

Usporedba zračnog i vodenog hlađenja i njihov utjecaj na vijek trajanja i stabilnost rada višejezgrenog mikroprocesora osobnog računala

Ugarković, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:961297>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-16**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mateo Ugarković

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Mateo Ugarković

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Ireni Žmak na savjetima i što mi je pružila mogućnost da obradim veoma zanimljivu temu.

Posebno zahvaljujem obitelji na strpljenju i podršci tijekom studija i prijateljima koji su mi učinili ove godine studija jednima od najzanimljivijih u životu.

I na kraju zahvaljujem svojoj partnerici Antoniji na tome što strpljivo sluša moje ideje koliko god se činile nedostižnima.

Mateo Ugarković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATEO UGARKOVIĆ**

Mat. br.: 0035195779

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba zračnog i vodenog hlađenja i njihov utjecaj na vijek trajanja i stabilnost rada višejezgrenog mikroprocesora osobnog računala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of air and water cooling and its effect on longevity and stability of a multi-core microprocessor in a personal computer**

Opis zadatka:

Mikroprocesori čine ključnu komponentu velikog broja današnjih sustava. Nalazi ih se u potrošačkoj tehnici, kao što su mobiteli, pametni satovi, osobna računala i dr. Procesori specifičnih svojstava primjenjuju se i kod kompleksnijih elektroničkih sustava u automobilske i zrakoplovne industriji, kao što su sustavi za dovod goriva, upravljanje klimatizacijom ili sustavi za automatsko slijetanje.

Kao i svi ostali elektronički dijelovi kroz koje prolazi struja određene jakosti, procesori prilikom rada generiraju znatnu količinu topline koja predstavlja problem, ne samo za rad procesora već i za ostale elektroničke komponente u sustavu. Iz tog razloga vrlo je važno projektirati adekvatno hlađenje procesora kako bi se osigurao stabilan rad i dugotrajnost sustava.

U teorijskom dijelu rada potrebno je:

- Prikazati povijesni razvoj računala i njihov značaj u današnjem svijetu.
- Opisati funkcije pojedinih komponenti osobnih računala uz naglasak na materijalima i proizvodnim postupcima koji se koriste pri izradi procesora.
- Dati pregled novih postupaka izrade procesora, čija se primjena u elektroničkoj industriji tek očekuje.
- Osvrnuti se na utjecaj proizvodnih postupaka izrade procesora na okoliš.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je:

- Usporediti karakteristike zračnog i vodenog (engl. all-in-one) hlađenja procesora.
- Pripremiti dodirne površine s jednolikim prijanjanjem hladnjaka i procesora.
- Definirati istu krivulju brzine vrtnje ventilatora za oba načina hlađenja kako bi se osigurala usporedivost konačnih rezultata.
- Procesor podvrgnuti programskom opterećenju koje simulira ekstremne radne uvjete.
- Pratiti temperaturu procesora i utrošenu energiju.
- Analizirati dobivene rezultate i donijeti zaključke o utjecaju određene vrste hlađenja na stabilnost rada procesora.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

4. ožujka 2021.

Rok predaje rada:

6. svibnja 2021.

Predviđeni datum obrane:

10. svibnja do 14. svibnja 2021.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VIII
POPIS OZNAKA	IX
POPIS KRATICA	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
2. KRATKA POVIJEST RAČUNALA	2
2.1. Prva generacija računala	3
2.2. Druga generacija računala.....	5
2.3. Treća generacija računala.....	6
2.4. Kasnije generacije računala	7
3. ZNAČAJ RAČUNALA U DANAŠNJEM SVIJETU	9
3.1. Osobno računalo i radna stanica	9
3.2. Računala kao numerički procesori	9
3.3. Računala kod sustava automatskog upravljanja.....	10
3.4. Kvantna računala.....	12
4. STRUKTURA OSOBNIH RAČUNALA	14
4.1. Mikroprocesor	16
4.2. Matična ploča	17
4.3. Radna memorija	19
4.3.1. Vrste RAM-modula	20
4.4. Uređaji za pohranu podataka.....	22
4.5. Napajanje	23
4.5.1. Energetska učinkovitost napajanja.....	24

4.6.	Grafička kartica.....	26
4.6.1.	CFD-simulacije	27
4.6.2.	Simulacija radijacije tla.....	28
4.7.	Sustav za hlađenje	29
5.	UPOTREBA SILICIJA U ELEKTRONICI	30
5.1.	Svojstva silicija	30
5.1.1.	Struktura kristala silicija	30
5.1.2.	Toplinska svojstva	32
5.1.3.	Mehanička svojstva.....	33
5.2.	Proizvodnja mikroprocesora	34
5.2.1.	Odrezivanje i oblikovanje ingota	35
5.2.2.	Oblikovanje ruba i brušenje	37
5.2.3.	Nagrizanje	38
5.2.4.	Poliranje i operacije u čistoj sobi	38
5.2.5.	Izrada čipova	39
6.	SUSTAV HLAĐENJA OSOBNOG RAČUNALA	42
6.1.	Načini prijenosa topline	42
6.2.	Komponente sustava za hlađenje	43
6.2.1.	Kućiste	43
6.2.2.	Zračno hlađenje.....	45
6.2.3.	Vodeno hlađenje	49
6.2.4.	Ventilatori	53
6.3.	Upravljanje sustavom za hlađenje.....	55
6.3.1.	Modulacija	55
6.3.1.1.	Impulsna modulacija.....	56
6.3.1.2.	Impulsno-širinska modulacija (PWM).....	58
6.3.2.	Prednosti i primjena PWM-a kod upravljanja sustavom hlađenja.....	60
6.4.	Alternativna rješenja hlađenja.....	63
6.4.1.	Termosifon.....	63
6.4.2.	Peltierov element	64
7.	EKSPERIMENTALNI DIO	65

7.1. Hardver korišten prilikom ispitivanja	65
7.1.1. Mikroprocesor	66
7.1.2. Matična ploča	67
7.1.3. Napajanje	68
7.1.4. Grafička kartica	70
7.1.5. Sustav hlađenja	71
7.1.5.1. Kućište i ventilatori	71
7.1.5.2. Hladnjak AMD Wraith Stealth	73
7.1.5.3. Hladnjak Be quiet! Pure Loop 280	75
7.1.5.4. Hladnjak Noctua NH-D15	76
7.1.5.5. Toplinska pasta	76
7.2. Softver korišten prilikom ispitivanja	77
7.2.1. HWiNFO	78
7.2.2. AIDA64	78
7.2.3. Cinebench	79
7.2.4. Generic Log Viewer	80
7.3. Provedena ispitivanja	81
7.3.1. Ispitivanje pouzdanosti hladnjaka Wraith	82
7.3.1.1. Opterećenje mikroprocesora u programu AIDA64	83
7.3.1.2. Opterećenje mikroprocesora u programu Cinebench	84
7.3.2. Ispitivanje pouzdanosti hladnjaka NH-D15	85
7.3.2.1. Opterećenje mikroprocesora u programu AIDA64	86
7.3.2.2. Opterećenje mikroprocesora u programu Cinebench	87
7.3.3. Ispitivanje pouzdanosti hladnjaka Pure Loop	88
7.3.3.1. Opterećenje mikroprocesora u programu AIDA64	89
7.3.3.2. Opterećenje mikroprocesora u programu Cinebench	90
7.4. Analiza rezultata dobivenih ispitivanjem	91
8. ZAKLJUČAK	95
LITERATURA	97
PRILOZI	101

POPIS SLIKA

Slika 1. Ilustracija trgovine u Kini gdje se koristio abak (lijevo) i sam abak (desno) [1].....	2
Slika 2. Mehanizam iz Antikitere [2]	3
Slika 3. IAS računalo [3].....	3
Slika 4. IAS struktura [4]	4
Slika 5. Struktura računala IBM 7094 [4]	5
Slika 6. Prikaz puta izrade jednog čipa [4].....	6
Slika 7. Porast broja tranzistora u integriranim krugovima [4].....	7
Slika 8. Računalo kao upravljački element kod automatskog slijetanja zrakoplova [5].....	10
Slika 9. Računalom upravljani sustav za dovod goriva kod automobila [5]	11
Slika 10. IBM-ovo Q System One kvantno računalo [7]	13
Slika 11. Shematski prikaz ljudskog bića [5]	14
Slika 12. Shematski prikaz strukture računala [5].....	15
Slika 13. AMD Ryzen 3300X (lijevo) i AMD Ryzen Threadripper 3990X (desno) [9][10].	16
Slika 14. Struktura matične ploče proizvođača Gigabyte [11].....	17
Slika 15. Shematski prikaz matične ploče [12]	18
Slika 16. Komponente čipseta [12]	19
Slika 17. Pločice radne memorije proizvođača Corsair [13].....	20
Slika 18. Razvoj RAM-modula [12]	21
Slika 19. Položaj proreza kod različitih RAM-modula [12]	21
Slika 20. Tvrdi disk bez kućišta [14].....	22
Slika 21. SSD proizvođača Micron [15]	23
Slika 22. Modularno napajanje (lijevo) i napajanje s integriranim kablovima (desno) [16] .	24
Slika 23. Prikaz kompleksnog modela u programu Solidworks [19].....	26
Slika 24. Model pasivnog hladnjaka [20].....	27
Slika 25. Prikaz rasporeda temperature na hladnjaku i okolnom zraku; nacrt (gore), tlocrt (dolje) [20].....	28
Slika 26. Shematski prikaz simulacije radijacije tla [21]	29
Slika 27. Položaj atoma silicija unutar jedinične ćelije silicija [22]	31
Slika 28. Millerovi indeksi [22]	31
Slika 29. Mogući defekti kristalne rešetke silicija [22].....	33
Slika 30. Dijagram naprezanje-deformacija za silicij [22].....	34

Slika 31. Shema izrade pločica silicija [25]	34
Slika 32. Kružno piljenje ingota [25]	35
Slika 33. Rezanje ingota žicom [25]	36
Slika 34. Rubni profili pločice silicija [25]	37
Slika 35. Brušenje pločice silicija [25]	37
Slika 36. Postupak fotolitografije [27]	39
Slika 37. Rezultati istraživanja koeficijenta toplinske provodljivosti kompozita bakra i dijamanta [28]	40
Slika 38. Stariji modeli kućišta [30]	43
Slika 39. Kućišta proizvođača Be quiet!, dizajnirano za protok zraka (lijevo) i dizajnirano za tihi rad (desno) [31]	44
Slika 40. Pasivni hladnjak [32]	45
Slika 41. Grafička kartica proizvođača EVGA [33]	46
Slika 42. Shema sustava za hlađenje CPU-a [34]	46
Slika 43. Zračni hladnjak proizvođača be quiet! [31]	47
Slika 44. Princip rada toplinske cijevi zračnog hladnjaka [35]	48
Slika 45. Alternativni zračni hladnjak [37]	48
Slika 46. AIO-hladnjak proizvođača EKWB [39]	50
Slika 47. Položaj radijatora AIO-hladnjaka u kućištu računala [39]	51
Slika 48. Osobno računalo hlađeno vodenom petljom [40]	51
Slika 49. Utjecaj masenog protoka i volumnog udjela nanočestica Al_2O_3 u vodi na temperaturu hladne ploče [42]	52
Slika 50. Aksijalni ventilator proizvođača be quiet! [31]	53
Slika 51. Protok zraka kroz kućište osobnog računala [43]	54
Slika 52. Shema prijenosa informacije modulacijom signala [44]	55
Slika 53. Impulsna modulacija. a) valni oblik prijenosnoga signala; b) modulacijski signal; c) PAM-signal; d) PWM-signal; e) PPM-signal [44]	57
Slika 54. Princip rada potencijometra [45]	58
Slika 55. Radni ciklus tri različita PWM-signala [46]	59
Slika 56. Jednostavan strujni krug upravljiv PWM-om [46]	59
Slika 57. Shema priključka ventilatora s 4 žice [48]	61
Slika 58. Radna krivulja ventilatora [48]	63

Slika 59. Termosifon proizvođača <i>IceGiant</i> [50]	64
Slika 60. Shema <i>Peltierovog</i> elementa [51]	64
Slika 61. AMD Ryzen 5 3600 mikroprocesor	66
Slika 62. MSI MEG X570 UNIFY matična ploča	67
Slika 63. Napajanje RM850i proizvođača Corsair	68
Slika 64. Dijagram deklarirane efikasnosti napajanja RM850i.....	69
Slika 65. Grafička kartica Radeon Pulse 5600 XT BE proizvođača Sapphire.....	70
Slika 66. Pure Base 500DX kućište proizvođača Be quiet!	71
Slika 67. Pure Wings 2 (lijevo) i Silent Wings 3 (desno) ventilatori proizvođača Be quiet! 72	
Slika 68. Shema ventilacije	73
Slika 69. Hladnjak Wraith Stealth proizvođača AMD	74
Slika 70. Pure Loop 280 hladnjak proizvođača be quiet!	75
Slika 71. NH-D15 hladnjak proizvođača Noctua.....	76
Slika 72. Toplinske paste i aplikator	77
Slika 73. Grafičko korisničko sučelje programa HWiNFO	78
Slika 74. Grafičko korisničko sučelje programa AIDA64	79
Slika 75. Grafičko korisničko sučelje programa Cinebench	80
Slika 76. Grafičko korisničko sučelje programa Generic Log Viewer	80
Slika 77. Krivulja rada ventilatora na usisu	81
Slika 78. Položaj hladnjaka Wraith u kućištu	82
Slika 79. Rezultati ispitivanja hladnjaka Wraith opterećenjem u programu AIDA64: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)	83
Slika 80. Rezultati ispitivanja Wraith hladnjaka opterećenjem u programu Cinebench: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)	84
Slika 81. Položaj hladnjaka NH-D15 u kućištu.....	85
Slika 82. Rezultati ispitivanja NH-D15 hladnjaka opterećenjem u programu AIDA64: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)	86
Slika 83. Rezultati ispitivanja NH-D15 hladnjaka opterećenjem u programu Cinebench: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)	87
Slika 84. Položaj Pure Loop hladnjaka u kućištu	88
Slika 85. Rezultati ispitivanja hladnjaka Pure Loop opterećenjem u programu AIDA64: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)	89

Slika 86. Rezultati ispitivanja Pure Loop hladnjaka opterećenjem u programu Cinebench: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)	90
Slika 87. Pregled temperature mikroprocesora prilikom ispitivanja sva tri hladnjaka uz opterećenje nametnuto programom AIDA64	91
Slika 88. Pregled radnog takta mikroprocesora prilikom ispitivanja sva tri hladnjaka uz opterećenje nametnuto programom Cinebench	92

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz komercijalno dostupnih mikroprocesora 1970-ih godina [4].....	8
Tablica 2. Prikaz komercijalno dostupnih mikroprocesora novijih generacija [4]	8
Tablica 3. Dio vrijednosti iskoristivosti određenih certifikatom „80 Plus“ [17]	25
Tablica 4. Rezultati ispitivanja učinkovitosti napajanja [17]	25
Tablica 5. Rezultati simulacije modela radijacije tla [21].....	29
Tablica 6. Toplinska svojstva silicija [24]	32
Tablica 7. Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta za aluminij, bakar i vodu [38].....	49
Tablica 8. Tehnički podaci za AMD Ryzen 5 3600 mikroprocesor.....	66
Tablica 9. Tehnički podaci ventilatora	72
Tablica 10. Toplinska svojstva toplinskih pasti	77
Tablica 11. Pregled rezultata ispitivanja za sva tri hladnjaka	93

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
c_p	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet
$f_{c,min}$	MHz	Minimalni radni takt mikroprocesora
K	W/(m ² K)	Koeficijent prijelaza topline
R_{eH}	N/mm ²	Gornja granica tečenja materijala
R_{eL}	N/mm ²	Donja granica tečenja materijala
T	s	Period ponavljanja impulsa
T_s	K	Temperatura pri kojoj su izmjerena svojstva silicija
U_0	m	Amplituda impulsa
α	10 ⁻⁶ /K	Koeficijent toplinskog istezanja
ε_d	%	Maseni udio dijamanta u kompozitu
θ_{blok}	°C	Temperatura hladne ploče
$\theta_{p,max}$	°C	Maksimalna temperatura mikroprocesora
λ	W/(m K)	Toplinska provodnost
τ	s	Vrijeme trajanja impulsa

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AIO	<i>All-In-One</i> – sveobuhvatno vodeno hlađenje
AMD	<i>Advanced Micro Devices</i> – ime tvrtke
BIOS	<i>Basic Input/Output System</i> – Sustav ulaza/izlaza računala
CFD	<i>Computer Fluid Dynamics</i> – računalom potpomognuta dinamika fluida
CPU	<i>Central Processing Unit</i> - mikroprocesor
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i> – postupak nanošenja premaza
DDR	<i>Double Data Rate</i> – dvostruka protočnost podataka
EKWB	<i>Edvard König Water Blocks</i> – ime tvrtke
FCC	<i>Face-Centered Cubic</i> – vrsta jedinične ćelije (plošno centrirana kubična)
FSB	<i>Front Side Bus</i> - sabirnica
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i> – grafička kartica
HDD	<i>Hard Disk Drive</i> – tvrdi disk
HPC	<i>High Performance Computing</i> – računanje visokih performansi
IAS	<i>Institute for Advanced Study</i> – Institut za napredno učenje
IBM	<i>International Business Machines</i> - ime tvrtke
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> – mali elektromehanički sustavi
MSI	<i>Micro Star International</i> – ime tvrtke
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i> – impulsno-amplitudna modulacija
PDM	<i>Pulse Duration Modulation</i> – impulsno-duljinska modulacija
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i> – impulsno-pozicijska modulacija
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – impulsno-širinska modulacija
SDRAM	<i>Synchronous Dynamic Random Access Memory</i> – dinamička radna memorija
SSD	<i>Solid State Drive</i> – uređaj za pohranu podataka

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad sastoji se od dva glavna dijela, teoretskog i eksperimentalnog. Teoretski dio osvrće se na strukturu današnjih računala bez zadiranja u arhitekturu računala i procese koji omogućavaju prijenos podataka. U eksperimentalnom dijelu načeta je tema hlađenja računalnih komponenti, točnije mikroprocesora, čime se osigurava njihova stabilnost u dugotrajnom radu.

Teoretski dio započinje kratkim pregledom računala kroz povijest nakon čega su navedene različite primjene i značaj računala u današnjem svijetu. U nastavku su obrađene ključne komponente potrebne za stabilan rad modernih osobnih računala. Prije prelaska na eksperimentalni dio razmatra se upotreba silicija u elektroničkim komponentama. U ovom dijelu navedena je struktura kristala silicija, njegova toplinska i mehanička svojstva te njegova uloga u proizvodnji mikroprocesora, koja je u radu i opisana. Na kraju, razmatraju se različiti mehanizmi prijenosa topline tijekom rada računala te različite vrste hlađenja, što služi kao svojevrsan uvod u eksperimentalni dio.

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada ispitana je pouzdanosti tri različita hladnjaka primjenom sintetičkog opterećenja na mikroprocesor. U tu svrhu korišteni su posebni softverski paketi. Prije svega, prikazan je sav hardver te programski paketi korišteni prilikom ispitivanja. Nakon završetka ispitivanja slijedi prikaz i analiza rezultata, nakon čega je izveden zaključak čitavog diplomskog rada.

Ključne riječi: *računalo, CPU, pločica silicija, zračno hlađenje, vodeno hlađenje, otpornost na opterećenje*

SUMMARY

This Master thesis consists of two major parts, one being the theoretical and the other one experimental. The theoretical part revolves around the makings of a modern computer without going into the architecture and the processes behind data transfer. The experimental part delves into the area of cooling the computer components, specifically a CPU, to ensure their stability over long periods of time.

The theoretical part starts with a short representation of computers throughout history, after which a rundown of different usages and the significance of computers in the present day is given. Furthermore, key components needed for stable work of personal computers are discussed. Before going to the experimental part, usage of silicon in electronic components is considered. There, the structure of the silicon crystal, its thermal and mechanical properties as well as its role in the production of CPUs is given. Finally, several types of heat transfer mechanisms during computer workloads and different kinds of cooling are considered, which serves as an introduction to the experimental part.

In the experimental part three different coolers are stress tested using synthetic loads which are forced by using specialized software. Firstly, hardware components and software packages used in the tests are listed. After the completion of the tests, the results are discussed. In the end, a conclusion to the Master thesis is given.

Key words: *computer, CPU, silicon wafer, air cooling, water cooling, stress test*

1. UVOD

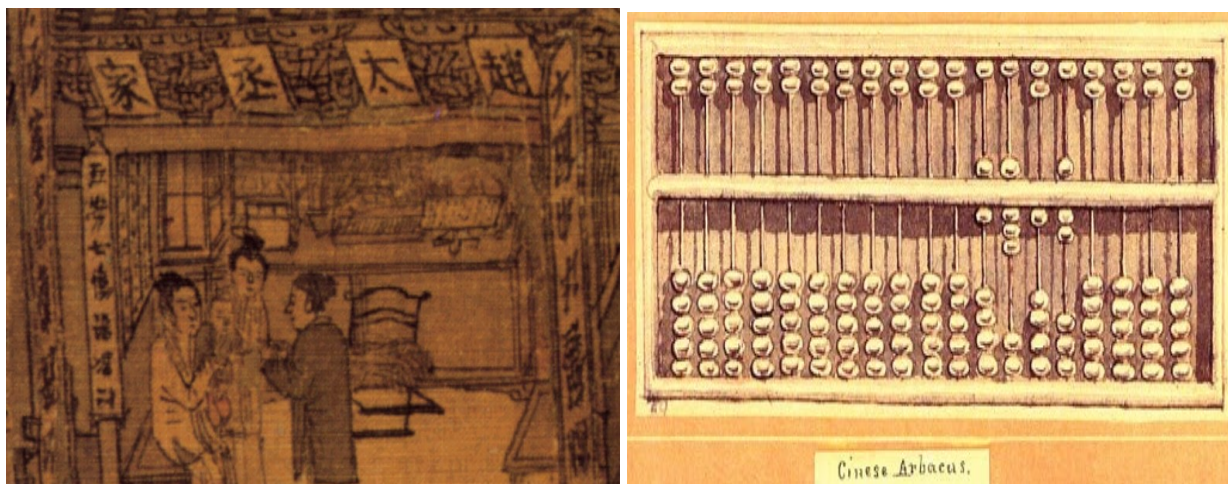
Računalna tehnologija iz godine u godinu doživljava sve veći porast. Zbog potrebe ljudi za pouzdanim radnim stanicama i sve zahtjevnijeg opsega posla koji se zahtijevaju od računala, nove i poboljšane komponente se izrađuju svakih nekoliko mjeseci. Zahtjevi se naravno razlikuju ovisno o primjeni. Računala se danas koriste u svim granama industrije te su njihov neizostavan dio, bilo da se radi o sustavima za bespilotno letenje zrakoplovima ili o upravljanju parametrima poput brzine rezanja kod obradnih sustava.

S druge strane potražnja za novim računalnim komponentama raste i zbog raznih nepredvidivih okolnosti. Sa sve većim porastom ljudi koji moraju raditi od doma, potrebno je i ondje stvoriti radnu atmosferu i omogućiti alate za rad. Jedan od tih alata je i računalo, čime granica između radne stanice i računala postaje sve manje jasna.

Budući da se nove i energetske zahtjevnije računalne komponente razvijaju svake godine s njima dolazi i potreba za sve robusnijim načinima hlađenja. Upravo će tome biti posvećen velik dio ovog rada. Kroz samostalno istraživanje potrebno je upoznati se sa strukturom računala i velikim brojem njegovih komponenti te načinima na koje one međusobno komuniciraju. Sama arhitektura računala je mnogima apstraktna i zbog toga je jedan od ciljeva ovog rada pokušati je pojednostaviti i približiti čitatelju. Glavni cilj rada je iskoristiti znanja dobivena istraživanjem u svrhu usporedbe dva načina hlađenja ključne komponente svakog računala, mikroprocesora. Usporedba se provodi nakon detaljnih ispitivanja triju hladnjaka (dva zračna i jednog vodenog) u svrhu testiranja njihove pouzdanosti te utjecaja na stabilnost rada mikroprocesora.

2. KRATKA POVIJEST RAČUNALA

Računala kao ideja su nastala kako bi pomogla ljudima u različitim operacijama računanja. Kako bi izbjegli brojanje na prste izmišljena su pomagala koja uvelike olakšavaju računanje. Jedno od takvih pomagala je i abak, korišten za operacije zbrajanja i oduzimanja. Stari Rimljani razvili su abak iz pomagala korištenih kod babilonske civilizacije 2400 godina prije Krista [1]. Koristila ih je čak i kineska civilizacija, kao što to prikazuje *Slika 1*.



Slika 1. Ilustracija trgovine u Kini gdje se koristio abak (lijevo) i sam abak (desno) [1]

Neki uređaji korišteni su i za naprednije operacije poput računanja položaja astronomskih tijela. Tako je u Grčkoj pronađena naprava koja je dobila ime po otoku na kojem je pronađena, mehanizam iz Antikitere, koja je imala upravo tu svrhu. Smatra se da je napravljena 100 godina prije Krista te da su se uređaji slične kompleksnosti počeli koristiti tek 1000 godina kasnije. Sam uređaj prikazan je na *Slika 2*. Slično kao sat, kućište uređaja ima veliko kružno naličje s rotirajućim kazaljka. Sa svake strane sadrži ručice koje služe za navijanje mehanizma naprijed i natrag. Kako se ručice okreću, tako zupčanici u spoju pokreću kazaljke različitim brzinama. Umjesto sati i minuta, ove kazaljke prikazuju nebesko vrijeme, kada će koje nebesko tijelo biti u određenom položaju. Jedna kazaljka prikazuje Sunce, druga Mjesec itd. [2].

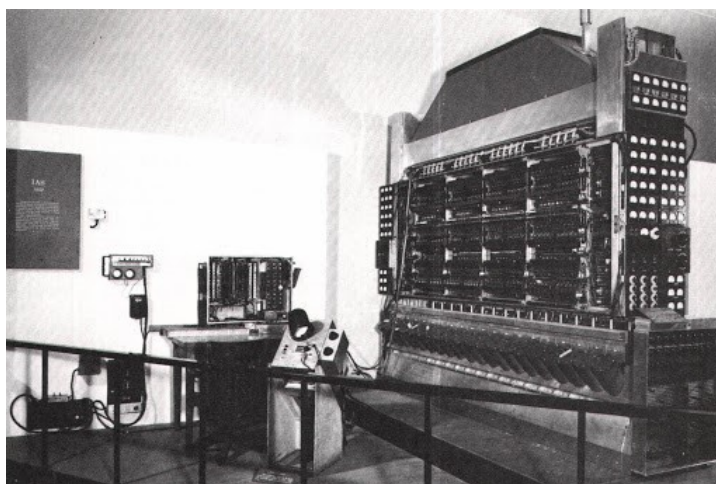


Slika 2. Mehanizam iz Antikitere [2]

Tijekom povijesti ima mnogo sličnih primjera, no pravi procvat računala doživljavaju mnogo kasnije. U nastavku će biti dan kratak pregled razvoja digitalnih računala.

2.1. Prva generacija računala

Prva generacija računala koristila je vakuumske cijevi kao elemente digitalne logike i memoriju. Ti strojevi, kao što se može vidjeti na *Slika 3*, bili su veliki i imali su masu oko pola tone. Na slici je prikazano IAS (engl. *Institute for Advanced Study*) računalo, kod kojeg je prvi put primijenjen koncept pohrane programa. Ideja se pridaje matematičaru Johnu von Neumannu, koji je 1946. godine dizajnirao spomenuto računalo [4].

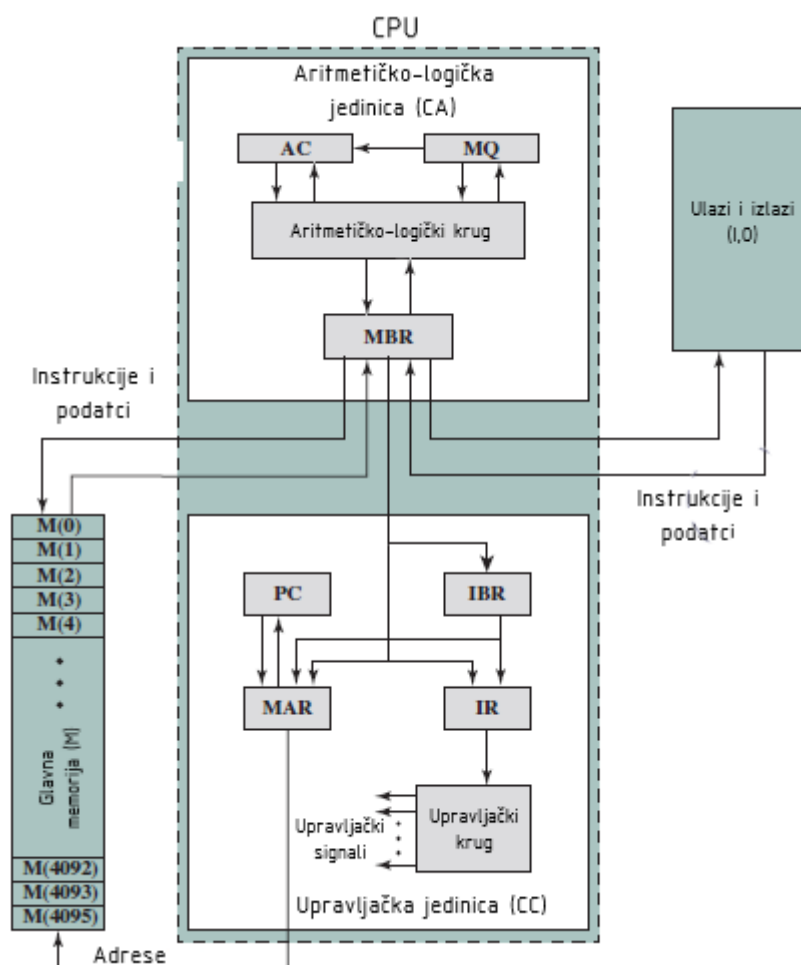


Slika 3. IAS računalo [3]

IAS računalo imalo je za današnje standarde relativno jednostavnu strukturu [4]:

- glavna memorija, koja pohranjuje podatke i naredbe
- aritmetička i logička jedinicu, koja obrađuje binarne podatke
- upravljačka jedinica, koja interpretira naredbe u memoriji
- ulazi/izlazi, oprema kojom upravlja upravljačka jedinica.

Blok shema takve strukture prikazana je na *Slika 4*.



Slika 4. IAS struktura [4]

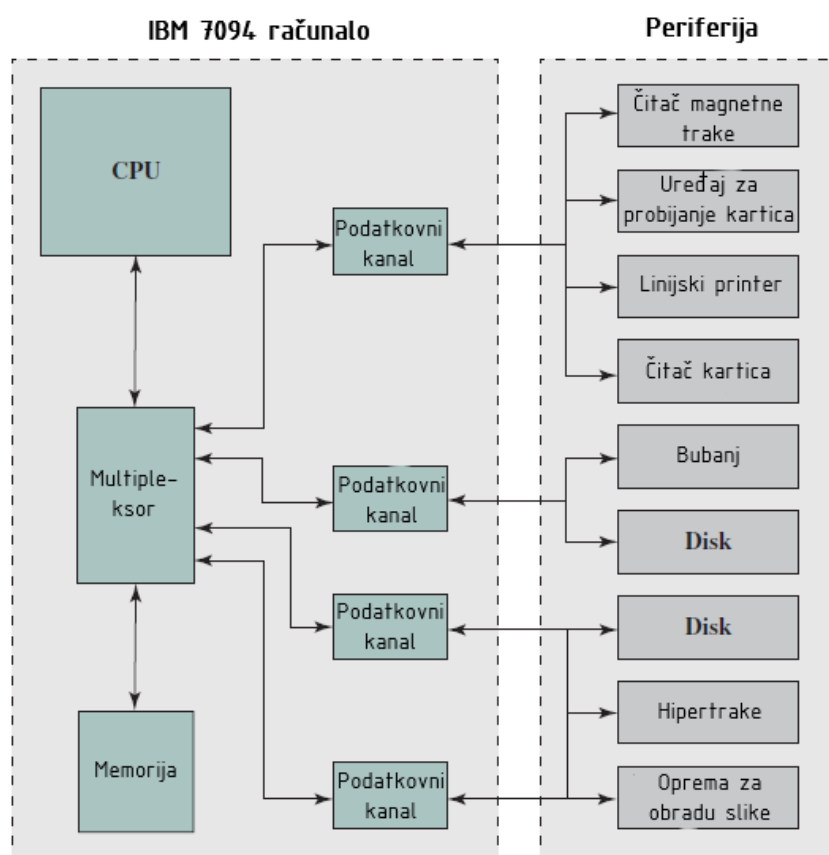
2.2. Druga generacija računala

Prva velika promjena kod digitalnih računala dogodila se zamjenom vakuumskih cijevi tranzistorima. Tranzistor je manji, jeftiniji i otpušta manje topline. Za razliku od vakuumskih cijevi koje su izgrađene od više dijelova, žica, metalnih ploča, staklenih kapsula itd., tranzistor je jedan cjelovit dio izrađen od silicija [4].

Tranzistor je izumljen 1947. godine na lokalitetu Bell Labs, ali je tek krajem 1950-ih postao komercijalno dostupan u računalima.

Uz pojavu tranzistora, drugu generaciju računala obilježila je i pojava kompleksnijih aritmetičkih i logičkih sklopova, upotreba viših programskih jezika te sposobnost računala da pokreće programe.

