

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Aleš Palčič

ANALIZA PROTOKOLOV TRILL IN SPB
GLEDE NA FUNKCIONALNOSTI
PROTOKOLA STP

DIPLOMSKO DELO
NA VISOKOŠOLSLEM STROKOVNEM ŠTUDIJU

Mentor:izr. prof. dr. Miha Mraz
Somentor: doc. dr. Iztok Lebar Bajec

Ljubljana, 2011



Št. naloge: 00102/2011

Datum: 04.04.2011

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **ALEŠ PALČIČ**

Naslov: **ANALIZA PROTOKOLOV TRILL IN SPB GLEDE NA
FUNKCIONALNOSTI PROTOKOLA STP**

**ANALYSIS OF THE TRILL AND SPB PROTOCOLS WITH RESPECT TO
THE FUNCTIONALITY OF THE STP PROTOCOL**

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija prve stopnje

Tematika naloge:

Kandidat naj v svojem delu analizira delovanje protokolov TRILL in SPB, ki se zadnjem času navajata kot alternativni rešitvi za pospešitev upravljanja topologije ethernet omrežij. Pri tem naj se kandidat usmeri predvsem na prednosti obeh protokolov, glede na obstoječi a že zastareli protokol STP.

Mentor:

prof. dr. Miha Mrz

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic

Somentor:

doc. dr. Iztok Lebar Bajec



IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani/-a Aleš Palčič,
z vpisno številko 63990290,

sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom:

ANALIZA PROTOKOLOV TRILL IN SPB GLEDE NA FUNKCIONALNOSTI PROTOKOLA STP

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)
izr. prof. dr. Miha Mraz
in somentorstvom (naziv, ime in priimek)
doc. dr. Iztok Lebar Bajec
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne 27.06.2011

Podpis avtorja/-ice:

Aleš Palčič

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Mihi Mrazu in somentorju, doc. dr. Iztoku Lebarju Bajcu, za pomoč in usmerjanje pri pisanju diplomske naloge. Seveda se zahvaljujem tudi sošolcem in prijateljem za pomoč in sodelovanje v času študija.

Posebna zahvala gre tudi staršem ter bratu, ki so me podpirali in verjeli vame skozi celoten študij in mi omogočili, da sem uspešno zaključil svojo študijsko pot.

Kazalo

Povzetek	v
Abstract	vii
1 Uvod.....	1
2 Omrežje Ethernet	3
2.1 Povezovalne naprave v omrežju.....	8
2.2 Naslavljanje v Ethernetu	11
2.3 VLAN (802.11Q)	12
3 Analiza treh Ethernet protokolov	15
3.1 Spanning Tree Protokol.....	15
3.1.1 Opis STP	17
3.1.2 Pomanjkljivosti IEEE 802.1D STP v današnjih omrežjih.....	22
3.2 TRILL in SPB	24
3.2.1 Ozadje in osnove TRILL-a.....	24
3.2.2 Ozadje in osnove SPB-ja.....	26
3.2.3 Primerjava tehnologij in nasprotja	28
3.2.4 TRILL in SPB primerjava Iskanja/Posredovanja	32
4 Zaključek.....	37
5 Literatura in viri	39

Kratice

ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>	čip, namenjen za določeno uporabo
BPDU	<i>Bridge Protocol Data Unit</i>	podatkovni paketek premoščevalnega protokola
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection</i>	pristopna metoda za ravnanje kontrole pristopa
DIX	<i>DEC, Intel, Xerox</i>	poimenovanje ethernet okvirja
ESADI	<i>End Station Address Distribution Information protocol</i>	protokol za porazdelitev informacije naslova končne postaje
ID	<i>Identifier</i>	enolično določena oznaka, ki jo je mogoče uporabiti za označevanje česa
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	Inštitut inženirjev elektrotehnike in elektronike
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>	mednarodno standardizacijsko telo v internetnem združenju ISOC
IS-IS	<i>Intermediate System to Intermediate System</i>	usmerjevalni protokol za učinkovito premikanje podatkov v računalniškem omrežju
LAN	<i>Local Area Network</i>	krajevno omrežje, ki povezuje med seboj naprave znotraj interesnega področja, npr. dom, pisarno, itd.
MAC	<i>Media Access Control</i>	krmiljenje dostopa do medija
MSTP	<i>Multiple Spanning Tree Protocol</i>	protokol večkratnega vpetega drevesa
OA&M	<i>Operations, Administration, and Management</i>	splošni izraz za opis procesov, aktivnosti, orodij, standardov, itd.
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>	referenčni model za razvoj in oblikovanje komunikacijskih protokolov in protokolov računalniških omrežij
PBB	<i>Provider Backbone Bridging</i>	skupek arhitekture in protokolov za usmerjevalnik
PVST	<i>Per-VLAN Spanning Tree</i>	vpeto drevo za vsak VLAN
QoS	<i>Quality of Service</i>	kakovost storitve

<i>RFC</i>	<i>Request for Comments</i>	zahteva za mnenja
<i>ROI</i>	<i>Return on Investment</i>	donosnost naložbe
<i>RPFC</i>	<i>Reverse Path Forwarding Check</i>	preverjanje posredovanja povratne poti
<i>RSTP</i>	<i>Rapid Spanning Tree Protocol</i>	protokol hitrega vpetega drevesa
<i>SPB</i>	<i>Shortest Path Bridging</i>	najkrajša pot premoščanja
<i>STP</i>	<i>Spanning Tree Protocol</i>	protokol vpetega drevesa
<i>TRILL</i>	<i>Transparent Interconnect of Lots of Links</i>	transparentna medsebojna povezanost večih povezav
<i>TTL</i>	<i>Time-To-Live</i>	življenjska doba
<i>VLAN</i>	<i>Virtual Local Area Network</i>	virtualno krajevno omrežje
<i>WAN</i>	<i>Wide Area Network</i>	prostrano omrežje

Povzetek

V diplomskem delu smo analizirali protokole na drugi plasti Ethernet omrežja. Ti protokoli so Spanning Tree Protocol (STP), Transparent Interconnection of Lots of Links (TRILL) in Shortest Path Bridging (SPB) protokol. STP je najbolj razširjen protokol v današnji rabi, preostala dva protokola pa sta novejša in alternativni rešitvi za nadomestitev trenutnega STP. Protokoli so bili razviti pod okriljem organizacij IEEE (SPB, STP) in IETF (TRILL). Namen teh protokolov je zagotoviti optimalno delovanje Ethernet omrežij.

Naloga obsega predstavitev in analiziranje funkcionalnosti delovanja različnih Ethernet protokolov na drugi plasti referenčnega modela ISO/OSI. Zajema primerjavo dveh najbolj obetajočih protokolov, ki bi lahko nadomestila prvotnega. Analiza njunih prednosti glede na potrebe v današnjih omrežjih pripelje do ugotovitev, da sta si po funkcionalnosti zelo podobna, vendar je SPB glede na splošno lažjo implementacijo, lažje vzdrževanje in z dodatno možnostjo razširitev funkcionalnosti, veliko bolj ugoden za nadomestitev Spanning Tree Protokola kot pa TRILL.

Ključne besede: Ethernet, STP, SBP, TRILL, topologije

Abstract

In the thesis we used protocols on Ethernet network's second layer. These protocols are Protocol Spanning Tree (STP), Transparent Interconnection of Lots of Links (TRILL) and Shortest Path Bridging (SPB) protocol. STP is the most widely used protocol in use today, while the remaining two protocols are newer and an alternative solution to replace the current STP. The protocols have been developed under the auspices of the IEEE (STP) and IETF (TRILL). The purpose of these protocols is to ensure optimal performance of Ethernet networks.

The assignment comprises of the presentation and functionality analysis of different Ethernet protocols in the second layer of the reference model ISO/OSI. It covers a comparison of the two most promising protocols, which could replace the primary one. The analysis of their benefits to the needs of today's networks leads to the conclusion that they are very similar as for their functionality, but regarding that SPD is generally easier installed, easier maintained and has the possibility of further functionality extensions, it is much more advantageous to replace the Spanning Tree Protocol than TRILL.

Keywords: Ethernet, STP, SBP, TRILL, topology

1 Uvod

V današnjem času se vedno bolj povečuje povpraševanje po veliki pasovni širini (angl. *bandwidth*) v podatkovnih centrih. Večjedrni procesorji in strežniške rezine (angl. *blade servers*) znatno povečajo računsko gostoto in s tem ustvarjajo ustrezno povpraševanje po pasovni širini. Omrežno shranjevanje povečuje povpraševanje po pasovni širini. Virtualizacija in konsolidacija strežnikov zagotavljata, da so strežniki v celoti izkoriščeni, s čimer se povečuje povpraševanje po pasovni širini. Mobilnost virtualnih naprav (npr. Citrix XenMotion, VMWare vMotion ali Xen Live Migration) zahteva veliko omrežje na drugi plasti referenčnega modela ISO/OSI, da se lahko naprave premika brez ponovnega nastavljanja njihovih omrežnih nastavitev. Povečanje tega omrežja skupaj s povečanjem povpraševanja po večji pasovni širini izzove razširljivost trenutnih Ethernet preklopnih tehnologij.

Trenutno Ethernet uporablja Spanning Tree Protocol. Spanning Tree Protokol je omrežni protokol podatkovno-povezovalne plasti OSI, ki zagotavlja topologijo povezav brez zank za vsak premoščevalni LAN. Tako je osnovna funkcija protokola preprečiti zanke, nastale zaradi redundantnih povezav med mosti ali stikali in posledično probleme, ki z zankami nastanejo. Kot pove že ime samo, je bil Spanning Tree Protokol zasnovan kot vpeto drevo znotraj zankastega omrežja (tipično Ethernet stikalo) za onemogočitev tistih povezav, ki niso del vpetega drevesa. Aktivna je samo po ena povezava med dvema omrežnima vozliščema. Vpeto drevo omogoča oblikovanje omrežja z vključitvijo redundantnih povezav, ki zagotovijo nadomestne poti, če aktivna povezava odpove brez nevarnosti povratnih zank ali potrebe za ročno omogočanje/onemogočanje redundantnih povezav.

V današnjih naprednih podatkovnih centrih je postal Spanning Tree Protokol rahlo zavirajoč. Problem se pojavi zaradi dolge čakalne dobe usklajevanja omrežij poljubne fizične topologije pred postavitvijo vrat (angl. *port*) v stanje posredovanja, omejitev VLAN-ov na eno logično topologijo in s tem zmanjšanje stopnje izolacije ter potrate pasovne širine v času oddajanja paketkov. Drevesna struktura tudi sili promet k omrežnemu jedru in s tem ustvarja ozko grlo. Zaradi tega sta dve različni združenji – IETF in IEEE razvili dva zelo podobna nova standarda, ki naj bi omogočila pospešitve pretoka podatkov in s tem nadomestila stari protokol. Ta dva standarda posredovanja najkrajše poti sta IEEE 802.1aq ali Shortest Path Bridging in Transparent Interconnect of Lots of Links ali TRILL. Oba alternativna standarda uporabljata posredovalno tehniko, ki izbira najkrajše poti skozi omrežje. To omogoča obvod jedra in zmanjševanje ozkega grla. Dodatna korist njune tehnike pa je sposobnost uporabe

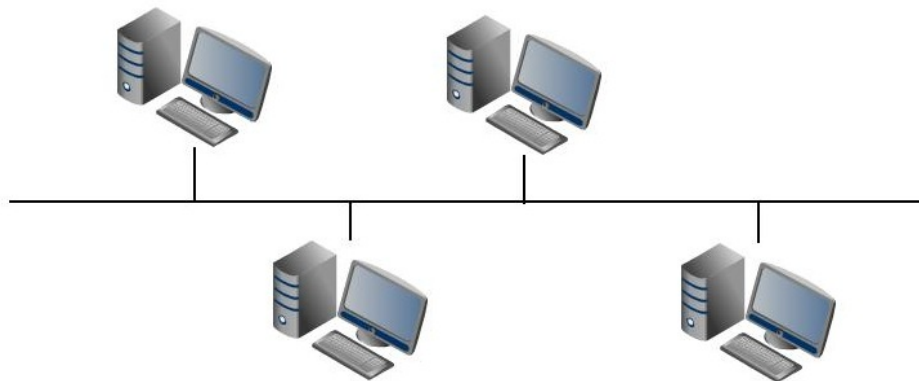
vseh povezav, vključno z nadomestnimi povezavami in s tem nadaljnje povečanje zmogljivosti omrežja.

