

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Davor Munda  
**Asinhroni Ethernet v realnem času**

MAGISTRSKO DELO

PODIPLOMSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: doc. dr. Mojca Ciglarič

Ljubljana, 2016



Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje in izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.



*Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Mojci Ciglarič za pomoč, vodenje in svetovanje pri izdelavi magistrske naloge. Zahvaljujem se tudi podjetju Iskra d.d. za podporo pri meritvah za izkustveni dokaz pravilnosti modela sistema.*



## Kazalo

Povzetek	
Abstract	
1 Uvod.....	1
2 Sorodne raziskave in projekti.....	5
2.1 Linux v realnem času in Ethernet v realnem času.....	6
2.2 Standard IEC 61850.....	10
2.2.1 IEC 61850 GOOSE.....	11
2.2.2 Zahtevana zmogljivost za naprave za zaščito in vodenje v elektroenergetiki.....	13
3 Zasnova komunikacijskega sklada 61850CS in sistemska arhitektura.....	15
3.1 Izbrana strojna platforma in procesiranje v realnem času.....	15
3.1.1 RTAI.....	16
3.1.2 RTDM.....	16
3.2 Zasnova 61850CS.....	17
3.3 Implementacija 61850CS.....	19
3.4 Matematični model izračuna prenosnega časa za IEC GOOSE.....	21
3.4.1 Izračun $t_n$ .....	24
3.4.2 Izračun $t_m$ .....	25
3.4.3 Izračun $t_f$ .....	28
3.4.4 Izračun celotnega IEC GOOSE prenosnega časa.....	28
4 Vrednotenje sistema.....	31
4.1 Meritve prenosnega časa.....	31
4.1.1 Metodologija meritev.....	32
4.1.2 Rezultati.....	32
5 Sklepne ugotovitve.....	39
Literatura.....	41
Priloge.....	45
Dodatek A: seznam slik in tabel	





## Seznam uporabljenih kratic in simbolov

kratica	angleško	slovensko
<b>ADEOS</b>	adaptive domain environment for operating systems	nano (mikro) jedrni abstraktni sloj strojne opreme
<b>API</b>	application programming interface	programski vmesnik
<b>ASIC</b>	application-specific integrated circuit	aplikacijsko specifično integrirano vezje
<b>CSMA/CD</b>	carrier sense multiple access with collision detection	večtočkovni pristop z detekcijo nosilca in kolizije
<b>DFT</b>	discrete Fourier transform	diskretna Fourierjeva transformacija
<b>DMA</b>	direct memory access	neposreden dostop do pomnilnika
<b>FFT</b>	fast Fourier transform	hitra Fourierjeva transformacija
<b>FIFO</b>	first in first out	prvi noter prvi ven
<b>FPC</b>	feeder protection and control	zaščitni rele
<b>FPGA</b>	field-programmable gate array	programilno logično vezje
<b>FIR</b>	finite impulse response	končni odziv na enotin impulz
<b>GOOSE</b>	Generic Object Oriented Substation Events	Splošni objektno orientirani dogodki v razdelilnih transformatorskih postajah
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission	Mednarodna komisija za elektrotehniko
<b>IED</b>	intelligent electronic device	inteligentna elektronska naprava
<b>LAN</b>	local area network	lokalno omrežje
<b>MAC</b>	media access control	dostop do omrežnega vmesnika
<b>MMS</b>	Manufacturing Message Specification	Specifikacija za pošiljanje sporočil v industriji
<b>MMU</b>	memory management unit	pomnilniška enota
<b>MUP</b>	Multi UniProcessor	več jedrni procesor
<b>NIC</b>	network interface controller	omrežni vmesnik
<b>NRT</b>	non real-time	ne-realni čas
<b>OS</b>	operating system	operacijski sistem
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection	modulirana zgradba protokolov
<b>POSIX</b>	portable operating system interface	prenosni vmesnik operacijskega sistema
<b>RAM</b>	random-access memory	pomnilnik z naključnim dostopom
<b>RT</b>	real-time	realni čas
<b>RTAI</b>	real-time application interface	programski vmesnik v realnem času
<b>RTDM</b>	real-time driver model	model za gonilnike v realnem času
<b>RTOS</b>	real-time operating system	realnočasovni operacijski sistem
<b>SKB</b>	socket buffer	medpomnilnik za omrežno vtičnico
<b>SMV/SV</b>	Sampled Measured Values / Sampled Value	Vzorčene vrednosti
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol / Internet Protocol	protokol za krmiljenje prenosa / protokol internet
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol	nepovezovalni protokol za prenašanje paketov

**VLAN**  
**WDT**

virtual local area network  
watchdog timer

navidezno lokalno omrežje  
stražni mehanizem

**CPE**  
**RTP**

central processing unit  
electrical substation

centralna procesna enota  
razdelilna transformatorska postaja

## **Povzetek**

**Naslov:** Asinhroni Ethernet v realnem času

Industrijski Ethernet je postal standard za izgradnjo porazdeljenih sistemov v industrijskih omrežjih, kateri morajo omogočati predvidljive zmogljivosti in vzdrževalnost. Industrijske aplikacije zahtevajo časovno omejeno obdelavo, katero se zagotavlja s procesiranjem ali v mehkem ali v trdem realnem času. V okoljih, kjer je zahtevan determinističen odzivni čas aplikacij, je treba zagotoviti procesiranje v trdem realnem času. Protokoli Fieldbus so standard za povezovanje industrijskih naprav v omrežjih Ethernet. Protokoli Fieldbus za svoje delovanje zahtevajo sinhronizacijo in namenske strojne vmesnike, kar pušča prostor za alternativne, bolj splošne rešitve. To delo predstavlja načrtovanje, izvedbo in vrednotenje novega asinhronnega komunikacijskega gonilnika v trdem realnem času, poimenovanega programski vmesnik 61850CS. Programski vmesnik 61850CS je implementiran v inteligentni elektronski napravi in omogoča IEC 61850 GOOSE Ethernet komunikacijo v trdem realnem času v razdelilnih transformatorskih postajah v elektroenergetiki. Predstavljena 61850CS implementacija omogoča sočasno Ethernet komunikacijo v realnem in v ne-realnem času preko istega strojnega omrežnega vmesnika. Predstavljena tehnologija omogoča poljuben sočasni realno časovni in ne-realnočasovni Ethernet promet. Splošna izvedba komunikacijskega vmesnika omogoča uporabo aplikacijskega vmesnika na različnih arhitekturah. Predstavljena izvedba tudi izpolnjuje zahteve za industrijske Ethernet komunikacije. In še več, ker aplikacijski vmesnik 61850CS ne vpliva na CSMA/CD mehanizem, v omrežju ni več potrebe za posebnim koordinatorskim vozliščem, ki bi pošiljalo sinhronizacijski signal po omrežju, kar občutno poveča razpoložljivi čas porazdeljenega sistema.

Predstavljena rešitev je v praksi implementirana kot vmesnik API za zaščitni rele FPC 680. Rele FPC 680 je zgrajen na strojni platformi PPC440EPx z RTAI Linux operacijskim sistemom v trdem realnem času. Naprava FPC 680 je komercialni produkt podjetja Iskra d.d. in je nameščena po razdelilnih transformatorskih postajah širom sveta.

**Ključne besede:** industrijski Ethernet, realni čas, RTDM, RTnet, IEC 61850, GOOSE, razdelilna transformatorska postaja, Linux.



## **Abstract**

**Title:** Asynchronous real-time Ethernet

The Industrial Ethernet has become a way to build distributed systems in industrial networks which must provide predictable performance and maintainability. Industrial applications require time-critical processing, which can be guaranteed within soft or hard real-time environments, Where applications' responses require deterministic processing time, the hard real-time environment is requested. The Fieldbus protocols are the standard way to connect instruments on the Ethernet-based communication. Fieldbuses require synchronisation and dedicated application-specific integrated circuits, what leaves space for alternate, more common solutions. This thesis presents design, implementation, and evaluation of the novel Real-Time Driver Model asynchronous communication stack called 61850CS API. 61850CS stack is implemented in an intelligent electronic device to enable real-time IEC 61850 GOOSE Ethernet communications in electrical substations. The presented 61850CS implementation enables simultaneous flow of real-time and non-real-time Ethernet traffic over the same physical network interface controller. The same technology supports running arbitrary real-time Ethernet traffic and non real-time Ethernet traffic simultaneously and its implementation is general enough to enable an API use on different architectures and to comply with different industrial Ethernet requirements. And more, since 61850CS doesn't affect CSMA/CD mechanism, it doesn't need any master nodes, which increases the system availability.

The presented solution was implemented as an application programming interface for feeder protection and control (FPC 680) intelligent electronic device relay. Hardware platform for 61850CS was PPC440EPx microcontroller with implemented Linux Real-Time application interface RTOS. The FPC 680 is an IED commercial product by Iskra d.d. which is implemented worldwide in several substations.

**Keywords:** Industrial Ethernet, real-time, RTDM, RTnet, IEC 61850, GOOSE, electric substation, Linux.



## 1 Uvod

Industrijski Ethernet je postal standard za izgradnjo porazdeljenih sistemov v industrijskih omrežjih. Ena od zahtev za uporabo standardnih Ethernet protokolov v industrijskih okoljih je komunikacija v realnem času (RT). Za zadovoljitev časovno omejenih zahtev za industrijske aplikacije, je potrebna uporaba sistemov v mehkem ali trdem realnem času. Protokoli Fieldbus [1, 38] združeni v standard IEC 61158 so postali način povezovanja instrumentacije v industrijskih obratih tudi za Ethernet komunikacije. Vendar pa protokoli Fieldbus zahtevajo sinhronizacijo in namenska integrirana vezja (ASIC). To delo opisuje alternativno rešitev za RT Ethernet komunikacije, ki je implementirana na standardnih Ethernet vmesnikih. Cilji implementacije so bili:

- Uporaba standardnih Ethernet omrežnih vmesnikov (NIC).
- Implementacija Ethernet komunikacije v trdem realnem času znotraj običajnih asinhronih Ethernet omrežij.
- Omogočanje sočasnega prometa v realnem in v ne-realnem času preko istega omrežnega vmesnika.

Prednosti take implementacije so: nižja cena zaradi uporabe standardnih Ethernet vmesnikov, zaradi asinhronosti ni potrebe po posebnem koordinatorskem vozlišču in ni potrebe po namenskih ASIC integriranih vezjih.

Nova implementacija Etherneta v realnem času je bila realizirana znotraj IEC 61850 inteligentne elektronske naprave (IED) kot gonilnik v realnem času (RTDM). Model za gonilnike v realnem času je l. 2005 predstavil Kiszka [2]. V tem delu predstavljena implementacija gonilnika je bila poimenovana "*Asinhroni komunikacijski sklad 61850CS*" (IEC 61850 Communication Service).

Standard IEC 61850 definira komunikacijska omrežja in sisteme v razdelilnih transformatorskih postajah (RTP) v elektroenergetiki. Standard definira tri komunikacijske protokole:

- Manufacturing Message Specification (MMS) [3],
- Generic Object Oriented Substation Events (GOOSE) [3],
- Sampled Measured Values / Sampled Values (SMV/SV) [4].

Ti protokoli so lahko implementirani v omrežjih protokol za krmiljenje prenosa / protokol internet (TCP/IP) kot tudi v lokalnih omrežjih (LAN) v razdelilnih transformatorskih postajah. Protokola GOOSE in SMV/SV dodatno zahtevata komunikacijo Ethernet v realnem času.

Za realnočasovni operacijski sistem (RTOS) je bil izbran Linux programski vmesnik v realnem času (RTAI) [6]. Kljub popravkom PREEMPT\_RT [7] za Linux jedro, je RTAI še vedno aktualna izbira za realnočasovni operacijski sistem (npr. Raju in Shubhanga [9]). Zaradi izbire RTAI, je za komunikacije v realnem času bil izbran RTnet [10], vendar pa implementacija RTnet ne izpolnjuje vseh zahtev za komunikacije IEC 61850 (npr. večtočkovno oddajanje čez Ethernet<sup>1</sup>). Za izpolnitev zahtev za implementacijo protokolov MMS in GOOSE je bilo treba odpraviti pomanjkljivosti implementacije RTnet. RTnet ne podpira večtočkovnega oddajanja in njegov tunelski način delovanja za promet v ne-realnem času (NRT) blokira delovanje procesiranja v realnem času.