Jedan od predstavnika te generacije je IBM (engl. *International Business Machines*) 7094 čija struktura je prikazana na Slika 5.

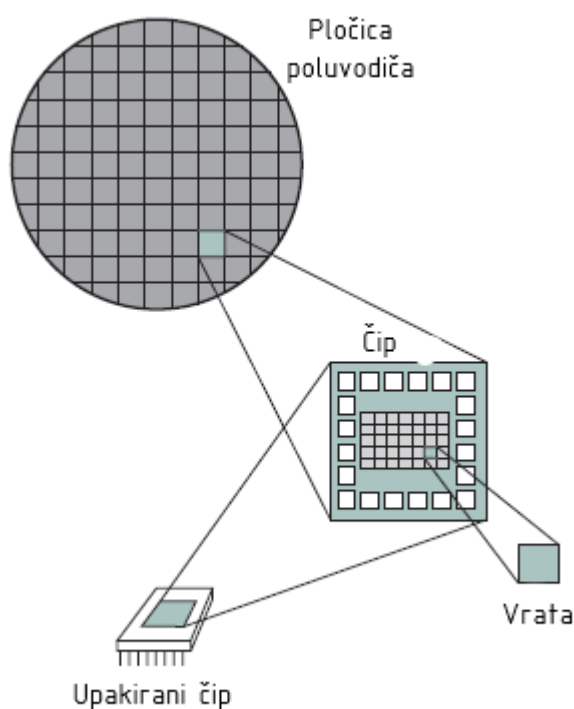


Slika 5. Struktura računala IBM 7094 [4]

Sa slike se može uočiti najbitnija razlika s obzirom na računala prijašnje generacije, a to je upotreba podatkovnih kanala. Oni izvršavaju naredbe nezavisno od procesora te mu signaliziraju kad je naredba izvršena i time bitno rasterećuju sam procesor.

2.3. Treća generacija računala

Glavno obilježje treće generacije računala bila je pojava integriranih krugova. Umjesto izrade dijelova poput tranzistora zasebno i naknadnim povezivanjem u cjelinu, kod treće generacije računala više dijelova se izrađuje iz istog komada silicija. Tanka pločica silicija podijeli se u više manjih područja, svaki reda veličine nekoliko milimetara kvadratnih. U svakom području se izradi identični uzorak, te se komad silicija razlama na čipove. Taj čip se potom ugradi u kućište radi zaštite. Kućište sadrži pinove koji omogućavaju integraciju čipa s drugim uređajima [4]. Taj postupak prikazan je na *Slika 6*.



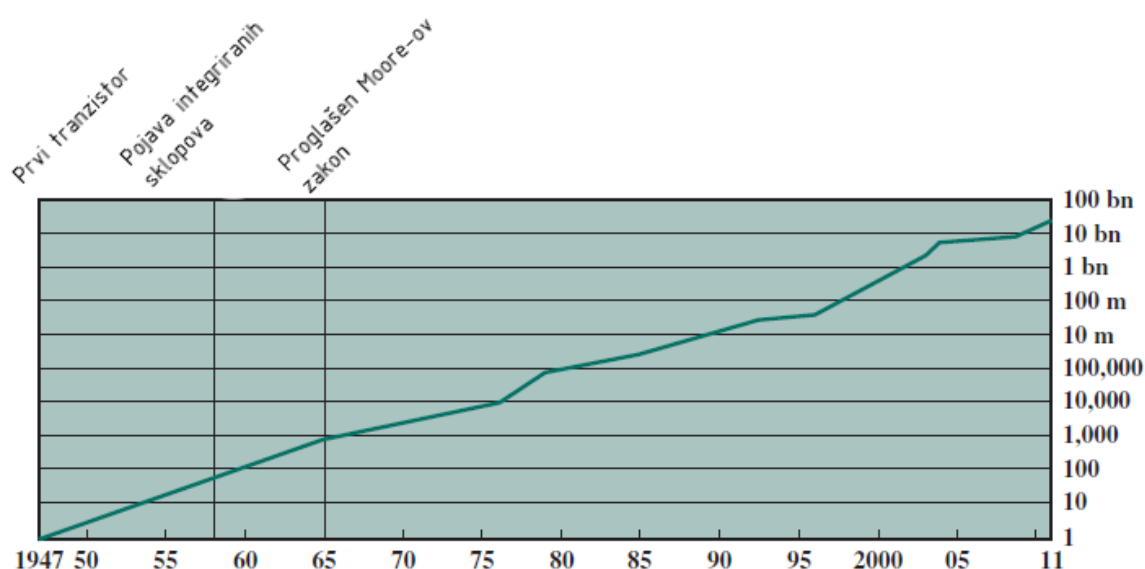
Slika 6. Prikaz puta izrade jednog čipa [4]

S vremenom postalo je moguće upakirati sve više i više komponenti na isti čip. Taj porast prikazuje Mooreov zakon. Gordon Moore, suosnivač tvrtke Intel, primijetio je da broj tranzistora koji se može upakirati na isti čip, svake godine biva dvostruko veći.

Isto tako je točno predvidio tempo kojim će taj trend rasti u nadolazećim godinama. Iz tih predviđanja su proizašle i posljedice Mooreova zakona [4]:

- Cijena jednog čipa ostala je nepromijenjena tijekom perioda rasta gustoće.
- Budući da su logički i memorijski elementi gušće upakirani, put podataka je manji i brzina prijenosa je veća.
- Računalima se smanjuju dimenzije i moguće ih je lakše smjestiti.
- Smanjuje se potreba za snagom računala.
- Veze na integriranim krugovima su pouzdanije nego lemljeni spojevi.

Porast broja tranzistora u integriranim krugovima kroz duži period prikazuje *Slika 7*.



Slika 7. Porast broja tranzistora u integriranim krugovima [4]

2.4. Kasnije generacije računala

Nakon treće generacije računala postaje sve teže definirati napredak širenja računalne tehnologije zbog njenog ubrzanog rasta. Uz brzo plasiranje novih proizvoda na tržište, ta klasifikacija postaje sve manje značajna.

U tom periodu može se istaknuti jedan bitak pomak, a to je pojava mikroprocesora. Kako je rasla gustoća elemenata na memorijskim čipovima rasla je i gustoća elemenata procesora. Zbog toga je manje čipova bilo potrebno kako bi se izradio jedan procesor. Prvi mikroprocesor je nastao kada su svi ti elementi uspjeli stati na jedan čip [4].

Razvoj mikroprocesora u razdoblju od tridesetak godina prikazan je na *Tablica 1* i *Tablica 2*.

Tablica 1. Prikaz komercijalno dostupnih mikroprocesora 1970-ih godina [4]

Model mikroprocesora	4004	8008	8080	8086	8088
Predstavljeni godine	1971.	1972.	1974.	1978.	1979.
Radni takt	108 kHz	108 kHz	2 MHz	5 MHz, 8 MHz, 10 MHz	5 MHz, 8 MHz
Broj tranzistora	2300	3500	6000	29000	29000
Veličina tranzistora (μm)	10	8	6	3	6

Tablica 2. Prikaz komercijalno dostupnih mikroprocesora novijih generacija [4]

Model mikroprocesora	Pentium III	Pentium 4	Core II Duo	Core i7 EE 4960X
Predstavljeni	1999.	2000.	2006.	2013.
Radni takt	450-660 MHz	1,3-1,8 GHz	1,06-1,2 GHz	4 GHz
Broj tranzistora	9,5 milijuna	42 milijuna	167 milijuna	1,86 milijardi
Veličina tranzistora (nm)	250	180	65	22
Broj jezgri	1	1	2	6

Uočava se ogroman porast broja tranzistora na mikroprocesoru te smanjenje veličine tranzistora s reda veličine nekoliko mikrometara na red veličine nekoliko nanometara.

3. ZNAČAJ RAČUNALA U DANAŠNJEM SVIJETU

Prije daljnje razrade potrebno je definirati nekoliko pojmova. Računalo je stroj koji uzima informacije iz svoje okoline, obrađuje ih prema predodređenom setu operacija i na kraju prikazuje obrađene podatke. Ova definicija često nije od velike pomoći jer pokušava definirati riječ računalo pomoću podjednako kompleksnih riječi poput informacije i operacije. Bolji pristup tome problemu je objasniti ulogu računala u obradi podataka, numeričkim operacijama, radnim stanicama i sustavima automatske kontrole, što je i prikazano u nastavku.

3.1. Osobno računalo i radna stanica

Osobnim računalima omogućeno je rješavanje raznih problema ljudi u uredima te je dovedena moć računanja i u kućanstva. Softverski alati poput onih za obradu teksta i brzi pristup različitim bazama podataka uvelike mijenjaju uredsku okolinu. Na isti način programski paketi za računalom potpomognuto konstruiranje mijenjaju industriju. Inženjeri danas mogu konstruirati različite dijelove, odrediti operacije obrade, raditi simulacije i mnogo više i sve to uz pomoć intuitivnog alata kao što je računalo [5].

Iako je većina ljudi upoznato s pojmom osobnog računala, koncept radne stanice nije toliko široko rasprostranjen. Radnim stanicama smatraju se računala visokih performansi koja koriste najnoviju tehnologiju i uglavnom se koriste u industriji. Razlika između osobnog računala i radne stanice nekad je bila u jačini grafičkog procesora koji se koristio ili posebnim zahtjevima za monitore koji se koriste u industriji. Uvođenjem grafičkih kartica visoke brzine i sve većih zahtjeva za monitorima visoke razlučivosti u komercijalnoj upotrebi, ta granica postaje manje jasna [5].

3.2. Računala kao numerički procesori

Obrada numeričkih podataka odnosi se na primjenu računala koja uključuje veliki broj matematičkih operacija, nekad i nekoliko milijardi operacija po zadatku. Računala koja se koriste za takvu obradu karakteriziraju brzi i skupi procesori, brze memorije i mali broj ulaza/izlaza te dodatne pohrane. [5]

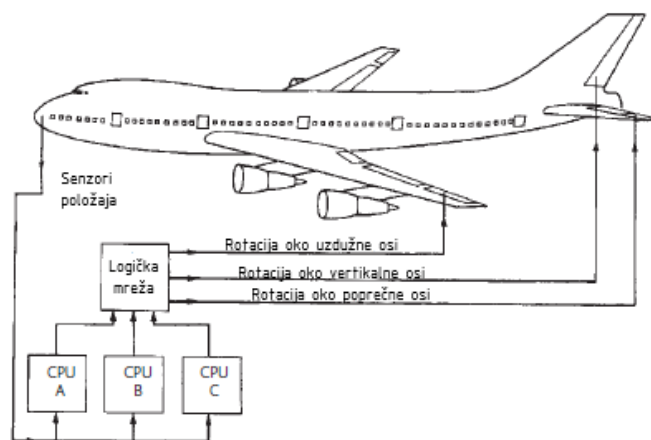
Primjena računala kod obrade numeričkih podataka uglavnom je znanstvene prirode. Primjerice, može se koristiti kod modeliranja vremenske prognoze metodom konačnih elemenata. Atmosfera je kontinuirani trodimenzionalni medij sastavljen od molekula više

plinova. Rad s kontinuiranim medijem je problematičan i stoga znanstvenici pri matematičkom modeliranju gledaju na atmosferu kao na medij sastavljen od velikog broja pravilnih geometrijskih tijela, npr. kocki. Svaka od tih kocki ima jednoliku temperaturu, gustoću i tlak što znači da zrak unutar pojedine kocke ne pokazuje varijaciju fizičkih svojstava. Varijacija postoji samo između susjednih kocki. S obzirom na to da kocka ima šest strana, može se kreirati model koji pokazuje međudjelovanje kocke sa svakim od šest neposrednih susjeda. Počinje se pretpostavkom da su sve kocke identične te se onda razmatra slučaj kada se izvor energije, primjerice Sunce, primjeni na sustav. Utjecaj svake kocke na svoje susjede se računa i taj proces se ponavlja ciklički (iterativno). Kako bi se osigurali precizni rezultati, veličina kocki mora biti infinitezimalno mala inače pretpostavka da su svojstva zraka unutar kocke jednolika ne vrijedi. Broj iteracija potreban kako bi rješenje konvergiralo ka konačnoj vrijednosti je često vrlo velik. Kao posljedica toga ovakvi tipovi problema zahtijevaju dosta vremena čak i na superračunalima na kojima se te simulacije inače izvode. Rješavanje takvih i sličnih problema potiče ubrzani razvoj računalne arhitekture [5].

3.3. Računala kod sustava automatskog upravljanja

Velika većina računala koristi se kao srce sustava automatskog upravljanja. Kada se koristi kao upravljački element, računalo je integrirano u većem sustavu i nije vidljivo promatraču. Pod „nije vidljivo“ smatra se da promatrač nekada nije svjestan da koristi računalo.

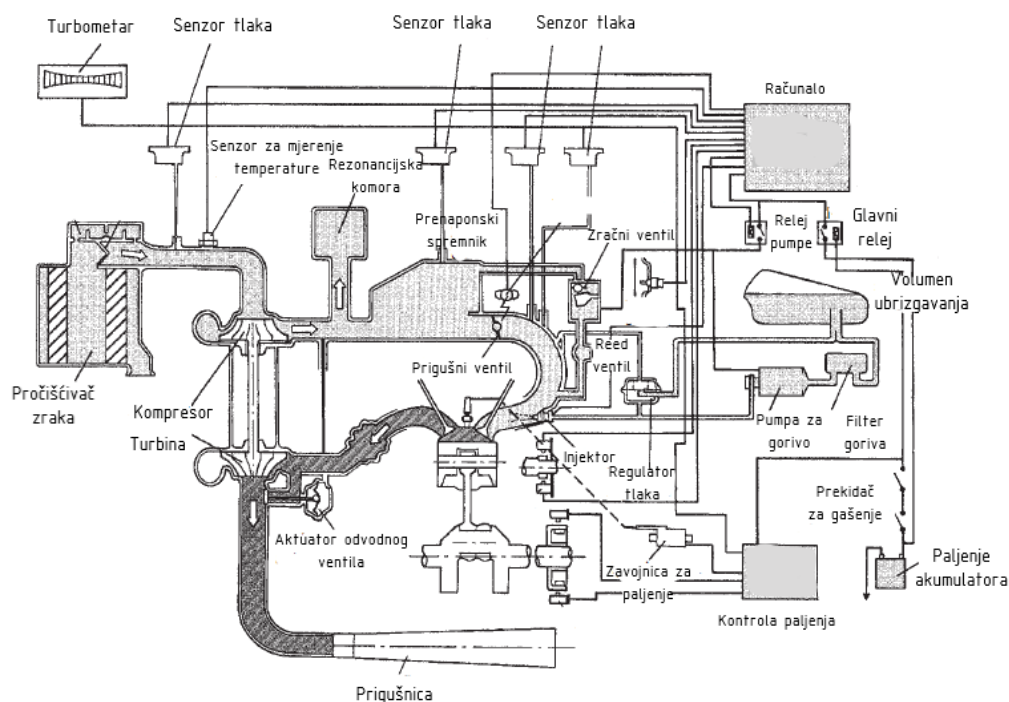
Dobar primjer primjene računala kod automatskog upravljanja je sustav automatskog slijetanja zrakoplova. Shema takvog upravljanja prikazana je na *Slika 8*.



Slika 8. Računalo kao upravljački element kod automatskog slijetanja zrakoplova [5]

Pozicija letjelice (visina, udaljenost od mjesta slijetanja i pomak s obzirom na središnjicu piste) i brzina koordiniraju se pomoću radiovalova s kontrolnim tornjem koji se nalazi na zemlji. Informacije o položaju letjelice šalju se na tri zasebna računala, koja individualno računaju pogrešku u putanji zrakoplova. Pogreška je razlika između izmjerene vrijednosti položaja (one u kojoj se zrakoplov stvarno nalazi) i one vrijednosti položaja koja je predviđena. Izlaz s računala su signali potrebni za pokretanje elemenata za upravljanje letjelicom i upravljanje potiskom motora. Razlog zbog kojeg se koriste tri ista računala koja rade na istim problemima je sigurnost. Ako jedno računalo pošalje krivi signal, upravljački sustav zrakoplova prepozna je signal s druga dva računala kao onaj pravi. To čini ovakve sustave izrazito pouzdanima [5].

Još jedan primjer primjene računala kao kontrolera nalazi se kod automobila. Cilj proizvođača automobila je povećati učinkovitost i poboljšati svojstva motora s unutarnjim izgaranjem te smanjiti emisiju štetnih plinova izgaranja. Slika 9 prikazuje strukturu računalom upravljano sustava za dovod goriva za optimalan rad motora.



Slika 9. Računalom upravljani sustav za dovod goriva kod automobila [5]

Temperatura i tlak zraka, kut zakreta koljenastog vratila i mnoge druge varijable potrebno je mjeriti nekoliko tisuća puta u sekundi tijekom rada motora. Ti ulazni parametri se potom unose u računalu, koje računa koliko je goriva potrebno dovesti u koji cilindar [5].

3.4. Kvantna računala

Tijekom zadnjih nekoliko desetljeća kvantna tehnologija postaje tema istraživanja mnogih znanstvenika, iako i dalje mora pokazati svoju korisnost u praksi. Interes industrije i dugotrajna ulaganja u kvantni hardver i razvoj softvera mogu se postići samo ako pogodnosti njihove primjene nadjačaju ogroman trošak izrade i upravljanja kvantnim računalima i njihovom infrastrukturom [6].

Prije opisa kvantnog računala, potrebno je objasniti pojam znanstvenog računanja. Znanstveno računanje je multidisciplinarno polje znanosti koje koristi napredne računalne simulacije za analizu kompleksnih problema u fizici, biologiji, kemiji, medicini, građevinarstvu itd. Uz eksperimentalnu i teorijsku znanost, često dobiva naziv treći stup znanstvenog istraživanja [6].

Znanstveno računanje se koristi u mnogim granama znanosti za [6]:

- predviđanje i optimiranje novih proizvoda poput kosilica, usisavača, automobila i letjelica prije faze izrade prvog prototipa
- predviđanje i optimiranje svojstava novih materijala, poput složenih kompozita ili grafena upravljanjem procesa nastajanja
- analizu rizika kod vremenskih nepogoda poput poplava ili potresa
- bolje teorijsko razumijevanje kompleksnih problema, poput postojanja crnih rupa ili uvid u svojstva tamne tvari te procesa koje je zasad nemoguće eksperimentalno utvrditi.

Zbog velikog porasta u snazi računala i efikasnosti korištenih algoritama, danas je moguće simulirati sve kompleksnije probleme. Iz toga proizlazi opasnost predstavljanja rezultata tih simulacija kao „pravih“ rješenja, iako su to samo aproksimacije. Uz takve rezultate uvijek je potrebno dati i procjenu greške, kako bi rezultate bilo moguće bolje ocijeniti. Razvojem složenijih matematičkih modela i upotrebom bržih računala može se steći dojam da su rezultati dobiveni simulacijama „apsolutna istina“, stoga ih je uvijek potrebno kritički interpretirati [6].

Izrada i održavanje kvantnih računala je težak zadatak i zahtjeva velika ulaganja, posebne prostore i specijalizirana znanja. Iz tog razloga pristup takvim računalima ima tek nekolicina znanstvenih instituta na svijetu. Kako bi se taj problem riješio i kako bi se usluga kvantnog računanja približila širem krugu korisnika, nastoji se omogućiti računanje putem usluga u oblaku. Prvi korak k tome napravio je IBM sa svojim računalom Q System One. To je prvo komercijalno računalo takve vrste i omogućava kvantno računanje izvan granica laboratorija. Njegov prikaz moguće je vidjeti na *Slika 10*.



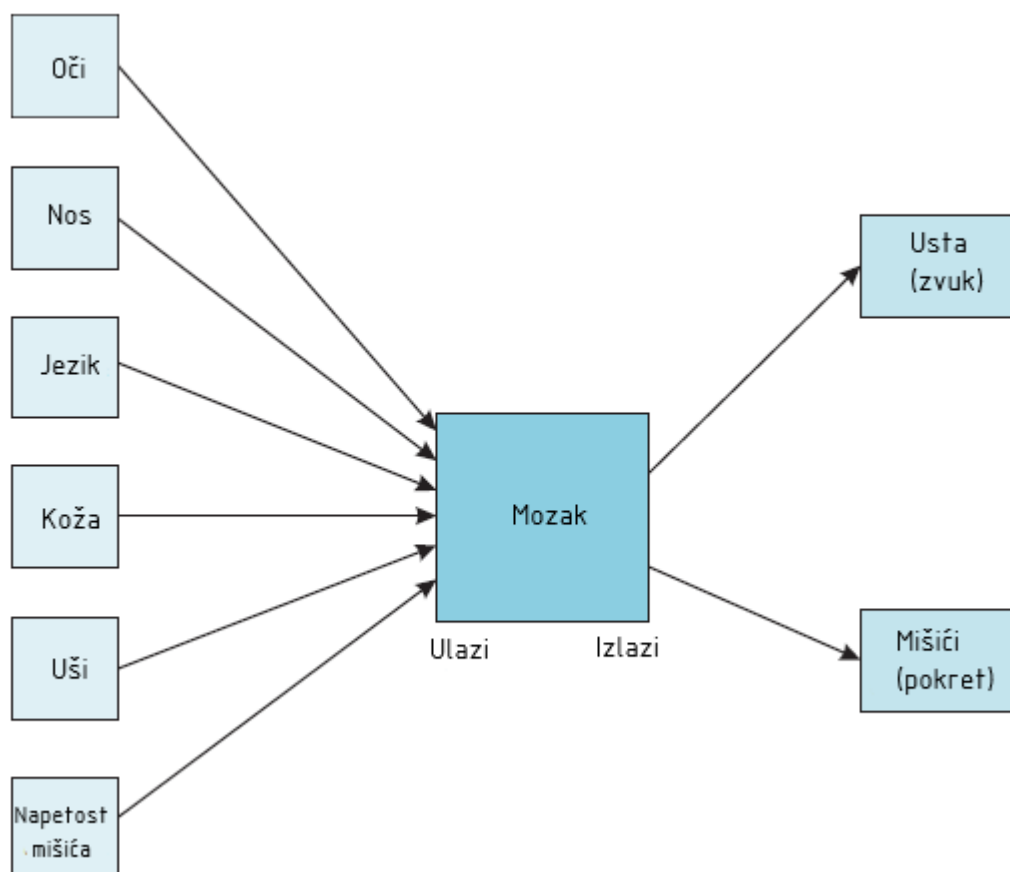
Slika 10. IBM-ovo Q System One kvantno računalo [7]

Iako već nalazi svoju primjenu u praćenju sigurnosti na internetu, bankarstvu i kemijskom inženjerstvu, kvantno računanje je i dalje neznatno iskorišteno. Interes se nastoji proširiti upotrebom u industrijama poput automobilske i elektroničke. Primjerice, kvantno računanje koristi se za predviđanje grešaka pri izradi mikroprocesora. Kod takvih naprednih proizvodnih postupaka greške su rijetke, ali skupe i zato ih se nastoji potpuno izbjeći [8].

Ovime se privodi kraju kratak pregled primjene i uloge računala u današnjem svijetu. U sljedećem poglavlju naglasak će biti stavljen na osobna računala i bit će dan prikaz komponenata koje čine jedno takvo računalo.

4. STRUKTURA OSOBNIH RAČUNALA

Zbog brzog napretka računalne tehnologije mnogi računalo uspoređuju s ljudima. *Slika 11* prikazuje kako je čovjeka moguće prikazati kao sustav koji prima informacije, obrađuje ih i šalje dalje.

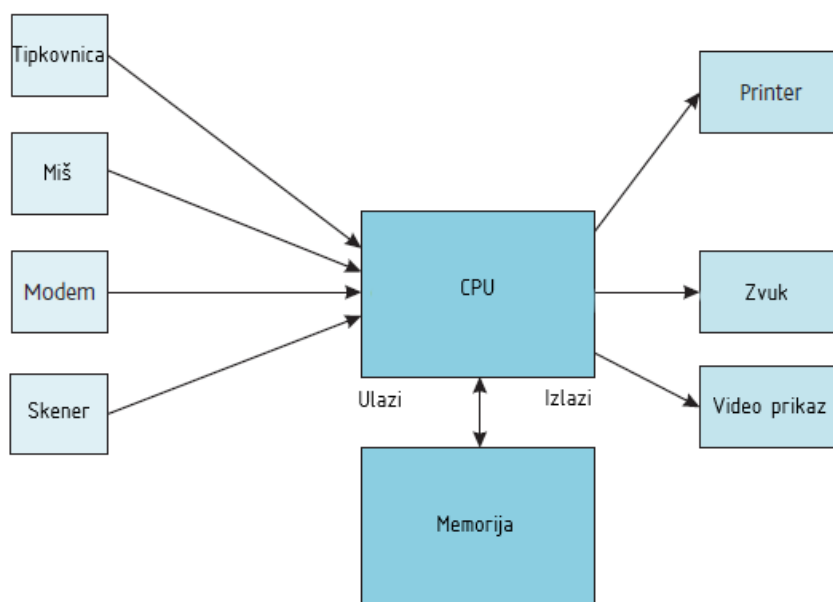


Slika 11. Shematski prikaz ljudskog bića [5]

Ulazi u sustav su vid (oči), njuh (nos), okus (jezik), dodir (koža), zvuk (uši) i položaj (napetost mišića). Mozak obrađuje informacije iz tih senzora i sprema nove informacije. Dio mozga koji se koristi kao spremište bitan je jer modificira rad mozga kroz proces koji se naziva učenje. Zato što mozak uči kad se susretne s novim podražajem, njegova reakcija na određeni podražaj nije uvijek ista [5].

Digitalno računalo, kao i mozak, posjeduje sposobnost pohrane i obrade informacije. Međutim, računala i dalje ne mogu oponašati kompleksne procese koji se zbivaju u mozgu. Postoji grana računalne znanosti koja se bavi dizajnom računala i programa koji pokušavaju oponašati ljudski mozak. Takva računala, odnosno programi nazivaju se neuronske mreže [5].

Na shematskom prikazu ljudskog bića, *Slika 11*, izlazi iz sustava su impulsi koji generiraju govor ili upravljaju mišićima potrebnim za upravljanje tijelom. *Slika 12* prikazuje analogiju čovjeka i računala. Računalo posjeduje sve ulaze kao i čovjek, uz još neka dodatna osjetila. Pomoću fotoelektričnih uređaja i radio-prijamnika računalo može osjetiti i prepoznati ultraljubičastu svjetlost kao i infracrvene zrake te radio valove. Izlazi računala su također svestraniji od ljudskih. Računala mogu generirati svjetlo (monitori), proizvesti zvuk (zvučnici) i čak toplinu (prolaskom struje kroz otpornike) [5].



Slika 12. Shematski prikaz strukture računala [5]

Pandan računala mozgu čovjeka je njegov procesor zajedno s memorijom (skladištem informacija). Pomoću njega, isto kao i ljudsko tijelo pomoću mozga, računalo obrađuje različite ulaze i na kraju proizvodi izlaze.

Kako bi periferija računala mogla normalno funkcionirati, procesor i ostale komponente koje se nalaze u „kutiji“ računala moraju skladno raditi. U nastavku je dan kratak pregled tih komponenti.

4.1. Mikroprocesor

Mikroprocesor (engl. *Central Processing Unit*, CPU) ključna je komponenta mnogih uređaja. On čini mozak uređaja poput mobitela, pametnih satova i velike većine današnje pametne opreme. U suštini mikroprocesor je čip koji se nalazi u posebnom utoru na matičnoj ploči. Njegova izrada podrazumijeva postavljanje milijarde sitnih tranzistora na jedan jedini čip i trend napretka prati veličinu tih tranzistora. Cilj je smanjiti tranzistor kako bi ih što više stalo na čip, čime raste brzina obrade podataka u mikroprocesoru.

Zadaća mikroprocesora je slušati naredbe koje dolaze iz određenih programa ili aplikacija. Mikroprocesor mora dohvatiti naredbu, prevesti je i na kraju provesti u djelo. Te naredbe se uvijek svode na jednostavne aritmetičke operacije, usporedbu brojeva ili premještanje brojeva u memoriji. U modernim sustavima opseg zadaća mikroprocesora je smanjen i prebačen na druge komponente, no on i dalje upravlja tim komponentama. Primjerice kada je potrebno prikazati video na ekranu, mikroprocesor daje naredbu grafičkoj kartici da to napravi.

U zadnjih dvadesetak godina mikroprocesori su doživjeli veliki skok u razvoju: od prve generacije koja je imala samo jednu jezgru do današnjih mikroprocesora koji imaju i do šezdeset i četiri jezgre ovisno o primjeni. Mikroprocesori različite primjene prikazani su na *Slika 13*.

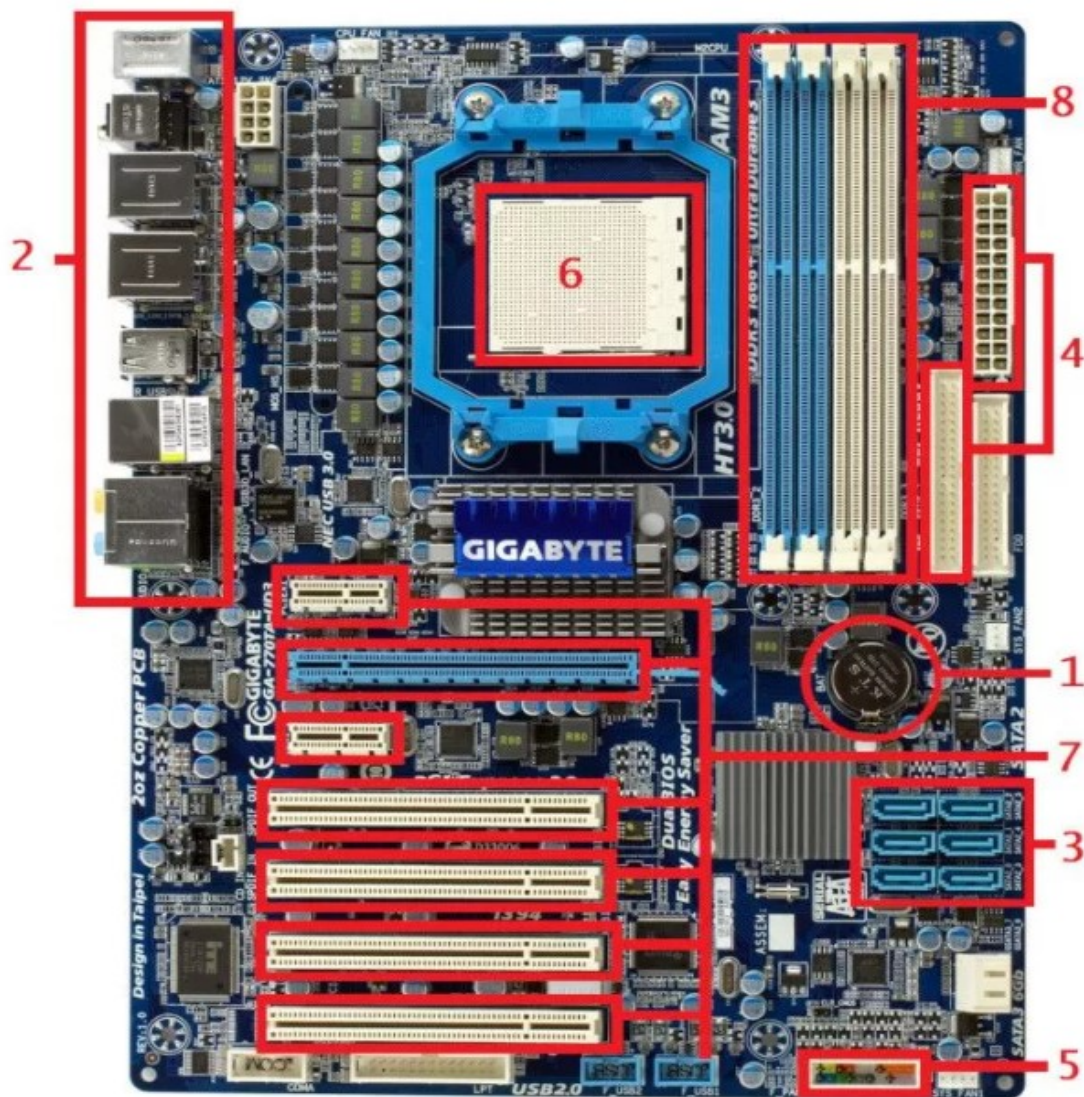


Slika 13. AMD Ryzen 3300X (lijevo) i AMD Ryzen Threadripper 3990X (desno) [9][10]

S lijeve strane prikazan je mikroprocesor za svakodnevnu upotrebu, dok je s desne strane prikazan mikroprocesor za profesionalnu upotrebu koji može podnijeti veća opterećenja.

4.2. Matična ploča

Matična ploča je kontroler čija je glavna zadaća omogućiti komunikaciju između procesora, radne memorije, pohrane podataka, grafičke kartice i ostalih komponenti. Isto tako, zadaća joj je preraspodijeliti napon koji dobiva iz napajanja na ostale komponente. Na *Slika 14* prikazana je struktura jedne matične ploče.

