

Energetska učinkovitost Single-board računala

Vidović, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:941888>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni prijediplomski studij Računarstvo

**ENERGETSKA UČINKOVITOST SINGLE-BOARD
RAČUNALA**

Završni rad

Marko Vidović

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Marko Vidović
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Računarstvo
Mat. br. pristupnika, god.	R4731, 28.07.2021.
JMBAG:	0165092064
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Zdravko Krpić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Energetska učinkovitost Single-board računala
Znanstvena grana završnog rada:	Programsko inženjerstvo (zn. polje računarstvo)
Zadatak završnog rada:	Cilj rada je istražiti energetske učinkovita računalna rješenja koja se mogu koristiti kao alternativa prijenosnim i stolnim računalima za manje zahtjevne svrhe. Osim toga, istražiti načine vrednovanja energetske učinkovitosti Single-board računala te aktualne metrike i pokazatelje kvalitete za navedenu svrhu. U praktičnom dijelu rada postaviti programsko okruženje i potrebne alate na više vrsta Single-board računala dostupnih na FERIT-u (Odroid-MC1, Odroid-U3, Raspberry Pi 4B, Raspberry Pi 3B itd.) te izmjeriti njihovu energetske učinkovitost. Analizirati, dokumentirati i usporediti energetske učinkovitost navedenih sustava u
Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:	18.09.2024.
Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:	25.09.2024.
Ocjena završnog rada nakon obrane:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:	26.09.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 26.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Marko Vidović

Studij:

Sveučilišni prijediplomski studij Računarstvo

Mat. br. Pristupnika, godina upisa:

R4731, 28.07.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Energetska učinkovitost Single-board računala**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Zdravko Krpić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. PREGLED PODRUČJA RADA	2
2.1. Pregled relevantnih istraživanja	3
2.2. Istraživanje mogućnosti SBC-eva u računarstvu	4
2.2.1. Energetska učinkovitost u računarstvu na rubu	4
2.2.2. Energetska učinkovitost u IoT uređajima	4
2.2.3. Energetska učinkovitost u računarstvu u oblaku	5
2.2.4. Istraživanje mogućnosti energetske učinkovitosti SBC-eva u računarstvu visokih performansi.....	5
3. PREGLED TEHNOLOGIJA ZA IZVOĐENJE EKSPERIMENTA	6
3.1. Single-board računala	6
3.1.1. Evolucija single-board računala	6
3.1.2. Odabrana računala	7
3.2. Programske postavke single-board računala	8
3.3. Programski alati za ispitivanje računalnih sustava	9
3.3.1. Stress-ng	10
3.3.2. Sysbench.....	10
3.3.3. STREAM Benchmark.....	11
3.4. Alati za mjerenje potrošnje energije	11
4. METODOLOGIJA RADA	12
4.1. Postavljanje okruženja	12
4.2. Stanje mirovanja (Idle)	13
4.3. Opterećenje CPU-a	13
4.4. Opterećenje memorije	13
5. POSTAVKE EKSPERIMENTA I REZULTATI	15
5.1. Mjerenje potrošnje u stanju mirovanja (Idle)	15
5.2. Mjerenje potrošnje pri opterećenju CPU-a	15
5.3. STREAM Benchmark	21
6. ANALIZA REZULTATA	23

7. ZAKLJUČAK.....	29
8. LITERATURA	31
SAŽETAK.....	33
ABSTRACT	34

1. UVOD

U današnje doba, gdje se javlja sve veća potreba za održivim tehnološkim rješenjima, energetska učinkovitost postaje ključni faktor u razvoju i primjeni računalnih sustava. Ova potreba za smanjenjem potrošnje energije dovela je do razvoja inovativnih rješenja koja nastoje optimizirati uporabu energije. Jedno od tih rješenja je upravo single-board računalo (*eng. single-board computer, SBC*) koje se pokazalo kao izuzetno korisno, zahvaljujući svojoj kompaktnoj veličini, niskoj cijeni i energetske učinkovitosti ARM (*eng. Advanced RISC Machine*) arhitekturi.

S obzirom na ove prednosti, SBC-evi su postali neizostavan element u razvoju različitih tehnologija. Za razliku od tradicionalne x86 arhitekture, dominantne u osobnim računalima i poslužiteljima, koja često prioritet daje visokim performansama uz veću potrošnju energije, SBC-evi se ističu svojom sposobnošću da pruže nešto skromnije, no zadovoljavajuće performanse uz znatno manje energetske zahtjeve. Ova karakteristika ih čini posebno privlačnima za primjene gdje je energetska učinkovitost ključna, poput mobilnih uređaja i ugrađenih sustava.

Istraživanje energetske učinkovitosti SBC-eva postalo je ključno za daljnji razvoj ove tehnologije. Proučavanje različitih aspekata potrošnje energije, poput radnih opterećenja i konfiguracija koje se primjenjuju na SBC-evima, omogućuje optimizaciju performansi za specifične primjene. To ne samo da pridonosi tehničkoj optimizaciji, već donosi i značajne uštede u energetske troškovima IT infrastrukture, a pritom ne narušava kvalitetu usluge. Takve uštede ne samo da podupiru održivost na razini pojedinačnih sustava, već i doprinose globalnim naporima za očuvanje okoliša, otvarajući put prema održivijoj budućnosti.

1.1. Zadatak završnog rada

U ovom radu istražit će se energetska učinkovitost nekoliko popularnih SBC-eva u usporedbi s tradicionalnim x86 računalom. Kroz praktične eksperimente koji uključuju mjerenje potrošnje energije tijekom idle stanja i izvođenja zahtjevnih zadataka (stress testova), nastoji se steći uvid u stvarne energetske karakteristike ovih platformi.

2. PREGLED PODRUČJA RADA

Ubrzani tehnološki napredak, prisutnost računalnih sustava u svim područjima života, rastuća zabrinutost za okoliš i potreba za održivim tehnološkim rješenjima povećavaju važnost energetske učinkovitosti. Kada se spominje energetska učinkovitost u kontekstu računalnih sustava, odnosi se na sposobnost računala da obavi određeni zadatak s minimalnom potrošnjom energije, kako je objašnjeno u [1]. Cilj je smanjiti troškove energije bez utjecaja na performanse ili funkcionalnost sustava.

U tom kontekstu single-board računala se ističu kao obećavajuća rješenja za budućnost brojnih industrija. SBC-evi pronalaze široku primjenu u različitim područjima poput Internet stvari (*eng. Internet of Things, IoT*), u računarstvu na rubu (*eng. edge computing*), mobilnim uređajima i mnogim drugim. Iako su SBC-evi pokazali svoj potencijal u pogledu energetske učinkovitosti, daljnja istraživanja su ključna. Razumijevanje njihove potrošnje energija u različitim scenarijima upotrebe omogućuje prepoznavanje područja za poboljšanje i optimizaciju, što omogućuje njihov razvoj te primjenu u budućim tehnologijama.

U srži ovog istraživanja energetske učinkovitosti single-board računala leži analiza iskorištenosti resursa. Učinkovito upravljanje CPU-om i memorijom ključno je za postizanje optimalnih performansi, a kod single-board računala to izravno utječe na energetska učinkovitost i trajanje baterije.

Radi boljeg razumijevanja konteksta ovog istraživanja, u nastavku se nalazi pregled relevantnih istraživanja koja su postavila temelje za ovaj rad. Ova istraživanja usmjerena su na ispitivanje performansi i energetske učinkovitosti samih SBC-eva za različite svrhe, poput mogućnosti primjene u područjima poput umjetne inteligencije ili računarstva visokih performansi. U tim istraživanjima, autori su koristili alate za opterećenje CPU-a i memorije kako bi mjerili performanse različitih modela SBC-eva, kako pojedinačno, tako i u grozdovima računala. Također, ispitivane su i performanse samih SBC-eva unutar računarstva visokih performansi koristeći specijalizirane programske alate za opterećenje.

Ova istraživanja ne samo da su pružila vrijedne uvide u performanse SBC-eva u različitim scenarijima korištenja, već su i pomogla u odabiru odgovarajućih alata za ovo istraživanje. Na temelju njihovih zaključaka, možemo bolje razumjeti prednosti i ograničenja korištenja SBC-eva u računalnim okruženjima.

2.1. Pregled relevantnih istraživanja

U [2] autor je koristio stress-ng unutar programskog alata Phoronix Test Suite kako bi proveo testove performansi na tri single-board računala: Raspberry Pi 4 Model B, Cool Pi 4 Model B i Google Coral USB Accelerator s Google Edge TPU. Specifični testovi provedeni sa stress-ng uključivali su CPU Stress, Matrix Math i Memory Copying. Rezultati ovih testova, mjereni u Bogo Ops/s¹, korišteni su za usporedbu performansi SBC-a u različitim računalnim zadacima. Slično tome, u ovom radu, također je korišten stress-ng kojim je opterećen CPU operacijama množenja matrica, a memorija je opterećena alociranjem i kopiranjem memorijskih blokova.

U istraživanju [3], autori su koristili Sysbench kako bi procijenili računalnu snagu procesora na tri različita grozda (*eng. cluster*) računala: grozd RPi računala (konkretno, Raspberry Pi 2B), grozd HardKernel Odroid Xu-4 računala te grozd računala opremljenih Intel i7 procesorom na 3.00 GHz s 64-bitnim Windows 10 operativnim sustavom. Konkretno, primijenjen je Sysbench CPU test koji provjerava je li svaki broj do 10 000 prost broj, pri čemu se broj niti može prilagoditi kako bi se simuliralo različito opterećenje procesora. Upravo tako u ovom radu je primijenjen isti pristup opterećenja CPU-a koristeći Sysbench testa za provjeru prostih brojeva.