V diplomskem delu so predstavljeni Ethernet omrežje, omrežne topologije, vsi trije protokoli ter primerjava in analiza obeh novih protokolov. Z analizo funkcionalnosti smo želeli prikazati, kateri protokol bi bil bolj primeren za alternativno rešitev današnjih naprednih omrežij.

2 Omrežje Ethernet

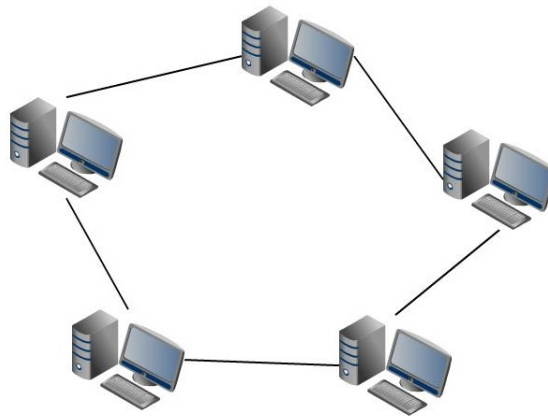
Topologije omrežja, se nanašajo na postavitve omrežja, na to kako so različna vozlišča v omrežju med seboj povezana in kako komunicirajo. Topologije so fizične in logične. Obstajajo štiri glavne topologije povezovanja naprav [1]:

- **Topologija vodila** (angl. *bus topology*): Vse naprave so priključene na centralni kabel (slika 1), ki se imenuje vodilo (angl. *bus*) ali hrbtenica (angl. *backbone*). Omrežja, ki uporabljajo topologijo vodila, so relativno poceni in enostavna za namestitev majhnih omrežij.



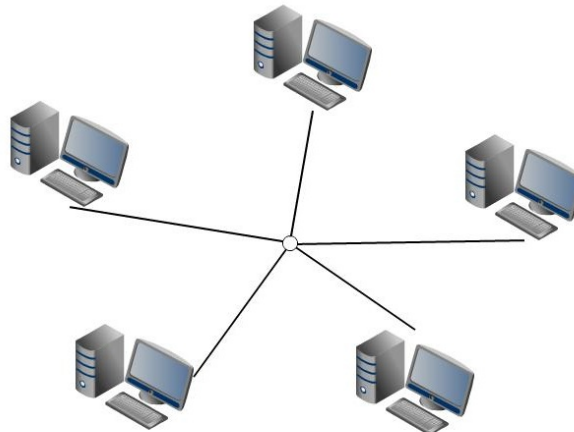
Slika 1: Topologija vodila.

- **Topologija obroča** (angl. *ring topology*): Vse naprave so povezane med seboj v obliki zaprte zanke (slika 2), tako da je vsaka naprava priključena neposredno na dve drugi napravi (na vsaki strani ima po eno). Topologije obroča so relativno drage in težko se namestijo, vendar pa ponujajo veliko pasovno širino ter omogočajo premostitev velikih razdalj.



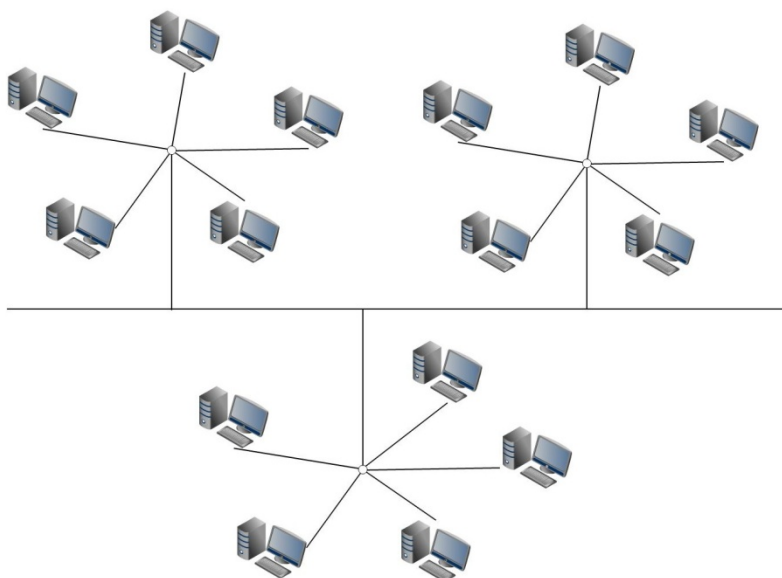
Slika 2: Topologija obroča.

- **Zvezdna topologija** (angl. *star topology*): Vse naprave so priključene na centralno vozlišče (slika 3). Zvezdna omrežja so enostavna za namestitev in so preprosta za upravljanje, vendar se lahko pojavijo ozka grla, ker morajo vsi podatki skozi centralno vozlišče.



Slika 3: Zvezdna topologija.

- **Drevesna topologija** (angl. *tree topology*): Drevesna topologija združuje lastnosti linearnega vodila in zvezdnih topologij (slika 4). Sestavljena je iz skupin zvezdno postavljenih postaj (angl. *workstations*) povezanih na linearno hrbtenično vodilo.



Slika 4: Drevesna topologija.

Vse te topologije so lahko tudi pomešane skupaj v celoto kot npr. drevesna topologija [2].

Topologijo vodila ali pa zvezdno topologijo uporablja nam znani Ethernet. Ethernet je najpopularnejši protokol lokalnih omrežij (angl. *local-area network* – LAN), ki ga je leta 1976 razvil Xerox Corporation s sodelovanjem z Intel-om in DEC-om. Ta industrijski standard so prevzeli mnogi proizvajalci omrežne strojne opreme. Začetni Ethernet je podpiral prenosno hitrost do 10Mbps. Prenosni medij je običajno koaksialni kabel. Novejša verzija Etherneta se imenuje 100Base-T oz. hitri Ethernet (angl. *Fast Ethernet*), ki podpira prenosno hitrost do 100Mbps. Prenosni medij je običajno parica. Še novejša verzija se imenuje Gigabit Ethernet in podpira prenosno hitrost do 1Gbps [3].

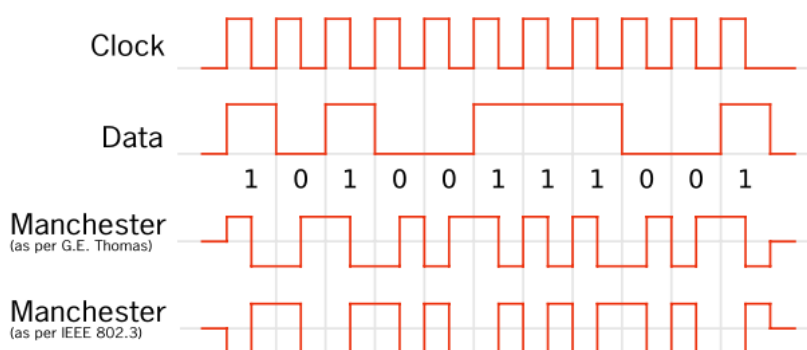
Specifikacija Etherneta služi kot osnova za standard IEEE 802.3, ki opredeljuje fizično (angl. *physical layer*) in nižjo aplikacijsko plast (angl. *lower software layer*). Obe plasti sta del referenčnega modela OSI (angl. *Open System Interconnection*). ISO/OSI model je sestavljen iz sedmih plasti (tabela 1), načrtovan kot zgled za implementacijo komunikacijskih modelov (de iure standard) in za preprečevanje vendor lock-in, ki je bil pogost v telefonskih omrežjih [4].

Tabela 1: ISO/OSI plasti.

ISO/OSI plasti	
Aplikacijska plast	zagotavlja storitve aplikacijskim procesom (http request)
Predstavitvena plast	skrbi za uskladitev različnih načinov predstavitve podatkov (protokol za kriptiranje, stiskanje podatkov)
Sejna plast	skrbi za komunikacijo med uporabniki in procesi (protokol poskrbi za sejo)
Transportna plast	odgovoren za zanesljivo komunikacijo med končnima sistemoma v omrežju (nadzor protokola, multipleksiranje, ipd.)
Omrežna plast	zagotavlja povezljivost in izbiro poti v omrežju (skrb za usmerjanje in posredovanje paketov)
Podatkovno povezovalna plast	zagotavlja zanesljiv prenos podatkov po fizični povezavi (prenos okvira od naprave do naprave; tudi odkrivanje napak, npr. CRC)
Fizična plast	opredeljuje električne, mehanske, procedurne in funkcijske značilnosti fizične povezave med sistemi (prenos signala)

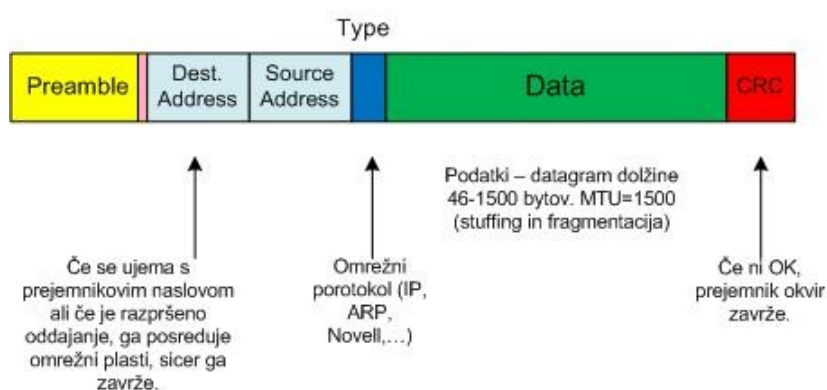
Ena ključnih lastnosti omrežja, ki so ga ustvarili, je bila uporaba pristopne metode CSMA/CD (angl. *Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection*). To je pristopna metoda za nadzor kontrole pristopa. Je množica protokolov, ki pri uporabi deljenega prenosnega medija definira uporabo (pošiljanje, sprejemanje) podatkov [5].

Ethernet med drugim uporablja tudi Manchester kodiranje. To je tehnika prenosa bitov, ki omogoča sprejemniku enostavno sinhronizacijo s pošiljateljem. Manchester kodiranje razdeli vsako periodo bita na dva dela in zagotavlja, da vedno obstaja prehod med stopnjami signala v sredini vsakega bita. V Manchester kodiranju se »1« prenaša kot 0 v prvi polovici ure in kot 1 v drugi polovici ure. »0« pa se prenaša kot 1 v prvi polovici ure in kot 0 v drugi polovici ure (slika 5) [6].



Slika 5: Manchester kodiranje [7].

Ena izmed poglavitnih nalog protokola Ethernet je pridobivanje podatkov iz omrežja v paketu in priprava le-tega za prenos po celotnem omrežju. Podatkovni paketek na Ethernet povezavi se imenuje Ethernet okvir. Sestavljen je iz glave, noge in podatkov, ki so še dodatno razdeljeni na polja, ki vsebujejo informacije za prenos podatka do njegovega cilja. Format okvirja Ethernet je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Ethernet okvir.

Okvir Ethernet je sestavljen iz naslednjih delov [8]:

- **Preambula** (7 bajtov): To polje vsebuje 7 bajtov ničel in enic, ki jih komunikacijski sistem uporablja za sinhroniziranje ure sistema, ki prejema podatke. Ta sistem mora uskladiti svojo uro z uro oddajnega sistema.
- **Začetek okvirjevega delimetra** (1 bajt): To polje vsebuje 6 bitov ničel in enic, katerim sledita dve enici, ki sta signal prejemniku za začetek prenosa okvirja.

- **Ciljni naslov** (6 bajtov): To polje vsebuje 6–bajtni naslov omrežnega vmesnika v lokalnem omrežju, kateremu je paket namenjen.
- **Naslov izvora** (6 bajtov): To polje vsebuje 6–bajtni naslov omrežnega vmesnika, ki je generiral paket.
- **Tip etherneteta/dolžina** (2 bajta): V okvirju DIX ethernet, to polje vsebuje kodo identifikacije protokola omrežnega sloja, kateremu je podatek v paketu namenjen. V IEEE 802.3 okvirju to polje določa dolžino podatkovnega polja (razen zapolnitve).
- **Podatki in zapolnitev** (od 46 do 1.500 bajtov): To polje vsebuje podatke omrežnega protokola izvirnega sistema, ki bodo poslani na isti protokol končnemu sistemu. Ethernet okvirji (tudi glava in noga, razen preambule in začetnega delimetra okvirja) morajo biti dolgi najmanj 46 bajtov. V primeru, da je poslani podatek krajši od 46 bajtov, mu sistem doda zapolnjevalne bajte (angl. *pad*). Tako paket dobi minimalno zahtevano dolžino.
- **Pregledovanje okvirja** (4 bajte): Rep okvirja je samostojno polje za pregled nedotaknjenosti paketa (angl. *frame check sequence*), ki vsebuje 4–bajtno pregledovalno vrednost za celoten paket. Pošiljatelj naredi to vrednost in jo vstavi v okvir. To naredi tudi prejemnik in s primerjanjem obeh vrednosti lahko ugotovi, ali je paket prišel nepoškodovan.

