

Janusz Wójcik

Chłodzenie 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
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

Wstęp	7
Rozdział 1. Historia a współczesność	9
Rozdział 2. Podstawy teoretyczne	19
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, oporu konwekcyjnego, dwóch oporów (dla stałego strumienia ciepła) 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 prostopadłym od góry	38
Rozdział 3. Badania odbioru ciepła wydzielanego przez procesor komputera PC za pomocą radiatora chłodzonego powietrzem	47
3.1. Opis instalacji i badania wstępne	47
3.2. Wpływ temperatury radiatora na pracę wentylatora	51
3.3. Współczynnik wnikania ciepła	51
Rozdział 4. Badania chłodzenia wodnego	61
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 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.	Ciepłowody	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 ciepłem	186
7.5.3.	Monitorowanie obciążenia cieplnego	187
7.5.4.	Zrównoważony rozwój	187
7.5.5.	Potrzeba standaryzacji charakteryzacji opisu wydajności cieplnej hardware'u	187
7.6.	Podsumowanie	188

Spis oznaczeń 203

Skorowidz 205

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.

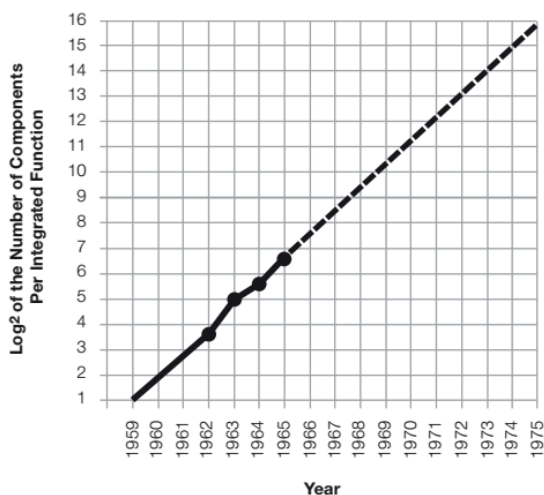
Literatura

- [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., Smolka 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.

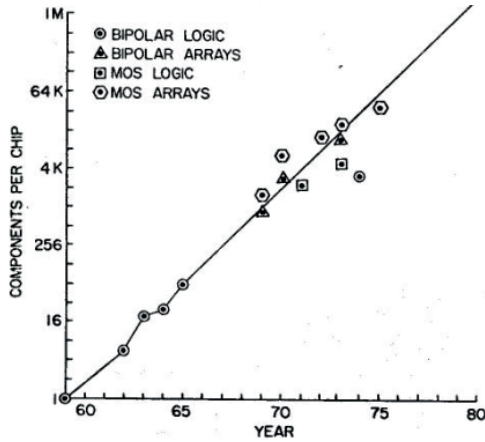
Historia a współczesność

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 powierzchniość czipu oraz jego mniejsze rozmiary będzie możliwa szybsza praca dla tej samej gęstości mocy rozproszonej.

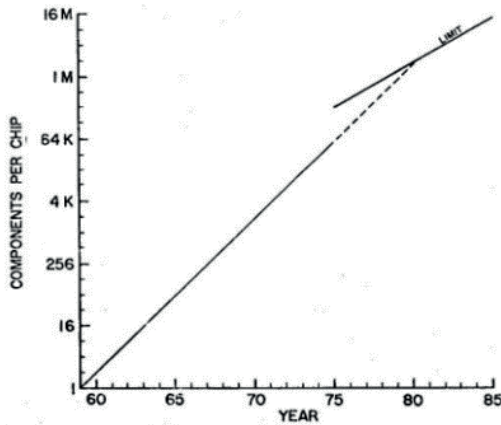


RYSUNEK 1.1. Przybliżona liczba tranzystorów dla złożonych układów scalonych w zależności od roku wprowadzenia na rynek [1]

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]

