

Janusz Wójcik

# Cłodzenie procesorów PC



Helion 

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz Wydawnictwo HELION dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz Wydawnictwo HELION nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Redaktor prowadzący: Barbara Lepionka  
Opiniodawca: prof. dr hab. inż. Andrzej Nowak, Politechnika Śląska

Projekt okładki: Studio Gravite / Olsztyn  
Obarek, Pokoński, Pazdrijowski, Zaprucki  
Grafika na okładce została wykorzystana za zgodą Shutterstock.com

Wydawnictwo HELION  
ul. Kościuszki 1c, 44-100 GLIWICE  
tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63  
e-mail: [helion@helion.pl](mailto:helion@helion.pl)  
WWW: <http://helion.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Drogi Czytelniku!  
Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres  
<http://helion.pl/user/opinie/chprpc>  
Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

ISBN: 978-83-283-5091-5

Copyright © Helion 2020

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

# Spis treści

|                                                                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Wstęp .....</b>                                                                                                                                       | <b>7</b>  |
| <b>Rozdział 1. Historia a współczesność .....</b>                                                                                                        | <b>9</b>  |
| <b>Rozdział 2. Podstawy teoretyczne .....</b>                                                                                                            | <b>19</b> |
| 2.1. Model oporu konwekcyjnego .....                                                                                                                     | 19        |
| 2.2. Model dwóch oporów: opór konwekcyjny i płynu .....                                                                                                  | 21        |
| 2.3. Metoda LMTD .....                                                                                                                                   | 23        |
| 2.4. Metoda efektywność-NTU .....                                                                                                                        | 24        |
| 2.5. Porównanie modeli efektywności wymiennika ciepła,<br>oporu konwekcyjnego, dwóch oporów (dla stałego strumienia ciepła)<br>i oporu całkowitego ..... | 26        |
| 2.6. Inne zalety stosowania metodologii wymienników ciepła .....                                                                                         | 28        |
| 2.6.1. Efekt wypychania .....                                                                                                                            | 28        |
| 2.6.2. Określenie wpływu omijania (bypass) .....                                                                                                         | 29        |
| 2.7. Spadek ciśnienia i wymiana ciepła w radiatorach o wlocie powietrza<br>prostopadłym od góry .....                                                    | 38        |
| <b>Rozdział 3. Badania odbioru ciepła wydzielanego przez procesor komputera PC<br/>za pomocą radiatora chłodzonego powietrzem .....</b>                  | <b>47</b> |
| 3.1. Opis instalacji i badania wstępne .....                                                                                                             | 47        |
| 3.2. Wpływ temperatury radiatora na pracę wentylatora .....                                                                                              | 51        |
| 3.3. Współczynnik wnikania ciepła .....                                                                                                                  | 51        |
| <b>Rozdział 4. Badania chłodzenia wodnego .....</b>                                                                                                      | <b>61</b> |
| 4.1. Budowa bloku wodnego Zalman ZM-WB3 Gold .....                                                                                                       | 61        |
| 4.2. Opis stanowiska laboratoryjnego .....                                                                                                               | 64        |
| 4.2.1. Obliczanie bloku chłodzącego .....                                                                                                                | 65        |

|        |                                               |    |
|--------|-----------------------------------------------|----|
| 4.3.   | Obliczenia dla danych eksperymentalnych ..... | 66 |
| 4.3.1. | Przykład obliczeniowy .....                   | 67 |
| 4.4.   | Wyniki obliczeń .....                         | 68 |
| 4.5.   | Podsumowanie .....                            | 75 |

## **Rozdział 5. Nanopłyyny ..... 77**

|        |                                                                                                              |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.   | Synteza nanopłyynów .....                                                                                    | 78 |
| 5.2.   | Gęstość nanopłyynów .....                                                                                    | 78 |
| 5.3.   | Dynamiczny współczynnik lepkości .....                                                                       | 80 |
| 5.4.   | Współczynnik przewodzenia ciepła .....                                                                       | 80 |
| 5.4.1. | Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła nanopłyynu<br>z zastosowaniem metody Transient Hot Wire (THW) ..... | 85 |
| 5.4.2. | Budowa i zasada działania urządzenia pomiarowego .....                                                       | 86 |
| 5.4.3. | Pomiar i opracowanie wyników .....                                                                           | 88 |

## **Rozdział 6. Chłodzenie nanocieczą procesora komputera osobistego ..... 95**

|        |                                                                         |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1.   | Pomiary .....                                                           | 95  |
| 6.2.   | Numeryczna mechanika płynów (CFD) .....                                 | 97  |
| 6.2.1. | Preprocesor .....                                                       | 99  |
| 6.2.2. | Solwer .....                                                            | 99  |
| 6.2.3. | Postprocesor.....                                                       | 100 |
| 6.3.   | Opis bloku chłodzącego i modelowania za pomocą preprocesora Gambit..... | 100 |
| 6.3.2. | Tworzenie siatki .....                                                  | 102 |
| 6.4.   | Modelowanie CFD we Fluencie .....                                       | 103 |
| 6.4.1. | Woda jako medium chłodzące .....                                        | 103 |
| 6.4.2. | Symulacje chłodzenia nanopłyynem woda – CuO .....                       | 108 |
| 6.4.3. | Podsumowanie .....                                                      | 112 |
| 6.5.   | Rozważania i obliczenia Korpysia .....                                  | 112 |
| 6.5.1. | Model CFD .....                                                         | 114 |
| 6.5.2. | Wyniki .....                                                            | 116 |
| 6.5.3. | Podsumowanie .....                                                      | 130 |

