

## Projektovanje i realizacija inteligentnih mrežnih senzora

NENAD J. JEVTI, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

VUJO R. DRNDAREVI, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

Pregledni rad

UDC:681.586:004.738

DOI:10.5937/tehnika1506991J

*U radu je prezentovan proces projektovanja i realizacije inteligentnih mrežnih senzora. Ukratko je opisan koncept automatske konfiguracije sistema na bazi elektronskih specifikacija u industrijskim merno-upravljačkim sistemima kao i u distribuiranim sistemima koji se baziraju na OGC-SWE familiji standarda. Detaljnije je izložen model za realizaciju Plug and Play senzora u skladu sa IEEE 1451 familijom standarda. Posebno je analizirano mrežno povezivanje analognih senzora realizovanih u skladu sa IEEE 1451.4 standardom. Opisana je praktična realizacija 1451.4 kompatibilnog mrežnog procesora za povezivanje RTD temperaturnih senzora, kao i odgovarajuća softverska podrška za kreiranje elektronskih specifikacija 1451.4 senzora.*

**Ključne reči:** mrežni senzor, IEEE 1451, TEDS, RTD senzor

### 1. UVOD

Široka zastupljenost mrežnih tehnologija u svim oblastima ljudske delatnosti uslovljava primenu ovih tehnologija i u povezivanju senzora i aktuatora. Mrežno povezivanje pretvarača omogućilo je decentralizaciju merno-upravljačkih sistema i povećanje fleksibilnosti i funkcionalnosti u odnosu na tradicionalne sisteme. S obzirom da je složenost distribuiranih mernih i kontrolnih sistema u stalnom porastu, povezivanje, konfiguracija i održavanje kompleksnih sistema sa velikim brojem umreženih senzora i aktuatora predstavlja izuzetno složen zadatak [1]. Osim toga, treba imati u vidu i niz problema koji nastaju usled grešaka pri ručnom unošenju važnih parametara pretvarača kao što su nemerni opsezi, osetljivost, faktori skaliranja i slično, a koji doprinose ukupnim troškovima instalacije i održavanja sistema. Iskustvo pokazuje da se oko 20% od ukupnih troškova za instalaciju mernih sistema troši na konfiguraciju hardvera i kalibraciju senzora [2]. Rešenje navedenog problema omogućeno je primenom Plug and Play koncepta i u povezivanju senzora, čime se obezbeđuje automatizacija procesa povezivanja, konfiguracije i održavanja senzora [3].

Termin „inteligentni pretvarač“ (smart transducer) prvi put je definisan 1982. godine kao pretvarač koji je

opremljen mrežnim interfejsom u cilju povezivanja u distribuirani merno-upravljački sistem [4]. U današnje vreme ovaj termin široko je prihvaćen, a funkcionalnosti koje se pripisuju inteligentnim pretvaračima proširene su tako da, osim mrežnog povezivanja, obuhvataju i druge funkcije koje olakšavaju proces konfiguracije i menadžmenta sistema.

Među ove funkcije spadaju: dijagnostika, samotestiranje, automatski oporavak od otkaza, automatska identifikacija, prepoznavanje kao i konfiguracija pretvarača u mrežu [5].

Da bi koncept mrežnog povezivanja inteligentnih pretvarača efikasno funkcionisao neophodno je obezbediti interoperabilnost uređaja različitih proizvođača. Za implementaciju koncepta interoperabilnosti senzori se moraju opremiti odgovarajućim elektronskim specifikacijama pretvarača, koje treba da obuhvate sve relevantne parametre: identifikator proizvođača, tip pretvarača, serijski broj, radne opsege, napone napajanja, kalibracione podatke i sl. [6].

Inteligentni senzori se, osim u industrijskim sistemima, koriste i u mnogim drugim oblastima, u medicini, građevinarstvu, za nadzor i kontrolu u poljoprivrednim sistemima, u saobraćaju i transportu, u sistemima za distribuciju električne energije, a posebno u sistemima za monitoring okoline [7-11].

U narednim poglavljima ukratko su objašnjeni najčešće korišćeni sistemi za mrežno povezivanje senzora. Posebna pažnja posvećena je opisu modela i

Adresa autora: Nenad Jevti, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305

Rad primljen: 23.06.2015.

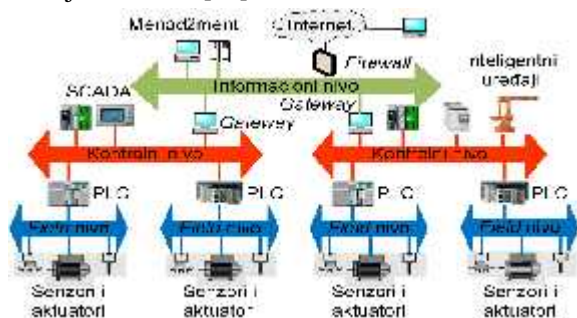
Rad prihvaćen: 14.09.2015.

prakti noj realizaciji inteligentnih mrežnih senzora na bazi IEEE 1451 familiji standarda.

