

**Gordana Gardašević, Mitar Simić**

**PROJEKTOVANJE INDUSTRIJSKIH IoT MREŽA**

Recenzenti:

**Prof. dr Igor Radusinović, redovni profesor**

Elektrotehnički fakultet Univerziteta Crne Gore u Podgorici

**Prof. dr Dejan Vukobratović, redovni profesor**

Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

Lektor

**Bojana Sarić**

Izdavač

**Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci**

Štampa

**R Biro d.o.o Banja Luka**

Tiraž: 100 primjeraka

**ISBN: 978-99955-46-40-3**

Gordana Gardašević

Mitar Simić

# Projektovanje industrijskih IoT mreža

**M O N O G R A F I J A**

Banja Luka

**2020.**

# Sadržaj

PREDGOVOR .....	1
1 Uvod u industrijske IoT mreže .....	5
Reference: .....	12
2 IIoT standardizacija .....	15
2.1. Karakteristike saobraćaja u IIoT mrežama .....	17
2.2. IIoT arhitektura .....	22
2.3. IEEE standardi za IIoT primjene .....	26
2.3.1. Standard IEEE 802.15.4g .....	26
2.3.2. Standard IEEE 802.15.4k .....	27
2.3.3. Standard IEEE 802.15.4m .....	29
2.3.4. Time Sensitive Networking (TSN) umrežavanje .....	31
2.4. 5G sistemi .....	33
Reference: .....	35
3 Komunikacione tehnologije u IIoT mrežama .....	38
3.1. LP-WAN tehnologije .....	42
3.1.1. LoRaWAN tehnologija .....	42
3.1.2. Sigfox tehnologija .....	46
3.1.3. NB-IoT tehnologija .....	46
3.1.4. LTE-M tehnologija .....	48
3.2. Topologije mreža u IIoT primjenama .....	49
3.2.1. ZigBee .....	49
3.2.2. WirelessHART .....	50
3.2.3. Z-Wave .....	51
3.2.4. ISA 100.11a .....	52
Reference: .....	54
4 Komunikacione tehnologije zasnovane na standardu IEEE 802.15.4 .....	56
4.1. Standard IEEE 802.15.4e .....	59
4.1.1. Pregled karakteristika TSCH protokola .....	60
4.1.2. Raspoređivanje u TSCH .....	64
Reference: .....	69
5 6TiSCH - referentni protokol-stek za IIoT primjene .....	72
5.1. 6top podsloj .....	73
5.2. Rutiranje u 6TiSCH mrežama .....	76
5.3. Pravci razvoja 6TiSCH umrežavanja .....	80
Reference: .....	82
6 Eksperimentalno testiranje 6TiSCH performansi u IIoT primjenama .....	85
6.1. OpenMote hardverska platforma .....	85
6.2. OpenWSN operativni sistem .....	87
6.3. Protokoli aplikacionog sloja .....	89
6.3.1. CoAP protokol .....	90
6.3.2. MQTT protokol .....	91
6.4. Eksperimentalno testiranje centralizovanog algoritma rutiranja .....	94
6.4.1. JSRA algoritam .....	94
6.4.2. Eksperimentalna postavka .....	96