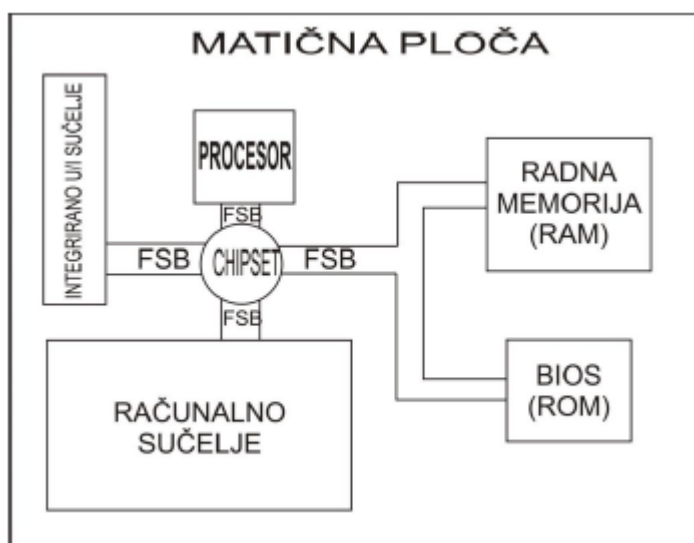


Slika 14. Struktura matične ploče proizvođača Gigabyte [11]

Na slici su izdvojene sljedeće komponente [11]:

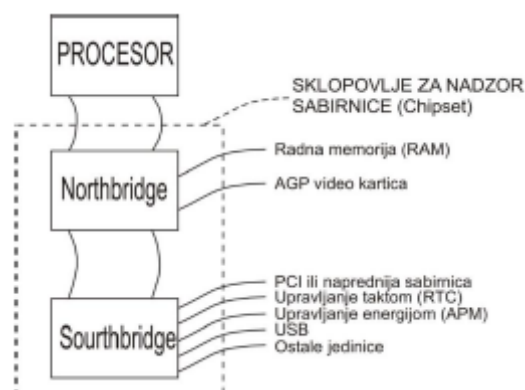
- 1) CMOS-baterija (čuva informacije kada je računalo ugašeno)
- 2) osnovni ulazi i izlazi (utori za tipkovnicu, miš itd.)
- 3) SATA-konektori (na njih se spaja uređaj za pohranu podataka)
- 4) konektori za napajanje sustava
- 5) konektori prednjih ulaza/izlaza (gumb za uključivanje računala)
- 6) utor za procesor
- 7) utori za grafičku karticu i druge dodatke poput zvučnih ili mrežnih kartica
- 8) utori za radnu memoriju.

Postoje različite vrste matičnih ploča. Njihova sistematizacija se uglavnom provodi prema veličini te se prema njima odabire i veličina kućišta. Radi lakšeg poimanja sastava matične ploče, na *Slika 15* može se vidjeti i njen shematski prikaz.



Slika 15. Shematski prikaz matične ploče [12]

U srcu matične ploče nalazi se tzv. „čipset“ (engl. *Chipset*), tj. skup elektroničkih komponenti čija je glavna zadaća nadzor i upravljanje radom sabirnice (engl. *Front Side Bus*, FSB). Sabirnica, kao što je vidljivo na slici, povezuje elemente na matičnoj ploči i bitna je za pravovremenu izmjenu informacija između tih elemenata. Sam čipset čine dvije ključne komponente, Northbridge i Southbridge kao što je prikazano na *Slika 16* [12].



Slika 16. Komponente čipseta [12]

Sa slike se može uočiti da svaka od komponenti upravlja određenom vrstom informacija.

4.3. Radna memorija

Radna memorija (engl. *Random Access Memory*, RAM) ključna je komponenta osobnog računala. Ona daje programima i aplikacijama mjesto za kratkotrajnu pohranu i pristup podacima. RAM pohranjuje podatke koje računalo aktivno koristi i time omogućuje brži pristup tim podacima. Što više programa računalo koristi odjednom, potrebno je više radne memorije. Brzina cijelog sustava direktno je povezana s količinom radne memorije koja je ugrađena. Uz premalo memorije sustav će sporo obavljati zadatke, dok previše memorije ne znači nužno i bolje rezultate.

Instalacija radne memorije je relativno jednostavna budući da su utori posebno napravljeni za svaku novu generaciju kako ne bi došlo do zabune. Na pločici radne memorije postoji jedan prerez koji je odmaknut od centra i odgovara utoru na matičnoj ploči s istim takvim prerezom, kao što je moguće vidjeti na

Slika 17.

U nekim slučajevima, iako pločice fizički odgovaraju, postoji mogućnost da nisu kompatibilne jer postoje pločice koje mogu izmjenjivati podatke samo s procesorom određenog proizvođača.



Slika 17. Pločice radne memorije proizvođača Corsair [13]

Na slici su prikazani trenutno aktualni memorijski moduli. U nastavku će biti pojašnjen njihov razvitak od najjednostavnijih, sporih modula do današnjih izrazito brzih modula.

4.3.1. Vrste RAM-modula

Ubrzani razvoj novih računalnih tehnologija uvjetovao je i razvoj radne memorije. U početku moduli radne memorije bili su integrirani u matičnim pločama, dok su današnje izvedbe modularne i mogu se izmjenjivati između više sustava.

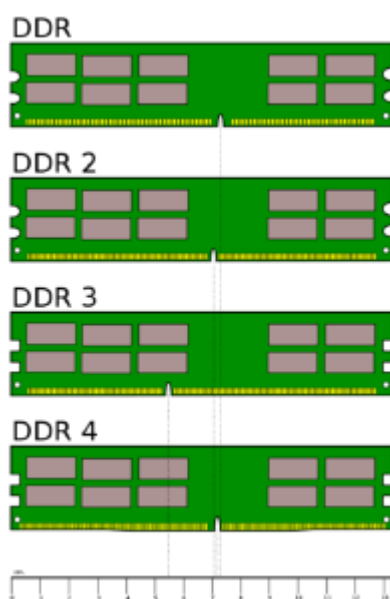
Tehnologija izvedbe naziva se DDR (engl. *Double Data Rate*) SDRAM (engl. *Synchronous Dynamic Random Access Memory*) te se dijeli na više vrsta. Razlika između njih je uglavnom u broju pinova te brzini propusnosti informacija [12].

Na Slici 18 može se vidjeti prikaz memorijskih modula od prvih integriranih modela do onih koji se danas pretežito koriste. Primjećuje se razlika u broju pinova, ali i u veličini samih modula.



Slika 18. Razvoj RAM-modula [12]

Uz razliku u brzini još jedna bitna razlika između pojedinih modula je položaj proreza koji predstavlja prekid u nizu pinova i može se jasnije vidjeti na *Slika 19*.



Slika 19. Položaj proreza kod različitih RAM-modula [12]

Kao što je već naglašeno, prorezi u modulima sprječavaju priključak modula u matičnu ploču koja ne podržava tu vrstu memorije.

4.4. Uređaji za pohranu podataka

Razlika između uređaja za pohranu podataka i radne memorije je u njihovoj funkciji. Dok radna memorija trenutno sprema podatke koji se aktivno koriste, ovi uređaji služe za trajnu pohranu i zaštitu tih podataka. U pravilu se mogu podijeliti na dvije vrste: HDD (engl. *Hard Disk Drive*) i SSD (engl. *Solid State Drive*).

HDD ili tvrdi disk najčešće se koristi kao medij za pohranu podataka. Koristi se i kod stolnih računala i kod prijenosnih računala te predstavlja jeftiniju opciju u usporedbi s SSD-om. Sastoji se od jednog ili više diskova naslaganih jedni na druge. Svaki disk premazan je magnetnim medijem, na kojeg se utiskuju podatci pomoću igle.

U slučaju potrebe za više prostora za pohranu moguće je nadograditi računalo ugradnjom dodatnog tvrdog diska u vanjskoj ili unutarnjoj izvedbi. Dodatni tvrdi disk preporučuje se korisnicima koji rade s velikim datotekama budući da ih radna memorija ne može održavati kod aktivne upotrebe. Tipičan tvrdi disk može se vidjeti na *Slika 20*.



Slika 20. Tvrdi disk bez kućišta [14]

SSD s druge strane pohranjuje podatke na pouzdaniju, tzv. *flash*-memoriju za razliku od HDD-a. Budući da ne posjeduju pokretne dijelove, odlikuje ih tiši rad i predviđa se da će u budućnosti u potpunosti zamijeniti tvrde diskove. Ta predviđanja temelje se na prednostima SSD-a poput veće robusnosti i sigurnosti podataka te smanjene potrošnje energije, dok je jedini nedostatak njihova cijena. Na *Slika 21* prikazan je jedan SSD.



Slika 21. SSD proizvođača Micron [15]

Uz SSD sa slike postoje i novije verzije koje posjeduju manji format, veću brzinu, ali i višu cijenu.

4.5. Napajanje

Zadaća napajanja osobnih računala je pretvoriti izmjeničnu struju iz naponske mreže u istosmjernu struju niskog napona te opskrba svih komponenti koje se nalaze u kućištu. Ovisno o zahtjevima sustava potrebna su napajanja određene snage. Najveći potrošači snage u jednom takvom sustavu su grafička kartica i procesor, budući da oni obavljaju većinu rada. Sukladno odabiru te dvije komponente, odabire se i samo napajanje.

Kako bi bio osiguran stabilan rad sustava, napajanja posjeduju određene zaštite, od kojih su najbitnije:

- zaštita od kratkog spoja
- zaštita od preopterećenja
- zaštita od previsokog ili preniskog napona
- zaštita od prevelike struje.

U uporabi danas postoje dva glavna tipa napajanja. Jedno od njih dolazi s vodičima (kablovima) koji su integrirani u sklopu napajanja i nisu odvojivi, dok je drugo modularno i kod kojeg se vodiči mogu izvaditi. Razlika ta dva tipa napajanja prikazana je na *Slika 22*.



Slika 22. Modularno napajanje (lijevo) i napajanje s integriranim kablovima (desno) [16]

Velika prednost modularnih napajanja je odvajanje vodiča koji nisu potrebni. Višak vodiča može predstavljati prepreku ventilaciji ili u ekstremnim slučajevima (npr. kod loše konstrukcije napajanja) kratki spoj cijelog sustava.

4.5.1. Energetska učinkovitost napajanja

Kod pretvorbe izmjenične struje u istosmjernu dolazi do određenih gubitaka koji se očituju kao toplina koju generiraju komponente napajanja. Količinu otpadne topline moguće je umanjiti upotrebom kvalitetnijih komponenti i stoga je donesen standard koji definira i ograničava tu pretvorbu energije. Vrijednosti određene certifikatom „80 Plus“ prikazane su u *Tablica 3*.

Tablica 3. Dio vrijednosti iskoristivosti određenih certifikatom „80 Plus“ [17]

Iskoristivost	115 V			230 V		
Opterećenje	20 %	50 %	100 %	20 %	50 %	100 %
80 PLUS Silver	85 %	88 %	85 %	85 %	89 %	85 %
80 PLUS Gold	87 %	90 %	87 %	88 %	92 %	88 %
80 PLUS Platinum	90 %	92 %	89 %	90 %	94 %	91 %

Certifikat „80 Plus“ u suštini znači da će primjerice napajanje od 1000 W, iskoristivosti 80 %, u slučaju 100 % opterećenja iz mreže povući 1000 W snage i sustavu predati 800 W, dok će se preostalih 200 W pretvoriti u toplinu.

Naravno, cilj je postići pretvorbu uz što manje gubitaka, ali takve velike iskoristivosti je teško postići. Zato se provode testiranja kako bi se provjerile stvarne vrijednosti gubitaka i koliko se one razlikuju od propisanih. Jedno takvo istraživanje provedeno je u [17] gdje je testirano napajanje koje posjeduje „80 Plus Platinum“ certificiranu razinu učinkovitosti. Rezultati su prikazani u *Tablica 4*.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja učinkovitosti napajanja [17]

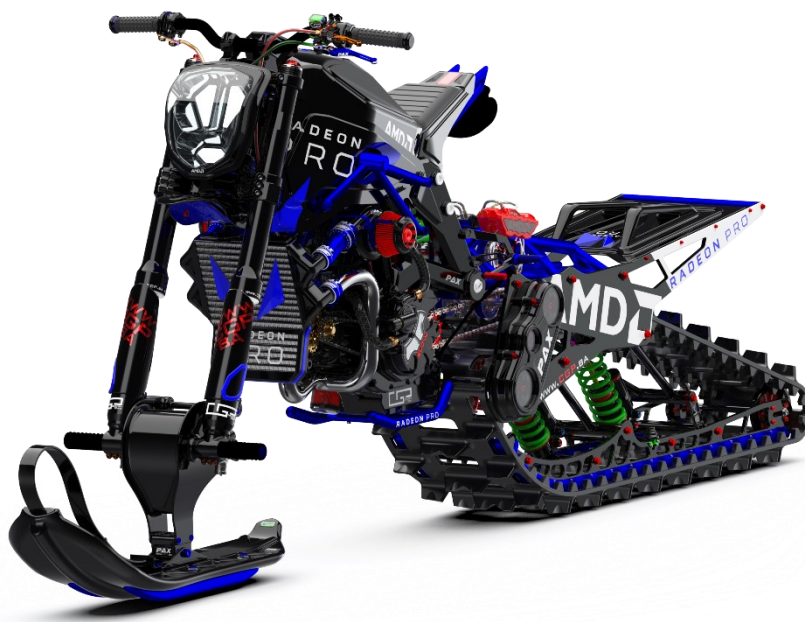
Napon	Opterećenje (%)	Izmjerena učinkovitost (%)	Propisana učinkovitost (%)
115 V	20	91,60	90
	50	93,17	92
	100	89,66	89
230 V	20	93,09	90
	50	94,51	94
	100	91,64	91

Iz tablice se može vidjeti da se izmjerena i propisana učinkovitost neznatno razlikuju te da napajanje zadovoljava certifikat „80 Plus Platinum“.

4.6. Grafička kartica

Grafički procesor ili grafička procesna jedinica (engl. *Graphics Processing Unit*, GPU) važna je komponenta suvremenih računala. Izvorna i još uvijek temeljna funkcija joj je generiranje dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih grafičkih sadržaja, odnosno slike i videa kao podrške suvremenim grafičkim operacijskim sustavima, grafičkim korisničkim sučeljima, video-igrama te vizualnim aplikacijama za obradu slike i reprodukciju videa. No visoka performansa današnjih grafičkih procesora sve se više iskorištava i za računanje opće namjene, bez ograničavanja samo na generiranje grafičkih sadržaja [18].

Primjerice, u području strojarstva grafičke kartice potrebne su kod prikaza i modeliranja u programima poput Solidworks. Na *Slika 23* se može vidjeti primjer jedne takve primjene.



Slika 23. Prikaz kompleksnog modela u programu Solidworks [19]

Prikaz tako zahtjevnog trodimenzionalnog sklopa bez grafičke kartice određene brzine nije moguć ili u najboljem slučaju zahtjeva od korisnika neprihvatljivu količinu vremena.

Uz već navedeno, grafičke kartice uvelike olakšavaju izvođenje računalnih simulacija.

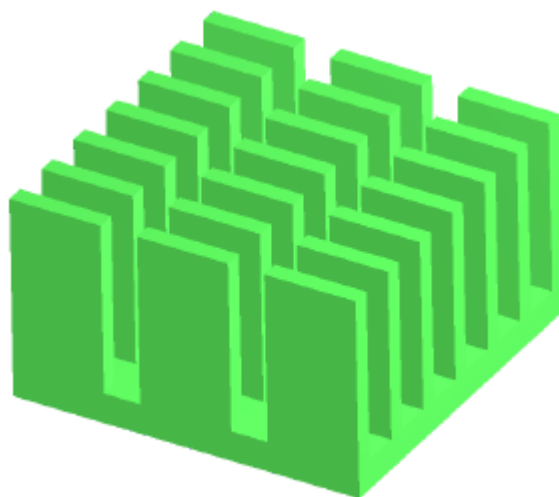
4.6.1. CFD-simulacije

CFD-simulacije (engl. *Computer Fluid Dynamics*) sve se više koriste u računalnoj industriji i postale su ključan dio konstruiranja dijelova koji su toplinski opterećeni. Upotrebom mikroprocesora i određenog softvera moguće je dobiti rezultate tih simulacija u okviru nekoliko sati ili čak i dana ovisno o zahtjevnosti računskih operacija potrebnih za provedbu zadatka. To vrijeme je potrebno skratiti kako bi se povećala produktivnost timova koji rade na rješavanju problema [20].

Iako se CPU koristi za računanje kod većine sustava, u posljednjih nekoliko godina ta se zadaća prebacuje na komponente koje imaju mogućnost heterogenog računanja od kojih prevladava GPU. On zbog svoje pretežito paralelne arhitekture može obraditi ogromnu količinu podataka odjednom te se pokazao kao dobar izbor u području koje zahtijeva računanje visokih performansi (engl. *High Performance Computing*, HPC) kojem pripada i CFD [20].

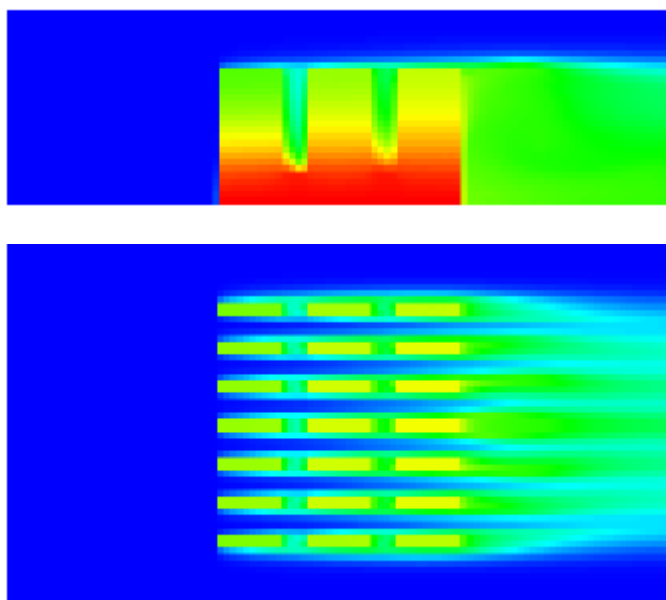
CPU je zbog svoje serijske arhitekture ograničen radnim taktom jedne jezgre, dok GPU oduvijek koristi više jezgri. Iz tog razloga proizvodnja današnjih mikroprocesora isto prelazi na paralelnu arhitekturu, čime će se razlika u vremenu računanja bitno smanjiti. Ta razlika može se uočiti na primjeru jedne CFD simulacije.

Istraživanje je provedeno prema [20], na elektroničkom izvoru topline. Korišten je pasivni hladnjak, kojeg je moguće vidjeti na *Slika 24* te je sklop stavljen u zračni tunel radi kontrole protoka zraka.



Slika 24. Model pasivnog hladnjaka [20]

Kako zrak prolazi uz površinu hladnjaka, tako se odvodi toplina s izvora topline koji je u spoju s hladnjakom. Prije konstrukcije hladnjaka provedena je simulacija prijelaza topline na okolni zrak. Vizualni prikaz može se vidjeti na *Slika 25*.

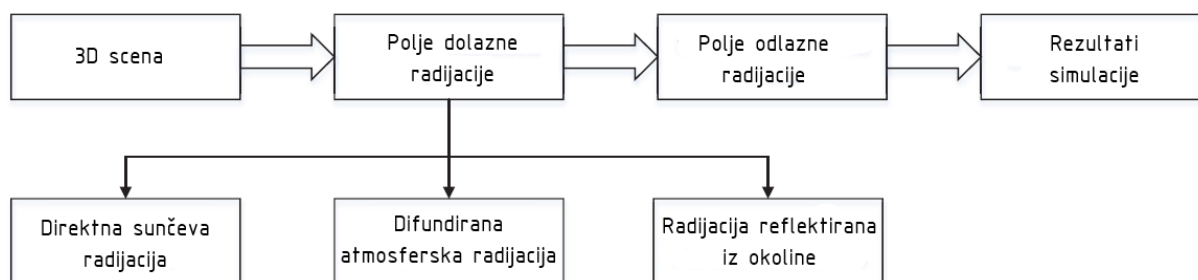


Slika 25. Prikaz rasporeda temperature na hladnjaku i okolnom zraku; nacrt (gore), tlocrt (dolje) [20]

Simulacija je provedena na dva načina. Prvi način je koristio snagu CPU-a, dok je u drugom načinu korišten GPU. Iako su oba predviđjela istu temperaturu, CPU je utrošio 2628 sekundi (43,8 min), a GPU 740 sekundi (12,3 min). Kada bi pred njih bio stavljen još kompleksniji slučaj, ta razlika bi bila znatno veća. Time je dokazana prednost paralelnog računanja koju pružaju grafički procesori [20].

4.6.2. Simulacija radijacije tla

Kao i prije spomenute CFD-simulacije, paralelnim računanjem mogu se poboljšati i puno kompleksniji modeli. Jedan od tih modela je i simulacija radijacije tla prouzrokovana prirodnom toplinskom radijacijom (zračenjem) iz okoline. U istraživanju prema [21], napravljena je simulacija u svrhu testiranja efikasnosti paralelnog računanja. Shematski prikaz modela moguće je vidjeti na *Slika 26*.



Slika 26. Shematski prikaz simulacije radijacije tla [21]

Na slici se može vidjeti da model polazi od pretpostavke da se ukupno polje radijacije nekog tijela dijeli na odlaznu i dolaznu radijaciju, koju čine tri komponente. Prva od njih je direktna Sunčeva radijacija ovisna o položaju Sunca s obzirom na objekt i atmosferskim uvjetima. Druga, difundirana atmosferska radijacija je isto Sunčeva radijacija, ali raspršena u molekulama koje se nalaze u atmosferi. Konačno, radijaciju reflektiranu iz okoline čini radijacija reflektirana iz okoline blizu objekta. Simulacija je podijeljena na tri video scene od kojih svaka sljedeća zahtijeva više računanja. Rezultati simulacije prikazani su u *Tablica 5* [21].

Tablica 5. Rezultati simulacije modela radijacije tla [21]

Scena	Broj izvora radijacije	Vrijeme računanja za CPU (min)	Vrijeme računanja za GPU (min)
Scena 1	2400	154	13
Scena 2	9800	935	76
Scena 3	29800	12841	664

Iz rezultata je vidljivo da je uz upotrebu paralelnog računanja simulacije koje bi inače trajale tjedan dana moguće svesti na svega nekoliko sati, ovisno o vrsti problema u pitanju.

4.7. Sustav za hlađenje

Sustav za hlađenje i njegove komponente bit će detaljnije obrađeni u posebnom poglavlju.

5. UPOTREBA SILICIJA U ELEKTRONICI

Pri izradi mikroprocesora pretežito se koriste silicij, polimeri i bakar. Zbog svojih povoljnih svojstava i visoke dostupnosti, silicij se koristi za izradu tranzistora koji čine ključni dio za izmjenu informacija u mikroprocesoru. Postupak proizvodnje silicija od obrade kvarcnog pijeska i rasta kristala silicija do izrade ingota čistog silicija je u posljednjih nekoliko godina detaljno razvijen. Time se omogućava konstantna opskrba tržišta sirovinom potrebnom za izradu velike većine elektroničkih komponenti.

U nastavku će biti prikazana neka svojstva silicija bitna kod primjene u MEMS-u (engl. *Micro Electro Mechanical Systems*) te dio postupka izrade pločica silicija.

5.1. Svojstva silicija

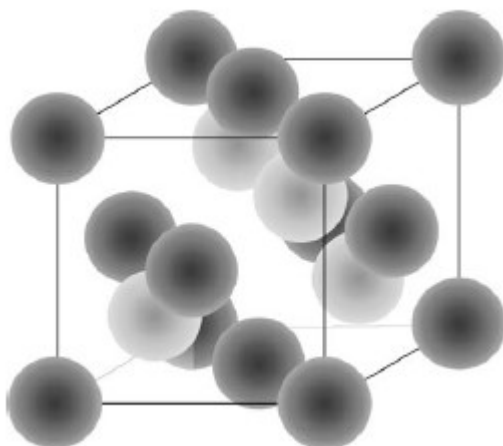
Silicij pripada skupini polumetala te je nakon kisika drugi najzastupljeniji element na Zemlji. Silicij čini veliki dio Zemljine kore i u prirodi ga se može pronaći u raznim spojevima. Većina silicija koristi se za izradu fotonaponskih elemenata, gdje je kvaliteta niža od one predviđene za poluvodičku industriju. Koriste se dvije vrste poluvodiča, ovisno o legirnim elementima. Legirni elementi koji se nalaze u N-tipu poluvodiča su antimon, arsen i fosfor, dok je P-tip legiran borom [22].

Najveći udio silicija dobiva se iz silicijevog dioksida Siemensovom postupkom. Tim postupkom se silicijev dioksid reducira u elektrolučnoj peći, iz čega se dobije triklorosilan (HCl_3Si). On se potom destilira kako bi se izlučile nečistoće i stavlja se u reaktor zajedno s vodikom, gdje se raspada na niti koje čine šipku polisilicija. Ta šipka polisilicija se kasnije koristi kao sirovina za rast kristala silicija [22].

U području MEMS-a silicij se koristi zbog svojstava poput promjenjivog otpora ovisno o udjelu legirnih elemenata, inertnosti, elastičnosti pri sobnoj temperaturi itd. Neka od tih svojstava prikazana su u nastavku.

5.1.1. Struktura kristala silicija

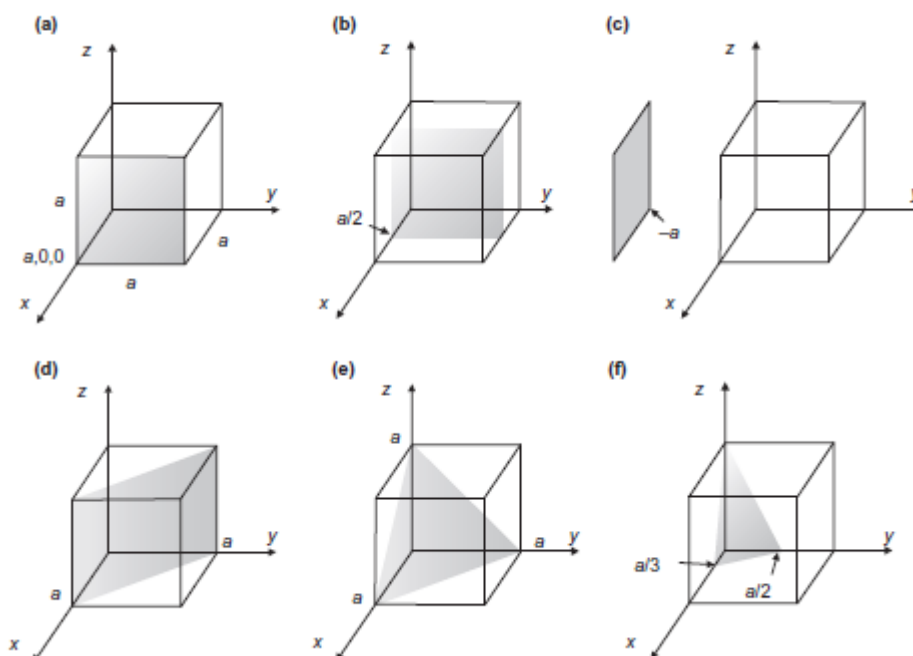
Silicij čine plošno centrirane kubične (engl. *Face-Centered Cubic*, FCC) jedinične ćelije u kojima su atomi vezani kovalentnim vezama. Položaj atoma silicija unutar jedinične ćelije može se prikazati tamnijim kuglama na modelu sa *Slika 27*.



Slika 27. Položaj atoma silicija unutar jedinične ćelije silicija [22]

U prazninama kristalne rešetke vrlo često su intersticijski otopljeni kemijski elementi poput kisika i ugljika, koji se smatraju nečistoćama.

Način na koji se mogu označiti pravci i kristalne ravnine unutar rešetke je upotreba Millerovih indeksa, prikazano na Slika 28.



Slika 28. Millerovi indeksi [22]

Tako se upotrebom Millerovih indeksa za ravninu na slici pod (a) dobiva oznaka (1,0,0) budući da ravnina siječe os x u točki $a,0,0$, gdje je a parametar jedinične ćelije. S druge strane, za ravninu pod (f) dobiva se oznaka (3,2,1), gdje su odsječci na pripadajućim osima $a/3,0,0$ (os x); $0,a/2,0$ (os y); $0,0,a$ (os z).

Pravilno označivanje kristalnih ravnina i pravaca omogućava praćenje svojstava materijala ovisno o smjeru vanjskih djelovanja, budući da su svojstva u različitim smjerovima često drugačija. Time se prati deformacija koja se formira na ravninama najgušće zaposjednutosti atomima u smjeru istoimenih pravaca. Te ravnine se tada nazivaju kliznim ravninama, a pravci kliznim pravcima. Tako je primjerice FCC-rešetka silicija klizni sustav koji čine 4 klizne ravnine i 3 klizna pravca za svaku od njih. Veći broj kliznih sustava znači da je materijal spreman podnijeti veću plastičnu deformaciju prije pojave loma [23].

5.1.2. Toplinska svojstva

Budući da se silicij koristi u elektronici kao poluvodič, kroz njega nerijetko prolazi struja velike jakosti. Prolaskom struje kroz materijal on se zagrijava i počinje otpuštati toplinu. Iz tog razloga potrebno je upoznati se s toplinskim svojstvima silicija, od kojih su ona glavna prikazana u *Tablica 6*.

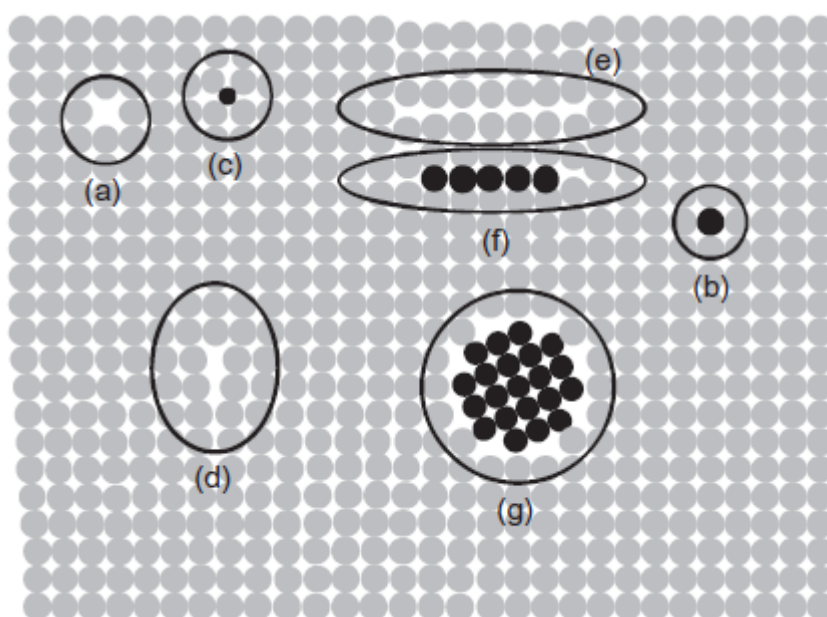
Tablica 6. Toplinska svojstva silicija [24]

T_s (K)	c_p (J/(kg K))	α ($10^{-6}/K$)	K (W/ m K)
200	557	1,406	266
220	597	1,715	/
240	632	1,986	/
260	665	2,223	/
280	691	2,432	/
300	713	2,616	156
400	785	3,253	105

Iz tablice se može primijetiti da s porastom temperature specifični toplinski kapacitet i koeficijent toplinskog rastezanja rastu, dok koeficijent prijelaza topline pada.

5.1.3. Mehanička svojstva

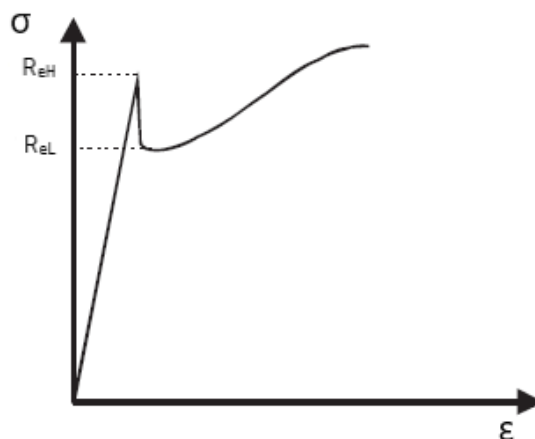
Silicij je tvrd i krhak materijal te se pod utjecajem naprezanja njegova kristalna rešetka elastično deformira do loma uz pojavu značajne plastične deformacije. Temeljem toga, defekti poput ogrebotina, udubina i ostalih mehaničkih oštećenja mogu prouzročiti preuranjen lom zbog zareznog djelovanja. Defekti kristalne rešetke koji uzrokuju zarežno djelovanje prikazani su na *Slika 29*.



Slika 29. Mogući defekti kristalne rešetke silicija [22]

Pod (a) se mogu vidjeti vakancije u kristalnoj rešetki, dok (b) i (c) prikazuju intersticijske atome. Dio slike pod (d) prikazuje bridnu dislokaciju, a (e) i (f) pogreške nastale nepravilnim slaganjem atoma. Konačno, pod (g) se mogu vidjeti precipitati stranih atoma [22].

Pri povišenim temperaturama silicij se počinje plastično deformirati. Kada vrijednost naprezanja prođe gornju granicu tečenja, dislokacije se počinju množiti i primicati jedna drugoj. Ta pojava uzrokuje otvrdnjavanje kristalne rešetke i time se povećava vrijednost naprezanja potrebnog za daljnje propagiranje deformacije te u konačnici lom. Naprezanje potrebno da dođe do loma prikazano je na *Slika 30*.



Slika 30. Dijagram naprezanje-deformacija za silicij [22]

Na dijagramu su sa R_{eH} i R_{eL} označene gornja i donja granica tečenja materijala.

