



## II. KLASA SAOBRAĆAJA U TTEETHERNET MREŽI

Kao što je rečeno u uvodu, u TTEthernet mreži postoje četiri vrste saobraćaja koji mogu da koegzistiraju zajedno ili pojedinačno, u zavisnosti od potrebe. Bitno je napomenuti da u slučaju komunikacije koja se odvija prema determinističkoj (engl. *Time-Triggered*) paradigmi, pored TT paketa u mreži se prenose i PCF paketi koji imaju ulogu uspostavljanja i održavanja sinhronizacije između uređaja u mreži.

### A. Saobraćaj TT paketa

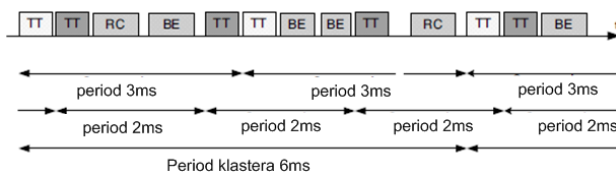
Uloga TT saobraćaja je da učini komunikaciju u mreži strogo determinističkom, tj. da se tačno zna u kojem trenutku je poruka poslata sa predajnika i kada prijemnik može da je očekuje. Ovaj tip saobraćaja je primarni u TTEthernet mrežama i ima viši prioritet u odnosu na RC i BE saobraćaj [2]. TT komunikacija se odvija tek nakon što je uspostavljena sinhronizacija između svih uređaja u mreži koji pripadaju istom sinhronizacionom domenu.

Kao što smo ranije rekli, trenuci slanja i prijema paketa su unaprijed poznati i infomacije o njima su lokalno smještene u tzv. tabele rasporeda (eng. *Schedule tables*) koje posjeduje svaki ES [5].

Komunikacija sa ostatkom mreže se odvija preko TTEthernet kontrolera. Ovaj kontroler ima dva osnovna porta: jedan za povezivanje sa host računarom i drugi za povezivanje sa *switch*-em. Preko kontrolera se vrši TT komunikacija, kao i ET (*Event-Triggered*) komunikacija prema Ethernet standardu [4]. U slučaju bezbjednosno-kritičnih aplikacija, gdje se koriste redundantni *switch*-evi, TTEthernet kontroler ima još jedan ili dva dodatna porta prema tim *switch*-evima. Dodatni (redundantni) *switch*-evi se uvode iz razloga da bi se komunikacija u mreži nastavila nesmetano odvijati i u slučaju otkaza jednog od njih [5].

TTEthernet mreža se sastoji od ES i *switch*-eva međusobno povezanih *full-duplex* fizičkim linkovima. U većim mrežama, ovi uređaji su grupisani u klaster. Podaci se prenose u paketima, a poruke u *payload* sekciji paketa [5]. Komunikacija između dva ili više ES se definiše pomoću virtuelnih linkova [6] koji su jednosmjerni i definišu se u smislu  $ES_i \rightarrow [ES_{i+1}, ES_{i+2}, \dots, ES_n]$ , tj. može postojati jedan predajnik i jedan ili više prijemnika. U slučaju potrebe za dvosmjernom komunikacijom između dva ES, definišu se dva virtuelna linka  $ES_i \rightarrow ES_j$  i  $ES_j \rightarrow ES_i$ .

Jedan od najbitnijih problema komunikacije u TTEthernet mreži je kreiranje rasporeda slanja paketa koji pripadaju determinističkom tipu saobraćaja. Primjer jednog rasporeda slanja poruka je prikazan na Sl. 2.



Sl. 2. Primjer rasporeda slanja paketa u TTEthernet mreži [2].

Kao što se vidi sa Sl. 2, paketi su raspoređeni unutar perioda klastera koji u našem slučaju traje 6 ms. Standardni Ethernet paketi koji spadaju u BE saobraćaj se prenose samo ako link u posmatranom trenutku nije zauzet od strane TT ili RC saobraćaja. Period klastera se bira kao najmanji zajednički sadržilac perioda TT virtuelnih linkova koji učestvuju u komunikaciji [7], koji u našem primjeru iznose 2 ms i 3 ms. U toku komunikacije period klastera se periodično ponavlja, tj. čitava TT komunikacija se odvija prema rasporedu paketa definisanom u periodu klastera.

