

MODULARNA PLATFORMA RELEJNE ZAŠTITE

Dimitrije Dinić, ABS Control Systems, Srbija

UVOD

Savremene potrebe tržišta na polju digitalne relejne zaštite elektroenergetskih postrojenja diktiraju visok tempo razvoja numeričkih releja. Upotreba 32-bitnih procesorskih arhitektura (ARM, PPC, ColdFire...) , *FPGA*, *real-time* operativnih sistema (eCOS, VxWorks, Linux RT ekstenzije), komunikacionih protokola visokog nivoa (IEC61850, PTP, ...) i savremenih *backplane bus* rešenja (CompactPCI, EtherCAT, ...) postala je gotovo neizbežna. Sa druge strane, od savremenih numeričkih releja se očekuje simultano izvršavanje i više desetina zaštitnih algoritama u okviru jednog uređaja, sa periodama ispod 1ms, precizna sinhronizacija odabiranja merenih veličina ($< 1 \mu s$) uz upotrebu globalnih navigacionih sistema, jednostavan i intuitivan interfejs prema korisniku kao i paleta softverskih konfiguracionih i nadzornih alata.

U okviru ovog rada biće izloženo rešenje nove platforme čija je težnja da modularnom strukturom integriše navedene osobine, kao i da omogući širok spektar uređaja prilagođenih različitim zaštitnim aplikacijama. Prvi deo rada obuhvata pregled glavnih osobina modularne platforme, blok dijagrame, razmatranje primenjenih hardverskih rešenja kao i kratak prikaz realizovanih hardverskih modula. Drugi deo rada obuhvata softverske module i alate, blok dijagrame, performanse i ključne izazove vezane za tehnologije koje su relativno nove u industrijskoj i energetske primeni. Izlaganje neće obuhvatiti pojedinačne detalje realizacije već će težiti isticanju prednosti modularnog pristupa u projektovanju zaštitnih uređaja, i opisivanju ključnih mehanizama koji ovakvu platformu čine primenljivom i u drugim oblastima industrije.

Nota: Skraćenice i strane reči karakteristične za oblast koju obuhvata rad su navedene u *italic* formatu, dok su detaljniji opisi dati kao poslednje poglavlje

MODULARNA PLATFORMA - OPŠTE OSOBINE

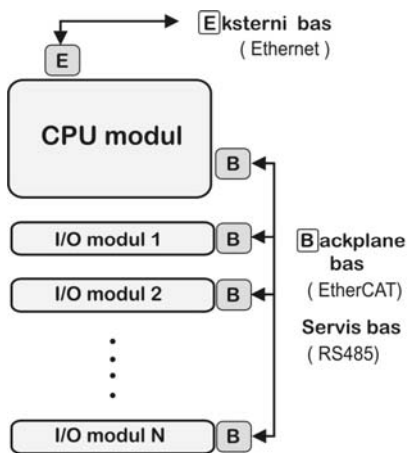
Kada se govori o uređajima relejne zaštite, ključne reči koje opisuju namenu i način funkcionisanja su: elektroenergetska mreža, merenja, detekcija kvara ili neispravnosti dela mreže (*fault state*), upozorenja (*alarm* signali) i isključenja delova mreže (*trip* signali). Navedene osobine su fundamentalne i karakteristične su kako za mehaničke releje (uređaji starije generacije) tako i za moderne numeričke (digitalne) releje. Pre nego što prikažemo blok dijagram platforme neophodno je detaljnije opisati osnovne zahteve koje prikazana platforma mora ispuniti:

- Modularnost rešenja koja podrazumeva da su performanse i kapaciteti uređaja definisani skupom implementiranih modula, kao i da je svaki pojedinačni uređaj potpuno prilagođen svojoj nameni u eksploataciji (primenjeni su samo neophodni sastavni moduli). I nove funkcionalnosti proističu iz dodatnih modula zasnovanih na istoj platformi. Interfejsi između modula su jasno definisani.