5.2. Produvodnja mikroprocesora

Nakon rasta kristala silicija, sljedeći korak u proizvodnji mikroprocesora je izrada pločica silicija. Ovisno o kasnijoj primjeni koriste se različiti postupci, ali oni osnovni se ne mijenjaju. Pločice se izrezuju iz ingota, potom oblikuju, obrađuju i čiste prije nego krenu u daljnju proizvodnju [25]. Osnovni pregled koraka izrade pločica silicija prikazan je na *Slika 31*.



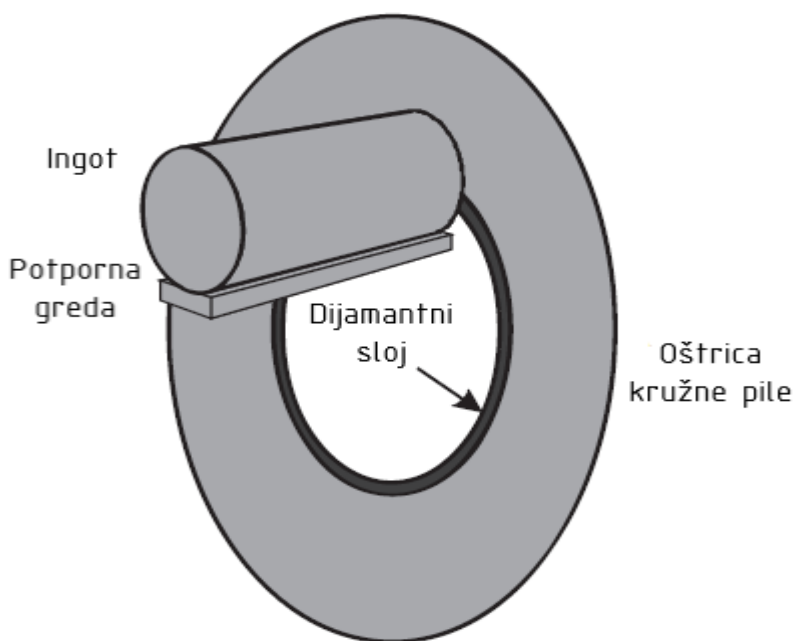
Slika 31. Shema izrade pločica silicija [25]

U nastavku će biti detaljnije opisani koraci proizvodnje pločica silicija.

5.2.1. Odrezivanje i oblikovanje ingota

Prvi korak podrazumijeva odrezivanje glave i repa ingota budući da se njihova svojstva razlikuju od cilindričnog dijela ingota. Nakon toga se ingot reže u dijelove jednakih dimenzija i obrađuje cilindričnim brušenjem kako bi se postigao kružni oblik. Dobiveni ingot se zatim reže na tanke pločice, prije čega je potrebno učvrstiti komad ingota potpornom gredom izrađenom od keramike. Rezanje je moguće izvesti na dva načina. Prvi koristi kružnu pilu i time se dobivaju pojedinačne pločice. Drugi način se izvodi ojačanom žicom i njime je moguće obraditi cijeli ingot odjednom [25].

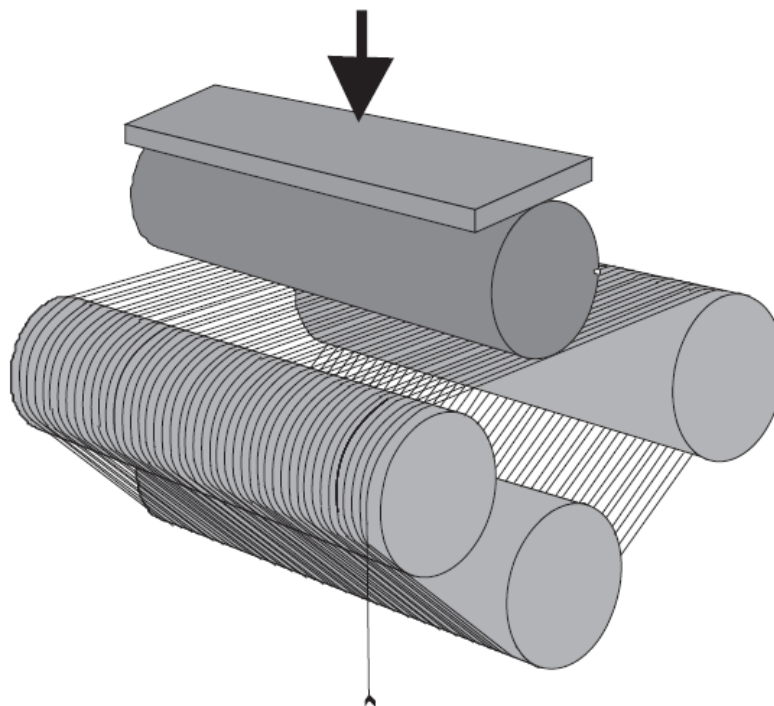
Kod kružnog piljenja koristi se tanka oštrica ojačana dijamantnim slojem. Prolaskom pile kroz ingot nastaje zaobljenje koje se uklanja daljnjom obradom. Postupak kružnog piljenja ingota prikazan je na *Slika 32*.



Slika 32. Kružno piljenje ingota [25]

Prednost ovog postupka je dobra fleksibilnost u pojedinačnoj proizvodnji. Moguće je udovoljiti specifičnim zahtjevima obrade te se koristi za obradu kraćih ingota. S druge strane, ovim postupkom nije moguće dobiti tanke pločice i zbog toga se uglavnom koristi rezanje žicom [25].

Rezanje žicom omogućava istovremenu obradu stotina pločica ovisno o duljini ingota i željenom promjeru pločice. Rezanje se provodi pomoću žice obložene abrazivnim premazom koji sadrži silicijev karbid. Žica se dobavlja preko kalema samo s jedne strane ingota i kada je ponestane, smjer kretanja žice se mijenja [25]. Sam princip obrade može se vidjeti na *Slika 33*.



Slika 33. Rezanje ingota žicom [25]

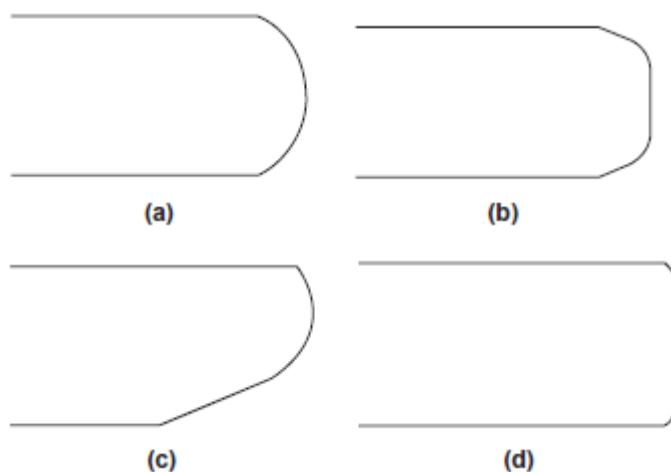
Prednost rezanja žicom je dobivanje tanjih pločica koje se pretežito koriste kod proizvodnje današnjih mikroprocesora. U novijoj varijanti ovog postupka koristi se i žica ojačana dijamantnim premazom. To omogućava korištenje vode kao sredstva za hlađenje, čime se poboljšava kvaliteta površine pločice silicija i olakšava gospodarenje otpadom nakon obrade. Unatoč tome, pločice dobivene rezanjem pomoću takve žice sklone su pucanju i zbog toga se taj postupak rjeđe koristi [25].

Neovisno o postupku rezanja koji se koristi, nakon rezanja pločice silicija se čiste i uklanja se ostatak potporne grede. Uz čišćenje provodi se i nagrizanje kako bi se uklonile nečistoće i manja oštećenja na površini te umanjila zaostala naprezanja prouzročena obradom [25].

Prije daljnje obrade pločice silicija potrebno je označiti ovisno o svojstvima koja određena pločica posjeduje. Za označivanje se koristi laser kojim se utiskuju standardizirani simboli.

5.2.2. Oblikovanje ruba i brušenje

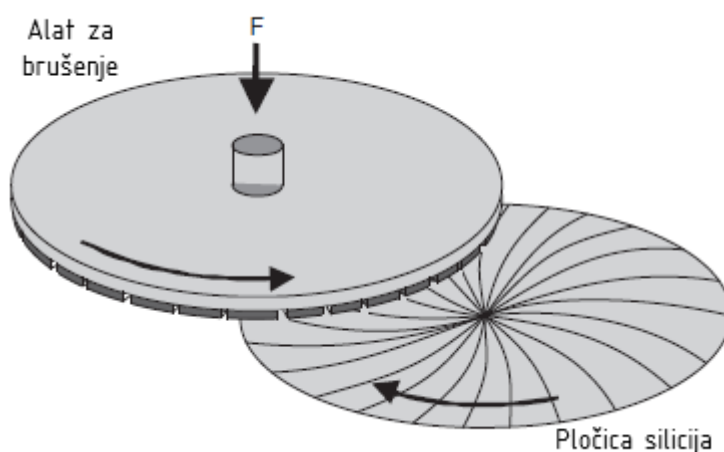
Nakon rezanja pločice silicija imaju oštre rubove, zbog čega ih je lako otkrhnuti. Iz tog razloga, oštri rubovi se zaobljuju, čime se dobiva jedan od oblika prikazanih na *Slika 34*.



Slika 34. Rubni profili pločice silicija [25]

Profili prikazani na slici pod (a) i (b) su češće korišteni, dok su oni prikazani pod (c) i (d) optimirani za procese koji zahtijevaju dodatno stanjivanje pločica.

Kako bi se smanjila prevelika odstupanja u debljini pločice, nakon oblikovanja ruba potrebno je provesti operaciju brušenja. Time se postiže zadovoljavajuća hrapavost površine i umanjuju se oštećenja na površini materijala. Sam postupak može se vidjeti na *Slika 35*.



Slika 35. Brušenje pločice silicija [25]

Kao alat koriste se dijamantni segmenti, koji ostavljaju plitke oznake na površini u smjeru obrade.

5.2.3. Nagrizanje

Brušenje ostavlja oštećenja na površini pločice silicija i stoga se u koraku nagrizanja ta oštećenja nastoje ukloniti. Uz to, nagrizanjem se pločica čisti od nečistoća nastalih u prijašnjim operacijama. Koriste se različite kiseline i lužine, od kojih svaka ima svoje prednosti i nedostatke.

Korištenjem kiseline dobiva se izrazito glatka površina te je takav postupak pogodan za obradu visokolegiranog silicija. Pretežito se koriste fluorovodična i dušična kiselina te se dodaju aditivi poput amonijaka koji pospješuju nagrizanje površine [25].

Druga opcija su lužine i ovdje se najčešće koristi topla otopina kalijevog hidroksida. Lužinama se dobije grublja površina u usporedbi s upotrebom kiseline, ali dobiveni nusprodukti nisu toliko štetni za okolinu [25].

5.2.4. Poliranje i operacije u čistoj sobi

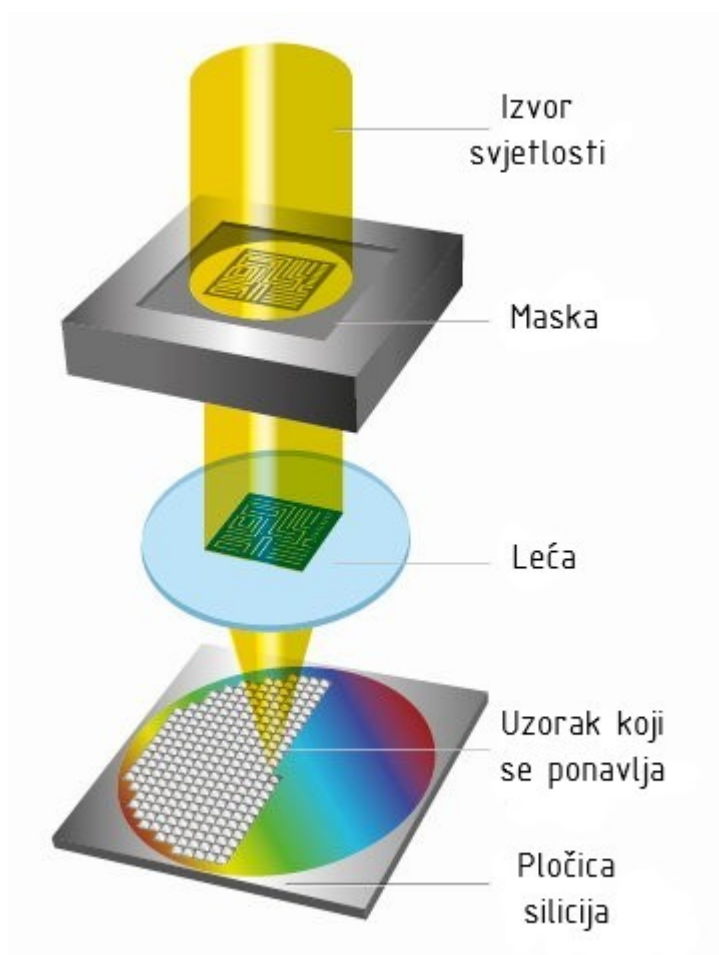
Prilikom poliranja pločice silicija obrađuju se na konačnu mjeru. Pločica se obrađuje s obje strane, što se uglavnom radi istovremeno kako bi se zadržala ravnost pločice dobivena u prijašnjim koracima. Kao sredstvo za poliranje koristi se koloidna suspenzija silicijevog dioksida, dok je alat izrađen od poroznog poliuretana. Nakon poliranja na površini više nema mehaničkih oštećenja [25].

Nakon poliranja pločice se dovode u tzv. čistu sobu, gdje se odstranjuju organske tvari i površinski metali u čistom okruženju bez utjecaja prašine i ostalih nečistoća. Organske tvari se uklanjaju lužnatim otopinama uz prisustvo oksidirajućeg sredstva koje sprječava ponovno nagrizanje već obrađene površine. Površinski sloj silicijevog dioksida uklanja se razrijeđenom otopinom vode i fluorovodične kiseline te se nakon toga površina tretira otopinom klorovodične kiseline, vodikovog peroksida i vode pri povišenim temperaturama [25].

Ispiranja u čistoj sobi se provode u nekoliko ciklusa dok se ne dobiju zadovoljavajuća svojstva. Nakon toga se pločice suše i pakiraju te šalju na daljnju obradu.

5.2.5. Izrada čipova

Čipovi se proizvode iz pločica silicija postupkom fotolitografije. Ovim postupkom se stvaraju tranzistori i putevi za prijenos informacija, taloženjem više slojeva materijala [26]. Prikaz fotolitografije može se vidjeti na *Slika 36*.



Slika 36. Postupak fotolitografije [27]

Postupak započinje taloženjem silicijevog dioksida na pločici upotrebom CVD-postupka (engl. *Chemical Vapor Deposition*). Zatim se površina premazuje posebnom fotoosjetljivom emulzijom. Prije tretiranja svjetlošću izrađuje se maska koja sadrži negativ željene arhitekture jednog sloja čipa. Današnji čipovi sadrže preko dvadeset slojeva i za svaki je potrebna druga maska. Prolaskom svjetlosti kroz masku željeni uzorak se prenosi do leće koja usmjerava zraku i stvara ponavljajući uzorak na pločici silicija. Kada se obradi cijela pločica, područja kojima je prošla svjetlost ispiru se i na površini ostaju dijelovi integriranog kruga i putevi. Zatim se

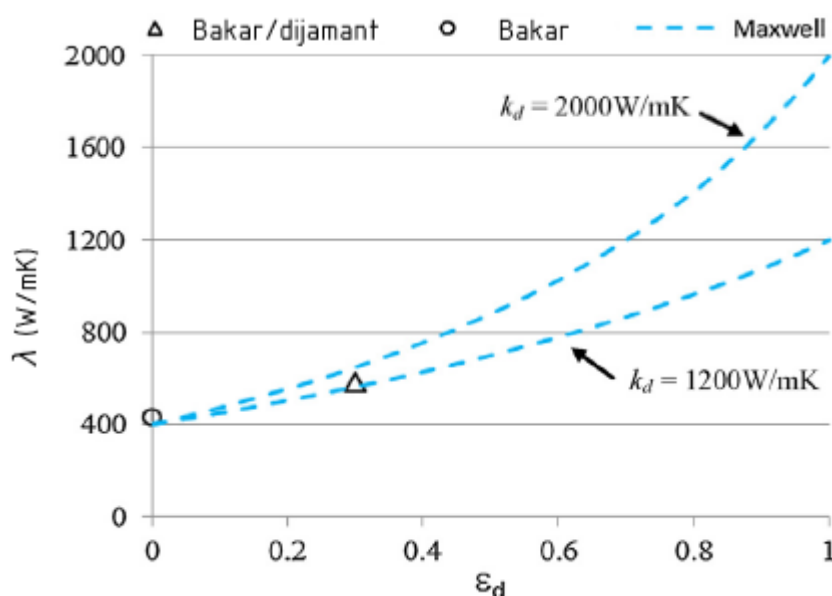
dodaje još jedan sloj silicijevog dioksida i fotoosjetljive emulzije te se postupak ponavlja uz korištenje druge maske [26].

Između već spomenutih slojeva umeću se metalizacijski slojevi koji povezuju pojedinačne tranzistore i ostale komponente i time omogućavaju nesmetan protok podataka. Poveznice u tim slojevima izrađene su od bakra zbog dobre provodnosti struje i zato što je njegovom uporabom moguće dobiti čipove manjih dimenzija [26].

Završetkom izrade čipova oni se postavljaju u kućišta koja s donje strane sadrže zlatne pinove. Njima se omogućava kasnija integracija i izmjena podataka s matičnom pločom. S gornje strane čip se oblaže toplinskom pastom i na njega se postavlja distributer topline, čija je zadaća toplinu koja se oslobađa na čipu raspršiti i prenijeti dalje u sustav.

U današnje vrijeme nastoji se eliminirati potreba za korištenjem toplinske paste budući da ona stvara najveći otpor prijenosu topline. Predlažu se metode kojima se distributer topline nanosi direktno na čip. Tako je prema istraživanju u [28] predložen sloj kompozita bakra i dijamanta kao rješenje tog problema. Bakru se dodaje dijamant zbog izvrsne toplinske provodnosti i zato što se time smanjuje razlika između koeficijenata toplinske dilatacije kompozita i materijala čipa.

U eksperimentu, hladnim prskanjem nanoseni su slojevi bakra i kompozita bakra i dijamanta te su dobiveni koeficijenti toplinske provodnosti za oba slučaja. Rezultati su vidljivi na *Slika 37*.



Slika 37. Rezultati istraživanja koeficijenta toplinske provodljivosti kompozita bakra i dijamanta [28]

Sa slike se može zaključiti da povišenje udjela dijamanta u bakrenom kompozitu (ϵ_d) povoljno utječe na toplinsku provodnost sustava. Na slici je plavim linijama označen raspon koeficijenata toplinske provodnosti sintetičkog dijamanta.

6. SUSTAV HLAĐENJA OSOBNOG RAČUNALA

Hlađenje osobnih računala ima važnu ulogu u stabilnosti i dugotrajnosti samog sustava i njegovih komponenti. Trend rasta brzine rada današnjih mikroprocesora sa sobom nosi i povećanje energije koja je potrebna za njegov rad. Jedna od posljedica toga je i povećano otpuštanje topline što zahtjeva robusnija i konstrukcijski zahtjevnija rješenja za hlađenje računala.

U ovom poglavlju bit će dan teorijski uvod u eksperimentalni dio diplomskog rada. Na početku će biti ukratko objašnjeni načini prijenosa topline koji prevladavaju kod hlađenja računalnih komponenti. Nakon toga slijedi prikaz komponenti koje sudjeluju u hlađenju te objašnjenje njihovog principa rada. Uz to bit će dan osvrt na upravljanje tim komponentama te će na kraju biti spomenute neke alternativne metode hlađenja.

6.1. Načini prijenosa topline

Kod osobnih računala uglavnom prevladavaju dva načina prijenosa topline: kondukcija i konvekcija. Sam pojam prijenosa topline označuje količinu energije koju dva tijela izmjene zbog razlike u njihovim temperaturama [29].

Kondukcija je način izmjene topline svojstven čvrstim tvarima, iako se može pojaviti i kod tekućina. Toplina se kondukcijom prenosi na atomskoj i molekularnoj razini, gdje atomi i molekule više temperature (veća brzina titranja i veća kinetička energija) predaju energiju atomima i molekulama niže temperature (manja brzina titranja i manja kinetička energija) prilikom sudara. Metali se smatraju dobrim vodičima topline upravo zbog njihovih slobodnih elektrona koji pogoduju ovakvom načinu izmjene topline [29].

Konvekcija je način izmjene topline kod kojeg čestice tekućine putuju i pritom svoju energiju predaju hladnijim česticama tekućine ili čvrstoj površini na koju naiđu. Pod konvekciju spadaju i kondenzacija pare na hladnoj stijenci te isparavanje tekućine u dodiru sa zagrijanom površinom. U pravilu se razlikuju dva oblika konvekcije: prisilna i prirodna. Kod prisilne, uzrok gibanja tekućine je neki vanjski faktor koji nije vezan uz temperaturu. S druge strane, kod prirodne konvekcije uzrok gibanja čestica je razlika u gustoći zagrijanih čestica tekućine blizu stijence i čestica koje se nalaze dalje od nje. Iz toga proizlazi da je uzrok gibanja čestica zapravo razlika u njihovim temperaturama [29].

Princip hlađenja komponenti osobnih računala zasniva se na ova dva načina prijenosa topline. Energija koju računalno dobiva iz mreže prenosi se napajanjem do svih komponenti, koje onda svojim radom oslobađaju energiju u obliku topline. Neke računalne komponente moguće je hladiti pasivno (slobodnom konvekcijom), ali u većini slučajeva potrebno je aktivno hlađenje. Tako se primjerice toplina koju oslobađa CPU prenosi od čipa na toplinsku pastu i distributer topline kondukcijom. Dalje se kondukcijom prenosi na hladnu ploču hladnjaka te konvekcijom na okolni zrak.

6.2. Komponente sustava za hlađenje

U hlađenju osobnog računala sudjeluju mnoge komponente od kojih su glavne: kućište, hlađenje CPU-a, hlađenje GPU-a i ventilatori. Uz njih u hlađenju sudjeluju i pasivni hladnjaci na matičnoj ploči te u novije vrijeme hladnjaci na uređajima za pohranu podataka. U okviru ovog rada obradit će se glavne komponente s naglaskom na hlađenje CPU-a i GPU-a budući da oni oslobađaju najviše topline.

6.2.1. Kućište

Kućišta osobnih računala imaju ulogu zaštite ostalih komponenti. Čuvaju ih od vanjskih utjecaja poput prašine te pružaju mogućnost strukturirane raspodjele komponenti što bitno olakšava dijagnostiku problema i buduće nadogradnje.

Nekadašnja kućišta bila su jednostavne metalne kutije bez mogućnosti dobre ventilacije. Razlog tome su elektroničke komponente koje nisu otpuštale mnogo topline, zbog čega su kućišta bila jednostavnija. Jedno takvo kućište prikazano je na *Slika 38*.



Slika 38. Stariji modeli kućišta [30]

Na slici je prikazana tipična zatvorena konstrukcija kućišta. Prednost zatvorenog kućišta je izoliranost od okoline što znači manje nakupina prašine na komponentama.

Današnja kućišta su nešto drugačija i mogu se podijeliti u dvije različite kategorije. S jedne strane su kućišta dizajnirana za bolji protok zraka, koja se koriste za smještaj komponenti koje oslobađaju veliku količinu topline. S druge strane nalaze se kućišta dizajnirana za tihi rad, gdje se smještaju slabije komponente. Primjeri jedne i druge vrste kućišta prikazani su na *Slika 39*.



Slika 39. Kućišta proizvođača Be quiet!, dizajnirano za protok zraka (lijevo) i dizajnirano za tihi rad (desno) [31]

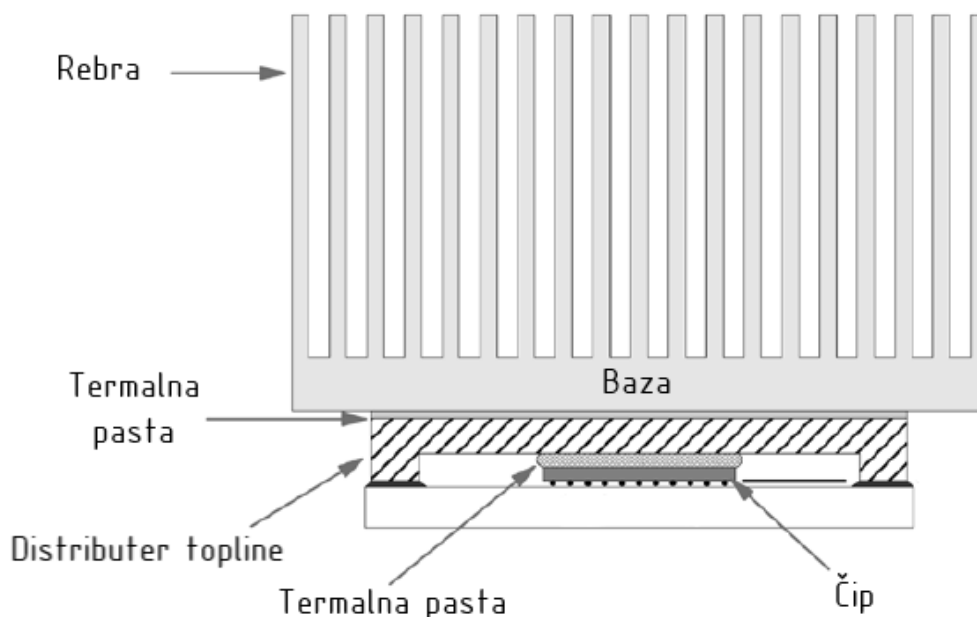
Kućišta dizajnirana za protok zraka otvorena su s gornje i prednje strane. Na tim mjestima obično se nalazi mrežica koja dopušta usis ili ispuh velike količine zraka. Uz mrežicu potrebno je koristiti i posebne filtre koji će spriječiti cirkulaciju prašine unutar sustava budući da je kućište otvoreno.

Kod kućišta dizajniranih za tihi rad na mjestu mrežica nalaze se ploče prekrivene pjenom koja prigušuje zvuk i vibracije ventilatora unutar kućišta. Usis je osiguran kroz male otvore na prednjoj strani kućišta, dok se zrak ispuhuje kroz otvor na stražnjoj strani.

Prije odabira ostalih komponenti sustava potrebno je provjeriti kompatibilnost s kućištem. To se posebice odnosi na matičnu ploču koja se vijcima spaja na jednu od strana kućišta. Također je potrebno provjeriti dopuštenu visinu zračnih hladnjaka koji zbog zahtjevnijih elektroničkih komponenti postaju sve veći.

6.2.2. Zračno hlađenje

Hlađenje zrakom poznatija je i pristupačnija metoda hlađenja u odnosu na vodeno hlađenje. Njome se hladi većina elektroničkih komponenti u računalu, bilo to aktivno ili pasivno. Najjednostavnija vrsta su pasivni hladnjaci, koji se sastoje od baze i rebrastih izdanaka, kao što se može vidjeti na *Slika 40*.



Slika 40. Pasivni hladnjak [32]

Pasivni hladnjaci uglavnom su izrađeni od bakra ili aluminija zbog njihovog dobrog provođenja topline. U dodiru sa zagrijanom komponentom toplina se prenosi sa zagrijane površine na bazu hladnjaka. Zbog velike površine rebara koja je u dodiru sa zrakom toplina se konvekcijom efektivno prenosi na okolni zrak. Iako je na slici prikazano hlađenje slabijeg CPU-a, ovaj način se uglavnom koristi za hlađenje manjih čipova na matičnoj ploči ili primjerice čipova na mrežnim karticama koji ne zahtijevaju aktivno hlađenje.

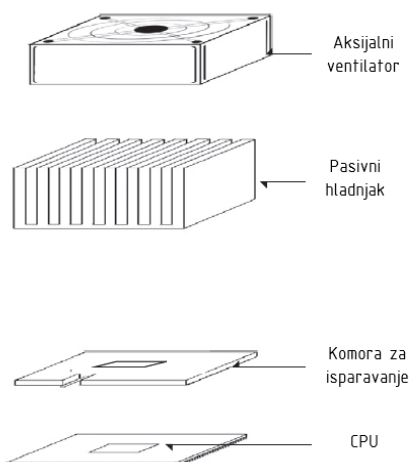
Uz manje čipove, zrakom se mogu hladiti i veći čipovi poput onih na grafičkim karticama. Kao jedna od komponenti koja oslobađa najviše topline, hlađenje grafičke kartice zahtijeva robusnija rješenja. Zbog rasta snage potrebne za pokretanje novijih grafičkih kartica preporučuje se vodeno hlađenje njihovih čipova. Zrakom hlađena grafička kartica prikazana je na *Slika 41*.



Slika 41. Grafička kartica proizvođača EVGA [33]

Na slici se može uočiti rješenje s tri aksijalna ventilatora koja omogućavaju strujanje zraka preko kontrolera grafičke kartice. Kako bi se izbjeglo vodeno hlađenje u ovom slučaju koriste se uz ventilatore dodatni pasivni hladnjaci te komora isparavanja. Ventilatori usmjeravaju zrak preko rebara pasivnog hladnjaka, koji je preko komore isparavanja povezan s čipovima koji se nalaze na grafičkoj kartici. Zrak koji struji preko rebara preuzima oslobođenu toplinu i izlazi preko otvora na pasivnom hladnjaku.

Komore isparavanja sve se češće koriste prilikom hlađenja komponenti osobnih računala zbog sposobnosti dobre distribucije topline. Shema sustava za hlađenje koji koristi komoru za isparavanje prikazana je na *Slika 42*.



Slika 42. Shema sustava za hlađenje CPU-a [34]

Sama komora na slici sastoji se od gornje i donje bakrene ploče i kapilarnih kanala pod vakuumom, između njih. Kapilarni kanali djelomično su ispunjeni destiliranom vodom. Na donjoj bakrenoj ploči koja je u dodiru s CPU-om destilirana voda isparava te se para potom zbog kapilarnosti širi i dolazi do gornje bakrene ploče. Ona je u dodiru s hladnjakom i zbog razlike u temperaturi dolazi do kondenzacije vodene pare. Nakon kondenzacije, kapljice vode vraćaju se prema donjoj ploči i hlade CPU [34].

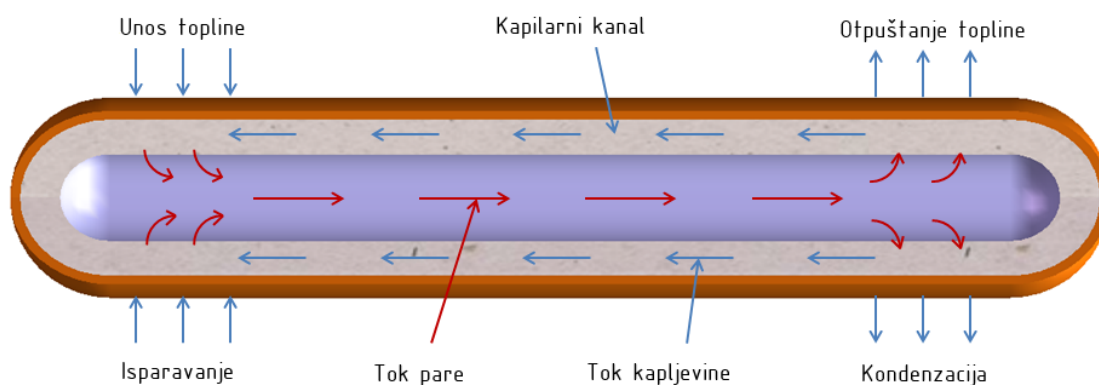
Za hlađenje CPU-a danas se uglavnom koriste takozvani tornjevi. Ovisno o zahtjevnosti hlađenja koriste se verzije s jednim ili dva tornja. Na *Slika 43* prikazana je verzija s jednim tornjem.



Slika 43. Zračni hladnjak proizvođača be quiet! [31]

Princip rada tornjeva temelji se na toplinskim cijevima. One prolaze kroz bazu hladnjaka, gdje preuzimaju toplinu od CPU-a i granaju se prema gusto raspoređenim aluminijskim listovima. Velika površina tih listova omogućava dobru distribuciju topline koja se strujanjem zraka predaje okolini.

Toplinske cijevi djeluju na sličan način kao i komore za isparavanje. Pojednostavljen prikaz rada toplinske cijevi može se vidjeti na *Slika 44*.

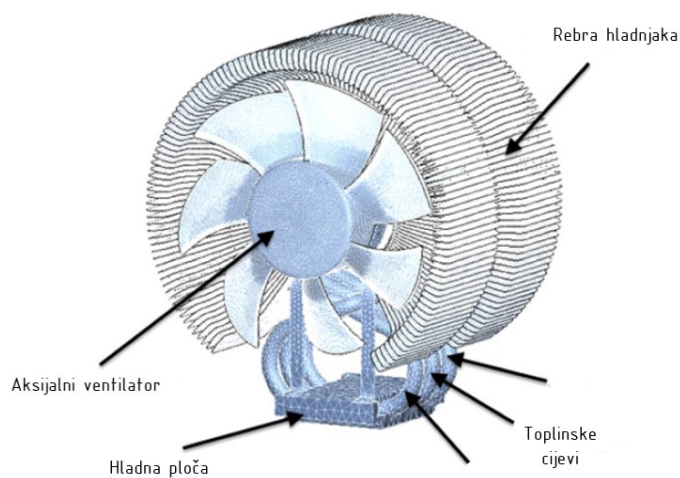


Slika 44. Princip rada toplinske cijevi zračnog hladnjaka [35]

Toplinske cijevi izrađene su od bakra i sadrže kapilarne kanale u kojima se nalazi destilirana voda. Na dijelu gdje hladna ploča hladnjaka dodiruje CPU tekućina u cijevima isparava i zbog kapilarnosti kreće prema dijelu cijevi koji je aktivno hlađen ventilatorom. Ovdje para kondenzira i kapljevina se tada vraća posebnim kanalom do hladne ploče [36].