Ako je data poruka poslata u trenutku  $t_{send}$ , onda se ta poruka na prijemnim ES očekuje u intervalu  $(t_{send} + d_{min}, t_{send} + d_{max})$ , gdje je  $d_{min}$  minimalno, a  $d_{max}$  maksimalno kašnjenje posmatrane poruke. Razlika između ova dva kašnjenja predstavlja *jitter* kanala. Inače, *jitter* je statički parametar jer su obično parametri  $d_{min}$  i  $d_{max}$  dati u parametrizaciji prenositeljskog kanala. Ova osobina je veoma bitna, jer osigurava ograničeno kašnjenje koje treba imati u vidu pri kreiranju rasporeda slanja paketa [4].

Pored perioda, bitni parametri TT paketa su njegov ofset i dužina. Prema ovim činjenicama, parametre TT paketa za posmatrani link možemo predstaviti pomoću sledeće formule [2]:

$$f_i^{[v_k \rightarrow v_l]} = \{f_{i(\text{period})}, f_{i(\text{offset})}, f_{i(\text{trajanje})}\} \quad (1)$$

gdje je  $f_i$  posmatrani paket, a  $[v_k \rightarrow v_l]$  jednosmjerni virtuelni link između uređaja  $v_k$  i  $v_l$ . Kao što je simbolično prikazano u (1), period i trajanje paketa je već unaprijed poznato, a kreiranje ofseta paketa je zadatak tzv. *scheduler*-a [2] koji ima ulogu u kreiranju rasporeda TT paketa.

### B. Saobraćaj RC paketa

Da bi se odvijao RC saobraćaj u TTEthernet mreži, uređaji ne moraju biti međusobno sinhronizovani. Pri prenosu RC paketa unaprijed je poznato minimalno rastojanje između susjednih paketa. Ovaj parametar se naziva BAG (engl. *Bandwidth Allocation Gap*). Ukoliko se ukaže mogućnost za preopterećenje linka, određeni broj RC paketa se odbacuje da se to ne dogodi. Po prioritetu, RC paketi su na nižem nivou od paketa TT saobraćaja [8, 11].

Kao i kod TT saobraćaja, RC virtuelni linkovi su takođe jednosmjerni. Paket RC tipa može se opisati preko formule [2]:

$$f_i^{[v_k \rightarrow v_l]} = \{f_{i(\text{period})}, f_{i(\text{trajanje})}\} \quad (2)$$

gdje su značenja elemenata analogna kao u (2). Prema [11], obično su periodi RC virtuelnih linkova između 1 ms i 128 ms.

### C. Saobraćaj ET paketa (BE saobraćaj)

Ovaj tip saobraćaja predstavlja standardni Ethernet saobraćaj [8]. Za razliku od TT saobraćaja kod koga su trenuci slanja i prijema paketa strogo vremenski definisani, kod BE saobraćaja slanje paketa (ET paketa) se vrši stihijski [4].

Ovaj tip saobraćaja ima najniži prioritet u TTEthernet mreži i on se odvija samo u slučaju da link nije zauzet od strane drugih tipova saobraćaja. Ukoliko se inicira slanje

TT paketa za vrijeme dok je slanje ET paketa u toku, ET paket se skladišti u baferu *switch*-a, njegovo slanje se zaustavlja, šalje se TT poruka, te se nastavlja sa slanjem ET poruke kada link ponovo postane slobodan. TT poruke se ne skladište u *switch*-u, ali mogu biti zakašnjene na strani ES za nekoliko  $\mu$ s ako se radi o mreži brzine 100 Mb/s. Za mreže brzine 1Gb/s ova kašnjenja su kraća. Ukoliko posmatrani ES treba da komunicira samo putem BE saobraćaja, onda nema potrebe za korištenjem TTEthernet kontrolera, nego se može koristiti i standardni Ethernet kontroler [4].

