

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za elektrotehniko

Primož Rebernik

TELEMETRIJSKE NAPRAVE S
TEHNOLOGIJO ZIGBEE

DIPLOMSKA NALOGA UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec

Ljubljana, 2010

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu za pomoč, nasvete in pregledovanje diplomske naloge.

Iskrena hvala sodelavcem iz podjetja Solvera Lynx, ki so me spodbujali in mi pomagali pri izvedbi projekta in diplomske naloge.

Še posebej se zahvaljujem očetu, mami, domačim in prijateljem za podporo med študijem in po njem. Hvala, ker ste verjeli vame in me spodbujali.

Povzetek

V diplomskem delu je predstavljeno načrtovanje, izdelava in programiranje brezžičnih senzorskih ZigBee naprav. Predstavljen je brezžični standard ZigBee za brezžična osebna omrežja (WPAN), ki ga je definirala skupina IEEE 802.15. Opisan je standard IEEE 802.15.4, ki je osnova tehnologije ZigBee. Predstavljena je tudi razvojna platforma Jennic, ki smo jo uporabili pri razvoju brezžičnih senzorskih naprav. Predstavljeni so problemi, na katere smo naleteli pri samem razvoju brezžičnih senzorskih naprav in njihove rešitve.

Končni izdelek diplomskega dela so tri brezžične senzorske ZigBee naprave: koordinator, usmerjevalnik in končna naprava. Prikazana je vključitev v sistem in njihova praktična uporaba v industriji.

Ključne besede: brezžične senzorske naprave, ZigBee, koordinator, usmerjevalnik, končna naprava, Jennic, IEEE 802.15.4

Abstract

This thesis introduces the planning, development and programming of the ZigBee wireless sensor devices, and gives a description of the ZigBee wireless standard for Wireless Personal Area Networks (WPAN), defined by the IEEE 802.15 working group. The core of the ZigBee technology – the IEEE 802.15.4 standard is also presented in my thesis, as well as the Jennic development platform that we used for the development of wireless sensor devices. The thesis includes problems encountered during the development of the wireless sensor devices and their solutions.

The final result of this thesis are three ZigBee wireless sensor devices: coordinator, router and end device. The thesis also describes their incorporation into the system and practical usage in the industry.

Key words: wireless sensor devices, ZigBee, coordinator, router, end device, Jennic, IEEE 802.15.4

Kazalo

1	Uvod	1
2	Zakaj samostojni razvoj	2
2.1	Izbira razvojne platforme	5
3	Razvojna platforma Jennic	10
3.1	Mikrokrmilniški sistem JN5148	11
4	Brezžična komunikacija ZigBee	16
4.1	Predstavitev skupine standardov IEEE 801.15	16
4.2	WPAN standard IEEE 802.15.4	17
4.2.1	Fizična plast.....	20
4.2.1.1	Detekcija energije kanala	22
4.2.1.2	Kakovost povezave	22
4.2.1.3	Ocena nezasedenosti kanala.....	23
4.2.1.4	Format paketa fizičnega sloja	23
4.2.2	Podplast za kontrolo dostopa do medija.....	23
4.2.2.1	Struktura protokola podatkovne enote MAC okvirja.....	24
4.2.2.2	Mehanizmi dostopa do kanala z izogibanjem trkom	25
4.2.2.3	Struktura super okvirja.....	25
4.2.2.3.1	Komunikacija od koordinatorja k napravi s svetilniškim okvirjem	27
4.2.2.3.2	Komunikacija od naprave h koordinatorju s pomočjo svetilniškega okvirja	27
4.2.2.3.3	Komunikacija med dvema enakovrednima napravama s pomočjo svetilniškega okvirja	28
4.2.2.3.4	Komunikacija v nesvetilniškem načinu	29
4.3	Brezžična senzorska omrežja ZigBee	30
4.3.1	Naprave v omrežju ZigBee	31

4.3.2	Omrežna plast.....	32
4.3.3	Aplikacijska plast	33
4.3.4	Omrežne topologije v omrežju ZigBee	34
5	Izdelava tiskanine	37
5.1	Napajalni del	37
5.2	Napetostni digitalni vhodi.....	38
5.3	Kontaktni digitalni vhodi	38
5.4	Digitalni izhodi	39
5.5	1-Wire	39
5.6	Analogni tokovni vhod	40
5.7	Analogni napetostni vhod	41
5.8	Zunanji pomnilnik	41
5.9	Serijska povezava	42
5.10	Sheme celotne tiskanine	43
6	Programska implementacija	45
6.1	Programsko okolje	45
6.2	Protokol prenosa sporočil po omrežju	49
6.2.1	Logirani telemetrijski podatki naprav	49
6.2.2	Nastavitve naprav	50
6.2.3	Komande za naprave	50
6.2.4	Sinhronizacija naprav	51
6.3	Koordinator	52
6.3.1	Protokol med koordinatorjem in GsmBox2	53
6.3.1.1	Pošiljanje sprejetih podatkov	54
6.3.1.2	Sprejemanje nastavitev za naprave	55
6.3.1.3	Sprejemanje komand za naprave.....	56
6.3.1.4	Sprejemanje sinhronizacije	56
6.4	Usmerjevalnik.....	57
6.5	Končna naprava	57
6.6	Programska implementacija procesnih modulov	58
6.6.1	Inicializacija naprave in priklop na omrežje	58
6.6.2	Digitalni vhodi.....	59
6.6.3	Digitalni izhodi.....	60

6.6.4	Analogni vhodi	60
6.6.5	Temperaturni senzor.....	60
6.6.6	Ura realnega časa	61
6.6.7	Pošiljanje in potrjevanje podatkov	62
7	Vključitev v sistem Solvere Lynx	63
8	Primeri rabe naprav	67
9	Zaključek	69
10	Literatura	70
10.1	Literatura.....	70
10.2	Spletni viri (dostopnost november 2010)	70

Kazalo slik

Slika 1 – Brezžični modul proizvajalca Coronis z dvema digitalnima vhodoma	3
Slika 2 – Brezžični modul proizvajalca ICP DAS s 6 digitalnimi vhodi in 4 digitalnimi izhodi ...	4
Slika 3 – Brezžični modul proizvajalca ICP DAS z 2 serijskima priključkoma.....	4
Slika 4 – PICDEM™ Z 2,4 GHz Development Kit proizvajalca Microchip.....	7
Slika 5 – iDigi™ X4 Starter Kit ZB proizvajalca Digi	7
Slika 6 – Atmel® AVR® Z-Link™ ATAVRRZ200 Development kit proizvajalca Atmel.....	8
Slika 7 – MeshNetics ZigBit™ Development Kit proizvajalca MeshNetics	8
Slika 8 – JN5148 Evaluation Kit proizvajalca Jennic	9
Slika 9 – Razvojni paket Jennic	11
Slika 10 – Blokovna shema JN5148 mikrokrmilnika [17].....	12
Slika 11 – Blokovna shema mikrokrmilnika JN5148 s perifernimi enotami [18]	13
Slika 12 – Modul JN5148-001-M03	14
Slika 13 – Logotip skupine IEEE 801.15.....	16
Slika 14 – Prikaz možnost uporabe WPAN v domači rabi	18
Slika 15 – Razporeditev plasti v IEEE 802.15.4.....	19
Slika 16 – Grafični prikaz strukture plasti IEEE 802.15.4 in ZigBee	20
Slika 17 – Frekvenčni pasovi posameznih kanalov pri različnih frekvencah	22
Slika 18 – Struktura super okvirja [21]	26
Slika 19 – Pošiljanje od koordinatorja k napravi v svetilniškem načinu	27
Slika 20 – Pošiljanje od naprave h koordinatorju v svetilniškem načinu.....	28
Slika 21 – Pošiljanje od koordinatorja k napravi v nesvetilniškem načinu.....	29
Slika 22 – Pošiljanje od naprave h koordinatorju v ne nesvetilniškem načinu	29
Slika 23 – Logotip združenja ZigBee Alliance	30
Slika 24 – Grafični prikaz plasti, za katere je odgovoren IEEE 802.15.4 in za katere ZigBee Alliance	31
Slika 25 – ZigBee omrežne topologije	33
Slika 26 – Mrežna topologija točka do točka.....	35