Radi bolje estetike ove čiste bakrene cijevi se u skupljim varijantama hladnjaka oblažu slojevima keramike i time cijevi poprimaju drugu boju. Upotrebom keramike umjesto boje ne narušava se toplinska provodnost cijevi.

Uz tornjeve, razvijaju se i nove verzije zračnog hlađenja. Tako je prema [37] predložen hladnjak koji pokazuje dobre performanse pri niskim razinama buke ventilatora, kao što je prikazano na *Slika 45*.



Slika 45. Alternativni zračni hladnjak [37]

Ovaj hladnjak daje slične rezultate kao i komercijalna rješenja, ali zbog specifičnosti izrade i dalje ne nalazi svoju primjenu.

6.2.3. Vodeno hlađenje

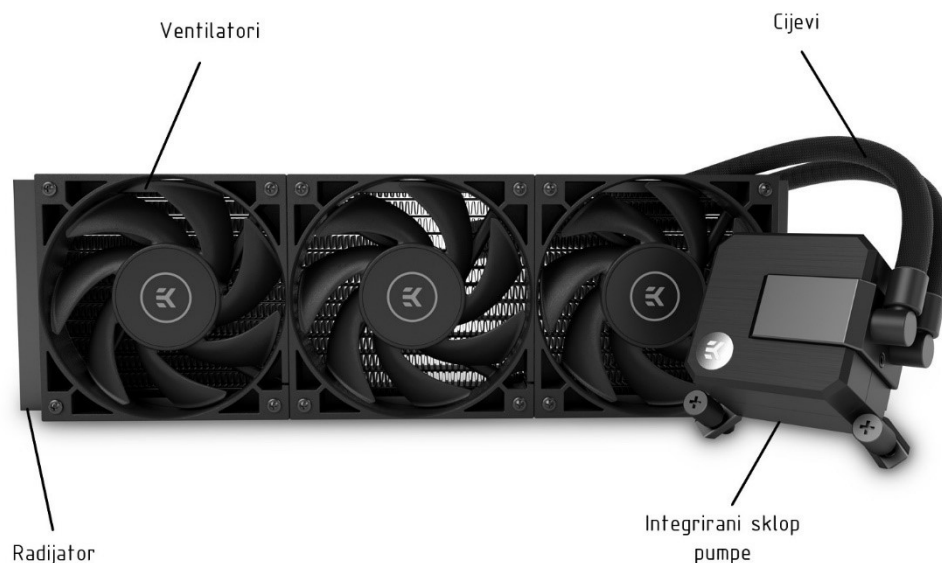
Vodena hlađenja pojavljuju se kasnije u odnosu na zračna zbog razvijanja brzih čipova koji oslobađaju velike količine topline. Njihova prednost leži u upotrebi vode kao sredstva za hlađenje. Za razliku od većine zračnih hladnjaka kojima se toplina prenosi samo preko dodira hladne ploče s bakrenim cijevima i kasnije na okolni zrak, vodeni hladnjaci koriste vodu za odvođenje topline izvan sustava. Prednost vode je u daleko većem specifičnom toplinskom kapacitetu od bakra ili aluminija. Podaci se mogu vidjeti u *Tablica 7*.

Tablica 7. Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta za aluminij, bakar i vodu [38]

Materijal/Tvar	c_p (J/kg K)
Aluminij (pri temperaturi 20 °C i tlaku 101325 Pa)	902
Bakar (pri temperaturi 20 °C i tlaku 101325 Pa)	385
Voda (pri temperaturi 20 °C i tlaku 100000 Pa)	4184,8

Vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta vode uzeta je za pothlađenu vodu pri navedenim uvjetima, gdje je razlika u tlakovima zanemariva za potrebe ove usporedbe. Iz visoke vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta može se zaključiti da voda, u odnosu na aluminij i bakar, može primiti znatno veću količinu topline prije nego joj se temperatura poveća za određenu vrijednost. Vrijedi i obrnuto, kako bi se temperatura vode smanjila za određenu vrijednost, ona mora predati veću količinu topline. Iz tog razloga, ta izmjena energije provodi se dalje od izvora topline, gdje omogućeno adekvatno vrijeme za njenu provedbu.

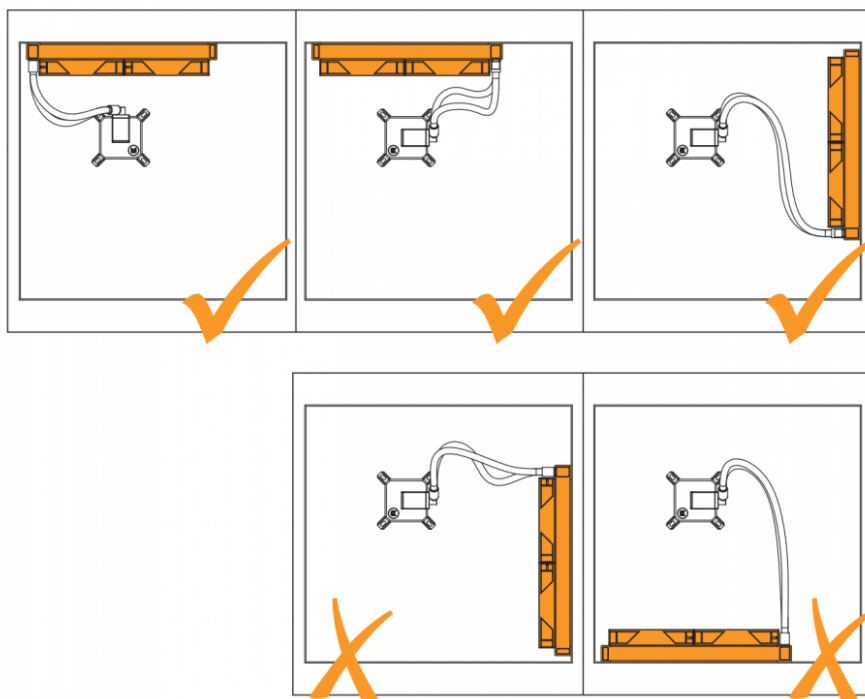
Vodena hlađenja zahtjevnije su konstrukcije u odnosu na zračna te se uglavnom dijele na dvije vrste. Prva vrsta su takozvana sveobuhvatna rješenja (engl. *All-In-One*, AIO). Ta vrsta je jednostavnija, ali pruža sve pogodnosti vodenog hlađenja. Odlikuje ih lakša ugradnja i manja mogućnost popravaka budući da nisu modularna. S druge strane, nalaze se vodene petlje koje pružaju najbolja svojstva hlađenja, ali su ujedno i najskuplja rješenja. Primjer jednog AIO-hladnjaka prikazan je na *Slika 46*.



Slika 46. AIO-hladnjak proizvođača EKWB [39]

Voda kod AIO-hladnjaka putuje od pumpe, gdje preko hladne ploče prima toplinu i cijevima putuje prema radijatoru. Unutar radijatora nalaze se cijevi kojima cirkulira voda te je osigurana velika površina za izmjenu topline. Preko te rebraste strukture struji hladan zrak uzrokovan vrtnjom ventilatora. Time se toplina odvodi izvan sustava. Budući AIO-hladnjaci nisu modularni, svaki problem koji nastane teško je otkloniti. Jedan od najvećih problema ovakvih sustava za hlađenje, i općenito svih sustava koji koriste vodu kao rashladni element, je mogućnost curenja vode uslijed trošenja komponenti hladnjaka. Curenje može bitno naštetiti ostalim komponentama, poput grafičke kartice i matične ploče, koje dobivaju konstantno napajanje iz mreže. U tom slučaju potrebno je odmah isključiti sustav iz struje i pokušati osušiti bitne komponente.

Kod pozicioniranja radijatora AIO-hladnjaka u kućištu računala bitno je paziti na međusoban položaj pumpe i radijatora, kako je prikazano na *Slika 47*. U slučaju postavljanja pumpe iznad radijatora (pumpa je najviša točka sustava) može doći do problema u radu same pumpe. Naime, s vremenom određeni volumen vode ispari iz hladnjaka zbog permeabilnosti membrane na cijevima i time ostavlja mjesto zraku koji se prirodno skuplja u najvišoj točki sustava. Nakupljanje zraka u radnom prostoru pumpe uzrokuje buku i vibracije zbog nepravilnog dinamičkog opterećenja pumpe. Dugotrajnim izlaganjem takvom opterećenju može doći do popuštanja spoja pumpe i hladne ploče i neizbježnog curenja u sustav.



Slika 47. Položaj radijatora AIO-hladnjaka u kućištu računala [39]

Druga skupina vodenih hlađenja predstavlja optimalno rješenje za ekstremne sustave koji otpuštaju veliku količinu topline. Zbog svoje modularnosti imaju puno veću fleksibilnost prilikom otkrivanja grešaka i omogućavaju veću slobodu prilikom konstruiranja vodene petlje. Ovakvim prilagođenim petljama moguće je hladiti ne samo CPU, već i grafičku karticu, što uvelike pospješuje efikasnost cijelog sustava. Jedno takvo osobno računalo hladeno vodenom petljom prikazano je na *Slika 48*.

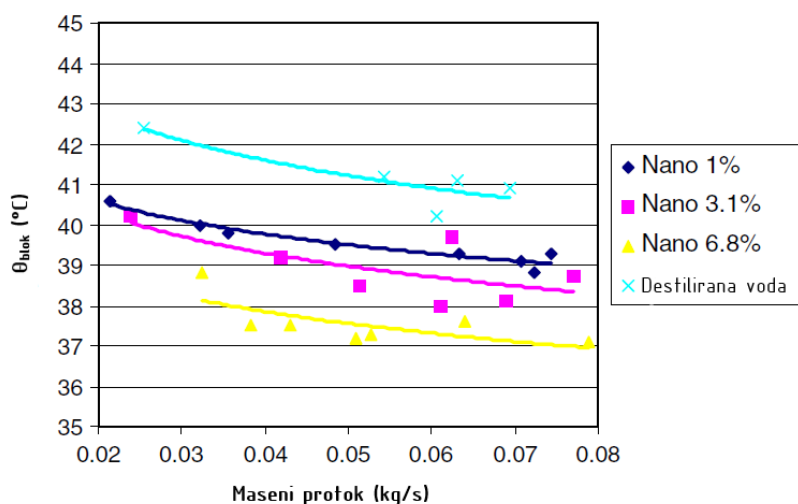


Slika 48. Osobno računalo hladeno vodenom petljom [40]

Sa slike se može uočiti da su takvi sustavi zahtjevniji za izradu od AIO-vodenih hlađenja i zahtijevaju određena znanja iz područja mehanike fluida i hidraulike.

Sam princip rada je vrlo sličan AIO-hladnjacima uz par bitnih iznimki. Cijevi se postavljaju i savijaju proizvoljno prema željenom toku vode. Pumpa je udaljena od izvora topline i nalazi se uz rezervoar koji nadomješta vodu koja se gubi isparavanjem tijekom vremena. Osim rezervoara, koriste se i posebne distribucijske ploče koje pomažu usmjeriti tok vode. Njihovom upotrebom eliminira se potreba za ostrim zavojima, koji loše utječu na stabilnost petlje. Isto tako, moguće je koristiti i više radijatora u slučajevima kada se žele odvojiti petlja koja hladi CPU od one koja hladi GPU. Otvoreni dizajn petlji omogućava dodavanje različitih boja vodi u petlji. Iako kreativno, ovime se s vremenom pojavljuju nakupine različitih mikroorganizama na metalnim dijelovima petlje i dolazi do korozije. Takve sustave potrebno je češće ispirati i ponovno puniti.

U industrijskim primjenama vodenog hlađenja za elektroničke komponente traže se načini poboljšanja specifičnog toplinskog kapaciteta tekućine koja se koristi. Tako je prema [41] predloženo dodavanje nanočestica destiliranoj vodi. Utvrđeno je da nanočestice pospješuju hlađenje smanjenjem prosječne i maksimalne temperature zagrijane komponente, olakšavaju konvekcijski prijelaz topline te osiguravaju jednolikost temperature po čitavoj površini elektroničke komponente. Kao dobar izbor pokazale su se nanočestice dijamanta, titanija i aluminijevog dioksida. Prema istraživanju u [42] te vrijednosti su kvantificirane i mogu se vidjeti na *Slika 49*.



Slika 49. Utjecaj masenog protoka i volumnog udjela nanočestica Al_2O_3 u vodi na temperaturu hladne ploče [42]

Istraživanjem je pokazano da se dodatkom nanočestica aluminijevog oksida u destiliranu vodu temperatura ploče u dodiru s CPU-om bitno smanjila ovisno o masenom udjelu nanočestica u vodenoj suspenziji.

U nekim slučajevima razmatra se i metoda hlađenja uranjanjem cijelog sustava u tekućinu prema [32]. Za razliku od ostalih metoda vodenog hlađenja, gdje se rashladno sredstvo fizičkom preprekom odvađa od čipova, kod metode potpunog uranjanja čipovi i ostale komponente su u direktnom kontaktu s fluidom. Time se uklanja nekoliko slojeva toplinskog otpora između čipa i rashladnog sredstva.

Kod metode potpunog uranjanja potrebno je pažljivo odabrati fluid koji će se koristiti. Obična voda, iako ima odlična toplinska svojstva, u ovom slučaju nije dobar izbor jer provodi struju i izaziva koroziju. Kao i kod ostalih vrsta hlađenja, moguće je poboljšati izmjenu topline upotrebom pumpi koje će povećati protok fluida u sustavu i time izazvati prisilnu konvekciju [32].

6.2.4. Ventilatori

Ventilatori kod osobnih računala od velike su važnosti i kod zračnog i kod vodenog hlađenja. Oni omogućavaju brže strujanje zraka uz površine koje je potrebno ohladiti i time izazivaju izmjenu topline prisilnom konvekcijom. Tipičan ventilator prikazan je na *Slika 50*.

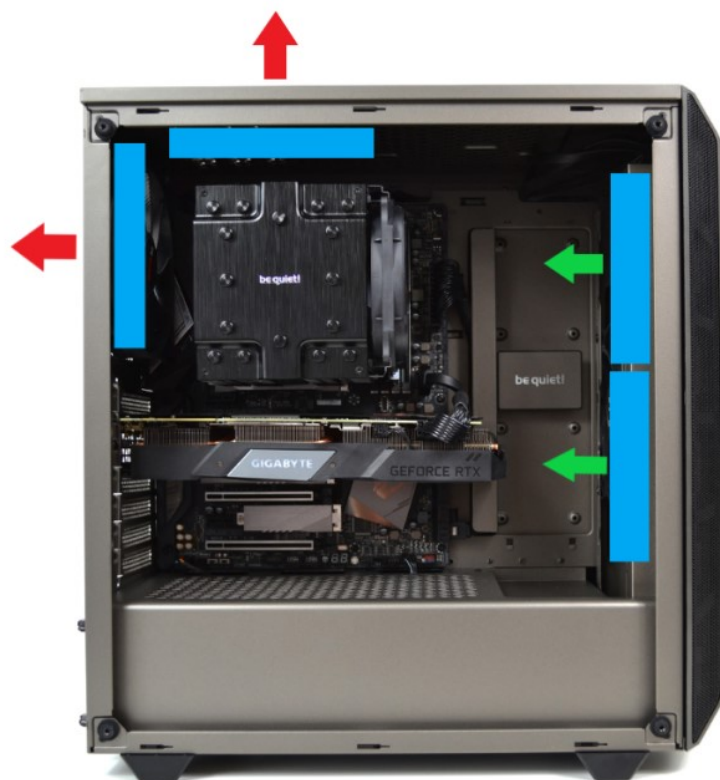


Slika 50. Aksijalni ventilator proizvođača be quiet! [31]

Ventilatori se sastoje od okvira, lopatica rotora, koje su spojene s kućištem motora, te malog istosmjernog motora koji pokreće rotor. Napajanje se izvodi preko konektora koji se spaja na matičnu ploču ili poseban kontroler. Reguliranje brzine provodi se softverskim putem, što će biti detaljnije objašnjeno u nastavku. O brzini vrtnje i veličini ventilatora ovisi i razina buke u sustavu. Tako manji ventilatori postižu veće brzine vrtnje, dok veći ventilatori mogu uz manju brzinu vrtnje ostvariti isti volumni protok zraka i time smanjiti razinu buke.

Na dugovječnost ventilatora najviše utječu ležajevi na osovini rotora. U pravilu se koriste obični kuglični ležajevi i hidrodinamički kuglični ležajevi kod skupljih izvedbi. Hidrodinamički ležajevi imaju dulji vijek trajanja jer im je kuglica prilikom rada uvijek u dodiru s fluidom.

Najbitnija zadaća ventilatora je osiguravanje adekvatnog protoka zraka kroz kućište. Primjer takvog protoka dan je na *Slika 51*.



Slika 51. Protok zraka kroz kućište osobnog računala [43]

Sva toplina koja se oslobodi i koju hladnjak preda okolnom zraku unutar kućišta i dalje ostaje u sustavu. Kako bi se to izbjeglo, ventilatori moraju zagrijani zrak izbaciti izvan kućišta. Na slici je prikazana neutralna konfiguracija protoka kojom se to može postići. S prednje strane kućišta postavljena su dva ventilatora koji usisavaju svjež zrak. U smjeru toka postavljena su još dva ventilatora koja ispuhuju zagrijani zrak i svojim položajem omogućavaju prirodan tok

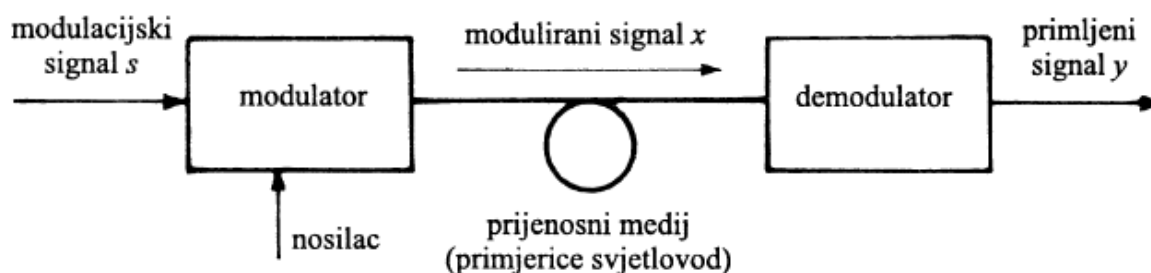
toplog zraka budući da se toplina diže pod utjecajem sile uzgona. Uz neutralnu konfiguraciju postoje i konfiguracije kod kojih unutrašnjost kućišta postaje polje pretlaka ili potlaka. Pretlak nastaje kada je volumen zraka na usisu veći od onoga na ispuhu i tada višak zraka izlazi kroz ostale otvore na kućištu. Potlak nastaje u slučaju većeg ispuha i tada zrak ulazi kroz ostale otvore na kućištu i sa sobom unosi prašinu. Iz tog razloga veći ispuh od usisa kod kućišta nije poželjan.

6.3. Upravljanje sustavom za hlađenje

Kako bi se postiglo adekvatno hlađenje sustava, potrebno je kvalitetno i intuitivno upravljanje njegovim komponentama, prvenstveno brzinama vrtnje ventilatora i pumpi kod vodenog hlađenja. U nastavku će biti detaljno prikazan način upravljanja upotrebom impulsno-širinske modulacije.

6.3.1. Modulacija

Prijenos informacija jedan je od ključnih procesa potreban za napredak društva. Nerijetko ih je potrebno prenijeti na jako velike udaljenosti i stoga je potrebno pronaći način kako to učiniti. Kako bi se informacija prebacila iz jedne točke u drugu, mora se pripremiti za prijenos medijem koji obuhvaća te dvije točke. Na mjestu odašiljanja informaciju treba pretvoriti u oblik prikladan za prijenos, dok je na mjestu prijama informaciju potrebno vratiti u izvorni oblik [44]. U komunikacijskoj tehnici takav prijenos se obavlja pomoću električnog signala kojeg obilježavaju karakteristične veličine, kao što su: napon, jakost struje, frekvencija, faza itd. Postupak pretvorbe električnog signala koji nosi informaciju u oblik pogodan za prijenos naziva se modulacija. Proces inverzan modulaciji naziva se demodulacija. Primjer jednog takvog prijenosa može se vidjeti na *Slika 52* [44].



Slika 52. Shema prijenosa informacije modulacijom signala [44]

Modulacija je pojam koji obuhvaća mijenjanje jedne ili više značajnih karakterističnih veličina pomoćnog signala, s obzirom na signal koji nosi informaciju. Taj se pomoćni signal još naziva i prijenosni signal. Signal koji nosi informaciju i upravlja promjenama karakterističnih veličina prijenosnog signala jest modulacijski signal. Rezultat modulacije je signal kojemu su karakteristične veličine funkcije nekih od značajnih karakterističnih veličina modulacijskog signala. Tada se dobiva signal pod nazivom modulirani signal [44].

Postupak modulacije i demodulacije važan je dio komunikacijske teorije i stoga je potrebna njihova pažljiva sistematizacija.

Postupaka modulacije ima mnogo, a neki od bitnijih su [44]:

- amplitudna modulacija
- frekvencijska modulacija
- fazna modulacija
- impulsna modulacija.

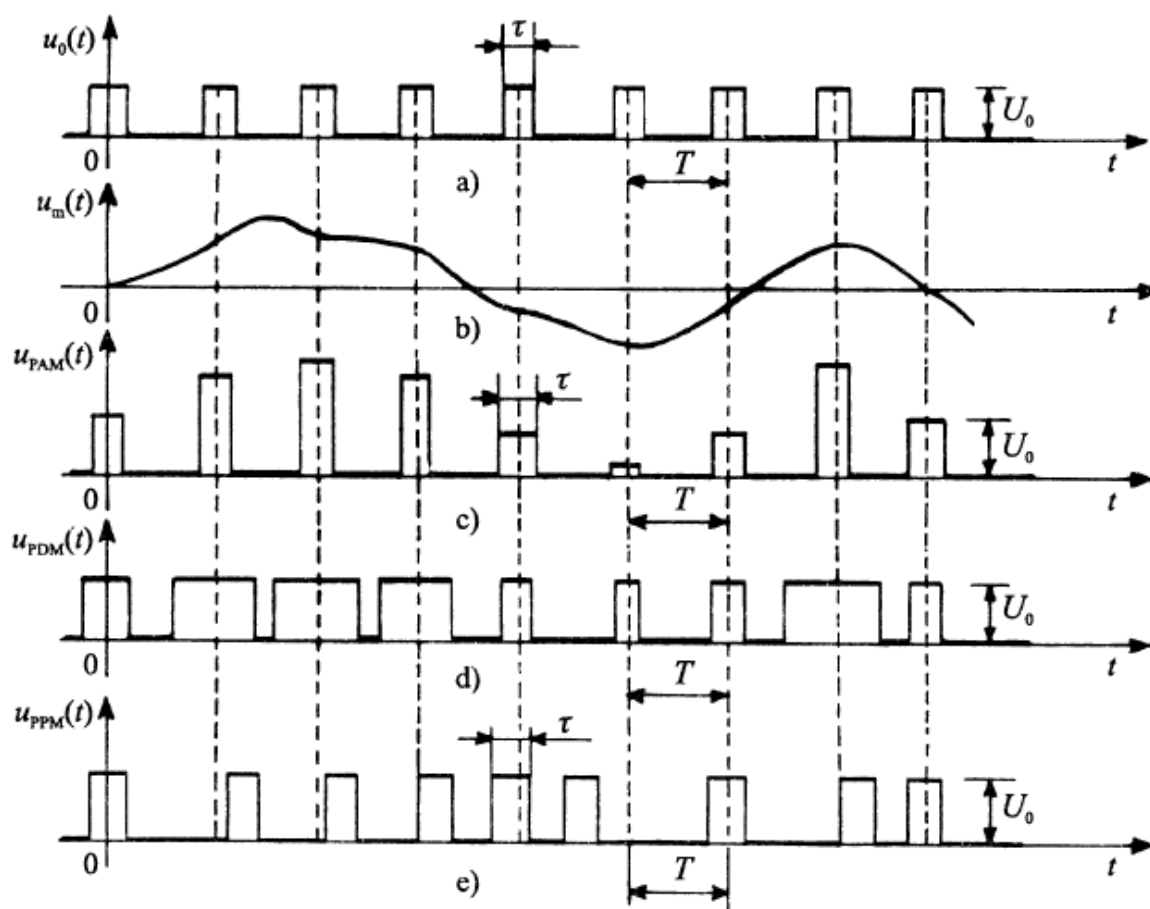
U okviru ovoga rada bit će obrađena samo impulsna modulacija, točnije jedan njen dio.

6.3.1.1. Impulsna modulacija

Impulsna modulacija pripada skupini digitalnih modulacija čiji je prijenosni signal diskretan. Po tome se bitno razlikuju od amplitudne i kutne modulacije čiji je signal kontinuiran.

U procesu prijenosa impulsno moduliranih signala zamjećuju se dva stanja: stanje u kojem signal postoji i stanje u kojem signal ne postoji. Spomenuta stanja traju određeno konačno vrijeme. Aktivni interval (sa signalom) i pasivni interval (bez signala) neprestano se izmjenjuju [44].

Prijenosni signal u procesu impulsne modulacije redovito je slijed pravokutnih impulsa $u_0(t)$ prikazano na *Slika 53*.



Slika 53. Impulsna modulacija. a) valni oblik prijenosnoga signala; b) modulatorski signal; c) PAM-signal; d) PWM-signal; e) PPM-signal [44]

Tri karakteristične veličine opisuju ovu funkciju [44]:

- amplituda impulsa, U_0
- vrijeme trajanja impulsa, τ
- perioda ponavljanja impulsa, T .

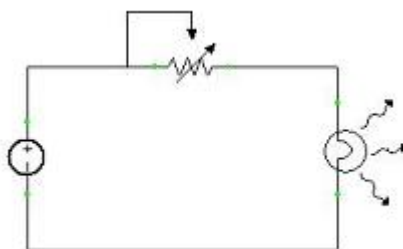
Sve tri veličine za takav su valni oblik stalne. Međutim, svaku od njih moguće je mijenjati i na osnovu toga nastaju postupci impulsne modulacije.

Ako se amplituda impulsa U_0 mijenja izravno razmjerno uzorcima modulirajućeg signala $U_m(t)$, kao na Slika 53 b), dok ostale karakteristične veličine niza impulsa ostaju stalne, bit će ostvarena impulsna amplitudna modulacija (engl. *Pulse Amplitude Modulation*, PAM). Ovako moduliran signal prikazan je na Slika 53 c). Mijenja li se samo trajanje impulsa, τ , nastat će impulsno-širinska modulacija (engl. *Pulse Duration Modulation*, PDM ili *Pulse Width Modulation*, PWM). Tako modulirani signal prikazan je na Slika 53 d). Konačno, ako se mijenja

samo perioda ponavljanja, T , nastaje impulsno-pozicijska modulacija (engl. *Pulse Position Modulation*, PPM), čiji je signal prikazan na *Slika 53 e*) [44].

6.3.1.2. Impulsno-širinska modulacija (PWM)

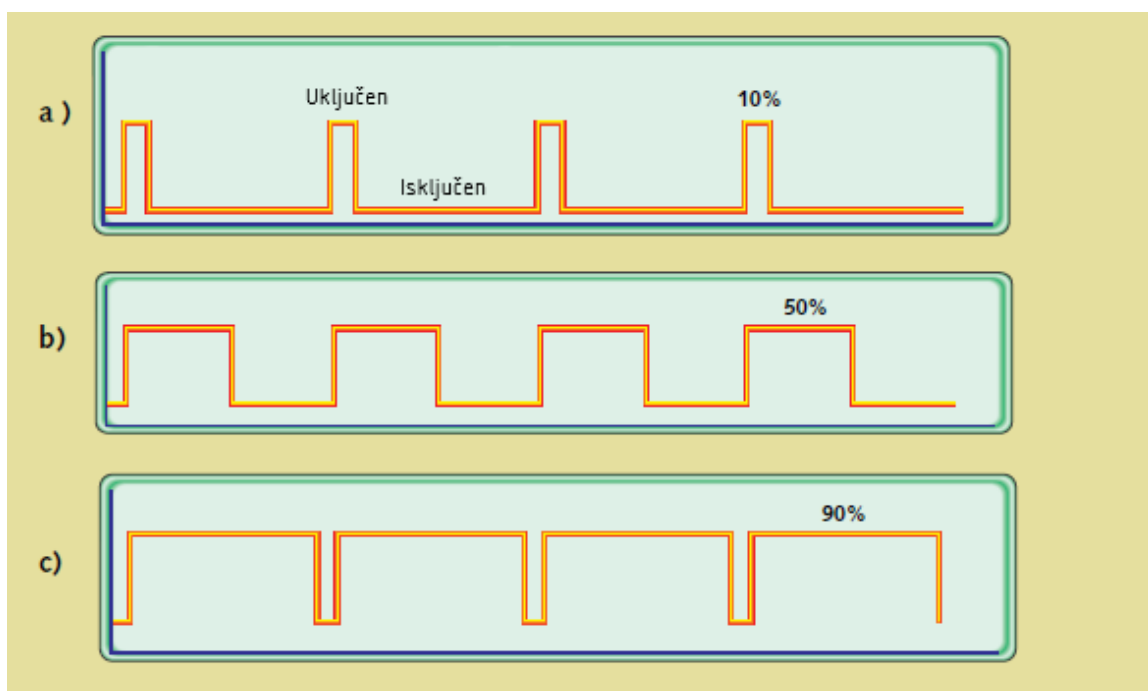
U ranije vrijeme, prije nego što je upotreba PWM-a postala moguća uvođenjem modernih elektroničkih prekidača, analogni sklopovi su bili jedini način na koji se moglo upravljati svjetlinom žarulja, razinom zvuka radio-prijamnika ili brzinom istosmjernih motora. Na *Slika 54* može se vidjeti primjer takvog upravljanja na principu rada jednostavnog potencijometra. Kod primjerice prigušenja svjetala, prekidač je uglavnom bio spojen na promjenjivi otpornik. Kako se prekidač okreće, tako se otpor povećava ili smanjuje. Time se ograničava količina struje koja protječe do žarulje i upravlja njezinom svjetlinom.



Slika 54. Princip rada potencijometra [45]

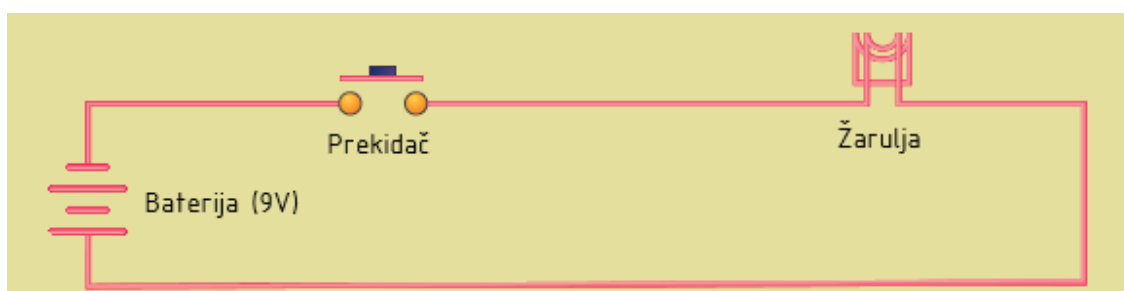
Može se uočiti jedan veliki nedostatak takvih analognih sklopova, a to je njihova loša ekonomičnost. Ta loša ekonomičnost rezultat je velike disipacije topline na promjenjivom otporniku. Isto tako analogni sklopovi osjetljivi su na buku (šum).

Digitalnim upravljanjem analognih sklopova, potrošnja energije može se drastično smanjiti. PWM omogućava digitalno kodiranje razina analognog signala. Radni ciklus kvadratnog vala modulira se pomoću brojača visoke razlučivosti, kako bi označivao određenu razinu analognog signala. PWM-signal je digitalan jer je opskrba istosmjernom strujom uvijek ili potpuno uključena ili potpuno isključena. Napon se do analognog trošila prenosi serijom „on“ i „off“ impulsa. „On“ predstavlja vrijeme u kojem struja prolazi kroz trošilo, dok „off“ predstavlja vrijeme u kojem struja ne prolazi kroz trošilo. Na *Slika 55* mogu se vidjeti tri različita PWM-signala [46].



Slika 55. Radni ciklus tri različita PWM-signalna [46]

Slika 55 a) prikazuje radni ciklus od 10 %, što znači da je signal uključen 10 %, a isključen 90 % vremena. Slika 55 b) i c) prikazuju radni ciklus od 50 % i 90 %. Ta tri PWM-izlaza predstavljaju tri različite vrijednosti analognog signala i to 10 %, 50 % i 90 % od ukupnog napona. Primjerice, ako je opskrba naponom jednaka 9 V, a radni ciklus jednak je 10 %, rezultirajući analogni signal bit će napona 0,9 V. Jednostavan primjer toga prikazuje Slika 56.



Slika 56. Jednostavan strujni krug upravljiv PWM-om [46]

Na Slika 56, baterija od 9 V napaja običnu žarulju. Ako se prekidač zatvori na 50 ms, žarulja će u tom intervalu primiti 9 V. Ako se potom prekidač otvori na 50 ms, žarulja će primiti 0 V.