Za implementacijo GOOSE komunikacij v realnem času, ki omogoča sočasen promet v realnem in v ne-realnem času, preko istega omrežnega vmesnika, je bil implementiran novi programski vmesnik 61850CS. Asinhroni komunikacijski gonilnik v trdem realnem času 61850CS je robusten in zelo primeren za izpolnjevanje zahtev za komunikacije v trdem realnem času. Lahko se ga umešča v poljubna omrežja Ethernet s poljubnim številom vozlišč in deluje na standardnih omrežnih vmesnikih. Implementacija 61850CS omogoča sočasen Ethernet promet v realnem in v ne-realnem času preko istega omrežnega vmesnika in njegova splošnost omogoča uporabo programskega vmesnika (API) na različnih arhitekturah. V tem delu predstavljen komunikacijski sklad 61850CS je edinstvena tehnologija primerna za uporabo v industrijskih Ethernet omrežjih.

Zgradba nadaljnjega besedila je sledeča: v poglavju 2 so predstavljene sorodne

---

1 Multicast service.



raziskave in projekti, poglavje 3 opisuje zasnovo in obratovalno platformo za komunikacijski sklad 61850CS, v poglavju 4 so povzeti rezultati izkustvenega vrednotenja implementacije in poglavje 5 sklene predstavljeno delo.



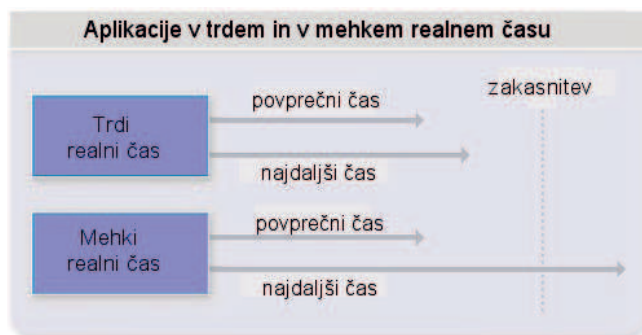
## 2 Sorodne raziskave in projekti

Sorodne raziskave in projekti predstavljene implementacije 61850CS vključujejo razširitve operacijskega sistema (OS) Linux v trdem realnem času, industrijske komunikacije v realnem času, rešitve za Ethernet v realnem času in avtomatizacijo v elektroenergetiki.

V računalništvu se termin “procesiranje v realnem času” uporablja za opis odzivnih časov in zakasnitev strojne in programske opreme. Aplikacije v realnem času morajo imeti zagotovljeno zakasnitev v okviru vnaprej predpisane zakasnitve. Odzivi v realnem času so običajno reda nekaj milisekund, lahko tudi reda nekaj mikrosekund. Sistem v ne-realnem času pa nima zagotovljenih nobenih časovnih okvirjev za svoje zakasnitve [35, 37].

Procesiranje v realnem času se v splošnem ločuje na trdi in mehki realni čas (slika 1):

- Trdi realni čas; zamuda predpisanega odzivnega časa rezultira v odpoved sistema; sesutje sistema se lahko prepreči s stražnimi mehanizmi, ki detektirajo in odstranijo aplikacijo, ki krši predpisane omejitve.
- Mehki realni čas; uporabnost sistema se zmanjša zaradi prekoračitev pričakovane zakasnitve; sistem z mehkim realnim časom ima zagotovljeno povprečno zakasnitev, nima pa definirane največje zakasnitve.



Slika 1. Aplikacije v trdem in v mehkem realnem času [36]

- Ne-realni čas; sistem v ne-realnem času nima zagotovljenega niti povprečnega odzivnega časa aplikacij.

## 2.1 Linux v realnem času in Ethernet v realnem času

Začetki operacijskega sistema Linux v trdem realnem času segajo v l. 1995, ko je na Inštitutu za rudarstvo in tehnologijo v New Mexicu bil zagnan raziskovalni projekt RTLinux [13]. Gre za prenosni vmesnik operacijskega sistema (POSIX) za realnočasovno razširitev operacijskega sistema Linux. L. 1998 je RTLinux postal komercialni izdelek podjetja FSMLabs in se je uveljavil kot primeren za uporabo v industriji. Podjetje Wind River Systems je l. 2007 pridobilo RTLinux in so ga integrirali v svojo obstoječo Linux platformo [14].

Mantegazza je l. 1998 na milanski Univerzi za politehniko zagnal projekt RTAI [6]. RTAI je prost javni vmesnik za Linux v trdem realnem času, ki je bil zasnovan na osnovi RTLinuxa.

L. 2001 je bil zagnan projekt Xenomai [15] kot abstraktni sloj za RTLinux in RTAI. L. 2003 sta se projekta RTAI in Xenomai združila in l. 2005 zopet ločila. Od ločitve naprej je Xenomai neodvisen projekt, ki omogoča aplikacijam v uporabniškem prostoru operacijskega sistema Linux procesiranje v realnem času [16].

Tako RTAI kot Xenomai sta zgrajena na nano oz. mikro jedrnem abstraktnem sloju strojne opreme (ADEOS) [17]. Vse prej naštete tehnologije so tako imenovane dvo-jedrne tehnologije<sup>2</sup>. Za dvo-jedrne tehnologije (slika 2) je značilna implementacija posebnega programskega sloja med strojno opremo in jedrom operacijskega sistema za zagotavljanje ločenega upravljanja opravil v realnem času in opravil v ne-realnem času.

Na osnovi preteklega Molnarjevega dela [18] je bil l. 2004 zagnan projekt PREEMPT\_RT [7]. Projekt PREEMPT\_RT so v bistvu popravki za operacijski sistem Linux, da se zagotovi popolnoma prekinjevalno večopravilno jedro<sup>3</sup> operacijskega sistema. To je eno-jedrna

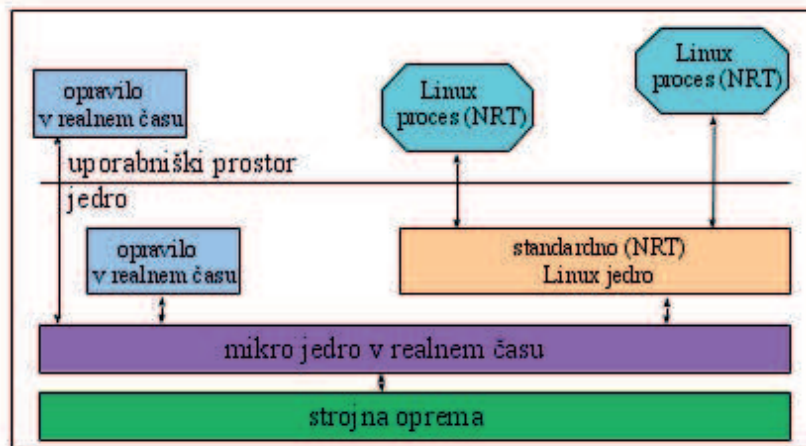
---

<sup>2</sup> Dual-kernel.

<sup>3</sup> Full preemptable kernel.

implementacija Linuxa v realnem času. Gleixnerjevi popravki [8] iz l. 2009 so prekinitvene programe spremenili v prednostne niti<sup>4</sup>, kar je operacijski sistem Linux spremenilo v operacijski sistem v trdem realnem času.

S tem je Linux v realnem času postal še bolj zanimiv in uporaben za industrijo z naraščajočim trendom prenašanja industrijskih aplikacij na realnočasovni operacijski sistem Linux.



Slika 2. Model dvo-jedrne tehnologije [25]

Tukaj je treba omeniti tudi nekaj v industriji razširjenih rešitev za Ethernet v realnem času. Za razliko od rešitev za operacijski sistem Linux v realnem času, ki se večinoma razvijajo v akademskih krogih kot raziskovalni projekti na univerzah in inštitutih, se Ethernet v realnem času razvija predvsem v razvojnih oddelkih tehnoloških podjetij.

Powerlink (B&R) [19], EtherCAT (Beckhof) [21] in ProFiNet (Siemens) [22] so nekatere od rešitev za industrijski Ethernet, ki se razvijajo v različnih podjetjih in so združene v standard IEC 61158, Fieldbus [38]. Pomanjkljivost Fieldbusov je potreba po sinhronizaciji (npr. slika 3) in potreba po namenskih omrežnih vmesnikih. Sicer nekateri protokoli Fieldbus (npr. EtherCAT) že omogočajo komutirane<sup>5</sup> povezave in označevanje v navideznih

4 Priority-based threads.

5 Switched.

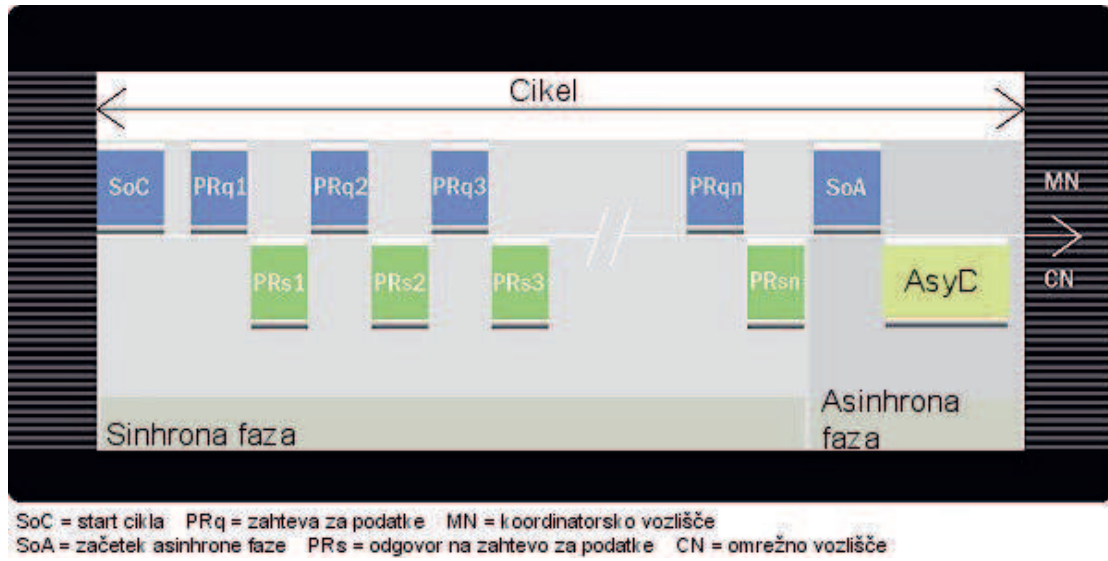
lokalnih omrežjih<sup>6</sup> [23], vendar pa so take rešitve omejene le na določene omrežne topologije v katerih je omogočeno priključevanje asinhronih Ethernet naprav v nameska omrežja v realnem času. Npr. v omrežjih EtherCAT je lahko samo koordinatorsko vozlišče implementirano s programsko opremo in lahko uporablja standardni omrežni vmesnik, medtem, ko morajo ostala vozlišča, ki želijo komunicirati v realnem času, uporabljati posebne namenske vmesnike ASIC.

Drugačna rešitev za Ethernet v realnem času je RTnet [10] (slika 4). RTnet je odprtokodni komunikacijski sklad za omrežja v realnem času za realnočasovna operacijska sistema RTAI in Xenomai. Projekt RTnet je bil zagnan na Univerzi Hannover, na Istitutu za sistemski inženiring [11]. L. 2002 je bila objavljena prva odprtokodna verzija RTnet. Prednost RTneta je uporaba standardnih omrežnih vmesnikov in prosta odprta koda. RTnet ima tudi pomanjkljivosti, npr. ne podpira večtočkovnega oddajanja in tunelski način delovanja za ne-realnočasovni promet blokira delovanje procesiranja v realnem času.