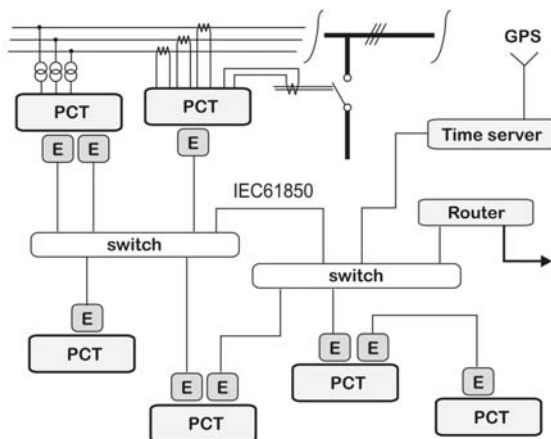
- Robusnost hardverskih rešenja koja se prevashodno ogleda u sertifikatima Elektromagnetne kompatibilnosti (*EMC*), kakvi se zahtevaju za uređaje i prateću opremu namenjenu radu u elektroenergetskim postrojenjima.
- Brzina obrade i prenosa podataka u vidu primenjene procesorske arhitekture, koja mora zadovoljiti predviđene softverske zahteve. Od centralne procesorske jedinice (*CPU*) se zahteva operativni sistem sa *hard real-time* karakteristikama dok je za prenos podataka između I/O modula neophodan brz i fleksibilan *backplane bus*. Konkretno rešenje će biti prikazano u narednim sekcijama.
- Precizno merenje osnovnih mrežnih veličina (ortogonalne komponente struja i napona osnovnog i viših harmonika, simetrične komponente, efektivne vrednosti, frekvencija sistema, ...).
- Sinhronizacija sistemskog vremena i vremena odabiranja ulaznih merenih veličina prema specifikacijama IEC 61850 (1) standarda. (klase tačnosti T1 - 1 ms, T2 - 10 μs, T3 - 25 μs, T4 - 4 μs i T5 - manje od 1 μs). Centralni izvor sinhronizacije je *GPS* navigacioni sistem, dok je distribucija sistemskog vremena i sistemskih *clock* signala predviđena SNTP i PTP protokolom po IEC 61588 (2) standardu.
- Primenu palete zaštitnih algoritama zasnovanu na *ANSI device number* klasifikaciji (50, 50N, 51.....) i savremenim komunikacionim protokolima (IEC61850, GOOSE, MMS servisi). Platforma predviđa grafičke alate za razvoj i testiranje zaštitnih algoritama.
- Implementacija pomoćnih servisa karakterističnih za moderne digitalne releje: *disturbance recording*, upotreba *ComTrade* formata, *event recording*, *fault locator*, *self supervision*, ... Ovakvi servisi su dostupni centralizovanim nadzornim sistemima kroz IEC61850 protokol, a osnovna namena im je akvizicija, analiza i dokumentovanje nepravilnosti u radu elektroenergetskog sistema.
- Realizacija korisničkih softverskih alata namenjenih konfigurisanju uređaja relejne zaštite kroz intuitivan grafički interfejs, kao i paletu pomoćnih alata namenjenih specifičnim servisima iz prethodne stavke.

MODULARNA PLATFORMA - HARDVERSKA REŠENJA

Detaljnije izlaganje primenjenih rešenja započinjemo prikazom osnovnih hardverskih modula koji sačinjavaju PCT (Protection Control Terminal) uređaj, projektovan na osnovu modularne platforme razvijene u okviru kompanije ABS Control Systems (Blok dijagram na slici 1):



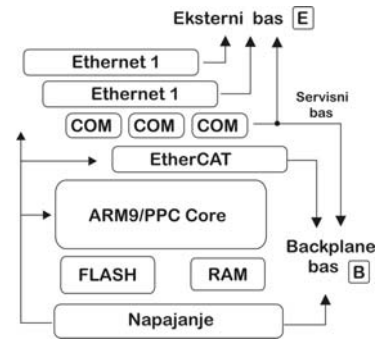
Slika 1a. Protection Control Terminal (PCT) interna modularna struktura



Slika 1b. PCT modularnost na nivou trafostanice (substation)

