



Univerzitet u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Odsjek za telekomunikacije

Time-Sensitive Networking (TSN)

Kvaliteta usluge u telekomunikacijskim mrežama

Muhamed Crnčalo
Broj indeksa: 2237/2024

Harun Dedović
Broj indeksa: 2294/2024

Vedad Crnčalo
Broj indeksa: 2293/2024

Amna Bumbul
Broj indeksa: 2292/2024

Datum: 24.04.2025.

Sadržaj

1	Uvod	2
2	Osnovni koncepti TSN-a	3
3	Tehničke komponente TSN-a	5
3.1	TSN komponente oblikovanja mrežnog saobraćaja	5
3.2	Prekidanje prijenosa okvira	6
3.3	Karakteristike pouzdanosti	6
3.4	Kontrola i upravljanje	6
4	Implementacija TSN-a	7
4.1	Ključne funkcije i mehanizmi u TSN-u	8
4.1.1	Oblikovači TSN-a (eng: TSN Shapers)	8
4.1.2	Prekidanje okvira	10
4.1.3	Vremenska sinhronizacija	10
4.2	Ethernet switch	10
5	Postojeća rješenja	12
5.1	Mjerenje ključnih metrika	12
6	Zaključak	15

1 Uvod

Vremenski osjetljivo umrežavanje (*eng: Time-Sensitive Networking*) (TSN) predstavlja skup standarda IEEE 802.1Q razvijenih s ciljem omogućavanja determinističkog i pouzdanog prijenosa podataka s niskom latencijom putem Ethernet mreža. Ova tehnologija je ključna za aplikacije koje zahtijevaju visoku preciznost i predvidljivost, poput industrijske automatizacije, automobilskih sistema, energetske mreže i profesionalnih audio-video sistema. TSN omogućava koegzistenciju vremenski kritičnih podatkovnih tokova s uobičajenim saobraćajem *best effort* tipa, uz osiguranje minimalnog gubitka paketa i strogo definisane latencije.

U kontekstu četvrte industrijske revolucije, poznate kao Industrija 4.0, TSN igra ključnu ulogu u stvaranju fleksibilnih, modularnih i potpuno automatizovanih proizvodnih sistema. Puna primjena TSN-a u industrijskim okruženjima još uvijek nailazi na izazove. Standardi su relativno novi i konstantno se razvijaju, a implementacija zahtijeva zamjenu ili nadogradnju postojeće opreme, što može predstavljati tehnički i finansijski izazov. Također, sinhronizacija vremena na velikim mrežama sa heterogenim uređajima može biti kompleksna i zahtijeva dodatne mehanizme za precizno upravljanje.

Ovaj rad objašnjava osnovne koncepte TSN-a, njegove tehničke komponente, izazove u implementaciji, praktične primjene, te potencijal za daljnji razvoj, naglašavajući njegov značaj u transformaciji modernih mrežnih infrastruktura.

2 Osnovni koncepti TSN-a

TSN (*eng: Time-Sensitive Networking*) predstavlja skup IEEE 802.1Q standarda osmišljenih za omogućavanje determinističkog, vremenski predvidivog prijenosa podataka preko Ethernet mreže. TSN omogućava visok stepen pouzdanosti, nisku latenciju i minimalanu varijaciju kašnjenja, što je ključno za aplikacije u industrijskoj automatizaciji, automobilskoj industriji, energetici i audio-video sistemima. Osnovni cilj TSN-a je omogućiti nulti gubitak paketa zbog zagušenja i ograničenu latenciju za vremenski osjetljive podatkovne tokove, čak i kada dijele mrežu sa “best effort” saobraćajem. Kvalitet usluge koji pruža TSN dodjeljuje se TSN tokovima, koji su označeni kao kritični za real-time aplikacije [1],[2].

Osnovni koncepti TSN -a obuhvataju:

1. **Vremenska sinhronizacija** (*eng: Time Synchronization*): Precizna vremenska sinhronizacija mrežnih uređaja ostvaruje se primjenom IEEE 802.1AS standarda, koji se bazira na PTP-u (*eng: Precision Time Protocol - IEEE 1588*) [3].
2. **Zakazivanje saobraćaja** (*eng: Scheduling*)

xTSN koristi različite mehanizme za kontrolu i oblikovanje saobraćaja:

- 2.1 **IEEE 802.1Qbv - (eng: Time-Aware Shaper) (TAS)**: Centralni mehanizam za zakazivanje saobraćaja u TSN -u, koristi (*eng: Gate Control List*) (GCL) za definisanje vremenskih prozora prilikom kojih su određeni tokovi dozvoljeni za prijenos s malim kašnjenjem.
 - 2.2 **IEEE 802.1Qch - (eng: Cyclic Queuing and Forwarding) (CQF)**: Koristi se kao alternativni mehanizam za rezervisanje saobraćaja. Omogućava ciklični prijenos paketa s garantovanim gornjom i donjom granicom latencije.
 - 2.3 **IEEE 802.1Qcr - (eng: Asynchronous Traffic Shaping) (ATS)**: Podrška za miješani saobraćaj - periodični, ograničeni (*eng: rate - constrained*), ne zahtijeva vremensku sinhronizaciju [1].
3. **Oblikovanje saobraćaja** (*eng: Shaping*)
 - 3.1 **IEEE 802.1Qav - (eng: Credit-Based Shaper) (CBS)**: Mehanizam koji reguliše saobraćaj tako da se obezbijedi jednaka raspodjela resursa i izbjegnu saobraćajni sudari. Iznenadni skokovi u saobraćaju se sprječavaju korištenjem CBS-a na izlaznim portovima preklopnika i krajnjih čvorova, što garantuje ograničenu latenciju za (*eng: real-time*) klase [1].
 - 3.2 **IEEE 802.1Qbu – (eng: Frame Preemption)**: Omogućava prekidanje prijenosa paketa nižeg prioriteta kako bi se bitniji paketi odmah prenijeli, smanjujući zaštitni opseg (*eng: guard band*) i povećavajući efikasnost mreže [2].

4. Pouzdanost i redundansa

Za postizanje visoke pouzdanosti u kritičnim aplikacija koriste se:

- 4.1 **IEEE 802.1CB - (eng: *Frame Replication and Elimination*):** Koristi se za visoku pouzdanost kroz distribuciju paketa putem više ruta i eliminacije dupliranih paketa, osiguravajući otpornost na gubitak podataka [2].
- 4.2 **IEEE 802.1Qci – (eng: *Per-Stream Filtering and Policing*):** Detekcija grešaka i izolacija tokova (eng: *stream*) radi sprječavanja širenja grešaka na nivou pojedinačnih tokova [2].
- 5. **Koegzistencija i fleksibilnost:** TSN omogućava istovremeni rad sa *best effort* saobraćajem, bez narušavanja performansi kritičnih tokova, zahvaljujući preciznoj raspodjeli resursa i vremenskom zakazivanju [3]. Pored toga, svaki TSN tok je predmet ugovora sa mrežom o maksimalnoj latenciji i dozvoljenom gubitku paketa. Time se osigurava fleksibilnost mreže i mogućnost dinamičkog dodavanja/uklanjanja tokova (pomoću IEEE 802.1Qat i IEEE 802.1Qcc. protokola) [3].

3 Tehničke komponente TSN-a

IEEE 802 standard je podijeljen u dva skupa standarda za različita područja umrežavanja. TSN pripada IEEE 802.1 grupi prenosnih mreža i mrežnog upravljanja [4].

Najnovije izmjene IEEE 802.1 skupa standarda predstavljaju istraživačko područje za TSN [4].

IEEE Standard	Karakteristike/Područja istraživanja
Pravovremenost	
802.1Qav	Komponenta oblikovanja temeljena na dozvoljenom protoku (<i>eng: Credit Based Shaper - CBS</i>).
802.1Qbv	Poboljšanja za zakazani mrežni saobraćaj (<i>eng: Time Aware Shaper - TAS</i>).
802.1Qbu	Prekidanje prijenosa okvira (<i>eng: Frame Preemption - FP</i>).
802.1Qcr	Asinhrona komponenta oblikovanja mrežnog saobraćaja (<i>eng: Asynchronous Traffic Shaper - ATS</i>).
802.1Qch	Ciklično određivanje redova čekanja i prosljeđivanje (<i>eng: Cyclic Queuing and Forwarding - CQF</i>).
Pouzdanost	
802.1CB	Replikacija i eliminacija okvira za pouzdanost (<i>eng: Frame Replication and Elimination for Reliability - FRER</i>).
802.1Qci	Filtriranje i kontrola po toku (<i>eng: Per-stream Filtering and Policing - PSFP</i>).
802.1Qca	Kontrola puta i rezervacija (<i>eng: Path Control and Reservation - PCR</i>).
Kontrola i upravljanje	
802.1Qat	Protokol rezervacije toka (<i>eng: Stream Reservation Protocol - SRP</i>).
802.1Qcc	Poboljšanja protokola rezervacije toka (<i>eng: Stream Reservation Protocol - SRP</i>) i poboljšanja performansi.
Vremenska sinhronizacija	
802.1AS	Vremensko usklađivanje i sinhronizacija.
802.1ASbt	Poboljšanja performansi u kontekstu vremenskog usklađivanja i sinhronizacije.

Tabela 1: Tabelarni prikaz klasifikacije tehničkih komponenata TSN-a [4],[5]

3.1 TSN komponente oblikovanja mrežnog saobraćaja

TSN komponente oblikovanja mrežnog saobraćaja se mogu klasificirati u vremenski aktivirane komponente ili komponente aktivirane događajem. Vremenski aktivirane komponente oblikovanja mrežnog saobraćaja poput TAS-a i CQF-a obično imaju izvanredne performanse, ali na račun složenosti. Glavni razlog za ovu kompleksnost je to što je neophodna vremenska sinhronizacija na nivou cijele mreže. Ovo nije slučaj kod komponenata aktiviranih događajem poput CBS-a i ATS-a, što znači da je njihova implementacija daleko jednostavnija. Sve komponente oblikovanja mrežnog saobraćaja odgađaju slanje paketa koji se nalazi u redu čekanja. Za razliku od QoS

komponenata oblikovanja mrežnog saobraćaja, glavni fokus TSN komponenata je na tome da se kontroliše latencija i jitter, umjesto iskorištenja propusnog opsega [5].