U [4] i [5] spominje se STREAM benchmark kao industrijski standard za mjerenje održive propusnosti memorije. Oba rada ističu njegovu važnost u kontekstu sustava računarstva visokih performansi (*eng. High Performance Computing, HPC*), posebno za procjenu performansi u aplikacijama poput HPL-a, gdje je memorijska propusnost ključni faktor. Iako nije u potpunosti optimiziran za moderne HPC sustave s nepravilnim obrascima pristupa memoriji, STREAM se ističe svojom jednostavnošću i pouzdanošću te je stoga odabran kao jedan od alata u ovom radu, posebno u kontekstu istraživanja energetske učinkovitosti single-board računala gdje se traže jednostavna i učinkovita rješenja za procjenu performansi.

¹ Bogo ops/s – operacije koje nemaju nikakvu praktičnu svrhu, već služe za simuliranje opterećenja na određenoj komponenti sustava

2.2. Istraživanje mogućnosti SBC-eva u računarstvu

U sljedećem dijelu prikazani su radovi u kojima autori istražuju mogućnosti SBC-eva u raznim područjima računarstva. Analizirat će se njihove potencijalne primjene i prednosti u specifičnim područjima.

2.2.1. Energetska učinkovitost u računarstvu na rubu

Kako se navodi u [6], računarstvo na rubu je pristup koji pomiče obradu podataka s centraliziranih poslužitelja na rub mreže odnosno bliže izvoru podataka. Ova promjena u arhitekturi računalnih sustava donosi brojne prednosti, poput smanjenja latencije i povećanja brzine obrade podataka, ali također postavlja nove probleme u pogledu energetske učinkovitosti. Iako SBC-evi možda nisu zamjena za sve tradicionalne servere, oni nude značajne prednosti u smislu troškova i potrošnje energije u specifičnim aplikacijama i okruženjima. Ističe se da rubni (*eng. edge*) uređaji često imaju ograničene energetske resurse, te da energetska učinkovitost tih uređaja i učinkovitost baza podataka, kao ključne komponente rubnog računarstva, imaju presudnu važnost za ukupnu potrošnju energije. U tom kontekstu, single-board računala postaju sve popularnija zbog svoje niske cijene, kompaktnosti i energetske učinkovitosti. Međutim, kako bi se u potpunosti iskoristio njihov potencijal, potrebno je detaljno razumijevanje njihovih energetske karakteristika. Rezultati istraživanja pokazuju da pravilna konfiguracija i upravljanje radnim opterećenjima mogu značajno smanjiti potrošnju energije, što je ključno za primjenu SBC-eva u okruženjima s ograničenim resursima i za postizanje veće energetske učinkovitosti u rubnom računarstvu.

2.2.2. Energetska učinkovitost u IoT uređajima

Prema izvješću "State of IoT 2023" [7], tvrtke IoT Analytics, procjenjuje se da je 2023. godine bilo 16,7 milijardi aktivnih IoT uređaja povezanih na internet diljem svijeta što je porast od 16% u odnosu na 2022. kada ih je bilo 14,4 milijarde. Ovaj nagli rast naglašava sve veću potrebu za energetske učinkovitim računalnim rješenjima koja mogu podržati ove uređaje.

Energetska učinkovitost SBC-eva u IoT-u nije samo poželjna, već postaje ključna za održivost ovog sustava. SBC-evi se često koriste kao srž IoT uređaja, omogućujući prikupljanje podataka sa senzora, upravljanje pametnim kućama, praćenje industrijskih procesa i još mnogo toga. Njihova sposobnost da pruže potrebne računalne resurse uz minimalnu potrošnju energije čini ih idealnim

za održiva i prilagodljiva IoT rješenja, također mogu omogućiti nove IoT primjene koje prije nisu bile izvedive zbog ograničenja energije.

2.2.3. Energetska učinkovitost u računarstvu u oblaku

Jedno od važnih područja u kojem energetska učinkovitost SBC-eva postaje ključna je računarstvo u oblaku (*eng. cloud computing*). U [3] autori ističu problem visoke potrošnje energije u podatkovnim centrima kao značajnu prepreku zelenom računarstvu, tekst naglašava potencijal SBC-eva u rješavanju ovog problema u kontekstu računarstva u oblaku. Ideja je da bi implementacija grozda računala sastavljenih od SBC-eva u oblak (*eng. cloud*) infrastrukturnama mogla dovesti do značajnih ušteda energije. SBC-evi nude ekonomičan način za procjenu i optimizaciju ovih troškova, čime omogućuju održivija i ekološki prihvatljivija rješenja u računarstvu u oblaku.

2.2.4. Istraživanje mogućnosti energetske učinkovitosti SBC-eva u računarstvu visokih performansi

Iako je računarstvo visokih performansi ključno za istraživanje i napredak, često je preskupo za zemlje u razvoju. Kao alternativa, SBC-evi se sve više istražuju zbog svoje sposobnosti da pruže izuzetnu energetska učinkovitost uz značajno niže troškove.

U kontekstu HPC-a, gdje tradicionalni sustavi često zahtijevaju visoke energetske troškove za postizanje vrhunskih performansi, SBC-evi se ističu kao održivija opcija. Istraživanje uspoređivanja SBC-eva s tradicionalnim računalima, kao što je navedeno u [8], pokazuje da SBC-evi, unatoč svojoj jednostavnosti, nude konkurentne performanse uz znatno manju potrošnju energije, ali samo za manje instance radnih opterećenja (*eng. Workloads*). Testiranje provedeno pomoću alata poput stress-ng i HPL-a za CPU pokazuje da SBC-evi ne samo da osiguravaju zadovoljavajuće performanse, već također postižu izvanrednu energetska učinkovitost, što ih čini idealnim za primjene s ograničenim resursima.

3. PREGLED TEHNOLOGIJA ZA IZVOĐENJE EKSPERIMENTA

U ovom dijelu, pružit će se detaljan pregled korištenih tehnologija za izvođenje eksperimenta. Započet će se s opisom single-board računala kao ključne komponente ovog istraživanja. Zatim će se istražiti korišteni programski alati za mjerenje performansi, praćenja potrošnje i upravljanja samim SBC-om.

3.1. Single-board računala

Single-board računalo, kako je objašnjeno u [9], je potpuno funkcionalno računalo izgrađeno na jednoj tiskanoj pločici koja uključuje mikroprocesor(e), memoriju i U/I komponente zajedno s ostalim potrebnim elementima za funkcioniranje sustava. Njihova jednostavnost i kompaktnost omogućuju im široku primjenu u različitim tehnološkim rješenjima, a sposobnost pokretanja operacijskih sustava poput Linuxa, Unix-a, Windowsa i Androida pruža im veliku fleksibilnost.

Jedna od ključnih prednosti SBC-eva leži u njihovoj energetskej učinkovitosti, koja ih izdvaja od tradicionalnih računalnih sustava. Većina modernih SBC-eva koristi ARM arhitekturu, koja je prvotno dizajnirana za mobilne uređaje i ugrađene sustave s naglaskom na nisku potrošnju energije, ali se sada sve više primjenjuje i u drugim područjima.

Zahvaljujući kontinuiranom razvoju i unapređenju ARM arhitekture, SBC-evi postaju sve moćniji, čime proširuju svoju primjenjivost i potvrđuju svoju ulogu ključnih komponenti u razvoju energetskej učinkovitih sustava. Njihova sposobnost da pruže odgovarajuće performanse uz minimalnu potrošnju energije čini ih idealnim izborom za buduće tehnologije koje se temelje na održivosti.

3.1.1. Evolucija single-board računala

Single-board računala doživjela su značajnu evoluciju kroz različite generacije, a svaka nova generacija donosi poboljšanja u odnosu na prethodne. Kako bi se prikazala ova evolucija, može se razmotriti razvoj kroz nekoliko istaknutih SBC linija, uključujući Raspberry Pi, Odroid i Cubieboard:

- Rane generacije (Raspberry Pi 1, Odroid-U2 i U3, Cubieboard 1 i 2): Ove generacije postavile su temelje popularnosti single-board računala. Iako su imale ograničene procesorske snage i memoriju, bile su pristupačne i nudile su osnovne mogućnosti za učenje programiranja, elektronike i izradu jednostavnih projekata.

- Razvojne generacije (Raspberry Pi 2 i 3, Odroid-XU4 i MC1, Cubieboard 3): Ove generacije donijele su značajna poboljšanja u performansama, uključujući brže procesore, više memorije i boljim mogućnostima povezivanja. Ova poboljšanja omogućila su izradu zahtjevnijih projekata poput igračih konzola, kućne automatizacije i grozd računarstva.
- Najnovije generacije (Raspberry Pi 4B i noviji, Odroid-N2+ i C4, Cubieboard 5): Ove generacije single-board računala pružaju još veće performanse, uključujući napredne procesore, podršku za 4K video, više memorije i bolje mrežne mogućnosti poput Gigabit Ethernet-a ili čak Wi-Fi-ja 6. Ovi modeli su idealni za napredne projekte poput strojnog učenja, umjetne inteligencije i računalnog vida.

Svaka nova generacija single-board računala donosi značajna poboljšanja u performansama, povezanosti i energetske učinkovitosti. Važno je napomenuti da novije generacije SBC-eva obično zadržavaju kompatibilnost s prethodnim generacijama u pogledu softvera i dodataka, što omogućuje nastavak rada na projektima razvijenim za starije modele bez potrebe za značajnim prilagodbama.