## 2. DISTRIBUIRANI MERNI SISTEMI I MREŽE SENZORA

Umrežavanje senzora i aktuatora prisutno je u industrijskim sistemima već duže vreme. Primena mrežnih komunikacija u merno-upravlja kim sistemima dovodi do decentralizacije, povećanja fleksibilnosti i skalabilnost sistema i jednostavnije instalacije i održavanja sistema. Uvođenjem distribuiranih sistema smanjuju se troškovi održavanja i ostvaruje lakše upravljanje složenim sistemima, te su distribuirane mreže sa inteligentnim pretvara ima postale nezaobilazne u industrijskim primenama [12].

Međutim, industrijske mreže namenjene su po pravilu za rad u realnom vremenu i razlikuju se od računarskih mreža u pogledu specifičnih funkcionalnih zahteva. U cilju povezivanja senzora, aktuatora i drugih industrijskih uređaja, razvijen je već i broj komunikacionih protokola, tzv. Fieldbus protokola. Tipična arhitektura jedne industrijske komunikacione mreže prikazana je na slici 1 [13].



Slika 1 – Arhitektura industrijske komunikacione mreže

Najniži nivo povezivanja u industrijskoj automatizaciji (field level) služi za međusobno povezivanje senzora i aktuatora sa složenijim uređajima za kontrolu procesa (PLC kontroleri i sl.). Najčešće korišćene mreže field nivoa su: CAN, ASInterface, DeviceNet, Foundation Fieldbus H1, INTERBUS-S, PROFIBUS-DP, PROFIBUS-PA, LonWorks i druge.

Drugi nivo povezivanja u industrijskim mrežama naziva se kontrolni nivo (control level) i koristi se za povezivanje PLC kontrolera, distribuiranih kontrolnih sistema i sl. Najčešće korišćeni protokoli su: PROFIBUS-FMS, P-Net, ControlNet, CANopen, Foundation Fieldbus HSE, CC-Link, PROFINET, EtherNet/IP i drugi.

Najviši nivo povezivanja je informacioni nivo (information level) na kom se prikupljaju informacije sa kontrolnog nivoa i vrši upravljanje kompletnim industrijskim sistemom za automatizaciju. U poslednje vreme teži se integraciji komercijalnih i industrijskih

mreža, te se na ovom nivou najčešće koriste protokoli koji se baziraju na Ethernet mrežama kao što su EtherNet i EtherNet/IP.

Za podršku automatskoj konfiguraciji i menadžmentu u Fieldbus sistemima koriste se različita rešenja među kojima su najzastupljenija EDDL (Electronic Device Description Language) i FDT/DTM (Field Device Tool/Device Type Manager). EDDL [14] je jezik za opis industrijskih uređaja i predstavlja ključni element tehnologije za integraciju i konfiguraciju industrijskih sistema. EDDL jezik se koristi za kreiranje deskriptora EDD (Electronic Device Descriptor), tekstualnih fajlova koji sadrže opis svih parametara i funkcija uređaja. EDDL fajlovi sadrže podatke za identifikaciju i opis parametara, informacije o ispravnosti uređaja, kalibraciji, verifikaciji promena moda rada i dr.

FDT/DTM [15] je koncept za konfiguraciju industrijskih uređaja koji podržava organizacija FDT Group. FDT/DTM sistem za konfiguraciju ima tri funkcionalne celine: FDT frame application, CommDTM drajver i DeviceDTM drajveri. FDT frame application je univerzalni softverski alat zadužen za konfiguraciju i menadžment sistema i nezavistan je od tipa Fieldbus protokola. CommDTM je drajver za odgovaranje na Fieldbus protokol, dok su DeviceDTM drajveri za uređaje koji su povezani u sistem.

Većina proizvođača industrijske opreme prinudjena je da podržava i FDT i EDDL tehnologije, te se pojavila potreba za njihovim ujedinjenjem. Iz tog razloga najznačajnije fondacije u oblasti industrijskih sistema formirale su korporaciju FDI Cooperation LLC, sa ciljem da razvije jedinstvenu tehnologiju za upravljanje inteligentnim industrijskim uređajima – FDI (Field Device Integration) [16]. Treba napomenuti da su FDI tehnologije još uvek u procesu razvoja i standardizacije.

Distribuirane mreže sa inteligentnim pretvaračima imaju brojne primene i izvan industrijskog okruženja, posebno u oblasti monitoringa okoline. Poslednjih godina mreže za monitoring sve više migriraju ka distribuiranim mernim sistemima sa nacionalnim i globalnim geografskim pokrivanjem [7].

Za povezivanje inteligentnih senzora u distribuirane mreže koje obuhvataju velika geografska područja često se koristi SWE (Sensor Web Enablement) familija standarda [17] koju je usvojio konzorcijum OGC (Open Geospatial Consortium). SWE standardi podeljeni su na: standarde koji definišu informacioni model i standarde koji definišu modele interfejsa (servisa).