3.2 Prekidanje prijenosa okvira

Prekidanje prijenosa okvira predstavlja drugačiji pristup smanjenja kašnjenja. Umjesto fokusiranja na vremenski trenutak izlaska paketa iz reda čekanja, smanjuje se interferencija koju mrežni saobraćaj s manjim prioritetom može stvoriti mrežnom saobraćaju s većim prioritetom. Prekidanje prijenosa paketa ovo omogućava na način da se prijenos okvira mrežnog saobraćaja s manjim prioritetom zaustavi, dok se prijenos okvira mrežnog saobraćaja s većim prioritetom saobraćaja ne završi, nakon čega prijenos okvira mrežnog saobraćaja s manjim prioritetom može ponovo započeti. Po konvenciji, mrežni saobraćaj manjeg prioriteta se zove *preemptable*, dok se mrežni saobraćaj većeg prioriteta zove *express* [5].

3.3 Karakteristike pouzdanosti

Glavni fokus TSN karakteristika pouzdanosti je uglavnom poboljšanje dostupnosti mreže za mrežni saobraćaj od velike važnosti. Dostupnost kao metrika se može definisati kao odnos vremena rada i ukupnog vremena. Povećanje dostupnosti se može postići smanjenjem mrežnih problema i smanjenjem vremena oporavka [5].

3.4 Kontrola i upravljanje

Procesi koji naposljetku omogućavaju implementaciju mreže su:

- Planiranje;
- Izgradnja mreže;
- Faza upravljanja mrežom.

Procesi administracije i upravljanja, koji se koriste za implementaciju kontrolnih i upravljačkih protokola, se uglavnom odnose na faze izgradnje i upravljanja. SRP je protokol koji se ovdje koristi (u TSN Ethernet kontekstu) kako bi se obezbijedili vremenski osjetljivi tokovi kroz čvorove, i kako bi se mogao garantovati i pratiti njihov učinak [5].

4 Implementacija TSN-a

Industrija 4.0 označava četvrtu industrijsku revoluciju, nakon mehanizacije, uvođenja električne energije i informacionih tehnologija. Ova nova faza razvoja temelji se na povezivanju fizičkog i digitalnog svijeta kroz Internet stvari (*eng: Internet of Things*) (IoT) i Internet usluga, čime se proizvodnja digitalizuje i automatizuje. Za razliku od prethodnih revolucija koje su prepoznate tek naknadno, sada postoji prilika da se njen tok usmjeri unaprijed [6].

Industrija 4.0 teži ka modularnim, fleksibilnim i potpuno automatiziranim proizvodnim postrojenjima. To zahtijeva kompleksno umrežavanje senzora, aktuatora i komunikacijskih tehnologija koje omogućavaju visoku pouzdanost i komunikaciju u realnom vremenu. Ipak, savremene proizvodne linije još uvijek su uglavnom krute – kako po pitanju vrste proizvoda, tako i načina rada. Postepena integracija novih tehnologija vodi ka ostvarenju vizije industrije 4.0.

Jedna od ključnih tehnologija u tom procesu je TSN (*eng: Time-Sensitive Networking*). Ona omogućava pouzdanu komunikaciju u realnom vremenu i povećava fleksibilnost mrežnih sistema u industrijskom okruženju. Ipak, TSN je još uvijek u fazi standardizacije, a hardver koji je podržava tek se postupno uvodi na tržište [1].

Sa aspekta mrežnog inženjeringa, cilj TSN tehnologije jeste da obezbijedi determinističke garancije za metrike kvaliteta usluge (QoS), kao što su kašnjenje, varijacija kašnjenja (jitter), gubitak paketa i širina pojasa u Ethernet mrežama sa komutacijom. U ovom kontekstu, determinističke garancije znače postavljanje gornjih granica na najgore moguće vrijednosti navedenih parametara. Zahvaljujući takvim garancijama, TSN omogućava podršku za mrežne aplikacije u realnom vremenu [5].

Zbog niske cijene, robusnosti i podrške za visoke brzine prijenosa podataka, Ethernet je postao dominantna tehnologija na podatkovnom sloju (*eng: data-link layer*) računarskih mreža. Ipak, u svom osnovnom obliku, Ethernet nije bio sposoban da zadovolji zahtjeve aplikacija koje rade u realnom vremenu. Kako bi se odgovorilo na potrebe za prijenosom vremenski osjetljivog saobraćaja, razvijena su četiri glavna pristupa: emulacija vremenske podjele multipleksiranja (TDM), vremenska sinhronizacija i pristupi zasnovani na njoj, očuvanje razmaka između paketa (gap preservation), te zakazivanje po hitnosti i asinhrono oblikovanje saobraćaja (traffic shaping) [2].