Hardverski moduli

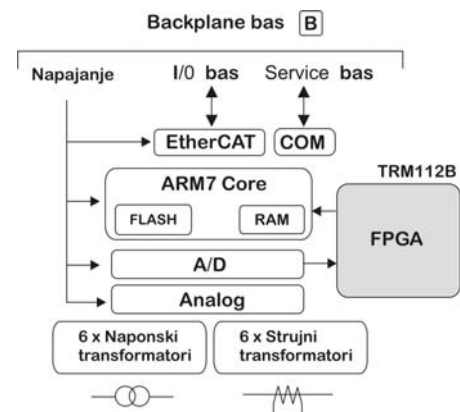
CPU110/210 – procesorski modul je baziran na dve savremene procesorske 32-bitne arhitekture ARM9 i PPC (Power PC) procesora. Pored neophodnih memorijskih i komunikacionih elemenata (*backplane I/O bus*, serijski COM portovi, dva Ethernet porta 'TX/FX') prikazani su i prateći elementi: napajanje koje osim CPU modula koriste i svi I/O moduli i servisni bus. Glavni zadatak ovog modula je akvizicija mrežnih veličina sa I/O modula, izvršavanje mernih i zaštitnih algoritama i implementacija servisa visokog nivoa (IEC61850 komunikacija i servisi u podstanicama, SNTP/PTP, vremenska sinhronizacija, ...). Za operativni sistem odabran je Linux sa ekstenzijom za 'hard real-time' rad, što će biti detaljnije prikazano u narednim izlaganjima.



Slika 2. CPU modul

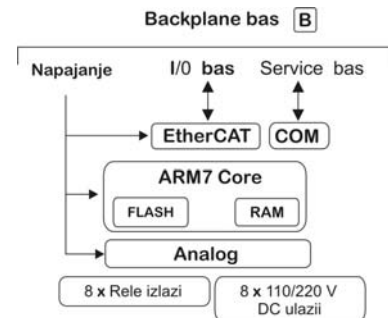
TRM112A – transformatorski modul namenjen akviziciji 6 strujnih i 6 naponskih signala iz mreže. Pored 32-bitnih procesora (ARM7 jezgro) sa setom integrisanih periferija (FLASH, RAM, COM, ...) modul sadrži AD konvertore sa sinhronim odabiranjem svih 12 analognih signala kao i *backplane bus* komunikacioni deo. Modul omogućava merni dinamički opseg do 128 In i SNR ~ 90dB.

TRM112B – transformatorski modul koji predstavlja nadgradnju modula TRM112A, i svojom ulogom ističe prednosti modularne strukture. Prikazani FPGA blok (samo TRM112B, siva boja na slici 3) je namenjen paralelnom izvršavanju mernih algoritama koji inače zahtevaju znatan deo procesorske snage pri sekvencijalnoj obradi na CPU modulu. Akcenat je stavljen na računanje ortogonalnih komponenti osnovnog i većeg broja viših harmonika u merenoj mreži.



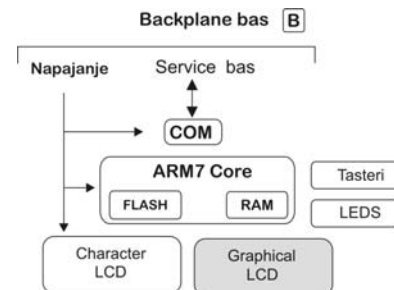
Slika 3. TRM modul, dve varijante

DXM110 – digitalni ulazno izlazni modul. Deo strukture, sačinjen od ARM7 procesora i backplane bus-a, definiše jasnu granicu između platformski zavisnog i nezavisnog dela (koji određuje i ulogu samog modula). Platformski nezavisan deo DXM110 modula je 8 digitalnih ulaza (220/110V DC, optička izolacija) i 8 relejnih izlaza namenjenih prekidanju strujnog toka delova mreže gde je detektovan kvar. Modularnost u ovom slučaju znači da je moguće koristiti više istih I/O modula koji će proširiti broj I/O resursa i biti na raspolaganju zaštitnim algoritmima.