Ponavljanjem tog ciklusa 10 puta u sekundi žarulja će svijetliti kao da je spojena na bateriju od 4,5 V (50 % od 9 V). Kažemo da je radni ciklus 50 %, a frekvencija modulacije je 10 Hz. Većina trošila zahtijeva ipak veću frekvenciju modulacije. Ako se žarulja uključi na pet sekundi i onda nakon toga isključi na pet sekundi i tako se nastavi, radni ciklus će i dalje biti 50 %, ali će žarulja jarko svijetliti prvih pet sekundi, dok će sljedećih pet sekundi biti ugašena. Kako bi žarulja svijetlila kao da je spojena na napon od 4,5 V, period uključivanja-isključivanja mora biti relativno kratak u odnosu na vrijeme koje je potrebno žarulji da reagira na tu promjenu stanja. Da se postigne željeni efekt prigušenog svjetla potrebno je povećati frekvenciju modulacije. Uobičajene frekvencije modulacije kreću se od 1 kHz do 200 kHz [46].

6.3.2. Prednosti i primjena PWM-a kod upravljanja sustavom hlađenja

Jedna od prednosti PWM-a je u tome što signal ostaje digitalan cijelim putem od mikroprocesora do sustava kojim se upravlja. Nije potrebna pretvorba iz digitalnog u analogni signal. Time je bitno smanjen utjecaj šumova. Šum može utjecati na digitalni signal jedino ako je dovoljno jak da 1 („on“) promijeni u 0 („off“) i obrnuto.

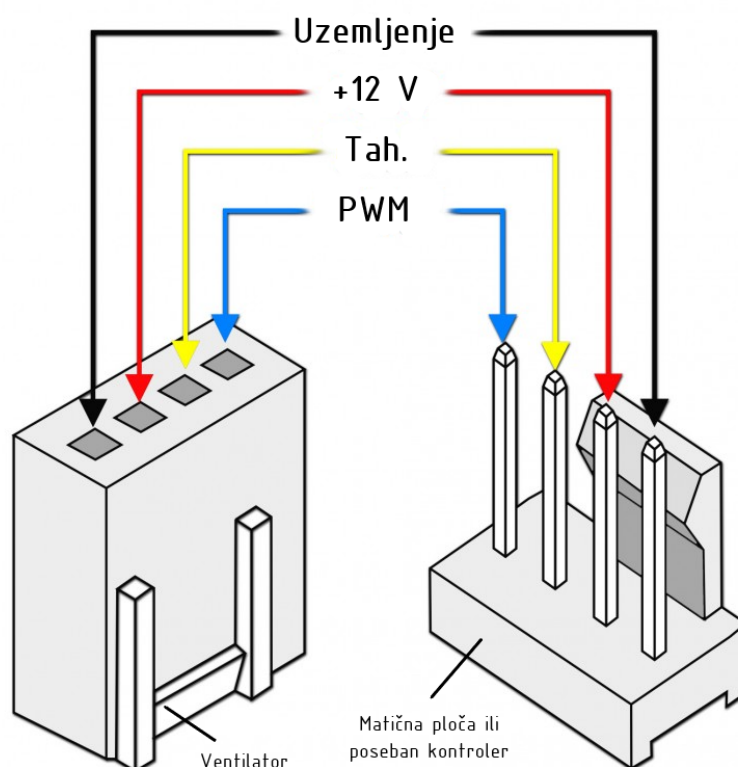
Otpornost na šumove je razlog zbog kojeg se PWM koristi u komunikacijama. Pretvorba analognog signala u digitalni signal povećava moguću duljinu komunikacijskog kanala. Na prijemnoj strani mreža otpornik-kondenzator može taj kvadratni val visoke frekvencije modulacije vratiti u analogni oblik.

Nadalje, impulsno-širinska modulacija nalazi svoju primjenu i u autoindustriji. Pomoću PWM-a moguće je upravljati kočnicom automobila. Kod brojnih vrsta kočnica, količinom kočnog pritiska upravlja se pomoću analognog ulaznog signala. Što se veći napon ili jakost struje primijeni na kočnicu, bit će veći pritisak kočnice na kotač. Izlazni signal s PWM-kontrolera može se spojiti na prekidač između izvora napona i kočnice. Kako bi se postigao veći pritisak kočnice na kotač, softver samo treba povećati radni ciklus PWM-izlaza. Ako je potrebna određena vrijednost pritiska, moraju se provesti mjerenja kako bi se pronašla matematička ovisnost između radnog ciklusa i pritiska kočnice na kotač. Time se pronalazi optimalna vrijednost s obzirom na uvjete poput radne temperature, površinskog trošenja itd.

PWM se primjenjuje i kod osobnih računala sa svrhom upravljanja ventilatorima i pumpom kod vodenog hlađenja. Upotrebom PWM-a povećava se područje upravljivosti čime je moguće smanjiti brzinu vrtnje ventilatora ispod granica postavljenih drugim načinima upravljanja.

Smanjenjem maksimalne brzine vrtnje dobiva se smanjena razina buke, manja potrošnja energije te se povećava radni vijek ventilatora [47].

Postoji više vrsta ventilatora koji se koriste u elektronici i moguće ih je podijeliti na one s dvije, tri ili četiri žice, ovisno o načinu upravljanja. Kako ventilatori s dvije i tri žice ne pružaju mogućnost adekvatnog upravljanja, danas se pretežito koriste oni s četiri žice [47]. Shema priključka jednog takvog ventilatora prikazana je na Slika 57.



Slika 57. Shema priključka ventilatora s 4 žice [48]

Na slici se može vidjeti da crvena žica napaja ventilator, dok crna žica zatvara strujni krug. Žuta žica omogućava slanje tahometrijskog signala. Tim signalom šalju se podaci o trenutnoj brzini vrtnje ventilatora natrag prema kontroleru. I na kraju, plava žica šalje PWM-signal i odgovorna je za upravljanje brzinom vrtnje [48].

Svi signali šalju se prema matičnoj ploči i mogu se pratiti preko grafičkog korisničkog sučelja posebnog softverskog paketa ili BIOS-a (engl. *Basic Input/Output System*) računala.

Samo upravljanje ventilatora moguće je izvesti na nekoliko različitih načina [47]:

- bez upravljanja
- „uključeno“/„isključeno“ upravljanje
- linearno upravljanje
- PWM niske frekvencije
- PWM visoke frekvencije.

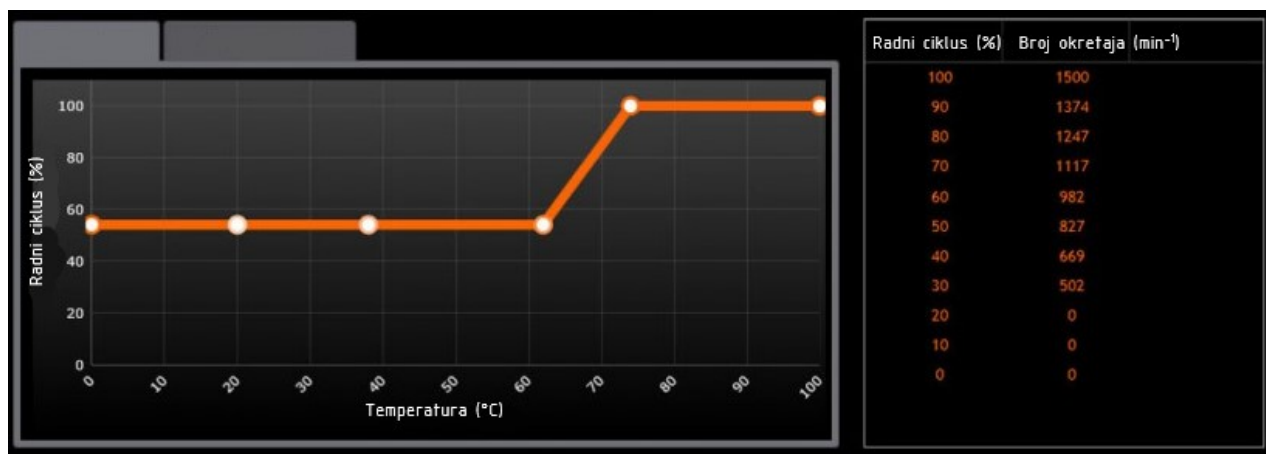
Najjednostavnija metoda je rad ventilatora bez upravljanja. Njome ventilator uvijek postiže maksimalnu brzinu vrtnje. Iako jednostavno, loše utječe na vijek trajanja i razinu buke, pogotovo u manje zahtjevnim primjenama kada hlađenje nije ključno [47].

Kod upravljanja „uključeno“/„isključeno“ ventilatori rade samo kada je to potrebno. Odluku donosi operater i ručno unosi vrijednosti temperature pri kojoj će se ventilator početi vrtjeti [47].

Linearno upravljanje donosi određena poboljšanja u odnosu na prethodna dva načina. Kod ove metode mijenja se vrijednost napona pod kojim se nalazi motor ventilatora. Kako bi se dobila niska brzina vrtnje napon se smanjuje, dok se za dobivanje visoke brzine vrtnje napon povećava. Iako se time osigurava tiši rad, pojavljuje se problem ograničenog područja upravljanja. Primjerice, kod ventilatora s nazivnim naponom od 12 V područje upravljanja se nalazi između vrijednosti 7 V i 12 V [47].

Metoda koja se pretežito koristi je PWM-upravljanje. PWM niske frekvencije radi na principu brze izmjene vrijednosti napona između 0 V i 12 V. Jedini problem nastaje zbog buke uslijed komutacije, budući da je frekvencija modulacije niska. Taj problem se rješava upotrebom PWM-a visoke frekvencije, gdje je frekvencija modulacije izvan slušnog praga ljudi [47].

Ono što PWM omogućava je postavljanje proizvoljne krivulje rada ventilatora i pumpi kod sustava hlađenja računala. Točkama krivulje se aproksimiraju radne točke ventilatora pri različitim temperaturama. Tako je primjerice moguće zadati linearan porast brzine vrtnje s porastom temperature. Primjer jedne krivulje rada ventilatora prikazan je na *Slika 58*, gdje se bijele točke mogu pomicati po mreži dijagrama kako bi se našao idealan omjer između dobrog hlađenja i buke.



Slika 58. Radna krivulja ventilatora [48]

Isto tako se može primijetiti mogućnost spuštanja brzine vrtnje sve do 30 % radnog ciklusa moduliranog signala čime se dobiva broj okretaja od 502 min⁻¹.

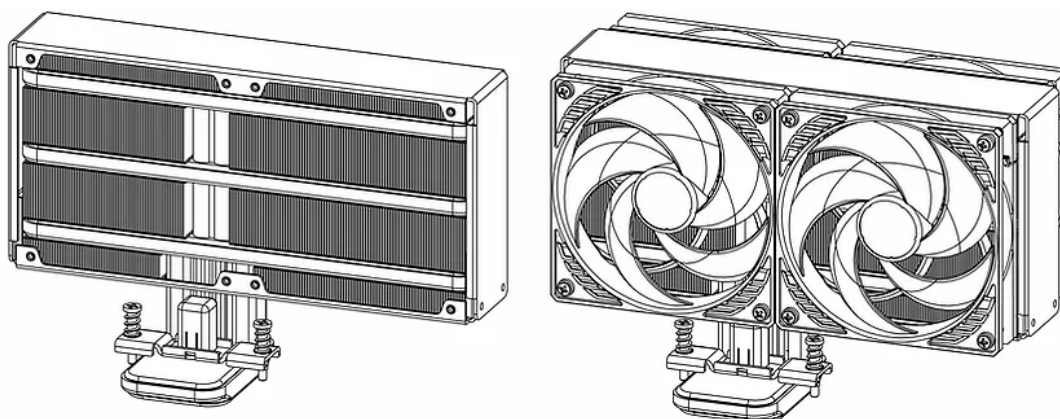
6.4. Alternativna rješenja hlađenja

U području hlađenja elektroničkih komponenti ima mnogo inovacija. Te inovacije se uglavnom svode na određena poboljšanja već postojećih rješenja. U nastavku će biti prikazana dva takva poboljšanja.

6.4.1. Termosifon

Princip rada termosifona vrlo je sličan onome zračnih hladnjaka koji koriste toplinske cijevi. Problem koji se javlja kod toplinskih cijevi je toplinsko zasićenje. Ako CPU predaje više topline nego što fluid na dnu cijevi može primiti, dolazi do isparavanja i u kapilarnim kanalima, čime se povećava otpor provođenju topline i narušavaju toplinska svojstva.

Način na koji se to može spriječiti je upotreba termosifona. Toplinske cijevi termosifona ne oslanjaju se na svojstvo kapilarosti kako bi vratile hladan fluid prema izvoru topline, već koriste gravitaciju. Zbog toga je moguće takve cijevi postaviti u petlju u kojoj na početku fluid isparava te se dobivena para zbog oslobođene energije penje prema gornjem dijelu cijevi. Tamo para kondenzira i vraća se drugim putem pod utjecajem gravitacije [49]. Termosifon se može vidjeti na Slika 59.

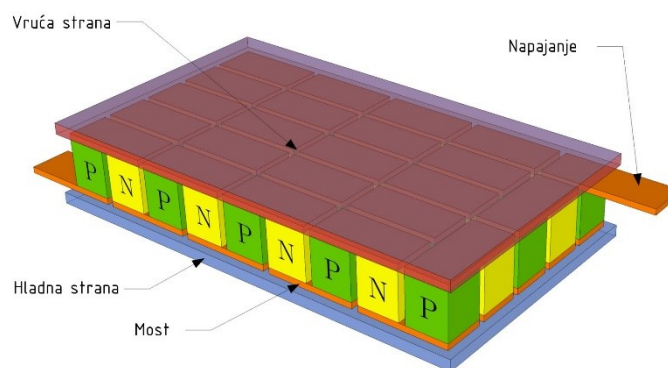


Slika 59. Termosifon proizvođača *IceGiant* [50]

Na slici se može vidjeti sličnost sa zračnim hladnjacima. Iako pružaju odlične karakteristike hlađenja, na tržištu nema mnogo ovakvih komercijalnih rješenja.

6.4.2. Peltierov element

Peltierov element je termoelektrični hladnjak koji se može koristiti kao dodatak klasičnim metodama hlađenja. Sam element prikazan je na *Slika 60*.



Slika 60. Shema *Peltierovog* elementa [51]

Peltierov element postavlja se između hladne ploče hladnjaka i distributera topline CPU-a. Kad se priključi na napon, elektroni u vodiču koji se nalazi između dvije keramičke ploče reagiraju i stvaraju razliku temperature. Zbog te razlike toplina se prenosi s jedne strane elementa na drugu. Potrebne su velike količine energije za njihovo pokretanje što ih čini lošim izborom za hlađenje CPU-a.

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U nastavku slijedi eksperimentalni dio rada gdje će biti ispitana pouzdanost tri različita hladnjaka. Svrha ovog ispitivanja je utvrditi utjecaj hlađenja na stabilnost rada i dugotrajnost mikroprocesora osobnog računala.

Na stabilnost rada mikroprocesora utječe mnogo čimbenika, među kojima se najviše ističe temperatura. Naime, prilikom pokretanja računala napajanje uzima struju iz mreže i ona počinje teći kroz cijeli sustav. Ovisno o zahtjevnosti, komponente su tada spojene na napon određen unutarnjom kompozicijom napajanja te im on omogućuje normalan rad. Usred toka struje kroz sustav, elektroničke komponente oslobađaju toplinu, koju je potrebno adekvatnim hlađenjem i pravilnom ventilacijom prenijeti izvan sustava. Ako se to ne dogodi, mogu se primijetiti određene nepravilnosti u radu elektroničkih komponenti. U slučaju mikroprocesora to se odnosi na brzinu prijenosa podataka, koja se očituje radnim taktom. Ako temperatura čipa prijeđe određenu vrijednost, dio sustava koji je zadužen za praćenje poremećaja smanjuje radni takt, čime se smanjuje i oslobođena toplina te sustav opet postiže normalne radne uvjete. U ekstremnim slučajevima kada nije moguće postići normalne radne uvjete, cijeli sustav se sam isključuje.

Dugotrajnost današnjih mikroprocesora bolja je nego kod prijašnjih generacija zbog sigurnosnih mjera koje su implementirane u njihov rad. Unatoč tome, dugotrajan rad pri povišenim temperaturama, blizu temperature zasićenja, može utjecati na strukturu silicija i ostalih komponenti. Iako je to rijetkost, i dalje se preporučuje adekvatno hlađenje kako bi se spriječile greške kasnije u radnom vijeku mikroprocesora.

U ovom poglavlju bit će navedena oprema koja je korištena pri ispitivanju. Nakon toga slijedi opis tijeka ispitivanja za sva tri hladnjaka te prikaz dobivenih rezultata. Na kraju se uspoređuju rezultati sva tri ispitivanja te se prema tome donosi odluka o optimalnoj vrsti hlađenja za mikroprocesor u pitanju.

7.1. Hardver korišten prilikom ispitivanja

Ovdje su navedene hardverske komponente bitne za tijek ispitivanja. Komponente koje sudjeluju u radu računala, ali ne utječu na konačne rezultate, nisu navedene.

7.1.1. Mikroprocesor

Ispitivanje se provodi na mikroprocesoru Ryzen 5 3600 tvrtke AMD, koji je prikazan na *Slika 61*.



Slika 61. AMD Ryzen 5 3600 mikroprocesor

Mikroprocesor na slici umetnut je u matičnu ploču te je na slici vidljiv samo njegov distributer topline. Sam mikroprocesor pripada srednjoj klasi AMD-ovih procesora i predstavlja drugu generaciju procesora sa sposobnošću paralelnog računanja. Njegovi tehnički podaci prikazani su u *Tablica 8*.

Tablica 8. Tehnički podaci za AMD Ryzen 5 3600 mikroprocesor

Proizvođač	Model	Broj jezgri	Broj dretvi	Radni takt (MHz)	Maksimalni radni takt (MHz)	Temperatura zasićenja (°C)	Potrošnja (W)
AMD	Ryzen 5 3600	6	12	3600	4200	95	65

U tablici je navedena temperatura zasićenja od 95 °C koja označuje maksimalnu temperaturu pri kojoj mikroprocesor i dalje postiže maksimalni radni takt. S druge strane, navedena potrošnja označuje vrijednost potrošnje snage pri maksimalnom opterećenju i normalnim uvjetima rada (bez mijenjanja napona i povećanja radnog takta). Broj dretvi označava fiktivne jezgre mikroprocesora potrebne za paralelno računanje.

7.1.2. Matična ploča

Za povezivanje svih komponenti računala i raspodjelu snage među njima koristi se MSI MEG X570 Unify matična ploča prikazana na *Slika 62*.



Slika 62. MSI MEG X570 UNIFY matična ploča

Navedena matična može podnijeti velika toplinska opterećenja jer koristi pasivni hladnjak kroz koji prolazi toplinska cijev. Time se osigurava normalna radna temperatura čipova na matičnoj ploči čak i u slučaju pregrijavanja mikroprocesora. Ona služi i kao kontroler za upravljanje brzinom vrtnje ventilatora. Ventilatori se spajaju direktno na matičnu ploču i definira se krivulja rada za svaki ventilator pojedinačno.

7.1.3. Napajanje

Za napajanje cijelog sustava koristi se model RM850i proizvođača Corsair. Napajanje je izrađeno po standardu 80 Plus Gold, što osigurava kvalitetnu pretvorbu energije. Time je također osigurano dovoljno snage i kada je sustav maksimalno opterećen. Samo napajanje prikazano je na *Slika 63*.

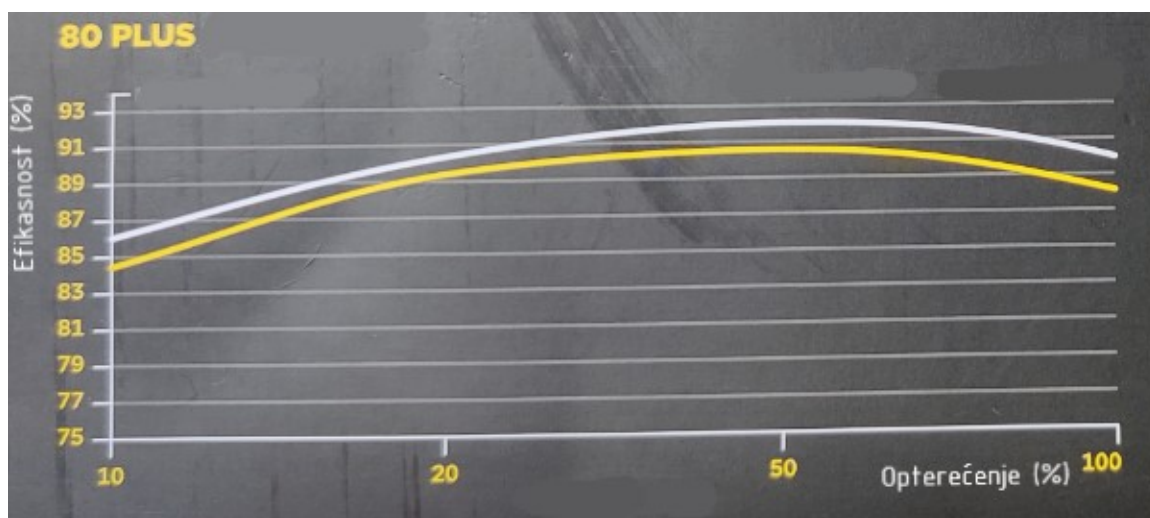


Slika 63. Napajanje RM850i proizvođača Corsair

Na slici su isto tako prikazani i priključci korišteni prilikom ispitivanja. Budući da je napajanje modularno, višak kablova je odstranjen čime je omogućeno lakše spajanje.

Senzor za mjerenje mjeri razliku između energije preuzete iz elektroenergetske mreže i one predane komponentama. Poželjno je da ta razlika bude što manja, što ponajviše ovisi o opterećenju sustava. Ta ovisnost prikazana je na *Slika 64*.

Iz dijagrama se može zaključiti da najveću efikasnost energetske pretvorbe napajanje postiže kada je opterećeno 50 % pa sve do 80 % vrijednosti dopuštenog opterećenja.



Slika 64. Dijagram deklarirane efikasnosti napajanja RM850i

7.1.4. Grafička kartica

Prikaz podataka i prijenos vizualnog signala do ekrana računala omogućava model grafičke kartice Radeon Pulse RX 5600 XT BE proizvođača Sapphire prikazan na *Slika 65*.



Slika 65. Grafička kartica Radeon Pulse 5600 XT BE proizvođača Sapphire

Hlađenje navedene grafičke kartice izvodi se preko toplinske cijevi koja prenosi toplinu na gustu mrežu listova izrađenih od aluminija. Potom se toplina konvekcijom prenosi na okolni zrak, koji se radom ventilatora odvodi izvan sustava. U provedenim ispitivanjima toplina oslobođena usred rada grafičke kartice ne uzima se u obzir. Naime, opterećenje se nameće samo na mikroprocesor i toplina oslobođena zbog rada grafičke kartice je konstantna za sva tri ispitivanja.

7.1.5. Sustav hlađenja

Komponente sustava za hlađenje detaljno su obrađene u prijašnjim poglavljima. Ovdje je dan samo kratak prikaz komponenti korištenih kod ispitivanja.

7.1.5.1. Kućište i ventilatori

Za prihvat svih komponenti i zaštitu od vanjskih čimbenika poput prašine odabrano je Pure Base 500DX kućište proizvođača Be quiet! prikazano na *Slika 66*.



Slika 66. Pure Base 500DX kućište proizvođača Be quiet!

Na slici se može vidjeti sklopljen sustav unutar kućišta (lijevo) te mrežica na prednjem dijelu kućišta koja omogućava dovod svježeg zraka. Samo kućište je dizajnirano za dobar protok zraka, gdje su prednja, gornja i donja strana otvorene. Jedna strana izrađena je od kaljenog stakla i pruža uvid u stanje i procese koji se zbivaju unutar kućišta.

Kako bi se stvorio dobar protok zraka koriste se ventilatori proizvođača Be quiet! prikazani na Slika 67.



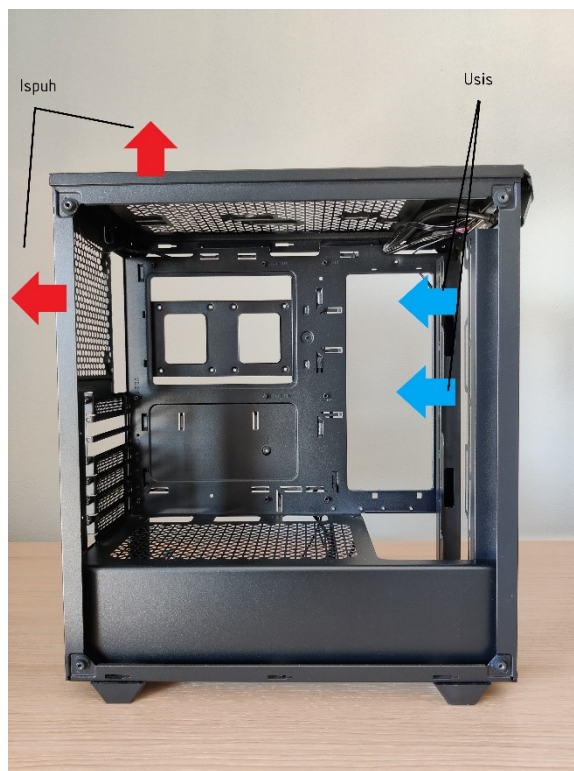
Slika 67. Pure Wings 2 (lijevo) i Silent Wings 3 (desno) ventilatori proizvođača Be quiet!

Tehnički podaci navedenih ventilatora prikazani su u Tablica 9.

Tablica 9. Tehnički podaci ventilatora

Proizvođač	Model	Promjer ventilatora (mm)	Maksimalan broj okretaja (min^{-1})	Volumni protok zraka (m^3/s)	Vrsta ležaja
Be quiet!	Silent Wings 3	140	1600	0,037	Hidrodinamički
Be quiet!	Pure Wings 2	140	1600	0,044	Puškasti

Prikazani ventilatori postavljaju se u kućište prema sljedećem rasporedu. Dva Silent Wings 3 ventilatora postavljaju se s prednje strane kućišta i odgovorna su za usis svježeg zraka. Pure Wings 2 ventilatori postavljaju se s gornje i stražnje strane, gdje ispuhuju topli zrak izvan kućišta. Shema ventilacije može se vidjeti na *Slika 68*.



Slika 68. Shema ventilacije

Ovom konfiguracijom ventilacije stvara se približno neutralna atmosfera unutar kućišta, što znači da je tlak približno jednak atmosferskom. Drugi ventilatori unutar kućišta, poput onih na grafičkoj kartici i napajanju isto sudjeluju u cirkulaciji zraka kroz sustav, ali je njihov utjecaj na tlak zanemariv.

7.1.5.2. Hladnjak AMD Wraith Stealth

Prvi hladnjak korišten za hlađenje mikroprocesora je Wraith Stealth proizvođača AMD. Ovaj hladnjak pripada skupini pasivnih hladnjaka, čija je izmjena topline potpomognuta strujanjem zraka izazvanim malim ventilatorom. Sam hladnjak izrađen je od aluminija i napravljen je za

hlađenje komponenti koje oslobađaju malu količinu topline. Prikaz hladnjaka može se vidjeti na *Slika 69*.

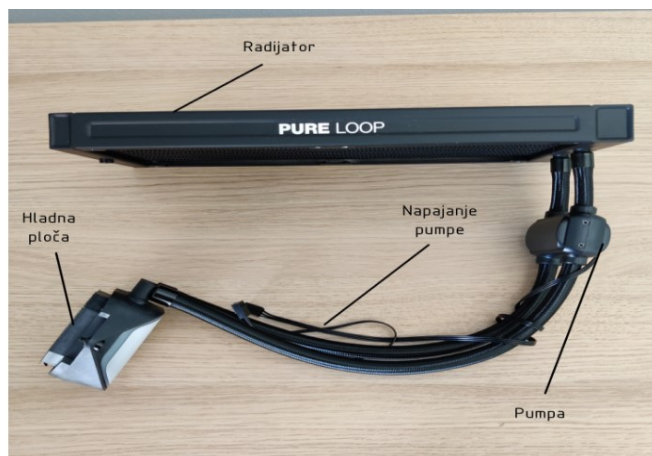


Slika 69. Hladnjak Wraith Stealth proizvođača AMD

Sa slike se može primijetiti da je ovaj hladnjak jednostavnije konstrukcije s obzirom na ostale hladnjake.

7.1.5.3. Hladnjak Be quiet! Pure Loop 280

Sljedeći hladnjak korišten kod ispitivanja je Pure Loop 280 proizvođača Be quiet!, prikazan na Slika 70.

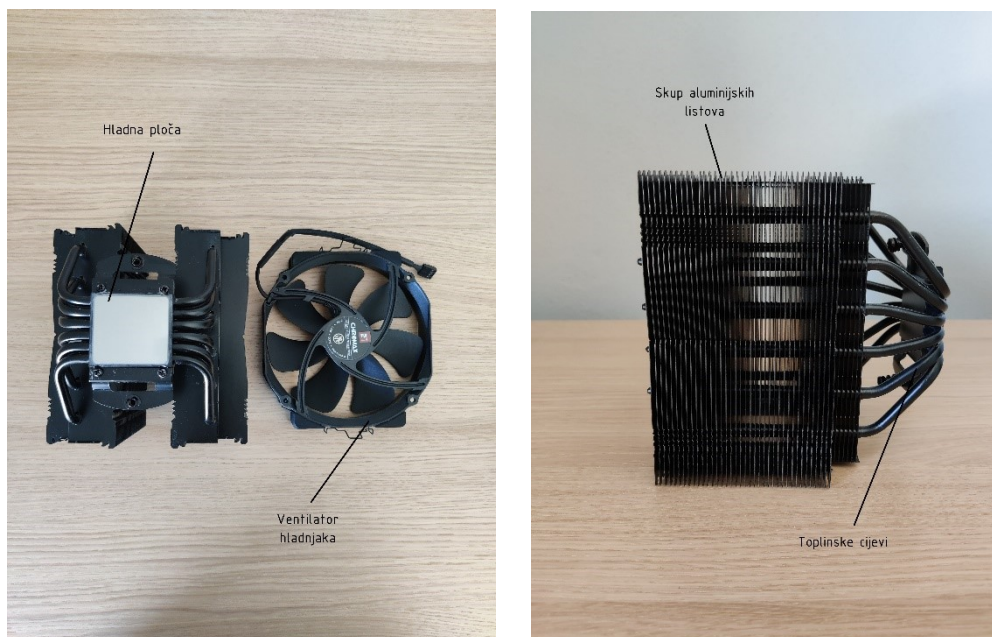


Slika 70. Pure Loop 280 hladnjak proizvođača be quiet!

Prikazani hladnjak pripada skupini sveobuhvatnih vodenih hladnjaka. Za razliku od vodenih petlji, sveobuhvatna rješenja nisu modularna i sadrže sve potrebne komponente za hlađenje mikroprocesora. Sastoji se od hladne ploče preko koje se toplina prenosi na rashladni medij, koji je u ovom slučaju destilirana voda. Zagrijana voda se radom pumpe prenosi cijevima do aluminijskog radijatora, gdje se toplina predaje zraku, koji se potom izvodi van iz kućišta.

7.1.5.4. Hladnjak Noctua NH-D15

Posljednji hladnjak koji se koristi je NH-D15 proizvođača Noctua prikazan na *Slika 71*.



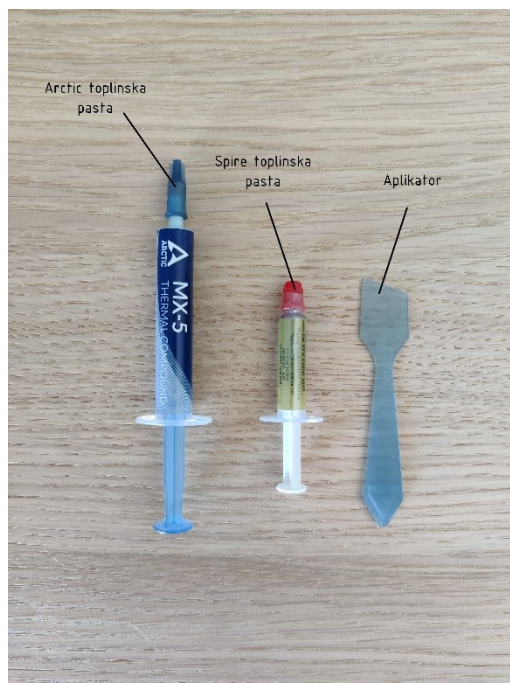
Slika 71. NH-D15 hladnjak proizvođača Noctua

Ovaj hladnjak pripada skupini zračnih hladnjaka s dva tornja. Za hlađenje koristi toplinske cijevi u kojima voda isparava u dodiru sa zagrijanim mikroprocesorom. Dobivena para penje se do gornjeg dijela cijevi gdje predaje toplinu velikoj površini aluminijskih listova na koje nastrujava zrak. Nakon prijenosa topline para se kondenzira i vraća se kapilarnim kanalima prema mikroprocesoru i hladi ga.

7.1.5.5. Toplinska pasta

Toplinske paste koriste se kod svih vrsta hlađenja, gdje povećavaju efektivnost izmjene topline. Nanose se u tankom sloju između distributera topline mikroprocesora i hladne ploče hladnjaka. Iako površine tih dviju komponenti na prvi pogled izgledaju savršeno ravne, one ne mogu biti potpuno (geometrijski) ravne, već neminovno imaju i manje neravnine, što može narušiti izmjenu topline. Kako bi se to spriječilo, nanosi se toplinska pasta koja popunjava praznine između tih neravnina i omogućava jednolik dodir po čitavoj površini.