Tipične Ethernet mreže koriste „Switched Ethernet“ arhitekturu, gdje se preklopnici koriste za usmjeravanje okvira između čvorova. Ovi switchevi obično primjenjuju FIFO strategije bez vremenskog planiranja, što može dovesti do nepredvidivih kašnjenja. TSN se nadovezuje na ovu arhitekturu dodavanjem mehanizama za preciznu kontrolu vremena, zakazivanje, oblikovanje i prioritetizaciju saobraćaja.

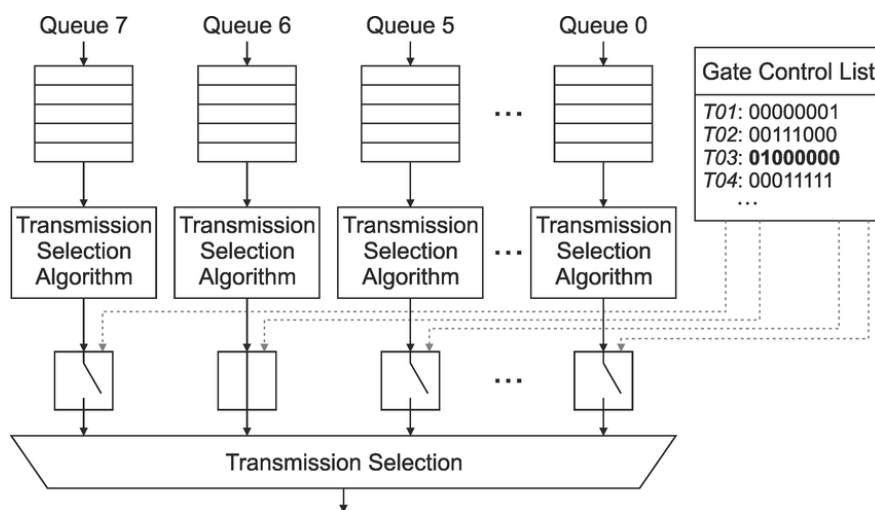
4.1 Ključne funkcije i mehanizmi u TSN-u

4.1.1 Oblikovači TSN-a (eng: TSN Shapers)

TSN oblikovači saobraćaja mogu se grubo podijeliti na one koji se aktiviraju događajem (*eng: event-triggered*) i one koji se aktiviraju vremenom (*eng: time-triggered*). Vremenski aktivirani oblikovači, kao što su *Time-Aware Shaper* (TAS) i *Cyclic Queuing and Forwarding* (CQF), obično nude izuzetne performanse, ali po cijenu veće složenosti. Glavni razlog za to je potreba za sinhronizacijom vremena na nivou cijele mreže. S druge strane, oblikovači koji se aktiviraju događajem, poput *Credit-Based Shaper* (CBS) i ATS, mnogo su jednostavniji za implementaciju.

U suštini, svi oblikovači odgađaju slanje paketa iz reda čekanja. Za razliku od standardnih QoS oblikovača koji su fokusirani na efikasnost korištenja širine pojasa, TSN oblikovači prvenstveno ciljaju na kontrolu kašnjenja i varijacije kašnjenja (jitter). U ovom potpoglavlju biće opisane dvije vrste TSN oblikovača na funkcionalnom nivou [5].