Informacioni model SWE ima standarde koji definišu modele podataka za predstavljanje opservacija senzora i za reprezentaciju metapodataka. SWE familija

prve generacije (SWE 1.0) u okviru informacionog modela definiše sledeća tri standarda:

- SensorML (Sensor Model Language) definiše modele i XML (Extensible Markup Language) kodne šeme za opis mernog procesa i procesa obrade podataka.
- Standard O&M (Observations & Measurements) definiše modele i XML kodne šeme za reprezentaciju mernih podataka, odnosno rezultata „opservacija” senzora.
- TML (Transducer Markup Language) definiše XML šeme za opis pretvarača i arhiviranje ili prenos podataka u realnom vremenu.

Drugu grupu SWE standarda, model interfejsa, čini skup standarda koji definišu različite tipove mrežnih servisa. U okviru modela interfejsa definisana su sledeća četiri standarda:

- SOS (Sensor Observation Service) definiše aplikacioni interfejs koji ima za cilj da obezbedi standardizovan i konzistentan pristup opservacijama bez obzira na tip senzora.
- SAS (Sensor Alert Service) je standardni interfejs mrežnog servisa za pretplatu klijenata za prijem, kao i za distribuciju upozorenja (alert) sa senzora ka pretplatanim klijentima.
- SPS (Sensor Planning Service) predstavlja standardni aplikacioni interfejs za pokretanje korisničkih akvizicija i opservacija, kreiranje mernih zadataka, kao i za kalibraciju senzora.
- WNS (Web Notification Service) je standardni interfejs mrežnog servisa za asinhronu dostavu poruka ili upozorenja od nekog drugog mrežnog servisa.

Nova generacija SWE standarda (SWE 2.0) uvodi novine i u informacioni model i u model interfejsa. Na primer, interfejsni model SAS evoluirao je u širi standard koji je ujedno dobio i novi naziv *Sensor Event Service* (SES).

Jedan pojednostavljeni primer primene SWE standarda za monitoring hidroloških parametara prikazan je na slici 2. Merni sistem obuhvata različite vrste senzora: vodomere, meteorološke stanice, kamere za nadzor kritičnih postrojenja i sl.

Svaki senzorski sistem opisan je odgovarajućim specifikacijama na bazi SensorML standarda kako bi se omogućilo automatsko otkrivanje i konfiguracija. Merni podaci procesiraju se i koduju u skladu sa O&M standardom i stavljaju na raspolaganje SWE mrežnim servisima. Na primer, SOS servis se može koristiti za dobijanje podataka na zahtev sa odgovarajućih senzorskih sistema. Ukoliko je korisnik zainteresovan za prijem samo određenog specifičnog podskupa podataka može koristiti SES servis. Podaci sa senzora

kontinualno se šalju SES servisu, ali SES prosleđuje podatke sa senzora korisniku samo u slučaju kada je ispunjen prethodno zadati kriterijum za filtriranje. Ako je korisniku potrebno samo obaveštenje da se određeni događaj odigrao, SES može koristiti usluge WNS servisa za slanje poruke korisniku. Poruka se može poslati putem SMS, e-mail ili nekog drugog protokola. Senzorima se mogu slati i odgovarajućih zadaci korišćenjem SPS servisa, npr. za definisanje rotiranja i zumiranja kamere koja posmatra neki kritični objekat ili za dobijanje video podataka u realnom vremenu.



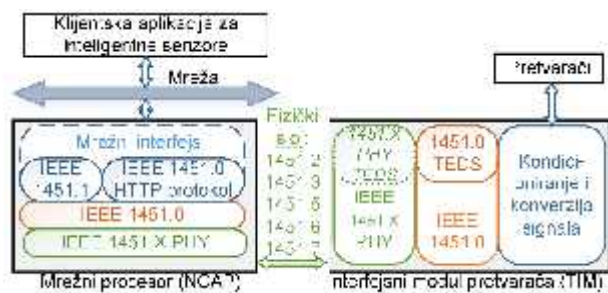
Slika 2 – Primer scenarija za primenu SWE servisa

### 3. PRIKAZ FAMILIJE STANDARDA IEEE 1451 ZA MREŽNO POVEZIVANJE SENZORA

U novije vreme rad na standardizaciji mrežnog povezivanja senzora je intenziviran, a jedan od rezultata je i familija standarda IEEE 1451. Standarde IEEE 1451 publikovala je međunarodna organizacija IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) uz podršku organizacije NIST (National Institute of Standards and Technology), kao i mnogih zainteresovanih istraživača i proizvođača senzora i merne opreme. S obzirom na relativno široku popularnost ovog standarda, nedavno je međunarodna organizacija za standardizaciju ISO (International Organization for Standardization) u saradnji sa IEC (International Electrotechnical Commission) usvojila ovu familiju standarda pod nazivom ISO/IEC/IEEE 21451-2010.

Familija standarda IEEE 1451 definiše niz komunikacionih interfejsa i odgovarajućih elektronskih specifikacija za mrežno povezivanje širokog spektra senzora i aktuatora, nezavisno od tipa mreže koja se koristi za povezivanje. Osim nezavisnosti od mreže, standard IEEE 1451 obezbeđuje interoperabilnost pretvarača i različitih proizvođača i automatsku konfiguraciju po konceptu Plug and Play, zasnovanu na elektronskim specifikacijama pretvarača.

