

Analiza performansi ext4, xfs i btrfs fajl sistema na poluprovodničkom disku (SSD)

Nikola Davidović, Slobodan Obradović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Istočno Sarajevo, RS, BiH
nikola.davidovic@etf.unssa.rs.ba
slobo.obradovic@etf.unssa.rs.ba

Borislav Đorđević, Valentina Timčenko
Elektrotehnički fakultet, Institut Mihajlo Pupin
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
bora@impcomputers.com
valentina.timcenko@pupin.rs

Abstract— HDD više decenija dominira tržištem sekundarnih memorija. U zadnjih nekoliko godina razvojem elektronskih permanentnih memorija, kao sekundarna memorija računarskog sistema sve više se koristi poluprovodnički disk (Solid State Drive - SSD). U ovom radu analizirane su performanse fajl sistema u Linux okruženju. Predstavljeni rezultati dobijeni su ispitivanjem performansi ext4, xfs i btrfs sistema datoteka pod Linux CentOS operativnim sistemom (kernel verzija 3.10.0) na poluprovodničkom disku. Mjerenje performansi na izabrane sisteme datoteka urađeno je korištenjem nasumičnih (eng. random) i sekvencijalnih (eng. sequential) benchmark testova. Benchmark aplikacija koja je korištena za dobijanje rezultata je Bonnie++.

Ključne riječi – SSD, ext4, xfs, btrfs, fajl sistemi, Linux, performanse

I. UVOD

Razvoj računarskih permanentnih memorija bez pokretnih dijelova počeo je sredinom XX vijeka. Međutim i pored brojnih pokušaja, poluprovodničke memorije nisu mogle da ugroze dominaciju HDD kao sekundarne memorije računara. Krajem dvadesetog vijeka dolazi do naglog razvoja fleš memorija, koje su u početku korištene kao pomoćne memorije za čuvanje i prenos podataka, a zatim i kao osnova za razvoj sekundarnih memorija bez pokretnih dijelova – poluprovodničkih diskova (eng. Solid State Disk - SSD).

Unapređenjem komponenti računarskog sistema, prvenstveno procesora, javlja se potreba za korišćenjem bržih sekundarnih memorija.

Pored toga što poluprovodnički diskovi imaju znatno bolje performanse od magnetnih diskova, u pogledu brzine pristupa čitanju i upisivanju podataka, oni imaju i nekoliko značajnih nedostataka, koji onemogućavaju SSD uređaje da preuzmu potpunu dominaciju kao sekundarne memorije računara od HDD uređaja.

Uprkos nedostacima koje imaju SSD uređaji u odnosu na HDD uređaje, prvenstveno zahvaljujući većoj brzini pristupa čitanju i upisivanju podataka, poluprovodnički diskovi imaju tendenciju da zamjene magnetne diskove u računarskim sistemima i da na taj način postane dominantna tehnologija u daljem razvoju sekundarnih memorija.

Jedan od značajnih operativnih sistema, koji je nastao krajem XX vijeka, razvijan na osnovu slobodno dostupnog softvera i putem otvorenog koda je Linux. Postoje brojne distribucije (verzije) Linux operativnog sistema. Neke od poznatijih distribucija su Debian, RHEL, Fedora, Ubuntu, Sidux, CentOS, PCLinuxOS, itd.[1]

Jedna od Linux distribucija koja je izvedena iz RHEL (Red Hat Enterprise Linux[2]) distribucije je i CentOS (Community Enterprise Operating System).[3] S obzirom na tu činjenicu CentOS distribucija podržava skoro sve platforme koje podržava i RHEL distribucija. Ova Linux distribucija je podržana od strane šire zajednice od marta 2004. godine. Najvažnije osobine CentOS-a su stabilnost, pouzdanost i sigurnost u radu, pri čemu je besplatan za razliku od RHEL.

Osnovna uloga fajl sistema je da čuva, pristupa i upravlja podacima. Postojeće metode koje su bile odgovarajuće za čuvanje, pristup i upravljanje podacima zapisanim na magnetnom disku, možda i nisu odgovarajuće za primjenu na poluprovodničkim diskovima.

II. CILJ RADA

Cilj rada je da se na sistematičan način predstave rezultati dobijeni ispitivanjem performansi najčešće korišćenih fajl sistema u Linuxu: ext, xfs i btrfs sistema datoteka na poluprovodničkom disku (SSD). Osim toga, u radu je dat kratak opis principa rada poluprovodničkih diskova, kao i pregled osnovnih karakteristika analiziranih fajl sistema: ext, xfs i btrfs. Nakon toga navedeni su rezultati testiranja i uporedna analiza pomenuta tri fajl sistema.