### III. SINHRONIZACIJA U TTEETHERNET MREŽI

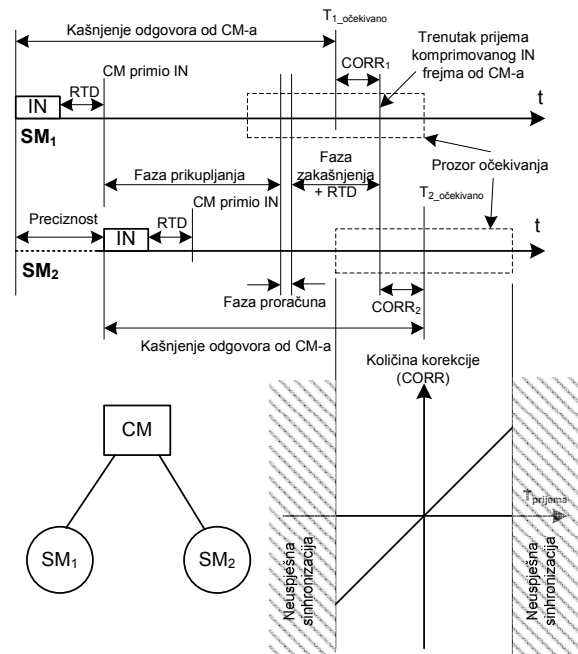
U determinističkim mrežama posebna pažnja se posvećuje sinhronizaciji. Pošto se sve TT poruke u TTEthernet mreži razmjenjuju u precizno definisanim vremenskim trenucima, potrebno je da uređaji imaju isti pojam o vremenu, tj. da budu međusobno sinhronizovani. U uspostavljanju i održavanju sinhronizacije ulogu imaju PCF paketi, pomoću kojih se razmjenjuju informacije o korekcijama časovnika uređaja koji komuniciraju determinističkim putem. PCF paketi se dijele u tri grupe: CS (engl. *Coldstart*), CA (engl. *Coldstart Acknowledge*) i IN (engl. *Integration*) frejmovi. Ako uređaji u TTEthernet mreži komuniciraju deterministički, svaki od njih ima jednu od uloga: SM (engl. *Synchronization Master*), SC (engl. *Synchronization Client*), ili CM (engl. *Compression Master*). Obično se uloga CM-a dodjeljuje *switch*-u, a SM-a ES-u, iako standard podržava i drugačije konfiguracije. Ulogu SC-a može imati i ES i *switch* [9, 10]. SM inicira proces sinhronizacije, dok PCF paketi generisani od strane CM-a određuju korekcije časovnika u uređajima koji ih konzumiraju. SC nema posebnu ulogu u procesu sinhronizacije, nego treba samo da prima informacije o korekcijama sopstvenog časovnika [8].

Proces sinhronizacije odvija se u sledećim koracima [2, 8]:

- SM šalje CS frejm CM-u koji se dalje prosljeđuje svim ostalim uređajima u mreži.
- Kada ostali SM prime CS, oni generišu i šalju CA frejm CM-u, koji ga dalje prosljeđuje ostalim uređajima. Uređaji sa SC ulogom ne generišu nikakav saobraćaj.
- Nakon prijema CA frejma, SM generišu IN frejmove i šalju ih CM-u. Što se tiče sinhronizacije, ovim korakom započinje integracija posmatranog SM-a sa ostatkom mreže.
- CM prikuplja IN frejmove od svih SM u mreži, te generiše novi, tzv. komprimovani IN frejm koji šalje svim ostalim SM i SC u mreži.
- Na osnovu razlike očekivanog trenutka prijema komprimovanog IN frejma i stvarnog trenutka njegovog prijema, SM i SC vrše korekcije svojih časovnika. Takođe, i CM vrši korekciju sopstvenog časovnika korištenjem komprimovanog IN frejma.