2.1 Povezovalne naprave v omrežju

Povezovalne omrežne naprave, znane tudi kot komunikacijske naprave, so enote za posredovanje podatkov v računalniškem omrežju. Te naprave so razdelilniki, stikala, usmerjevalniki, LAN kartice, modemi itd. So osnovne naprave omrežij. Brez teh naprav v Ethernet ali WAN omrežju ni možno izvesti posredovanja podatkov. Pogledali si bomo štiri med bolj pomembnimi pri tvorbi Ethernet omrežij.

Razdelilnik (angl. *Hub*)

Razdelilnik je omrežna naprava, ki deluje na prvi plasti OSI modela. Ne bere podatkov, ki potujejo skozenj in se ne zaveda njihovih virov ali ciljev. Drugače rečeno, razdelilnik sprejema dohodne pakete, po možnosti ojača električni signal in nato oddaja te pakete na vse naprave v omrežju – vključno s tisto, ki je paketek prvotno poslala [9].

Stikalo (angl. *Switch*)

Stikalo je naprednejše od razdelilnika in deluje na povezovalni plasti. V primerjavi z navadnimi razdelilniki ima dve pomembni prednosti: naprava, priklopljena na stikalo, lahko hkrati pošilja in prejema podatke. Ob tem stikalo poskrbi, da je podatek, ki ga ena naprava pošilja, poslan samo tisti napravi v omrežju, ki ji je podatek namenjen. Povezave do drugih naprav so proste in po njih se lahko prenašajo drugi podatki. Zaradi omenjenih lastnosti so stikala precej primernejša za povezovanje omrežnih naprav, razlike pa so še posebej opazne, ko presežemo okvire povprečnega domačega omrežja in je število naprav v omrežju večje. Vsaka posamezna naprava lahko s takim načinom priklopa izkoristi celotno pasovno širino, ki ji je na voljo, medtem ko si pri priklopu z razdelilnikom vse naprave v omrežju delijo pasovno širino [9].

Usmerjevalnik (angl. *Router*)

Usmerjevalnik je naprava, ki povezuje dve ali več omrežij. Njegova glavna funkcija je prenašanje podatkov med različnimi omrežji.

Cilj in izvor podatkov sta ena izmed ključnih podatkov za uspešno komunikacijo dveh naprav. Naprave v omrežju danes po večini uporabljajo enega izmed dveh načinov naslavljanja:

- **IPv4** in/ali
- **IPv6**.

Naslovi so definirani na tretji plasti referenčnega modela ISO/OSI. Usmerjevalnik je zato naprava, ki deluje na tretjem (omrežnem) sloju omenjenega modela [9].

Usmerjevalniki se lahko odločajo (glede na zmogljivosti in nastavitve) na dva načina, kako bodo izbrali pot od izvora do cilja:

- **statično naslavljanje** – upravitelj omrežja vnaprej določi vse poti, kje se bo prenašal promet,
- **dinamično naslavljanje** - usmerjevalniki si med seboj izmenjujejo določene podatke, na podlagi katerih se odločijo, katera je najboljša pot za pošiljanje posameznega podatka.

Tabela 2 : Primerjava povezovalnih naprav.

	Razdelilnik	Stikalo	Usmerjevalnik
Izolacija prometa	NE	DA	DA
Potrebna konfiguracija?	NE	DA	DA
Optimalno usmerjanje	NE	NE	DA
Možno oddajanje, ko protokolarna podatkovna enota (PPE) še prejema	DA	DA	NE

Tabela 2 predstavlja funkcionalno primerjavo razdelilnika, stikala ter usmerjevalnika.

Ponavljalnik (angl. *Repeater*)

Ponavljalnik je telekomunikacijska naprava, katere naloga je ojačanje in regeneriranje bitnih signalov, ki slabijo vzdolž prenosnega medija. Tako ponavljalnik vzdržuje popolnost signalov ali pa pretvorbo signala na prehodu, na primer med bakrenim in optičnim prenosnim medijem. Z njegovo pomočjo lahko premostimo večje zemljepisne razdalje.

Deluje kot skupna točka ožičenja in v njo prihajajo podatki iz več smeri, iz nje pa se pošiljajo podatki v vse ostale smeri.

Deluje na fizični plasti ISO OSI modela, zaradi česar ne pregleduje podatkovnih paketov, ki jih prejema, niti ni seznanjen z naslavljanjem paketov. Rezultat tega je, da ne upočasnjuje toka podatkov. Z večanjem števila uporabnikov na preklopniku se povečuje tudi število trkov, ker ponavljalnik ne pregleduje prometa na ostalih segmentih.

Most (angl. *Bridge*)

Most oziroma premoščevalnik medsebojno povezuje omrežja. Če je lokalno omrežje povezano z mostom, le tega zapustijo podatki, ki so namenjeni za drugo lokalno omrežje. Je novejšega izvora kot ponavljalnik in zahtevnejša naprava, saj podatke (pakete) ne le ojača in pošlje na ustrezen vmesnik, temveč jih najprej shrani v medpomnilnik. Te podatke preveri in če ni napak, jih pošlje naprej na ustrezen vmesnik (enega ali več premoščevalnikov), odvisno od ciljnega naslova. Premnoščevalniki so počasnejši od ponavljalnikov in delujejo na drugi plasti modela OSI [10].

Lastnosti:

- število naprav v omrežju ni omejeno,
- lahko delno povečamo prepustnost omrežja,
- omogočajo povezavo različnih LAN omrežij med seboj (Ethernet, Token Ring).

Podobno kot stikalo most sprejme vse pakete iz vseh segmentov, na katerih se nahaja s svojimi vmesniki. Za vsak svoj vmesnik ima vpisane MAC naslove postaj, ki se nahajajo na istem segmentu kot pripadajoči vmesnik. Most pregleda vsak paket. Odloča se po naslednjih kriterijih:

- Če se ponorni naslov ne ujema s ponornimi naslovi v tabeli vmesnika, ki je paket sprejel, pogleda v tabelo ostalih vmesnikov in:
 - pošlje paket na tisti vmesnik, katerega naslov se nahaja v tabeli,
 - pošlje paket na vse vmesnike, če ponornega naslova ni v nobeni izmed tabel vmesnikov.
- Če prepozna, da je ponorni naslov vpisan v tabeli vmesnika, ki je sprejel ta paket pomeni, da se naslovljena postaja nahaja na istem segmentu, zato paket zavrže.

Med seboj jih ločimo po segmentni povezljivosti:

- **lokalni** premoščevalniki (angl. *local bridge*), ki med seboj povezujejo segmente lokalnega omrežja,
- **oddaljeni** premoščevalniki (angl. *remote bridge*), ki med seboj povezujejo oddaljena lokalna omrežja.

Ti premoščevalniki so počasni, zato jih zamenjujejo preklopna stikala in usmerjevalniki.

2.2 Naslavljanje v Ethernetu

Vsaka omrežna naprava ima poleg programske oznake, s katero se loči od drugih naprav v omrežju (pri omrežjih TCP/IP je to IP številka), še dodatno oznako, imenovano naslov MAC (angl. *Media Access Control*), ki je vpisana v strojno opremo omrežne naprave. MAC naslov je za vsako napravo unikatna.

Dolžina MAC naslova je 6 bajtov. Prve 3 bajte naslova, imenovane organizacijski enolični identifikator ali OUI (angl. *Organizationally Unique Identifier*), IEEE dodeli organizaciji.

Preostali 3 bajti, imenovani individualen naslovni blok ali IAB (angl. *Individual Address Block*), pa so neke vrste serijska številka, ki jo določi organizacija oziroma proizvajalec omrežne kartice. Oba dela MAC naslova lahko za neko omrežno kartico preverimo na spletni strani IEEE Standards Association.

Za dodeljevanje MAC naslovov obstajajo trije različni standardi: MAC-48, EUI-48 in EUI-64. Kratica EUI (angl. *Extended Unique Identifier*) v primeru EUI-48 in EUI-64 pomeni razširjeni edinstveni identifikator. Razlika med MAC-48 in EUI-48 identifikatorji je zgolj semantična. MAC-48 se uporablja za strojno omrežno opremo, EUI-48 pa se uporablja za identifikacijo drugih naprav in programske opreme. Po definiciji EUI-48 ni čisto pravi MAC naslov, kljub temu, da je po sintaksi enak pravemu MAC naslovu in uporablja isto vrsto številčenja. Vsi sistemi številčenja uporabljajo isti format in se med seboj razlikujejo le v dolžini identifikatorja. Format identifikatorja MAC-48 uporabljajo tehnologije Ethernet, brezžična omrežja (standard IEEE 802.11), Bluetooth, Žetonski obroč ali Token Ring (standard IEEE 802.5), večina drugih omrežij, ki spadajo pod IEEE standard 802, FDDI (ang. *Fiber Distributed Data Interface*), ATM in še nekatere druge. Format identifikatorja EUI-64 pa uporabljajo tehnologije FireWire, IPv6 in ZigBee/6LoWPAN (standard IEEE 802.15.4) brezžična omrežja.

Posebne vrste naslovov:

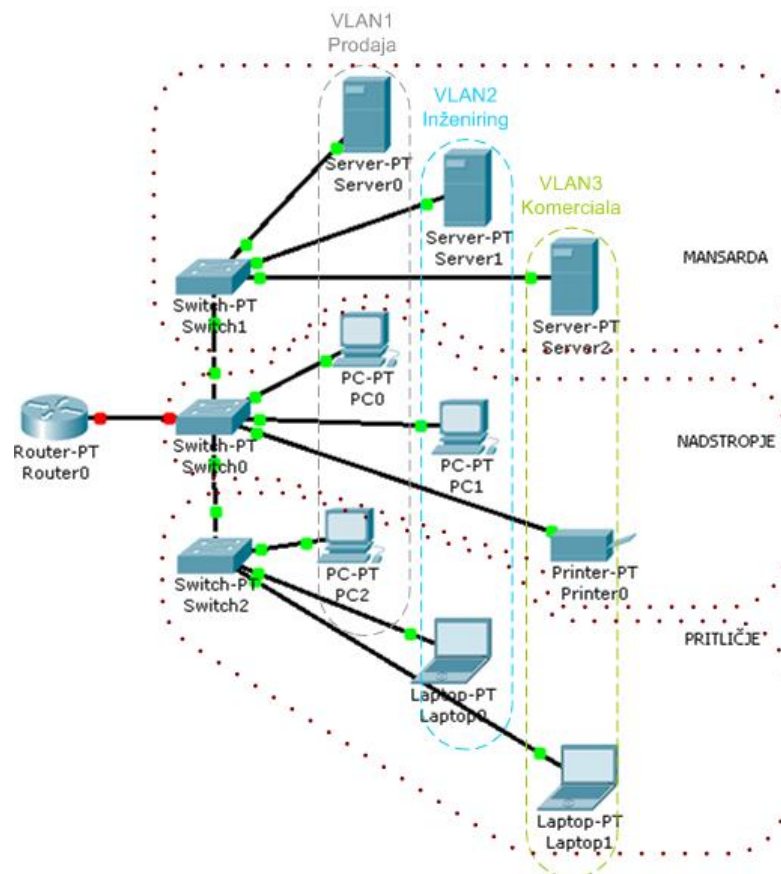
- FF-FF-FF-FF-FF-FF, kar pomeni, da so prejemniki sporočila vse naprave v istem omrežju (angl. *broadcast*),
- Multicast - poseben naslov, ki ga sprejemajo le določene naprave, prijavljene v multicast skupino.

2.3 VLAN (802.11Q)

Pomembna lastnost komutacije (preklapljanja okvirov) v Ethernet omrežjih je možnost tvorjenja navideznih krajevnih omrežij (angl. *Virtual Local Area Network* - VLAN). Ta omrežja najpogosteje tvorimo na stikalih, lahko pa tudi v brezžičnih omrežjih. Z navideznim lokalnim omrežjem ustvarimo logično skupino odjemalcev. V začetku uporabe omrežnih stikal smo lahko z njimi ločili uporabnike glede na njihovo fizično lokacijo. Z uporabo VLAN-a in označevanjem okvirov (angl. *frame tagging*) pa jih lahko ločimo ne glede na njihovo fizično lokacijo.