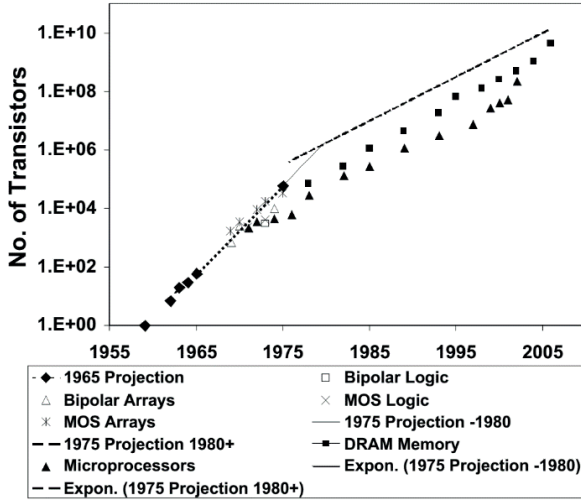


RYSUNEK 1.3. Przewidywanie krzywej złożoności z granicą zwiększania gęstości upakowania elementów, wynikającą z barier technologicznych [2]

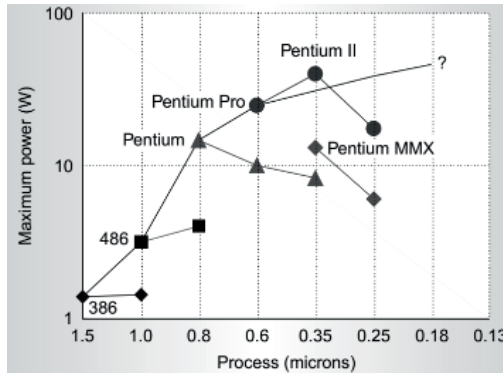
Na sympozjum w 2003 r. [3] Moore przedstawił m.in. porównanie przewidywania z 1975 r. [2] z historycznymi danymi z rynku (rysunek 1.4).

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 μm 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 μm 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.

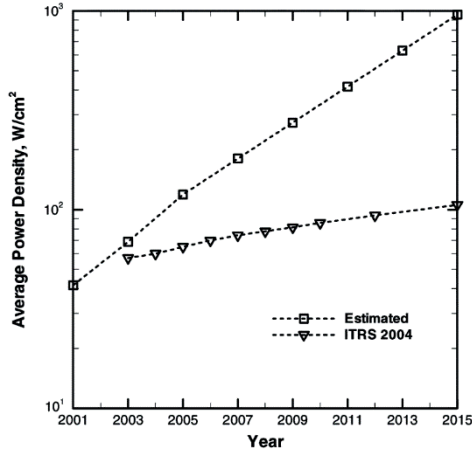
Całkowita moc rozpraszana podczas pracy (w stanie aktywnym) jest sumą składników dynamicznych i statycznych. Moc przełączeń, czyli moc rozpraszana dynamicznie, pochodzi z ładowania i rozładowywania pojemności (βCU^2f). Występuje ona, gdy w urządzeniu zachodzi przejście napięciowe zużywające moc. Współczynnik aktywności przełączeń (β) 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), określane 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].