III. POLUPROVODNIČKI DISKOVI - SSD

Za razliku od magnetnih diskova, sekundarnih memorija koji se sastoje od elektronskog i mehaničkog dijela, poluprovodnički diskovi su sekundarne memorije koje se sastoje samo od elektronskog dijela. Podaci se kod ovog tipa sekundarnih memorija trajno skladište u elektronskom obliku - fleš memorijskim čipovima.

Prve fleš memorije koje su se pojavile bile su NOR tipa. Međutim, NAND tip fleš memorija ima veću gustinu po bitu, kao i veću brzinu upisivanja od NOR fleš memorija, tako da je

NAND fleš memorija preovladala u komercijalnim SSD uređajima.

Fizička organizacija memorijskog prostora unutar SSD uređaja[5][6]:

- **Memorijska ćelija (eng. memory cell)** - osnovnu memorijsku komponentu koja čuva jedan ili više bitova podataka.
- **Stranica (eng. page)** - organizovana grupa memorijskih ćelija. One predstavljaju najmanju strukturu iz koje se može očitavati ili na koju se može upisivati.
- **Blok (eng. block)** - organizovan je od stranica. On predstavlja najmanju memorijsku strukturu koja se može brisati.
- **Ravan (eng. plane)** – čini ga više blokova.
- **Fizički čip** sadrži više ravni.
- **SSD uređaj** - sadrži više čipova koji svojim brojem i kapacitetom određuju ukupan kapacitet poluprovodničkog diska.

Glavni i najbrži dio SSD uređaja, čija je uloga da obezbjedi elektronicu da premosti NAND memorijske komponente do glavnog računara, je kontroler poluprovodničkog diska.

S obzirom da su poluprovodnički diskovi sastavljeni samo od električnih dijelova, odnosno nemaju mehaničkih dijelova, kao magnetni diskovi, SSD uređaji imaju zanemarljivo vrijeme traženja podataka. Uzimajući u obzir naprijed navedenu činjenicu možemo smatrati da je kašnjenje pri čitanju kod SSD uređaja zanemarljivo.

Dvije osnovne operacije, koje utiču na vijek trajanja poluprovodničkog diska, su proces upisivanja podatka i proces brisanja podatka. Proces čitanja nema uticaja na vijek trajanja poluprovodničkog diska.

Proces upisa kod SSD uređaja se vrši adresiranjem određene stranice unutar nekog bloka u jednoj ravni u čipu. Minimum podataka koji tom prilikom upisuje je veličine stranice. Nedostatak je taj što sa svakim novim upisom u tu stranicu, ukupan broj ciklusa te stranice se smanjuje za jedan upis.

Za razliku od magnetnih diskova, gdje brisanje podataka ne zahtjeva posebne radnje već se izvršava jednostavnim prepisivanjem novih podataka preko postojećih, kod poluprovodničkih diskova za upis novog podatka na mjestu gdje već postoji podatak, potrebno je izvršiti sljedeće korake:

- I korak - izvodi se proces čitanja cijelog bloka u internu memoriju.
- II korak - izvode se modifikacije zahtjevanih stranica u internoj memoriji.
- III korak - operacija brisanja cijelog bloka.
- IV korak - operacija ponovnog upisa, stranica na kojima je izvršena modifikacija, kao i stranica koje nisu modifikovane.

Najznačajniji nedostatak koji imaju SSD uređaji je posljedica karakteristike fleš memorije da posjeduje ograničen broj upisa. Nakon određenog broja brisanja podataka memorijske ćelije gube mogućnost memorisanja podatka. S obzirom na postojeći problem razvijene su tehnike koje produžuju vijek trajanja SSD uređaja. Jedna od tehnika je i ujednačavanje habanja memorijskih ćelija koje se postiže upisivanjem u različite memorijske blokove prilikom svakog upisa čime se teži što ujednačenijoj upotrebi blokova (eng. wear leveling). Druge tehnike koje se mogu koristiti uključuju povremeno pomjeranje fajlova koji se ne koriste često u drugi memorijski blok, kao i dodatne memorijske blokove koji imaju svrhu da zamjene memorijske ćelije koje su otkazale. Primjenom ovih tehnika postiže se samo odgađanje otkaza memorijske ćelije, ali ne i sprječavanje otkaza.