6.5. Eksperimentalno testiranje Source Routing Minimum Cost Forwarding (SRMCF) protokola.....	100
6.5.1. Eksperimentalna postavka.....	101
6.6. Eksperimentalno testiranje koegzistencije 6TiSCH i RPL protokola.....	103
6.7. Heterogena arhitektura za IoT <i>healthcare</i> aplikacije .....	107
6.8. Daljinsko testiranje Contiki-NG operativnog sistema u WSN .....	110
Reference: .....	117
<b>7 Senzori u mjernom sistemu.....</b>	<b>120</b>
7.1. Senzori .....	120
7.2. Podjela senzora.....	121
7.3. Karakterizacija senzora .....	121
7.4. Statička karakteristika senzora .....	122
Reference: .....	125
<b>8 Interfejs senzora sa elektronskim sistemima .....</b>	<b>126</b>
8.1. Kondicioniranje signala.....	126
8.2. Pojačavači .....	126
8.2.1. Diferencijalni pojačavač.....	128
8.2.2. Instrumentacioni pojačavač.....	129
8.2.3. Jedinični pojačavač .....	129
8.3. Filtri.....	130
8.3.1. Pasivni analogni niskopropusni filter .....	132
8.3.2. Pasivni analogni visokopropusni filter .....	132
8.3.3. Aktivni analogni niskopropusni filter.....	133
8.3.4. Aktivni analogni visokopropusni filter.....	134
8.3.5. Softverski filtri .....	134
8.4. Analogno-digitalna konverzija.....	136
8.4.1. Rezolucija AD konverzije .....	136
8.4.2. Brzina odmjeravanja .....	137
8.4.3. Fleš AD konvertori.....	137
8.4.4. Integrirajući AD konvertori.....	138
8.4.5. AD konvertori sa sukcesivnom aproksimacijom.....	138
8.4.6. Sigma-delta AD konvertori .....	139
Reference: .....	140
<b>9 Savremeni elektronski sistemi.....</b>	<b>141</b>
9.1. Arduino .....	142
9.1.1. Osnovne Arduino pločice.....	142
9.1.2. Dodatne Arduino pločice .....	144
9.1.3. Arduino integrisano razvojno okruženje za pisanje programa .....	148
9.2. Raspberry Pi .....	150
9.2.1. Osnovni Raspberry Pi modeli .....	150
9.2.2. Dodatni moduli za Raspberry Pi .....	152
9.2.3. Raspberry Pi operativni sistemi.....	153
Reference: .....	154
<b>10 Komunikacioni protokoli .....</b>	<b>155</b>
10.1. Paralelni interfejs .....	156
10.2. UART .....	157
10.3. I <sup>2</sup> C .....	160
10.4. SPI.....	164

10.5. 1-wire .....	167
Reference: .....	170
11 Senzori sa izlaznim električnim veličinama .....	171
11.1. Senzori sa naponskim izlazom .....	171
11.1.1. Termopar .....	171
11.1.2. Holov senzor .....	172
11.2. Senzori sa promjenljivom impedansom .....	174
11.2.1. Senzori sa promjenljivom rezistansom (otpornički senzori) .....	174
11.2.2. Senzori sa promjenljivom reaktansom: kapacitivni senzori .....	177
11.2.3. Senzori sa promjenljivom reaktansom: induktivni senzori .....	182
11.2.4. Senzori sa promjenljivom rezistansom i reaktansom .....	183
Reference: .....	196
12 Pametni senzori: standard IEEE 1451 .....	198
12.1. Uvod.....	198
12.2. IEEE 1451.4 .....	199
12.3. Pametni senzor za mjerjenje temperature .....	202
Reference: .....	204
13 Modelovanje senzora .....	205
13.1. Uvod.....	205
13.2. Elektrohemisjska impedansna spektroskopija .....	206
13.3. Osnovni elementi modela.....	206
13.4. Grafičko prikazivanje impedanse .....	207
13.5. Izbor modela i procjena kvaliteta modela .....	208
13.6. RC modeli .....	211
13.7. Empirijski modeli.....	212
Reference: .....	214
LISTA SKRAĆENICA .....	215

## PREDGOVOR

Projektovanje industrijskih Internet of Things (IIoT) mreža podrazumijeva niz aktivnosti, počevši od analize propagacionih uslova, karakterizacije okruženja i frekvencijskog opsega, do izbora adekvatnih hardverskih i softverskih platformi za njihovu realizaciju. Razvoj IIoT je zasnovan na primjeni naprednih IT rješenja, komunikacionih tehnologija, simbiozi sa operacionim i komunikacionim entitetima, sa ciljem poboljšanja procesa automatizacije i digitalizacije sistema. Intenzivno se radi na donošenju IIoT standarda i specifikacija kao osnovnih preduslova za transformaciju tradicionalnih sistema u novu generaciju poznatu pod nazivom *Industrija 4.0*.