Slika 4. DXM modul

HMI110 – (*Human Machine Interface*) Poslednji modul koji prikazujemo takođe sledi sličan pristup. Usled činjenice da za ovakav modul brzina reakcije i prenosa informacija nije kritična, izbegnuto je opterećenje brzog I/O *backplane bus-a*, korišćenjem sporijeg *service bus-a*. Slično kao i kod transformatorskog modula, izvedene su dve varijante u zavisnosti od tipa displeja koji se koristi. Glavna namena ovakvog modula je da pruži korisniku jednostavan interfejs za konfiguraciju zaštitnih funkcija, kao i da prokazuje stanja internih signala od interesa.



Slika 5. HMI modul

Prikazani hardverski moduli predstavljaju jedan konkretan primer korišćenja platforme koja je predmet ovog rada. Treba dodati da su oni ujedno i minimalan skup modula koji su neophodni za projektovanje zaštitnog uređaja visokih performansi. (Vremena skeniranja manja od 1 ms, sinhronizacija I/O operacija ispod 1 μ s, paralelno izvršavanje većeg broja zaštitnih algoritama, ...)

Backplane bus

Jedno od inovativnih rešenja je implementacija EtherCAT (3) tehnologije kao efikasnog i pouzdanog rešenja za prenos podataka između CPU modula i I/O modula. Najvažnije prednosti se ogledaju u brzini i načinu prenosa podataka, kao i u naprednim mogućnostima sinhronizacije. EtherCAT komunikacija je novijeg datuma i predstavlja modifikaciju 100 Mbps Ethernet IEEE 802.3u specifikacije koja se ogleda u takozvanom *daisy chain* načinu prenosa podataka korišćenjem specifičnog ASIC hardvera. Sa druge strane softverski protokol funkcioniše na Data Link sloju (ISO-OSI model) što omogućava efikasnu obradu u poređenju sa standardnim mrežnim protokolima (TCP, UDP, ...). Kako detaljniji pregled ovakvog tipa komunikacije prevazilazi okvire rada, pomenućemo još samo to da je precizna vremenska sinhronizacija IO ploča, ali i samih uređaja zaštite međusobno omogućena baš upotrebom EtherCAT *bus*-a. PTP (Precision Time Protocol) implementiran na hardverskom nivou, a čitaoca upućujemo na IEC standarde koji pružaju sve neophodne informacije.

MODULARNA PLATFORMA - SOFTVERSKA REŠENJA

U prethodnom delu, prikazana hardverska rešenja su težila zadovoljenju opštih zahteva karakterističnih za moderne zaštitne platforme:

- *robusnost*
- *brzina izvršavanja zaštitnih algoritama i prenosa informacija*
- *sinhronizacija odabiranja merenih veličina*
- *fleksibilnost koja proističe iz modularnog pristupa.*

Softverska rešenja su takođe navođena zahtevima koji zaokružuju sliku o prikazanoj platformi:

- a) postojanje fleksibilnog operativnog sistema koji je pod kontrolom razvojnog tima
- b) determinizam (*hard real-time*) i optimizacija u obavljanju periodičnih zadataka najvišeg prioriteta (merni i zaštitni algoritmi)
- c) pouzdan i optimizovan sistemski softver zadužen za ključne operacije u sistemu (*kernel* i *drajveri*)
- d) podrška za moderne portokole koji se primenjuju u relejnoj zaštiti (IEC61850)
- e) postojanje razvojnih i korisničkih alata u intuitivnom grafičkom okruženju

Dalje izlaganje će biti podeljeno na tri celine: operativni sistem i real-time osobine, sistemski softver, razvojni i korisnički softver i servisi. Na kraju će ukratko biti naglašeni delovi platforme koje je kompanija ABS Control Systems smatrala inovativnim na polju uređaja relejne zaštite.