## **Rozdział 7. Postępy w chłodzeniu procesorów ..... 133**

|        |                                           |     |
|--------|-------------------------------------------|-----|
| 7.1.   | Przewodzenie .....                        | 133 |
| 7.2.   | Chłodzenie powietrzem .....               | 135 |
| 7.2.1. | Wentylatory .....                         | 138 |
| 7.2.2. | Osady na powierzchni wymiany ciepła ..... | 138 |

|         |                                                                                      |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2.3.  | Innowacje .....                                                                      | 140 |
| 7.2.4.  | Podsumowanie .....                                                                   | 151 |
| 7.3.    | Alternatywne metody chłodzenia procesorów PC .....                                   | 153 |
| 7.3.1.  | Piezowentylatory .....                                                               | 153 |
| 7.3.2.  | Syntetyczne strumienie chłodzące .....                                               | 153 |
| 7.3.3.  | Nanobłyskawice .....                                                                 | 154 |
| 7.3.4.  | Chłodzenie cieczą .....                                                              | 154 |
| 7.3.5.  | Ciepłowodory .....                                                                   | 156 |
| 7.3.6.  | Zimne płytki .....                                                                   | 157 |
| 7.3.7.  | Mikrokanały i minikanały .....                                                       | 157 |
| 7.3.8.  | Chłodzenie elektrohydrodynamiczne i elektrozwilżanie .....                           | 161 |
| 7.3.9.  | Chłodzenie ciekłym metalem .....                                                     | 162 |
| 7.3.10. | Chłodzenie przez zanurzenie .....                                                    | 164 |
| 7.3.11. | Uderzenie strumienia cieczy .....                                                    | 170 |
| 7.3.12. | Chłodzenie aerozolem .....                                                           | 171 |
| 7.3.13. | Chłodzenie w ciele stałym .....                                                      | 173 |
| 7.3.14. | Chłodzenie w supersieci i heterostrukturze .....                                     | 177 |
| 7.3.15. | Chłodzenie termojonowe i termotunelowe .....                                         | 178 |
| 7.3.16. | Materiały bazujące na przemianie fazowej i akumulatory ciepła ....                   | 179 |
| 7.4.    | Chłodzenie ekstremalne .....                                                         | 181 |
| 7.5.    | Wnioski dotyczące rozwoju chłodzenia procesorów .....                                | 186 |
| 7.5.1.  | Podejście fenomenologiczne .....                                                     | 186 |
| 7.5.2.  | Architektura systemu oparta na technikach zarządzania<br>ciepłem .....               | 186 |
| 7.5.3.  | Monitorowanie obciążenia cieplnego .....                                             | 187 |
| 7.5.4.  | Zrównoważony rozwój .....                                                            | 187 |
| 7.5.5.  | Potrzeba standaryzacji charakteryzacji opisu wydajności<br>cieplnej hardware'u ..... | 187 |
| 7.6.    | Podsumowanie .....                                                                   | 188 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>Spis oznaczeń .....</b> | <b>203</b> |
|----------------------------|------------|

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>Skorowidz .....</b> | <b>205</b> |
|------------------------|------------|



# Wstęp

Komputery osobiste, serwery lub stacje robocze zużywają do pracy znaczną ilość energii elektrycznej. Aktualnie standardem są zasilacze 500 W przeznaczone dla zestawów klasy PC (dla graczy nawet 850 W). Energia ta jest w dużej mierze rozpraszana pod postacią ciepła z takich elementów jak procesory (CPU) i karty graficzne, których jednostki obliczeniowe (GPU) coraz częściej zbliżają się parametrami pracy do procesorów komputerów sprzed paru lat. Powoduje to wzrost temperatury tych elementów. Niestety, wysoka temperatura ma niekorzystny wpływ na sprzęt elektroniczny, gdyż powoduje niestabilną pracę, skraca żywotność na skutek usterek mechanicznych, elektronicznych i korozji oraz spowalnia szybkość obliczeń [1]. Może nawet w niekorzystnym przypadku doprowadzić do spalenia procesora. Dlatego też wraz z nowymi technologiami elektroniki użytkowej intensywnie rozwija się gałąź przemysłu zajmująca się jej chłodzeniem. Oferowane są różne metody odbioru ciepła, rozpoczynając od klasycznych rozwiązań opierających się wyłącznie na powietrzu, poprzez chłodzenie obiegami cieczy, a kończąc na rozwiązaniach niestandardowych, takich jak chłodzenie za pomocą skroplonych gazów. Duży nacisk kładzie się na komfort użytkowania sprzętu. Komputery muszą działać cicho, jeżeli użytkownicy mają przy nich spędzić dużo czasu. W celu wyeliminowania hałasu stosuje się wolnoobrotowe wentylatory i rury cieplne (ciepłowody) bądź też likwiduje się źródło hałasu poprzez zastosowanie chłodzenia pasywnego czy obiegów cieczy.

Obecnie używane procesory zużywają nawet do 290 W, a niektóre przewidywania sięgają aż 400 W w 2020 r.

Przydatnym narzędziem do analizy odbioru ciepła w mini- czy mikrokanałach jest numeryczna mechanika płynów (CFD), która po walidacji doświadczalnej modeli pozwala na analizę wpływu różnych zmiennych na temperaturę procesora.

Po wpisaniu do wyszukiwarki Google hasła „chłodzenie procesora” otrzymano około 368 000 wyników. Taki rezultat świadczy o ogromnym rynku różnego rodzaju przyrządów, artykułów i materiałów związanych z szeroko pojętym odbiorem ciepła z procesorów PC.

Autor zajmuje się tym problemem od 2004 r., prowadząc prace dyplomowe magisterskie [2 – 8], uczestnicząc w badaniach własnych i statutowych oraz pisząc [9 – 14] i recenzując artykuły naukowe. Ciekawym doświadczeniem było promotorstwo pracy doktorskiej [15].

Wspomniane badania dotyczą zarówno chłodzenia powietrznego procesorów PC [2], jak i chłodzenia cieczą, w tym nanocieczą [3 – 8]. Niniejsza monografia jest podsumowaniem tych badań.