Toplinske paste su uglavnom viskozne i ne provode struju kako bi se spriječio kratki spoj u slučaju dodira s elektroničkim komponentama. U ovom ispitivanju korištene su pasta MX-5 proizvođača Arctic i pasta Silvergrease proizvođača Spire, prikazane na *Slika 72*.



Slika 72. Toplinske paste i aplikator

Toplinska svojstva paste korištenih u ispitivanjima prikazana su u *Tablica 10*.

Tablica 10. Toplinska svojstva toplinskih paste

Proizvođač	Model	Toplinska provodnost, λ (W/m K)	Temperatura primjene (°C)
Arctic	MX-5	8,5	–40 do 180
Spire	SILVERGREASE	2,93	–50 do 200

7.2. Softver korišten prilikom ispitivanja

Ovaj dio rada obuhvaća sve programske pakete korištene tijekom ispitivanja. Svi programi su besplatno preuzeti s interneta, osim u slučaju programa AIDA64, gdje je preuzeta probna verzija u trajanju od 30 dana.

7.2.1. HWiNFO

HWiNFO je besplatan programski paket koji prikazuje informacije o računalu u realnom vremenu. Njegovo grafičko korisničko sučelje prikazano je na *Slika 73*.

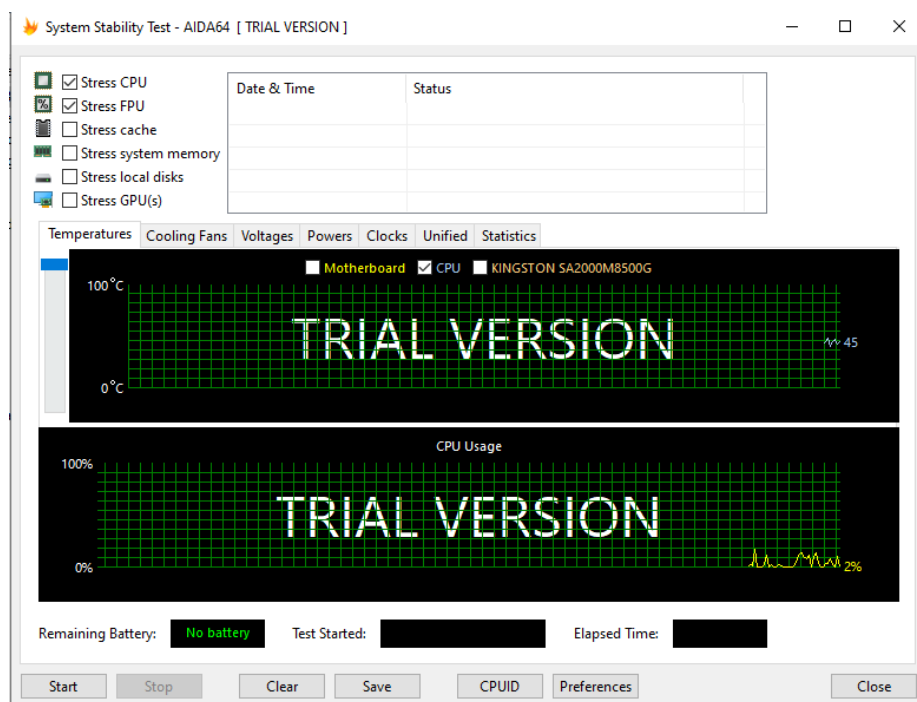
Sensor	Current	Minimum	Maximum	Average
System: MSI MS-7C35				
Virtual Memory Com...	8,743 MB	8,682 MB	8,743 MB	8,714 MB
Virtual Memory Avail...	10,023 MB	10,023 MB	10,084 MB	10,052 MB
Virtual Memory Load	46.5 %	46.2 %	46.5 %	46.4 %
Physical Memory Used	5,321 MB	5,276 MB	5,321 MB	5,303 MB
Physical Memory Av...	11,013 MB	11,013 MB	11,057 MB	11,031 MB
Physical Memory Load	32.5 %	32.3 %	32.5 %	32.4 %
Page File Usage	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
CPU [#0]: AMD Ryz...				
Core 0 VID	1.456 V	1.019 V	1.463 V	1.144 V
Core 1 VID	1.456 V	1.019 V	1.463 V	1.145 V
Core 2 VID	1.456 V	1.019 V	1.463 V	1.145 V
Core 3 VID	1.456 V	1.019 V	1.463 V	1.145 V
Core 4 VID	1.456 V	1.019 V	1.463 V	1.145 V
Core 5 VID	1.456 V	1.019 V	1.463 V	1.145 V
Core 0 Clock (perf ...	4,125.2 MHz	3,525.2 MHz	4,125.2 MHz	3,698.5 MHz
Core 1 Clock (perf ...	4,125.2 MHz	3,525.2 MHz	4,125.2 MHz	3,698.5 MHz
Core 2 Clock (perf ...	4,125.2 MHz	3,525.2 MHz	4,125.2 MHz	3,698.5 MHz
Core 3 Clock (perf ...	4,125.2 MHz	3,525.2 MHz	4,125.2 MHz	3,733.5 MHz
Core 4 Clock (perf ...	4,125.2 MHz	3,525.2 MHz	4,125.2 MHz	3,733.5 MHz
Core 5 Clock (perf ...	4,125.2 MHz	3,525.2 MHz	4,125.2 MHz	3,733.5 MHz
Bus Clock	100.0 MHz	100.0 MHz	100.0 MHz	100.0 MHz
Core 0 T0 Effective...	1,238.4 MHz	489.5 MHz	1,238.4 MHz	819.8 MHz
Core 0 T1 Effective...	218.4 MHz	21.0 MHz	218.4 MHz	79.6 MHz
Core 1 T0 Effective...	262.4 MHz	27.7 MHz	507.9 MHz	144.0 MHz
Core 1 T1 Effective...	231.3 MHz	25.0 MHz	329.6 MHz	93.4 MHz
Core 2 T0 Effective...	136.5 MHz	20.8 MHz	136.5 MHz	54.0 MHz
Core 2 T1 Effective...	190.9 MHz	27.0 MHz	190.9 MHz	80.9 MHz
Core 3 T0 Effective...	92.8 MHz	7.5 MHz	92.8 MHz	35.5 MHz
Core 3 T1 Effective...	123.5 MHz	9.6 MHz	123.5 MHz	41.4 MHz
Core 4 T0 Effective...	291.7 MHz	31.6 MHz	291.7 MHz	106.4 MHz

Slika 73. Grafičko korisničko sučelje programa HWiNFO

Primjena ovog programa omogućuje praćenje temperature različitih komponenti sustava, trenutne jakosti struje, napona, radnog takta grafičke kartice ili mikroprocesora itd. Tijekom praćenja koristi senzore koji su već integrirani u pojedinim komponentama sustava.

7.2.2. AIDA64

AIDA64 je programski paket koji prati informacije o računalu slično kao HWiNFO, ali ima i druge funkcije. U okviru ovog rada korišten je u svrhu opterećenja mikroprocesora. Opterećenjem jedne jezgre generalnim naredbama postiže se maksimalni radni takt, čime se povećava i oslobođena toplina. Grafičko korisničko sučelje programa prikazano je na *Slika 74*.

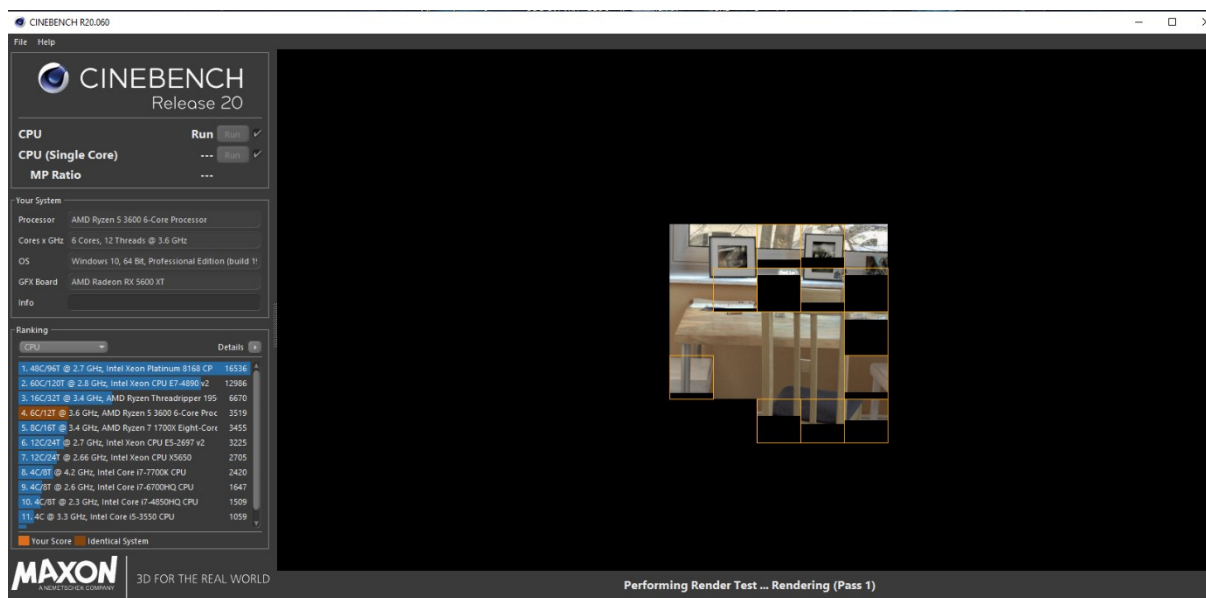


Slika 74. Grafičko korisničko sučelje programa AIDA64

U programu je moguće testirati i ostale komponente sustava, ali u sklopu ovog rada opterećenje je lokalizirano na mikroprocesor.

7.2.3. Cinebench

Treći program namijenjen testiranju stabilnosti mikroprocesora je Cinebench. Njime se provodi testiranje višejezgrenih mikroprocesora, pod koje spada i Ryzen 5 3600. Generiranjem digitalne slike koriste se sve jezgre i dretve mikroprocesora, čime se oslobađa velika količina topline. Ovakav način testiranja svojstven je grafičkim karticama, ali u današnje vrijeme sve više mikroprocesora ima mogućnost paralelnog računanja i zbog toga ih je moguće ovako opteretiti. Grafičko korisničko sučelje ovog programa prikazano je na *Slika 75*.

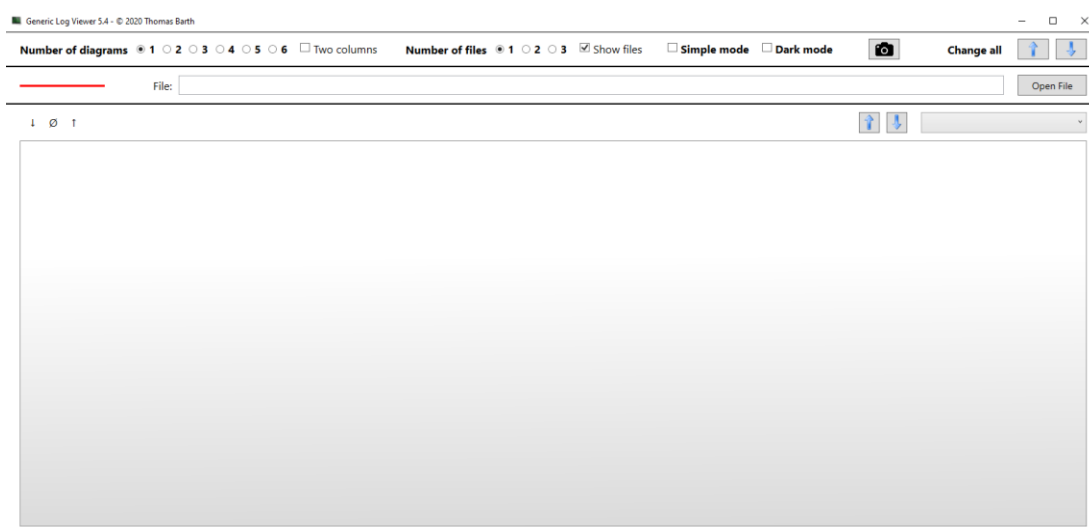


Slika 75. Grafičko korisničko sučelje programa Cinebench

Na slici je prikazano trenutno generiranje potpuno digitalne slike jedne prirodno osvijetljene sobe. Iako grafičke kartice bez problema rješavaju ovakve zadatke, mikroprocesorima to i dalje predstavlja problem.

7.2.4. Generic Log Viewer

Generic Log Viewer je alat koji omogućava bilježenje podataka dobivenih testiranjem i njegovo sučelje prikazano je na Slika 76.



Slika 76. Grafičko korisničko sučelje programa Generic Log Viewer

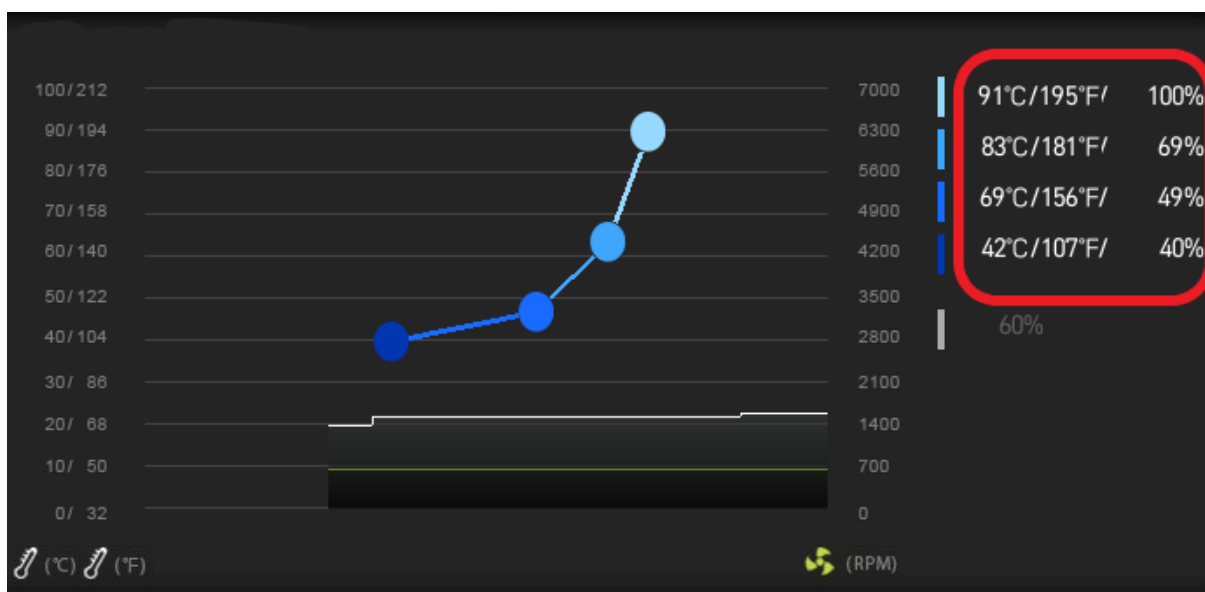
Ovaj alat uzima izvorne podatke rezultata ispitivanja i grafički ih prikazuje ovisno o unaprijed određenim željenim mjerenjima.

7.3. Provedena ispitivanja

Ispitivanja su provedena na osobnom računalu koje se koristi kao radna stanica kod koje se intenzitet opterećenja mijenja na dnevnoj bazi ovisno o vrsti primjene. Prije samog početka potrebno je pripremiti komponente. Računalo se rastavlja na pojedinačne dijelove i čisti od prašine nakupljene tijekom rada. Temeljito se čiste ventilatori i filtri zraka s prednje te gornje i donje strane kućišta, kako bi se osigurao nesmetan protok zraka. Komponente se potom vraćaju u kućište i spajaju na napajanje.

Hladnjaci se prije postavljanja ispuhaju komprimiranim zrakom te se, prije nanošenja toplinske paste, dodirne površine hladnjaka i mikroprocesora brišu etanolom. Nakon toga nanosi se toplinska pasta u tankom sloju pomoću aplikatora kako bi se osigurao jednolik dodir po čitavoj površini te učinkovitija izmjena topline.

Tijekom uključanja računala u BIOS-u se postavljaju krivulje rada ventilatora na usisu prema *Slika 77*.



Slika 77. Krivulja rada ventilatora na usisu

Ovom krivuljom osigurana je jednaka brzina vrtnje u svim ispitivanjima. Na slici su istaknute temperature prema kojima se mijenja radni ciklus modulacije. Ventilatorima na ispuhu upravlja se promjenom napona, što je automatski regulirano od strane matične ploče.

U provedenim ispitivanjima na mikroprocesor se nameće sintetičko opterećenje pomoću programa AIDA64 i Cinebench. Oba slučaja predstavljaju ekstremne uvjete opterećenja do kojih ne dolazi prilikom normalne upotrebe računala. Za pojedini hladnjak svako ispitivanje se provodi dva puta s dvije različite toplinske paste. Tijekom svake izmjene toplinske paste dodirne površine se temeljito čiste. Vrijeme ispitivanja mjeri se štopericom i iznosi 15 minuta, kako bi se postigla toplinska ravnoteža. Tijekom ispitivanja softver bilježi vrijednosti temperature, radnog takta i opterećenosti mikroprocesora koje su prikazane u nastavku.

Sva ispitivanja provedena su pri temperaturi okoline od 18 °C uz odstupanje ± 2 °C.

7.3.1. Ispitivanje pouzdanosti hladnjaka Wraith

Prvo ispitivanje se provodi na hladnjaku Wraith. Položaj u kućištu nakon postavljanja prikazan je na *Slika 78*.

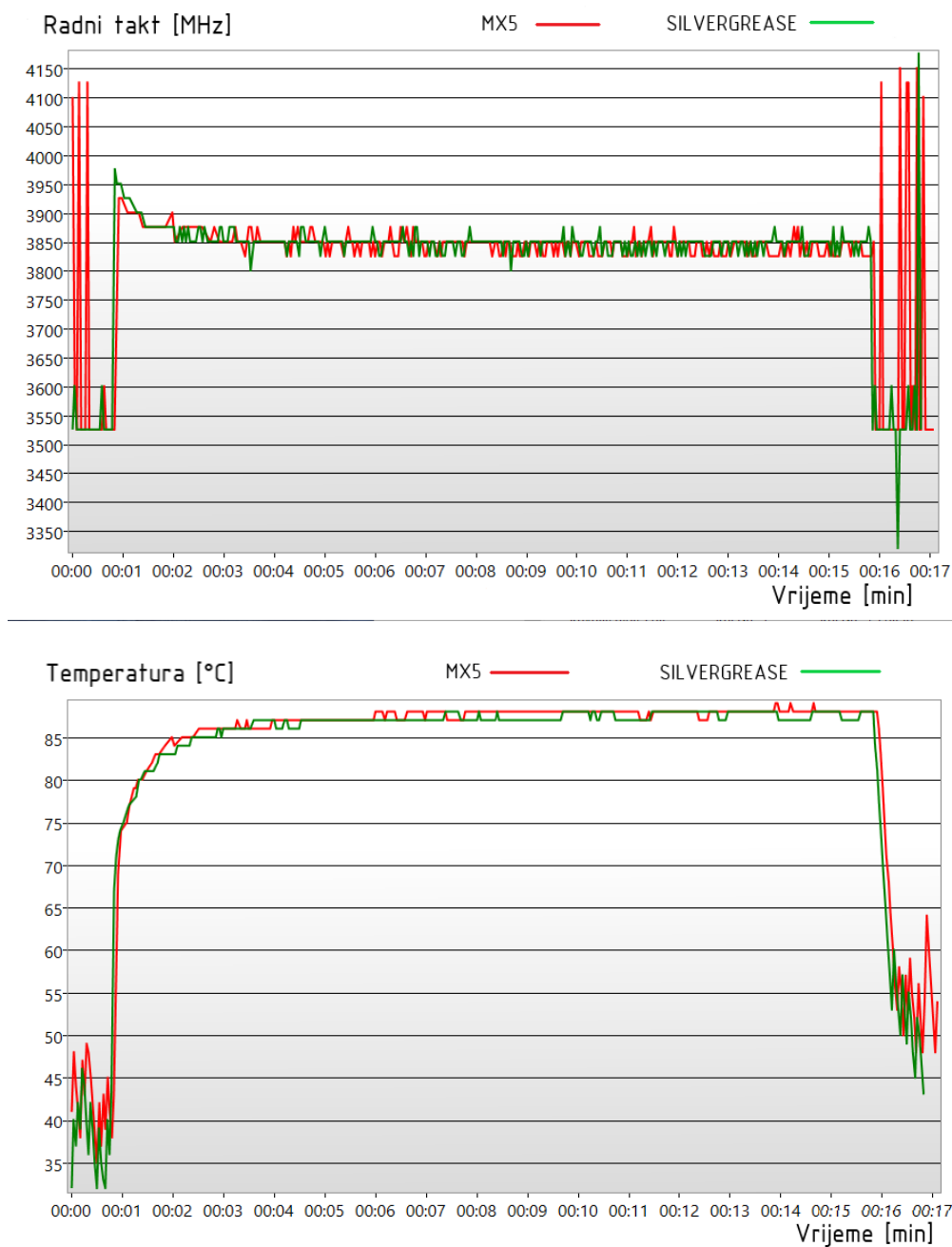


Slika 78. Položaj hladnjaka Wraith u kućištu

Nakon postavljanja, ventilator hladnjaka se spaja na odgovarajući priključak na matičnoj ploči. Njegova krivulja rada prikazana je u prethodnom dijelu.

7.3.1.1. Opterećenje mikroprocesora u programu AIDA64

Prvo slijedi opterećenje u programu AIDA64. Rezultati tog ispitivanja prikazani su na Slika 79.



Slika 79. Rezultati ispitivanja hladnjaka Wraith opterećenjem u programu AIDA64: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)

Iz grafova se može primijetiti postignuta visoka temperatura, koja u nekim trenucima postiže vrijednost od 90 °C neovisno o korištenoj toplinskoj pasti. Kao posljedica visoke temperature, i radni takt mikroprocesora ne postiže vrijednosti veće od 4000 MHz prilikom ispitivanja.

7.3.1.2. Opterećenje mikroprocesora u programu Cinebench

Potom slijedi opterećenje u programu Cinebench, čiji su rezultati vidljivi na *Slika 80*.



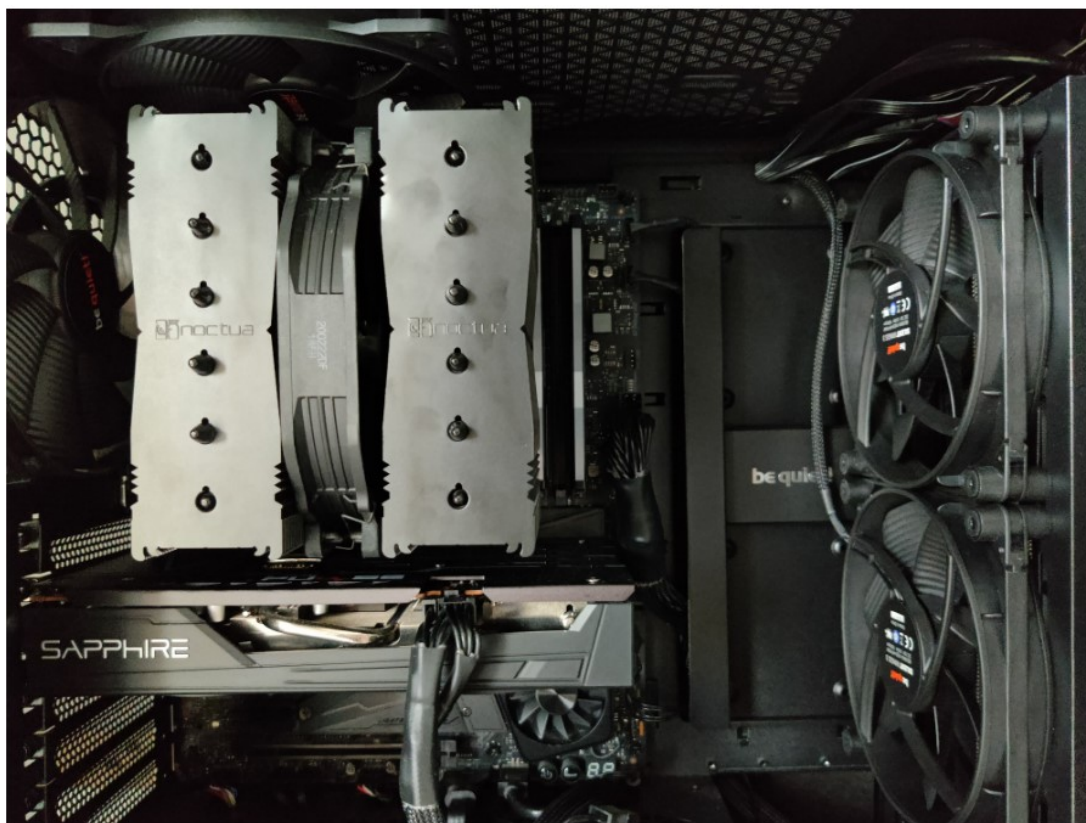
Slika 80. Rezultati ispitivanja Wraith hladnjaka opterećenjem u programu Cinebench: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)

Ovo ispitivanje prikazuje povoljnije rezultate. Temperatura se kreće oko vrijednosti od 85 °C dok je radni takt uglavnom stabilan te samo u jednom trenutku pada na vrijednost manju od 3200 MHz zbog specifičnosti ispitivanja.

Nakon inicijalnih ispitivanja na hladnjaku Wraith, sustav se gasi i ostavlja da ponovno postigne toplinsku ravnotežu.

7.3.2. Ispitivanje pouzdanosti hladnjaka NH-D15

Sljedeće ispitivanje provodi se na većem hladnjaku NH-D15. Njegov položaj u kućištu nakon postavljanja može se vidjeti na *Slika 81*.

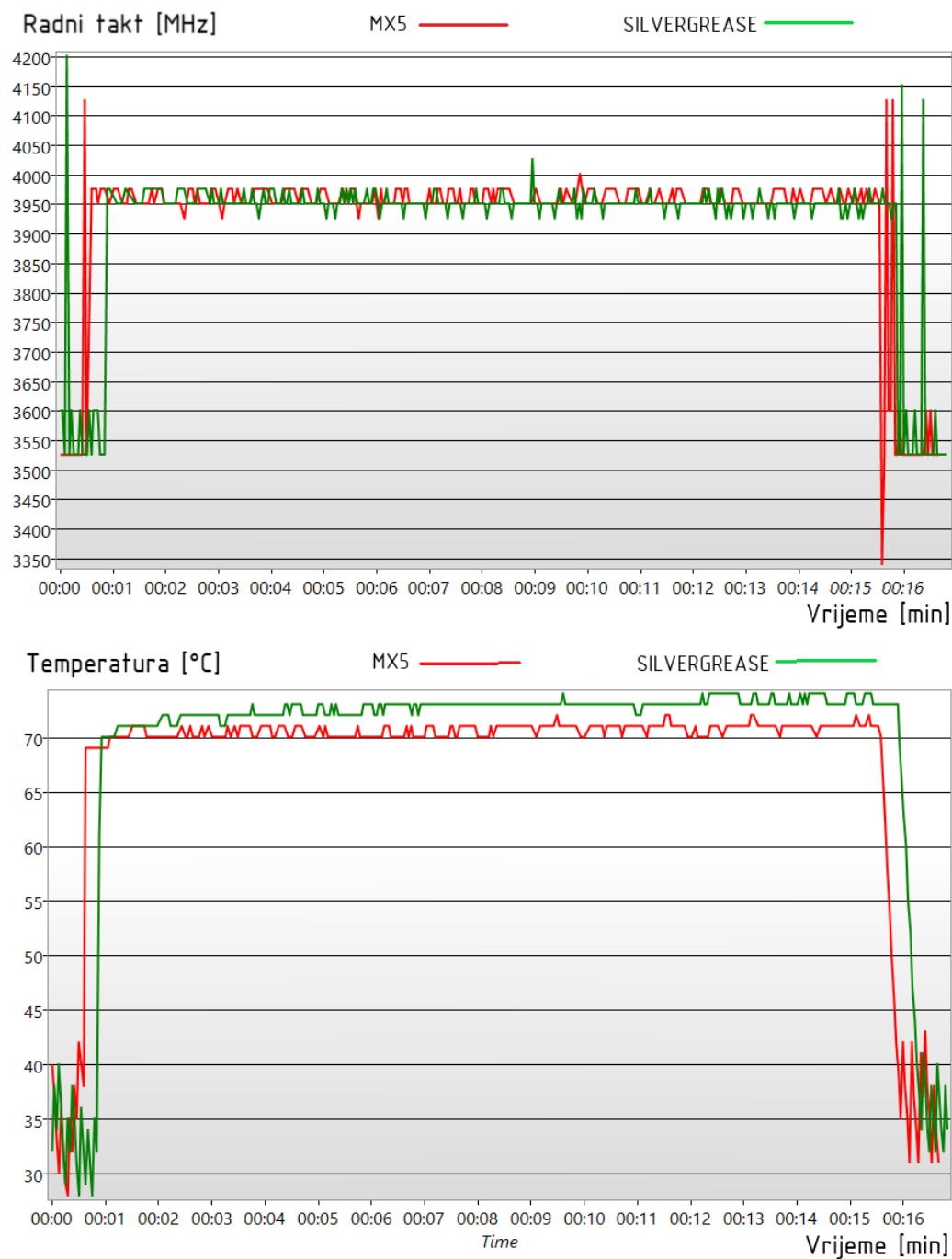


Slika 81. Položaj hladnjaka NH-D15 u kućištu

Kao i u prijašnjem slučaju, ventilator hladnjaka spaja se na odgovarajući priključak na matičnoj ploči, gdje se njegovom brzinom vrtnje upravlja impulsno-širinskom modulacijom.

7.3.2.1. Opterećenje mikroprocesora u programu AIDA64

Ovdje se na mikroprocesor također nameće sintetičko opterećenje u programu AIDA64. Rezultati ispitivanja prikazani su na *Slika 82*.

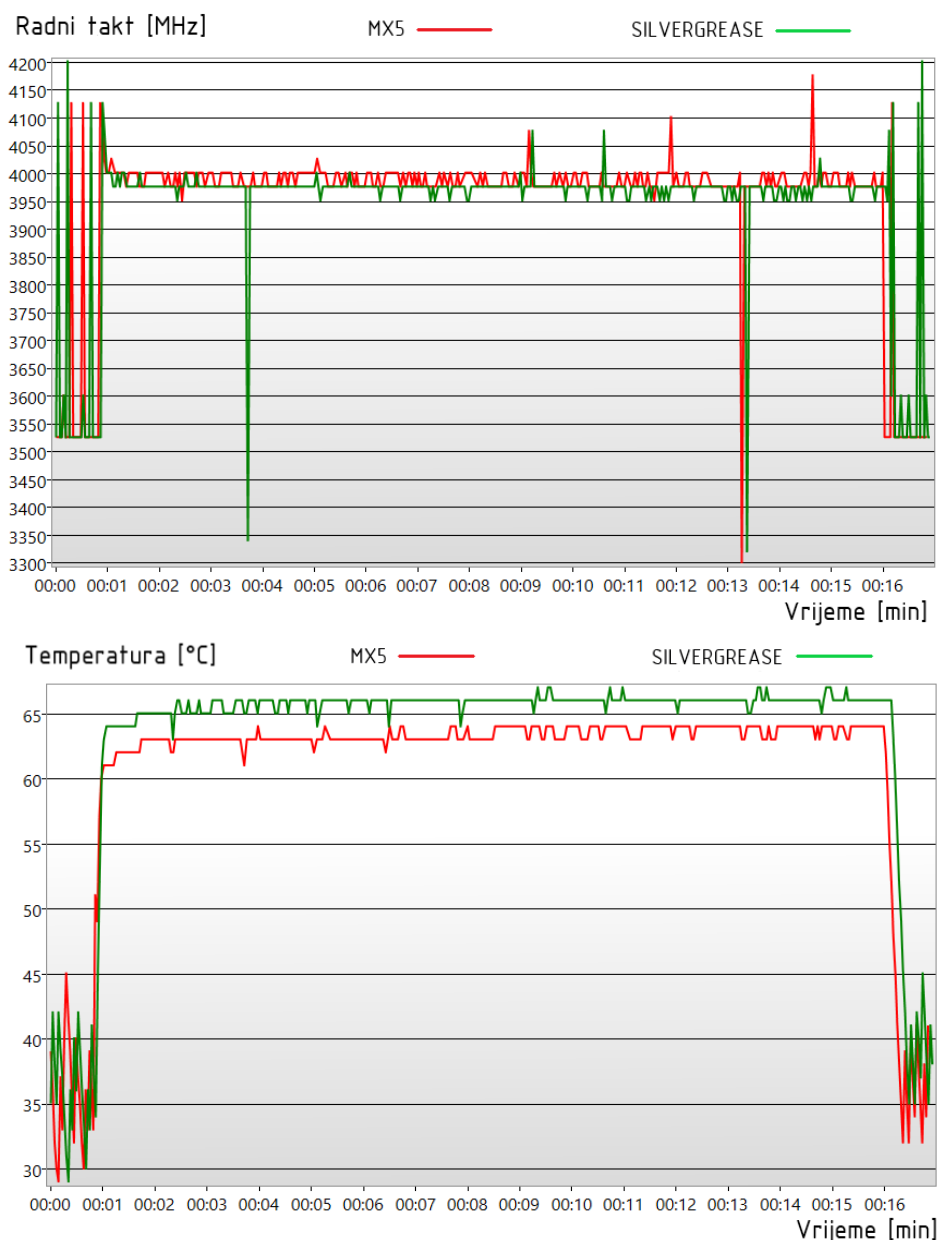


Slika 82. Rezultati ispitivanja NH-D15 hladnjaka opterećenjem u programu AIDA64: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)

Slika prikazuje bitno povoljnije rezultate od onih u prijašnjem slučaju. Temperatura tijekom ispitivanja ne prelazi 75 °C, dok je radni takt stabilan pri vrijednosti blizu 4000 MHz.