3.1.2. Odabrana računala

U cilju razumijevanja potrošnje energije s različitim hardverskim platformama, provode se eksperimenti na raznovrsnom izboru single-board računala. Odabrane su četiri platforme: Raspberry Pi 3B, Odroid-U3, Cubieboard2 i Odroid-MC1, pokrivajući hardvere različitih proizvođača i različite generacije proizvoda. Osim navedenih SBC-eva, u istraživanju je korišteno i prijenosno računalo Lenovo V310, koje je predstavljeno 2016. godine, u približno isto vrijeme kada i ODROID-MC1. Ovaj uređaj će poslužiti kao referentna točka za usporedbu energetske učinkovitosti SBC-eva s tradicionalnim x86 računalima. Tablica 1. predstavlja specifikacije za svaki spomenuti uređaj.

Tablica 1. Specifikacije pojedinog uređaja

	Raspberry Pi 3B	Odroid-U3	Cubieboard2	Odroid- MC1	Lenovo V310
Procesor	Broadcom BCM2837	Exynos 4412 Prime	Allwinner A20	Exynos5422	Intel Core i5- 6200
Broj jezgri	4	4	2	4 velike Cortex-A15 i 4 male Cortex-A7	2 (4 niti s Hyper- Threadingom)
Frekvencija	1.2GHz	1.0GHz	1.7GHz	2.0GHz	2.3Ghz, način ubrzanja 2.8GHz
RAM	1GB LPDDR2	2GB LPDDR2	1 GB DDR3	2GB LPDDR3	8GB DDR4
Mreža	10/100 Mbps Ethernet	10/100Mbps Ethernet	10/100 Mbps Ethernet	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
Napajanje	5V, 2.5A	5V, 2A	5V, 2A	12V,2A	20V, 3.25A

3.2. Programske postavke single-board računala

U sklopu ovog eksperimenta, kako bi se osigurala konzistentnost u mjerenju energetske učinkovitosti, odabrani su operacijski sustavi prilagođeni specifičnim platformama, ali slični u pogledu stabilnosti i optimizacije za ARM arhitekturu. Na tri od četiri single-board računala i na x86 računalu instaliran je Ubuntu 18.04, dok je na Cubieboard 2 korišten Armbian 21.02. Ovi operacijski sustavi odabrani su zbog svoje stabilnosti, široke podrške za ARM arhitekturu, te zbog jednostavnosti konfiguracije i optimizacije za svrhe ovog istraživanja. Kako neke platforme ne podržavaju novije verzije operacijskih sustava, korištenje starijih verzija OS-a osigurava usporedivost rezultata. Također, birani su operacijski sustavi koji su otprilike iz istog vremenskog razdoblja kako bi se osiguralo da alati koji dolaze s njima budu približno istih verzija, čime se dodatno minimiziraju potencijalne razlike u performansama i energetske učinkovitosti koje mogu nastati zbog različitih verzija softvera.

Ubuntu 18.04, koji je instaliran na većini uređaja, poznat je po svojoj pouzdanosti i širokoj primjeni u server okruženjima. Njegova stabilnost i dugoročna podrška osiguravaju idealno okruženje za testiranje i eksperimentiranje bez potrebe za čestim nadogradnjama ili promjenama konfiguracije. Odabir ovog sustava omogućilo je konzistentno mjerenje performansi i potrošnje energije, budući da se radi o operacijskom sustavu koji dobro balansira između performansi i potrošnje resursa. Korištenjem server verzije bez grafičkog sučelja dodatno se smanjuje potrošnja resursa, što omogućava preciznija mjerenja energetske učinkovitosti.

S druge strane, Armbian 21.02, instaliran na Cubieboard 2, izabran je zbog svojih optimizacija za ARM arhitekturu i podrške za različite SBC platforme. Armbian je lagan i efikasan operacijski sustav koji je prilagođen za rad na uređajima s ograničenim resursima, čime je osigurana usporedivost s Ubuntom na drugim uređajima. Korištenje ovih sličnih operacijskih sustava, prilagođenih za pojedinačne arhitekture, minimaliziralo je varijable koje bi mogle utjecati na energetske performanse, kao što su različite metode upravljanja memorijom i procesima.

Odabirom ovih operacijskih sustava nastojalo se osigurati da mjerenja što vjernije odražavaju stvarne performanse hardvera, minimizirajući nepotrebno opterećenje resursima koje bi moglo utjecati na rezultate. Time je omogućeno precizno praćenje energetske učinkovitosti različitih računalnih arhitektura, pri čemu su rezultati usporedivi i relevantni za daljnje analize.

3.3. Programski alati za ispitivanje računalnih sustava

U kontekstu ovog istraživanja, ključno je simulirati opterećenje sustava kako bi se precizno izmjerila njegova potrošnja energije i procijenila energetska učinkovitost. Opterećenje sustava postiže se pokretanjem programa koji intenzivno koriste resurse poput procesora (CPU), memorije (RAM) ili drugih komponenti. Simulacija različitih radnih opterećenja omogućuje nam uvid u ponašanje sustava u različitim uvjetima korištenja, od stanja mirovanja do intenzivnih računalnih zadataka. Potrošnja energije računalnih sustava ovisi o više faktora, uključujući CPU, memoriju, periferne uređaje i druge komponente. Međutim, CPU i memorija obično imaju najveći utjecaj na ukupnu potrošnju, posebno prilikom izvođenja zahtjevnih zadataka.

Mjerenje potrošnje energije obično se provodi pomoću specijaliziranih uređaja koji prate potrošnju električne energije sustava u stvarnom vremenu. S druge strane, energetska učinkovitost sustava procjenjuje se omjerom isporučenih performansi s utroškom energije potrebne da bi se te performanse ostvarile. Energetska učinkovitost računalnog sustava se može izraziti kroz različite

mjerene veličine, poput broja operacija po džulu potrošene energije ili vremena potrebnog za izvršenje određenog zadatka u odnosu na potrošenu energiju.

S obzirom na navedeno, u ovom radu opterećenje sustava simulirat će se pomoću specijaliziranih programa za ispitivanje performansi i opterećenja sustava, a potrošnja energije mjerit će se u stvarnom vremenu pomoću pametne utičnice EZVIZ T31. Za analizu energetske učinkovitosti koristit će se različite mjerene veličine koje će omogućiti usporedbu performansi i potrošnje energije različitih uređaja.

U ovom radu koristit će se programski alati Stress-ng, Sysbench i STREAM Benchmark.

3.3.1. Stress-ng

Stress-ng, opisan u [10], besplatan je alat za testiranje stabilnosti i performansi računalnih sustava. Razvijen je kao nadogradnja originalnog programskog alata **stress**, nudi napredne mogućnosti za simuliranje intenzivnih radnih opterećenja na različitim komponentama sustava, uključujući CPU, memoriju, U/I uređaje i mrežne resurse. Omogućuje ispitivanje granica i pouzdanosti hardverskih i softverskih komponenti kroz razne scenarije opterećenja. Korisnici mogu precizno kontrolirati parametre testiranja, uključujući trajanje testiranja, intenzitet opterećenja i prioritet resursa. Stress-ng je dostupan u službenim repozitorijima većine modernih Linux distribucija, pa se lako instalira i koristi. Zbog sveobuhvatnosti, pouzdanosti i jednostavnosti korištenja, odabran je kao alat za simuliranje radnog opterećenja i procjenu energetske učinkovitosti sustava u ovom istraživanju.

3.3.2. Sysbench

Sysbench, što se može pronaći u [11], je višenamjenski alat za mjerenje performansi računalnih sustava, posebno dizajniran za testiranje baza podataka, ali i za općenita opterećenja sustava. Može simulirati različita opterećenja, uključujući CPU, memoriju, U/I operacije i pristup bazi podataka. Sysbench korisnicima omogućuje konfiguriranje različitih parametara testiranja, poput broja programskih niti, trajanja testa i vrste opterećenja kako bi se simulirali specifični scenariji.

Isto kao i stress-ng, dostupan je u službenim repozitorijima većine modernih Linux distribucija, što ga čini lako dostupnim i jednostavnim za korištenje. Odabran je zbog svoje jednostavnosti i mogućnosti detaljne konfiguracije, što je omogućilo specifična mjerenja energetske učinkovitosti i analizu performansi u različitim radnim uvjetima.

3.3.3. STREAM Benchmark

STREAM Benchmark je programski alat za ispitivanje performansi specijaliziran za mjerenje propusnosti memorije, što je važan aspekt performansi sustava u kontekstu energetske učinkovitosti. Ovaj alat omogućuje procjenu koliko brzo sustav može pristupiti memoriji i obraditi podatke, što direktno utječe na ukupnu potrošnju energije. STREAM Benchmark koristi jednostavne funkcije jezgre (*eng. kernel*) za mjerenje performansi izvođenja osnovnih operacija nad vektorima, poput kopiranja, skaliranja i zbrajanja, pružajući uvid u brzinu prijenosa podataka između procesora i memorije.

3.4. Alati za mjerenje potrošnje energije

U ovom radu za mjerenje potrošnje struje korištena je EZVIZ T31 pametna utičnica (*eng. smart plug*), uređaj koji se spaja između SBC-a i izvora napajanja. Ovaj uređaj omogućava precizno mjerenje potrošnje energije u vatima i bilježi podatke o trenutnoj potrošnji, što olakšava praćenje i analizu energetske učinkovitosti sustava. Podaci se prate putem mobilne aplikacije, omogućujući korisnicima nadgledanje potrošnje energije u stvarnom vremenu i upravljanje podacima s mobilnog uređaja.

4. METODOLOGIJA RADA

Cilj ovog istraživanja bio je mjeriti i analizirati energetska učinkovitost različitih SBC-eva i jednog x86 računala pod različitim radnim uvjetima. Metodologija je osmišljena kako bi se izmjerila potrošnja energije u tri ključna scenarija:

1. Mjerenje potrošnje u stanju mirovanja (Idle)
2. Mjerenje potrošnje pri opterećenju CPU-a
3. Mjerenje potrošnje pri opterećenju memorije

4.1. Postavljanje okruženja

Za svako pojedino računalo, prvo je bilo potrebno preuzeti odgovarajuću verziju operacijskog sustava. Nakon preuzimanja, sljedeći korak bio je snimanje OS-a na microSD karticu, koja će se koristiti kao pogon za pokretanje uređaja. Proces snimanja na microSD karticu obavljen je korištenjem programskog alata Etcher.