Istraživačke aktivnosti u posljednjih desetak godina su usmjerenе na projektovanje energetski-efikasnih i pouzdanih industrijskih bežičnih senzorskih mreža (eng. Wireless Sensor Networks - WSN). Ove mreže omogućavaju realizaciju velikog broja aplikacija, od automatizacije i kontrole industrijskih procesa, do velikih smart grid sistema u elektro-energetskim postrojenjima i inteligentnih transportnih mreža. Njihova primjena obezbjeđuje brojne prednosti, prvenstveno u pogledu male cijene realizacije, fleksibilnosti i skalabilnosti implementacije, kao i jednostavnog uvođenja mreže u operativni rad. Razvoj senzorskih tehnologija je jedan od ključnih elemenata za masovnu proizvodnju senzorskih uređaja male cijene realizacije i jednostavne implementacije, koji se mogu efikasno koristiti u različitim okruženjima.

Dramatičan porast broja IoT uređaja zahtijeva primjenu novih oblika energije koja se generiše iz neposrednog okruženja. Aktuelna istraživanja predviđaju da će broj pametnih uređaja na svjetskom nivou dostići cifru od 70 milijardi do 2025. godine. Nova generacija industrijskih aplikacija se temelji na primjeni naprednih tehnologija, kao što su cloud/edge/fog računarstvo, big data analitika, algoritmi vještačke inteligencije i mašinskog učenja, sajber-fizički sistemi i dr. Očekuje se da će njihova upotreba smanjiti operacione troškove i povećati efikasnost rada.

Monografija je nastala kao rezultat višegodišnjeg rada autora u oblasti analize, projektovanja i optimizacije algoritama, protokola i uređaja u IIoT mrežama. Istraživanja su realizovana u okviru brojnih međunarodnih i nacionalnih projekata. Posebno je značajno istraživanje ostvareno u jednom

od najvećih evropskih projekata iz oblasti informaciono-komunikacionih tehnologija - COST CA15104 IRACON (Inclusive Radio Communications for 5G and Beyond) u periodu od 2016. do 2020. godine. Važno je naglasiti da su projekti podrazumijevali eksperimentalna mjerenja u realnim okruženjima, sa ciljem da se dobiju relevantni rezultati koji će omogućiti poboljšanja postojećih i razvoj novih rješenja u ovoj dinamičnoj oblasti.

Monografija *Projektovanje industrijskih IoT mreža* je organizovana u trinaest poglavlja.

Prvo poglavlje pod nazivom "Uvod u industrijske IoT mreže" sadrži definicije, osnovne koncepte i pojmove neophodne za razumijevanje principa rada i projektovanja IIoT mreža i uređaja. Navedene su osnovne standardizacione aktivnosti u ovoj oblasti, kao i pravci razvoja i istraživanja u IIoT.

U okviru drugog poglavlja "Standardizacija u IIoT mrežama" je dat detaljan pregled aktuelnih IIoT standarda i arhitektura, kao i karakteristika saobraćajnih tokova u ovim primjenama.

Treće poglavlje pod nazivom "Komunikacione tehnologije u IIoT mrežama" obrađuje značajnu grupu tehnologija za realizaciju WSN u IIoT primjenama. Posebna pažnja je posvećena aktuelnim tehnologijama prenosa na duga rastojanja, kao što su LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M i 5G. Predstavljene su i osnovne topologije mreža u IIoT primjenama.

U četvrtom poglavlju pod nazivom "Komunikacione tehnologije zasnovane na standardu IEEE 802.15.4" je analiziran standard IEEE 802.15.4 i karakteristike prenosa na fizičkom i MAC (eng. Medium Access Control) sloju. Posebna pažnja je posvećena analizi IEEE 802.15.4e-TSCH (eng. Time-Slotted Channel Hopping) protokola koji je prilagođen karakteristikama prenosa u industrijskim IoT mrežama.

Peto poglavlje pod nazivom "6TiSCH - referentni protokol-stek za IIoT primjene" obrađuje standardizovani 6TiSCH protokol-stek, kao i mehanizme prenosa po slojevima protokol-steka. Analizirani su načini rutiranja u ovim sistemima, kao i pravci daljeg razvoja 6TiSCH umrežavanja.

U šestom poglavlju pod nazivom "Eksperimentalno testiranje 6TiSCH performansi u IIoT primjenama" je dat pregled hardverskih i softverskih platformi koje su korišćene u konkretnim eksperimentalnim istraživanjima. Predstavljeni su rezultati primjene eksperimentalnih testiranja protokola rutiranja, koegzistencije i interoperabilnosti različitih protokola i operativnih sistema, kao i mogućnosti primjene 6TiSCH u IoT healthcare aplikacijama.