Kao što je navedeno, korekcija lokalnih časovnika vrši se pod uticajem IN frejmova. Ovaj proces je ilustrovan na Sl. 3 [8], gdje posmatramo slučaj sa 2 SM i jednim CM.

Ukoliko je komprimovani IN frejm primljen od CM-a u očekivanom vremenskom intervalu (prozor očekivanja) i ako je on nastao pod uticajem dovoljnog broja IN frejmova generisanih od strane SM uređaja (engl. *Threshold*), taj komprimovani IN frejm će se koristiti u svrhe korekcije lokalnog časovnika uređaja koji ga konzumira. Ovim je ostvaren jedan stabilan sinhronizacioni ciklus. U suprotnom, taj IN frejm se odbacuje i ne vrši se korekcija lokalnog časovnika. Samim tim, posmatrani uređaj gubi sinhronizaciju.



Sl. 3. Princip korekcije časovnika SM-a.

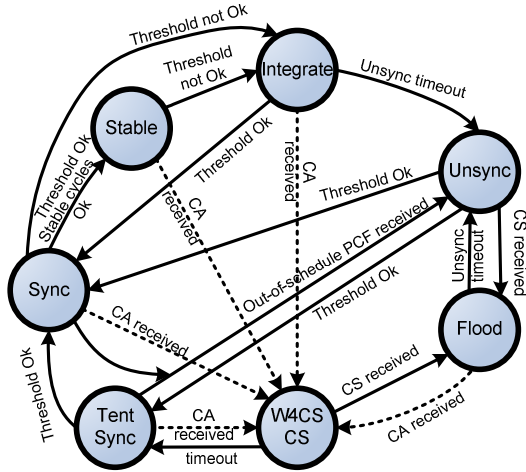
Sa Sl. 3. možemo primjetiti da časovnik SM<sub>2</sub> je sporiji od časovnika SM<sub>1</sub> za vrijednost preciznosti. Po definiciji, preciznost predstavlja razliku između najbržeg i najsporijeg časovnika u mreži [8, 9]. Sa aspekta SM-a, očekivani trenutak prijema komprimovanog IN frejma od CM-a je:

$$T_{očekivano} = T_{predaje} + RTD + D_{prikupljanja} + D_{proracuna} + D_{zakašnjenja} + RTD \quad (3)$$

gdje parametri  $T$  predstavljaju momente, parametri  $D$  kašnjenja, a  $RTD$  kašnjenje propagacije (engl. *Round Trip Delay*). Nakon prijema prvog IN frejma od nekog SM-a, u CM-u započinje faza prikupljanja IN frejmova od svih SM uređaja u mreži. Sledeća je faza proračuna, gdje CM izračunava srednju vrijednost vremena pristizanja IN frejmova od SM uređaja, te faza zakašnjenja. U ovoj fazi se emituje komprimovani IN frejm prema SM uređajima, ali zakašnjen za vrijednost dobijenu u fazi proračuna. Razlika između očekivanog i stvarnog trenutka prijema komprimovanog IN frejma određuje količinu korekcije posmatranog lokalnog časovnika ( $CORR_1$ ,  $CORR_2$ ). Na osnovu ovih vrijednosti SM<sub>1</sub> zna da treba da poveća vrijednost svog lokalnog časovnika za  $CORR_1$ , dok SM<sub>2</sub> treba da ga umani za vrijednost  $CORR_2$ . Kompletan ovaj proces se odvija periodično u periodima koji se nazivaju

integracioni ciklusi [8]. U slučaju idealnih časovnika, momenti prispijeća IN frejmova na CM su isti, tako da je njihova srednja vrijednost kao i  $D_{zakašnjenja}$  jednako 0. Samim tim dobija se da je  $CORR_1 = CORR_2 = 0$ .