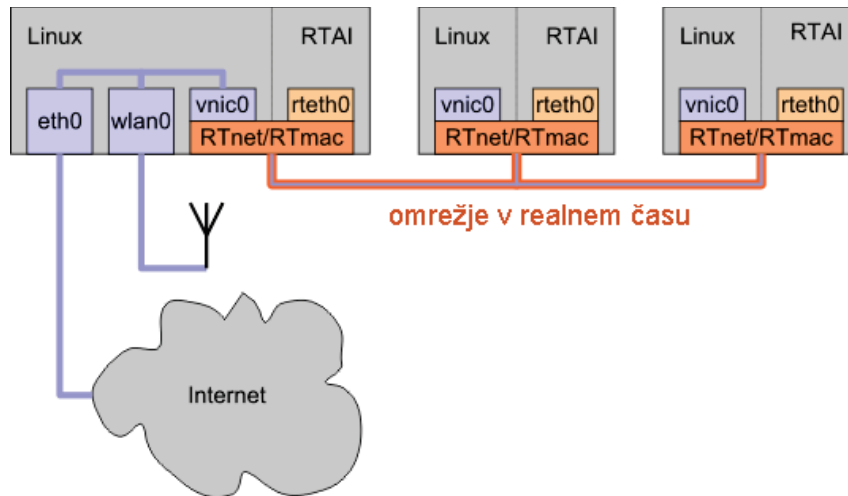
Predstavljena implementacija 61850CS rešuje RTnet pomanjkljivosti. Kot osnova za implementacijo je bil izbran komunikacijski sklad RTnet, kar zagotavlja zmogljive Ethernet komunikacije v trdem realnem času. Barbalace et al. [24] so izvedli primerjalne teste zmogljivosti komunikacij in zaključili, da je kombinacija RTAI in RTnet zmogljivejša od kombinacije Xenomai in RTnet, medtem, ko se je VxWorks omrežna komunikacija v realnem času izkazala za najpočasnejšo.

---

6 VLAN tagging.



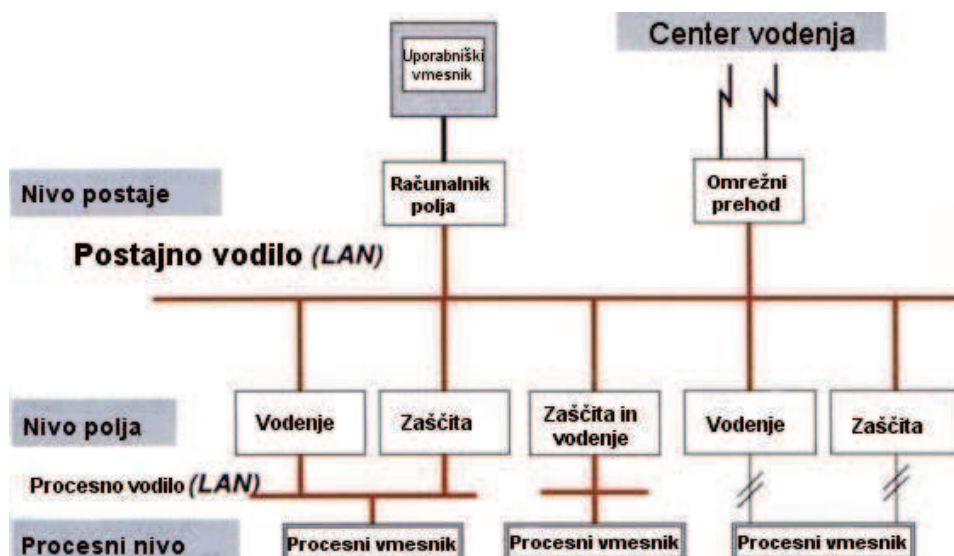
Slika 3. Powerlink cikel [20]



Slika 4. Model omrežja RTnet [12]

## 2.2 Standard IEC 61850

Standard IEC 61850 specificira razširljiv podatkovni model in storitve za avtomatizacijo za RTP postaje v elektroenergetiki. Standard ne predpisuje funkcionalnosti za zaščito in vodenje, ampak predpisuje, kako morajo naprave za zaščito in vodenje predstaviti in posredovati svoje informacije. Standard definira tudi opisni jezik za avtomatizacijo v razdelilnih transformatorskih postajah. Za komunikacijo uporablja Ethernet in TCP/IP tehnologije. Liang in Campbell [26] ugotavljata, da 7. del standarda sestavljajo logični koncepti, 8. del predpisuje preslikave internih struktur (MMS in GOOSE) na predstavitveno plast in na povezavno plast Ethernet, 9. del pa definira preslikave vzorčenih vrednosti (SMV/SV) na Ethernet povezave od točke do točke. Standard trenutno obsega protokole MMS, GOOSE in SMV/SV in je odprt za bodoče sistemske in komunikacijske koncepte. Na Sliki 5 je prikazan IEC 61850 RTP model.



Slika 5. IEC 61850 RTP model [27]

MMS [3] je sporočilni sistem za izmenjavo procesnih podatkov in nadzorne informacije med napravami v omrežju in računalniškimi aplikacijami. Izmenjava podatkov poteka



neodvisno od aplikacijskih funkcij. MMS je dovolj splošen, da ustreza široki množici naprav in aplikacij. V elektroenergetskih sistemih so aplikacije na višjih nivojih v bistvu sistemi za nadzor, krmiljenje in zajem podatkov in aplikacije centrov vodenja.

SMV/SV [4] je storitev za pretok podatkov za močnostne in tokovne transformatorje. Uporablja se za vzorčenje (zajemanje) merjenih vrednosti. SMV/SV omogoča souporabo vhodno/izhodnih signalov med inteligentnimi elektronskimi napravami in deluje na procesnem nivoju v razdelilnih transformatorskih postajah.

GOOSE [3] je protokol za hitre prenose dogodkov med inteligentnimi elektronskimi napravami in deluje preko postajnega vodila v razdelilnih transformatorskih postajah. Protokol GOOSE je bolj podrobno opisan v poglavju 2.2.1.

### **2.2.1 IEC 61850 GOOSE**

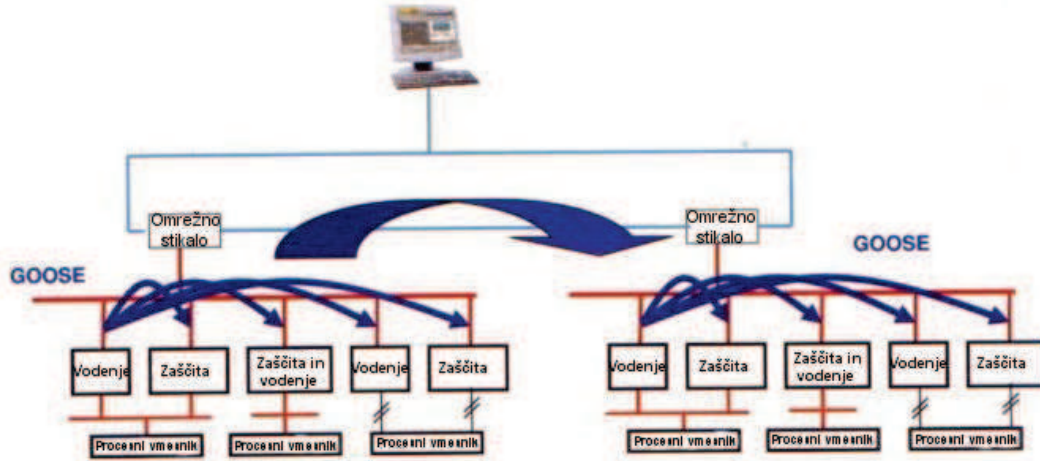
Protokol GOOSE predpisuje maksimalen čas v katerem morajo biti podatki o dogodkih prenešeni preko postajnega vodila RTP (npr. 3 milisekunde za P2/P3 tip 1A dogodkov; v ta tip dogodkov npr. spadajo kritične napake<sup>7</sup> v delovanju daljnovoda). GOOSE se uporablja za horizontalno komunikacijo med napravami za potrebe izvajanja funkcij zaščite in vodenja (slika 6).

Mehanizmi za zagotavljanje hitrosti in zanesljivosti:

- GOOSE podatki so neposredno vgrajeni v Ethernet pakete in delujejo po mehanizmu večtočkovnega oddajanja na fizične naslove omrežnih vmesnikov (MAC).
- GOOSE uporablja navidezna omrežja (VLAN) in prioriteto označevanje (standard IEEE 802.1Q [28]) za združevanje več navideznih omrežij v eno fizično omrežje in za postavljanje ustrezne prioritete za sporočila.
- Izboljšani mehanizem za ponovno oddajanje. Ker protokol GOOSE nima potrjevanja, se isto sporočilo ponovno oddaja v naraščajočih časovnih intervalih. Protokol loči ali je sporočilo novo ali ponovljeno.

---

<sup>7</sup> Trip.



Slika 6. GOOSE, horizontalna komunikacija [27]

Implementacija protokola IEC GOOSE zahteva ustrezno omrežno opremo. Omrežna stikala morajo ustrezati standardu IEEE 802.1p (CoS<sup>8</sup>) za prioritarno označevanje (slika 7).

Inteligentne elektronske naprave pošiljajo svojo statusno informacijo vsem ostalim napravam znotraj razdelilne transformatorske postaje hkrati preko skupnega omrežja. Da se zagotovi zahtevani prenosni čas za dogodke, mora biti protokol GOOSE implementiran v trdem realnem času.



Slika 7. GOOSE, prioritarno označevanje [27]

8 Class of Service. 3-bitno polje za prioritarno označevanje.

## 2.2.2 Zahtevana zmogljivost za naprave za zaščito in vodenje v elektroenergetiki

Standard IEC 61850 definira tri zmogljivostne razrede<sup>9</sup> za aplikacije za zaščito in vodenje [5]:

- P1 – zmogljivostni razred za srednje in nizko napetostne vode,
- P2 – zmogljivostni razred za visoko napetostne vode,
- P3 – zmogljivostni razred za visoko napetostne vode z velikimi potrebami.

Celotna zahtevana zmogljivost je odvisna še od tipa informacije za podatkovne prenose. Standard definira sedem tipov sporočil. Sporočila tipa 1<sup>10</sup> so hitra sporočila. Najpomembnejše hitro sporočilo je sporočilo o kritični napaki (trip - type 1A). Zahteve za hitra sporočila tipa 1A so najvišje (v to skupino zraven tripa spadajo še signalnovarnostna sporočila, brezpogojna sporočila o napakah in sporočila o aktiviranju različnih funkcij za zaščito) [5]. Standard definira prenosni čas za sporočila na osnovi slike 8 ( $t = t_n + t_t + t_m$ ), kjer:

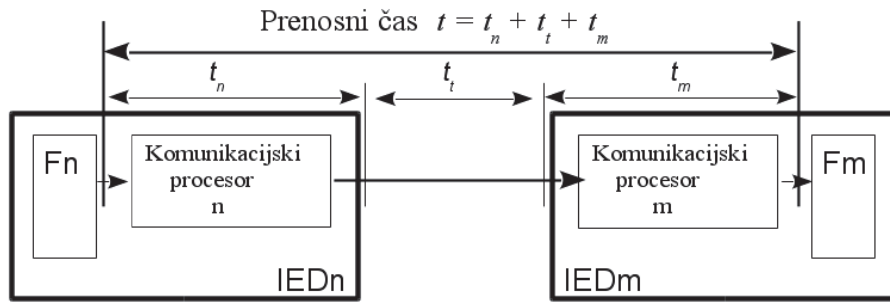
- $t_n$  predstavlja čas od trenutka, ko aplikacija oddajne naprave IED<sub>n</sub> pripravi sporočilo za oddajo do trenutka, ko je sporočilo odposlano v omrežje,
- $t_t$  predstavlja čas za prenos sporočila preko omrežja,
- $t_m$  predstavlja čas od trenutka, ko sprejemna naprava IED<sub>m</sub> prejme sporočilo iz omrežja do trenutka, ko sprejemna aplikacija naprave prevzame prejete podatke.