Slika 27 – Omrežna topologija zvezda.....	35
Slika 28 – Omrežna topologija drevo.....	36
Slika 29 –Omrežna topologija mreža	36
Slika 30 – Napajalni del naprave.....	37
Slika 31 – Shema napetostnega digitalnega vhoda	38
Slika 32 – Shema kontaktnega digitalnega vhoda.....	39
Slika 33 – Shema digitalnega izhoda	39
Slika 34 – Shema 1-Wire priklopa	40
Slika 35 – Temperaturni senzor DS18B20-PAR in njegove priključitvene sponke	40
Slika 36 – Shema analognega tokovnega vhoda	41
Slika 37 – Shema analognega napetostnega vhoda.....	41
Slika 38 – Shema prikopa zunanjega EEPROM pomnilnika.....	42
Slika 39 – Shema UART priključka.....	42
Slika 40 – Električna shema naprave	43
Slika 41 – Shema tiskanine zgoraj	44
Slika 42 – Shema tiskanine spodaj	44
Slika 43 – Programsko okolje Eclipse IDE.....	46
Slika 44 –Vmesnik v Eclipse IDE za nastavljanje ZigBee nastavitev	47
Slika 45 – Vmesnik v Eclipse IDE za nastavljanje procesov ROTS	48
Slika 46 – Shema delovanja koordinatorja in procesov, ki se izvajajo	52
Slika 47 – Slika UART - RS-232 konvertorja CAB-SER-02 in priključitvena shema [28]	54
Slika 48 – Shema procesov, ki tečejo na napravi.....	58
Slika 49 – Shema teka časovnika, ki je implementiran kot ura realnega časa	61
Slika 50 – Primer uspešnega pošiljanje podatka iz sklada	62
Slika 51 – Primer neuspešnega pošiljanje podatka iz sklada	62
Slika 52 – GsmBox2	63
Slika 53 – Shema procesov v GsmBox2	64
Slika 54 – Prikaz komunikacije med brezžičnimi napravami, GsmBox2-om in Gemologic	64
Slika 55 – Splošni pregled podatkov v informacijskem sistemu [2].....	65
Slika 56 – Diagram ciljnega spremljanja rabe energije.....	66
Slika 57 – CuSum analiza za sprotno spremljanje energetske učinkovitosti tako z energijskim kot tudi s finančnim vrednotenjem	66
Slika 58 – Prikaz tlaka, zunanje temperature in notranje temperature za šotor	67
Slika 59 – Energetska izkaznica stavbe [1].....	68

Slika 60 – Shema novega sistema, pri katerem koordinator komunicira z GPRS modemom 69

Kazalo tabel

Tabela 1 – Električne karakteristike modulov JN5148-001- M00/03/04 [18]	15
Tabela 2 – Frekvenčni pasovi, hitrosti prenosa podatkov, modulacija in kanali	21
Tabela 3 – Dovoljena uporaba frekvenčnih pasov po svetu.....	22
Tabela 4 – Struktura PPDU paketa [24].....	23
Tabela 5 – Struktura osnovnega MPDU okvirja [24]	24
Tabela 6 – Namen uporabe FFD in RFD naprav v omrežju ZigBee.....	31
Tabela 7 – Struktura logiranih telemetrijskih podatkov	49
Tabela 8 – Velikost posameznih elementov za logirane telemetrijske podatke.....	49
Tabela 9 – Struktura nastavitvenih podatkov	50
Tabela 10 – Velikost posameznih elementov za nastavitve	50
Tabela 11 – Struktura komand	51
Tabela 12 – Velikost posameznih elementov za komande	51
Tabela 13 - Struktura sinhronizacije	51
Tabela 14 – Velikost sinhronizacijskega elementa	51
Tabela 15 – Struktura logiranih podatkov, ki se pošiljajo GsmBox2-u	54
Tabela 16 – Velikost posameznih elementov logiranih podatkov	55
Tabela 17 – Struktura nastavitvenih podatkov, ki jih prejema koordinator od GsmBox2-a.....	55
Tabela 18 – Velikost posameznih elementov nastavitvenih parametrov	55
Tabela 19 – Struktura komand, ki jih prejema koordinator od GsmBox2-a	56
Tabela 20 – Velikost posameznih elementov komand.....	56
Tabela 21 – Struktura sinhronizacijskega niza, ki ga prejema koordinator od GsmBox2-a.....	56
Tabela 22 – Velikost posameznih elementov sinhronizacijskega niza	57

Uporabljene kratice

AES	– napredni kodirni standard (ang. Advanced Encryption Standard)
AMR	– avtomatsko oddaljeno merjenje (ang. Automatic Meter Reading)
APL	– aplikacijska plast (ang. Applicaton Layer)
APS	– aplikacijska podplast (ang. Application Support Sublayer)
BI	– interval svetilniškega (beacon) okvirja (ang. Beacon Interval)
BO	– red svetilniškega (beacon) okvirja (ang. Beacon Order)
BPSK	– binarna fazna modulacija (ang. Binary Phase-Shift Keying)
CAP	– prvi časovni interval znotraj aktivne periode (super okvirne strukture) (ang. Contension Access Period)
CCA	– dostop do prostega kanala (ang. Clear Channel Assessment)
CFP	– drugi časovni interval znotraj aktivne periode (ang. Contention Free Period)
CRC	– ciklično preverjanje pravilnosti (prenosa podatkov) (ang. Cyclic Redundancy Check)
CSMA-CA	– dostop do kanala z izogibanjem trkov (ang. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
ED	– detekcija jakosti signala (ang. Receiver energy Detection)
EEPROM	– električno izbrisljiv programirljiv bralni pomnilnik (ang. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
FCS	– sekvenca preverjanja okvirja (ang. Frame Check Sequence)
FFD	– vrsta naprave, ki deluje z vsemi podprtimi funkcijami (ang. Full Function Device)
GTS	– zjamčena časovna reža (ang. Guaranteed Time Slots)
IEEE	– inštitut inženirjev elektrotehnike in elektronike (ang. Institute of Electrical and Electronics Engineers)
LQI	– indikator kakovosti povezave (ang. Link Quality Indication)
MAC	– krmiljenje dostopa do prenosnega medija (ang. Media Access Control)
MFR	– noga MAC podplasti (znotraj okvirja MPDU) (ang. MAC footer)
MHR	– glava MAC podplasti (znotraj okvirja MPDU) (ang. MAC header)

MPDU	– protokolna podatkovna enota MAC podplasti (ang. MAC Protocol Data Unit)
NWK	– omrežna plast (ang. network layer)
O-QPSK	– zamaknjena kvadratura fazna modulacija (ang. Offset Quadrature Phase Shift Keying)
PAN	– osebno omrežje (ang. Personal Area Network)
PHR	– glava fizične plasti (ang. Physical Layer Header)
PHY	– fizična plast (ang. Physical Layer)
PPDU	– protokolna podatkovna enota fizične plasti (ang. Protocol Data Unit)
PSDU	– storitvena podatkovna enota fizične plasti (ang. Physical Layer Service Data Unit)
QoS	– kakovost storitev (ang. Quality of Service)
RAM	– bralno-pisalnik pomnilnik (ang. Random-Access Memory)
RFD	– vrsta naprave, ki deluje z omejenim številom funkcij (ang. Reduced Function Device)
RSSI	– sprejeta moč signala (ang. Received Signal Strength Indicator)
SD	– čas trajanja super okvirne strukture (ang. Superframe Duration)
SHR	– sinhronizacijska glava (ang. Synchronization Header)
SO	– red super okvirja (ang. Superframe Order)
SPI	– serijski periferni vmesnik (ang. Serial Peripheral Interface)
TG	– opravilna skupina (ang. Task Group)
UART	– univerzalni asinhroni sprejemnik in oddajnik (ang. Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
WLAN	– brezžično lokalno omrežje (ang. Wireless Local Area Network)
WPAN	– brezžično osebno omrežje (ang. Wireless Personal Area Network)
ZDO	– del ZigBee standarda (definira vloge ZigBee naprav) (ang. ZigBee Device Objects)