U zavisnosti od uloge uređaja, svaki od njih radi prema ustanovljenoj mašini stanja. Shodno trenutnom stanju u kojem se uređaj nalazi, vrši se procesiranje ili odbacivanje primljenog PCF frejma u zavisnosti od njegovog tipa (CS, CA ili IN). U ovom radu analizana je mašina stanja SM-a i njena sinhrona stanja (Sl. 4). U ovim stanjima SM vrši slanje IN frejmova, te korekciju lokalnog časovnika u zavisnosti od primljenog komprimovanog IN frejma.



Sl. 4. Pojednostavljena mašina stanja SM-a [8].

Prvo sinhrono stanje je Tentative\_Sync. Ovo je u stvari privremeno stanje, jer u njemu SM nikad ne ostaje duži vremenski period. Ukoliko je ostvaren dovoljan broj stabilnih sinhronizacionih ciklusa, vrši se tranzicija u više sinhrono stanje (Sync), dok u suprotnom SM gubi sinhronizaciju (prelazi u Unsync stanje). Istim putem se vrši prelaz iz Sync u Stable stanje, koje označava da je sinhronizacija posmatranog uređaja sa ostatkom mreže stabilna. U slučaju neuspješne sinhronizacije vrši se tranzicija iz stanja Stable u Integrate. Ako se za vrijeme Integrate stanja primi odgovarajući IN frame prije Unsync timeout-a, moguć je prelaz direktno u Sync stanje [2, 8].

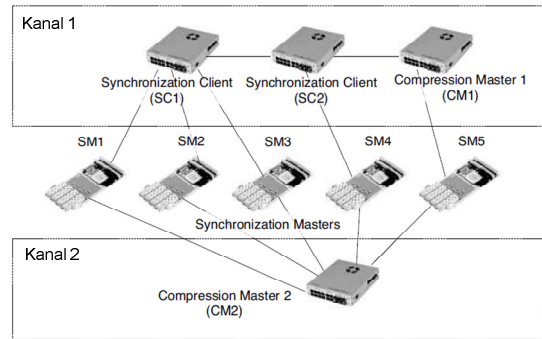
#### IV. OTPORNOST NA GREŠKE KOD TTEETHERNET MREŽA

Pošto se determinističke mreže prevashodno koriste u bezbjednosno-kritičnim aplikacijama, posebna pažnja se posvećuje postizanju otpornosti na greške. U ovakvim aplikacijama potrebna radnja mora da se izvrši bez obzira da li je neka komponenta u mreži otkazala. Obično se u ovakvim situacijama uvode redundantni switch-evi, a TTEthernet kontroleri koji se tada koriste imaju po dva ili tri porta prema switch-evima, u zavisnosti od stepena redundanse.

Na Sl. 5 prikazana je topologija sa stepenom redundanse 2, tj. postoje dva kanala od kojih je drugi redundantni. Možemo primjetiti da svaki od kanala posjeduje switch koji obavlja funkciju CM-a, iz razloga da bi se

sinhronizacija između uređaja mogla nastaviti nesmetano odvijati i nakon otkaza switch-a iz nekog od kanala. Iz istog razloga se teži da u mreži postoji više od jednog ES-a koji obavlja ulogu SM-a. Što se tiče SC-a, oni su manje bitni sa aspekta otpornosti na otkaze, jer su oni pasivne komponente i ne igraju nikakvu ulogu u uspostavljanju i održavanju sinhronizacije [10].

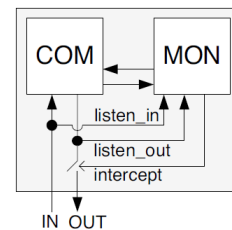
Sa aspekta otpornosti na otkaze, TTEthernet mreža može da bude konfigurisana tako da toleriše otkaz jednog (single-failure) ili dva (double-failure) uređaja bez obzira da li se radi o ES-u ili switch-u [10].



Sl. 5. Primjer redundantne konfiguracije u TTEthernet mreži [2].