Prema modelu koji definiše standard IEEE 1451, inteligentni mrežni pretvarač podeljen je u dve funkcionalne celine: interfejsni modul pretvarača – TIM (Transducer Interface Module) i mrežni procesor – NCAP (Network Capable Application Processor), kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3 – Model inteligentnog mrežnog pretvarača

Interfejsni modul pretvarača i pretvarača, kola za kondicioniranje i analogno-digitalnu konverziju signala, elektronske specifikacije pretvarača – TEDS (Transducer Electronic Data Sheets) i odgovaraju i interfejs pretvarača za vezu sa mrežnim procesorom. Mrežni procesor zadužen je za obradu podataka iz pretvaračkih modula i povezivanje sa mrežom.

Jedan od najznačajnijih elemenata koji uvodi standard IEEE 1451 su elektronske specifikacije pretvarača TEDS. One imaju ključnu ulogu u automatskoj konfiguraciji distribuiranih sistema i predstavljaju osnovu za uvođenje Plug and Play koncepta. Elektronske specifikacije najčešće se memorišu u EEPROM, FLASH ili sve popularniju FeRAM memoriju, koja je pridružena pretvaraču.

U zavisnosti od fizičkog medijuma i tipa veze IEEE 1451 familija definiše više standarda za komunikaciju mrežnog procesora i pretvarača (koji se zajednički označavaju sa 1451.X):

- standard 1451.2 definiše digitalni interfejs koji koristi žičnu vezu od tačke do tačke;
- standard 1451.3 definiše digitalni interfejs za povezivanje multi-drop vezom;
- standard 1451.4 definiše mešoviti analogno-digitalni interfejs za povezivanje tradicionalnih analognih pretvarača;
- standard 1451.5 definiše interfejs za bežično povezivanje pretvarača na bazi popularnih bežičnih komunikacionih standarda;
- standard 1451.6 definiše interfejs na bazi protokola CANopen;
- standard 1451.7 definiše interfejs za pretvarače koji se zasnivaju na tehnologiji RFID (Radio Frequency Identification).

Osim standarda za pretvarače, usvojen je i poseban standard za mrežni procesor IEEE 1451.1 koji precizno definiše softverski model, funkcije i komunikacione interfejse mrežnog procesora.

Posebnu ulogu u IEEE 1451 familiji ima standard IEEE 1451.0, pomoću kog se obezbeđuje jednoobraznost u komunikaciji sa pretvaračkim modulima. Standard definiše zajednički format TEDS podataka (1451.0 TEDS) i skup zajedničkih komandi za pristup

pretvarača, bez obzira na tip fizičkog interfejsa (1451.X) preko koga se odvija komunikacija. Osim toga, za jednostavnije aplikacije, obezbeđeno je i da se pretvarač može pristupiti preko mreže korišćenjem HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) protokola.

U nastavku rada detaljnije je razmotreno povezivanje tradicionalnih analognih senzora u skladu sa standardom IEEE 1451.4 [18]. Komunikacija između mrežnog procesora i IEEE 1451.4 pretvaračkog modula vrši se pomoću mešovitog interfejsa MMI (Mixed Mode Interface) koji kombinuje tradicionalnu analognu komunikaciju sa pretvaračem i digitalni protokol za upis i očitavanje elektronskih specifikacija iz TEDS memorije.

Za prenos elektronskih specifikacija iz EEPROM memorije pridružene pretvaraču u standard propisuje korišćenje jednožičnog protokola (1-Wire protocol) [18]. Za smeštanje elektronskih specifikacija preporučuje se jednožični EEPROM DS2430A kapaciteta 256 bita, mada se mogu koristiti i jednožične memorije većeg kapaciteta.

Uzimajući u obzir ograničenost memorijskog prostora koji je na raspolaganju za smeštanje elektronskih specifikacija, standard definiše vrlo precizno mapiranje TEDS podataka. Definisane su tri sekcije: osnovni TEDS (Basic TEDS), TEDS pretvarača (Transducer TEDS) i kalibracioni TEDS (Calibration TEDS).

Osnovni TEDS sadrži samo 64 bita sa pet osnovnih informacija o pretvaraču: identifikaciju proizvođača (Manufacturer ID), broj modela (Model number), broj verzije (Version number), oznaku verzije (Version letter) i serijski broj (Serial number). Osnovna TEDS sekcija pruža dovoljno informacija za jedinstvenu identifikaciju senzora.

Sekcija TEDS pretvarača ima najvažniju ulogu u automatskoj konfiguraciji i sadrži podatke o karakteristikama pretvarača koje se tipično mogu naći u katalozima proizvođača, kao što su: opseg merenja, opseg izlaznog signala, osetljivost, zahtevi za naponom napajanja i drugi parametri. S obzirom na velike razlike u karakteristikama pretvarača koji su danas u upotrebi, sekcija TEDS pretvarača nema fiksnu strukturu već se opisuje odgovarajućim šablonom (template). Šablonom se precizno definiše tip podataka, odnosno način na koji će se izvršiti prevođenje u binarnu formu određenog parametara pretvarača. Standard IEEE 1451.4 definiše izvestan broj šablona za unošenje podataka u sekciju TEDS pretvarača za neke postojeće senzore kao što su: akcelerometri, mikrofoni, RTD senzori i drugi.