1 Uvod

V zadnjem desetletju smo priče velikemu razmahu naprav, ki uporabljajo senzorsko tehnologijo za nadzor, spremljanje in krmiljenje industrijskega procesa. Ko v zahtevnih industrijskih okoljih nameščamo dodatne senzorske naprave, moramo dodatno izvesti polaganje povezovalnega ožičenja. Tukaj nastopi problem, saj je to mnogokrat zelo zahtevno in drago opravilo, če upoštevamo (predpostavljamo), da bi bilo potrebno namestiti veliko število senzorjev in ostalih krmilnih naprav, ki bi jih želeli centralno nadzirati in upravljati. Tu pride do izraza nova brezžična tehnologija in njene rešitve. Tako bodo brezžični senzorji in brezžična senzorska omrežja v prihodnje vse bolj izpodrivala ožičene senzorje in jih v celoti nadomestila ali vsaj dopolnjevala.

Za nadzor in opazovanje industrijskih procesov ne potrebujemo velikih prenosnih hitrosti, ampak zanemarljive zakasnitve pri prenosu podatkov, majhno porabo električne energije in zanesljivo delovanje. To spoznanje je vodilo k razvoju nove brezžične tehnologije osebnih omrežij ZigBee, ki je uporabna predvsem v aplikacijah hišne in industrijske avtomatizacije [6].

Zaradi enostavne montaže naprav in prednosti, ki jih ponuja brezžična tehnologija, smo se v podjetju odločili poiskati naprave, ki bi jih lahko uporabili v naših aplikacijah in rešitvah. Pri pregledu ponudnikov brezžičnih naprav smo ugotovili, da se naše zahteve razlikujejo od tega, kar ponuja sam trg. Tako smo se zaradi pomanjkanja naprav na trgu in specifične uporabe v industriji v podjetju Solvera Lynx d.d. [4] odločili za samostojni razvoj brezžičnih senzorskih naprav. Tako smo izkoristili možnost razvoja in začeli tržiti lastne brezžične senzorske ZigBee naprave. Nove naprave smo lahko vključili v že obstoječe aplikacije in rešitve, kot so GprsBox2 in GemaLogic [5].

2 Zakaj samostojni razvoj

Za spremljanje ter nadzorovanje industrijskih sistemov in procesov so se določile zahteve, kakšne vrste vhodnih podatkov bi lahko telemetrijske naprave zajemale in kakšne bi bile lahko izhodne veličine, namenjene krmiljenju procesov. Tako so se postavile zahteve, ki bi jih morale naprave izpolnjevati. Te bi morale biti dovolj prilagodljive glede strojne opreme in odprte glede programske implementacije za vključitev v že obstoječe sisteme. Glede na zahteve strank in bodočih uporabnikov so se določile strojne in programsko uporabniške zahteve.

Strojne zahteve:

- brezžična komunikacija,
- nizka poraba energije,
- neprekinjeno napajanje,
- baterijsko napajanje,
- možnost spanja naprave,
- možnost zbujanja ob prekinitvah,
- število digitalnih vhodov,
 - o digitalni vhodi kot števci,
 - o digitalni vhodi kot stanje,
 - o digitalni vhodi kot delovne ure,
- število digitalnih izhodov,
 - o možnost vklopa in izklopa na daljavo,
- število analognih vhodov,
 - o napetostni analogni vhod (0 V – 10 V),
 - o tokovni analogni vhod (0 mA – 20 mA),
- število serijskih priključkov,
 - o možnost transparentnega načina,
- možnost priključitve zunanjih senzorjev preko raznih vodil (1-Wire, SPI, UART, SMBus, I2C, RS-485, RS-232...),

- velikost,
- zanesljivost.

Uporabniške zahteve:

- preprosto nastavljanje naprave,
- preprosta vključitev v obstoječi način GsmBox2,
- preprosto odčitavanje ali odprt komunikacijski protokol,
- možnost nadgradnje in uporabe z drugimi napravami,
- varnost,
- cena.

Pri pregledu precejšnega števila proizvajalcev brezžičnih telemetrijskih in krmilnih naprav smo prišli do ugotovitve, da večina naprav le delno ustreza našim zahtevam. Pri uporabi obstoječih naprav bi morali uporabljati več različnih naprav različnih proizvajalcev. To ima za posledico večjo ceno sistema, dražje vzdrževanje in večjo kompleksnost samega sistema.

Razlog za samostojni razvoj brezžičnih naprav izhaja iz dejstva, da nam trg v danem trenutku ni ponujal primernih rešitev. Na trgu so sicer že obstajale brezžične senzorske naprave, vendar njihova uporabnost in funkcionalnost nista zadoščali našim potrebam. Integracija v naš sistem bi bila kompleksna in nepopolna.



Slika 1 – Brezžični modul proizvajalca Coronis z dvema digitalnima vhodoma

Na sliki 1, 2 in 3 so prikazane telemetrijske naprave proizvajalcev Coronis [7] in ICP DAS [8], ki pa so preveč specifično usmerjene in ponujajo le delne rešitve. Njihove sposobnosti so omejene in ponujajo le določeno vrsto odčitavanja vhodnih podatkov.



Slika 2 – Brežžični modul proizvajalca ICP DAS s 6 digitalnimi vhodi in 4 digitalnimi izhodi

Produkti na trgu so bili neprimerni za nas zato, ker so bili preveč enostransko usmerjeni. Na voljo so imeli le nekatere možnosti odčitavanja. Sicer so naprave posamezno podpirale raznovrstno beleženje in odčitavanje vhodnih podatkov, vendar so se njihove omejitve pojavljale pri raznolikosti vhodnih podatkov. Tako ni bilo možno z eno napravo spremljati digitalnih in analognih vhodnih podatkov kaj šele, da bi priključili zunanje senzorje ali krmilili digitalne izhode. Za naše aplikacije in rešitve smo potrebovali univerzalne naprave, ki bi jih bilo mogoče uporabiti na več različnih načinov, pri čemer bi bile karseda prilagodljive našim kupcem in našim potrebam.



Slika 3 – Brežžični modul proizvajalca ICP DAS z 2 serijskima priključkoma

2.1 Izbira razvojne platforme

Izbira razvojne platforme je zelo pomembna in jo je potrebno podrobno preučiti, saj je od nje odvisen ves nadaljnji razvoj. V našem interesu je bilo, da bi bil razvojni sistem enostaven in prilagodljiv, kar bi vodilo v hitrejši in cenejši razvoj. Pri izbiri razvojne platforme smo tako posvečali posebno pozornost mikrokrmilniškemu sistemu in radijskemu delu. Tako smo pripravili zahteve glede razvojne platforme in zahteve glede same naprave.

Razvojna platforma:

- mikrokrmilnik,
 - o takt delovanja mikrokrmilnik,
 - o pomnilnik,
 - o poraba energije,
 - o vhodni in izhodni signali,
- komunikacijski del,
 - o protokol prenosa,
 - o poraba energije,
- način programiranja,
 - o mikrokrmilnik,
 - o komunikacijskega dela,
- cena,
 - o mikrokrmilnik,
 - o komunikacijski del.

Tako smo glede na zgornji seznam pripravili zahteve, ki bi jih morale izpolnjevati nove naprave. Zahteve naprave so bile kompromis med uporabnostjo, ceno in ponudbo samih proizvajalcev razvojnih platform.