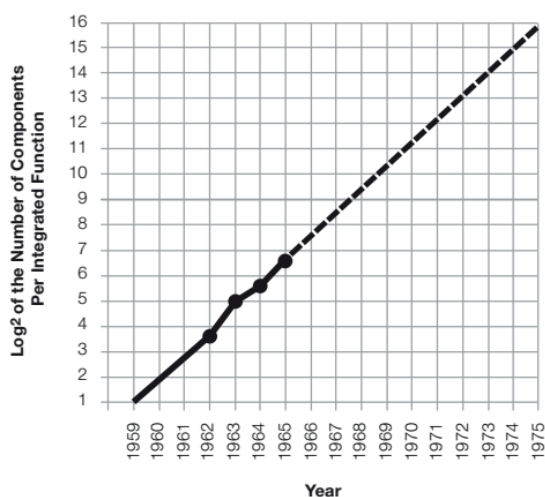
## Literatura

- [1] Shabany Y., *Heat transfer. Thermal management of electronics*, CRC Press, Boca Raton 2010.
- [2] Lemanowicz M., *Analiza ciepła wydzielanego z procesora komputera klasy PC oraz jego odbioru za pomocą radiatora z wentylatorem*, praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2006.
- [3] Kowalik M., *Analiza odbioru ciepła z procesora komputera klasy PC za pomocą bloku chłodzonego cieczą*, praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2007.
- [4] Janusz M., *Analiza odbioru ciepła z procesora komputerowego za pomocą bloków chłodzonych wodą*, praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2008.
- [5] Gorczyca P., *Badania chłodzenia procesorów PC przy pomocy nanocieczy*, praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2009.
- [6] Sieradzki P., *Investigation of CPU nanoliquid cooling by the CFD method*, praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2009.
- [7] da Silva T.P., *Nanoliquids use to PC/CPU cooling*, praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2010.
- [8] Sikora-Jasińska M., *Chłodzenie procesorów PC za pomocą płynów*, praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2011.
- [9] Lemanowicz M., Wójcik J., *Przegląd metod chłodzenia procesorów komputerowych*, „Inż. Ap. Chem” 2006, nr 6, s. 10 – 15.
- [10] Tychże, *Studies of Heat Transfer From PC Processor to the Air Cooled Heat Sink*, „Chemical & Process Engineering” 2007, No. 28, pp. 57 – 66.
- [11] Korpyś M., Al-Rashed M., Dzido G., Wójcik J., *CPU Heat Sink Cooled by Nanofluids and Water: Experimental and Numerical Study*, „Escape” 2013, No. 23, pp. 409 – 414, doi: 10.1016/B978-0-444-63234-0.50069-5.
- [12] Al-Rashed M., Dzido G., Korpyś M., Smółka J., Wójcik J., *Investigation on the CPU Nanofluid Cooling*, „Microelectronics Reliability” 2016, No. 63, pp. 159 – 165, doi: 10.1016/j.microrel.2016.06.016.
- [13] Korpyś M., Dzido G., Wójcik J., *Experimental and CFD investigation of commercial PC heat sink performance using water and nanofluids*, 14th Eu. Conf. of Mixing, Warszawa 2012, s. 229 – 234.
- [14] Tychże, *CPU cooling using water and nanofluids, experimental and CFD investigation*, NHT2012 Int. Conference, Wrocław 2012.
- [15] Korpyś M., *Analiza wnikania ciepła w wybranych układach przy przepływie nanopłynu CuO — woda*, praca doktorska, Gliwice 2016.

## Rozdział 1.

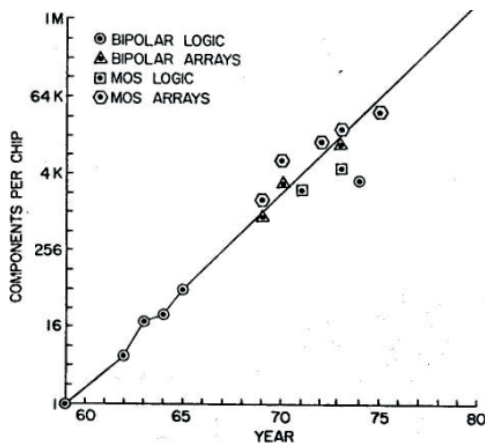
# Historia a współczesność

Gordon E. Moore, współzałożyciel Intela, w 1965 r. przewidział, że ekonomicznie optymalna liczba tranzystorów w układzie scalonym dostępnym w handlu co roku będzie się podwajać. Dokonał tego na podstawie obserwacji z lat 1962 – 1965, kiedy tendencja ta w przybliżeniu się utrzymywała. Miało to zaowocować liczbą tranzystorów równą 65 000 na czipie w 1975 r. Było to przewidywanie zgrubne [1], które zostało okrzyknięte prawem Moore’a (rysunek 1.1). Już wtedy Moore zauważył problem rozpraszania i odbioru ciepła z układu scalonego. Wydawało mu się, że z uwagi na dwuwymiarowość i powierzchnię czipu oraz jego mniejsze rozmiary będzie możliwa szybsza praca dla tej samej gęstości mocy rozproszonej.

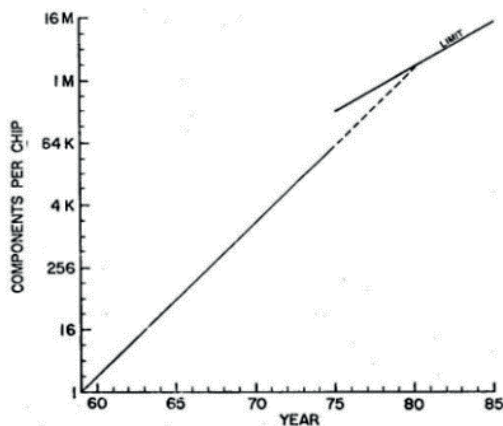


**RYСУNEK 1.1.** Przybliżona liczba tranzystorów dla złożonych układów scalonych w zależności od roku wprowadzenia na rynek [1]

Po dziesięciu latach i dokonaniu inspekcji dostępnych układów scalonych Moore doszedł do wniosku, że trend ten powinien się utrzymywać dalej [2] (rysunek 1.2), choć z uwagi na zmniejszającą się szybkość wynalazków odnoszących się do zwiększenia gęstości upakowania elementów podwojenie elementów na czipie może być ograniczone do dwóch lat (rysunek 1.3).