IV. SISTEMI DATOTEKA U OS LINUX

Sistemom datoteka nazivamo metodu spremanja i organizovanja datoteka, koja nam pored toga omogućava i obavljanje operacija nad datotekama (stvaranje, brisanje, otvaranje itd.)

Sva tri tipa sistema datoteka koriste journaling tehnike, odnosno vode dnevnik (eng. journal) promjena koje nastaju na disku. Sadržaj dnevnika se ažurira prije promjene sadržaja objekta, pri čemu se prate promjene u sistemu datoteka u odnosu na posljednje stabilno stanje. U slučaju da dođe do oštećenja i gubitka integriteta sistema datoteka, sistem lako može da se rekonstruiše povratkom na zadnje stabilno stanje.

Fourth Extended filesystem (ext4) je nasljednik sistema datoteka ext3/ext2. Sistem datoteka ext2 predstavlja najjednostavniju i-node implementaciju. Iako je izuzetno brza ext2 danas se gotovo i ne koristi, jer ne podržava vođenje dnevnika.

Ext3 predstavlja direktnu nadogradnju na ext2 sa opcijom vođenja dnevnika. Moguće je izabrati tri nivoa rada, koji se kreću od manje brzine i veće pouzdanosti, ka većoj brzini i manjoj pouzdanosti. Ext3 je u potpunosti kompatibilan sa ext2 tako da se ext2 može direktno konvertovati u ext3 i obratno.

Ext 4 donosi suštinska poboljšanja, kao što su veće particije i datoteke, teorijski neograničen broj foldera u sistemu datoteka itd. U odnosu na ext3 sistem datoteka ext4 ima veliki broj tehnika koje nisu bile zastupljene u ext3, među kojima je *checksumming*, brži *fsck*, *on-line* defragmentacija, istovremena alokacija više blokova, odložena alokacija, kao i brojne druge. Bitno je navesti da je za razliku od prethodnih verzija, ext4 je 64-bitni sistem datoteka, što ima za posledicu da veličina jedne datoteke može dostići veličinu i do 16TB.

Ext4 je kompatibilan sa prethodnim verzijama ext3 i ext2, dok kompatibilnost u suprotnom pravcu nije potpuna. Sa aspekta strukture podataka, ext4 je u odnosu na prethodne verzije znatno pouzdaniji. Ovaj sistem datoteka je na velikom broju novijih Linux distribucija podrazumjevani sistem datoteka.

Silicon Graphics, Inc (SGI), je početkom devedesetih godina XX vijeka razvila sistem datoteka pod nazivom xfs. Prvenstveno je napravljen za SGI IRIX, a kasnije i varijanta za

Linux. Većina Linux distribucija danas podržava xfs sistem datoteka, pri čemu je zadani sistem datoteka na RHEL, CentOS7 i mnogim drugim distribucijama.

Uvođenje linearnih regiona jednake veličine, odnosno alokacionih grupa, koji se definišu za svaki disk predstavlja prvu novinu koju je predstavio xfs. Pri tome svaka alokaciona grupa je nezavisna i može učestvovati u paralelnim I/O operacijama. To je moguće ostvariti jer svaka alokaciona grupa ima svoju i-node tabelu i listu slobodnog prostora.

Svaka alokaciona grupa, interno, koristi B+ stabla, koja čuvaju informaciju o zonama slobodnog prostora i slobodnim i-node čvorovima. Xfs optimizuje alokaciju slobodnog prostora putem odložene alokacije (eng. delayed allocation).

B – tree file system nazivan još i “Butter FS”, “Better Filesystem” je jedan od sistema datoteka novijeg datuma. Originalno je razvijen 2007. godine od strane Oracle. U razvoj ovog tipa sistema datoteka pored Oracle uključili su se i Red Hat, Intel, Fujitsu, itd.

Rad btrfs je baziran na principu “kopiraj na upis” (CoW – Copy on Write). CoW može imati negativan efekat s velikim datotekama koje imaju mali broj nasumičnih pisanja. Osnovna struktura podataka za btrfs su B+ stabla.[11]

Najveća razlika koja postoji između tri posmatrana fajl sistema je u organizaciji direktorijuma. Ext4 fajl sistem koristi formu H-stabla dok xfs i btrfs koriste B+stabla. Upravo to je razlog da ukupno vrijeme izvršavanja svih operacija je zavisno od fajl sistema i da se javljaju velike razlike.

