

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Nenad J. Jevtić

**AUTOMATSKA KONFIGURACIJA  
DISTRIBUIRANIH MERNIH SISTEMA  
KORIŠĆENJEM ELEKTRONSKIH  
SPECIFIKACIJA SENZORA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nenad J. Jevtić

**AUTOMATIC CONFIGURATION OF  
DISTRIBUTED MEASUREMENT  
SYSTEMS BASED ON TRANSDUCER  
ELECTRONIC DATA SHEETS**

doctoral dissertation

Belgrade, 2015

## KOMISIJA ZA ODBRANU

### *Mentor*

Dr Vujo Drndarević, redovni profesor,  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

### *Članovi komisije*

Dr Milan Prokin, redovni profesor,  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Dr Dragutin Kostić, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet

Dr Predrag Pejović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Dr Predrag Ivaniš, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Beogradu  
- Elektrotehnički fakultet -



Datum odbrane

---

## **Zahvalnost**

Zahvaljujem se, pre svih, svom mentoru, prof. dr Vuju Drndareviću, na višegodišnjoj uspešnoj saradnji i zajedničkom radu na ovoj doktorskoj disertaciji kojem je pristupio sa entuzijazmom ulažući znanje, vreme i strpljenje. Mnogobrojnim korisnim idejama i sugestijama podsticao moju istraživačku delatnost, stručno i naučno usavršavanje.

Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Dragutinu Kostiću, prof. dr Predragu Ivanišu i ostalim članovima komisije za pomoć i savete koje su mi davali tokom izrade disertacije i tako doprineli njenom sadržaju.

Dragocena je bila pomoć mojih kolega iz Laboratorije za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke Vinča, koji su mi omogućili da izvršim praktična merenja u okviru istraživanja sprovedenih u svrhu priprema disertacije, kao i podrška kolega sa Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Hvala im na tome.

Veliku zahvalnost dugujem mojoj porodici, rodbini i prijateljima jer su mi pružili ljubav i bili oslonac u radu, kao i dragom teći Draganu Berkuljanu za pomoć u lekturi i korekturi teksta. Posebno se zahvaljujem Mariji Malnar na konstruktivnim i kreativnim diskusijama i bezrezervnoj podršci i pomoći tokom izrade disertacije.

## **Automatska konfiguracija distribuiranih mernih sistema korišćenjem elektronskih specifikacija senzora**

**Rezime:** Savremeni merni sistemi se u novije vreme suočavaju sa sve većim izazovom da zadovolje rastuće potrebe za merenjem različitih fizičkih veličina uz korišćenje velikog broja senzora koji su često distribuirani na širokom geografskom prostoru. S obzirom na to da se za povezivanje senzora i aktuatora koristi veliki broj različitih mrežnih interfejsa i protokola, proizvođači i korisnici moraju uložiti izuzetan napor kako bi obezbedili odgovarajuću podršku za sve aktuelne mrežne interfejse. Sa druge strane, konfiguracija i održavanje složenih mernih sistema koji sadrže različite tipove i sisteme povezivanja senzora predstavlja skup i zahtevan proces, posebno ako se on sprovodi manuelno, imajući u vidu da je unošenje brojnih važnih parametara senzora dugotrajan proces a uz to i podložan greškama. Kao rešenje navedenog problema nameće se upotreba inteligentnih senzora, koji podržavaju *Plug and Play* koncept, čime bi se obezbedila automatizacija procesa povezivanja, konfiguracije i održavanja senzora. Uvođenjem *Plug and Play* koncepta za povezivanje senzora i aktuatora ostvarile bi se značajne uštede i omogućila potpuno automatizovana konfiguracija mernih i kontrolnih sistema.

Imajući u vidu prednosti koje pruža upotreba mrežnih senzora i primena *Plug and Play* koncepta u njihovom povezivanju i konfigurisanju, organizacije za standardizaciju prepoznale su važnost ove tehnologije i predložile veći broj standarda u ovoj oblasti. Usvajanje i šira primena odgovarajućih standarda pomogli bi da se prevaziđu mnogi problemi vezani za kompatibilnost i interoperabilnost merne opreme različitih proizvođača. S obzirom da skup standarda IEEE 1451 predstavlja najprihvatljiviji okvir za mrežno povezivanje analognih pretvarača, u ovoj doktorskoj disertaciji detaljno su analizirane mogućnosti proširenja primene ove familije standarda u mrežnom povezivanju specifičnih klasa analognih senzora.

Jedan od važnih rezultata predložene doktorske disertacije je doprinos uvođenju *Plug and Play* koncepta u oblast detekcije i monitoringa jonizujućeg zračenja. S obzirom da današnji sistemi za monitoring jonizujućeg zračenja ne koriste u potpunosti ovaj široko primenjivani koncept, posebna pažnja posvećena je primeni

inteligentnih analognih i kvazidigitalnih detektora jonizujućeg zračenja koji zadovoljavaju IEEE 1451.4 standard i na taj način obezbeđuju automatsku konfiguraciju u monitoring mrežu. IEEE 1451.4 standard definiše grupu standardnih šablona (*template*) za opis karakteristika senzora koji se najčešće koriste u industriji. Međutim, definisani standardni šabloni ne uključuju detektore jonizujućeg zračenja, što značajno otežava prihvatanje i primenu ovog standarda u mrežama za monitoring zračenja. Stoga je definisanje standardnog načina za specifikovanje i memorisanje karakteristika detektora jonizujućeg zračenja od ključnog značaja za povezivanje i automatsku konfiguraciju monitoring mreža primenom *Plug and Play* koncepta.

Posebna pažnja u disertaciji posvećena je razvoju inteligentnih detektora jonizujućeg zračenja na bazi IEEE 1451.4 standarda, te je za opis karakteristika detektora predloženo više novih originalnih šablona kao i modifikacija postojećih standardnih šablona. Postupak specifikovanja karakteristika i izrade elektronskih specifikacija senzora jonizujućeg zračenja, izložen u ovoj doktorskoj disertaciji, prema uvidu u raspoloživu literaturu, predstavlja prvi pokušaj da se omogući potpuno automatizovano povezivanje senzora jonizujućeg zračenja po *Plug and Play* konceptu. U okviru disertacije predloženi su novi šablon za smeštanje elektronskih specifikacija detektora jonizujućeg zračenja za GM (*Geiger-Müller*) brojač i srodne detektore impulsnog tipa i odgovarajući šablon za jonizacionu komoru, koji omogućavaju integraciju ovih detektora u heterogene monitoring mreže. Osim toga, predložen je i šablon za korekcionu tabelu koji omogućava korekciju funkcije prenosa senzora u odnosu na specifikovani parametar. Detalji praktične realizacije inteligentnih detektora, kao i odgovarajućeg akvizicionog sistema, uključeni su u disertaciju. Iako su predložena rešenja ograničena na primenu u monitoringu gama zračenja, uz manje izmene, mogu se primeniti i na monitoring drugih tipova jonizujućeg zračenja.

**Ključne reči:** inteligentni senzori, distribuirani merni sistemi, automatska konfiguracija, IEEE 1451, elektronske specifikacije, monitoring, gama zračenje.

**Naučna oblast:** tehničke nauke, elektrotehnika

**Uža naučna oblast:** elektronika

**UDK broj:** 621.3

## **Automatic configuration of distributed measurement systems based on transducer electronic data sheets**

**Abstract:** Modern measurement systems have the important task to meet growing demands for measuring the increasing number of different physical quantities, using a large number of sensors often distributed over a wide area. With the existence of a multitude of incompatible networks and protocols, development efforts required to support variety of sensor interfaces and network protocols are enormous for both sensor producers and users. On the other hand, configuration and maintenance of various sensor types in complex measurement systems, is a demanding and expensive task, especially if it is carried out manually, bearing in mind that writing a number of important parameters of the sensor is a time-consuming process and very susceptible to errors. Solution to this problem appeared in the form of smart sensors that enable Plug and Play concept and provide automation of the process of sensor connecting, configuration and maintenance. Introducing the Plug and Play concept to connect sensors and actuators would be quite useful in measurement and control systems that will lead to self-configuring and automatic system set-up.

Numerous benefits offered by networked sensors and application of Plug and Play concept for connecting these sensors are recognized by organizations for standardization that gave proposals for a series of standards. Adoption and wider application of appropriate standards would help to overcome many compatibility issues and to solve problems related to the interoperability of transducers from different vendors. Since the IEEE 1451 standard represents the most appropriate framework for connecting analog transducers in the network, possibilities to extend the application of this family of standards in network connection of specific classes of analog sensors were analyzed in detail in this thesis.

One important goal of this thesis is to advance the Plug and Play concept in the field of ionizing radiation monitoring. Unfortunately, today's radiation monitoring systems use little or no Plug and Play technology at all. Therefore, special attention is paid to the implementation of the analog and quasi-digital radiation sensors compatible to IEEE 1451.4 standard that enable the automatic configuration of the monitoring network. The IEEE 1451.4 defines standard transducer type templates for the

description of commonly used industrial sensors. Among these templates there is no standardized template that can be used for radiation detectors. The fact that standard templates do not include radiation sensors significantly complicates the acceptance and application of IEEE 1451.4 standard in radiation monitoring networks. Therefore, defining a standard way to store data on ionizing radiation detectors is crucial for their connection in the monitoring network enabling automatic configuration based on the Plug and Play concept.

Special attention in the thesis is devoted to the development of intelligent detectors of ionizing radiation based on the IEEE 1451.4 standard, and therefore several new original templates as well as the modifications of the existing standard templates for description of the characteristics of the detectors are proposed. Based on the literature available to the author, there has been no attempt to use the Plug and Play concept in the interfacing of radiation detectors with built-in electronic sensor specifications. A new TEDS template suitable for counting types of radiation detectors, such as GM (Geiger-Müller) detectors, and a new template for ionizing chambers have been proposed in the thesis to enable integration and automatic configuration of the monitoring network containing heterogeneous sensors. Also, a new correction table template for the correction of sensor's measurement transfer function, based on specified parameter, has been proposed. The implementation details of the proposed smart radiation detectors as well as appropriate data acquisition system are included in the thesis. Although the proposed transducer templates are limited to the monitoring of gamma radiation, with minor modifications, they can be applied to other types of ionizing radiation.

**Keywords:** smart sensors, distributed measurement systems, automatic configuration, IEEE 1451, transducer electronic data sheets, monitoring of gamma radiation.

**Scientific area:** technical science, electrical engineering

**Specific scientific area:** electronics

**UDK number:** 621.3



# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b> .....	<b>1</b>
1.1. Predmet i cilj istraživanja .....	4
1.2. Metodologija istraživanja .....	6
1.3. Struktura doktorske disertacije .....	8
Literatura.....	10
<b>2. Karakteristike mernih sistema</b> .....	<b>13</b>
2.1. Klasifikacija senzora sa posebnim osvrtom na senzore temperature i senzore zračenja.....	13
2.1.1. Senzori temperature .....	16
2.1.2. Senzori nuklearnog zračenja.....	18
2.2. Osnovne karakteristike senzora .....	19
2.2.1. Linearizacija statičke funkcije prenosa.....	25
2.2.2. Izvori grešaka merenja i kalibracija senzora .....	28
2.3. Statistička obrada rezultata merenja i procena merne nesigurnosti .....	33
2.3.1. Statistička obrada mernih podataka .....	36
2.3.2. Izražavanje merne nesigurnosti .....	42
Literatura.....	54

<b>3. Povezivanje senzora u distribuirani merni sistem.....</b>	<b>56</b>
3.1. Inteligentni senzori .....	57
3.2. Primena inteligentnih senzora.....	61
3.3. Geografski distribuirani merni sistemi .....	70
3.4. Standardizovani interfejsi za <i>Plug and Play</i> senzore.....	74
3.5. Automatska konfiguracija distribuiranih merno-upravljačkih sistema.....	80
Literatura.....	94
<b>4. <i>Plug and Play</i> analogni senzori .....</b>	<b>102</b>
4.1. Mrežni procesor prema IEEE 1451.1 standardu.....	103
4.1.1. Objektni model mrežnog procesora.....	105
4.1.2. Model podataka .....	111
4.1.3. Komunikacioni model .....	111
4.1.4. Primena i unapređenje standarda IEEE 1451.1 .....	115
4.2. Povezivanje analognih senzora prema IEEE 1451.4 standardu.....	119
4.2.1. Mešoviti interfejs .....	120
4.2.2. Protokol za prenos digitalnih podataka.....	122
4.2.3. Elektronske specifikacije analognih pretvarača.....	126
4.2.4. Primena i unapređenje standarda IEEE 1451.4 .....	136
4.3. Zajedničke funkcije i protokoli prema 1451.0 standardu .....	137
4.3.1. Zajedničke osobine i funkcije pretvaračkih modula.....	139
4.3.2. Elektronske specifikacije pretvarača .....	143
4.3.3. Osnovne komunikacione komande pretvaračkih modula.....	146
4.3.4. Interfejs za komunikaciju sa modulima pretvarača .....	148
4.3.5. Interfejs za mrežne servise pretvarača .....	152
4.3.6. Mrežno povezivanje na bazi HTTP protokola.....	153
4.3.7. Primena i unapređenje standarda IEEE 1451.0 .....	158

Literatura.....	159
<b>5. Implementacija i rezultati testiranja koncepta automatske konfiguracije analognih mrežnih senzora .....</b>	<b>164</b>
5.1. Platforma za razvoj mrežnih senzora.....	165
5.1.1. Projektovanje hardvera i softvera interfejsnog modula .....	166
5.1.2. TEDS editor .....	171
5.1.3. Implementacija mrežnog procesora .....	175
5.2. Inteligentni <i>Plug and Play</i> senzor temperature.....	181
5.2.1. Realizacija i povezivanje senzora.....	181
5.2.2. Testiranje <i>Plug and Play</i> temperaturnog senzora.....	183
5.2.3. Analiza mernih performansi temperaturnog senzora.....	187
5.3. Monitoring jonizacionog zračenja korišćenjem inteligentnih <i>Plug and Play</i> senzora .....	189
5.3.1. Inteligentni <i>Plug and Play</i> GM detektor .....	191
5.3.1.1. Elektronske specifikacije GM detektora.....	192
5.3.1.2. Realizacija i povezivanje <i>Plug and Play</i> GM detektora .....	199
5.3.1.3. Testiranje <i>Plug and Play</i> GM detektora .....	202
5.3.2. Inteligentna <i>Plug and Play</i> jonizaciona komora.....	205
5.3.2.1. Elektronske specifikacije jonizacione komore.....	206
5.3.2.2. Povezivanje i testiranje jonizacione komore.....	209
5.3.3. Povezivanje inteligentnih senzora zračenja u monitoring mrežu .....	215
Literatura.....	217
<b>6. Zaključak.....</b>	<b>221</b>
<b>Prilog 1.....</b>	<b>230</b>
<b>Prilog 2.....</b>	<b>232</b>

## Spisak skraćenica

BIPM	International Bureau of Weights and Measures
CAN	Controller Area Network
CBA	Component Based Architecture
CCD	Cluster Configuration Descriptor
CIP	Common Industrial Protocol
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
CP	Configuration and Planning
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DCOM	Distributed Component Object Model
DCS	Distributed Control Systems
DM	Diagnostic and Management
DSP	Digital Signal Processor
DTP	Data Transmission Protocol
EA	European co-operation for Accreditation
EDD	Electronic Device Descriptor
EDDL	Electronic Device Description Language
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ES	Extended Selector

FDI	Field Device Integration
FDT/DTM	Field Device Tool / Device Type Manager
FF H1	Foundation Fieldbus H1
FF HSE	Foundation Fieldbus High Speed Ethernet
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FSK	Frequency Shift Keying
FTP	File Transfer Protocol
GPS	Global Positioning System
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurements
HART	Highway Addressable Remote Transducer
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDM	Intelligent Device Management
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE-SA	Institute of Electrical and Electronic Engineers – Standards Association
IFCC	International Federation of Clinical Chemistry
IFS	Interface File System
IFSA	International Frequency Sensor Association
IO	Input/Output
IOT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology

MMI	Mixed Mode Interface
MN	Merna nesigurnost
MU	Measurement Uncertainty
NCAP	Network Capable Application Processor
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPL	National Physical Laboratory
NTP	Network Timing Protocol
O&M	Observations & Measurements
OGC	Open Geospatial Consortium
OIML	International Organization of Legal Metrology
OSI	Open Systems Interconnection
PID	Proportional-Integral-Derivative
PLC	Programmable Logic Device
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RFID	Radio Frequency Identification
RPC	Remote Procedure Calls
RS	Real-Time Service
RTD	Resistance Temperature Detector
SAS	Sensor Alert Service
SES	Sensor Event Service
SOA	Service-Oriented Architecture
SoC	System on Chip
SOS	Sensor Observation Service
SPI	Serial Peripheral Interface
SPS	Sensor Planning Service
STD	Smart Transducer Descriptions
STI	Smart Transducer Interface

STWS	Smart Transducer Web Service
SWE	Sensor Web Enablement
TDL	Template Description Language
TDMA	Time-Division Multiple Access
TEDS	Transducer Electronic Data Sheets
TII	Transducer Independent Interface
TIM	Transducer Interface Module
TML	Transducer Markup Language
TTP	Time-Triggered Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UML	Unified Modeling Language
UPnP	Universal Plug and Play
URL	Universal Resource Locator
URN	Unique Registration Number
USB	Universal Serial Bus
UUID	Universal Unique Identifier
VTIM	Virtual Transducer Interface Module
WIA-PA	Wireless Networks for Industrial Automation – Process Automation
WLAN	Wireless Local Area Networks
WNS	Web Notification Service
WWW	World Wide Web
XML	Extensible Markup Language

## Spisak slika

<b>Slika 2.1.</b> Idealna statička karakteristika prenosa senzora .....	19
<b>Slika 2.2.</b> Ilustracija tačnosti i preciznosti mernog uređaja .....	21
<b>Slika 2.3.</b> Statička karakteristika prenosa senzora sa histerezisom.....	21
<b>Slika 2.4.</b> Statička karakteristika prenosa senzora sa ofsetom.....	22
<b>Slika 2.5.</b> Odziv senzora na skokovitu promenu merene veličine ako se koristi model senzora prvog reda.....	24
<b>Slika 2.6.</b> Grafički a) i tabelarni b) prikaz statičke karakteristike prenosa senzora .....	27
<b>Slika 2.7.</b> Princip digitalne linearizacije statičke karakteristike prenosa .....	27
<b>Slika 2.8.</b> Kalibracija mernog instrumenta sa ponovljenim merenjima .....	31
<b>Slika 3.1.</b> Izlazni interfejsi pretvarača: analogni (a), kvazidigitalni (b), digitalni sa UART interfejsom (c), digitalni sa I <sup>2</sup> C interfejsom (d), digitalni sa jednožičnim interfejsom (e) i digitalni sa SPI interfejsom (f).....	58
<b>Slika 3.2.</b> Model inteligentnog pretvarača .....	60
<b>Slika 3.3.</b> Arhitektura industrijske komunikacione mreže .....	62
<b>Slika 3.4.</b> Evolucija interfejsa i mrežnih standarda.....	64
<b>Slika 3.5.</b> Primer scenarija za primenu SWE servisa .....	73
<b>Slika 3.6.</b> Model inteligentnog mrežnog pretvarača prema IEEE 1451 standardu .....	76
<b>Slika 3.7.</b> Povezivanje različitih modula pretvarača na mrežu prema IEEE 1451 standardu.....	78



<b>Slika 3.8.</b> Model mrežnog povezivanja pretvarača prema IEEE 1451 standardu.....	80
<b>Slika 3.9.</b> EDDL prevodilac – EDD <i>workbench</i> .....	85
<b>Slika 3.10.</b> Konceptija FDT/DTM konfiguracionog sistema .....	86
<b>Slika 3.11.</b> Arhitektura za konfiguraciju i menadžment sistema zasnovanog na TTP/A <i>Fieldbus</i> protokolu.....	89
<b>Slika 4.1.</b> Model mrežnog procesora prema IEEE 1451.1 standardu .....	104
<b>Slika 4.2.</b> Komunikacioni model klijent-server .....	112
<b>Slika 4.3.</b> Komunikacioni model izdavač-pretplatnik.....	115
<b>Slika 4.4.</b> Organizacija objekata u tipičnoj realizaciji mrežnog procesora.....	116
<b>Slika 4.5.</b> Mrežni interfejs prema modifikovanom IEEE 1451.1 standardu .....	118
<b>Slika 4.6.</b> Konceptija inteligentnog pretvarača prema IEEE 1451.4 standardu .....	120
<b>Slika 4.7.</b> Povezivanje pretvarača korišćenjem mešovitog interfejsa klase 1 .....	121
<b>Slika 4.8.</b> Povezivanje pretvarača korišćenjem mešovitog interfejsa klase 2 .....	122
<b>Slika 4.9.</b> Blok dijagram jednožične memorije DS2431 .....	123
<b>Slika 4.10.</b> Vremenski dijagram osnovnih signala na jednožičnoj magistrali .....	125
<b>Slika 4.11.</b> Struktura elektronskih specifikacija 1451.4 pretvarača .....	126
<b>Slika 4.12.</b> Specifikacije senzora iz kataloga proizvođača (a), šablon (b) i sadržaj TEDS memorije senzora (c) .....	132
<b>Slika 4.13.</b> Režimi rada za modul (a) i kanal (b) pretvarača.....	141
<b>Slika 4.14.</b> Struktura komande (a), odgovora na komandu (b) i poruke koju inicira pretvarački modul (c).....	146
<b>Slika 4.15.</b> Algoritam za slanje komande i prijem odziva za mrežni procesor (a) i prijem komande i slanje odziva za pretvarački modul (b) .....	151
<b>Slika 4.16.</b> Pristup IEEE 1451.0 mrežnom procesoru na bazi HTTP protokola.....	156
<b>Slika 5.1.</b> Arhitektura platforme za razvoj i testiranje 1451.4 kompatibilnih senzora.	166
<b>Slika 5.2.</b> Povezivanje 1451.4 kompatibilnih senzora na interfejsni modul: analogni senzor (a) i kvazidigitalni (impulsni) senzor (b) .....	167

<b>Slika 5.3.</b> Signaliziranje preko jednožičnog interfejsa: osnovni <i>Read/Write</i> signali (a) i <i>Reset</i> , <i>Read ROM</i> komanda i odziv (b).....	169
<b>Slika 5.4.</b> Organizacija softvera interfejsnog modula .....	170
<b>Slika 5.5.</b> Grafički korisnički interfejs <i>TEDS editor</i> programa.....	172
<b>Slika 5.6.</b> Blok dijagram <i>TEDS editor</i> programa .....	173
<b>Slika 5.7.</b> Model mrežnog povezivanja 1451.4 pretvarača: prema standardu 1451.0 (a) i prema predlogu iz [15] (b).....	176
<b>Slika 5.8.</b> Konceptija 1451.4 mrežnog procesora.....	177
<b>Slika 5.9.</b> Standardna struktura 1451.0 elektronskih specifikacija (a), struktura 1451.0 elektronskih specifikacija kada se koristi 1451.4 TEDS (b) .....	180
<b>Slika 5.10.</b> Povezivanje 1451.4 senzora temperature sa mrežnim procesorom .....	182
<b>Slika 5.11.</b> Realizovani sistem za testiranje <i>Plug and Play</i> temperaturnog senzora ...	184
<b>Slika 5.12.</b> Grafički korisnički interfejs aplikacije za merenje temperature sa <i>Plug and Play</i> RTD senzorom .....	185
<b>Slika 5.13.</b> Deo grafičkog interfejsa <i>TEDS editora</i> za unos parametara RTD senzora prema IEEE šablonu 37 .....	186
<b>Slika 5.14.</b> Ilustracija upotrebe <i>Correction table</i> šablona za specifikaciju relativnog energetskog odziva GM detektora u odnosu na <sup>137</sup> Cs .....	199
<b>Slika 5.15.</b> Povezivanje 1451.4 GM detektora sa mrežnim procesorom .....	200
<b>Slika 5.16.</b> Realizovani sistem za testiranje <i>Plug and Play</i> GM detektora.....	202
<b>Slika 5.17.</b> Grafički interfejs za unos parametara GM detektora prema šablonu: <i>Counting ionizing radiation sensor</i> (a) i <i>Correction table</i> (b) .....	205
<b>Slika 5.18.</b> Povezivanje komore na bazi elektrometarskog pojačavača kojim se vrši konverzija struje komore u napon .....	210
<b>Slika 5.19.</b> Povezivanje 1451.4 jonizacione komore sa mrežnim procesorom.....	211
<b>Slika 5.20.</b> Testiranje jonizacione komore M1000 korišćenjem izvora X zračenja.....	213
<b>Slika 5.21.</b> Relativna osetljivost jonizacione komore M1000 u odnosu na <sup>137</sup> Cs u funkciji energija X i gama zračenja.....	213

<b>Slika 5.22.</b> Struja zasićenja jonizacione komore M1000 u funkciji ekspozicione doze dobijene korišćenjem gama izvora $^{60}\text{Co}$ .....	214
<b>Slika 5.23.</b> Grafički korisnički interfejs <i>TEDS editor</i> programa za upis parametara jonizacione komore M1000.....	214
<b>Slika 5.24.</b> Grafički korisnički interfejs klijentske aplikacije za udaljeni pristup inteligentnoj jonizacionoj komori.....	216

## Spisak tabela

<b>Tabela 2.1.</b> Karakteristike temperaturnih senzora .....	17
<b>Tabela 2.2.</b> Karakteristike senzora nuklearnog zračenja .....	18
<b>Tabela 2.3.</b> Faktori proširenja za Gausovu raspodelu.....	49
<b>Tabela 2.4.</b> Faktori proširenja za najznačajnije raspodele.....	50
<b>Tabela 2.5.</b> Budžet merne nesigurnosti indirektno merene veličine.....	52
<b>Tabela 3.1.</b> Najznačajniji elementi elektronskih specifikacija pretvarača prema 1451.0 standardu.....	92
<b>Tabela 4.1.</b> Hijerarhija klasa objektnog modela 1451.1 mrežnog procesora .....	105
<b>Tabela 4.2.</b> Atributi Entitet objekata 1451.1 mrežnog procesora .....	106
<b>Tabela 4.3.</b> Hijerarhija klasa za Blok objekte.....	107
<b>Tabela 4.4.</b> Hijerarhija klasa za Komponente.....	109
<b>Tabela 4.5.</b> Hijerarhija klasa za Servise .....	110
<b>Tabela 4.6.</b> Spisak šablona za senzore koji su definisani u standardu IEEE 1451.4...	128
<b>Tabela 4.7.</b> Tipovi podataka u standardu IEEE 1451.4.....	130
<b>Tabela 4.8.</b> Sažeti prikaz šablona .....	136
<b>Tabela 4.9.</b> Aplikacioni interfejs za mrežne servise .....	152
<b>Tabela 4.10.</b> HTTP aplikacioni interfejs .....	157
<b>Tabela 5.1.</b> Podešavanje UART interfejsa za generisanje jednožičnih signala.....	168
<b>Tabela 5.2.</b> Osnovne komande za komunikaciju sa 1451.4 interfejsnim modulom ....	170
<b>Tabela 5.3.</b> Tipovi TEDS sekcija definisanih DS poljem.....	174
<b>Tabela 5.4.</b> Struktura Meta-TEDS sekcije 1451.4 mrežnog procesora .....	180
<b>Tabela 5.5.</b> Varijanse u merenju napona, otpornosti referentnog otpornika i pojačanja pojačavača dobijene iz podataka proizvođača.....	188
<b>Tabela 5.6.</b> Procena merne nesigurnost otpornosti za $R_{PT100}=390 \Omega$ .....	188

<b>Tabela 5.7.</b> Upoređenje rezultata merene otpornost korišćenjem <i>Plug and Play</i> senzora i referentnog instrumenta.....	189
<b>Tabela 5.8.</b> Klasifikacija detektora na bazi <i>Version letter</i> i <i>Version number</i> polja osnovnog TEDS-a .....	193
<b>Tabela 5.9.</b> Organizacija šablona za TEDS pretvarača GM detektora .....	194
<b>Tabela 5.10.</b> Šablon za TEDS pretvarača – <i>Measurement</i> sekcija .....	195
<b>Tabela 5.11.</b> Šablon za TEDS pretvarača GM detektora osetljivog na gama zračenje	196
<b>Tabela 5.12.</b> Predloženi <i>Correction table</i> šablon .....	199
<b>Tabela 5.13.</b> Primer elektronskih specifikacija za 1451.4 <i>Plug and Play</i> GM detektor .....	203
<b>Tabela 5.14.</b> Uprošćeni prikaz šablona za sekciju TEDS pretvarača jonizacione komore koja je osetljiva na gama zračenje .....	208

# 1. Uvod

Savremeni distribuirani merni sistemi imaju važnu ulogu u industrijskom okruženju kao i u istraživačkim laboratorijama. U poslednje vreme, osim u prostorno relativno ograničenim industrijskim i eksperimentalnim okruženjima, distribuirani merni sistemi našli su široku primenu u praćenju, nadzoru i kontroli ekoloških parametara, saobraćaja i transporta, u oblasti medicine, poljoprivredne proizvodnje i mnogim drugim oblastima. Savremeni merni sistemi sve više su prisutni u najrazličitijim ljudskim aktivnostima kao i uređajima za svakodnevnu upotrebu, počev od mobilnih telefona i drugih komunikacionih uređaja, preko inteligentnih uređaja u domaćinstvu, do inteligentnih stambenih zgrada i drugih složenih sistema.

Sveprisutnost mernih sistema u najrazličitijim oblastima ljudske delatnosti direktna je posledica sve većih zahteva i neprekidnog razvoja jeftinih, kompaktnih, energetske efikasne i multifunkcionalnih pretvarača. Ubrzan razvoj pretvarača omogućio je njihovo povezivanje u mreže gde svaki čvor mreže može obavljati bilo ulogu senzora ili aktuatora, ili čak obe uloge istovremeno.

S obzirom na činjenicu 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. Osim toga, treba imati u vidu i niz problema koji nastaju usled grešaka pri ručnom unošenju važnih parametara pretvarača kao što su merni opsezi, osetljivost, faktori skaliranja i slično, koji doprinose ukupnim troškovima instalacije i održavanja sistema. Iz tog razloga savremeni pretvarači, osim svoje osnovne funkcije senzora ili aktuatora, najčešće mogu obavljati i niz dodatnih funkcija kao što su automatska identifikacija,

konfiguracija i kalibracija pretvarača, ali i različite vrste obrade, skladištenja i prenosa podataka preko žičnih ili bežičnih mrežnih interfejsa. S obzirom da mogu autonomno obavljati različite složene zadatke, ovakvi pretvarači smatraju se inteligentnim pretvaračima.

Savremena primena distribuiranih mernih i kontrolnih sistema sve više zahteva izvršavanje složenih zadataka po mogućstvu autonomno i automatski, te se samim tim od sistema zahteva sve veći nivo inteligencije. Svakako, uz mnoge prednosti koje donosi primena inteligentnih pretvarača i distribuiranih sistema, postoje i brojni izazovi kao što su robusnost, komunikacija u realnom vremenu, sinhronizacija, energetska efikasnost, problemi lociranja, interoperabilnost, automatsko prepoznavanje pretvarača, podrška za konfiguraciju i upravljanje, kao i mnogi drugi problemi. Zbog svega navedenog, projektovanje i razvoj inteligentnih senzora i aktuatora, kao i protokola za njihovo mrežno povezivanje, u poslednje vreme je u fokusu mnogih istraživačkih projekata.

Na tržištu je danas prisutan veliki broj inteligentnih pretvarača koji se mogu povezati u različite žične i bežične mreže. Međutim, inteligentni pretvarači najčešće su specifično odabrani i prilagođeni, a često i posebno dizajnirani prema specifikacijama sistema u okviru koga će biti korišćeni. Pretvarački čvor koji je dizajniran za jedan mrežni sistem najčešće nije kompatibilan sa drugim sistemima, ili se bar ne može upotrebiti u drugim sistemima bez prethodnih prilagođenja i rekonfiguracije sistema. Takođe, kontinualni razvoj pretvarača i mrežnih tehnologija otežava održavanje i unapređenje već postojećih sistema usled čestih nekompatibilnosti novih tehnologija sa prethodnim, kao i usled nekompatibilnosti opreme različitih proizvođača. Različiti proizvođači najčešće teže da nametnu sopstvena specifična hardverska i softverska rešenja, kao i specifične komunikacione protokole, čime se povezivanje pretvarača različitih proizvođača u potpunosti onemogućava, odnosno proces povezivanja čini jako otežanim i nepraktičnim.

Prethodno navedeni problemi, nastali usled nekompatibilnosti inteligentnih pretvarača različitih proizvođača, mogu se prevazići uvođenjem odgovarajućih standarda. Primenom dobro osmišljenih i definisanih standarda, koji bi bili opšteprihvaćeni od proizvođača i krajnjih korisnika, ostvario bi se niz prednosti i ušteda u projektovanju, instalaciji i održavanju kompleksnih mernih i kontrolnih sistema.

Prisustvo odgovarajućeg komunikacionog standarda moglo bi da obezbedi univerzalnu komunikaciju sa inteligentnim pretvaračima bez obzira na proizvođača opreme.

Tokom 1990-tih godina učinjeni su značajni naponi da se standardizuje jedinstven protokol za industrijske merno-upravljačke mreže. Do izvesnih pomaka u standardizaciji industrijskih mreža došlo se uvođenjem IEC 61158, a zatim i IEC 61784 standarda što, na žalost, nije dovelo do opšteprihvaćenog univerzalnog rešenja. U današnje vreme u industriji se koristi veliki broj različitih protokola među kojima su: PROFIBUS, HART, *Foundation Fieldbus*, *DeviceNet*, INTERBUS, *CANopen*, MODBUS, LIN i mnogi drugi.

Međutim, bez obzira na veliki broj proizvođača koji često koriste različite komunikacione protokole, upotrebom standardizovanih elektronskih specifikacija pretvarača mogla bi se obezbediti interoperabilnost opreme različitih proizvođača. Standardizacijom elektronskog opisa specifikacija pretvarača i formata podataka omogućila bi se primena *Plug and Play* koncepta, automatsko prepoznavanje senzora i aktuatora, a samim tim i automatizacija procesa konfiguracije i kalibracije sistema, bez obzira na tip mreže koja se koristi za fizičko povezivanje pretvarača. Automatizacijom procesa konfiguracije i kalibracije mernih i kontrolnih sistema eliminisale bi se česte greške koje nastaju usled obavljanja ovog procesa ručno, čime se povećava pouzdanost sistema i čine značajne uštede. Primenom standardizovanih elektronskih specifikacija, postiže se interoperabilnost između pretvarača različitih proizvođača što dovodi do demonopolizacije tržišta. Uz prisustvo velikog broja proizvođača na tržištu i opšteprihvaćenog standarda, neminovno dolazi do ušteda u svim elementima procesa dizajniranja, instalacije, održavanja i unapređenja mernih i kontrolnih sistema, pa samim tim i do pada cena posmatranih sistema.

Zahtevi za automatskom konfiguracijom distribuiranih mernih sistema doveli su do mnogih interesantnih rešenja koja evoluiraju tokom poslednjih dvadesetak i više godina. Međutim, zbog velike složenosti merno-upravljačkih sistema, brzog razvoja računarskih i mrežnih interfejsa, kao i mnogobrojnih raznorodnih rešenja i standarda, problem automatske konfiguracije ovakvih sistema ni do danas nije u potpunosti rešen, te je on predmet intenzivnog izučavanja i istraživanja.



U okviru predložene disertacije diskutovano je i ponuđeno nekoliko rešenja za elektronske specifikacije analognih i kvazidigitalnih senzora koja doprinose unapređenju i široj primeni *Plug and Play* koncepta u oblasti distribuiranih mernih sistema.

## **1.1. Predmet i cilj istraživanja**

U poslednje vreme, povećan je broj aplikacija koje zahtevaju da se merni podaci prikupljaju sa širokog geografskog područja, korišćenjem velikog broja senzora, te se stoga može uočiti porast interesovanja za povezivanje inteligentnih senzora u distribuirane merne sisteme. Za povezivanje senzora u distribuirane sisteme često se koriste specijalizovane industrijske komunikacione mreže, ali se mogu koristiti i druge lokalne žične ili bežične mreže. Mrežne tehnologije omogućavaju značajno unapređenje performansi i efikasnosti mernih sistema. Povezivanjem inteligentnih senzora u distribuirane merne sisteme povećava se fleksibilnost, pojednostavljuje se instalacija i održavanje, obezbeđuje lakše proširenje sistema kao i globalni pristup mernim podacima korišćenjem Internet tehnologija.

Komunikaciona mreža koja se koristi za povezivanje inteligentnih senzora kao i način korisničkog pristupa mernim podacima, značajno utiču na performanse distribuiranog mernog sistema. Postojanje velikog broja senzorskih interfejsa kao i velikog broja međusobno nekompatibilnih mreža i protokola, donosi niz problema među kojima se posebno ističu povezivanje na proizvoljnu mrežu, automatska detekcija senzora, rekonfigurabilnost i automatska konfiguracija sistema, kao i interoperabilnost inteligentnih senzora različitih proizvođača [1–3]. Automatska detekcija i konfiguracija senzora zahteva da se svaki senzor opiše adekvatnim standardizovanim skupom relevantnih informacija, kojima se definišu merne funkcije, merni opsezi i kalibracija, ali i podržani protokoli i servisi za mrežnu komunikaciju [4].

U velikom broju industrijskih sistema, pre svega u onim koji se zasnivaju na HART i *Foundation Fieldbus* protokolima, koristi se EDDL jezik (*Electronic Device Description Language*) [5] za opis karakteristika i funkcija pretvarača. Za potrebe konfiguracije i upravljanja resursima u mernim i kontrolnim sistemima često se koristi i

FDT/DTM (*Field Device Tool / Device Type Manager*) [6] koncept koji se bazira na konstrukciji odgovarajućih drajvera uređaja za industrijske pretvarače. Poslednjih godina učinjeni su izvesni napori da se ove dve tehnologije objedine u jedinstven sistem za automatsku konfiguraciju i menadžment industrijskih sistema kroz FDI (*Field Device Integration*) [7] projekat koji podržavaju vodeće svetske kompanije i organizacije: *Fieldbus Foundation*, *FDT Group*, *HART Communications Foundation*, *OPC Foundation* i *PROFIBUS & PROFINET International*.

Za razliku od industrijskih mreža, kod automobilskih i avionskih mreža, zasnovanih na TTP/A protokolu, koncept automatske konfiguracije mrežnih pretvarača ostvaruje se na nešto drugačiji način. TTP/A protokol striktno je vremenski organizovan, te je pogodan za povezivanje inteligentnih pretvarača u vremenski kritičnim sistemima male brzine prenosa. Automatsku konfiguraciju za TTP/A mrežne pretvarače predložili su H. Kopetz, M. Holzmann i W. Elmenreich u radu [8]. Kasnije je ovaj predlog prihvatila i standardizovala organizacija OMG (*Object Management Group*) u okviru STI (*Smart Transducer Interface*) standarda [9]. Elektronske specifikacije za opis pretvarača u TTP/A mrežama nazivaju se *Smart Transducer Descriptions – STD* [10]. Za opis podataka smeštenih u STD specifikacijama koristi se popularni XML jezik (*EXtensible Markup Language*).

Još jedan pristup standardizovanog mrežnog povezivanja senzora definisala je međunarodna organizacija OGC (*Open Geospatial Consortium*) koja je pokrenula inicijativu za standardizaciju mrežnog povezivanja senzora kroz familiju standarda SWE (*Sensor Web Enablement*) [11]. Familija OGC–SWE uvodi standardno predstavljanje podataka i elektronskih specifikacija senzora, kao i standardne interfejsne mrežnih servisa, koji omogućavaju pristup sensorima preko Interneta korišćenjem različitih mreža i protokola [12 – 13].

Povezivanje inteligentnih senzora značajno je olakšano pojavom familije standarda IEEE 1451 [14], koju je publikovala međunarodna organizacija za standardizaciju IEEE-SA (*Institute of Electrical and Electronic Engineers – Standards Association*) uz podršku organizacije NIST (*National Institute of Standards and Technology*). U novije vreme, ovu familiju standarda podržala je i usvojila i međunarodna organizacija za standardizaciju ISO (*International Organization for Standardization*) u saradnji sa IEC (*International Electrotechnical Commission*) pod

nazivom ISO/IEC/IEEE 21451-2010. Familija standarda IEEE 1451 definiše skup standardnih komunikacionih interfejsa za mrežno povezivanje velikog broja različitih senzora i aktuatora, nezavisno od korišćene mreže. Osim toga, standardom se definišu i odgovarajuće elektronske specifikacije pretvarača – TEDS (*Transducer Electronic Datasheets*) koje omogućavaju primenu *Plug and Play* koncepta povezivanja pretvarača. Familijom standarda IEEE 1451 opisani su komunikacioni protokoli aplikativnog nivoa koji se mogu koristiti i u heterogenim okruženjima za povezivanje i automatsku konfiguraciju inteligentnih pretvarača u distribuirani merno-upravljački sistem. Poseban značaj ove familije standarda ogleda se u primeni u različitim oblastima: industrijskim sistemima, vremenski determinisanim automobilskim i avionskim mrežama, ali i u sistemima za nadzor parametara okoline, u medicini, u poljoprivrednim sistemima, inteligentnim zgradama i inteligentnim transportnim sistemima. Imajući u vidu popularnost i široku primenu standarda, brojni istraživači razmatrali su različite aspekte njihove praktične primene i predložili izvesna proširenja i unapređenja standarda [15 – 20].

U poslednje vreme, primena distribuiranih mernih sistema najčešće se oslanja na arhitekturu baziranu na mrežnim servisima (SOA – *Service-Oriented Architecture*). Posebno značajno unapređenje familije standarda IEEE 1451, koje obezbeđuje podršku SOA arhitekturi, prikazano je u [21]. Međutim, uprkos širokoj popularnosti, familija standarda IEEE 1451 ne predstavlja univerzalni i opšteprihvaćeni koncept mrežnog povezivanja senzora. Takođe, postoji i niz problema u mrežnom povezivanju senzora za koje ova familija ne nudi adekvatna rešenja, te su neophodna dodatna unapređenja [22]. Na primer, u radovima [23 – 24] pokazano je na koji način se skup protokola za automatsko otkrivanje i povezivanje uređaja UPnP (*Universal Plug and Play*) može iskoristiti da se unapredi razvoj Internet baziranih mernih sistema.

Cilj ove doktorske disertacije je da se izvrši sistematizacija metoda i rešenja mrežnog povezivanja mernih pretvarača nezavisno od korišćene mrežne tehnologije i da se predlože rešenja koja obezbeđuju interoperabilnost proizvoda i tehnologija različitih proizvođača i automatsku konfiguraciju distribuiranih mernih sistema po *Plug and Play* konceptu korišćenjem elektronskih specifikacija senzora.

## **1.2. Metodologija istraživanja**

Uprkos značajnom progresu u razvoju inteligentnih senzora i distribuiranih mernih sistema i velikim naporima učinjenim na polju standardizacije interfejsa i protokola za automatsku konfiguraciju i interakciju senzora i korisničkih aplikacija, ova oblast je još uvek u fazi razvoja. S obzirom na složenost problema automatske konfiguracije i brz razvoj novih mrežnih tehnologija, aktuelna rešenja u povezivanju senzora ne pružaju adekvatne odgovore na mnoga pitanja. Analizom postojećih protokola i standarda može se uočiti nedostatak jasne povezanosti između fizičke realizacije distribuiranih mreža senzora i pristupa sensorima sa aplikativnog nivoa.

U ovoj doktorskoj disertaciji polazi se od osnovne pretpostavke da se postojeći protokoli i standardi mogu dodatno unaprediti razvojem novih tehnika i pristupa, posebno po pitanju automatske konfiguracije distribuiranih mernih sistema korišćenjem elektronskih specifikacija senzora.

Primenjene naučne metode u istraživanju koje čini osnovu ove disertacije jesu:

- analiza postojećih rešenja, protokola i standarda za povezivanje senzora u distribuirane merne sisteme,
- komparativna analiza postojećih modela inteligentnih senzora sa stanovišta automatske konfiguracije pri povezivanju u distribuirane merne sisteme,
- analiza metoda za pristup podacima sa inteligentnih mrežnih senzora preko industrijskih komunikacionih mreža i Interneta u cilju rešavanja opštih i specifičnih aplikativnih problema, i
- eksperimentalna verifikacija novih rešenja povezivanja i konfiguracije senzora, testiranjem performansi laboratorijskog modela sistema.

Istraživanje u okviru priprema doktorske disertacije sprovedeno je u više faza. U prvoj fazi proučeni su osnovni bibliografski izvori, protokoli i standardi za povezivanje inteligentnih senzora u distribuirane merne sisteme. U okviru druge faze izvršen je pregled i sistematizacija najnovijih istraživanja u oblasti povezivanja, konfiguracije, autotestiranja i kalibracije mreže senzora korišćenjem elektronskih specifikacija senzora. Pregled i sistematizacija savremenih alata i tehnika za realizaciju inteligentnih senzora predstavlja treću fazu istraživanja. Četvrta faza predstavlja analizu

najnovijih načina implementacije mrežnih senzora koja će poslužiti za poređenje sa rešenjima predloženim u disertaciji. U okviru pete faze, istražene su mogućnosti i dati predlozi novih rešenja za projektovanje inteligentnih mrežnih senzora sa elektronskim specifikacijama korišćenjem standardnih hardverskih i softverskih alata. Izrada laboratorijskog prototipa projektovanog inteligentnog mrežnog senzora sa automatskom konfiguracijom na bazi elektronskih specifikacija predstavlja šestu fazu istraživanja. U poslednjoj fazi istraživanja izvršena je uporedna analiza karakteristika predloženog rešenja za povezivanje i autokonfiguraciju senzora sa postojećim rešenjima koja su opisana u novijoj literaturi.

### **1.3. Struktura doktorske disertacije**

Plan i metodologija sprovedenog istraživanja sastoji se od teorijskog i praktičnog dela koji su izloženi u okviru doktorske disertacije. Pored uvodne, prve glave, disertacija sadrži još pet glava, a u nastavku je dat kratak sadržaj ovih glava. U okviru druge glave opisane su najvažnije karakteristike senzora, koje su bitne za kreiranje elektronskih specifikacija, odnosno za proces automatske konfiguracije mernog sistema. Definisani su osnovni pojmovi i tipovi senzora i data uobičajena klasifikacija senzora. Imajući u vidu da su u praktičnim primerima primene korišćeni senzori temperature i jonizujućeg zračenja, ovi senzori su nešto detaljnije opisani. Objašnjene su osnovne tehnike linearizacije i kalibracije senzora, a posebna pažnja posvećena je određivanju merne nesigurnosti senzora i mernog sistema u celini.

U trećoj glavi disertacije dat je pregled metoda za povezivanje senzora u distribuirane merne sisteme. Prvo je uveden i detaljno objašnjen pojam inteligentnog senzora. Nakon toga, dat je pregled najznačajnijih primera primene inteligentnih senzora u industriji, kao i kratak opis geografski distribuiranih mernih sistema koji se baziraju na familiji standarda OGC-SWE. U nastavku je dat opis standardnih interfejsa za *Plug and Play* pretvarače na bazi familije standarda IEEE 1451. Konačno, u poslednjem poglavlju ove glave, dat je pregled nekih od najznačajnijih metoda za kreiranje elektronskih specifikacija i automatsku konfiguraciju u distribuiranim mernim i kontrolnim sistemima.

U četvrtoj glavi dat je pregled *Plug and Play* analognih senzora koji se baziraju na IEEE 1451.1, 1451.4 i 1451.0 standardima. U okviru prvog poglavlja dat je opis objektnog modela, modela podataka i komunikacionog modela mrežnog procesora na osnovu 1451.1 standarda. Opisana je primena ovog standarda i neki predlozi njegovog unapređenja. U narednom poglavlju, opisane su metode povezivanja analognih pretvarača na osnovu standarda 1451.4. Posebna pažnja posvećena je mešovitom interfejsu, protokolu za prenos digitalnih podataka i elektronskim specifikacijama analognih pretvarača. U sledećem poglavlju opisane su zajedničke funkcije i protokoli na osnovu standarda 1451.0. U okviru ovog poglavlja date su zajedničke karakteristike i funkcije pretvaračkih modula, kao i opis elektronskih specifikacija, navedene su osnovne komande i definisani su interfejs za komunikaciju sa modulima pretvarača i interfejs za mrežne servise pretvarača. U poslednjem poglavlju objašnjeno je mrežno povezivanje senzora na bazi HTTP protokola.

U okviru pete glave dat je predlog novih rešenja za integraciju senzora u distribuirane merne sisteme [25, 26, 27]. Izvršena je analiza problema u mrežnom povezivanju IEEE 1451.4 kompatibilnih senzora i koncepcija za praktičnu implementaciju *Plug and Play* analognih i kvazidigitalnih senzora. Opisan je realizovani laboratorijski prototip *Plug and Play* analognog senzora, hardverska platforma i softverska rešenja na bazi programskog paketa *LabVIEW* i programskog jezika *Java*. Realizovani laboratorijski prototip analognog senzora prvo je testiran povezivanjem senzora temperature [25], a zatim i povezivanjem složenijih senzora za detekciju jonizujućeg zračenja [26, 27]. Za svaki od testiranih *Plug and Play* senzora definisane su odgovarajuće elektronske specifikacije i pokazano na koji način se one mogu iskoristiti u procesu automatske konfiguracije mernog sistema.

U završnoj, šestoj glavi disertacije data su zaključna razmatranja i predlozi za dalji rad. Osim toga, na kraju svake glave naveden je pregled literature koja je korišćena pri njenom pisanju. Izlaganja u glavama 3 i 5 upotpunjena su priložima koji su dati na kraju teksta disertacije. U Prilogu 1 dat je pregled protokola za industrijske mreže, dok su u Prilogu 2 navedeni detalji pojedinih IEEE 1451.4 standardnih šablona.

## Literatura

- [1] K. Lee, „Sensor networking and interface specification,“ in *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Conf.*, vol 1, 2001, pp. 146-152.
- [2] S. Rossi, A. Carvalho, A. Silva, E. Batista, C. Kitano, T. Filho, and T. Prado, „Open and standardized resources for smart transducer networking,“ *IEEE Trans. on Instrum. & Meas.*, vol. 58, no. 10, pp. 3754-3761, 2009.
- [3] J. Riviera, M. Carrillo, and G. Herrera, „Self-compensation to build reconfigurable measurement systems,“ *IEEE Instrum. & Meas. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 10-19, 2013.
- [4] L. Benetazzo, M. Bertocco, and C. Narduzzi, „Self-configuring measurement networks,“ *Metrology & Meas. Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 59-67, 2007.
- [5] International Electrotechnical Commission (IEC). (2006). Function blocks (FB) for process control—Part 3: Electronic Device Description Language (EDDL). IEC 61804-3:2006.
- [6] T. Tetsuo, “FDT/DTM Framework for new for new field device tools,” Yokogawa Technical Report, Yokogawa Electric Corporation, vol. 51, no 2, 2007, [Online]. Available: <http://www.yokogawa.com/rd/pdf/TR/rd-tr-r00044-004.pdf>
- [7] FDI cooperation, [Online]. Available: <http://www.fdi-cooperation.com/home.html>
- [8] H. Kopetz, M. Holzmann and W. Elmenreich, „A universal smart transducer interface: TTP/A,“ *International Journal of Computer System Science & Engineering*, vol. 16, no 2, pp. 71-77, 2001.
- [9] OMG. Smart transducers interface V1.0. Available specification document number formal/2003-01-01. Object Management Group, Needham, MA, January 2003. [Online]. Available: <http://doc.omg.org/formal/2003-01-01>.
- [10] S. Pitzek; and W. Elmenreich, “Configuration and management of a real-time smart transducer network,” in *Proc. of the IEEE International Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, vol. 1, 2003, pp. 407-414.
- [11] Sensor Web Enablement (SWE) standard, [Online]. Available: <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe>
- [12] A. Bröring, P. Maué, K. Janowicz, D. Nüst, and C. Malewski, „Semantically-enabled sensor plug & play for the sensor web,“ *Sensors*, vol. 11, no. 8, pp. 7568-7605, 2011.

- [13] A. Bröring, J. Echterhoff, S. Jirka, I. Simonis, T. Everding, C. Stasch, S. Liang, and R. Lemmens, „New generation sensor web enablement,“ *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2652-2699, 2011.
- [14] IEEE 1451 Smart transducer interface standards. [Online]. Available: <http://ieee1451.nist.gov>.
- [15] K. Nihal and B. Sudantha, „An environmental air pollution monitoring system based on the IEEE 1451 standard for low cost requirements,“ *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 415-422, 2008.
- [16] N. Ulivieri, C. Distante, T. Luca, S. Rocchi and P. Siciliano, „IEEE 1451.4: A way to standardize gas sensor,“ *Sensors & Actuators B-Chemical*, vol. 114, no. 1 pp.141-151, 2006.
- [17] J. Kim, H. Byun, Y. Ham, W. Jung, D. Han, J. Park and H. Lee, „The definition of basic TEDS of IEEE 1451.4 for sensors for an electronic tongue and the proposal of new template TEDS for electrochemical devices,“ *Talanta*, vol. 71, no. 4, pp. 1642-1651, 2007.
- [18] A. Kumar, P. Singh and S. Sud, „Energy efficient and low-cost indoor environment monitoring system based on the IEEE 1451 standard,“ *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 10, pp. 2598-2610, 2011.
- [19] J. Higuera and J. Polo, „IEEE 1451 Standard in 6LoWPAN Sensor Networks Using a Compact Physical-Layer Transducer Electronic Datasheet,“ *IEEE Trans. on Instrum. & Meas.*, vol. 60, no. 8, pp. 2751-2758, 2011.
- [20] F. Barrero, S. Toral, M. Vargas and J. Becerra. (2012). Networked electronic equipments using the IEEE 1451 standard – VisioWay: A case study in the ITS area. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, [Online]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2012/467124/>
- [21] E. Song and K. Lee, „STWS: A Unified Web Service for IEEE 1451 smart transducers,“ *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, vol. 57, no. 8, pp. 1749-1756, 2008.
- [22] V. Vasiliev and P. Chernov, „Smart sensors, sensor networks, and digital interfaces,“ *Measurement Techniques*, vol. 55, no. 10, pp. 1115-1119, 2013.
- [23] H. Song, D. Kim, K. Lee and J. Sung. (2005). UPnP-based sensor network management architecture. Presented at Int. Conf. on Mobile Comput. Ubiquitous



Netw., [Online]. Available: <http://kumo.ishilab.net/icmu2005/Papers/117390-1-050228235605.pdf>

- [24] A. Nieves, N. Madrid, R. Seepold, J. Larrauri and B. Larrinaga, „A UPnP Service to Control and Manage IEEE 1451 Transducers in Control Networks,“ *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, vol. 61, no. 3, pp. 791-800, 2012.
- [25] N. Jevtić and V. Drndarević, „Design and Implementation of Plug-and-Play analog resistance temperature sensor,“ *Metrology & Meas. Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 565-580, 2013.
- [26] N. Jevtić and V. Drndarević, „Plug and Play Geiger-Muller Detector for Environmental Monitoring,“ *Instrumentation Science & Technology*, vol. 43, no. 02, pp. 222-243, 2015.
- [27] V. Drndarević , N. Jevtić, V. Rajović and S. Stanković, „Smart Ionization Chamber for Gamma-ray Monitoring,“ *Nuclear Technology & Radiation Protection*, vol. 29, no. 3, pp. 190-198, 2014.

## **2. Karakteristike mernih sistema**

Proces automatske konfiguracije distribuiranih mernih sistema se u velikoj meri bazira na elektronskim specifikacijama senzora, te je veoma važno definisati najvažnije karakteristike senzora koje su potrebne za kreiranje elektronskih specifikacija. Ova glava je posvećena definisanju najvažnijih karakteristika senzora koje su od značaja za automatsku konfiguraciju mernog sistema. Date su definicije osnovnih pojmova, pregled često korišćenih senzora kao i kratak opis senzora temperature i jonizujućeg zračenja koji su primenjeni u istraživanju, te su bitni za dalje izlaganje. Definisane su osnovne karakteristike senzora i objašnjene osnovne tehnike linearizacije, kao i kalibracije senzora koja igra važnu ulogu u procesu konfiguracije i menadžmenta mernih sistema. Posebna pažnja posvećena je određivanju merne nesigurnosti senzora i mernog sistema u celini, s obzirom da je podatak o mernoj nesigurnosti od ključne važnosti pri izboru adekvatnog senzora za određenu primenu.

### **2.1. Klasifikacija senzora sa posebnim osvrtom na senzore temperature i senzore zračenja**

Senzor je uređaj čija je funkcija da reaguje na promenu ulazne fizičke veličine i konvertuje tu promenu u merljivi (najčešće električni) signal [1]. Osim termina senzor u literaturi se često sreće i termin pretvarač (*transducer*). Pretvarač je opštiji pojam i označava uređaj kojim se vrši konverzija jednog oblika energije u drugi [1]. U većini slučajeva može se smatrati da senzori predstavljaju pretvarače kojima se vrši konverzija promena određene fizičke veličine u električni signal. Pretvarači takođe obuhvataju i

aktuatore kojima se vrši obrnuta transformacija – energije iz električnog u neki drugi oblik. Koncepti koji su izloženi u okviru disertacije prevashodno se odnose na senzore, mada se, u većini slučajeva, mogu primeniti i na aktuatore. U daljem tekstu korišćen je termin pretvarač, kada se tekst odnosi i na senzore i na aktuatore.

Savremena tehnika konstrukcije senzora razvija se u sledeća tri pravca [2]:

- Minimizacija senzora, odnosno povećanje stepena integracije. Ova tendencija je globalnog karaktera i prisutna je i u svim drugim oblastima tehnike,
- Ostvarenje višestrukog dejstva kako bi se omogućilo da senzor istovremeno meri više različitih fizičkih veličina,
- Proširivanje mogućnosti senzora dodavanjem mikroprocesorske logike. U poslednje vreme posebno je zanimljiv razvoj inteligentnih senzora i povezivanje senzora u mreže.

S obzirom na veoma širok spektar primene senzora i različite pravce razvoja senzorske tehnike, klasifikacija senzora nije jednostavna i može se izvršiti na mnogo načina. Neki od često korišćenih načina za podelu senzora zasnivaju se na nekom od svojstava senzora: vrsti izlaznog signala, tipu merene veličine, fizičkom ili hemijskom principu na kom počiva njihov rad, gabaritima, oblasti primene i slično.

Najčešće korišćena podela senzora je po vrsti izlaznog signala. Prema izlaznom signalu senzori se mogu grupisati u tri kategorije: analogni, kvazidigitalni i digitalni. Iako su senzori sa digitalnim interfejsom sve prisutniji u poslednje vreme, analogni senzori su još uvek najzastupljeniji na svetskom tržištu. Prema podacima organizacije IFSA (*International Frequency Sensor Association*) udeo analognih senzora na svetskom tržištu je oko 55%, digitalnih oko 30%, a kvazidigitalnih senzora oko 15% [3, 4].

Analogni senzori najčešće koriste naponski ili strujni signal u određenom opsegu. Opseg signala može biti proizvoljan, mada se često sreću senzori koji generišu izlazni signal u nekom od standardno korišćenih opsega, kao što su 0–5V, 0–10V,  $\pm 10V$ , 4–20mA i slično. Prednosti analognih senzora ogledaju se u jednostavnosti izrade i niskoj ceni. Nedostaci se ogledaju u neophodnosti odgovarajuće obrade i kondicioniranja analognog signala kao i u dodatnoj potrebi za digitalizacijom signala.

Takođe, povezivanje i konfiguracija analognih senzora mogu biti dosta komplikovani i podložni greškama.

Kvazidigitalni senzori koriste diskretne digitalne signale standardizovanih logičkih nivoa pri čemu se podaci prenose modulacijom frekvencije tj. periode, faze, faktora ispunjenosti impulsa, intervala između impulsa ili broja impulsa. Na tržištu su najzastupljeniji kvazidigitalni senzori sa frekvencijskom modulacijom – 70%, senzori sa impulsnom širinskom modulacijom – 16% i senzori sa modulacijom ispunjenosti impulsa – 9%. Procenat zastupljenosti senzora kod kojih se korisni podatak prenosi putem broja impulsa je 3%, modulacijom periode 1% i modulacijom faze impulsa 1%. [3, 4]. Kvazidigitalni signali otporniji su na smetnje, obrada izlaznog signala je jednostavnija i manje su podložni greškama nego što je to slučaj sa analognim signalima. Međutim, i za kvazidigitalne signale se mora obezbediti prevođenje signala u odgovarajući digitalnu formu.

Uticaj mikroprocesorske tehnike na razvoj savremenih senzora doveo je do razvoja senzora sa digitalnim izlaznim signalom. Izlazni digitalni interfejsi senzora uglavnom koriste serijsku komunikaciju za prenos informacija do nadređenog kontrolera ili procesora, ali u pojedinim slučajevima omogućuju i mrežne servise. Digitalni senzori obezbeđuju veliku fleksibilnost i jednostavnost povezivanja i konfiguracije u okviru složenih mernih sistema. Takođe, digitalni senzori mogu obezbediti i čitav niz dodatnih funkcija kao što su identifikacija senzora, samotestiranje i dijagnostika, automatska adaptacija i konfiguracija i slično, o čemu će biti više reči u trećoj glavi.

Podela senzora često se vrši i prema tome da li senzor koristi spoljni izvor napajanja ili ne [5]. Senzori koji ne zahtevaju spoljni izvor napajanja za konverziju signala nazivaju se samopobudni ili pasivni senzori i kod njih izlazni signal nastaje na osnovu energije merene veličine. Pasivni senzori mogu biti: indukcioni, elektromagnetni, elektrodinamički, piezoelektrični, piroelektrični, termoelektrični i fotoelektrični. Sa izuzetkom piezoelektričnih senzora, većina pasivnih senzora obično daje male izlazne nivoe i neophodno je pojačati ih. Odziv i osetljivost pasivnih senzora ograničeni su energijom raspoloživom tokom procesa konverzije i efikasnošću senzora.

Senzori kojima je neophodan spoljni izvor napajanja nazivaju se aktivni ili modulirani senzori. Aktivni senzori vrše modulaciju energije nekog spoljašnjeg izvora, odnosno koriste dodatnu energiju iz spoljašnjeg izvora napajanja za konverziju merene veličine u odgovarajuću električnu. Kod aktivnih senzora neelektrične veličine najčešće utiču na promenu neke od električnih karakteristika kao što su otpornost, kapacitivnost ili induktivnost. Aktivni senzori mogu se podeliti na: otporničke, kapacitivne, induktivne, ali u ovu grupu se takođe svrstavaju i pojedini hemijski i optoelektronski senzori.

Podela senzora može se izvršiti i prema tipu merene veličine na: toplotne, mehaničke, kinematičke, geometrijske, radijacione, vremenske, električne, hemijske i fizičke [6]. Toplotni senzori mogu se koristiti za merenje temperature ili toplotnog kapaciteta; mehanički se najčešće koriste za merenje sile, momenta, pritiska ili naprezanja; kinematički se koriste za merenje linearnog i ugaonog ubrzanja i brzine, merenje protoka i slično; geometrijski senzori najčešće se koriste za merenje položaja ili nivoa objekata u prostoru; radijacioni za merenje intenziteta toplotnog, nuklearnog, akustičnog ili elektromagnetnog zračenja; vremenski za merenje vremenskih perioda i intervala kao i za merenje frekvencije; električni senzori koriste se za merenje elektromotorne sile, struje, otpora, induktivnosti, kapaciteta i drugih parametara; hemijski senzori koriste se za merenje hemijskog sastava supstanci; dok se fizički senzori najčešće koriste za merenje mase, gustine, vlažnosti, tvrdoće i slično.

U nastavku teksta senzori temperature i nuklearnog zračenja biće opisani nešto detaljnije jer su ovi tipovi senzora korišćeni za praktičnu primenu koncepta inteligentnih senzora, opisanog u petoj glavi disertacije.

### **2.1.1. Senzori temperature**

Merenje temperature je najrasprostranjenije i najstarije merenje. Temperatura je toplotno stanje predmeta ili procesa. Temperatura zavisi od toga koliko toplote sadrži telo određene mase i pod određenim pritiskom. U praksi se temperatura najčešće izražava u Celzijusovim stepenima ( $^{\circ}\text{C}$ ), ali su u upotrebi i Farenhajtova, Reomirova i druge skale. Celzijus je 1740. godine predložio skalu kod koje se temperatura topljenja leda uzima kao  $0^{\circ}\text{C}$ , a temperatura ključanja vode je uzeta kao  $100^{\circ}\text{C}$ . Dakle, Celzijusov stepen predstavlja stoti deo temperature razlike između tačke topljenja leda

i tačke ključanja vode. Britanski naučnik Kelvin je 1851. godine uveo temperaturu kao fundamentalnu veličinu i predložio apsolutnu termodinamičku skalu koja je danas poznata kao Kelvinova skala. Jedinica termodinamičke skale je kelvin (K). Prema Kelvinovoj skali voda se leđi na temperaturi 273,15 K pri pritisku od 1 atm, što odgovara 0 °C na Celzijusovoj skali.

Praktično merenje temperature zasniva se na promeni određenog parametra pri promeni temperature. Temperaturno osetljive osobine materije koje se koriste u izradi instrumenata za merenje temperature su: promena zapremine ili pritiska, promena električnog otpora, elektromotorna sila na spoju dva različita metala ili poluprovodnika, intenzitet zračenja na visokim temperaturama ili magnetni efekti na ekstremno niskim temperaturama. Karakteristike najčešće korišćenih temperaturnih senzora koji na svom izlazu daju električni signal sistematizovane su u tabeli 2.1 [5].

**Tabela 2.1. Karakteristike temperaturnih senzora [5]**

Tip	Električne karakteristike	Napomena
Termo-prekidač	Izlaz predstavlja otvoren ili zatvoren kontakt.	Temperaturni opseg od -30°C do 300 °C. Tačnost ±0.5% do ±2% punog opsega.
Termopar	Naponski izvor izlazne otpornosti reda 10Ω. Osetljivost od 5μV/°C do 50μV/°C.	Relativno mala osetljivost. Nelinearan odziv. Male dimenzije, širok opseg temperatura od -200 °C do 1600 °C, visoka reproduktibilnost karakteristika.
Platinski otporni senzori	Pozitivan temperaturni koeficijent. Tipična vrednost otpornosti na 0°C u opsegu od 20Ω do 2kΩ. Osetljivost od 0.1% do 0.6% punog opsega po °C.	Visoka reproduktibilnost karakteristika. Relativno dobra linearnost u širokom opsegu. Merni opseg od -260°C do 650°C (maksimalno 1500°C). Povezuje se u mostnu šemu ili pobuđuje izvorom konstantne struje.
Termistor	Negativan temperaturni koeficijent. Tipična otpornost na 25°C od 50Ω do 1MΩ. Osetljivost oko 4%/°C na temperaturi 25°C.	Posедуje veliku osetljivost. Merni opseg od -100 °C do 400 °C. Nelinearni, ali se nude i linearizovani senzori.
Poluprovodnički senzor	Promena napona, struje ili otpornosti sa promenom temperature. Naponski senzor (p-n spoj) zahteva strujnu pobudu, strujni zahteva naponsku, otporni (najčešće silicijumski) može se pobuđivati i naponski i strujno.	Mala promena signala sa promenom temperature. Merni opseg od -50°C do 150 °C. Zahtevaju pažljivu obradu signala. Raspoloživi u formi monolitnih integrisanih kola, linearizovani i kalibrisani. Tačnost reda ±1% punog opsega.

Temperaturne promene odvijaju se sporo što je sa stanovišta merenja i upravljanja veoma značajno. Merenje temperature tipično se vrši sa periodom

odabiranja od 20 s, te se akvizicija temperaturnih podataka obavlja bez posebnih poteškoća.

### 2.1.2. Senzori nuklearnog zračenja

Merenje nuklearnog zračenja neophodno je u svim oblastima primene nuklearne energije – naučnim istraživanjima, reaktorima, zaštiti od zračenja, kao i monitoringu životne sredine. Izbor tipa detektora nuklearnog zračenja zavisi od energije zračenja i od toga koja se vrsta zračenja, odnosno nuklearnih čestica, detektuje. Pri interakciji nuklearnog zračenja sa atomima materije koja je izložena zračenju dolazi do jonizacije ili eksitacije atoma aktivne materije detektora. Većina detektora bazira se na efektima jonizacije do koje dolazi usled interakcije zračenja sa aktivnom materijom detektora. Ovi detektori tipično daju, na svom izlazu, jednosmerni strujni signal, srazmeran efektima jonizacije, ili naponske impulse čiji je broj u jedinici vremena srazmeran intenzitetu zračenja. Detektori koji na svom izlazu daju impuls pri prolasku nuklearnog zračenja kroz njihovu aktivnu zapreminu, nazivaju se brojači. Pored detekcije zračenja brojači mogu da daju i informaciju o prirodi i energiji zračenja. Drugi tipovi detektora na svom izlazu daju signal čiji je nivo srazmeran intenzitetu nuklearnog zračenja. Karakteristike najčešće korišćenih detektora nuklearnog zračenja date su u tabeli 2.2.

**Tabela 2.2.** Karakteristike senzora nuklearnog zračenja [5]

Tip	Električne karakteristike	Napomena
Jonizaciona komora	Na izlazu detektora dobija se jednosmerni strujni signal veoma malog intenziteta $10^{-6}$ A do $10^{-12}$ A.	Za pojačanje veoma malih struja neophodno je koristiti elektrometarski pojačavač. Koristi se za merenje intenziteta $x$ i $\gamma$ zračenja.
Gajger-Milerovi brojači	Naponski impulsi na izlazu. Amplituda impulsa je reda nekoliko volta a trajanja od $100\mu$ s do $300\mu$ s i ne zavisi od energije.	Mogu se povezati direktno na brojačko kolo. Koriste se za detekciju intenziteta $\beta$ i $\gamma$ zračenja.
Scintilacioni detektori	Naponski impulsi amplitude od nekoliko mV do nekoliko stotina mV. Amplituda impulsa srazmerna je energiji zračenja.	Koriste se za merenje intenziteta i spektrometriju $x$ i $\gamma$ zračenja.
Poluprovodnički detektori	Na izlazu detektora dobija se signal naelektrisanja srazmeran energiji zračenja.	Za obradu signala neophodan je niskošumni predpojačavač naelektrisanja. Koriste se za kvalitetnu spektrometriju $x$ , $\alpha$ , $\beta$ i $\gamma$ zračenja.

## 2.2. Osnovne karakteristike senzora

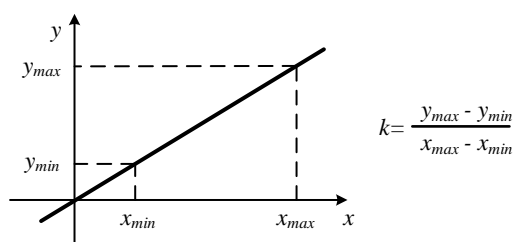
U opštem slučaju konverzija mernog signala  $x$  u informacioni signal  $y$ , ili drugim rečima model mernog instrumenta, može se opisati matematičkim izrazom [2]:

$$a_0 y + \sum_{i=1}^n a_i \frac{d^i y}{dt^i} = b_0 x + \sum_{j=1}^m b_j \frac{d^j x}{dt^j}, \quad m \leq n. \quad (2.1)$$

Statička karakteristika senzora predstavlja odnos informacionog signala  $y$  i mernog signala  $x$  u stacionarnim uslovima:

$$y = kx = \frac{b_0}{a_0} x, \quad \text{za} \quad \frac{d^i y}{dt^i} = \frac{d^j x}{dt^j} = 0. \quad (2.2)$$

Koeficijent  $k = b_0/a_0$  naziva se statičko pojačanje ili statička osetljivost senzora. Idealna statička karakteristika senzora prikazana je na slici 2.1. U praksi, senzor nikada nije idealan, te i realna statička karakteristika  $y_r = f(x)$  odstupa od idealne  $y = kx$ . Realna statička karakteristika dobija se eksperimentalno tako što se na ulaz dovede odgovarajuća vrednost, sačeka izvesno vreme da se smire sve prelazne pojave, a zatim očita vrednost na izlazu senzora. Ovaj postupak ponavlja se za odabranu sekvencu ulaznih vrednosti senzora u opsegu od interesa. Optimalni pravac prave koja predstavlja realnu statičku karakteristiku senzora određuje se na osnovu metoda linearne regresije. Statička karakteristika bliska je idealnoj u sledećim uslovima: kada ulazna veličina ne zavisi od vremena, kada su efekti višeg reda zanemarljivi i kada veza između ulaza i izlaza ne zavisi od toga da li ulazna veličina raste ili se smanjuje.



**Slika 2.1.** Idealna statička karakteristika prenosa senzora

Među najznačajnije statičke karakteristike senzora ubrajaju se: merni opseg, linearnost, tačnost, preciznost, razlaganje, osetljivost, histerezis, ulazna i izlazna impedansa.



Merno područje je skup vrednosti merne veličine od  $x_{min}$  do  $x_{max}$  za koje senzor daje odziv unutar dozvoljenih granica greške merenja. Maksimalna promena merne, odnosno ulazne veličine senzora  $x_{max} - x_{min}$  naziva se ulazni merni opseg, dok se maksimalna promena izlazne veličine  $y_{max} - y_{min}$  naziva izlazni merni opseg senzora.

Linearnost pokazuje u kojoj meri se realna karakteristika senzora,  $y_r$ , podudara sa idealnom statičkom karakteristikom, u opsegu u kome je predviđeno da merni uređaj radi. U idealnom slučaju, senzori treba da budu linearni, a koeficijent pojačanja  $k$  ne sme da zavisi od opsega u kome se merenje vrši. Greška linearnosti određuje se maksimalnim odstupanjem od idealne karakteristike i definiše se kao:

$$L = \frac{\max|y_r - y|}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\% . \quad (2.3)$$

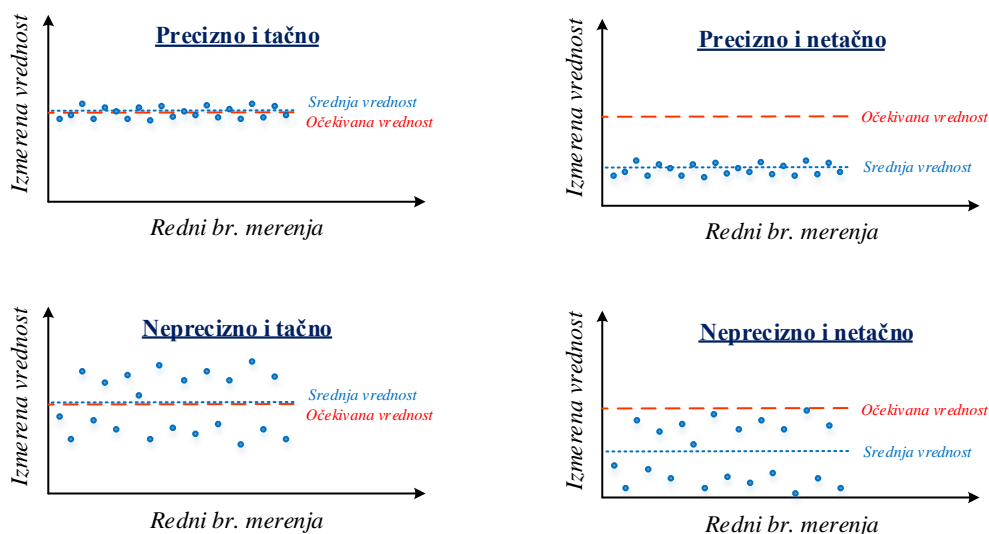
Tačnost je sposobnost mernog instrumenta da pokazuje vrednost koja je bliska pravoj vrednosti. Preciznost je sposobnost pokazivanja vrednosti koje su međusobno bliske. Treba imati u vidu da prava vrednost merene veličine nije poznata, pa se koriste statističke definicije za obradu rezultata merenja. Kao dogovorena vrednost uobičajeno se koristi srednja vrednost skupa mernih rezultata, a kao mera preciznosti tipično se usvaja standardna devijacija. Na slici 2.2 ilustrovani su pojmovi tačnosti i preciznosti. Detaljnija razmatranja o tačnosti i preciznosti mernog instrumenta vezana su za pojam greške merenja i merne nesigurnosti o čemu će biti više reči u poglavlju 2.3.

Razlaganje ili rezolucija mernog instrumenta je sposobnost razlikovanja bliskih vrednosti. Na primer, kod analognih mernih uređaja, odnosno mernih uređaja sa analognim indikatorom, moć razlaganja predstavlja najmanji podeok indikatora. Kod mernih uređaja sa digitalnim indikatorom, poslednja cifra indikatora određuje rezoluciju instrumenta.

Osetljivost senzora ili mernog sistema dobija se iz statičke karakteristike:

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} . \quad (2.4)$$

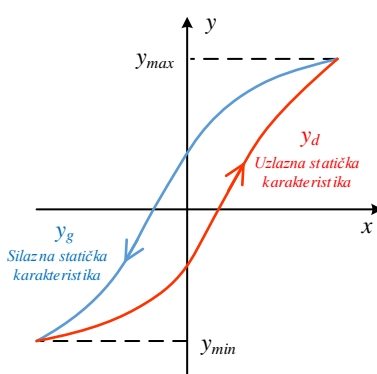
Osetljivost linearnog senzora je konstantna i odgovara statičkom pojačanju. Međutim, ukoliko senzor nije linearan osetljivost je promenljiva i zavisi od intenziteta merne veličine.



Slika 2.2. Ilustracija tačnosti i preciznosti mernog uređaja

Histerezis je pojava koja dovodi do razlikovanja statičke karakteristike, dobijene za rastuću sekvencu vrednosti merene veličine (uzlazna statička karakteristika), i statičke karakteristike dobijene za opadajuću sekvencu vrednosti merene veličine (silazna statička karakteristika). Statička karakteristika senzora sa histerezisom prikazana je na slici 2.3. Histerezis se kvantitativno može izraziti korišćenjem formule:

$$H = \frac{\max|y_g - y_d|}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\% . \quad (2.5)$$

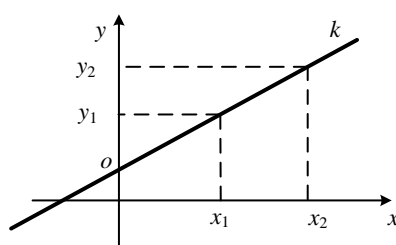


Slika 2.3. Statička karakteristika prenosa senzora sa histerezisom

Za povezivanje senzora na odgovarajući akvizicioni sistem veoma je važno definisati vrednost izlazne impedanse senzora i ulazne impedanse akvizicionog sistema.

Povezivanje naponskih senzora sa velikom izlaznom impedansom na akvizicioni sistem sa malom ulaznom impedansom može dovesti do grešaka pri merenju ukoliko se ne izvrši odgovarajuća korekcija.

Osim prethodno opisanih statičkih karakteristika u praksi se često sreće još jedna statička karakteristika koja se naziva ofset. Ofset je pojava koja se manifestuje postojanjem signala na izlazu senzora kada je merena veličina jednaka nuli. Do pojave ofseta dolazi kod aktivnih senzora, dok ofseta nema kod pasivnih senzora. Razlog je u tome što pasivni senzori ne zahtevaju spoljni izvor napajanja koji pravi ofset aktivnim sensorima, pa oni imaju izlazni signal čak i kada nema ulaznog signala. Statička karakteristika aktivnog senzora sa ofsetom prikazana je na slici 2.4.