**RYSUNEK 1.2.** Inspekcja prawa Moore'a w 1975 r. [2]

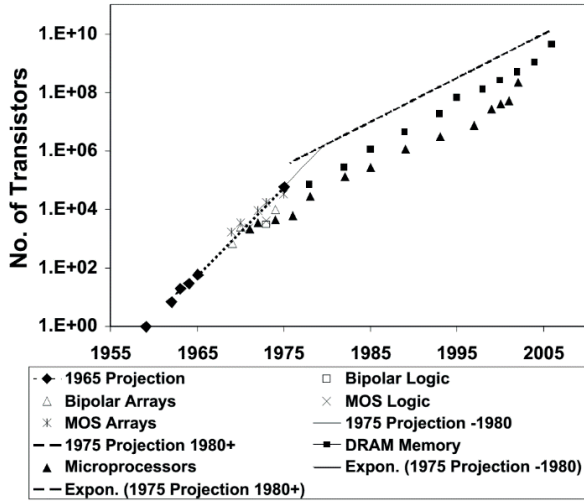


**RYSUNEK 1.3.** Przewidywanie krzywej złożoności z granicą zwiększania gęstości upakowania elementów, wynikającą z barier technologicznych [2]

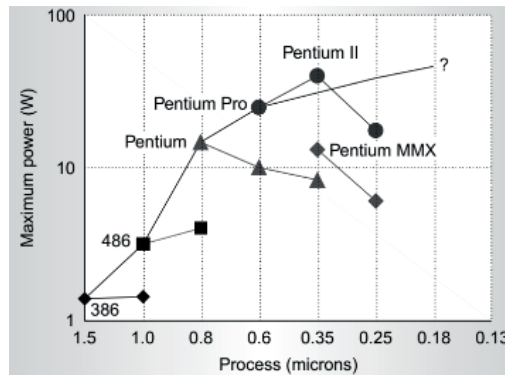
Na sympozjum w 2003 r. [3] Moore przedstawił m.in. porównanie przewidywania z 1975 r. [2] z historycznymi danymi z rynku (rysunek 1.4).

Do pewnego stopnia przybliżone dwuletnie podwojenie liczby tranzystorów przewidziane w 1975 r. [2] jest wynikiem kurczenia się rozmiarów obwodów drukowanych i układów scalonych oraz wzrostu rozmiaru kości. Szybsza prędkość wzrostu złożoności w porównaniu do danych 1975 r. została uzyskana dzięki wpływowi dodatkowego czynnika — nowych struktur układów ścieśniających obszary marnowane do tej pory na krzemie. Ponieważ do 1975 r. było mało do ścieśnienia, prędkość postępu zmalała [3].

Rysunek 1.5 przedstawia maksymalne rozproszenie ciepła z procesorów [4] znanych do 1999 r. Z perspektywy czasu może on wywołać uzasadniony uśmiech na twarzy czytają-



**RYSUNEK 1.4.** Porównanie przewidywań z 1975 r. z danymi historycznymi [3]



**RYSUNEK 1.5.** Maksymalna dyssypacja ciepła z procesorów [4] w zależności od technologii wykonania

cego. Technologie do 0,8  $\mu\text{m}$  stosowały skalowanie przy stałej różnicy potencjałów, dlatego moc rozpraszana dramatycznie rosła na skutek wzrostu liczby tranzystorów, choć moc zużywana przez jeden tranzystor była stała. Moc prądów zerowych (moc statyczna) dla technologii przed 0,18  $\mu\text{m}$  wynosiła poniżej 5% mocy całkowitej. Należy podkreślić, że rozproszenie ciepła zależy nie tylko od skali technologii, ale również od zastosowanej architektury i projektu obwodu.

Artykuł [5] jest poświęcony rozważaniom na temat pojedynczego mikroprocesora wobec trendów w gęstości mocy oraz Thermal Design Power (TDP), czyli maksymalnej ilości wydzielanej mocy cieplnej, którą trzeba odebrać z procesora. W rozumieniu firmy Intel TDP to moc, którą procesor pobiera (i oddaje w postaci ciepła) przy obciążeniu realnymi aplikacjami. AMD zaczął podawać moc procesora uzyskiwaną w realnych warunkach, nazywając ją ACP (ang. Average CPU Power — średnia moc procesora) [6].

Rozważania te oparto na tendencjach wynikających z prawa Moore’a i teorii skalowania [5]. Omówiono moc aktywną. Równie istotna jest moc bierna, którą urządzenie zużywa w stanie gotowości do pracy.

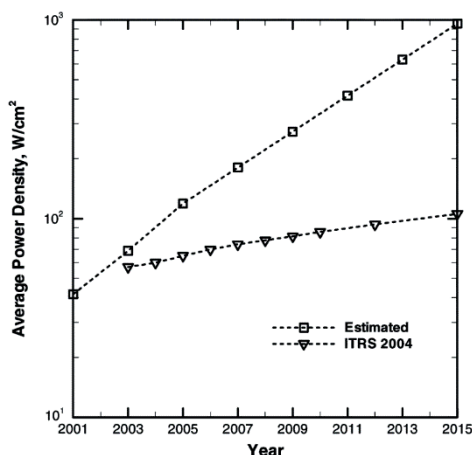
Całkowita moc rozpraszana podczas pracy (w stanie aktywnym) jest sumą składników dynamicznych i statycznych. Moc przełączeń, czyli moc rozpraszana dynamicznie, pochodzi z ładowania i rozładowywania pojemności ( $\beta CU^2f$ ). Występuje ona, gdy w urządzeniu zachodzi przejście napięciowe zużywające moc. Współczynnik aktywności przełączeń ( $\beta$ ) zdefiniowano jako efektywną liczbę takich przejść. Zależy on od topologii obwodu, stylu logiki oraz statystyki sygnałów wejściowych. Dlatego można uważać, że jest on miarą średniego prawdopodobieństwa możliwych wyjść. Oszacowanie takich współczynników dla dużych obwodów jest skomplikowane, bo sygnały wejściowe nie są stałe. Aktywność przełączeń jest jedną z głównych przyczyn większego zużycia mocy przez tranzystory logiczne, dla których współczynniki aktywności są bardzo duże w porównaniu do ich wartości dla tranzystorów pamięci. Mniejszy udział w dynamicznym rozpraszaniu mocy ma prąd zwarcia ( $I_z$ ), który przepływa chwilowo, gdy PMOS i NMOS w inwerterze przewodzą równocześnie podczas zmiany stanu.