Uređaji u ovakvim mrežama se razdvajaju na cjeline koje su izolovane u slučaju otkaza neke komponente koja se u njoj nalazi. To su tzv. FCR (engl. *Fault Containment Regions*). U slučaju otkaza neke od komponenata u FCR, samo ta cjelina prestaje da funkcioniše, dok ostatak mreže korektno radi. Iz ovoga zaključujemo da su FCR u stvari nezavisne cjeline u TTEthernet mreži. Uređaji u istom FCR obično dijele jedan isti resurs kao što je npr. napajanje, izvor tačnog vremena i slično [2].

Svaka greška u uređaju (nezavisno da li se radi o switch-u ili ES-u) uzrokuje nevalidan ili izgubljen paket, što je vidljivo na interfejsima posmatranog uređaja. Jedan od vidova povećanja pouzdanosti uređaja u TTEthernet mreži je korištenje tzv. visokopouzdanog dizajna, čiji je jedan od aspekata prikazan na Sl. 6.



Sl. 6. COM/MON konfiguracija u visokopouzdanom dizajnu [8].

Visokopouzdanost dizajn podrazumijeva korištenje 2 jedinice na ulazu/izlazu uređaja: komander (COM) i monitor (MON). Ovakav dizajn se može primjeniti i na switch i na ES. COM i MON rade u repliciranom režimu, tj. primaju iste podatke na ulazu, u njima se izvršava ista operacija nad ulaznim signalima, te na izlazu treba da daju isti rezultat. U slučaju da COM ili MON generišu različite rezultate, to znači da je došlo do greške, te MON intercept signalom prekida generisanje rezultata na izlazu posmatrane komponente [8].

## V. POREĐENJE TTEETHERNET I STANDARDNIH ETHERNET MREŽA

Imajući u vidu sam koncept TTEthernet mreža, tj. da su precizno određeni trenuci slanja paketa, kao i vremenski intervali u kojima se može očekivati njihov prijem na prijemnoj strani, zaključujemo da ovakve mreže predstavljaju optimalan izbor za sisteme koji rade u realnom vremenu. Za razliku od standardnih Ethernet mreža, gdje može doći do gubljenja određene količine paketa, kod determinističkih mreža ne smije doći do ovakve situacije, pogotovo ako se radi o bezbjednosno-kritičnim aplikacijama kao što je npr. u avionskoj industriji. Kod determinističkih mreža kao što je TTEthernet, gdje se prenose poruke različitih prioriteta (engl. *mixed-critical* mreže) ne smije doći do odbacivanja TT paketa jer se njima prenose najbitnije informacije neophodne za korektno funkcionisanje posmatranog sistema koji radi u realnom vremenu. Takođe, jednostavno je odrediti maksimalna kašnjenja determinističkog tipa poruka, u odnosu na kašnjenja poruka u standardnim Ethernet mrežama koja su nepredvidljiva, tj. ne postoje garancije u tom pogledu [2, 3, 8].

Kod TTEthernet mreža, jedan od glavnih nedostataka je fleksibilnost. Raspored slanja paketa koji je kreiran za jednu konfiguraciju mreže ne može se dinamički mijenjati. To znači da je nemoguće dodavanje nove komponente u mrežu koja će moći komunicirati sa ostalim komponentama po determinističkoj paradigmi, kao ni uvođenje dodatne aplikacije na postojeću komponentu koja bi trebala da komunicira sa ostatkom mreže na spomenuti način. Da bi se to ostvarilo, pri dodavanju nove komponente ili uvođenju nove aplikacije potrebno je da se kreira novi raspored slanja paketa što nekad može da bude komplikovan proces u zavisnosti od broja virtuelnih linkova između komponenata koji treba da se kreira. Takođe kod TTEthernet mreže posebnu pažnju treba obratiti na algoritme kojima se vrši sinhronizacija, jer deterministička komunikacija nije moguća ukoliko tačnost i otpornost na greške ovih mehanizama nije na odgovarajućem nivou [3]. Sa aspekta cijene održavanja, veći su troškovi održavanja sistema zatvorenog tipa u koje spada i TTEthernet [1].