**Slika 2.4.** *Statička karakteristika prenosa senzora sa ofsetom*

Ako se korišćenjem pasivnog senzora može zadovoljiti zahtevani odnos signal/šum preporučuje se korišćenje pasivnog senzora, kako ne bi došlo do pojave ofseta. Ako se sa  $x$  označi signal na ulazu senzora, sa  $y$  merena veličina,  $k$  osetljivost senzora, a sa  $o$  vrednost signala na izlazu iz senzora kada je vrednost merene veličine jednaka nuli, tada se funkcija prenosa senzora može predstaviti sledećim izrazom:

$$y = k \cdot x + o. \quad (2.6)$$

Vrednost ofseta  $o$  može se odrediti na osnovu dva merenja ( $y_1$  i  $y_2$ ) sprovedena za dve poznate vrednosti merene veličine ( $x_1$  i  $x_2$ ), pri čemu merenja treba sprovesti u što kraćem vremenskom intervalu. Vrednosti na izlazu iz senzora mogu se izraziti na sledeći način:

$$y_1 = k \cdot x_1 + o, \quad y_2 = k \cdot x_2 + o. \quad (2.7)$$

Iz relacije (2.7) dobija se:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (2.8)$$

$$o = y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1 \quad (2.9)$$

Ofset mernog sistema se najčešće može anulirati tako što se ukloni dejstvo merene veličine i izlazni signal podese na nulu. S obzirom da se vrednost ofseta menja u vremenu, neophodno je proveravati sistem i podešavati ofset pre početka merenja.

Većina senzora projektovana je tako da bude osetljiva samo na jednu veličinu, međutim senzori su osetljivi i na druge parazitne veličine usled čega dolazi do problema u interpretaciji informacije koju nosi signal iz senzora. Na primer, većina senzora je osetljiva na promene temperature. Primer kompenzacije osetljivosti senzora na promene temperature ogleda se u dodavanju elementa čiji temperaturni koeficijent ima suprotan znak od znaka temperaturnog koeficijenta senzora. Osim toga kompenzacija se može izvršiti i dodavanjem elementa na čijem se izlazu dobija signal koji na neki način zavisi od temperature. Moguće je izvršiti kompenzaciju i kombinovanjem senzora i drugog nezavisnog temperaturnog senzora i na taj način generisati signal koji je u nekom opsegu manje osetljiv na promene temperature.

Osim statičke funkcije prenosa u praksi se često posmatraju i dinamičke karakteristike senzora, posebno ako se merni sistem koristi u sistemima za automatsko upravljanje. Dinamičke karakteristike opisuju ponašanje senzora od trenutka promene merene veličine do trenutka ponovnog uspostavljanja stacionarnog stanja. Dinamičko ponašanje senzora opisano je modelom (2.1) pri čemu se izvodi višeg reda ne zanemaruju.

Da bi se ispitalo odnosno poredilo dinamičke karakteristike senzora potrebno je senzor pobuditi nekim standardnim signalom. Kao standardni signali za pobudu senzora najčešće se koriste odskočna (Hevisajdova), impulsna (Dirakova), i sinusoidna funkcija, ali isto tako često koriste se i linearne, eksponencijalne, trouglaste ili pravougaone funkcije.

Za praktičnu analizu dinamičkih karakteristika senzora u vremenskom domenu najviše se primenjuje odskočna (Hevisajdova) funkcija, jer je ona relativno jednostavna za realizaciju. Za model senzora prvog reda ( $n=1$ ):

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (2.10)$$

diferencijalna jednačina se najčešće piše u obliku:

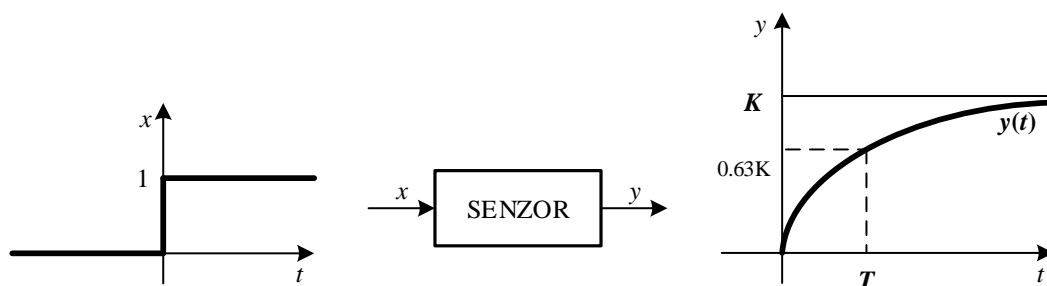
$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot x(t), \quad (2.11)$$

pri čemu je  $T = a_1 / a_0$  vremenska konstanta senzora, a  $K = a_b / a_0$  koeficijent pojačanja.

Kada se senzor modelovan diferencijalnom jednačinom (2.11) pobudi odskočnom funkcijom dobija se vremenski odziv oblika:

$$y(t) = K \cdot (1 - e^{-t/T}), \quad (2.12)$$

Vremenski odziv senzora grafički je prikazan na slici 2.5.



**Slika 2.5.** Odziv senzora na skokovitu promenu merene veličine ako se koristi model senzora prvog reda [2]

Da bi dinamička greška mernog sistema bila što manja potrebno je koristiti senzore koji imaju zadovoljavajuće malu vremensku konstantu. Kao što se vidi sa slike 2.5, vremenska konstanta  $T$  može se odrediti kao trenutak u kome odziv senzora dostigne 63% od vrednosti novog stacionarnog stanja. Za detaljniju analizu dinamičkih karakteristika senzora često se koristi i model drugog reda, dok se modeli višeg reda ređe koriste pri analizi mernih sistema u vremenskom domenu.

Za analizu dinamičkog ponašanja senzora, posebno za modele višeg reda, često se koristi Laplasova transformacija. Primenom Laplasove transformacije na diferencijalnu jednačinu (2.1), za nulte početne uslove, dobija se funkcija prenosa senzora:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad m \leq n. \quad (2.13)$$

gde je sa  $s$  označen kompleksan broj oblika  $s = \sigma + j\omega$ .

Prenosna funkcija senzora, dakle, predstavlja odnos Laplasove transformacije izlaza i ulaza senzora za nulte početne uslove. Na primer, prenosna funkcija senzora kao sistema prvog reda opisana je diferencijalnom jednačinom (2.11), te je odgovarajuća funkcija prenosa:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} = \frac{K}{Ts + 1}. \quad (2.14)$$

S obzirom na kompaktnost zapisa i jednostavnost analize u kompleksnom domenu u odnosu na vremenski domen, funkcija prenosa je veoma pogodna i često se koristi za opis dinamičkih karakteristika senzora.

### **2.2.1. Linearizacija statičke funkcije prenosa**

U prethodnom izlaganju definisana je statička karakteristika senzora kao veza ulazne i izlazne veličine senzora pri čemu su svi prelazni procesi završeni:

$$y = k \cdot x. \quad (2.15)$$

Očigledno, od senzora se očekuje da ima linearnu karakteristiku. Međutim, po pravilu senzori imaju nelinearnu statičku karakteristiku prenosa, ali linearnost može biti zadovoljena u pojedinim slučajevima, naročito ako se posmatra uzak opseg merene veličine. Da bi merena veličina bila ispravno određena na osnovu električnog signala na izlazu nelinearnog senzora, potrebno je koristiti odgovarajuću nelinearnu funkciju koja odgovara statičkoj karakteristici senzora, što može dovesti do različitih problema u realizaciji. S obzirom na jednostavnost praktične primene linearne funkcije, najčešće se od nelinearnih senzora zahteva da se pri realizaciji izvrše određene modifikacije kako bi se kao rezultat dobio senzor sa linearnom karakteristikom. Ovakav postupak naziva se linearizacija statičke karakteristike prenosa nelinearnog senzora.

Linearizacija statičke karakteristike prenosa senzora može se izvršiti modifikovanjem kola senzora ili obradom signala dobijenog na izlazu senzora. U opštem slučaju, signal na izlazu senzora,  $y$ , može se predstaviti kao nelinearna funkcija merene veličine,  $x$ :

$$y = f(x) \quad (2.16)$$

Ako signal  $y$  predstavlja napon, linearizacija se može izvršiti pomoću pojačavača čija je funkcija prenosa takođe nelinearna:

$$y_{kor} = k \cdot f_1(y) = k \cdot f_1(f(x)) \quad (2.17)$$

Da bi zavisnost korigovanog signala,  $y_{kor}$ , bila linearna u odnosu na merenu veličinu  $x$ , potrebno je da funkcija  $f_1$  bude inverzna funkcija funkcije  $f$ , odnosno:

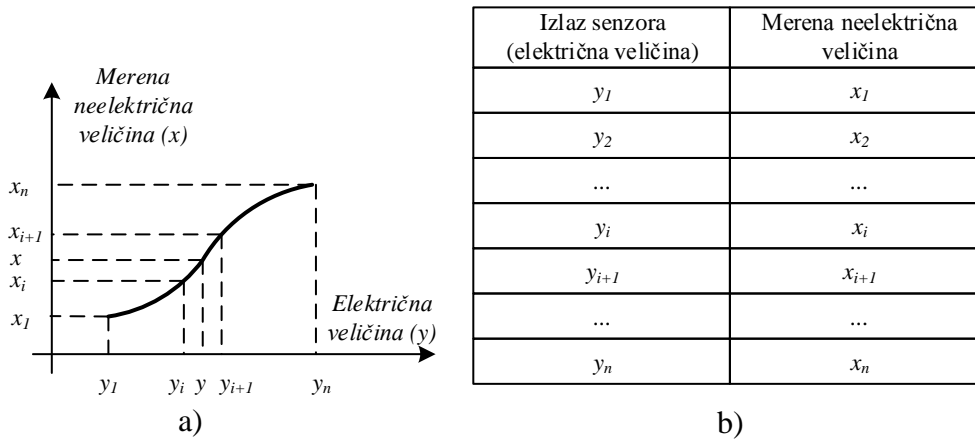
$$y_{kor} = k \cdot f_1(f(x)) = k \cdot f^{-1}(f(x)) = k \cdot x \quad (2.18)$$

Za linearizaciju karakteristike prenosa senzora koristi se odgovarajuća linearizaciona funkcija  $y_{kor} = f^{-1}(y)$  koja se dobija na osnovu karakteristika senzora. Ukoliko se linearizacija vrši analognim kolima u opštem slučaju nije jednostavno realizovati funkciju  $y_{kor} = f^{-1}(y)$  koja može biti proizvoljnog oblika. U praksi se linearizacija analognim kolima vrši korišćenjem linearizacionih funkcija kao što su  $y_{kor} = 1/y$ ,  $y_{kor} = y^n$ ,  $y_{kor} = \log(y)$  ili polinomske funkcije kao što je  $y_{kor} = Ay + By^2$  i slično.

U novije vreme, linearizacija se najčešće vrši digitalnom obradom signala. Prvo je potrebno izvršiti digitalizaciju signala na izlazu senzora, a zatim linearizaciju karakteristike prenosa senzora u digitalnom domenu. Linearizacija digitalnim kolima najčešće se vrši preko tabele pretraživanja. Tabela se formira snimanjem statičke karakteristike prenosa senzora u željenom mernom intervalu i sa odabranim brojem tačaka. Dobijeni podaci se smeštaju u ROM ili EEPROM memoriju u formi niza parova vrednosti električnog signala i odgovarajuće vrednosti merene veličine,  $(y_i, x_i)$ . Primer tabelarnog i grafičkog prikaza statičke karakteristike senzora dat je na slici 2.6. Proces linearizacije započinje očitavanjem digitalne vrednosti signala na izlazu senzora,  $(y_i)$ , a zatim se pristupa ROM ili EEPROM memoriji i pronalazi vrednost  $y_i$  u tabeli. Iz tabele se zatim očitava odgovarajuća vrednost merene veličine,  $(x_i)$ .

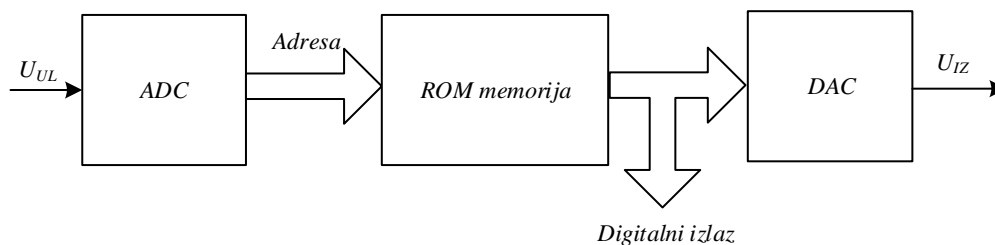
Ukoliko se vrednost električne veličine na izlazu senzora,  $(y_i)$ , nalazi između dve susedne vrednosti u tabeli, tada se odgovarajuća vrednost merene veličine,  $(x_i)$ , dobija najčešće linearnom interpolacijom. Na primer, ako je napon na izlazu senzora  $y_i < y < y_{i+1}$ , linearizovana vrednost merene veličine  $x$  izračunava se po formuli:

$$x = x_i + \frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} (y - y_i). \quad (2.19)$$



Slika 2.6. Grafički a) i tabelarni b) prikaz statičke karakteristike prenosa senzora [5]

Prethodno objašnjeni postupak digitalne linearizacije može se realizovati korišćenjem mikroprocesora. Ukoliko se za obradu signala ne koristi mikroprocesor, moguće je promeniti pojednostavljeni postupak linearizacije. Pojednostavljeni postupak linearizacije nelinearne karakteristike prenosa senzora pomoću tabele pretraživanja prikazan je na slici 2.7.



Slika 2.7. Princip digitalne linearizacije statičke karakteristike prenosa [5]

Nelinearni naponski signal sa izlaza senzora dovodi se na ulaz AD konvertora. Na izlazu ADC dobija se digitalni ekvivalent nelinearnog signala iz senzora. Dobijeni digitalni ekvivalent napona senzora se može iskoristiti kao adresa lokacije u ROM memoriji u koju je prethodno upisana linearizovana vrednost signala. Adresne linije memorije mogu se povezati direktno na izlaz AD konvertora, a za selektovanje memorije može se koristiti signal za kraj konverzije. Da bi se omogućilo očitavanje linearizovane vrednosti signala iz ROM memorije, u memoriju prethodno mora biti



upisana potpuna tabela podataka koja sadrži onoliko linearizovanih vrednosti koliko ima nivoa kvantizacije. S obzirom da za rezoluciju AD konvertora od  $n$  broj bita tabela treba da sadrži  $2^n$  linearizovanih vrednosti, može se zaključiti da za veću rezoluciju treba obezbediti i veliku memoriju za smeštanje potpune tabele za linearizaciju. Linearizovana vrednost signala može se koristiti u digitalnoj formi ili se pomoću DA konvertora može ponovo konvertovati u linearizovani analogni signal.

Prednost metode linearizacije koja se zasniva na korišćenju tabele pretraživanja je jednostavna realizacija i velika brzina odziva. Sa druge strane, primena ove metode zahteva da nelinearnost bude dobro poznata i konstantna.

### **2.2.2. Izvori grešaka merenja i kalibracija senzora**

U toku procesa merenja uslovi u kojima se proces odvija neprekidno se menjaju, tako da, osim merene veličine, na senzor i na merni sistem u celini deluju mnogobrojni faktori čije se delovanje ne može predvideti ni kontrolisati. Kao posledica delovanja različitih faktora u procesu merenja svaki merni rezultat uvek sadrži izvesnu grešku merenja. Apsolutna greška merenja predstavlja razliku između izmerenog rezultata,  $x_s$  i uslovno tačnog rezultata,  $x_t$ :

$$\varepsilon = x_s - x_t. \quad (2.20)$$

Ukoliko je moguće, merenje se obično ponavlja više puta pod istim uslovima, a kao rezultat merenja se usvaja srednja vrednost uzorka. Pod uslovno tačnim rezultatom,  $x_t$ , podrazumeva se rezultat koji se dobija ako se merenje izvrši etalonskim instrumentom. Osim apsolutne greške, često se definiše i relativna greška merenja:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{x_t} = \frac{x_s - x_t}{x_t}. \quad (2.21)$$

S obzirom na veliki broj faktora koji utiču na proces merenja, greške koje se pritom javljaju su veoma raznolike i nije ih lako klasifikovati. Po jednoj od mogućih klasifikacija greške se dele na dve grupe: odredive i neodredive (slučajne).

Odredive greške su one čiji se uzrok na neki način može utvrditi. Među najvažnije odredive greške svrstavaju se sistematske greške. Sistematske greške nastaju usled nesavršenosti: mernog postupka, mernih instrumenata, mera, prirode merene

fizičke veličine, uticaja okoline ili ličnog uticaja eksperimentatora [2]. Uticaj sistematskih grešaka može se smanjiti primenom postupka kalibracije senzora.

Neodredive (slučajne) greške u rezultatima eksperimenta posledica su mnogobrojnih i neizbežnih promena koje nastaju u merama, mernim uređajima, okolini, objektu ispitivanja, te u samom ispitivaču [2]. Slučajne greške se ne mogu odrediti, ali se njihov uticaj može umanjiti, ili se, uz pomoć statističkih metoda, mogu proceniti. Uticaj slučajne greške na rezultat merenja može da se smanji ako se merenje ponovi više puta, pod istim uslovima, i izvrši usrednjavanje dobijenih rezultata.

Pojam greške merenja usko je povezan sa pojmovima tačnosti i preciznosti. Očigledno, prisustvo sistematskih grešaka u procesu merenja dovodi do odstupanja srednje vrednosti,  $x_s$ , od uslovno tačne vrednosti,  $x_t$ , što čini merni rezultat netačnim. Sa druge strane, prisustvo slučajnih grešaka u mernom procesu dovodi do velikih odstupanja pojedinačnih merenja od srednje vrednosti,  $x_s$ , te se može reći da je rezultat neprecizan.

Teorija grešaka, međutim, polazi od aksiomatskih pojmova slučajne i sistematske greške koje su idealizovane veličine. To u praksi dovodi do poteškoća u jednoznačnom izražavanju rezultata merenja, jer nije poznata tačna vrednost merene veličine. Kako bi se postigla jednoznačnost u izražavanju rezultata merenja, vodeće institucije međunarodnog metrološkog sistema, na čelu sa Međunarodnim biroom za tegove i mere (*International Bureau of Weights and Measures – BIPM*), uvode pojam merne nesigurnosti [7]. Merna nesigurnost je definisana kao nenegativni parametar koji karakteriše rasipanje vrednosti pripisanih merenoj veličini. Dakle, svako merenje okarakterisano je ne samo vrednošću merene veličine već i odgovarajućim podatkom o pridruženoj mernoj nesigurnosti. Merna nesigurnost ima slučajni karakter i reflektuje nemogućnost potpunog poznavanja merene veličine. Iako se izražavanje merne nesigurnosti oslanja se na matematički aparat klasične statističke teorije koji se koristi i prilikom analize teorije grešaka, merna nesigurnost je pre svega orijentisana na praktičnu primenu i može se dobro koristiti u svim eksperimentalnim merenjima. Metode za određivanje merne nesigurnosti publikovane su u dokumentu *Uputstvo za izražavanje merne nesigurnosti* [8], o čemu će više reči biti u poglavlju 2.3.

U direktnoj vezi sa pojmovima greške merenja i merne nesigurnosti javlja se i pojam kalibracije koji je u praktičnoj primeni mernih sistema od velike važnosti. Kalibracija senzora je proces u kom se vrši poređenje dobijenog mernog rezultata, pomoću senzora koji se kalibriše, sa pokazivanjem odgovarajućeg etalonskog mernog instrumenta poznate tačnosti. Etalonski merni instrument koji se koristi u procesu kalibracije naziva se standard. Standard uobičajeno treba da poseduje bar četiri puta manju mernu nesigurnost od mernog instrumenta koji se kalibriše. Formalna definicija procesa kalibracije koju je usvojio Međunarodni biro za tegove i mere glasi [7]: „Operacija koja pod određenim uslovima, u prvom koraku, uspostavlja odnos između vrednosti fizičke veličine sa mernom nesigurnošću koju pruža merni standard i odgovarajućeg pokazivanja sa pratećom mernom nesigurnošću (instrumenta koji se kalibriše), i u drugom koraku, koristi ove informacije da uspostavi odnos za dobijanje rezultata merenja na osnovu pokazivanja (instrumenta koji se kalibriše)“.

Proces kalibracije nezaobilazan je u praktičnoj primeni mernih sistema. U mernom procesu uvek je u manjoj ili većoj meri prisutna sistematska greška, te se, kao rezultat procesa kalibracije senzora, sistematske greške senzora mogu uočiti i, na odgovarajući način, korigovati. Proces kalibracije u praksi se često sprovodi uz odgovarajuće korekcije mernog sistema (najčešće uvođenjem kalibracionih koeficijenata), tako da merni sistem u tačkama kalibracije pokazuje tačnu vrednost sa mernom nesigurnošću koja je određena etalonskim instrumentom.

Postupak kalibracije može se sprovoditi na različite načine u zavisnosti od: tipa senzora, merene veličine i oblasti primene mernog sistema, odnosno zahtevane tačnosti senzora. U industrijskim primenama, tipično se za određene vrste merenja specifikuju se standardne procedure kalibracije senzora kako bi se zadovoljili neophodni uslovi u pogledu tačnosti mernog postupka. Generalno govoreći, postupak kalibracije praktično se sprovodi kroz sledeće korake.

- Identifikacija svih fizičkih veličina od značaja koje mogu uticati na rezultat merenja;
- Fiksiranje svih promenljivih fizičkih veličina, osim merene veličine;
- Postavljanje merene veličine na određenu poznatu vrednost i zapisivanje rezultata merenja. Merena veličina mora biti unapred poznata sa pridruženom

mernom nesigurnošću ili izmerena standardom – etalonskim instrumentom poznate merne nesigurnosti;

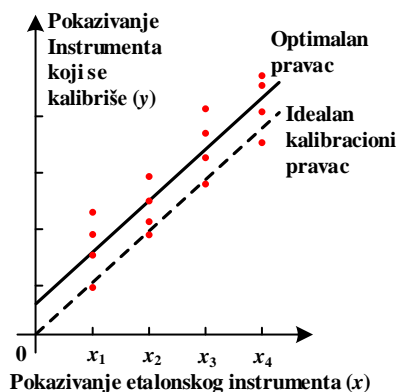
- Ponavljanje prethodnog postupka za svaku tačku u kojoj se vrši kalibracija;
- Specifikacija kalibracione krive;
- Podešavanje senzora, odnosno mernog sistema, tako da se otklone eventualne sistematske greške. Nakon podešavanja senzora potrebno je ponoviti postupak kalibracije, odnosno izvršiti rekalkibraciju senzora.

Kalibracija se može vršiti u jednoj ili više tačaka [9]. Kalibracija u jednoj tački uobičajena je kod senzora namenjenih za merenje vrednosti koje se nalaze u relativno uskoj okolini kalibracione tačke. Kalibracija u više tačaka primenjuje se kada je tačnost senzora važna u širem opsegu. Za linearne senzore kalibracija se tipično vrši u dve tačke koje se nalaze na krajevima mernog opsega, dok se za nelinearne senzore kalibracija tipično vrši u tri ili više tačaka.

Da bi se uzeo u obzir i uticaj slučajnih grešaka, ukoliko je praktično moguće, merenje se može ponoviti više puta za svaku tačku kalibracije, kao što je prikazano na slici 2.8. Kalibraciona kriva tada se dobija metodom linearne regresije kao optimalni pravac:

$$y = a \cdot x + b, \quad (2.22)$$

gde je  $x$  pokazivanje etalonskog instrumenta,  $y$  pokazivanje instrumenta koji se kalibriše, a koeficijenti  $a$  i  $b$  se određuju po kriterijumu da je suma kvadrata odstupanja mernih tačaka  $(x_i, y_i)$  od pravca (2.22) minimalna.



**Slika 2.8.** Kalibracija mernog instrumenta sa ponovljenim merenjima [2]

Ako se greška etalonskog instrumenta zanemari, odstupanja instrumenta koji se kalibriše od optimalnog pravca mogu se izraziti jednačinom:

$$e_i = y_i - (a \cdot x_i + b), \quad (2.23)$$

dok je suma kvadrata odstupanja data izrazom:

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (a \cdot x_i + b))^2. \quad (2.24)$$

Suma kvadrata odstupanja minimalna je pod uslovima  $\partial S/\partial a = 0$  i  $\partial S/\partial b = 0$ , odakle se dobijaju izrazi za izračunavanje koeficijenata optimalnog pravca u obliku [2, 10]:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (2.25)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (2.26)$$

Optimalni kalibracioni pravac tipično se razlikuje od idealnog. Razlika između idealnog i optimalnog pravca rezultat je delovanja sistematske greške, te se ona, uz korišćenje izračunatih kalibracionih koeficijenata  $a$  i  $b$ , može otkloniti.

Kalibracija se najčešće vrši u situacijama kada se realizuje ili instalira novi merni instrument ili nakon popravke ili modifikacije instrumenta. Međutim, karakteristike novih senzora menjaju se i degradiraju tokom vremena usled temperature, vibracija, starenja komponenti i slično. Iz tog razloga, kalibracija se sprovodi u regularnim vremenskim intervalima koje definiše proizvođač senzora, odnosno mernog instrumenta. Takođe, merni instrument može se kalibrisati i u nekim posebnim slučajevima, kada se vrši neko kritično merenje ili ako je instrument bio izložen spoljašnjim uticajima koji bi mogli nepovoljno uticati na karakteristike mernog sistema.

Da bi se poboljšao kvalitet procesa kalibracije i da bi rezultati kalibracije bili prihvaćeni, ne samo lokalno u okvirima jedne organizacije već i od strane drugih

spoljnih organizacija, poželjno je da se ostvari sledivost merenja do nivoa međunarodno definisanih mernih jedinica. Sledivost je osobina rezultata merenja pomoću koje se on može dovesti u vezu sa naznačenom referencom (definicija merne jedinice, referentni materijal, referentna vrednost i slično) kroz dokumentovani neprekidni lanac etaloniranja, gde svako etaloniranje doprinosi ukupnoj mernoj nesigurnosti [7, 11]. Uspostavljanje sistema sledivosti praktično se može postići kalibracijom u odnosu na standard, koji je direktno ili indirektno u vezi sa nacionalnim ili međunarodnim standardima. Kalibracija u odnosu na nacionalne standarde može se izvršiti u nacionalnim metrološkim laboratorijama ili u privatnim firmama koje nude metrološke usluge. U većini zemalja postoji odgovarajuća Nacionalna metrološka institucija u čijoj su nadležnosti osnovni standardi za kalibraciju mernih instrumenata. Na primer, u Sjedinjenim Američkim Državama odgovarajuća Nacionalna metrološka institucija je NIST (*National Institute of Standards and Technology*), u Velikoj Britaniji NPL (*The National Physical Laboratory*), u Nemačkoj PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*), a u Republici Srbiji Direkcija za mere i dragocene metale [12].

### **2.3. Statistička obrada rezultata merenja i procena merne nesigurnosti**

Imajući u vidu da se idealno tačna vrednost merene veličine ne može odrediti, jasno je da rezultat svakog realnog merenja u sebi sadrži određenu grešku, odnosno da se svakom rezultatu merenja može pridružiti određena merna nesigurnost. Izvori grešaka prilikom merenja mogu biti različiti i ne mogu se svi uzeti u obzir. Iz tog razloga izražavanje merne nesigurnosti nije uvek jednoznačno ni jednostavno. Merna nesigurnost može se definisati kao kvantitativna mera kvaliteta rezultata merenja koja omogućava da se rezultati merenja uporede sa drugim rezultatima, referencama, specifikacijama ili standardima [13]. Izračunavanje merne nesigurnosti nije ni rutinski ni čisto matematički zadatak, već zavisi od detaljnog poznavanja prirode merene veličine i postupka merenja. Validnost i praktična upotrebljivost izračunate merne nesigurnosti zavisi od iskustva onoga ko mernu nesigurnost određuje, njegovog razumevanja mernog procesa, stručnosti i sposobnosti kritičke analize.

Kako bi se postigla jednoznačnost u izražavanju rezultata merenja Međunarodna organizacija za standardizaciju ISO (*International Organization for Standardization*) objavila je 1993. godine prvu verziju dokumenta *Uputstvo za izražavanje merne nesigurnosti* (GUM – *Guide to the expression of uncertainty in measurements*) u kome su specifikovane preporuke za određivanje merne nesigurnosti. Izdavanje i revidiranje ovog dokumenta sada su u nadležnosti organizacije JCGM (*Joint Committee for Guides in Metrology*) koja okuplja vodeće institucije međunarodnog metrološkog sistema: BIPM (Međunarodni biro za tegove i mere), IEC (Međunarodna elektrotehnička komisija), IFCC (Međunarodna federacija za kliničku hemiju), ISO (Međunarodna organizacija za standardizaciju), IUPAC (Međunarodna unija za čistu i primenjenu hemiju), IUPAP (Međunarodna unija za čistu i primenjenu fiziku) i OIML (Međunarodna organizacija za zakonsku metrologiju). Poslednja verzija ovog dokumenta pod nazivom *JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurements* (GUM) dostupna je na Internet sajtu BIMP [8], odnosno pod nazivom *ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* u okviru organizacije ISO [14]. S obzirom na opštu prihvaćenost, ovaj dokument postao je osnovni referentni dokument za procenu i izražavanje merne nesigurnosti.

Uputstvom za izražavanje merne nesigurnosti propisano je da se obradom mernih podataka odrede sledeće tri merne veličine [8, 15]:

- *Rezultat merenja* koji predstavlja srednju vrednost ponovljenih merenja;
- *Merna nesigurnost* izražena intervalom oko srednje vrednosti u kom se očekuje da se nalazi stvarna vrednost merene veličine;
- *Statistička sigurnost* (verovatnoća) koja se odnosi na dati podatak o mernoj nesigurnosti.

Takođe, uvedene su konvencije o sledećem [8, 15]:

- Merna nesigurnost (MN) označava se slovom *u* (*Uncertainty*);
- Svi vidovi merne nesigurnosti posmatraju se kao slučajne veličine, što znači da se svakom podatku o nesigurnosti pridružuje odgovarajuća funkcija raspodele i statistička sigurnost datog podatka.

Osim Uputstva za izražavanje merne nesigurnosti, organizacija JCGM izdala je i čitav niz pratećih dokumenata, među kojima se ističe Međunarodni rečnik metrologije (*JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms*) [7] u kome su formalno definisani svi osnovni termini koji se koriste pri izražavanju merne nesigurnosti.

Prema definiciji koja je publikovana u Međunarodnom rečniku metrologije, pod terminom tačnosti merenja podrazumeva se bliskost slaganja rezultata merenja i tačne vrednosti merne veličine. S obzirom da tačna vrednost merene veličine nije poznata, tačnost predstavlja kvalitativni pojam, dok se merna nesigurnost definiše kao kvantitativna mera tačnosti merenja.

Međunarodni rečnik metrologije ne preporučuje upotrebu termina preciznost, već se umesto tog termina definišu ponovljivost i reproduktivnost. Ponovljivost merenja odnosi se na seriju merenja izvršenih pri istim uslovima u kratkom vremenskom periodu. Pod istim uslovima podrazumeva se istovetnost mernog postupka, posmatrača, mernog instrumenta i sl. Reproductivnost merenja odnosi se na seriju merenja izvršenih pod promenljivim uslovima, u dužem vremenskom intervalu. Pod promenljivim uslovima podrazumevaju se različiti uslovi merenja, različiti postupci ili različito mesto merenja i slično.

Međutim, imajući u vidu složenost određivanja merne nesigurnosti i opštosti postupaka opisanih u Uputstvu za izražavanje merne nesigurnosti, pojavili su se i drugi dokumenti koji specifikuju određivanje merene nesigurnosti u pojedinim oblastima primene. Na primer, Evropska organizacija EA (*European co-operation for Accreditation*), koja predstavlja asocijaciju nacionalnih akreditacionih institucija u Evropi, izdala je niz dokumenata kao što su: *Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration* [16] (koji detaljnije specifikuje zahteve za izveštavanje o nesigurnosti merenja pri izdavanju kalibracionih sertifikata), *EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing* [17] (koji daje preporuke i savete za procenu neizvesnosti kod kvantitativnih testova) i sl. Takođe, metrološke laboratorije za ispitivanje i etaloniranje u obavezi su da ispune uslove definisane ISO/IEC 17025 standardom [18]. Ovaj standard definiše zahteve koji se, između ostalog, odnose i na mernu nesigurnost, a koje laboratorije moraju ispuniti da bi dokazale kompetentnost za obavljanje svoje delatnosti.



### **2.3.1. Statistička obrada merinih podataka**

Eksperimentalna iskustva pokazuju da se ponovljenim merenjima dobijaju rezultati višeg kvaliteta nego pojedinačnim merenjima, čime se stiču bolja saznanja o prirodi merne veličine i karakteristikama merne opreme. Uzimajući u obzir činjenicu da rezultati ponovljenih merenja imaju slučajan karakter jasno je da se tačna vrednost merenja ne može teorijski predvideti. Ipak, pomoću funkcije raspodele moguće je odrediti matematički zakon koji definiše način nagomilavanja velikog broja rezultata ponovljenih merenja. Funkcijom raspodele moguće je proceniti verovatnoću da neki od rezultata bude u određenom intervalu, ili procenat rezultata koji se nalazi u nekom unapred određenom intervalu.

U teoriji grešaka funkcije raspodele dodeljuju samo slučajnim greškama, dok se sistemske greške posmatraju kao konstantne veličine. Ovakav koncept razlikuje se od pristupa koji se koristi kod merne nesigurnosti. Jedan od osnovnih koncepata merne nesigurnosti je da se svakom efektu koji ima uticaj na tačnost merenja pridruži odgovarajuća funkcija raspodele. Međutim, obično se pretpostavlja da su svi efekti koji imaju sistematski karakter već prethodno otklonjeni. Kao što je već diskutovano u poglavlju 2.2.2, sve uočljive sistemske greške mernog instrumenta mogu se otkloniti postupkom kalibracije. Pošto se kompenzovanje sistematskih grešaka nikad ne može potpuno izvršiti, u praksi se smanjivanje sistemskih efekata vrši sve dok preostali efekti ne dobiju slučajan karakter.

Ako se merenja neke fizičke veličine ponavljaju više puta pod istim uslovima, dobijeni rezultati će se razlikovati. Do različitosti rezultata dolazi usled uticaja različitih ometajućih veličina koje se ne mogu eliminisati. Ukoliko je izvršen veoma veliki broj (teorijski beskonačno velik) od  $N$  ponovljenih merenja, rezultati merenja  $x_1, x_2, \dots, x_N$  nazivaju se populacija. Srednja vrednost populacije,  $\mu$ , izračunava se kao aritmetička sredina tako dobijenih vrednosti:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i . \quad (2.27)$$

Odstupanja rezultata merenja,  $e_i$ , definišu se kao razlike pojedinih rezultata merenja i tačne vrednosti (2.28) i takođe predstavljaju jednu populaciju:

$$e_i = x_i - \mu . \quad (2.28)$$

Za izražavanje veličine odstupanja rezultata merenja od srednje vrednosti populacije koristi se standardno odstupanje populacije,  $\sigma$ , koje se definiše izrazom:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}. \quad (2.29)$$

Umesto standardnog odstupanja često se koristi i varijansa ili disperzija,  $\sigma^2$ , koja predstavlja kvadrat standardnog odstupanja. Relativno standardno odstupanje,  $\sigma_r$ , definiše se kao:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (2.30)$$

Relativno standardno odstupanje koristi se kao mera ponovljivosti merenja. Što je manja vrednost  $\sigma_r$  to je ponovljivost bolja, odnosno manje je relativno rasipanje rezultata oko srednje vrednosti populacije.

Iako je teorijski potrebno ponoviti merenja veoma veliki (beskonačan) broj puta, u praktičnim merenjima to nije moguće. Pri praktičnom sprovođenju eksperimenta, merenja se ponavljaju konačan i relativno mali broj puta  $n$  ( $n \ll N$ ). Tako dobijen skup rezultata  $x_1, x_2, \dots, x_n$  naziva se uzorak. Kako je u praksi broj ponavljanja merenja ograničen neophodno je, na osnovu uzorka, dobiti što bolju aproksimaciju karakteristika populacije, posebno srednje vrednosti  $\mu$  i standardnog odstupanja  $\sigma$ . Najboljom aproksimacijom srednje vrednosti populacije smatra se srednja vrednost uzorka:

$$x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.31)$$

Najboljom aproksimacijom standardnog odstupanja populacije smatra se standardno odstupanje uzorka od  $n$  članova,  $s$ , koje se dobija na osnovu izraza:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n-1}}. \quad (2.32)$$

Relativno standardno odstupanje uzorka,  $s_r$ , definiše se kao:

$$s_r = \frac{s}{x_s}. \quad (2.33)$$

Relativno standardno odstupanje predstavlja meru ponovljivosti i reproduktivnosti rezultata merenja.

### Standardno odstupanje indirektno merenih veličina

Mnoga merenja vrše se indirektnim putem, tako što se pomoću prethodno izmerenih podataka,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , tražena veličina izračunava pomoću odgovarajuće funkcije:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n). \quad (2.34)$$

Ako su  $s_{x_i}$  standardna odstupanja veličina  $x_i$ , standardno odstupanje indirektno merene veličine  $s_y$  određuje se na osnovu jednačine:

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 s_{x_i}^2}. \quad (2.35)$$

### Standardno odstupanje srednje vrednosti

Srednja vrednost uzorka, definisana jednačinom (2.31), predstavlja rezultat serije ponovljenih merenja, te se može posmatrati kao primer indirektno merene veličine. Kako se srednja vrednost računa na osnovu rezultata merenja koje predstavljaju slučajne vrednosti, i srednja vrednost takođe predstavlja slučajnu veličinu, pa samim tim ima svoje standardno odstupanje koje se može odrediti na osnovu (2.35).

Svi parcijalni izvodi funkcije (2.31) jednaki su i iznose:

$$\frac{\partial x_s}{\partial x_i} = \frac{1}{n}. \quad (2.36)$$

Zamenom u (2.35) dobija se:

$$s_{x_s} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n s_{x_i}^2}, \quad (2.37)$$

gde je sa  $x_i$  označena vrednost promenljivog uzorka. Ako svi članovi uzorka imaju isto standardno odstupanje,  $s_{x_i} = s$ , dobija se:

$$s_{x_s} = \frac{1}{n} \sqrt{ns^2} = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (2.38)$$

Na osnovu poslednjeg rezultata vidi se da je standardno odstupanje srednje vrednosti  $\sqrt{n}$  puta manje od standardnog odstupanja uzorka. Na osnovu toga može se zaključiti da je srednja vrednost pouzdaniji podatak od pojedinačnih elemenata uzorka, čime se opravdava potreba za višestrukim ponavljanjem merenja.

### Najvažnije funkcije gustine raspodele kod merenja

Pri obradi mernih rezultata mogu se primenjivati različite raspodele, ali se svakako najčešće koriste Gausova, uniformna, trougaona, hi kvadrat i Studentova raspodela, te će ove raspodele biti ukratko opisane u nastavku.

#### Gausova raspodela

Gausova (normalna) raspodela data je sledećim izrazom:

$$f_G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}. \quad (2.39)$$

Parametri Gausove raspodele su srednja vrednost  $\mu$  i standardno odstupanje  $\sigma$ . Funkcija  $f_G(x)$  ima maksimum u tački  $x=\mu$  koji iznosi  $f_G(\mu) = 1/\sigma\sqrt{2\pi}$ . Gausova raspodela simetrična je oko srednje vrednosti, što odgovara eksperimentalno utvrđenoj činjenici da su pozitivna i negativna odstupanja rezultata oko srednje vrednosti jednako verovatna, te se ova raspodela često koriti u praksi. Takođe, Gausova raspodela ima veliki značaj i zbog činjenice da se, na osnovu Centralne granične teoreme [19], može tvrditi da ako se iz jedne populacije uzme više uzoraka i odrede njihove srednje vrednosti, tada će raspodela srednjih vrednosti imati Gausovu raspodelu bez obzira kakva je raspodela populacije.

Za određivanje merne nesigurnosti od interesa je odrediti verovatnoću da se slučajna veličina  $X$  nađe u intervalu  $\mu - n\sigma \leq X \leq \mu + n\sigma$ . Za  $n=1$  tj. za  $\sigma$  okolinu oko srednje vrednosti  $\mu$  verovatnoća iznosi 68,2%, za okolinu  $2\sigma$  verovatnoća iznosi 95%, dok za okolinu  $3\sigma$  odgovarajuća verovatnoća iznosi 99,7%. Na osnovu prethodnih rezultata može se zaključiti da se skoro svi (99,7%) rezultati merenja koje podleže Gausovoj raspodeli nalaze u okolini  $3\sigma$  oko srednje vrednosti  $\mu$ , te rezultati koji

značajno izlaze izvan ovog opsega najverovatnije predstavljaju grubu grešku nastalu u mernom postupku.

### ***Uniformna (ravnomerna) raspodela***

Uniformna raspodela određena je srednjom vrednošću  $\mu$  i poluširinom intervala  $a$ . Vrednosti slučajne promenljive  $x$  mogu da se nalaze u opsegu  $x \in (\mu - a, \mu + a)$  pri čemu je svaka vrednost unutar intervala jednako verovatna. Funkcija raspodele opisuje se izrazom:

$$f_U(x) = \begin{cases} \frac{1}{2a}, & x \in (\mu - a, \mu + a) \\ 0, & x \notin (\mu - a, \mu + a) \end{cases} \quad (2.40)$$

Standardno odstupanje uniformne raspodele iznosi  $\sigma = a/\sqrt{3}$ . Verovatnoća da se slučajna veličina  $X$  sa uniformnom raspodelom nađe u intervalu  $\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma$  iznosi  $1/\sqrt{3} = 57,7\%$ .

Zbog svoje jednostavnosti, uniformna raspodela često se primenjuje pri određivanju merne nesigurnosti. Ova raspodela najčešće se koristi kada se ne raspolaže sa dovoljno informacija o mernim rezultatima čija se nesigurnost procenjuje i ako se može opravdano pretpostaviti da ne postoji grupisanje rezultata oko srednje vrednosti. Na primer, kada se vrši očitavanje rezultata na skali digitalnog instrumenta, uobičajeno se pretpostavlja da se rezultatu može pridružiti uniformna raspodela, sa poluširinom koja odgovara polovini rezolucije digitalnog instrumenta.

### ***Trougaona raspodela***

Trougaona raspodela sa srednjom vrednošću  $\mu$  i poluširinom  $a$  definisana je izrazom:

$$f_T(x) = \begin{cases} (x - (\mu - a))/a^2, & \mu - a \leq x \leq \mu \\ (\mu + a - x)/a^2, & \mu \leq x \leq \mu + a \\ 0, & \text{drugde} \end{cases} \quad (2.41)$$

Trougaona raspodela, za razliku od uniformne, uzima u obzir koncentraciju rezultata oko srednje vrednosti, odnosno pretpostavlja da su manja odstupanja rezultata od srednje vrednosti verovatnija od većih odstupanja. Standardno odstupanje kod

trougaone raspodele iznosi  $\sigma = a/\sqrt{6}$ , što je manje nego kod uniformne raspodele. Verovatnoća da se slučajna veličina  $X$ , koja ima trougaonu raspodelu, nađe u intervalu  $\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma$  iznosi 65%, što je značajno više nego kod uniformne raspodele.

Trougaona raspodela primenjuje se kada je iz iskustva poznato da postoji jasno grupisanje mernih rezultata oko srednje vrednosti. Takođe, ova raspodela često se primenjuje kada se određuje raspodela zbira dve slučajne veličine koje imaju istu uniformnu raspodelu sa poluširinom  $a$ . U tom slučaju, kao rezultat, dobija se trougaona raspodela sa poluširinom  $2a$ . Na primer, ako se određuje raspodela redne veze dve otpornosti  $R_1 = 100\Omega$  i  $R_2 = 50\Omega$  za koje se može usvojiti da imaju uniformnu raspodelu sa poluširinom  $\Delta R = 0,1\Omega$ , tada ekvivalentna otpornost  $R_e = R_1 + R_2$  ima trougaonu raspodelu, sa srednjom vrednošću  $150\Omega$  i poluširinom  $2\Delta R = 0,2\Omega$ .

### ***Hi kvadrat raspodela***

Posmatra se  $n$  nezavisnih slučajnih veličina  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , koje imaju Gausovu raspodelu sa srednjim vrednostima  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ , i standardnim odstupanjima  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ . Nova slučajna veličina, hi kvadrat sa  $n$  stepeni slobode, dobijena na osnovu  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , definisana je sa:

$$\chi_n^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2. \quad (2.42)$$

Raspodela veličine  $\chi_n^2$  određena je sa:

$$f_{Hi}(\chi_n^2) = \frac{1}{2^{n/2} \cdot \Gamma(n/2)} (\chi_n^2)^{(n/2-1)} e^{-\chi_n^2/2}, \quad \Gamma(n) = \int_0^{+\infty} e^{-x} x^{n-1} dx. \quad (2.43)$$

gde  $\Gamma(n)$  predstavlja Gama funkciju. Standardno odstupanje veličine  $\chi_n^2$  iznosi  $\sigma = \sqrt{2n}$ .

### ***Studentova raspodela***

Studentova raspodela primenjuje se kada je broj merenja mali, tj. kada se raspolaze malim uzorcima (u opsegu od 3 do oko 30). Gausova raspodela tada nije adekvatna jer se ona odnosi samo na populacije, odnosno uzorke sa veoma velikim brojem podataka. Posmatraju se dve slučajne veličine, veličina  $z$  koja podleže Gausovoj

raspodeli i veličina  $\chi_{n_s}^2$  koja ima hi kvadrat raspodelu sa  $n_s$  stepeni slobode. Pomoću njih se definiše nova slučajna veličina  $t = z / \sqrt{\chi_{n_s}^2 / n_s}$  koja ima raspodelu:

$$f_s(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi n_s}} \frac{\Gamma\left(\frac{n_s + 1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_s}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{n_s}\right)^{-\frac{n_s + 1}{2}}. \quad (2.44)$$

Standardno odstupanje Studentove raspodele je  $\sigma = \sqrt{n_s / (n_s - 2)}$  kada je  $n_s > 2$ . Kada  $n_s \rightarrow \infty$ , raspodela slučajne veličine  $t$  teži Gausovoj raspodeli sa parametrima  $\mu=0$  i  $\sigma=1$ .

### **2.3.2. Izražavanje merne nesigurnosti**

Nesigurnost rezultata merenja odražava nedostatak tačnog poznavanja vrednosti merene veličine. Rezultat merenja, nakon korekcije poznatih sistematskih efekata, i dalje je samo procena vrednosti merene veličine, zbog neizvesnosti usled slučajnih efekata i nepotpunih korekcija sistematskih efekata, te se uz rezultat merenja mora specifikovati i podatak o mernoj nesigurnosti. Merna nesigurnost prema Uputstvu za izražavanje merne nesigurnosti [8] može biti: standardna, kombinovana i proširena.

Standardna merna nesigurnost se označava sa  $u$  i definiše se kao veličina koja je jednaka standardnom odstupanju ( $u=s$ ). U zavisnosti od metode određivanja, izvršena je podela na dva tipa merne nesigurnosti: mernu nesigurnost tipa A i mernu nesigurnost tipa B. Merna nesigurnost tipa A određuje se metodom statističke obrade rezultata, dok se merna nesigurnost tipa B određuje svim ostalim metodama izuzev statističke analize.

Pri određivanju merne nesigurnosti uobičajeno se razmatra više komponenti koje zajedno određuju ukupnu nesigurnost. Neke od komponenti nesigurnosti mogu se odrediti na osnovu statističke analize serije ponovljenih merenja i izražavaju se odgovarajućom standardnom devijacijom, odnosno mogu se predstaviti kao merna nesigurnost tipa A. Pojedine komponente merne nesigurnosti ne mogu se proceniti ponavljanjem merenja, ali se mogu odrediti na osnovu pretpostavljenih raspodela verovatnoće i takođe izraziti standardnom devijacijom. Odgovarajuće raspodele verovatnoće pridružuju se komponentama merne nesigurnosti na bazi prethodnog iskustva ili drugih informacija. Ovakav tip merne nesigurnosti označava se kao merna

nesigurnost tipa B. Ukoliko postoje i jedan i drugi tip merne nesigurnosti, ili ako postoji više komponenti mernih nesigurnosti tipa B neophodno je koristi kombinovanu standardnu mernu nesigurnost.

Kombinovana standardna merna nesigurnost (*combined standard uncertainty*) koristi se u slučaju indirektnog merenja, odnosno kada se rezultat merenja dobija na osnovu merenja drugih fizičkih veličina od kojih merena veličina zavisi. U tom slučaju, merna nesigurnost merene veličine dobija se na bazi prethodno određenih komponenti standardne merne nesigurnosti svih veličina od kojih merena veličina zavisi i odgovarajućeg matematičkog modela te zavisnosti.

Statistička sigurnost (nivo poverenja) koja odgovara standardnoj mernoj nesigurnosti zavisi od raspodele koja odgovara mernim rezultatima. Na primer, intervalu širine jednog standardnog odstupanja  $x_s \pm u$  kod Gausove raspodele odgovara nivo poverenja od 68,2%, kod trugaone 65%, dok kod uniformne raspodele nivo poverenja iznosi 57,7%.

Proširena merna nesigurnost (*expanded uncertainty*), označena sa  $U$ , predstavlja umnožak standardne (ili kombinovane) merne nesigurnosti i broja  $k$  koji se naziva koeficijent proširenja (*coverage factor*), odnosno važi da je:  $U=ku$ . Faktor proširenja zavisi od usvojenog intervala poverenja i raspodele koja karakteriše rezultate merenja. Proširena merna nesigurnost uobičajeno se koristi u praksi za specifikaciju odstupanja u katalogima proizvođača.

### **Standardna merna nesigurnost tipa A**

Kao što je već rečeno, merna nesigurnost tipa A određuje se isključivo metodom statističke obrade rezultata i postoji samo ako se radi o merenju koje je ponovljeno više puta. Ako su rezultati ponovljenih merenja prikazani uzorkom  $x_1, x_2, \dots, x_n$  i ako su svi elementi uzorka ravnopravni (ponovljeni eksperimenti su izvršeni na istovetan način i istovetnom mernom opremom) onda je rezultat merenja srednja vrednost uzorka:

$$x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (2.45)$$



U poglavlju 2.3.1 pokazano je da srednja vrednost uzorka predstavlja slučajnu veličinu čije je standardno odstupanje  $\sqrt{n}$  puta manje od standardnog odstupanja elementa uzorka. Uzimajući u obzir da je merna nesigurnost tipa A po definiciji jednaka standardnom odstupanju srednje vrednosti, dobija se:

$$u_A = s_{x_s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n(n-1)}}. \quad (2.46)$$

Kod dovoljno velikih uzoraka srednja vrednost merenja ispunjava uslove Centralne granične teoreme [19] što znači da joj se po pravilu pridružuje Gausova raspodela. U slučaju manjih uzoraka pridružuje joj se Studentova raspodela.

S obzirom da u praktičnim merenjima nije uvek moguće izvršiti veliki broj ponovljenih merenja, dobijeni uzorak često je suviše mali da bi se obradom uzorka došlo do pouzdanih statističkih podataka. Da bi se u takvim situacijama odredila merna nesigurnost tipa A koristi se podatak koji se naziva objedinjena merna nesigurnost (*pooled uncertainty*) [15]. Do objedinjene merne nesigurnosti dolazi se na osnovu kalibracije instrumenata u ovlašćenoj metrološkoj laboratoriji. Prilikom kalibracije instrumenta izvodi se veća serija ponovljenih merenja u raznim opsezima, otklanjaju se eventualne sistematske greške i određuje se standardno odstupanje instrumenta. Dobijeni podatak o mernoj nesigurnosti korisnik instrumenta može da koristi pod nazivom objedinjena standardna merna nesigurnost,  $u_{Ao}$ .

Ako se izvrši samo jedno merenje, standardna merna nesigurnost za dobijeni rezultat odgovara objedinjenoj mernoj nesigurnosti,  $u_{Ao}$ . Ako se radi o uzorku od, na primer,  $n=3$  merenja, za krajni rezultat uzima se srednja vrednost  $x_s=(x_1+x_2+x_3)/3$ . Standardna nesigurnost srednje vrednosti je tada  $u_{Ao}/\sqrt{3}$ , odnosno, u opštem slučaju  $u_{Ao}/\sqrt{n}$ , za  $n$  ponovljenih merenja.

S obzirom da je objedinjena merna nesigurnost dobijena na osnovu višestrukih merenja ispunjeni su uslovi Centralne granične teoreme, pa se opravdano može pretpostaviti da ima Gausovu raspodelu. Ipak, ukoliko je moguće, poželjno je ponoviti merenja više puta i, umesto objedinjene merne nesigurnosti, koristiti standardnu mernu nesigurnost.

## **Standardna merna nesigurnost tipa B**

Za razliku od merne nesigurnosti tipa A, merna nesigurnost tipa B dobija se svim ostalim metodama osim statističke analize. Ona se određuje nezavisno od toga da li se radi o pojedinačnim ili ponovljenim merenjima. Izbor metoda nije određen već zavisi od iskustva i znanja osobe koja vrši eksperimente. Određivanje merne nesigurnosti tipa B komplikovanije je od određivanja merne nesigurnosti tipa A. Potrebno je imati sveobuhvatna saznanja o mernoj opremi, o uticaju parametara okruženja na mernu opremu i na veličinu koja se meri. Merna nesigurnost tipa B ima slučajan karakter pa se može odrediti na osnovu standardnog odstupanja merene veličine. Međutim, za sve slučajne veličine neophodno je prvo odrediti funkciju raspodele. Za razliku od tipa A, kod merne nesigurnosti tipa B moguće su razne raspodele od kojih su najzastupljenije sledeće: uniformna, trougaona/trapezna, Gausova, i Studentova. Problem određivanja raspodele zavisi uglavnom od praktičnih okolnosti u eksperimentu.

Jedan od najvažnijih izvora podataka za određivanje merne nesigurnosti tipa B su katalogi proizvođača. Te podatke treba posmatrati kao proširenu mernu nesigurnost. U slučaju da je nepoznata raspodela i da ne postoji dovoljno podataka da se ona odredi, usvaja se uniformna raspodela. Tipičan primer korišćenja uniformne raspodele za određivanje merne nesigurnosti tipa B predstavlja digitalni instrument, gde se, kao parametar poluširine  $a$  uniformne raspodele, uzima polovina vrednosti rezolucije instrumenta u posmatranom mernom opsegu.

Osim podataka iz kataloga proizvođača, važni podaci o mernoj nesigurnosti tipa B su i podaci dobijeni nakon pregleda instrumenata u nekoj od akreditovanih laboratorija, pre svega u nacionalnoj metrološkoj laboratoriji. Podaci koji se nalaze u sertifikatu dobijenom nakon pregleda, zajedno sa eventualnim dodatnim obaveštenjima stručnjaka koji su izvršili pregled, predstavljaju informacije pomoću kojih se određuje merna nesigurnost tipa B.

## **Kombinovana merna nesigurnost**

Kombinovana merna nesigurnost predstavlja resultantnu vrednost kada treba izračunati nesigurnost koja potiče od više različitih komponenti. Ona se koristi u dva slučaja: ① kada postoji merna nesigurnost tipa A, ali postoji jedna ili više komponenti

za koje se određuje merna nesigurnost tipa B, i  $\textcircled{2}$  postoji dve ili više komponenti merne nesigurnosti tipa B. Pri izračunavanju standardne kombinovane merne nesigurnosti treba uzeti u razmatranje sledeće karakteristične slučajeve:

- Komponente nesigurnosti međusobno su nekorelisane;
- Komponente nesigurnosti u potpunoj su korelaciji;
- Komponente nesigurnosti delimično su korelisane.

Od svih prethodno navedenih slučajeva u praksi se najčešće koristi slučaj kada su komponente merne nesigurnosti međusobno nekorelisane.

### ***Slučaj nekorelisanih komponenti nesigurnosti***

Sve slučajne veličine su nekorelisane (statistički nezavisne) kada promena jedne od njih ne izaziva predvidljive promene druge. U poglavlju 2.3.1 analiziran je problem standardnog odstupanja indirektno merenih veličina  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , gde su promene uticajnih veličina,  $x_i$ , međusobno nekorelisane. Kada se u izrazu (2.35) standardno odstupanje zameni odgovarajućim nesigurnostima, dobija se kombinovana merna nesigurnost [8]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u_i^2(y)}, \quad (2.47)$$

gde je sa  $u_i(y)$  označen doprinos pojedinačne merne nesigurnosti ulazne veličine  $x_i$ , sa

$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$  koeficijent osetljivosti merene veličine  $y$  u odnosu na ulaznu veličinu  $x_i$ , a sa

$u(x_i)$  standardna merna nesigurnost ulazne veličine  $x_i$ .

Svaka od komponenti kombinovane merne nesigurnosti  $u(x_i)$  može biti određena bilo kao standardna nesigurnost tipa A ili standardna nesigurnost tipa B. Izraz za određivanje kombinovane merne nesigurnosti (2.47) često se naziva i zakon propagacije nesigurnosti (za nekorelisane ulazne veličine).

### ***Slučaj potpuno korelisanih komponenti nesigurnosti***

Kada se posmatra jedan merni sistem podrazumeva se da su sistematski efekti u potpunosti otklonjeni, odnosno da veličine koje unose nesigurnost u merenje imaju isključivo slučajan karakter. Usled toga uzastopno izmereni rezultati mogu se smatrati

statistički nezavisnim odnosno oni su u potpunosti nekorelisani. Međutim, u praksi nije uvek moguće izbeći sve sistematske greške. U tom slučaju postoje merne veličine koje su međusobno zavisne, odnosno koje su na neki način korelisane.

Potpuna korelacija komponenti kombinovane merne nesigurnosti veoma je nepoželjna i retko se javlja u praksi. Do ove situacije dolazi u slučaju da merni sistem nije kalibrisan, te se mogu javiti značajni sistematski uticaji koji se ponavljaju pri svakom pojedinačnom merenju.

U slučaju potpuno korelisanih veličina, za indirektno merenu veličinu  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  merna nesigurnost izračunava se korišćenjem izraza [15]:

$$u_c(y) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) = \sum_{i=1}^n c_i u(x_i). \quad (2.48)$$

### ***Slučaj delimično korelisanih komponenti nesigurnosti***

Delimična korelacija komponenti kombinovane nesigurnosti često se javlja u praksi. Međutim, analiza ovog tipa problema relativno je složena pa se najčešće rezultati tretiraju kao da su potpuno nekorelisane veličine. Za indirektno merenu veličinu  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , koja zavisi od  $n$  delimično korelisanih veličina, merna nesigurnost određuje se na osnovu izraza:

$$\begin{aligned} u_c(y) &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Stepen korelacije ulaznih veličina  $x_i$  i  $x_j$  određen je koeficijentom korelacije koji je u formuli (2.49) označen sa  $r(x_i, x_j)$ . Za koeficijent korelacije važi da je  $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ , dok se brojna vrednost koeficijenta korelacije kreće u opsegu  $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq 1$ . Za koeficijent korelacije karakteristične su dve granične vrednosti:

- $r(x_i, x_j) = 0$  kada su slučajne veličine  $x_i$  i  $x_j$  potpuno nekorelisane, i tada se izraz (2.49) svodi na (2.47), i

- $|r(x_i, x_j)| = 1$  kada su slučajne veličine  $x_i$  i  $x_j$  potpuno korelisane, i tada se izraz (2.49) svodi na (2.48).

Poređenjem izraza (2.47) – (2.49) zaključuje se da je kombinovana merna nesigurnost veća u slučaju delimično korelisanih, nego u slučaju nekorelisanih veličina, a manja nego u slučaju potpuno korelisanih veličina. Iz tog razloga, poželjno je da sve komponente merne nesigurnosti budu nekorelisane.

### **Proširena merna nesigurnost**

S obzirom da standardna merna nesigurnost praktično predstavlja standardno odstupanje merene veličine, odgovarajući interval  $x_s \pm u$  uobičajeno ima relativno nizak nivo poverenja. Na primer, ako se posmatra nesigurnost rezultata merenja koji imaju Gausovu raspodelu, standardna merna nesigurnost odgovara varijansi raspodele, te odgovarajući interval iznosi  $x_s \pm \sigma$  sa nivoom poverenja od 68,2%. S obzirom da varijansa trougaone raspodele sa poluširinom  $a$  iznosi  $a/\sqrt{6}$ , odgovarajući interval iznosi  $x_s \pm a/\sqrt{6}$  sa nivoom poverenja od 65%. Kod uniformne raspodele sa poluširinom  $a$  varijansa iznosi  $a/\sqrt{3}$ , te je odgovarajući interval  $x_s \pm a/\sqrt{3}$ , a nivo poverenja 57,7%.

Kada se nakon nekog merenja odredi standardna merna nesigurnost, ponekad je iz praktičnih razloga potrebno proširiti rezultat. U nekim industrijskim primenama ili kada su u pitanju zdravlje i bezbednost, često je neophodno dati interval oko rezultata merenja koji obuhvata „skoro sve“ vrednosti koje se razumno mogu pripisati tom rezultatu merenja. Najčešće je to interval vrednosti oko merene veličine kome odgovara nivo poverenja od 95% ili više.

Prema definiciji u Uputstvu za izražavanje merne nesigurnosti, proširena merna nesigurnost (*expanded uncertainty*), u oznaci  $U$ , dobija se kao proizvod standardne merne nesigurnosti  $u$  i faktora proširenja  $k$  (*coverage factor*):

$$U = k \cdot u . \quad (2.50)$$

Vrednost faktora proširenja direktno određuje odgovarajući interval poverenja za proširenu mernu nesigurnost. S obzirom da se standardnoj mernoj nesigurnosti u većini slučajeva pripisuje Gausova raspodela, u tabeli 2.3 [11, 20] dati su faktori

proširenja za Gausovu raspodelu i neki od nivoa poverenja koji se najčešće sreću u praktičnim primenama.

**Tabela 2.3.** Faktori proširenja za Gausovu raspodelu

Faktor proširenja ( $k$ )	Nivo poverenja
1	68,2%
1,64	90%
1,96 ( $\approx 2$ )	95%
2.58	99%
3	99,7%

Proširenoj mernoj nesigurnosti, po pravilu, odgovara visoka vrednost statističke sigurnosti, tipično oko 95% ili više, što znači da se sa velikom verovatnoćom može tvrditi da se merena veličina nalazi u intervalu  $x_s \pm U$ .

Za rezultujuću funkciju raspodele koja odgovara kombinovanoj mernoj nesigurnosti tipično se uzima Gausova raspodela i nivo poverenja 95%, te je faktor  $k=2$ . Tada je  $U = 2u = 2\sigma$ , čemu odgovara interval širine dvostrukog standardnog odstupanja  $x_s \pm k \cdot u = x_s \pm 2\sigma$ . Međutim, u slučaju da u proračunu kombinovane merne nesigurnosti prevlađuje jedna ili više komponenti merne nesigurnosti koje nemaju Gausovu raspodelu, za nivo poverenja od 95% potrebno je posebno proračunati faktor proširenja  $k$ .

U jednostavnijim slučajevima, faktor  $k$  može se odrediti razmatranjem dominantne komponente kombinovane merne nesigurnosti. Neka je sa  $u_D$  označena dominantna komponenta merne nesigurnosti, a sa  $u_R$  ukupna merna nesigurnost svih ostalih nedominantnih komponenti. Može se smatrati da je merna nesigurnost  $u_D$  dominantna u odnosu na druge komponente merne nesigurnosti,  $u_R$ , ako je zadovoljena sledeća relacija [21]:

$$u_R/u_D \leq 3. \quad (2.51)$$

Za tačno određivanje faktora proširenja  $k$ , za zadati nivo poverenja, neophodno je prvo odrediti rezultujuću funkciju raspodele koja odgovara kombinovanoj mernoj nesigurnosti. Problem određivanja rezultujuće raspodele indirektno merene veličine nije jednostavan, a u nekim složenijim slučajevima se čak i ne može rešiti analitički, već se do raspodele dolazi primenom numeričkih postupaka. Kao numerička metoda za

određivanje rezultujuće raspodele najčešće se koristi Monte Karlo metoda, o čijoj upotrebi se detaljno govori u dokumentu JCGM 101:2008 [22].

Tipični faktori proširenja za najčešće korišćene raspodele prikazani su u tabeli 2.4. Kao što je već rečeno, za Gausovu raspodelu tipično se uzima faktor proširenja 2, odnosno nivo poverenja od 95%. Za uniformnu raspodelu, međutim, tipično se uzima vrednost faktor proširenja  $\sqrt{3}$ . S obzirom da standardno odstupanje uniformne raspodele sa poluširinom  $a$  iznosi  $a/\sqrt{3}$ , to se za interval poverenja dobija  $x_s \pm k \cdot u = x_s \pm \sqrt{3} \cdot \frac{a}{\sqrt{3}} = x_s \pm a$ , odnosno odgovarajući nivo poverenja od 100%. Slično uniformnoj, za trougaonu raspodelu sa poluširinom  $a$  se uzima vrednost koeficijenta proširenja  $\sqrt{6}$ , što takođe daje interval poverenja  $x_s \pm k \cdot u = x_s \pm \sqrt{6} \cdot \frac{a}{\sqrt{6}} = x_s \pm a$ , odnosno odgovarajući nivo poverenja od 100%.

**Tabela 2.4.** Faktori proširenja za najznačajnije raspodele

Raspodela	Faktor proširenja ( $k$ )
Gausova	2
Uniformna	$\sqrt{3}$
Trougaona	$\sqrt{6}$

Korišćenje odgovarajućeg faktora proširenja od posebnog je značaja kada se koriste katalogi proizvođača opreme za određivanje merne nesigurnosti tipa B. S obzirom da proizvođači merne opreme u svojim katalogima daju intervale poverenja koji predstavljaju proširenu mernu nesigurnost ( $x_s \pm U$ ), odgovarajuća komponenta merne nesigurnosti može se proceniti kao  $u_B = U/k$ . Na primer, ako se posmatra digitalni instrument rezolucije  $\Delta x$ , tada se tipično pridružuje uniformna raspodela i proširena merna nesigurnost  $U = \Delta x$ , odakle se odgovarajuća standardna merna nesigurnost tipa B može proceniti kao  $u_B = U/\sqrt{3} = \Delta x/\sqrt{3}$ .

### Budžet merne nesigurnosti

Kompletna procedura za procenu merne nesigurnosti merene veličine može se opisati kroz sledeći niz koraka.

- Prvo je potrebno definisati matematički model merenja  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , odnosno definisati uzročno-posledične veze ulaznih veličina sa merenom veličinom.
- U sledećem koraku identifikuju se sve bitne komponente merne nesigurnosti, tj. svi izvori koji bitno doprinose mernoj nesigurnosti, za zadati nivo tačnosti.
- Izračunava se standardna merna nesigurnost svake prethodno identifikovane komponente. Merna nesigurnost svake komponente izražava se pomoću procene tipa A ili tipa B. Za procenu tipa B polazni podaci su, po pravilu, dati u vidu proširene merne nesigurnosti. Za svaku veličinu određuje se raspodela, a ako ona nije poznata uzima se najprihvatljivija procena raspodele. Na osnovu usvojene raspodele određuje se faktor proširenja  $k$ , a zatim se računa odgovarajuća standardna merna nesigurnost tipa B.
- Na osnovu matematičkog modela merenja  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  određuju se koeficijenti osetljivosti  $c_i = \partial f / \partial x_i$ . Korišćenjem koeficijenata osetljivosti i prethodno određenih standardnih mernih nesigurnosti izračunava se učešće svake komponente kombinovane merne nesigurnosti. Po pravilu se smatra da su nesigurnosti međusobno nekorelisane veličine, te se kombinovana merna nesigurnost određuje u skladu sa zakonom o propagaciji nesigurnosti (2.47).
- Nakon izračunavanja kombinovane merne nesigurnosti, potrebno je odrediti njenu funkciju raspodele. Funkcija raspodele uglavnom se ne može odrediti egzaktno, već se, uz odgovarajuće obrazloženje, usvaja najprikladnija raspodela. Nakon toga određuje se faktor proširenja, koji odgovara funkciji raspodele kombinovane merne nesigurnosti, pomoću kog se računa proširena kombinovana merna nesigurnost.
- Na kraju je potrebno izraziti rezultat merenja koji se sastoji iz najbolje procene vrednosti merene veličine i kombinovane standardne (ili proširene) merne nesigurnosti.

Kako bi se rezultati proračuna merne nesigurnosti prikazali što je moguće preglednije i jasnije, i da bi korisnik podataka imao kompletan uvid u sve podatke, pri određivanju merne nesigurnosti koristi se tabelarni prikaz koji se naziva budžet merne



nesigurnosti [8]. Tipičan primer budžeta merne nesigurnosti za indirektno merenu veličinu  $y=f(x_1, x_2, x_3)$  prikazan je u tabeli 2.5.

**Tabela 2.5.** Budžet merne nesigurnosti indirektno merene veličine

	Tip (A/B)	Proširena MN ( $U_i$ )	Raspodela	Faktor proširenja ( $k$ )	Standardna MN ( $u_i$ )	Osetljivosti ( $c_i$ )
$x_1$	Ponovljeno merenje (tip A)	/	Gausova	/	$u_1$	$c_1 = \partial f / \partial x_1$
$x_2$	Kalibracija (tip B)	$U_2$	Gausova	2	$u_2=U_2/2$	$c_2 = \partial f / \partial x_2$
$x_3$	Digitalno očitavanje (tip B)	$U_3$	Uniformna	$\sqrt{3}$	$u_3 = U_3/\sqrt{3}$	$c_3 = \partial f / \partial x_3$
Kombinovana merna nesigurnost ( $u_c$ )					$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 c_i^2 \cdot u_i^2}$	
Pridružena raspodela					Gausova	
Koeficijent proširenja ( $k$ )					2	
Proširena merna nesigurnost sa nivoom poverenja 95%					$U_c=2u_c$	

U budžetu se navode sve veličine čiji je uticaj na mernu nesigurnost uzet u obzir. Pri tome se za svaku veličinu koja je uticala u proračunu navodi funkcija raspodele i njena vrednost standardne merne nesigurnosti. U primeru iz tabele 2.5 veličina  $x_1$  dobijena je ponovljenim merenjem, radi se o mernoj nesigurnosti tipa A, odgovarajuća raspodela je Gausova, te se standardna merna nesigurnost  $u_1$  određuje na osnovu serije mernih podataka. Podatak o nesigurnosti  $U_2$  se dobija na osnovu kalibracionih podataka o mernom instrumentu kojim je izvršeno merenje veličine  $x_2$ . U ovom slučaju se radi o mernoj nesigurnosti tipa B. Kako se kalibracija vrši na osnovu većeg broja ponovljenih merenja, može se usvojiti Gausova raspodela sa faktorom proširenja 2, te se odgovarajuća standardna nesigurnost dobija kao  $u_2 = U_2/k = U_2/2$ . Treća komponenta  $x_3$ , u primeru iz tabele 2.5, poseduje nesigurnost tipa B koja se dodeljuje usled očitavanja sa digitalnog instrumenta. U ovom slučaju na raspolaganju je podatak o proširenoj mernoj nesigurnosti  $U_3$  kom se pridružuje uniformna raspodela sa faktorom proširenja  $\sqrt{3}$ , te se odgovarajuća standardna merna nesigurnost dobija kao  $u_3 = U_3/k = U_3/\sqrt{3}$ . Ako se za svaku komponentu nesigurnosti izračuna odgovarajući koeficijent osetljivosti,  $c_i = \partial f(x_1, x_2, x_3) / \partial x_i$ , tada se kombinovana merna nesigurnost merene veličine  $y$  dobija iz:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 c_i^2 \cdot u_i^2} . \quad (2.52)$$

Ako se usvoji da je rezultujuća raspodela za kombinovanu mernu nesigurnost Gausova, a odgovarajući nivo poverenja 95%, tada se proširena merna nesigurnost dobija po formuli:

$$U = k \cdot u(y) = 2u(y) , \quad (2.53)$$

a konačni rezultat merenja se može izraziti u formi:

$$y = y_s \pm U . \quad (2.54)$$

## Literatura

- [1] K. Kalantar-Zadeh and B. Fry, „Sensor Characteristics and Physical Effects,“ in *Nanotechnology-Enabled Sensors*. Springer, 2008, pp. 13-62.
- [2] M. Popović, *Senzori i merenja*, 4. izdanje. Zavod za udžbenike i nastavna sredstva Srpsko Sarajevo, 2004.
- [3] K. Mikhaylov, J. Jamsa, M. Luimula, J. Tervonen, V. Autio, F. Hu and Q. Hao, „Intelligent Sensor Interfaces and Data Format,“ in *Intelligent Sensor Networks: The Integration of Sensor Networks, Signal Processing and Machine Learning*, Fei Hu and Qi Hao, Ed. CRC Press, 2013.
- [4] S. Yurish. (2012). Smart sensor systems integration: New challenges, IFSA, [Online]. Available: [http://www.iaria.org/conferences2011/filesICN11/Keynote\\_SergeyYurish.pdf](http://www.iaria.org/conferences2011/filesICN11/Keynote_SergeyYurish.pdf)
- [5] V. Drndarević, *Personalni računari u sistemima merenja i upravljanja*, Akademska misao, Elektrotehnički fakultet, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2003.
- [6] N. Zaimović-Uzunović, *Mjerna tehnika*, Univerzitet u Zenici – Mašinski fakultet, Zenica, 2006.
- [7] JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition, Joint Committee for Guides in Metrology, 2012. [Online]. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
- [8] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurements (GUM), 1st edition, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. [Online]. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
- [9] Portland Energy Conservation, Inc. (PECI) and Lawrence Berkeley National Laboratories (LBNL), Control System Design Guide, Section 3.4, 2006. [Online]. <http://www.peci.org/ftguide/csdg/CSDG.htm>
- [10] D. Popović and P. Pejović, *Električna merenja*, skripta sa predavanja, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2006. [Online]. [http://telekomunikacije.etf.rs/predmeti/ef2em/Merenja\\_skripta.pdf](http://telekomunikacije.etf.rs/predmeti/ef2em/Merenja_skripta.pdf)
- [11] P. Popović and V. Živković, *Osnovi standardizacije i metrologije*, 1. izdanje, Univerzitet Singidunum, Beograd, 2011. [Online]. <http://www.singipedia.singidunum.ac.rs/content/2976-Osnovi-standardizacije-i-metrologije>

- [12] Direkcija za mere i dragocene metale. [Online]. <http://www.dmdm.gov.rs/>
- [13] P. Howarth and F. Redgrave, *Metrologija – ukratko*, 3. izdanje, EURAMET e.V., 2008. [Online]. [http://www.dmdm.rs/PDF/Publikacije/Metrology\\_in\\_short\\_3rd\\_ed\\_Serbian\\_Cyrilic.pdf](http://www.dmdm.rs/PDF/Publikacije/Metrology_in_short_3rd_ed_Serbian_Cyrilic.pdf)
- [14] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), 2008.
- [15] P. Osmokrović, K. Stanković and M. Vujisić, *Merna nesigurnost*, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [16] EA-4/02 M:2013, Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration, European co-operation for Accreditation, 2013. [Online]. <http://www.european-accreditation.org/publication/ea-4-02-m>
- [17] EA-4/16 G:2003, EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing, European co-operation for Accreditation, 2003. [Online]. <http://www.european-accreditation.org/publication/ea-4-16-g>
- [18] ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005.
- [19] M. Merkle and P. Vasić, *Verovatnoća i statistika sa primenama i primerima*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1995.
- [20] S. Bell, *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*, Measurement Good Practice Guide, vol. 11, no.2, National Physical Laboratory, 2001. [Online]. [http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK\\_NPL/mgpg11.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf)
- [21] J. Delić and Lj. Nikolić, Procena merne nesigurnosti pri merenju otpornosti indirektnom metodom, u *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“*, vol. 20, 2010, str. 121-141. [Online]. <http://www.ieent.org/prototip/datoteke/20116/130611021124411.pdf>
- [22] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method, 2008. [Online]. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>

## **3. Povezivanje senzora u distribuirani merni sistem**

Mrežno povezivanje i razvoj distribuiranih sistema prisutni su u računarskoj tehnici dugi niz godina. Međutim, umrežavanje senzora i aktuatora vremenom je postalo nezaobilazno i u industrijskim sistemima. Razvoj visoko integrisanih mikrokontrolera sa brzim i jeftinim mrežnim interfejsima doveo je do masovne upotrebe ovih tehnologija u merno-upravljačkim aplikacijama [1]. Umrežavanje senzora i aktuatora i komunikacija korišćenjem digitalnih mrežnih interfejsa sve više dovodi do decentralizacije sistema i prebacivanja „inteligentnih“ funkcija bliže procesu čiji se parametri mere ili kontrolišu. Ovakav pristup donosi niz prednosti među kojima su poboljšanje performansi sistema, povećana fleksibilnost i skalabilnost sistema, jednostavnija instalacija i održavanje sistema i druge. Takođe, distribuirani sistemi omogućavaju i jednostavnu uspostavljanje paralelizma i redundanse u merno-upravljačkim sistemima. Uz to, decentralizacija sistema može se praktično iskoristiti za integraciju postojeće opreme kao podsistem jednog složenog distribuiranog sistema, i na taj način produžiti period eksploatacije instalirane opreme. Uvođenjem distribuiranih sistema smanjuju se troškovi i ostvaruje lakše upravljanje složenim sistemima, te su distribuirane mreže sa inteligentnim pretvaračima postale nezaobilazne u industrijskim primenama [2].

Međutim, distribuirane mreže sa inteligentnim pretvaračima imaju brojne primene, ne samo u industrijskim, već i u raznim drugim sistemima. Neke od tipičnih primena su mreže za monitoring okoline [3-10], mreže za nadzor i kontrolu u

poljoprivrednim sistemima [10-12], saobraćaju i inteligentnim vozilima [13, 14], kao i primene u inteligentnim sistemima za distribuciju električne energije [15-19], građevinarstvu u okviru koncepta inteligentnih zgrada [20, 21], medicini i zdravstvu [22, 23] i mnogim drugim oblastima.

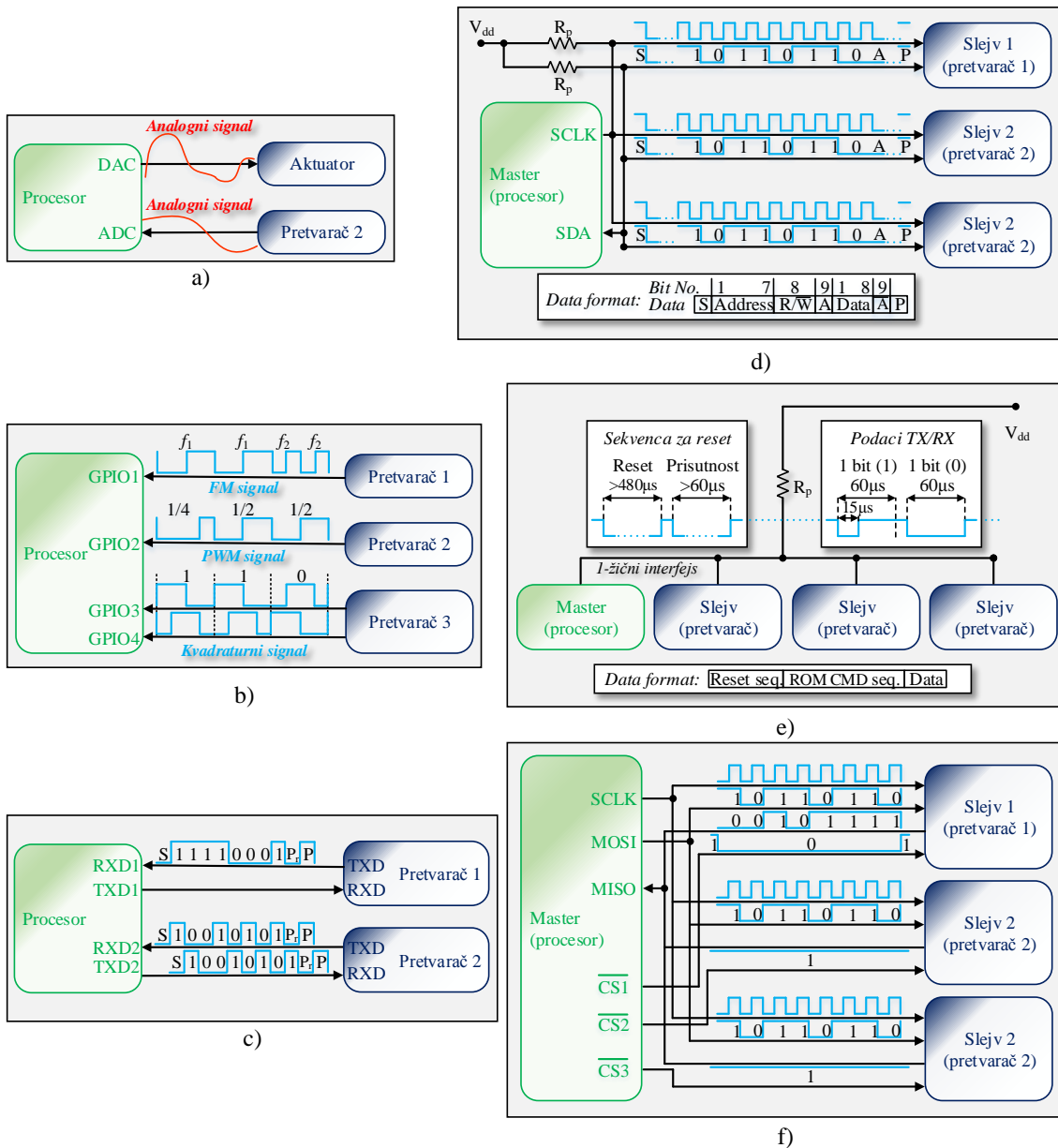
Poslednjih godina, sa razvojem bežičnih mreža i mobilnih uređaja malih dimenzija i male potrošnje energije, sve više su u ekspanziji bežične senzorske mreže i globalno povezivanje senzora. U skladu sa ovom tendencijom, pojavljuju se i različite tehnologije i standardi koji pokušavaju da definišu optimalnu arhitekturu i protokole sa ciljem da se olakša proces otkrivanja senzora i senzorskih mreža u geografski distribuiranim sistemima, kao i da se obezbedi konfiguracija i menadžment, odnosno da se vrši upravljanje i kontrola mernog procesa i prenosa podataka [24, 25]. Ovakvi sistemi od posebnog su interesa u mrežama za monitoring, koje od lokalnih mreža sve više migriraju ka distribuiranim mernim sistemima sa nacionalnim i globalnim geografskim pokrivanjem [26, 27].