Omrežni promet med VLAN-i je privzeto onemogočen. Uporabnike na tak način ločimo po skupinah (slika 7). Stikala in omrežni mosti posredujejo dohodni omrežni promet enemu

prejemniku (angl. *unicast*), več prejemnikom (angl. *multicast*) oz. vsem prejemnikom (angl. *broadcast*) samo v tiste segmente VLAN-a, ki pripadajo določenemu VLAN-u. Brez posredovanja ustrezne omrežne naprave oz. namenskega usmerjevalnega modula v omrežnem stikalu (večslojna stikala) medsebojna komunikacija med napravami, ki niso v istem VLAN-u, ni mogoča.



Slika 7: Primer združevanja odjemalcev glede na pripadnost k oddelku [8].

VLAN-i povečajo zmogljivost (propustnost) omrežja z logičnim združevanjem uporabnikov in virov. S pomočjo programske opreme oz. operacijskega sistema razvrstimo odjemalce, priključene na stikalo, v logično ločene skupine - VLAN-e.

3 Analiza treh Ethernet protokolov

Analizirali smo funkcionalnosti delovanja treh različnih Ethernet protokolov na drugi plasti referenčnega modela ISO/OSI. Ti protokoli so Spanning Tree Protokol, Shortest Path Bridging in Transparent Interconnect of Lots of Links. Analiza zajema primerjavo dveh najbolj obetajočih protokolov, ki bi lahko nadomestila prvotnega.

3.1 Spanning Tree Protokol

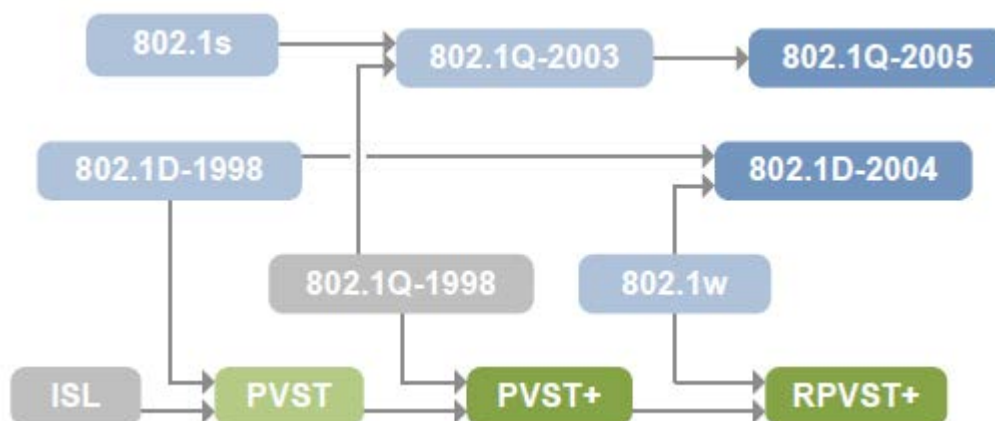
Pri načrtovanju omrežja lahko redundantne povezave zagotavljajo določeno stopnjo tolerance napak. Če ena povezava pade, je dobro vedeti, da imaš nadomestno povezavo, ki bo poskrbela za promet. Na žalost pa te iste redundantne povezave na trenutke povzročajo težave v omrežju. V primeru, da obstajata dve poti druge plasti (angl. *Layer 2*) od vira do cilja, bo vedno obstajala možnost za zanko. Kadar v premostitvenem ali preklopnem LAN okolju obstaja več poti, nastopi premostitvena zanka, ki povzroči, da paketki neprekinjeno krožijo po omrežju. To lahko povzroči veliko porabo pasovne širine in nezanesljivost omrežnih povezav.

V prizadevanjih za rešitev tega problema je Radia Perlman, zaposlen v Digital Equipment Corporation (DEC), leta 1985 iznašel prvi Spanning Tree Protocol (STP).

Leta 1990 je DEC-ova lastniška različica STP postala osnova za standard IEEE 802.1D. Obe različici protokola sta bili dovolj različni, da nista bili združljivi. Različici se razlikujeta predvsem po formatu sporočila in po nastavitvah merilnika časa.

Z razvojem Etherneta v polna hkratno komutirana omrežja (angl. *full duplex switched networks*), povezana s stikali tretje plasti (angl. *Layer 3*), je bilo potrebno 802.1D izboljšati, da je lahko sledil tempu zahtev sodobnega Ethernet omrežja. Primarne izboljšave so standard IEEE 802.1w Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) in IEEE 802.1s Multiple Spanning Tree Protocol (MSTP). Ta dva protokola sta grajena na temeljih protokola 802.1D in omogočata povratno združljivost s tem protokolom. Celoten razvoj protokola STP se lahko vidi na sliki 8.

Poleg teh dveh odprtih protokolov so bili vzporedno razviti še trije protokoli pod lastništvom Cisco. Primerjava STP protokolov je prikazana v tabeli 3.



Slika 8: Spanning tree razvojni načrt [11].

Odprti standardi IEEE [12]:

- 802.1D-1998 – odsvetovan podedovani STP standard,
- 802.1w – predstavljen RSTP,
- 802.1D-2004 – zamenjan podedovani STP z RSTP,
- 802.1s – predstavljen MST,
- 802.1Q-2003 – dodan MST v 802.1Q,
- 802.1Q-2005 – najnovejša 802.1Q različica.

Cisco lastniška izvedba:

- PVST – na VLAN izvedba podedovanega STP,
- PVST+ – dodana 802.1Q povezljivost v PVST,
- RPVST+ – na VLAN izvedba RSTP.

Tabela 3: Spanning Tree Protokoli.

Spanning Tree Protokoli						
	Podedovani STP	PVST	PVST+	RSTP	RPVST+	MST
Algoritem	Podedovani STP	Podedovani STP	Podedovani STP	Hitri STP	Hitri STP	Hitri STP
Definicija	802.1D	Cisco	Cisco	802.1w, 802.1D-2004	Cisco	802.1s, 802.1Q-2003
Primerki	1	Na VLAN	Na VLAN	1	Na VLAN	nastavljev
Trunking	N/A	ISL	802.1Q, ISL	N/A	802.1Q, ISL	802.1Q, ISL

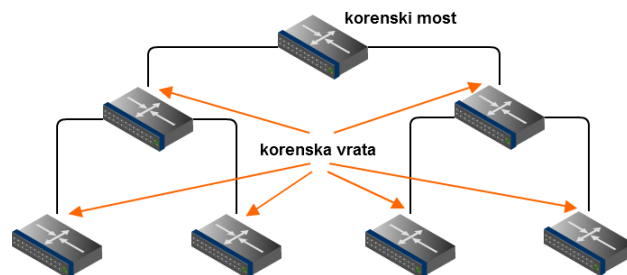
Namen STP je prepoznati in izklopiti redundančne poti druge plasti. S tem problem ni nujno rešen. Čeprav ta protokol nekateri proizvajalci stikalnih naprav implementirajo kot privzetega, imajo vsak svoje različice. In glede na to se težave še pojavljajo. Kaj se zgodi, če STP ne deluje? Vsakič, ko pride do spremembe v topologiji, mora STP zblížati ali preračunati drevo. Čas, ki je potreben za dokončanje tega procesa, je odvisen od velikosti omrežja. V tem času se ne posredujejo okvirji (angl. *frames*). Zaradi tega prihaja do zastoja v omrežju. V primeru, da problem ni odpravljen, lahko omrežje pade v stalen kaskadni proces, kjer STP preračunava znova in znova.

Tu nastopita kot rešitev dva novejša standarda; TRILL (angl. *Transparent Interconnection of Lots of Links*) in 802.1aq (angl. *Shortest Path Bridging – SPB*). Oba sta si zelo podobna, vendar prihajata iz dveh različnih regulacijskih združenj – IETF (angl. *Internet Engineering Task Force*) in IEEE (angl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Oba standarda poskušata nadomestiti STP, ki je pričel zavirati današnja napredna omrežja in s tem razširiti Layer 2 Ethernet domeno ter zagotoviti večkanalnost (angl. *multipathing*) in fleksibilne zmogljivosti, ki niso možne s STP.

3.1.1 Opis STP

IEEE 802.1D Spanning Tree Protocol (STP) odpravlja zanke v logični topologiji tako, da omogoči samo eno aktivno pot med dvema mestoma na Layer 2 omrežju. To se izvede s postavitvijo vseh redundančnih poti v pripravljeno stanje - ne posreduje paketkov (tj. blokirano). V primeru, da most ali povezava v aktivni poti pade, STP zagotavlja mehanizem za samodejno nadomestni način (angl. *auto fail-over*) delovanja na eni od redundančnih poti in s tem okrepi toleranco pri okvarah omrežja. Skupne koristi vstavi in poženi (angl. *plug and play*) delovanja in tolerance pri okvarah naredijo STP kot osnovno potrebo za vsako omrežno napravo, ki podpira Layer 2 preklapljanje / premostitve.

STP odpravlja zanke z nadzorom stanja omrežnih povezav v skladu s Spanning Tree Algoritmom (STA). STA je porazdeljen algoritem, osnovan na izmenjavi kontrolnih sporočil med premostitvenimi vmesniki ali vrati stikal z uporabo posebnih Ethernet paketkov poimenovanih Bridge Protocol Data Unit (BPDU). Na podlagi informacij v BPDU, mostovi izberejo korenski most (angl. *Root Bridge*). Most z najvišjo prioriteto oznako (Bridge ID) je izbran za koren in nato vsak most v strnjenem Layer 2 omrežju samostojno izračuna vpeto drevo, ki izhaja iz korena. Vpeto drevo določa logično topologijo omrežja, ki je breznančna in zagotavlja popolno medsebojno povezljivost mostov, kot je prikazano na sliki 9.



Slika 9: Topologija vpetega drevesa.

Za izračun vpetega drevesa vsak most ali stikalo v omrežju določa, kateri izmed njegovih vmesnikov ima najnižjo stroškovno pot do korenskega mostu. S tem označi ta vmesnik kot svoja korenska vrata. Most ali stikalo imata lahko istočasno aktivna samo ena korenska vrata. Strošek korenske poti do korenskega mostu se izračuna kot seštevek stroškov poti vseh korenskih vrat na stroškovno gledano najcenejši poti. Višine stroškov so po navadi določene v odvisnosti od pasovne širine vrat (tabela 4).

Tabela 4: Stroški poti.

<i>Stroški poti</i>							
Pasovna širina	4Mbps	10 Mbps	16 Mbps	100 Mbps	1 Gbps	2 Gbps	10 Gbps
Strošek	250	100	62	19	4	3	2

Vsak posamezni LAN ima povezavo na vrata mosta, da posreduje paketke iz LAN-a v koren in obratno. Za ta LAN so ta vrata znana kot *izbrana* vrata (angl. *Designated Port*), most pa kot *izbrani* most (angl. *Designated Bridge*). Ta vrata so izbrana kot tista, ki imajo najnižje stroške poti do korena v tem segmentu.

Če aktivna vrata niso niti korenska vrata niti *izbrana* vrata, potem so ta vrata postavljena v blokirano stanje. To pomeni, da ne posredujejo prometa in da je vpeto drevo zaključeno.

V primeru odpovedi povezave ali vmesnika se proces preračunavanja vpetega drevesa začne na novo. Usklajevanje se pojavi po nekem pretečenem času, tako da se lahko varno

domneva, da vsa stikala in mostovi neodvisno izračunajo enako stabilno vpeto drevo. Po uskladitvi se posredovanje prometa lahko prične. 802.1D različica STP ima usklajevalni čas (enačba 1.1 in 1.2), ki temelji na privzetih vrednostih merilnika časa. Dokler omrežje ni usklajeno, vsi vmesniki ostanejo v blokiranem stanju, strnjeno Layer 2 omrežje kot celota, pa je začasno neuporabno.