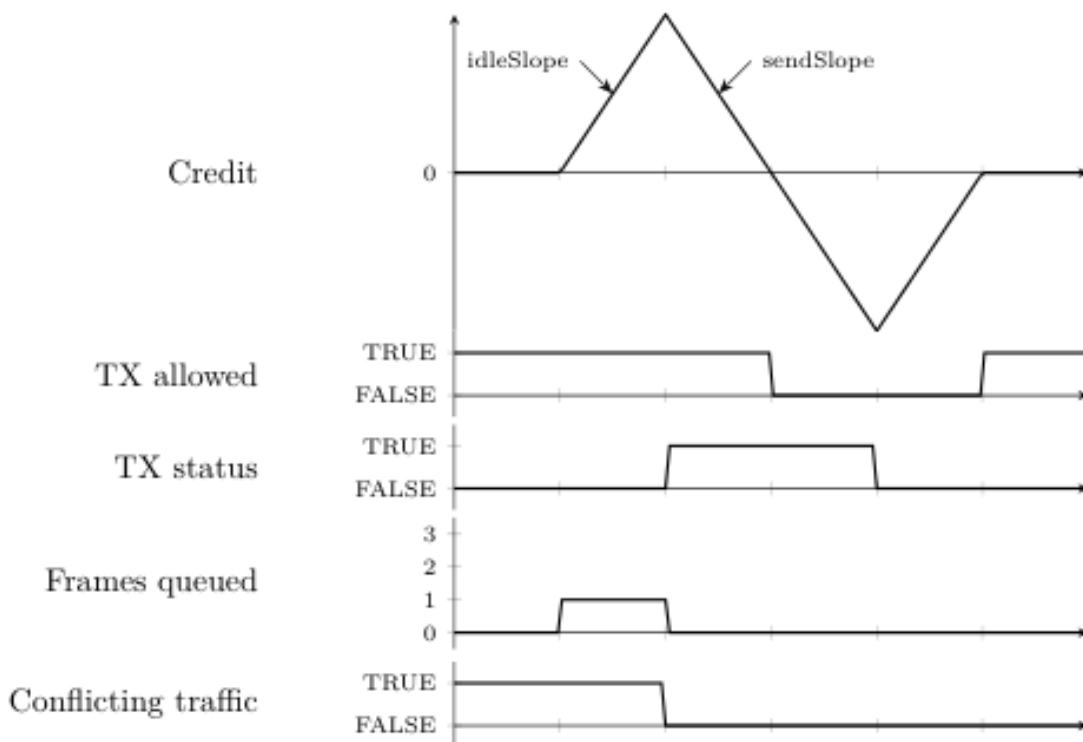
Vremenski aktivirani oblikovači (TAS) - u realnom vremenu, sistemi zahtijevaju visoko predvidivu isporuku podataka, s tačno određenim kašnjenjem i varijacijom kašnjenja. Zbog toga je neophodna vremenska sinhronizacija svih čvorova u mreži, što se u TSN-u postiže pomoću protokola za precizno vrijeme (PTP), s tačnošću do jedne nanosekunde. Ova sinhronizacija omogućava korištenje tzv. gate control lista koji definišu tačne vremenske prozore (zaštićene prozore) kada su portovi otvoreni za prijenos vremenski kritičnih podataka, čime se formira rezervisani komunikacijski kanal sa ultraniskom latencijom. Gate control lista funkcioniše kao repetitivni obrazac, a kako bi se osigurao nesmetan početak zaštićenog prozora, koristi se zaštitni vremenski razmak (guard band). On sprječava da se prijenos prethodnih podataka preklopi sa početkom zaštićenog prozora, ali može uzrokovati kašnjenja za pakete koji su mogli biti preneseni ranije. Ukoliko izlazni port prepozna da se naredni paket može prenijeti prije početka prozora, dozvoljeno je njegovo slanje, čime se povećava propusnost i smanjuje uticaj na saobraćaj koji nije vremenski kritičan [4].



Slika 1: Prikaz rada TAS-a [1]

Oblikovač aktiviran događajem (CBS) jedan je od prvih QoS mehanizama standardizovanih od strane IEEE, još prije formiranja TSN radne grupe, a objavljen je 2009. godine od strane AVB radne grupe. Osnovna mu je svrha omogućiti prijenos audiovizuelnih tokova sa konstantnim bit-nim protokom (CBR) putem paketnih mreža. Kao i svi oblikovači, CBS sprečava saobraćajne udare tako što baferuje podatke i ravnomjerno ih raspoređuje u vremenu. Održava tzv. vrijednost kredita za svaki red čekanja: ako je port zauzet drugim saobraćajem, kredit raste (idleSlope), a pri prijenosu podataka kredit opada (sendSlope). Prijenos je moguć samo kada je kredit nenegativan. Ako ostane pozitivan nakon slanja, a novi paketi nisu u redu, vrijednost se resetuje na nulu [5].

Na slici ispod je prikazano ponašanje CBS oblikovača kroz vrijeme. U gornjem dijagramu vidimo promjenu vrijednosti kredita – kada postoji konflikti saobraćaj, kredit raste (idleSlope), a kada je prijenosu omogućen, kredit opada (sendSlope). Linija "TX allowed" označava da li je prijenos dozvoljen, što se dešava kada je kredit veći ili jednak od 0. "TX status" prikazuje stvarni prijenosu, koji zavisi od toga da li u redu ima okvira za slanje ("Frames queued"). Kada se pojavi konflikti saobraćaj, prijenosu nije dozvoljen, a kredit počinje da raste. Nakon završetka konflikta, prijenosu se aktivira dok god ima okvira i dok je kredit pozitivan. Ovo ponašanje osigurava ravnomjernu raspodjelu propusnosti i predvidljivost u prijenosu podataka.



Slika 2: Prikaz rada CBS-a [5]

4.1.2 Prekidanje okvira

Prekidanje okvira (*eng: Frame preemption*), definisan standardom IEEE 802.1Qbu, predstavlja naprednu funkcionalnost koja omogućava prekid prijenosa Ethernet okvira u realnom vremenu. Ova tehnika se koristi kako bi se značajno smanjila zaštitna zona (*eng: guard band*) koja prethodi vremenskom prozoru rezervisanom za prioritetni saobraćaj. Kada okvir ne može biti u potpunosti prenesen unutar raspoloživog vremena, njegov prijenos se pauzira na kraju vremenskog prozora, a zatim nastavlja na početku narednog prozora kada su vrata (gate) za tu klasu otvorena.

Zbog zahtjeva da najmanji ispravan Ethernet okvir ima 64 bajta, a maksimalna express veličina je 63 bajta, frame preemption omogućava da se guard band smanji na ukupno 127 bajta. Time se postiže efikasnija iskorištenost mrežnog kapaciteta bez ugrožavanja vremenskih zahtjeva za visoko prioritetni saobraćaj [5].