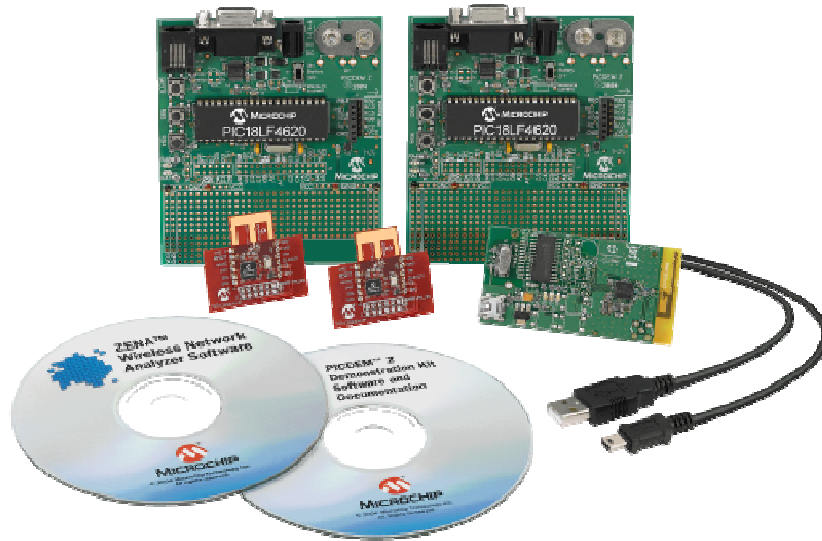
Zahteve naprave:

- brezžična komunikacija,
 - o možnost podaljšanja dosega naprav,
- možnost neprekinjenega napajanja,
- možnost baterijskega napajanja,

- možnost prehoda v spanje naprave,
- zbujanje naprave ob prekinitvah,
- 4 digitalni vhodi,
 - o 2 kontaktna vhoda,
 - o 2 napetostna vhoda,
- 2 digitalna izhoda,
- 1 analogni tokovni vhod (0 mA – 20 mA),
- 1 analogni napetostni vhod (0 V – 10 V),
- 2 serijska priključka,
- 1 1-Wire priklop.

Prav tako smo se pri razvojnih platformah osredotočili na povezavo mikrokrmilniškega in radijskega dela. Proizvajalci in ponudniki razvojnih platform so v večini primerov ponujali rešitve, ki so ločevale mikrokrmilniški in radijski del. Taka rešitev sicer ponuja neodvisnost obeh podsistemov in možnost uporabe radijskega dela naprave drugih proizvajalcev, vendar zahteva ločeno delo na obeh podsistemih.

Ker smo se nagibali k enostavnim rešitvam in preprosti implementaciji naprave, smo prišli do spoznanja, da bi bilo najbolje uporabiti kompletni razvojni sistem enega proizvajalca. Naša želja je bila tudi najti kompletno rešitev za integracijo mikrokrmilnika in radijskega dela na eni tiskanini ali v izvedbi vse v enem integriranem vezju (ang. single-chip solution). Tak pristop bi precej pripomogel k hitrosti in učinkovitosti razvoja naprave, prav tako pa bi bistveno vplival na ceno naprave.



V primeru razvojne platforme proizvajalca Digi [10] (slika 5) bi bila strategija razvoja drugačna. Ta ponuja samo radijski del naprave. Njihova strategija temelji na tem, da poleg radijskega dela naprav ponujajo še programsko opremo (ang. firmware) in imajo že vnaprej pripravljene programske pakete za posamezne vrste naprav. Prav tako ponujajo programsko opremo za nastavljanje radijskih modulov in konfiguracijo omrežja. Ta možnost omogoča, da bi se posvetili samo razvoju mikrokrmilniškega dela naprave.

Razvojni paket Atmela [11] (slika 6) je v celoti ustrezal našim zahtevam. Na tiskanini je integriran mikrokrmilniški in radijski del. Tiskanina že vsebuje antenski del.



Slika 6 – Atmel® AVR® Z-Link™ ATAVRRZ200 Development kit proizvajalca Atmel

MeshNetics [12] razvojna platforma, ki je prikazana na sliki 7, ponuja zmogljiv razvojni sistem. Komunikacija med mikrokrmilnikom in radijskim delom poteka preko serijskega vmesnika z AT komandami, s katerimi je mogoče nastavljanje in spremljanje delovanja radijskega dela naprave.



Slika 7 – MeshNetics ZigBit™ Development Kit proizvajalca MeshNetics

Razvojna platforma in mikrokrmilniški sistem proizvajalca Jennic [13], ki je prikazan na sliki 8, je v celoti zadovoljil naše potrebe po razvojnem in mikrokrmilniškem sistemu. Mikrokrmilniški sistem, ki ga je ponujal Jennic, je vseboval module, ki so vsebovali rešitev vse v enem integriranem vezju (single chip solution). Glavno prednost, ki jo je imel Jennic pred ostalimi proizvajalci razvojnih in mikrokrmilniških sistemov, je bila ravno ta rešitev. Mikrokrmilniški sistem in radijski del modula sta bila integrirana na enem tiskanem vezju in integriranemu vezju

ter zaprta v isti modul. Modul je imel pripravljeno podnožje za integracijo na tiskanino celotne telemetrijske naprave.

Jennic je ponujal tri različne module, ki so se razlikovali po svoji sprejemno/oddajni moči in načinu priključitve antene. Prav tako so ponujali dober razvojni programski paket za module in tehnično podporo s strani njihovih inženirjev. Na odločitev za njihov sistem je prav tako vplivala cena modulov.



Slika 8 – JN5148 Evaluation Kit proizvajalca Jennic

3 Razvojna platforma Jennic

Razvojna platforma Jennic JN5148-EK010 ZigBee Pro ponuja popolno okolje za razvoj brezžičnih ZigBee Pro naprav, ki temeljijo na mikrokrmilniškem sistemu JN5148. Razvojni paket vsebuje komplet strojne in programske opreme, vključno s petimi brezžičnimi senzorskimi enotami, z brezplačno razvojno programsko opremo (SDK, software developer kit) in s primeri programske kode.

SDK¹ vključuje povezovalna razvojna okolja, ki omogočajo hiter razvoj aplikacij in razhroščevanje, vključuje prevajalnik za C, assembler, GNU razhroščevalnik (Debugger GDB) in bliskovni (ang. flash) nalagalnik. Povezovalno razvojno okolje (ang. toolchain) temelji na industrijskem standardu orodja GNU², ki teče preko emulatorja Cygwin na operacijskem sistemu Windows. Programsko okolje Eclipse IDE vključuje vtičnike za povezovalno razvojno okolje (toolchain), RTOS (real-time operating system) in ZigBee sklad konfiguracijsko orodje, ki je vključeno v razvojno okolje. Prav tako nudi SVN (Sub Version Control), ki omogoča največjo prilagoditev in sodelovanje med skupinami razvijalcev.

SDK zagotavlja popolni nabor razvojnih ogrodiv, knjižnice, programske vmesnike (API, Application Programming Interfaces) za nadzor zunanjih naprav čipa JN5148, vsebuje orodja za konfiguriranje omrežja ter podatkovnih struktur komunikacijskih podatkov. Razvojno okolje podpira tudi strojno razhroščevanje preko JTAG (Joint Test Action Group) priključka.

ZigBee Jennic PRO razvojni paket vsebuje 5 baterijskih brezžičnih naprav, ki so prikazane na sliki 9. Vsaka naprava vsebuje temperaturni, vlažnosti in svetlobni senzor. Razširitveno priklonno mesto omogoča priključitev dodatnih senzorjev in vhodno-izhodnih perifernih naprav. Programiranje bliskovnega (ang. flash) pomnilnika in serijska komunikacija z brezžično napravo

¹ Komplet za razvoj programske opreme (SDK ali "devkit") je ponavadi skupek orodij za razvoj, ki omogoča ustvarjanje aplikacij za določeno programsko opremo, strojne platforme, računalniški sistem, video igralne konzole, operacijski sistem, ali podobno platforme.