## VI. ZAKLJUČAK

TTEthernet mreže imaju niz prednosti u odnosu na standardne Ethernet mreže u bezbjednosno-kritičnim aplikacijama. Jedna od glavnih prednosti je njihov sam koncept, tj. tačno se zna kada će određeni paket podataka biti poslat, a kada se očekuje njegov prijem na prijemnoj strani, što standardne Ethernet mreže ne podržavaju. Ispunjenje ovog zahtjeva je od izuzetnog značaja u spomenutim primjenama. Takođe, u TTEthernet mrežama, postoje mehanizmi osiguravanja visoke pouzdanosti kao što su redundantne konfiguracije i visoko-pouzdan dizajn spomenut u radu. Bitna prednost TTEthernet mreža je što

se standardni saobraćaj može odvijati u slučaju da link nije zauzet od strane determinističkog tipa saobraćaja.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je djelimično finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije, na projektu tehnološkog razvoja broj: III\_044009\_2.

## LITERATURA

- [1] TTEthernet – A Powerful Network Solution for All Purposes, [http://www.ttagroup.org/ttethernet/doc/TTEthernet\\_Article.pdf](http://www.ttagroup.org/ttethernet/doc/TTEthernet_Article.pdf) [pristupljeno 26.07.2016]
- [2] Roman Obermaisser, *Time-Triggered Communication*, CRC Press, New York, USA, 2012.
- [3] Stefan Poledna, Herman Kopetz, Wilfried Steiner, "Deterministic system design with Time-Triggered technology", Microelectronic Systems Symposium (MESS), 2014
- [4] Herman Kopetz, Astrit Ademaj, Petr Grillinger, Klaus Steinhammer, "The Time-Triggered Ethernet (TTE) Design", *Object-Oriented Real-Time Distributed Computing, 2005. ISORC 2005. Eighth IEEE International Symposium*, pp. 22-33, May, 2005.
- [5] Wilfried Steiner, Gunter Bauer, Brendan Hall, Michael Paulitsch, Srivatsan Varadarajan, "TTEthernet Dataflow Concept" *Network Computing and Applications, 2009. NCA 2009. Eighth IEEE International Symposium*, pp. 319-322, July, 2009.
- [6] Domitian Tamas-Selicean and Paul Pop, "Optimization of TTEthernet networks to support best-effort traffic", *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE*, 16-19 Sept. 2014, Barcelona
- [7] Ekarin Suethanuwong, "Scheduling time-triggered traffic in TTEthernet systems", *Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2012 IEEE 17th Conference*, 17-21 Sept. 2012, Krakow
- [8] Aerospace Standard SAE AS6802, 2011
- [9] Wilfried Steiner, Bruno Dutertre, "Layered Diagnosis and Clock-Rate Correction for the TTEthernet Clock Synchronization Protocol", *Dependable Computing (PRDC), 2011 IEEE 17th Pacific Rim International Symposium*, pp. 244-253, 12-14 Dec. 2011, Pasadena, CA
- [10] Bruno Dutertre, Arvind Easwaran, Wilfried Steiner, "Model-based analysis of Timed-Triggered Ethernet", Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2012 IEEE/AIAA 31st, pp. 9D2-1 - 9D2-11, 14-18 Oct. 2012, Williamsburg, VA
- [11] Aerospace Standard ARINC 664p7, 2009

## ABSTRACT

The characteristics of TTEthernet networks are described in this paper, as well as differences related to standard Ethernet networks. Principles and roles of the Time-Triggered (TT), Rate-Constrained (RC), Best-Effort (BE), and Protocol Control Frames (PCF) types of traffic are depicted, where the main focus is on TT communication which has the prime role in TTEthernet networks. Synchronization between devices, which represents the main aspect in deterministic networks is explained also. Fault-tolerant principles in deterministic networks are described. Through description of TTEthernet networks characteristics, their advantages in safety-critical applications compared to standard Ethernet networks are listed.

## Analysis of Communication Principles in TTEthernet Networks

Miladin Sandić, Ivan Velikić, Aleksandar Bilbija,  
Milena Milošević