7.3.2.2. Opterećenje mikroprocesora u programu Cinebench

Zatim se ponovno provodi opterećenje sustava u programu Cinebench. Rezultati tog ispitivanja mogu se vidjeti na *Slika 83*.



Slika 83. Rezultati ispitivanja NH-D15 hladnjaka opterećenjem u programu Cinebench: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)

Proučavanjem rezultata primijećena je razlika u postignutim maksimalnim temperaturama između ispitivanja s dvije različite toplinske paste, gdje ta razlika iznosi 3 °C. Radni takt u određenim trenucima pada na vrijednost 3300 MHz, ali se odmah ispravlja.

Nakon završetka sustav se isključuje te se priprema za posljednje ispitivanje.

7.3.3. Ispitivanje pouzdanosti hladnjaka Pure Loop

Posljednje ispitivanje provodi se na sveobuhvatnom vodenom hladnjaku Pure Loop. Položaj navedenog hladnjaka u kućištu prikazan je na *Slika 84*.

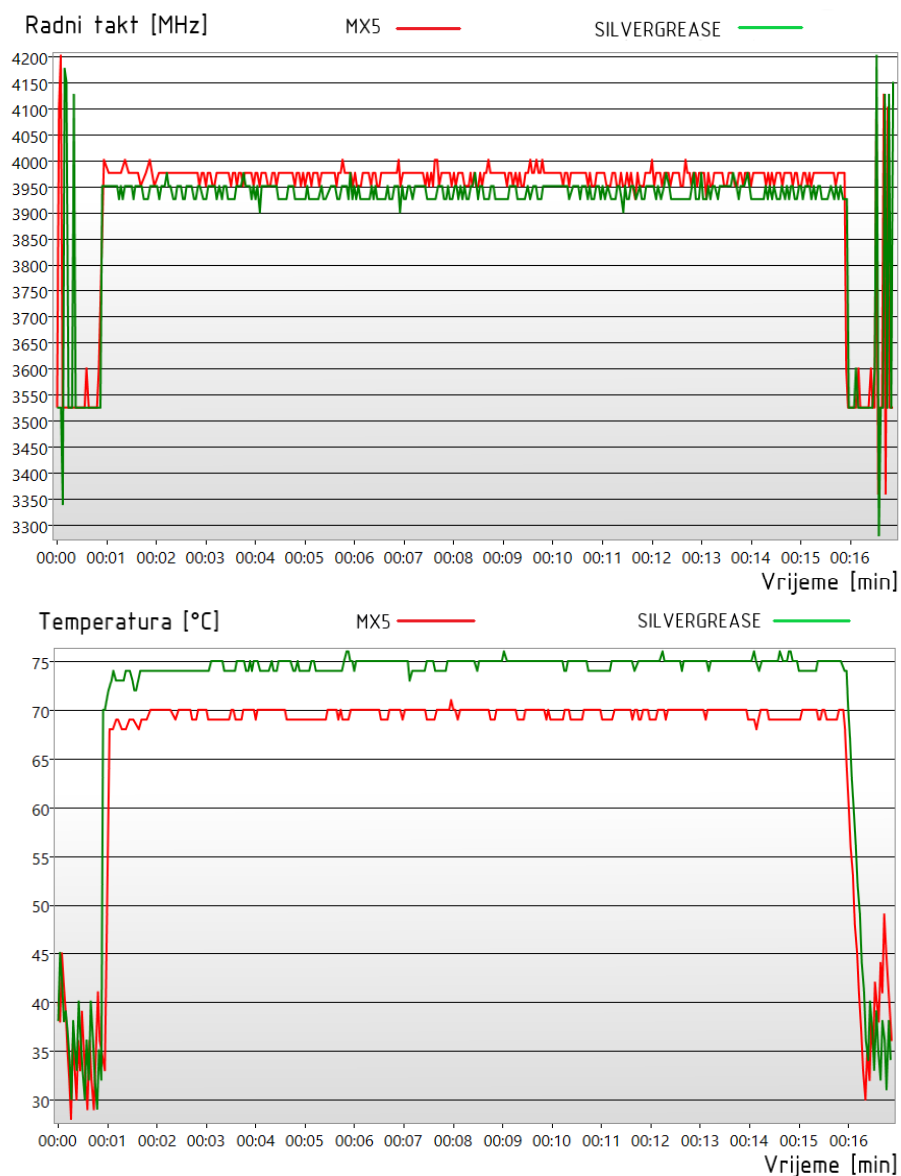


Slika 84. Položaj Pure Loop hladnjaka u kućištu

Pri postavljanju hladnjaka uvedene su promjene. Naime, zbog kolizije položaja hladnjaka i matične ploče, hladnjak je postavljen s prednje strane kućišta te su ventilatori s usisa prebačeni na ispuh. Ventilatori hladnjaka spajaju se na matičnu ploču, dok pumpa dobiva snagu direktno iz napajanja. Iz tog razloga nije moguće upravljanje brzinom rotora pumpe.

7.3.3.1. Opterećenje mikroprocesora u programu AIDA64

Isto kao i u prethodnim slučajevima, ovdje se na mikroprocesor nameće sintetičko opterećenje pomoću programa AIDA64. Dobiveni rezultati prikazani su na *Slika 85*.

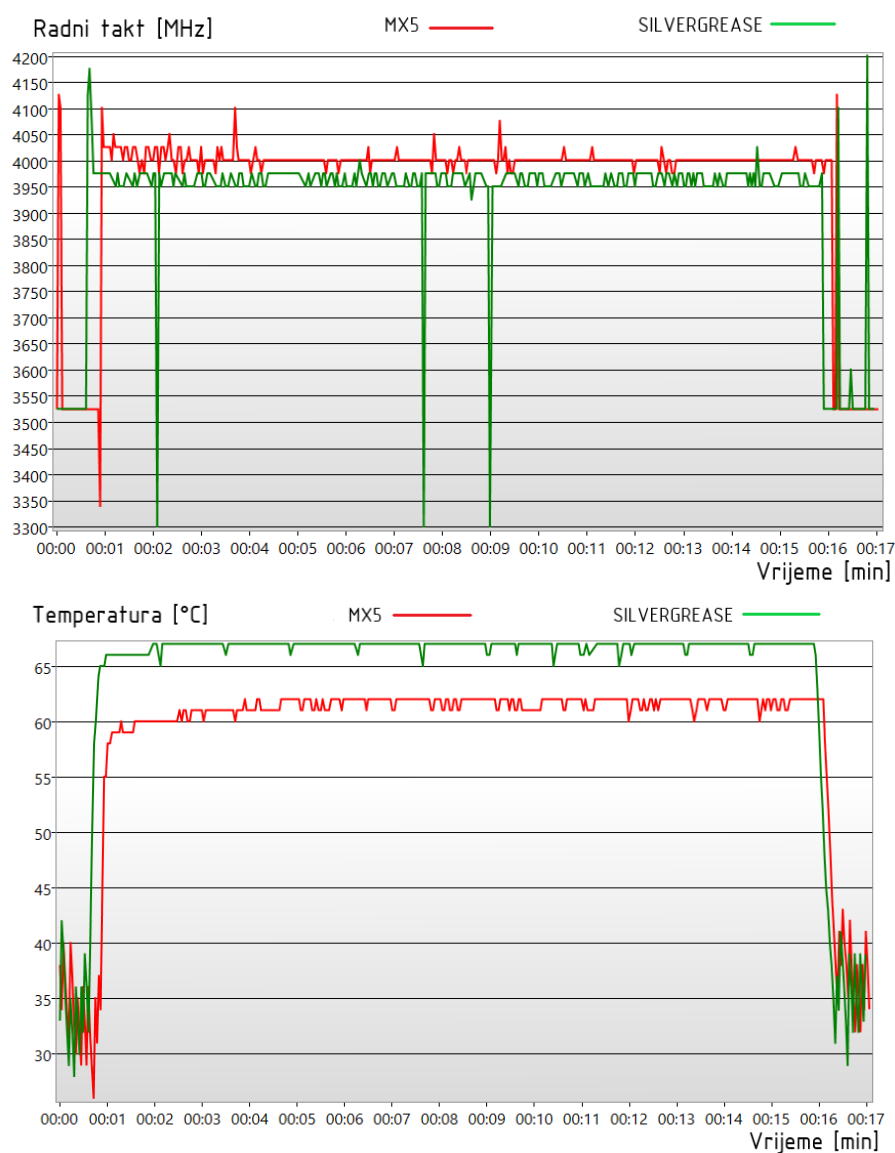


Slika 85. Rezultati ispitivanja hladnjaka Pure Loop opterećenjem u programu AIDA64: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)

Kao i kod NH-D15 hladnjaka, iz rezultata je vidljivo bitno poboljšanje s obzirom na hladnjak u prvom slučaju. Isto tako je bitno primijetiti razliku u temperaturi pri korištenju različitih toplinskih pasti, gdje ona iznosi 6 °C.

7.3.3.2. Opterećenje mikroprocesora u programu Cinebench

Posljednje ispitivanje, čiji su rezultati prikazani na *Slika 86*, provodi se u programu Cinebench.



Slika 86. Rezultati ispitivanja Pure Loop hladnjaka opterećenjem u programu Cinebench: radni takt (gore) i temperatura mikroprocesora (dolje)

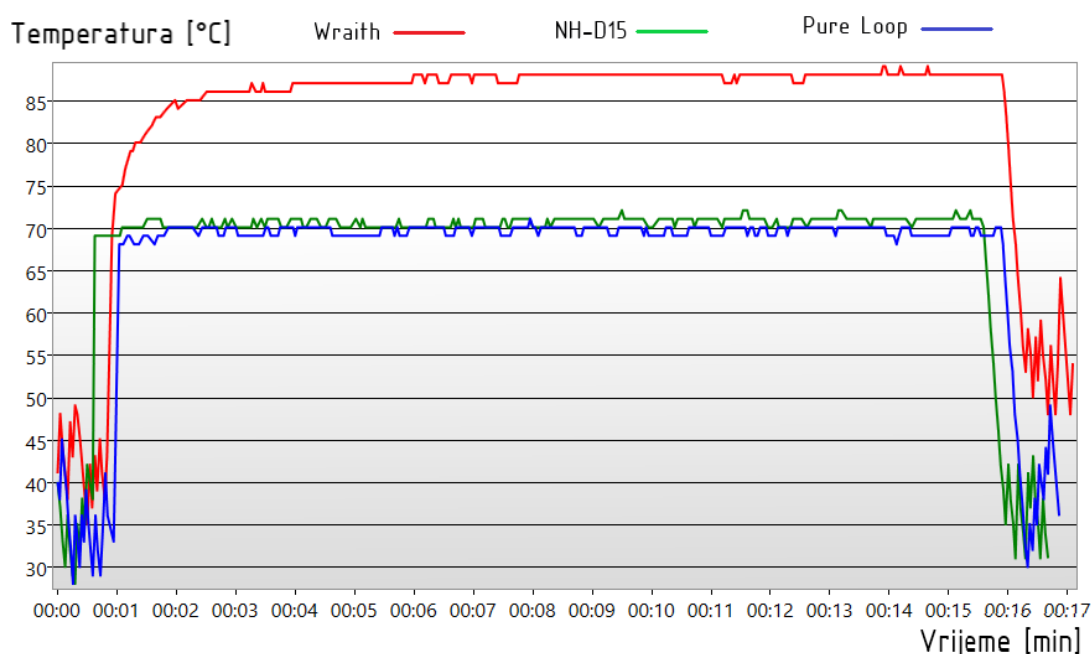
Pregledom rezultata utvrđena je identična razlika u temperaturi mikroprocesora kod korištenja različitih toplinskih pasti kao i u prethodnom slučaju. Isto tako, prilikom ispitivanja, vrijednost radnog takta mikroprocesora povremeno pada na 3300 MHz, ali ne ostaje dugo na toj vrijednosti.

U nastavku slijedi pojašnjenje i tumačenje rezultata ispitivanja.

7.4. Analiza rezultata dobivenih ispitivanjem

Svrha provedenih ispitivanja bila je utvrditi pouzdanost navedenih hladnjaka i njihov utjecaj na stabilnost rada mikroprocesora. Prije analize rezultata potrebno je definirati što znači pouzdano hlađenje i koji su uvjeti za stabilan rad mikroprocesora.

Pouzdanost hladnjaka uvjetovana je maksimalnom postignutom temperaturom mikroprocesora prilikom ispitivanja. Kao najgori slučaj i najveće opterećenje sustava pokazalo se ono nametnuto programom AIDA64. Na *Slika 87* prikazane su vrijednosti temperature ispitivanja sva tri hladnjaka uz korištenje toplinske paste MX5.

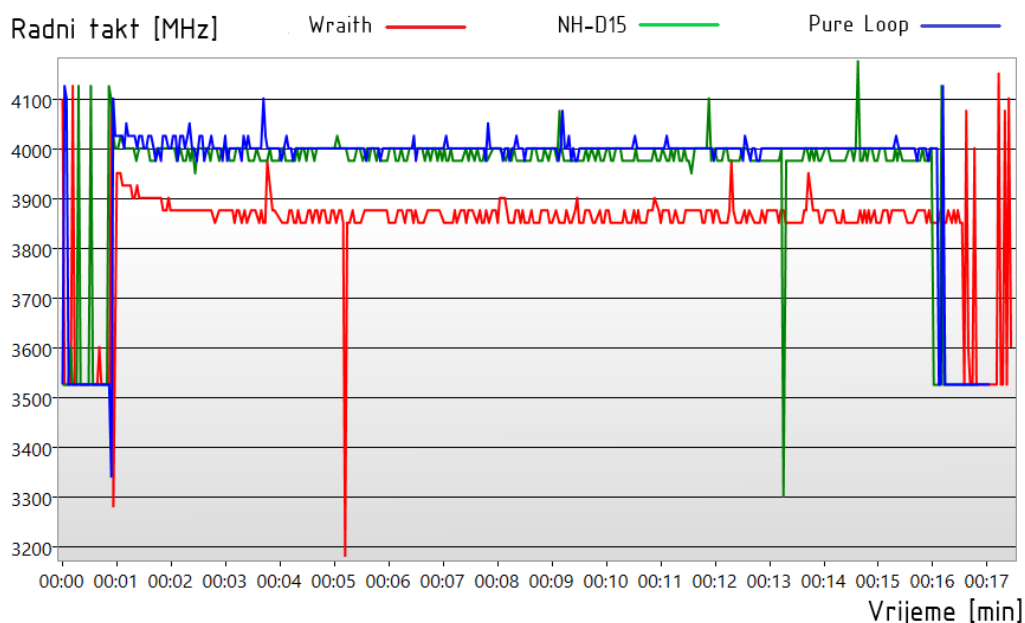


Slika 87. Pregled temperature mikroprocesora prilikom ispitivanja sva tri hladnjaka uz opterećenje nametnuto programom AIDA64

Kako bi se utvrdila pouzdanost, vrijednost maksimalne temperature dobivene ispitivanjem (one pri kojoj se postiže toplinska ravnoteža) uspoređuje se s temperaturom zasićenja mikroprocesora (u ovom slučaju 95 °C). Ako dobivena temperatura prijeđe vrijednost zadane temperature zasićenja, hladnjak se smatra nepouzdanim.

Iz priloženih rezultata vidljivo je da sva tri hladnjaka zadovoljavaju zadane uvjete. Unatoč tome, primijećeno je da se kod ispitivanja hladnjaka Wraith temperatura približava vrijednosti temperature zasićenja. Uzrok tome je njegova mala površina za izmjenu topline i iz tog razloga se upotreba ovog hladnjaka ne preporučuje za hlađenje mikroprocesora koji oslobađaju velike količine topline. S druge strane, hladnjaci NH-D15 i Pure Loop pokazuju dobre rezultate. Temperatura pri kojoj se postiže toplinska ravnoteža u oba slučaja se nalazi oko vrijednosti od 70 °C, čime se postiže adekvatno hlađenje navedenog mikroprocesora.

Stabilnost rada mikroprocesora određena je njegovim radnim taktom. Ako njegova vrijednost padne ispod vrijednosti koju mikroprocesor postiže u neopterećenom stanju (u ovom slučaju 3525 MHz), rad mikroprocesora smatra se nestabilnim. Najveće razlike u radnom taktu dobivene su opterećenjem u programu Cinebench te su iz tog razloga na *Slika 88* prikazane vrijednosti radnog takta za sva tri hladnjaka uz korištenje toplinske paste MX5.



Slika 88. Pregled radnog takta mikroprocesora prilikom ispitivanja sva tri hladnjaka uz opterećenje nametnuto programom Cinebench

Sa slike je vidljivo da radni takt pada ispod zadane vrijednosti kod ispitivanja Wraith i NH-D15 hladnjaka, no to u ovom slučaju ne uzrokuje nestabilan rad. Naime, očitana vrijednost pada radnog takta posljedica je specifičnosti provedenog ispitivanja i osjetljivosti mjerne opreme. Ispitivanje se svodi na petlju prikaza digitalne slike te na kraju svake petlje s naglim padom opterećenja događa se i nagli pad napona. Budući da se sve informacije prenose preko zajedničkog kontrolera (matične ploče), one su osjetljive na šumove. Zbog takvog velikog protoka različitih informacija senzori registriraju nagli pad napona kao pad radnog takta, no s početkom nove petlje ta vrijednost se ispravlja. U slučaju nestabilnog rada smanjena vrijednost radnog takta očitovala bi se kao porast temperature iznad 95 °C u dijagramu temperatura-vrijeme.

Radi bolje preglednosti brojčane vrijednosti rezultata dobivenih ispitivanjima prikazani su sažeto u *Tablica 11*.

Tablica 11. Pregled rezultata ispitivanja za sva tri hladnjaka

Hladnjak	AIDA64			Cinebench		
	$\theta_{p,max}$ (°C)	$f_{c,min}$ (MHz)	Opterećenje mikroprocesora (%)	$\theta_{p,max}$ (°C)	$f_{c,min}$ (MHz)	Opterećenje mikroprocesora (%)
Wraith/MX5	89	3525	100 %	85	3180	100 %
Wraith/Silvergrease	88	3320	100 %	85	3220	100 %
NH-D15/MX5	72	3340	100 %	64	3300	100 %
NH-D15/Silvergrease	74	3525	100 %	67	3320	100 %
Pure Loop/MX5	71	3360	100 %	62	3340	100 %
Pure Loop/Silvergrease	76	3280	100 %	67	3300	100 %

U tablici je s $\theta_{p,max}$ označena maksimalna postignuta temperatura prilikom ispitivanja dok je s $f_{c,min}$ označen minimalni radni takt mikroprocesora.

Iako je analizom rezultata primijećena razlika pri korištenju različite toplinske paste, zbog odstupanja temperature okoliša od ± 2 °C ta razlika je zanemariva. Na izmjenu topline prilikom rada mikroprocesora uz toplinsku provodnost toplinske paste, utječu i njen sastav te debljina sloja, čime se u sam proces uvodi još varijabli.

Ovime se privodi kraju eksperimentalni dio rada te ujedno i sam rad. U nastavku će biti sumirani ključni dijelovi cjelokupnog rada te će biti izveden zaključak na temelju sakupljenog znanja i rezultata dobivenih ispitivanjem.

8. ZAKLJUČAK

Računala su alati koji se u današnjem svijetu nalaze svugdje. Od osobnih računala do pametnih mobitela ili satova, postala su neizostavan dio ljudskih života. Od samih početaka računalna industrija ističe se kao jedna od najbrže rastućih u svijetu. U zadnjih nekoliko godina, potražnja za računalnim komponentama, posebice mikroprocesorima, nadilazi mogućnosti proizvodnje i periodično se otvaraju novi pogoni kako bi se smanjilo opterećenje na tržište. Velikoj potražnji najviše pridonosi rastući trend primjene mikroprocesora i ostalih elektroničkih komponenti u automobilske industriji.

No, uz tako veliku potražnju dolaze i inovacije te konstantan razvoj računalne tehnologije. Svake godine se na tržište plasira novi mikroprocesor s mogućnostima koje bitno nadilaze one od prošlih generacija. Unatoč tome, počinju se nazirati određena ograničenja vezana uz tehnologiju izrade mikroprocesora. Broj tranzistora koje je moguće postaviti na jedan čip polako doseže svoj maksimum. Dosadašnjim rješenjem smanjivanja veličine tranzistora dolazi se do granice materijala koji se nalazi u srži svih današnjih čipova, silicija. Iz tog razloga traže se alternativna rješenja kako bi se postigle bolje performanse bez spomenutih ograničenja.

Jedno od tih rješenja su kvantna računala. Ona se temelje na potpuno drugačijoj arhitekturi i predstavljaju veliki korak naprijed u području znanstvenog računanja, gdje se koriste za rješavanje raznih problema iz kvantne mehanike i drugih područja koja se bave istraživanjem kvantnog svijeta. Iako pružaju mnoge mogućnosti, primjena im je i dalje ograničena na znanstvene institute zbog komplicirane i skupe konstrukcije njihovog sustava za hlađenje.

S druge strane, rješenja za hlađenje komponenti osobnih računala su jednostavnija i uspješno prate sve veća opterećenja izazvana većom potrošnjom snage mikroprocesora. Tako je u sklopu ovog rada ispitana pouzdanost komercijalnih hladnjaka te utjecaj hlađenja na stabilnost rada mikroprocesora osobnog računala. Ispitivanje je provedeno na dva zračna i jednom vodenom hladnjaku.

Analizom rezultata ispitivanja utvrđeno je da sva tri hladnjaka pouzdano hlade ispitivani mikroprocesor. Tijekom ispitivanja temperatura mikroprocesora nije se približila vrijednosti temperature zasićenja. Isto tako, radni takt je uglavnom bio stabilan čime se potvrđuje povezanost stabilnosti rada mikroprocesora i adekvatnog hlađenja. Adekvatno hlađenje utječe i na dugovječnost mikroprocesora budući da se dugotrajnim radom na povišenim temperaturama narušava struktura silicija i time putevi za prijenos podataka u samom čipu.

Iako sva tri hladnjaka zadovoljavaju uvjete ispitivanja, potrebno je uočiti neke razlike. Zračni hladnjaci, poput hladnjaka Wraith, koji zbog svojih manjih dimenzija pokazuje lošije rezultate, uglavnom se koriste za hlađenje mikroprocesora koji oslobađaju malu količinu topline. Dodavanjem toplinskih cijevi i povećanjem površine kako bi se pospješila izmjena topline, kao što je to slučaj kod NH-D15 hladnjaka, zračni hladnjaci pokazuju velika poboljšanja. Ono što predstavlja problem je činjenica da se njihova površina ne može povećavati unedogled zbog prevelikog mehaničkog opterećenja na matičnu ploču uzrokovanog težinom hladnjaka. Vodeni hladnjaci, poput Pure Loop hladnjaka, pokazuju odlična svojstva pri hlađenju mikroprocesora. Zbog visokog specifičnog toplinskog kapaciteta vode, koja se koristi kao rashladno sredstvo, nadilaze mogućnosti hlađenja zračnih hladnjaka. Problemi s vodenim hladnjacima mogu se javiti u slučaju pucanja spojeva na hladnjaku, kada voda može ozbiljno naštetiti ostalim komponentama u sustavu.

U ovom radu obrađen je samo dio široke teme hlađenja elektroničkih komponenti. Zbog sve veće upotrebe elektronike koja oslobađa velike količine topline, postavlja se pitanje kakav utjecaj to ima na okoliš. Veća potrošnja električne energije sa sobom nosi veću potrošnju fosilnih goriva, što može izrazito negativno utjecati na okoliš. Osim toga, utjecaj toplinskog zagađenja i sve većeg problema elektroničkog otpada na okoliš može poslužiti kao tema za daljnje istraživanje.

LITERATURA

- [1] The Suanpan, a Chinese Version of the Abacus. URL: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=233> (Pristupljeno: 2021-02-20)
- [2] Decoding the Antikythera Mechanism, the First Computer. URL: <https://www.smithsonianmag.com/history/decoding-antikythera-mechanism-first-computer-180953979/> (Pristupljeno: 2021-02-20)
- [3] The IAS Computer. URL: <http://ds-wordpress.haverford.edu/bitbybit/bit-by-bit-contents/chapter-five/5-8-the-ias-computer/> (Pristupljeno: 2021-02-20)
- [4] Stallings, W. Computer Organization and Architecture: Designing for Performance. Tenth Edition. United States of America: Pearson Education; 2016.
- [5] Clements, A. Principles of Computer Hardware. Fourth Edition. United States of America: Oxford University Press; 2006.
- [6] Moller M, Vuik C. On the impact of quantum computing technology on future developments in high-performance scientific computing. *Ethics Inf Technol.* 2017;19(4):253-269. doi. 10.1007/s10676-017-9438-0.
- [7] What Is Quantum Computing? URL: <https://www.ibm.com/quantum-computing/what-is-quantum-computing> (Pristupljeno: 2021-03-27)
- [8] Bova F, Goldfarb A, Melko RG. Commercial applications of quantum computing. *EPJ Quantum Technol.* 2021;8(1):13. doi. 10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1.
- [9] The AMD Ryzen 3 3300X and 3100 CPU Review: A Budget Gaming Bonanza. URL: <https://www.anandtech.com/show/15774/the-amd-ryzen-3-3300x-and-3100-cpu-review> (Pristupljeno: 2021-02-23)
- [10] Guru3D Spring 2020 PC Buyer Guide - HEDT, or High End Desktop Builds. URL: <https://www.guru3d.com/articles-pages/guru3d-spring-2020-pc-buyer-guide,7.html> (Pristupljeno: 2021-02-23)
- [11] How Are Motherboards Made: Understanding the Process of Motherboard Manufacturing. URL: <https://www.wepc.com/tips/how-are-motherboards-made-manufacturing/> (Pristupljeno: 2021-02-23)
- [12] Kralj, D. Primjena računala. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2018.
- [13] What is RAM? Everything You Need to Know. URL: <https://www.howtogeek.com/697659/what-is-ram-everything-you-need-to-know/> (Pristupljeno: 2021-02-23)

- [14] Može li udarac po laptopu oštetiti hard disk? URL: <https://www.bug.hr/savjeti/moze-li-udarac-po-laptopu-ostetiti-hard-disk-9472> (Pristupljeno: 2021-02-23)
- [15] Solid State Drives. URL: <https://www.micron.com/products/ssd> (Pristupljeno: 2021-02-23)
- [16] Power supply unit. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Power_supply_unit_\(computer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_supply_unit_(computer)) (Pristupljeno: 2021-02-23)
- [17] Lai Y-S, Ho K-M, Ieee. FPGA- based Digital- controlled Power Converter Designed with Universal Input Meeting 80 Plus Platinum Efficiency Code and Standby Power Code for Sever Power Applications. 2014 International Power Electronics Conference. International Conference on Power Electronics2014. p. 3942-3949.
- [18] Hrkać, T. Arhitektura i programiranje grafičkih procesora – Materijali za predavanja iz kolegija Višeprocorski i paralelni sustavi. Verzija 0.2. Fakultet elektrotehnike i računalstva, Zagreb; 2017.
- [19] SolidWorks Visualize. URL: <https://www.goengineer.com/solidworks/technical-communication/solidworks-visualize> (Pristupljeno: 2021-02-23)
- [20] Sun H, Zhou YQ, Liang YS. GPU accelerated CFD simulation in electronics cooling. In: Zhang J, Wang ZJ, Zhu SR, Meng XM, editors. Information Technology Applications in Industry, Pts 1-4. Applied Mechanics and Materials. 263-266. Durnten-Zurich: Trans Tech Publications Ltd; 2013. p. 1285-+.
- [21] Zhao Y, Yao G, Ding Y. Parallel Computation of Ground Radiation Simulation Based on GPU. In: Patnaik S, editor. Advances in Information and Communication Technology. Procedia Computer Science. 1072017. p. 9-14.
- [22] Markku Tilli, Atte Haapalinna, Chapter One - Properties of Silicon, In Micro and Nano Technologies, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, William Andrew Publishing, 2010, Pages 3-17, <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00001-2>.
- [23] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Ćurković L. Materijali I – udžbenik. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2011.
- [24] Hull, R. Properties of Crystalline Silicon. INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom; 1999.

- [25] Markku Tilli, Chapter Five - Silicon Wafers: Preparation and Properties, In Micro and Nano Technologies, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, William Andrew Publishing, 2010, Pages 71-88, <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1594-4.00005-X>.
- [26] Mueller S. Upgrading and Repairing PCs. 22nd edition. United States of America: Pearson Education, Inc; 2015.
- [27] EUV for dummies. URL: <https://bits-chips.nl/artikel/euv-for-dummies/> (Pristupljeno: 2021-04-14)
- [28] Lupoi R, Lupton T, Jenkins R, Robinson AJ, O'Donnell GE. Direct manufacturing of diamond composite coatings onto silicon wafers and heat transfer performance. CIRP Ann-Manuf Technol. 2018;67(1):185-188. doi. 10.1016/j.cirp.2018.04.092.
- [29] Halasz B. Uvod u termodinamiku. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.
- [30] 123Free3DModels. URL: <https://123free3dmodels.com/3d-old-white-pc-case-model-126817> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [31] Be quiet! URL: <https://www.bequiet.com/en> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [32] Chu RC, Simons RE, Ellsworth MJ, Schmidt RR, Cozzolino V. Review of cooling technologies for computer products. Ieee Transactions on Device and Materials Reliability. 2004;4(4):568-585. doi. 10.1109/tdmr.2004.840855.
- [33] EVGA. URL: <https://www.evga.com/> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [34] Naphon P, Wongwises S, Wiriyaart S. On the thermal cooling of central processing unit of the PCs with vapor chamber. Int Commun Heat Mass Transf. 2012;39(8):1165-1168. doi. 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.013.
- [35] Standard Heat Pipes. URL: <https://myheatsinks.com/heat-pipe-solutions/standard-heat-pipes/> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [36] Nguyen T, Mochizuki M, Mashiko K, Saito Y, Sauciuc I, Boggs R. Advanced cooling system using miniature heat pipes in mobile PC. IEEE Trans Compon Packaging Technol. 2000;23(1):86-90. doi. 10.1109/6144.833046.
- [37] Jeehoon Choi, Minjoong Jeong, Junghyun Yoo, Minwhan Seo. A new CPU cooler design based on an active cooling heatsink combined with heat pipes. Applied Thermal Engineering. Volume 44; Pages 50-56; 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.027>
- [38] Halasz B, Galović A, Boras I. Toplinske tablice. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2013.

- [39] EKWB. URL: <https://www.ekwb.com/shop/> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [40] How to Build a Liquid-Cooled Gaming PC. URL: <https://www.forbes.com/sites/antonyleather/2016/10/31/how-to-build-a-liquid-cooled-gaming-pc/> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [41] Bahiraei M, Heshmatian S. Electronics cooling with nanofluids: A critical review. *Energy Conv Manag.* 2018;172:438-456. doi. 10.1016/j.enconman.2018.07.047.
- [42] Cong Tam Nguyen, Gilles Roy, Christian Gauthier, Nicolas Galanis. Heat transfer enhancement using Al₂O₃–water nanofluid for an electronic liquid cooling system. *Applied Thermal Engineering*, Volume 27, Issues 8–9, Pages 1501-1506; 2007. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.09.028>.
- [43] Optimal airflow for PureBase 500. URL: <https://www.overclockers.co.uk/forums/threads/optimal-airflow-for-pure-base-500.18889008/> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [44] Brodić, T. Osnove teorije signala. Rijeka: Udžbenici veleučilišta u Rijeci = Manualia Collegium Politechnic Fluminensis; 2011.
- [45] Sivov, O. Pulse-Width Modulation (PWM). The Clemson University vehicular electronics laboratory. URL: https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/ECE470_Projects_2011/Sivov_project.html (Pristupljeno: 2021-02-05)
- [46] Barr M. Pulse Width Modulation. *Embedded Systems Programming*, izdanje za 09/2001 (str. 103-104); 2001.
- [47] Burke M. Why and How to Control Fan Speed for Cooling Electronic Equipment. *Analog Dialogue*, 38-02. United States of America; 2004.
- [48] What is PWM and how does it work? URL: <https://www.ekwb.com/blog/what-is-pwm-and-how-does-it-work/> (Pristupljeno: 2021-04-15)
- [49] Ramezanizadeh M, Nazari MA, Ahmadi MH, Acikkalp E. Application of nanofluids in thermosyphons: A review. *J Mol Liq.* 2018;272:395-402. doi. 10.1016/j.molliq.2018.09.101.
- [50] IceGiant. URL: <https://www.icegiantcooling.com/> (Pristupljeno: 2021-04-20)
- [51] EK Water Blocks May Be Preparing a Thermoelectric CPU Cooler. URL: <https://www.techpowerup.com/274217/ek-water-blocks-may-be-preparing-a-thermoelectric-cpu-cooler> (Pristupljeno: 2021-04-20)

PRILOZI

I. CD-R disk