Nakon što je operacijski sustav pokrenut na računalu i povezan na internet, sustav je ažuriran kako bi preuzeo najnovije informacije o dostupnim paketima. Zatim su ažurirani svi osnovni i potrebni paketi na sustavu kako bi se osiguralo da su instalirane najnovije verzije softvera i alata potrebnih za daljnje korake eksperimenta.

Nakon ažuriranja operacijskog sustava, instalirani su potrebni alati za provođenje eksperimenta. Za instalaciju većine alata korišten je upravitelj paketa, što je standardni način instalacije softverskih paketa na Linux sustavima. Korištenjem ove metode, alati poput `cpufrequtils`, `stress-ng`, `sysbench` i `htop` jednostavno su preuzeti i instalirani iz službenih repozitorija operacijskog sustava. Ova metoda omogućuje automatsko preuzimanje i instalaciju softvera zajedno sa svim potrebnim ovisnostima.

Međutim, za instalaciju STREAM Benchmarka, postupak je bio drugačiji. STREAM Benchmark nije dostupan u službenim repozitorijima, pa je bio potreban ručni postupak preuzimanja i instalacije. Taj postupak uključuje preuzimanje izvornog koda s odgovarajuće stranice te kompilaciju koda koristeći GNU zbirku kompajlera (*eng. GNU Compiler Collection, GCC*). Ovaj proces poznat je kao kompilacija iz izvornog koda, a uključuje pretvaranje izvornog koda programa u izvršni program koji se može pokrenuti na sustavu. Ovaj pristup, iako zahtjevniji, omogućuje veću fleksibilnost, jer korisniku daje mogućnost prilagodbe softvera specifičnim potrebama ili optimizaciji performansi prema hardveru na kojem se postavlja.

4.2. Stanje mirovanja (Idle)

Nakon što su uređaji povezani i pokrenuti, svaki SBC i x86 računalo ostavljeni su raditi u stanju mirovanja 15-20 minuta kako bi se sustavi stabilizirali. Mjerenje potrošnje energije obavljeno je za svaki uređaj pojedinačno, bez vršenja ikakvih radnji tijekom perioda stabilizacije, kako bi uređaji u potpunosti prešli u stanje mirovanja.

Nakon stabilizacije uređaja, započelo je bilježenje potrošnje energije. Za svaki uređaj, tijekom jedne minute bilježene su sve promjene u potrošnji energije, izražene u vatima (W). Ovaj postupak ponovljen je pet puta za svaki uređaj, čime su prikupljeni podaci za daljnju analizu.

4.3. Opterećenje CPU-a

Za mjerenje potrošnje energije pri opterećenju CPU-a korišteni su programski alati stress-ng i sysbench, koji omogućuju generiranje intenzivnog opterećenja na procesoru. Eksperiment je proveden u dva scenarija za oba alata: opterećenje svih CPU jezgri i opterećenje jedne CPU jezgre.

Metoda mjerenja potrošnje uključivala je pokretanje opterećenja i ostavljanje sustava raditi pod punim opterećenjem određeno vrijeme kako bi se stabilizirale vrijednosti potrošnje. Nakon stabilizacije, bilježene su promjene u potrošnji energije, izražene u vatima (W), tijekom jedne minute. Ovaj postupak ponovljen je pet puta za svaki scenarij i za oba alata, čime su prikupljeni podaci za analizu.

4.4. Opterećenje memorije

Mjerenje potrošnje energije pri opterećenju memorije provedeno je korištenjem alata stress-ng i STREAM Benchmark.

U slučaju alata stress-ng, opterećenje memorije izvedeno je pokretanjem zadataka koji intenzivno koriste memoriju. Testovi su obuhvaćali dva scenarija: opterećenje svih CPU jezgri i opterećenje samo jedne jezgre. Kako bi se izbjeglo preopterećenje sustava i osigurao stabilan rad, opterećenje memorije postavljeno je na način kako bi ostalo dovoljno resursa za normalno funkcioniranje ostalih procesa unutar operacijskog sustava. STREAM Benchmark korišten je za dodatno testiranje memorije, mjereći propusnost memorije prilikom izvođenja niza operacija na svakom od SBC-a.

Mjerenje potrošnje provedeno je na način da se nakon pokretanja opterećenja sustav ostavio raditi određeno vrijeme kako bi se stabilizirale vrijednosti potrošnje. Zatim su, tijekom jedne minute,

bilježene sve promjene u potrošnji energije, izražene u vatima (W). Ovaj postupak bilježenja ponovljen je više puta za svaki scenarij i alat, čime su prikupljeni podaci za analizu energetske učinkovitosti pod opterećenjem memorije.

5. POSTAVKE EKSPERIMENTA I REZULTATI

Prije početka mjerenja, na svakom SBC-u izvršena je naredba prikazana Sl. 1.

<i>Linija</i>	<i>Kod</i>
1:	<code>sudo cpufreq-set -r -g performance</code>

Sl. 1. Naredba za postavljanje frekvencije CPU-a

Ova naredba postavlja regulator frekvencije CPU-a na "performance" način rada, osiguravajući da procesor radi na svojoj maksimalnoj frekvenciji tijekom testiranja. Ovo je važno kako bi se dobili konzistentni rezultati i izbjegle promjene u performansama i potrošnji energije koje mogu nastati zbog automatskog skaliranja frekvencije CPU-a.

5.1. Mjerenje potrošnje u stanju mirovanja (Idle)

U ovom dijelu, analizirana je potrošnja energije svih uređaja u stanju mirovanja, odnosno bez ikakvog dodatnog opterećenja.

Tablica 2. Potrošnja u stanju mirovanja

	Prosječna potrošnja
Raspberry Pi 3B	1.862W
Cubieboard 2	1.888W
ODROID-U3	1.96W
ODROID MC1	3.473W
Lenovo V310	10.795W

Rezultati prikazani u Tablica 2. ukazuju na značajne razlike u potrošnji energije između različitih SBC-eva, kao i u usporedbi s tradicionalnim x86 računalom. Dok je Lenovo V310 trošio 10.795 W energije, svi SBC-evi su pokazali znatno manju prosječnu potrošnju energije.

5.2. Mjerenje potrošnje pri opterećenju CPU-a

U ovom dijelu eksperimenta, analizirana je potrošnja energije uređaja prilikom opterećenja CPU-a. Cilj je bio izmjeriti potrošnju energije pod visokim opterećenjem CPU-a. Iako bi bilo zanimljivo istražiti i druge konfiguracije opterećenja, poput onih gdje su aktivne samo velike ili samo male jezgre (u slučaju heterogenih procesora kod MC1), ova specifična mjerenja nisu provedena u sklopu ovog eksperimenta.

Za generiranje CPU opterećenja korišten je alat stress-ng s parametrom `-matrix` kako je prikazano na Sl. 2. Ovaj test opterećuje procesor izvođenjem niza matematičkih operacija nad matricama, poput množenja, inverzije, transponiranja i rješavanja sustava linearnih jednadžbi, simulirajući tako zahtjevne računalne zadatke.

<i>Linija</i>	<i>Kod</i>
1:	<code>stress-ng --matrix N --matrix-ops M --timeout T</code>

Sl. 2. Stress-ng naredba za opterećenje CPU-a

- `--matrix N`– specificira broj CPU jezgri koje će biti zauzete testom opterećenja
- `--matrix-ops M`– definira broj matematičkih operacija

Prvo je izvršeno mjerenje potrošnje energije prilikom opterećenja svih dostupnih CPU jezgri. Također, spomenuto je da je računalo ostavljeno raditi neko vrijeme prije početka mjerenja kako bi se potrošnja stabilizirala. Ovo je važno jer se potrošnja energije može mijenjati u početnim fazama izvršavanja zadatka. U tim fazama se često odvijaju različite pripremne operacije, poput inicijalizacije podataka, alociranja memorije, uspostavljanja komunikacije između različitih komponenti sustava ili raspodjele zadataka na više procesora ili računala. Ove operacije mogu zahtijevati intenzivniju upotrebu resursa i dovesti do privremenog povećanja potrošnje energije. Mjerenjem potrošnje tek nakon stabilizacije dobivaju se pouzdaniji i reprezentativniji rezultati.

Tablica 3. Potrošnja pri opterećenju svih CPU jezgri koristeći stress-ng

	Opterećene CPU jezgre	Prosječna potrošnja
Raspberry Pi 3B	4	5.012W
Cubieboard 2	2	3.7W
ODROID-U3	4	6.456W
ODROID MC1	8	9.619W
Lenovo V310	4	28.38W

Rezultati prikazani Tablica 3. pokazuju na značajno povećanje potrošnje u odnosu na stanje mirovanja za sve uređaje. Kao što je vidljivo na grafu, ODROID-MC1, opremljen snažnijim procesorom, očekivano prednjači u potrošnji energije među SBC-evima. Također rezultati potvrđuju značajno nižu potrošnju energije kod SBC-eva u usporedbi s tradicionalnim x86 računalom, čak i pod punim opterećenjem.

U drugom dijelu testiranja, opterećena je samo jedna CPU jezgra kako bi se procijenila potrošnja struje prilikom izvođenja manje zahtjevnih zadataka. U slučaju ODROID-MC1, koji ima heterogenu arhitekturu s velikim i malim jezgrama, testiranje je provedeno odvojeno za obje vrste jezgri koristeći naredbu `taskset -c`.