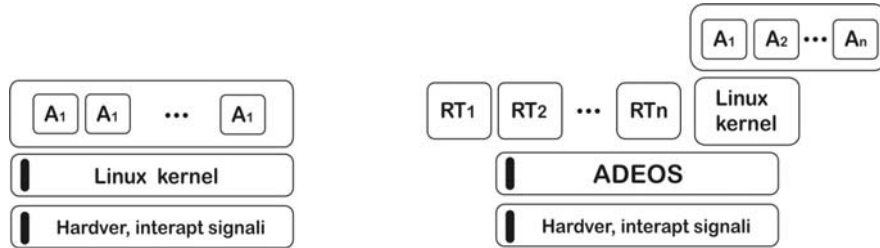
Operativni sistem i real-time osobine

Softverski zahtevi, u najevećoj meri pod a) i b) su razvojni tim naveli da se opredeli za Linux operativni sistem (4), na već prikazanom CPU modulu. Jedan od veoma važnih razloga je bila činjenica da je Linux potpuno otvoren (*open source*) kao i da postoji brojna zajednica koja kontinuirano radi na njegovom razvoju i otklanjanju nedostataka. Ostali takođe važni razlozi su:

- prilagodljivost primeni u *embedded* sistemima
- mali izvršni kod operativnog sistema (ispod 1 MB)
- postojanje brojnih ekstenzija za rad u realnom vremenu (*soft real-time* i *hard-real time*)
- pouzdanost u radu (što jeste i jedna od glavnih odlika Linux-a)

- postojanje širokog spektra gotovih biblioteka i softverskih blokova čija se realizacija može slobodno modifikovati i prilagoditi željenoj nameni i procesorskim resursima

Iako operativni sistem Linux nije u osnovi namenjen za rad u realnom vremenu, razvijene su različite varijante ekstenzija koje to omogućavaju. Detaljnija diskusija prevazilazi okvire ovog rada, pa će biti iznete samo najvažnije osobine i performanse *hard real-time* ekstenzije XENOMAI (5), koja je odabrana kao rešenje za modularnu platformu.



Slika 6. Standardna Linux konfiguracija (levo) Linux real-time ekstenzija (desno)

- ADEOS – softverski blok koja omogućava direktnu kontrolu i reakciju na hardverske *interrupt* pobude
- A1...An – *user space* aplikacije koje rade pod Linux-om. U slučaju razmatrane platforme to su servisi visokog nivoa čije izvršavanje nije kritično za rad sistema: IEC 61850, HM, I...
- RT1...RTn – aplikacije koje rade u realnom vremenu i čije je izvršavanje determinističko. U slučaju razmatrane platforme: merni i zaštitni algoritmi i GOOSE poruke čije je izvršavanje kritično za rad sistema

Osnovna prednost XENOMAI ekstenzije za rad u realnom vremenu je direktna reakcija na hardverske signale i pobude (*interrupt*). Umesto da takve pobude budu presleđene direktno jezgru operativnog sistema (slika 6 levo, *Linux kernel*), kontrolu nad njima preuzima ADEOS i time omogućava da se određeni servisi RT1, ..., RTn izvrše bez znanja operativnog sistema, sa najvišim prioritetom (slika 6 desno).

Sistemski softver

IO moduli (slike 3,4 i 5) izvršavaju sistemski deo softvera na ARM7 procesoru bez operativnog sistema. Obuhvaćene su sledeće ključne operacije:

- neopsredan pristup resursima (analogni, digitalni ulazi/izlazi) diktiran PTP sinhro impulsima
- kalibracija, kompenzacija i reprezentacija I/O podataka
- komunikacija sa I/O *bus*-om, detekcija kvarova i preduzimanje odgovarajućih akcija
- dijagnostika i ostali servisi

Sa aspekta CPU modula sa slike 2, centralni sistemski softverski blok, koji je diktirao izbor i uticao na projektovanje ostalih sistemskih softverskih komponenti, jesu merni i zaštitni algoritmi. Osim njih, značajan uticaj je imao izbor periode osvežavanja I/O pomenljivih (1 ms i manje). Ne računajući *kernel* operativnog sistema, sistemski servisi donjeg nivoa predstavljaju zapravo drajvere koji:

- inicijalizuju izvršavanje *real-time* servisa i definišu prioritete
- izvršavaju I/O operacije prilagođene specifičnostima prikazane platforme, *backplane bus* drajveri
- aktiviraju izvršavanje mernih i zaštitnih algoritama sa sistemski definisanom periodom (1 ms)
- izvršavaju resinhronizaciju sistema prema centralizovanom izvoru referentnog vremena, detekciju nepravilnosti u radu i odgovarajuće akcije
- omogućavaju komunikaciju između *real-time* (RT1, ..., RTn slika 6) i *user space* (A1, ..., An) servisa

Mesto sistemskih servisa čije su performanse kritične za rad zaštitnog uređaja kao i mernih i zaštitnih algoritama može se prikazati na slici 6, RT1, ..., RTn blokovima

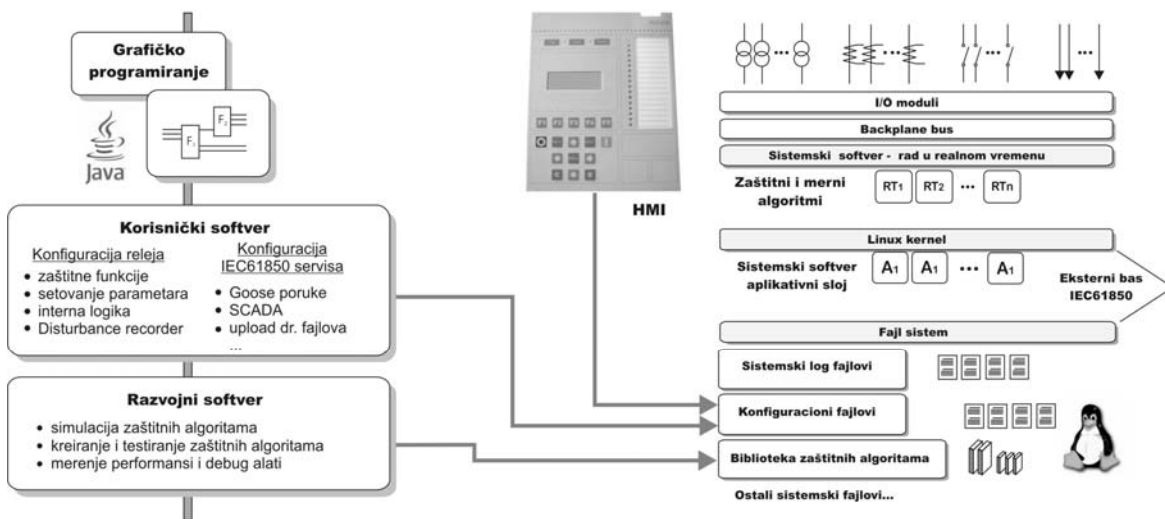
Drugi deo sistemskog softvera izvršava servise čija brzina nije prioritet u zaštitnom uređaju, i tipično su predstavljeni na slici 6, A1, ..., An blokovima. Nabrojaćemo samo najvažnije:

- IEC61850 *protocol stack*
- HMI servisi i komunikacija
- Prateći servisi: *disturbance recording, event recording, fault locator, self supervision*, ostali log servisi...

Korisnički, i razvojni softver

U prethodnom izlaganju obrađeni su delovi modularne platforme koji čine internu strukturu. Projektovanje ovakve platforme namenjene relejnoj zaštiti podrazumeva i skup konfiguracionih alata namenjenih korisnicima, kao i alate namenjene razvoju i testiranju. Isti modularni princip primenjen na hardver i internu softversku strukturu, korisćen je i u ovom slučaju. Za softversku platformu odabrano je Java programsko okruženje (6) i Eclipse razvojni alat. Razlog tome je široka podrška, *open source* priroda okruženja kao i platformska nezavisnost. Kao osnovni sistem interakcije sa korisnicima i razvojnim inženjerima odabrano je grafičko programiranje, i pažljivo projektovan mehanizam prevođenja grafičkih programa u izvršni kod na zaštitnom uređaju.