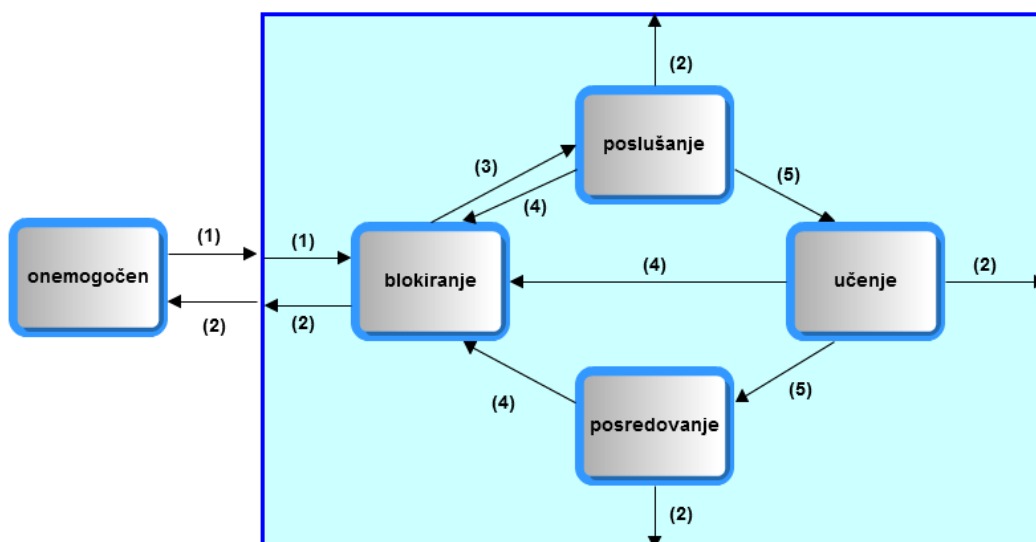
$$\text{usklajevalni čas} = (2 \times \text{posredovalna zakasnitev}) + \text{max_starost} \quad (1.1)$$

$$((2 \times 15s) + 20s) = 50s \quad (1.2)$$

Privzete vrednosti merilnika časa so sledeče [11]:

- pozdrav (Hello) 2s,
- posredovalna zakasnitev 15s,
- maksimalna starost 20s.

Vrata mostov ali stikal lahko posedujejo različna stanja. Na sliki 10 so z oštevilčenimi puščicami prikazani prehodi stanj ter vsa možna stanja med normalnim delovanjem STA.



Slika 10: Diagram stanj za STP.

Prehodi stanj med normalnim delovanjem STA:

- (1) vrata omogočena z upravljanjem ali z inicializacijo,
- (2) vrata onemogočena z upravljanjem ali z odpovedjo,
- (3) algoritem izbere ali so vrata *izbrana* ali korenska,
- (4) algoritem izbere kot nadomestna vrata,
- (5) protokol zapadlosti merilnika časa (posredovanje merilnika časa).

Vrstni red in namen posameznih stanj je sledeč:

- **Onemogočen:** Vrata v tem stanju ne sodelujejo v paketnem posredovanju niti v delovanju STA niti STP.
- **Blokiranje:** Blokirana vrata ne posredujejo prometa, zavržejo vse prejete pakete in ne dodajajo novih naslovov postaj v filtrirno bazo podatkov (angl. *filtering database*). Sprejemajo in obdelujejo BDPU.
- **Poslušanje:** Vrata poslušanja (angl. *listening port*) se pripravljajo na sodelovanje posredovanja paketkov. To stanje se prične iz stanja blokiranja, ko STA ugotovi, da bi morala vrata sodelovati v posredovanju.
- **Učenje:** Vrata učenja (angl. *learning port*) so še vedno blokirana, vendar so v procesu posodabljanja filtrirne baze podatkov z učenjem novih naslovov postaj. To stanje se prične iz stanja poslušanja po izteku posredovanega zakasnitvenega merilnika časa.
- **Posredovanje:** To je normalno stanje aktivnih vrat. Posreduje promet in uči se novih naslovov postaj. To stanje se prične iz stanja učenja po izteku posredovanega zakasnitvenega merilnika časa.

Tabela 5: Stanja vrat pri STP in RSTP protokolu.

Stanja vrat	
<i>Pododovani STP</i>	<i>Hitri STP</i>
Onemogočen	Zavračanje
Blokiranje	Zavračanje
Poslušanje	Zavračanje
Učenje	Učenje
Posredovanje	Posredovanje

Tabela 5 prikazuje primerjavo stanj vrat med Podedovanim STP (angl. *Legacy STP*) in Hitrim STP (angl. *Rapid STP*).

BPDU paket v primeru 802.1D vsebuje naslednja informacijska polja (slika 11) [12]:

- **ID protokola:** polje označuje vrsto protokola; to polje vsebuje vrednost nič;
- **Verzija:** polje označuje verzijo protokola; to polje vsebuje vrednost nič;
- **Vrsta sporočila:** polje označuje vrsto sporočila; to polje vsebuje vrednost nič;
- **Zastave:** polje vsebuje eno od naslednjega:
 - bit spremembe topologije, ki nakaže spremembo topologije,
 - bit potrditve spremembe topologije, ki je nastavljen za potrditev prejema konfiguracijskega sporočila z nastavljenim bitom spremembe topologije.
- **ID korena:** polje označuje korenski most z navedbo svoje 2-bajtna prioritete številke in 6-bajtnega MAC naslova;
- **Strošek poti korena:** polje označuje strošek poti do korenskega mosta označenega z ID korena iz oddajnega mosta;
- **ID mosta:** polje označuje prioriteto in ID mosta, ki oddaja BPDU paket;
- **ID vrat:** polje označuje ID vrat na oddajnem mostu, skozi katere je bil oddan BPDU paket;
- **Starost sporočila:** določa koliko časa je poteklo od poslanega korenskega BPDU paketa na katerem temelji sedanje sporočilo;
- **Maksimalna starost:** polje označuje obdobje veljavnosti trenutnega BPDU paketa; privzeta vrednost maksimalne starosti je 20s;
- **Čas pozdrava:** določa časovno obdobje med korenskim generiranjem BPDU paketa; privzeta vrednost je 2s;
- **Posredovalna zakasnitev:** določa čas, katerega mora most počakati pred prehodom v novo stanje po spremembi topologije; privzeta vrednost posredovalne zakasnitve je 15s.

ID Protokola (2 bajta)	Verzija (1 bajt)	Vrsta sporočila (1 bajt)	Zastave (1 bajt)	ID Korena (8 bajtov)	Strošek poti korena (4 bajti)	ID Mosta (8 bajtov)	ID vrat (2 bajta)	Starost sporočila (2 bajta)	Max. Starost (2 bajta)	Čas pozdrava (2 bajta)	Posredovalna zakasnitev (2 bajta)
---------------------------	---------------------	-----------------------------	---------------------	-------------------------	----------------------------------	------------------------	----------------------	--------------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------------------

Slika 11: Zgradba paketa BDPU.

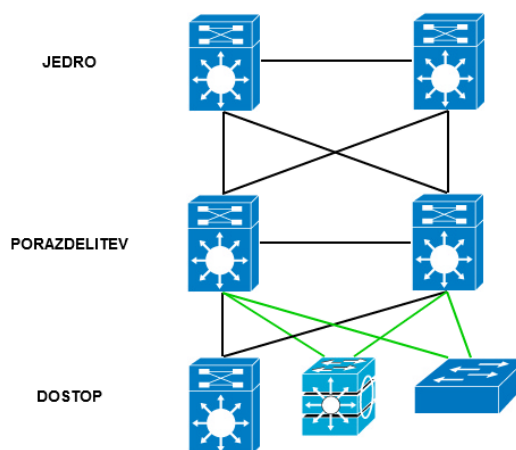
Korenski most pošilja BPDU paket vsak čas pozdrava (angl. *Hello Time*). Sprejemni tok stikal ali mostov posreduje ta BPDU na vsa izbrana vrata. V 802.1D pride do spremembe topologije, kadar vrata preidejo v ali iz blokirane stanja. Ko se to zgodi, omenjeni most pošilja obvestilo o spremembi topologije proti korenskemu mostu, dokler od slednjega ne prejme potrditve. Ko korenski most prejme obvestilo o spremembi topologije, posreduje obvestilo preostalim mostovom:

- **Sprememba topologije:** ob obvestilu ali odkritju spremembe topologije, koren za določeno časovno obdobje postavi zastavico v vseh paketih BPDU.
- **Potrditev spremembe topologije:** zastavico v BPDU paketu pošljejo v odgovor na obvestilo o spremembi topologije, ki je bil prejet na izbrana vrata.

3.1.2 Pomanjkljivosti IEEE 802.1D STP v današnjih omrežjih

STP kot standardiziran v 802.1D je omogočil kritično funkcionalnost za Layer 2 premostitvena omrežja (angl. *bridged networks*) in še vedno ostaja uporaben v današnjem času. Vendar pa so se po skoraj dveh desetletjih od njegove vpeljave, Ethernet in modeli načrtovanja omrežja bistveno spremenili:

- Polno hkratno komutiran Ethernet je postopoma izpodrinil deljeni Ethernet, tako v jedru kakor tudi v obrobju omrežja. Ob tem so strukturirane mrežne topologije, ki temeljijo na podvojenih Layer 2 in Layer 3 modulih, nadomestile več *ad hoc* pristopov za načrtovanje omrežij. Dostopi do Ethernet omrežij za podjetja in pa dostopi do Ethernet omrežij ponudnikov storitev so značilno načrtovani tako, da ustrezajo 3-stopenjskim (dostop / porazdelitev / jedro) ali 2-stopenjskim (dostop / jedro) oblikovanim modelom, ki poenostavljajo upravljanje in omejujejo število odpovedi domen. V osnovi strukturirana mrežna topologija običajno uporabi največ 2-3 prehode preko mosta (angl. *bridge hops*), da promet prepotuje Layer 2 module. Slika 12 prikazuje 3-stopenjski hierarhični model z naslednjimi napravami; dostop (Route Switch Procesor, Intelliswitch stack, Workgroup Switch), porazdelitev in jedro (Route Switch Procesor).



Slika 12: 3-stopenjski hierarhični model.

- V Layer 2 komutiranih omrežjih so pogosto uporabljeni Virtual LAN-i (VLAN) za nadaljnje delitve domen razpršenega oddajanja, za ločevanje prometa, ki temelji na skupinah uporabnikov ali na vrsti aplikacije ter za podporo izenačevanja obremenitve v redundantnih povezavah.

Kot je bilo že na začetku zapisano, prvotne različice STP, za maksimalno starost in za posredovalno zakasnitev, uporabljajo zelo konservativne vrednosti merilnika časa, da zagotovijo, da se mreža poljubne fizične topologije uskladi pred postavitvijo vrat v stanje posredovanja.

Dolg čas usklajevanja predstavlja za današnje kritične aplikacije nepotrebno dolge čakalne dobe v večini strukturiranih omrežij in pretirane prekinitve prometa. Prilagajanje merilnikov časa protokola na krajše zakasnitve omogoča delne rešitve problema, vendar zahteva skrbne nastavitve, da se izognemo vpeljevanju nestabilnosti v omrežje. Nastavljanje merilnikov časa protokola je tudi v nasprotju s prevladujočo filozofijo vstavi in poženi osnovnih Layer 2 povezav. Dolg čas usklajevanja v 802.1D je pripeljal do tega, da so številni proizvajalci začeli razvijati lastniške izboljšave STP, namenjene časovno hitrejšemu usklajevanju v določenih scenarijih mrežnih načrtov. IEEE rešitev za ta problem je 802.1w, znan tudi kot Rapid

Spanning Tree Protocol (RSTP). Z njim se izognemo uporabi merilnikov časa protokola v normalnem delovanju in poljubnih mrežnih topologijah.

802.1D (v povezavi z 802.1Q) tudi postavi stroge omejitve na raznolikosti VLAN-ov, katere je možno nastaviti. V podrobnosti 802.1D se predpostavlja, da bi morala biti le ena logična topologija za premostitvena omrežja. To pomeni, da se z uporabo STP v omrežju, kjer se VLAN-i raztezajo čez več stikal (z uporabo povezovalnega protokola, kot recimo IEEE 802.1Q) zahteva, da vsi VLAN-i delijo enako logično topologijo. To zmanjšuje stopnjo izolacije prometa, ki jo lahko zagotovijo VLAN-i, potrato pasovne širine v času oddajanja in poplave paketkov. Poleg tega ena sama topologija vsili vse redundantne poti v Layer 2 omrežju, da so v blokiranem stanju za ves promet. Potrati zmogljivosti pasovne širine se je mogoče izogniti, če lahko več logičnih topologij soobstaja na premostitvenem omrežju.

To pomanjkanje VLAN-zavedanja (angl. *VLAN-awareness*) je vodilo k razvoju drugega sklopa lastniških izboljšav, ki naredijo STP VLAN-zavedne, kot recimo Per-VLAN Spanning Tree (PVST), kateri ustvari ločene STP primerke za vsak VLAN. S PVST, 1000 VLAN-ov pomeni 1000 primerkov STP, kar predstavlja veliko CPU obremenitev na stikalih in potrato pasovne širine s pošiljanjem BPDU paketkov za vsak VLAN.