4.1.3 Vremenska sinhronizacija

Osnova TSN-a je uspostavljanje zajedničke percepcije vremena između svih uređaja u mreži. Tek tada uređaji mogu obavljati vremenski osjetljive zadatke sinhronizovano i tačno u predviđenom trenutku. Ovo se postiže korištenjem protokola za precizno vrijeme (PTP) (*eng: precision time protocol*), koji omogućava sinhronizaciju i usklađivanje frekvencije mrežnih uređaja s preciznošću manjom od jedne mikrosekunde. PTP je definisan standardom IEEE 1588, a verzija koja se koristi u TSN-u je PTPv2, uz IEEE 802.1AS i 802.1ASRev profile.

U jednoj PTP mreži, uređaji se automatski organizuju u hijerarhiju sinhronizacije pomoću algoritma za izbor najboljeg glavnog sata BMCA (*eng: Best master clock algorithm*). Uređaj s najkvalitetnijim internim satom postaje tzv. grandmaster (GM) i služi kao referenca za sve ostale u mreži. Ova organizacija formira tzv. PTP domen – dio mreže u kojem su svi satovi usklađeni s GM-om. Čak i uređaji koji nisu PTP-kompatibilni, poput običnih rutera i svičeva, mogu biti dio ove mreže. U drugoj, informacije o vremenu neprekidno se prijenose nizvodno od grandmaster uređaja. To se dešava između parova PTP portova, gdje jedan port u "master" stanju šalje vremenske podatke, a drugi u "slave" stanju ih prima i sinhronizuje svoj sat prema njima [7].

4.2 Ethernet switch

Za razliku od tradicionalnog Ethernet-a koji koristi čvorište (hub) i polu-dupleks veze, Switched Ethernet koristi mrežne prekidače (switch-eve) koji omogućavaju puni dupleks, to jeste istovremeni prijenos i prijem podataka. Dok hub prosljeđuje svaki paket svim čvorovima u mreži, switch prijenosi podatke isključivo ciljanom uređaju na osnovu MAC adresa koje održava u svojoj adresnoj tabeli. Iako pretraga tabele može unijeti minimalno kašnjenje, ono je najčešće zanemarivo.

Switched Ethernet omogućava paralelne komunikacije između više čvorova, smanjuje kolizije, olakšava upravljanje saobraćajem i omogućava niža i stabilnija end-to-end kašnjenja. Zahvaljujući niskoj latenciji i jitteru, skalabilnosti, jednostavnom održavanju i mogućnosti izolacije tokova, ova tehnologija se pokazala pogodnom za TSN sisteme [8].

Dolazni okvir prvo prolazi kroz Fizički kodirajući podsloj (PCS) (*eng: Physical Coding Sublayer*), zadužen za serijalizaciju, kodiranje i taktno usklađivanje. Slijedi prolazak kroz sloj kontrole pristupa mediju (MAC) (*eng: Media Access Control*) sloj, koji prepoznaje valjan okvir, odbacuje oni koji su neispravni i prosljeđuje ga dalje ka prekidačkom jezgru. U switching sistemu, okvir se smješta u strukturu virtualnog redoslijednog baferovanja izlaza (VOQ) (*eng: Virtual Output Queuing*), gdje se bafereju okviri po izlaznim portovima. Prekidačka matrica uspostavlja dinamičke veze između ulaza i izlaza, a arbiter (*eng: scheduler*) određuje redoslijed prijenosa. Na izlazu, MAC i PCS ponovo pripremaju okvir za transmisiju. Ovaj dizajn se često realizuje na FPGA platformama, gdje su PCS i MAC funkcije implementirane kao fiksna logika, a switching jezgro ostaje programabilno [5].

U cilju povećanja propusnosti i smanjenja kašnjenja, koristi se CIOQ (*eng: Combined Input and Output Queuing - spregnuto redoslijedno baferisanje ulaza i izlaza*) arhitektura. Ona eliminiše zagušenja pomoću VOQ sistema i centralizovanog arbitra, koji efikasno raspoređuje prijenose ka izlazima. CIOQ je posebno pogodna za TSN jer omogućava precizno zakazivanje, nisku latenciju i integraciju funkcionalnosti poput vremenski baziranih oblikovača i determinističkih scheduler-a, čime postaje osnovna platforma za realizaciju vremenski osjetljivih mrežnih sistema [5].

5 Postojeća rješenja

U savremenim telekomunikacijskim mrežama, osiguravanje visokog kvaliteta usluge (QoS) postaje obaveza, posebno za aplikacije koje zahtijevaju determinističku komunikaciju sa malim kašnjenjem i visokom pouzdanošću. U tom kontekstu, Time-Sensitive Networking (TSN) se pojavljuje kao ključni skup standarda, razvijen kao evolucija standardnog Ethernet, s ciljem upravo zadovoljavanja ovih strogih QoS zahtjeva na drugom sloju mreže. Značaj TSN tehnologije ogleda se u njenoj sposobnosti da pruži garancije performansi, što je predmet proučavanja mnogih istraživanja i analiza [1],[3]. Ovaj rad razmatra osnovne koncepte i tehničke komponente TSN-a koje omogućavaju pružanje naprednog kvaliteta usluge.