### **3.1. Inteligentni senzori**

Kao što je istaknuto u drugoj glavi disertacije, jedna od najčešćih podela senzora je prema tipu izlaznog signala. Dugi niz godina analogni senzori su dominirali u svim oblastima primene. Međutim, u novije vreme, tendencija minimizacije senzora i sve većeg stepena integracije u tehnologiji proizvodnje analognih i digitalnih elektronskih kola, omogućila je i veću zastupljenost kvazidigitalnih i digitalnih senzora. Neki od često korišćenih interfejsa za analogne, kvazidigitalne, i digitalne senzore i aktuatore prikazani su na slici 3.1.

Uprkos tendenciji korišćenja digitalnih senzora, analogni senzori još uvek se primenjuju u mnogim oblastima. Najznačajnije prednosti analognih senzora ogledaju se u njihovoj jednostavnosti i niskoj ceni. Povezivanje analognih senzora je jednostavno, ali linije za prenos signala često zahtevaju dodatno oklapanje kako bi se sprečilo superponiranje smetnji i mernog signala. Takođe, povezivanje analognih senzora zahteva i dodatne elektronske komponente za analogno-digitalnu (AD) konverziju signala.

Kvazidigitalni senzori koriste digitalne naponske nivoe i najčešće frekvencijsku ili faznu modulaciju za prenos korisnog signala. Slično analognim, kvazidigitalni senzori imaju relativno jednostavnu strukturu i nisku cenu, ali su manje osetljivi na šum i interferenciju te omogućavaju postizanje veće tačnosti nego što je slučaj kod analognih senzora [28, 29].



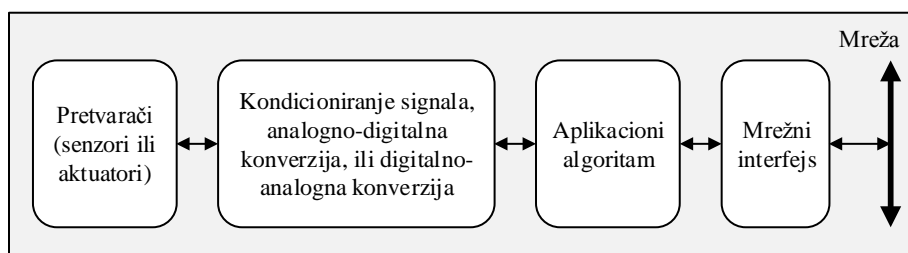
Slika 3.1. Izlazni interfejsi pretvarača: analogni (a), kvazidigitalni (b), digitalni sa UART interfejsom (c), digitalni sa I<sup>2</sup>C interfejsom (d), digitalni sa jednožičnim interfejsom (e) i digitalni sa SPI interfejsom (f) [28]

Digitalni senzori konvertuju signal u digitalnu formu u okviru senzora. Nakon konverzije digitalni merni podatak spreman je za dalje procesiranje i može mu se pristupiti putem odgovarajućeg komunikacionog interfejsa. U novije vreme prisutan je veliki broj različitih digitalnih interfejsa opšte namene, među kojima dominiraju serijski interfejsi kao što su UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*), SPI (*Serial Peripheral Interface*), jednožični (*one-wire*) interfejs i drugi.

Sa napretkom mrežnih tehnologija i povećanjem stepena integracije, koncept kompjuterskog umrežavanja sve je zastupljeniji i u povezivanju senzora i aktuatora. Mrežno povezivanje pretvarača omogućilo je decentralizaciju merno-upravljačkih sistema, povećanje fleksibilnosti i performansi sistema, kao i jednostavniju instalaciju i održavanje u odnosu na tradicionalne analogne sisteme. Od savremenih distribuiranih merno-akvizicionih sistema očekuje se da mnoge zadatke rešavaju autonomno i automatizovano, te je potrebno da pojedine komponente sistema, uključujući i senzore i aktuatore, poseduju sve veći nivo inteligencije. Termin „inteligentni pretvarač“ (*smart transducer*) prvi put je definisan 1982. godine, kao senzor ili aktuator koji je opremljen mrežnim interfejsom u cilju povezivanja u distribuirani merno-upravljački sistem [30]. U današnje vreme termin inteligentni pretvarač široko je prihvaćen, a funkcionalnosti koje se pripisuju inteligentnim pretvaračima su proširene. U savremenoj literaturi [31 - 33], inteligentni pretvarač najčešće se definiše kao pretvarač koji je osposobljen da obavlja dodatne funkcije, osim onih koje su neophodne za generisanje korektno reprezentacije merene ili kontrolisane veličine. Dodatne funkcije obezbeđuju se integracijom pretvaračkog elementa sa elektronskim komponentama za konverziju signala (AD i DA konvertori), komponentama za obradu signala (mikrokontroleri, digitalni procesori signala, sistemi na čipu – SoC (*System on Chip*)) i mrežnim interfejsima za komunikaciju sa inteligentnim sensorom.

Na slici 3.2 prikazan je model jednog tipičnog inteligentnog pretvarača koji se sastoji iz tradicionalnog analognog pretvarača, kola za kondicioniranje analognog signala i analogno-digitalnu/digitalno-analognu konverziju, procesora na kome se izvršava odgovarajući algoritam zavisno od primene pretvarača, kao i mrežnog interfejsa za prenos komandi i podataka.





*Slika 3.2. Model inteligentnog pretvarača*

Tehnologija inteligentnih pretvarača omogućila je novi pristup dizajniranju mernih i kontrolnih sistema koji pomaže da se smanji ukupna složenost i olakša realizacija sistema. Prema ovom konceptu, proizvođači inteligentnih pretvarača treba da se bave samo pitanjima vezanim za uređaj i da obezbede standardizovan interfejs za pristup, kontrolu i prenos podataka. Sa druge strane, dizajneri merne ili upravljačke aplikacije ne moraju da se bave detaljima implementacije senzora, jer se komunikacija sa pretvaračem obavlja preko standardizovanog apstraktnog interfejsa koji sakriva unutrašnju složenost hardvera i softvera pretvarača. Međutim, da bi ovakav koncept mogao da funkcioniše efikasno, neophodno je obezbediti interoperabilnost uređaja različitih proizvođača, odnosno potrebno je obezbediti da svi proizvođači opreme koriste jedinstven skup standarda, što nije jednostavno postići u praksi.

Osim osnovnih funkcija prikazanih na slici 3.2, koje uključuju kondicioniranje signala, analogno-digitalnu konverziju i procesiranje signala, od inteligentnih pretvarača očekuje se, zavisno od oblasti primene, da ostvare i mnoge druge funkcije. Na primer, od inteligentnog pretvarača najčešće se zahteva da obezbedi funkcije koje olakšavaju proces konfiguracije i menadžmenta sistema kao što su samotestiranje i dijagnostika, automatski oporavak od otkaza, funkcije automatske identifikacije, prepoznavanja i konfiguracije pretvarača po povezivanju u mrežu i druge. Za potrebe identifikacije i automatske konfiguracije koriste se različiti mehanizmi koji su najčešće zasnovani na elektronskim specifikacijama pretvarača. Elektronske specifikacije obezbeđuju da se najvažnije karakteristike pretvarača čuvaju u elektronskoj formi u memoriji pretvarača. U pojedinim sistemima, kod kojih su resursi pretvarača veoma ograničeni, u memoriji pretvarača čuvaju se samo najosnovnije informacije (proizvođač, tip i model uređaja, serijski broj i slično) koje obezbeđuju jedinstvenu identifikaciju, dok se detaljnije informacije o pretvaraču čuvaju izvan pretvarača.

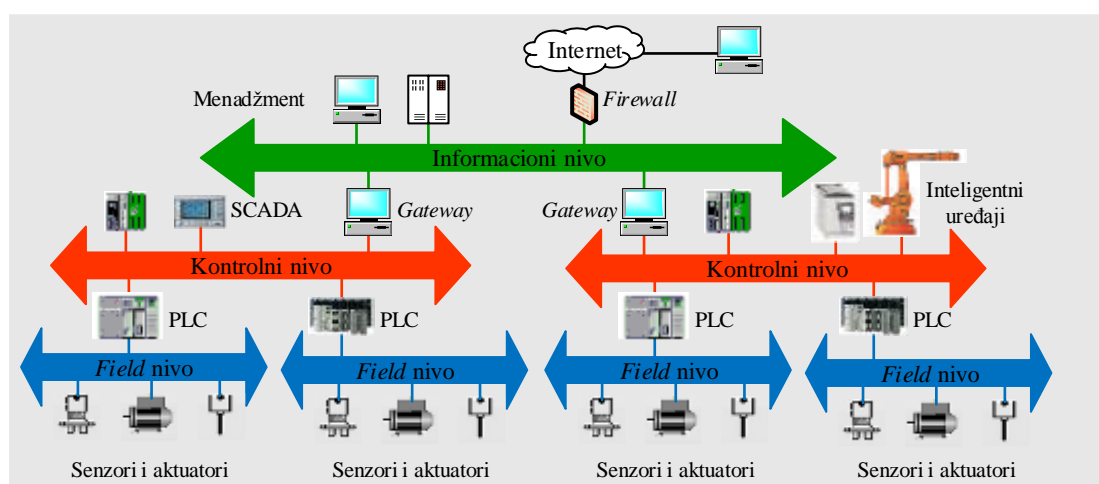
Automatsko prepoznavanje i konfiguracija pretvarača veoma je važna funkcija, posebno u industrijskom okruženju gde se sreće veliki broj različitih senzora i aktuatora, te bi manuelna konfiguracija sistema bila veoma komplikovana i zahtevala značajne finansijske izdatke. Osim toga, manuelna konfiguracija velikog broja parametara sistema često je podložna greškama i zahteva stručno osoblje, te bi se automatizacijom procesa konfiguracije merno-upravljačkih sistema primenom inteligentnih pretvarača postigle značajne uštede. Slično tome, i u distribuiranim heterogenim senzorskim mrežama nije važno samo omogućiti automatsku konfiguraciju mernog sistema već i obezbediti detaljne informacije o upotrebljenim sensorima. Zbog toga, za svaki senzor treba definisati detaljne elektronske specifikacije koje uključuju sve parametre od interesa za datu oblast primene.

### **3.2. Primena inteligentnih senzora**

U početnoj fazi razvoja industrijski kontrolni sistemi zasnivali su se na analognim uređajima i mehaničkoj, pneumatskoj i hidrauličnoj tehnologiji. Napretkom digitalne elektronike i tehnologije integrisanih kola analogne komponente brzo su zamenjene digitalnim kontrolerima i procesorima, a analogne komunikacione linije digitalnim. Takođe, napredak ostvaren u mrežnom povezivanju računarskih sistema našao je primenu i u industrijskom okruženju, što je dovelo do razvoja inteligentnih mrežnih pretvarača i distribuiranih mernih i kontrolnih sistema. Posebno interesantnu temu u industrijskim mrežama predstavlja automatska konfiguracija. Veliki troškovi instalacije i održavanja, kao i mala tolerancija na greške u konfiguraciji industrijskih sistema doveli su do razvoja različitih mehanizama i alata za automatsku konfiguraciju i upravljanje industrijskim mrežama, koji će biti analizirani u poslednjem poglavlju.

Industrijska kontrolna mreža predstavlja sistem za povezivanje uređaja koji se koriste za nadzor i kontrolu fizičkih procesa u industrijskom okruženju. Začeci savremenih industrijskih mreža datiraju još iz 70-tih godina prošlog veka, kada je došlo do značajnije upotrebe digitalnih računara i programabilnih logičkih kontrolera – PLC (*Programmable Logic Device*). Prvi distribuirani kontrolni sistemi pojavili su se sredinom 70-tih godina, dok se masovnija upotreba mrežnih tehnologija u industrijskim sistemima beleži 80-tih godina.

Industrijske mreže su, pre svega, namenjene za rad u realnom vremenu i značajno se razlikuju od tradicionalnih komercijalnih mreža u pogledu specifičnih funkcionalnih zahteva. U cilju povezivanja senzora, aktuatora, digitalnih kontrolera i drugih industrijskih uređaja, razvijen je veći broj komunikacionih protokola za industrijske mreže koji se često nazivaju *Fieldbus* protokoli. Uprkos funkcionalnim razlikama između komercijalnih i industrijskih mreža, u poslednje vreme se teži njihovoj integraciji. Tehnologija koja se koristi u industrijskim mrežama, sve više se oslanja na komercijalne tehnologije, poput *Ethernet*-a, posebno na višim slojevima mrežne arhitekture. Međutim, arhitektura industrijskih mreža složenija je od arhitekture tipičnih komercijalnih mreža i obično ima tri hijerarhijska nivoa, kao što je prikazano na slici 3.3 [34]. Pojedini autori koriste i složenije modele industrijskih mreža, koji imaju četiri i više hijerarhijskih nivoa [2, 35].



**Slika 3.3.** Arhitektura industrijske komunikacione mreže

Najniži nivo povezivanja u industrijskoj automatizaciji naziva se *field level* i služi za međusobno povezivanje jednostavnih uređaja (kao što su senzori i aktuatori) i složenijih uređaja (kao što su PLC kontroleri i računari). Za povezivanje uređaja prvo se koristila strujna petlja 4–20 mA, koja je kasnije zamenjena digitalnim komunikacionim standardima RS 232, RS 422, RS 485 i IEEE 488. Mreže ovog nivoa imaju stroge zahteve za determinizmom i radom u realnom vremenu, sa vremenom odziva od par stotina mikrosekundi do par milisekundi, dok su paketi podataka koji se prenose male veličine, osetljivi na kašnjenja i najčešće se prenose periodično u fiksnim vremenskim intervalima. Ove mreže koriste se za povezivanje inteligentnih senzora i aktuatora koji

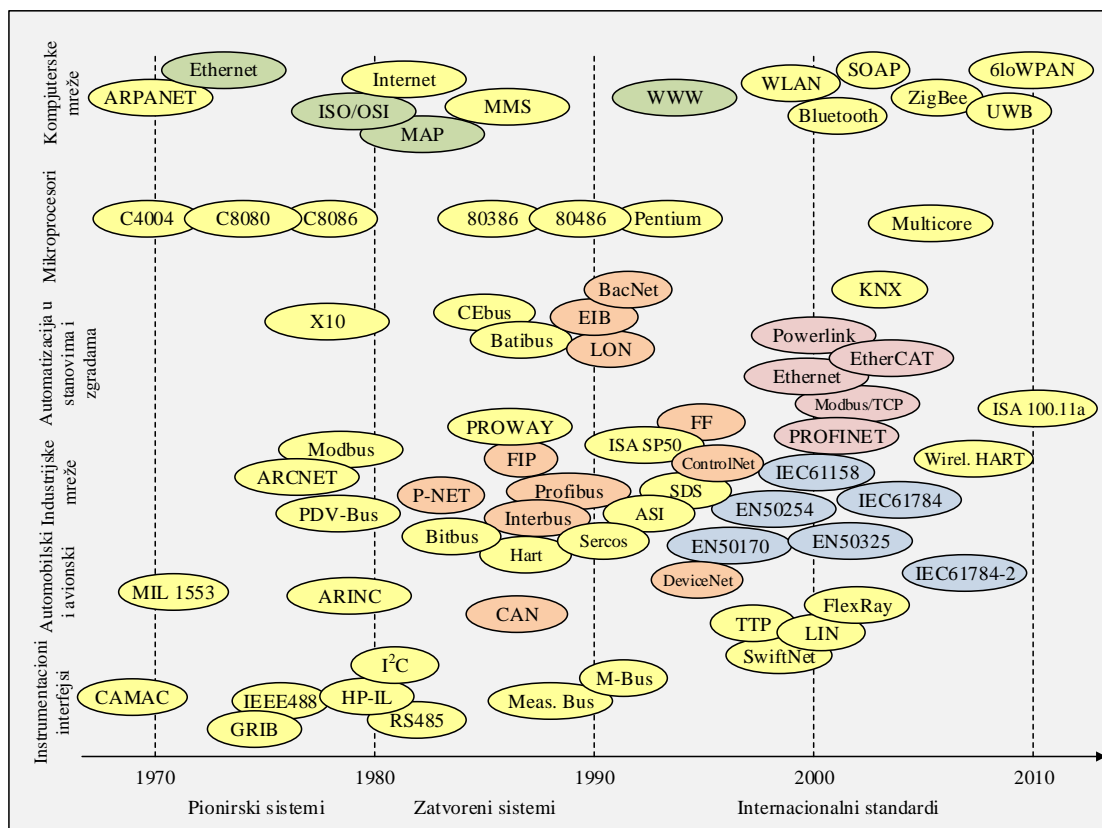
rade u distribuiranim i vremenski kritičnim okruženjima, a imaju i dijagnostičke i konfiguracione funkcije. Postoji veliki broj industrijskih mreža *field* nivoa koje se razlikuju po svojim karakteristikama, veličini paketa podataka i vremenskom odzivu, među kojima su najčešće korišćene *CAN*, *ASInterface*, *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 – *DCS (Distributed Control Systems)*, sistema za nadzor, arhiviranje i slično. Od komunikacionih mreža ovog nivoa zahteva se relativno kratko vreme odziva koje, u zavisnosti od tipa aplikacije, može dostići vrednosti od par desetina do par stotina milisekundi. Za razliku od mreža *field* nivoa, mreže kontrolnog nivoa koriste se za prenos, kako determinističkog saobraćaja, tako i saobraćaja koji nije vremenski kritičan, te se stoga zahteva i veliki protok podataka. Najčešće korišćeni protokoli su *PROFIBUS-FMS*, *ControlNet*, *CANopen*, *P-Net*, *CC-Link*, *Foundation Fieldbus HSE*, *PROFINET*, *EtherNet/IP* i drugi.

Najviši nivo povezivanja u industrijskim mrežama naziva se informacioni nivo (*information level*) i na njemu se prikupljaju informacije sa kontrolnog nivoa i vrši upravljanje kompletnim industrijskim sistemom za automatizaciju. Na ovom nivou najčešće se koriste *Ethernet* bazirane mreže, kao i hardverski i softverski alati za konfiguraciju i menadžment *Ethernet* mreža. Najčešće korišćeni protokoli su *EtherNet* i *EtherNet/IP*.

Uvođenje mrežnih tehnologija u merne i kontrolne sisteme dovelo je do značajnih promena i ekspanzije primene ovih sistema, ne samo u industrijskom fabričkom okruženju, nego i u oblastima razvoja inteligentnih zgrada, kućnoj automatizaciji, distribuciji energije, a takođe i u razvoju inteligentnijih transportnih sistema kao i praćenju i kontroli saobraćaja, monitoringu parametara prirodne sredine, medicini i mnogi drugim oblastima.

Na slici 3.4 prikazana je evolucija nekih od najvažnijih protokola koji se sreću u instrumentaciji, kućnoj automatizaciji, industrijskim i kompjuterskim mrežama [2]. Detaljniji pregled ovih protokola dat je u Prilogu 1 kao i u literaturi [2, 35], dok su neki od najznačajnijih protokola ukratko predstavljeni u nastavku.



Slika 3.4. Evolucija interfejsa i mrežnih standarda [2]

TTP (*Time-Triggered Protocol*) je otvoren deterministički mrežni protokol za kontrolne sisteme koji rade u realnom vremenu. Koristi se najčešće u vozilima, ali se sreće i u industrijskom okruženju. TTP je prvobitno razvijen na Bečkom Univerzitetu za tehnologiju početkom 80-tih godina prošlog veka, dok je dalji razvoj protokola preuzeo *TTTech Computertechnik AG* 1998. godine i, na osnovu njega, razvio dodatne odgovarajuće softverske i hardverske proizvode. TTP protokol koristi dva kanala od 25 Mb/s i TDMA (*Time-Division Multiple Access*) proceduru za pristup medijumu kako bi se obezbedio brz, pouzdan i efikasan prenos poruka sa minimalnim kašnjenjem i vremenskim odstupanjima (*jitter*). U periodu od 1994. do 2006. godine H. Kopetz i W. Elmenreich objavili su više radova u kojima su definisali nove verzije protokola TTP/A i TTP/C [36 - 38]. TTP/C protokol namenjen je za mreže visokog rizika otporne na otkaze, primenjuje se u automobilskoj i avioindustriji i podržava veće brzine prenosa. Pogodan je za povezivanje inteligentnih pretvarača niske cene u vremenski kritičnim sistemima male brzine prenosa (ispod 1 Mb/s). Protokol TTP/A implementiran je u skladu sa STI (*Smart Transducer Interface*) standardom [39] sa ciljem da se obezbedi

ne samo servis za prenos podataka u realnom vremenu već i servisi za automatsku konfiguraciju i menadžment inteligentnih pretvarača.

Protokol CAN (*Controller Area Network*) razvijen je početkom 80-tih godina za primenu u automobilske industriji. Za pristup medijumu koristi se protokol CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), a za prenos podataka RS232. CAN je definisan standardom ISO 11898 i precizira samo prva dva sloja OSI (*Open Systems Interconnection*) modela, fizički i sloj veze podataka. Protokol CAN podržava mehanizme kojima se prevazilazi otkaz jednog linka, međutim, mehanizmi viših slojeva koji bi služili za otklanjanje grešaka pri prenosu podataka nisu uključeni. Zbog nepostojanja specifikacije aplikativnog sloja, CAN nije pogodan za primenu u industrijske automatizaciji, ali se često koristi kao osnova za druge industrijske protokole koji definišu više slojeve OSI modela. Primeri takvih protokola su *CANopen*, *ControlNet*, *DeviceNet* i *Smart Distributed System*. Protokolom CAN ostvaruje se maksimalna brzina prenosa od 500 kb/s, šalju se paketi od samo osam bajta, i na taj način obezbeđuje se kratko vreme pristupa magistrali. Zbog svega navedenog, protokol CAN je pogodan za upotrebu na nižim nivoima industrijske automatizacije.

*CANopen* je proširenje CAN protokola, uvedeno od preduzeća Bosh, koje definiše aplikativni sloj OSI modela i odgovarajuće profile za specifične primene. Uvođenjem profila, protokol *CANopen* omogućava interoperabilnost industrijskih uređaja različitih proizvođača. Definisan je u okviru evropskog standarda EN 50325 zajedno sa ostalim protokolima koji se baziraju na CAN specifikaciji i podržava brzine prenosa od 125, 250, 500 i 1000 kb/s. Protokol *CANopen* definiše više metoda u cilju ostvarenja komunikacije u realnom vremenu i zasnovan je na *master-slave* principu rada. Za razliku od ostalih protokola, koji se baziraju na ovom principu rada, *CANopen* protokolom se omogućava i direktna međusobna komunikacija uređaja bez posredovanja *master* uređaja. Prednosti ovog protokola su visoka pouzdanost, efikasno iskorišćenje raspoloživog propusnog opsega, kao i obezbeđeno napajanje uređaja. Složenost protokola i nedostatak šire prihvaćenog standarda izvan Evrope, kao i ograničenja koja slede iz protokola CAN (ograničen propusni opseg, veličina poruke i maksimalna veličina mreže), predstavljaju najveće mane protokola *CANopen*.

*ControlNet* takođe predstavlja proširenje CAN protokola definisano standardom EN 50325. *ControlNet* primenjuje aplikacioni sloj protokola CIP (*Common*

*Industrial Protocol*) i optimizovan je za periodično slanje podataka, te je pogodan za kontrolne sisteme sa striktno definisanim zahtevima za rad u realnom vremenu.

*DeviceNet* predstavlja verziju protokola *ControlNet* koja je posebno usmerena na povezivanje industrijskih mašina i uređaja. Obezbeđuje pokrivenost na rastojanjima 100 – 500 m i brzine prenosa 125, 250 i 500 kb/s. *DeviceNet*, kao i *CANopen* obezbeđuju sličnu funkcionalnost u smislu prenosa podataka u realnom vremenu, kao i u pogledu konfiguracije i upravljanja mrežom. Međutim, *DeviceNet* više je orijentisan na povezivanje uređaja, dok je *CANopen* orijentisan na razmenu poruka.

PROFIBUS jedan je od najpoznatijih i najčešće korišćenih industrijskih protokola, koji je razvijen u Nemačkoj i podržan od mnogih kompanija, među kojima je najpoznatija Siemens. Standardizovan je i definisan prvo u okviru evropskog standarda EN 50170, a kasnije ga je prihvatila i IEC (*International Electrotechnical Commission*) i uključila u međunarodne standarde IEC 61158 i IEC 61784. PROFIBUS pokriva rastojanja od 100 m do 24 km i podržava brzine prenosa od 9600 b/s do 12 Mb/s. Veličina poruke može biti do 244 bajta. Za različite aplikacije definisani su različiti tipovi protokola PROFIBUS: za saobraćaj viših nivoa, koji ne zahteva komunikaciju u realnom vremenu, koristi se PROFIBUS-FMS, dok se za komunikaciju nižeg nivoa koristi PROFIBUS-DP. Osim toga, razvijeni su i PROFIBUS-PA za rad u sredinama sa visokim rizikom, *PROFIdrive* za kontrolu pokreta i *PROFI-safe* za sigurnosne sisteme. PROFIBUS uglavnom se realizuje korišćenjem RS 485 fizičkog sloja, osim za PROFIBUS-PA koji koristi IEC 61158-2 fizički sloj, kako bi se obezbedila dodatna sigurnost. Prednosti ovog protokola su internacionalna rasprostranjenost, podržava velike protoke, prenos velikih količina podataka, i velike dimenzije mreže. U nedostatke spadaju veliki *overhead* pri prenosu malih količina podataka, visoka cena, kao i nedostatak napajanja mrežnih uređaja.

PROFINET predstavlja adaptaciju protokola PROFIBUS za rad preko *Ethernet* mreža i definisan je IEC 61158 i IEC 61784 standardima. Dostupne su dve varijante protokola: CBA (*Component Based Architecture*) namenjen za više hijerarhijske nivoe mreže i IO (*Input / Output*) za opremu na nižem hijerarhijskom nivou industrijske mreže. PROFINET-CBA koristi RPC (*Remote Procedure Calls*) i DCOM (*Distributed Component Object Model*) procedure koje su originalno razvijene za *Microsoft Windows*. U cilju obezbeđivanja interoperabilnosti uređaja različitih proizvođača, kao i

opisa servisa koje uređaji pružaju, PROFINET-CBA koristi deskriptore komponenti (*component descriptor files*).

INTERBUS je evropska industrijska mreža definisana u okviru standarda EN 50254, a kasnije i u okviru međunarodnog standarda IEC 61158. Bazira se na topologiji prstena, koristi protokol RS 485 na fizičkom nivou, obezbeđuje pokrivanje do 12,8 km i brzine prenosa od 500 kb/s. S obzirom da koristi topologiju prstena, propusni opseg veoma se efikasno koristi sa predvidljivim kašnjenjima, te je pogodan za sisteme koji rade u realnom vremenu. Ova topologija takođe omogućava jednostavniju konfiguraciju i dodatne dijagnostičke mogućnosti, ali otkaz jednog linka može dovesti do prekida u komunikaciji cele mreže.

Fondacija *American Fieldbus Foundation*, razvila je protokol FF H1 (*Foundation Fieldbus H1*), kao pokušaj da realizuje međunarodni standard za industrijske mreže. Uprkos američkom poreklu, protokol FF H1 uključen je u evropski standard EN 50170, a kasnije je prihvaćen i u okviru međunarodnih standarda IEC 61158 i IEC 61784. Primenom protokola FF H1 protokola ostvaruju se brzine prenosa od 31,25 kb/s i opciono omogućava napajanje uređaja. FF H1 je bidirekcionni komunikacioni protokol koji se koristi za komunikaciju između kontrolera i industrijskih pretvarača, koja se ostvaruje preko uparenih parica ili preko optičkog linka i omogućava povezivanje do 32 uređaja. Za razliku od drugih protokola, FF H1 omogućava eksplicitnu sinhronizaciju i periodičnu (izohronu) komunikaciju uz minimalna vremenska odstupanja (*jitter*). Kao nadogradnja protokola FF H1 razvijen je protokol FF HSE (*Foundation Fieldbus High Speed Ethernet*). FF HSE jedan je od prvih *Ethernet* baziranih protokola koji je razvijen za više nivoa povezivanja u industrijskim mrežama. FF HSE se zasniva na neizmenjenom IEEE 802.3 *Ethernet* standardu pa je kompatibilan sa standardnom *Ethernet* opremom. Takođe, standardni *Ethernet* alati mogu se koristiti za konfiguraciju i upravljanje, kao i za testiranje, verifikaciju i otklanjanje problema pri instalaciji mreže. Sa druge strane, FF HSE je na aplikativnom nivou potpuno kompatibilan sa FF H1, odnosno, može se reći da primenjuje protokol H1 preko bržeg fizičkog medijuma.

Protokol HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) razvijen je sredinom 80-tih godina sa ciljem da se omogući digitalna komunikacija preko široko rasprostranjene 4–20 mA analogne žične veze. HART omogućava paralelno



povezivanje do 15 uređaja za koje analogni signal 4–20 mA obezbeđuje napajanje, dok se kompletna komunikacija ostvaruje korišćenjem FSK (*Frequency Shift Keying*) modulacije sa brzinom protoka od 1,2 kb/s. HART se, međutim, najčešće koristi za ostvarivanje tačka-tačka (*point-to-point*) komunikacije, često uz korišćenje specifičnog hardvera za realizaciju vremenskog multipleksiranja kojim se ostvaruje pristup zahtevanoj tačka-tačka vezi. Na taj način, HART omogućuje komunikacionu arhitekturu koja podseća na tradicionalne analogne komunikacione mreže, ali obezbeđuje i druge funkcionalnosti specifične za inteligentne uređaje, kao što je primena deskriptora uređaja i slično. Još jedna od prednosti HART protokola je korišćenje DDL (*Device Description Language*) jezika kojim se omogućava formalan opis *Fieldbus* čvorova, a koji je kasnije prihvaćen i kod drugih protokola, kao što su FF i PROFIBUS.

*P-Net* originalno je razvijen u Danskoj i standardizovan u okviru evropskog standarda EN 50170 i međunarodnog standarda IEC 61158. Kao i mnogi drugi protokoli namenjeni za niže nivoe povezivanja u industrijskim mrežama, i *P-Net* koristi RS 485 protokol na fizičkom nivou, ali uz određene specifičnosti. Posebno je optimizovan za male instalacije, sa naglaskom na nisku cenu opreme i efikasno iskorišćenje relativno male brzine prenosa od 76,8 kb/s. Protokolom *P-Net* omogućena je segmentacija magistrale, čime se obezbeđuje konkurentnost prenosa poruka uz zadržavanje direktnog adresiranja između segmenata magistrale.

U poslednje vreme predloženi su novi *Ethernet* bazirani protokoli za rad u realnom vremenu koje je verifikovao IEC te su postali sastavni deo IEC 61158 i IEC 61784 standarda. To su protokoli: *Ethernet PowerLink*, *EtherCAT*, *TCNet*, *Ethernet for Plant Automation* i drugi.

Najnoviji trend u industrijskim mrežama je primena protokola *Fieldbus* korišćenjem bežičnih tehnologija. Kao i kod *Ethernet* tehnologije, osnovna ideja je da se koriste postojeći standardi kako bi se smanjio ili potpuno izbegao utrošak vremena i sredstava potrebnih za razvoj novih tehnologija za prenos preko bežičnog medijuma. Najpopularnije su one tehnologije koje koriste slobodne, odnosno nelicencirane, propusne opsege kao što su: IEEE 802.11 lokalne bežične mreže – WLAN (*Wireless Local Area Networks*), IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*) i IEEE 802.15.4 koji se koristi kao osnova za ZigBee protokol.

Primena bežične tehnologije daje višestruke prednosti u odnosu na žičnu, jer se, sve češćim korišćenjem bežičnih instalacija, potreba za žičnim instalacijama značajno smanjuje i time se smanjuju troškovi instalacije. Bežična tehnologija takođe je posebno pogodna u hazardnim okruženjima ili instalacijama sa pokretnom opremom, gde često dolazi do oštećenja kablova, što predstavlja značajno ograničenje. Takođe, bežični sistemi omogućavaju brže puštanje u rad kao i efikasniju rekonfiguraciju sistema. Međutim, može se reći da je standardna bežična tehnologija još manje pogodna za industrijsku upotrebu nego *Ethernet*, te je adaptacija postojeće tehnologije za rad u realnom vremenu predmet mnogih istraživanja. Neki od najvećih izazova u primeni bežičnih tehnologija u industrijskim mrežama su problemi sa fadingom i interferencijom kao i veoma izraženim elektromagnetnim zračenjem koje je nezaobilazno u industrijskom okruženju. Ovi problemi mogu se uspešno otkloniti korišćenjem tehnika retransmisije i zaštitnog kodovanja, ali uz značajno povećanje overheda.

Nedavno su promovisana tri protokola za bežičnu komunikaciju i usvojena kao IEC standardi: IEC 62734 (ISA100.11a), IEC 62591 (WirelessHART) i IEC 62601 (WIA-PA – *Wireless Networks for Industrial Automation - Process Automation*). Sva tri standarda baziraju se na IEC 802.15.4 fizičkom sloju, pri čemu samo WIA-PA zadržava potpunu kompatibilnost sa 802.15.4 standardom. Uprkos sličnom konceptu rada, ova tri protokola poseduju različite mrežne protokole i međusobno su nespojivi.

Iako je adaptacija bežičnih tehnologija prisutna već više od jedne decenije i iako su učinjeni prvi koraci u standardizaciji, istraživanja se još uvek vrše na različite teme kao što su kvalitet servisa, protokoli za pristup medijumu, bezbednost, energetska efikasnost, prilagodljivost, kontrola grešaka pri prenosu, mobilnost, skalabilnost, algoritmi rutiranja i slično. Primena bežičnih industrijskih mreža verovatno će ostati aktivna oblast istraživanja još dugo vremena, pogotovo zbog činjenice da se bežične komunikacije i dalje razvijaju, te će nove tehnologije morati da se adaptiraju za industrijsku upotrebu.

### 3.3. Geografski distribuirani merni sistemi

Za povezivanje inteligentnih senzora, osim prethodno opisanih standardizovanih industrijskih mreža, često se koristi i SWE (*Sensor Web Enablement*) familija standarda [40] koju je usvojio konzorcijum OGC (*Open Geospatial Consortium*). Za razliku od industrijskih mreža, koje zauzimaju relativno mali geografski prostor i najčešće imaju veoma restriktivne zahteve za rad u realnom vremenu, familija standarda SWE ima generalniji pristup i posebno je pogodna za distribuirane senzorske sisteme koji pokrivaju velika geografska prostranstva. Grupa standarda SWE definiše pojedine elemente sistema senzora u cilju realizacije koncepta koji se naziva *Sensor Web*. Koncept *Sensor Web* odnosi se na senzore, senzorske mreže ili arhivirane podatke sa senzora koji se mogu otkriti i kojima se može pristupiti preko *Web*-a korišćenjem standardizovanih protokola i aplikacionih interfejsa [41]. Standardi SWE zapravo definišu infrastrukturu koja omogućava da se na standardizovan način obavlja proces otkrivanja i menadžmenta senzora i senzorskih mreža, da se vrši upravljanje i kontrola mernog procesa i prenosa podataka. Interesantno je istaći da se pod sensorom u SWE arhitekturi ne podrazumevaju samo fizički senzori koji prate promene fizičkih parametara u tekućem vremenskom trenutku, već i arhive mernih podataka nastale na osnovu prethodno izvršenih merenja, kao i simulacioni rezultati koji najčešće predstavljaju prognozu određenih parametara u bliskoj ili daljoj budućnosti.

U cilju realizacije *Sensor Web* koncepta SWE standardi nude sledeće funkcionalnosti [42, 43].

- Standardizovan proces otkrivanja senzorskih resursa.
- Opis mernih podataka koji se dobijaju sa senzora kako bi se omogućilo dalje procesiranje.
- Opis metapodataka senzora. Ovi podaci uključuju opis karakteristika senzora i mernog procesa, kao i pouzdanost i mernu nesigurnost izvršenih merenja.
- Standardizovan pristup mernim podacima (uopšteno govoreći opservacijama senzora) i metapodacima senzora.
- Postavljanje zadataka (*tasking*) sensorima u cilju dobijanja akvizicije željenih podataka.

- Detekcija zadatih događaja i alarmiranje u skladu sa zadatim kriterijumima.
- Slanje obaveštenja krajnjim korisnicima o određenim događajima, alarmima ili izvršenim mernim zadacima putem *e-mail* ili SMS servisa.

Za ostvarenje navedenih funkcija SWE standardi podeljeni su u dve grupe, na standarde koji definišu informacioni model i standarde koji definišu modele interfejsa, odnosno servisa.

Informacioni model sastoji se od skupa standarda koji primarno definišu modele podataka za predstavljanje opservacija senzora i za reprezentaciju metapodataka. SWE familija prve generacije (SWE 1.0) za specifikaciju informacionog modela definiše sledeća tri standarda.

- *SensorML (Sensor Model Language)* [44] definiše modele i XML (*Extensible Markup Language*) kodne šeme za opis mernog procesa i procesa obrade podataka. U okviru *SensorML* standarda senzori, aktuatori, filteri i slične komponente modeluju se kao procesi. Svi procesi imaju ulaze, izlaze, parametre i kolekciju metapodataka. Metapodaci procesa veoma su važni jer se na njima bazira otkrivanje procesa raspoloživih na *Web-u*, kao i automatska konfiguracija, odnosno realizacija *Plug and Play* senzora.
- Standard O&M (*Observations & Measurements*) [45] definiše modele i XML kodne šeme za reprezentaciju mernih podataka, odnosno rezultata „opservacija” senzora.
- TML (*Transducer Markup Language*) [46] definiše format poruka za opis pretvarača i prenos ili arhiviranje podataka korišćenjem XML šema. Obezbeđuje podršku za prenos podataka u, ka ili od pretvarača u realnom vremenu.

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

- SOS (*Sensor Observation Service*) [47] definiše aplikacioni interfejs koji ima za cilj da obezbedi standardizovan i konzistentan pristup opservacijama bez obzira na tip senzora ili sistema senzora. SOS upotpunjuje i usklađuje O&M

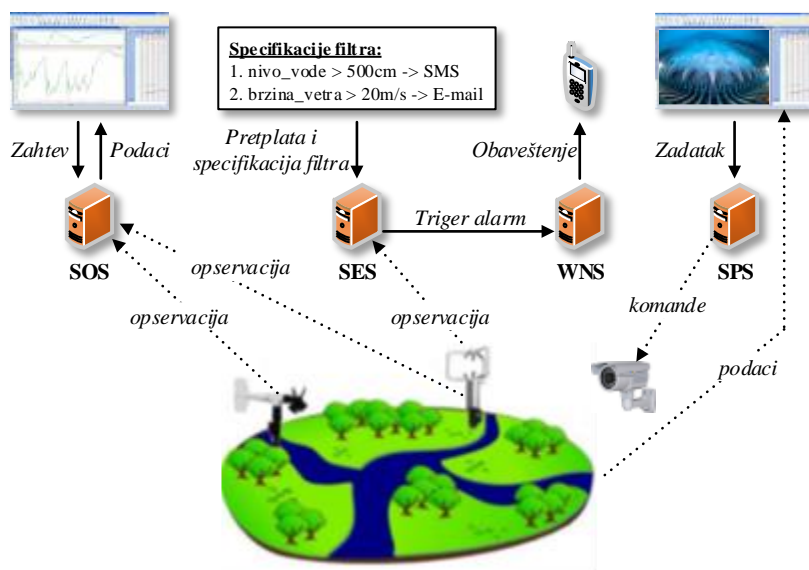
specifikacije za modelovanje opservacija senzora sa *SensorML* specifikacijama za modelovanje senzora i senzorskih sistema.

- SAS (*Sensor Alert Service*) [48] je standardni interfejs mrežnog servisa za pretplatu klijenata za prijem, kao i za distribuciju upozorenja (*alert*) sa senzora ka pretplaćenim klijentima. U ovom dokumentu definiše se upozorenje kao posebna vrsta obaveštenja da se određeni događaj odigrao, što rezultuje stanjem povećane opreznosti ili zahteva određenu akciju. Poruke upozorenja uvek sadrže vreme i lokaciju događaja od interesa.
- SPS (*Sensor Planning Service*) [49] predstavlja standardni aplikacioni interfejs za pokretanje korisničkih akvizicija i opservacija, kreiranje mernih zadataka, kao i za kalibraciju senzora.
- WNS (*Web Notification Service*) [50] je standardni interfejs mrežnog servisa za asinhronu dostavu poruka ili upozorenja od ma kog drugog mrežnog servisa. Podržava dva tipa poruka: jednosmerne i dvosmerne. Jednosmerna komunikacija koristi se za dostavu poruka korisnicima bez mogućnosti odgovora na poruku, dok se dvosmerna komunikacija koristi za dostavu poruka koje zahtevaju asinhroni odgovor na primljenu poruku.

Nova generacija SWE standarda (SWE 2.0) uvodi novine i u informacioni model i u model interfejsa. Specifični tipovi podataka koji se koriste kako za opis senzorskih sistema u okviru *SensorML* standarda, tako i za opis opservacija u O&M standardu izdvojeni su u poseban dokument koji se naziva *SWE Common*. Slično tome, zajednički aspekti za mrežne servise izdvojeni su u poseban dokument *SWE Service Model*. Takođe, 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 3.5. Merni sistem obuhvata različite vrste senzora ili senzorskih sistema: vodomere, meteorološke stanice, kamere za nadzor kritičnih postrojenja i slično. Svaki senzorski sistem opisan je odgovarajućim specifikacijama na bazi *SensorML* standarda kako bi se omogućilo automatsko otkrivanje i konfiguracija senzora. Podaci dobijeni od senzora 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. Aplikacije koriste standardizovani SOS interfejs za slanje zahteva i prijem podataka, a dobijeni podaci mogu se dalje koristiti po potrebi za grafički prikaz ili detaljniju analizu. Ukoliko je korisnik zainteresovan za prijem samo određenog specifičnog podskupa podataka može koristiti SES servis. Korisnik definiše odgovarajuće kriterijume za filtriranje podataka i pretplaćuje se na SES servis. Podaci sa senzora kontinualno se šalju SES servisu, ali SES prosleđuje podatke sa senzora korisniku samo u slučaju kada je ispunjen zadati kriterijum za filtriranje. Ukoliko je korisniku potrebno samo obaveštenje da se određeni događaj odigrao, SES može koristiti usluge WNS servisa za slanje odgovarajuće poruke korisniku. Poruka se može poslati putem SMS, *e-mail* ili nekog drugog komunikacionog protokola. Sensorima se mogu slati i odgovarajući zadaci korišćenjem SPS servisa. Na primer, SPS se može koristiti da se definiše rotiranje i zumiranje kamere koja posmatra neki kritični objekat ili za dobijanje video podataka u realnom vremenu.



Slika 3.5. Primer scenarija za primenu SWE servisa [42]

Poslednjih godina *Sensor Web* infrastruktura bazirana na SWE standardima se sve češće koristi za realizaciju različitih projekata, a posebno za monitoring sisteme. Jedan od istaknutijih projekata je *OSIRIS* [51] koji se koristi kao osnova za mnoge sisteme, na primer za monitoring zagađenja vazduha ili nadzor i borbu protiv šumskih požara. Takođe, projekat *GENESIS* [52] se često koristi u sistemima za monitoring vode

i vazduha. Na bazi SWE servisa razvijen je i projekat *ESS* [53] za potrebe razmene podataka u realnom vremenu u kriznim događajima, sa ciljem da se obezbede relevantni podaci i bolja sinhronizacija između kontrolnih centara, policije, vatrogasne i sličnih službi. Više projekata je razvijeno u oblasti istraživanja i nadzora okeana: *OOSTethys* [54], *Oceans IE* [55, 56], kao i projekat *GITEWS* [57] za rano upozoravanje na cunami.

### **3.4. Standardizovani interfejsi za *Plug and Play* senzore**

Jedan od često korišćenih standarda za povezivanje senzora i aktuatora je i IEEE 1451. Prvi put ga je publikovala 1993. godine međunarodna organizacija za standardizaciju IEEE-SA (*Institute of Electrical and Electronic Engineers – Standards Association*) i od tada se konstantno proširuje i dopunjuje uz podršku organizacije NIST (*National Institute of Standards and Technology*) i uz saradnju mnogih zainteresovanih istraživača i proizvođača senzora i merne opreme. S obzirom na relativno široku popularnost koju je doživeo ovaj standard, nedavno je međunarodna organizacija za standardizaciju ISO (*International Organization for Standardization*) u saradnji sa IEC (*International Electrotechnical Commission*) usvojila i podržala upotrebu ove familije standarda pod nazivom ISO/IEC/IEEE 21451-2010.

Familija standarda ISO/IEC/IEEE 21451-2010 (u daljem tekstu IEEE 1451) definiše niz komunikacionih interfejsa i odgovarajućih elektronskih specifikacija za mrežno povezivanje širokog spektra različitih senzora i aktuatora, nezavisno od tipa mreže koja se koristi za povezivanje. Drugim rečima, familija standarda 1451 definiše komunikacione protokole aplikativnog nivoa koji se mogu primeniti i u heterogenom mrežnom okruženju za povezivanje i konfiguraciju inteligentnih pretvarača u distribuirani merni ili kontrolni sistem.

Među osnovnim motivima za uvođenje familije standarda IEEE 1451 mogu se izdvojiti sledeći [32]:

- nezavisnost od mreže – razvoj interfejsa pretvarača koji ne zavise od mreže za povezivanje pretvarača,
- interoperabilnost – razvoj interfejsa pretvarača koji ne zavise od proizvođača senzora ili aktuatora,

- automatska konfiguracija (*Plug and Play*) – razvoj elektronskih specifikacija za identifikaciju i opis karakteristika pretvarača kako bi se omogućila automatska konfiguracija distribuiranog mernog ili kontrolnog sistema,
- razvoj standardizovanih interfejsa, odnosno standardnih komandi, tipova i formata podataka koji podržavaju operacije konfiguracije, kalibracije i razmene podataka sa inteligentnim pretvaračima.

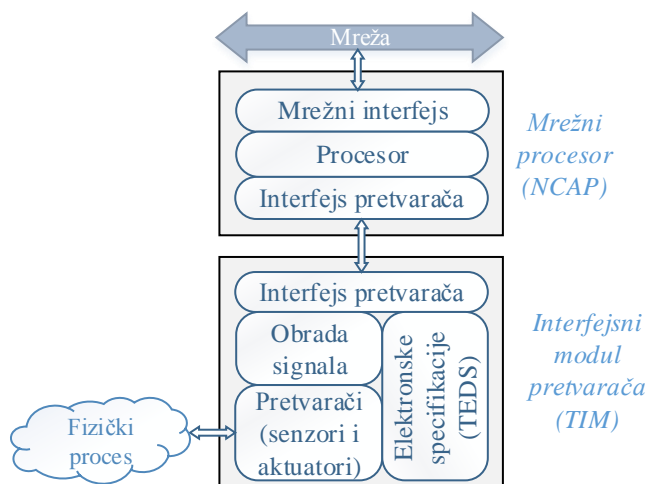
Za razliku od prethodno opisanih koncepcija koje su uglavnom ograničene na određeni tip mrežne infrastrukture, IEEE 1451 familija u centar pažnje stavlja pretvarač i definiše neophodne elektronske specifikacije za opis senzora i aktuatora, kao i odgovarajuće protokole za komunikaciju i standardizovani prenos podataka bez obzira na tip mrežnog povezivanja ili proizvođača upotrebljene opreme.

### **Model inteligentnog mrežnog pretvarača**

Prema modelu koji definiše 1451 standard, 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 3.6. Interfejsni modul pretvarača čine senzori i aktuatori (pretvarači), kola za prilagođenje, obradu i analogno-digitalnu konverziju signala, elektronske specifikacije pretvarača – TEDS (*Transducer Electronic Data Sheets*) i odgovarajući interfejs pretvarača za vezu prema mrežnom procesoru. Mrežni procesor zadužen je za obradu podataka iz pretvaračkih modula i povezivanje sa mrežom. Korišćenjem jednog mrežnog procesora može se izvršiti povezivanje više različitih interfejsnih modula pretvarača, dok se na svaki interfejsni modul može povezati više senzora ili aktuatora.

Jedan od najznačajnijih elemenata koji uvodi standard 1451 jeste definicija elektronskih tabela za specifikaciju različitih tipova pretvarača. Elektronske specifikacije igraju ključnu ulogu u automatskoj konfiguraciji distribuiranih sistema, odnosno predstavljaju osnovu za uvođenje *Plug and Play* koncepta u merne i upravljačke sisteme. TEDS se najčešće realizuje u vidu memorijskog uređaja EEPROM koji pohranjuje podatke za identifikaciju, automatsku konfiguraciju, kalibraciju i korekciju mernih podataka u formatu koji je propisan standardom.





Slika 3.6. Model inteligentnog mrežnog pretvarača prema IEEE 1451 standardu

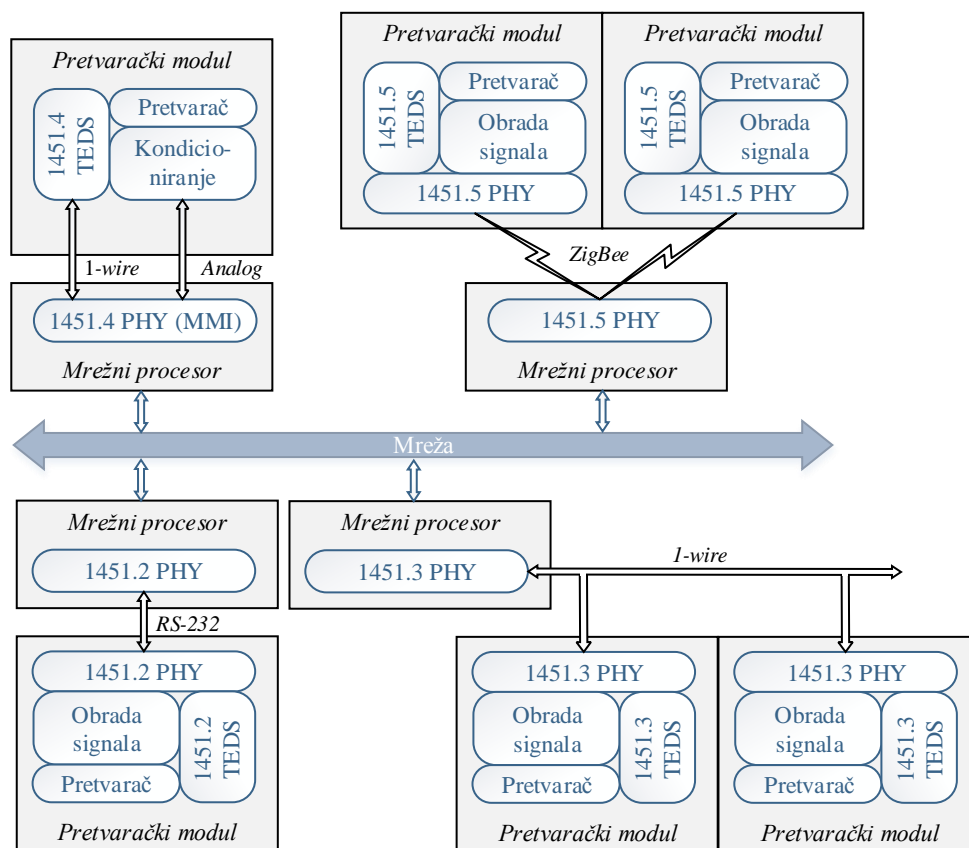
Drugi veoma važan koncept koji uvodi standard 1451 jeste razdvajanje pretvaračkog modula od mrežnog procesora. Ovakva podela uloga omogućava da se relativno komplikovane mrežne funkcije centralizuju tako da jedan mrežni procesor servisira više pretvaračkih modula, čime se ostvaruje jednostavnija konstrukcija pretvaračkih modula. Pošto se u novije vreme koristi izuzetno veliki broj senzora različitih proizvođača, ovakvim pristupom obezbeđuje se veća konkurentnost i snižava cena pretvaračkih modula. Međutim, kako se ne bi ugrozila interoperabilnost pretvaračkih modula različitih proizvođača, interfejs između mrežnog procesora i pretvaračkog modula mora biti precizno definisan standardom.

Interfejs pretvarača definiše protokol za prenos mernih podataka i informacija o pretvaraču smeštenih u TEDS memoriju. Protokolom se specifikuje skup operacija ili komandi kao što su čitanje mernih podataka senzora ili upis podataka u aktuator, kao i format odziva pretvaračkog modula na poslate komande. Interfejs pretvarača zavisi od fizičkog medijuma i tipa veze koja se koristi za komunikaciju mrežnog procesora i pretvarača, te je stoga u okviru 1451 familije definisan veći broj standarda:

- standard 1451.2 [58, 59, 60] definiše digitalni interfejs pretvarača koji koristi žičnu vezu od tačke do tačke posredstvom novouvedenog TII (*Transducer Independent Interface*) interfejsa ili često korišćenih serijskih interfejsa kao što su SPI, UART (RS-232), I2C, USB;

- standard 1451.3 [61] definiše digitalni interfejs za povezivanje mrežnog procesora i pretvaračkog modula *multi-drop* vezom, na primer preko jednožičnog (*1-wire*) interfejsa;
- standard 1451.4 [62, 63] definiše mešoviti analogno-digitalni interfejs – MMI (*Mixed Mode Interface*) za povezivanje tradicionalnih analognih pretvarača opremljenih digitalnim memorijom za smeštanje elektronskih specifikacija pretvarača;
- standard 1451.5 [64] definiše interfejs pretvarača za bežično povezivanje na bazi popularnih bežičnih komunikacionih standarda kao što su *WiFi* (802.11), *Bluetooth* (802.15.1), *ZigBee* (802.15.4), *6LoWPAN* i drugi;
- standard 1451.6 predlaže interfejs između modula pretvarača i mrežnog procesora korišćenjem protokola *CANopen* (predložen, ali nije usvojen);
- standard 1451.7 [65, 66] definiše interfejs i komunikacioni protokol za pretvarače koji se zasnivaju na tehnologiji *RFID* (*Radio Frequency Identification*).

Na slici 3.7 prikazan je princip povezivanja interfejsnih modula pretvarača baziran na familiji standarda IEEE 1451. Komunikacija između mrežnog procesora (NCAP) i interfejsnog modula pretvarača (TIM) može se ostvariti po ma kom protokolu iz familije: 1451.2 za serijske veze od tačke do tačke, 1451.3 za *multi-drop* veze, 1451.4 za tradicionalne analogne pretvarače, 1451.5 za bežične veze, 1451.6 za CAN ili 1451.7 za RFID sisteme. Svaki od prethodno navedenih standarda definiše specifične protokole i TEDS formate koji su prilagođeni tipu fizičke veze između pretvaračkog modula i mrežnog procesora. Iz tog razloga ova grupa standarda često se obeležava sa 1451.X i smatra se da opisuje fizički (PHY) sloj familije 1451. Odgovarajuće TEDS strukture definisane ovim standardima nazivaju se fizički TEDS (PHY TEDS). Treba napomenuti da su na slici 3.7 prikazani samo neki od najčešće korišćenih interfejsnih modula, kao i uobičajena konfiguracija, u kojoj se za mrežno povezivanje pretvaračkih modula istog tipa koristi jedan zajednički NCAP. Međutim, dozvoljeno je koristiti i više mrežnih procesora za isti tip pretvarača ili samo jedan zajednički NCAP (koji poseduje više interfejsa) za povezivanje različitih tipova pretvaračkih modula.



**Slika 3.7.** Povezivanje različitih modula pretvarača na mrežu prema IEEE 1451 standardu

Mrežni procesor definisan u standardu 1451 treba da ispuni dvostruku funkciju: da obezbedi povezivanje sa pretvaračkim modulima korišćenjem nekog od 1451.X fizičkih interfejsa pretvarača, ali i da omogući povezivanje na proizvoljnu spoljašnju mrežu. Standard IEEE 1451.1 [67, 68] uveden je sa ciljem da precizno definiše softverski model, funkcije i komunikacione interfejse mrežnog procesora. Prema ovom standardu NCAP treba da obezbedi sledeće funkcije:

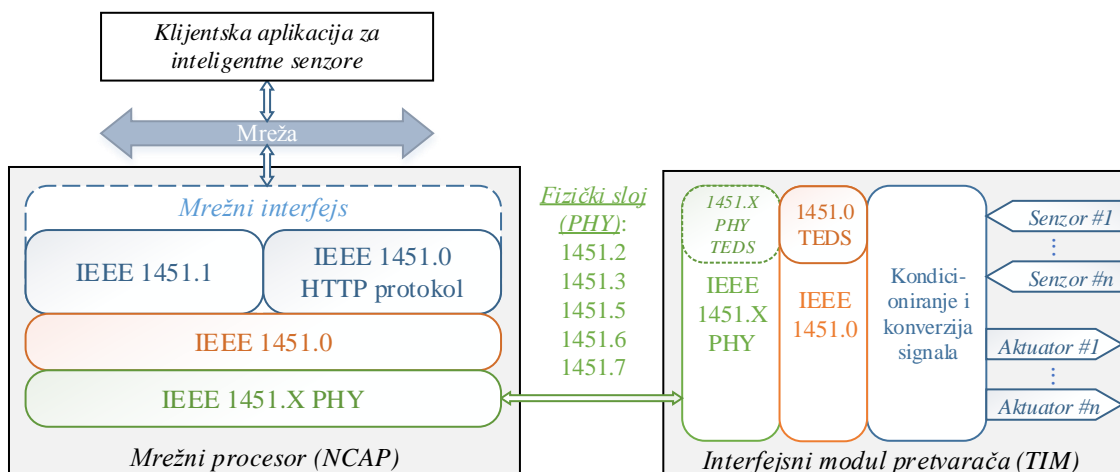
- očitavanje elektronskih specifikacija (TEDS), prepoznavanje svih povezanih pretvarača i njihovu automatsku konfiguraciju,
- upravljanje radom pretvarača u skladu sa fizičkim interfejsom koji se koristi za povezivanje (1451.X),
- procesiranje podataka koji se očitavaju sa senzora ili se šalju aktuatorima, i
- prijem ili slanje podataka koji su namenjeni krajnjim korisnicima korišćenjem protokola koji ne zavise od korišćene mrežne infrastrukture.

Softverski model mrežnog procesora detaljno je definisan standardom 1451.1 tako da se može implementirati na bilo kom savremenom objektno-orjentisanom programskom jeziku.

Međutim, u ranoj fazi razvoja familije standarda 1451 nije se vodilo računa o potrebi da se obezbedi interoperabilnost pretvaračkih modula sa različitim fizičkim interfejsom. Da bi se obezbedio univerzalni pristup i međusobna kompatibilnost pojedinih standarda iz familije 1451 potrebno je definisati zajednički skup operacija, komandi i formata podataka koji NCAP može da koristi pri komunikaciji sa pretvaračkim modulom proizvoljnog tipa.

Osnovni standard familije – 1451.0 [69, 70] uveden je, hronološki posmatrano, tek nakon uvođenja 1451.1 – 1451.5, sa ciljem da se obezbedi interoperabilnost i jednoobraznost u komunikaciji sa pretvaračkim modulima različitog tipa. Ovim standardom definiše se zajednički format TEDS podataka (1451.0 TEDS), kao i skup zajedničkih komandi za pristup sensorima i aktuatorima, bez obzira na tip fizičkog interfejsa (1451.X) preko koga se odvija komunikacija. Takođe, definisan je i skup mrežnih servisa kako bi se obezbedio jednoobrazan pristup pretvaračkim modulima preko proizvoljne mreže. Osim toga, za jednostavnije aplikacije, koje ne zahtevaju primenu standarda 1451.1, obezbeđeno je i da se pretvaračima može pristupiti preko mreže korišćenjem protokola HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*).

Na slici 3.8 prikazan je detaljniji model inteligentnog mrežnog pretvarača koji pokazuje na koji se način obavlja komunikacija između proizvoljne klijentske mrežne aplikacije na udaljenom računaru i pretvarača kompatibilnog sa standardom 1451. Povezivanje TIM modula na mrežni procesor može se izvršiti po ma kom od 1451.X protokola koji obuhvataju sve najčešće korišćene interfejse, od žičnih veza od tačke do tačke, preko magistrala tj. *multi-drop* veza, do bežičnih veza. Da bi povezivanje bilo moguće i NCAP i TIM moraju da podržavaju isti tip 1451.X interfejsa kojim se ostvaruje komunikacija na fizičkom nivou. TIM modul može da poseduje i odgovarajući 1451.X TEDS, što nije neophodno ukoliko se za povezivanje koriste zajedničke komande i univerzalni TEDS format koji su definisani standardom 1451.0.



Slika 3.8. Model mrežnog povezivanja pretvarača prema IEEE 1451 standardu

Povezivanje mrežnog procesora i pretvarača korišćenjem standarda 1451.0 zahteva da interfejsni modul pretvarača, osim TEDS strukture, obezbedi i dodatne funkcije definisane ovim standardom. Iako povezivanje korišćenjem standarda 1451.0 zahteva dodatnu funkcionalnost, pa samim tim i komplikovaniji hardver i softver pretvaračkih modula, ovakvo rešenje je opšte prihvaćeno jer se tako obezbeđuje univerzalni pristup pretvaračima bez obzira na tip fizičke veze koja se koristi.

### 3.5. Automatska konfiguracija distribuiranih merno-upravljačkih sistema

Pojam automatske konfiguracije, koji se u literaturi često naziva i *Plug and Play* [71], dolazi iz računarske industrije gde se veoma uspešno primenjuje već duži niz godina. Ključni koncept za primenu *Plug and Play* tehnologije jeste da svi uređaji poseduju jedinstvene elektronske identifikacione informacije koje se čuvaju u odgovarajućoj memoriji uređaja. Po povezivanju uređaja, prvo se vrši detekcija, očitavanje elektronskih specifikacija i prepoznavanje tipa uređaja, a zatim i automatska konfiguracija u računarski sistem. Tipičan primer ovakvog povezivanja u oblasti računarske tehnike je interfejs USB (*Universal Serial Bus*), gde se, po priključenju uređaja, vrši detekcija povezanosti, prepoznavanje tipa uređaja na osnovu elektronskih specifikacija (koji se kod USB interfejsa nazivaju deskriptori), a zatim i automatska

konfiguracija uređaja. Na taj način uređaj postaje spreman za rad uz minimalnu intervenciju, ili čak bez ikakve intervencije krajnjeg korisnika.

Uvođenjem *Plug and Play* koncepta za povezivanje senzora i aktuatora omogućila bi se potpuna automatizacija procesa konfiguracije mernih i kontrolnih sistema, što bi značajno smanjilo troškove instalacije sistema, ali bi, osim toga, otvorilo i mnogo novih mogućnosti. Međutim, kreiranje odgovarajućih elektronskih specifikacija senzora nije jednostavno jer se senzori veoma razlikuju po svojim tehničkim karakteristikama. Na primer, varijacije u pogledu složenosti mogu se kretati od veoma jednostavnih rezistivnih senzora, do kompleksnih biohemijskih i radioloških senzora. Isto tako zahtevi za brzinom prenosa podataka i kašnjenjem u prenosu podataka mogu da variraju od veoma sporih senzora koji generišu malu količinu podataka (na primer senzori temperature) do brzih senzora koji generišu veliku količinu podataka (na primer video senzori). Takođe, za razliku od računarske tehnike, gde je način upotrebe perifernih uređaja jasno definisan, kod senzora i aktuatora u distribuiranim merno-upravljačkim sistemima to nije slučaj. Kod upravljačkih sistema u industrijskim aplikacijama najčešće je dovoljno da pretvarač bude automatski detektovan, prepoznat i konfigurisan. Na primer, senzoru se, nakon povezivanja, automatski dodeljuje ime, adresa i odgovarajući kanal za komunikaciju, ali način upotrebe podataka koji se dobijaju od senzora najčešće definiše korisnik. Zbog toga se kod kontrolnih sistema umesto termina *Plug and Play* često koristi *Plug and Participate* [72].

U zavisnosti od primene, senzori se mogu povezivati u lokalne mreže relativno malih dimenzija i broja čvorova, ali i u mreže sa nacionalnim ili globalnim geografskim pokrivanjem (na primer mreže za monitoring okoline), što dovodi do novih problema u procesu konfiguracije. Problem automatske konfiguracije prisutan je i u oblasti komunikacionih mreža, posebno u bežičnim mrežama, gde se često koristi pojam samokonfigurisane (*self-configuring*) mreže. Kod ovih mreža bitno je da se omogući automatsko formiranje komunikacione mreže od nezavisnih čvorova i da se izvrši izbor optimalne putanje za prenos poruka. Kada su u pitanju distribuirani merni sistemi, svaki senzorski čvor treba da obezbedi odgovarajući skup informacija o funkcijama koje obezbeđuje, među kojima su [73]:

- merne karakteristike – podaci o veličini koja se meri, merni opsezi, kalibracija i slično,

- interfejs za povezivanje – potrebno je da senzorski čvor poseduje podatke o fizičkim medijumima i protokolima koji se mogu koristiti za povezivanje u mrežu,
- sinhronizacija – vremenska sinhronizacija često je od izuzetne važnosti; za jednostavnije aplikacije može se koristiti NTP (*Network Timing Protocol*), ali se za zahtevnije aplikacije može koristiti, na primer, IEEE 1458 *Precision Timing Protocol* ili sistem za globalno pozicioniranje GPS (*Global Positioning System*),
- sigurnost – obezbeđivanje sigurnosnih protokola u mernim sistemima veoma je važno jer sprečava neovlašćen pristup sensorima i podešavanje parametara sistema, što bi moglo da dovede do potpuno pogrešnih mernih rezultata,
- servisi – podrazumevaju standardizovane procedure kojima se korisnicima obezbeđuje pristup informacijama o senzorskim čvorovima preko mreže; osim servisa za prenos mernih podataka, potrebno je obezbediti i servise za otkrivanje i menadžment senzora, a na raspolaganju mogu biti i dodatni servisi za postprocesiranje podataka i slično.

Kod distribuiranih mernih sistema javljaju se istovremeno oba prethodno opisana zahteva za konfiguracijom – lokalna konfiguracija hardvera i softvera jednog mernog čvora po *Plug and Play* konceptu, ali i globalna konfiguracija i menadžment distribuiranog mernog sistema kao celine. Na primer, u industrijskim mrežama pod pojmom konfiguracije podrazumeva se veoma širok skup aktivnosti od fizičkog povezivanja senzora i aktuatora i konfiguracije hardvera, preko identifikacije uređaja povezanih u mrežu, pa do logičke konfiguracije svih povezanih uređaja u cilju formiranja distribuiranog merno-upravljačkog sistema [72]. Za razliku od konfiguracije, koja se odvija pri uspostavljanju distribuiranog sistema, upravljanje (menadžment) sistemom ostvaruje se nakon uspostavljanja i uključuje kalibraciju, održavanje, monitoring, dijagnostiku i otklanjanje grešaka. Međutim, procese konfiguracije i menadžmenta distribuiranih mernih sistema nije jednostavno razdvojiti, naročito kada je potrebno primeniti *Plug and Play* koncept povezivanja senzora koji zahteva da se automatska konfiguracija uređaja može izvršiti u proizvoljnom trenutku rada sistema.

U cilju podrške automatske konfiguracije i menadžmenta distribuiranih mernih i kontrolnih sistema potrebno je definisati specifikacije pretvarača i odgovarajućih

mrežnih servisa u elektronskoj formi i obezbediti standardizovani pristup ovim informacijama. U tu svrhu razvijen je veoma širok spektar različitih tehnologija, protokola i odgovarajućih alata koji se koriste u industrijskim i senzorskim mrežama. Međutim, s obzirom na rastući trend u povezivanju različitih inteligentnih uređaja na mrežu, problem automatske konfiguracije sve više dobija na značaju i do danas još uvek nije adekvatno rešen.

Potreba za konfiguracijom i upravljanjem industrijskim *Fieldbus* sistemima u periodu koji obuhvata poslednjih 20-tak godina dovela je do razvoja zanimljivih koncepata za podršku automatskoj konfiguraciji i menadžmentu. Neki od najčešće korišćenih mehanizama uključuju upotrebu: profila, *Electronic Device Description Language*, *Field Device Tool/Device Type Manager*, *Interface File System*, *Smart Transducer Descriptions* i drugih rešenja. Ovi mehanizmi mogu se koristiti ne samo u industriji već i u drugim oblastima da bi se ostvarila automatska konfiguracija i upravljanje uređajima povezanim u distribuirani sistem.

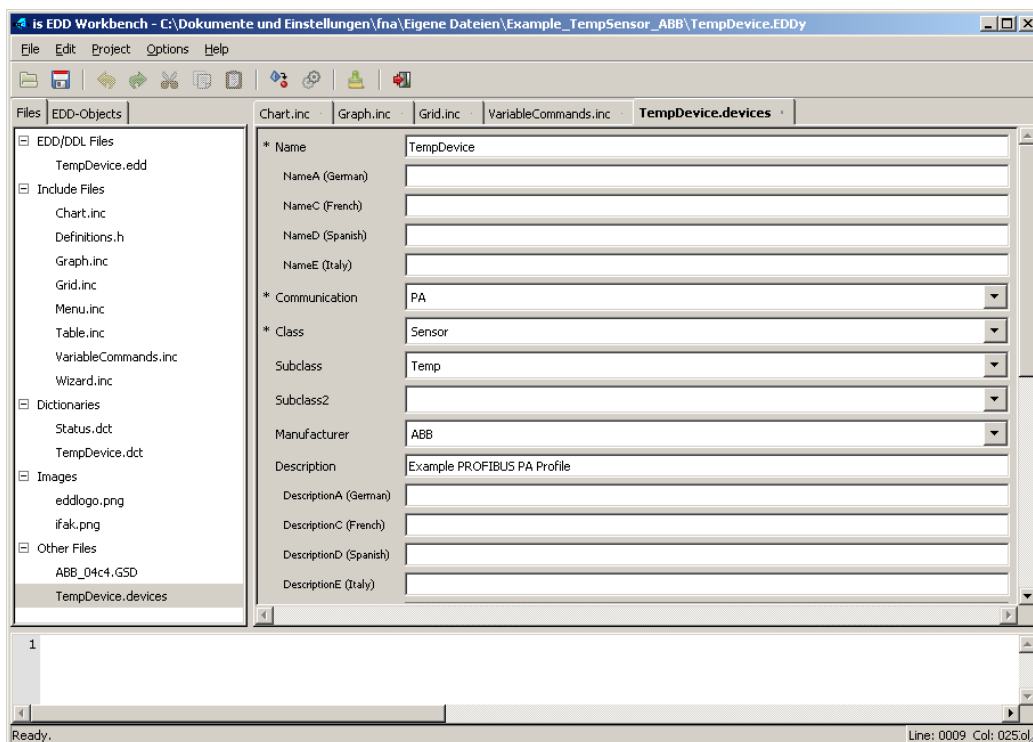
Jedan od primera koncepta za podršku automatskoj konfiguraciji u industrijskom okruženju predstavlja upotreba profila (*profiles*) uređaja. Profili predstavljaju prethodno definisane konfiguracije, funkcije i karakteristike koje se koriste za konfiguraciju odgovarajućih uređaja ili aplikacija. Za svaki tip uređaja profil definiše koji se parametri, operacije i komunikacioni interfejsi moraju implementirati tako da uređaj odgovara zadatom profilu. U većini slučajeva profili predstavljaju rezultat zajedničkog rada proizvođača uređaja za određenu oblast primene. Uočavaju se osobine, obrasci, funkcionalnosti i slično, koje su zajedničke za određeni tip uređaja i definišu se striktno formalne specifikacije koje predstavljaju profil uređaja. Ovo rešenje često se sreće u distribuiranim sistemima gde se zahteva interoperabilnost uređaja različitih proizvođača. Upotrebom profila postiže se otvorenost i interoperabilnost, tako da krajnji korisnik može biti siguran da će slična oprema različitih proizvođača obavljati iste funkcije koje su definisane profilom. Na taj način podstiče se konkurencija među proizvođačima opreme koji teže da plasiraju uređaje boljih performansi uz nižu cenu. Neki od industrijskih protokola koji podržavaju profile su: *LonWorks*, *CANopen* i *PROFIBUS* [72]. Međutim, iako je pristup kreiranja profila sličan u različitim protokolima, definisani profili nisu uvek univerzalni i primenljivi u različitim *Fieldbus* protokolima.



EDDL (*Electronic Device Description Language*) [74] je jezik za opis industrijskih uređaja i predstavlja ključni element tehnologije za integraciju i konfiguraciju industrijskih sistema. Proizvođači uređaja koriste EDDL jezik za kreiranje deskriptora EDD (*Electronic Device Descriptor*) u vidu tekstualnog fajla koji sadrži opis svih parametara i funkcija uređaja, među kojima su:

- informacije za identifikaciju uređaja,
- informacije za opis svih atributa i parametara uređaja, kao što su granice opsega rada, početne vrednosti parametara, radna temperatura i slično, kao i informacije o pravima pristupa parametrima uređaja,
- informacije o međusobnim relacijama parametara,
- informacije o funkcijama i procedurama koje se izvršavaju po utvrđenom protokolu kao što su kalibracija, verifikacija ispravnosti uređaja, promena moda rada i slično,
- informacije bitne za strukturisani prikaz parametara i funkcija, na primer, u formi menija, tabela i slično,
- informacije potrebne za vizuelizaciju podataka, kreiranje specifičnog izgleda, grafičku prezentaciju i prikaz podataka na više jezika,
- linkove za pristup dokumentaciji o uređajima.

Upotrebom EDDL tehnologije eliminiše se potreba za manuelnim unošenjem podataka u softverske alate za konfiguraciju, čime se značajno pojednostavljuje integracija sistema, a takođe i štedi vreme, smanjuju greške i olakšava uvođenje izmena, odnosno instalacija nove opreme u postojeći merno-upravljački sistem. Takođe, zahvaljujući informacijama za grafički prikaz parametara i podataka, proizvođači uređaja mogu da definišu standardizovani grafički interfejs za njihov uređaj. Iako se za analizu EDD fajlova može koristiti i standardni tekst editor, u upotrebi su najčešće specijalizovani alati koji se nazivaju EDDL prevodioci (EDDL *interpreter*). Grafički korisnički interfejs jednog EDDL prevodioca prikazan je na slici 3.9. Za konfiguraciju, dijagnostiku i menadžment inteligentnih uređaja u industrijskoj mreži EDDL se često koristi zajedno sa IDM (*Intelligent Device Management*) softverskim alatima koji sadrže EDDL prevodilac, ali i dodatne alate za konfiguraciju i menadžment sistema.

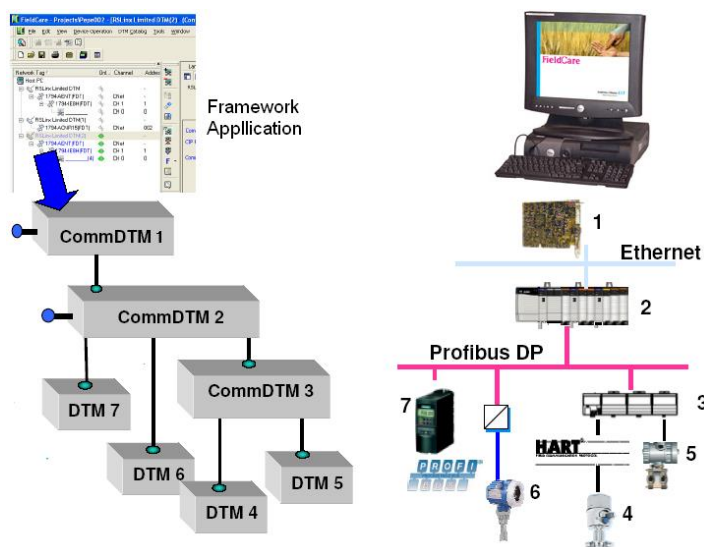


Slika 3.9. EDDL prevodilac – EDD workbench [75]

EDDL prvi put je definisan 1992. godine u okviru HART komunikacionog protokola. Kasnije je dopunjen kombinacijom jezika za opis uređaja koji se koristio ne samo u HART, već i u PROFIBUS i *Foundation Fieldbus* protokolima i verifikovan kao međunarodni standard IEC 61804-2 [76]. Dodatna proširenja EDDL jezika verifikovana su u novoj verziji standarda IEC 61804-3 [77]. Prednosti korišćenja EDDL jezika su postojanje otvorenog standarda, kao i činjenica da predstavlja sastavni deo HART, PROFIBUS i *Foundation Fieldbus* protokola, te se može izvršiti integracija ovih protokola u jedinstven sistem. Na primer, mogu se koristiti *Foundation Fieldbus* uređaji za kontrolu procesa, PROFIBUS-DP za kontrolu motora i *WirelessHART* za monitoring opreme, pri čemu se konfiguracija, dijagnostika i menadžment sistema obavlja jedinstvenim IDM softverskim alatom. Osnovni nedostatak EDDL-a predstavlja ograničenje na osnovne funkcije definisane standardom IEC 61804, što dovodi do potrebe za čestim izmenama i dopunama standarda, u skladu sa stalnim razvojem u industrijskim mrežama [72].

FDT/DTM (*Field Device Tool / Device Type Manager*) [78, 79] je koncept za konfiguraciju industrijskih uređaja koji podržava organizacija *FDT Group*. FDT/DTM sistem za konfiguraciju čine tri funkcionalne celine: *FDT frame application*,

*CommDTM* drajver i *DeviceDTM* drajver. *FDT frame application* je univerzalni softverski alat zadužen za konfiguraciju i menadžment sistema i nezavistan je od tipa *Fieldbus* protokola koji se koristi za povezivanje. DTM predstavlja aplikacioni program koji ima ulogu drajvera uređaja. Postoje dva tipa DTM drajvera, *CommDTM* drajver za odgovarajući *Fieldbus* protokol i *DeviceDTM* drajver za svaki tip uređaja koji je povezan u sistem (slika 3.10). *FDT frame application* obezbeđuje okruženje za rad sa DTM drajverskim programima, pri čemu se komunikacija sa drajverima ostvaruje korišćenjem standardizovanog FDT interfejsa. Svaki DTM drajver koristi standardni interfejs, tako da *FDT frame application* program može da pristupi uređajima korišćenjem standardnog FDT interfejsa.