IEEE rešitev tega problema je 802.1s ali Multiple Spanning Tree Protocol (MST ali MSTP), ki je grajen na podlagi 802.1w (RSTP) in 802.1Q za podporo večih primerkov RSTP, ki so lahko v skupni rabi večim VLAN-om. Deljeni primerki RSTP lahko močno zmanjšajo CPU obdelovalno obremenitev na Layer 2 stikalih, medtem ko podpirajo večje število VLAN-ov z različnimi logičnimi topologijami.

3.2 TRILL in SPB

TRILL in SPB sta najbolj primerna standarda za nadomestitev trenutnega starega STP protokola. Zaradi njune funkcionalnosti smo ju med seboj primerjali in poskušali ugotoviti, kateri od njiju je bolj uporaben.

3.2.1 Ozadje in osnove TRILL-a

TRILL je s strani IETF predlagani standard, ki je bil prvotno predstavljen IEEE v letu 2006, vendar ni bil sprejet v 802.1 skupino. Več omrežnih podjetij, vključno Cisco, Brocade in Juniper, je pričelo sodelovati v IETF TRILL pobudi in so napovedali namero za podporo tej

tehnologiji. Razvit je bil pod vodstvom Radia Perlmana, ustvarjalca Spanning Tree Protokola. Zasnovan je bil z naslednjimi lastnostmi:

- ni potrebnih nastavitvev oz. minimalne nastavitve,
- porazdelitev obremenitve med več poti,
- zmanjšanje usmerjevalnih zank (po možnosti preko polja TTL),
- podpora večmestnih priključitev,
- podpora za razpršeno oddajanje in oddajanje več prejemnikom,
- brez zakasnitev pomembnih storitev po priključitvah,
- nič manj varen kot obstoječe premostitvene rešitve.

TRILL je bil zasnovan kot način za premagovanje pomanjkljivosti Ethernet Spanning Tree Protokola, metode za preprečevanje mrežnih zank in obvladovanje rezervnih poti v primeru okvare. Spanning Tree je neučinkovit, ker ne uporabi vseh razpoložljivih poti med stikali in ker te poti niso vedno najkrajše ali najhitrejše. Zaradi tega je topologija zблиževanja v Spanning Tree omrežju počasna, kar omejuje obseg in naredi omrežje bolj dovzetno za napake povezav.

IETF se poskuša lotiti teh slabosti v RFC 5556 s TRILL-om, kar pomeni transparentno medsebojno povezanost večih povezav. TRILL je Layer 2 protokol, ki uporablja usmerjanje stanja povezave za preslikavo omrežja, odkrivanje in izračunavanje najkrajše poti med TRILL vozlišči. Ta vozlišča so poimenovana tudi usmerjevalni mostovi (angl. *Routing Bridges* oz. *RBridges*). To omogoča multi-hop usmerjanje najkrajših poti, tako da lahko uporabniki gradijo velika Ethernet in Fibre-Channel-over-Ethernet omrežja podatkovnih centrov.

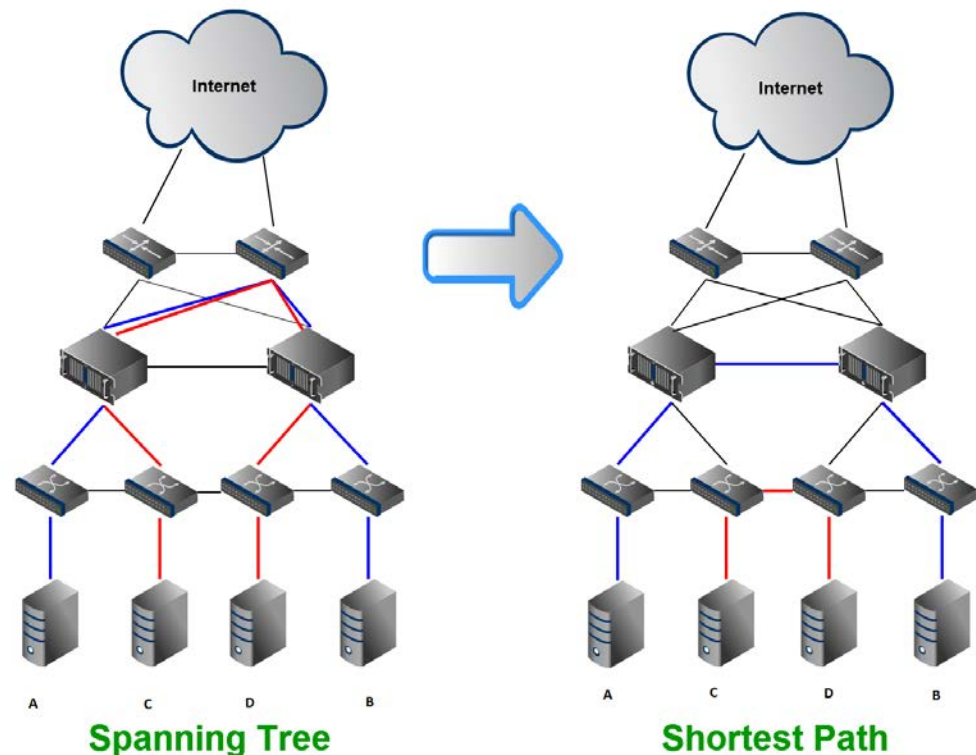
TRILL je predlagana tehnologija, ki je namenjena za uporabo v podatkovnih centrih. Je temeljna omrežna tehnologija, ki računalništvu v oblaku omogoča:

- povečanje pogostosti preklapljanja,
- boljšo izkoriščenost poti,
- osnovno podporo za zelo mobilne strežnike v virtualiziranem strežniškem okolju,
- hitrejše zблиževanje ob vklopu in v odgovoru za napake.

Bistvena lastnost TRILL-a je podpora za visoko mobilne virtualne strežnike znotraj VLAN-ov.

3.2.2 Ozadje in osnove SPB-ja

SPB (angl. *Shortest Path Bridging*) je bil prvotno predstavljen na IEEE kot PLSB (angl. *Provider Link State Bridging*) kot tehnologija, ki jo je razvil Nortel. PLSB kot sam, je bil razvit iz druge že razvite Nortel-ove tehnologije, in sicer 802.1ah (angl. *Provider Backbone Bridging*). Shortest Path Bridging je sedaj IEEE osnutek (802.1aq), ki bo morda vključen v 802.1Q standard. Več omrežnih podjetij, vključno z Avaya, Alcatel, Hauwei in Cisco, sodelujejo v IEEE SPB pobudi in so napovedale podporo Shortest Path Bridging tehnologiji. SPB je razširitev Multiple Spanning Tree Protokola (MSTP), ki prav tako uporablja usmerjevalni protokol stanja povezave. S tem omogoči stikalom, da se naučijo najkrajše poti preko Ethernet strukture in se dinamično prilagaja topologiji sprememb. Ta tehnologija je načrtovana kot rešitev za podjetja in pa ponudnike telekomunikacijskih in omrežnih storitev. Za podjetja bodo kot prvo področje implementacije podatkovni centri, za ponudnike telekomunikacijskih in omrežnih storitev pa je SPB viden kot alternativa in/ali podaljšanje v H-VPLS (angl. *Hierarchical Virtual Private LAN Service*). SPB je preizkušena tehnologija, ki je že nekaj let postavljena na trg ponudnikov telekomunikacijskih in omrežnih storitev. To zagotavlja SPB takojšnje prednosti pred TRILL-om, ki je popolnoma nova tehnologija, ki nima korenin razvoja.



Slika 13: Primerjava STP in SPB.
Komunikacija poteka med napravami A in B, oz. C in D.

Slika 13 prikazuje Ethernet, ki uporablja STP za določitev posredovalnih poti. Drevesna struktura sili promet k omrežnemu jedru in s tem ustvarja ozko grlo (rdeče in modre povezave na levi shemi). Poleg tega, drevesna struktura ne omogoča toka prometa po nadomestnih povezavah in s tem dodatno omeji uporabo pasovne širine. Alternativna posredovalna tehnika je izbrati najkrajše poti skozi omrežje (rdeče in modre povezave na desni shemi). To omogoči obvod jedra in zmanjševanje ozkega grla. Dodatna korist posredovanja najkrajše poti je njena sposobnost uporabe vseh povezav, vključno z nadomestnimi povezavami in s tem nadaljnje povečanje zmogljivosti.

V SPB obstajata dva modela za premostitev po več poteh: Shortest Path Bridging VLAN (SPBV) in Shortest Path Bridging Mac-in-Mac (SPBM). Obe različici uporabljata IS-IS (angl. *Intermediate System To Intermediate System*) kot protokol zaznave stanja povezave in obe izračunata drevo najkrajših poti med vozlišči. SPBV uporablja Shortest Path VLAN ID (SPVID) za določanje vozliščne dosegljivosti, SPBM pa uporablja kombinacijo Backbone MAC (BMAC) in Backbone VLAN ID (BVID) za določanje vozliščne

dosegljivosti. Oba SPBV in SPBM zagotavljata povezljivost s Spanning Tree. Za namene tega dokumenta bo SPBM tehnologija uporabljena za vse nadaljnje primerjave.

802.1aq SPB standard ponovno uporabi Provider Backbone Bridges (PBB) ali 802.1ah podatkovno pot in zato v celoti podpira OA&M funkcionalnosti, ki temeljijo na IEEE 802.1ag. Tako je celoten sklop operacij in funkcionalnosti za odpravljanje napak, ki temeljijo na Ethernetu, takoj na voljo za uporabo. 802.1ah blokovni zapis določa identifikatorja storitve (angl. *service identifier* - I-SID), ki je popolnoma ločen od Backbone MAC naslovov in VLAN ID – to omogoča poenostavljeno virtualizacijo podatkovnega centra. Cilj je v celoti ločiti plast povezljivosti storitev od fizične mrežne infrastrukture, odstraniti vse soodvisnosti protokolov in fizičnega omrežja. I-SID izloči storitev iz omrežja – s preslikavo VLAN-a ali več VLAN-ov v I-SID na vstopni točki storitve. SPB samodejno gradi najkrajšo pot preko omrežja, da v celoti razširi LAN povezljivost. Le-ta pa je osnovni pogoj za podporo virtualizacije strežnikov in virtualiziranih hrbtenic podatkovnih centrov. I-SID določa tudi mehanizem za razdrobljen nadzor prometa. S preslikavo storitev (aplikacij) v poseben I-SID lahko uporabnik sedaj ustvari namenska celotna (angl. *end-to-end*) omrežja in lahko veliko lažje nadzira dostop do teh storitev.

3.2.3 Primerjava tehnologij in nasprotja

Primerjali smo tehnične značilnosti SPB in TRILL protokolov. Razlike in podobnosti so prikazane v tabeli 6.

Tabela 6: Primerjava SPB in TRILL protokola.

Značilnosti	SPB	TRILL
Definicija standarda	IEEE (802.1aq)	IETF
Večpotna podpora	Da	Da
Definicija standarda	IEEE (802.1aq)	IETF
Večpotna podpora	Da	Da

»Se nadaljuje«

»Nadaljevanje«

Značilnosti	SPB	TRILL
Odpravlja potrebo po Spanning Tree protokolu	Da	Da
Medobratovalnost s Spanning Tree	Da	Da
Preprečevanje zank	RPFC	Na osnovi TTL (zaradi neujemanja dreves) & RPFC
Dinamično spreminja omrežne poti za promet sporočil	Da	Da
Podpora Virtualizacije	Uporablja I-SID (16 Mio)	Samo VLAN (4k)
Low-Touch konfiguracija	Da; potrebno nastaviti VLAN na storitev stopnje preslikave	Da
Procesi izbire	Pred priskrbo	Izbrani posredovalnik, Korenski most, IS-IS vzdevki na RBridge
Iskanje in posredovanje	Tradicionalno Ethernet preklapljanje v tandemu vozlišč; IEEE802.1ah v BCB in BEB; brez MAC zamenjav kot usmerjevalnik (potrebna IEEE 802.1ah strojna oprema)	Potrebna nova glava s trojnim iskanjem na vsakem RBridge vozlišču (nov ASIC)
Prometna pot za oddajane sporočila enemu prejemniku	Najkrajša pot, ki temelji na IS-IS izračunih	Najkrajša pot, ki temelji na IS-IS izračunih
Enkapsulacija	Mac-v-Mac	TRILL glava
Izstopna obdelava za oddajanje sporočila več prejemnikom	Ni potrebna	Potrebna zaradi spremembe izstopnih vrat MAC glave
Nezaporedni paketi (možno)	Ne	Možno, če so ciljni MAC prehodi iz neznanih MAC na znane