Tablica 4. Potrošnja pri opterećenju jedne CPU jezgre koristeći stress-ng

	Opterećene CPU jezgre	Prosječna potrošnja
Raspberry Pi 3B	1	2.783W
Cubieboard 2	1	2.943W
ODROID-U3	1	3.58W
ODROID MC1	Mala	4.21W
	Velika	6.472W
Lenovo V310	1	20.264W

Kao što je i očekivano, rezultati u Tablica 4. pokazuju smanjenje potrošnje energije u usporedbi s opterećenjem svih jezgri. Čak i u ovom scenariju, x86 računalo troši znatno više energije (20.264 W) od svih testiranih SBC-eva.

Nastavljajući s mjerenjem potrošnje pri opterećenju CPU-a, korišten je i alat sysbench s parametrom `--cpu-max-prime` kako je prikazano na Sl. 3. Ovaj test opterećuje procesor računanjem prostih brojeva do zadane vrijednosti, pružajući drugačiji tip CPU opterećenja u odnosu na matrične operacije korištene u prethodnom testu.

Linija	Kod
1:	<code>sysbench cpu --cpu-max-prime=M --max-time=T --threads=N run</code>

Sl. 3. Sysbench naredba za opterećenje CPU-a

- `--cpu-max-prime M` postavlja gornju granicu za provjeru prostih brojeva
- `--threads N` određuje koliko se niti koristi tijekom izvođenja

Tablica 5. Potrošnja pri opterećenju svih CPU jezgri koristeći sysbench

	Opterećene CPU jezgre	Prosječna potrošnja
Raspberry Pi 3B	4	3.588W
Cubieboard 2	2	2.997W
ODROID-U3	4	6.45W
ODROID MC1	8	9.017W
Lenovo V310	4	24.788W

Rezultati, prikazani u Tablica 5., pokazuju sličan trend kao i kod stress-ng testa, ali s nešto nižim vrijednostima potrošnje.

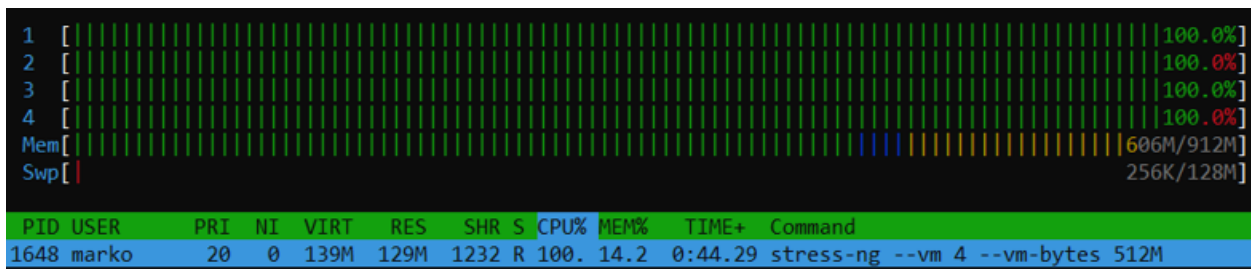
Potom je ponovljeno testiranje s sysbench, opterećujući samo jednu CPU jezgru. Kao i kod stress-ng testa, kod ODROID-MC1 provedena su odvojena mjerenja za velike i male jezgre.

Tablica 6. Potrošnja pri opterećenju jedne CPU jezgre koristeći sysbench

	Opterećene CPU jezgre	Prosječna potrošnja
Raspberry Pi 3B	1	2.291W
Cubieboard 2	1	2.509W
ODROID-U3	1	3.302W
ODROID MC1	Mala	3.938W
	Velika	5.56W
Lenovo V310	1	18.559W

Rezultati u Tablica 6. pokazuju očekivano smanjenje potrošnje u usporedbi s opterećenjem svih jezgri, pri čemu x86 računalo i dalje troši znatno više energije od svih testiranih SBC-eva.

U ovom dijelu eksperimenta, analizirana je potrošnja energije pri različitim stupnjevima opterećenja memorije. Kako bi se izolirao utjecaj opterećenja memorije na ukupnu potrošnju energije, nastojalo se održavati svaku CPU jezgru pod visokim opterećenjem tijekom mjerenja. Ovo je potvrđeno praćenjem iskorištenosti CPU-a korištenjem alata htop, kao što je prikazano na Sl. 4.



Sl. 4. Opterećenje CPU jezgri tijekom opterećenja 50% memorije za Raspberry Pi 3B

Ipak, važno je napomenuti da prikaz 100% opterećenja CPU jezgri ne mora nužno značiti i maksimalnu potrošnju energije. Naime, htop prikazuje zauzetost CPU jezgri procesima, ali to ne znači da procesor radi s maksimalnim performansama ili troši najviše energije. Zauzetost CPU-a može biti visoka, no postoje određeni faktori koji utječu na to koliko je stvarno opterećenje procesora i na to kolika je energetska potrošnja. Na primjer, alat stress-ng, koji je korišten u ovom eksperimentu, generira visoko računalno opterećenje, ali to opterećenje ne mora biti jednako onome koje bi proizveo zahtjevniji alat koji zahtijeva izvođenje složenih operacija. Takvi zadaci generiraju veću količinu topline i potencijalno dovode procesor do viših temperatura, što ukazuje na veću potrošnju energije u odnosu na manje intenzivne operacije koje generira stress-ng.

Iako postoji mogućnost da CPU nije bio maksimalno opterećen u pogledu energetske potrošnje, promjene u potrošnji energije mogu se i dalje dijelom pripisati povećanom opterećenju memorije. Ovakvim pristupom omogućuje se preciznija procjena energetske utjecaja intenzivnog korištenja memorije, što je važno za optimizaciju performansi i energetske učinkovitosti sustava u cjelini.

Za generiranje opterećenja memorije korišten je stress-ng s parametrom `--vm` kako je prikazano na Sl. 5., koji pokreće N radnih procesa zaduženih za alociranje i intenzivno korištenje memorije. Svaki radni proces alocira onoliko memorije koliko je specificirano parametrom `--vm-bytes`. Ako je zadana veličina manja ili jednaka raspoloživoj fizičkoj memoriji, procesi će koristiti isključivo RAM, a sustav neće prelaziti na korištenje swap-a. Međutim, ako opterećenje premašuje fizički raspoloživu memoriju, sustav će automatski početi koristiti virtualnu memoriju, što značajno usporava rad jer se podaci upisuju na disk umjesto u RAM. Ovakvo opterećenje može dovesti do veće potrošnje energije i sporijih performansi, jer pristup podacima u swap memoriji traje dulje.

Linija	Kod
1:	<code>stress-ng --vm N --vm-bytes M</code>

Sl. 5. Stress-ng naredba za opterećenje memorije

- `--vm N` – pokreće N „radnika“ koji će istovremeno zauzimati memoriju
- `--vm-bytes M` – svaki radnik će pokušati zauzeti M memorije

U ovom radu korišteni su postoci zauzeća memorije od 50% i 75% ukupnog dostupnog RAM-a na svakom SBC-u. Korištenje 50% memorije znači da će svaki proces alocirati polovicu ukupne fizičke memorije sustava. Slično, pri korištenju 75% memorije opterećenje se postavlja na tri četvrtine ukupnog RAM-a. Ove postavke omogućuju simuliranje scenarija u kojima se memorija sustava intenzivno koristi, ali bez preopterećenja koje bi dovelo do nužnog korištenja swap memorije. Time se osigurava stabilnost sustava, budući da ostatak memorije ostaje slobodan za druge ključne procese poput operacijskog sustava i aplikacija koje rade u pozadini.

Korištenje ovih postotaka omogućuje procjenu utjecaja različitih razina memorijskog opterećenja na potrošnju energije, bez ugrožavanja stabilnosti sustava. U slučaju da se sva raspoloživa memorija alocira za jedno opterećenje, dolazi do zagušenja sustava, usporavanja ili čak njegovog rušenja zbog nedostatka memorije za druge procese. Zbog toga je ograničavanje opterećenja na 75% osiguralo da sustav ostane funkcionalan i responzivan tijekom cijelog eksperimenta, omogućujući pouzdanija i relevantnija mjerenja.

Prvo je izmjerena potrošnja energije prilikom opterećenja memorije od 50% na svim jezgrama, potom je opterećenje memorije povećano na 75% i mjerenje je ponovljeno.

Tablica 7. Potrošnja pri opterećenju memorije koristeći sve CPU jezgre

	Opterećene CPU jezgre	Prosječna potrošnja prilikom opterećenja	
		50% memorije	75% memorije
Raspberry Pi 3B	4	3.302W	3.419W
Cubieboard 2	2	3.364W	3.404W
ODROID-U3	4	5.395W	5.856W
ODROID MC1	8	8.389W	8.452W
Lenovo V310	4	25.87W	26.676W

Tablica 7. pokazuje rezultate slične onima pri opterećenju CPU-a, što ukazuje da iako opterećenje memorije i opterećenje CPU-a dovode do visoke potrošnje energije, mehanizmi upravljanja memorijom i pristupa memoriji mogu biti energetske nešto učinkovitiji od čistog izvršavanja CPU operacija. Zatim je dodatno istražen utjecaj opterećenja memorije na potrošnju energije kada je samo jedna CPU jezgra aktivna. Korištena je ista naredba `stress-ng`, ali je smanjen broj radnika

na 1 (--vm 1), čime je ograničeno opterećenje memorije na jednu CPU jezgru. Kao i u prethodnim testovima, za ODROID-MC1 je provedeno odvojeno mjerenje za velike i male jezgre.

Rezultati Tablica 8. pokazuju očekivano smanjenje potrošnje u odnosu na slučaj kada su sve jezgre opterećene.