Rozpraszanie statyczne mocy następuje na skutek różnych prądów zerowych ( $I_0$ ) (prądów upływowych) pochodzących z ograniczeń technologicznych w tranzystorze.

Całkowite rozproszenie mocy podczas stanu aktywnego pracy tranzystora może być wyrażone następującym wzorem:

$$P = \beta CU^2f + I_zU + I_0U \quad (1.1)$$

Pierwsze dwa składniki po prawej stronie równania (1.1) to część dynamiczna, a ostatni to składnik statyczny. Moc przełączeń jest dominującą częścią rozproszenia energii w obwodach. Dla układu scalonego wartość uzyskaną ze wzoru (1.1) należy pomnożyć przez liczbę tranzystorów. Z uwagi na to, że rozmiary tranzystorów w czipie są różne, wzór ten daje tylko rząd wielkości. Zwykle rozmiary tranzystorów pamięci są znacznie mniejsze od tranzystorów logicznych, stąd też gęstość ich upakowania może być większa. Do lat osiemdziesiątych liczba tranzystorów w czipie podwajała się co roku, a później co 18 – 24 miesiące. Okres ten jest często nazywany pokoleniem technologicznym lub generacją. Charakteryzuje go rozmiar minimalny (długość bramki), określany jako węzeł technologiczny. Zależy on od użytej litografii — w czasie pisania tej książki litografia 10 nm sprawiała Intelowi dużo problemów, opanowana była jednak technologia 14 nm, np. Core i9-9900K. Na rysunku 1.6 przedstawiono przewidywanie gęstości mocy przy następujących założeniach: moc prądów zerowych wynosiła 30% mocy całkowitej, a moc prądów zwarcia 5% mocy przełączeń. Porównano tę prognozę z danymi ITRS 2004 (ang. *International Technology Roadmap for Semiconductors*). Na podstawie dzisiejszych danych widać, że prognoza ITRS była bliższa prawdy.



**RYSUNEK 1.6.** Porównanie średniej gęstości mocy otrzymanej na podstawie [1] oraz ITRS 2004 [5]

Praca wielowątkowa procesorów [7] pozwala zwiększyć ich wydajność przy mniejszym napięciu i częstotliwości, co powoduje zmniejszenie wydzielanego ciepła i jego mniejszą gęstość.

Na rysunku 1.7 przedstawiono aktualizację prawa Moore’a dokonaną w 2011 r. [8]. Dane do 2017 r. można znaleźć np. w [9].

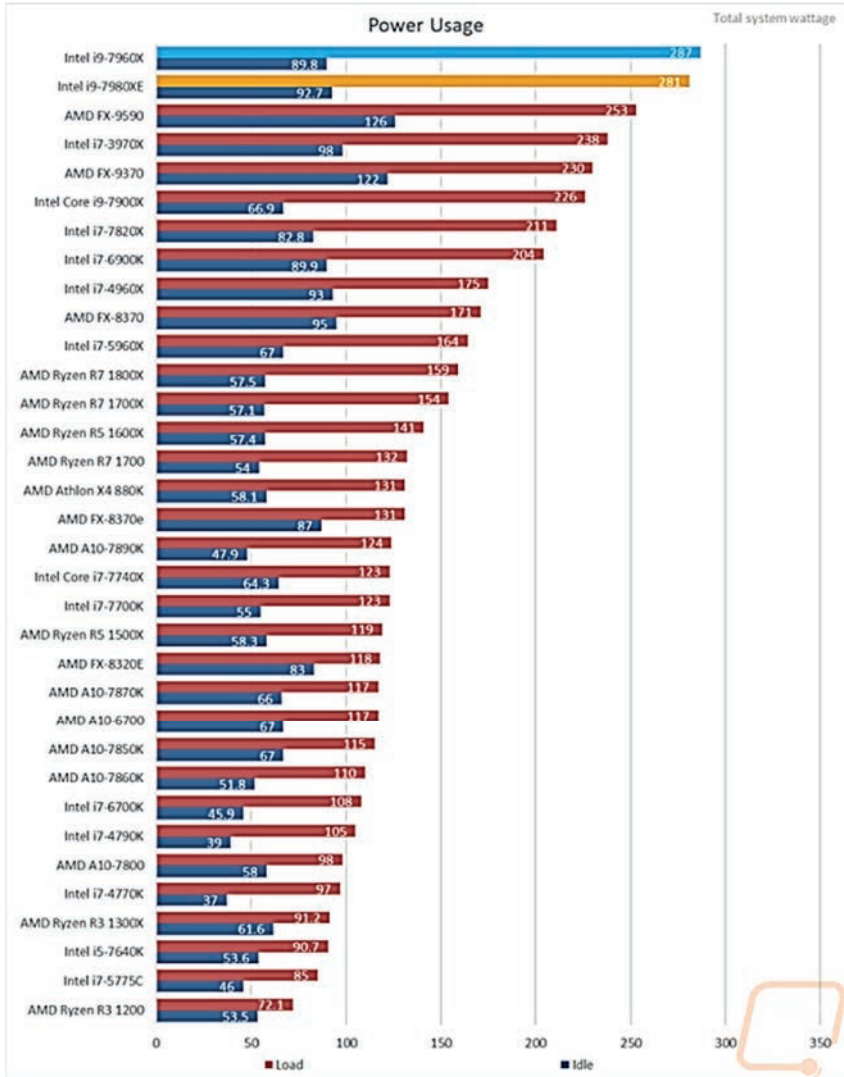
Wielokrotnie ogłaszano, że prawo Moore’a przestaje obowiązywać, ale było to chyba przedwczesne [10, 11]. W raporcie ITRS2.0 [12] przedstawiono hasło: „Moore’s Law is dead, long live Moore’s Law!” (co nawiązuje do powiedzenia „Umarł król, niech żyje król!”) i wyjaśniono, że każdorazowe ograniczenie postępu w jednej dziedzinie powodowało postęp w innej, dlatego też trend pozostaje aktualny. Jeśli chodzi o zużycie mocy, to [12] przewiduje ograniczenie  $<10 \text{ W/cm}^2$  np. dla ALU 32 bit (ang. *Arithmetic Logic Unit*).