Elektronske specifikacije isto sadrže i sekciju koja se naziva kalibracioni TEDS. Podaci koji su dobijeni u procesu kalibracije senzora smeštaju se u ovu sekciju po odgovarajućem šablonu.

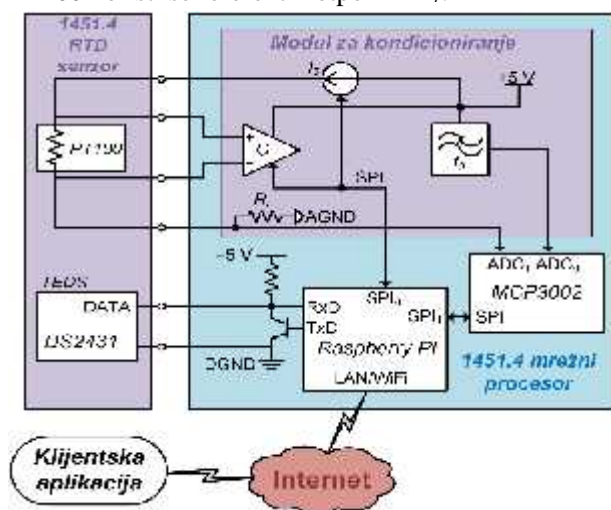


## 4. PRIMER REALIZACIJE

Iako su industrijski moduli za merenje temperature na bazi platinskih otpornika lako dostupni na tržištu, retko se sreću u moduli koji omogućavaju povezivanje u distribuirani merni sistem po Plug and Play konceptu [19, 20]. U ovom poglavlju opisan je proces projektovanja i implementacije inteligentnog otpornog temperaturnog detektora RTD (Resistance Temperature Detector) i odgovarajućeg mrežnog procesora. Blok dijagram RTD senzora i mrežnog procesora prikazan je na slici 4.

Inteligentni RTD senzor zasniva se na standardnom industrijskom platinskom otporniku PT100 i EEPROM memoriji DS2431 koja se koristi za skladištenje elektronskih specifikacija. Povezivanje inteligentnog RTD senzora na mrežu ostvareno je korišćenjem 1451.4 kompatibilnog mrežnog procesora kojim se realizuje modul za kondicioniranje analognog signala i sa njim povezane komponentama.

Modul za kondicioniranje signala sastoji se iz strujnog izvora za napajanje PT100 otpornika konstantnom strujom  $I_0$ , pojačavača programabilnog pojačanja  $G$  i niskofrekventnog (NF) filtra. Strujni izvor se zasniva na integrisanom kolu LM334, dok je pojačavač realizovan pomoću instrumentacionog pojačavača INA122. NF filter realizovan je kao Beviševljevičev aktivni filter drugog reda granice u frekvenciji 10 Hz. Za podešavanje struje strujnog izvora i pojačanja pojačavača koriste se programabilni otpornici serije MCP41XXX kojima se upravlja preko SPI magistrale. Za precizno merenje struje kojom se napaja senzor PT100 koristi se referentni otpornik  $R_r$ .



Slika 4 – Blok dijagram PnP RTD senzora i 1451.4 kompatibilnog mrežnog procesora

Za realizaciju mikroprocesorskog podsistema mrežnog procesora iskorišćen je *Raspberry Pi* računalo. Ovaj modul izabran je zbog malih dimenzija, niske cene i dobrih komunikacionih funkcija. Modul je

podržan Linux operativnim sistemom, koji poseduje odgovarajuće drajvere za mrežno povezivanje. Računalo na ploči i obavlja sledeće funkcije:

- Implementira mešoviti interfejs klase 2 kojim se ostvaruje komunikacija sa TEDS memorijom i očitavanje analognog signala sa senzora temperature, što je detaljnije opisano u radovima [21-24].
- Na bazi očitanih elektronskih specifikacija, računalo na ploči i izrađuje odgovarajuće vrednosti struje napajanja  $I_0$  i pojačanja instrumentacionog pojačavača  $G$ , a zatim podešava ove parametre pomoću programabilnih otpornika koji su povezani na SPI interfejs računala.
- Obavlja analogno-digitalnu konverziju signala sa PT100 senzora i očitavanje signala za merenje struje strujnog izvora. Konverzija se bazira na 10-bitnom AD konvertoru sa sukcesivnim aproksimacijama MCP3002.
- Implementira mrežne servise na bazi IEEE 1451.0 HTTP aplikacionog interfejsa [25] kao i konverziju 1451.4 TEDS u odgovarajuću 1451.0 TEDS strukturu [26]. Osim toga, računalo koristi i druge komponente kao što je *Raspberry Pi* omogućavajući eventualnu dodatnu digitalnu obradu signala i specifičnu aplikativna proširenja funkcija mrežnog procesora.