»Se nadaljuje«

»Nadaljevanje«

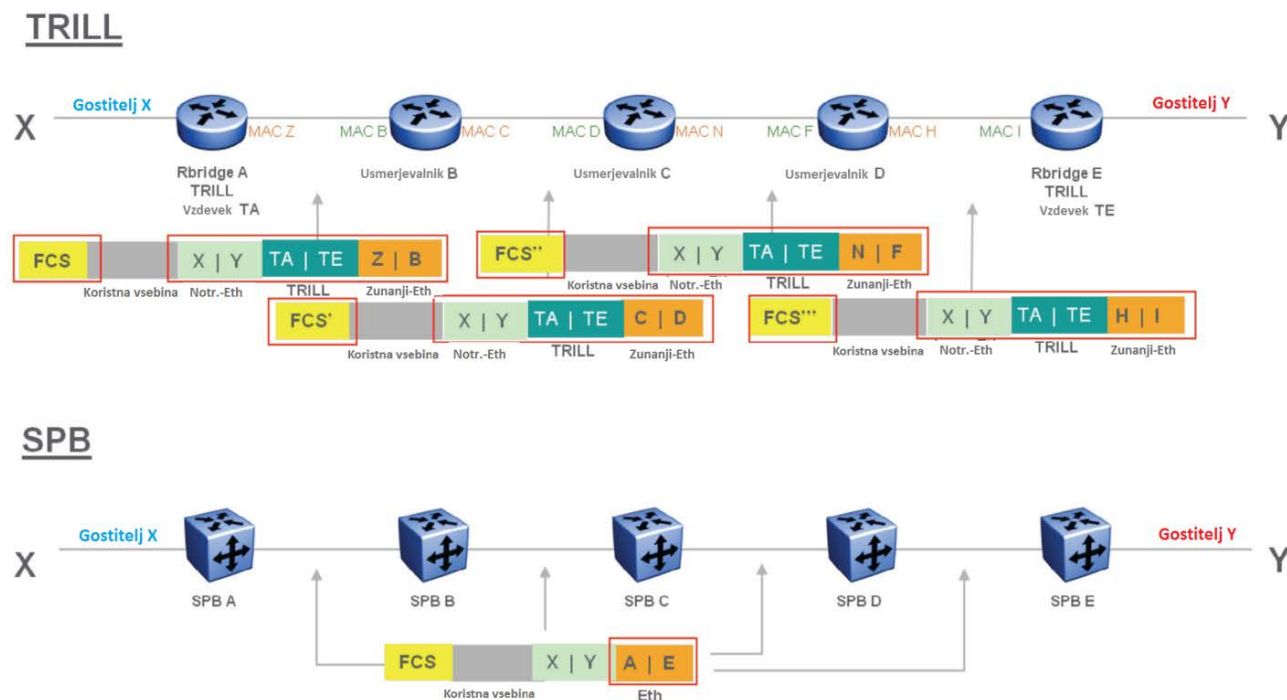
Značilnosti	SPB	TRILL
Prometna pot za razpršeno oddajanje/za oddajanje sporočila več prejemnikom	Med dvema koncema vozlišč enako kot oddajanje sporočila enemu prejemniku in dvosmerno ujemanje – drevo temelji na izvornem vozlišču	Odvisno od izbranega korenskega mostu, poti za oddajanje sporočila enemu prejemniku in za razpršeno oddajanje/za oddajanje sporočila več prejemnikom so lahko povsem drugačne (lahko povzroči nezaporedne pakete ob preklopu iz poti za razpršeno oddajanje/za oddajanje sporočila več prejemnikom na pot za oddajanje sporočila enemu prejemniku
MAC učenje stranke	Učenje, ki temelji na paketkih na robu SPB omrežja	Učenje, ki temelji na paketkih na robu dostopnih vrat + ESADI protokol
Zbiranje storitev	Da (več VLAN-ov se lahko preslika v primerke storitev)	Ne
Vodenje prometa	Dodeli promet na najkrajše poti Povezava na podlagi meritev za izračun poti	Dodeli najkrajšo pot za oddajanje sporočila enemu prejemniku z Layer 2 zamenjavo glave na vsak RBridge Povezava na podlagi meritev za izračun poti
OA&M	IEEE 802.1ag, ITU Y.1731 učinkovitost in vodenje trepetanja	Ni mogoča
Enostavnost odpravljanja težav	Lažje je videti celotno pot skozi omrežja. Celoten sklop Ethernet OA&M orodij, ki temeljijo na IEEE/ITU	Da poznaš pot, je potrebno pregledat prometa na hop-by-hop podlagi. Ni na voljo OA&M orodij

»Se nadaljuje«

»Nadaljevanje«

Značilnosti	SPB	TRILL
Potreba po novi strojni opremi	Grajen na 802.1ah, 802.1ad, 802.1ag, ki je podprt v mnogih platformah strojne opreme	TRILL zahteva novo strojno opremo in trenutno ni OA&M podpore za strojno opremo
Layer 3 in IP VPN razširitve	IP/SPB osnutek	Ni integracije
Razširljivost	10.000+ z večnivojskim IS-IS	10.000+
Zbliževanje	Izračuni drevesa temeljijo na viru vozlišča (število izračunanih dreves temelji na številu vozlišč)	Ločena ESADI primer / VLAN – vsaka vrata napovedujejo vse VLANe preko TRILL pozdrava; na vrata je lahko poslanih 4096 pozdravov. Dinamična izbira korenskega mosta, Dinamična izbira imenovanega posredovalnika
ID sistema	Imena vozlišč uporabljajo rezervirane ID sistema	Ob združitvi TRILL omrežij skupaj, možna trčenja vzdevkov

3.2.4 TRILL in SPB primerjava Iskanja/Posredovanja



Slika 14: TRILL in SPB paketno iskanje in posredovanje [18].

Slika 14 prikazuje paketno iskanje in posredovanje v okviru TRILL in SPB omrežja. Kot je razvidno na primeru, se poizvedovanje glave TRILL z zamenjavo MAC naslova in preračun okvirja za preverjanje zaporedja (angl. *Frame Check Sequence* - FCS) pojavi na vseh vozliščih. Vzrok za to je posredovanje, ki deluje na sistemu *hop-by-hop*. Gre za načelo krmiljenja pretoka podatkov v omrežju po načinu *shrani in posredujej* (dovoljuje posredovanje podatkov tudi če pot med virom in ciljem ni trajno povezana), ki ne vključuje samo vira in cilja, ampak tudi vsa ostala vozlišča. To dodatno prispeva k splošni kompleksnosti omrežja in lahko povzroči zaplete pri odpravljanju težav. Ker ni preprostega načina za določanje izbrane poti za določen tok, je potrebno storiti odpravljanje težav *hop-by-hop* v vsakem vozlišču posamezno. Uvedba SPB odpravlja kompleksnosti z uporabo preprostih MAC posredovalnih tabel za iskanje in dodeljuje promet na najkrajše poti do želene izhodne točke. To poenostavlja odpravljanje težav v tem okolju, saj se lahko ves tok z lahkoto prepozna po viru in ciljnim naslovu. S tem, da SPB zagotavlja skladne poti za ves promet, tudi omogoči veliko lažje opraviti delo odpravljanja napak.

Glavna razlika med SPB in TRILL protokolom je način posredovanja prometa:

- TRILL posredovanje:

V okviru hrbtnice je TRILL pravi Layer-3 protokol: TRILL glava ima štetje hop-ov, RBridges imajo Layer-3 naslove in Layer-2 glave sprememb (angl. *header changes*). Čeprav TRILL še vedno ohranja premostitveno paradigmo¹ na robovih, njegove jedrne lastnosti zagotavljajo, da se obnaša tako kot vsi drugi (dobro oblikovani) Layer-3 protokoli.

Ob vhodu RBridges prejme MAC okvir končnega uporabnika, okvir je ovit v Layer-3 TRILL glavo z Layer-3 naslovi za vhod in izstop iz RBridge-a. TRILL datagram² dobi novo MAC glavo, ki se spremeni vsakič, ko je RBridge posredoval paket; Layer-3 naslovi v TRILL glavi seveda ostanejo nespremenjeni, prav tako se zmanjša štetje hop-ov.

Prednosti: Layer-3 protokol ima številne prednosti pred Layer-2 protokolom (Quality of service – QoS, naslavljanje, nizka latenca, varnost, ...).

Pomanjkljivosti: TRILL ne more biti izveden z obstoječimi (nizkopračunskimi) ASIC-i, ki so vprogramirani za podporo le 802.1ad in 802.1ah. Lahko pa se izvaja z vsako arhitekturo posredovanja, ki je dovolj splošna, da lahko vstavlja in odstranjuje Layer-2/Layer-3 glave na vhodih/izstopnih točkah in izmenja Layer-2 glave ter spreminja Layer-3 glave medtem ko posreduje datagrame.

- SPB posredovanje:

802.1aq je pravzaprav spremenjen način vnašanja premostitvene FIB (angl. *Forwarding Information Base*), medtem ko posredovalna paradigma ostane nespremenjen. 802.1aq lahko uporabi 802.1ad (Q-v-Q) posredovanje ali 802.1ah (angl. *Provider Backbone Bridging*) posredovanje.

PBB (angl. *Provider Backbone Bridging*) vhod vzame uporabnikov MAC okvir in ga ovije v 802.1ah MAC okvir. Ciljni MAC naslov v 802.1ah MAC okvirju je

¹paradigma – najpogosteje pomeni vzorec delovanja v znanstvenem ali drugem raziskovanju

²datagram – vsebuje paketek in fizični naslov ponora

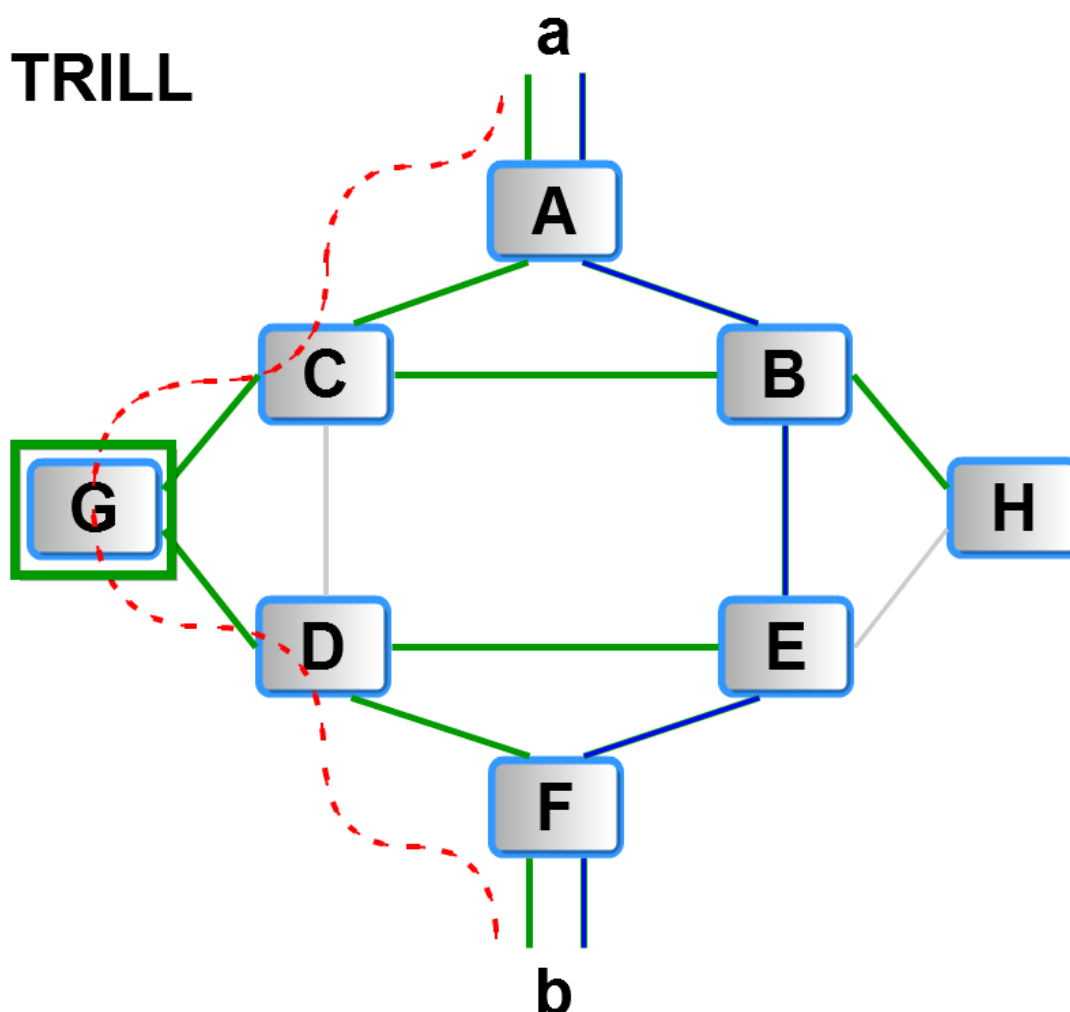
PBB izstop in pri tem ni hop štetja, ki se ga lahko uporablja za odkrivanje zank (ali omogoči omrežnemu operatorju sledenje poti preko omrežja). Novi okvir je mogoče premostiti preko 802.1aq hrbtenice; zaradi spremenjenih mehanizmov FIB objekta, hrbtenica ni več omejena na eno samo vpeto drevo (kar naredi 802.1aq drugačnega od 802.1ah). Skozi celoten posredovalni proces hrbtenice je okvir nespremenjen (in ciljni MAC naslov ostaja naslov PBB izstopa).