Tablica 8. Potrošnja pri opterećenju memorije koristeći jednu CPU jezgru

	Opterećene CPU jezgre	Prosječna potrošnja prilikom opterećenja	
		50% memorije	75% memorije
Raspberry Pi 3B	1	2.719W	2.871W
Cubieboard 2	1	2.691W	2.757W
ODROID-U3	1	3.346W	3.448W
ODROID MC1	Mala	4.332W	4.31W
	Velika	5.994W	6.36W
Lenovo V310	1	19.907W	20.012W

5.3. STREAM Benchmark

Kako bi se upotpunila slika, u ovom će se dijelu usredotočiti na memorijsku propusnost, ključni čimbenik koji utječe na brzinu obrade podataka, posebno kod velikih skupova podataka koji ne stanu u brzu cache memoriju procesora. Za ovu analizu koristit ćemo STREAM Benchmark, standardni alat za mjerenje održive memorijske propusnosti (*eng. sustainable memory bandwidth*).

Konfiguracija STREAM Benchmarka:

- Memorija po polju²: 76.3 MB
- Ukupna potrebna memorija³: 228.9 MB
- Broj izvršavanja svake jezgre⁴: 100
- Veličina polja⁵: 10.000.000 elemenata

² Označava količinu memorije koju zauzima jedno polje korišteno u benchmarku

³ Ukupna količina memorije koju benchmark treba za izvršavanje

⁴ Označava broj ponavljanja definirane operacije

⁵ Definira koliko elemenata (obično brojeva s pomičnim zarezom) sadrži svako polje

Ove vrijednosti su odabrane kako bi se osiguralo da benchmark pruži reprezentativno opterećenje memorijskog podsustava na svim testiranim uređajima, bez obzira na njihove specifične hardverske karakteristike. Konkretno, memorija po polju od 76.3 MB, uzimajući u obzir da STREAM koristi tri polja, rezultira ukupnom potrebnom memorijom od 228.9 MB. Iako se na prvi pogled ova količina memorije čini relativno malom u odnosu na ukupnu veličinu RAM-a (s obzirom da testirani SBC-evi imaju najmanje 1 GB RAM-a), ključ je u tome da je veličina odabrana tako da osigura da podaci ne budu zadržani u cache memoriji procesora, već da budu smješteni u glavnu memoriju, čime se dobiva realniji prikaz performansi memorijskog podsustava. STREAM Benchmark je dizajniran da testira kontinuirani prijenos podataka između procesora i RAM-a, a odabrane veličine podataka osiguravaju da se cache memorija procesora zaobiđe, što omogućuje mjerenje prave propusnosti glavne memorije.

Povećanje memorije na više od 228.9 MB ne bi nužno značajno utjecalo na rezultate u ovom kontekstu, budući da je cilj ovog testa performansi testirati memorijsku propusnost, a ne isključivo kapacitet RAM-a. S obzirom na arhitekturu ovih uređaja, testiranje veće količine podataka moglo bi produljiti trajanje testa bez proporcionalnog poboljšanja točnosti mjerenja.

Broj izvršavanja svake jezgre postavljen je na 100 kako bi se postigao balans između trajanja samog programa i preciznosti mjerenja. Za uređaje kao što su Cubieboard 2 i Raspberry Pi 3B, koji nemaju velike računalne kapacitete, veći broj ponavljanja bi produžio trajanje testa bez značajnog povećanja preciznosti. Ova vrijednost omogućuje dovoljno ponavljanja operacija da se dobiju stabilni i pouzdani rezultati, a da se istovremeno test ne produži nepotrebno.

Veličina polja od 10.000.000 elemenata odabrana je kako bi se osiguralo da test radi s dovoljno velikim skupom podataka da zadovoljavajuće optereti memorijski podsustav, ali i da ostane izvediv u razumnom vremenskom roku na svim testiranim uređajima.

U Tablica 9. prikazana je potrošnje u vatima za 4 SBC-a i Lenovo V310 računala.

Tablica 9. Potrošnja pri korištenju STREAM Benchmarka

	Potrošnja
Raspberry Pi 3B	3.97W
Cubieboard 2	3.33W
ODROID-U3	4.32W
ODROID MC1	9.52W
Lenovo V310	28.25W

6. ANALIZA REZULTATA

Razlike u potrošnji energije u stanju mirovanja mogu se objasniti različitim faktorima, uključujući arhitekturu procesora, korištene komponente i optimizacije softvera. Primjerice, ODROID-MC1, koji ima najveću potrošnju među SBC-evima, koristi snažniji procesor Exynos5422, što može doprinijeti većoj potrošnji čak i u stanju mirovanja. S druge strane, Raspberry Pi 3B i Cubieboard 2, koji koriste procesore Broadcom BCM2837 i Allwinner A20, istaknuli su se niskom potrošnjom struje u svim testiranim scenarijima. To ih čini dobrim izborom kada je štednja energije prioritet, a vrhunske performanse nisu presudne.

Ovi rezultati naglašavaju važnost razmatranja potrošnje struje u stanju mirovanja pri odabiru SBC-a za određenu primjenu, posebno u slučajevima kada je uređaj često u stanju mirovanja ili kada je potrebno minimizirati ukupnu potrošnju energije.

Usporedba rezultata stress-ng i sysbench testova ukazuje na to da vrsta CPU opterećenja može utjecati na potrošnju energije. Iako ODROID-MC1 ima najveću potrošnju u oba testa, razlika u potrošnji između različitih SBC-eva je manje izražena kod sysbench testa, što sugerira da su neki uređaji efikasniji u određenim vrstama računalnih zadataka.

Stress-ng test, koji je korišten, opterećuje različite komponente sustava, uključujući procesor, memoriju, U/I uređaje i mrežne resurse. S druge strane, sysbench se fokusira prvenstveno na testiranje performansi baze podataka, što uključuje intenzivno korištenje memorije i U/I uređaja. Ovi kerneli simuliraju tipične operacije čitanja, pisanja i ažuriranja podataka u bazi, što zahtijeva česte pristupe memoriji i disku. Stoga je moguće da su uređaji s boljom memorijskom propusnošću i efikasnijim U/I podsustavom pokazali bolje rezultate u sysbench testu, čak i ako imaju procesor s nižim performansama u odnosu na ODROID-MC1.

Rezultati opterećenja memorije ukazuju na to da opterećenje memorije ima utjecaj na potrošnju energije, ali taj utjecaj nije toliko izražen kao kod opterećenja CPU-a. Također, povećanje opterećenja memorije s 50% na 75% prilikom korištenja programskog alata stress-ng, rezultira relativno malim povećanjem potrošnje, što sugerira da postoji određena razina zasićenja u smislu utjecaja opterećenja memorije na potrošnju energije. Ova saznanja mogu biti korisna prilikom odabira SBC-a za aplikacije koje zahtijevaju intenzivno korištenje memorije, omogućujući procjenu očekivane potrošnje energije i planiranje kapaciteta napajanja.

Rezultati naglašavaju važnost testiranja energetske učinkovitosti pod različitim vrstama opterećenja kako bi se dobio potpuniji uvid u performanse uređaja i donijela informirana odluka o odabiru SBC-a za specifičnu primjenu.

Radi lakše vizualizacije i dodatnog uvida u energetska učinkovitost, Tablica 10. prikazuje godišnju potrošnju svakog računala. Troškovi energije za tri prikazana scenarija (mirovanje, stress-ng i sysbench opterećenja CPU-a i memorije) računaju se prema (6-1), uz pretpostavku 24/7 načina rada, prosječnu potrošnju struje u mirovanju i opterećenju svake jezgre te cijenu od 0.15 EUR/kWh. Cijena od 0,15 EUR/kWh odabrana je na temelju prosječnih cijena električne energije za kućanstva u Hrvatskoj, uzimajući u obzir različite tarifne modele što se može pronaći u [12].

$$C = P \times 24 \frac{\text{sati}}{\text{dan}} \times 365.25 \frac{\text{dana}}{\text{godina}} \times 0.15 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}} \quad (6-1)$$

Tablica 10. Troškovi korištenja pojedinog uređaja

	Idle	CPU opterećenje		Memorijsko opterećenje
		stress-ng	sysbench	stress-ng
Raspberry Pi 3B	2.45EUR	6.59EUR	4.34EUR	4.5EUR
Cubieboard 2	2.49EUR	4.87EUR	3.94EUR	4.47EUR
ODROID-U3	2.58EUR	8.49EUR	8.48EUR	7.7EUR
ODROID MC1	4.56EUR	12.65EUR	11.86EUR	11.11EUR
Lenovo V310	14.2EUR	37.32EUR	32.59EUR	35.08EUR

Uz praćenje potrošnje svakog računala, ključan pokazatelj energetske učinkovitosti je broj operacija koje računalo može izvršiti po džulu potrošene energije, koji se računa prema (6-2). Što je ta vrijednost viša, to je računalo energetski učinkovitije, jer obavlja više posla uz istu količinu energije.

$$Ops/J = \frac{\text{Broj operacija}}{\text{Energija(J)}} \quad (6-2)$$

Za prikaz odnosa između potrošnje energije i performansi, provedena su dodatna mjerenja koja uključuju i vrijeme potrebno za izvršavanje specifičnog CPU zadatka. Korišten je stress-ng s parametrom `--matrix-ops` postavljenim na vrijednost 100000 bez vremenskog ograničenja. Test

je proveden pet puta, te je za svaku vrijednost koja je prikazana u Tablica 11. uzeta srednja vrijednost.