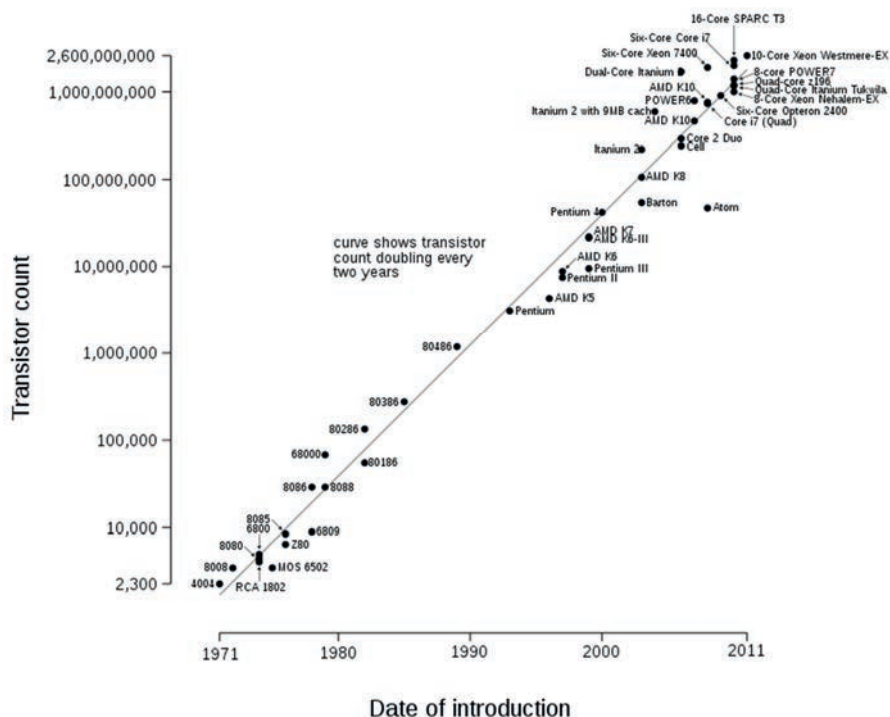
Wielokrotnie ogłaszano, że prawo Moore’a przestaje obowiązywać, ale było to chyba przedwczesne [10, 11]. W raporcie ITRS2.0 [12] przedstawiono hasło: „Moore’s Law is dead, long live Moore’s Law!” (co nawiązuje do powiedzenia „Umarł król, niech żyje król!”) i wyjaśniono, że każdorazowe ograniczenie postępu 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].

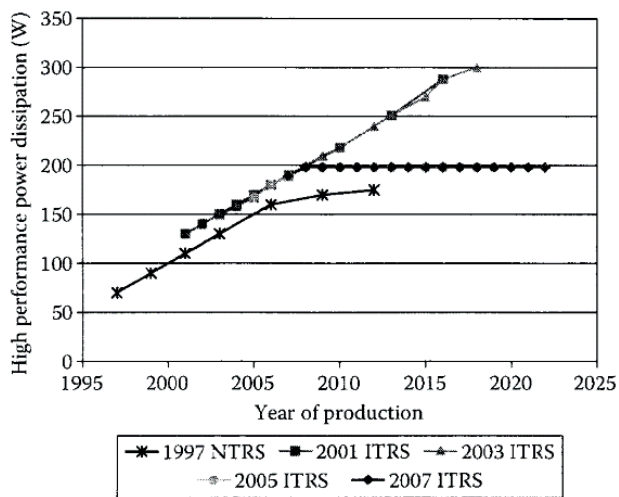
Aktualnie sprzedawany [14] przez Intela procesor i9-7980XE posiada następujące parametry: 22 MB pamięci podręcznej, 16 rdzeni, 32 wątki, 165,0 W Max TDP, zegar 2,80 GHz, 4,20 GHz maksymalnej częstotliwości podkręcania dozwolonej przez producenta dla zwykłych użytkowników.

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).