Poniżej (rysunek 1.8) zamieszczono przewidywania mocy rozpraszanej z procesora wysokiej wydajności [13].

Aktualnie sprzedawany [14] przez Intel’a procesor i9-7980XE posiada następujące parametry: 22 MB pamięci podręcznej, 16 rdzeni, 32 wątki, 165,0 W Max TDP, zegar 2,80 GHz, 4,20 GHz maksymalnej częstotliwości podkręcania dozwolonej przez producenta dla zwykłych użytkowników.

W celu porównania rzeczywistych wartości wydajności oraz TDP i temperatur procesorów przeprowadzono badania porównawcze [15]. Do testów użyto monitora Kill-A-Watt, programów wPrime (programu do obliczeń wielowątkowych pierwiastków kwadratowych metodą Newtona) oraz Aida64 (programu diagnostycznego i rejestrującego temperatury procesora). Wymiennik ciepła Noctua NH-U12S był zamontowany na procesorach, użyto również pasty Noctua NT-H1. Jak widać, całkowita moc obciążonego w powyższy sposób procesora i9-7980XE sięga 281 W, a gotowego do pracy 92,7 W (ok. 33%) (rysunek 1.9).

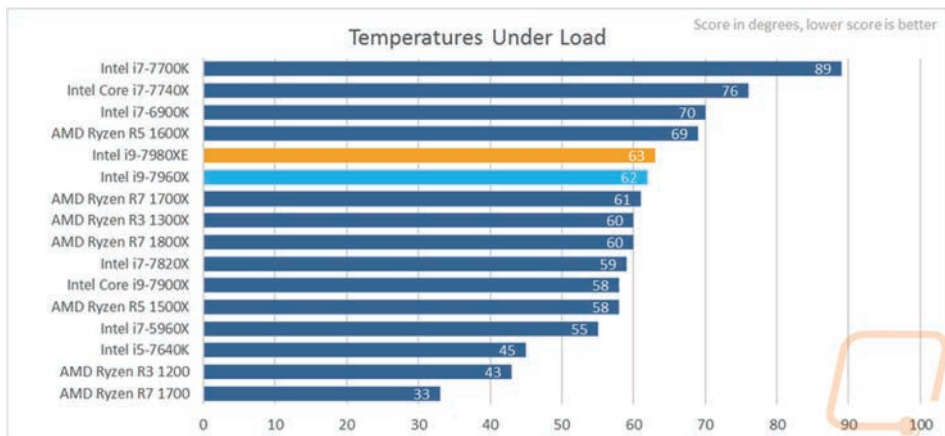




**RYSunek 1.9.** Porównanie mocy zużywanej przez procesory gotowe do pracy oraz w pełni obciążone [15]

W celu porównania danych testowych z teoretycznym wzorem (1.1) wykonano obliczenia pomijając dwa ostatnie składniki. Wiedząc, że przy taktowaniu 2,8 GHz TDP wynosi 165W, to dla 4,2 GHz otrzymuje się  $TPD = 247,5$  W, widać tu niedoszacowanie wynoszące ok. 13,5 %.

Natomiast temperatura pracy jest rzędu (rysunek 1.10) 63°C. Interesujące jest porównanie zużywanych mocy przez różne procesory i ich temperatury pracy — oczywiście ich wydajności są w pewnym stopniu zależne od tych parametrów, ale również od architektury cipów.



**RYSUNEK 1.10.** Temperatury pracy procesorów dostępnych na rynku [15]

Analizując powyższe dane (rysunek 1.9), widać, że TDP utrzymuje się na poziomie przewidzianym przez ITRS [12, 13], a procesory wielordzeniowe i pracujące wielowątkowo na razie nie mają alternatywy. Natomiast radiatory (np. wspomniany wyżej Noctua NH-U12S) są chętnie stosowane do chłodzenia procesorów nawet przez wymagających użytkowników (graczy).

## Literatura

- [1] Moore G.E., *Cramming more components onto integrated circuits*, „Electronics” 1965, April 19, Vol. 38, No 8, pp. 114 – 117.
- [2] Tegoż, *Progress In Digital Integrated Electronics*, Technical Digest, International Electron Devices Meeting, IEEE, 1975, pp. 11 – 13.
- [3] Tegoż, *No Exponential is Forever: But “Forever” Can Be Delayed!*, ISSCC 2003, 2003 IEEE International Solid-State Circuits Conference, Session 1, Plenary 1.1.
- [4] Borkar S., *Design challenges of technology scaling*, „IEEE Micro” 1999, No 4, Vol. 19, pp. 23 – 29.
- [5] Krishnan S., Garimella S.V., Chrysler G.M., Mahajan R.V., *Towards a Thermal Moore’s Law*, „IEEE Trans. on Adv. Packaging” 2007, No. 3, Vol. 30, pp. 462 – 474.
- [6] *Thermal Design Power*, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_Design\\_Power](https://pl.wikipedia.org/wiki/Thermal_Design_Power) [dostęp: 11 lipca 2018].
- [7] Parkhurst J., Darringer J., Grundmann B., *From Single Core to Multi-Core: Preparing for a new exponential*, 2006 IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design, pp. 67 – 72.
- [8] Wgsimon (praca własna), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15193542> [dostęp: 28 czerwca 2018].