Upotrebom istog baznog mehanizma omogućeno uniformno okruženje za sve razvijene aplikacije ali i jasno razdvajanje razvojnih i korisničkih alata na nivou prava privilegija i mogućnosti pristupa zaštićenim blokovima i modulima. Na slici 7 prikazana je opšta struktura svih sastavnih delova razmatrane platforme, ali sa naglašenom namenom softvera i tipa interfejsa sa zaštitnim uređajem.



Slika 7. Softverski alati i interfejs sa zaštitnim uređajem

Konfiguracija zaštitnog uređaja se može izvršiti na tri načina: korisničkim softverom - *offline*, preko HMI interfejsa - *offline* i preko HMI interfejsa *online* (dok zaštitni uređaj obavlja svoju punu funkciju). Konfiguracija svih servisa IEC61850 je moguća i u *online* i u *offline* modu. Ovakve operacije se obavljaju posredstvom konfiguracionih fajlova. Razmatranje razvojnog softvera nije predviđeno okvirom ovog rada.

ZAKLJUČAK

Prethodna izlaganja su namenjena pre svega razmatranju svih prednosti koje donosi modularan pristup projektovanju zaštitnih uređaja u elektroenergetici. Prikazano je konkretno rešenje modularne platforme

razvijene u okviru kompanije ABS Control Systems. Navedeni su ključni mehanizmi, principi i putanje podataka, dok su performanse važne za fazu eksploatacije iznete tamo gde se to činilo neophodnim. Razvojni tim želi da istakne, pored primene dobro poznatih rešenja, i korišćenje određenog broja novih i izazovnih tehnologija od kojih se tek očekuje da steknu široku primenu: Linux sa *real-time* podrškom, IEC61850, EtherCAT i IEEE1588.

STRANI TERMINI I SKRAĆENICE

Strani termini su kratko opisani prema kontekstu u kome su pomenuti i prema predmetu ovog rada:

daisy chain – označava serijski prenos podataka od posmatranog uređaja do prvog susednog itd.
device number – tipovi zaštitnih funkcija klasifikovani rednim brojevima prema ANSI numeraciji
embedded – uređaji sa lokalnim napajanjem i nezavisnom funkcijom
offline – režim rada u kome uređaj ne obavlja svoju zaštitnu funkciju
online – režim rada u kome uređaj obavlja svoju zaštitnu funkciju
user space – Unix/Linux termin za memorijski prostor van *kernel*-a koji pripada aplikacijama
alarm – u datom kontekstu signal upozorenja pred kvar u sistemu
backplane bus – pozadinske linije za prenos podataka između centralnih i lokalnih modula
disturbance recording – softverski modul koji beleži u memoriju interne podatke od interesa
fault locator – softverski blok koji detektuje mesto kvara kod nekih tipova zaštite
fault state – kvar u delu elektroenergetskog sistema
hard real-time – determinističko reagovanje sistema na hardverske *interrupt* signale
open source – termin koji označava javno dostupan i izmenljiv izvorni kod
real-time – determinističko reagovanje sistema u zadanom vremenskom okviru ili intervalu
self supervision – softverski modul koji periodično proverava vitalne funkcije zaštitnog uređaja
trip signal – signal kojim se aktiviraju prekidači velike snage koji izoluju neispravne delove sistema

ASIC – Application Specific Integrated Circuit
ComTrade – *Common Transient Data Exchange Format*
FPGA – Field Programmable Gate Array
TX/FX – Twisted pair / Fiber optic
CPU – Central Processing Unit
EMC – Electro Magnetic Compatibility
GPS – Global Positioning System

LITERATURA

1. IEC 61850, 2004, "Communication networks and systems in substation", *International Electrotechnical Commission*
2. IEC 61588, 2004, "Precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems", *International Electrotechnical Commission*
3. IEC 61158, "Digital data communications for measurement and control"
4. www.linux.org, Linux OS, *kernel releases*, dokumentacija
5. www.xenomai.org, *Hard Real Time* ekstenzija za Linux
6. www.sun.com, Java i razvojni alati

Kontakt informacije autora – Dimitrije Dinić, ABS Control Systems, Beograd, dimitrije.dinic@abs-cs.com