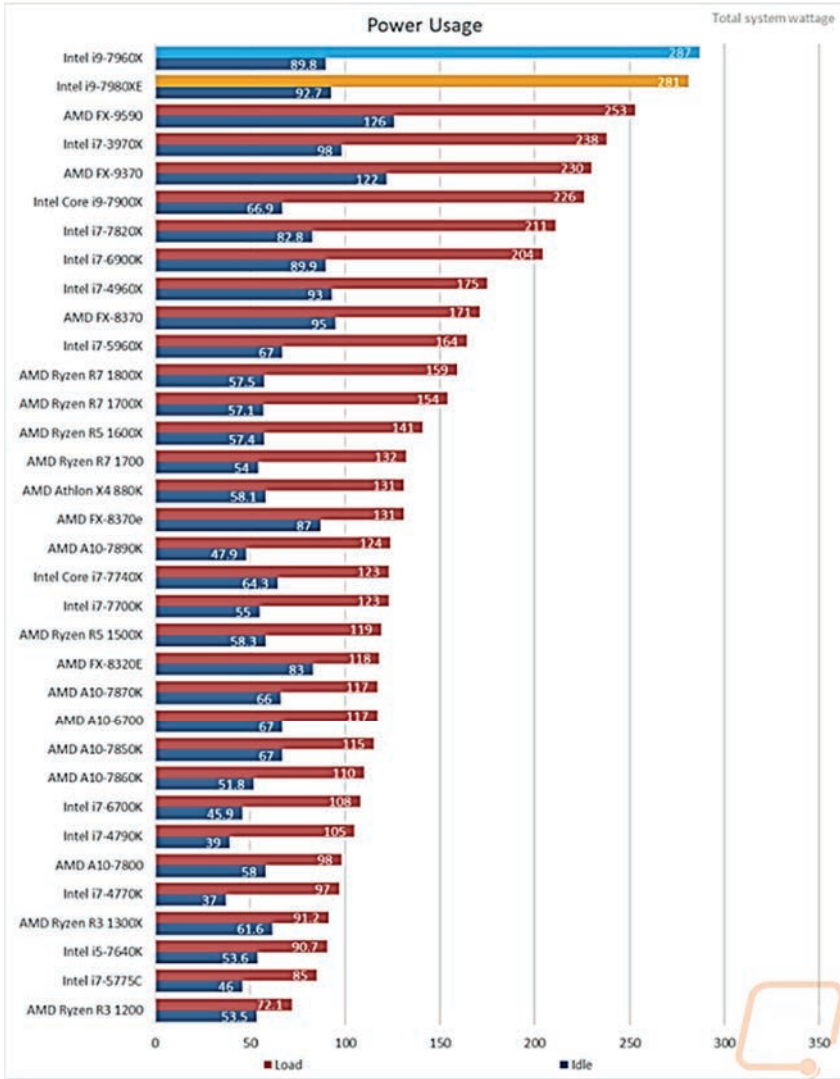
Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



RYSUNEK 1.7. Wzrost liczby tranzystorów w procesorach w latach 1971 – 2011 [8]



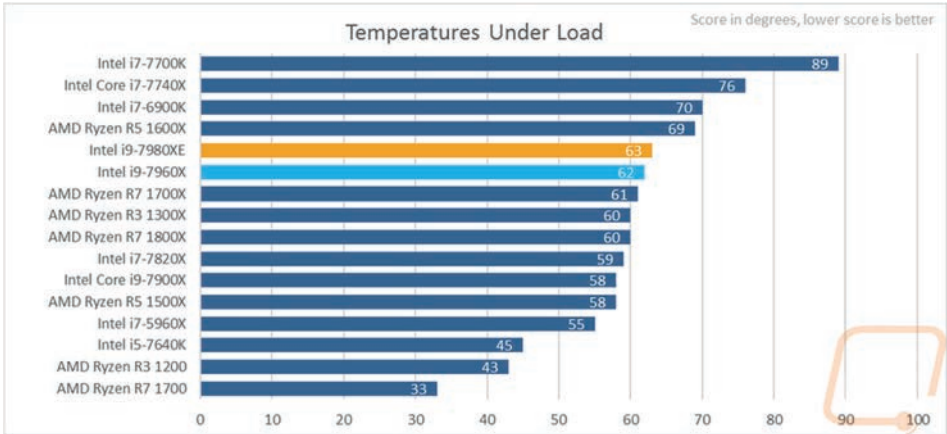
RYSUNEK 1.8. Przewidywania mocy rozpraszanej z procesora wysokiej wydajności [13]



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 czipów.



RYСУNEK 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 [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 [dostęp: 24 lipca 2018].
- [10] *Prawo Moore'a*, 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 [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
 ciekłym 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
ciepłowod, 156
COP, coefficient-of-performance, 176

E

efekt wypychania, 28
efektywna różnica temperatur, 143
efektywność, 26
 żebra, 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
 LMP_{TD}, 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
 nanopłyny, 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
 cieplny
 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
 wymiennika ciepła, 129

rozpraszacz ciepła ACT, 159

S

schemat
 bloku wodnego, 63
 ideowy mostka Wheatstone'a, 87
 siatki numerycznej, 115
 wymiennika 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, szczególnie 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!



WWW.SZKOLENIA.HELION.PL

KOD KORZYŚCI
Sięgnij po więcej! ▶



ISBN 978-83-283-5091-5



INFORMATYKA W NAJLEPSZYM WYDANIU

Cena: 59,00 zł