Merenje temperature zasnovano je na merenju otpornosti PT100 otpornika. Za određivanje ove otpornosti vrši se merenje napona ( $V_{PT100}$ ) preko nultog kanala AD konvertora ( $ADC_0$ ) i struje strujnog izvora ( $I_0$ ), te je:

$$R_{PT100} = V_{PT100} / I_0 = V_{ADC0} / (G \cdot I_0) \quad (1)$$

Kako bi se vrednost otpornosti PT100 senzora odredila sa što manjom mernom nesigurnošću, neophodno je imati tačnu i precizna merenja struje izvora  $I_0$ , napona  $V_{ADC0}$  i pojačanja programabilnog pojačavača  $G$ , što se može videti iz (1). Da bi se smanjile greške merenja koje su posledica nepreciznosti podešavanja parametara strujnog izvora, korišćen je tehnika merenja struje kroz poznat, veoma precizan referentni otpornik  $R_r$  koji je redno vezan sa senzorom. Meranjem napona  $V_{ADC1}$  na otporniku  $R_r$  preko prvog kanala AD konvertora ( $ADC_1$ ) određuje se struja napajanja, te se zamenom u (1) dobija:

$$R_{PT100} = (V_{ADC0} \cdot R_r) / (G \cdot V_{ADC1}) \quad (2)$$

Kao što se vidi na osnovu (2), tačnost merenja  $R_{PT100}$  zavisi od karakteristika AD konvertora, pojačanja pojačavača  $G$  i otpornosti  $R_r$ , ali ne zavisi od tačnosti i stabilnosti struje  $I_0$ .

Za implementirani merni sistem određena je i standardna merna nesigurnost koja za merenje

otpornosti PT100 senzora iznosi 0,2340  $\Omega$ , dok odgovarajuća proširena merna nesigurnost sa nivoom pouzdanosti od 95% iznosi 0,4607  $\Omega$  [22].

Za odabrani RTD senzor PT100, minimalne i maksimalne vrednosti temperature mernog opsega su -200°C i +850°C, respektivno. U ovako širokom temperaturnom opsegu funkcija prenosa senzora pokazuje značajnu nelinearnost, koja se može aproksimirati pomoću tzv. Callendar–Van Dusen jednačina [18]:

$$R_{PT100} = R_0 \left[ 1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3 \right], t < 0^\circ\text{C}; \quad (3)$$

$$R_{PT100} = R_0 \left[ 1 + At + Bt^2 \right], t \geq 0^\circ\text{C}. \quad (4)$$

U prethodnim jednačinama  $t$  predstavlja temperaturu RTD senzora u °C,  $R_{PT100}$  otpornost na temperaturi  $t$ , a  $R_0$  otpornost na 0 °C. Nakon izvršenog merenja PT100 otpornosti, izmerena temperatura određuje se na osnovu jednačine (3) za negativne, odnosno na osnovu jednačine (4) za pozitivne temperature.

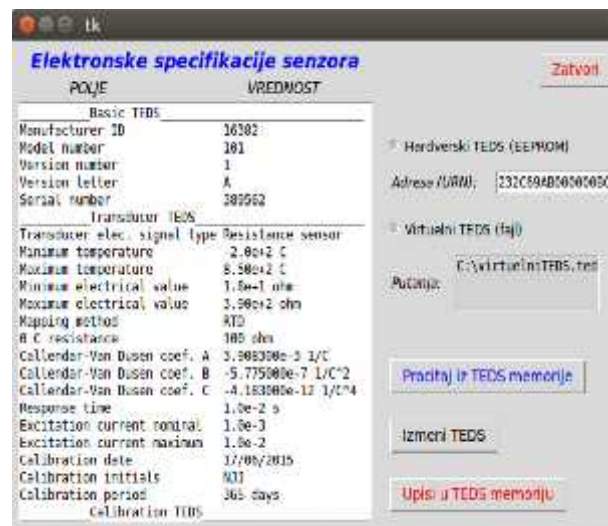
Praktičnim testiranjem mernog sistema ustanovljeno je da greška merenja otpornosti PT100 senzora ne prelazi  $\pm 0,32 \Omega$ , a da greška merenja temperature ne prelazi  $\pm 1^\circ\text{C}$  u celokupnom mernom opsegu [22].

U prethodnom izlaganju detaljno je objašnjeno na koji način se računara koristi za implementaciju mrežnog procesora. Međutim, računara i tako se koristi i za kreiranje elektronskih specifikacija senzora u skladu sa IEEE 1451.4 standardom. Da bi se omogućila automatska identifikacija senzora i konfiguracija parametara modula za kondicioniranje, elektronske specifikacije smeštaju se u EEPROM memoriju prema standardnom IEEE šablonu 37 za RTD senzore [18]. Ovim šablonom definišu se parametri kao što su temperaturni opseg, opseg otpornosti, nominalna i maksimalna struja za napajanje senzora, koeficijenti Callendar–Van Dusen jednačina i drugi parametri.

Za kreiranje elektronskih specifikacija 1451.4 RTD senzora razvijena je aplikacija TEDS editor u programskom jeziku Python (slika 5). Programski jezik Python predstavlja uobičajeno programsko okruženje za razvoj korisničkih aplikacija na Raspberry Pi hardverskoj platformi, te je stoga izabran za implementaciju aplikacije TEDS editora.