² GNU Compiler Collection (angleško Prevajalniška zbirka GNU, po navadi skrajšano kot GCC) je množica programskih prevajalnikov, ki jo je izdelal projekt GNU. Zbirka je prosto programje, ki jo razširja Free Software Foundation (FSF) pod GNU GPL in GNU LGPL. GCC je pomemben del GNU toolchain. Je standardni prevajalnik za operacijske sisteme podobne Unixu in nekatere lastniške sisteme, izvedene od tam, kot je na primer Mac OS X.

je mogoča preko USB povezave. Ena brezžična naprava ima vgrajen matrični LCD prikazovalnik ločljivosti 128x64 slikovnih elementov, ki omogoča enostaven prikaz podatkov.

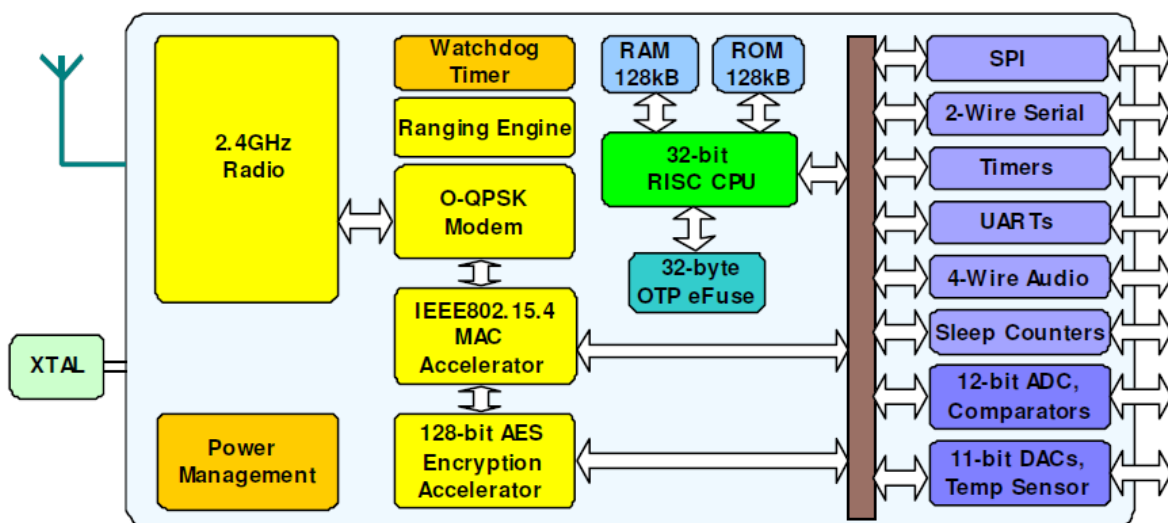
Prav tako je razvojni paket dobro podprt z dokumentacijo in najrazličnejšimi primeri že narejene kode.



Slika 9 – Razvojni paket Jennic

3.1 Mikrokrmilniški sistem JN5148

Mikrokrmilnik JN5148 je energetske varčen, visoko zmogljiv, brezžično usmerjeni mikrokrmilnik, namenjen povezovanju v ZigBee Pro omrežja in aplikacije. Odlikuje ga možnost izvajanja ZigBee sklada in uporabniške aplikacije na mikrokrmilniku. Jedro naprave je 32 bitni RISC procesor, ki omogoča visoko učinkovitost kodiranja in hitro izvajanje operacij. To mu omogoča večstopenjski ukazni cevovod in programsko nastavljen takt procesorja, kar tudi omogoča nizko porabo. Obratovalni tok naprave je pod 18 mA, kar omogoča baterijsko napajanje (coin cell).



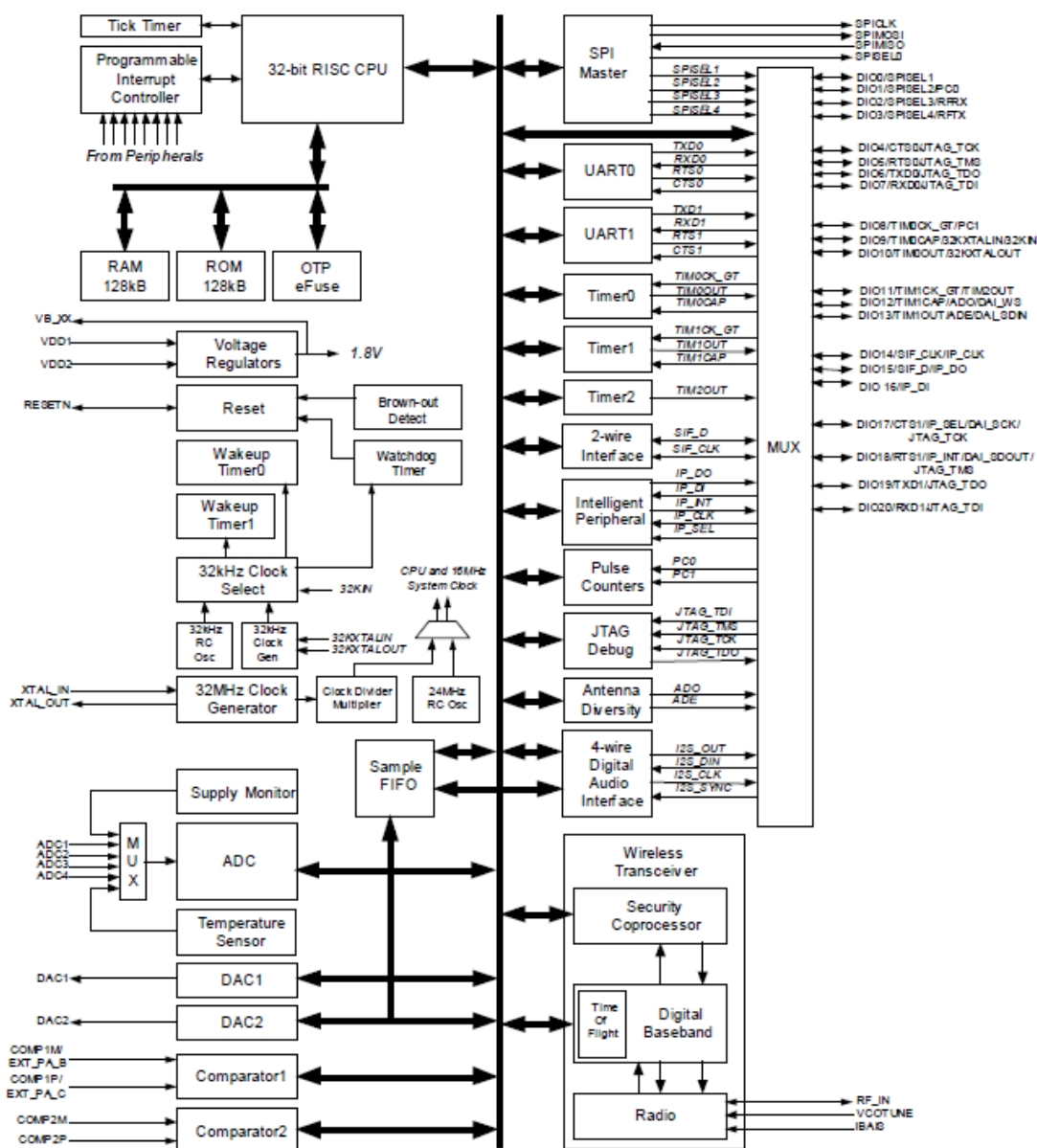
Slika 10 – Blokovna shema JN5148 mikrokrmilnika [17]

Mikrokrmilniški sistem vključuje 2,4 GHz IEEE 802.15.4³ standardni oddajnik, 128KB ROM, 128KB RAM-a, časovni čuvaj (watchdog), enoto za upravljanje z energijo in bogato mešanico analognih in digitalnih perifernih naprav. Velika količina spomina na napravi omogoča poganjanje tehnologije ZigBee PRO sklada (ang. stack) in vgrajene uporabniške programske aplikacije. Prav tako vsebuje energijsko varčne števec, ki tečejo tudi v spalnem načinu mikrokrmilnika. Te se uporablja za štetje pulzov v aplikacijah AMR (Automatic Meter Reading) in za določevanje lokacije v načinu čas leta (ang. Time of Flight), ki se uporablja v brezžičnih senzorskih mrežah.