Definiran maksimalni prenosni čas za zmogljivostni razred P1 in tip sporočil 1A je 10 milisekund (pol cikla v 50 Hz elektro omrežjih). Za zmogljivostna razreda P2 in P3 in tip sporočil 1A je definiran maksimalni prenosni čas 3 milisekunde (manj kot četrtnina cikla v 60 Hz elektro omrežjih). Ostali tipi sporočil nimajo tako visokih zahtev za prenosne čase. Ker protokol IEC GOOSE pokriva tudi P2/P3 tip 1A sporočila, GOOSE komunikacija ne sme trajati več kot 3 ms.

---

<sup>9</sup> Performance classes.

<sup>10</sup> Type 1 messages.



Slika 8. Definicija prenosnega časa sporočil [5]

### **3 Zasnova komunikacijskega sklada 61850CS in sistemska arhitektura**

Zasnova komunikacijskega sklada 61850CS sledi naslednjim zahtevam:

- implementacija IEC 61850 zaščitnega releja (IED) z GOOSE Ethernet komunikacijo v trdem realnem času,
- implementacija TCP/IP MMS Ethernet komunikacije preko istega omrežnega vmesnika (NIC),
- uporaba standardnih asinhronih Ethernet omrežij.

Zaradi ponovne uporabe že implementirane kode za zaščito in vodenje, je bil za realnočasovni operacijski sistem izbran Linux RTAI. Zaradi že uvedene strojne platforme je za centralno procesno enoto (CPE) bilo izbrano vezje PPC440EPx [29]. Standardna PowerPC arhitektura je pri tem vezju razširjena z Book-E arhitekturo [30], ki specificira delovanje pomnilniške enote (MMU). Da se skrajša razvojni čas za implementacijo naprave, je bila za implementacijo protokolov MMS in GOOSE izbrana programska knjižnica Triangle MicroWorks. Zaradi sprostitve procesnega časa CPE enote, je za signalno procesiranje, ki ga zahteva zajem SMV/SV, bilo uporabljeno programilno logično vezje (FPGA). V implementaciji IDE naprave FPC 680, ni implementirano procesno vodilo in se IEC 61850 SMV/SV vzorčene vrednosti ne prenašajo preko Etherneta.

Za implementacijo GOOSE komunikacijskega sklada v realnem času je za gonilnik bil izbran model RTDM [2]. V poglavju 3.1 je podrobneje opisana zasnova komunikacijskega sklada 61850CS.

#### **3.1 Izbrana strojna platforma in procesiranje v realnem času**

Projekt IEC 61850 IED je v podjetju Iskra bil zagnan januarja l. 2010. Opisana implementacija 61850CS API je bila zaključena marca l. 2011. Za implementacijo je bila izbrana takrat sodobna strojna in programska oprema. Opisana tehnologija za implementacijo 61850CS API pa ostaja zaradi svojih prednosti še vedno aktualna.

Zaradi arhitekture Book-E, ki zadeva drugačno delovanje MMU, je potrebno klasični operacijski sistem za PowerPC arhitekturo prilagoditi (treba je prilagoditi dostope do pomnilnika z naključnim dostopom – RAM). Za ne-realnočasovni operacijski sistem je bil izbran Linux-2.6.29.4, ki je že bil prenešen na arhitekturo Book-E.

### 3.1.1 RTAI

RTAI je prosta odprto kodna razširitev operacijskega sistema Linux s trdo različico procesiranja v realnem času. Osnovna tehnologija delovanja RTAI je prestrezanje prekinitev. Med delovanjem RTAI opravil, se prekinitve prestrezajo in se shranjujejo v medpomnilnik po načelu prvi noter, prvi ven (FIFO). Ko RTAI opravila sprostijo procesor, se izvede distribucija prekinitev po prekinitveno servisnih rutinah. Po servisiranju prekinitev se procesor dodeli operacijskemu sistemu Linux. Torej se Linux izvaja med RTAI prostim tekom<sup>11</sup>.

Za realnočasovni operacijski sistem je bil izbran RTAI-3.7.1 (objavljen l. 2009). Ker RTAI ni bil prenešen na arhitekturo Book-E, je bilo treba najprej implementirati prenos<sup>12</sup> RTAI na PowerPC Book-E arhitekturo. Glavna naloga tega prenosa je bila namestitev RTAI prekinitvenih vektorjev namesto Linux prekinitvenih vektorjev. Osnovna PowerPC arhitektura ima statične<sup>13</sup> prekinitvene vektorje, Book-E arhitektura pa ima dinamične<sup>14</sup> prekinitvene vektorje. Ob prenosu so bile popravljene še nekatere napake RTAI programskega vmesnika (npr. dostopi do ure realnega časa) [31]. Ta prenos RTAI na Book-E arhitekturo je pionirsko delo in je rešil problem s katerim so se prej srečevali inženirji, ki so želeli uporabiti RTAI na Book-E PowerPC arhitekturi.

### 3.1.2 RTDM

RTDM [2] je tehnologija za implementacijo gonilnikov za razširitve operacijskega sistema Linux s procesiranjem v realnem času za RTAI in Xenomai. Ker zgornji sloj RTDM

---

11 Idle task.

12 Portation.

13 Vektorji za prekinitve so na vnaprej znanih naslovih, ki so vedno enaki.

14 Naslovi za prekinitvene vektorje so določeni z vsebino internih registrov procesorja, ki se spreminja.

API deluje kot POSIX omrežne vtičnice<sup>15</sup> in ker je spodnji sloj abstrakcije majhen, je komunikacijski sklad 61850CS implementiran kot gonilnik RTDM.

### 3.2 Zasnova 61850CS

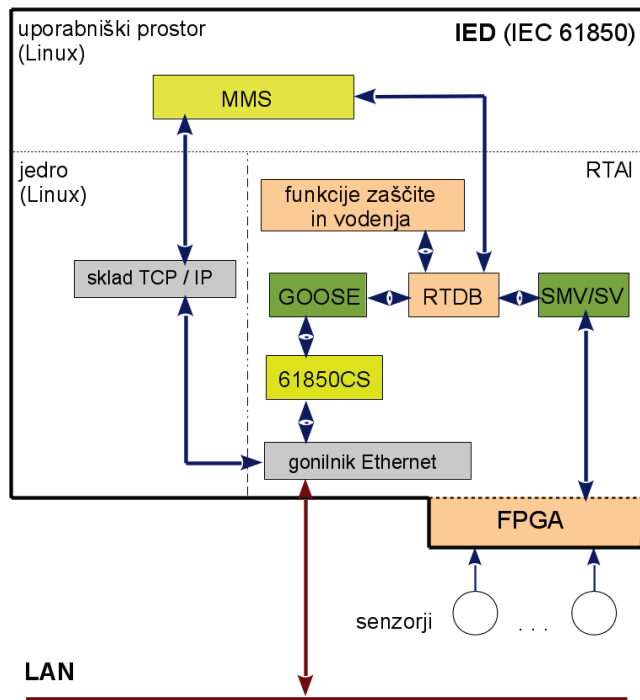
Predstavljeni sistem uporablja realnočasovni operacijski sistem RTAI za procesiranje v realnem času. Aplikacije v realnem času delujejo kot periodična opravila z osnovno periodo 1 ms (1000 Hz). Linux jedro se izvaja s frekvenco 250 Hz (4 ms časovni interval), aplikacije v Linux uporabniškem prostoru pa delujejo s frekvenco 100 Hz (10 ms časovni interval). Aplikacija IEC 61850 MMS se izvaja v Linux uporabniškem prostoru, aplikacija IEC GOOSE se izvaja kot RTAI opravilo v trdem realnem času, funkcionalnost SMV/SV pa je implementirana znotraj vezja FPGA (Xilinx Spartan-3). Podatkovna baza v realnem času (RTDB) je implementirana znotraj RTAI in se uporablja kot podatkovni vir in ponor za aplikacije (slika 9).

Preslikave IEC 61850 na sliki 10 predstavljajo aplikacijo MMS na aplikacijskem sloju, ki uporablja sloje TCP/IP za komunikacijo medtem, ko sporočila GOOSE in SMV/SV preskočijo TCP/IP sloje in se preslikujejo neposredno na Ethernet povezavni sloj po modelu OSI oz. na sloj računalniškega omrežja po TCP/IP modelu.

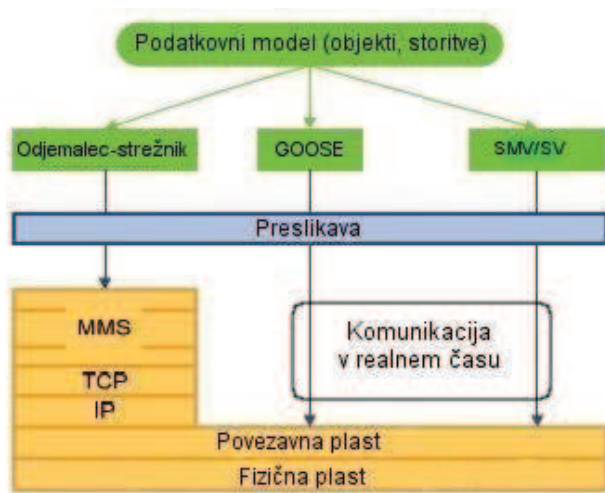
Za zagotavljanje GOOSE procesiranja v trdem realnem času, je bila Triangle MicroWorks programska knjižnica GOOSE prenešena v RTAI okolje (slika 11).

---

<sup>15</sup> Sockets (Berkeley sockets).



Slika 9. IEC 61850 IED

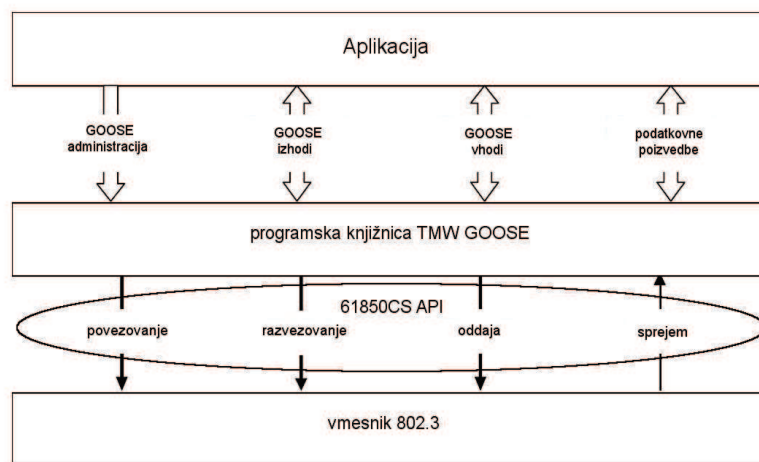


Slika 10. IEC 61850 komunikacijske plasti [27]



### 3.3 Implementacija 61850CS

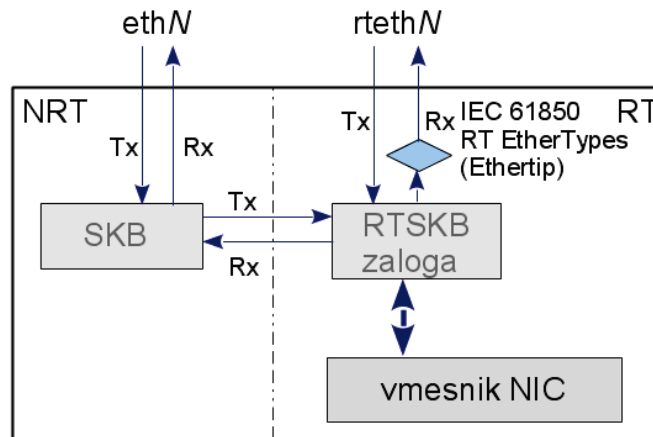
Komunikacijski sklad 61850CS API deluje v okolju RTAI in omogoča Ethernet



Slika 11. Uporaba programske knjižnice TMW GOOSE [32]

komunikacijo v trdem realnem času za opravilo GOOSE. API omogoča, da TCP/IP in ostali ne-realnočasovni Ethernet promet poteka hkrati s prometom v realnem času. Za doseg te funkcionalnosti je bilo treba gonilnik Ethernet prenesti v RTDM tehnologijo in v gonilniku implementirati usmerjanje ne-realnočasovnega in realnočasovnega prometa. V nadaljevanju je predstavljena tehnologija usmerjanja.