Slika 3.10. Konceptija FDT/DTM konfiguracionog sistema [80]

*DeviceDTM* drajveri, osim standardnog interfejsa, sadrže i unifikovane strukture za pristup parametrima uređaja čime se omogućava dijagnostika, konfiguracija i menadžment uređaja. *DeviceDTM* drajveri mogu biti jednostavni programi koji obezbeđuju samo grafički korisnički interfejs za postavljanje određenih parametara uređaja, ali mogu biti i sofisticirani programi sposobni za obavljanje veoma složenih operacija u realnom vremenu u cilju dijagnostike i održavanja uređaja. S obzirom da DTM drajver kreira proizvođač za svaki tip uređaja posebno, ne postoji problem sa opisivanjem parametara i funkcija čak i za najsloženije uređaje, što je to bio slučaj sa EDDL jezikom. Međutim, kreiranje DTM drajvera za svaki tip uređaja nameće dodatne

troškove za proizvođače, pa su FDT/DTM konfiguracioni sistemi skuplji za primenu [72].

Komunikacija između DTM drajvera i *FDT frame application* programa zasniva se na *Microsoft Windows COM* tehnologiji, dok se podaci razmenjuju u vidu XML (*Extensible Markup Language*) dokumenata. Osim toga, *FDT frame application* koristi *Active X* tehnologiju za kreiranje grafičkog korisničkog interfejsa i prikaz podataka sa uređaja. Pošto se FDT/DTM grafički korisnički interfejs bazira na *Active X* tehnologiji, zadržava se identičan izgled interfejsa bez obzira na tip *FDT frame application* programa koji se koristi za prikaz parametara. Novije verzije FDT drajvera i *FDT frame application* programa zasnivaju se na *Microsoft .NET* tehnologiji. Imajući u vidu korišćenu tehnologiju, FDT/DTM sistemi ograničeni su na *Windows* okruženje. Dodatni problem predstavlja kompatibilnost postojećih drajvera sa različitim verzijama *Windows* operativnog sistema. Zbog toga često može doći do potrebe za nabavkom i instalacijom novih verzija drajvera čime se povećava složenost i cena održavanja sistema.

Koncept koji promovise FDT pojavio se još 1998. godine. Ovaj koncept je kasnije preuzela i dopunila radna grupa PROFIBUS, dok je za dalji razvoj i promociju koncepta trenutno nadležna neprofitna organizacija *FDT Group* koju čini više od 60 kompanija. FDT je 2009. godine prihvaćen kao standard IEC 62453 i trenutno podržava 16 *Fieldbus* protokola uključujući i HART, PROFIBUS i *Foundation Fieldbus*.

S obzirom da većina proizvođača industrijske opreme podržava i FDT i EDDL tehnologije, pojavila se potreba za njihovim ujedinjenjem, čime bi se značajno pojednostavio proces konfiguracije i menadžmenta kontrolnih sistema. FDI (*Field Device Integration*) [81] projekat nastao je sa idejom da se EDDL i FDT ujedine u jedinstvenu tehnologiju. U septembru 2011. godine najznačajnije fondacije uključujući *Fieldbus Foundation*, *FDT Group*, *HART Communications Foundation*, *OPC Foundation* i *PROFIBUS & PROFINET International* formirale su korporaciju *FDI Cooperation LLC* sa ciljem da razviju jedinstvenu tehnologiju za upravljanje inteligentnim uređajima u industrijskom okruženju. FDI tehnologija trenutno je još uvek u procesu razvoja i standardizacije.

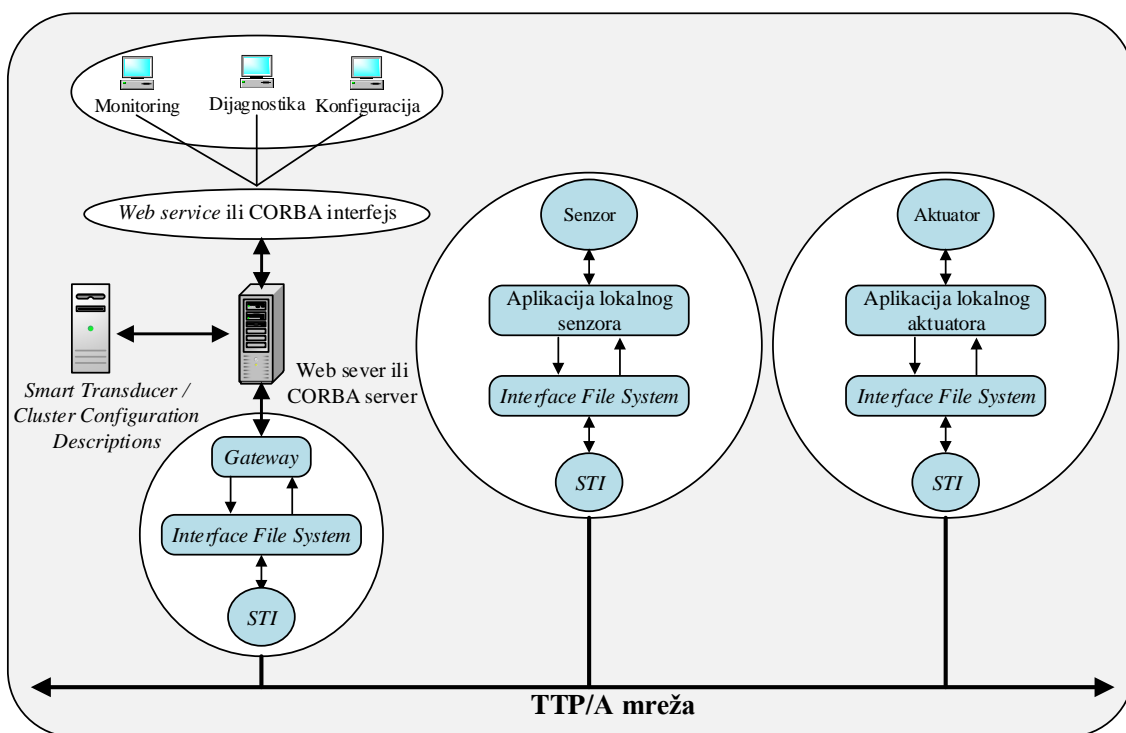
Nešto drugačiji pristup za realizaciju automatske konfiguracije predložen je u okviru TTP/A *Fieldbus* protokola, koji je definisan u [82], a kasnije i standardizovan u okviru organizacije OMG (*Object Management Group*) kroz STI (*Smart Transducer Interface*) standard [39]. Kao što je već rečeno, TTP/A protokol pogodan je za povezivanje inteligentnih pretvarača u vremenski kritičnim sistemima male brzine prenosa.

Mreža TTP/A podeljena je u maksimalno 250 celina koje se nazivaju klasteri (*clusters*), tako da se u svakom klasteru nalazi do 250 inteligentnih pretvarača. Komunikacija u jednom klasteru organizovana je po *master-slave* principu. Svaki klaster poseduje jedan aktivni master uređaj, koji je nadležan za sinhronizaciju razmene podataka između svih uređaja u klasteru. Prenos podataka u realnom vremenu, sa zagantovanim kašnjenjem, realizovan je korišćenjem TDMA multipleksa. Osim RS (*Real-Time Service*) servisa koji obezbeđuje prenos podataka u realnom vremenu, protokolom TTP/A obezbeđuju se i DM (*Diagnostic and Management*) servis za dijagnostiku i upravljanje, kao i CP (*Configuration and Planning*) servis za konfiguraciju i planiranje.

Razmena podataka sa inteligentnim pretvaračima u TTP/A mreži zasniva se na konceptu IFS (*Interface File System*) koji su definisali Kopetz, Holzmann i Elmenreich u [82]. IFS može da se zamisli kao memorijski prostor inteligentnog pretvarača kome se pristupa preko mreže TTP/A u cilju očitavanja ili upisa odgovarajućeg sadržaja. Memorijski prostor može da sadrži najviše 64 celine koje se nazivaju fajlovi. Svaki od fajlova sadrži određenu vrstu podataka vezanu za pretvarač (konfiguracione podatke, elektronske specifikacije, interne statusne informacije i slično). Fajlovi se koriste i za slanje podataka aktuatorima i očitavanje podataka sa senzora u realnom vremenu.

Svaki fajl podeljen je na maksimalno 256 delova dužine 4 bajta koji se nazivaju zapisi (*records*) i predstavljaju najmanju adresibilnu memorijsku celinu. Adresa zapisa sastoji se iz 4 bajta koji definišu klaster, inteligentni pretvarač, fajl i zapis, respektivno. Osim upisa i čitanja sadržaja zapisa, IFS omogućava i izvršavanje (*execute*) zapisa. Ova mogućnost koristi se za izvršavanje unapred definisanih operacija, pri čemu, u tom slučaju, adresa zapisa predstavlja indentifikaciju operacije inteligentnog pretvarača.

Primer realizacije platforme za konfiguraciju i menadžment TTP/A mreže na osnovu standarda OMG – STI i komunikacionog modela CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) [83] prikazan je na slici 3.11. i detaljno opisan u radu [84]. Alternativni primer realizacije infrastrukture za konfiguraciju i menadžment TTP/A mreža na bazi tehnologije mrežnih servisa (*Web service*) predstavljen je u [85].



**Slika 3.11.** Arhitektura za konfiguraciju i menadžment sistema zasnovanog na TTP/A Fieldbus protokolu [84]

Sa stanovišta konfiguracije mreže TTP/A najvažnije je obezbediti odgovarajuće elektronske specifikacije inteligentnih pretvarača. Elektronske specifikacije za opis pretvarača – STD (*Smart Transducer Descriptions*) definisali su Pitzeck i Elmenreich u [86]. STD koristi XML (*EXtensible Markup Language*) jezik za opis podataka smeštenih u elektronskim specifikacijama. Razlikuju se dva tipa elektronskih specifikacija pretvarača:

- statičke STD koje se koriste za opis statičkih karakteristika familije uređaja kojoj pretvarač pripada, i definiše ih proizvođač u trenutku kreiranja pretvarača, i
- dinamičke STD koje opisuju način korišćenja pretvarača u konkretnom *Fieldbus* sistemu (kao što su adresa pretvarača, konfiguracioni parametri i slično).

Karakteristike koje su opisane elektronskim specifikacijama pretvarača uključuju sledeće elemente:

- informacije o čvoru – ovaj STD blok sadrži osnovne informacije za identifikaciju: ime proizvođača pretvarača, tip pretvarača, serijski broj, lokalnu adresu i slično,
- mikrokontrolerske informacije – uz pretpostavku da su pretvarači realizovani korišćenjem standardnih mikrokontrolera, ovaj STD blok opisuje najvažnije karakteristike upotrebljenog mikrokontrolera kao što su proizvođač, tip kontrolera, frekvencija osnovnog takta, odstupanje frekvencije i slično,
- informacije o protokolu koje uključuju tip komunikacionog protokola, brzinu prenosa podataka i slične podatke,
- informacije o servisima – ovaj blok podataka opisuje operacije koje podržava inteligentni pretvarački čvor. Na primer, jedan servis, odnosno operacija, može biti definisan za pokretanje rada određenog senzora ili aktuatora. Ovakav servis može da sadrži odgovarajuće ulazne i izlazne parametre koji se definišu u ovom bloku STD specifikacija.

Osim STD specifikacija koje opisuju pretvarač, kod TTP/A sistema koristi se još jedan tip specifikacija – CCD (*Cluster Configuration Descriptor*). CCD sadrži osnovne informacije o svim čvorovima TTP/A mreže koji su povezani u jedan klaster (uključujući i referencu na STD čvor), informacije o komunikacionom protokolu koji se koristi u klasteru i informacije o TDMA šemi koja se koristi za određivanje trenutka kada određeni čvor treba da emituje ili prima podatke.

Interesantno je primetiti da, iako se elektronske specifikacije pretvarača fizički nalaze u IFS fajlovima pretvarača, njihove XML reprezentacije, koje su neophodne za tumačenje sadržaja odgovarajućeg IFS fajla, čuvaju se van čvorova. Ovakav pristup tipičan je za *Fieldbus* sisteme naročito kod mreža niskog nivoa koje se koriste za povezivanje senzora i aktuatora. Najčešće sam pretvarač sadrži minimalni skup informacija koji je neophodan za jedinstvenu identifikaciju, dok se detaljnije informacije obično nalaze na nekom od sistemskih servera koji ima veće memorijske kapacitete i bržu komunikacionu infrastrukturu.

Za razliku od prethodno opisanog pristupa, IEEE 1451 definiše elektronske specifikacije koje su prvenstveno namenjene za čuvanje u okviru inteligentnog pretvarača. Ovakav pristup može da ima značajne nedostatke u pogledu memorijskih zahteva za skladištenje elektronskih specifikacija. Takođe, da bi se obezbedilo relativno malo zauzeće memorijskih resursa, TEDS formati su specifični i ne koriste prednosti strukturiranih i lako čitljivih jezika za opis parametara, kao što je XML. Dodatni nedostatak predstavlja i činjenica da je standard 1451.0 usvojen nakon standarda 1451.2 – 1451.5, te postoje izvesni problemi u kompatibilnosti TEDS struktura i samim tim i potreba da se definišu dve TEDS tabele za isti pretvarač: 1451.0 TEDS koji ima univerzalnu strukturu za sve tipove pretvarača i 1451.X TEDS (PHY TEDS) koji zavisi od fizičke veze modula pretvarača i mrežnog procesora.

Međutim, pristup koji je primenjen u IEEE 1451 familiji donosi i niz prednosti. S obzirom da se elektronske specifikacije nalaze u memoriji pretvarača omogućena je kompletna podrška za primenu koncepta *Plug and Play*. Kako se za smeštanje elektronskih specifikacija u memoriju pretvarača koriste unapred definisani formati podataka, zauzeće memorije relativno je malo i reda je nekoliko stotina bajtova. Za analogne pretvarače, kod kojih se za čuvanje elektronskih specifikacija mora obezbediti spoljašnja memorija, koristi se još efikasnije kodovanje podataka, te se kompletan TEDS najčešće može smesti u memoriju kapaciteta svega 256 bita. Osim toga, standardom je predviđeno i korišćenje virtuelnih TEDS fajlova za smeštanje elektronskih specifikacija izvan pretvarača. Na taj način, zauzeće memorije pretvarača svodi se samo na podatke neophodne za identifikaciju.

Identifikacija pretvarača vrši se na osnovu podataka o proizvođaču, tipu, modelu, serijskom broju, koji su smešteni u TEDS memoriji. U elektronskim specifikacijama tipično se nalaze i podaci o statičkim i dinamičkim karakteristikama senzora, te je moguće izvršiti povezivanje senzora na akvizicioni sistem i konfiguraciju mernog sistema bez manuelnih radnji. Drugim rečima, moguće je izvršiti automatizaciju procesa povezivanja i konfiguracije mernog sistema po konceptu *Plug and Play*.

Standardom IEEE 1451.0 definisan je TEDS koji ima jedinstvenu strukturu za sve tipove pretvarača i podeljen je u više celina od kojih su pojedine obavezne za sve pretvarače, a pojedine opcione. Pregled nekih najznačajnijih elemenata elektronskih



specifikacija pretvarača, prema standardu 1451.0, dat je u tabeli 3.1. Neophodna veličina memorije za obavezni deo 1451.0 TEDS specifikacija iznosi oko 300 bajta.

Podaci u TEDS tabeli mogu biti binarni ili tekstualni. Binarne podatke koristi mrežni procesor i namenjeni su za primenu *Plug and Play* koncepta. Tekstualni podaci namenjeni su za opis pretvarača u formi koja je prilagođena krajnjem korisniku i mogu biti predstavljeni na više govornih jezika.

**Tabela 3.1.** Najznačajniji elementi elektronskih specifikacija pretvarača prema 1451.0 standardu [32]

Naziv	Tip podataka	Kategorija
<i>Meta TEDS</i>	Binarni	Obavezan
<i>Channel TEDS</i>	Binarni	Obavezan
<i>Calibration TEDS</i>	Binarni	Opcioni
<i>Generic Extension TEDS</i>	Binarni	Opcioni
<i>Meta Identification TEDS</i>	Tekstualni	Obavezan
<i>Channel Identification TEDS</i>	Tekstualni	Obavezan
<i>Calibration Identification TEDS</i>	Tekstualni	Opcioni
<i>End User Application Specific TEDS</i>	Tekstualni	Opcioni

*Meta TEDS* sadrži podatke koji opisuju interfejsni modul pretvarača (TIM). S obzirom da interfejsni modul može da sadrži više pretvarača, svakom od njih dodeljuje se po jedan kanal, te *Meta TEDS* sadrži podatke o broju raspoloživih kanala i maksimalnom vremenu odziva interfejsnog modula. Osim toga, *Meta TEDS* sadrži informacije o grupisanju kanala, a može da sadrži i podatke o geografskoj lokaciji pretvarača. Ove informacije neophodne su mrežnom procesoru kako bi se omogućio pristup detaljnim podacima o svakom pojedinačnom kanalu.

Detaljne informacije o svakom kanalu smeštene su u strukturi podataka koja se naziva *Channel TEDS*. Ove informacije uključuju: vreme pristupa kanalu, period i vrstu odabiranja, format i način razmene podataka, tip pretvarača, opseg rada pretvarača, fizičke jedinice, tačnost, mernu nesigurnost, kao i podatke o tome da li je obezbeđena kalibracija za dati kanal.

*Calibration TEDS* sadrži neophodne informacije za konverziju podataka iz senzora u odgovarajuće fizičke jedinice specifikovane u *Channel TEDS*-u. Ako je na neki od kanala TIM modula povezan aktuator, onda *Calibration TEDS* sadrži informacije za konverziju podataka iz fizičkih jedinica u odgovarajući format koji se

koristi za upravljanje aktuatorom. *Calibration TEDS*, osim toga, sadrži podatke o intervalu kalibracije i datumu poslednje izvršene kalibracije.

*Generic Extension TEDS* je opcioni TEDS koji proizvođačima industrijske opreme daje mogućnost da, u binarnom formatu, specifikuju dodatne TEDS podatke.

*Meta Identification TEDS* je tekstualni TEDS i sadrži podatke o interfejsnom modulu pretvarača kao što su ime proizvođača, serijski broj i broj modela TIM modula. *Channel Identification TEDS* sadrži slične podatke kao *Meta Identification TEDS*, međutim, *Meta Identification TEDS* daje informacije za TIM, dok *Channel Identification TEDS* daje identifikacione informacije o pretvaračima koji su povezani na interfejsni modul. *Calibration Identification TEDS* sadrži dodatne informacije o kalibraciji koje uključuju podatke o tome ko je izvršio kalibraciju i prema kom standardu.

*End User Application Specific TEDS* nije detaljno definisan standardom i krajnjim korisnicima daje mogućnost da, u tekstualnom formatu, specifikuju dodatne informacije kao što su lokacija modula, vreme instalacije ili druge relevantne podatke.

U okviru disertacije posebna pažnja posvećena je razvoju elektronskih specifikacija za analogne *Plug and Play* senzore na bazi standarda 1451.4. Iz tog razloga, u četvrtoj glavi detaljnije su opisane elektronske specifikacije i koncepcija 1451.4 *Plug and Play* senzora. Praktična realizacija prototipa analognog *Plug and Play* senzora i njegova primena za senzore temperature i jonizujućeg zračenja, data je u petoj glavi. Povezivanje analognog senzora na mrežu izvršeno je korišćenjem 1451.0 standarda, te je detaljna analiza ovog standarda izvršena u četvrtoj glavi, a praktična realizacija odgovarajućeg mrežnog procesora u petoj glavi disertacije.

## Literatura

- [1] G. Song, A. Song and W. Huang, "Distributed measurement system based on networked smart sensors with standardized interfaces," *Sensors & Actuators – A Physical*, vol. 120, pp. 147-153, 2005.
- [2] R. Zurawski Ed., *Industrial Communication Technology Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, 2014.
- [3] D. Wobschall, "Networked sensor monitoring using the universal IEEE 1451 standard," *IEEE Instrum. & Meas. Mag.* vol. 11, no. 2, pp. 18–22, 2008.
- [4] A. Kumar, I. Singh and S. Sud, "Energy efficient and low cost indoor environment monitoring system based on the IEEE 1451 standard," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 10, pp. 2598-2610, 2011.
- [5] N. Kularatna and B. Sudantha, "An Environmental Air Pollution Monitoring System Based on the IEEE 1451 Standard for Low Cost Requirements," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 415-422, 2008.
- [6] A. Kumar, H. Kim and G. Hancke, "Environmental Monitoring Systems: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 1329-1339, 2013.
- [7] F. Ding, G. Song, K. Yin, J. Li, and A. Song, "A GPS-enabled wireless sensor network for monitoring radioactive materials," *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 155, no. 1, pp. 210-215, 2009.
- [8] L. Bissi, P. Placidi, A. Scaroni, I. Elmi and S. Zampolli, "Environmental monitoring system compliant with the IEEE 1451 standard and featuring a simplified transducer interface," *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 137, no. 1, pp. 175-184, 2007.
- [9] V. Drndarevic and M. Bolic, "Gamma Radiation Monitoring with Internet-Based Sensor Network," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 2, pp. 121-133, 2008.
- [10] S. Mukhopadhyay (Ed.), *Smart Sensing Technology for Agriculture and Environmental Monitoring*, Springer, 2012.
- [11] J. Wei, N. Zhang, N. Wang, D. Lenhart, M. Neilsen and M. Mizuno, "Use of the "smart transducer" concept and IEEE 1451 standards in system integration for precision agriculture," *Computers & Electronics in Agriculture*, vol. 48, no. 3, pp. 245-255, 2005.

- [12] M. Fernandes, S. Matos, E. Peres, C. Cunha, J. López, P. Ferreira, M. Reis and R. Morais, “A framework for wireless sensor networks management for precision viticulture and agriculture based on IEEE 1451 standard,” *Computers & Electronics in Agriculture*, vol. 95, pp. 19-30, 2013.
- [13] F. Barrero, S. Toral, M. Vargas and J. Becera. (2012). Networked Electronic Equipments Using the IEEE 1451 Standard—VisioWay: A Case Study in the ITS Area. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, [Online]. vol. 2012. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2012/467124/>
- [14] F. Barrero, J. Guevara, E. Vargas, S. Toral and M. Vargas, “Networked transducers in intelligent transportation systems based on the IEEE 1451 standard,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 300-311, 2014.
- [15] A. Cataliotti, G. Cipriani, V. Cosentino, D. Cara, V. Dio, S. Guaiana, N. Panzavecchia and G. Tine, “A prototypal architecture of an IEEE 1451 network for smart grid applications based on power line communications,” To be published in *Sensors Journal, IEEE*, DOI 10.1109/JSEN.2014.2336377.
- [16] C. De Capua, G. Lipari, M. Lugara and R. Morello, “A smart energy meter for power grids,” in *Proc. of IEEE Instrum. & Meas. Technology Conf.*, 2014, pp. 878-883.
- [17] J. Higuera and J. Polo, “Standardization for interoperable autonomous smart sensors in the future energy grid system,” in *Proc. of IEEE Telecommun. Energy Conf.*, 2011, pp. 1-9.
- [18] J. Kim, J. Lee, Y. Ham, C. Hong, B. Min and S. Lee, “Sensor-Ball system based on IEEE 1451 for monitoring the condition of power transmission lines,” *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 154, no 1, pp. 157-168, 2009.
- [19] D. Dollen and G. Aumaugher, Smart Grid Technologies Report. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, California USA, December 2010.
- [20] T. Torfs, T. Sterken, S. Brebels, J. Santana, R. Hoven, V. Spiering, N. Bertsch, D. Trapani and D. Zonta, “Low Power Wireless Sensor Network for Building Monitoring,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 909-915, 2013.
- [21] A.Kumar and G. Hancka, “An Energy-Efficient Smart Comfort Sensing System Based on the IEEE 1451 Standard for Green Buildings,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 12, pp. 4245-4252, 2014.

- [22] V. Shnayder, B. Chen, K. Lorincz, T. Fulford-Jones and M. Welsh. Sensor Networks for Medical Care. Technical Report TR-08-05, Harvard University, Apr. 2005.
- [23] W. Kim, S. Lim, J. Ahn, J. Nah and N. Kim, "Integration of IEEE 1451 and HL7 Exchanging Information for Patients' Sensor Data," *Journal of Medical Systems* vol. 34, no. 6, pp. 1033-1041, 2010.
- [24] S. Nittel, A. Labrinidis, A. Stefanidis (Eds.), *GeoSensor Networks*, Springer, 2006.
- [25] A. Bröring, J. Echterhoff, S. Jirka, I. Simonis, T. Everding, C. Stasch, S. Liang and R. Lemmens. (2011). New Generation Sensor Web Enablement. *Sensors*, [Online]. 11(3), pp. 2652-2699. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2652>
- [26] S. Nittel. (2009). A Survey of Geosensor Networks: Advances in Dynamic Environmental Monitoring. *Sensors*. [Online]. 9(7), pp. 5664-5678. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/7/5664>
- [27] Y. Jung, K. Lee, D. Lee, K. Ryu and S. Nittel, "Air Pollution Monitoring System using Geosensor Networks," in *Proc. IEEE Int. Geoscience Remote Sensing Symp.*, vol. 3, 2008, pp.1370-1373.
- [28] K. Mikhaylov, J. Jamsa, M. Luimula, J. Tervonen, F. Hu and Q. Hao, "Intelligent Sensor Interfaces and Data Format," in *Intelligent Sensor Networks: The Integration of Sensor Networks, Signal Processing and Machine Learning*, F. Hu and Q. Hao, Ed. CRC Press, 2013.
- [29] S. Yurish. (2012). Smart sensor systems integration: New challenges, IFSA, [Online]. Available: [http://www.iaria.org/conferences2011/filesICN11/Keynote\\_SergeyYurish.pdf](http://www.iaria.org/conferences2011/filesICN11/Keynote_SergeyYurish.pdf)
- [30] W. Ko and C. Fung, "VLSI and intelligent transducers," *Sensors & Actuators*, vol. 2, pp. 239-250, 1982.
- [31] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, IEEE Standard 1451.2-1997, 1997.
- [32] K. Lee, „Smart Transducer Interface Standard for Sensors and Actuators“ in *Industrial Communication Technology Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., R. Zurawski Ed. CRC Press, 2014.

- [33] V. Vasilijev and P. Chernov, „Smart Sensors, Sensor Networks, and Digital Interfaces,” *Measurement Techniques*, vol. 55, no. 10, pp. 1115-1119, 2013.
- [34] S. Djiev, „Industrial Networks for Communication and Control,” TU-Sofia Publ. House, 2003, [Online]. Available: <http://anp.tu-sofia.bg/djiev/PDF%20files/Industrial%20Networks.pdf>
- [35] B. Galloway and G. Hancke, „Introduction to Industrial Control Networks,” *IEEE Comm. Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 860-880, 2013.
- [36] H. Kopetz, M. Holzmann and W. Elmenreich, „A Universal Smart Transducer Interface: TTP/A,” in *Proc. of the IEEE Intern. Symp. on Object-oriented Real-time distributed Computing*, 2000, pp. 71-77.
- [37] W. Elmenreich and R. Ipp, „Introduction to TTP/C and TTP/A,” in *Proc. of the Workshop on Time-Triggered and Real-Time Comm. Systems*, 2003, pp. 1-9.
- [38] W. Elmenreich, „Time-triggered smart transducer networks,” *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 2, no. 3, pp. 192-199, 2006.
- [39] OMG. Smart transducers interface V1.0. Available specification document number formal/2003-01-01. Object Management Group, Needham, MA, January 2003. [Online]. Available: <http://doc.omg.org/formal/2003-01-01>
- [40] Sensor Web Enablement (SWE) standard, [Online]. Available: <http://www.opengeospatial.org/ogc/markets-technologies/swe>
- [41] M. Botts, G. Percivall, C. Reed, and J. Davidson, „OGC® Sensor Web Enablement: Overview and High Level Architecture,” in *GeoSensor Networks*, Springer, 2008, pp 175-190.
- [42] A. Bröring, J. Echterhoff, S. Jirka, I. Simonis, T. Everding, C. Stasch, S. Liang and R. Lemmens, „New Generation Sensor Web Enablement,” *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2652-2699, 2011.
- [43] M. Botts, A. Robin, J. Davidson and I. Simonis. (2006). OpenGIS® Sensor Web Enablement Architecture, OGC Document 06-021r1. [Online]. Available: [https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license\\_agreement.php?suppressHeaders=0&access\\_license\\_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact\\_id=14140](https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact_id=14140).
- [44] M. Botts. (2006). OpenGIS® Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification, OGC Document 05-086r2. [Online]. Available:

- [https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license\\_agreement.php?suppressHeaders=0&access\\_license\\_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact\\_id=13879](https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact_id=13879).
- [45] S. Cox. (2006). Observations and Measurements, OGC Document 05-087r3. [Online]. Available: [https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license\\_agreement.php?suppressHeaders=0&access\\_license\\_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact\\_id=14034](https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact_id=14034).
- [46] S. Havens. (2006). OpenGIS® Transducer Markup Language Implementation Specification, OGC Document 06-010r2. [Online]. Available: [https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license\\_agreement.php?suppressHeaders=0&access\\_license\\_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact\\_id=14282](https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact_id=14282)
- [47] A. Na, M. Priest. (2006). Sensor Observation Service, OGC Document 05-088r1. [Online]. Available: [https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license\\_agreement.php?suppressHeaders=0&access\\_license\\_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact\\_id=12846](https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact_id=12846).
- [48] I. Simons. (2007). OGC® Sensor Alert Service Implementation Specification, OGC Document 06-028r5. [Online]. Available: <http://www.opengeospatial.org/standards/requests/44>.
- [49] I. Simons. (2007). OpenGIS® Sensor Planning Service Implementation Specification, OGC Document 07-014r3. [Online]. Available: [https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license\\_agreement.php?suppressHeaders=0&access\\_license\\_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact\\_id=23180](https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact_id=23180)
- [50] I. Simons, A. Wytzisk. (2003). Web Notification Service, OGC Document 03-008r2. [Online]. Available: [https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license\\_agreement.php?suppressHeaders=0&access\\_license\\_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact\\_id=1367](https://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/%3fartifact_id=1367).
- [51] OSIRIS project. [Online]. <http://www.osiris-project.eu/>.
- [52] GENESIS project, [Online]. [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/ict/docs/sustainable-growth/fp7-genesis\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/ict/docs/sustainable-growth/fp7-genesis_en.pdf).
- [53] ESS project. [Online]. <http://www.ess-project.eu/>
- [54] OOSTethys project. [Online]. <http://oostethys.org>

- [55] Ocean IE experiment 1. [Online]. <http://www.opengeospatial.org/projects/initiatives/oceansie>
- [56] Ocean IE experiment 2. [Online]. <http://www.opengeospatial.org/projects/initiatives/oceansiei>
- [57] GITEWS project. [Online]. <http://www.gitews.de>
- [58] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, IEEE Standard 1451.2-1997, 1997.
- [59] Information technology - Smart transducer interface for sensors and actuators - Part 2: Transducer to microprocessor communication protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats, ISO/IEC/IEEE Standard 21451-2:2010, 2010.
- [60] IEEE Draft Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, IEEE P1451.2/D20, 2011.
- [61] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats for Distributed Multidrop Systems, IEEE Standard 1451.3-2003, 2004.
- [62] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, IEEE Standard 1451.4-2004, 2004.
- [63] 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.
- [64] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, IEEE Standard 1451.5-2007, 2007.
- [65] IEEE Standard for Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators-- Transducers to Radio Frequency Identification (RFID) Systems Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet Formats, IEEE Standard 1451.7-2010, 2010.



- [66] Information technology - Smart transducer interface for sensors and actuators - Part 7: Transducer to radio frequency identification (RFID) systems communication protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats, ISO/IEC/IEEE Standard 21451-7:2011, 2011.
- [67] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Network Capable Application Processor Information Model, IEEE Standard 1451.1-1999, 2000.
- [68] Information technology - Smart transducer interface for sensors and actuators - Part 1: Network Capable Application Processor (NCAP) information model, ISO/IEC/IEEE Standard 21451-1:2010, 2010.
- [69] IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, *IEEE Standard 1451.0-2007*, 2007.
- [70] 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.
- [71] T. Shanley, *Plug and Play System Architecture*, Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [72] W. Elmenreich and A. Monnacchi, „Configuration and Management of Networked Embedded Devices“ in *Industrial Communication Technology Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., Richard Zurawski Ed. CRC Press, 2014.
- [73] L. Benetazzo, M. Bertocco and C. Narduzzi, „Self-configuring measurement networks,“ *Metrology & Meas. Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 59-67, 2007.
- [74] EDDL (Electronic Device Description Language). [Online]. Available: <http://www.eddl.org/Pages/default.aspx>
- [75] EDDL components and services. [Online]. Available: <http://eddl.ifak.eu/en>
- [76] International Electrotechnical Commission (IEC). Function Blocks (FB) for process control—Part 2: Specification of FB concept and Electronic Device Description Language (EDDL). IEC Standard 61804-2:2004, 2004.
- [77] International Electrotechnical Commission (IEC). Function blocks (FB) for process control—Part 3: Electronic Device Description Language (EDDL). IEC 61804-3:2006, 2006.

- [78] T. Tetsuo. (2007). FDT/DTM Framework for new for new field device tools. Yokogawa Technical Report. Yokogawa Electric Corporation, [Online]. vol. 51, no 2. Available: <http://www.yokogawa.com/rd/pdf/TR/rd-tr-r00044-004.pdf>
- [79] J. Riegert, „Field device tool — mastering diversity & reducing complexity,“ *PROCESSWest*, pp. 46–48, 2005.
- [80] FDT group.[Online]. <http://www.fdtgroup.org/>
- [81] FDI cooperation. [Online]. <http://www.fdi-cooperation.com/home.html>
- [82] H. Kopetz, M. Holzmann and W. Elmenreich, „A universal smart transducer interface: TTP/A,“ *International Journal of Computer System Science & Engineering*, vol. 16, no 2, pp. 71-77, 2001.
- [83] Common Object Request Broker Architecture. [Online]. <http://www.corba.org/>
- [84] W. Elmenreich and S. Pitzek, „Smart Transducers - Principles, Communications, and Configuration,“ in *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Intelligent Engineering Systems*, 2003, pp. 510-515.
- [85] V. Turau, M. Venzke and C. Weyer, „A Web Service for TTP/A Fieldbus Systems based on Meta-Data,“ in *Proc. of the Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems*, 2004, pp. 159-168.
- [86] S. Pitzek and W. Elmenreich, „Configuration and management of a real-time smart transducer network,“ in *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation*, vol.1, 2003, pp. 407-414.

## **4. *Plug and Play* analogni senzori**

Stalno prisutna tendencija minimizacije senzora i povećanja stepena integracije u tehnologiji izrade elektronskih kola, tokom vremena dovodi do sve veće zastupljenosti digitalnih senzora u mernim i kontrolnim sistemima. Međutim, analogni i kvazidigitalni senzori se i dalje često koriste u mnogim oblastima, a posebno u industrijskom okruženju. Prema podacima organizacije IFSA (*International Frequency Sensor Association*) iz 2011. godine, udeo digitalnih senzora na svetskom tržištu procenjen je na oko 30%, dok je udeo analognih i kvazidigitalnih senzora oko 70% [1, 2]. U narednim godinama očekuje se sve veća zastupljenost digitalnih senzora, međutim, zastupljenost analognih i kvazidigitalnih senzora još uvek je visoka. Takođe, potrebno je napomenuti da integracija senzorskog elementa i digitalnog procesora nije uvek dobro rešenje. U pojedinim slučajevima, senzori se mogu naći u ekstremnim uslovima gde varijacije parametara okoline kao što su temperatura, pritisak, vibracije, ubrzanje i druge, značajno smanjuju pouzdanost, te se često koriste jednostavniji, ali pouzdaniji, analogni senzori [3].

Sa druge strane, integracija pretvarača i mikroprocesora omogućila je dodavanje različitih inteligentnih funkcija koje uključuju identifikaciju, automatsku konfiguraciju, kalibraciju, kao i mrežno povezivanje senzora, a koje kod analognih senzora nisu bile moguće. Međutim, jednostavnim dodavanjem EEPROM memorije za smeštanje elektronskih specifikacija, analognom pretvaraču mogu se pridružiti neke od funkcija inteligentnog digitalnog pretvarača. Ova ideja iskorišćena je u okviru standarda IEEE 1451.4 za definisanje pretvaračkog modula jednostavne strukture koji se sastoji od tradicionalnog analognog pretvarača i TEDS memorije za elektronske specifikacije. Kao

i kod ostalih standarda IEEE 1451 familije, povezivanje pretvaračkih modula na mrežu obavlja se korišćenjem mrežnog procesora (NCAP). Komunikacija između mrežnog procesora i 1451.4 pretvaračkog modula vrši se pomoću mešovitog interfejsa koji kombinuje tradicionalnu analognu komunikaciju sa pretvaračem i digitalni protokol za očitavanje/upis elektronskih specifikacija iz/u TEDS memoriju.

Ova glava posvećena je opisu najvažnijih elemenata familije standarda IEEE 1451 koji se koriste pri realizaciji analognih *Plug and Play* senzora. Dat je detaljniji opis modela mrežnog procesora na bazi standarda 1451.1, konstrukcija analognog pretvaračkog modula i elektronskih specifikacija na bazi standarda 1451.4, kao i realizacija zajedničkih funkcija i elektronskih specifikacija na bazi standarda 1451.0. S obzirom na to da su, uprkos uvođenju standarda, mnogi problemi koji se sreću u primeni inteligentnih senzora i aktuatora ostali nerešeni, opisana su i izvesna unapređenja, predložena u novijoj literaturi, kao i predlozi za dalje unapređenje standarda. Na osnovu prethodne analize, u glavi 5 predložen je koncept za realizaciju analognih *Plug and Play* senzora koji predstavlja osnovu za njihovu praktičnu primenu.

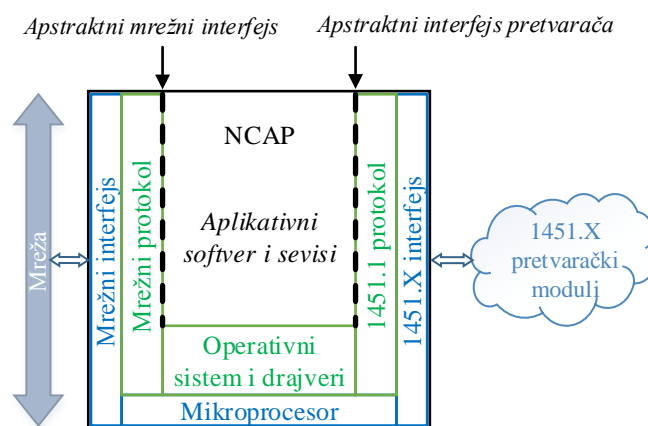
#### **4.1. Mrežni procesor prema IEEE 1451.1 standardu**

S obzirom da je u poslednje vreme u upotrebi veoma veliki broj različitih žičnih i bežičnih mrežnih interfejsa, a imajući u vidu i da se u mernim i kontrolnim sistemima često koriste i specijalizovani mrežni interfejsi i protokoli, za široko prihvatanje familije standarda 1451 neophodno je obezbediti mrežni pristup sensorima i aktuatorima koji ne zavisi od tipa mrežnog interfejsa. Standardom IEEE 1451.1 [4] uveden je softverski model za implementaciju mrežnog procesora – NCAP sa ciljem da se obezbedi nezavisnost od:

- mrežne infrastrukture na koju se povezuje,
- fizičkog interfejsa koji se koristi za vezu sa sensorima i aktuatorima, i
- hardverske platforme koja se koristi za realizaciju.

Osnovna uloga mrežnog procesora je da ostvari povezanost između pretvaračkih modula i komunikacione mreže. Posmatrano na fizičkom nivou, mrežni procesor sastoji se od mikroprocesora sa pomoćnim hardverskim komponentama i

operativnog sistema sa pratećim drajverima koji obezbeđuju povezivanje na željenu mrežu sa jedne, i standardizovanih pretvaračkih modula sa druge strane, kao što je prikazano na slici 4.1. Fizičko povezivanje sa mrežom može biti realizovano kao proizvoljni žični ili bežični interfejs uz odgovarajući mrežni protokol. Detalji mrežnog povezivanja na nivou interfejsa i protokola nisu obuhvaćeni standardom 1451.1. Međutim, standard specifikuje apstraktni logički mrežni interfejs kojim se enkapsuliraju detalji fizičke implementacije i obezbeđuje komunikacija preko bilo kog mrežnog interfejsa. Isto tako, mrežni procesor obezbeđuje i apstraktni logički interfejs pretvarača za povezivanje sa pretvaračkim modulima korišćenjem bilo kog od fizičkih interfejsa 1451.X.



Slika 4.1. Model mrežnog procesora prema IEEE 1451.1 standardu

Model mrežnog procesora po standardu 1451.1 ističe i nezavisnost od hardverske platforme, odnosno ostavlja se široka mogućnost izbor hardvera i softverskog okruženja za implementaciju NCAP funkcija. Mrežni procesor može se realizovati sa minimalnim hardverskim resursima, na primer, korišćenjem mikrokontrolera [5, 6] ili FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) čipova [7, 8]. Međutim, realizacija mrežnog procesora može se oslanjati i na standardne personalne računare uz odgovarajuću softversku podršku. Lee i Song u [9, 10] definisali su objektno orijentisani model za mrežni procesor korišćenjem UML (*Unified Modeling Language*) alata. Ovako definisani model može se iskoristiti za automatsko kreiranje koda u objektno orijentisanim jezicima kao što su C++ ili *Java*. U novije vreme, za realizaciju aplikacija baziranih na standardu IEEE 1451.1 obično se koristi tehnologija mrežnih servisa (*Web Service*) [11]. Praktične implementacije najčešće se oslanjaju na

programski jezik *Java* [12 - 14], *Microsoft .NET* [15] ili na softverske pakete za virtuelnu instrumentaciju kao što je *LabVIEW* [16, 17].

Standard IEEE 1451.1 precizno definiše softverski model mrežnog procesora na principima koji se koriste u objektno-orijentisanom programiranju. Softverski model mrežnog procesora može se podeliti u tri celine: model objekata, model podataka i komunikacioni model.

- Model objekata specifikuje strukturu, osobine i funkcije osnovnih komponenti softvera koji se koriste kao gradivni blokovi u kreiranju NCAP softvera za specifičnu aplikaciju;
- Model podataka specifikuje formate podataka kojima manipulišu objekti i koji se mogu razmenjivati između objekata;
- Komunikacioni model definiše apstraktni interfejs između proizvoljne mreže i mrežno vidljivih objekata. Podržana su dva, u praksi najčešće korišćena, modela mrežne komunikacije: klijent-server (*client-server*) i izdavač-pretplatnik (*publish-subscribe*).

#### **4.1.1. Objektni model mrežnog procesora**

Objektni model sastoji se iz hijerarhijski uređenih klasa objekata koji se mogu podeliti u tri kategorije: Blokovi (*Block*), Komponente (*Component*) i Servisi (*Service*), kao što je prikazano u tabeli 4.1 [4].

**Tabela 4.1.** Hijerarhija klasa objektnog modela 1451.1 mrežnog procesora

Pozicija u hijerarhiji	Naziv klase	Komentar
1	<i>Root</i>	Apstraktna klasa. Predstavlja koren klasne hijerarhije sa sve objekte koji su definisani 1451.1 standardom.
1.1	<i>Entity</i>	Apstraktna klasa. Predstavlja roditeljsku klasu za sve tipove objekata koji su vidljivi na mreži.
1.1.1	<i>Block</i>	Apstraktna klasa. Predstavlja roditeljsku klasu za sve Blokove. Blok klase namenjene su procesiranju podataka.
1.1.2	<i>Component</i>	Apstraktna klasa. Predstavlja roditeljsku klasu za sve Komponente. Klase Komponenti služe za enkapsulaciju podataka.
1.1.3	<i>Service</i>	Apstraktna klasa. Služi kao roditeljska klasa za sve servise koji podržavaju komunikaciju između objekata.

Blokovi, Komponente i Servisi izvode se iz apstraktne klase Entiteta (*Entity*) koja obezbeđuje zajedničke atribute i funkcije za sve objekte koji su vidljivi preko

mreže. Najvažniji atributi mrežno vidljivih objekata prikazani su u tabeli 4.2. Međutim, standard ne zabranjuje korišćenje drugih nestandardnih objekata u implementaciji softvera mrežnog procesora, s tim da ovakvi objekti ne mogu da budu podklase klase Entiteta.

**Tabela 4.2.** Atributi Entitet objekata 1451.1 mrežnog procesora [4, 18]

Atribut	Tip podatka	Vrednost atributa je jedinstvena	Opis atributa
objectTag	Niz podataka tipa <i>Octet</i>	Poželjno	Predstavlja logičko ime koje se daje objektima klase Entitet (odnosno klase nasleđene od klase Entitet) kako bi se olakšala konfiguracija sistema. Koristi se kao pseudonim za atribut <i>objectDispatchAddress</i> .
objectID	Niz podataka tipa <i>Octet</i>	Da, u kontekstu celokupnog distribuiranog sistema	Predstavlja jedinstveni identifikator objekta klase Entitet (odnosno klase nasleđene od klase Entitet) u okviru celokupnog distribuiranog sistema.
objectName	<i>String</i>	Da, u okviru jednog NCAP procesa	Predstavlja lokalno ime objekta koje daje programer objektu klase Entitet (odnosno klase nasleđene od klase Entitet).
objectDispatchAddress	<i>String</i>	Da, u kontekstu celokupnog distribuiranog sistema	Predstavlja jedinstvenu mrežnu adresu – URL ( <i>Universal Resource Locator</i> ) objekta klase Entitet (odnosno klase nasleđene od klase Entitet).

Blokovi su klase namenjene procesiranju podataka. Mogu se podeliti u tri grupe: NCAP blok (*NCAP Block*), Blokovi pretvarača (*Transducer Block*) i Funkcionalni blokovi (*Function Block*), kao što je prikazano u tabeli 4.3. Radi jednostavnijeg procesa inicijalizacije NCAP aplikacije svi objekti mrežnog procesora organizovani su u strukturu stabla koje se naziva stablo pripadnosti. Svaki mrežni procesor poseduje samo jedan NCAP blok koji predstavlja koren stabla pripadnosti. Samo objekti klase *Block* mogu da poseduju druge objekte. Preostali objekti (Komponente, Servisi i nestandardni objekti) imaju uvek tačno jedan nadređeni blok objekat kome pripadaju. Na taj način formira se stablo pripadnosti objekata gde Blokovi imaju ulogu čvorova iz kojih se vrši grananje stabla.

NCAP blok zadužen je za upravljanje svim objektima koji se nalaze u stablu pripadnosti. Proces upravljanja objektima uključuje sledeće zadatke [18].

- Po uključenju mrežnog procesora, NCAP blok je odgovoran za kreiranje inicijalnog skupa objekata koji garantuje operabilnost sistema. Standard preporučuje da se lista objekata i početne vrednosti njihovih atributa smeste u

trajnu memoriju kao što je hard disk ili EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*).

**Tabela 4.3.** Hijerarhija klasa za Blok objekte

Pozicija u hijerarhiji	Naziv klase	Komentar
1.1.1	<i>Block</i>	Apstraktna klasa roditelj za sve Blokove.
1.1.1.1	<b>NCAP Block</b>	Najvažniji blok. Odgovoran za inicijalizaciju i upravljanje svim drugim objektima mrežnog procesora.
1.1.1.2	<i>Function Block</i>	Apstraktna klasa. Definiše okvir za implementaciju aplikativne funkcije.
1.1.1.3	<i>Base Transducer Block</i>	Apstraktna klasa. Definiše osnovne attribute i operacije koje predstavljaju okvir za sve Blokove pretvarača. Pretvarači podrazumevano pripadaju familiji 1451.X, ali je definisan okvir za eventualna proširenja i povezivanje sa drugim često korišćenim standardima u industrijskim mrežama.
1.1.1.3.1	<i>Transducer Block</i>	Apstraktna klasa. Predstavlja roditeljsku klasu za sve Blokove pretvarača koji su definisani familijom standarda 1451.X.
1.1.1.3.1.1	<b>Dot2 Transducer Block</b>	Definiše interfejs za povezivanje sa 1451.2 pretvaračkim modulima.
1.1.1.3.1.2	<b>Dot3 Transducer Block</b>	Definiše interfejs za povezivanje sa 1451.3 pretvaračkim modulima.
1.1.1.3.1.3	<b>Dot4 Transducer Block</b>	Definiše interfejs za povezivanje sa 1451.4 pretvaračkim modulima.

- Kao što se vidi iz tabele 4.2 svaki Entitet ima jedinstveni identifikator *objectID*. NCAP blok mora posedovati odgovarajuću funkciju koja će generisati jedinstvenu vrednost parametra *objectID* na nivou celokupnog distribuiranog sistema.
- NCAP blok šalje difuzne (*broadcast*) poruke sa podacima o svim mrežno vidljivim Entitetima koje poseduje. Istovremeno NCAP blok dužan je da osluškuje difuzne poruke drugih mrežnih procesora koji su prisutni u mreži i čuva podatke iz tih poruka, formirajući relevantnu sliku o distribuiranoj mreži kojoj pripada.

Blokovi pretvarača predstavljaju softverske drajvere pomoću kojih se ostvaruje komunikacija sa pretvaračkim modulima. Blokovi pretvarača obavljaju sledeće aktivnosti: očitavaju podatke sa senzorskih i upisuju podatke u aktuatorске module, očitavaju statusne registre, očitavaju i upisuju sadržaj TEDS memorije i slično. Aktuelna verzija standarda 1451.1 podržava Blokove pretvarača za 1451.2, 1451.3 i 1451.4 interfejse. S obzirom da su u međuvremenu usvojeni i standardi 1451.0, 1451.5 i 1451.7, trenutno je u toku usklađivanje sadržaja standarda sa promenama nastalim od trenutka njegovog usvajanja. Međutim, s obzirom na jasno utvrđenu hijerarhiju klasa



(tabela 4.3) moguće je, relativno lako, u standard integrisati i druge protokole kao što su PROFIBUS ili *Foundation Fieldbus*.

Funkcionalni blokovi predstavljaju standardizovani mehanizam za dodavanje različitih operacija za obradu podataka sa senzora ili podataka za aktuatore, korišćenjem različitih logičkih i aritmetičkih funkcija. Ove funkcije mogu obuhvatiti operacije komparacije signala, multipleksiranja signala sa senzora, generisanje upravljačkih signala za aktuatore u vidu PID (*Proportional-Integral-Derivative*) kontrolera i slično. U okviru standarda nije definisana nijedna konkretna klasa koja realizuje neku od pomenutih funkcija, već je definisan samo okvir, odnosno apstraktna klasa, kojom se opisuje generalno ponašanje Funkcionalnih blokova.

Klase Komponenti enkapsuliraju podatke koji pripadaju određenim Blokovima. Detaljni prikaz hijerarhije klasa Komponenti dat je u tabeli 4.4. Najistaknutiji predstavnik ove klase je Parametar (*Parameter*) kojim se reprezentuju različiti tipovi podataka – najčešće podaci dobijeni od senzora ili namenjeni aktuatorima, ali i neki posebni tipovi podataka kao što su vremenski podaci namenjeni sinhronizaciji događaja.

Posebna vrsta klase Komponenti su Akcije (*Action*) koje enkapsuliraju relativno složenu komunikaciju između mrežnih procesora koja zahteva dosta vremena za izvršenje. Akcije obezbeđuju operacije kojima se može pokrenuti određena transakcija, zatim proveriti stanje transakcije ili, po potrebi, prekinuti tekuća transakcija.

Još jedan često korišćeni tip Komponenti jesu Fajlovi (*Files*). Fajlovi predstavljaju mrežno vidljive memorijske blokove. Fajlovima se može pristupiti preko mreže korišćenjem interfejsa sličnom FTP (*File Transfer Protocol*) protokolu pomoću operacija za otvaranje, upis, čitanje i zatvaranje udaljenih fajlova.

Klase Servisa (tabela 4.5) obezbeđuju komunikaciju preko mreže između lokalnih i udaljenih NCAP objekata korišćenjem Portova (klasa *Base Port*), kao i globalnu sinhronizaciju sistema korišćenjem Muteks (*Mutex*) servisa.

Standard IEEE 1451.1 definiše dva modela za komunikaciju preko mreže između udaljenih NCAP objekata: klijent-server (*client-server*) i izdavač-pretplatnik (*publish-subscribe*). Za svaki tip komunikacije u standardu je definisana odgovarajuća klasa Porta.

Tabela 4.4. Hijerarhija klasa za Komponente

Pozicija u hijerarhiji	Naziv klase	Komentar
1.1.2	<i>Component</i>	Apstraktna, roditeljska klasa za sve Komponente.
1.1.2.1	<b>Parameter</b>	Obezbeđuje mehanizme pristupa tj. operacije čitanja i upisa za mrežno vidljive promenljive.
1.1.2.1.1	<b>Parameter With Update</b>	Obezbeđuje dodatne mehanizme za sinhronizaciju tj. osvežavanje vrednosti Parametra pre operacije očitavanja (za senzore) ili nakon operacije upisa (za aktuatora).
1.1.2.1.1.1	<i>Physical Parameter</i>	Apstraktna klasa. Obezbeđuje dodatne metapodatke neophodne za definiciju promenljivih koje reprezentuju realne fizičke veličine. Tipični metapodaci uključuju jedinice, opseg vrednosti, učestanost odabiranja, mernu nesigurnost i slično.
1.1.2.1.1.1.1	<b>Scalar Parameter</b>	Klasa namenjena modelovanju fizičkih veličina koje se mogu adekvatno predstaviti skalarnim vrednostima.
1.1.2.1.1.1.1.1	<b>Scalar Series Parameter</b>	Klasa namenjena modelovanju fizičkih veličina koje se mogu adekvatno predstaviti nizom skalarnih vrednosti ekvidistantno raspodeljenih duž neke ose. Niz vrednosti koje predstavljaju vremensku zavisnost (npr. izlaz jednokanalnog osciloskopa) ili frekvencijski spektar signala se mogu predstaviti ovom klasom.
1.1.2.1.1.1.1.2	<b>Vector Parameter</b>	Klasa pogodna za modelovanje fizičkih veličina koje se adekvatno izražavaju vektorima. GPS koordinate mogu biti dobar primer za reprezentaciju ovom klasom.
1.1.2.1.1.1.1.2.1	<b>Vector Series Parameter</b>	Klasa namenjena modelovanju fizičkih veličina koje se mogu adekvatno predstaviti nizom vektora ekvidistantno raspodeljenih duž neke ose. Na primer, ovom klasom se mogu predstaviti podaci dobijeni sa višekanalnog osciloskopa u nekom intervalu vremena, gde svaki kanal predstavlja jednu komponentu vektora.
1.1.2.1.2	<b>Time Parameter</b>	Klasa namenjena modelovanju fizičkih veličina koje direktno ili indirektno predstavljaju vreme nekog događaja ili interval između dva događaja.
1.1.2.2	<b>Action</b>	Modeluje aktivnosti koje menjaju stanje sistema ili kojima je za izvršavanje potrebno dosta vremena.
1.1.2.3	<b>File</b>	Predstavlja memorijski blok nad kojim se, kao kod računarskih fajlova, mogu obavljati operacije otvaranja, upisa, čitanja, zatvaranja i slično.
1.1.2.3.1	<b>Partitioned File</b>	Može se koristiti za Fajlove koji su podeljeni u više delova (particija).
1.1.2.4	<b>Component Group</b>	Obezbeđuje mogućnost za specifikaciju pripadnosti grupi objekata.

Klijent – server komunikacija podrazumeva postojanje mrežne komunikacione veze između lokalnog objekta koji zahteva podatke (klijent) i udaljenog objekta koji obezbeđuje tražene podatke (server). Za klijent – server komunikaciju koriste se Portovi

klijenata (*Client Port* i *Asynchronous Client Port*). Da bi bilo moguće uspostaviti vezu između klijentskog objekta i serverskog objekta, neophodno je da mrežni procesor poseduje odgovarajući Port klijenta i da Port ima validnu mrežnu adresu udaljenog serverskog objekta.

**Tabela 4.5. Hijerarhija klasa za Servise**

Pozicija u hijerarhiji	Naziv klase	Komentar
1.1.3	<i>Service</i>	Roditeljska klasa za sve servise.
1.1.3.1	<i>Base Port</i>	Apstraktna klasa. Služi kao roditeljska klasa za sve Portove kojima se obezbeđuju različiti oblici komunikacije preko mreže.
1.1.3.1.1	<i>Base Client Port</i>	Apstraktna klasa. Služi kao roditeljska klasa za sve Portove klijenata u klijent-server komunikacionom modelu.
1.1.3.1.1.1	<b>Client Port</b>	Obezbeđuje blokirajući aplikacioni interfejs za klijentske objekte u klijent-server komunikacionom modelu. Pozivi operacija su sinhroni tj. blokirajući za klijentski objekat.
1.1.3.1.1.2	<b>Asynchronous Client Port</b>	Obezbeđuje asinhroni aplikacioni interfejs za klijentske objekte u klijent-server modelu. Pozivi operacija su asinhroni i ne blokiraju pozivajući klijentski objekat.
1.1.3.1.2	<i>Base Publisher Port</i>	Apstraktna, roditeljska klasa za sve Portove izdavača u izdavač-pretplatnik komunikacionom modelu. Ovaj model se koristi za slanje difuznih poruka u mreži.
1.1.3.1.2.1	<b>Publisher Port</b>	Aplikacioni interfejs Porta izdavača koji omogućava izdavačkim objektima da šalju difuzne poruke.
1.1.3.1.2.2	<b>Self-Identifying Publisher Port</b>	Aplikacioni interfejs Porta izdavača koji obezbeđuje dodatne operacije za povezivanje pretplatnika sa izdavačem i operacije kojima izdavač obaveštava pretplatnika o promenama u metapodacima difuznih poruka.
1.1.3.1.2.2.1	<b>Event Generator Publisher Port</b>	Koristi se za slanje difuznih poruka koje evidentiraju unutrašnje događaje u okviru nekog Blok objekta.
1.1.3.2	<b>Subscriber Port</b>	Aplikacioni interfejs Porta pretplatnika koji omogućava objektima da se registruju tj. pretplate za prijem željenih difuznih poruka.
1.1.3.3	<b>Mutex Service</b>	Obezbeđuju mehanizam za ekskluzivno pravo pristupa NCAP resursu koji je mrežno vidljiv.
1.1.3.4	<b>Condition Variable Service</b>	Obezbeđuje operacije za kontrolu redosleda izvršavanja segmenata NCAP softvera koji se izvršavaju u konkurentnim procesima.

Model izdavač-pretplatnik koristi se za komunikaciju preko mreže između dva udaljena mrežna procesora korišćenjem difuznih (*broadcast*) poruka. Difuzne poruke,

osim korisnih podataka, sadrže i metapodatke koji opisuju korisni sadržaj poruke. Na bazi metapodataka primljene poruke udaljeni NCAP može da izdvoji poruke koje su od interesa i prosledi ih prethodno prijavljenim objektima pretplatnika. Detaljniji opis procesa komunikacije po modelu klijent-server i izdavač-pretplatnik opisan je u poglavlju 4.1.3.

S obzirom da su svi mrežno vidljivi resursi mrežnog procesora istovremeno dostupni svim potencijalnim korisnicima ovih resursa, potrebno je obezbediti i kontrolu pristupa. Da bi se obezbedilo ekskluzivno pravo pristupa nekom resursu mrežnog procesora u datom trenutku koriste se Muteks servisi. Ovi servisi poseduju operacije za zaključavanje i otključavanje resursa, čime se obezbeđuje da, u nekom trenutku, resursu može pristupiti tačno jedan udaljeni korisnik.

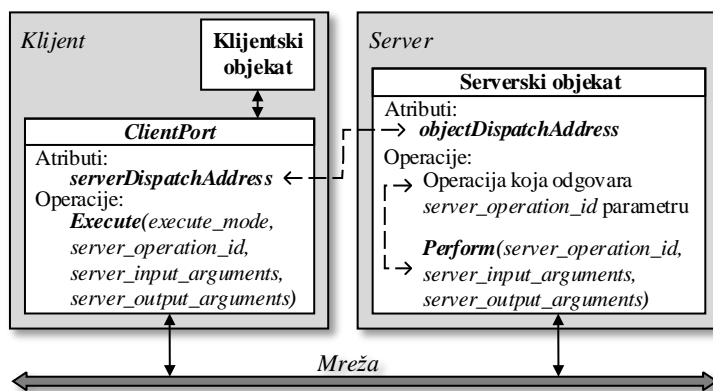
#### **4.1.2. Model podataka**

Model podataka definiše tipove podataka koji se koriste za razmenu informacija između objekata (Entiteta) u okviru lokalne NCAP aplikacije, ali i za prenos informacija preko mreže između objekata lokalne i udaljene NCAP aplikacije. Standard IEEE 1451.1 definiše sledeće osnovne tipove podataka: *Boolean* (logički tip podataka koji može imati samo dve vrednosti – tačno i netačno), *Octet* (8-bitni podatak), *Integer* (8-bitni, 16-bitni, 32-bitni, ili 64-bitni celobrojni podatak sa ili bez znaka), *Float* (32-bitni ili 64-bitni decimalni broj sa pokretnim zarezom, u skladu sa standardom IEEE 754 [19]), *String* (niz 8-bitnih karaktera koji sadrži tekstualne podatke). Osim toga, dozvoljene su i složenije strukture podataka kao što su nizovi i strukture koji se kreiraju od osnovnih tipova podataka. Standard takođe definiše i poseban tip podataka *Argument* koji je uopšteni tip i najčešće se koristi za prenos podataka proizvoljnog tipa preko mreže. Slični tipovi podataka postoje u savremenim softverskim tehnologijama kao što je na primer *Variant*, koji se koristi u *Microsoft ActiveX* tehnologiji.

#### **4.1.3. Komunikacioni model**

Kao što je prethodno rečeno, standard IEEE 1451.1 definiše dva modela za komunikaciju preko mreže između udaljenih NCAP objekata: klijent-server i izdavač-pretplatnik. Oba modela veoma su poznata i u upotrebi su u velikom broju široko rasprostranjenih mrežnih aplikacija.

Klijent-server model predstavlja arhitekturu distribuiranog sistema koji se sastoji od dva čvrsto spregnuta procesa klijenta i servera koji komuniciraju preko računarske mreže. Klijentski proces uvek inicira uspostavljanje veze sa serverskim procesom, dok je serverski proces u stanju iščekivanja zahteva klijentskog procesa. Serverski proces prima klijentske zahteve, obrađuje ih i vraća traženu informaciju klijentu. Klijent-server arhitektura postala je jedan od osnovnih modela mrežne komunikacije i mnoge savremene aplikacije koriste ovaj model za pristup Internetu, e-mejlu, bazama podataka i slično. Korišćenjem klijent-server modela udaljeni NCAP (klijent) može, posredstvom mrežnog interfejsa, da pozove funkciju i dobije povratne podatke nastale izvršavanjem funkcije na lokalnom NCAP procesu (server). Na slici 4.2 prikazan je princip po kome se obavlja komunikacija po modelu klijent-server. Komunikacija se odvija kroz sledeće korake.



Slika 4.2. Komunikacioni model klijent-server

1. Tokom procesa inicijalizacije distribuiranog sistema atribut *serverDispatchAddress* objekta klase *ClientPort*, koji pripada klijentskoj NCAP aplikaciji, dobija adresu (URL – *Universal Resource Locator*) tj. vrednost atributa *objectDispatchAddress* odgovarajućeg mrežno vidljivog objekta koji igra ulogu servera na udaljenoj NCAP aplikaciji.
2. Takođe, tokom procesa inicijalizacije, klijentski objekat povezuje se sa odgovarajućim komunikacionim portom odnosno objektom klase *ClientPort*.
3. Kada je klijentskom objektu potrebno da dobije određene podatke ili da izvrši neku operaciju nad serverskim objektom on poziva operaciju *Execute()* odgovarajućeg komunikacionog porta (objekat klase *ClientPort*). Kao što se

može videti na slici 4.2, operacija *Execute()* ima argumente kojima se specifikuju: tip poziva (*execute\_mode*), jedinstveni identifikator serverske operacije (*server\_operation\_id*), ulazni parametri zadate serverske operacije (*server\_input\_arguments*) i reference za izlazne parametre zadate serverske operacije (*server\_output\_arguments*). S obzirom da operacije koje se mogu pozivati na serverskom objektu imaju različit broj i različite tipove ulaznih i izlaznih argumenata, svi argumenti prenose se kao nizovi podataka tipa *Argument*, koji je prethodno objašnjen u poglavlju 4.1.2.

4. Korišćenjem specifične mrežne infrastrukture poziv operacije *Execute()* objekta klase *ClientPort*, rezultuje pozivanjem operacije *Perform()* serverskog objekta. Operacija *Perform()*, kao i *Execute()*, ima argumente za identifikaciju i specifikaciju ulaznih i izlaznih parametara odgovarajuće serverske operacije. Treba napomenuti da specifična mrežna infrastruktura uključuje odabrani hardverski interfejs, drajvere operativnog sistema i odgovarajuće softverske biblioteke koje su zavisne od implementacije i ne predstavljaju deo standarda 1451.1.
5. Operacija *Perform()*, na osnovu parametra *server\_operation\_id*, poziva odgovarajuću operaciju serverskog objekta i prosleđuje odgovarajuće ulazne parametre *server\_input\_arguments*. Rezultati izvršavanja serverske operacije prosleđuju se nazad operaciji *Perform()* preko referenci na izlazne parametre *server\_output\_arguments*.
6. Korišćenjem mrežne infrastrukture, koja je specifična za datu implementaciju, operacija *Perform()* prosleđuje rezultate izvršene serverske operacije (*server\_output\_argumets* parametre) operaciji *Execute()* objekta klase *ClientPort*.
7. Operacija *Execute()* dalje prosleđuje dobijene podatke klijentskom objektu koji je izvršio poziv ove operacije.

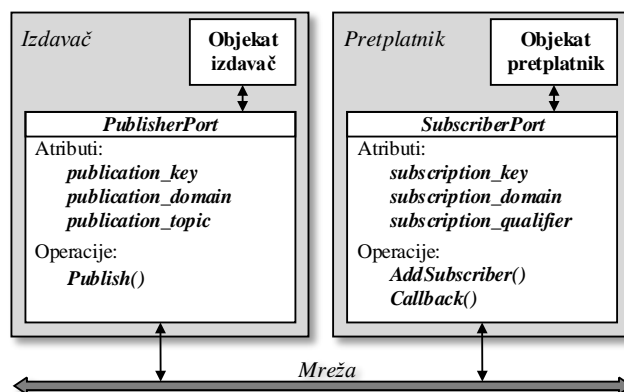
Potrebno je napomenuti da se prethodno opisana procedura odnosi na klasu *ClientPort* koja se koristi za sinhronu, blokirajuće pozive operacija serverskog objekta. Nakon poziva operacije *Execute()* klijentski objekat se blokira i čeka dok ne stigne odgovarajući odziv od serverskog objekta (ili dok ne istekne unapred definisani

vremenski period – *timeout*). Argumentom *execute\_mode* operacije *Execute()* moguće je specifikovati da se klijentski objekat ne blokira („*send and forget*“ mode), odnosno da se ne čeka na odziv od serverskog objekta, ali u tom slučaju eventualni rezultat operacije serverskog objekta ne može biti prosleđen klijentu. Međutim, osim preko objekata klase *ClientPort*, klijent-server komunikacija može se ostvarivati i korišćenjem objekata srodne klase *AsynchronousClientPort* (tabela 4.5). Ova klasa poseduje operaciju *ExecuteAsynchronous()* koja prosleđuje poziv zadate operacije serverskom objektu, ali pri tom ne blokira pozivajućeg klijenta. Kasnije, klijentski objekat može da proveriti da li je operacija završena i ukoliko jeste, da preuzme poslate podatke pozivom operacija *GetAsynchronousClientResultStatus()* i *GetResult()*, respektivno.

Drugi model komunikacije podržan u standardu 1451.1, izdavač-pretplatnik karakterističan je za komunikaciju između jednog provajdera (izdavača) i većeg broja korisnika (pretplatnika) informacija. Osnovna karakteristika ovog modela je da izdavač ne mora da vodi evidenciju o tome koliko ima pretplatnika i ko su oni, odnosno ko su krajnji korisnici informacija koje on šalje preko mreže. Korišćenjem modela izdavač-pretplatnik lokalni NCAP proces (izdavač) može da šalje difuzne (*boadcast*) poruke svim pretplatnicima na mreži kad god ima odgovarajuće informacije za slanje. Objekat koji želi da distribuira difuzne poruke šalje ih pozivanjem odgovarajuće operacije *Publish()* Porta izdavača. Difuzne poruke, osim korisnih informacija, sadrže i takozvane metapodatke koji bliže opisuju korisni sadržaj poruke: *publication\_key* – specificira tip difuzne poruke definisan standardom, *publication\_domain* – specificira mrežno područje (domen) u kom će se vršiti distribucija poruka i *publication\_topic* – dodatno opisuje sintaksu i semantiku poruke koja je zavisna od primene. Na bazi metapodataka udaljeni NCAP vrši filtriranje svih primljenih difuznih poruka i izdvaja poruke od interesa, odnosno prosleđuje sadržaj filtriranih poruka svim prijavljenim objektima koji predstavljaju krajnje korisnike informacija. Funkcije filtriranja poruka i obaveštavanje prijavljenih pretplatnika vrši odgovarajući Port pretplatnika. Na slici 4.3 prikazan je princip po kome se obavlja tipična komunikacija po modelu izdavač-pretplatnik. Komunikacija se odvija kroz sledeće korake:

1. Tokom procesa inicijalizacije distribuiranog sistema objekat izdavač dobija referencu na lokalni Port izdavača (*Publisher Port*), dok na drugoj strani objekat pretplatnik dobija referencu na lokalni Port pretplatnika (*Subscriber Port*).

- Objekat izdavač konfigurira metapodatke Porta izdavača. Ovi podaci koriste se prilikom slanja difuznih poruka.



Slika 4.3. Komunikacioni model izdavač-pretplatnik

- Objekat pretplatnik konfigurira metapodatke Porta pretplatnika. Metapodaci Porta pretplatnika koriste se za filtriranje primljenih difuznih poruka.
- Pozivanjem operacije *AddSubscriber()* objekat pretplatnik prijavljuje se odgovarajućem Portu pretplatnika. Kao argument ove operacije *AddSubscriber()* pretplatnik specifikuje referencu na funkciju *Callback()* koju će Port pretplatnika pozvati kada primi validnu difuznu poruku preko mreže.
- Izdavač šalje difuznu poruku pozivanjem operacije *Publish()* Porta izdavača i kao argument prosleđuje sadržaj poruke.
- Port pretplatnika prima i filtrira poruke poredeći metapodatke primljene poruke sa sopstvenim metapodacima. Ako postoji poklapanje metapodataka Porta pretplatnika i primljene poruke, poruka uspešno prolazi kroz proces filtriranja.
- Ukoliko difuzna poruka prođe filtriranje, Port pretplatnika poziva *Callback()* funkcije svih registrovanih objekata pretplatnika i kao argument funkcije prosleđuje sadržaj primljene poruke.

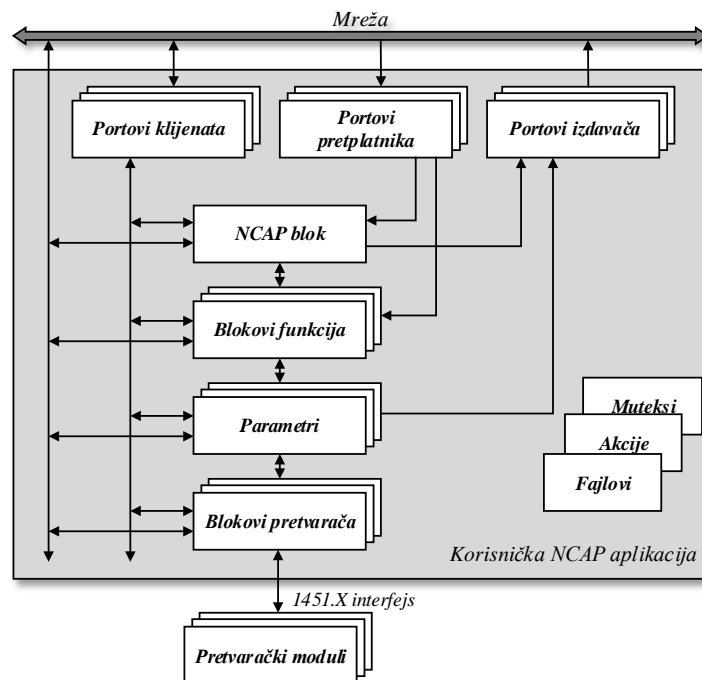
#### 4.1.4. Primena i unapređenje standarda IEEE 1451.1

Do sada je analizirana struktura standarda IEEE 1451.1, dat pregled svih definisanih softverskih klasa i ukratko objašnjena njihova osnovna upotreba. Takođe, razmatrani su i osnovni principi mrežne komunikacije. Međutim, iz dosadašnjeg



izlaganja teško je zaključiti kako se svi definisani koncepti uklapaju u celinu, odnosno kako se od opisanih softverskih komponenti realizuje mrežni procesor. Na slici 4.4 prikazana je interna organizacija objekata mrežnog procesora koja će poslužiti za pojašnjenje procesa realizacije i funkcionisanja tipične NCAP korisničke aplikacije.

Nakon pokretanja aplikacije mrežnog procesora, kreira se jedinstveni NCAP blok. Na bazi polaznih konfiguracionih podataka, NCAP blok dalje kreira polazni skup objekata, dodeljuje im jedinstvene identifikacione brojeve (*objectID*) i postavlja inicijalne vrednosti svih drugih argumenata koji pripadaju objektima. Inicijalni skup objekata i odgovarajuće vrednosti argumenata najčešće se čuvaju u formi tekstualnog fajla, ako se mrežni procesor realizuje na personalnom računaru, ili u ROM memoriji kod mikrokontrolerskih implementacija.



Slika 4.4. Organizacija objekata u tipičnoj realizaciji mrežnog procesora [18]

Po kreiranju svih potrebnih objekata, NCAP blok koristi odgovarajući Port izdavača da pošalje standardizovanu difuznu poruku sa ključem (*publication\_key*) *PSK\_NCAPBLOCK\_ANNOUNCEMENT*, kojom obaveštava druge mrežne procesore o svom postojanju, kao i o svim mrežno vidljivim objektima koji mu pripadaju. Svaki mrežni procesor dužan je da se preko odgovarajućih Portova pretplatnika pretplati za prijem difuznih poruka sa sledećim ključevima:

*PSK\_NCAPBLOCK\_ANNOUNCEMENT* i *PSK\_NETWORK\_VISIBLE\_SERVER\_OBJECT\_PROPERTIES*. Prvi tip difuznih poruka se, kao što je već rečeno, koristi za obaveštavanje o pojavi novog NCAP objekta na mreži, dok se drugi tip poruka koristi za obaveštavanje o promenama koje nastaju tokom rada na postojećim mrežno vidljivim objektima. Na osnovu primljenih difuznih poruka preko mreže, svaki mrežni procesor u okviru svog NCAP bloka čuva podatke o svim drugim NCAP blokovima i njihovim objektima, formirajući sliku kompletnog distribuiranog merno-upravljačkog sistema.

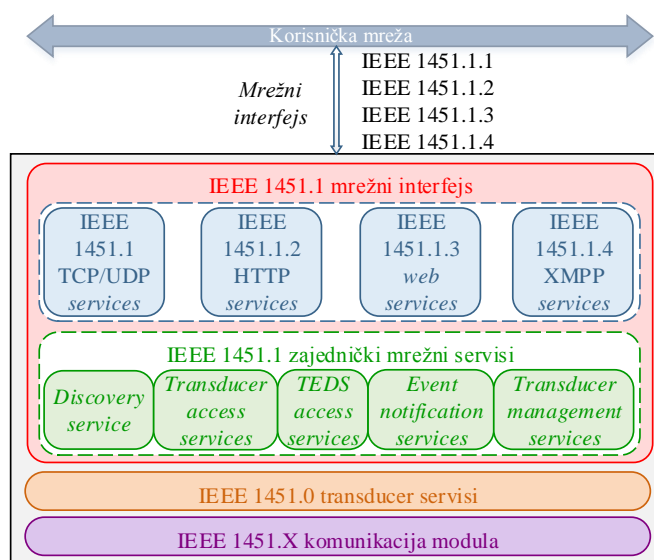
Osim prethodno pomenutih Portova pretplatnika i izdavača, tipična aplikacija mrežnog procesora sadrži i druge Portove pretplatnika i izdavača za prenos difuznih informacija, kao i Portove klijenata za uspostavljanje direktne veze sa željenim serverskim objektom. Da bi lokalni objekti mogli da koriste Portove klijenata za pozive operacija udaljenih serverskih objekata, potrebno je da Port ima validnu mrežnu adresu servera (*serverDispatshAddress*). Adresa servera dobija se iz strukture podataka o distribuiranom sistemu koju lokalni NCAP blok formira na bazi primljenih difuznih poruka od udaljenih NCAP blokova.

Sa modulima pretvarača mrežni procesor se povezuje preko nekog od fizičkih 1451.X interfejsa. Uvođenjem posebne klase Blokova pretvarača 1451.1 standard definiše apstraktni logički interfejs koji enkapsulira detalje komunikacije sa pretvaračima. Blokovi pretvarača podržavaju funkcije automatske detekcije i konfiguracije pretvarača kompatibilnih sa primenjenim 1451.X interfejsom. Za smeštanje podataka dobijenih od senzora ili namenjenih za aktuatore, Blokovima pretvarača pridružuju se odgovarajući Fizički parametri. Podaci koji su smešteni u Fizički parametar dostupni su, kako lokanim objektima mrežnog procesora, tako i Entitetima udaljenih NCAP aplikacija. Svaki put kada se vrednost Fizičkog parametra promeni šalje se difuzna poruka sa ključem *PSK\_PHYSICAL\_PARAMETRIC\_DATA*, čime se o nastaloj promeni obaveštavaju svi pretplatnici na mreži.

Različite operacije specifične za konkretnu aplikaciju NCAP softvera, kao što su, na primer, lokalne upravljačke petlje i slično, realizuju se Blokovima funkcija. Blokovi funkcija kao ulazne podatke tipično koriste Parametre senzorskih modula dok izlazne podatke smeštaju u Parametre koji su vezani za aktuatorske module. Kao što se može primetiti, implementacija mrežnog procesora, posebno ako se posmatra u kontekstu realizacije distribuiranog merno-upravljačkog sistema, relativno je složen

zadatak. Prvo je potrebno izvršiti detaljnu analizu distribuiranog sistema i odrediti tačan broj mrežnih procesora, njihove fizičke lokacije i zadatke koje treba da obavljaju. Iako standard 1451.1 definiše principe funkcionisanja i logičke interfejsse koji mogu da se primene u svakoj mreži, neophodno je izvršiti odabir adekvatne mreže. Izbor mreže može biti od ključne važnosti za uspešno funkcionisanje distribuiranog sistema u realnom vremenu. Kada su zadaci podeljeni mrežnim procesorima, pristupa se analizi svake pojedinačne NCAP aplikacije i dodeljeni zadaci se preslikavaju u odgovarajući skup 1451.1 objekata. Pri tome, neophodno je dobro definisati komunikaciju između svih objekata jedne NCAP aplikacije, ali isto tako i komunikaciju između mrežno vidljivih objekata različitih mrežnih procesora.

Međutim, bez obzira na širok spektar mogućnosti koje pruža i prednosti koje unosi standardizacija, 1451.1 standard nije doživeo veliki komercijalni uspeh i širu primenu. Danas praktično ne postoje komercijalno raspoloživi mrežni procesori koji rade po standardu 1451.1, iako je uloženi veliki trud u njegovu popularizaciju. Razloge za malu prihvaćenost standarda verovatno treba tražiti u njegovoj relativno velikoj složenosti, ali i u kompleksnosti mrežnog povezivanja i kreiranja distribuiranih aplikacija. Od trenutka usvajanja standarda 1451.1 pa do danas došlo je do značajnih promena usvajanjem novih standarda 1451 familije, kao i do pojave novih koncepcija mrežnog povezivanja, tako da je u toku usvajanje odgovarajućih izmena i dopuna standarda u cilju njegove aktuelizacije, kao što je prikazano na slici 4.5 [20].