Radijski del mikrokrmilnika vsebuje 2,4 GHz radio, modem, osnovno frekvenčni krmilnik (ang. baseband controller) in varnostni koprocesor. Radijski del omogoča krmiljenje sprejemne in oddajne moči, prav tako je možno krmiljenje močnostnih ojačevalnikov. Tako lahko v primeru preslabega sprejema ali oddaje moč programske povečamo. V spalnem načinu je poraba radijskega dela 100 nA, poraba med delovanjem pa je odvisna od sprejemanja ali oddajanja naprave. Pri oddaji je obremenitev 15 mA, pri sprejemu pa 17,5 mA. Občutljivost na sprejemu je -95 dBm, oddajna moč pa 2,5 dBm, vendar je to odvisno do vrste uporabljenega modula. Varnostni koprocesor zagotavlja 128-bitno strojno AES-CCM kodiranje, kot je določeno s

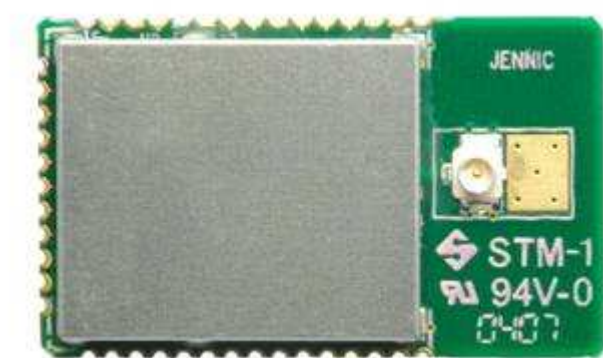
³ IEEE 802.15.4 je standard kateri podaja specifikacijo fizične plasti (PHY) in podplasti MAC (media access control) za brezžična osebna omrežja (WPAN). Vzdrževan je s strani IEEE organizacije (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

standardom IEEE 802.15.4 2006. JN5148 mikrokrmilnik je prav tako dobro podprt z vhodno-izhodnimi perifernimi enotami, kar je prikazano na sliki 11.



Slika 11 – Blokovna shema mikrokrmilnika JN5148 s perifernimi enotami [18]

Jennic je naredil izjemno potezo, ko je združil radijski, mikrokrmilniški in periferni del, iz česar je nastal uporaben in izredno zmogljiv mikrokrmilniški sistem. Na voljo so tri izvedbe modulov JN5148, ki se razlikujejo predvsem v radijskem delu in priključitvi antene. Na voljo imamo module JN5148-001-M00, JN5148-001-M03 in JN5148-001-M04. Posebnost modula JN5148-001-M00 je v tem, da ima že v sami tiskanini integrirano anteno. Modul JN5148-001-M03 omogoča priklop zunanje antene. Pri modulu JN5148-001-M04 pa sta še ojačevalnik moči in LNA (low-noise amplifier), ki omogočata doseganje daljših razdalj. Na sliki 12 je prikazan modul JN5148-001-M03.



Slika 12 – Modul JN5148-001-M03

Zaradi razlik v sestavi in izgradnji so različne tudi njihove specifikacije in električne lastnosti. Tako so v tabeli 1 predstavljene njihove specifikacije in razlike med moduli.

Karakteristike mikroprocesorja			Opombe
	JN5148-001-M00/03	JN5148-001- M04	
globoko spanje poraba	1,3 uA	1,3 uA	
spanje poraba	2,6 uA	2,6 uA	pri aktivnem spalnem časovniku (sleep timer)
poraba radia pri oddaji	15 mA	110 mA	CPU v mirovanju, radio oddaja
poraba radia pri sprejemu	17,5 mA	23 mA	CPU v mirovanju, radio sprejema
natančnost frekvence	+/-25 ppm	+/-25 ppm	dodatno + /-15ppm zaradi vpliva temperature in staranja
Karakteristike radijskega dela			Opombe
občutljivost na sprejemu	-95 dBm	-98 dBm	nominalno 1% PER
maksimalna oddajna moč	+2,5 dBm	18 dBm	
oddajna moč pri 3,6V		20 dBm	ko je Vdd=3,6V
maksimalni vhodni signal	+5 dBm	-5 dBm	1% PER, pri merjenju občutljivosti
RSSI območje	-95 dBm do -10 dBm	-105 dBm do -20 dBm	
RF impedanca priključka – uFl priključek	50 ohm	50 ohm	2,4 - 2,5 GHz
VSWR (max)	0,084027778	0,084027778	2,4 - 2,5 GHz
Periferne enote			Opombe
gospodar SPI priključek	5 izbir	3 izbir	250 kHz – 16 MHz
suženj SPI priključek	da	da	250 kHz – 8 MHz
dva UART-a	da	da	16550 združljivost
serijski vmesnik I/F (združljiv z SMBus in I ² C)	da	da	do 400kHz
dva programabilna časovnika/števcia z možnostjo delovanja kot primerjalnika, števca ali prožilnika	da	da	16MHz takt
dva programabilna spalna časovnika	da	da	32kHz takt
digitalni izhodi/vhodi (multipleksirani z UART, časovniki in SPI)	21	19	
štiri kanalni analogno-digitalni pretvornik	da	da	12-bit, do 100ks/s
dvokanalni digitalno-analogni pretvornik	da	da	12-bit, do 100ks/s
dva programabilna analogna primerjalnika	da	da	v spanju je poraba zanemarljiva
notranji senzor temperature in stanja baterije	da	da	

Tabela 1 – Električne karakteristike modulov JN5148-001- M00/03/04 [18]

4 Brežžična komunikacija ZigBee

4.1 Predstavitev skupine standardov IEEE 801.15

ZigBee tehnologija temelji na standardu 802.15.4 inštituta IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Pripravila ga je delovna skupina IEEE 802.15 [20], ki je bila ustanovljena leta 1999, logotip skupine prikazuje slika 13. Cilj skupine je bil razvoj standardov, priporočil in navodil za razvoj brezžičnih naprav, ki so namenjene brezžičnemu osebnemu omrežju WPAN (Wireless Personal Area Network) za kratke razdalje. Cilji so bili nizka cena naprav, majhna poraba energije, čim manjša velikost naprav, komunikacija z drugimi napravami, varnost prenesenih podatkov, preprosta uporaba, podpora različnim omrežnim topologijam, zanemarljiva zakasnitev pri prenosu podatkov, prenosne hitrosti in domet.



Slika 13 – Logotip skupine IEEE 801.15

Skupina je sestavljena iz sedmih podskupin, tako imenovanih delovnih skupin (TG, task group). Vsaka od skupin je osredotočena na svoj standard (od IEEE 802.15.1 do IEEE 802.15.4). Ti štirje standardi se med seboj razlikujejo predvsem po hitrosti prenašanja podatkov, porabi energije in kakovosti storitev QoS (Quality of Service).

Osnovni namen storitev QoS je, da pravilno razporeja različne prioritete za enega ali več podatkovnih tokov glede na stopnjo zahtevnosti aplikacije, ki jih omrežje izvaja. Kakovost storitev QoS je pri različnih podatkovnih tokovih zmožna nadzirati dovoljeno zakasnitev, čas tipanja (ang. jitter) in bitno napako.