Jedan od temeljnih aspekata TSN-a je precizna vremenska sinhronizacija svih čvorova u mreži, najčešće implementirana putem protokola poput IEEE 802.1AS, što je osnova za koordinisano upravljanje saobraćajem. Pored sinhronizacije, TSN uvodi sofisticirane mehanizme za oblikovanje i raspoređivanje mrežnog saobraćaja, kao što su Time-Aware Shaper (TAS) specificiran u IEEE 802.1Qbv standardu, koji omogućava rezervaciju vremenskih slotova za kritični saobraćaj. Dodatno, mehanizmi poput prekidanja prijenosa okvira (frame preemption - IEEE 802.1Qbu) i redundantnosti (npr. IEEE 802.1CB) doprinose smanjenju latencije za prioritetne podatke i povećanju ukupne pouzdanosti mreže, čineći TSN pogodnim za industrijsku automatizaciju i druge zahtjevne aplikacije [2],[4][5].

5.1 Mjerenje ključnih metrika

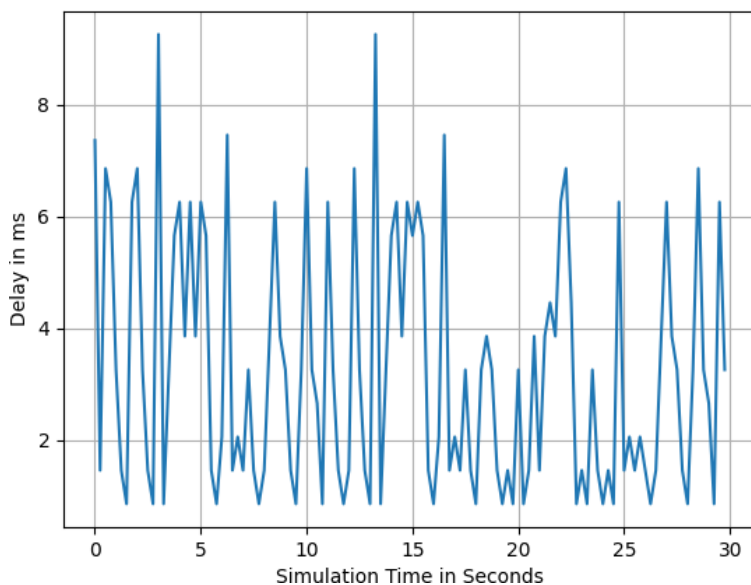
Za svaki eksperimentalni scenario pratit će se i analizirati sljedeće metrike:

- **Kašnjenje (latency)** : je vrijeme koje protekne od početka neke radnje do njenog završetka. U mrežama, latencija predstavlja vrijeme koje je potrebno da paket bude isporučen od izvora do odredišta. Također se može koristiti za označavanje vremena povratnog kašnjenja (round-trip delay) [4].
- **Varijacija kašnjenja (jitter)** : je pojam koji označava razlike u latenciji između određenih mjerenja. Drugim riječima, predstavlja varijaciju latencije i koristi se za procjenu stabilnosti kvaliteta mrežne veze. Ukoliko je jitter nizak, mrežna veza se smatra stabilnijom i predvidljivijom. Jitter se može smanjiti do određene granice, a da krajnji korisnik ne primijeti dodatna kašnjenja [4].
- **Propusnost (throughput)** - predstavlja maksimalnu količinu saobraćaja (podataka) koja može biti uspješno prenesena s kraja na kraj u jedinici vremena.

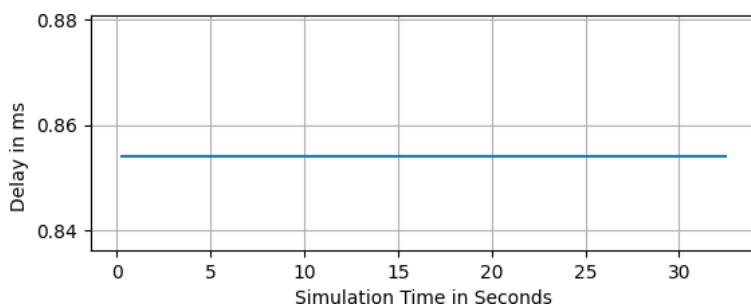
Harri Laine sa Tehničkog Univerziteta Danske (DTU) je 2015. godine u radu [4], koji se bavi simulacijom Time-Sensitive Networking - a (TSN), predstavio razvoj samostalnog simulatora. U ovom radu implementiran je simulator u Javi koji modelira ključne TSN mehanizme definisane standardima IEEE 802.1Qbv (Time-Aware Shaper - TAS), IEEE 802.1Qav (Credit-Based Shaper - CBS) i IEEE 802.1Qbu (Frame Preemption).