**Slika 4.5.** Mrežni interfejs prema modifikovanom IEEE 1451.1 standardu [20]

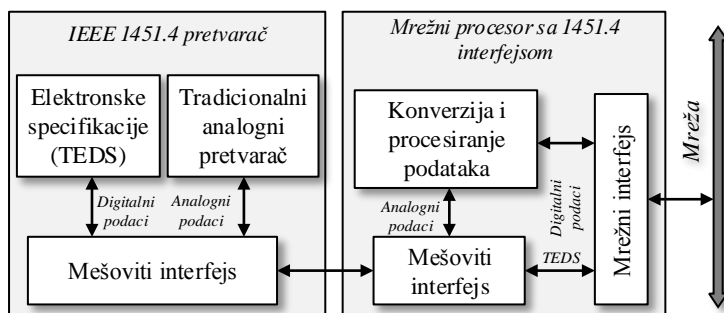
Novim standardom predlaže se izdvajanje skupa zajedničkih mrežnih servisa za inteligentne pretvarače koji uključuju: *Discovery*, *Transducer Access*, *TEDS Access*, *Event Notification* i *Transducer Management* servis. Na osnovu ovog skupa zajedničkih mrežnih servisa biće omogućen pristup IEEE 1451 sensorima i aktuatorima korišćenjem različitih popularnih protokola kao što su TCP/UDP, HTTP, XMPP i drugi.

## **4.2. Povezivanje analognih senzora prema IEEE 1451.4 standardu**

Uprkos činjenici da su savremeni pametni senzori sa digitalnim interfejsom sve prisutniji na tržištu, tradicionalni analogni senzori još uvek se, u velikoj meri, koriste u industrijskim sistemima. Činjenica da su analogni senzori još uvek prisutni u velikoj meri nameće potrebu da se i ovi senzori uključe u proces standardizacije kako bi se omogućilo automatsko povezivanje analognih senzora u distribuirani merni sistem. S obzirom da je manuelni proces konfiguracije i kalibracije analognih senzora dosta složen i podložan greškama, automatizacija ovog procesa korišćenjem *Plug and Play* koncepta mogla bi doneti i značajne uštede u instalaciji i održavanju mernog sistema.

Standard IEEE 1451.4 [21] (odnosno ISO/IEC/IEEE 21451-4:2010) kao svoj osnovni cilj upravo postavlja interoperabilnost, odnosno primenu koncepta *Plug and Play* na tradicionalne analogne senzore. Postavljeni cilj postiže se primenom relativno jednostavne ideje da se analognom pretvaraču pridruži memorijski uređaj malih dimenzija koji će biti opremljen elektronskim specifikacijama pretvarača. Za realizaciju ove ideje standard IEEE 1451.4 formalno uvodi dve komponente: elektronske specifikacije za analogne pretvarače (1451.4 TEDS) i mešoviti interfejs (MMI). Princip povezivanja inteligentnog 1451.4 pretvarača prikazan je na slici 4.6.

Osnovnu komponentu standarda čine elektronske specifikacije pretvarača – TEDS. S obzirom da se za čuvanje elektronskih specifikacija koristi jednostavan memorijski uređaj malih dimenzija i malog kapaciteta, veliki trud uložen je u standardizaciju elektronskih specifikacija analognih pretvarača kako bi se ostvarilo minimalno zauzeće memorijskog prostora.



Slika 4.6. Konceptija inteligentnog pretvarača prema IEEE 1451.4 standardu

Druga komponenta standarda, mešoviti interfejs, definisan je tako da se ostvari povezivanje sa analognim pretvaračima na tradicionalan način, ali i da se omogući očitavanje i upis sadržaja u memorijski uređaj pridružen pretvaraču. U nastavku ovog poglavlja prvo je opisan mešoviti interfejs, zatim je analiziran postupak kreiranja elektronskih specifikacija analognih pretvarača, dok je, na kraju, razmatrana integracija pretvarača u distribuirani sistem kao i unapređenja standarda IEEE 1451.4.

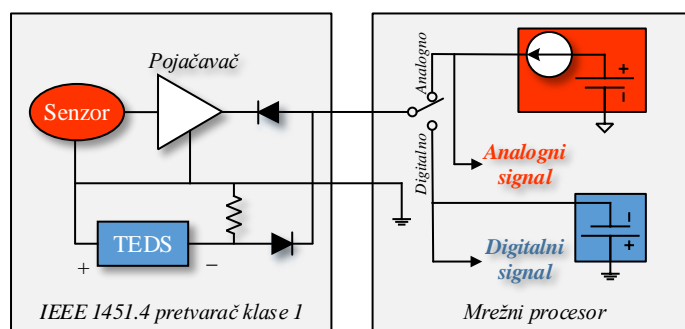
#### 4.2.1. Mešoviti interfejs

Mešoviti interfejs obezbeđuje prenos analognog signala i digitalnih podataka između IEEE 1451.4 pretvaračkog modula i odgovarajućeg mrežnog procesora. Preciznije govoreći, mešoviti interfejs objedinjuje analogni interfejs za povezivanje tradicionalnih analognih pretvarača i digitalni interfejs za komunikaciju sa memorijskim uređajima koji sadrže elektronske specifikacije pretvarača. Kako bi se obuhvatilo što više različitih pretvarača i obezbedila široka prihvaćenost, standard IEEE 1451.4 definiše dve klase mešovitog interfejsa, klasu 1 (*Class 1*) i klasu 2 (*Class 2*).

Klasa 1 specifikuje detalje hardverskog interfejsa koji obezbeđuje prenos analognih i digitalnih signala preko zajedničkih linija. Tipičan primer povezivanja analognog senzora sa mrežnim procesorom, korišćenjem samo dva provodnika, prikazan je na slici 4.7. Prenos analognog signala senzora i digitalnih TEDS podataka, smeštenih u memorijskom uređaju pridruženom senzoru, odvija se sekvencijalno. Sekvencijalni pristup analognom signalu sa izlaza ugrađenog pojačavača, odnosno digitalnom signalu TEDS memorije, ostvaruje se izborom odgovarajuće pozicije („analogno“ ili „digitalno“) kontrolnog prekidača koji je sastavni deo mešovitog interfejsa mrežnog procesora. Kada je kontrolni prekidač u poziciji „digitalno“, vrši se

prenos elektronskih specifikacija pretvarača smeštenih u TEDS memoriji. Za napajanje memorijskog uređaja kod interfejsa klase 1 koristi se negativni napon koji omogućava donjoj diodi na slici 4.7 da provodi.

Prenos digitalnih podataka obavlja se korišćenjem inverzne logike, tako da logičkoj nuli odgovara 0V, dok logičkoj jedinici odgovara -5V. Kada se kontrolni prekidač prebaci u poziciju „analogno“, vrši se prenos analognog signala. Pri prenosu analognog signala koristi se pozitivan napon napajanja čime se obezbeđuje da provodi gornja dioda. Na slici 4.7 simbolički je prikazan senzor koji se napaja konstantnom strujom i ima ugrađen pojačavač signala. Analogni naponski signal uzima se sa istog provodnika koji se ujedno koristi i za prenos struje za napajanje pojačavača.

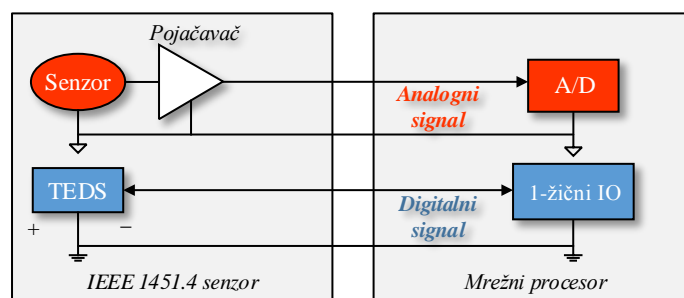


**Slika 4.7.** Povezivanje pretvarača korišćenjem mešovitog interfejsa klase 1 [21]

Kod pojedinih senzora nije pogodno povezivanje analognog signala korišćenjem dva zajednička provodnika, kao što je prikazano na slici 4.7, pa se koriste slične konfiguracije sa tri ili četiri provodnika. Kod konfiguracije sa tri provodnika, za analogni signal se rezerviše posebna linija dok se za napajanje analognog pojačavača i digitalne podatke koristi zajednička linija [21]. Kod konfiguracije sa četiri provodnika jedina zajednička linija je uzemljenje, dok se za napajanje pojačavača, analogni signal senzora i digitalne podatke koriste tri nezavisne linije [21]. Mešoviti interfejs klase 1 najčešće se koristi za povezivanje senzora sile i ubrzanja, mikrofona i sličnih senzora.

Za razliku od klase 1, interfejs klase 2 koristi potpuno razdvojene linije za prenos analognih i digitalnih signala. Tipičan primer povezivanja mrežnog procesora sa otpornim senzorom u konfiguraciju mosta, prema specifikacijama interfejsa klase 2, prikazan je na slici 4.8. S obzirom da se koriste razdvojene linije za analogne i digitalne signale, interfejs klase 2 omogućuje istovremeni prenos TEDS podataka i mernog

signala senzora. Pri prenosu digitalnih podataka koristi se pozitivna logika, logičkoj nuli odgovara 0V, dok logičkoj jedinici odgovara +5V.



Slika 4.8. Povezivanje pretvarača korišćenjem mešovitog interfejsa klase 2 [21]

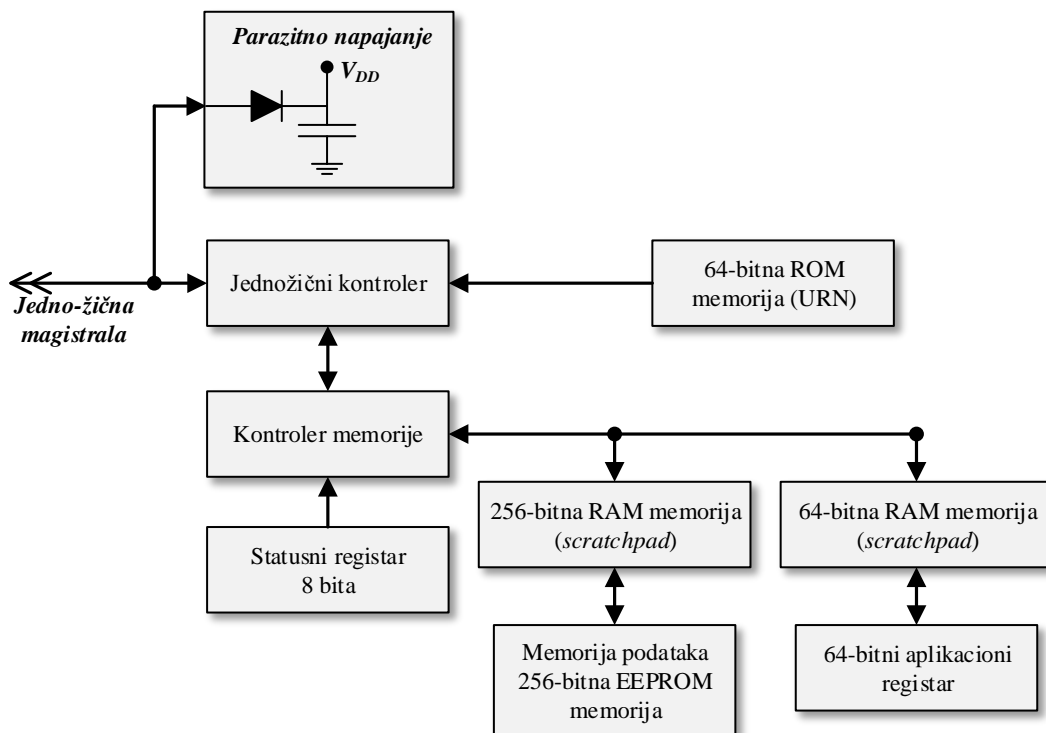
Interfejs klase 2 tipično se koristi za povezivanje senzora kod kojih prisustvo prekidača i dioda na linijama za prenos analognog signala nije poželjno, kao što su na primer termoparovi, mostni senzori, pH senzori i slično. Još jedan tipičan primer gde se koristi interfejs klase 2 je prenos signala industrijskom strujnom petljom 4-20 mA, za koju je takođe neophodno izdvojiti zasebne linije za prenos analognog signala.

#### 4.2.2. Protokol za prenos digitalnih podataka

Za prenos elektronskih specifikacija između memorijskog uređaja koji je pridružen pretvaraču i mrežnog procesora, standard definiše protokol za prenos digitalnih podataka DTP (*Data Transmission Protocol*) [21]. Definisani protokol predstavlja adaptaciju već postojećeg jednožičnog protokola (*1-Wire protocol*) koji koriste uređaji firme *Maxim/Dallas* [22]. Tipičan predstavnik memorijskog uređaja koji koristi ovaj protokol i koji se u standardu preporučuje za smeštanje elektronskih specifikacija je jednožični EEPROM DS2430A [23] koji ima veoma mali kapacitet od svega 256 bita. U poslednje vreme *Maxim/Dallas* preporučuje upotrebu savremenije verzije jednožične EEPROM memorije DS2431 kapaciteta 1024 bita [24].

Jednožični memorijski uređaj koristi isti par provodnika za komunikaciju i za napajanje uređaja. Za komunikaciju se koristi konfiguracija sa otvorenim drejnom, te se napajanje automatski dobija preko istih provodnika kada je magistrala u stanju mirovanja, odnosno kada se ne vrši prenos podataka. U cilju lakšeg razumevanja principa funkcionisanja jednožičnog interfejsa, na slici 4.9 prikazan je blok dijagram EEPROM uređaja DS2430A.

Jednožična magistrala funkcioniše po master-slejev (*mastr-slave*) principu. Mrežni procesor ima ulogu mastera, dok se jedan ili više pretvarača mogu povezati kao slejev uređaji. Svaki jednožični uređaj poseduje nepromenljivu 64-bitnu adresu (*URN – Unique Registration Number*), definisanu od proizvođača koji ujedno garantuje i da je adresa jedinstvena tj. da ne postoje dva uređaja sa istom adresom. Zanimljivo je primetiti da se adresa sastoji iz tri dela: 8-bitnog koda familije (*Family Code*), 48-bitnog serijskog broja i 8-bitnog zaštitnog CRC (*Cyclic Redundancy Check*) koda. Svaki tip jednožičnog uređaja poseduje sopstveni kod familije, na primer kod familije je 14<sub>hex</sub> za DS2430A, a 2D<sub>hex</sub> za DS2431. S obzirom da svaki tip uređaja poseduje izvesne specifičnosti u protokolu komunikacije, kod familije može se iskoristiti za automatsko prepoznavanje i izbor odgovarajućeg softverskog drajvera za upis i čitanje podataka iz memorije. Na primer, DS2430A poseduje jedan EEPROM blok od 256 bita i 64-bitni aplikacioni registar sa zasebnim RAM baferima (*scratchpad*, na slici 4.9), dok DS2431 poseduje četiri EEPROM bloka od 256 bita i 64-bitni aplikacioni registar sa zajedničkim 64-bitnim RAM baferom, te se procedura upisa u memoriju donekle razlikuje.



Slika 4.9. Blok dijagram jednožične memorije DS2431 [24]

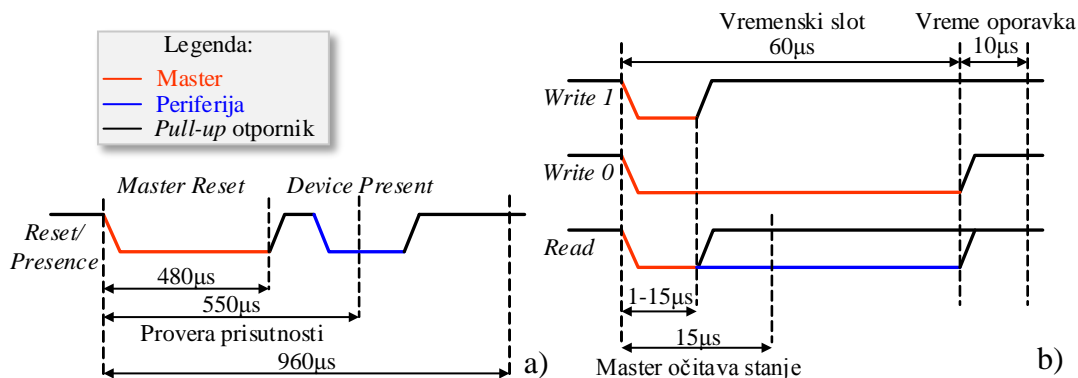


Proces upisa i čitanja podataka odvija se po tačno utvrđenoj proceduri. Mrežni procesor, koji igra ulogu mastera, započinje svaku transakciju na magistrali prateći sledeću sekvencu koraka.

1. *Inicijalizacija* – master resetuje sve uređaje koji su povezani na magistralu. U bilo kom trenutku, tokom procesa komunikacije, master može izvršiti resetovanje uređaja, čime se započinje novi ciklus.
2. *ROM komanda* – master šalje jednu od četiri ROM komande: *MatchROM*, *SearchROM*, *ReadROM* i *SkipROM*. Ove komande koriste se za adresiranje tj. selekciju uređaja na magistrali sa kojim se želi uspostaviti komunikacija. Ukoliko master zna tačnu adresu (URN) uređaja sa kojim želi da komunicira najjednostavnije je da se koristi *MatchROM* komanda za selekciju željenog uređaja. Ukoliko ne zna tačnu adresu, master može da iskoristi *SearchROM* komandu kako bi utvrdio adresu povezanog uređaja. Ukoliko je poznato da je povezan tačno jedan uređaj, master može da pojednostavi proceduru otkrivanja adrese slanjem *ReadROM* komande. Međutim, ukoliko je na magistrali prisutno više uređaja, očitavanje URL adrese rezultovaće greškom. Najjednostavniji način za selekciju uređaja je *SkipROM* komanda. Ova komanda može se koristiti samo ako je na magistrali prisutan samo jedan uređaj i ako poznavanje njegove tačne adrese nije od interesa. Osim navedene četiri komande, pojedini jednožični uređaji mogu imati i dodatne ROM komade.
3. *Memorijska komanda i prenos podataka* – nakon uspešne selekcije memorijskog uređaja nastupa faza prenosa podataka koji započinje odgovarajućom memorijskom komandom, nakon čega sledi upis ili čitanje podataka iz memorije. U zavisnosti od familije kojoj pripada, jednožični uređaji mogu posedovati različite memorijske komande, međutim neke od najvažnijih komandi su: *ReadMemory*, *WriteScratchpad*, *ReadScratchpad*, *CopyScratchpad*, *WriteApplicationRegister*, *ReadApplicationRegister* i *Copy&LockApplicationRegister*. Interesantno je primetiti da se upis u EEPROM memoriju ne vrši direktno, kao posledica činjenice da upis traje dugo i da je neophodno obezbediti dovoljno energije za napajanje uređaja tokom ovog procesa. Zbog toga se koriste RAM baferi (*scratchpad*) za privremeni upis sadržaja, a zatim se odgovarajućom komandom (*CopyScratchpad*) sadržaj bafera upisuje u EEPROM memoriju.

Posebna 64-bitna sekcija EEPROM memorije koja se naziva aplikacioni registar (*Application Register*) koristi se za upis sadržaja koji se može „zaključati“, odnosno zaštititi od neželjenih izmena. Ovaj deo memorije ima poseban značaj za smeštanje osnovnih informacija iz elektronskih specifikacija pretvarača, koje korisnik ne sme menjati. Po završetku ove faze, master ponovo resetuje sve uređaje i započinje novi transfer.

Kao što je prethodno rečeno, svaki transfer započinje reset signalom (*Reset*). Reset signal inicira master postavljajući liniju magistrale na nivo logičke nule u trajanju od minimalno 480  $\mu$ s, a zatim otpuštajući liniju magistrale koja se usled postojanja *pull-up* otpornika vraća na nivo logičke jedinice. Nakon reseta svaki od uređaja na magistrali javlja se odgovarajućim signalom prisutnosti (*Presence*). Signal prisutnosti započinje od 15  $\mu$ s do 60  $\mu$ s nakon reseta i traje od 60  $\mu$ s do 240  $\mu$ s. Ovim signalom obaveštava se master da je bar jedan uređaj prisutan na magistrali. Vremenski dijagram signala za inicijalizaciju komunikacije na magistrali prikazan je na slici 4.10a.



Slika 4.10. Vremenski dijagram osnovnih signala na jednožičnoj magistrali

S obzirom da, osim uzemljenja, jednožični interfejs poseduje samo jednu komunikacionu liniju, prenos svih komandi, adresa i podataka vrši se serijski, bit po bit. Trajanje vremenskog slot koji odgovara prenosu jednog bita iznosi 60  $\mu$ s, nakon čega je neophodno umetnuti fazu oporavka od minimalno 10  $\mu$ s.

Master započinje slanje ili prijem svakog bita postavljajući liniju magistrale na nivo logičke nule. Postoje tri signala za prenos 1-bitnog podatka: *Write1* koji se koristi kada master šalje logičku jedinicu uređaju, *Write0* koji se koristi kada master šalje logičku nulu uređaju i *Read* signal za slanje 1-bitnog podatka od uređaja ka masteru.

*Write1* signal započinje kada master postavi na magistralu nivo logičke nule u trajanju 1  $\mu$ s do 15  $\mu$ s i nakon toga otpusti magistralu do isteka tekućeg vremenskog slota. *Write0* signal započinje na isti način, ali se nivo logičke nule zadržava do kraja vremenskog slota. *Read* signal takođe započinje master na isti način kao i *Write1* signal, ali nakon isteka 15  $\mu$ s adresirani uređaj zadržava magistralu na nivou logičke nule ili je postavlja na nivo jedinice, zavisno od sadržaja bita koji se šalje masteru. Vremenski dijagrami opisanih signala prikazani su na slici 4.10b.

### 4.2.3. Elektronske specifikacije analognih pretvarača

Uzimajući u obzir ograničenost memorijskog prostora koji je na raspolaganju za smeštanje elektronskih specifikacija pretvarača (kapacitet DS2430A EEPROM memorije je svega 256 bita), 1451.4 standard definiše vrlo precizno mapiranje TEDS podataka, kako bi se minimizovalo zauzeće memorije. Elektronske specifikacije prema standardu IEEE 1451.4 podeljene su u tri glavne sekcije: osnovni TEDS (*Basic TEDS*), TEDS pretvarača (*Transducer TEDS*) i kalibracioni TEDS (*Calibration TEDS*), slika 4.11. Sve elektronske specifikacije 1451.4 pretvarača moraju obavezno da sadrže osnovni TEDS, dok su ostale sekcije opcione i mogu se izostaviti.

<b>Osnovni TEDS</b>	<i>Manufacturer ID, Model number, Version number, Version letter, Serial number.</i>
<b>TEDS pretvarača</b> (Standardni šabloni od 25 do 39, i 43)	Meni opseg, Opseg izlaznog signala senzora ili ulaznog signala aktuatora, Osetljivost, Izvor napajanja, ...
<b>Kalibracioni TEDS</b> (Standardni šabloni od 40 do 42)	Kalibracioni podaci: - Kalibraciona tabela - Polinomialna aproksimacija - Tabela frekvencijskog odziva

*Slika 4.11. Struktura elektronskih specifikacija 1451.4 pretvarača*

Osnovni TEDS sadrži samo 64 bita sa pet osnovnih informacija o pretvaraču: identifikaciju proizvođača (*Manufacturer ID*), broj modela (*Model number*), broj verzije (*Version number*), oznaka verzije (*Version letter*) i serijski broj (*Serial number*). Praktični značaj osnovne TEDS sekcije je da pruži dovoljno informacija za jedinstvenu

identifikaciju senzora. Podatke smeštene u ovoj sekciji definiše proizvođač i korisnik pretvarača ih ne sme menjati. Iz tog razloga osnovni TEDS se smešta u poseban zaštićeni deo EEPROM memorije koji se naziva aplikacioni registar, kao što je objašnjeno u poglavlju 4.2.2.

Osnovni TEDS može biti praćen sekcijom koja se naziva TEDS pretvarača. Ova sekcija sadrži informacije o specifičnim osobinama pretvarača koje se tipično mogu naći u katalogima proizvođača i ima najznačajniju ulogu u automatskoj konfiguraciji pretvarača. Na primer, neki od karakterističnih podataka koji se smeštaju u TEDS pretvarača 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, za razliku od osnovne TEDS sekcije, ne poseduje fiksnu strukturu. Da bi se opisao veoma široki spektar različitih senzora i aktuatora, a da se istovremeno zadrži malo iskorišćenje memorije, uveden je koncept šablona (*template*) i odgovarajućeg jezika za opis šablona (TDL – *Template Description Language*) [21, 25, 26]. Šabloni predstavljaju tekstualni fajl koji se najčešće čuva u mrežnom procesoru ili u lokalnom akvizicionom sistemu. Šabloni zapravo podsećaju na softverski kod napisan u specifičnom TDL jeziku i sastoje se od niza komandi koje su precizno definisane standardom. Ove komande specifikuju tip podataka, odnosno način na koji će se izvršiti kodovanje određenog parametara iz elektronskih specifikacija pretvarača, kako bi se omogućilo snimanje u TEDS memoriju u što kompaktnijoj formi. Da bi se obezbedilo korektno očitavanje elektronskih specifikacija iz sekcije TEDS pretvarača, neophodno je obezbediti odgovarajući šablon napisan u TDL jeziku i odgovarajući softver koji, na osnovu komandi iz šablona, prevodi niz „sirovih“ bita, očitanih iz TEDS memorije, u skup parametara pretvarača koji se mogu koristiti u konfiguraciji sistema. Detaljniji opis TDL jezika dat je u nastavku.

Standard IEEE 1451.4 definiše izvestan broj šablona za unošenje podataka u sekciju TEDS pretvarača za neke odabrane često korišćene senzore. Šabloni su definisani za veliki broj senzora kao što su: akcelerometri, mikrofoni, pokretne trake, termistori i drugi. Kompletan spisak šablona koji su definisani standardom prikazan je u tabeli 4.6 [21]. U ovom trenutku, spisak standardnih šablona uključuje šablone sa identifikacionim brojevima (*Template ID*) od 25 do 39 i 43. Iako spisak šablona

obuhvata veliki broj senzora, može se uočiti da se na tom spisku ne nalaze mnogi relativno često korišćeni senzori, kao što su kvazidigitalni senzori. Takođe, spiskom standardnih šablona nije obuhvaćen ni jedan tip aktuatora. Činjenica da standardni šabloni ne uključuju određene vrste senzora prilično otežava šire prihvatanje standarda IEEE 1451.4.

Međutim, osim standardnih šablona iz tabele 4.6, proizvođači mogu definisati i koristiti sopstvene šablone, pod uslovom da su šabloni napisani korišćenjem TDL jezika. Takođe, IEEE standardni šablon može biti dopunjen šablonom proizvođača kreirajući na taj način jedan složeniji šablon, koji detaljnije opisuje određeni tip senzora. Ovakvim pristupom omogućava se pokrivanje većeg skupa senzora u odnosu na slučaj kada se koriste samo standardni IEEE šabloni.

**Tabela 4.6.** Spisak šablona za senzore koji su definisani u standardu IEEE 1451.4 [21]

TemplateID	Opis
25	<i>Accelerometer and force transducer</i>
26	<i>Charge amplifier (with attached accelerometer)</i>
27	<i>Microphones with built-in preamplifier</i>
28	<i>Microphone preamplifier with attached microphone</i>
29	<i>Capacitive microphone</i>
30	<i>High-level voltage output sensor</i>
31	<i>Current loop output sensor</i>
32	<i>Resistance sensor</i>
33	<i>Bridge sensor</i>
34	<i>AC linear/rotary variable differential transformer (LVDT/RVDT)</i>
35	<i>Strain gage</i>
36	<i>Thermocouple</i>
37	<i>Resistance temperature detector (RTD)</i>
38	<i>Thermistor</i>
39	<i>Potentiometric voltage divider</i>
43	<i>Charge amplifier (with attached force transducer)</i>

Pored definisanja najvažnijih karakteristika familije kojoj pripada senzor ili aktuator i smeštanja odabranih podataka u sekciju memorije koja je nazvana TEDS pretvarača, elektronske specifikacije mogu da sadrže i treću sekciju koja se naziva kalibracioni TEDS. Kalibracioni TEDS sadži podatke koji su dobijeni u procesu linearizacije, odnosno kalibracije konkretnog pretvarača. Kao i kod prethodne sekcije, podaci iz kalibracionog TEDS-a smeštaju se na osnovu odgovarajućeg šablona, napisanog u TDL jeziku. Postoje tri kalibraciona šablona koja su definisana u standardu IEEE 1451.4 koji koriste identifikacione brojeve od 40 do 42: kalibraciona tabela (*Calibration table*), kalibraciona kriva (*Calibration curve*) i tabela frekvencijskog

odziva (*Frequency response table*). Kalibraciona tabela koristi se za smeštanje podataka o korekcijama merne katakteristike senzora u formi tabele koja može da smesti maksimalno 127 kalibracionih tačaka. Detaljniji opis šablona kalibracione tabele prezentovan je u glavi 5, gde je predložena i izvesna modifikacija, odnosno metod za generalizaciju tipa podataka koji se mogu smestiti u kalibracionu tabelu. Šablon kalibracione krive pogodan je kada se korekcije merne karakteristike senzora mogu aproksimirati polinomima. Tabela frekvencijskog odziva ima istu formu kao i kalibraciona tabela, s tim što se korekcije merne karakteristike senzora unose u odnosu na frekvenciju pobude.

### **Jezik za opis šablona**

Za razliku od preostalih članova familije IEEE 1451, koji se zasnivaju na pretvaračima sa digitalnim interfejsom, standard IEEE 1451.4 omogućava da se analogni pretvarač učini pametnim pridruživanjem odgovarajuće EEPROM memorije u koju se smeštaju elektronske specifikacije pretvarača. Ovakav pristup opravdan je u situacijama kada je potrebno modernizovati već postojeću opremu ili ukoliko nije poželjno da se neposredno uz pretvarač nalazi odgovarajući sistem za obradu i digitalizaciju signala. Standard IEEE 1451.4 teži da minimizuje dimenzije i broj komponenti koje je potrebno pridružiti tradicionalnom analognom pretvaraču kako bi se pretvarač učinio inteligentnim. Pretvaraču se zapravo pridružuje samo jedna digitalna komponenta – EEPROM memorija sa jednožičnim interfejsom. Izbor jednožičnog interfejsa omogućava da se TEDS memorija poveže sa mrežnim procesorom korišćenjem minimalnog broja provodnika.

Osnovna memorijska komponenta koja je preporučena u standardu (DS2430A) ima kapacitet od svega 256 bita, iako je moguće koristiti i memorije većeg kapaciteta. Treba napomenuti da je veličina tipičnih elektronskih specifikacija u drugim standardima IEEE 1451 familije reda nekoliko stotina kilobajta. Ovako velike uštede u memorijskom prostoru bilo je moguće ostvariti jedino uvođenjem posebnih tipova podataka koji se u drugim standardima ne koriste. Na primer, za smeštanje celobrojnih podataka u većini standarda koristi se tip *Integer* koji zauzima 8, 16, 32 ili čak 64 bita memorije. Standard IEEE 1451.4, međutim, za smeštanje celobrojnih podataka uvodi tip *UnInt* koji može zauzimati proizvoljan broj bita u memoriji. Pregled nekih od najznačajnijih tipova podataka koje uvodi standard IEEE 1451.4 prikazan je u tabeli 4.7.

Kao što se iz tabele 4.7 može primetiti, većina tipova podataka omogućava da se broj bita potrebnih za odgovarajući TEDS podatak zadaje proizvoljno, u skladu sa zahtevanom preciznošću. Ovakav pristup očigledno omogućava veoma velike uštede u memoriji, ali nameće potrebu da se svaki parametar, koji ulazi u specifikaciju pretvarača, veoma detaljno analizira, kako sa aspekta njegove neophodnosti, tako i sa aspekta preciznosti (odnosno broja bita) sa kojom se zadaje.

**Tabela 4.7.** Tipovi podataka u standardu IEEE 1451.4

Tip podatka	Broj bita	Opis
<i>UnInt</i>	proizvoljan	Positivan celobrojni podatak. Za negativne brojeve se koristi tip <i>ConRes</i> .
<i>Single</i>	32	Broj u pokretnom zarezu po standardu IEEE 754.
<i>ConRes</i>	proizvoljan	Linearno mapiranje sa zadatom rezolucijom u zadatom intervalu.
<i>ConRelRes</i>	proizvoljan	Logaritamsko mapiranje sa zadatom rezolucijom u zadatom intervalu.
<i>Chr5</i>	5	Karakter koji može imati veoma limitiran skup vrednosti: slova engleskog alfabeta A-Z, razmak i specijalne karaktere „,“, „“, „/“, „i“, „@“.
<i>ASCII</i>	7	7-bitni ASCII karakter
<i>Unicode</i>	16	Unikod karakter – ISO/IEC 10646-1:2002 standard.
<i>String5</i>	$X+N*5$	Niz karaktera (string) tipa <i>Chr5</i> . $X$ je dužina prvog polja u bitima. Ovo polje specifikuje dužinu celog stringa $N$ . Svako od narednih $N$ polja je dužine 5 bita.
<i>String7</i>	$X+N*7$	Niz karaktera (string) tipa ASCII. $X$ je dužina prvog polja u bitima. Ovo polje specifikuje dužinu celog stringa $N$ . Svako od narednih $N$ polja je dužine 7 bita.
<i>String16</i>	$X+N*16$	Niz karaktera (string) tipa <i>Unicode</i> . $X$ je dužina prvog polja u bitima. Ovo polje specifikuje dužinu celog stringa $N$ . Svako od narednih $N$ polja je dužine 16 bita.
<i>Date</i>	proizvoljan	Datum koji se zadaje kao broj dana od 1.1.1998.

Iako za većinu tipova podataka prikazanih u tabeli 4.7 nisu potrebna dodatna objašnjenja, tipove *ConRes* i *ConRelRes* potrebno je dodatno pojasniti. Naime, veliki broj podataka koji se smeštaju u elektronske specifikacije senzora su decimalni brojevi u pokretnom zarezu, za koje se tipično koristi tip podataka *Single* koji zauzima fiksno 32 bita. S obzirom da standardom preporučena memorija pretvarača ima svega 256 bita, samo 8 podataka tipa *Single* se mogu smestiti u elektronske specifikacije. Da bi se uštedelo na memorijskom prostoru za definisanje brojeva u pokretnom zarezu uvedena su dva specifična tipa podataka: *ConRes* i *ConRelRes*.

Tip *ConRes* se koristi za linearno mapiranje sa zadatom rezolucijom u zadatom intervalu po sledećoj formuli [21]:

$$\text{parametar} = \langle \text{pocetna\_vrednost} \rangle + [\langle \text{tolerancija} \rangle \cdot \langle \text{TEDS\_biti} \rangle], \quad (4.1)$$

gde su  $\langle \text{početna\_vrednost} \rangle$  i  $\langle \text{tolerancija} \rangle$  veličine koje se zadaju u fajlu šablona, dok  $\langle \text{TEDS\_biti} \rangle$  predstavlja celobrojnu veličinu sačuvanu u memoriji pretvarača sa zadatim brojem bita. Na primer, ako se određeni parametar čuva u memoriji sa 4 bita i ako je očitana vrednost  $1010_2=10_{10}$ , pri čemu je u odgovarajućem fajlu šablona zadata  $\langle \text{početna\_vrednost} \rangle -0,14$  i  $\langle \text{tolerancija} \rangle 0,02$ , tada je na osnovu (4.1) vrednost parametra:

$$\text{parametar} = -0,14 + [0,02 \cdot 10] = 0,06. \quad (4.2)$$

S obzirom da je na raspolaganju 4 bita, veličina  $\langle \text{TEDS\_biti} \rangle$  koja se čuva u memoriji pretvarača može da uzme vrednosti od  $0000_2=0_{10}$  do  $1110_2=14_{10}$  (vrednost  $1111_2$  se po standardu ne koristi). To znači da se odgovarajuća vrednost parametra može kretati u opsegu od  $-0,14$  do  $+0,14$  sa rezolucijom  $0,02$ .

U slučajevima kada se vrednost parametra menja u veoma širokom opsegu, često je bolje koristiti logaritamsko mapiranje koje omogućuje *ConRelRes* tip podataka. Vrednost *ConRelRes* parametra se izračunava po sledećoj formuli [21]:

$$\text{parametar} = \langle \text{početna\_vrednost} \rangle \cdot [1 + 2 \cdot \langle \text{tolerancija} \rangle]^{<\text{TEDS\_biti}>}, \quad (4.3)$$

gde su, kao i prethodno,  $\langle \text{početna\_vrednost} \rangle$  i  $\langle \text{tolerancija} \rangle$  veličine koje se zadaju u fajlu šablona, dok  $\langle \text{TEDS\_biti} \rangle$  predstavlja celobrojnu veličinu sačuvanu u memoriji pretvarača sa zadatim brojem bita. Na primer, ako se određeni parametar čuva u memoriji sa 4 bita i ako je u odgovarajućem fajlu šablona zadata  $\langle \text{početna\_vrednost} \rangle 1$  i  $\langle \text{tolerancija} \rangle 0,5$ , tada se (4.3) svodi na:

$$\text{parametar} = 1 \cdot [1 + 2 \cdot 0,5]^{<\text{TEDS\_biti}>} = 2^{<\text{TEDS\_biti}>}. \quad (4.4)$$



S obzirom da veličina  $\langle \text{TEDS\_biti} \rangle$ , kao i u prethodnom primeru, može da uzme vrednosti od  $0000_2=0_{10}$  do  $1110_2=14_{10}$ , to znači da odgovarajuće vrednosti parametra mogu biti:  $1, 2, 2^2, 2^3, \dots, 2^{13}$  i  $2^{14}$ , što očigledno daje ekvidistantne vrednosti u logaritamskoj skali.

Osim pomenutih tipova podataka standard takođe podržava i uvođenje podataka tipa nabiranja (*enumerate*) kao i definisanje pomoćnih tipova podataka kao što su fizičke jedinice (*physical\_unit*) koje se izvode na bazi skupa osnovnih jedinica SI sistema (*International System of Units*).



Iako tipovi podataka predstavljaju ključni element za čuvanje specifikacija pretvarača u elektronskoj formi, veoma je važno obezbediti i odgovarajuću standardizovanu formu po kojoj se opisuje sadržaj TEDS memorije. Kao što je prethodno već rečeno, formalni opis sadržaja TEDS memorije čuva se u tekstualnim fajlovima koji se nazivaju šabloni (*templates*), koji su napisani na TDL jeziku (*Template Description Language*). TDL predstavlja programski jezik u formalnom smislu sa definisanim komandama kao i programskim strukturama za grananje i iteraciju. Takođe, jezik za opis šablona poseduje i striktno definisanu sintaksu koja je izložena u aneksu C IEEE 1451.4 standarda [21]. Međutim, iako struktura i sintaksa šablona podsećaju na standardni programski kod, TDL je mnogo jednostavniji od programskih jezika kao što su C, fortran, paskal i drugi, jer je konstruisan samo sa ciljem da se formalno opišu specifikacije pretvarača u elektronskoj formi.

U nastavku teksta je, na jednostavnom primeru, dat kratak prikaz osnova TDL jezika. Za ilustraciju, izabran je senzor struje sa Holovim efektom čiji je izlaz naponski signal. Radi jednostavnosti, za smeštanje u TEDS memoriju izdvojene su samo najvažnije karakteristike senzora. Na slici 4.12a prikazani su izdvojeni parametri iz kataloga proizvođača, dok je na slici 4.12b prikazan primer šablona koji bi mogao da se koristi za čuvanje elektronskih specifikacija u TEDS memoriji pretvarača.

<p>a)  </p> <p><b>Current Transducer HXS 10-NP/SP3</b>  Osnovne karakteristike proizvođača:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Merni opseg: -30 / +30 A</li> <li>• Osetljivost: 0,0625 V/A</li> <li>• Napajanje: +5 V</li> </ul> <p>c) <b>TEDS memorija, sekcija TEDS pretvarača:</b>  00000001 – Identifikator šablona (<i>Template ID</i>)  11001 – Minimalna struja -155*5*25=-30A  00110 – Maksimalna struja 0+5*6=30A  1000001101 – Osetljivost 0,01+0,0001*525=0,0625  000 – Nominalno napajanje "+5V"</p>	<p>b) Template 16382,8,1, "Strujni pretvarac sa naponskim izlazom"  // Definicija fizickih jedinica  Physical_Unit "A", (0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0) // A – SI jedinica  Physical_Unit "V", (0,0,0,2,1,-3,-1,0,0,0,1,0) // V = m<sup>2</sup> kg s<sup>-3</sup> A<sup>-1</sup>  Physical_Unit "V/A", (0,0,0,2,1,-3,-2,0,0,0,1,0) // V = m<sup>2</sup> kg s<sup>-3</sup> A<sup>-2</sup>  // Merni opseg  %MinPhysVal, "Minimalna struja", ID,5,ConRes,-155,5,"000","A"  %MaxPhysVal, "Maksimalna struja", ID,5,ConRes,0,5,"000","A"  // Osetljivost  %Sens, "Osetljivost", CAL,10,ConRes,0.01,0.0001,"0.0000","V/A"  // Nominalni napon napajanja  Enumerate NapajanjeEnum, "+5V", "+12V", "+/-12V", "15V", "+/-15V"  %ExiteAmpNom, "Nominalno napajanje", ID,3,NapajanjeEnum, "e", ""  EndTemplate</p>
--	--

Slika 4.12. Specifikacije senzora iz kataloga proizvođača (a), šablon (b) i sadržaj TEDS memorije senzora (c)

Treba napomenuti da se šablonima tipično ne opisuje jedan konkretan pretvarač već se izdvajaju karakteristike koje su bitne za opis familije srodnih

pretvarača. Konkretni podaci za određeni pretvarač se upisuju u TEDS memoriju na osnovu odgovarajućeg šablona familije kojoj pretvarač pripada.

Prva linija šablona na slici 4.12b predstavlja komandu *Template* kojom započinje svaki šablon, dok je odgovarajuća komanda za završetak šablona *EndTemplate*. Sintaksa *Template* komande je:

$$Template \langle kod\_proizvođača \rangle, \langle br\_bita \rangle, \langle ID\_šablona \rangle, \langle naslov \rangle$$

pri čemu argumenti komande imaju sledeća značenja.

$\langle kod\_proizvođača \rangle$  - Kôd proizvođača pretvarača. Kôd proizvođača dobija se od IEEE agencije za autorizaciju (*IEEE Registration Authority*). Vrednost „0“ odgovara standardnim IEEE šablonima, dok vrednost „16382“, koja je korišćena u okviru disertacije, odgovara korisničkim šablonima.

$\langle br\_bita \rangle$  - Broj bita koji se koristi za identifikaciju šablona. Standardni IEEE šabloni koriste 8 bita za identifikator (*Template ID*). Spisak šablona koji su postali sastavni deo standarda IEEE 1451.4 sa odgovarajućim identifikatorima već je prikazan u tabeli 4.6. U primeru sa slike 4.12b za identifikator se takođe koristi polje od 8 bita.

$\langle ID\_šablona \rangle$  - Identifikator šablona (*Template ID*). Ovo polje je prva informacija koja se očitava iz memorije pretvarača, preciznije rečeno, iz sekcije TEDS pretvarača. Kôd proizvođača i identifikator šablona na jedinstven način određuju vezu između odgovarajućeg šablona i sadržaja odgovarajuće TEDS sekcije u memoriji pretvarača. Na slici 4.12c prikazan je sadržaj TEDS memorije koji je kreiran za senzor sa slike 4.12a prema šablonu sa slike 4.12b.

$\langle naslov \rangle$  - Naslov predstavlja opisni identifikator šablona.

Sledeće tri komande u primeru na slici 4.12b su pomoćne i namenjene za definisanje fizičkih jedinica koje se koriste u šablonu. Fizičke jedinice se definišu na bazi odabranog skupa osnovnih jedinica prema sledećoj formuli:

$$jedinica = skala \cdot (\text{rad}^{e1} \cdot \text{sterad}^{e2} \cdot \text{m}^{e3} \cdot \text{kg}^{e4} \cdot \text{s}^{e5} \cdot \text{A}^{e6} \cdot \text{K}^{e7} \cdot \text{mol}^{e8} \cdot \text{cand}^{e9} + \text{offset}) \quad (4.5)$$

gde su *skala* i *offset* koeficijenti za skaliranje i ofset, a  $e_1, \dots, e_9$  eksponenti odgovarajućih osnovnih jedinica. Formalna sintaksa TDL naredbe za definisanje jedinice je:

$$Physical\_Unit \langle \text{ime} \rangle, (\langle \text{tip\_jedinice} \rangle, \langle e1 \rangle, \langle e2 \rangle, \dots, \langle e9 \rangle, \langle skala \rangle, \langle \text{offset} \rangle)$$

gde <„ime“ > predstavlja tekstualni naziv jedinice, <tip\_jedinice> je detaljnije opisan u standardu [21], a preostale vrednosti se definišane u skladu sa formulom (4.5).

Na primer, jedinica za napon („V“ – volt) se može izraziti preko osnovnih jedinica kao:

$$V = 1 \cdot (\text{rad}^0 \cdot \text{sterad}^0 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^1 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{K}^0 \cdot \text{mol}^0 \cdot \text{cand}^0 + 0)$$

te odgovarajuća definicija u šablonu ima oblik:

*Physical\_Unit* „V“, (0,0,0,2,1,-3,-1,0,0,0,1,0).

Najznačajnije komande TDL jezika su komande parametara (*property commands*). Ove komande predstavljaju centralni deo svakog šablona jer se njima opisuje format zapisa odabranih parametara iz kataloga proizvođača u TEDS memoriju pretvarača. Osnovna sintaksa komande parametara je:

%<oznaka>, <„opis“>, <nivo\_pristupa>, <tip\_podatka>, <format\_prikaza>, <„jedinica“>

pri čemu argumenti komande imaju sledeća značenja:

%<oznaka> - Oznaka parametra pretvarača. U aneksu B IEEE 1451.4 standarda definisan je skup najčešće korišćenih parametara, odnosno odgovarajućih rezervisanih oznaka. Na primer, %*MinPhysVal* predstavlja minimalnu vrednost mernog opsega senzora, %*MaxPhysVal* predstavlja maksimalnu vrednost mernog opsega, %*Sens* predstavlja oznaku za osetljivost senzora, dok je %*ExciteAmplNom* oznaka za nominalnu vrednost napona (ili struje) napajanja. Pri kreiranju šablona poželjno je koristiti standardizovane oznake, mada je standardom predviđena i mogućnost za definisanje novih oznaka, ukoliko odgovarajući parametar ne postoji.

<„opis“> - Tekstualni opis parametra.

<nivo\_pristupa> - Nivo pristupa, odnosno pravo na izmenu sadržaja parametra. Standard definiše tri nivoa pristupa: *ID*, *CAL* i *USR*. Nivo pristupa *ID* koristi se za parametre koje definiše proizvođač i koji se ne menjaju tokom vremena, kao što su merni opseg ili napon napajanja. Nivo pristupa *CAL* koristi se za parametre koji se tokom vremena mogu promeniti, kao što je osetljivost senzora. Ovi parametri tipično se ažuriraju u procesu kalibracije senzora. Nivo pristupa *USR* je korisnički, što znači da ove parametre može menjati krajnji korisnik. Tipičan predstavnik *USR*

parametra bi mogla biti lokacija pretvarača, koju upisuje korisnik u momentu montaže.

<tip\_podatka> - Tip podatka može biti bilo koji tip definisan standardom (najznačajniji tipovi definisani su u tabeli 4.7). Ovo polje sadrži više potpolja koja zavise od navedenog tipa podatka. Pošto većina tipova podataka može biti proizvoljne dužine, prvo potpolje uvek predstavlja broj bita koji će se koristiti za smeštanje u TEDS memoriju.

<format\_prikaza> - Specifikuje u kojoj formi program za očitavanje TEDS memorije treba da prezentuje podatke krajnjem korisniku. Na primer, format „0.0000“ definiše prikaz odgovarajućeg parametra u decimalnoj formi sa jednom cifrom levo i četiri cifre desno od decimalne tačke.

<„jedinica“> - Fizička jedinica prethodno definisana komandom *Physical\_Unit*.

Imajući u vidu prethodne definicije, u šablonu na slici 4.12b komanda:

```
%MinPhysVal,"Minimalna struja",ID,5,ConRes,-155,5,"000","A"
```

definiše minimalnu vrednost struje koju senzor može da meri, nivo pristupa *ID*, zauzeće memorije od 5 bita, tip podataka *ConRes* sa početnom vrednošću -155 i tolerancijom 5, prikaz pomoću tri cifre i ampere kao jedinicu u kojoj se zadaje vrednost parametra.

Naredna komanda u šablonu na slici 4.12b:

```
%MaxPhysVal,"Maksimalna struja",ID,5,ConRes,0,5,"000","A"
```

definiše maksimalnu vrednost struje koju senzor može da meri, sa sličnim argumentima s tim da početna vrednost za *ConRes* tip podatka iznosi 0.

Korišćenjem naredne dve komande u šablonu na slici 4.12b:

```
Enumerate NapajanjeEnum,"+5V","+12V","+/-12V","15V","+/-15V"
```

```
%ExiteAmplNom,"Nominalno napajanje",ID,3,NapajanjeEnum,"e",""
```

prvo se definiše novi tip nabrajanja *NapajanjeEnum* sa navedenim mogućim vrednostima napona napajanja, a zatim i parametar za nominalno napajanje senzora koji ima tip prethodno definisanog nabrajanja i zauzima 3 bita u memoriji (s obzirom da nabrajanje podržava 5 slučajeva, te je 3 bita dovoljno za opis parametra).

Često se šabloni prikazuju u sažetom obliku u formi tabele. Sažeta forma šablona strujnog senzora sa slike 4.12b, prikazana je u tabeli 4.8.

**Tabela 4.8.** Sažeti prikaz šablona

TDL komanda	Opis	Pristup	Biti	Tip podataka	Jedinice
Template	Template ID	-	8	-	-
%MinPhysVal	Minimalna struja	ID	5	ConRes(od -155 do 0, rez. 5)	A
%MaxPhysVal	Minimalna struja	ID	5	ConRes(od 0 do 155, rez. 5)	A
%Sens	Osetljivost	CAL	10	ConRes(od 0.01 do 0.1123, rez. 0.0001)	V/A
% ExiteAmplNom	Nominalno napajanje	ID	3	Enum: (+5V, +12V, +/-12V, 15V, +/-15V)	-

Tabelarni prikaz šablona je korišćen u glavi 5 pri opisu implementacije analognih *Plug and Play* senzora temperature i jonizujućeg zračenja.

#### **4.2.4. Primena i unapređenje standarda IEEE 1451.4**

U cilju iskorišćenja velikog potencijala standarda IEEE 1451.4 predložena su mnoga proširenja za povezivanje analognih senzora koji nisu obuhvaćeni standardnim šablonima. Neki autori su naglasili mogućnost korišćenja standardnih šablona za opis senzora koji nisu obuhvaćeni standardom [27, 29], dok su drugi autori predložili svoje originalne šablone [28 - 32]. Standardni način za smeštanje elektronskih specifikacija o gasnim sensorima u TEDS memoriju predložio je Ulivieri [27]. Format za smeštanje elektronskih specifikacija za elektronski senzor jezika i odgovarajući šablon za ovaj tip senzora opisao je Kim [28]. Napor da se koncept 1451.4 inteligentnih senzora primeni na kvazidigitalne senzore sa frekvencijski modulisanim izlazom opisao je Yurish [30].

Autor disertacije je razmatrao mogućnost primene standarda IEEE 1451.4 za realizaciju *Plug and Play* temperaturnog senzora na bazi platinskog otpornika PT 100 korišćenjem RTD šablona (*Teplate ID* = 37) [29]. Takođe, za opis senzora jonizujućeg zračenja predložio je odgovarajuće šablone za memorisanje elektronskih specifikacija za Gajger-Milerov (GM – *Geiger-Muller*) brojač [31], kao i za jonizacionu komoru [32], koji su opisani u petoj glavi.

Za razvoj IEEE 1451.4 kompatibilnih pretvarača od velikog je značaja postojanje odgovarajućih razvojnih sistema, koji bi omogućili testiranje pretvarača, kao i alata za kreiranje elektronskih specifikacija na bazi TDL jezika i upis/čitanje iz/u TEDS memorije. Razvojna platforma za 1451.4 pretvarače sa mešovitim interfejsom

klase 2, kao i odgovarajući *TEDS editor*, opisani su u radovima autora disertacije [33, 34], dok je platformu za razvoj pretvarača sa mešovitim interfejsom klase 1 predložio Song u [35].

Za mrežno povezivanje 1451.4 pretvarača potrebno je implementirati i odgovarajući mrežni procesor (NCAP). Potpuna implementacija mrežnog procesora na bazi standarda 1451.1 relativno je složena i podrazumeva kreiranje Bloka pretvarača (*Transducer Block*) koji ima ulogu drajvera za 1451.4 pretvarač. Jedno rešenje za realizaciju 1451.4 Bloka pretvarača u *LabVIEW* programskom okruženju dato je u [36]. Upkros činjenici da je implementacija potpuno funkcionalnog mrežnog procesora složen zadatak, u radu [37] predloženo je jedno jednostavno rešenje za implementaciju NCAP procesora sa minimalnim skupom funkcija neophodnih za pristup 1451.4 pretvaračima preko mreže. Princip povezivanja na bazi 1451.4 standarda pogodan je i za povezivanje analognih pretvarača korišćenjem najsavremenih tehnologija i koncepata kao što je Internet objekata (IoT – *Internet of Things*). U radu [38] prikazan je prototip senzora za merenje debljine leda u realnom vremenu, koji se zasniva na IoT konceptu i standardu IEEE 1451.4.

### **4.3. Zajedničke funkcije i protokoli prema 1451.0 standardu**

Standard IEEE 1451.0 [39] nastao je, hronološki gledano, nakon uvođenja familije IEEE 1451, sa ciljem da se poboljša interoperabilnost postojećih članova familije standarda. Standard uvodi skup zajedničkih osobina i funkcija kao i zajedničku TEDS strukturu koji zajedno čine hierarhijski viši logički sloj, dok se odgovarajući članovi familije standarda (IEEE 1451.2 – 1451.7) posmatraju kao niži fizički sloj. S obzirom da uvodi mnoge zajedničke elemente za sve članove IEEE 1451 familije, standard IEEE 1451.0 ima relativno složenu strukturu koja obuhvata sledeće celine.

- *Tipovi podataka* – Tipovi podataka koje uvodi ovaj standard uglavnom se poklapaju sa ostalim standardima, ali ipak postoje i izvesne razlike o kojima se u primeni, u procesu kodovanja i dekodovanja poruka, mora voditi računa.
- *Specifikacija osobina i funkcija inteligentnog pretvarača* – Standard nameće izvesne zajedničke funkcionalnosti koje svaki pretvarač mora da poseduje. Na

primer, uvode se standardni tipovi pretvarača, definišu se tipovi kanala, grupisanje kanala kao i interno adresiranje pojedinačnih kanala i grupa. Posebna pažnja posvećuje se odabiranju, trigger (*trigger*) funkcijama i sinhronizaciji. Takođe, standardizovani su i režimi rada pretvarača kao i odgovarajući sadržaj statusnog registra pretvarača.

- *Komande* – Komunikacija između 1451.0 sloja mrežnog procesora i 1451.0 sloja pretvaračkog modula (videti sliku 3.8) obavlja se posredstvom skupa standardizovanih komandi. Standardom je definisana struktura komandi i odziva na komande, kao i skup komandi koje mrežni procesor i pretvarački modul moraju da podrže. Skup komandi koje pretvarački modul mora da podrži zavisi od radnog režima u kom se pretvarač nalazi, te su stoga komande podeljene u odgovarajuće grupe.
- *Elektronske specifikacije (TEDS)* – Jedna od najznačajnijih novina koju uvodi ovaj standard je zajednički TEDS. Svaki pretvarački modul treba da obezbedi odgovarajući 1451.0 TEDS. Osim toga pretvarački modul treba da poseduje i „fizički“ TEDS (PHY TEDS) koji je definisan „fizičkim“ 1451.X standardom (1451.2 – 1451.7) kome pretvarački modul pripada. S obzirom da se 1451.4 TEDS po svojoj strukturi dosta razlikuje od elektronskih specifikacija preostalih članova familije 1451, postoje izvesni problemi koje je potrebno prevazići pri povezivanju 1451.4 pretvarača (što je detaljnije analizirano u petoj glavi).
- *Aplikacioni interfejs za komunikaciju sa modulima pretvarača (Module Communications API)* – S obzirom da se „fizičko“ povezivanje može ostvariti preko različitih 1451.X protokola, definisan je standardni komunikacioni interfejs koji povezuje komande i funkcije definisane u standardu 1451.0 sa odgovarajućim komandama i funkcijama definisanim u odgovarajućem 1451.X standardu. U ovom kontekstu se pod standardom 1451.X očigledno ne podrazumeva IEEE 1451.4 jer se u ovom standardu podaci prenose analognim putem, odnosno ne postoji odgovarajući skup komandi za razmenu podataka sa pretvaračima. Iz tog razloga, standard IEEE 1451.0 preporučuje da se povezivanje 1451.4 pretvarača vrši posredno korišćenjem 1451.2 (ili nekog drugog digitalnog „fizičkog“) interfejsa. Iako povezivanje 1451.4 pretvarača,

prema predlogu iz standarda IEEE 1451.0, predstavlja prihvatljivo i logično rešenje, ono nije bez nedostataka, posebno u pogledu složenosti. O efikasnijim metodama povezivanja analognih pretvarača detaljnije se govori u glavi 5.

- *Aplikacioni interfejs pretvarača za mrežno povezivanje (Transducer services API)* – Sa tačke gledišta povezivanja pretvarača u distribuirani sistem, potrebno je obezbediti zajednički skup mrežnih servisa, odnosno standardnih funkcija i odgovarajućih odziva, za udaljeni pristup pretvaračima preko mreže, bez obzira na „fizičku“ vezu koju pretvarač koristi za povezivanje sa NCAP uređajem. Aplikacioni interfejs omogućava kreiranje distribuirane aplikacije koja može da izvrši detekciju povezanih pretvaračkih modula, očitavanje TEDS memorije (u pojedinim slučajevima i izmenu tj. upis u TEDS) i na bazi očitanih podataka da izvrši automatsku konfiguraciju sistema, kao i čitanje mernih podataka sa senzora ili upis podataka za aktuator.
- *HTTP protokol za povezivanje sa pretvaračima* – Standard obezbeđuje i pojednostavljeni protokol za direktan pristup pretvaračkim modulima koji se zasniva na veoma popularnom i često korišćenom HTTP protokolu. Ovaj protokol predstavlja alternativni pristup za jednostavno povezivanje pretvarača na mrežu, umesto dosta složenog modela koji je definisan standardom IEEE 1451.1.

S obzirom na relativno veliku složenost standarda IEEE1451.0, u nastavku su izdvojeni samo najznačajniji i najrelevantniji detalji koji su korišćeni u disertaciji. Opširnija diskusija o pojedinim detaljima neophodnim za realizaciju pretvaračkih modula i mrežnog procesora u pogledu mrežnog povezivanja IEEE 1451.4 senzora data je u glavi 5.

#### **4.3.1. Zajedničke osobine i funkcije pretvaračkih modula**

U svakom od standarda 1451 familije definiše se uređaj koji služi za povezivanje grupe pretvarača na mrežni procesor. Ovakav uređaj se uopšteno naziva modul pretvarača – TIM (*Transducer Interface Modul*). S obzirom da se na jedan modul može povezati više pretvarača, svaki od povezanih pretvarača definiše jedan kanal pretvarača (*Transducer Channel*). Pojam kanal pretvarača obuhvata ne samo fizički



pretvarač, već i odgovarajuće pridružene elektronske komponente za digitalizaciju signala i funkcije za komunikaciju i prenos podataka. Osnovni podaci o kanalu pretvarača čuvaju se u odgovarajućoj sekciji TEDS memorije, dok se podešavanja promenljivih parametara kanala vrše odgovarajućim standardizovanim komandama koje šalje mrežni procesor. Standard IEEE 1451.0 precizira tri tipa kanala pretvarača: senzor, senzor događaja (*event sensor*) i aktuator.

Senzori se koriste za merenje fizičkih veličina i parametara i predstavljanje izmerenih veličina u digitalnoj formi. Senzori mogu da obavljaju svoju funkciju neprekidno, ili pak početak merenja može biti zadat posebnim okidačkim signalom – triggerom (*trigger*). Merni podaci privremeno se čuvaju u memoriji pretvaračkog modula i na zahtev, odnosno odgovarajuću komandu, prosleđuju se mrežnom procesoru.

Senzori događaja služe za detekciju promene stanja određene veličine ili parametra. Na primer, analogni senzori događaja uglavnom se koriste da detektuju trenutak kada posmatrani analogni signal pređe određenu zadatu vrednost praga. Često se koriste senzori događaja sa histerezisom koji zadaju dve vrednosti praga. Senzori događaja mogu biti vezani i za digitalne signale kada se detektuju odgovarajući nivoi signala ili pak usponske i silazne ivice signala i slično. Ovi senzori mogu da rade neprekidno, ili u skladu sa zadatim okidačkim signalom.

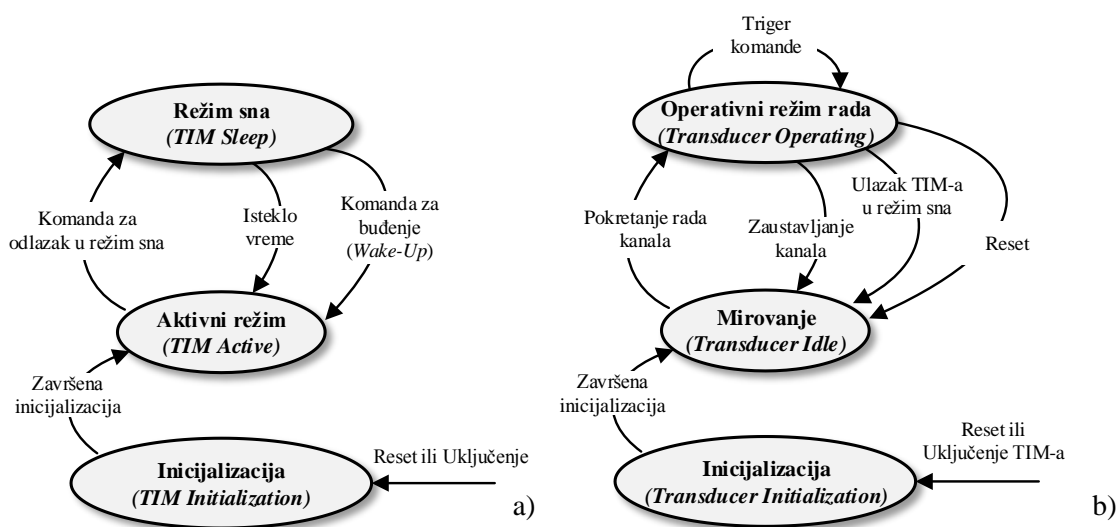
Uopšteno govoreći, aktuatori transformišu određenu fizičku veličinu na bazi primljenih digitalnih podataka. Po zadavanju trigger signala aktuator obavlja akcije koje menjaju datu fizičku veličinu u skladu sa trenutnim skupom ulaznih podataka. Pojedini aktuatori mogu obavljati svoju funkciju i bez prijema podataka. U tom slučaju aktuator ima unapred zadati skup podataka, odnosno odgovarajuće izlazne akcije koje se obavljaju po prijemu triggera.

Pojedini kanali pretvarača mogu biti grupisani u kontrolne ili vektorske grupe. Kontrolne grupe (*Control Groups*) koriste se kada je jedan kanal u grupi primarni, dok su ostali prateći. Na primer, jednu kontrolnu grupu pretvarača mogu činiti primarni senzor događaja i njemu pridruženi prateći analogni ili digitalni kanali. Vektorske grupe (*Vector Groups*) koriste se kada se udružuju ravnopravni kanali kao što su, na primer, ose koordinatnog sistema. Osim prethodno pomenutih, standard IEEE 1451.0 definiše i posebne grupe kanala koje se nazivaju proksi (*proxy*). Proksi je idejna konstrukcija za

grupisanje izlaza više senzora (ili ulaza aktuatora) u jedinstvenu celinu radi efikasnijeg prenosa podataka i istovremenog trigerovanja.

Svaki modul pretvarača poseduje tri osnovna režima rada: inicijalizacija (*TIM Initialization*), aktivni režim (*TIM Active*) i režim sna (*TIM Sleep*), kao što je prikazano na slici 4.13a. Po uključenju napajanja ili nakon resetovanja, modul pretvarača nalazi se u režimu inicijalizacije. Nakon inicijalizacije modul pretvarača prelazi u aktivno stanje koje predstavlja osnovni režim rada modula. Po potrebi, modul pretvarača može preći u režim sna po prijemu odgovarajuće komande (*TIM Sleep*). Modul pretvarača ostaje u režimu sna sve dok ne primi odgovarajuću komandu za buđenje (*Wake-up* ili sličnu komandu definisanu od proizvođača).

Kanal pretvarača takođe može da se nađe u tri režima rada: inicijalizacija (*Transducer Initialization*), mirovanje (*Transducer Idle*) i operativni režim rada (*Transducer Operating*) kao što je prikazano na slici 4.13b. Nakon inicijalizacije, kanal pretvarača nalazi se u stanju mirovanja. U stanju mirovanja tipično se šalju komande za konfiguraciju kanala, podešavanje trigera, tipa odabiranja i slično. Po prijemu komande *Transducer Channel Operate* kanal prelazi u operativni režim rada. Operativni režim tipično se koristi za slanje komandi za očitavanje mernih podataka sa senzora, odnosno slanje upravljačkih podataka ka aktuatorima ili za aktiviranje/deaktiviranje trigera.



Slika 4.13. Režimi rada za modul (a) i kanal (b) pretvarača [39]

Za svaki kanal pretvarača, odnosno za svaki senzor ili aktuator, može se definisati više različitih načina odabiranja. Odabiranje može biti inicirano trigerom ili se može vršiti kontinuirano u slobodnom režimu (*free-running*). Takođe, podaci dobijeni sa senzora ili podaci namenjeni aktuatorima, mogu biti baferovani ili ne. Treba voditi računa i da se senzori i aktuatori različito ponašaju za isti način odabiranja. U cilju pojednostavljenja opisa, objašnjen je samo najjednostavniji tip odabiranja – neposredno odabiranje (*immediate*). Kod kanala senzora neposredno odabiranje inicira se komandom mrežnog procesora (standardne komande opisane su u poglavlju 4.3.3), a dobijeni podaci šalju se nazad u okviru odziva na poslatu komandu. Kod aktuatora, međutim, neposredno odabiranje vrši se tako što mrežni procesor zajedno sa komandom šalje i podatke, a sama komanda ujedno služi i kao triger za početak akcije. Različiti metodi trigerovanja i odabiranja kao i načini organizacije i prenosa podataka prevazilaze okvire ovog kratkog pregleda standarda i detaljno su objašnjeni u [39].

Pretvarački moduli koji zadovoljavaju standard IEEE 1451.0 takođe moraju da poseduju i odgovarajuće statusne registre. Postoje dva 32-bitna statusna registra: registar stanja (*Condition Register*) i registar događaja (*Event Register*). Registar stanja sadrži tekuće stanje odgovarajućih parametara čiji se status prati. Sadržaj ovog registra može se pročitati odgovarajućom komandom (videti 4.3.3). Registar događaja prati iste parametre kao i registar stanja, odnosno prati dešavanja u samom registru stanja. Pojedinačni bit registra događaja setovan je, ako je u proteklom periodu (počev od poslednjeg očitavanja ili brisanja sadržaja registra događaja) došlo do setovanja odgovarajućeg bita u registru stanja. Na primer, ako modul pretvarača primi pogrešnu komandu, bit 2 statusnog registra stanja se setuje. Usled toga bit 2 statusnog registra događaja takođe je setovan. S obzirom da prijem pogrešne komande ne predstavlja trajno stanje, bit 2 registra stanja automatski se resetuje. Međutim, odgovarajući bit registra događaja ostaje setovan sve dok se ne izvrši očitavanje ili brisanje ovog registra.

Registri stanja i događaja koriste se za pretvarački modul kao celinu, ali i za svaki pojedinačni kanal pretvarača. Bit 0 statusnog registra ima posebnu ulogu da registruje zahtev za opsluženje (*service request*). Naime, svaki statusni registar događaja prati i odgovarajući 31-bitni registar maskiranja (bit 0 se ne može maskirati). Upisivanje logičke jedinice u neki bit registra maskiranja omogućava da se usled pojave odgovarajućeg događaja, odnosno setovanja odgovarajućeg bita registra događaja,

automatski setuje i statusni bit 0. Setovanje statusnog bita 0 ma kog kanala, takođe setuje i bit 0 statusnog registra modula pretvarača. Mrežni procesor tipično periodično očitava statusne registre modula i kanala pretvarača kako bi utvrdio da li postoji zahtev za opsluženje. Takođe, standardom je predviđena i mogućnost konfiguracije modula pretvarača da kreira poruku sa sadržajem registra događaja i izvrši automatsko slanje poruke mrežnom procesoru kada se registruje odgovarajući zahtev za opsluženje.

### **4.3.2. Elektronske specifikacije pretvarača**

Zajedničke elektronske specifikacije (TEDS) još jedna su karakteristika koju definiše standard IEEE 1451.0. Kao i ostali članovi familije 1451, i ovaj standard preporučuje smeštanje podataka o pretvaraču u odgovarajućoj formi u EEPROM memoriju pretvaračkog modula. Elektronske specifikacije moguće je čuvati i u vidu fajlova (virtuelni TEDS) u bilo kom delu distribuiranog merno-upravljačkog sistema ukoliko je njihovo čuvanje u memoriji pretvarača, iz ma kog razloga, nepraktično. U tom slučaju pretvarački modul kao minimum neophodnih informacija mora da obezbedi univerzalni identifikator UUID (*Universal Unique Identifier*). UUID je veličine 10 bajtova, a struktura i sadržaj pojedinih polja definisani su standardom kako bi se obezbedila jedinstvenost ovog identifikatora na globalnom nivou.

S obzirom da standard IEEE 1451.0 ima za cilj da obezbedi univerzalnost za sve tipove pretvarača koji se zasnivaju na specifičnim standardima u okviru 1451 familije, broj različitih vrsta sekcija koje TEDS memorija može da sadrži je veliki, a njihova struktura može biti relativno složena. Međutim, sledeće četiri TEDS sekcije smatraju se obaveznim.

- *Meta-TEDS*. Ova sekcija obezbeđuje osnovne informacije o pretvaračkom modulu kao što su: jedinstveni identifikator modula (UUID), broj kanala pretvarača koje modul poseduje, podaci o kontrolnim, vektorskim i proksi grupama kanala i određena vremenska ograničenja (maksimalno vreme odziva na komandu, vreme potrebno za autotestiranje modula i slično). Ako bi se izvršilo poređenje sa TEDS sekcijama standarda IEEE 1451.4, meta-TEDS ima sličnu ulogu kao i osnovni TEDS kod 1451.4 pretvarača.

- *TEDS kanala (Transducer Channel TEDS)*. TEDS kanala predstavlja formatizovani skup parametara koji su neophodni za konfigurisanje sistema i razmenu podataka sa jednim kanalom pretvarača. U poređenju sa 1451.4 pretvaračima, TEDS kanal bi se mogao donekle uporediti sa ulogom koju ima sekcija TEDS pretvarača. Za razliku od 1451.4 pretvarača kod kojih je struktura parametara koji opisuju kanal pretvarača definisana šablonima, skup parametara koji opisuju kanal pretvarača prema standardu IEEE 1451.0 unapred je precizno definisan. Na primer, jedan kanal senzora između ostalog obuhvata definisanje fizičke jedinice, mernog opsega i merne nesigurnosti senzora, ali i podatke o načinu odabiranja, trigerovanja i prenosa podataka.
- *TEDS korisničkih imena (User's Transducer Name TEDS)*. Ova sekcija TEDS memorije namenjena je za čuvanje korisničkih imena pretvaračkog modula i kanala pretvarača. Specifikacija korisničkog imena pretvarača, prema standardu 1451.0, smatra se obaveznom, dok je specifikacija imena pojedinih kanala pretvarača opcionalna.
- *Fizički TEDS (PHY TEDS)*. Fizički TEDS vezan je za „fizički“ interfejs odnosno odgovarajući IEEE 1451.X standard koji se koristi za povezivanje pretvaračkog modula. Standard IEEE 1451.0 obezbeđuje mehanizme za pristup ovim podacima, ali su detaljne specifikacije strukture i organizacije podataka u fizičkoj TEDS sekciji definisane odgovarajućim IEEE 1451.X standardom.

Osim obaveznih sekcija, TEDS pretvaračkog modula može da sadrži i sledeće opcione sekcije.

- *Calibration TEDS*. Obezbeđuje kalibracione konstante potrebne za konverziju vrednosti merne veličine koja se očitava na izlazu senzora u odgovarajuću fizičku veličinu koja se meri (za aktuatorne proces konverzije je suprotan).
- *Frequency Response TEDS*: Obezbeđuje informacije o frekvencijskom odzivu pretvarača koji se čuvaju u formi tabele.
- *Transfer Function TEDS*: Koristi se za definisanje frekvencijskog odziva preko specifikacije nula i polova funkcije prenosa pretvarača.

- *Text-based TEDS*: Postoji čitava familija elektronskih specifikacija koje se zadaju tekstualno i njihova struktura nije striktno definisana. Na ovaj način definišu se: *Commands TEDS*, *Identification TEDS* i *Geographic Location TEDS*.
- *Commands TEDS*: Ova sekcija obezbeđuje proizvođačima modula odgovarajući mehanizam da definišu nove komande koje nisu specifikovane standardom.
- *Identification TEDS*: Sadrži tekstualne informacije o pretvaračkom modulu, kanalu pretvarača ili kalibraciji.
- *Geographic Location TEDS*: Koristi se za geografsko lociranje pretvarača. Pretpostavlja se da proizvođač modula treba da obezbedi odgovarajući memorijski prostor, dok krajnji korisnik treba da upiše realne informacije o poziciji pretvarača.
- *Units Extension TEDS*: U pojedinim slučajevima, posebno kod hemijskih senzora, osim fizičke jedinice (na primer, za količinu određene hemikalije u uzorku) potrebno je specifikovati i dodatne informacije (na primer, koja je vrsta hemikalije u pitanju).
- *End User Application Specific TEDS*: Omogućava krajnjim korisnicima da u slučaju potrebe smeštaju određene informacije u memoriju pretvarača u slobodnoj formi koja nije definisana standardom.
- *Manufacturer Defined TEDS*: TEDS sekcija koju definiše proizvođač pretvaračkog modula. Sadržaj ove memorijske sekcije nije definisan standardom.

Brojni primeri konstrukcije 1451.0 TEDS specifikacija mogu se naći u literaturi. Na primer, nova upravljačka arhitektura i elektronske specifikacije za realizaciju jedne klase 1451.0 kompatibilnog DC-DC konvertora opisana je u [40]. Primena 1451.0 standarda za implementaciju sistema za nadzor energetskih vodova za snabdevanje električnom energijom (*Sensor-Ball*) predložena je u [41]. Inteligentni sistem za nadzor saobraćaja na putevima (*VisioWay*) i odgovarajući TEDS kompajler kompatibilan sa standardom 1451.0 predstavljen je u [42].

### 4.3.3. Osnovne komunikacione komande pretvaračkih modula

Komunikacija između 1451.0 servisnog sloja mrežnog procesora i odgovarajućeg 1451.0 sloja pretvaračkog modula odvija se posredstvom komandi koje su definisane standardom. Svaka komanda ima zaglavlje kojim se specifikuje odredišna adresa, klasa i funkcija komande kao i dužina parametara koji se šalju komandom (slika 4.14a).

Pojedine komande zahtevaju odgovor koji se šalje prema strukturi prikazanoj na slici 4.14b. Polje *Succes/Fail Flag* ima vrednost 0 ako je došlo do greške, a nenultu vrednost ako je komanda uspešno izvršena. U pojedinim slučajevima može se dozvoliti da pretvarački modul samoinicijativno šalje određene podatke mrežnom procesoru ili drugim pretvaračkim modulima. Na primer, ukoliko se u servisnom registru pojavi zahtev za opsluživanjem pretvaračkog modula, modul može poslati mrežnom procesoru sadržaj statusnog registra događaja, pod uslovom da je to prethodno omogućeno. Struktura poruke koju inicira pretvarački modul prikazana je na slici 4.14c.

Polje	Dužina
Odredišna adresa (broj kanala)	2B
Klase komande	1B
Funkcije komande	1B
Dužina polja za parametre	2B
Parametri funkcije	Određeno pethodnim poljem

a)

Polje	Dužina
<i>Succes/Fail Flag</i>	1B
Dužina polja za parametre	2B
Parametri odziva	Određeno pethodnim poljem

b)

Polje	Dužina
Izvorišna adresa (broj kanala)	2B
Klase komande	1B
Funkcije komande	1B
Dužina polja za parametre	2B
Parametri funkcije	Određeno pethodnim poljem

c)

**Slika 4.14.** Struktura komande (a), odgovora na komandu (b) i poruke koju inicira pretvarački modul (c)

Adresno polje koje se javlja u strukturi komande specifikuje odredišnu adresu u okviru pretvaračkog modula. Na primer, adresa 0 koristi se za pretvarački modul kao celinu, dok se opseg adresa od 1 do 7FFF<sub>hex</sub> koristi za adresiranje pojedinačnih kanala. Opseg adresa od 8000<sub>hex</sub> do FFFE<sub>hex</sub> koristi se za adresiranje grupa kanala, a adresa FFFF<sub>hex</sub> se koristi za adresiranje svih kanala pretvaračkog modula. Treba imati u vidu da je za prenos komandi preko „fizičkog“ interfejsa potrebno posedovati odgovarajuću adresu modula pretvarača u skladu sa korišćenim 1451.X standardom. Način na koji se

dobija „fizička“ adresa modula definisan je u okviru aplikacionog interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača (videti poglavlje 4.3.4).

Komanda se definiše korišćenjem dva 8-bitna polja: klasa i funkcija. Klasa definiše kojoj kategoriji komanda pripada na osnovu radnih režima u kojima se modul ili kanal pretvarača mogu naći. Polje funkcije zapravo definiše konkretnu komandu u okviru zadate klase. Standardom je definisano sedam klasa:

- *Komande zajedničke za modul i kanal pretvarača.* U ovu klasu spadaju komande koje se odnose na upis i čitanje podataka iz TEDS memorije kao i skup komandi za rad sa statusnim registrima modula i kanala.
- *Komande za kanal u režimu mirovanja.* Komande koje su namenjene za konfiguraciju kanala pretvarača. Obuhvataju komande za definisanje načina odabiranja, trigerovanja i slanja podataka.
- *Komande za kanal u operativnom režimu rada.* Standard definiše četiri komande namenjene za operativni rad kanala pretvarača: komandu za očitavanje podataka, komandu za upisivanje podataka, komandu za zadavanje i odustajanje od trigera.
- *Komande za kanal u operativnom radnom režimu ili režimu mirovanja.* Ovaj skup komandi ne zavisi od režima rada kanala, odnosno mogu se slati adresiranom kanalu pretvarača i u stanju mirovanja i u operativnom režimu rada. Dve najistaknutije komande su svakako komanda za prebacivanje kanala iz režima mirovanja u operativni režim, kao i komanda koja proizvodi suprotno dejstvo, odnosno stavlja kanal u stanje mirovanja. Osim toga, u ovu klasu spadaju i komanda za dozvolu ili zabranu trigerovanja, kao i komande za očitavanje parametara za konfiguraciju kanala koji su prethodno postavljeni komandama za kanal u režimu mirovanja.
- *Komande za modul u režimu sna.* Jedina komanda koja je definisana u režimu sna je komanda za buđenje tj. za prelazak iz režima sna u aktivni režim.
- *Komande za modul u aktivnom režimu rada.* Ove komande omogućavaju memorisanje i rekonstrukciju prethodno memorisanog stanja u kom se nalazio pretvarački modul kao i svi njemu pridruženi kanali. Takođe, u ovu grupu spadaju i komande za prevođenje modula u režim sna, za očitavanje oznake



verzije modula koji definiše proizvođač, kao i za očitavanje verzije IEEE 1451.0 standarda koji pretvarački modul podržava.