61850CS Ethernet gonilnik za vsaka Ethernet vrata, katera krmili, v operacijski sistem umesti dva vmesnika. Vmesnik *ethN* je namenjen za ne-realnočasovni, vmesnik *rtethN* pa za realnočasovni Ethernet promet. Slika 12 predstavlja usmerjanje NRT / RT Ethernet prometa.



Slika 12. 61850CS Ethernet usmerjanje

Gonilnik za vmesnik *ethN* v funkciji *hard\_start\_xmit* (v oddaji) prekopira vsebino aktualnega medpomnilnika (SKB) v medpomnilnik v realnem času (RTSKB) in sprosti SKB (SKB je osnovna podatkovna struktura v Linux omrežni kodi). To se izvede v ne-realnočasovnem kontekstu. Realnočasovni vmesnik *rtethN* uporablja svojo, ločeno *hard\_start\_xmit* funkcijo, ki se izvaja v realnočasovnem kontekstu.

V sprejemu ima gonilnik ločene medpomnilnike RTSKB, posebej za ne-realnočasovno in posebej za realnočasovno procesiranje. Za ne-realnočasovni sprejem se znotraj programske prekinitveno servisne rutine<sup>16</sup> izvede rezervacija medpomnilnika SKB in se vanj prekopira vsebina RTSKB medpomnilnika. S sistemsko funkcijo *netif\_rx* se vsebina SKB posreduje naprej v omrežno sistemsko ne-realnočasovno procesiranje. Prejeta vsebina RTSKB za procesiranje v realnem času pa se prepušča skozi realnočasovno sito in se samo za Ethertipe<sup>17</sup> GOOSE, GSE in SV posreduje naprej, preko funkcije *rtnetif\_rx*, v realnočasovno procesiranje. Ker se komunikacijski sklad 61850CS uporablja za IEC 61850 protokole, implementirano realnočasovno sito v sprejemu prepušča v realnočasovno procesiranje samo IEC 61850 RT Ethertipe. S prilagoditvijo tega sprejemnega sita, se lahko implementira poljuben Ethernet protokol v realnem času.

<sup>16</sup> Software interrupt handler.

<sup>17</sup> EtherType. 16-bitno polje znotraj Ethernet paketa, ki definira uporabljeni Ethernet protokol.

Zaloga RTSKB medpomnilnikov se vnaprej rezervira, ob zagonu gonilnika, v ne-realnočasovnem kontekstu (v trdem realnočasovnem kontekstu so dinamične rezervacije pomnilnika, zaradi nedeterminističnih in časovno dragih postopkov prepovedane). Osnovna logika delovanja RTSKB je bila prevzeta od logike RTneta. Za omogočanje sočasnega realnočasovnega in ne-realnočasovnega Ethernet prometa pa je bilo dodanih več različno velikih zalog RTSKB medpomnilnikov. 61850CS API podpira samo neposredne (raw) in nepovezovane (UDP) omrežne vtičnice za komunikacije v realnem času. Osnovna logika delovanja omrežnih vtičnic v realnem času je bila ravno tako prevzeta od RTneta. Temu pa je bila dodana logika večtočkovnega delovanja v realnem času (standard IEC 61850 predpisuje večtočkovno oddajanje).

Na sliki 9 je predstavljena logična zasnova IED naprave, znotraj katere deluje 61850CS API. Razen MMS, se celotno IEC 61850 procesiranje izvaja v trdem realno časovnem okolju. Komunikacijski sklad 61850CS in RT Ethernet gonilnik sta implementirana kot funkcije, ki so v realnočasovnem kontekstu klicane na zahtevo<sup>18</sup>, aplikacijska plast GOOSE pa deluje kot periodično RTAI opravilo.

Ker sta usmerjanje in sinhronizacija za realnočasovni in ne-realnočasovni Ethernet promet implementirana znotraj Ethernet gonilnika v realnem času, je za prenos 61850CS API na druge arhitekture, potrebno samo ustrezno prilagoditi kodo za gonilnik Ethernet. Vsi ostali 61850CS programski moduli so trivialno prenosljivi v druga RTDM okolja.

### **3.4 Matematični model izračuna prenosnega časa za IEC GOOSE**

Standard [5] zahteva 3 ms prenosni čas za P2/P3 tip 1A GOOSE (npr. kritična napaka) sporočila. V tem poglavju je predstavljena analiza prenosnega časa za 61850CS GOOSE sporočila.

Za IED napravo na sliki 9, definicija za IEC GOOSE prenosni čas izhaja iz enačbe na sliki 8:

---

<sup>18</sup> RT one-shot tasks on demand.

$$t = t_n + t_t + t_m \quad (1)$$

kjer  $t_n$  predstavlja čas za prenos od GOOSE opravila do omrežja LAN,  $t_m$  predstavlja čas prenosa od LAN do GOOSE in  $t_t$  predstavlja čas, porabljen za prenos po omrežju.

$F_n$  (slika 8) predstavlja FPGA procesiranje (FPGA procesiranje poteka paralelno s CPE procesiranjem), prenos vzorčene vrednosti do podatkovne baze RTDB, vključno z RTDB procesiranjem in delovanjem funkcij zaščite in vodenja in procesiranje RT GOOSE opravila pred oddajo sporočila. Vezje FPGA obdeluje 128 vzorčenih vrednosti za vsako periodo (v 50 Hz elektro omrežjih je frekvenca vzorčenja 6.400 Hz), izračunava hitro Fourierjevo transformacijo (FFT) s Hannovim oknom preko štirih period in izračunava še diskretno Fourierjevo transformacijo (DFT) za vsako periodo za analogne vhodne signale, ter tudi izračunava sito s končnim odzivom na enotin impulz (FIR) za digitalne vhode.  $F_m$  procesiranje pa je odvisno od vsebine prejetega sporočila.

RTAI privzeto uporablja več-jedrno shemo za razvrščanje opravil (MUP) s prioriteto prekinjevalnim večopravilnim razvrščanjem<sup>19</sup>. Opisana IED naprava deluje na enem CPE jedru (strojna oprema vsebuje še enoto za procesiranje v plavajoči vejici - FPU, katera pa se ne uporablja znotraj RTAI in Linux jedra). Posledično deluje RTAI algoritem za razvrščanje opravil enako kot za eno-jedrno arhitekture. Prioritetno prekinjevalno večopravilno razvrščanje pomeni, da je procesiranje opravila z nižjo prioriteto lahko prekinjeno in se začne procesiranje opravila z višjo prioriteto. Opravila z enako prioriteto se v takem sistemu ne morejo prekinjati med seboj. Opravila z višjo prioriteto morajo samostojno prepustiti CPE procesiranje ostalim, enako ali nižje prioritetim, opravilom (če realnočasovno opravilo z višjo prioriteto pravočasno ne sprostí CPE, preide sistem v trdem realnem času v zasičenje, kar blokira oz. onemogoči nadaljnje delovanje sistema; za sanacijo delovanja sistema, se v tem primeru mora aktivirati stražni mehanizem – WDT; v sistemih s kritičnim poslanstvom<sup>20</sup> do takih situacij ne sme prihajati; predstavljena IED naprava deluje kot sistem s kritičnim poslanstvom).

Sistem predstavljen v tem delu izvaja razvrščanje opravil v realnem času po

<sup>19</sup> Priority-based preemptive scheduling.

<sup>20</sup> Mission critical systems.

Burnsovi [33] enačbi (3) za časovno vodeno<sup>21</sup> prioriteto prekinjevalno večopravilno razvrščanje. Enačba (2) prikazuje Burnsovo enačbo (3) [33].

$$w_i^{n+1} = B_i + C_i + \sum_{j \in hp(i)} \left\lceil \frac{w_i^n + J_j}{T_j} \right\rceil C_j \quad (2)$$

V enačbi (2)  $w_i^n$  predstavlja časovni interval (okno) za čas, potreben za procesiranje opravila  $i$  v  $n$ -ti iteraciji izvajanja. Rekurzija se začne z  $w_i^0 = C_i$ , kjer  $C_i$  predstavlja najdaljši potreben čas za procesiranje opravila  $i$  v eni iteraciji.  $B_i$  predstavlja najdaljši mogoči čas čakanja opravila  $i$  na uvrstitev v procesiranje zaradi atomičnega procesiranja<sup>22</sup>.  $hp(i)$  je množica višje prioritetenih opravil od opravila  $i$ .  $T_j$  je trajanje periode za periodično opravilo  $j$  oz. minimalni potreben čas za proženje signala za aktiviranje enkratnega procesiranja opravila  $j$  na zahtevo<sup>23</sup>. In  $J_j$  predstavlja čas, potreben za sprostitvev procesorja s strani opravila  $j$ <sup>24</sup> [33].

V takem sistemu izvajanje najvišje prioritetnega opravila ni mogoče prekinjati. V sistemu, ki je opisan v tem delu, je najvišje prioriteto opravilo periodično opravilo za stražni mehanizem (WD), ki se izvaja s periodo 1 ms. WD opravilo lahko prekinja izvajanje vseh ostalih opravil v sistemu, v predstavljeni inteligentni elektronski napravi pa skrbi za to, da celotno procesiranje v realnem času ne porabi več kot 80% razpoložljivega procesnega časa. Tako je zagotovljeno, da se tudi običajno ne-realnočasovno procesiranje lahko regularno izvaja. Najdaljši mogoči odzivni čas za opravilo WD izračunamo po Burnsu [33]:

$$R_{wd} = B_{wd} + C_{wd} + J_{wd} \quad (3)$$

V enačbi (3)  $R_{wd}$  predstavlja najdaljši mogoči odzivni čas za opravilo WD. Ker v predstavljenem sistemu opravilo WD nikoli ne čaka, zaradi atomičnega procesiranja ostalih opravil, velja  $B_{wd} = 0$ .

---

21 Tick driven.

22 Critical section. Del izvajanja opravil, ki ga, zaradi zagotavljanja celovitosti podatkov, ni mogoče prekiniti.

23 One-shot task  $j$ .

24 Task  $j$  release latency.

Enačba (2) je izpeljana iz rekurzivne relacije  $w_i^{n+1} = w_i^n = R_i$  [33] iz česar sledi:

$$R_i = B_i + C_i + \sum_{j \in hp(i)} \left\lceil \frac{R_i + J_j}{T_j} \right\rceil C_j \quad (4)$$

V enačbi (4)  $R_i$  predstavlja najdaljši mogoči odzivni čas za opravilo  $i$ . Relacija  $\left\lceil \frac{R_i + J_j}{T_j} \right\rceil$  določa, koliko krat višje prioriteto opravilo  $j$  prevzame CPE med eno iteracijo opravlja  $i$  (uvrščanje opravila  $j$  v procesiranje prekine procesiranje opravila  $i$  v primeru, ko procesiranje opravila  $i$  prekorači predpisani čas za uvrščanje opravila  $j$  v procesiranje).

V poglavjih od 3.4.1 do 3.4.3 so na osnovi enačbe (4) analizirani odzivni časi vseh spremenljivk v enačbi (1), da se izračuna najdaljši možni odzivni čas IEC GOOSE prenosa sporočil za implementacijo 61850CS.

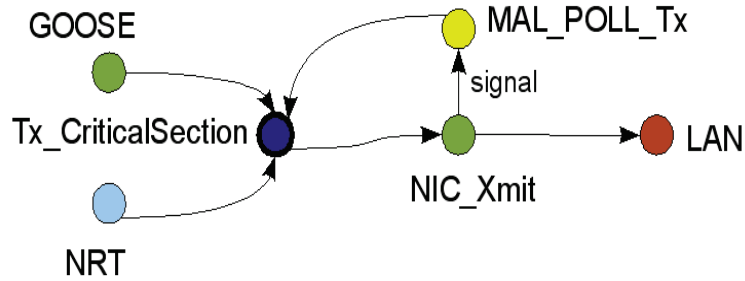
### 3.4.1 Izračun $t_n$

Spremenljivka  $t_n$  v enačbi (1) predstavlja IEC GOOSE oddajni čas. Potek oddaje IEC GOOSE se v celoti izvaja v realnem času. Z izjemo opravila WD, ima opravilo GOOSE najvišjo prioriteto v realnočasovnem sistemu. Opravilo WD lahko prekinja izvajanje opravila GOOSE in potek oddaje GOOSE sporočil vsebuje še čakanje zaradi atomičnega procesiranja (critical section). Oddajni čas GOOSE sporočil  $t_n$  izračunamo iz poteka oddaje GOOSE, to je pot od GOOSE do LAN na sliki 13.