- 
- [9] *Transistor count*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count) [dostęp: 24 lipca 2018].
- [10] *Prawo Moore’a*, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo\\_Moore%E2%80%99a](https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Moore%E2%80%99a) [dostęp: 28 czerwca 2018].
- [11] Bójko M., *Prawo Moore’a. Jak wygląda postęp?*, <http://wyborcza.pl/1,145452,20082383,prawo-moore-a-jak-wyglada-postep.html?disableRedirects=true> [dostęp: 28 czerwca 2018].
- [12] International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0, 2015 Edition, [https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/0\\_2015-ITRS-2.0-Executive-Report-1.pdf](https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/0_2015-ITRS-2.0-Executive-Report-1.pdf) [dostęp: 28 czerwca 2018].
- [13] Shabany Y., *Heat transfer. Thermal management of electronics*, CRC Press, Boca Raton 2010.
- [14] Intel Core i9-7960X Processor, <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/processors/core/x-series/i9-7960x.html> [dostęp: 6 lipca 2018].
- [15] Intel 8th Gen Core CPUs, <https://lanoc.org/review/cpus/7656-intel-8th-gen-core-cpus-coffee-lake?showall=&start=4> [dostęp: 7 lipca 2018].



# Skorowidz

## A

ACP, Average CPU Power, 11  
aerozol, 171  
akumulatory ciepła, 179  
algorytm obliczeń ciśnienia, 114  
ALU, Arithmetic Logic Unit, 13  
architektura systemu, 186

## B

badania  
    chłodzenie  
        powietrzem, 47  
        wodne, 61  
    opracowanie wyników, 88  
    pomiar, 88, 95  
blok  
    chłodzący  
        symulacja pracy, 100  
    wodny, 61  
błędy pomiarów, 113  
bypass, 29

## C

całkowite rozproszenie mocy, 12  
CFD, Computational Fluids Dynamics, 97,  
    114, 130  
CHA, chemical heat accumulator, 179  
chemiczne akumulatory ciepła, CHA, 179  
chłodzenie  
    aerozolem, 171, 172  
    cieczą, 154  
    ciepłym metalem, 162, 164

ekstremalne, 181  
elektrohydrodynamiczne, 161  
mikrokanałowe, 160  
nanocieczą, 95  
nanopłynem, 108  
powietrzem, 47, 135  
procesorów, 133  
procesorów PC, 153  
przez wrzenie pęcherzykowe, 165  
termojonowe, 178  
termotunelowe, 178  
w ciele stałym, 173  
w heterostrukturze, 177  
w supersieci, 177  
wodne, 61  
zanurzeniowego serwera, 167

ciekły  
    azot, 185  
    metal, 162  
ciepłowody, 156  
COP, coefficient-of-performance, 176

## E

efekt wypychania, 28  
efektywna różnica temperatur, 143  
efektywność, 26  
    zebra, 34  
elektrozwilżanie, 161

## G

generator wirów wzdłużnych, 152  
gęstość nanopłynów, 78  
glikol etylenowy, 73

**K**

konfiguracja radiatora, 33  
konwekcja  
    naturalna, 134  
    wymuszona, 134  
kryterium jakości ZT, 174  
krzywe spadku ciśnienia, 37  
kurz, 140

**L**

liczba  
    Nusselta, 127, 128  
    Reynoldsa, Re, 32, 35  
     tranzystorów, 14  
    żeber, 35, 36  
LMpTD, Logarithmic Mean Temperature  
    Difference, 19, 23

**M**

materiały bazujące na przemianie fazowej, 179  
medium chłodzące, 103  
metoda  
    CFD, 19  
    efektywność-NTU, 24  
    LMTD, 23  
    Transient Hot Wire, 85  
Micro ATX, 182  
mikrokanały, 157  
Mini ITX, 183  
minikanały, 157  
moce chłodzące, 178  
model  
    CFD, 114, 130  
    dwuskładnikowy, 21  
    oporu konwekcyjnego, 19  
modele efektywności wymiennika ciepła, 27  
moduł Peltiera, 175  
monitorowanie obciążenia cieplnego, 187  
Moore Gordon E., 9  
mostek Wheatstone'a, 87

**N**

nanobłyskawice, 154  
nanocząstki CuO, 77  
nanopłyn woda — CuO, 108, 118  
nanopłyn, 77  
    gęstość, 78  
    synteza, 78  
    współczynnik przewodzenia  
        ciepła, 85  
NTU, number of transfer units, 19, 25  
numeryczna mechanika płynów, CFD, 97

**O**

objętość radiatorów, 137  
obliczanie bloku chłodzącego, 65  
obliczenia Korpysia, 112  
obraz TEM, 77  
omijanie radiatora, 29  
    geometria, 30  
opór  
    ciepły  
        całkowity, 22, 26, 27  
        podstawy, 123  
        radiatora, 19, 35  
        radiatora z bypassem, 37  
        żeber, 123  
    konwekcyjny, 19, 21, 27  
    pływu, 21  
osad, 138