Tablica 11. Utrošena energija, bogo ops/s i operacije po džulu za specifični stress-ng zadatak

	Energija	Bogo ops/s	Ops/J
Raspberry Pi 3B	301.36J	1642.55	331.83
Cubieboard 2	675.14J	564.97	148.12
ODROID-U3	207.24J	3112.36	485.53
ODROID MC1	234.63J	4124.58	436.2
Lenovo V310	212.57J	13361.03	470.43

U ovoj vrsti opterećenja ODROID-U3 se ističe najboljom energetsom učinkovitošću (Ops/J), što znači da obavlja najviše operacija po potrošenom džulu energije. Međutim, kada gledamo sirovu procesorsku snagu (Bogo ops/s), Lenovo V310 i ODROID MC1 prednjače. Ovo ukazuje da, iako ODROID-U3 efikasno koristi energiju, Lenovo V310 i ODROID MC1 imaju veći računalni kapacitet za ovu vrstu zadatka.

Za daljnju analizu, fokus je na usporedbi najsnažnijeg SBC-a, ODROID-MC1, s tradicionalnim x86 računalom, Lenovo V310. Ovaj odabir omogućuje relevantniju usporedbu jer su njihove performanse najbliže, iako Lenovo V310 nesumnjivo prednjači u sirovoj procesorskoj snazi.

Cilj nije isticanje razlike u procesorskoj snazi, već istraživanje potencijala SBC-eva, poput MC1, da pruže zadovoljavajuće performanse uz znatno manju potrošnju energije. Ovo je posebno relevantno u kontekstima već spomenutog IoT-a, računarstva na rubu i računarstva u oblaku, gdje energetska učinkovitost igra ključnu ulogu. SBC-evi se često koriste u okruženjima gdje provode značajan dio vremena u stanju mirovanja. Stoga, čak i ako su njihove performanse pod punim opterećenjem slabije od tradicionalnih računala, njihova sposobnost da obavljaju zadatke uz minimalnu potrošnju energije može predstavljati značajnu prednost. Osim toga, u mnogim primjenama, performanse SBC-eva su sasvim dovoljne za obavljanje potrebnih zadataka. U takvim slučajevima, odabir SBC-a umjesto energetski zahtjevnijeg x86 računala ima smisla.

Ova usporedba odabrana je iz nekoliko razloga. Prvo, ODROID MC1 i Lenovo V310 pojavili su se na tržištu u istom vremenskom razdoblju, što ih čini relevantnim za usporedbu jer oba uređaja predstavljaju tehnologije dostupne za to razdoblje u svojim kategorijama. ODROID MC1 je jedno od najmoćnijih single-board računala u seriji ODROID, dizajnirano za primjene koje zahtijevaju istodobnu obradu više procesa i procesorske snage, dok Lenovo V310 predstavlja tipičan primjer

pristupačnog x86 sustava srednje klase s namjenom za široki spektar korisnika. Drugo, usporedba s drugim SBC uređajima iz ovog rada, poput ODROID U3, Cubieboard2 i Raspberry Pi 3, nije uključena u ovo istraživanje jer ti uređaji imaju značajno slabije performanse i energetske učinkovitost u odnosu na ODROID MC1. ODROID MC1, kao najjače od dostupnih SBC-ova u ovom istraživanju, pruža najbolji uvid u stvarni potencijal single-board računala kada se stavi u kontekst konkurencije s konvencionalnim x86 računalima.

Razmatrane su razne mjerene veličine iz već spomenutog stress-ng opterećenja CPU-a, koje je uključivalo 100.000 operacija množenja matrica. Analiza je obuhvatila ukupnu potrošnju energije tijekom testiranja, trajanje zadatka, te energetske učinkovitost izraženu kao broj operacija po džulu (Ops/J) i Energy Delay Product (EDP) koja se u [13] koristi kao ključna metrika za procjenu energetske učinkovitosti jer istovremeno uzima u obzir i potrošnju energije i performanse procesora. Ove mjerene veličine omogućuju nam procjenu kako se ODROID MC1 uspoređuje s Lenovo V310 u pogledu energetske učinkovitosti i ukupnih performansi.

Energija je mjerena pomoću (6-3), gdje snaga predstavlja prosječnu potrošnju uređaja, a vrijeme predstavlja vrijeme koje je bilo potrebno za uređaj obaviti zadatak.

$$Energija(J) = Snaga(W) \times Vrijeme(s) \quad (6-3)$$

EDP (Energy Delay Product) je mjera koja kombinira vrijeme i energiju potrošenu za dovršavanje zadatka. Niži EDP znači bolji odnos između brzine i energetske učinkovitosti. Formula za izračun prikazana je izrazom (6-4).

$$EDP = Energija(J) \times Vrijeme (s) \quad (6-4)$$

Tablica 12. Usporedba performansi MC1 i Lenovo računala

	ODROID MC1	Lenovo V310
Prosječna potrošnja	9.62W	28.38W
Energija	234.63J	212.57J
Vrijeme	24.39s	7.49s
Operacije/s	4124.58	13361.03
Ops/J	436.2	470.43
EDP	5722.63Js	1592.15Js

Analizirajući podatke iz Tablica 12., jasno je da Lenovo nadmašuje ODROID MC1 gotovo u svim aspektima, osim u prosječnoj potrošnji energije. Za opterećenje od 100.000 operacija, Lenovo ga obavlja znatno brže, što, uzimajući u obzir čak i njegovu potrošnju, rezultira boljim rezultatima u odnosu na MC1. Ako je prioritet energetska učinkovitost po događaju (operacije/J) x86 računalo je bolji izbor, unatoč većoj potrošnji energije. Ako je cilj minimalna potrošnja energije, ali je moguće žrtvovati performanse, Odroid MC1 može biti prikladniji.

Međutim, trebaju se uzeti u obzir stvarne situacije i okruženja u kojima se računalo koristi često se razlikuje od „laboratorijskih“ uvjeta. Kao primjer možemo uzeti IoT, računarstvo na rubu i okruženja s ograničenim resursima. U ovakvim situacijama, uređaji provode dosta vremena u stanju mirovanja ili s niskim opterećenjima, uz povremene periode intenzivnijeg rada. Upravo u takvim situacijama SBC poput MC1 može doći do izražaja. Njihova manja prosječna potrošnja u svim testiranim stanjima čini ih energetske učinkovitijima u dugoročnom radu, čak i ako zaostaju u performansama pod punim opterećenjem. Ipak, važno je naglasiti da različita opterećenja CPU-a i memorije mogu imati različit utjecaj na potrošnju energije. Stoga je pri odabiru računala za specifične potrebe ključno provesti detaljniju analizu koja će uzeti u obzir očekivana opterećenja i prioritete u pogledu performansi i energetske učinkovitosti, kao i specifičnosti radnog okruženja u kojem će se uređaj koristiti.

Kako bi se dodatno dobio uvid u razlike u performansama između ODROID-MC1 i Lenovo V310, proveden je i STREAM Benchmark. Iako manje izražen u odnosu na CPU, utjecaj opterećenja memorije na potrošnju energije i dalje je bitan faktor pri odabiru SBC-a, posebno za aplikacije koje intenzivno koriste memoriju. Ovaj test mjeri propusnost memorije, odnosno koliko brzo sustav može čitati i pisati podatke u memoriju. U kontekstu ovog istraživanja, STREAM Benchmark nam pomaže procijeniti koliko brzo svaki uređaj može pristupiti i obraditi podatke pohranjene u RAM-u, što je ključno za mnoge računalne zadatke. Tijekom izvođenja STREAM Benchmarka, prosječna potrošnja energije za ODROID MC1 iznosila je 9.52 W, dok je za Lenovo V310 bila 28.25 W.

Fokus je na rezultatima za četiri ključne STREAM Benchmark operacije:

- Copy: Jednostavno kopiranje podataka, mjeri osnovnu brzinu prijenosa podataka
- Scale: Množenje podataka s konstantom, dodaje jednostavnu aritmetičku operaciju
- Add: Zbrajanje dvaju polja, testiranje istovremenog učitavanja i spremanja podataka
- Triad: Kombinacija zbrajanja i množenja, najbližnja stvarnim primjenama

Tablica 13. Rezultati STREAM Benchmarka za ODROID MC1

	Best rate MB/s	Avg time	Min time	Max time
Copy:	4539	0.0375	0.0363	0.0395
Scale:	3938.5	0.0424	0.0406	0.0443
Add:	5059.8	0.0397	0.0484	0.052
Triad:	4696.9	0.0533	0.0511	0.0564

Tablica 14. Rezultati STREAM Benchmarka za Lenovo V310

	Best rate MB/s	Avg time	Min time	Max time
Copy:	23343.8	0.0069	0.0069	0.01
Scale:	15302.4	0.0105	0.0105	0.013
Add:	17563.2	0.0137	0.0137	0.0138
Triad:	17289.9	0.01397	0.0139	0.0191

Rezultati u Tablica 13. i Tablica 14. jasno pokazuju da je Lenovo V310 superioran i u pogledu performansi memorije. U svim kategorijama STREAM Benchmark testa (Copy, Scale, Add i Triad), Lenovo postiže znatno veće brzine prijenosa podataka i kraća vremena izvršavanja u usporedbi s ODROID-MC1. Ovo je u skladu s očekivanjima, s obzirom na to da Lenovo V310 ima znatno snažniji procesor i bržu memoriju. Razlika u performansama dodatno se može pripisati tipu memorije koju koriste ova dva uređaja. ODROID-MC1 koristi LP-DDR3 memoriju, koja je dizajnirana za manju potrošnju energije, ali zbog toga ima nižu propusnost u odnosu na DDR4 memoriju ugrađenu u Lenovo V310. Ova razlika u brzini prijenosa podataka utječe na performanse, što se može vidjeti i u zadatka testiranih u STREAM Benchmarku.

Ukratko, STREAM Benchmark potvrđuje da se prednosti i mane ova dva uređaja odražavaju i u performansama memorije, dodatno podcrtavajući važnost odabira platforme koja je najbolje prilagođena specifičnim zahtjevima aplikacije i radnog okruženja.