- *Komande za modul u proizvoljnom režimu rada.* Jedina komanda ove klase je komanda za resetovanje modula pretvarača i svih pridruženih kanala.

Iako komande predstavljaju osnovni način komunikacije između mrežnog procesora i pretvaračkih modula, treba imati u vidu da krajnji korisnici koji pristupaju pretvaračima preko mreže posredstvom mrežnog procesora ne mogu direktno da pozivaju ove komande. Umesto direktnog pozivanja komandi, krajnjim korisnicima su na raspolaganju funkcije definisane u okviru aplikativnog interfejsa za mrežne servise pretvarača (*Transducer Services API*) koje su opisane u poglavlju 4.3.5.

Sa druge strane, da bi se komande prenele od mrežnog procesora do modula pretvarača preko 1451.X interfejsa, neophodno je obezbediti odgovarajuće mehanizme za detekciju interfejsa, kao i za ispravno adresiranje i uspostavljanje komunikacionog kanala za transport 1451.0 poruka kroz „fizički“ medijum. Ove funkcije definisane su u okviru aplikativnog interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača (*Module Communications API*) kojim se bavi naredno poglavlje.

#### **4.3.4. Interfejs za komunikaciju sa modulima pretvarača**

Zajedničke komande, protokoli i TEDS strukture koje su definisane u standardu IEEE 1451.0 dovele su do uspostavljanja neophodnog nivoa kompatibilnosti i interoperabilnosti između postojećih standarda IEEE 1451.X. S obzirom na velike razlike u standardima IEEE 1451.X, uvođenje standarda IEEE 1451.0 takođe dovodi i do usložnjavanja procesa komunikacije između mrežnog procesora i pretvaračkih modula. Složenost komunikacije može se sagledati kroz sledeće aspekte.

- Potrebno je obezbediti mehanizme za prenos poruka samo u jednom smeru (ako se šalje komanda od mrežnog procesora prema pretvaračkom modulu koja ne zahteva odziv, na primer trigger signal) ili u oba smera (ako se šalje komanda od mrežnog procesora prema pretvaračkom modulu koja zahteva odziv, na primer očitavanje mernih podataka).
- Podrška za *Plug and Play* koncept. U najjednostavnijim slučajevima pretvarač može biti fiksno povezan na pretvarački modul i na mrežni procesor, ali u

opštem slučaju mora se obezbediti dinamičko povezivanje modula pretvarača na mrežni procesor.

- Veza između mrežnog procesora i modula pretvarača može biti od tačke do tačke (*point-to-point*) ili mrežna tj. takva da je više modula pretvarača povezano preko istog komunikacionog medijuma.
- Komunikacija može biti takva da direktno komuniciraju dva uređaja (jedan na jedan) ili takva da jedan uređaj inicira komunikaciju sa grupom uređaja.
- U pojedinim slučajevima, potrebno je obezbediti odgovarajući kvalitet servisa tj. rezervisati odgovarajuće resurse komunikacionog medijuma (posebno kod bežičnih medijuma za prenos).
- Pojedine 1451.0 komande ili odgovarajući odziv na komandu mogu biti duži od maksimalne dužine poruka koju podržava „fizički“ interfejs 1451.X , te je stoga potrebno obezbediti mehanizam za segmentaciju poruka.

Da bi se omogućio univerzalni prenos 1451.0 poruka i istovremeno obuhvatili svi prethodno navedeni aspekti u komunikaciji, definisan je aplikacioni interfejs za komunikaciju sa modulima pretvarača. Ovaj interfejs realizuje se i na mrežnom procesoru i na modulu pretvarača i sastoji se iz tri osnovna interfejsa: *Registration*, *Comm* i *Receive*. Neki od ovih interfejsa logički pripadaju 1451.0 sloju, dok drugi logički pripadaju 1451.X sloju, odnosno predstavljaju nadogradnju odgovarajućeg standarda IEEE 1451.X.

- *Registration* interfejs logički pripada 1451.0 sloju. Funkcije ovog interfejsa pozivaju se kada 1451.X sloj detektuje promenu u povezanim modulima, na primer, ako se poveže novi modul ili ako se isključi neki od povezanih modula ili pretvarača.
- *Comm* interfejs logički pripada 1451.X sloju. Funkcije ovog interfejsa poziva 1451.0 sloj u cilju slanja poruka preko odgovarajućeg „fizičkog“ 1451.X interfejsa.
- *Receive* interfejs logički pripada 1451.0 sloju. Funkcije ovog interfejsa pozivaju se kada 1451.X sloj primi poruku i treba da izvesti 1451.0 logički sloj o prijemu.

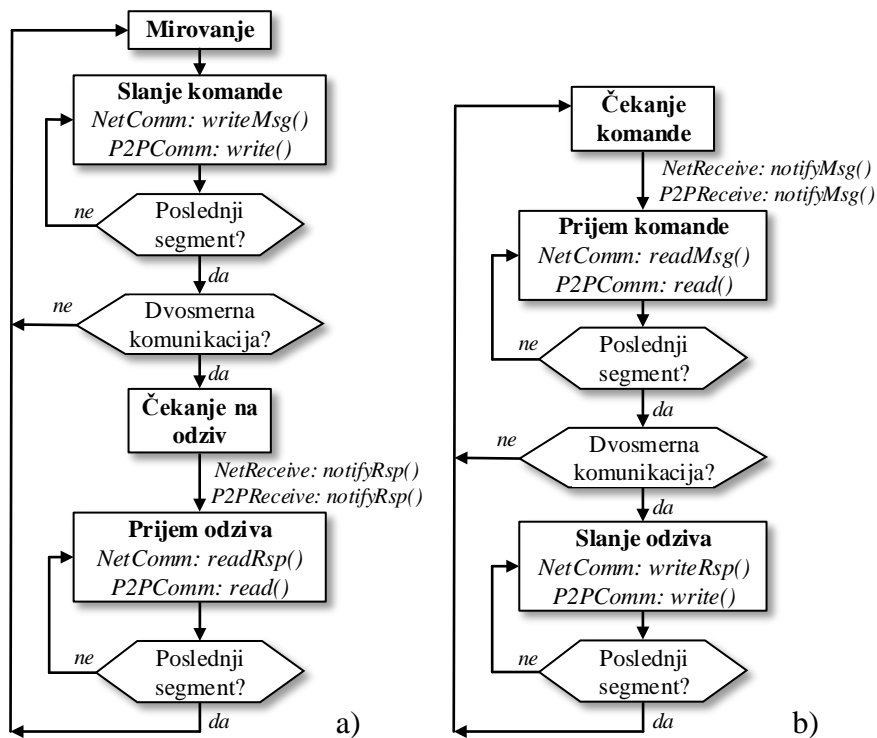
Svaki od ova tri osnovna interfejsa dalje se može podeliti na dva nova interfejsa u zavisnosti od toga da li je uspostavljena veza od tačke do tačke (P2P) ili je u pitanju mrežni interfejs (*Net*). Na taj način dobija se ukupno šest interfejsa: *P2PRegistration*, *NetRegistration*, *P2PComm*, *NetComm*, *P2PReceive* i *NetReceive*. S obzirom da veza od tačke do tačke podrazumeva uspostavljanje jedan na jedan komunikacije između mrežnog procesora i pretvaračkog modula, P2P interfejsi po prirodi su značajno jednostavniji od odgovarajućih *Net* interfejsa.

Nakon povezivanja određenog pretvaračkog modula, 1451.X sloj mrežnog procesora dužan je da detektuje povezani modul i registruje njegovo postojanje u 1451.0 logičkom sloju. Ovim putem obezbeđuje se realizacija koncepta *Plug and Play*. Oba interfejsa, *P2PRegistration* i *NetRegistration*, poseduju dve funkcije za registraciju: *registerModule()* i *registerDestination()*. Funkcija *registerModule()* koristi se za registraciju 1451.X interfejsa pri čemu mrežni procesor dodeljuje interfejsu jedinstven identifikacioni broj *moduleId*. Funkcija *registerDestination()* koristi se za registraciju svakog novog TIM modula, pri čemu se kod *Net* interfejsa, koji podržava povezivanje više modula, dobija i jedinstvena identifikacija *destId*. S obzirom da kod P2P komunikacije postoji samo jedan određeni TIM modul, *destId* se ne koristi. Treba napomenuti da se proces registracije interfejsa i modula pretvarača odvija samo u mrežnom procesoru i da pretvarački moduli *Net* interfejsa koriste rezervisanu vrednost 1 kao *destId* da bi označili da se poruka šalje mrežnom procesoru.

Kod *Net* interfejsa mrežni procesor može paralelno da komunicira sa više modula pretvarača preko istog medijuma za prenos poruka. Iz tog razloga, pre početka komunikacije sa određenim modulom, 1451.0 logički sloj mrežnog procesora poziva funkciju *open()* koja pripada *NetComm* interfejsu. Kao rezultat otvaranja komunikacionog kanala dobija se jedinstveni identifikator *commId* koji se koristi pri daljem slanju komandi i prijemu odziva odgovarajućeg modula. Identifikator *commId* praktično se može posmatrati kao identifikator komunikacione sesije.

Nakon uspostavljanja komunikacionog linka, mrežni procesor može da inicira slanje komande preko odgovarajućeg IEEE 1451.X interfejsa. Uprošćeni algoritam za slanje komande i prijem eventualnog odziva prikazan je na slici 4.15a.

Proces slanja započinje pozivom funkcije *write()* za *P2PComm*, odnosno *writeMsg()* za *NetComm* interfejs. Ukoliko je komanda suviše dugačka za prenos preko fizičkog medijuma, deli se na više segmenata, a slanje se ponavlja sve dok se ne pošalje i poslednji segment. Za jednosmernu komunikaciju, proces se završava slanjem komande. Međutim, kod dvosmerne komunikacije potrebno je sačekati odziv od modula pretvarača. Kada fizički interfejs primi odziv od pretvaračkog modula poziva se funkcija *notifyRsp()* koja pripada *P2PReceive* odnosno *NetReceive* interfejsu (funkcija ima isto ime u oba interfejsa). Po prijemu obaveštenja da je odziv stigao, 1451.0 logički sloj očitava podatke pozivom funkcije *read()* za *P2PComm*, odnosno *readRsp()* za *NetComm* interfejs. Očitavanje se ponavlja sve dok se ne pročita i poslednji segment odziva.



Slika 4.15. Algoritam za slanje komande i prijem odziva za mrežni procesor (a) i prijem komande i slanje odziva za pretvarački modul (b)

Prijem komande se odvija po analognom algoritmu koji je prikazan na slici 4.15b. Po prijemu komande fizički interfejs obaveštava 1451.0 logički sloj da je pristigla poruka pozivom funkcije *notifyMsg()*. Poruka se očitava pozivom funkcije *read()* za *P2PComm*, odnosno *readMsg()* za *NetComm* interfejs, sve dok se ne pročita i

poslednji segment. Ukoliko je potrebno poslati odziv na primljenu komandu, 1451.0 logički sloj poziva funkciju *write()* za *P2PComm*, odnosno *writeRsp()* za *NetComm* interfejs, sve dok se ne pošalje i poslednji segment.

#### 4.3.5. Interfejs za mrežne servise pretvarača

Za realizaciju distribuiranih merno-upravljačkih sistema, mrežni servisi pretvarača obezbeđuju interfejs za pristup pretvaračima preko mreže. Mrežni servisi obuhvataju funkcije klasifikovane u šest interfejsa kao što je dato u tabeli 4.9.

Interesantno je naglasiti da interfejse mrežnih servisa implementira samo mrežni procesor, a ne i pretvarački moduli. Mrežni procesor ima ulogu da korisničke zahteve, koji dospevaju preko mreže posredstvom mrežnih servisa, prevede u odgovarajuće komande za pretvaračke module ili kanale i da ih zatim transportuje do zahtevanog odredišta pozivom funkcija aplikacionog interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača.

**Tabela 4.9.** Aplikacioni interfejs za mrežne servise

Interfejs	Opis
<i>TimDiscovery</i>	Funkcije za otkrivanje pretvaračkih modula i odgovarajućih kanala pretvarača koji su povezani na mrežni procesor.
<i>TransducerAccess</i>	Funkcije za uspostavljanje konekcije i prenos podataka sa kanalima pretvarača.
<i>TransducerManager</i>	Naprednije funkcije za pristup modulima i kanalima pretvarača. Obuhvata funkcije za zadavanje triggera, zaključavanje i otključavanje pristupa kanalu kao i funkcije za slanje proizvoljne 1451.0 komande modulima ili kanalima pretvarača.
<i>TedsManager</i>	Funkcije za upis i čitanje sadržaja TEDS memorije.
<i>CommManager</i>	Sadrži samo jednu funkciju za informisanje krajnjeg korisnika o tome koji tip komunikacionog kanala (P2P ili <i>Net</i> ) koristi određeni pretvarački modul.
<i>AppCallback</i>	Napredne funkcije za podršku neblokirajućim operacijama za kontinualni prenos podataka između korisničke aplikacije i pretvarača.

S obzirom da detaljniji pregled standarda IEEE 1451.0 izlazi iz okvira disertacije, funkcije interfejsa za mrežne servise predstavljene su kroz jedan jednostavan primer upotrebe ovih funkcija od krajnjeg korisnika. Na početku, može se pretpostaviti da je veza između mrežnog procesora i pretvaračkih modula uspostavljena korišćenjem interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača. U tom slučaju mrežni procesor poseduje listu svih povezanih modula i kanala, te krajnji korisnik može pozivati funkcije *TimDiscovery* interfejsa za dobijanje informacija o povezanim pretvaračima. Pozivom funkcije *reportCommModule()* dobija se spisak komunikacionih interfejsa

*moduleIds* koje podržava mrežni procesor. Za željeni komunikacioni interfejs sa spiska *moduleIds* može se pozvati funkcija *reportTims()* koja kao rezultat vraća spisak pretvaračkih modula *timIds* povezanih preko zadatog interfejsa. Za izabrani pretvarački modul sa spiska *timIds* korisnik poziva funkciju *reportChannels()* i dobija spisak raspoloživih kanala pretvarača *channelIds*. Na osnovu prethodno dobijenih informacija krajnji korisnik može da izabere željeni pretvarač, odnosno kanal pretvarača sa spiska *channelIds* i da pokrene komunikaciju.

Prva funkcija koja se poziva za željeni kanal je *open()* koja pripada *TransducerAccess* interfejsu. Ovom funkcijom uspostavlja se jedinstveni komunikacioni kanal i dobija odgovarajući identifikacioni broj *transCommId* koji se dalje koristi pri pozivu ostalih funkcija interfejsa. Ukoliko komunikacioni interfejs za povezivanje modula pretvarača podržava kvalitet servisa, umesto funkcije *open()* može se koristiti *openQoS()* kojom se ujedno zadaje i željeni kvalitet servisa za komunikacioni kanal. Identifikacioni broj komunikacionog kanala validan je sve dok se komunikacioni kanal ne zatvori pozivom funkcije *close()*. Po uspostavljanju komunikacionog kanala, može se početi sa očitavanjem podataka iz senzorskog kanala pozivom funkcije *readData()* ili upisom podataka u aktuatorski kanal pozivom funkcije *writeData()*. Ove funkcije blokiraju pozivaoca sve dok se ne prosledi rezultat operacije. Za složenije oblike komunikacije, neblokirajuće pozive i druge operacije, na raspolaganju su dodatne funkcije *TransducerAccess* i *TransducerManager* interfejsa.

Vrlo značajan korak u komunikaciji sa pretvaračima predstavlja i očitavanje elektronskih specifikacija. Aplikacioni interfejs *TedsManager* poseduje funkcije *readTeds()* i *writeTeds()* za upis, odnosno čitanje TEDS podataka. Zbog povećanja efikasnosti u komunikaciji, mrežni procesor najčešće vrši privremeno skladištenje (keširanje) elektronskih specifikacija povezanih pretvarača, te prethodno pomenute funkcije vrše očitavanje i upis u keš memoriju mrežnog procesora. Za očitavanje i upis podataka direktno u memoriju pretvarača, koriste se funkcije *readRawTeds()* i *writeRawTeds()*.

#### **4.3.6. Mrežno povezivanje na bazi HTTP protokola**

Prethodno opisane funkcije aplikacionog interfejsa za mrežne servise pretvarača dostupne su krajnjim korisnicima preko proizvoljne mreže, ali je još

potrebno obezbediti i mrežne mehanizme za poziv ovih funkcija. Na primer, jedan od načina da se obezbedi globalna mrežna vidljivost i dostupnost funkcija aplikacionog interfejsa za mrežne servise pretvarača jeste primena standarda IEEE 1451.1. Međutim, kao što je već prethodno navedeno, primena standarda IEEE 1451.1 relativno je komplikovan zadatak i u pojedinim slučajevima doprinosi nepotrebnom usložnjavanju sistema. Za jednostavnije sisteme, posebno ako se radi o mernim sistemima koji su distribuirani na veoma širokom geografskom prostoru i kojima se pristupa preko Interneta, dovoljno je obezbediti jednostavan mehanizam za pristup podacima sa senzora koji se bazira na HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) protokolu.

Protokol HTTP predstavlja klijent-server protokol, koji omogućava da dva udaljena procesa komuniciraju preko Interneta. Klijent-server model može se uporediti sa modelom komunikacije između krajnjeg korisnika i IEEE 1451.0 mrežnog procesora. Mrežni procesor ima ulogu servera jer obezbeđuje podatke za krajnje korisnike, dok krajnji korisnik ima ulogu klijenta, s obzirom da šalje komande i prima podatke od mrežnog procesora. Klijent-server komunikacija zasniva se na zahtevima koje šalje klijent (*HTTP Client Request*) i odgovorima koje šalje server (*HTTP Server Response*).

- *HTTP Client Request*: klijent šalje zahtev (*HTTP Request*), formatiran na osnovu HTTP standarda. Ova poruka definiše kojim resursima klijent želi da pristupi, a može da sadrži i informacije koje je potrebno proslediti serveru.
- *HTTP Server Response*: server čita i tumači HTTP zahtev koji je dobio od klijenta. Na osnovu zahteva, server odgovara i formira HTTP odgovor (*HTTP Response*) koji šalje klijentu. Tom porukom potvrđuje se da li je zahtev bio uspešno primljen. Osim toga, odgovor može sadržati informacije o resursima koje je klijent zahtevao.

HTTP protokol definiše osam funkcija, kojima se opisuje akcija ili operacija namenjena resursu koji je specifikovan u zahtevu klijenta: GET, POST, HEAD, PUT, DELETE, TRACE i OPTIONS. Aplikacioni interfejs u standardu IEEE 1451.0 (IEEE 1451.0 HTTP API) koristi samo GET i POST zahteve.

- GET: vraća bilo koju informaciju koja se nalazi u zahtevu klijenta. Interakcija putem GET zahteva podseća na pristup bazi podataka odnosno na operacije

čitanja ili pretraživanja. Drugim rečima, GET se koristi za dobijanje podataka od servera, tj. za čitanje podataka iz kanala pretvarača ili iz TEDS memorije.

- POST: kod HTTP protokola na ovaj način se šalju podaci složenije strukture. U kontekstu primene u aplikativnom interfejsu pretvarača, POST se koristi za slanje podataka ka aktuatorima ili za upis u TEDS memoriju.

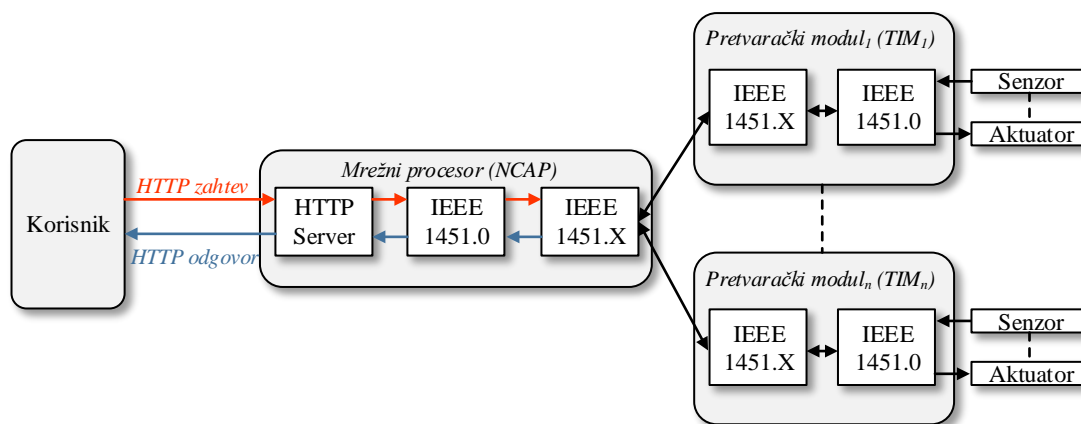
Aplikacioni interfejs za mrežne servise pretvarača, kao što je prethodno napomenuto, namenjen je isključivo za implementaciju IEEE 1451.0 sloja mrežnog procesora. Ovaj interfejs sadrži operacije za čitanje i upis u kanal pretvarača, za čitanje i upis u TEDS, i za slanje konfiguracionih, kontrolnih i operacionih komandi ka modulima pretvarača. Interfejs za mrežne servise pretvarača podeljen je, na bazi funkcionalnosti koju pružaju, u šest interfejsa: *TimDiscovery*, *TransducerAccess*, *TransducerManager*, *TedsManager*, *CommManager* i *AppCallback* (tabela 4.9). Prva četiri interfejsa predstavljaju osnovu za kreiranje distribuiranih aplikacija za merenje i neophodno ih je implementirati na 1451.0 sloju mrežnog procesora. Ako su potrebne poboljšane ili dodatne opcije, poželjno je implementirati i preostala dva interfejsa.

IEEE 1451.0 HTTP aplikacioni interfejs uglavnom se koristi kako bi se omogućio jednostavan pristup podacima iz pretvarača i TEDS memorije. Na slici 4.16 prikazano je kako se pristupa 1451.0 mrežnom procesoru (NCAP) korišćenjem HTTP servera. Korisnici mogu da šalju HTTP zahtev serveru, koji je sastavni deo mrežnog procesora, kao i da dobiju HTTP odgovor od servera. Proces slanja zahteva i prijema odgovora servera može se opisati na sledeći način.

1. Korisnik šalje HTTP zahtev serveru koji je relizovan kao sastavni deo 1451.0 mrežnog procesora.
2. HTTP server prima zahtev, obrađuje ga i poziva odgovarajuću funkciju 1451.0 aplikacionog interfejsa za mrežne servise pretvarača. Na primer, može se pozvati funkcija *readData()* iz *TransducerAccess* interfejsa, ako korisnik želi da pročita neki podatak sa senzora.
3. U pozivu odgovarajuće funkcije aplikacionog interfejsa za mrežne servise, zahtev klijenta prevodi se u 1451.0 komandu, koju je potrebno preneti do odgovarajućeg modula, odnosno kanala pretvarača. Na primer, za očitavanje



podatka iz senzorskog kanala šalje se komanda *Read Transducer Channel Data-Set Segment* koja pripada klasi komandi za kanal u operativnom režimu rada.



Slika 4.16. Pristup IEEE 1451.0 mrežnom procesoru na bazi HTTP protokola

4. IEEE 1451.0 sloj šalje komandu pretvaraču preko 1451.X „fizičkog“ sloja pozivom odgovarajućih funkcija aplikacionog interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača, kao što je objašnjeno u poglavlju 4.3.4.
5. Pretvarački modul prima komandu preko 1451.X „fizičkog“ sloja i prosleđuje je 1451.0 sloju pretvaračkog modula. Pretvarač izvršava komandu i odgovarajući odziv šalje nazad mrežnom procesoru. Odziv se takođe šalje preko 1451.X „fizičkog“ sloja korišćenjem funkcija aplikacionog interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača. U posmatranom primeru, merni podaci šalju se mrežnom procesoru kao odgovor na poslatu 1451.0 komandu.
6. IEEE 1451.X „fizički“ sloj mrežnog procesora prima poruku od pretvaračkog modula i prosleđuje je svom 1451.0 sloju. Time je komanda *Read Transducer Channel Data-Set Segment* iz koraka 3 kompletirana i podaci se prosleđuju *readData()* funkciji iz koraka 2.
7. Na kraju, aplikacioni interfejs za mrežne servise pretvarača prosleđuje dobijene podatke HTTP severu koji kreira odgovarajući HTTP odgovor i prosleđuje klijentu preko mreže.

Prilikom slanja HTTP poruka, od udaljenog klijenta do 1451.0 mrežnog procesora, koristi se sličan princip kao kod Internet pretraživača. Poruka koja se šalje serveru ima sintaksu HTTP URL (*Uniform Resource Locator*) adrese (RFC 2616):

http://<host>:<port>/<path>?<parameters>

gde pojedini elementi URL adrese imaju značenja navedena u nastavku.

<host> - Sadrži naziv ciljanog (željenog) domena, odnosno IP adresu pretvarača, npr:

<host>="192.168.100.4".

<port> - Ovo je opciono polje. Ako nije specificovano u zahtevu, pretpostavlja se da ima vrednost 80. Korišćenje odgovarajuće vrednosti porta zavisi od konkretne aplikacije, pri čemu treba imati u vidu i sigurnosne zahteve servera.

<path> - Definiše putanju i odgovarajuću funkciju aplikacionog interfejsa za mrežne servise pretvarača koja će biti pozvana. Veza između URL putanje i odgovarajuće funkcije aplikacionog interfejsa za mrežne servise pretvarača prikazana je u tabeli 4.10.

**Tabela 4.10. HTTP aplikacioni interfejs [39]**

Aplikacioni interfejs	Naziv	Putanja ( <i>path</i> )
<i>Discovery API</i>	TIMDiscovery	1451/Discovery/TIMDiscovery
	TransducerDiscovery	1451/Discovery/TransducerDiscovery
<i>Transducer Access API</i>	ReadData	1451/TransducerAccess/ReadData
	StartReadData	1451/TransducerAccess/StartReadData
	MeasurementUpdate	1451/TransducerAccess/MeasurementUpdate
	WriteData	1451/TransducerAccess/WriteData
	StartWriteData	1451/TransducerAccess/StartWriteData
<i>TEDS Manager API</i>	ReadTeds	1451/TEDSManager/ReadTeds
	ReadRawTeds	1451/TEDSManager/ReadRawTeds
	WriteTeds	1451/TEDSManager/WriteTeds
	WriteRawTeds	1451/TEDSManager/WriteRawTeds
	UpdateTedsCache	1451/TEDSManager/UpdateTedsCache
<i>Transducer Manager API</i>	SendCommand	1451/TransducerManager/SendCommand
	StartCommand	1451/TransducerManager/StartCommand
	CommandComplete	1451/TransducerManager/CommandComplete
	Trigger	1451/TransducerManager/Trigger
	StartTrigger	1451/TransducerManager/StartTrigger

<parameters> - Parametri koji su vezani za odgovarajuću funkciju aplikacionog interfejsa za mrežne servise pretvarača. Na primer <parameters> = „timID=1&channelID=2&timeout=14&format=xml“, gde je *timID* – identifikacija selektovanog modula pretvarača, *channelID* – identifikacija selektovanog kanala pretvarača, *timeout* – vreme u sekundama koliko je dozvoljeno čekati na odziv i *format* – traženi format povratne informacije (može imati vrednosti „text“, „HTML“, ili „xml“).

Kao odgovor na poslatu HTTP poruku 1451.0 mrežni procesor šalje HTTP odgovor koji sadrži tražene podatke formatizovane prema zahtevanom formatu („text“, „HTML“, ili „xml“).

#### **4.3.7. Primena i unapređenje standarda IEEE 1451.0**

U poslednje vreme, sa napretkom tehnologije, pojavila se ideja da se mrežni senzori posmatraju kao komponenta koja obezbeđuje mrežni servis (*Web Service*), odnosno obavlja merne funkcije za korisnike koristeći arhitekturu SOA (*Service Oriented Architecture*) koja obezbeđuje interoperabilnost kroz komunikaciju koja ne zavisi od standarda, platformi, korišćenog programskog jezika i operativnog sistema. Primenom ovog koncepta na senzorske mreže obezbeđuje se standardizovan mehanizam za otkrivanje, pristup i upravljanje inteligentnim sensorima preko Interneta.

Kao što je već navedeno, implementacija mrežnog procesora na bazi 1451.1 standarda i SOA arhitekture, opisana je u radovima [11, 15], ali se, zbog svoje složenosti, ovakav pristup ređe koristi u praksi. Sa druge strane, standard 1451.0 definiše mrežne interfejsne za otkrivanje, pristup i upravljanje inteligentnim sensorima (što je opisano u poglavlju 4.3.5), kao i mehanizam za pristup ovim servisima korišćenjem HTTP protokola (što je opisano u poglavlju 4.3.6). HTTP protokol pogodan je za realizaciju WWW (*World Wide Web*) aplikacija, ali ne rešava problem interoperabilnosti. U cilju povećanja interoperabilnosti u mrežnim tehnologijama, predložen je novi model mrežnih servisa za inteligentne pretvarače – STWS (*Smart Transducer Web Service*) koji se bazira na 1451.0 standardu i SOA arhitekturi [43].

STWS model prihvaćen je i primenjen od velikog broja istraživača, koji su uneli i izvesne modifikacije i unapređenja. Na primer, unapređenje arhitekture mreže inteligentnih senzora, uvođenjem virtuelnog pretvaračkog modula – VTIM (*Virtual Transducer Interface Module*), koje je pogodno za implementaciju na platformama sa ograničenim memorijskim i procesorskim resursima, predloženo je u [44]. U cilju daljeg povećanja interoperabilnosti predložena su rešenja za integraciju standarda IEEE 1451 sa drugim često korišćenim protokolima i standardima. Na primer u [45], opisana je interoperabilnost IEEE 1451 inteligentnog pretvarača i OGC-SWE mrežnih servisa korišćenjem STWS modela, dok je integracija IEEE 1451 sa familijom protokola UPnP (*Universal Plug and Play*) opisana u [46 – 47].

## Literatura

- [1] K. Mikhaylov, J. Jamsa, M. Luimula, J. Tervonen, V. Hu and Q. Hao, „Intelligent Sensor Interfaces and Data Format,“ *Intelligent Sensor Networks: The Integration of Sensor Networks, Signal Processing and Machine Learning*, F. Hu, Q. Hao, Ed. CRC Press, 2013.
- [2] S. Yurish. (2012). Smart sensor systems integration: New challenges, IFSA, [Online]. Available: [http://www.iaria.org/conferences2011/filesICN11/Keynote\\_SergeyYurish.pdf](http://www.iaria.org/conferences2011/filesICN11/Keynote_SergeyYurish.pdf)
- [3] V. Vasilijev and P. Chernov, „Smart Sensors, Sensor Networks, and Digital Interfaces,“ *Measurement Techniques*, vol. 55, no. 10, pp. 1115-1119, 2013.
- [4] Information technology - Smart transducer interface for sensors and actuators - Part 1: Network Capable Application Processor (NCAP) information model, ISO/IEC/IEEE Standard 21451-1:2010, 2010.
- [5] A. Stepanenko, K. Lee, R. Kochan, V. Kochan and A. Sachenko, „Development of a Minimal IEEE 1451.1 Model for Microcontroller Implementation,“ in *Proc. of IEEE Sensors Applications Symposium*, 2006, pp. 88-93.
- [6] V. Kockan, R. Kockan and A. Sachenko, „Approach to Improving Network Capable Application Processor Based on IEEE 1451 Standard,“ *Computer Standards & Interfaces*, vol. 28, pp. 141-149, 2005.
- [7] R. Kochan, V. Kockan, A. Sachenko, I. Maykiv, I. Turchenko and G. Markowsky, „Network Capable Application Processor Based on FPGA,“ in *Proc. of IEEE Inst. & Meas. Technology Conf.*, vol. 2, 2005, pp. 813-817.
- [8] D. Devarjan and S. Bibyk, „A VHDL Software Model for Networking Smart Transducer thought Bluetooth Technology,“ in *Proc. Of IEEE Midwest Symposium on Circuits & Systems*, vol. 2, 2001, pp. 919-922.
- [9] K. Lee and E. Song, „UML Model for the IEEE 1451.1 Standard,“ in *Proc. of Instrum. & Meas. Technology Conf.*, 2003, pp. 1587-1592.
- [10] K. Lee and E. Song, „Object-Oriented Application Framework for IEEE 1451.1 Standard,“ *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 4, pp. 1527-1533, 2005.
- [11] E. Sadok and R. Liscano, „A Web-Services Framework for 1451 Sensor Networks,“ in *Proc. of Instrum. & Meas. Technology Conf.*, 2005, pp. 554-559.

- [12] M. Sveda and R. Vrba, „Embedded Systems With IEEE 1451.1 on Internet,“ in *Proc. of IEEE Conf. on Information & Comm. Technology*, 2005. pp. 539-550.
- [13] S. Rossi, A. Carvalho, A. Silva, E. Batista, C. Kitano, T. Filho and T. Prado, “Open and Standardized Resources for Smart Transducer Networking,“ *IEEE Trans. Instrum. Meas*, vol. 58, no. 10, pp. 3754-3761, 2009.
- [14] E. Batista, L. Gonda, A. Carneiro, M. Pereira and A. Silva, „Supervisory Software Development According to IEEE 1451.1 Standard,“ in *Proc. of IEEE Sensors Applications Symposium*, 2010, pp. 278-281.
- [15] V. Viegas, M. Pereira and P. Giro, „NET Framework and Web Services: A Profit Combination to Implement and Enhance the IEEE 1451.1 Standard,“ *IEEE Trans. Instrum. & Meas*, vol. 56, no. 6, pp. 2739-2746, 2007.
- [16] R. Franzl and D. Gurkan, „Implementation of an IEEE 1451.1 compatible multiple NCAP Controller Using LabView,“ in *Proc. of IEEE Sensors Application Symposium*, 2009. pp. 137-141.
- [17] H. Ramos, M. Pereira, V. Viegas, O. Postolache and P. Giro, „A Virtual Instrument to Test Smart Transducer Interface Modules (STIMs),“ *IEEE Trans. Instrum. & Meas*, vol. 53, no. 4, pp. 1232-1239, 2004.
- [18] V. Viegas, M. Pereira, P. Giro, „A Brief Tutorial on the IEEE 1451.1 Standard,“ *IEEE Instrum. & Meas. Mag.*, vol. 11, no. 2, pp. 38-45, 2008.
- [19] IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic, *IEEE Standard 754*, 1985.
- [20] K. Lee, „Smart Transducer Interface Standard for Sensors and Actuators,“ in *Industrial Communication Technology Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., Richard Zurawski Ed. CRC Press, 2014.
- [21] 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.
- [22] 1-Wire. (October 2014). [Online]. <http://www.maximintegrated.com/en/products/comms/one-wire.html>.
- [23] DS2430A – 256-Bit 1-Wire EEPROM. (October 2014). [Online]. <http://www.maximintegrated.com/en/products/digital/memory-products/DS2430A.html>.
- [24] DS2430 – 1024-Bit 1-Wire EEPROM. (October 2014). [Online]. <http://www.maximintegrated.com/en/products/digital/memory-products/DS2431.html>.

- [25] C. Jones, IEEE 1451.4 Smart Transducers Template Description Language, [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/develop/regauth/tut/tdl.pdf>
- [26] J. Mark and P. Hufnagel, The IEEE 1451.4 Standard for Smart Transducers [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/develop/regauth/tut/1451d4.pdf>
- [27] N. Ulivieri, C. Distante, T. Luca, S. Rocchi and P. Siciliano, „IEEE 1451.4: A way to standardize gas sensor,“ *Sensors & Actuators B-Chemical*, vol. 114, no. 1 pp.141-151, 2006.
- [28] J. Kim, H. Byun, Y. Ham, W. Jung, D. Han, J. Park and H. Lee, „The definition of basic TEDS of IEEE 1451.4 for sensors for an electronic tongue and the proposal of new template TEDS for electrochemical devices,“ *Talanta*, vol. 71, no. 4, pp. 1642-1651, 2007.
- [29] N. Jevtić and V. Drndarević, „Design and Implementation of Plug-and-Play analog resistance temperature sensor,“ *Metrology & Meas. Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 565-580, 2013.
- [30] S. Yurish. (2005). IEEE 1451 Standard and Frequency Output Sensors: How to obtain a Broad-Based Industry Adoption. *Sensors & Transducers Mag.* [Online]. vol. 59, no.9, pp. 412-418. Available: <http://www.sensorsportal.com>
- [31] N. Jevtić and V. Drndarević, „Plug and Play Geiger-Muller Detector for Environmental Monitoring,“ *Instrumentation Science & Technology*, vol. 43, no. 02, pp. 222-243, 2015.
- [32] V. Drndarević, N. Jevtić, V. Rajović and S. Stanković, „Smart Ionization Chamber for Gamma-ray Monitoring,“ *Nuclear Technology & Radiation Protection*, vol. 29, no. 3, pp. 190-198, 2014.
- [33] N. Jevtić and V. Drndarević, „Implementation of Mixed-Mode Interface for the IEEE 1451.4 Smart Transducers,“ *Zbornik radova konf. ETRAN*, 2012, str. EL1.4-1-4.
- [34] N. Jevtić and V. Drndarević, „Development of Smart Transducers Compliant with the IEEE 1451.4 Standard,“ in *Proc. of the IEEE Intern. Symposium on Instrumentation & Control Technology*, 2012, pp.126-131.
- [35] E. Song, D. Westbrook and K. Lee, „A Prototype IEEE 1451.4 Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators,“ in *Proc. of Intern. Conf. on Electronic Measurement & Instruments*, vol. 1, 2011, pp. 1-6.

- [36] V. Viegas, M. Pereira and P. Giro, „Smart Transducer Block Enables Plug & Play Transducers,“ in *Proc. Of IMEKO World Congress on Fundamental & Applied Metrology*, 2009, pp. 1452-1455.
- [37] D. Wobschall, „A Minimal Dot4 NCAP with a Compatible Sensor Bus,“ in *Proc. Of Sensors for Industry Conf.*, 2005, pp. 139-142.
- [38] L. Zhi, Q. Chang-Ming and H. Zhang, „The prototype IEEE 1451.4 applied in the IOT,“ in *Proc. of World Congress on Intelligent Control & Automation*, 2012, pp. 4241-4244.
- [39] 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.
- [40] J. Kamala, „IEEE 1451 0 enabled smart control architectures and their application to DC DC converters,“ Ph.D. dissertation, Faculty of Information and Communication Engineering, Anna University, Chennai, India, 2013, [Online]. Available: <http://shodhganga.inflibnet.ac.in/handle/10603/13411>
- [41] J. Kim, J. Lee, Y. Ham, C. Hong, B. Min and S. Lee, „Sensor-Ball system based on IEEE 1451 for monitoring the condition of power transmission lines,“ *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 154, no. 1, pp. 157-168, 2009.
- [42] F. Barrero, S. Toral, M. Vargas and J. Becerra. (2012). Networked electronic equipments using the IEEE 1451 standard – VisioWay: A case study in the ITS area. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, [Online]. Available: <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2012/467124/>
- [43] E. Song and K. Lee, „STWS: A Unified Web Service for IEEE 1451 Smart Transducers,“ *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, vol. 57, no. 8, pp. 1749-1756, 2008.
- [44] N. Bezanic and I. Popovic, „Service-oriented Implementation Model for Smart Transducers Network,“ *Computer Standards & Interfaces*, vol. 38, pp. 78-83, 2015.
- [45] E. Song and K. Lee, „Service-oriented Sensor Data Interoperability for IEEE 1451 Smart Transducers,“ in *Proc. of IEEE Inst. & Meas. Technology Conf.*, 2009, pp. 1043-1048.
- [46] H. Song, D. Kim, K. Lee and J. Sung. (2005). UPnP-based sensor network management architecture. Presented at Int. Conf. on Mobile Comput. Ubiquitous

Netw., [Online]. Available: <http://kumo.ishilab.net/icmu2005/Papers/117390-1-050228235605.pdf>

- [47] A. Nieves, N. Madrid, R. Seepold, J. Larrauri and B. Larrinaga, „A UPnP Service to Control and Manage IEEE 1451 Transducers in Control Networks,“ *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, vol. 61, no. 3, pp. 791-800, 2012.



## **5. Implementacija i rezultati testiranja koncepta automatske konfiguracije analognih mrežnih senzora**

Ova glava posvećena je praktičnoj primeni koncepta inteligentnih senzora korišćenjem tradicionalnih analognih i impulsnih senzora u skladu sa standardom 1451.4. Da bi se obezbedilo *Plug and Play* povezivanje tradicionalnih senzora u distribuirani merni sistem, potrebno je dizajnirati odgovarajući mrežni procesor (NCAP) i elektronske specifikacije senzora (TEDS).

Prvo je razmatran dizajn interfejsnog modula za povezivanje 1451.4 senzora korišćenjem MMI interfejsa. Izložen je koncept i detalji realizacije hardvera i softvera interfejsnog modula. Zatim je razmatran dizajn elektronskih specifikacija senzora na bazi standarda 1451.4. S obzirom da dizajn elektronskih specifikacija predstavlja najznačajniji element za povezivanje senzora po *Plug and Play* principu, veoma je važno da se obezbede odgovarajući hardverski i softverski alati za kreiranje, upis i čitanje TEDS podataka. Posebna pažnja posvećena je opisu softverske aplikacije koja obezbeđuje funkcije prevođenja elektronskih specifikacija u binarni oblik i funkcije upisa i čitanja podataka iz TEDS memorije. Detalji implementacije hardverske platforme i softverskih alata za razvoj 1451.4 senzora publikovani su u radovima autora disertacije [1, 2]. Ista hardverska platforma iskorišćena je i za razvoj mrežnog procesora i demonstraciju mrežnog povezivanja analognih senzora.

Primena predloženih hardverskih i softverskih rešenja demonstrirana je povezivanjem *Plug and Play* rezistivnog temperaturnog senzora [3]. U cilju proširenja primene standarda IEEE 1451.4 u oblasti monitoringa jonizujućeg zračenja, realizovan je *Plug and Play* GM (*Geiger-Müller*) detektor za merenje gama zračenja [4, 5]. Predloženo je novo rešenje šablona za smeštanje elektronskih specifikacija koje se može primeniti ne samo za GM detektore, već i za druge senzore jonizujućeg zračenja sa impulsnim izlazom. Osim GM detektora, u disertaciji je opisana i realizacija inteligentne jonizacione komore koja je povezana u monitoring mrežu prema *Plug and Play* konceptu. Za realizaciju je iskorišćena komora M1000, razvijena u Institutu za nuklearne nauke Vinča, a elektronske specifikacije su kreirane u skladu sa novim predloženim šablonom [6].

## **5.1. Platforma za razvoj mrežnih senzora**

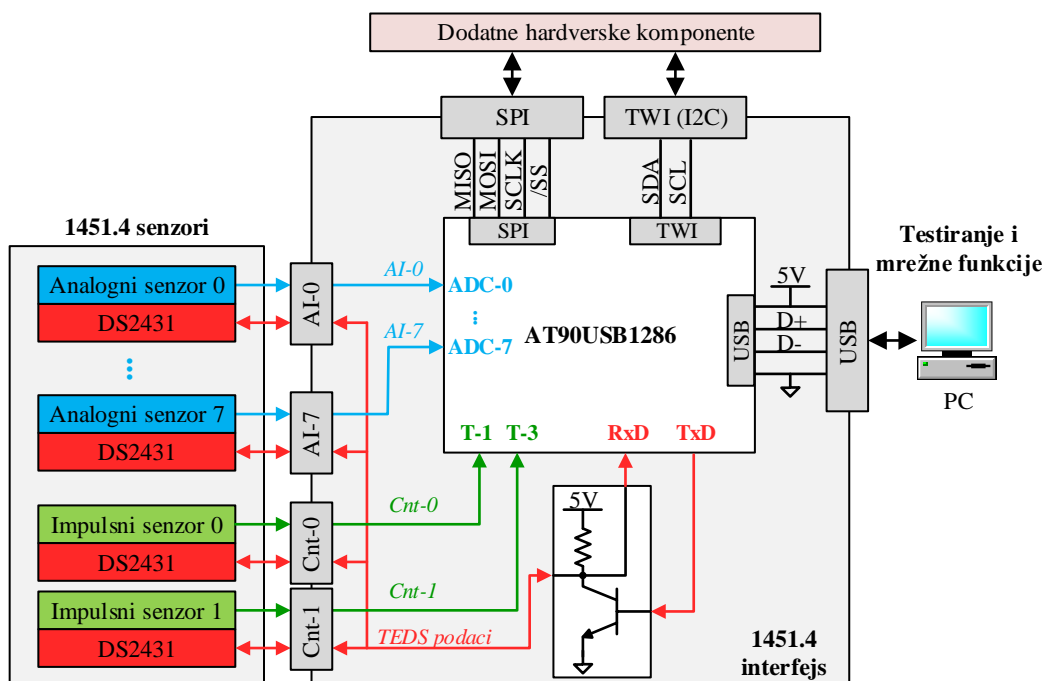
Za potrebe razvoja i testiranja analognih i kvazidigitalnih *Plug and Play* senzora dizajnirana je specijalizovana hardverska platforma koja podržava komunikaciju sa 1451.4 sensorima preko MMI interfejsa. Za analogne senzore obezbeđena je AD konverzija signala, dok su za kvazidigitalne senzore obezbeđeni odgovarajući ulazi za brojanje impulsa TTL logičkih nivoa. Takođe, za očitavanje i upis elektronskih specifikacija senzora realizovana je odgovarajuća hardverska i softverska podrška kojom se obavlja komunikacija sa EEPROM memorijom u skladu sa jednožičnim protokolom. Dizajn i kompajliranje elektronskih specifikacija na bazi standarda IEEE 1451.4 vrši se korišćenjem *TEDS editor* programskog alata koji je razvijen u *LabVIEW* [7] okruženju.

Za testiranje mrežnog povezivanja 1451.4 senzora izvršena je praktična realizacija mrežnog procesora na bazi standarda 1451.0 prema konceptu koji je opisan u poglavlju 5.1.3. Za softversku implementaciju mrežnog procesora korišćen je programski jezik *Java*. U nastavku glave detaljno su objašnjeni svi elementi koji čine platformu za razvoj 1451.4 *Plug and Play* senzora.

### 5.1.1. Projektovanje hardvera i softvera interfejsnog modula

Platforma za razvoj 1451.4 senzora koncipirana je na PC računaru i odgovarajućem interfejsnom modulu koji obezbeđuje komunikaciju sa sensorima preko MMI interfejsa. Ovakav koncept razvojnog sistema odabran je kako bi se ostvarila dvostruka funkcija: dizajn i testiranje 1451.4 senzora i realizacija mrežnog procesora. Hardver interfejsnog modula treba da bude jednostavan ali dovoljno fleksibilan da se uz upotrebu odgovarajućih PC softverskih alata može koristiti kao platforma za razvoj i testiranje 1451.4 kompatibilnih senzora. Sa druge strane, PC računar ujedno se koristi i za realizaciju NCAP softvera.

Imajući u vidu sve navedene zahteve za dizajn razvojne platforme, predloženo hardversko rešenje, zasnovano na 8-bitnom kontroleru i PC računaru, prikazano je na slici 5.1. Najvažniji element hardverske platforme je interfejsni modul koji obezbeđuje komunikaciju između senzora i PC računara. Podržane su dve vrste senzora, tradicionalni analogni senzori sa izlaznim naponom u opsegu od 0 do 5 V i kvazidigitalni impulsni senzori sa brojačkim izlazima.

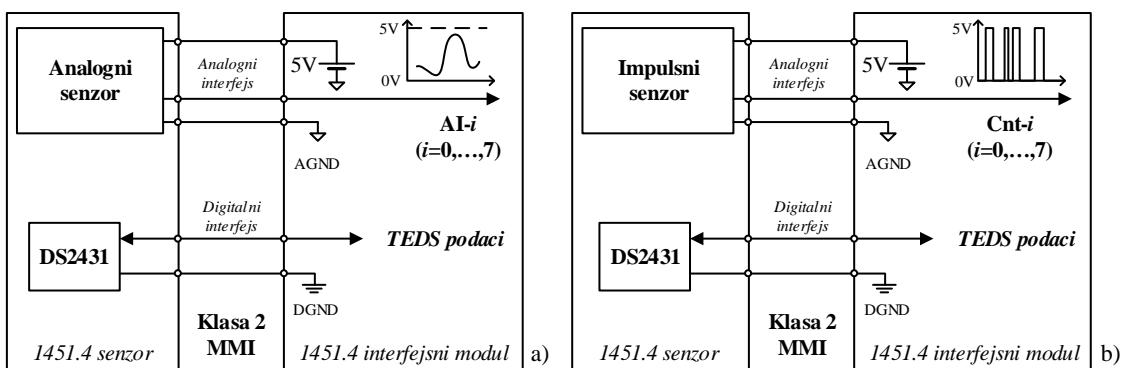


Slika 5.1. Arhitektura platforme za razvoj i testiranje 1451.4 kompatibilnih senzora

Svaki senzor poseduje TEDS memoriju za smeštanje elektronskih specifikacija. Iako 1451.4 standard preporučuje upotrebu EEPROM memorije DS2430A

[8] kapaciteta 256-bita, u hardverskoj realizaciji korišćena je savremenija komponenta DS2431 [9] kapaciteta 1024-bita. Realizacija analognog temperaturnog senzora detaljno je opisana u poglavlju 5.2, dok su u poglavljima 5.3.1 i 5.3.2, opisane realizacije impulsnog senzora jonizujućeg zračenja na bazi GM detektora i analognog senzora na bazi jonizacione komore, respektivno.

Centralnu komponentu 1451.4 interfejsa predstavlja 8-bitni mikrokontroler AT90USB1286 [10] koji vrši sledeće funkcije: komunikaciju sa analognim i impulsnim sensorima, očitavanje i upis TEDS memorije i komunikaciju sa PC računarom. Komunikacija sa sensorima vrši se prema MMI protokolu klase 2. Za analogne senzore koristi se 10-bitni AD konvertor ugrađen u mikrokontroler, koji poseduje 8 ulaza, te se na interfejsnu ploču može istovremeno povezati najviše 8 analognih senzora. S obzirom na ograničenja mikrokontrolera, odabiranje kanala može se vršiti maksimalnom učestanošću od 15 kHz. Detaljniji prikaz interfejsa za povezivanja analognih senzora dat je na slici 5.2a.



Slika 5.2. Povezivanje 1451.4 kompatibilnih senzora na interfejsni modul: analogni senzor (a) i kvazidigitalni (impulsni) senzor (b)

S obzirom da mikrokontroler poseduje dva 16-bitna brojača, za impulsne senzore moguće je koristiti dva ulaza Cnt-0 i Cnt-1 koji se povezuju na odgovarajuće 16-bitne brojače mikrokontrolera. Detaljniji prikaz povezivanja impulsnih senzora dat je na slici 5.2b.

S obzirom da je za realizaciju 1451.4 senzora korišćen MMI klase 2, linije za prenos analognog/impulsnog signala senzora i digitalnih podataka TEDS memorije su razdvojene, te se digitalni podaci prenose pomoću standardnih TTL naponskih nivoa.

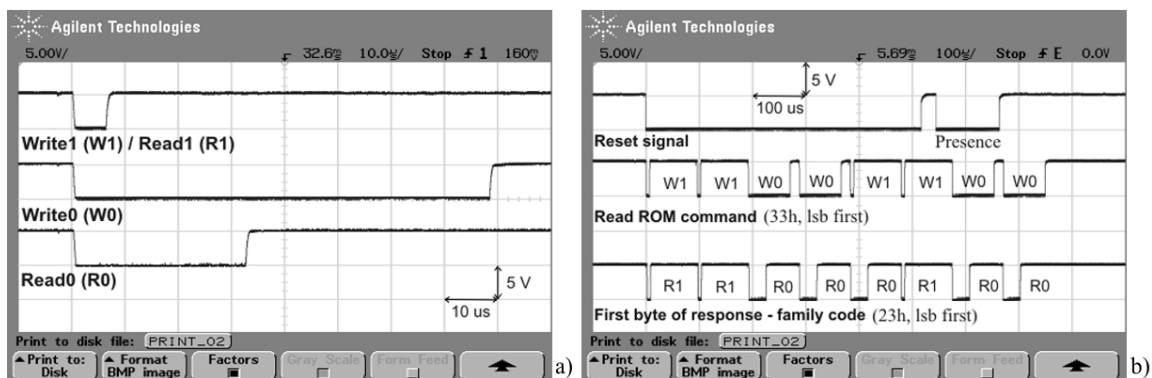
Prenos TEDS podataka preko MMI klase 2 korišćenjem jednožičnog protokola detaljno je objašnjen u poglavlju 4.2.2. Implementacija jednožičnog protokola izvršena je korišćenjem UART interfejsa mikrokontrolera [11]. TxD izlaz UART interfejsa koristi se za slanje, a RxD ulaz za prijem TEDS podataka. Međutim, za povezivanje TxD i RxD linija na bidirekcionu jednožični interfejs potrebno je dodati tranzistor u konfiguraciji sa otvorenim kolektorom, kao što je prikazano na slici 5.1. Za generisanje osnovnih jednožičnih signala: *Reset/Presence*, *Write0*, *Write1* i *Read*, koristi se sledeći UART format za prenos jednog bajta: 8 bitni podatak, bez bita parnosti i jedan stop bit. Slanje/prijem jednog bajta podataka preko UART interfejsa odgovara slanju/prijemu jednog osnovnog signala jednožičnog interfejsa. Vremenski zahtevi i talasni oblici jednožičnih signala (prema specifikacijama koje su detaljnije objašnjene u poglavlju 4.2.2) realizuju se podešavanjem brzine prenosa i sadržaja podatka koji se šalje ili prima preko UART interfejsa, kao što je prikazano u tabeli 5.1. Na primer, za generisanje *Reset/Presence* signala koristi se brzina od 9600 b/s, a u izlazni UART registar upisuje se F0h. Ukoliko se ni jedan uređaj ne odazove na *Reset* signal, u prijemnom registru UART interfejsa nalazi se isti podatak F0h koji je i poslat (podatak koji se šalje preko TxD linije se istovremeno prima preko RxD linije). Ako je neki od uređaja prisutan na jednožičnoj magistrali, on se odaziva *Presence* signalom čime se u prijemni registar UART interfejsa upisuje sadržaj različit od F0h.

**Tabela 5.1.** *Podešavanje UART interfejsa za generisanje jednožičnih signala [11]*

Signal	Brzina prenosa	Slanje podatka	Prijem podatka
<i>Write1</i>	115200	FFh	FFh
<i>Write0</i>	115200	00h	00h
<i>Read</i>	115200	FFh	FFh – prijem logičke “1”, bilo šta drugo – prijem logičke “0”
<i>Reset/Presence</i>	9600	F0h	F0h – nema odziva uređaja, bilo šta drugo – uređaj prisutan

Implementacija jednožičnog protokola na bazi UART interfejsa mikrokontrolera testirana je snimanjem talasnih oblika signala digitalnim osciloskopom. Vremenski dijagrami osnovnih signala prikazani su na slici 5.3.

Osim MMI i jednožičnog interfejsa koji su neophodni za komunikaciju sa 1451.4 senzora, modul sa slike 5.1 opremljen je SPI i I<sup>2</sup>C interfejsom kako bi se obezbedilo povezivanje dodatnih hardverskih komponenti za specifične primene.



Slika 5.3. Signaliziranje preko jednožičnog interfejsa: osnovni Read/Write signali (a) i Reset, Read ROM komanda i odziv (b) [3]

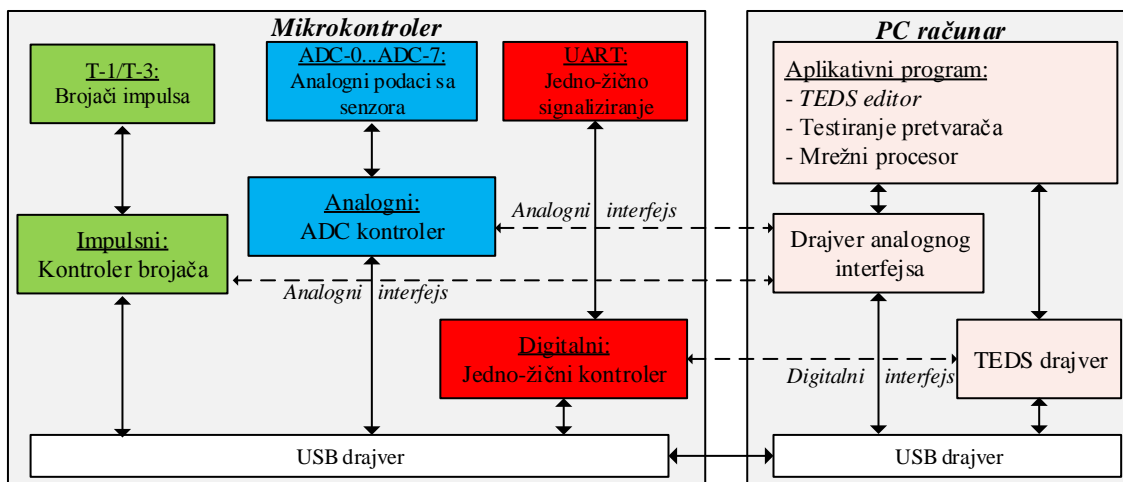
Komunikacija 1451.4 interfejsnog modula sa PC računarom ostvarena je preko USB interfejsa. PC računar korišćen je kao alat za razvoj i testiranje 1451.4 senzora, ali takođe se koristi i kao ključna komponenta NCAP procesora koja obezbeđuje mrežnu komunikaciju.

### Koncepcija softvera interfejsnog modula

Kao što je prethodno objašnjeno, hardverska platforma za razvoj IEEE 1451.4 senzora sastoji se od PC računara i interfejsnog modula pretvarača (slika 5.1). S obzirom da se 1451.4 interfejsni modul bazira na 8-bitnom *Atmel* mikrokontroleru, softver interfejsnog modula zapravo predstavlja odgovarajući program mikrokontrolera. Organizacija programa mikrokontrolera kao i odgovarajućih softverskih komponenti aplikativnih programa PC računara prikazani su na slici 5.4. Program mikrokontrolera razvijen je u programskom jeziku C korišćenjem *Atmel AVR Studio* [12] okruženja, dok je program PC računara razvijen u *LabVIEW* programskom okruženju i programskom jeziku *Java*.

Implementacija softvera mikrokontrolera veoma je važna kako bi se obezbedile sve funkcije modula koje su neophodne za realizaciju sledećih aplikativnih programa:

- alati za testiranje prenosa podataka sa senzora povezanih na analogne ili impulsne ulaze interfejsnog modula,
- *TEDS editor* alat za dizajn elektronskih specifikacija, kao i upis i čitanje podataka iz TEDS memorije senzora korišćenjem jednožičnog interfejsa,
- implementacija mrežnog procesora.



Slika 5.4. Organizacija softvera interfejsnog modula

S obzirom da se interfejsni modul povezuje sa PC računarom preko USB interfejsa, softver mikrokontrolera koristi odgovarajuće drajverske funkcije namenjene za detekciju komandi i slanje odgovarajućih odziva preko USB magistrale. USB drajver realizovan je korišćenjem bibliotečkih funkcija koje obezbeđuje proizvođač mikrokontrolera.

Tabela 5.2. Osnovne komande za komunikaciju sa 1451.4 interfejsnim modulom

Opis	Komanda
<i>Komande za analogne senzore</i>	
Konfiguracija interfejsa za analogne senzore	ADC_CONFIG
Pokretanje AD konvertora	ADC_START
Zaustavljanje AD konvertora	ADC_STOP
Očitavanje rezultata AD konverzije iz određenog kanala	ADC_READ_CHANNEL
<i>Komande za impulsne senzore</i>	
Konfiguracija brojača za rad sa impulsnim sensorom	CNT_CONFIG
Reset sadržaja brojača	CNT_RESET
Pokretanje odgovarajućeg brojača	CNT_START
Zaustavljanje rada brojača	CNT_STOP
Očitavanje stanja odgovarajućeg brojača	CNT_READ
<i>Komande za rad za jednožičnim interfejsom</i>	
Konfiguracija UART interfejsa za slanje jednožičnih signala	OWI_CONFIG
Jednožični Reset/Presence signal	OWI_RESET
Algoritam za automatsku detekciju i pronalaženje 1451.4 pretvarača	OWI_SEARCH_DEV
Slanje 1-bajtnog podatka preko jednožičnog interfejsa	OWI_WRITE_BYTE
Prijem 1-bajtnog podatka preko jednožičnog interfejsa	OWI_READ_BYTE

Osim USB komunikacije program mikrokontrolera obavlja tri ključne funkcije:

- podešavanje parametara AD konvertora i očitavanje vrednosti dobijenih konverzijom analognih ulaznih signala,
- kontrolu i očitavanje sadržaja brojača za rad sa impulsnim sensorima, i

- kontrolu UART interfejsa u cilju očitavanja i upisa sadržaja jednožične EEPROM memorije koja se koristi za smeštanje elektronskih specifikacija.

Najznačajnije komande za komunikaciju sa 1451.4 interfejsnim modulom prikazane su u tabeli 5.2.

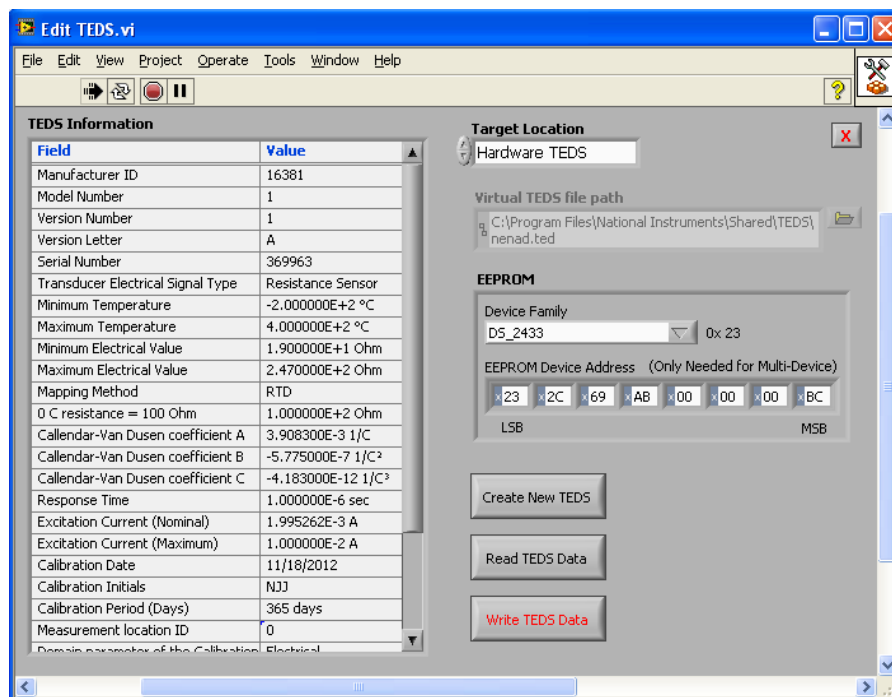
U zavisnosti od aplikacije program PC računara obavlja odgovarajuće funkcije slanjem komandi mikrokontroleru kroz USB interfejs. Ove funkcije korišćene su za realizaciju aplikacije *TEDS editor* koja se koristi za dizajn 1451.4 elektronskih specifikacija i za realizaciju mrežnog procesora.

### **5.1.2. TEDS editor**

U cilju primene *Plug and Play* koncepta u oblasti povezivanja senzora u distribuirane merne sisteme, neophodno je da svaki pojedinačni senzor poseduje ugrađenu standardizovanu elektronsku specifikaciju koja opisuje njegove najvažnije karakteristike. Na osnovu ovih karakteristika može se izvršiti identifikacija povezanog senzora i automatska konfiguracija u skladu sa tipom senzora koji je povezan u distribuirani sistem. Nakon izvršene konfiguracije, mernim podacima sa senzora može se pristupiti korišćenjem standardizovanih komunikacionih protokola. S obzirom da elektronske specifikacije senzora predstavljaju najvažniju komponentu u konstrukciji inteligentnih *Plug and Play* senzora, u nastavku je detaljnije opisan postupak kreiranja 1451.4 TEDS struktura na kojima se bazira praktična realizacija senzora.

Imajući u vidu da standard zahteva smeštanje elektronskih specifikacija u memoriju malog kapaciteta, 1451.4 TEDS koristi veoma kompaktnu formu za kodovanje podataka. Kako bi se omogućilo kreiranje i modifikovanje elektronskih specifikacija, kao i njihovo prevođenje u binarnu formu (kompajliranje) i smeštanje u EEPROM memoriju, razvijen je program za PC računar u *LabVIEW* programskom okruženju – *TEDS editor*. Po pokretanju *TEDS editor* aplikacije korisnik može da kreira elektronske specifikacije 1451.4 kompatibilnog senzora korišćenjem grafičkog korisničkog interfejsa koji je prikazan na slici 5.5. Odgovarajući *LabVIEW* blok dijagram prikazan je na slici 5.6.

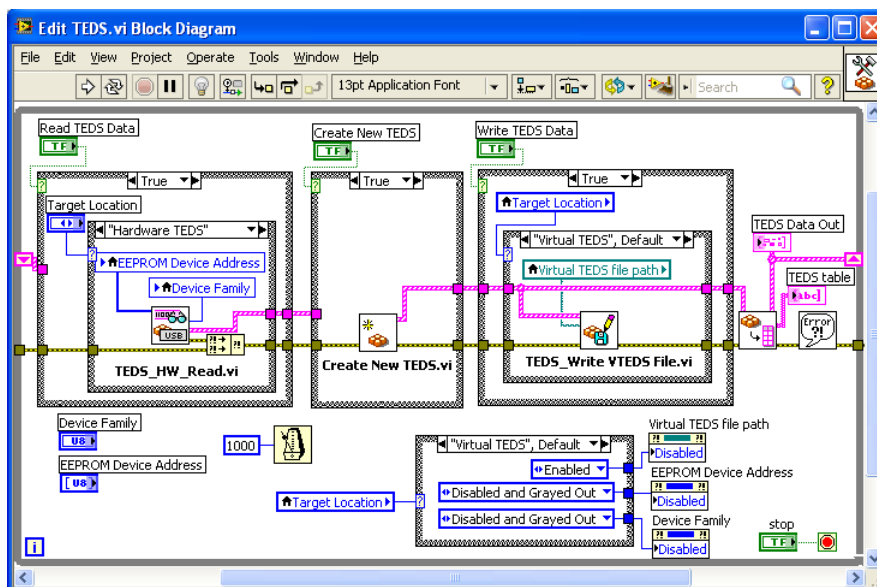




Slika 5.5. Grafički korisnički interfejs TEDS editor programa

Na početku rada korisnik bira lokaciju za elektronske specifikacije (*Target Location*). Moguće je izabrati memorijski uređaj (*EEPROM memory*) koji je povezan preko 1451.4 interfejsnog modula sa slike 5.1 ili virtuelni TEDS fajl (*Virtual TEDS*). Izborom memorijskog uređaja automatski se pokreće program mikrokontrolera na 1451.4 interfejsnom modulu kojim se detektuje prisustvo DS2431 memorije prema jednožičnom protokolu i odgovarajuća adresa uređaja (odnosno jedinstveni URN kod) se prikazuje na grafičkom interfejsu. Ukoliko je na interfejsni modul povezano više senzora, svi memorijski uređaji biće detektovani tako da korisnik bira željeni EEPROM iz padajućeg menija grafičkog korisničkog interfejsa.

Komunikacija sa interfejsnim modulom vrši se korišćenjem internog protokola, odnosno pozivom odgovarajućih funkcija mikrokontrolerskog programa, koje su definisane u poglavlju 5.1.1. Izborom virtuelnog TEDS fajla korisnik može da sačuva kreirane elektronske specifikacije u fajlu na PC računaru. U tom slučaju potrebno je definisati i odgovarajuću putanju fajla. Virtuelni TEDS fajlovi najčešće se koriste za potrebe testiranja, ali se mogu iskoristiti i u slučaju kada se fizički EEPROM uređaj ne može pridružiti pretvaraču.



Slika 5.6. Blok dijagram TEDS editor programa

Po izboru lokacije, korisnik može da pročita sadržaj TEDS memorije pretvarača (fizičke ili virtuelne) izborom opcije *Read TEDS Data* sa korisničkog interfejsa. Očitani podaci iz TEDS memorije su u binarnoj formi, te ih je potrebno prevesti u format koji se može prikazati korisniku.

Prevođenje binarnih TEDS podataka može se podeliti u nekoliko faza. U prvoj fazi očitava se sadržaj memorije u vidu niza bitova. Sadržaj TEDS memorije je organizovan u stranice od po 256 bita (32 bajta). Svaka stranica počinje sa *checksum* bajtom koji se koristi za detekciju greške. U narednoj fazi prevođenja TEDS podataka očitani sadržaj se deli na stranice i računaju se *checksum* bajtovi na osnovu kojih se utvrđuje da li je pri čitanju iz memorije došlo do greške. Ukoliko je do greške došlo, očitavanje se ponavlja, a u suprotnom, postupak se nastavlja i iz niza TEDS bita se uklanjaju *checksum* bajtovi.

Kao što je objašnjeno u poglavlju 4.2.3, elektronske specifikacije analognih pretvarača se sastoje iz tri osnovne sekcije: osnovni TEDS (*Basic TEDS*), TEDS pretvarača (*Transducer TEDS*) i kalibracioni TEDS (*Calibration TEDS*), slika 4.11. U narednoj fazi prevođenja TEDS sadržaja prepoznaju se pojedine sekcije. 1451.4 senzor uvek sadrži osnovni TEDS koji je fiksne dužine 64 bita, dok su ostale sekcije opcione. Nakon završetka svake sekcije, nalazi se 2-bitno polje koje se naziva *Selector of*

*descriptor* (DS). Ovo polje može imati četiri različite vrednosti kao što je definisano u tabeli 5.3.

Najčešća vrednost DS polja je 00b, što označava da je sledeća TEDS sekcija definisana standardnim IEEE 1451.4 šablonom. Za specifične sekcije TEDS memorije, bazirane na novim šablonima koji su predloženi u disertaciji, korišćena je vrednost 10b za DS polje i 16382 za *Manufacturer ID* polje. Kraj TEDS memorije označava se DS poljem koje ima vrednost 11b, iza koga sledi 1-bitno polje ES (*Extended Selector*) čija je vrednost jednaka 1.

U poslednjoj fazi pristupa se prevođenju svake sekcije TEDS memorije. Osnovni TEDS ima fiksnu strukturu (videti poglavlje 4.2.3), te je postupak prevođenja jednoznačan. Ova sekcija TEDS memorije sadrži indentifikaciju proizvođača, broj modela, simbol verzije, broj verzije i serijski broj, odnosno minimalni skup informacija za jedinstvenu indentifikaciju senzora. Podatke iz ove sekcije definiše isključivo proizvođač pretvarača, te se tipično smeštaju se u aplikacioni registar DS2431 memorije koji se može zaštititi od izmena od strane krajnjih korisnika. Preostali segmenti TEDS memorije prevode se korišćenjem šablona.

**Tabela 5.3. Tipovi TEDS sekcija definisanih DS poljem**

DS ( <i>Selector of descriptor</i> )	Tip TEDS sekcije
00b	IEEE standardni šablon. Može biti TEDS pretvarača ili kalibracioni TEDS. Svaki IEEE šablon počinje 8-bitnim poljem <i>Template ID</i> kojim se vrši indentifikacija šablona.
01b	Sekcija definisana od proizvođača senzora. Proizvođač je definisan poljem <i>Manufacturer ID</i> u osnovnoj TEDS sekciji.
10b	Sekcija definisana od korisnika ili drugog proizvođača. Nakon DS polja obavezno sledi 14-bitno polje <i>Manufacturer ID</i> . Ovim poljem definiše se proizvođač koji je obezbedio šablon. Ukoliko se radi o korisničkom šablonu, za ovo polje koristi se vrednost 16382.
11b	Proširena sekcija. Iza DS polja sledi 1-bitno polje ES ( <i>Extended Selector</i> ). Ako je vrednost ES selektora 0, sledi TEDS sekcija koja nije ograničena formom definisanom u 1451.4 standardu. Ukoliko je vrednost polja ES jednaka 1, TEDS je završen. U preostalom delu memorije korisnik može definisati sadržaj po želji. Ovaj sadržaj je tekstualni, pri čemu se svaki karakter koduje po ASCII formatu.

Pročitani i prevedeni TEDS podaci prikazuju se korisniku u tabelarnoj formi na grafičkom interfejsu, kao što je prikazano na slici 5.5. Prvih pet redova tabele predstavljaju osnovni TEDS. Preostali sadržaj TEDS memorije zavisi od tipa senzora, odnosno šablona koji se koristi za prevođenje sadržaja memorije. U *TEDS editor* programu, prevođenje binarnih TEDS podataka u formu pogodnu za prikaz korisniku,

bazira se na kolekciji *LabVIEW* virtuelnih instrumenata koja se naziva TEDS biblioteka (*TEDS library*) i dostupna je besplatno [13]. TEDS biblioteka sadrži funkcije za prevođenje podataka iz osnovnog i kalibracionog TEDS-a, dok su za TEDS pretvarača podržani standardni IEEE šabloni (tabela 4.6). Za prevođenje specifičnih elektronskih specifikacija prema novim šablonima kreirane su posebne biblioteke *LabVIEW* virtuelnih instrumenata, što je detaljnije objašnjeno u primerima realizacije 1451.4 senzora u poglavlju 5.3.

Osim čitanja sadržaja TEDS memorije, *TEDS editor* program (slika 5.5) omogućava i kreiranje novog TEDS sadržaja izborom opcije *Create New TEDS*. Sadržaj elektronskih specifikacija se može uneti za sve tri osnovne sekcije: osnovni TEDS pretvarača i kalibracioni TEDS. Prevođenje unetih podataka u binarnu formu vrši se korišćenjem *TEDS library* funkcija, odnosno korišćenjem posebno kreirane biblioteke za specifične sekcije TEDS memorije koje nisu definisane standardom. Po kreiranju željenog sadržaja elektronskih specifikacija senzora, kompajliranje i upis u TEDS memoriju vrši se izborom opcije *Write TEDS Data* sa grafičkog korisničkog menija *TEDS editor* aplikacije.

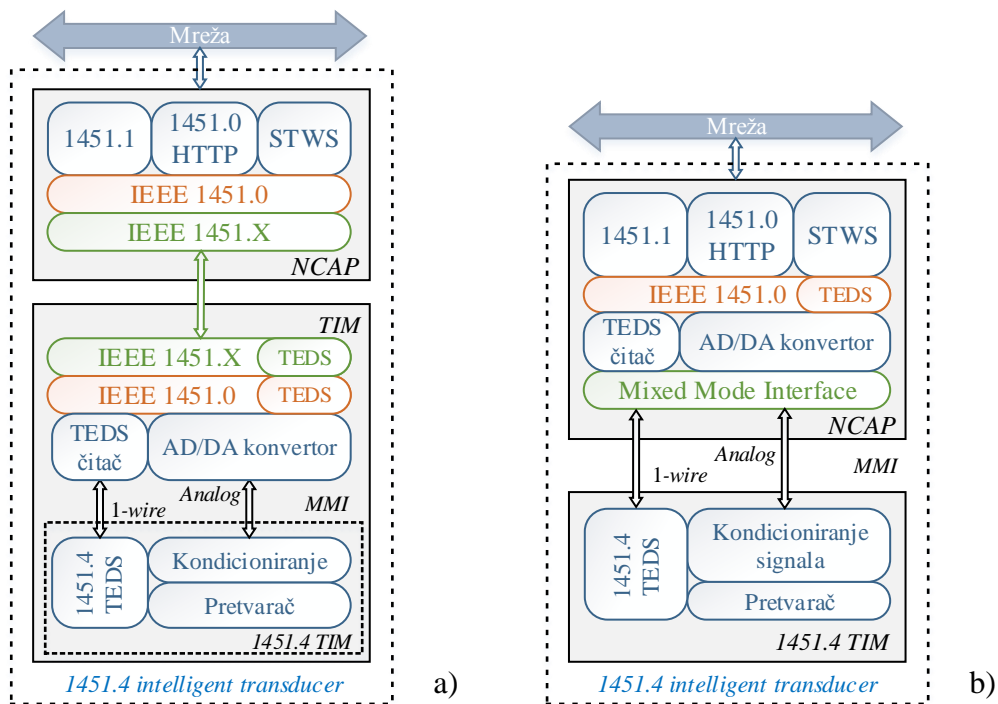
### **5.1.3. Implementacija mrežnog procesora**

U glavi 4 utvrđeno je da mrežni procesor (NCAP) ima ključnu ulogu u povezivanju inteligentnih senzora u distribuirani merni sistem. Mrežni procesor, sa jedne strane, treba da obezbedi odgovarajući interfejs za *Plug and Play* povezivanje i komunikaciju sa inteligentnim sensorom, dok sa druge strane, treba da definiše mrežne servise koji će omogućiti integraciju senzora u distribuirani merni sistem.

S obzirom da je osnovni cilj uvođenja standarda IEEE 1451.4 da se na što jednostavniji način omogući mrežno povezivanje tradicionalnih analognih senzora, ovim standardom se, za komunikaciju između senzora i mrežnog procesora, definiše mešoviti interfejs. Kao što je analizirano u poglavlju 4.2.1, mešoviti interfejs kombinuje prenos digitalnih podataka iz TEDS memorije i analognih podataka tradicionalnog senzora. U okviru disertacije koristi se mešoviti interfejs klase 2.

Pošto se podaci sa 1451.4 senzora prenose posredstvom analognih signala, mrežni procesor mora da obezbedi kondicioniranje signala i analogno-digitalnu (AD) konverziju, kao i odgovarajuće mrežne servise. Ukoliko se za povezivanje na mrežu

koriste servisi definisani standardom IEEE 1451.0, mrežni procesor takođe mora da obezbedi i adekvatnu TEDS strukturu u skladu sa ovim standardom. Međutim, zbog analognog prenosa mernih signala i zbog značajno drugačijeg formata TEDS podataka, standard IEEE 1415.0 ne obezbeđuje potpunu kompatibilnost sa standardom IEEE 1451.4. Umesto toga standard 1451.0 preporučuje povezivanje 1451.4 pretvarača na mrežni procesor posredno, korišćenjem nekog od digitalnih 1451.X interfejsa, slika 5.7a [14].