Z uporabo enačbe (4) za izračun oddajnega časa GOOSE, dobimo:

$$t_n = R_{GOOSE\_xmit} = B_{GOOSE\_xmit} + C_{GOOSE\_xmit} + N \cdot C_{wd} \quad (5)$$

kjer  $N$  določa, koliko krat opravilo WD prekine eno oddajanje GOOSE. V enačbi (5) velja:



Slika 13. IEC GOOSE oddaja

$$B_{GOOSE\_xmit} = C_{NRT\_hard\_start\_xmit} + C_{MAL\_POLL\_Tx} \quad (6)$$

Tako dobimo enačbo za oddajni čas GOOSE:

$$t_n = C_{NRT\_hard\_start\_xmit} + C_{MAL\_POLL\_Tx} + C_{GOOSE\_xmit} + N \cdot C_{wd} \quad (7)$$

MAL\_POLL\_Tx je opravilo v realnem času na zahtevo (one-shot), kjer se krmilijo neposredni dostopi do pomnilnika (DMA) za potrebe Ethernet<sup>25</sup>. NRT\_hard\_start\_xmit pa označuje procesiranje za ne-realnočasovno Ethernet oddajanje na povezavnem sloju.

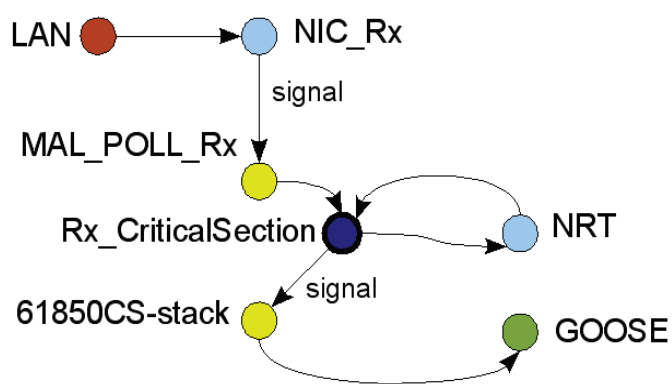
### 3.4.2 Izračun $t_m$

Spremenljivka  $t_m$  v enačbi (1) predstavlja IEC GOOSE sprejemni čas. Potek sprejema IEC GOOSE je predstavljen na sliki 14, to je pot od LAN do GOOSE.

MAL\_POLL\_Rx je opravilo realnem času na zahtevo (one-shot) z najnižjo prioriteto, kjer se krmilijo DMA dostopi do pomnilnika za potrebe Ethernet<sup>25</sup> v sprejemu. Sprejemni signal

<sup>25</sup> MAL, Memory Access Layer [29].

NIC\_Rx zažene MAL\_POLL\_Rx opravilo, ko vmesnik NIC prejme podatke. Ob koncu procesiranja MAL\_POLL\_Rx opravila se proži signal, ki zahteva zagon (one-shot) opravila 61850CS-stack. Opravilo 61850CS-stack ima (razen WD) najvišjo prioriteto. Opravilo 61850CS-stack posreduje prejete podatke na sprejemni komunikacijski sklad, od koder jih pobirajo aplikacije v realnem času oz. opravila v realnem času. Periodično opravilo v realnem času GOOSE ima najvišjo (razen seveda WD) prioriteto in preverja ali ima pripravljene podatke na sprejemnem skladu. Ko so prejeti podatki na skladu, jih opravilo GOOSE prejme in posreduje v nadaljnje procesiranje. Enačba (8) predstavlja izračun IEC GOOSE sprejemnega časa.



Slika 14. IEC GOOSE sprejem

$$\begin{aligned}
 t_m &= R_{MAL\_POLL\_Rx} \\
 &+ R_{61850CS-stack} + R_{GOOSE\_Rx} \\
 &+ T_{GOOSE\_Rx} - R_{GOOSE\_Rx} = \\
 &R_{MAL\_POLL\_Rx} \\
 &+ R_{61850CS-stack} \\
 &+ T_{GOOSE\_Rx}
 \end{aligned} \tag{8}$$

V enačbi (8)  $T_{GOOSE\_Rx}$  predstavlja periodo GOOSE opravila in razlika  $T_{GOOSE\_Rx} - R_{GOOSE\_Rx}$  čas čakanja na naslednji GOOSE procesni cikel. Za razumevanje enačbe (8) je v nadaljevanju predstavljena analiza posameznih spremenljivk:



$$R_{MAL\_POLL\_Rx} = B_{MAL\_POLL\_Rx} + C_{MAL\_POLL\_Rx} + \sum_{j \in hp(MAL\_POLL\_Rx)} \left[ \frac{R_{MAL\_POLL\_Rx} + J_j}{T_j} \right] C_j \quad (9)$$

in

$$R_{61850CS-stack} = B_{61850CS-stack} + C_{61850CS-stack} + M \cdot C_{wd} \quad (10)$$

kjer  $M$  določa, koliko krat opravilo WD prekine izvajanje opravila 61850CS-stack v enem proženju 61850CS-stack opravila. V poteku sprejema GOOSE prihaja do čakanja zaradi atomičnega procesiranja (critical section) edino med delovanjem opravila MAL\_POLL\_Rx (torej velja  $B_{61850CS-stack} = 0$ ).

$$B_{MAL\_POLL\_Rx} = C_{NRT\_RTSKB\_Rx} \quad (11)$$

V enačbi (11)  $C_{NRT\_RTSKB\_Rx}$  predstavlja čas potreben za izvrševanje ne-realnočasovne RTSKB logike v sprejemu. Iz enačb (8), (9), (10) in (11) sledi:

$$t_m = C_{NRT\_RTSKB\_Rx} + C_{MAL\_POLL\_Rx} + \sum_{j \in hp(MAL\_POLL\_Rx)} \left[ \frac{R_{MAL\_POLL\_Rx} + J_j}{T_j} \right] C_j + C_{61850CS-stack} + M \cdot C_{wd} + T_{GOOSE\_Rx} \quad (12)$$

V enačbi (12) vrsta (  $j \in hp(MAL\_POLL\_Rx)$  ) predstavlja celotni procesni čas, porabljen za procesiranje v realnem času, razen časa za procesiranje opravil MAL\_POLL\_Rx in 61850CS-stack (opravilo MAL\_POLL\_Rx ima najnižjo prioriteto).

V sistemih s trdim realnim časom (takšen je predstavljeni sistem) enačba (12) zagotavlja, da je čas  $t_m$  (sprejemni čas GOOSE) manjši od dveh period opravila GOOSE (sistem v trdem realnem času razpade, če opravilo v realnem času zamudi predpisani čas za uvrščanje v procesiranje).

### 3.4.3 Izračun $t_t$

Protokol IEC GOOSE zahteva uporabo hitrih Ethernet komutacij<sup>26</sup> (100 Mbps). Sporočila GOOSE imajo velikost od 259 zlogov<sup>27</sup> do maksimalne velikosti paketa Ethernet z IEEE 802.1Q označevanjem, kar je 1.522 zlogov (sporočila GOOSE imajo tipično velikost reda 300 zlogov). Enačba za izračun  $t_t$  je:

$$t_t = \frac{GOOSE\_message\_size}{Data\_bandwidth} = \frac{1522 \cdot 8b}{100 \cdot 1000000 \frac{b}{s}} = 0.00012176s = 121.76\mu s \quad (13)$$

Enačba (13) ne upošteva zakasnitev v omrežnem prometu, ki so npr. posledica preobremenjenosti omrežja, vendar pa za izračun IEC GOOSE prenosnega časa taka poenostavitev zadošča (standard IEC 61850 zahteva uporabo omrežne opreme IEEE 802.1p - slika 7).

### 3.4.4 Izračun celotnega IEC GOOSE prenosnega časa

Iz enačb (1), (7), (12) in (13) sledi izračun za IEC GOOSE prenosni čas (enačba 14), kjer velja  $K = N + M$ .

Enačba (14) prikazuje, da je najdaljši možni IEC GOOSE prenosni čas v predstavljenem sistemu reda velikosti dve periodi RT GOOSE opravila. Najzahtevnejši je odzivni čas v sprejemu GOOSE, kateri tudi definira celotni IEC GOOSE prenosni čas.

---

<sup>26</sup> High speed Ethernet switch.

<sup>27</sup> Bytes.

$$\begin{aligned}
t &= t_n + t_t + t_m = \\
&C_{NRT\_hard\_start\_xmit} + C_{MAL\_POLL\_Tx} + C_{GOOSE\_xmit} \\
&+ C_{NRT\_RTSKB\_Rx} + C_{MAL\_POLL\_Rx} \\
&+ \sum_{j \in hp(MAL\_POLL\_Rx)} \left[ \frac{R_{MAL\_POLL\_Rx} + J_j}{T_j} \right] C_j \\
&+ C_{61850CS\_stack} + T_{GOOSE\_Rx} \\
&+ K \cdot C_{wd} + 121.76 \mu s
\end{aligned} \tag{14}$$

V poglavju 4 so predstavljeni rezultati izkustvenih meritev za IEC GOOSE prenosne čase.



## 4 Vrednotenje sistema

Vrednotenje predstavljene IED naprave obsega funkcionalna testiranja vsake posamezne komponente in celotno testiranje zmogljivosti. V tem poglavju je opisano vrednotenje implementacije 61850CS. Za predstavljeno inteligentno elektronsko napravo FPC 680 je bil pridobljen certifikat KEMA, ki potrjuje skladnost naprave z IEC 61850 zahtevami v elektroenergetiki [34]. V tem poglavju opisana testiranja so bila opravljena v okolju s trdim realnim časom, s čimer je tudi potrjena skladnost s trdimi realnočasovnimi zahtevami.



Slika 15. Zaščitni rele FPC 680

### 4.1 Meritve prenosnega časa

Za empirično potrditev prenosnega časa, izračunanega v poglavju 3.4, so bile izvedene meritve oddajnega ( $t_n$ ) in sprejemnega ( $t_m$ ) časa.

### 4.1.1 Metodologija meritev

Opisane meritve so bile izvedene na napravi IED FPC 680 s CPE PPC440EPx 400 MHz, z operacijskim sistemom Linux-2.6.29.4 razširjenem z realnočasovnim operacijskim sistemom RTAI-3.7.1 v trdem realnem času. Za Ethernet komunikacijo so bile uporabljene neposredne (raw) omrežne vtičnice z neposrednim dostopom do povezavnega sloja. Izmerjeni so bili prenosni časi za IEC GOOSE sporočila.

Ker komunikacijski sklad 61850CS nima vpliva na prenos podatkov čez omrežje, so bile meritve izvedene za oddajni čas ( $t_n$ , slika 13) in za sprejemni čas ( $t_m$ , slika 14) za sporočila IEC GOOSE. Zaradi poudarka na pomembnosti procesiranja v realnem času, so bile primerjalno izvedene tudi meritve za ne-realnočasovne GOOSE prenosne čase. Za ta namen je bilo v ne-realnočasovnem Linux uporabniškem prostoru in v ne-realnočasovnem Linux jedru treba implementirati IEC GOOSE protokol. Izvedeni so bili testi z aplikacijo v Linux uporabniškem prostoru, ki je delovala s periodo 10 ms, z aplikacijo v Linux jedru, ki je delovala s periodo 4 ms in z aplikacijo v trdem realnem času s periodama 2 ms in 1 ms.

Za vsako GOOSE aplikacijo je bilo izvedenih  $N = 100.000$  meritev v oddaji in v sprejemu. Rezultati so predstavljeni z minimalnimi (najkrajši izmerjeni), maksimalnimi (najdaljši izmerjeni) in s povprečnimi (aritmetična sredina  $\pm$  standardna deviacija) prenosnimi časi. Predstavljeni rezultati so izmerjeni prenosni časi za eno IEC GOOSE sporočilo v milisekundah.