U zaključku, iako Lenovo V310 može pružiti bolje performanse i energetska učinkovitost u kontekstu intenzivnih računalnih zadataka, ODROID MC1 predstavlja značajnu prednost u primjenama gdje su dugotrajna energetska učinkovitost i sposobnost rada u stanju mirovanja ključni. Ovo čini ODROID MC1 prikladnijim za projekte i uređaje koji zahtijevaju nisku potrošnju energije, dugotrajnu upotrebu i fleksibilnost u radu s ograničenim resursima, dok i dalje pruža prihvatljive performanse za specifične primjene.

7. ZAKLJUČAK

Analiza energetske učinkovitosti računalnih sustava, a posebno SBC-eva, ključna je zbog rastuće potrebe za održivim tehnološkim rješenjima, ali i zbog specifičnih prednosti i izazova koje SBC-evi donose. SBC-evi, sa svojom kompaktnom veličinom, niskom cijenom i energetske učinkovitom ARM arhitekturom, nude obećavajuće rješenje za budućnost, posebno u područjima poput IoT-a, računarstva na rubu i računarstva u oblaku. Rastuća popularnost SBC-eva i primjena u sve većem broju uređaja i sustava zahtijevaju kontinuiranu analizu i optimizaciju kako bi se osigurala njihova dugoročna održivost. Stoga je analiza njihove energetske učinkovitosti ključna kako bi razumjeli njihov utjecaj na okoliš, optimizirali njihov rad i osigurali njihovu održivu primjenu u budućnosti.

Povezana literatura jasno ukazuje na važnost analize energetske učinkovitosti SBC-eva, ističući nekoliko ključnih pristupa. Kroz precizno mjerenje i analizu potrošnje energije pod različitim radnim opterećenjima, mogu se identificirati komponente koje troše najviše energije i procijeniti ukupna energetska učinkovitost ovih uređaja. Nadalje, pokazalo se da optimizacija softvera, kroz korištenje energetske učinkovitih algoritama, te pravilno upravljanje radnim opterećenjima, mogu značajno smanjiti potrošnju energije. Osim toga, istaknut je potencijal grozdova SBC-eva za postizanje većih performansi uz zadržavanje niske potrošnje energije, što ih čini energetske učinkovitijima od tradicionalnih grozdova baziranih na x86 arhitekturi. Ovo naglašava važnost kontinuiranog istraživanja i razvoja u području energetske učinkovitosti SBC-eva kako bi se iskoristio njihov puni potencijal u izgradnji održivije tehnološke budućnosti.

Temeljem ovog rada, mogu se prepoznati prednosti i nedostaci single-board računala koje je važno uzeti u obzir. Energetska učinkovitost u stanju mirovanja i pri niskim opterećenjima se ističe kao glavna prednost SBC-eva, što im omogućuje obavljanje potrebnih operacija uz minimalnu potrošnju struje. Osim niske potrošnje ističu se i svojom kompaktnom veličinom i pristupačnom cijenom u odnosu na x86 ekvivalente. No, uz ove prednosti dolaze i nedostaci u pogledu na njihovih performansi u usporedbi s tradicionalnim x86 računalima, te zbog čega mogu biti manje prikladni za zahtjevne računalne zadatke. Uzimajući sve to u obzir, primjene SBC-eva mogu se vidjeti u područjima gdje je energetska učinkovitost ključna, resursi ograničeni, a performanse koje nude x86 računala nisu od presudne važnosti.

Ovo istraživanje otvara prostor za daljnja istraživanja u području energetske učinkovitosti SBC-eva, posebno u kontekstu mogućnosti grozdova SBC-eva. Korištenjem grozdova, moguće je postići znatno veće performanse, a istovremeno zadržati prednosti niske potrošnje energije u

usporedbi s tradicionalnim grozdovima baziranim na x86 arhitekturi. Ovo bi moglo otvoriti nove mogućnosti za primjenu SBC-eva u područjima gdje su potrebne veće performanse, poput znanstvenih istraživanja ili analize velikih skupova podataka. Također, zanimljivo bi bilo istražiti kako različite konfiguracije grozdova (broj pločica i raspodjela zadataka) utječu na ukupnu energetska učinkovitost i performanse sustava.

Osim toga, važno je nastaviti pratiti razvoj novih generacija SBC-eva i njihov utjecaj na energetska učinkovitost. S obzirom na brzi napredak tehnologije, očekuje se da će buduće generacije SBC-eva pružati još bolje performanse uz još nižu potrošnju energije, što će dodatno proširiti njihovu primjenu i utjecaj na različita područja.

8. LITERATURA

- [1] „What is Energy Efficiency & Why is it Important? | NVIDIA“. Pristupljeno: 27. lipanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.nvidia.com/en-us/glossary/energy-efficiency/>
- [2] D. A. Paulenka, E. V. Snezhko, i V. A. Kovalev, „Testing and analyzing the performance of single-board computers for AI tasks“, Минск : БГУ, 2024. Pristupljeno: 27. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/315226>
- [3] B. Qureshi i A. Koubaa, „On Energy Efficiency and Performance Evaluation of Single Board Computer Based Clusters: A Hadoop Case Study“, *Electronics*, sv. 8, izd. 2, Art. izd. 2, velj. 2019, doi: 10.3390/electronics8020182.
- [4] M. Beebe, B. Williams, S. Devaney, J. Leidel, Y. Chen, i S. Poole, „RaiderSTREAM: Adapting the STREAM Benchmark to Modern HPC Systems“, u *2022 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*, ruj. 2022, str. 1–7. doi: 10.1109/HPEC55821.2022.9926292.
- [5] S. W. Nabi i W. Vanderbauwhede, „MP-STREAM: A Memory Performance Benchmark for Design Space Exploration on Heterogeneous HPC Devices“, u *2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, svi. 2018, str. 194–197. doi: 10.1109/IPDPSW.2018.00036.
- [6] J. Liu, K. Wang, i F. Chen, „Understanding Energy Efficiency of Databases on Single Board Computers for Edge Computing“, u *2021 29th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, stu. 2021, str. 1–8. doi: 10.1109/MASCOTS53633.2021.9614300.
- [7] „State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16% to 16.7 billion globally“, IoT Analytics. Pristupljeno: 30. lipanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- [8] P. J. R. Yepes, C. Barrios, i L. Steffemel, „Low Energy Consumption on Post-Moore Platforms for HPC Research“, *ACI Av. En Cienc. E Ing.*, sv. 13, izd. 2, Art. izd. 2, stu. 2021, doi: 10.18272/aci.v13i2.2108.

- [9] „What Are Single Board Computers (SBC)?“, BAE Systems | United States. Pristupljeno: 29. lipanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.baesystems.com/en-us/definition/what-are-single-board-computers>
- [10] „Ubuntu Manpage: stress-ng - a tool to load and stress a computer system“. Pristupljeno: 28. lipanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://manpages.ubuntu.com/manpages/jammy/man1/stress-ng.1.html>
- [11] „Ubuntu Manpage: sysbench - multi-threaded benchmark tool for database systems“. Pristupljeno: 30. lipanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://manpages.ubuntu.com/manpages/focal/en/man1/sysbench.1.html>
- [12] B. O. „Cijene električne energije i plina u Hrvatskoj među nižima u EU-u“, Energetika. Pristupljeno: 12. rujan 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.energetika-net.com/energetsko-gospodarstvo/cijene-elektricne-energije-i-plina-u-hrvatskoj-meu-nizima-u-eu-u>
- [13] R. Gonzalez i M. Horowitz, „Energy dissipation in general purpose microprocessors“, *IEEE J. Solid-State Circuits*, sv. 31, izd. 9, str. 1277–1284, ruj. 1996, doi: 10.1109/4.535411.

SAŽETAK

Rastući zahtjevi za održivim tehnološkim rješenjima čine single-board računala privlačnom alternativom tradicionalnim x86 sustavima zbog njihove energetske učinkovitosti. SBC-evi, temeljeni na ARM arhitekturi, pružaju zadovoljavajuće performanse uz nisku potrošnju energije, što ih čini pogodnima za scenarije u kojima su radna opterećenja manja, a energetska učinkovitost prioritet.

U ovom radu istražena je energetska učinkovitost SBC-eva u usporedbi s jednim x86 računalom. Eksperimenti su obuhvatili mjerenje potrošnje energije u stanju mirovanja, te pod različitim radnim opterećenjima, uključujući opterećenje procesora i memorije. Rezultati pokazuju da SBC-evi troše značajno manje energije u stanju mirovanja i pri manjim opterećenjima, dok x86 sustavi nadmašuju SBC-eve u pogledu procesorske snage i efikasnosti pri većim opterećenjima.

Zaključeno je da su SBC-evi optimalan izbor za aplikacije u kojima je energetska učinkovitost ključna, osobito u scenarijima gdje uređaji veći dio vremena provode u stanju mirovanja ili pod manjim opterećenjima.

Ključne riječi: ARM arhitektura, energetska učinkovitost, opterećenje memorije, opterećenje procesora, single-board računalo

ABSTRACT

Energy Efficiency of Single-Board Computers

The growing demand for sustainable technological solutions makes single-board computers an attractive alternative to traditional x86 systems due to their energy efficiency. SBCs, based on ARM architecture, offer satisfactory performance with low energy consumption, making them suitable for scenarios where workloads are lighter and energy efficiency is a priority.

This paper explores the energy efficiency of SBCs in comparison to an x86 computer. Experiments included measuring power consumption in idle states and under various workloads, including CPU and memory load. The results show that SBCs consume significantly less energy in idle states and under lower workloads, while x86 systems outperform SBCs in terms of processing power and efficiency under higher workloads.

It is concluded that SBCs are the optimal choice for applications where energy efficiency is crucial, especially in scenarios where devices spend most of their time in idle states or under light workloads.

Keywords: ARM architecture, energy efficiency, memory load, processor load, single-board computer