Po pokretanju TEDS editora korisnik bira lokaciju elektronskih specifikacija. Elektronske specifikacije najčešće se nalaze u EEPROM memoriji senzora koja je preko 1451.4 mešovito interfejsa povezana sa računarom na ploču (slika 4). U tom slučaju sa grafičkog interfejsa korisnik bira opciju „Hardverski TEDS“. Izborom ove opcije automatski se pokreće program za detekciju prisustva EEPROM memorije prema jednoznačnom protokolu. Adresa detektovanog memorijskog uređaja (odnosno jedinstveni URN broj) prikazuje se

na grafičkom korisničkom interfejsu. U slučaju kada se EEPROM memorija ne može fizički ugraditi u senzor, za smeštanje elektronskih specifikacija koriste se fajlovi locirani na računaru na ploču. U ovom slučaju, sa grafičkog interfejsa korisnik bira opciju „Virtualni TEDS“ i definiše odgovarajuću putanju fajla.



Slika 5 – Grafički korisnički interfejs 1451.4 kompatibilnog TEDS editora

Po izboru lokacije, korisnik može da pročitati sadržaj TEDS memorije pretvarajući izborom opcije „Pročitaj iz TEDS memorije“. Očitani podaci su u binarnoj formi, te se za prikaz na grafičkom interfejsu prevode u odgovarajuću formu na osnovu standardnog šablona za RTD senzore. Osim očitavanja sadržaja TEDS memorije, program TEDS editor omogućava i kreiranje novog ili izmenu prethodno pročitane TEDS sadržaja izborom opcije „Izmeni TEDS“. Uneti podaci mogu se upisati u TEDS izborom opcije „Upiši u TEDS memoriju“.

Posebna aplikacija realizovana je za povezivanje RTD senzora na mrežu. Za realizaciju aplikacije koristi se jezik Python koji ima ugrađenu podršku za implementaciju HTTP web servera. Aplikacija automatski pokreće algoritam pretraživanja EEPROM memorije kako bi se otkrilo da li je RTD senzor povezan. Po otkrivanju senzora, elektronske specifikacije očitavaju se iz memorijskog uređaja i prevode u skladu sa 1451.4 šablonom za RTD senzore. Na taj način dobijaju se podaci o mernom opsegu, opsegu promene otpornosti, nominalnoj struji napajanja i drugi parametri. Na osnovu dobijenih parametara, automatski se konfiguriraju elektronske komponente modula za kondicioniranje signala. Nakon uspešno završenog procesa konfiguracije senzor je spreman za prijem komandi sa mreže. Komande za rad sa senzorom preko mreže realizovane su na bazi IEEE 1451.0 standarda i HTTP aplikacionog interfejsa [25].

## 5. ZAKLJU AK

Inteligentni senzori donose niz prednosti pomo u kojih se omogu ava automatsko povezivanje i konfiguracija na osnovu elektronskih specifikacija senzora, te zna ajno olakšavaju i smanjuju troškove konfiguracije i održavanja složenih distribuiranih merno-upravlja kih sistema. U ovom radu dat je kratak osvrt na industrijske sisteme i opis mehanizama za automatsku konfiguraciju i menadžment ovih sistema. Tako e, opisana je i OGC-SWE familija standarda koja se esto koristi za globalno povezivanje senzora raspore enih na velikim geografskim prostranstvima.

Posebna pažnja posve ena je primeni IEEE 1451 familiji standarda. Objašnjen je osnovni model za realizaciju inteligentnih mrežnih senzora koji podržavaju koncept Plug and Play. Detaljnije je opisano mrežno povezivanje tradicionalnih analognih senzora zasnovano na standardu 1451.4.

Prakti na primena izloženih koncepata demonstrirana je na primeru povezivanja inteligentnog RTD temperaturnog senzora PT100. Industrijski inteligentni moduli za merenje temperature na bazi platinskih otpornika i sa razli itim komunikacionim interfejsima su u novije vreme lako dostupni na tržištu. Me utim, veoma su retka rešenja koja omogu avaju povezivanje u distribuirani merni sistem po Plug and Play konceptu.

U radu je detaljno opisana hardverska platforma za realizaciju 1451.4 kompatibilnog mrežnog procesora kao i odgovaraju a softverska podrška za kreiranje elektronskih specifikacija senzora. Prakti nim testiranjem mernog sistema ustanovljeno je da se temperatura može meriti sa odstupanjem  $\pm 1$  °C u temperaturnom opsegu od -200 °C do +850 °C .

## 6. ZAHVALNOST

Ovo istraživanje je podržano kroz projekte TR36047 i TR32043 Ministarstva nauke i tehnologije.