### 4.1.2 Rezultati

Ker standard IEC 61850 definira prenosne čase v milisekundah, so rezultati meritev predstavljeni v milisekundah.

Rezultati predstavljeni v tabeli 1 kažejo, da bi lahko IEC GOOSE oddaja bila implementirana tudi v ne-realnočasovnem okolju. To je posledica dejstva, da aplikacije komunicirajo preko neposrednih (raw) omrežnih vtičnic, kjer se sporočila prenašajo neposredno na povezavni sloj. Vendar pa kljub temu GOOSE aplikacija v realnem času ne more uporabljati ne-realnočasovne komunikacije, ker v ne-realnočasovnih okoljih ni

predpisane maksimalne možne zakasnitve. Zraven tega pa se v ne-realnočasovnem procesiranju izvajajo nekatere operacije (npr. dinamične rezervacije medpomnilnikov), ki kršijo predpisane realnočasovne omejitve (aplikacije v trdem realnem času lahko uporabljajo edino operacije, ki imajo determinističen čas izvajanja).

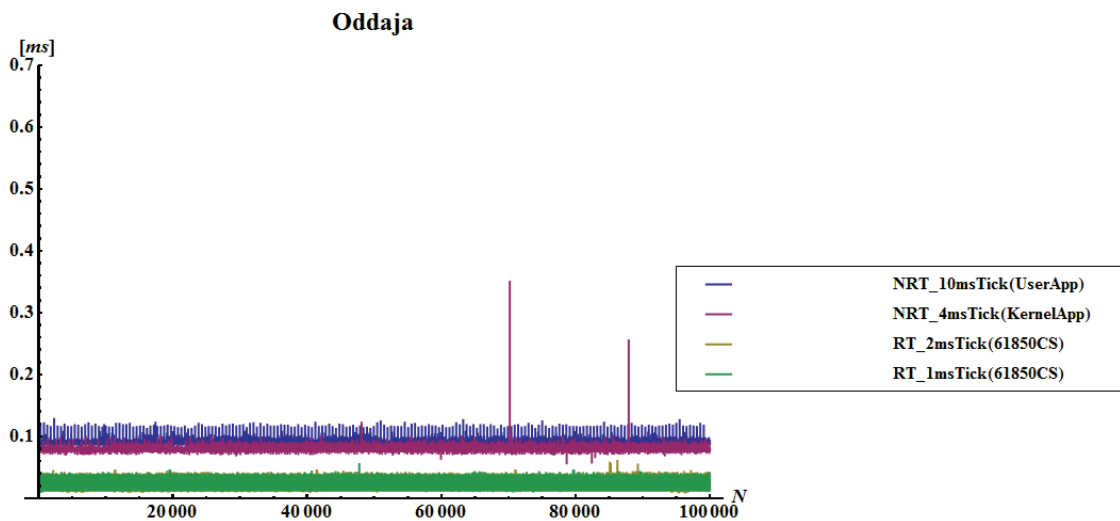
<b>Oddaja <math>N=100,000</math></b>			
	Min. [ms]	Max. [ms]	Avg. [ms]
NRT_10msTick(UserApp)	0.081	0.136	$0.089 \pm 0.002$
NRT_4msTick(KernelApp)	0.055	0.352	$0.077 \pm 0.002$
RT_2msTick(61850CS)	0.009	0.062	$0.020 \pm 0.011$
RT_1msTick(61850CS)	0.009	0.057	$0.017 \pm 0.009$

Tabela 1. Oddaja

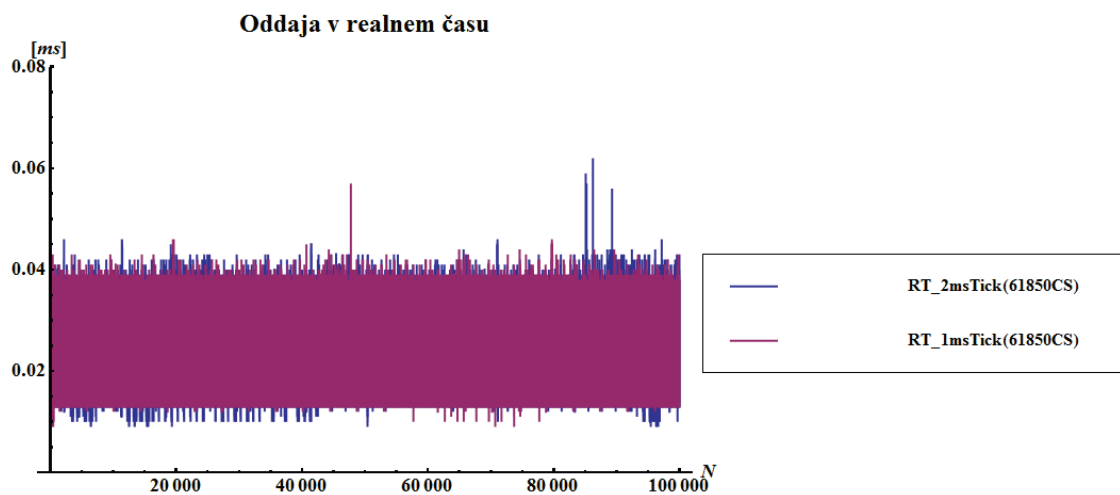
<b>Sprejem <math>N=100,000</math></b>			
	Min. [ms]	Max. [ms]	Avg. [ms]
NRT_10msTick(UserApp)	0.156	34.924	$5.563 \pm 3.181$
NRT_4msTick(KernelApp)	0.144	55.030	$5.408 \pm 2.100$
RT_2msTick(61850CS)	0.077	2.044	$1.065 \pm 0.581$
RT_1msTick(61850CS)	0.077	1.074	$0.555 \pm 0.291$

Tabela 2. Sprejem

Na sliki 16 sta lepo vidni dve nedeterministični odstopanji za ne-realnočasovno oddajo, kar pa se ne odraža v standardni deviaciji v tabeli 1. Slika 17 prikazuje, da so rezultati oddaje v realnem času praktično neodvisni od periode opravlja v realnem času.



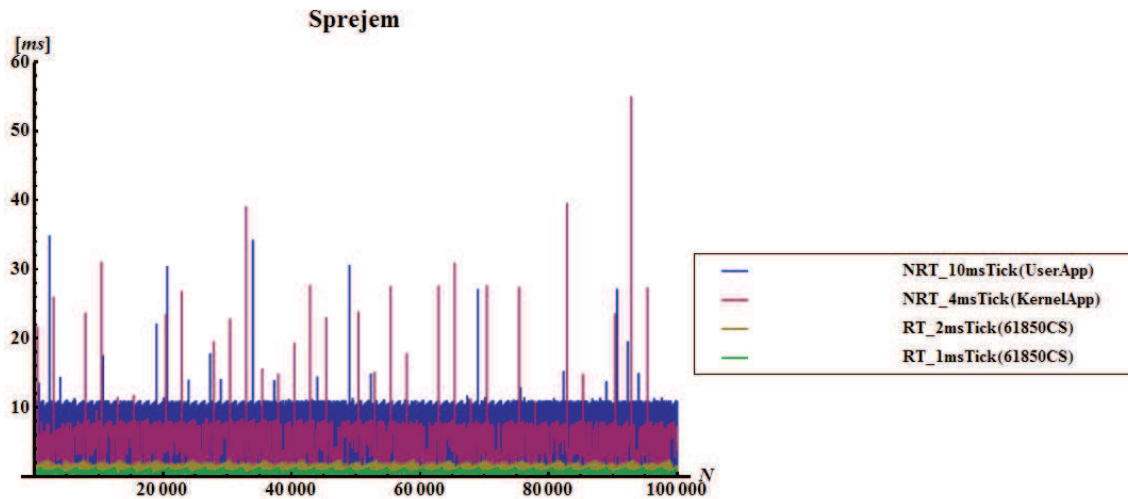
Slika 16. Oddajni časi za štiri testne aplikacije IEC GOOSE



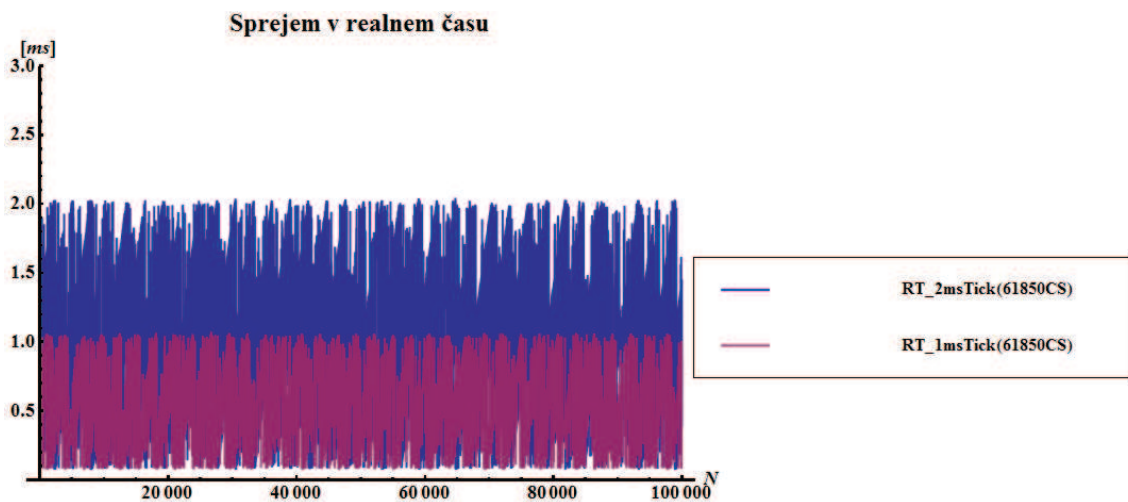
Slika 17. Oddajni časi za testni aplikaciji IEC GOOSE v realnem času

Rezultati predstavljeni v tabeli 2 kažejo, da aplikacije v ne-realnem času in komunikacija v ne-realnem času ne ustrezajo zahtevam IEC GOOSE protokola. Rezultati za GOOSE aplikaciji v realnem času in 61850CS komunikacijo v realnem času pa kažejo, da ima perioda za opravilo GOOSE pomemben vpliv na najdaljši in povprečni sprejemni čas.





Slika 18. Sprejemni časi za štiri testne aplikacije IEC GOOSE

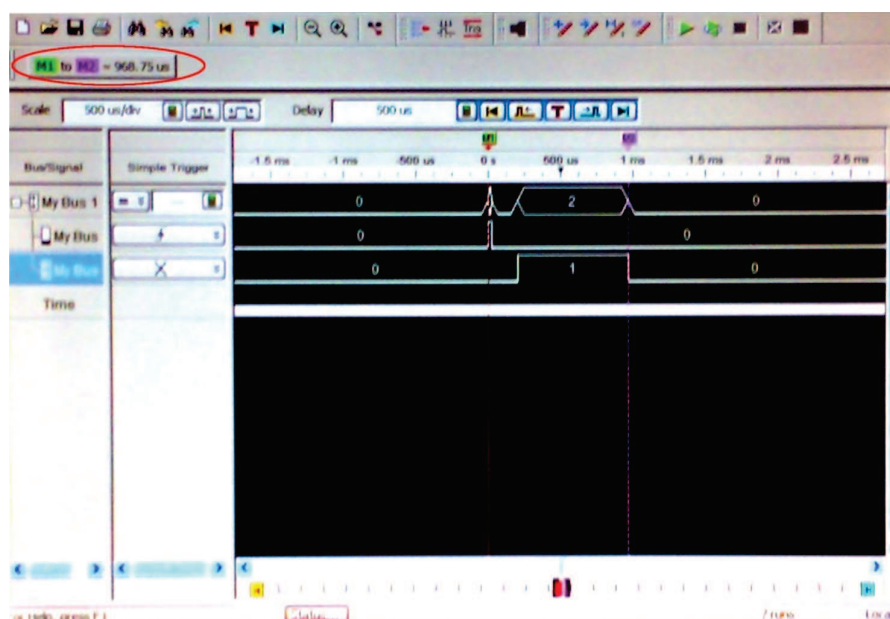


Slika 19. Sprejemni časi za testni aplikaciji IEC GOOSE v realnem času

Na sliki 18 so lepo vidna nedeterministična odstopanja v sprejemu za aplikacije v ne-realnem času in komunikacijo v ne-realnem času. Najslabši rezultati za sprejemne čase v tabeli 2 so reda več period v ne-realnem času, kar je pričakovano za ne-realnočasovna

okolja. Slika 19 pa potrjuje deterministično delovanje okolja v trdem realnem času.