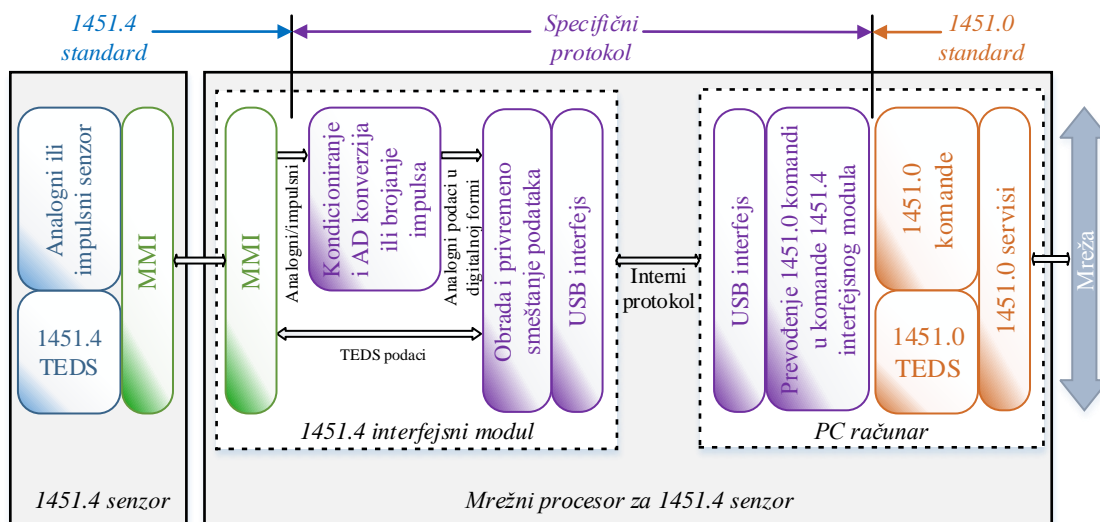
Slika 5.7. Model mrežnog povezivanja 1451.4 pretvarača: prema standardu 1451.0 (a) i prema predlogu iz [15] (b)

Za primenu koncepta sa slike 5.7a potrebno je konstruisati TIM modul koji, sa jedne strane, podržava 1451.4 interfejs za povezivanje sa sensorima, dok, sa druge strane, podržava 1451.X interfejs za povezivanje sa mrežnim procesorom, a osim toga treba da obezbedi i podršku za pristup podacima i TEDS strukturama prema standardu 1451.0. Očigledno, ovakav pristup je dosta složen za implementaciju, što je u suprotnosti sa osnovnom idejom jednostavnog povezivanja analognih senzora koja je predstavljena u standardu IEEE 1451.4. U pojedinim slučajevima koncept prikazan na slici 5.7a je opravdan ako se, na primer, za komunikaciju TIM modula i NCAP procesora koristi bežična veza. U tom slučaju bežična veza implementira se na bazi

standarda IEEE 1451.5 uz dodatak odgovarajućeg fizičkog TEDS-a. Međutim, kod bežičnih senzorskih sistema često se koriste baterijski napajani čvorovi veoma ograničenih resursa te je od ključnog interesa smanjenje potrošnje. Kod takvih sistema poželjno je koristiti što kraće poruke i što manje zauzeće memorije senzora, pa ovakav pristup u tom slučaju nije praktičan.

Iako principski jednostavan i prihvatljiv, pristup sa slike 5.7a očigledno dodatno komplikuje realizaciju i često ne predstavlja adekvatno rešenje, posebno kada se koristi žična veza za povezivanje sa mrežnim procesorom. Pojedini autori stoga predlažu nešto drugačiji pristup. Na primer, autori u [15] predlažu da se povezivanje pretvarača i mrežnog procesora izvrši po standardu IEEE 1451.4, a da se analogno-digitalna konverzija signala kao i neophodni 1451.0 servisi obezbede konstrukcijom hardverskih i softverskih komponenti mrežnog procesora (slika 5.7b).

S obzirom da pristup sa slike 5.7b predstavlja adekvatnije rešenje za slučaj senzora direktno povezanog na NCAP žičnom vezom, ovaj koncept usvojen je kod realizacije mrežnog procesora. Detaljniji šematski prikaz koncepcije realizovanog 1451.4 mrežnog procesora prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8. Koncepcija 1451.4 mrežnog procesora

Kako standard 1451.0 dozvoljava realizaciju monolitnih NCAP i TIM modula uz uslov da poruke na „vidljivim“ interfejsima zadovoljavaju standard („as long as the messages at visible interfaces conform to the rest of the standard“ [14]), 1451.4 mrežni

procesor realizovan je tako da zadovolji standard IEEE 1451.4 za povezivanje sa analognim sensorima i standard IEEE 1451.0 za mrežno povezivanje.

Svi elementi standarda IEEE 1451.0 koji su neophodni za realizaciju aplikacionog interfejsa za mrežne servise pretvarača (*Transducer Services API*), opisanog u poglavlju 4.3.5, realizovani su na PC računaru korišćenjem programskog jezika *Java*. Osim toga, kako bi se omogućio pristup sensorima preko Interneta, PC računar takođe ima ulogu HTTP servera. U tu svrhu instaliran je besplatni softver *Apache HTTP server* [16], dok je integracija instaliranog severa sa mrežnim servisima pretvarača izvršena na bazi *Java* tehnologije. Za demonstraciju mrežnih funkcija 1451.4 pretvarača u praktičnim primenama, opisanim u poglavlju 5.3, slanje odgovarajućih komandi mrežnom procesoru izvršeno je korišćenjem HTTP protokola kao što je objašnjeno u poglavlju 4.3.6.

Sa druge strane, kako se za vezu mrežnog procesora i interfejsnog modula pretvarača ne koristi nijedan od fizičkih 1451.X interfejsa, pri realizaciji nisu implementirane funkcije aplikativnog interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača (*Module Communications API*), opisane u poglavlju 4.3.4. Iako je implementacija interfejsa za komunikaciju sa modulima pretvarača moguća, ona predstavlja nepotrebnu komplikaciju softvera mrežnog procesora, te je iz tog razloga izostavljena. Međutim, odgovarajući mehanizmi koji su neophodni za detekciju 1451.4 kompatibilnih pretvarača i komunikaciju sa mrežnim procesorom implementirani su na bazi internog protokola. Neke od najznačajnijih komandi internog protokola objašnjene su u poglavlju 5.1.1.

### **Dizajn elektronskih specifikacija prema standardu IEEE 1451.0**

Najznačajniju komponentu svakog inteligentnog *Plug and Play* pretvarača predstavljaju elektronske specifikacije. U poglavlju 5.1.2 objašnjena je realizacija softverskog alata za dizajn elektronskih specifikacija pretvarača u skladu sa standardom IEEE 1451.4. Međutim, kao što je prethodno objašnjeno, elektronske specifikacije 1451.4 senzora su specifične i nisu kompatibilne sa elektronskim specifikacijama definisanim u standardu IEEE 1451.0. Kako bi se 1451.4 senzori koristili u sistemima koji su bazirani na opšteprihvaćenom 1451.0 standardu, neophodno je izvršiti odgovarajuću konverziju [17]. Ovaj zadatak, međutim, nije jednostavan, a u samom

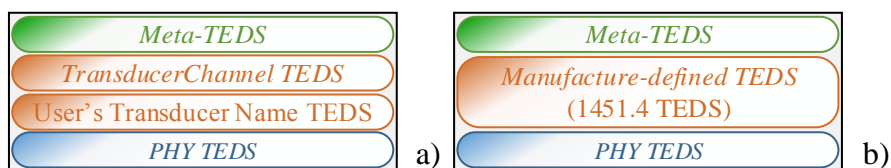
standardu IEEE 1451.0 problem nekompatibilnosti elektronskih specifikacija nije uopšte razmatran. Zbog toga je u literaturi ovaj problem tretiran na veoma različite načine.

Na primer, u radu [18] razmatrana je konstrukcija bežičnog senzorskog čvora na bazi standarda IEEE 1451.4. Međutim, u tom trenutku (2006. godine), standard IEEE 1451.0 još uvek nije bio zvanično usvojen, te problem kompatibilnosti ova dva standarda nije razmatran. Iste godine, C. Lee u svom master radu [19] detaljno analizira ovaj problem i daje predlog za konverziju sekcije osnovni TEDS prema standardu IEEE 1451.4 u odgovarajuću vrednost UUID (*Universal Unique Identification*) polja *Meta-TEDS* sekcije iz standarda IEEE 1451.0. Na ovaj način može se rešiti problem jedinstvene identifikacije senzora, ali je odgovarajući predlog za konverziju najvažnijih karakteristika senzora (*Transducer TEDS*) izostao, pa je samim tim onemogućena i automatska konfiguracija senzora. D. Wobshall takođe ističe ovaj problem u radovima [20, 21] i daje predlog da se za identifikaciju senzora u bežičnim senzorskim mrežama koristi samo osnovni TEDS, a da se kompletan virtuelni TEDS kompatibilan sa standardom IEEE 1451.0 čuva na odgovarajućem *gateway* čvoru koji igra ulogu mrežnog procesora.

Nešto drugačiji pristup predložio je J. Kim u [22]. Pošto je 1451.4 TEDS dobro definisan i prilagođen individualnom senzoru za koji se koristi, konverzija ovih specifikacija u odgovarajuću *TransducerChannel* sekciju 1451.0 TEDS-a nije najbolje rešenje, već je bolje koristiti *Manufacture-defined* TEDS sekciju, slika 5.9. Razlog za to je što *TransducerChannel* sekcija ima fiksnu strukturu koja nije prilagođena analognim sensorima, dok *Manufacture-defined* može imati proizvoljnu strukturu, te se originalni 1451.4 TEDS može koristiti neizmenjen.

Važno je napomenuti da je za realizaciju sa slike 5.9b neophodno definisati odgovarajuću *Meta-TEDS* sekciju za specifikaciju organizacije kanala pretvarača i *PHY TEDS* sekciju za specifikaciju fizičkog interfejsa koji se koristi za povezivanje mrežnog procesora i TIM modula. U okviru disertacije prihvaćen je pristup koji je uveo Kim u [22], pa je u skladu sa tim definisana odgovarajuća *Meta-TEDS* sekcija, čija je struktura prikazana u tabeli 5.4.





**Slika 5.9.** Standardna struktura 1451.0 elektronskih specifikacija (a), struktura 1451.0 elektronskih specifikacija kada se koristi 1451.4 TEDS (b) [22]

Struktura *Meta-TEDS* sekcije odabrana je tako da sadrži minimalan skup obaveznih parametara prema standardu IEEE 1451.0. Najvažniji parametar za operativni rad predstavlja maksimalan broj raspoloživih kanala koji, za realizovani interfejsni modul sa slike 5.1, iznosi deset – osam analognih i dva impulsa kanala. Takođe, treba napomenuti da se UUID polje *Meta-TEDS* sekcije ne koristi za identifikaciju pojedinačnih senzora, već se koriste odgovarajući podaci iz sekcije osnovni TEDS 1451.4 specifikacija.

**Tabela 5.4.** Struktura *Meta-TEDS* sekcije 1451.4 mrežnog procesora

Tip polja	Naziv polja	Komentar	Broj bajtova
-	-	Dužina TEDS sekcije	4
3	TEDSID	Identifikator TEDS sekcije	4
4	UUID	Globalni jedinstveni identifikator ( <i>Universal Unique Identification</i> )	10
<i>Informacije vezane za vremenski odziv pretvarača</i>			
10	OHoldOff	<i>Timeout</i> vreme za izvršenje operacije (komande)	4
12	TestTime	Trajanje operacije samotestiranja	4
<i>Informacije o kanalima pretvarača</i>			
13	Maxchan	Broj kanala pretvarača	2
-	-	<i>Checksum</i>	2

Svakom implementiranom kanalu pridružuje se *Manufactured-defined* TEDS koji sadrži elektronske specifikacije povezanog senzora definisane na bazi standarda IEEE 1451.4. S obzirom da interfejsni modul predstavlja integralni deo mrežnog procesora (slika 5.8), za povezivanje senzora korišćen je samo fizički 1451.4 interfejs, te bi najprirodnije rešenje bilo da se 1451.4 TEDS strukturi pridruži, umesto *Manufactured-defined* TEDS, odgovarajuća PHY TEDS struktura. Međutim, tekuća verzija standarda IEEE 1451.0 ne podržava ovu mogućnost, te odgovarajući PHY TEDS nije realizovan. Uz usvajanje koncepcije povezivanja koja je prikazana na slici 5.8 i uz manje formalne izmene u standardu IEEE 1451.0 (u interfejsu za komunikaciju sa modulima pretvarača), interfejs 1451.4 bi mogao da se uvede kao jedan od podržanih fizičkih 1451.X interfejsa.

## **5.2. Inteligentni *Plug and Play* senzor temperature**

Industrijski inteligentni moduli za merenje temperature na bazi platinskih otpornika i sa različitim komunikacionim interfejsima su u novije vreme lako dostupni na tržištu [23, 24]. Međutim, veoma su retka rešenja koja omogućavaju povezivanje u distribuirani merni sistem po *Plug and Play* konceptu. U ovom poglavlju opisan je proces projektovanja i implementacije *Plug and Play* otpornog temperaturnog detektora RTD (*Resistance Temperature Detector*) koji se zasniva na standardnom industrijskom PT100 senzoru. Za povezivanje RTD senzora korišćen je odgovarajući interfejsni modul baziran na platformi opisanoj u poglavlju 5.1.1. Za kreiranje elektronskih specifikacija senzora korišćen je *TEDS editor* program, opisan u poglavlju 5.1.2, dok je za povezivanje na mrežu korišćen 1451.4 kompatibilan mrežni procesor koji je opisan u poglavlju 5.1.3.

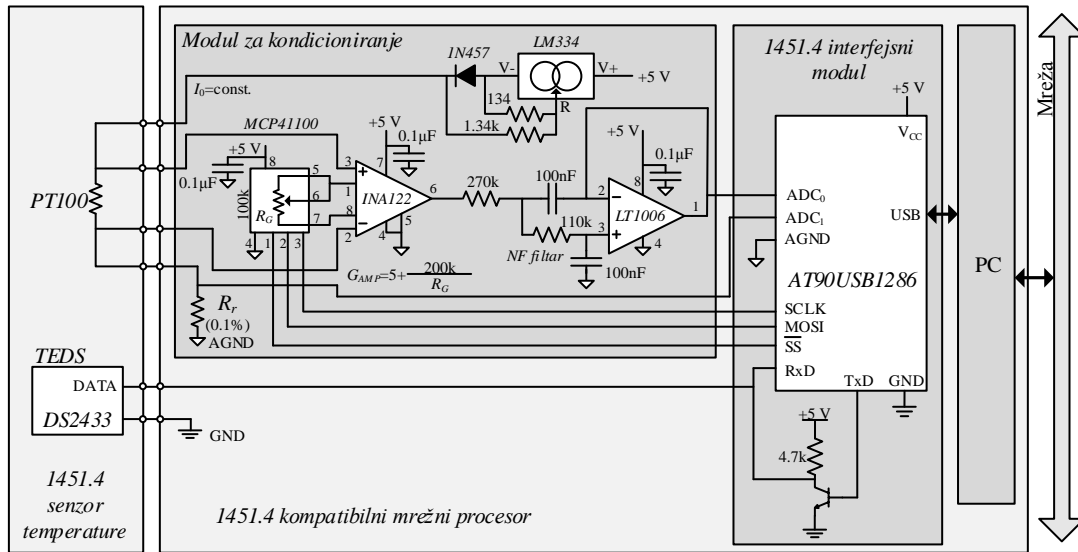
### **5.2.1. Realizacija i povezivanje senzora**

Inteligentni senzor temperature sastoji se iz tradicionalnog analognog RTD PT100 senzora i TEDS memorije. Povezivanje inteligentnog senzora temperature na mrežu ostvareno je korišćenjem 1451.4 interfejsnog modula i PC računara, kao što je opisano u poglavlju 5.1.1. Za napajanje senzora PT100 konstantnom strujom i kondicioniranje analognog mernog signala interfejsnom modulu pridružen je modul za kondicioniranje, kao što je prikazano na slici 5.10.

Modul za kondicioniranje signala sastoji se iz pojačavača programabilnog pojačanja i niskofrekventnog filtra. Pojačavač je realizovan korišćenjem instrumentacionog pojačavača INA122 i MCP41100 programabilnog otpornika kojim se upravlja preko SPI interfejsa. Niskofrekventni filter realizovan je kao Čebiševljevi filter drugog reda granične učestanosti 10 Hz. Modul za kondicioniranje signala povezan je sa 1451.4 interfejsnim modulom koji je korišćen za:

- komunikaciju sa TEDS memorijom preko jednožičnog interfejsa,
- komunikaciju sa PC računarom preko USB interfejsa,
- podešavanje pojačanja instrumentacionog pojačavača,
- analogno-digitalnu konverziju signala sa PT100 senzora (ADC-0), i

- analogno-digitalnu konverziju pomoćnog signala za merenje struje strujnog izvora (ADC-1).



Slika 5.10. Povezivanje 1451.4 senzora temperature sa mrežnim procesorom

Platinski PT100 senzor i modul za kondicioniranje povezani su preko četvorožičnog interfejsa kako bi se smanjile greške usled postojanja otpornosti provodnika za povezivanje. Jedan par provodnika korišćen je za povezivanje 1 mA strujnog izvora, dok je drugi par korišćen za merenje napona. Merenjem preko četvorožičnog interfejsa obezbeđuje se da pad napona usled postojanja otpornosti provodnika za povezivanje senzora ne utiče na merenje napona PT100 otpornika, s obzirom da ulazna otpornost instrumentacionog pojačavača ima veoma veliku vrednost.

Merenje temperature bazira se na merenju otpornosti PT100 otpornika. Za određivanje otpornosti, vrši se merenje napona ( $V_{PT100}$ ) na PT100 preko nultog kanala AD konvertora (ADC-0) i struje strujnog izvora ( $I_0$ ). Otpornost PT100 otpornika računa se kao:

$$R_{PT100} = \frac{V_{PT100}}{I_0} = \frac{V_{ADC0}}{G_{AMP} I_0}. \quad (5.1)$$

Kako bi se vrednost PT100 otpornika odredila sa što manjom mernom nesigurnošću, neophodno je imati tačna i precizna merenja struje izvora  $I_0$ , napona  $V_{ADC0}$  i pojačanja programabilnog pojačavača  $G_{AMP}$ , što se može videti iz (5.1). Da bi se smanjile greške merenja koje su posledica strujnog izvora, korišćena je tehnika merenja

struje kroz referentni otpornik. Struja konstantne vrednosti  $I_0$  teče kroz poznat, veoma precizan referentni otpornik otpornosti  $R_r$  koji je redno vezan sa otpornikom PT100. Merenjem napona na otporniku  $R_r$  ( $V_{ADC1}$ ) preko prvog kanala AD konvertora, struja napajanja se određuje po formuli:

$$I_0 = \frac{V_{ADC1}}{R_r}. \quad (5.2)$$

Na osnovu (5.1) PT100 otpornost se računa kao:

$$R_{PT100} = \frac{V_{ADC0}}{G_{AMP} V_{ADC1}} R_r. \quad (5.3)$$

Kao što se vidi, na osnovu (5.3), tačnost merenja  $R_{PT100}$  zavisi od karakteristika AD konvertora, pojačanja pojačavača i preciznog otpornika  $R_r$ , ali ne zavisi od tačnosti i stabilnosti konstantnog strujnog izvora  $I_0$ .

Ako se uvede pretpostavka da AD konvertor ima ofset, izmerena otpornost PT100 data je sledećom jednačinom:

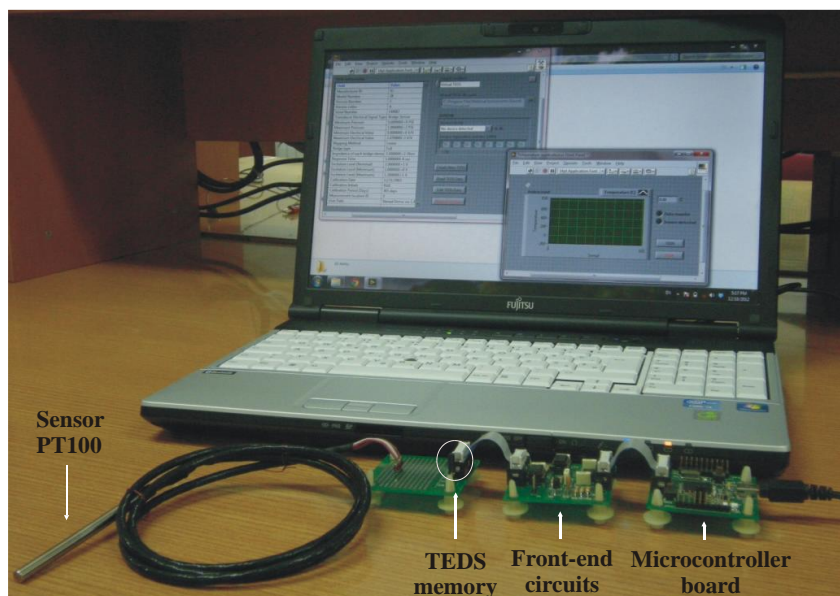
$$R_{PT100} = \frac{V_{ADC0} - V_{offADC0}}{G_{AMP} (V_{ADC1} - V_{offADC1})} R_r. \quad (5.4)$$

Ako se ofset odgovarajućeg kanala AD konvertora,  $V_{offADC0}$  odnosno  $V_{offADC1}$ , meri svake sekunde internim kratkospajanjem ulaza AD konvertora, izraz (5.4) se može iskoristiti za tačnije merenje otpornosti PT100.

Kola za kondicioniranje, zajedno sa konstantnim strujnim izvorom, u ovoj realizaciji, optimizovana su za rezistivni temperaturni detektor (RTD), ali mogu se koristiti za povezivanje i drugih analognih senzora kao što su: senzori otpornosti, mostni senzor, merne trake i termistori [2].

### **5.2.2. Testiranje *Plug and Play* temperaturnog senzora**

U skladu sa predstavljenim konceptom, implementiran je i testiran *Plug and Play* sistem za merenje temperature. Ovaj sistem se sastoji iz PT100 temperaturnog detektora, TEDS memorije, modula za kondicioniranje signala, interfejsnog modula na bazi 8-bitnog mikrokontrolera i PC računara (slika 5.11). Mikrokontrolerski interfejsni modul, modul za kondicioniranje i PC računar formiraju mrežni procesor, dok je senzor temperature povezan na NCAP preko MMI interfejsa klase 2.



*Slika 5.11. Realizovani sistem za testiranje Plug and Play temperaturnog senzora*

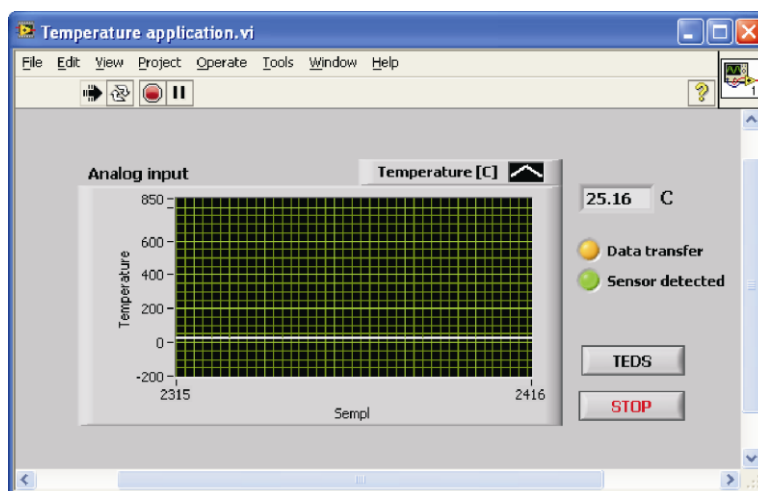
Ko što je objašnjeno u poglavlju 5.1, PC računar je korišćen za razvoj i testiranje elektronskih specifikacija senzora, ali i za podržavanje funkcionalnosti mrežnog procesora. PC, koji može biti realizovan i kao kompjuter na jednoj ploči, izabran je kao deo mrežnog procesora jer već ima drajvere za većinu podržanih mrežnih protokola, kao i zbog visokog stepena integracije sa modernim T&M i DAQ sistemima.

Nakon uključivanja ili resetovanja PC aplikacija automatski konfigurira sistem prema sledećoj sekvenci:

- Pokreće se algoritam pretraživanja kako bi se otkrilo da li je povezan jednožični memorijski uređaj;
- TEDS podaci se čitaju iz memorijskog uređaja;
- Prevođenje TEDS podataka u skladu sa šablonom;
- Elektronske komponente u modulu za kondicioniranje signala automatski se konfiguriraju na osnovu elektronskih specifikacija senzora.

Nakon uspešno završenog procesa konfiguracije, aplikacija periodično učitava analogne podatke, vrši konverziju podataka, obradu signala i prikazuje izmerene podatke u odgovarajućim jedinicama (slika 5.12). Ukoliko je senzor povezan na mrežu, sprovodi se ista procedura za konfiguraciju senzora. Po završenoj konfiguraciji, senzor

je spreman za prijem komandi sa mreže. Komande za rad sa senzorom preko mreže realizovane su u skladu sa konceptom koji je detaljno opisan u poglavlju 5.1.3.



Slika 5.12. Grafički korisnički interfejs aplikacije za merenje temperature sa Plug and Play RTD senzorom

Da bi se omogućila automatska indentifikacija i konfiguracija senzora, TEDS podaci smeštaju se u EEPROM memoriju prema standardnom IEEE šablonu 37 (*Template ID = 37*) [25]. Ovim šablonom definišu se parametri kao što su opseg mernih temperatura, opseg otpornosti, strujni izvori i drugi parametri koji su potrebni za RTD senzore. Tabela koja detaljnije opisuje parametre IEEE šablona 37 data je u prilogu 2. Za kreiranje elektronskih specifikacija senzora temperature koristi se *TEDS editor* aplikacija opisana u poglavlju 5.1.2. Deo grafičkog interfejsa *TEDS editora* za unos parametara RTD senzora prikazan je na slici 5.13.

Za odabrani RTD senzor PT100, minimalne i maksimalne vrednosti temperature mernog opsega su  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respektivno. U ovako širokom temperaturnom opsegu funkcija prenosa senzora pokazuje značajnu nelinearnost, koja se može aproksimirati pomoću dve polinomske funkcije, tzv. Callendar–Van Dusen jednačine [25]:

$$R(t) = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100^{\circ}\text{C})t^3], (t < 0^{\circ}\text{C}), \quad (5.5)$$

$$R(t) = R_0 [1 + At + Bt^2], (t \geq 0^{\circ}\text{C}). \quad (5.6)$$

U prethodnim jednačinama  $t$  predstavlja temperaturu RTD senzora u  $^{\circ}\text{C}$ ,  $R(t)$  je otpornost na temperaturi  $t$ ,  $R_0$  je otpornost na  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za standardni industrijski PT100

otpornik, vrednosti parametara  $R_0$ ,  $A$ ,  $B$ , i  $C$  specifikovane su u standardu IEC 60751 i iznose:  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ ,  $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$ . S obzirom da su ove vrednosti koeficijenta  $A$ ,  $B$  i  $C$  standardne i da ih IEEE šablon 37 već sadrži, nije ih potrebno posebno unositi. Osim toga, TEDS šablon podržava i mogućnost unošenja odgovarajućih vrednosti koeficijenta na osnovu kojih se može podesiti najbolja polinomska aproksimacija funkcije prenosa PT100 senzora.

The image shows a screenshot of the TEDS editor interface for configuring an RTD sensor. The interface is organized into several sections with input fields and labels:

- Physical Value Range:** Maximum Physical Value (deg C) set to 400, Minimum Physical Value (deg C) set to -200.
- Electrical Value Range:** Maximum Electrical Value (Ohms) set to 247.09, Minimum Electrical Value (Ohms) set to 18.52.
- R0 Resistance:** R0 Resistance Select is set to "R0 = 100 ohms". Below it, a note says "Specify value if 'R0 Resistance' Select = 'Specify R0'", and the R0 Resistance field is set to 1 Ohms.
- RTD Curve (CVD Coefficients):** alpha = 0.003851. A note states: "following 3 parameters are only valid if 'RTD Curve' value is 'Specify Coefficients'". Below this, RTDcoef\_A, RTDcoef\_B, and RTDcoef\_C are all set to 0E+0.
- Calibration Information:** Calibration Date is 11/19/2012, Calibration Initials (3) is NJJ, Calibration Period (days) is 365, and Measurement Location ID is 0.
- Response Time and Excitation:** Transducer Response Time (sec) is 1E-6, Excitation Level (Nom) (Amps) is 0.002, and Excitation Level (Max) (Amps) is 0.01.

Slika 5.13. Deo grafičkog interfejsa TEDS editora za unos parametara RTD senzora prema IEEE šablonu 37

Nakon izvršenog merenja PT100 otpornosti, izmerena temperatura određuje se na osnovu jednačine (5.5) za negativne, odnosno na osnovu jednačine (5.6) za pozitivne temperature. Za dodatno podešavanje funkcije prenosa PT100 senzora, kao dopuna standardnom šablonu 37 na osnovu podataka dobijenih kalibracijom, koristi se standardni kalibracioni šablon u vidu tabele (*Calibration table*) ili krive (*Calibration curve*).

Osim prethodno navedenih podataka, elektronske specifikacije RTD senzora sadrže i podatke o izvoru napajanja. Na osnovu TEDS podataka o vrednosti struje izvora napajanja (*excitation level*) i opsega otpornosti senzora (*min/max electrical value*), automatski se proračunava vrednost otpornosti  $R_G$ , kako bi se prilagodilo

pojačanje instrumentacionog pojačavača. Na primer, za struju izvora napajanja od 1 mA i maksimalnu otpornost PT100 senzora od 390.26  $\Omega$ , pojačanje pojačavača treba da iznosi  $G_{AMP} = 5 \text{ V} / (1 \text{ mA} * 390.26 \Omega) = 12.81$ , što se postiže podešavanjem otpornosti  $R_G$  na vrednost od 25.6 k $\Omega$  (videti sliku 5.10).

### 5.2.3. Analiza mernih performansi temperaturnog senzora

Na osnovu prethodne analize može se videti da i NCAP i RTD senzor unose greške u merenje. U nastavku poglavlja posebna pažnja posvećena je određivanju merne nesigurnosti koja potiče od NCAP hardvera. S obzirom da je merenje PT100 otpornosti vršeno indirektno (videti poglavlje 2.3.2), na osnovu jednačine (5.1) merna nesigurnost koju unose 1451.4 interfejsni modul i modul za kondicioniranje signala data je sledećom jednačinom [26, 27]:

$$u(R_{PT100}) = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{PT100}}{\partial V_{PT100}}\right)^2 u^2(V_{PT100}) + \left(\frac{\partial R_{PT100}}{\partial I_0}\right)^2 u^2(I_0)} = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{PT100}) + c_2^2 u^2(I_0)}, \quad (5.7)$$

gde  $u(R_{PT100})$  predstavlja nesigurnost merenja otpornosti PT100,  $u^2(V_{PT100})$  varijansu merenog napona, a  $u^2(I_0)$  varijansu merene struje.

S obzirom da je  $V_{PT100} = V_{ADC} / G_{AMP}$ , varijansa merenog napona  $u^2(V_{PT100})$  definisana je sledećom zavisnošću:

$$u^2(V_{PT100}) = \left(\frac{\partial V_{PT100}}{\partial V_{ADC}}\right)^2 u^2(V_{ADC}) + \left(\frac{\partial V_{PT100}}{\partial G_{AMP}}\right)^2 u^2(G_{AMP}) = c_3^2 u^2(V_{ADC}) + c_4^2 u^2(G_{AMP}), \quad (5.8)$$

gde  $u^2(V_{ADC})$  predstavlja varijansu merenja napona AD konvertora, a  $u^2(G_{AMP})$  varijansu pojačanja pojačavača. U skladu sa (5.2), varijansa merene struje  $I_0$  data je sa:

$$u^2(I_0) = \left(\frac{\partial I_0}{\partial V_{ADC}}\right)^2 u^2(V_{ADC}) + \left(\frac{\partial I_0}{\partial R_r}\right)^2 u^2(R_r) = c_5^2 u^2(V_{ADC}) + c_6^2 u^2(R_r), \quad (5.9)$$

gde je  $u^2(R_r)$  varijansa otpornosti referentnog otpornika.

Pojednostavljena procena merne nesigurnosti PT100 otpornosti može se izvršiti pod pretpostavkom da varijansa mernog napona odgovara rezoluciji AD konvertora. Pretpostavljena raspodela napona AD konvertora u opsegu koji odgovara jednom nivou kvantizacije je uniformna, te odgovarajući faktor proširenja iznosi  $\sqrt{3}$ , a odgovarajuća vrednost varijanse je prikazana u tabeli 5.5. Faktor proširenja detaljno je razmatran u



poglavlju 2.3.2, a odgovarajuće vrednosti za često korišćene raspodele date su u tabeli 2.4. Vrednost varijanse naponskog pojačanja i otpornosti referentnog otpornika dobijene su iz kataloških podataka proizvođača i prikazane u tabeli 5.5. S obzirom na diskretnu prirodu pojačanja, kao i kod AD konvertora usvojena je uniformna raspodela, dok je za vrednosti referentnog otpornika usvojena Gausova raspodela.

**Tabela 5.5.** Varijanse u merenju napona, otpornosti referentnog otpornika i pojačanja pojačavača dobijene iz podataka proizvođača

Simbol	Raspodela verovatnoće	k	Maksimalna varijansa
$u^2(V_{ADC})$	Uniformna	$\sqrt{3}$	$3.1789 \cdot e^{-7} [V^2]$
$u^2(R_r)$	Gausova	2	$2.5 \cdot e^{-7} [\Omega^2]$
$u^2(G_{AMP})$	Uniformna	$\sqrt{3}$	$3.0 \cdot e^{-6} [(V/V)^2]$

U tabeli 5.6. date su vrednosti koeficijenata  $c_i$ , svih komponenta merne nesigurnosti, kao i procenjene ukupne merne nesigurnosti NCAP hardvera. Procena je izvršena za najgori slučaj, odnosno kada je  $R_{PT100} = 390 \Omega$ .

**Tabela 5.6.** Procena merne nesigurnost otpornosti za  $R_{PT100}=390 \Omega$

Koeficijenti osetljivosti	$c_1$	$1 \cdot e^{-3} [1/A]$
	$c_2$	$3.9 \cdot e^{-5} [V/A^2]$
	$c_3$	$7.8 \cdot e^{-2} [V/V]$
	$c_4$	$3.042 \cdot e^{-2} [V]$
	$c_5$	$1 \cdot e^{-3} [1/\Omega]$
	$c_6$	$1 \cdot e^{-6} [V/\Omega^2]$
Standardna nesigurnost procene struje $u(I_0)$		$5.6382 \cdot e^{-7} [A]$
Standardna nesigurnost procene napona $u(V_{PT100})$		$6.8631 \cdot e^{-5} [V]$
Standardna nesigurnost procene RT100 otpornosti $u(R_{PT100})$		$0.2340 [\Omega]$
Proširena nesigurnost (95%) procene RT100 otpornosti $U(R_{PT100})$		$0.4607 [\Omega]$

Određena standardna merna nesigurnost PT100 otpornosti je  $0.2340 \Omega$ , a proširena nesigurnost sa nivoom pouzdanosti 95% je  $0.4607 \Omega$ . Ove nesigurnosti ne prelaze 0.12% vrednosti merene otpornosti.

U odsustvu komore za testiranje i sertifikovanog termometra, umesto PT100 senzorom, testiranje realizovanog *Plug and Play* senzora izvršeno je na temperaturi  $25^\circ C$  pomoću niza otpornika poznate otpornosti. Da bi se verifikovala tačnost sprovedenih merenja, dobijeni rezultati upoređeni su sa merenjima izvršenim pomoću *Agilent 34401A DMM* [28]. Merenja su vršena za osam otpornika u 1000 tačaka. Rezultati paralelnih merenja otpornosti, pomoću DMM i pomoću predloženog

akvizicionog sistema za *Plug and Play* senzor, dati su u tabeli 5.7. Ekvivalentna temperatura računata je pomoću Callendar–Van Dusen jednačina (5.5) – (5.6).

**Tabela 5.7.** *Upoređenje rezultata merene otpornost korišćenjem Plug and Play senzora i referentnog instrumenta.*

Nominalna vrednost		Agilent 34401A			Akvizicioni sistem za <i>Plug and Play</i> senzor		
Rnom [Ω]	Tol. [%]	Rmeas [Ω]	Standardna nesigurnost [Ω]	Ekvivalentna temperatura [°C]	Rmeas [Ω]	Standardna nesigurnost [Ω]	Ekvivalentna Temperatura. [°C]
18	1	17.9611	8.79e-6	-201.29	17.9164	6.9e-4	-201.40
51	1	50.7311	1.495 e-5	-123.36	50.6701	1.5e-3	-123.51
100	1	99.8820	9.92 e-6	-0.30	99.6088	3.6e-3	-1.00
150	1	149.402	1.594 e-5	128.86	149.2097	5.6e-3	128.34
200	1	199.711	1.391 e-5	265.55	199.3970	6.0e-3	264.67
270	1	267.957	3.383 e-5	461.17	267.9073	7.6e-3	461.02
330	1	328.339	1.701 e-5	645.88	328.0192	9.1e-3	644.88
390	1	390.608	1.798 e-5	850.43	390.9000	1.14e-2	851.43

Rezultati testiranja iz tabele 5.7 pokazuju da greška merenja otpornosti koja potiče od NCAP elektronike ne prelazi  $\pm 0.32 \Omega$ , što znači da u celom mernom opsegu relativne greške za otpornost i temperaturu ne prelaze 0.27% i  $\pm 1^\circ\text{C}$ , respektivno. Ako bi bila potrebna preciznija merenja, potrebno je koristiti spoljašnji AD konvertor visoke rezolucije sa ugrađenim pojačavačem i programabilnim pojačanjem.

### **5.3. Monitoring jonizacionog zračenja korišćenjem inteligentnih *Plug and Play* senzora**

Mreža za monitoring parametara okoline predstavljaju važan oblast primene senzora koji podržavaju *Plug and Play* tehnologiju. Monitoring jonizujućeg zračenja je od posebnog značaja u okolini nuklearnih postrojenja, jer se koristi da bi se obezbedila blagovremena zaštita i minimalna izloženost zračenju u slučaju nuklearne nezgode usled koje dolazi do oslobađanja radijacije iz nuklearnih postrojenja. Iako senzorske mreže, a posebno bežične senzorske mreže, predstavljaju jednu od ključnih tehnologija 21. veka, one još uvek nemaju punu primenu u oblasti monitoringa jonizujućeg zračenja. Ovakvo stanje posledica je činjenice da savremeni sistemi za praćenje radijacije koriste vrlo malo ili uopšte ne koriste *Plug and Play* tehnologiju. Istovremeno, ne postoje

komercijalno dostupni detektori zračenja sposobni za povezivanje po *Plug and Play* principu u heterogenom mrežnom okruženju.

Da bi se *Plug and Play* koncept primenio u oblasti monitoringa mreža, neophodno je da pojedini uređaji, kao što su detektori, uključuju „samoopisujuće“ funkcije koje obezbeđuju najvažnije informacije o uređaju. Na osnovu ovih informacija moguće je izvršiti identifikaciju uređaja koji su povezani na mrežu i komunicirati sa njima kroz standardizovani komunikacioni interfejs. Razvoj tehnologije senzora u poslednjoj deceniji, doveo je do toga da se na tržištu pojave inteligentni senzori koji sadrže ugrađene „samoopisujuće“ funkcije [29-32], te se otvara mogućnost primene ovih tehnologija u monitoringu jonizujućeg zračenja.

Jedan od mnogih standarda koji uvodi „samoopisujuće“ funkcije inteligentnih senzora je i IEEE 1451. U okviru ove familije posebno je zanimljiv standard IEEE 1451.4 jer omogućava mrežno povezivanje tradicionalnih analognih senzora uz dodavanje EEPROM memorije u koju se smeštaju elektronske specifikacije za opis karakteristika senzora. Standard IEEE 1451.4 može biti veoma koristan za povezivanje radijacionih detektora u mreže za monitoring jonizacionog zračenja.

MMI interfejs definisan 1451.4 standardom nudi dovoljno mogućnosti za povezivanje bilo kog tipa detektora jonizujućeg zračenja sa naponskim, strujnim ili impulsnim izlazom. Iako standard definiše veći broj šablona za širokopoznate klase senzora kao što su senzori sile, ubrzanja, mikrofone, senzore temperature i druge (videti tabelu 4.6) [25], standard ne obuhvata šablone za senzore jonizacionog zračenja. Za pojedine tipove detektora, kao što su jonizacione komore sa strujnim izlazom, standardni IEEE šabloni 30 (*High-Level Voltage Output*) ili 31 (*Current Loop Output*) mogu se, iako nisu u potpunosti adekvatni, iskoristiti za smeštanje elektronskih specifikacija. Upravo zbog nedostatka odgovarajuće podrške za ove tipove senzora standard IEEE 1451.4 do sada nije naišao na širu primenu u mrežama za monitoring radioaktivnog zračenja.

U nastavku ovog poglavlja analizirana je mogućnost primene standarda IEEE 1451.4 u oblasti merenja jonizujućeg zračenja. S obzirom na složenost problema merenja i raznovrsnost i specifičnost senzora i instrumenata za merenje radioaktivnog

zračenja, razmatranja u okviru disertacije ograničena su na monitoring gama zračenja na bazi pristupačnih i često korišćenih senzora GM detektora i jonizacione komore.

### **5.3.1. Inteligentni *Plug and Play* GM detektor**

GM (*Geiger-Müller*) detektor spada u grupu gasnih detektora jonizujućeg zračenja koji na svom izlazu daju impulsi naponski signal. Broj impulsa u jedinici vremena srazmeran je brzini doze jonizujućeg zračenja. Od svih gasnih detektora, GM detektor ima najveću osetljivost i daje impulse najveće amplitude. Međutim, impulsi na izlazu GM detektora su iste amplitude i ne zavise od energije jonizujućeg zračenja, te se ne mogu koristiti za analizu energetskog spektra.

GM detektor tipično se sastoji od metalnog cilindra, koji služi kao katoda, i od anode u vidu metalne žice koja prolazi kroz osu cilindra. Cilindar je zatvoren sa obe strane i ispunjen plemenitim gasom koji je najčešće obogaćen organskim ili halogenim elementima. Potencijalna razlika između elektroda GM detektora je visoka (tipično reda 300-500 V) i dovoljna da izazove skoro potpunu jonizaciju detektora gasa od jedne primarne jonizacije. Trenutno smanjenje napona napajanja, omogućava oporavak detektora. Međutim, za oporavak detektora potrebno je izvesno vreme koje se naziva mrtvo vreme detektora.

Još jedna važna karakteristika GM detektora je zavisnost broja impulsa na izlazu detektora od energije zračenja. Maksimum odziva detektora dostiže se na relativno niskim energijama i može da bude i do trideset puta veći od odziva na drugim energijama, za istu vrednost brzine doze. Ovakva zavisnost odziva od energije zračenja veoma nepovoljno utiče na mernu nesigurnost instrumenta. Energetska zavisnost detektora može se ispraviti dodavanjem obloge za kompenzaciju, koja, međutim, nepovoljno utiče na osetljivost i detekciju zračenja niske energije. Sličan problem postoji i kod zavisnosti odziva od upadnog ugla zračenja u odnosu na osu detektora. Oba problema mogu biti efikasno rešena uvođenjem odgovarajućih elektronskih specifikacija, kao što je opisano u radu autora disertacije [4].

GM detektori masovno se proizvode u raznim oblicima, veličinama, i sa različitim vrednostima osetljivosti. Prenosni merači doze i brzine doze jonizujućeg zračenja koji sadrže GM brojače česti su zbog svoje jednostavnosti i niske cene, jer je ovim detektorima potreban napon napajanja umerene stabilnosti i odgovarajući

pojačavač jednostavne konstrukcije. S obzirom na široku i čestu upotrebu, GM detektor odabran je kao tipični primer za realizaciju elektronskih specifikacija detektora jonizujućeg zračenja na bazi standarda IEEE 1451.4.

### **5.3.1.1. Elektronske specifikacije GM detektora**

Kao drugi pretvarači podržani standardom IEEE 1451.4, detektori jonizujućeg zračenja mogu se opisati odgovarajućim elektronskim specifikacijama i povezati sa 1451.4 kompatibilnim mrežnim procesorom. U nastavku je izvršena sistematizacija karakteristika detektora zračenja i dat je predlog za standardizaciju TEDS informacija za ovu vrstu senzora. Posebna pažnja posvećena je definisanju standardnog šablona za čuvanje podataka o GM detektoru. Konstrukcija šablona od ključnog je značaja za priključenje detektora jonizujućeg zračenja na monitoring mrežu koja omogućava automatsku konfiguraciju baziranu na *Plug and Play* konceptu .

#### **Osnovni TEDS**

Pošto je osnovni TEDS obavezan, važno je koristiti informacije sadržane u ovom TEDS segmentu kako bi se ukazalo na vrstu senzora koji se koristi za detekciju zračenja. Kao što je ranije navedeno osnovni TEDS sastoji se iz pet polja: *Manufacturer ID*, *Model number*, *Version letter*, *Version number* i *Serial number*. Svaki proizvođač 1451.4 pretvarača u obavezi je da zatraži jedinstveni identifikator proizvođača (*Manufacturer ID*) od IEEE *Registration Authority* organizacije. Ovo polje, kao i polja *Model number* i *Serial number*, ne mogu se koristiti za klasifikaciju detektora. Međutim, polja *Version letter* (5 bita) i *Version number* (6 bita) pogodna su za grubu klasifikaciju pretvarača [33, 34].

U tabeli 5.8 data je klasifikacija najčešće korišćenih senzora za monitoring jonizacionog zračenja, izvršena na osnovu polja *Version letter* i *Version number*.

#### **Šablon za TEDS pretvarača GM detektora**

Iako osnovni TEDS može da se iskoristi za smeštanje podataka o tipu senzora, kao što je pokazano u tabeli 5.8, ovi podaci nisu dovoljni da omoguće povezivanje senzora u skladu sa *Plug and Play* konceptom. Najvažnije karakteristike senzora za automatsku konfiguraciju, kao što su merni opseg, osetljivost i električne karakteristike mernog signala, čuvaju se u sekciji TEDS memorije koja se naziva TEDS pretvarača

(*Transducer TEDS*). Kao što je objašnjeno u poglavlju 4.2.3, ovi podaci formatizuju se i čuvaju u TEDS memoriji na osnovu odgovarajućeg šablona napisanog na TDL jeziku.

**Tabela 5.8.** Klasifikacija detektora na bazi *Version letter* i *Version number* polja osnovnog TEDS-a

Tip detektora	<i>Version letter</i>	<i>Version number</i>	Pod-tip detektora
Geiger-Müller brojači	G	0000ew	w=1 – sa prozorom w=0 – bez prozora e=1 – energetske kompenzovan e=0 – bez energetske kompenzacije
Jonizaciona komora	I	0000pp	pp=00 – nizak pritisak pp=01 – otvorena pp=10 – visoki pritisak
Proporcionalni brojači	P	000ggw	w=1 – sa prozorom w=0 – bez prozora gg=00 – sa protočnim gasom gg=01 – zatvoren gg=10 – vazdušni
Scintilacioni brojači	C	0000so	o=1 – organski scintilator o=0 – neorganski scintilator s=1 – čvrsti scintilator s=0 – tečni scintilator
Poluprovodnički detektori	S	000mmd	d=1 – dopiran ( <i>extrinsic</i> ) d=0 – nedopiran ( <i>intrinsic</i> ) mm=00 – silicijumski detektor mm=01 – germanijumski detektor mm=10 – drugi materijal detektora
Bilo koji	Bilo koje	111111	Nema informacija

Veliki broj senzora jonizujućeg zračenja, uključujući i GM detektor, rade u impulsnom režimu. Međutim, nijedan od standardnih IEEE šablona (videti tabelu 4.6) nije definisan za ovaj tip senzora, te se impulsni senzori ne mogu opisati primenom standardnih IEEE šablona pretvarača. Sa druge strane, u aneksu B (*Annex B*) 1451.4 standarda navodi se kompletna lista i odgovarajuće definicije standardnih karakteristika svih pretvarača koji su obuhvaćeni standardom. Uprkos činjenici da impulsni senzori nemaju standardni IEEE šablon, među ovim karakteristikama navedena je i karakteristika *Electrical signal type* koja može imati vrednost *Puls sensor* čime se daje mogućnost da senzor bude impulsnog tipa. Osim toga, u aneksu B, navedene su i druge karakteristike važne za impulsne senzore:

- *Pulse measurement type* – kojom se specifikuje vrsta mernog signala (*Frequency, Period, Duty cycle, Count* i dr.),

- *Discrete signal type* – kojom se specifikuje tip logičkih signala (*Active low*, *Active high*, *Bipolar*, i dr.),
- *Discrete signal amplitude* – kojom se specifikuje amplituda digitalnog signala.

Prethodne karakteristike, kao i druge koje su navedene u aneksu B iskorišćene su za definisanje šablona za GM brojač.

Predložen je novi šablon, nazvan *Counting ionizing radiation sensor*, dizajniran za GM detektore. Predloženi šablon takođe se može koristiti i za druge senzore jonizujućeg zračenja sa impulsnim izlazom. Šablon je podeljen u nekoliko sekcija koje grupišu parametre slične namene: *Template ID*, *Measurement*, *Electrical signal output*, *Power supply*, i *Calibration and miscellaneous*, kao što je prikazano u tabeli 5.9. Kao i kod standardnih IEEE šablona, prvo polje, *Template ID*, predstavlja 8-bitni celobrojni identifikator šablona. Za predloženi šablon, *Counting ionizing radiation sensor* usvojena je vrednost identifikatora 45, s obzirom da se ova vrednost ne koristi u okviru standarda IEEE 1451.4.

**Tabela 5.9.** Organizacija šablona za TEDS pretvarača GM detektora

Sekcija šablona	Sadržaj (skup parametara slične namene)
<i>Template ID</i>	Identifikator šablona. Ova sekcija sadrži samo jedno polje za identifikaciju šablona. Za predloženi šablon <i>Counting ionizing radiation sensor</i> koristi se vrednost 45.
<i>Measurement</i>	Specifikuje merne karakteristike senzora, kao što sumerni opseg, jedinice, vezu između fizičkih i električnih parametara senzora i sl. (tabela 5.10).
<i>Electrical signal output</i>	Definiše električne karakteristike izlaza senzora, koje se koriste za automatsku konfiguraciju modula za kondicioniranje signala (tabela 5.11).
<i>Power supply</i>	Definiše parametre napona za napajanje senzora (tabela 5.11).
<i>Calibration and miscellaneous</i>	Dotatne informacije i parametri (tabela 5.11).

Da bi se obezbedila opštost elektronskih specifikacija za sve GM detektore, sekcija *Measurement* sadrži pet podsekcija za svaki tip zračenja: neutronska, X, alfa, beta ili gama. Na taj način, obuhvaćeni su svi često korišćeni tipovi GM detektora. Pri tome, elektronske specifikacije obuhvataju samo one podsekcije koje su definisane za dati tip GM detektora, dok se preostale podsekcije ne koriste.

Kao što je prikazano u tabeli. 5.10. prvo polje (*Selection field*) svake podsekcije rezervisano je za izbor jednog od dva moguća slučaja:

- *Case 0* – detektor se ne koristi za odgovarajući tip zračenja, te nisu potrebne dodatne informacije o karakteristikama detektora za ovaj tip zračenja;
- *Case 1* – detektor se koristi za odgovarajući tip zračenja, te u nastavku elektronskih specifikacija slede dodatni parametri preuzeti iz kataloga proizvođača; Broj i tipovi parametara definisani su odgovarajućom podsekcijom šablona.

**Tabela 5.10.** Šablon za TEDS pretvarača – Measurement sekcija

Tip zračenja	Osobine		Biti
Neutronske	<i>Selection field</i>	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za neutrone. <i>Case 1:</i> Koristi se za neutrone.	1
	Dodatne karakteristike u skladu sa podsekcijom za neutrone.		$\geq 0^*$
X	<i>Selection field</i>	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za X zračenje. <i>Case 1:</i> Koristi se za X zračenje.	1
	Dodatne karakteristike u skladu sa podsekcijom za X zračenje.		$\geq 0^*$
Alfa	<i>Selection field</i>	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za alfa čestice. <i>Case 1:</i> Koristi se za alfa čestice.	1
	Dodatne karakteristike u skladu sa podsekcijom za alfa čestice.		$\geq 0^*$
Beta	<i>Selection field</i>	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za beta čestice. <i>Case 1:</i> Koristi se za beta čestice.	1
	Dodatne karakteristike u skladu sa podsekcijom za beta čestice.		$\geq 0^*$
Gama	<i>Selection field</i>	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za gama zračenje. <i>Case 1:</i> Koristi se za gama zračenje.	1
	Dodatne karakteristike u skladu sa podsekcijom za gama zračenje (videti tabelu 5.11).		$\geq 0^*$

\*Broj bita definisan je odgovarajućom podsekcijom.

Razmatranja u okviru disertacije zasnivaju se na GM detektorima osetljivim na gama zračenje, te je u nastavku teksta posebna pažnja posvećena upravo opisu podsekcije šablona za ovu vrstu detektora.

Kao što se može videti iz tabele 5.11, u *Measurement* sekciji definisano je sedam karakteristika. Merne karakteristike GM detektora tipično se specifikuju za jedan izvor zračenja. Odgovarajući izvor zračenja je specifikovan poljem *Radiation Source*. S obzirom da se kao izvori za kalibraciju GM detektora najčešće koriste izvori  $^{60}\text{Co}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , *Radiation Source* polje je tipa nabiranja, ima dužinu 1 bit, pri čemu vrednost 0 odgovara izvoru  $^{60}\text{Co}$ , a vrednost 1 izvoru  $^{137}\text{Cs}$ . Ako je potrebno, ovo polje može se proširiti tako da obuhvati dodatne izvore.

Naredna četiri parametra iz tabele 5.11, opisuju merni opseg detektora. Ovi parametri, zajedno sa *Mapping method* parametrom koriste se da definišu matematičku zavisnost između brzine doze i broja impulsa na izlazu senzora u jedinici vremena. Radi



jednostavnosti, za standardnu jedinicu brzine doze usvojena je jedinica mGy/h, iako se na jednostavan način mogu uključiti i druge često korišćene jedinice, kao što je Sv/h. Poslednji parametar *Measurement* sekcije koristi se za specifikaciju brzine brojanja koja odgovara pozadinskom jonizujućem zračenju. U koloni „Pristup“, tabele 5.11, vidi se da se vrednosti svih parametara mogu menjati tokom procesa kalibracije (CAL), sa izuzetkom parametra *Mapping method*, koji je specifikovan u šablonu i ne može se menjati (ID).

Tabela 5.11. Šablon za TEDS pretvarača GM detektora osetljivog na gama zračenje

Karakteristika (TDL komanda)	Naziv karakteristike	Pristup	Biti	Tip i opseg podataka	Jedinica
<i>Measurement sekcija za GM detektor osetljiv na gama zračenje</i>					
%RadSource <sup>a</sup>	<i>Radiation source</i>	CAL	1	Enumeration: <sup>60</sup> Co   <sup>137</sup> Cs	–
%MinPhysVal	<i>Minimum dose rate</i>	CAL	32	Floating point (single)	mGy/h
%MaxPhysVal	<i>Maximum dose rate</i>	CAL	32	Floating point (single)	mGy/h
%MinElecVal	<i>Minimum counting rate</i>	CAL	32	Floating point (single)	imp/s
%MaxElecVal	<i>Maximum counting rate</i>	CAL	32	Floating point (single)	imp/s
%MapMeth	<i>Mapping method</i>	ID	0	Assign = "Linear"	–
%MaxBackgr <sup>a</sup>	<i>Max. background count rate</i>	CAL	7	UnInt (0 to 126)	imp/min
<i>Electrical signal output sekcija</i>					
%ElecSigType	<i>Electrical signal type</i>	ID	0	Assign = 6, "Pulse Sensor"	–
%PulseMeasType	<i>Pulse measurement type</i>	ID	0	Assign = 5, "Count"	–
%ACDCCoupling	<i>Electrical signal coupling</i>	ID	1	Enumeration AC   DC	–
%DiscSigType	<i>Discrete signal type</i>	ID	3	Enum.: OC OE AL AH BIP	–
%DiscSigAmp	<i>Discrete signal amplitude</i>	ID	8	UnInt (0 to 253)	V
%RespTime	<i>Maximum dead time</i>	ID	9	UnInt (0 to 510)	µs
<i>Power supply sekcija</i>					
%ExciteAmplNom	<i>Input power supply voltage, nom.</i>	ID	9	ConRes(0 to 51, step 0.1)	V
%ExciteAmplMin	<i>Input power supply voltage, min.</i>	ID	9	ConRes(0 to 51, step 0.1)	V
%ExciteAmplMax	<i>Input power supply voltage, max.</i>	ID	9	ConRes(0 to 51, step 0.1)	V
%ExciteCurrentDraw	<i>Max. current at background</i>	ID	8	ConRelRes (1 to 21206, ±2%)	µA
%SensorImped	<i>Minimum anode resistor</i>	ID	7	ConRes (0.5 to 13.1, step 0.1)	MΩ
%GM_StartVolt <sup>a</sup>	<i>Starting voltage, max.</i>	ID	9	ConRes(0 to 5100, step 10)	V
%GM_PlateauThr <sup>a</sup>	<i>Plateau threshold voltage</i>	ID	9	ConRes(0 to 5100, step 10)	V
%GM_PlateauLen <sup>a</sup>	<i>Plateau length voltage</i>	ID	7	ConRes(0 to 1260, step 10)	V
%GM_RecomSupply <sup>a</sup>	<i>Recommended supply</i>	ID	9	ConRes(0 to 5100, step 10)	V
%GM_PlateauSlope <sup>a</sup>	<i>Plateau slope</i>	ID	5	UnInt(0 to 30)	%/100V
<i>Calibration and miscellaneous sekcija</i>					
%CalDate	<i>Calibration date</i>	CAL	16	Date	–
%CalInitials	<i>Calibration initials</i>	CAL	15	String of 5-bit chr. (Chr5)	–
%CalPeriod	<i>Calibration period</i>	CAL	12	UnInt(0 to 4094)	days
%GM_LifeCount <sup>a</sup>	<i>Life count expectancy</i>	ID	8	ConRelRes(10 <sup>6</sup> to 10 <sup>26</sup> , ±10%)	imp
%OpTempMin <sup>a</sup>	<i>Operating ambient temp, min.</i>	ID	5	ConRes(-50 to 100, step 5)	°C
%OpTempMax <sup>a</sup>	<i>Operating ambient temp, max.</i>	ID	5	ConRes(-50 to 100, step 5)	°C
%GPS_Lati <sup>a</sup>	<i>GPS Latitude</i>	USR	21	ConRes(-90 to 90, step 10 <sup>-4</sup> )	°
%GPS_Longi <sup>a</sup>	<i>GPS Longitude</i>	USR	22	ConRes(-180 to 180, step 10 <sup>-4</sup> )	°

<sup>a</sup> Predložene nove karakteristike.

Naredna sekcija predloženog šablona (*Electrical signal output*) sadrži električne karakteristike senzora. Ovi parametri uključuju električne karakteristike izlaza senzora, kao što su tip signala, vrsta merenja, logički nivoi i druge parametre koji se koriste za automatsku konfiguraciju modula za kondicioniranje signala. Parametar *Electrical signal type* definisan je u šablonu i specifikuje da GM detektor pripada grupi

senzora sa impulsnim izlazom (*Pulse sensor*). Vrednost *Pulse measurement type* parametra takođe je definisana u šablonu i specifikuje da se ova vrsta senzora koristi kao brojač impulsa. Parametar *Electrical signal coupling* opisuje primenjeni način povezivanja izlaznog signala senzora i može imati vrednosti AC ili DC. Oblik i amplituda impulsnog signala na izlazu iz senzora, definisani su parametrima *Discrete signal type* i *Discrete signal amplitude*, kao što je specifikovano u aneksu B standarda. Konačno, parametar *Maximum dead time* specifikuje mrtvo vreme GM detektora i koristi se za korekciju mrtvog vremena pri velikim brzinama brojanja.

Podaci iz sekcije *Electrical signal output* tipično se koriste zajedno sa parametrima sekcije *Power supply* za potpunu specifikaciju električnog interfejsa GM detektora. Prva tri parametra ove sekcije, data u tabeli 5.11, opisuju nominalne vrednosti i tolerancije za napon napajanja senzora. Parametrom *Maximum current at background* specifikuje se potrošnja struje GM detektora pri pozadinskom zračenju. Preostali parametri iz ove grupe predstavljaju dodatne karakteristike, kao što su podaci o naponu i širini platoa, preporučenom naponu napajanja i druge karakteristike. Ovi parametri koriste se za konfiguraciju elektronskih komponenti za kondicioniranje izlaznog signala i napajanje GM detektora.

Poslednja sekcija u tabeli 5.11, *Calibration and miscellaneous*, uključuje nekoliko tipičnih parametara: *Calibration initials*, *Calibration date* i *Calibration period*, kojima se identifikuje osoba koja je vršila kalibraciju, kao i odgovarajući datum i vremenski period do sledeće kalibracije. Osim toga, ovoj sekciji pridruženi su i drugi parametri važni za proces održavanja senzora kojima se definiše opseg radne temperature i očekivani životni vek detektora. S obzirom da je u mrežama za monitoring od posebne važnosti poznavanje tačne lokacije senzora, u ovu sekciju šablona uključena su i dva nova parametra, *GPS Latitude* i *GPS Longitude*, kojima se omogućava pozicioniranje senzora sa preciznošću do 10 m.

### **Šablon za kalibracioni TEDS**

Kao što je objašnjeno u poglavlju 4.2.3, kalibracioni podaci senzora mogu se smestiti u TEDS memoriju korišćenjem standardnih IEEE šablona *Calibration table* ili *Calibration curve*. Oba šablona pružaju mogućnost za izbor domena na koji će se primeniti korekcije rezultata merenja. Parametar domena (*Domain parameter*) je 1-bitno

polje koje pruža izbor između električnog (*Electrical*) i fizičkog (*Physical*) domena. Električni domen označava da se korekcije mernih podataka vrše na električnom signalu dobijenom na izlazu senzora. Fizički domen koristi se za korekcije podataka koji su prethodno konvertovani u odgovarajuću vrednost merene fizičke veličine. Ovakav pristup pogodan je za veliki broj senzora, međutim, karakteristike senzora često zavise i od drugih parametara koji se ne mogu direktno specifikovati funkcijom prenosa senzora. Na primer, funkcija prenosa senzora često zavisi od temperature, pritiska i drugih parametara okoline u kojoj se senzor nalazi. Ovakve zavisnosti mogu se uneti u elektronske specifikacije jedino ponavljanjem kalibracione tabele za različite vrednosti parametara koji utiču na karakteristiku senzora. Imajući u vidu da jedna kalibraciona tabela može da zauzme i do 4715 bita [25], ovakav pristup očigledno je veoma neefikasan po pitanju zauzeća TEDS memorije, posebno u slučaju senzora koji pokazuju izraženu zavisnost funkcije prenosa od „parazitnih“ parametara. Takav primer upravo je GM detektor čiji odziv izrazito zavisi od energije i ugla zračenja u odnosu na osu detektora, te je neophodno definisati kalibracionu tabelu koja ima veću fleksibilnost u pogledu zadavanja parametra domena.

S obzirom da energetska i ugaona zavisnost GM detektora značajno utiču na rezultat merenja, od velikog je značaja da se ove informacije efikasno inkorporiraju u TEDS memoriju. Iz tog razloga, predložen je novi šablon *Correction table*, prikazan u tabeli 5.12, koji predstavlja modifikaciju standardnog IEEE šablona *Calibration table* (*Template ID* = 40). Predložena modifikacija ogleda se u mogućnosti fleksibilnijeg zadavanja parametra domena, čime se u TEDS mogu uneti odgovarajuće korekcije merene veličine u funkciji proizvoljnog parametra kao što je energija, ugao zračenja, pritisak, temperatura i slično.

Za indentifikaciju šablona koristi se *Template ID* polje čija je usvojena vrednost 46. U zaglavlju *Correction table* šablona specifikovani su podaci o domenu koji uključuju sledeće parametre: *Domain parameter* – oznaka domena, i *Min. domain value* i *Max. domain value* – za specifikaciju opsega od interesa za korekciju.

Ostatak šablona definisan je po ugledu na standardni šablon IEEE *Calibration table*. Parametar *Size of calibration table* koristi se za specifikaciju broja tačaka za korekciju (podržano je do 127 korekcionih tačaka). Svaka tačka opisana je sa dva

parametra: *Domain value* koji predstavlja procenat punog opsega parametra domena, i *Correction factor value* koji predstavlja multiplikativni korektivni faktor.

**Tabela 5.12. Predloženi Correction table šablon**

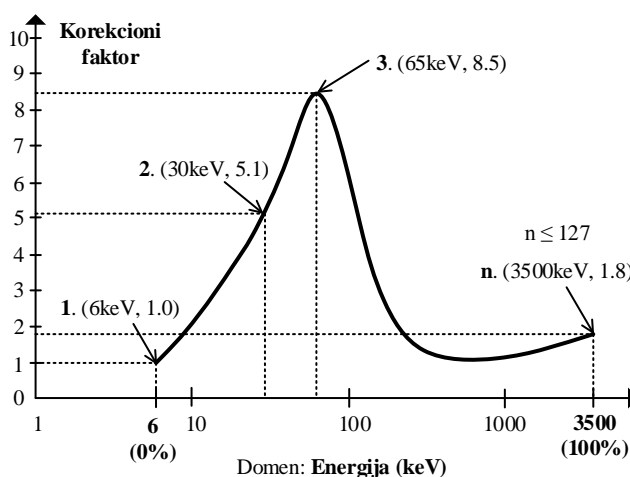
Karakteristika (TDL komanda)	Naziv karakteristike	Pristup	Biti	Tip i opseg podataka	Jedinica
Template	Template ID	–	8	Integer (value=46)	–
Specifikacija domena					
%CalTable_ArbDomain <sup>a</sup>	Domain parameter	CAL	5	Chr5	–
%CalTable_MinDomVal <sup>a</sup>	Min. domain value	CAL	32 <sup>b</sup>	Floating-point (single)	varijabilno <sup>c</sup>
%CalTable_MaxDomVal <sup>a</sup>	Max. domain value	CAL	32 <sup>b</sup>	Floating-point (single)	varijabilno <sup>c</sup>
Tabela sa korekcijama					
Structarray	Size of table	CAL	7	Integer (1 to 127)	–
%CalTable_DomainValue	Domain value	CAL	16	ConRes (0 to 100, step $1.5 \cdot 10^{-3}$ )	%
%CalTable_CorrectValue <sup>a</sup>	Correction factor value	CAL	21	ConRes (0 to 21, step $10^{-5}$ )	–

<sup>a</sup> Predložene nove karakteristike.

<sup>b</sup> Radi jednostavnosti prikaza, usvojeno je da se opseg domena predstavlja 32-bitnim brojem u pokretnom zarezu, ali se u praktičnim primenama ovaj broj bita može značajno redukovati korišćenjem odgovarajuće Case strukture.

<sup>c</sup> Mogu se specifikovati različite fizičke jedinice.

Na slici 5.14. ilustrovana je primena *Correction table* šablona na primeru energetske zavisnosti GM detektora.

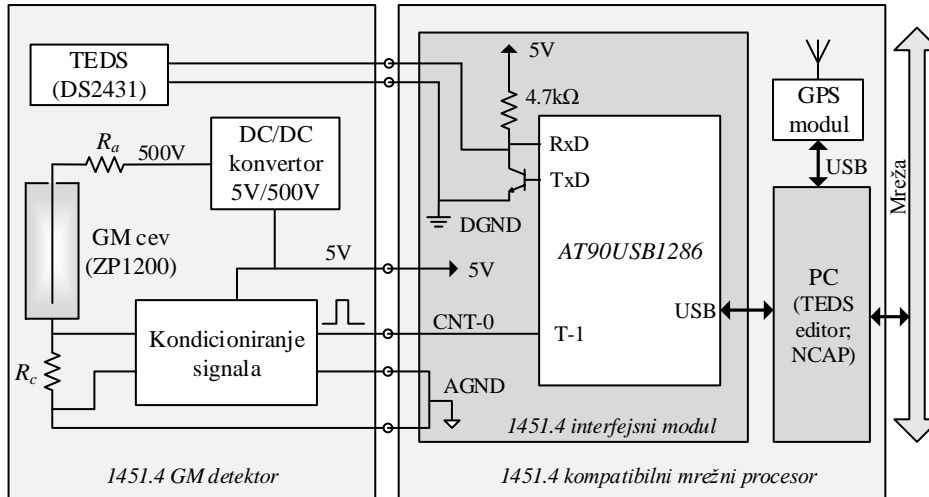


**Slika 5.14. Ilustracija upotrebe Correction table šablona za specifikaciju relativnog energetskog odziva GM detektora u odnosu na <sup>137</sup>Cs**

Na sličan način može se definisati i ugaona zavisnost GM detektora.

### 5.3.1.2. Realizacija i povezivanje *Plug and Play* GM detektora

GM detektor sastoji se iz GM cevi namenjene za detekciju gama zračenja – ZP1200, izvora visokog napona za napajanje GM cevi, kola za kondicioniranje signala i TEDS memorije, kao što je prikazano na slici 5.15.



Slika 5.15. Povezivanje 1451.4 GM detektora sa mrežnim procesorom

GM detektor se napaja kroz četvorožični MMI interfejs naponskim izvorom od +5 V. U opisanom rešenju napon napajanja dobija se sa USB interfejsa PC računara. Napon napajanja od +5 V se konvertuje u napon od +500 V, koji je preporučen za napajanje ZP1200 cevi, korišćenjem kombinacije *boost* DC/DC konvertora i pasivnog kola za multiplikovanje napona. Detaljniji opis DC/DC konvertora i kola za kondicioniranje signala dat je u [35, 5].

Za povezivanje GM detektora na mrežu koristi se 1451.4 kompatibilni mrežni procesor. Implementacija mrežnog procesora oslanja se na 1451.4 interfejsni modul i PC računar, kao što je opisano u poglavljima 5.1.1 i 5.1.3. Osim toga, mrežni procesor opremljen je GPS modulom koji se koristi za precizno lociranje detektora.

Signal sa izlaza GM detektora povezuje se na CNT-0 ulaz interfejsnog modula, odnosno na odgovarajući ulaz T-1 16-bitnog brojača. Konfiguracija brojača vrši se po internom protokolu slanjem odgovarajućih komandi interfejsnog modula, opisanih u poglavlju 5.1.1. Mikrokontroler je zadužen da vrši brojanje impulsa sa izlaza GM detektora u zatom vremenskom intervalu, koji je jednak periodi odabiranja kanala. Mrežni procesor, korišćenjem odgovarajućih komandi internog protokola, periodično očitava sadržaj brojača i izračunava vrednost brzine brojanja prema sledećoj relaciji:

$$r = \frac{n}{T_s} \quad [\text{imp/s}], \quad (5.10)$$

gde je  $n$  broj impulsa GM detektora (odnosno sadržaj brojača),  $T_S$  perioda odabiranja, a  $r$  brzina brojanja.

Brzina doze određuje se na osnovu brzine brojanja i osetljivosti GM detektora:

$$X = S \cdot r \quad [\text{mGy/h}], \quad (5.11)$$

gde je sa  $S$  označena osetljivost detektora, a sa  $X$  brzina doze.

Osetljivost detektora određuje se korišćenjem parametara *Maximum dose rate*, *Minimum dose rate*, *Maximum counting rate* i *Minimum counting rate* koji su prethodno pročitani iz TEDS memorije:

$$S = \frac{\text{Maximum dose rate} - \text{Minimum dose rate}}{\text{Maximum counting rate} - \text{Minimum counting rate}} \left[ \frac{\text{mGy/h}}{\text{imp/s}} \right]. \quad (5.12)$$

Osetljivost GM detektora, međutim, nije konstantna u celom mernom opsegu, posebno za velike brzine brojanja. U tom slučaju, usled postojanja mrtvog vremena brojača, izvestan broj impulsa ostaje neregistrovan. Na osnovu parametra *Maximum dead time* koji se nalazi u TEDS memoriji detektora, može se izvršiti korekcija brzine brojanja,  $r_c$  [36]:

$$r_c = \frac{r}{1 - r \cdot \text{Maximum dead time}}, \quad (5.13)$$

te je odgovarajuća brzina doze:

$$X = S \cdot r_c. \quad (5.14)$$

Brzina doze može se tačnije izračunati korišćenjem kalibracionih podataka smeštenih u *Calibration table* sekciji. Pod pretpostavkom da je za formiranje kalibracione tabele korišćen električni domen, brzina doze određuje se interpolacijom:

$$X = \frac{X_2 - X_1}{r_2 - r_1} (r - r_1) + X_1, \quad r_1 < r < r_2, \quad (5.15)$$

gde su  $X_1$  i  $X_2$  vrednosti brzine doze očitane iz kalibracione tabele koje odgovaraju vrednostima brzine brojanja  $r_1$  i  $r_2$ , respektivno.

Krajnji korisnik, koji tumači rezultate merenja, najčešće poznaje vrstu zračenja kojem je detektor izložen, pa samim tim i odgovarajuću energiju zračenja. U tom

slučaju se, na osnovu poznate energije i podataka iz korekcionne tabele (*Correction table*), izračunava odgovarajući korekcionni faktor,  $K$ :

$$K = \frac{K_2 - K_1}{E_2 - E_1} (E - E_1) + K_1, \quad E_1 < E < E_2, \quad (5.16)$$

gde su  $K_1$  i  $K_2$  vrednosti korekcionnih faktora očitane iz kalibracione tabele koje odgovaraju vrednostima energije zračenja  $E_1$  i  $E_2$ , respektivno.

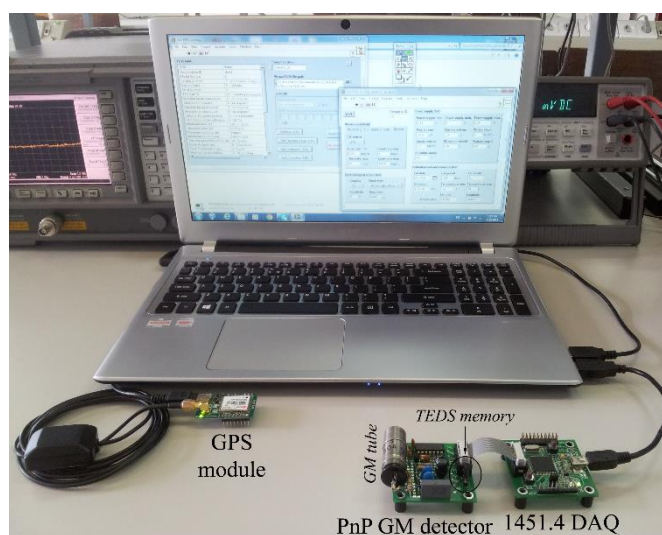
Na osnovu toga, korigovana vrednost brzine doze je:

$$X_c = K \cdot X. \quad (5.17)$$

Na sličan način, može se izvršiti korekcija vrednosti brzine doze ako je poznat ugao zračenja, u odnosu na osu GM detektora.

### 5.3.1.3. Testiranje *Plug and Play* GM detektora

U skladu sa predstavljenim konceptom, implementiran je i testiran *Plug and Play* GM detektor gama zračenja i njemu pridruženi TEDS. Implementacija opisanog rešenja za povezivanje GM detektora na mrežu i dizajn odgovarajućih elektronskih specifikacija, prikazana je na slici 5.16.



**Slika 5.16.** Realizovani sistem za testiranje *Plug and Play* GM detektora

Na osnovu predložene strukture osnovne TEDS sekcije (tabela 5.8), šablona za TEDS pretvarača GM detektora (tabela 5.11) i šablona za korekcionnu tabelu (tabela

5.12), formiran je TEDS za GM detektor baziran na ZP1200 GM cevi, koji je prikazan u tabeli 5.13.

**Tabela 5.13.** Primer elektronskih specifikacija za 1451.4 Plug and Play GM detektor

TEDS sekcija	Polje	Biti	Vrednost	Komentar	
Osnovni TEDS (64 bita)	<i>Manufacturer identification</i>	14	16382	Korisnički TEDS	
	<i>Model number</i>	15	0	0-32767	
	<i>Version number</i>	6	2	Bez prozora, energetski kompenzovan	
	<i>Version letter</i>	5	G	GM detektor	
	<i>Serial number</i>	24	0	0-16777215	
TEDS pretvarača (343 bita)	<i>Template ID</i>	8	45	<i>Counting ionizing radiation sensor</i>	
	Measurement	<i>Selection for neutron source</i>	1	0	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za neutrone.
		<i>Selection for X source</i>	1	0	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za X zračenje.
		<i>Selection for alpha source</i>	1	0	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za alfa čestice.
		<i>Selection for beta source</i>	1	0	<i>Case 0:</i> Ne koristi se za beta čestice.
		<i>Selection for gamma source</i>	1	1	<i>Case 1:</i> Koristi se za gama zračenje.
		<i>Radiation source</i>	1	1	<sup>137</sup> Cs
		<i>Minimum dose rate</i>	32	10 <sup>-3</sup>	mGy/h
		<i>Maximum dose rate</i>	32	10	mGy/h
		<i>Minimum counting rate</i>	32	4	imp/s
		<i>Maximum counting rate</i>	32	10 <sup>4</sup>	imp/s
	<i>Mapping method</i>	0 <sup>a</sup>	0	„Linear“	
	Electrical signal output	<i>Electrical signal type</i>	0 <sup>a</sup>	6	„Pulse Sensor“
		<i>Pulse measurement type</i>	0 <sup>a</sup>	5	„Count“
		<i>Electrical signal coupling</i>	1	0	DC coupling
		<i>Discrete signal type</i>	3	3	„Active high“
		<i>Discrete signal amplitude</i>	8	5	V
		<i>Maximum dead time</i>	9	90	μs
	Power supply	<i>Power supply voltage, nom.</i>	9	5	V
		<i>Power supply voltage, min.</i>	9	4.75	V
		<i>Power supply voltage, max.</i>	9	5.25	V
		<i>Max. current at background</i>	8	358.9	μA
		<i>Minimum anode resistor</i>	7	4.7	MΩ
		<i>Starting voltage, max.</i>	9	325	V
		<i>Plateau threshold voltage</i>	9	400	V
		<i>Plateau length voltage</i>	7	200	V
		<i>Recommended supply</i>	9	500	V
	Calibration and miscellaneous	<i>Plateau slope</i>	5	4	% / 100V
		<i>Calibration date</i>	16	5840	Broj dana od 1.1.1998.
		<i>Calibration initials</i>	15	NJJ	Osoba koja je izvršila kalibraciju.
		<i>Calibration period</i>	12	1095	broj dana do sledeće kalibracije
		<i>Life count expectancy</i>	8	4.7×10 <sup>10</sup>	imp
		<i>Operating ambient temp, min.</i>	5	-40	°C
<i>Operating ambient temp, max.</i>		5	70	°C	
Kalibracioni TEDS (84 + N:37 bita)	<i>Template ID</i>	8	46	<i>Correction table</i>	
	Correction table	<i>Domain parameter</i>	5	E	Energetska zavisnost
		<i>Minimum domain value</i>	32	6	keV
		<i>Maximum domain value</i>	32	3500	keV
		<i>Size of calibration table</i>	7	N	N ≤ 127 tačka
<i>Domain value<sup>b</sup></i>		16	0.0	Tačka 1 – domen: 6keV=0.0% (slika 5.14)	
<i>Correction factor value<sup>b</sup></i>	21	1.0	Tačka 1 – korekcija: 1.0 (slika 5.14)		

<sup>a</sup> Vrednosti je dodeljena u šablonu i ne zauzima prostor u TEDS memoriji

<sup>b</sup> Ponavlja se N puta

Osnovni TEDS obezbeđuje osnovne informacije o radijacionom senzoru. Na osnovu predloga klasifikacije detektora prikazane u tabeli 5.8, polja *Version number* i *Version letter* iskorišćena da bi se specifikovala upotreba GM detektora bez prozora sa energetskom kompenzacijom.



Detaljniji podaci o senzoru, neophodni za povezivanje po *Plug and Play* konceptu dati su u sekciji TEDS pretvarača. Za kreiranje ove sekcije TEDS memorije iskorišćen je šablon *Counting ionizing radiation sensor*, koji je definisan u tabelama 5.9 - 5.11. GM cev ZP1200 koristi se samo za detekciju gama zračenja, te stoga podaci za alfa, beta, neutronska i X zračenje nisu specifikovani u TEDS memoriji detektora. Podaci o osetljivosti GM detektora u polju  $^{137}\text{Cs}$  preuzeti iz kataloga cevi ZP1200 iskorišćeni su za unos parametara *Radiation source*, *Maximum dose rate*, *Minimum dose rate*, *Maximum counting rate* i *Minimum counting rate* prema šablonu iz tabele 5.11.