## LITERATURA

- [1] Pitzek, S, Elmenreich, W, „Configuration and management of a real-time smart transducer network,“ Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation, vol.1, p. 407-414, 2003.
- [2] Frank, R, Understanding Smart Sensors, 2nd ed. Norwood: Artech House, 2000.
- [3] Potter, D, „Smart Plug and Play Sensors,“ IEEE Instr. Mea. Mag., vol. 5, no. 1, p. 28-30, 2002.
- [4] Ko, W, Fung, C, “VLSI and intelligent transducers,“ Sensors & Actuators, 2, p. 239-250, 1982.
- [5] Vasiliev, V, Chernov P, „Smart sensors, sensor networks, and digital interfaces,“ Measurement Techniques, vol. 55, no. 10, p. 1115-1119, 2013.
- [6] Lee, K. B, Song, E. Y, “Understanding IEEE 1451- Networked Smart Transducer Interface Standard,“ IEEE Instru. Meas. Mag., vol. 11, no. 2, p. 11-17, 2008.
- [7] Nittel. S, “A Survey of Geosensor Networks: Advances in Dynamic Environmental Monitoring,“ Sensors, 9, 7, p. 5664-5678, 2009.
- [8] Jevti , N, Drndarevi , V. “Plug and Play Geiger-Muller Detector for Environmental Monitoring,“ Instrumentation Science & Technology, 43, 02, p. 222-243, 2015.
- [9] Drndarevi , V, Jevti , N, Rajovi , V, Stankovi , S, “Smart Ionization Chamber for Gamma-ray Monitoring,“ Nuclear Technology & Radiation Protection, 29, 3, p. 190-198, 2014.
- [10] Drndarevic, V, Bolic, M, “Gamma Radiation Monitoring with Internet-Based Sensor Network,“ Instrumentation Science & Technology, 36, 2, p. 121-133, 2008.
- [11] Drndarevi V, Jevti N, “A Versatile PC-based Gamma Ray Monitor,“ Radiation Protection Dosimetry, 129, 4, p. 478-480, 2008.
- [12] Zurawski R, Ed., Industrial Communication Technology Handbook, 2nd ed., CRC Press, 2014.
- [13] Djiev, S, ”Industrial Networks for Communication and Control,“ TU-Sofia Publ. House, 2003.
- [14] EEDL (Electronic Device Description Language). [Online]. Available: <http://www.eddl.org/Pages/default.aspx>.
- [15] Riegert, J, ”Field device tool — mastering diversity & reducing complexity,“ PROCESSWest, p. 46–48, 2005.
- [16] FDI cooperation. [Online]. <http://www.fdi-cooperation.com/home.html>.
- [17] Sensor Web Enablement (SWE) standard, [Online]. Available: <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe>.
- [18] Information technology - Smart transducer interface for sensors and actuators - Part 4: Mixed-mode communication protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats, ISO/IEC/IEEE Standard 21451-4:2010, 2010.
- [19] Liu, J, Li, Y, Zhao, H, „A Temperature Measurement System Based on PT100,“ Proc. of Intern. Conf. on Electrical & Control Engineering, p. 296-298, 2010.

- [20] Svelto, C, Galzerano G, Bava, E, „Compact and accurate digital thermometer based on Anderson’s loop and Pt-100 sensor,“ *Measurement*, vol. 29, p. 287–292, 2001.
- [21] Jevti N, Drndarevi V, „Implementation of Mixed-Mode Interface for the IEEE 1451.4 Smart Transducers,“ *Zbornik radova konferencije ETRAN*, p. EL1.4-1-4, 2012.
- [22] Jevti N, Drndarevi V, „Design and Implementation of Plug-and-Play analog resistance temperature sensor,“ *Metrology & Measurement Systems*, 20, 4, p. 565-580, 2013.
- [23] Drndarevi , D, Rakovi , V, „Standardizovani pristup u primeni Plug-and-Play koncepta kod analognih senzora,“ *INFOTEH - Jahorina*, 10, Ref. E-VI-10, p. 887-891, 2011.
- [24] Jevtic, N, Drndarevic, V, “Development of Smart Transducers Compliant with the IEEE 1451.4 Standard,“ *Proc. of the 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT)*, p. 126 – 131, 2012.
- [25] Information technology - Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Common functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats, ISO/IEC/IEEE Standard 21450:2010, 2010.
- [26] Kim, J-D, Kim, J-J, Park, S, Hong, C, Byun, H, Lee, S, “A Smart Web-Sensor Based on IEEE 1451 and Web-Service Using a Gas Sensor,“ *Computer Networks Systems and Industrial Engineering*, Ed. Lee, R., vol. 365, p. 219-235, 2011.

## SUMMARY

### DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SMART WEB SENSORS

*This paper presents the design and implementation of the smart web sensors. The paper briefly describes the concept of automatic configuration based on electronic specifications in industrial measurement and control systems as well as in distributed systems based on the OGC SWE family of standards. The model for the implementation of Plug and Play sensor in accordance with the IEEE 1451 family of standards is analyzed in detail. Special attention is paid to the network connectivity of analog sensors in accordance with IEEE 1451.4. The practical implementation of the 1451.4 compatible network processor for RTD temperature sensors and adequate software support for 1451.4 TEDS generation, are included in the paper.*

**Key words:** *web sensor, IEEE 1451, TEDS, RTD detector*