U sedmom poglavlju pod nazivom "Senzori u mjernom sistemu" su opisani osnovni gradivni elementi mjernih sistema sa senzorima. Predstavljeni su načini podjele senzora, kao i odgovarajući postupak karakterizacije u cilju određivanja njihove staticke karakteristike.

U osmom poglavlju pod nazivom "Interfejs senzora sa elektronskim sistemima" predstavljene su osnovne faze u postupku prevođenja odziva senzora u digitalizovan oblik pogodan za prenos i dalju obradu. Analizirane su najvažnije klase pojačavača poput jediničnog, diferencijalnog i instrumentacionog, te pasivne i aktivne realizacije niskopropusnih i visokopropusnih filtera. Predstavljene su i karakteristike najčešće korišćenih vrsta AD konvertora (fleš, integrirajući, sigma-delta i sa sukcesivnom aproksimacijom) sa posebnim naglaskom na uočavanju aplikacija u kojima pojedini tipovi AD konvertora pružaju najbolje performanse.

Deveto poglavlje pod nazivom "Savremeni elektronski sistemi" daje pregled karakteristika često korišćenih elektronskih sistema u interfejsu sa senzorima (Arduino i Raspberry Pi), kao i dodatnih modula kojim se omogućavaju dopunski servisi.

U povezivanju savremenih elektronskih sistema često se javlja dilema pri izboru komunikacionog protokola (npr. UART, I<sup>2</sup>C, SPI, 1-wire), pa je u desetom poglavlju pod naslovom "Komunikacioni protokoli" posebna pažnja posvećena predstavljanju osnovnih karakteristika, kao i praktičnih ograničenja koje pojedini protokoli imaju.

Senzori sa izlaznim električnim veličinama imaju primjenu u brojnim aplikacijama, te je prepoznata potreba za predstavljanjem načina njihove integracije sa elektronskim sistemima. U složenijim aplikacijama je neophodno izvršiti pravilno kondicioniranje izlaznog signala senzora kako bi se doatile što bolje karakteristike, pa je ovom postupku posvećena posebna pažnja u jedanaestom poglavlju koje nosi naziv "Senzori sa izlaznim električnim veličinama".

"Pametni senzori: standard IEEE 1451" je naslov dvanaestog poglavlja u kojem su opisani osnovni elementi projektovanja pametnih senzora u skladu sa IEEE 1451 standardom. Predstavljeni su osnovni elementi standarda, kao i dvije klase pametnih pretvarača signala. Teorijska razmatranja su dopunjena konkretnim opisom načina realizacije pametnog senzora za mjerjenje temperature.

U trinaestom poglavlju pod nazivom "Modelovanje senzora" su prikazani osnovni elementi na kojima je zasnovano modelovanje senzora, počevši od interpretacije izmjerениh vrijednosti, preko često korišćenih RC i empirijskih

modela, pa do softverskih paketa koji omogućavaju relativno jednostavno modelovanje.

Monografija *Projektovanje industrijskih IoT mreža* predstavlja korisnu literaturu za istraživače i inženjere koji rade u oblasti projektovanja komunikacionih mreža, uređaja i aplikacija, kao i za sve one koji žele produbiti teorijska i praktična znanja u ovoj značajnoj i aktuelnoj inženjerskoj oblasti. Monografija je namijenjena i studentima koji slušaju kurseve iz oblasti telekomunikacionih mreža, bežičnih senzorskih mreža, IoT tehnologija i aplikacija, kao i kurseve iz opšte elektrotehnike poput električnih mjerjenja, obrade signala i elektronskih sistema za digitalnu obradu signala.

Autori se posebno zahvaljuju recenzentima, prof. dr Igoru Radusinoviću i prof. dr Dejanu Vukobratoviću, na uloženom trudu prilikom čitanja materijala, te na korisnim sugestijama i primjedbama. Takođe, autori se unaprijed zahvaljuju svima koji će svojim prijedlozima i sugestijama omogućiti da ovaj materijal pronade put do šire čitalačke publike.

Banja Luka, april 2020. godine

*Autori*