**P**

PCM, phase change materials, 179  
pętla chłodząca, 163  
pianki  
    metalowe, 151  
    węglowe, 152  
piezowentylatory, 153  
podkręcanie procesorów, 185  
pomiar temperatury, 48

poprawa wymiany ciepła, 147  
 mniejsze zużyciu materiału, 147  
 przecięcia poprzeczne radiatora, 149  
 spadek ciśnienia, 149  
 postprocesor, 100  
 powierzchnia wymiany, 151  
 prawo Moore'a, 9  
 preprocesor, 99  
   Gambit, 100  
 prędkość przepływu powietrza, 52, 56, 59  
 procesory  
   chłodzenie, 133  
   moc  
     rozpraszana, 14  
     zużywana, 15  
   temperatury pracy, 16  
 profil  
   prędkości, 118, 119, 120  
   temperatury, 22, 105, 111, 117  
 przemiana fazowa, 179  
 przepływ  
   laminarny, 32  
   wody chłodzącej, 104

## R

radiator, 28  
   chłodzony powietrzem, 47  
   efekt wypychania, 28  
   firmy Intel, 48  
   konfiguracja, 33  
   liczba żeber, 34–36  
   o żebrach porowatych, 141  
   objętość, 137  
   opór cieplny, 35, 37  
   prostopadły wlot powietrza, 39  
   spadek ciśnienia, 33, 38, 40, 42  
   temperatura, 51  
   wymiana ciepła, 38  
   z bypassem, 29, 37  
   z okresowym sprężaniem, 152  
   z wentylatorem, 38  
 rozkład temperatur, 121  
   wymennika ciepła, 129  
 rozpraszacz ciepła ACT, 159

## S

schemat  
   bloku wodnego, 63  
   ideowy mostka Wheatstone'a, 87  
   siatki numerycznej, 115  
   wymennika ciepła, 114  
 siatka, 102  
 SIMPLE, 114  
 solwer, 99  
 spadek ciśnienia, 38  
   AP, 31  
   na radiatorze, 40, 42  
 sprawność żebra, 36  
 standaryzacja, 187  
 symulacja  
   CFD, 127, 128  
   chłodzenia, 108  
   dla nanopłynu, 110  
 syntetyczne strumienie chłodzące, 153  
 synteza nanopłynów, 78

## Ś

średnia  
   gęstość mocy, 13  
   logarytmiczna różnica temperatur,  
     LMTD, 23  
   moc procesora, ACP, 11

## T

taktowanie procesora, 53, 55  
 technologia termoelektryczna, 174  
 temperatura  
   procesora, 16, 117,  
     121–125  
   radiatora, 51  
 tworzenie siatki, 102

## U

uderzenie strumienia cieczy, 170  
 urządzenia pomiarowe, 86

**W**

wentylator, 51, 52, 138  
  a temperatura  
    radiatora, 51  
  pierwszy zakres pracy, 55  
  prędkość przepływu powietrza, 52  
  zmiana wydajności, 139  
wlot powietrza, 39  
woda, 103  
  destylowana, 72  
współczynnik  
  dynamiczny lepkości, 32, 80  
  pozorny oporu przepływu, 32  
  przewodzenia ciepła, 80, 85, 90  
  wnikania ciepła, 36, 51, 134  
  wydajności  
    chłodzenia, 178  
    COP, 176

wymiennik ciepła, 19, 23, 38  
  całkowity opór cieplny, 124  
  efekt wypychania, 28  
  modele efektywności, 26, 27  
  osady, 138  
  rozkład temperatur, 121, 129  
  Zalman, 112, 114  
  zwiększanie powierzchni, 140

**Z**

zarządzanie ciepłem, 186  
zimne płytki, 157  
zmiany wydajności wentylatora, 139

**Ż**

żebra, 143  
  gęste, 152  
  przepływ ciepła, 66

# PROGRAM PARTNERSKI

— GRUPY HELION —



1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW w działający bankomat!

**Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!**

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA  
**Helion**

# Chłodzenie procesorów PC bez tajemnic

**Komputery osobiste, stacje robocze i serwery** zużywają w czasie pracy dużo energii elektrycznej, emitując przy tym sporo ciepła. Znaczna jego część jest wydzielana przez procesory, które są coraz szybciej taktowane i wyposażane w coraz większą liczbę rdzeni. Zbyt wysoka temperatura wewnątrz jednostek centralnych powoduje zmniejszenie stabilności pracy i szybsze zużycie podzespołów, a w konsekwencji pogorszenie wydajności i zwiększenie awaryjności. Dlatego tak istotne jest wprowadzanie technik efektywnego chłodzenia elementów elektronicznych i ciągle poszukiwanie nowych rozwiązań w ramach badań w tym zakresie.

**Książka jest przeznaczona** dla osób zainteresowanych zgłębieniem aktualnej wiedzy na temat dostępnych technik chłodzenia procesorów komputerowych. Autor przedstawia teoretyczne podstawy zjawisk związanych z wymianą ciepła w elementach elektronicznych — prezentuje stosowane w tym zakresie modele i metody, szczegółowo opisuje badania nad chłodzeniem wykorzystującym powietrze, wodę i nanopłynny, a także omawia możliwości zwiększenia wydajności wymiany ciepła przy użyciu innych technik. To obowiązkowa pozycja dla każdego, kto zawodowo zajmuje się tą tematyką.

- Modele i metody używane w badaniach nad chłodzeniem procesorów
- Badania nad chłodzeniem procesorów przy użyciu powietrza
- Badania nad chłodzeniem z wykorzystaniem cieczy, w tym nanopłynów
- Historia i nowe techniki chłodzenia procesorów komputerowych

**Helion** 



helion.pl



HELION SA  
ul. Kościuszki 1c  
44-100 Gliwice  
tel.: 32 230 98 63  
helion@helion.pl

*Sprawdź nasze szkolenia!*



AKADEMIA IT & BUSINESS

WWW.SZKOLENIA.HELION.PL

**KOD KORZYŚCI**  
*Sięgnij po więcej!* ▶



ISBN 978-83-283-5091-5



9 788328 350915

**INFORMATYKA W NAJLEPSZYM WYDANIU**

Cena: 59,00 zł