WPAN omrežja z visoko hitrostjo prenosa uporabljajo standard IEEE 802.15.3. Koristna so v multimedijki aplikacijah, kjer je potreba po storitvi QoS velika. WPAN omrežja s srednje visoko podatkovno prenosno hitrostjo uporabljajo standard IEEE 802.15.1, medtem ko standard IEEE 802.15.4 uporabljajo WPAN omrežja z nizko hitrostjo prenosa podatkov. Standard IEEE 802.15.4 pogosto zasledimo v različnih industrijskih aplikacijah s področja avtomatizacije, kjer se zahteva zelo majhna poraba energije. Standard IEEE 802.15.2, ki je najmanj aktualen, je osredotočen na področje souporabe naprav iz WPAN omrežja z ostalimi napravami, na primer iz WLAN omrežja.

V delovno skupino sodita tudi delovni podskupini TG5 in TG6. Prva (znana kot TG5 WPAN Mesh Networking) podaja specifikacijo fizične plasti (PHY) in podplasti za kontrolo dostopa do medija (MAC) za vzpostavitev mesh WPAN omrežja, druga (znana tudi kot TG6 Body Area Networks) pa se ukvarja z razvojem komunikacijskega standarda, ki bo namenjen predvsem potrebam v medicini in zdravstvu.

4.2 WPAN standard IEEE 802.15.4

Standard IEEE 802.15.4 je bil razvit v delovni skupini TG4, ki je bila odgovorna za rešitve za naprave z nizkimi hitrostmi, nizko porabo, dolgo življenjsko dobo, z uporabo nelicenčnega radijskega pasu, za nezapletenost naprave in nizko ceno. Glavne značilnosti, ki so izšle iz te študije in so zapisane v standardu IEEE 802.15.4, so:

- hitrosti prenosa podatkov 250 kbps, 40 kbps in 20 kbps,
- dva načini naslavljanja, 16-bitno kratko in 64-bitno IEEE naslavljanje,
- kanalni dostop z izogibanjem trkom CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance),
- samodejna vzpostavitev omrežja s strani koordinatorja,
- sinhronizacija z rokovanjem (ang. handshake),
- upravljanje porabe energije za zagotovitev nizke porabe energije,
- 16 kanalov v pasu 2,4 GHz ISM, 10 kanalov v 915 MHz in en kanal v pasu 868 MHz.

Aplikacije, ki temeljijo na standardu IEEE 802.15.4, se uporabljajo tako v industriji kot v domači uporabi. Uporabljajo se na raznovrstnih področjih, iz katerih še posebej izstopajo naslednja.

Domača avtomatizacija in varnost: WPAN omogoča poceni rešitev za elektronsko upravljanje znotraj doma (slika 14), kot je ogrevanje, prezračevanje in klimatizacija, razsvetljava, zavese / rolete, vrata, ključavnice. Druga pomembna vloga v domu je varnost - protivlomni sistemi in sistemi za odkrivanje požara.



Slika 14 – Prikaz možnost uporabe WPAN v domači rabi

Zabavna elektronika: WPAN je lahko vgrajen v izdelke zabavne elektronike. Najbolj očiten primer je zagotoviti skupni daljinski upravljalnik za različne komponente sistema za domače razvedrilo, ki se lahko porazdelijo po celotnem domu. Drugi primeri so računalniški sistemi in igranje, pri katerih se lahko brezžična povezava uporabi za nadomestitev od točke do točke PPP (point-to-point) žične povezave (kot na primer med miško in računalnikom).

Zdravstveno varstvo: WPAN se v tem področju uporablja za senzorje in diagnostične naprave, ki vključujejo spremljanje zdravstvenega stanja in nadzor treninga ali rehabilitacijske vadbe.

Spremljanje delovanja vozil: Vozila ponavadi vsebujejo številne senzorje in diagnostične naprave in zagotavljajo idealne aplikacije za WPAN. Primer je uporaba senzorjev tlaka v pnevmatikah, ki jih ni mogoče povezati s kablji.

Kmetijstvo: WPAN lahko pomaga kmetom nadzorovati zemljišča in okoljske razmere, da bi dosegli najboljši pridelek. Taka omrežja lahko delujejo pri zelo nizkih hitrosti prenosa podatkov,

vendar zahtevajo široko geografsko pokritost - drugi vidik je obravnavan z uporabo topologije, ki omogoča posredovanje sporočil po omrežju.

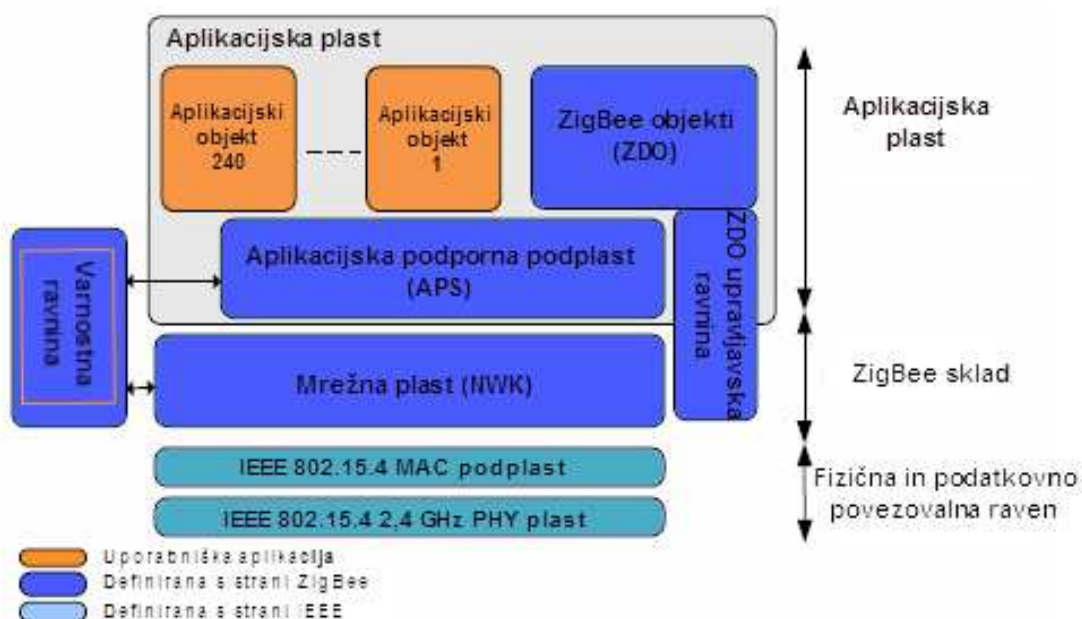
Industrija: WPAN se uporablja za nadzorovanje in krmiljenje industrijskih procesov. V sistem WPAN so vključene najrazličnejše senzorske in krmilne naprave. Velika prednost je v preprosti vgradnji naprav, saj ne potrebujejo ožičenja in posledično robustnost sistema, saj preprečimo mehanske poškodbe.

Vendar standard IEEE 802.15.4 definira in podaja le specifikacijo fizične (PHY) plasti in podplasti za kontrolo dostopa do medija (MAC, Media Access Control) (slika 15).



Slika 15 – Razporeditev plasti v IEEE 802.15.4

Standard IEEE 802.15.4 je tako podlaga za specifikacije ZigBee, WirelessHART in MiWi, ki se odvijajo na višjih nivojih standarda IEEE 802.15.4. Vsaka od naštetih specifikacij ponuja celotne omrežne rešitve z razvojem višjih nivojev, kot sta omrežna plast in aplikacijska plast. Lahko se uporablja tudi z 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks) in s standardnimi internetnimi protokoli za izgradnjo brezžičnega vgrajenega (ang. embedded) interneta.



Slika 16 – Grafični prikaz strukture plasti IEEE 802.15.4 in ZigBee

Na sliki 16 je prikazana struktura plasti standarda ZigBee, ki kaže, da sta fizična plast (PHY) in MAC podplast najnižji plasti standarda. Za višje plasti je zadolžena ZigBee Alliance, kar opisujemo v nadaljevanju.