Simulator je dizajniran da učitava mrežne konfiguracije i karakteristike poruka iz fajlova, simulira prijenos podataka uzimajući u obzir prioritete i TSN pravila (poput zaštićenih prozora i oblikovanja saobraćaja), te da evaluiira performanse mjerenjem latencije i jitter-a. Zaključeno je da TSN mehanizmi, a posebno TAS sa svojim zaštićenim prozorima, teoretski omogućavaju postizanje stabilnog i niskog kašnjenja potrebnog za vremenski kritične aplikacije, potvrđujući potencijal TSN-a za mreže koje podržavaju različite tipove saobraćaja na standardnom Ethernetu.

Dennis Krummacker i Luca Wendling su 2020. godine u svome radu [1] opisali implementaciju Time-Aware Shaper (TAS) mehanizma (IEEE 802.1Qbv) unutar široko korištenog mrežnog simulatora ns-3. Njihov rad je bio motivisan nedostatkom dostupnih TSN simulacionih alata za ns-3. Implementacija uključuje upravljanje redovima čekanja, filter za klasifikaciju paketa, mehanizam kontrole propuštanja ("gates") zasnovan na listi kontrole (GCL) i algoritam stroge prioritizacije za odabir prijenosa. Validacija kroz testne scenarije potvrdila je da njihov TAS modul ispravno funkcioniše, osiguravajući da zakazani saobraćaj ima predvidljiv prijenos sa niskim kašnjenjem i varijacijom kašnjenja (jitter).



Slika 3: Prikaz kašnjenja bez aktivnog rasporeda [1]



Slika 4: Prikaz kašnjenja sa aktivnim rasporedom [1]

Detalje topologije, korištenih standarda, protokola i sami izgled simulirane mreže koji će biti implementirani će se prikazati u praktičnom dijelu rada koji će biti rađen u mrežnom simulatoru ns-3 (*engl. network simulator*). U okviru simulacije, mjerit će se latencija, jitter i propusnost kako bi se procijenile performanse mreže i "ocijenile" QoS karakteristike u različitim uslovima opterećenja.

6 Zaključak

Vremenski osjetljivo umrežavanje (*eng: Time-Sensitive Networking*) (TSN) predstavlja revolucionarnu tehnologiju koja omogućava determinističku komunikaciju u realnom vremenu, pri čemu zadovoljava stroge zahtjeve Industrije 4.0. Kroz preciznu vremensku sinhronizaciju, napredne mehanizme zakazivanja saobraćaja, te metode za osiguravanje pouzdanosti, TSN pruža temelj za izgradnju fleksibilnih i efikasnih mrežnih sistema.

Iako proces standardizacije i široka dostupnost kompatibilnog hardvera još uvijek predstavljaju izazove, TSN-ova sposobnost integracije s postojećim Ethernet infrastrukturama i podrška za različite vrste saobraćaja čine ga ključnim elementom za buduće automatizirane sisteme. Kontinuirani razvoj TSN standarda i povećanje primjene TSN-a u industrijskim i komercijalnim okruženjima ukazuju na svijetlu budućnost ove tehnologije, koja će značajno doprinijeti unaprijeđenju skalabilnosti, pouzdanosti i performansi mreža u raznim sektorima.

Zaključno, TSN predstavlja temeljnu tehnologiju za ispunjenje sve strožih zahtjeva moderne mrežne komunikacije. Njegov razvoj i primjena direktno doprinose evoluciji ka inteligentnim, autonomnim i vremenski preciznim sistemima koji čine srž Industrije 4.0 i šire.

Popis slika

1	<i>Prikaz rada TAS-a [1]</i>	8
2	<i>Prikaz rada CBS-a [5]</i>	9
3	<i>Prikaz kašnjenja bez aktivnog rasporeda [1]</i>	13
4	<i>Prikaz kašnjenja sa aktivnim rasporedom [1]</i>	13

Popis tabela

1	<i>Tabelarni prikaz klasifikacije tehničkih komponenata TSN-a [4],[5]</i>	5
---	---	---

Literatura

- [1] L. W. Dennis Krummacker, *Tsn simulation: Time-aware shaper implemented in ns-3*, Dec. 2020.
- [2] J. L. Messenger, *Time-sensitive networking: An introduction*, Jun. 2018.
- [3] N. Finn, *Introduction to time-sensitive networking*, Jun. 2018.
- [4] H. Laine, *Simulating Time-Sensitive Networking*. Technical University of Denmark, 2015.
- [5] A. Pruski, “Time sensitive networking ethernet:architecture, implementation and applications,” Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, 2022.
- [6] A. Gilchrist, *Industry 4.0*. Bangken, Nonthaburi, Thailand: Springer, 2016, ISBN: 978-1-4842-2046-7.
- [7] S. Waldhauser, B. Jaeger, and M. Helm, “Time synchronization in time-sensitive networking,” *Network*, vol. 51, pp. 51–56, 2020.
- [8] D. Alibegović and L. Smajlović, *Time sensitive network (tsn) configurations on network performance in real-time communication*, 2022.