Ukupno vrijeme za izvršenje svih operacija $T_{workload}$ je dato jednačinom:

$$T_{workload} = T_{Dir} + T_{Meta} + T_{FL} + T_{FB} + T_J + T_{HK} \quad (1)$$

gdje T_{Dir} predstavlja vrijeme koje je potrebno da se izvrše sve operacije vezane za direktorijume, T_{Meta} je vrijeme potrebno da se izvrše sve operacije u vezi sa meta podacima, T_{FL} je vrijeme koje je potrebno da se izvrše sve operacije sa slobodnih lista, T_{FB} vrijeme koje je potrebno da se izvrše direktne operacije sa blokovima, T_J vrijeme vođenja dnevnika i T_{HK} je vrijeme koje je potrebno za vođenje operacija u okviru fajl sistema.

Btrfs i xfs fajl sistem, s obzirom da koriste B+stabla, moraju izvršavati operaciju balansiranja. Postoje brojne šeme koje predlažu različite metode balansiranja, pri čemu je potrebno izvršiti niz operacija kako bi došlo do premještanja podataka. Prednosti operacija premještanja podataka prilikom balansiranja stabla treba biti veća od cijene samog balansiranja, pri čemu za cijenu operacije premještanja podataka tj. balansiranja treba da važi:

$$Cijena \leq \log_d \frac{n+1}{2} \quad (2)$$

gdje je n ukupan broj čvorova, a d broj direktnih potomaka. (B stabla su strukture podataka u obliku stabla, koje se sastoje od tri vrste čvorova: korijenog čvora, međučvorova i krajnjih čvorova tj. listova.)

Pored toga razlika između ext4, xfs i btrfs je i u tome što prilikom upisa ext4 i btrfs koriste metod prepisivanja, dok btrfs

koristi metod kopiraj-na-upis (Copy-on-Write - CoW), koji uzrokuje seobu podataka i povećava količinu podataka koja treba biti upisana.

Osim toga btrfs fajl sistem ima najveće vrijeme vođenja operacija, jer provjerava ček sumu za meta podatke i operacije sa podacima, a koje dodatno produžavaju cikluse upisa.

V. REZULTATI TESTIRANJA

A. Hardverska konfiguracija i organizacija fajl sistema

Hardverska specifikacija prikazana je u tabeli 1. Testovi su urađeni na CentOS7 Linux operativnom sistemu koristeći fabrički nov SSD na kojem do testova nisu vršeni upisi podataka, a čije su karakteristike date u tabeli 2.

Kompletna organizacija fajl sistema data je u tabeli 3.

TABELA I. HARDVERSKA KONFIGURACIJA

Hardver	Specifikacija
RAM	DDR3 Hyperx Fury 8 GB x 2, 16 GB
CPU Model	CPU Intel Core i7-4790 CPU @ 3,60GHz
Poluprovodnički disk - OS CentOS7	Kingston SM2280S3/120GB M.2
Poluprovodnički disk - test	ADATA Premier Pro SP900 128GB SSD
Operativni sistem	CentOS Linux 7 (Core), 3.10.0-229.el7. x86_64

TABELA II. HARDVERSKA KONFIGURACIJA[12]

SSD	Specifikacija
Model	ADATA Premier Pro SP900 2.5"
Kapacitet	128 GB
Interfejs	SATA III
Brzina prenosa	6 Gb/s
Tip memorije	Sinhroni MLC NAND Fleš memorija
MAX 4K upis IOPS	91K

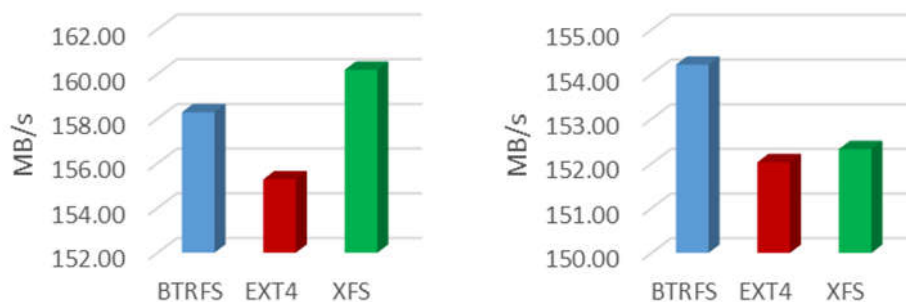
TABELA III. ORGANIZACIJA FAJL SISTEMA

	Veličina	Particija
/dev/sdc1	300 MB	/boot
/dev/sdc2	32 GB	/swap
/dev/sda3	80 GB	/root
/dev/sda1	100 GB	/test