Prednosti: 802.1aq lahko uporabi obstoječe ASIC-e.

Pomanjkljivosti: 802.1aq nima nobene zveze z usmerjanjem in nima nobenih usmerjevalnih funkcionalnosti. Zanke narejene s *control-plane* protokolom, ki je namenjen za nadzor povezav, razširjanje informacij povezljivosti, izračun optimalne poti, lahko povzročijo zlom omrežja (na primer zaradi izvajanja programske napake ali pa distribucijske narave IS-IS izračunov).

802.1aq uporablja preprost in eleganten način izkoriščanja več poti preko omrežja. Ko IS-IS gradi omrežno topologijo, SPB ustvarja najkrajše poti in nato dodeli promet (prometna pot za oddajanje sporočila enemu prejemniku in pa prometna pot za oddajanje sporočila več prejemnikom) tej poti. Zato je zelo enostavno napovedati tok prometa skozi znančno omrežje, saj se izračuna enkrat za celotno pot. Z 802.1aq lahko omrežni analizator z lahkoto prepozna omrežni promet poti v obe smeri, s pogledom na izvorni naslov, na naslov ponora in na VLAN ID. Identifikator storitve (I-SID) v 802.1aq omeji tudi obseg poteka na posamezno storitev.

V nasprotju TRILL uporablja dva različna mehanizma za posredovanje paketkov glede na vrsto prometa. Za promet oddan enemu prejemniku, kjer je znan RBridge izstop, TRILL uporablja IS-IS bazo povezave stanj za dodelitev prometa na najbolj optimalno pot (podobno kot SPB). Vendar pa za oddajanje sporočila več prejemnikom, za razpršeno oddajanje in neznanu oddajanje, TRILL uporablja distribucijska drevesa in RBridge kot koren za posredovanje. V mnogih primerih se te poti ne bodo ujemale in naredile TRILL dovzeten za *out-of-order pakete* (paketki dostavljeni v drugačnem zaporedju, kot so bili poslani) ob prehodu MAC stanja (angl. *MAC state transition*) iz neznanega v znanega. To nam tudi oteži poznavanje točne poti preko omrežja, če jo opazujemo glede na vrsto prometa iz stikala ali vrat.



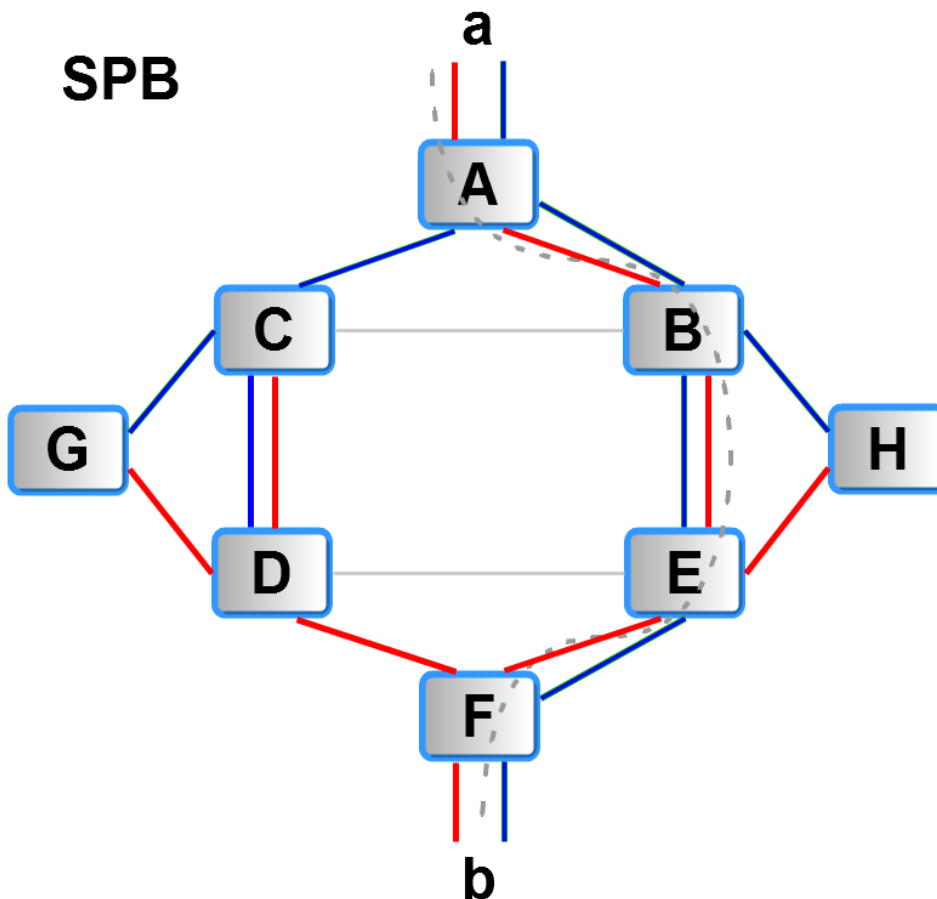
Slika 15: Razlaga dreves najkrajše poti po TRILL.

Slika 15 predstavlja razlago dreves najkrajše poti po TRILL protokolu. Predpostavljamo, da so vsa vozlišča del drevesa. Zeleni kvadratik (vozlišče G) in zelene povezave predstavljajo najkrajšo pot drevesa za koren RBridge-a. Rdeča prekinjena črta $a \rightarrow b$ prikazuje pot oddajanja sporočila več prejemnikom, pot za razpršeno oddajanje in pot za neznano oddajanje. Modre povezave $a \rightarrow b$ prikazujejo pot oddajanja sporočila enemu prejemniku.

Značilnosti:

- Poti za oddajanje sporočila enemu prejemniku in poti za oddajanje sporočila več prejemnikom se ne ujemajo/niso vzporedne.
- Možnost okvare paketkov.

- RPFC (angl. *Reverse Path Forwarding Check*) otežen: F mora vedeti, da A uporablja koren drevesa v G.



Slika 16: Razlaga dreves najkrajše poti po SPB.

Slika 16 predstavlja razlago dreves najkrajše poti po SPB protokolu. Predpostavljamo, da so vsa vozlišča del drevesa. Modre povezave prikazujejo drevo za izvorno vozlišče A. Rdeče povezave prikazujejo drevo za izvorno vozlišče F. Značilnosti:

- Poti za oddajanje sporočila enemu prejemniku in poti za oddajanje sporočila več prejemnikom se ujemajo/so vzporedne.
- Dvosmerna najkrajša pot je zagotovljena s pametnim algoritmom za vzporedne poti.
- Zaporedje okvirjev je zagotovljeno.
- RPFC vedno deluje: Paketki iz a lahko dosežejo b samo po najkrajši poti drevesa.

4 Zaključek

Poslovne zahteve, še posebej v naslednji generaciji podatkovnih centrov, bodo pripeljale do potrebe po virtualizaciji omrežja. Ker omrežja postopoma postajajo vedno bolj kritičnega pomena za podjetja in njihove sposobnosti za poslovanje, je zato potreba po vedno delujoči, prilagodljivi in učinkoviti infrastrukturi vedno večja. Ključni cilj je razširitev omrežnih zmogljivosti, hkrati pa zmanjšanje njene zahtevnosti.

Predlogi za to so:

- zmožnost za zagotovitev »vstavi in poženi« storitev z manjšo zahtevnostjo, kot jo imajo podedovani protokoli,
- operativni prihranki s poenostavitvijo, ki temeljijo na novem vgrajenem modelu,
- večja razpoložljivost omrežja z uporabo enega dokazanega in zanesljivega povezovalnega protokola za vse storitve,
- ločevanje omrežne infrastrukture od plasti povežljivosti storitev,
- združljivo omrežno ravnanje in predvidljivost s podporo enega protokola za vse omrežne storitve,
- optimalna izkoriščenost pasovne širine omrežja s pomočjo uporabe vseh razpoložljivih povezav,
- maksimalna prilagodljivost načrtovanja topologije omrežja z uporabo protokola, ki temelji na stanju povezav.

Donosnost naložb (angl. *return of investment* - ROI) za uvajanje nove tehnologije mora biti dovolj privlačna za korak naprej. Shortest Path Bridging ponuja prednosti virtualizacije omrežja z na splošno lažjo postavitvijo in preprostejšim rednim vzdrževanjem. TRILL ponuja nekatere enake osnovne prednosti kakor SPB, vendar je TRILL bolj zapleten in ne ponuja dodatnih razširjenih funkcionalnosti, kot jih SPB. Obstaja veliko razlik med tema dvema tehnologijama. SPB prinaša enostavnost in eleganco v omrežju skupaj z dodatnimi Layer 3 funkcijami, ki jih podjetja potrebujejo.

Z združevanjem IEEE 802.1aq (SPB) z dodatnimi funkcijami po potrebah podjetij – in sicer Layer 3 usmerjanje, razširitev virtualnih usmerjevalnikov in potreba po *dual-home* dostopu – lahko ustvarimo veliko prednosti za SPB protokol pred TRILL protokolom.

5 Literatura in viri

- [1] Tone Vidmar, Informacijsko – komunikacijski sistem, 2002.
- [2] (2011) Wikipedia, Network topology.
Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Network_topology
- [3] (2011) Wikipedia, Ethernet. Dostopno na: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet>
- [4] Mitchell Bradley, OSI Model Reference Guide.
Dostopno na: <http://compnetworking.about.com/cs/designosimodel/a/osimodel.htm>
- [5] (2011) Wikipedia, CSMA/CD. Dostopno na: <http://sl.wikipedia.org/wiki/CSMA/CD>
- [6] Diane Teare, Catherine Paquet, Campus Network Design Fundamentals, 2006.
- [7] (2011) Wikipedia, Manchester code.
Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Manchester_code
- [8] Borut Breščak, Ethernet. Dostopno na:
http://sers.s-sers.mb.edus.si/gradiva/rac/moduli/upravljanje_ik/22_eternet/01_datoteka.html
- [9] Dostopno na: http://colos1.fri.uni-lj.si/ERI/RAC_SISTEMI_OMREZJA/html/medmerezno_povezovanje/medmreno_povezovanje.html
- [10] (2006) MaFiRa-WIKI, Most. Dostopno na: <http://wiki.fmf.uni-lj.si/wiki/Most>
- [11] Jeremy Stretch, Spanning Tree. Dostopno na:
http://media.packetlife.net/media/library/11/Spanning_Tree.pdf
- [12] Cisco, Frame formats, stran 13. Dostopno na:
<http://docstore.mik.ua/univercd/cc/td/doc/product/lan/trsr2/frames.pdf>
- [13] (2010) Nanrog, The great Debate: TRILL Versus 802.aq (SPB). Dostopno na:
http://nanog.org/meetings/nanog50/presentations/Monday/NANOG50.Talk63.NANOG50_TRILL-SPB-Debate-Roisman.pdf
- [14] (2011) Peter Ashwood-Smith, Shortest Path Bridging IEEE 802.1aq. Dostopno na:
<http://www.nanog.org/meetings/nanog49/presentations/Tuesday/Ashwood-SPB.pdf>
- [15] (2011) Wikipedia, TRILL (computing). Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/TRILL_%28Computer_Networking%29

[16] (2011) John Herbert, Layer 2 Routing (sort of) and TRILL. Dostopno na:

<http://lamejournal.com/2011/05/16/layer-2-routing-sort-of-and-trill/>

[17] (2009) Radia Perlman, RFC 5556. Dostopno na: <http://tools.ietf.org/html/rfc5556>

[18] (2011) Avaya, Support. Dostopno na:

<http://support.avaya.com/css/appmanager/public/support>