Kot zanimivost je na sliki 20 prikazana meritev IEC GOOSE 61850CS API prenosnega časa, izmerjena z logičnim analizatorjem. Za predstavljeno meritev sta delovali dve FPC 680 IED napravi s periodo GOOSE opravila v realnem času 1 milisekunda. Sporočilo IEC GOOSE je bilo oddano preko običajno obremenjenega LAN omrežja v katerem ni bilo opreme, ki bi ustrezala standardu IEEE 802.1p CoS. Visok nivo prvega signala (prožilec na prvo fronto) prikazuje oddajni čas ( $t_n$ ), interval, ko imata oba signala nizek nivo, prikazuje čas prenosa po omrežju ( $t_t$ ) medtem, ko visok nivo drugega signala (X) prikazuje sprejemni čas ( $t_m$ ). Slabo vidna, rdeče obkrožena, vrednost v zgornjem levem kotu pa predstavlja celotni prenosni čas, ki znaša 968,75 mikrosekund.



Slika 20. Prenosni čas IEC GOOSE izmerjen z logičnim analizatorjem

Rezultati meritev pričajo, da je celoten IEC GOOSE prenosni čas v najslabšem primeru veliko pod rangom dveh period GOOSE opravila v realnem času in komaj presega eno periodo GOOSE opravila.

Izvedene empirične meritve potrjujejo deterministično naravo komunikacijskega sklada 61850CS v trdem realnem času. Rezultati meritev tudi ustrezajo teoretičnemu matematičnemu modelu, ki je predstavljen v poglavju 3.4, kar daje inženirjem osnovo za naravnavanje predstavljenega sistema v trdem realnem času.



## 5 Sklepne ugotovitve

Komunikacijski sklad 61850CS je unikatna tehnologija za Ethernet komunikacije v trdem realnem času. Rezultati empiričnih meritev potrjujejo trdo realno časovno naravo 61850CS API in tudi, da se z uporabo komunikacijskega sklada 61850CS dosegajo najvišje zahteve za IEC GOOSE prenosne čase.

Glavna prednost v tem delu predstavljene rešitve je, da se enaka tehnologija lahko uporabi za implementacijo poljubnih Ethernet komunikacij v trdem realnem času, katere omogočajo sočasen, običajni, ne-realnočasovni Ethernet promet na standardnih omrežnih vmesnikih. In še, da je predstavljena implementacija dovolj splošna za uporabo na različnih strojnih arhitekturah in ustreza zahtevam za industrijski Ethernet. Edini pogoj za prenos komunikacijskega sklada 61850CS v poljubno okolje je ustrezna implementacija gonilnika Ethernet. Še več, ker 61850CS API ne vpliva na večtočkovni pristop z detekcijo nosilca in kolizije (CSMA/CD), v omrežju ni več potrebe za posebnim koordinatorskim vozliščem, kar je slabost protokolov Fieldbus.

Skratka, 61850CS API presega nekatere slabosti Fieldbusov in tudi RTneta kot protiuteži za Fieldbuse.



## Literatura

- [1] (2016) Fieldbus Inc., IEC 61158 Technology Comparison, State of the Bus. Dostopno na: [http://www.fieldbusinc.com/downloads/fieldbus\\_comparison.pdf](http://www.fieldbusinc.com/downloads/fieldbus_comparison.pdf)
- [2] J. Kiszka, "The Real-Time Driver Model and First Applications," v zborniku *7th Real-Time Linux Workshop*, Lille, France, nov. 2005.
- [3] "*Communication networks and systems in substations, Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM), Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3*", standard IEC 61850 – 8 – 1, Geneva, Switzerland, may 2004.
- [4] "*Communication networks and systems in substations, Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM), Sampled values over ISO/IEC 8802-3*", standard IEC 61850 – 9 – 2, Geneva, Switzerland, apr. 2004.
- [5] "*Communication networks and systems in substations – Part 5: Communication requirements for functions and device models*", standard 61850-5, Geneva, Switzerland, jul. 2003.
- [6] (2016) R. Bucher, L. Dozio, D. Gasperini, H. Mayer, P. Mantegazza, P. Masarati, M. Neuhauser, G. Racciu, D. Schleef, P. Soetens, RTAI – the RealTime Application Interface for Linux. Dostopno na: <https://www.rtai.org>
- [7] (2016) T. Ts'o, D. Hart, J. Kacur, Real-Time Linux Wiki. Dostopno na: [https://rt.wiki.kernel.org/index.php/Main\\_Page](https://rt.wiki.kernel.org/index.php/Main_Page)
- [8] (2009) T. Gleixner, Add support for threaded interrupt handlers - V3. Dostopno na: <https://lkml.org/lkml/2009/3/23/344>
- [9] R. Raju, K. N. Shubhanga, "Implementation of a RTAI-Linux-based PLL and firing pulse generation for a laboratory TCSC," v zborniku *Power Electronics, Drives and Energy Systems PEDES, 2014 IEEE International Conference on*, Mumbai, India, dec. 2014, str. 1-6.
- [10] J. Kiszka, B. Wagner, Y. Zhang, J. Broenink, "RTnet - A Flexible Hard Real-Time Networking Framework," v zborniku *10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Catania, Italy, sept. 2005, str. 19-22.
- [11] (2010) RTnet Development Team, RTnet. Dostopno na: <http://www.rtnet.org>
- [12] (2009) RTnet Development Team, Documentation. Dostopno na: <http://www.rtnet.org/doc.html>

- [13] (2005) V. Yodaiken, The RTLinux Manifesto. Dostopno na:  
<http://www.yodaiken.com/papers/rtlmanifesto.pdf>
- [14] (2016) Wind™ an Intel Company, Wind River Newsroom. Dostopno na:  
<http://www.windriver.com/news/press/pr.html?ID=4261>
- [15] (2008) G. Lipari, Real-Time Linux and the Xenomai system. Dostopno na:  
<http://retis.sssup.it/~lipari/courses/str07/xenomai-handout.pdf>
- [16] (2016) G. Chantepredrix, J. Kiszka,, J. Ramirez-Ortiz, W. Grandegger, P. Gerum, Start Here. Dostopno na:  
<http://xenomai.org/start-here>
- [17] (2001) K. Yaghmour, Adaptive Domain Environment for Operating Systems. Dostopno na:  
<http://www.opersys.com/adeos/dox/adeos/index.html>
- [18] (2015) B. Traynor, Realtime Preemption. Dostopno na:  
[http://elinux.org/Realtime\\_Preemption](http://elinux.org/Realtime_Preemption)
- [19] (2013) EPSG, Ethernet Powerlink. Dostopno na:  
<http://www.ethernet-powerlink.org>
- [20] (2013) EPSG, How Powerlink works. Dostopno na:  
<http://www.ethernet-powerlink.org/en/powerlink/technology/how-powerlink-works>
- [21] (2016) EtherCAT Technology Group, EtherCAT – The Ethernet Fieldbus. Dostopno na:  
<https://www.ethercat.org/default.htm>
- [22] (2016) PI North America, PROFINET. Dostopno na:  
<http://us.profinet.com/technology/profinet>
- [23] M. Knežić, B. Dokić, Ž. Ivanović, "Performance Evaluation of the Switched EtherCAT Networks with VLAN Tagging," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, št. 1, zv. 9, str. 33-42, 2012.
- [24] A. Barbalace, A. Luchetta, G. Manduchi, M. Moro, A. Soppelsa, C. Taliercio, "Performance Comparison of VxWorks, Linux, RTAI, and Xenomai in a Hard Real-Time Application," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, št. 1, zv. 55, str. 435-439, 2008.
- [25] (2010) Robert Berger, Getting real (time) about embedded GNU/Linux. Dostopno na:  
<http://www.embedded.com/design/operating-systems/4204740/Getting-real--time--about-embedded-GNU-Linux>
- [26] Y. Liang, R. H. Campbell, *Understanding and Simulating the IEC 61850 Standard*, Urbana–Champaign:University of Illinois, 2008.



- [27] (2010) B. Wang, ABB, Substation automation solution with IEC61850. Dostopno na:  
[http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/9276485464e7953cc125770300133d9a/\\$file/ABB+Substation+Automation+Solution.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/9276485464e7953cc125770300133d9a/$file/ABB+Substation+Automation+Solution.pdf)
- [28] "*IEEE Standards for Local and metropolitan area networks, Virtual Bridged Local Area Networks*", standard 802.1Q™, New York, USA, may 2003.
- [29] AMCC, *PPC440EPx/GRx Embedded Processor User's Manual, PowerPC®*, Revision 1.15, AMCC, 2008.
- [30] IBM, *Book E: Enhanced PowerPC™ Architecture*, Version 1.0, IBM, 2002.
- [31] (2010) D. Munda, Downloads: PPC44x. Dostopno na:  
<http://www.kopica-sp.si/download/PPC44x/ppc44x.htm>
- [32] Triangle MicroWorks, Inc., *IEC 61850 GOOSE Source Code Library, User Manual*, Version 8.9, Triangle MicroWorks, 2009.
- [33] A. Burns, *Preemptive Priority Based Scheduling, An Appropriate Engineering Approach*, Heslington:University of York, 1993.
- [34] (2016) DNV GLAS, KEMA Laboratories. Dostopno na:  
<https://www.dnvgl.com/energy/laboratories/index.html>
- [35] (2016) Wikipedia, Real-time computing. Dostopno na:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_computing)
- [36] (2016) National Instruments Corporation, Do I Need a Real-Time System? Dostopno na:  
<http://www.ni.com/white-paper/14238/en/>
- [37] R. Kamal, *Embedded Systems: Architecture, Programming and Design*, New Delhi, Tata McGraw-Hill, 2003.
- [38] S. Vincent, "IEC 61158 Technology Comparison, State of the Bus," v zborniku *ISA EXPO, Technical Conference, Wireless & Networking Dominate*, Houston, USA, oct. 2008.



## Priloge

### Dodatek A: seznam slik in tabel

Slika 1. Aplikacije v trdem in v mehkem realnem času .....	5
Slika 2. Model dvo-jedrne tehnologije .....	7
Slika 3. Powerlink cikel .....	9
Slika 4. Model omrežja RTnet .....	9
Slika 5. IEC 61850 RTP model .....	10
Slika 6. GOOSE, horizontalna komunikacija .....	12
Slika 7. GOOSE, prioriteto označevanje .....	12
Slika 8. Definicija prenosnega časa sporočil .....	14
Slika 9. IEC 61850 IED .....	18
Slika 10. IEC 61850 komunikacijske plasti .....	18
Slika 11. Uporaba programske knjižnice TMW GOOSE .....	19
Slika 12. 61850CS Ethernet usmerjanje .....	20
Slika 13. IEC GOOSE oddaja .....	25
Slika 14. IEC GOOSE sprejem .....	26
Slika 15. Zaščitni rele FPC 680 .....	31
Slika 16. Oddajni časi za štiri testne aplikacije IEC GOOSE .....	34
Slika 17. Oddajni časi za testni aplikaciji IEC GOOSE v realnem času .....	34
Slika 18. Sprejemni časi za štiri testne aplikacije IEC GOOSE .....	35
Slika 19. Sprejemni časi za testni aplikaciji IEC GOOSE v realnem času .....	35
Slika 20. Prenosni čas IEC GOOSE izmerjen z logičnim analizatorjem .....	36
Tabela 1. Oddaja .....	33
Tabela 2. Sprejem .....	33