B. Bonnie++ – test i rezultati

Bonnie++ je program koji se koristi za ocjenu performansi na različitim uređajima za skladištenje i čuvanje podataka, kao i na različitim sistemima datoteka. Analiza rezultata može se podijeliti na dvije grupe nasumičnu (eng. random) i sekvencijalnu (eng. sequential). U tabeli 4 prikazani su dobijeni rezultati nasumičnog i sekvencijalnog testa.

Iz tabele 4, kao i sa sl. 1a može se uočiti da za nasumični upis najbolje rezultate daje xfs, dok su btrfs i ext4 neznatno



Slika 1 a) Nasumični upis; b) Nasumično čitanje



Slika 2 a) Sekvencijalni upis; b) Sekvencijalno prepisivanje; c) Sekvencijalno čitanje

lošiji. Ovdje su dobijeni očekivani rezultati. Btrfs je neznatno lošiji od xfs fajl sistema prvenstveno zbog CoW načina rada, koji ima negativan uticaj na operacije upisa, kao i zbog vremena vođenja operacija u okviru fajl sistema. Gubitak brzine nasumičnog upisa kod btrfs fajl sistema koji uzrokuje CoW način rada ublažava keš.

TABELA IV. REZULTATI TESTOVA

	BTRFS (MB/s)	EXT4 (MB/s)	XFS (MB/s)
Random Write	158.29	155.29	160.19
Sequential Write	531.91	536.95	538.43
Sequential Rewrite	237.88	197.43	196.99
Random Read	154.22	152.03	152.32
Sequential Read	639.59	465.22	466.47

U testu nasumičnog čitanja najbolje rezultate daje btrfs (sl. 1b), ali je i ovdje moguće uočiti da je razlika između ova tri fajl sistema mala. Najbolji rezultat nasumičnog čitanja je posljedica ubrzanja koje dolazi od činjenice da btrfs, kao i xfs, baziraju svoje operacije na B+ stablima, koje uključuju direktorijumske operacije, metadatum odnosno inode operacije i operacije sa slobodnim listama, koje maksimalno ubrzavaju pretraživanje.

Iz tabele 4 i sa sl. 2a moguće je primjetiti da na poluprovodničkom disku benchmark aplikacija Bonnie++ za sekvencijalni upis najbolje rezultate daje xfs, dok su druga dva fajl sistema neznatno lošija. Btrfs dobija usporenja zbog CoW tehnologije koju koristi, a xfs koristeći update metod i sve beneficije B+ stabla, pokazuje najbolje osobine. Gubitak brzine sekvencijalnog upisa kod btrfs fajl sistema koji uzrokuje CoW način rada, za razliku od nasumičnog upisa, keš ne može

mного da pomogne. Iako je za očekivati da će prilikom sekvencijalnog prepisivanja (sl. 2b) xfs imati bolje rezultate od btrfs fajl sistema, što je tipično za magnetne diskove, rezultati testiranja na CentOS operativnom sistemu pri navedenoj konfiguraciji pokazuju suprotno.

U sekvencijalnom čitanju (sl. 2c) najbolje rezultate očekivano daje btrfs fajl sistem. Razlozi za ovo ponašanje su slični kao kod nasumičnog testiranja. B+tree operacije maksimalno ubrzavaju pretraživanje i čitanje, tako da btrfs ubjedljivo daje najbolje rezultate u čistom sekvencijalnom testu čitanja.

Ovako dobijeni rezultati su posljedica primjene B+stabla za btrfs, koja su brža u pretraživanju od B+stabla primjenjenog u xfs i H-stabla u ext4. Osim toga ključna razlika koja dovodi do ovako dobijenih rezultata su i metode koje se koriste za ubacivanje i brisanje zapisa, a koje imaju za cilj balansiranje stabla kod xfs i btrfs (jed. 2). Iako postoji veliki broj predloženih šema za balansiranje B-stabla, svaka ta šema zahtijeva neka izračunavanja koja utiču na ukupno vrijeme izvršenja (jed. 1).

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršena je komparacija između btrfs, ext4 i xfs sistema datoteka na SSD uređaju. Za nasumične i sekvencijalne testove korišten je benchmark program Bonnie++.