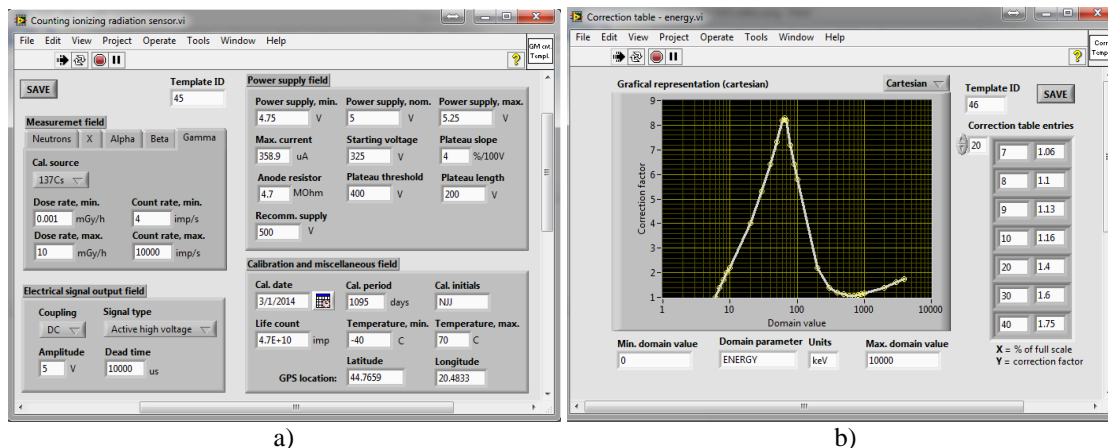
Sekcije *Electrical signal output* i *Power supply* koriste se za specifikaciju električnog interfejsa GM detektora. U ovom slučaju specifikovano je da su u upotrebi impulsi amplitude 5 V sa aktivnim visokim logičkim nivoom. Za napajanje detektora koristi se USB interfejs PC računara, te nominalna vrednost napona napajanja iznosi 5V, dok su minimalna i maksimalna vrednost 4,75 V i 5,25 V, respektivno. Dodatne informacije o naponu platoa, preporučenoj vrednosti anodnog otpornika i druge korisne informacije preuzete su iz kataloga GM cevi ZP1200 i unete u TEDS memoriju prema šablonu datom u tabeli 5.11.

Sekcija *Calibration and miscellaneous* koristi se za skladištenje dodatnih informacija o senzoru. Za monitoring ambijentalne brzine doze važno je znati tačnu poziciju senzora, pa se u tu svrhu koristi GPS modul povezan na PC računar. Podaci o lokaciji za statične senzore upisuju se u odgovarajuća polja *GPS Latitude* i *GPS Longitude* TEDS memorije, pa se GPS modul koristi samo prilikom inicijalizacije monitoring sistema. S druge strane, za senzore koji nisu statični, neophodna je stalna veza sa GPS modulom, kako bi se obezbedilo ažuriranje lokacije senzora.

Poslednja sekcija u tabeli 5.13 prikazuje korišćenje šablona za korekcionu tabelu (tabela 5.12) na primeru energetske zavisnosti GM cevi ZP1200. Relativna energetska zavisnost detektora u odnosu na  $^{137}\text{Cs}$  (videti sliku 5.14), definisana je u opsegu od 6 keV do 3500 keV u  $N$  korekcionih tačaka, gde je  $N$  proizvoljna vrednost u opsegu od 1 do 127.

Kreirane elektronske specifikacije smeštaju se u odgovarajuću EEPROM memoriju korišćenjem *TEDS editor* programa opisanog u poglavlju 5.1.2. Grafički korisnički interfejs *TEDS editora* za unos parametara GM detektora prema *Counting*

ionizing radiation sensor šablonu prikazan je na slici 5.17a, dok je grafički korisnički interfejs za unos podataka o energetskej zavisnosti prema šablonu *Correction table* prikazan na slici 5.17b.



Slika 5.17. Grafički interfejs za unos parametara GM detektora prema šablonu: *Counting ionizing radiation sensor* (a) i *Correction table* (b)

Za prevođenje vrednosti parametara u binarnu formu, na bazi predloženih šablona, realizovan je odgovarajući skup *LabVIEW* virtuelnih instrumenata.

### 5.3.2. Inteligentna *Plug and Play* jonizaciona komora

Jonizacione komore predstavljaju detektore nuklearnog zračenja koji su veoma pogodni za neprekidni nadzor brzine doze gama zračenja u okolini nuklearnih objekata, kao i za nadzor prostorija i objekata u blizini medicinskih i industrijskih uređaja čiji se rad bazira na X zračenju. Široka upotreba jonizacionih komora u ovim sistemima zasnovana je na njihovim dobrim mernim karakteristikama, visokoj pouzdanosti i relativno niskoj ceni. Osim toga, imaju približno uniforman odziv u širokom opsegu energija koje obuhvataju X i gama zračenje, obezbeđuju jasnu diskriminaciju između beta i gama komponente nuklearnog zračenja i predstavljaju najbolji izbor za merenje visokih nivoa gama zračenja.

S obzirom da jonizaciona komora sa strujnim izlazom predstavlja jedan od najčešće korišćenih analognih detektora u oblasti monitoringa nuklearnog zračenja, inteligentna jonizaciona komora realizovana je u cilju promovisanja koncepta *Plug and Play* senzora u ovoj oblasti [6]. Realizacija inteligentne komore zasnovana je na kreiranju elektronskih specifikacija kompatibilnih sa standardom IEEE 1451.4. Na taj

način obezbeđuje se jednostavan postupak nadogradnje postojećih detektora dodavanjem TEDS memorije. Inteligentna jonizaciona komora ima niz prednosti u odnosu na tradicionalne sisteme. Zahvaljujući elektronskim specifikacijama smeštenim u odgovarajućoj EEPROM memoriji, jonizaciona komora se po uključenju automatski prepoznaje, automatski se konfigurira i integriše u monitoring sistem koji je zasnovan na ovom tipu detektora.

### **5.3.2.1. Elektronske specifikacije jonizacione komore**

S obzirom da elektronske specifikacije igraju ključnu ulogu u povezivanju inteligentnih senzora po *Plug and Play* konceptu, ovo poglavlje posvećeno je sistematizaciji i formalnoj specifikaciji karakteristika jonizacione komore u obliku pogodnom za čuvanje u TEDS memoriji. Na osnovu analize najvažnijih karakteristika predložen je šablon za kreiranje elektronskih specifikacija za jonizacionu komoru sa strujnim izlazom koja je osetljiva na gama zračenje.

Kako bi se lakše razumeo proces standardizacije sadržaja TEDS memorije, u nastavku je dat kratak osvrt na konstrukciju, električne i merne karakteristike jonizacione komore. Posebna pažnja posvećena je vazduh-ekvivalentnoj komori sa strujnim izlazom koja je korišćena za praktičnu implementaciju inteligentnog senzora.

Jonizaciona komora, po svojoj konstrukciji, predstavlja najjednostavniji gasni detektor. Uprkos jednostavnosti, u zavisnosti od konstrukcije, može se izdvojiti nekoliko tipova jonizacionih komora: otvorena vazдушna komora, ventilaciona komora, zatvorena komora sa niskim ili visokim pritiskom, kao i različite vrste komora koje se koriste za kalibraciju i istraživanja.

Za punjenje jonizacione komore koriste se različiti gasovi, kao što su azot, argon, tkivo-ekvivalentni gas, i drugi, ali se za monitoring gama zračenja najčešće koriste komore punjene vazduhom ili vazduh-ekvivalentnim gasom. Pritisak punjenja gasa najčešće je 1 atm, mada se, u cilju povećanja osetljivosti, ponekad koriste i viši pritisci.

Dimenzije i geometrija jonizacionih komora mogu se znatno razlikovati u zavisnosti od oblasti primene. U praksi se koriste komore sa paralelnim pločama između kojih je homogeno električno polje, kao i komore cilindrične geometrije, gde je polje

obrnuto srazmerno poluprečniku komore. Analitičke metode za modelovanje strujno-naponskih karakteristika komora različitih geometrija date su u [37].

Promena temperature ili pritiska utiče na gustinu vazduha i, shodno tome, na osetljivost komore. To podrazumeva da, ako se želi precizno merenje, u obzir treba uzeti i parametre okruženja.

Jonizacionom komorom može se meriti X, gama, neutronska i beta zračenje. Za otkrivanje beta radijacije koriste se komore sa tankim prozorom koji omogućava prodiranje beta čestica u aktivnu zapreminu detektora. Zatvaranjem prozora sprečava se detekcija beta čestica. Kod komora sa visokim pritiskom zid komore mora biti deblji, čime se onemogućava detekcija beta radijacije, kao i niskoenergetskog gama i X zračenja (ispod oko 40 keV).

U električne karakteristike jonizacione komore spadaju napon napajanja, radni napon, maksimalni dozvoljeni radni napon, napon platoa, mod rada, merni opseg izlazne struje ili naelektrisanja, struja curenja i slično. Odnos između primenjenog visokog napona i jonizacione struje zasićenja za isti izvor zračenja veoma je važan za komore sa strujnim izlazom. Kada je komora u jonizacionom regionu, blagi porast primenjenog napona rezultira zanemarljivo malom promenom izmerene struje.

Merne karakteristike jonizacione komore uključuju vrstu zračenja koja se detektuje, energetski opseg, merni opseg, osetljivost na određeni tip zračenja, energetsku i ugaonu zavisnost, itd.

Elektronske specifikacije jonizacione komore kreirane su prema standardu IEEE 1451.4. Kao što je prethodno objašnjeno, elektronske specifikacije podeljene su u tri sekcije: osnovni TEDS, TEDS pretvarača i kalibracioni TEDS.

Osnovni TEDS je obavezan, dužine je 64 bita, fiksne strukture i koristi se za identifikaciju senzora. Kao što je već objašnjeno na primeru GM detektora, polja *Version letter* i *Version number* mogu se iskoristiti za grubo definisanje tipa detektora (tabela 5.8).

TEDS pretvarača sadrži detaljnije merne, električne, mehaničke i druge karakteristike senzora koji se koriste za proces automatske konfiguracije mernog sistema. Sadržaj sekcije TEDS pretvarača nije fiksna i definiše se šablonima. Iako je standard IEEE 1451.4 definisao odgovarajuće šablone za veći broj često korišćenih

senzora, detektori jonizujućeg zračenja nisu našli svoje mesto u listi standardnih šablona. Iz tog razloga, u nastavku, analizirana je mogućnost uvođenja 1451.4 šablona za opis jonizacione komore sa strujnim izlazom, namenjene za monitoring gama zračenja.

Predloženi TEDS šablon za jonizacionu komoru sadrži pet sekcija: *Template ID*, *General*, *Measurement*, *Electrical* i *Calibration and miscellaneous* (tabela 5.14). Polje *Template ID* koristi se za jedinstvenu indentifikaciju šablona, dok sekcija *General* daje najvažnije mehaničke karakteristike jonizacione komore kao što su: tip komore (*Chamber type*), gasno punjenje (*Fill gas*), pritisak (*Fill pressure*), i efektivna zapremina (*Effective volume*).

**Tabela 5.14.** Uprošćeni prikaz šablona za sekciju TEDS pretvarača jonizacione komore koja je osetljiva na gama zračenje

Polje	Broj bita, tip podatka i opseg vrednosti
<i>Template ID</i>	8b, Integer (0÷255)
<i>GENERAL SEKCIJA</i>	
<i>Chamber type</i>	3b, Enum: 0=free-air, 1=vented, 2=low pressure, 3=high pressure, 4=research and calibration
<i>Fill gas</i>	30b, String
<i>Fill pressure [mmHg]</i>	16b, Integer (0÷65534)
<i>Eff. volume [x10<sup>-1</sup>cm<sup>3</sup>]</i>	18b, Integer (0÷262142)
<i>MEASUREMENT SEKCIJA ZA GAMA ZRAČENJE</i>	
<i>Type of radiation</i>	3b, Enum: 1=Beta, 2= <u>Gamma</u> , 3=X, 4=Neutron, 0=No source
<i>Radiation</i>	1b, Enum: <sup>60</sup> Co, <sup>137</sup> Cs
<i>Sensitivity [AC<sup>-1</sup>kgs]</i>	32b, Floating point
<i>Min. exposure rate [Ckg<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>]</i>	32b, Floating point
<i>Max. exposure rate [Ckg<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>]</i>	32b, Floating point
<i>Next type of radiation</i>	3b, Enum: 1=Beta, 2=Gamma, 3=X, 4=Neutron, 0= <u>No source</u>
<i>ELECTRICAL SEKCIJA</i>	
<i>Min. IC current out [A]</i>	32b, Floating point
<i>Max. IC current out [A]</i>	32b, Floating point
<i>Min. electrometer out [V]</i>	10b, Dec (0÷10, step 10 <sup>-2</sup> )
<i>Max. electrometer out [V]</i>	10b, Dec (0÷10, step 10 <sup>-2</sup> )
<i>Recom. HV supply [V]</i>	9b, Integer (0÷5100, step 10)
<i>Max. HV supply [V]</i>	9b, Integer (0÷5100, step 10)
<i>Input power supply [V]</i>	9b, Integer (0÷51, step 0.1)
<i>CALIBRATION AND MISCELLANEOUS SEKCIJA</i>	
<i>Calibration date</i>	16b, Integer (0÷65534)
<i>Calibr. period [day]</i>	22b, Integer (0÷4094)
<i>Measur. location ID</i>	11b, Integer (0÷2046)

Sekcija *Measurement* specifikuje merne karakteristike senzora. U zavisnosti od konstrukcije, jonizaciona komora može biti namenjena za detekciju X, gama, neutronske ili beta zračenja. Prvi parametar ove sekcije, *Type of radiation*, definiše tip

radioaktivnog izvora na koji je jonizaciona komora osetljiva. Moguće je specifikovati više od jednog tipa zračenja kome je pridružena odgovarajuća grupa parametara. Na primer, za komore osetljive na gama zračenje, ovi parametri uključuju izvor zračenja, osetljivost i opseg ekspozicione brzine doze (tabela 5.14). Nakon liste parametara koja odgovara gama zračenju mogu se dodati odgovarajuće liste parametara za X, neutronske ili beta zračenje. Da bi se definisao kraj *Measurement* sekcije, vrednost poslednjeg parametra, *Next type of radiation*, mora biti podešena na vrednost „*No source*“.

Sekcija *Electrical* definiše električne karakteristike jonizacione komore, elektrometarskog pojačavača i napona napajanja. Električne karakteristike izlaza inteligentnog senzora specifikuju se definisanjem opsega izlazne struje i odgovarajućeg opsega elektrometarskog pojačavača. Napon napajanja definiše se korišćenjem parametra *Input power supply* i tipično se koristi kao ulaz DC/DC konvertora kojim se obezbeđuje visoki napon za rad jonizacione komore. Podaci o preporučenom i maksimalnom visokom naponu za napajanje komore čuvaju se u TEDS memoriji korišćenjem parametara *Recommended* i *Maximum high voltage supply*.

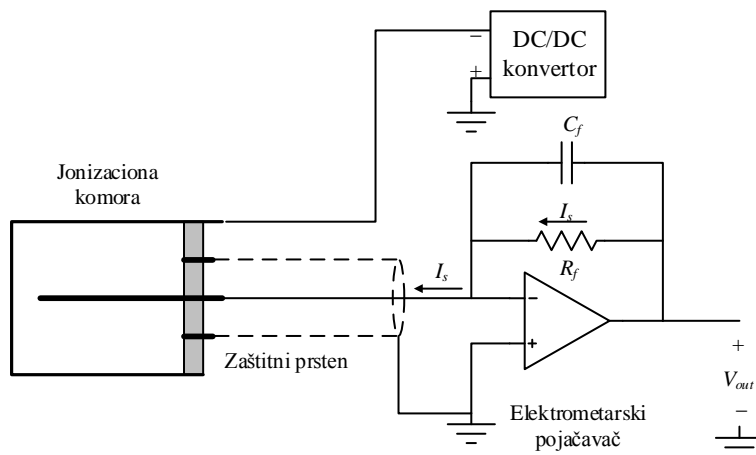
Dodatni parametri definisani su u sekciji *Calibration and miscellaneous*. Parametar *Calibration date* koristi se za specifikaciju datuma poslednje kalibracije komore, parametar *Calibration period* koristi se da upozori korisnika na datum naredne kalibracije, dok parametar *Measurement location ID* služi da se za statične komore definiše lokacija na kojoj se vrši merenje.

Podaci dobijeni kalibracijom jonizacione komore mogu se upisati u TEDS memoriju korišćenjem standardnih IEEE šablona: *Calibration table* ili *Calibration curve*. Korišćenjem podataka iz kalibracione tabele omogućava se tačnije određivanje ekspozicione brzine doze na osnovu izmerene struje komore, odnosno napona na izlazu elektrometarskog pojačavača. Karakteristika prenosa jonizacione komore, kao i kod GM detektora, takođe zavisi od energije i ugla zračenja u odnosu na osu komore. Usled toga, za korekciju karakteristike na energetske zavisnosti i zavisnost od upadnog ugla zračenja može se koristiti *Correction table* šablon, predložen u tabeli 5.12.

### **5.3.2.2. Povezivanje i testiranje jonizacione komore**

Jonizaciona komora koja se koristi u praktičnoj realizaciji strujnog je tipa i meri prosečnu jonizaciju koju proizvodi odgovarajući izvor zračenja. Ovo se postiže

merenjem jednosmerne struje koja se generiše u komori korišćenjem elektrometarskog pojačavača. Idejno rešenje pojačavača za konverziju struje u napon koje se bazira na elektrometarskom pojačavaču, prikazan je na slici 5.18.



**Slika 5.18.** Povezivanje komore na bazi elektrometarskog pojačavača kojim se vrši konverzija struje komore u napon

Najznačajniji problem u primeni jonizacionih komora je dizajn elektrometarskog pojačavača za precizno merenje malih struja čije su vrednosti reda veličine  $10^{-13}$  A. Merenje izuzetno niskih struja nameće korišćenje visoko sofisticiranih tehnika izolacije i zaštite, kao i korišćenje operacionih pojačavača sa ultra niskom ulaznom strujom (*bias current*) u cilju realizacije sistema koji je upotrebljiv za monitoring životne sredine [36].

Kada je komora u ravnoteži, na izlazu elektrometarskog pojačavača dobija se konstantni napon,  $V_{out}$ , koji je srazmeran poznatoj otpornosti,  $R_f$  i struji komore,  $I_s$ :

$$V_{out} = R_f \cdot I_s . \quad (5.18)$$

Na ovaj način, merenjem napona na izlazu elektrometarskog pojačavača,  $V_{out}$ , posredno se vrši merenje jonizacione struje saturacije,  $I_s$ . Za poznatu struju jonizacije vazduh-ekvivalentne jonizacione komore ekspoziciona doza dobija se kao odnos struje  $I_s$  i mase  $M$  koja se nalazi u aktivnoj zapremini komore:

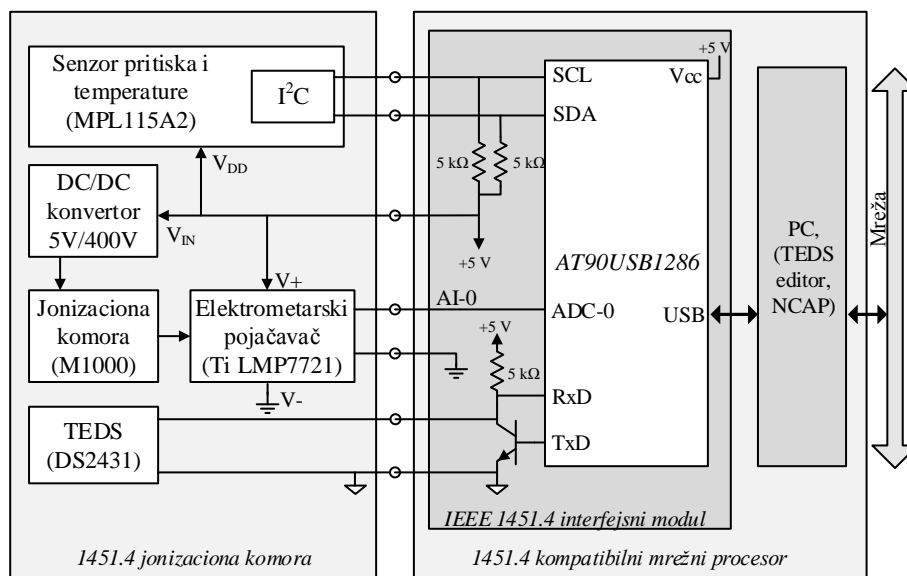
$$\dot{X} = I_s / M . \quad (5.19)$$

Masa vazduha izračunava se na osnovu vrednosti zapremine komore i gustine vazduha pri zadatom pritisku i temperaturi, prema relaciji [36]:

$$M = 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} V \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \quad (5.20)$$

gde su:  $V$  – aktivna zapremina komore u  $\text{m}^3$ ,  $P$  – pritisak vazduha u komori,  $P_0$  – standardni atmosferski pritisak (101.325 kPa),  $T$  – temperatura vazduha u komori i  $T_0$  – standardna temperatura (273.15 K).

Jonizaciona komora predstavlja tradicionalni analogni senzor sa strujnim ili naponskim izlazom. Kako bi se konstruisala inteligentna jonizaciona komora potrebno je obezbediti elektronske specifikacije koje sadrže najvažnije električne i merne karakteristike komore. Elektronske specifikacije objašnjene su u poglavlju 5.3.2.1, dok je povezivanje inteligentne jonizacione komore na mrežu realizovano kao na slici 5.19.



Slika 5.19. Povezivanje 1451.4 jonizacione komore sa mrežnim procesorom

Inteligentna jonizaciona komora bazira se na vazduh-ekvivalentnoj komori M1000 koja je izgrađena na osnovu koncepta Novkovića [38] i proizvedena u Institutu za nuklearne nauke Vinča, Beograd. Komora se napaja naponom od 5 V dobijenim preko USB magistrale, koji se dalje konvertuje u visoki napon 400 V pomoću kombinacije *boost* pretvarača i multiplikatora napona [35]. Elektrometarski pojačavač dizajniran je pomoću operacionog pojačavača veoma male ulazne struje TiLMP7721.

Kao što je pokazano u (5.20), ekspoziciona doza vazduh-ekvivalentne jonizacione komore zavisi od ambijentalne temperature i pritiska. Iz tog razloga, da bi



se izvršila korekcija u odnosu na ambijentalnu temperaturu i pritisak, digitalni senzor temperature i pritiska sa I<sup>2</sup>C interfejsom ugrađen je u inteligentnu komoru.

Za povezivanje opisane inteligentne jonizacione komore na mrežu koristi se 1451.4 kompatibilni mrežni procesor. Implementacija mrežnog procesora oslanja se na 1451.4 interfejsni modul i PC računar, kao što je opisano u poglavljima 5.1.1 i 5.1.3. Analogni signal sa izlaza komore povezuje se na ulaz AI-0 1451.4 interfejsnog modula, odnosno na ADC-0 ulaz mikrokontrolera. Konfiguracija AD konvertora i prenos mernih podataka u digitalnoj formi vrši se po internom protokolu slanjem odgovarajućih komandi interfejsnog modula koje su opisane u poglavlju 5.1.1.

Digitalni signal, izmeren na izlazu elektrometarskog pojačavača, pretvara se u odgovarajuću vrednost ekspozicione doze na osnovu kalibracionog faktora koji je prethodno pročitao iz TEDS memorije. Pošto je jonizaciona komora opremljena digitalnim senzorom temperature i pritiska, mikrokontroler, kroz I<sup>2</sup>C interfejs, očitava vrednosti parametara okoline i obavlja odgovarajuće korekcije ekspozicione doze u skladu sa formulom (5.20). Dobijena vrednost ekspozicione doze šalje se mrežnom procesoru preko USB interfejsa.

### **Evaluacija karakteristika jonizacione komore**

Vazduh-ekvivalentna jonizaciona komora M1000, zapremine 1000 cm<sup>3</sup> i debljine zida 2 mm prikazana je na slici 5.20. Unutrašnje površine komore obložene su povodnim vazduh-ekvivalent slojem. Preporučeni radni napon je 400 V.

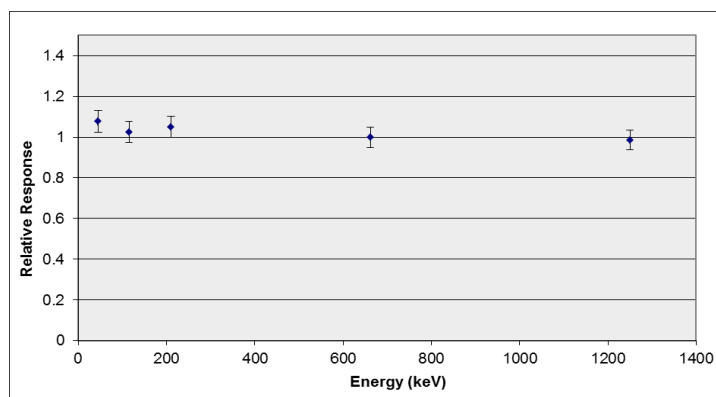
Za procenu karakteristika jonizacione komore, izvršena je kalibracija u Laboratoriji za radijaciona merenja Instituta za nuklearne nauke Vinča, Beograd. Kalibracija je izvršena korišćenjem X zračenja, energija 46 Kev, 114 keV i 195 keV, generisanim korišćenjem rendgen aparata *Philips* MG320 i gama zračenja korišćenjem dozimetrijskih izvora <sup>137</sup>Cs i <sup>60</sup>Co. Jonizaciona struja merena je korišćenjem elektrometra *Keithley* 610c sa relativnom greškom manjom od ± 3%. Ukupna relativna greška merenja manja je od ± 5%. Energetski odziv komore prikazan je na slici 5.21.

Kao što se vidi sa slike 5.21, energetski odziv je skoro uniforman u opsegu od 46 keV do 1.25 MeV sa relativnim odstupanjima koje ne prelaze ±8 %.



Slika 5.20. Testiranje jonizacione komore M1000 korišćenjem izvora X zračenja

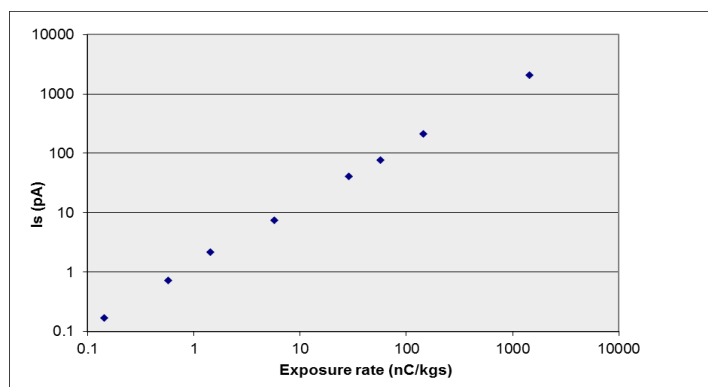
Osetljivost komore M1000 testirana je korišćenjem gama zračenja dobijenog korišćenjem izvora  $^{60}\text{Co}$ . Zavisnost struje jonizacione komore od ekspozicione doze data je na slici 5.22.



Slika 5.21. Relativna osetljivost jonizacione komore M1000 u odnosu na  $^{137}\text{Cs}$  u funkciji energija X i gama zračenja

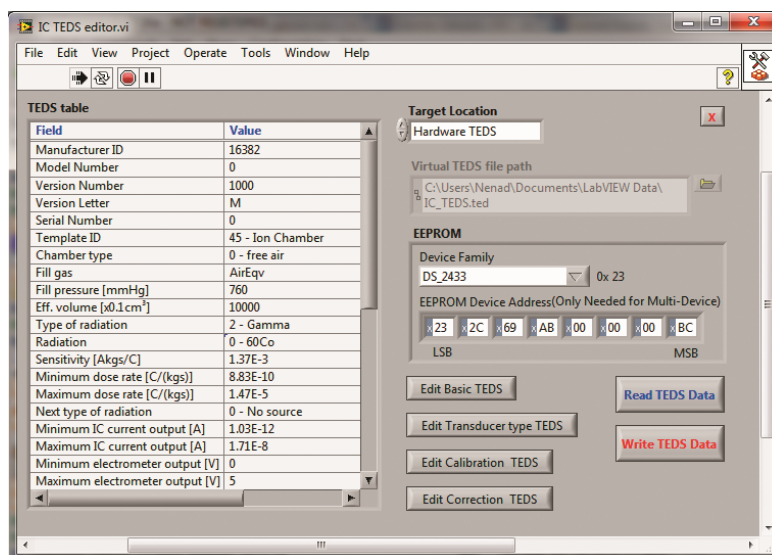
Osetljivost komore M1000 testirana je korišćenjem gama zračenja dobijenog korišćenjem izvora  $^{60}\text{Co}$ . Zavisnost struje jonizacione komore od ekspozicione doze data je na slici 5.22.

Na osnovu dobijenih karakteristika M1000 komore i predloženih TEDS šablona, formirane su elektronske specifikacije za inteligentnu komoru kompatibilnu sa standardom IEEE 1451.4. Za formiranje, upis i čitanje sadržaja TEDS memorije inteligentne komore, korišćen je *LabVIEW* program *TEDS editor*, prikazan na slici 5.23.



Slika 5.22. Struja zasićenja jonizacione komore M1000 u funkciji ekspozicione doze dobijene korišćenjem gama izvora  $^{60}\text{Co}$

Mehaničke i konstrukcione karakteristike komore, dobijene iz kataloga komore M1000, upisane su u osnovni TEDS prema predlogu klasifikacije detektora datom u tabeli 5.8 i u TEDS pretvarača, prema šablonu koji je prikazan u tabeli 5.14. Podaci dobijeni evaluacijom karakteristika komore upisani su u kalibracioni TEDS. Energetska zavisnost komore (slika 5.21) upisana je u TEDS memoriju korišćenjem *Correction table* šablona, a struja komore u funkciji ekspozicione doze (slika 5.22) korišćenjem standardnog IEEE šablona *Calibration table*.



Slika 5.23. Grafički korisnički interfejs TEDS editor programa za upis parametara jonizacione komore M1000

### **5.3.3. Povezivanje inteligentnih senzora zračenja u monitoring mrežu**

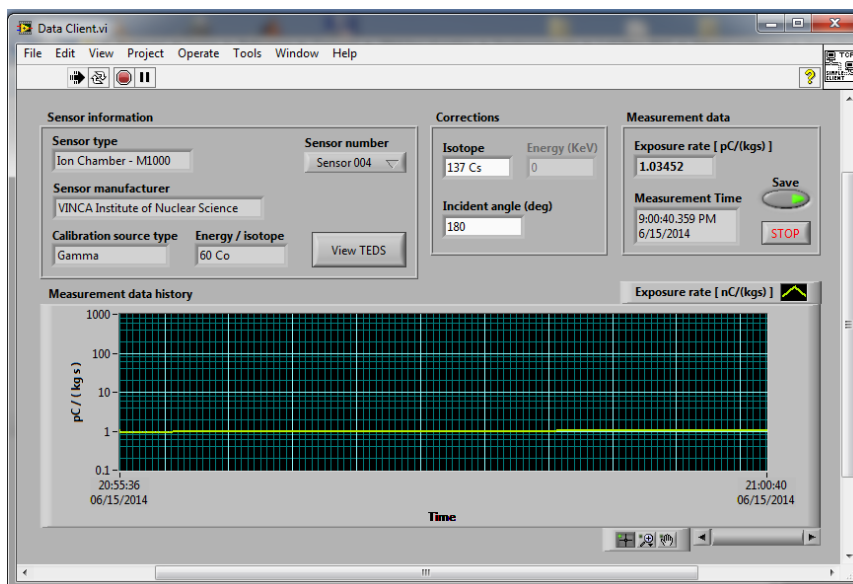
Jonizaciona komora predstavlja jedan od često korišćenih detektora u oblasti monitoringa nuklearnog zračenja, te je kao primer povezivanja senzora po *Plug and Play* konceptu iskorišćena realizovana inteligentna jonizaciona komora. *Plug and Play* funkcionalnost inteligentne komore ostvarena je kreiranjem elektronskih specifikacija kompatibilnih sa standardom IEEE 1451.4, kao što je objašnjeno u poglavlju 5.3.2.1. Kreirane specifikacije čuvaju se na poluprovodničkoj EEPROM memoriji malog kapaciteta čime se obezbeđuje jednostavan postupak nadogradnje postojećih detektora.

Mrežno povezivanje inteligentne komore u distribuirani merni sistem za monitoring gama zračenja izvršeno je korišćenjem 1451.4 mrežnog procesora opisanog u poglavlju 5.1.3. S obzirom da je mrežni procesor realizovan na bazi standarda IEEE 1451.0, elektronske specifikacije jonizacione komore potrebno je konvertovati u odgovarajući 1451.0 TEDS. Kako ne bi došlo do gubitka informacija sadržanih u specifikacijama, 1451.4 TEDS konvertuje se u odgovarajuću *Manufactured-defined* TEDS sekciju kompatibilnu sa standardom IEEE 1451.0.

Po priključenju komore na odgovarajući kanal interfejsnog modula pretvarača, mrežni procesor automatski detektuje prisustvo novog senzora, očitava sadržaj TEDS memorije i vrši konverziju u *Manufactured-defined* TEDS. Nakon toga, mrežni procesor je spreman za prijem 1451.0 kompatibilnih komandi za očitavanje TEDS memorije i mernih podataka sa senzora. Za demonstraciju povezivanja inteligentne jonizacione komore u distribuirani merni sistem za monitoring gama zračenja kreirana je klijentska aplikacija u *LabVIEW* programskom okruženju, a odgovarajući grafički korisnički interfejs prikazan je na slici 5.24. Udaljena klijentska aplikacija sa mrežnim procesorom komunicira korišćenjem HTTP aplikacionog interfejsa opisanog u poglavlju 4.3.6.

Po pokretanju aplikacije, ostvaruje se TCP/IP konekcija između klijenta i mrežnog procesora. Nakon uspostavljanja konekcije sa udaljenim mrežnim procesorom, klijentska aplikacija koristi *Discovery API* funkcije HTTP aplikacionog interfejsa za dobijanje liste inteligentnih senzora koji su povezani na mrežni procesor. Izborom odgovarajućeg senzora iz dobijene liste, korisnička aplikacija poziva *TEDS Manager API* funkcije za očitavanje sadržaja TEDS memorije. Imajući u vidu da se elektronske specifikacije dobijaju u formi *Manufactured-defined* TEDS-a, neophodno je izvršiti

konverziju u 1451.4 TEDS. Nakon konverzije, vrši se prevođenje 1451.4 TEDS-a korišćenjem razvijenih virtuelnih instrumenata *LabVIEW* biblioteke i odgovarajućih šablona po kojima je originalni TEDS napravljen.



Slika 5.24. Grafički korisnički interfejs klijentske aplikacije za udaljeni pristup inteligentnoj jonizacionoj komori

Na osnovu podataka o elektrometarskom pojačavaču i osetljivosti senzora koji su specifikovani u TEDS memoriji, mrežni procesor automatski konvertuje napon na izlazu pojačavača u odgovarajuće jedinice ekspozicione doze. Dodatne korekcije izračunate ekspozicione doze vrše se korišćenjem podataka iz *Correction table* sekcije TEDS memorije. Ukoliko je korisniku poznat izotop ili energija jonizujućeg zračenja, ovi podaci mogu se uneti putem grafičkog korisničkog interfejsa klijentske aplikacije. Na osnovu ovih podataka i podataka koji su pročitani iz *Correction table* TEDS sekcije za energetska zavisnost, vrši se odgovarajuća korekcija rezultata merenja. Kao što je već rečeno, ako je poznat ugao zračenja u odnosu na osu senzora, tada se vrednost ekspozicione doze može korigovati na osnovu podataka koji se čuvaju u *Correction table* TEDS sekciji za ugaonu zavisnost. Nakon konfiguracije jonizacione komore i unosa podataka za korekciju merenja (poznatog izotopa i ugla zračenja), klijentska aplikacija periodično zahteva prenos relevantnih rezultata merenja pozivanjem *Transducer Access API* funkcija mrežnog procesora. Dobijeni merni podaci prikazuju se grafički ili snimaju u odgovarajući fajl.

## Literatura

- [1] N. Jevtić and V. Drndarević, „Implementation of Mixed-Mode Interface for the IEEE 1451.4 Smart Transducers,“ *Zbornik radova konferencije ETRAN*, 2012, str. EL1.4-1-4.
- [2] N. Jevtić and V. Drndarević, „Development of Smart Transducers Compliant with the IEEE 1451.4 Standard,“ in *Proc. of IEEE Intern. Symposium on Instrument. and Control Technology*, 2012, pp.126-131.
- [3] N. Jevtić and V. Drndarević, „Design and Implementation of Plug-and-Play analog resistance temperature sensor,“ *Metrology & Measurement Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 565-580, 2013.
- [4] N. Jevtić and V. Drndarević, „Plug and Play Geiger-Muller Detector for Environmental Monitoring,“ *Instrumentation Science & Technology*, vol. 43, no. 02, pp. 222-243, 2015.
- [5] V. Drndarević and N. Jevtić, „A Vesatile, PC-based Gamma Ray Monitor,“ *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 21, no. 2, pp. 478-480, 2008.
- [6] V. Drndarević, N. Jevtić, V. Rajović and S. Stanković, „Smart Ionization Chamber for Gamma-ray Monitoring,“ *Nuclear Technology & Radiation Protection*, vol. 29, no. 3, pp. 190-198, 2014.
- [7] National Instruments, [Online]. <http://www.ni.com>.
- [8] DS2430A – 256-Bit 1-Wire EEPROM. (October 2014). [Online]. <http://www.maximintegrated.com/en/products/digital/memory-products/DS2430A.html>.
- [9] DS2431 – 1024-Bit 1-Wire EEPROM. (October 2014). [Online]. <http://www.maximintegrated.com/en/products/digital/memory-products/DS2431.html>.
- [10] AT90USB1286 Microcontroller. (June 2012). [Online]. <http://www.atmel.com/devices/at90usb1286.aspx>.
- [11] AVR318: Dallas 1-Wire ® master. (Jan 2015). [Online]. <http://www.atmel.com/images/doc2579.pdf>
- [12] Atmel AVR Studio 5, [Online]. <http://www.atmel.com>.
- [13] How to Install the TEDS Library into LabVIEW. (2013, June). [Online]. Available: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/DE722DD48F72175986256EFB00545EB8>

- [14] 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.
- [15] K. Mikhaylov, J. Jamsa, M. Luimula, J. Tervonen, F. Hu and Q. Hao, "Intelligent Sensor Interfaces and Data Format," in *Intelligent Sensor Networks: The Integration of Sensor Networks, Signal Processing and Machine Learning*, F. Hu and Q. Hao, Ed. CRC Press, 2013.
- [16] Apache http server. (February 2015). [Online]. <http://httpd.apache.org/>
- [17] S. Saponara, E. Petri, L. Fannuci and P. Terreni, „Smart Transducer Interface in Embedded Systems for Networked Sensors Based on the Emerging IEEE 1451 Standard: H2 Detector Case Study,“ in *Proc. of Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems*, 2006, pp. 49-55.
- [18] H. Ramos, O. Postolache, M. Pereira and P. Giro, „Embedding IEEE 1451.4 Smart Sensing Nodes in a Wireless Air Quality Monitoring Network,“ in *Proc of IEEE Int. Midwest Symposium on Circuits & Systems*, vol. 1, 2006, pp. 177-181.
- [19] C. Lee, „A Prototype of IEEE1451.4 Network Capable Application Processor and Transducer Interface Module with Transducer Electronic Data Sheet Conversion Software,“ M.S. thesis, Dept. Electrical Eng., The State Univ. New York, Buffalo, USA, 2006.
- [20] D. Wobschall and S. Mupparaju, „Low-Power Wireless Sensor with SNAP and IEEE 1451 Protocol,“ in *Proc. of Sensors Applications Symposium*, 2008, pp. 225-227.
- [21] D. Wobschall, „Networked sensor monitoring using the universal IEEE 1451 Standard,“ *IEEE Instrum. & Meas. Mag.*, vol. 11, no. 2, pp. 18-22, 2008.
- [22] J-D. Kim, J-J. Kim, S. Park, C. Hong, H. Byun and S. Lee, „A Smart Web-Sensor Based on IEEE 1451 and Web-Service Using a Gas Sensor,“ in *Computers, Networks, Systems, and Industrial Engineering 2011*, vol. 365, R. Lee, Ed. Springer, 2011, pp 219-235.
- [23] J. Liu, Y. Li and H. Zhao, „A Temperature Measurement System Based on PT100,“ in *Proc. of Intern. Conf. on Electrical & Control Engineering*, 2010, pp. 296-298.

- [24] C. Svelto, G. Galzerano and E. Bava, „Compact and accurate digital thermometer based on Anderson’s loop and Pt-100 sensor,“ *Measurement*, vol. 29, pp. 287–292, 2001.
- [25] 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.
- [26] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurements (GUM), 1st edition, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. [Online]. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
- [27] A. Dzwonkowski and L. Swedrowski, “Uncertainty analysis of measuring system for instantaneous power research,” *Metrology & Measurement Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 573-582, 2012.
- [28] Agilent 34401A Data Sheet. (June 2013). [Online]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-0162EN.pdf>.
- [29] D. Potter, „Smart plug and play sensors,“ *IEEE Instrum. & Meas. Mag.*, vol. 5, no. 1, pp. 28-30, 2002.
- [30] K. Lee, „IEEE 1451: A Standard in Support of Smart Transducer Networking,“ in *Proc. IEEE Instrum. & Meas. Technology Conf.*, vol. 2, 2000, pp. 525-528.
- [31] T. Licht, „The 1451.4 Proposed Standard,“ *IEEE Instrum. & Meas. Mag.*, vol. 4, no. 1, pp. 12-18, 2001.
- [32] H. Tai, D. Li, C. Wang, Q. Ding, C. Wang and S. Liu, “Design and characterization of a smart turbidity transducer for distributed measurement system,“ *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 175, pp. 1-8, 2012.
- [33] J. Kim, H. Byun, Y. Ham, W. Jung, D. Han, J. Park and H. Lee, „The definition of basic TEDS of IEEE 1451.4 for sensors for an electronic tongue and the proposal of new template TEDS for electrochemical devices,“ *Talanta*, vol. 71, no. 4, pp. 1642-1651, 2007.
- [34] S. Yurish. (2005). IEEE 1451 Standard and Frequency Output Sensors: How to obtain a Broad-Based Industry Adoption. *Sensors & Transducers Mag.* [Online]. vol. 59, no.9, pp. 412-418. Available: <http://www.sensorsportal.com>
- [35] V. Drndarević, N. Jevtić and R. Đurić, „USB Based Radiation Monitor,“ *Nuclear Technology & Radiation Protection*, vol. 21, no. 2, pp. 73-78, 2006.



- [36] G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, New York, USA, 2000, pp. 129-148.
- [37] F. Hajnel and J. Pane, „Calculated Saturation Curves and Ion Densities of Ionization Chambers,“ *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 25, no.1, pp. 550-552, 1978.
- [38] D. Novković, D. Paligorić, R. Ilić and D. Veličković „An Air-equivalent Ionization Chamber,“ *Isotopenpraxis*, vol. 25, no. 5, pp. 205-208, 1989.

## **6. Zaključak**

Senzori i aktuatori imaju široku primenu u praćenju, nadzoru i kontroli automatizovanih procesa u različitim okruženjima kao što su industrijska postrojenja, naučno-istraživački centri, monitoring saobraćaja i transporta, u biomedicini, poljoprivrednoj proizvodnji i mnogim drugim oblastima. Primenom savremenih tehnologija senzori fizičkih veličina beleže stalni napredak u performansama, pre svega u pogledu tačnosti, brzine odziva, smanjenja potrošnje, kao i smanjenja dimenzija i cene. Osim napretka u performansama, od savremenih distribuiranih mernih sistema očekuje se da obavljaju veoma složene zadatke potpuno automatizovano, što zahteva da sve komponente sistema, a posebno senzori, poseduju veliki stepen inteligencije. Iz tog razloga sve više se koriste tzv. inteligentni senzori koji, pored osnovne merne funkcije, poseduju i dodatne funkcije kao što su: autodijagnostika, automatska konfiguracija i kalibracija, lokalizacija, obrada i fuzija podataka i mrežna komunikacija.

Sa tačke gledišta korisnika mernih sistema, inteligentni senzori donose niz prednosti koje omogućavaju automatsko povezivanje i konfiguraciju na osnovu elektronskih specifikacija senzora, te značajno olakšavaju projektovanje i implementaciju, kao i smanjenje troškova konfiguracije i održavanja složenih distribuiranih merno-upravljačkih sistema. Sa tačke gledišta proizvođača merne opreme, inteligentni senzori predstavljaju dobru investiciju jer omogućavaju realizaciju složenijih i kvalitetnijih mernih sistema sa dodatnim funkcijama koje povećavaju vrednost proizvoda. Vrlo često proizvođači merne opreme uz inteligentne senzore nude i odgovarajuća softverska rešenja kojima se ostvaruje dodatni profit. Stoga se u

narednom periodu očekuju značajnija ulaganja u savremenu mernu opremu zasnovanu na inteligentnim sensorima.

U zavisnosti od okruženja i ciljne oblasti primene, proizvođači merne opreme mogu se odlučiti da slede neko od standardizovanih rešenja za mrežno povezivanje pretvarača ili da razvijaju i nameću sopstvena rešenja za mrežnu komunikaciju. U prethodnim periodu razvijen je veći broj industrijskih mreža i protokola za povezivanje inteligentnih senzora i aktuatora u distribuirani merno-upravljački sistem. Međutim, uvođenje velikog broja specifičnih zatvorenih rešenja dovodi do nekompatibilnosti pri povezivanju pretvarača različitih proizvođača, te se samim tim smanjuju fleksibilnost i konkurentnost a povećavaju troškovi dizajna, instalacije i održavanja merno-upravljačkih sistema.

Kao posledica težnje za interoperabilnošću, u poslednje dve decenije sve više pažnje poklanja se standardizaciji, a posebno kreiranju globalnih internacionalnih standarda i usaglašavanju postojećih standarda za mrežno povezivanje senzora. Uvođenje standarda u oblast projektovanja inteligentnih pretvarača i njihovog povezivanja u kompleksne merne i kontrolne sisteme potencijalno donosi mnogobrojne prednosti i uštede. Opšte prihvatanje standardizacije od različitih proizvođača dovelo bi do interoperabilnosti pretvarača pa samim tim i ušteda usled podsticanja konkurencije među proizvođačima.

Osim problema interoperabilnosti, sa upotrebom inteligentnih pretvarača pojavljuju se i drugi problemi koji uključuju potrebu za univerzalnim mehanizmom za komunikaciju koji ne zavisi od tipa pretvarača ili mreže na koju je pretvarač povezan, kao i univerzalnim načinom za specifikaciju karakteristika pretvarača. Standardizacijom elektronskih specifikacija otvara se mogućnost uvođenja *Plug and Play* koncepta za povezivanje pretvarača. *Plug and Play* pretvarači omogućavaju automatizaciju procesa konfiguracije i kalibracije sistema, što dovodi do ušteda u održavanju i unapređenju postojećih, i instalaciji novih mernih i kontrolnih sistema.

Kao odgovor na potrebe za standardizacijom elektronskih specifikacija i univerzalnog pristupa sensorima preko mreže, pojavilo se više familija standarda koje su donekle uspele da reše mnogobrojne izazove nastale uvođenjem koncepta inteligentnih pretvarača. Među najznačajnijim standardima u oblasti distribuiranih

mernih i kontrolnih sistema koji pokušavaju da reše najvažnija pitanja automatskog prepoznavanja i konfiguracije, povezivanja na mrežu, kao i interoperabilnosti pretvarača različitih tipova i proizvođača, izdvaja se familija standarda IEEE 1451. Ova familija standarda omogućava povezivanje analognih i digitalnih senzora po *Plug and Play* konceptu korišćenjem standardizovanih elektronskih specifikacija pretvarača. Elektronske specifikacije obezbeđuju neophodni skup podataka o pretvaračima, kako bi se obezbedila automatska konfiguracija po povezivanju.

IEEE 1451.2 je prvi praktično primenjeni standard ove familije koji je omogućio povezivanje digitalnih senzora na bazi specijalizovanog TII interfejsa. Za povezivanje senzora preko digitalne *multi-drop* magistrale uveden je standard 1451.3, koji nije naišao na širu primenu. Sa razvojem bežičnih tehnologija i bežičnih senzorskih mreža pojavio se i standard 1451.5 koji omogućava povezivanje senzora na bazi *WiFi* (802.11), *Bluetooth* (802.15.1), *ZigBee* (802.15.4), *6LoWPAN* i drugih interfejsa. U novije vreme pojavio se i standard 1451.7 za povezivanje RFID pretvarača.

Iako su digitalni senzori sve prisutniji na tržištu, u pojedinim oblastima primene, a posebno u industriji kao i u sistemima koji rade u teškim uslovima, analogni i kvazidigitalni senzori još uvek se koriste u velikoj meri. Značajan nedostatak analognih senzora predstavlja činjenica da se za ove senzore ne može obezbediti automatska identifikacija, pa samim tim ni automatsko povezivanje i konfiguracija u složeni distribuirani merni sistem. Međutim, standard IEEE 1451.4 promovisao je ideju da se dodavanjem male poluprovodničke memorije senzorskom elementu može na jednostavan način obezbediti smeštanje neophodnih elektronskih specifikacija, čime se omogućava *Plug and Play* povezivanje analognih i kvazidigitalnih senzora. S obzirom na ograničene memorijske kapacitete, standardom 1451.4 definisana je specifična, veoma kompaktna TEDS struktura koja omogućava smeštanje elektronskih specifikacija korišćenjem svega nekoliko stotina bita. Zbog ove činjenice 1451.4 senzori pogodni su za primenu i u *embedded* sistemima koji imaju veoma ograničene resurse.

Mrežna komunikacija sa udaljenim inteligentnim sensorima prema standardu IEEE 1451 ostvaruje se korišćenjem mrežnog procesora (NCAP). Standardizovani softverski model mrežnog procesora definisan je u okviru standarda 1451.1. Mrežni procesor na bazi standarda 1451.1 relativno je složen i nije šire prihvaćen u praktičnim realizacijama. Međutim, za jednostavnije primene, mrežna komunikacija može se

zasnivati na zajedničkim servisima, funkcijama i protokolima koji su definisani u okviru standarda 1451.0.

Osim pozitivnih aspekata, uvođenjem standarda za mrežno povezivanje inteligentnih pretvarača nailazi se i na mnogobrojne poteškoće. Da bi se standardom postigla očekivana unapređenja neophodna je široka prihvaćenost standarda, pre svega među vodećim proizvođačima, koji najčešće teže ka specifičnim zatvorenim hardverskim i softverskim rešenjima. Takođe, treba imati u vidu da definisanje i usvajanje standarda predstavlja zahtevan i dugotrajan proces te je, s obzirom na ubrzan tempo pojavljivanja novih tehnoloških rešenja, neophodno obezbediti da standard obuhvati, kako tekuća tehnološka rešenja, tako i da odgovori na zahteve za buduća proširenja i unapređenja koja se neminovno javljaju sa napretkom tehnologije.

Postavljeni cilj ove disertacije, koji je deklarisan u uvodnoj glavi i koji se odnosi na primenu inteligentnih *Plug and Play* senzora, ostvaren je bazirajući se na familiji standarda IEEE 1451. Ovakav izbor zasnovan je na detaljnoj sistematizaciji i analizi postojećih rešenja za implementaciju inteligentnih mrežnih senzora. Familija standarda IEEE 1451 posebno je posvećena razvoju pretvarača sa ugrađenim elektronskim specifikacijama koje obezbeđuju *Plug and Play* povezivanje i automatsku konfiguraciju senzora. Takođe, mrežna komunikacija prema familiji standarda IEEE 1451 bazira se na protokolima aplikativnog nivoa OSI modela čime se obezbeđuje komunikacija preko mrežne infrastrukture proizvoljnog tipa.

Posebna pažnja u ovoj disertaciji posvećena je analognim sensorima sa osnovnim motivom da se proširi oblast primene standarda IEEE 1451.4 i da se omogući povezivanje nasleđenih analognih senzora po *Plug and Play* konceptu. Jedan od ključnih problema rešavan u okviru ove disertacije odnosi se na definisanje neophodnog skupa podataka za formiranje elektronskih specifikacija koje bi omogućile automatsku identifikaciju i konfiguraciju za pojedine klase analognih i impulsnih senzora. Definisane su najvažnije karakteristike senzora i predloženi novi TEDS šabloni za smeštanje elektronskih specifikacija na bazi standarda IEEE 1451.4.

Na osnovu prethodnih analiza i razmatranja predložena su nova rešenja za praktičnu realizaciju inteligentnih analognih i impulsnih *Plug and Play* senzora. Praktične realizacije inteligentnih senzora u ovoj disertaciji zasnivaju se na novom

rešenju hardverske i softverske platforme za projektovanje i implementaciju 1451.4 kompatibilnih senzora. Hardverska platforma sastoji se iz 1451.4 interfejsnog modula, baziranog na MMI interfejsu klase 2, i PC računara koji je korišćen za dizajn, testiranje i realizaciju funkcija mrežnog procesora. Za kreiranje odgovarajućih elektronskih specifikacija razvijen je originalni postupak za prevođenje vrednosti parametara senzora u binarnu formu pogodnu za upis u TEDS memoriju pretvarača. Odgovarajuće softversko rešenje za očitavanje, raščlanjivanje i prevođenje sadržaja TEDS memorije u formu pogodnu za prikaz na grafičkom korisničkom interfejsu, kao i obrnuto, za prevođenje podataka unetih od strane korisnika u binarnu formu, razvijeno je u *LabVIEW* programskom okruženju.

Za povezivanje IEEE 1451.4 kompatibilnih senzora na mrežu predloženo je originalno rešenje mrežnog procesora na bazi standarda 1451.0. Predloženo rešenje bazira se na prethodno razvijenoj hardverskoj platformi koja se sastoji iz 1451.4 interfejsnog modula za povezivanje senzora i na PC računaru. PC računar je iskorišćen za realizaciju odgovarajućeg skupa funkcija koje čine interfejs za mrežne servise pretvarača (*Transducer Services API*) i koje obezbeđuju mrežni pristup senzoru. Za 1451.4 interfejsni modul pretvarača definisan je 1451.0 kompatibilni TEDS i obezbeđeno je povezivanje informacija iz elektronskih specifikacija senzora na bazi standarda IEEE 1451.4 i elektronskih specifikacija interfejsnog modula na bazi standarda IEEE 1451.0. Pristup sensorima preko mreže ostvaren je korišćenjem HTTP protokola, a odgovarajuća softverska realizacija izvršena je u *Java* programskom jeziku.

Razvijena hardverska platforma i odgovarajući softverski alati iskorišćeni su za nadogradnju nasleđenih analognih senzora, odnosno za realizaciju inteligentnih mrežnih senzora na bazi tradicionalnih analognih senzora po *Plug and Play* konceptu. Realizovana platforma za razvoj 1451.4 kompatibilnih senzora prvo je testirana povezivanjem senzora temperature. Iako je na tržištu prisutan veliki broj industrijskih modula za merenje temperature sa različitim komunikacionim interfejsima, predložena rešenja ne nude mogućnost *Plug and Play* povezivanja. Nasuprot tome, u ovoj disertaciji predloženo je novo rešenje za realizaciju senzora temperature koje se zasniva na konceptu *Plug and Play*. Realizacija senzora je izvršena na bazi predložene hardverske platforme i standardnog industrijskog platinskog rezistivnog detektora

PT100, dok su odgovarajuće elektronske specifikacije dizajnirane prema šablonu za RTD senzore koji je definisan u standardu IEEE 1451.4.

Primena razvojnog sistema za 1451.4 senzore demonstrirana je i kroz realizaciju inteligentnih senzora za detekciju jonizujućeg zračenja: GM detektora i jonizacione komore. Osnovni motiv za realizaciju inteligentnih detektora jonizujućeg zračenja je da se proširi oblast primene standarda IEEE 1451.4 i na ovu oblast i da se omogući povezivanje detektora zračenja po *Plug and Play* konceptu. Najznačajniju prepreku u primeni standarda IEEE 1451.4 u oblasti detekcije jonizujućeg zračenja predstavlja nedostatak odgovarajućih šablona za senzore zračenja. Ova činjenica značajno otežava primenu standarda IEEE 1451.4 u mrežama za monitoring jonizujućeg zračenja. Iz tog razloga, u disertaciji su predloženi originalni šabloni i realizovani odgovarajući detektori koji, prema znanju autora i raspoloživoj literaturi, predstavljaju prvi predlog rešenja za povezivanje detektora jonizujućeg zračenja po *Plug and Play* konceptu.

Veliki broj senzora jonizujućeg zračenja, uključujući i GM detektor, radi u impulsnom režimu, te se može svrstati u grupu kvazidigitalnih senzora. Senzori sa impulsnim odzivom samo su delimično podržani u standardu IEEE 1451.4. Izvestan broj karakteristika, specifičnih za impulsne senzore, definisan je u standardu, ali nijedan od standardnih šablona ne može se iskoristiti za opis ovog tipa senzora. S obzirom da za GM detektor ne postoji standardni šablon za čuvanje elektronskih specifikacija, odgovarajući šablon je razvijen i testiran na primeru inteligentnog senzora gama zračenja na bazi ZP1200 GM cevi. Predloženi šablon sadrži nekoliko sekcija kojima se specificiraju najvažnije merne karakteristike senzora, napon napajanja i električne karakteristike izlaza senzora. Električne karakteristike senzora neophodne su za proces automatske konfiguracije akvizicionog interfejsa mrežnog procesora, dok se merne karakteristike koriste za automatsko prevođenje električnog izlaza senzora u odgovarajuće merne jedinice. Predloženi šablon pogodan je ne samo za GM detektore već i za druge tipove detektora sa impulsnim izlazom.

Osim GM detektora, jedan od najčešće korišćenih radijacionih detektora, posebno pogodan za primene u monitoring mrežama, jeste jonizaciona komora. U disertaciji je predloženo novo rešenje jonizacione komore koja se u monitoring mrežu povezuje po *Plug and Play* konceptu. Predloženo rešenje realizovano je na bazi komore

M1000 koja je konstruisana i proizvedena u Institutu za nuklearne nauke Vinča, Beograd. Kao što je bio slučaj za GM brojač, ni za jonizacionu komoru ne postoji adekvatan šablon u standardu IEEE 1451.4 koji je pogodan za čuvanje elektronskih specifikacija ovog tipa detektora. Predložen je novi šablon za smeštanje elektronskih specifikacija jonizacione komore sa strujnim izlazom i elektrometarskim pojačavačem na bazi standarda IEEE 1451.4. Predloženi šablon, osim osnovnih mehaničkih i električnih karakteristika, sadrži i detaljne merne karakteristike senzora, čime se obezbeđuje automatska konverzija struje na izlazu komore, odnosno merenog napona na izlazu elektrometarskog pojačavača, u odgovarajuću vrednost ekspozicione doze jonizujućeg zračenja. Realizovani detektor kalibrisan je u Laboratoriji za radijaciona merenja u Institutu za nuklearne nauke Vinča, a rezultati evaluacije karakteristika upisani su TEDS memoriju senzora.

Odziv detektora jonizujućeg zračenja, a posebno kod GM detektora, značajno zavisi od energije i upadnog ugla zračenja u odnosu na osu detektora. Ove zavisnosti imaju veliki uticaj na merne rezultate, te je zbog toga važno pronaći efikasan način za uključivanje korekcionih podataka u TEDS memoriju. Iako standard IEEE 1451.4 obezbeđuje šablone za smeštanje kalibracionih podataka senzora, ovi šabloni ne predstavljaju adekvatan mehanizam za smeštanje podataka o energetske i ugaonoj zavisnosti odziva. Iz tog razloga predložen je novi korekcioni šablon za smeštanje ovih podataka u tabelarnoj formi.

U cilju testiranja deklarisanе mrežne funkcionalnosti realizovanih detektora razvijena je posebna korisnička aplikacija u *LabVIEW* programskom okruženju koja koristi mrežne servise bazirane na HTTP protokolu za prikupljanje raspoloživih mernih podataka sa senzora i grafički prikaz rezultata merenja.

Imajući u vidu napred navedeno, u okviru predložene doktorske disertacije ostvareni su sledeći originalni naučni doprinosi.

- Predlog originalnog rešenja i implementacija hardverske i softverske platforme za razvoj analognih i impulsnih inteligentnih senzora na bazi standarda IEEE 1451.4 i 1451.0. Razvijena je originalna softverska aplikacija za editovanje elektronskih specifikacija pretvarača kompatibilnih sa standardom IEEE 1451.4.



- Za povezivanje IEEE 1451.4 kompatibilnih senzora na mrežu predloženo je novo rešenje mrežnog procesora na bazi standarda 1451.0. Pristup sensorima preko mreže ostvaren je korišćenjem HTTP protokola, a odgovarajuća softverska implementacija izvršena je u programskom jeziku *Java*.
- Prethodna rešenja primenjena su za realizaciju *Plug and Play* senzora temperature. Realizacija je bazirana na industrijskom platinskom rezistivnom detektoru PT100 za koji su kreirane odgovarajuće elektronske specifikacije prema standardnom šablonu za RTD senzore.
- U cilju proširenja primene standarda IEEE 1451.4 u oblasti monitoringa jonizujućeg zračenja, realizovan je *Plug and Play* GM detektor za merenje gama zračenja. Predloženo je novo rešenje šablona za smeštanje elektronskih specifikacija koje se može primeniti ne samo za GM detektore, već i za druge senzore jonizujućeg zračenja sa impulsnim izlazom.
- Osim GM detektora, u sklopu istraživanja sprovedenog za potrebe ove disertacije realizovana je inteligentna jonizaciona komora koja je povezana u monitoring mrežu prema *Plug and Play* konceptu. Za realizaciju je iskorišćena komora M1000, a elektronske specifikacije su kreirane u skladu sa novim predloženim šablonom.
- Predloženo je i novo rešenje IEEE 1451.4 kompatibilnog šablona za smeštanje podataka za korekciju funkcije prenosa senzora u zavisnosti od proizvoljno zadatog parametra. Predloženo rešenje primenjeno je za smeštanje podataka o energetske i ugaonoj zavisnosti odziva radijacionih detektora.
- Kao posredan doprinos disertacije može se navesti i sistematična i detaljna analiza postojećih rešenja mrežnog povezivanja senzora kao i detaljna analiza mogućnosti primene familije standarda IEEE 1451 na konstrukciju analognih *Plug and Play* senzora.

Iako je uvođenje standarda poboljšalo interoperabilnost i omogućilo kreiranje *Plug and Play* pretvarača, mnogi problemi koji se sreću u primeni inteligentnih pretvarača još uvek su ostali nerešeni i predstavljaju predmet daljeg istraživanja.

Jedan od osnovnih motiva za rad na ovoj disertaciji je proširenje oblasti primene standarda IEEE 1451.4 na oblast merenja radioaktivnog zračenja. Kao što je već rečeno, predložena su originalna rešenja koja uključuju GM detektor i jonizacionu komoru. Međutim, osim ovih detektora, u čestoj upotrebi su i scintilacioni i poluprovodnički detektori, za koje takođe ne postoje odgovarajući IEEE 1451.4 šabloni. U cilju kompletnosti predloženog rešenja, u budućem radu, ove detektore potrebno je detaljno analizirati i predložiti odgovarajuće šablone kompatibilne sa standardom IEEE 1451.4. Takođe, praktični predlozi u ovoj disertaciji pre svega su ograničeni na monitoring gama zračenja, te je zarad opštosti predloženih rešenja potrebno uneti dopune u predložene šablone kako bi se obuhvatili svi tipovi radioaktivnog zračenja.

Veoma važan aspekt sa stanovišta primene standarda IEEE 1451.4 u oblasti merenja radioaktivnog zračenja je i kompatibilnost sa postojećim standardima u toj oblasti kao što je standard ANSI/IEEE N42.42. Svrha standarda N42.42 je da obezbedi prenos podataka mernih instrumenata prema standardizovanoj XML šemi koja je univerzalna, odnosno nezavisna od proizvođača merne opreme. U budućem radu u planu je realizacija mrežnog procesora koji će merne podatke slati prema XML šemi kompatibilnoj sa standardom ANSI/IEEE N42.42.

Testiranje mrežnih funkcija predloženih *Plug and Play* detektora bazirano je u disertaciji na HTTP protokolu i *RESTfull Web* servisima. U budućem radu može biti pogodno je realizovati koncept *Plug and Play* senzora primenom opštijeg rešenja na bazi *SOAP Web* servisa. Takođe, za realizaciju predloženog koncepta povezivanja korišćen je PC računar. Ovakvo rešenje pogodno je sa stanovišta razvoja i testiranja *Plug and Play* senzora, ali ne i za praktičnu primenu, te je potrebno zasnovati realizaciju mrežnog procesora na savremenim mikrokontrolerima ili FPGA čipovima.

# Prilog 1 – Pregled protokola za instrumentaciju, kućnu automatizaciju, industrijske i kompjuterske mreže

*Tabela 1. Instrumentacioni interfejsi*

Protokol	Proizvođač (država)	Godina uvođenja	Standard
CAMAC	ESONE (Evropa)	1969.	IEEE 583 (1970, 1982, 1994) IEEE 595 (1974, 1982) IEEE 596 (1972, 1982) IEEE 758 (1979)
GPIB (HP-IB)	Hewlett-Packard (SAD)	1974	ANSI IEEE-488 (1975, 1978) ANSI IEEE -488.2 (1987, 1992) IEC 60625 (1979, 1993)
HP-IL	Hewlett-Packard (SAD)	1980	-
I <sup>2</sup> C	Philips (Holandija)	1981	-
M-Bus	Univerzitet Paderbon, TI, Techem (Nemačka)	1992	EN 1434-3 (1997)
Measurement bus	Industrijski konzorcijum (Nemačka)	1988	DIN 66348-2 (1989) DIN 66348-3 (1996)

*Tabela 2. Automobilski i avionski interfejsi*

Protokol	Proizvođač (država)	Godina uvođenja	Standard
ABUS	Volkswagen (Nemačka)	1987	-
ARINC	Aeronautical Radio, Inc. (SAD)	1978	AEEC ARINC 429 (1978, 1995) AEEC ARINC 629 (1989)
CAN	Bosh (Nemačka)	1986	ISO 11898 (1993, 1995) ISO 11519 (1994)
Flexay	DaimlerChrysler, BMW (Nemačka)	2002	-
J1850	Ford, GM, Chrysler (SAD)	1987	SAE J1850 (1994, 2001) ISO 11519-4
J1939	SAE (SAD)	1994	SAE J1939 (1998)
LIN	Industrijski konzorcijum (Nemačka)	1999	- (otvorena spec)
MIL 1533	SAE (SAD)	1970	MIL-STD-1553 (1973) MIL-STD-1553A(1975) MIL-STD-1553B (1978)
VAN	Renault, PSA, Peugeot-Citroen (Francuska), ISO TC22	1988	ISO 11519-3 (1994)
SwiftNet	Ship Star Association, Boeing (SAD)	1997	IEC 61158 (2000)
TTP	Univerzitet tehnologije u Beču (Austrija)	1996	-

**Tabela 3. Industrijski protokoli**

Protokol	Proizvođač (država)	Godina uvođenja	Standard
ARCNET	Datapoint (SAD)	1977	ANSI ATA 878 (1999)
ASi	Industrijski i univerzitetski konzorcijum (Nemačka)	1991	EN 50295-2 (1998, 2002) IEC 62026-2 (2000)
Bitbus	Intel (SAD)	1983	ANSI IEEE 1118 (1990)
CC-Link	Mitsubishi (Japan)	1996	-
CANopen	CAN u automatici (Nemačka)	1995	EN 50325-4 (2002)
ControlNet	Allen-Bradley (SAD)	1996	EN 50170-A3 (2000)
DeviceNet	Allen-Bradley (SAD)	1994	EN 50325-2 (2000)
FF	Fieldbus Foundation (SAD)	1995	EN 50170-A1 (2000)
HART	Rosemount (SAD)	1986	- (otvorena spec)
Interbus-S	Phoenix Contact (SAD)	1987	DIN 19258 (1993) EN 50254-2 (1998)
MAP	General Motors (SAD)	1982	MAP 1.0 (1982) MAP 2.0 (1985) MAP 3.0 (1988)
MMS	ISO TC 184	1986	ISO/IEC 9506 (1988, 2000)
Modbus	Gould, Modicon (SAD)	1979	- (otvorena spec)
PDV-bus	Industrijski i univerzitetski konzorcijum (Nemačka)	1979	DIN 19241 (1982)
P-NET	Proces Data (Danska)	1983	DS 21906 (1990) EN 50170-1 (1996)
PROWAY C	IEC TC 65	1986	ISA S72.01 (1985) IEC 60955 (1989)
PROFIBUS	Industrijski i univerzitetski konzorcijum (Nemačka)	1989	FMS: DIN 19245-1—2 (1991) DP: DIN 19245-3 (1993) PA: DIN 19245-4 (1995) FMS/DP: EN 50170-2 (1996) DP: EN 50254-3 (1998) PA: EN 50170-A2 (2000)
SDS	Honeywell (SAD)	1994	EN 50325-3 (2000)
Sercos	Industrijski konzorcijum (Nemačka)	1989	IEC 61491 (1995) EN 61491 (1998)
Seriplex	APC, Inc. (SAD)	1990	IEC 62026-6 (2000)
SINEC L2	Siemens (Nemačka)	1992	-
SP50 Fieldbus	ISA SP 50 (SAD)	1993	ISA SP 50 (1993)
(World)FIP	Industrijski i univerzitetski konzorcijum (Francuska)	1987	AFNOR NF C46601—7 (1989–1992) EN 50170-3 (1996) DWF: AFNOR NF C46638 (1996) DWF: EN 50254-4 (1998)

**Tabela 4. Interfejsi za automatizaciju u stanovima i zgradama**

Protokol	Proizvođač (država)	Godina uvođenja	Standard
BACnet	ASHRAE SPC135P Industrijski konzorcijum (SAD)	1991	ANSI/ASHRAE 135 (1995) ENV 1805-1 (1998) ENV 13321-1 (1999) ISO 16484-5 (2003)
Batibus	Industrijski konzorcijum (Francuska)	1987	AFNOR NF 46621—3, 9 (1991) ENV 13154-2 (1998)
CEBus	Industrijski konzorcijum (SAD)	1984	ANSI EIA 600 (1992)
EHS	Industrijski konzorcijum (Evropa)	1987	ENV 13154-2 (1998)
EIB	Industrijski konzorcijum (Nemačka)	1990	AFNOR NFC 46624—8 (1991) DIN V VDE 0829 (1992) ENV 13154-2 (1998)
HBS	Industrijski konzorcijum (Japan)	1986	EIAJ/REEA ET2101
LonWorks	Echelon (SAD)	1991	ANSI EIA 709 (1999) ENV 13154-2 (1998)
Sigma 1	ABB (Nemačka)	1983	-
X10	Pico Electronics (Velika Britanija)	1978	-
KNX	Industrijski konzorcijum (Evropa)	2002	EN 50090 (2003) ISO/IEC 14543-3 (2006)

## Prilog 2 – Standardni IEEE 1451.4 šabloni

**Tabela 1.** Standardni IEEE 1451.4 šablon za rezistivni temperaturni detektor (RTD) –  
Template ID = 37

Izbor	Karakteristika (TDL komanda)	Naziv karakteristike	Pri-stup	Biti	Tip i opseg podataka	Jedinica
–	TEMPLATE	Template ID		8	Integer (value = 40)	–
<i>Measurement sekcija</i>						
–	%MinPhysVal	Minimum temperature	CAL	11	ConRes (-200 to 1847, step 1)	°C
–	%MaxPhysVal	Maximum temperature	CAL	11	ConRes (-200 to 1847, step 1)	°C
<i>Electrical signal output sekcija</i>						
–	%ElecSigType	Transducer Electrical signal type	ID	–	Assign = 2, "Resistance Sensor"	–
–	%MinElecVal	Minimum electrical output	CAL	11	ConRes (0 to 2.05k, step 1)	Ω
–	%MaxElecVal	Maximum electrical output	CAL	13	ConRes (0 to 8.2k, step 1)	Ω
–	%MapMeth	Mapping method	ID	–	Assign = 5, "RTD"	–
Select Case – R0 Resistance				2	Select Case	–
Case0	%RTDCoef_R0	Resistance R0	ID	–	Assign = 100.0	Ω
Case1	%RTDCoef_R0	Resistance R0	ID	–	Assign = 120.0	Ω
Case2	%RTDCoef_R0	Resistance R0	ID	–	Assign = 1000.0	Ω
Case3	%RTDCoef_R0	Resistance R0	ID	20	ConRelRes (1 to 12.5k, ±4.5 ppm)	Ω
Select Case – RTD Curve (Callendar-Van Dusen koeficijenti)				3	Select Case	–
Case0	%RTDCoef_A	CVD Coefficient A	ID	–	Assign = 3.8100E-3	1/C
	%RTDCoef_B	CVD Coefficient B	ID	–	Assign = -6.0200E-7	1/C <sup>2</sup>
	%RTDCoef_C	CVD Coefficient C	ID	–	Assign = -6.000E-12	1/C <sup>3</sup>
Case1	%RTDCoef_A	CVD Coefficient A	ID	–	Assign = 3.9083E-3	1/C
	%RTDCoef_B	CVD Coefficient B	ID	–	Assign = -5.7750E-7	1/C <sup>2</sup>
	%RTDCoef_C	CVD Coefficient C	ID	–	Assign = -4.183E-12	1/C <sup>3</sup>
Case2	%RTDCoef_A	CVD Coefficient A	ID	–	Assign = 3.9692E-3	1/C
	%RTDCoef_B	CVD Coefficient B	ID	–	Assign = -5.8495E-7	1/C <sup>2</sup>
	%RTDCoef_C	CVD Coefficient C	ID	–	Assign = -4.229E-12	1/C <sup>3</sup>
Case3	%RTDCoef_A	CVD Coefficient A	ID	–	Assign = 3.9739E-3	1/C
	%RTDCoef_B	CVD Coefficient B	ID	–	Assign = -5.8700E-7	1/C <sup>2</sup>
	%RTDCoef_C	CVD Coefficient C	ID	–	Assign = -4.39E-12	1/C <sup>3</sup>
Case4	%RTDCoef_A	CVD Coefficient A	ID	–	Assign = 3.9787E-3	1/C
	%RTDCoef_B	CVD Coefficient B	ID	–	Assign = -5.8685E-7	1/C <sup>2</sup>
	%RTDCoef_C	CVD Coefficient C	ID	–	Assign = -4.160E-12	1/C <sup>3</sup>
Case5	%RTDCoef_A	CVD Coefficient A	ID	–	Assign = 3.9888E-3	1/C
	%RTDCoef_B	CVD Coefficient B	ID	–	Assign = -5.915E-7	1/C <sup>2</sup>
	%RTDCoef_C	CVD Coefficient C	ID	–	Assign = -3.816E-12	1/C <sup>3</sup>
Case6	%RTDCoef_A	CVD Coefficient A	ID	13	ConRes(3.8E-3 to 4E-3, step 2.5E-8)	1/C
	%RTDCoef_B	CVD Coefficient B	ID	10	ConRes(-6.1E-7 to -5.6E-7, step 5E-11)	1/C <sup>2</sup>

	%RTDCoef_C	<i>CVD Coefficient C</i>	ID	7	ConRes(-6E-12 to -3E-12, step 2.3E-14)	1/C <sup>3</sup>
Case7	%RTDCoef_A	<i>CVD Coefficient A</i>	ID	32	Single	1/C
	%RTDCoef_B	<i>CVD Coefficient B</i>	ID	32	Single	1/C <sup>2</sup>
	%RTDCoef_C	<i>CVD Coefficient C</i>	ID	32	Single	1/C <sup>3</sup>
–	%RespTime	<i>Sensor Response Time</i>	ID	6	ConRelRes (1E-6 to 7.9, ±15%)	s
<i>Excitation or power supply sekcija</i>						
	%ExciteAmplNom	<i>Excitation current, nom.</i>	CAL	8	ConRelRes (1E-6 to 120E-3, ±2.3%)	A
	%ExciteAmplMax	<i>Excitation current, max.</i>	ID	8	ConRelRes (1E-6 to 120E-3, ±2.3%)	A
<i>Calibration information sekcija</i>						
	%CalDate	<i>Calibration date</i>	CAL	16	Date	–
	%CalInitials	<i>Calibration initials</i>	CAL	15	String of 5-bit chr. (Chr5)	–
	%CalPeriod	<i>Calibration period</i>	CAL	12	UnInt	days
<i>Misc. sekcija</i>						
	%MeasID	<i>Measurement location ID</i>	USR	11	UnInt	–
				Ukupan broj bita potreban za TEDS:	135 to 251 bit	

**Tabela 2.** Standardni IEEE 1451.4 šablon za kalibracionu tabelu – *Template ID = 40*

Karakteristika (TDL komanda)	Naziv karakteristike	Pri-stup	Biti	Tip i opseg podataka	Jedinica
TEMPLATE	<i>Template ID</i>		8	Integer (value = 37)	–
<i>Table data sekcija</i>					
%CalTable_Domain	<i>Domain parameter</i>	CAL	1	Enumeration: Electrical   Physical	–
STRUCTARRAY CalTable	<i>Number of data sets</i>	CAL	7	Dimension size of 1 to 127	–
%ElecSigType	<i>Domain Calibration Point (% of full span)</i>	CAL	16	ConRes (0 to 100, step 0.0015)	%
	<i>Range Calibration Deviation (% of full span)</i>	CAL	21	ConRes (-100 to 100, step 0.0001)	%
			Ukupan broj bita potreban za TEDS:	16 to 4715 bit	

## **Biografija**

Nenad Jevtić rođen je 18.12.1975. godine u Jagodini. Završio je Gimnaziju u Jagodini 1994. godine. Iste godine upisao se na Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Odsek za elektroniku, telekomunikacije i automatiku po petogodišnjem programu. Diplomirao je u aprilu 2002. godine sa prosečnom ocenom 8,88. Te godine upisao se na poslediplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu a 18.06.2010. godine odbranio je magistarsku tezu pod naslovom „Primena USB magistrale u sistemima merenja i nadzora“.

Odmah po diplomiranju, 2002. godine, zaposlio se u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“, u Laboratoriji za elektroniku. U Institutu „Vinča“ radio je kao istraživač-pripravnik u istraživačkom timu koji se bavio razvojem mernih metoda i savremenih sistema za merenje različitih fizičkih veličina, uključujući i radioaktivno zračenje. Oktobra 2003. godine zaposlio se kao asistent-pripravnik na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, Odsek za poštanski i telekomunikacioni saobraćaj, Katedra za telekomunikacioni saobraćaj i mreže. U sadašnje zvanje asistenta izabran je 2010. godine. Angažovan je u nastavi u užoj naučnoj oblasti Informacione i komunikacione tehnologije i drži računске i laboratorijske vežbe iz predmeta Elektrotehnika, Osnovi elektronike, Statistička teorija telekomunikacija, Telekomunikaciona elektronika i Telekomunikaciona merenja, na osnovnim studijama i Teorija informacija i kodovanje na master studijama.

Učestvovao je u većem broju naučno-istraživačkih projekata koje je finansiralo Ministarstvo nauke i tehnološkog razvoja. Iz oblasti kojima se bavi kao prvi autor ili koautor do sada je objavio pet radova u međunarodnim časopisima koji se nalaze na SCI listi, dva rada u domaćim časopisima, pet radova na međunarodnim konferencijama i trinaest radova na domaćim konferencijama. Koautor je Zbirke zadataka iz elektronike, štampane na Saobraćajnom fakultetu 2008. godine.

---

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а \_\_\_\_\_ Ненад Јевтић \_\_\_\_\_

број индекса \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Аутоматска конфигурација дистрибуираних мерних система коришћењем  
електронских спецификација сензора

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 20.2.2015.

Ненад Јевтић



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Ненад Јевтић

Број индекса \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

Студијски програм Електроника

Наслов рада Аутоматска конфигурација дистрибуираних мерних система коришћењем електронских спецификација сензора

Ментор проф. др Вујо Дрндаревић

Потписани/а Ненад Јевтић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 20. 2. 2015.

Ненад Јевтић

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Аутоматска конфигурација дистрибуираних мерних система коришћењем електронских спецификација сензора

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 20.2.2015.

Nevac Terzić