Zahvaljujući modernim B+ stablima, btrfs ispoljava jako dobre osobine za nasumične i za sekvencijalne performanse. Dobre osobine btrfs fajl sistema primjetne su kod operacija čitanja, a na testiranoj konfiguraciji, naročito prilikom sekvencijalnog čitanja. Testiranja su očekivano pokazala da

CoW metod kod btrfs fajl sistema ima negativan uticaj na performanse upisa, naročito kod sekvencijalnog upisa. Sistem datoteka xfs, ima brojne dobre osobine bazirane na B+ stablima. Pored toga što ext4 sistem datoteka je linearan i ne koristi B+ stabla, pokazao je da ima sasvim dobre performanse u odnosu na svoju direktnu konkurenciju, kao što je xfs ili btrfs.

U sistemima gdje se zahtijeva veći pristup memorijama radi čitanja blagu prednost bi ipak imao btrfs sistem datoteka.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je djelimično finansiran od strane Ministarstva prosvjete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Projekti TR32025, TR32037 i III43002).

LITERATURA

- [1] D. P. Bovet, M. Cesati, "Understanding the Linux kernel", O'Reilly Media Inc., 2005.
- [2] "Red Hat Enterprise Linux",
<https://www.redhat.com/en/technologies/linux-platforms/enterprise-linux>
- [3] The CentOS Project, Online: <https://www.centos.org>
- [4] "How is SSD Changing Software Architecture?",
<http://www.cubrid.org/blog/dev-platform/how-ssd-changing-softwarearchitecture/>
- [5] Valentina Timčenko, Borislav Đorđević, Slobodan Obradović, Nikola Čorni, Uticaj keš disk bafera na performanse SSD diskova, INFOTEH-JAHORINA Vol. 12, March 2013.
- [6] Nikola Davidović, Dijana Kosmajac, Borislav Đorđević, Valentina Timčenko, Komparativna analiza sekundarnih memorija – poređenje tvrdog diska sa poluprovodničkim diskom, , INFOTEH-JAHORINA Vol. 13, March 2014.
- [7] "ext4 file system",
https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Linux/6/html/Storage_Administration_Guide/c-h-ext4.html
- [8] "ext4 file system",
<https://www.kernel.org/doc/Documentation/filesystems/ext4.txt>
- [9] "ext2-ext3-ext4 file system",
<http://www.thegeekstuff.com/2011/05/ext2-ext3-ext4/>

- [10] „Linux xfs file system“,
http://landoflinux.com/linux_xfs_filesystem_introduction.html
- [11] OHAD RODEH, JOSEF BACIK and CHRIS MASON, "BTRFS: The Linux B-Tree Filesystem"
- [12] "SSD ADATA 128GB"
<http://www.adata.com/us/ssd/specification/171>
- [13] O. Rodeh, J. Bacik, C. Mason, "BTRFS: The Linux B-Tree Filesystem", Journal ACM Trans. on Storage (TOS), Vol. 9 Issue 3, August 2013.
- [14] C. Hellwig, "XFS for Linux", In Proceedings of Linux 2003 Conference and Tutorials, Edinburgh, Scotland, July, 2003.
- [15] M. Xie, L. Zefan, "Performance Improvement of BTRFS", LinuxCon Japan, 2011.
- [16] A. Mathur, M. Cao, S. Bhattacharya, A. Dilger, A. Tomas, L. Vivier, "The new EXT4 filesystem: current status and future plans," in Proceedings of the Linux Symposium, 2007, vol. 2, pp. 21–33

ABSTRACT

HDD is dominant type of secondary memory for a long years period. Recently, the development of permanent electronic memory has evolved to the point that semiconductor disks are increasingly been used as secondary memory. This paper analyzes the performance of thee file systems in Linux environment. The presented results were obtained by testing the performance ext4, xfs and btrfs file system under Linux CentOS operating system (kernel version 3.10.0) and using semiconductor technology for memory needs. The measurement of the FS performances is carried on by random (eng. Random) and sequential (eng. Sequential) benchmark tests. We have used Bonnie++ application to obtain the results.

Key words: SSD, ext4, xfs, btrfs, fajl sistemi, Linux, performanse

PERFORMANCE ANALYSIS EXT4, XFS AND BTRFS FILESYSTEMS ON THE SEMICONDUCTOR DISK (SSD)

Nikola Davidović, Slobodan Obradović, Borislav Đorđević,
Valentina Timčenko