4.2.1 Fizična plast

Fizična plast (PHY, physical layer) je najnižja plast standarda in ima direktni dostop do strojne radijske opreme in višje MAC podplasti. Predstavljamo si jo lahko kot vmesnik med MAC podplastjo in fizičnim radio kanalom. Naloge fizične plasti so tako aktivacija in deaktivacija oddajno-sprejemnega radijskega dela, detekcija energije (ED), detekcija kvalitete povezave (LQI), izbira kanala, zagotavljanje kanala po postopku CCA ter pošiljanje in sprejemanje paketov po fizičnem mediju. Če povzamemo, je fizična plast odgovorna za pošiljanje bitov med napravami po zraku. Pri pošiljanju fizična plast pretvori od MAC plasti sprejete bite, jih zakodira in modulira ter pretvori v električni signal, namenjen anteni. Pri sprejemanju se zgodi obraten proces, sprejem električnih signalov od antene, demoduliranje, dekodiranje in pretvorba v bite, ki so namenjeni MAC podplasti.

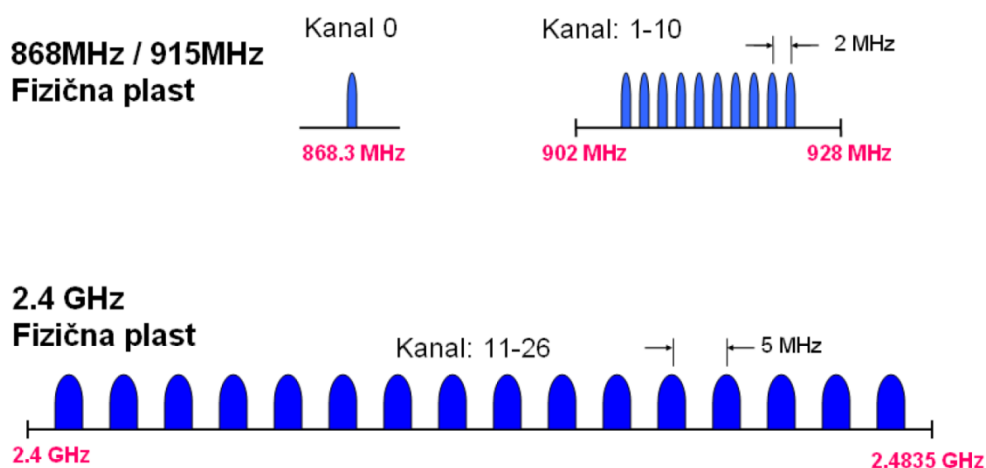
Standard ponuja dve fizične plasti, ki se med seboj razlikujeta po uporabljenem frekvenčnem pasu (868/915 MHz in 2,4 GHz). Oba temeljita na uporabi DSSS (direct-sequence spread

spectrum). Frekvenčni pas 868/915 MHz podpira podatkovne hitrosti 20kbps in 40kbps ter 2,4 GHz frekvenčni pas 250kbps. Višja hitrost prenosa podatkov pri frekvenčnem pasu 2,4 GHz je posledica modulacije višjega reda. Višja hitrost pripomore k boljši prepustnosti omrežja in nižjemu obratovalnemu ciklu (duty cycle). Vendar se v nižjem frekvenčnem področju da bolje zagotoviti daljše razdalje, večjo pokritost, večjo občutljivost in manjše izgube. Standard prav tako omogoča dinamično menjavo kanalov, pregledovanje omrežja za prostimi kanali in indikacijo kvalitete in moči kanala.

Osnovna frekvenca (MHz)	Frekvenčni pas (MHz)	Širjenje parametrov		Podatkovni parametri			Število kanalov
		Kodirna hitrost (kchip/s)	Modulacija	Bitna hitrost (kb/s)	Simbolna hitrost (ksymbols/s)	Simbol	
868	868 – 868.6	300	BPSK	20	20	binarni	0 (1 kanal)
915	902 – 928	600	BPSK	40	40	binarni	1-10 (10 kanalov)
2450	2400 – 2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16 ortogonalni	11-26 (16 kanalov)

Tabela 2 – Frekvenčni pasovi, hitrosti prenosa podatkov, modulacija in kanali

V tabeli 2 vidimo, da imamo pri frekvenci 868 MHz na voljo le en kanal, pri frekvenci 915 MHz imamo na voljo 10 kanalov, pri 2,4 GHz pa kar 16 kanalov. Frekvenčna razporeditev posameznih kanalov pri različnih frekvenčnih področjih je vidna na sliki 17. Občutljivost sprejemnika je -85 dBm za 2,4 GHz in -92 dBm za 868/915 MHz. Prednost občutljivosti pri 868/915 MHz za 6 dB – 8 dB prihaja na račun nižjih hitrosti kot pri 2,4 GHz. Dosegljiva razdalja je odvisna od sprejemne in oddajne moči. Pri tem mora biti maksimalna moč naprave skladna z lokalnimi predpisi države, v kateri se naprava uporablja.



Slika 17 – Frekvenčni pasovi posameznih kanalov pri različnih frekvencah

Dovoljena uporaba nelicenčnih frekvenc se po svetu razlikuje, prav tako je to odvisno od posamezne države ali regije, kar je prikazano v tabeli 3.

Frekvenčni pas (MHz)	Geografska raba
868 – 868,6	Evropa
902 – 928	Amerika, Avstralija
2400 – 2483,5	po vsem svetu

Tabela 3 – Dovoljena uporaba frekvenčnih pasov po svetu

4.2.1.1 Detekcija energije kanala

Detekcija energije kanala (ang. ED, Receiver Energy Detection) je na voljo omrežni plasti za potrebe algoritma za izbiro prenosnega kanala. ED je ocena prejete moči signala v pasovni širini izbranega frekvenčnega signala. ED ne poizkuša identificirati in dekodirati samega signala, ampak gleda samo moč, ki se spremlja za 8 simbolov v enakih časovnih intervalih. Rezultat meritve je 8 bitno celo število od 0x00 do 0xff. Najnižja vrednost je 0 in pomeni, da je prejeta moč manjša kot 10 dB. Ko je prejeta moč več kot 40 dB, se vrednosti ED lahko linearno preslikajo.

4.2.1.2 Kakovost povezave

Po sprejemu paketa fizična plast (PHY) pošlje dolžino PSDU (PHY service data unit), PSDU in oceno kvalitete signala (LQ) MAC podplasti. Ta na osnovi meritev ED in ocene signal/šum izračuna LQI (LQI, Link Quality Indication). Rezultat je 8-bitno celo število od 0x00 do 0xff.

Vrednost je linearno razporejena glede na vrednosti, ki jih omogoča sprejemnik. Uporaba rezultata LQI je odvisna od omrežne in aplikacijske plasti.

4.2.1.3 Ocena nezasedenosti kanala

Ocena nezasedenosti kanala (CCA, Clear Channel Assessment) se izvaja na osnovi treh metod:

- CCA sporoča zasedenost medija zaradi energije, ki je nad ED pragom,
- CCA sporoča zasedenost medija zaradi zaznave moduliranega signala in širjenja signala z IEEE 802.15.4 karakteristikami,
- CCA sporoča zasedenost medija zaradi zaznave moduliranega signala in širjenja signala z IEEE 802.15.4 karakteristikami ter energijo nad ED pragom.

4.2.1.4 Format paketa fizičnega sloja

Paketi podatkovnega fizičnega sloja (PPDU, PHY Protocol Data Unit) služijo za prenos podatkov preko fizične plasti. Paketna PPDU struktura je prikazana v tabeli 4. Vsak paket PPDU je sestavljen iz naslednjih delov:

- sinhronizacijske glave SHR (synchronization header), ki je sestavljena iz preambule, ki služi za sinhronizacijo čip sekvence in razdelitvenega polja SFD, ki služi za ločitev SHR in PHR polja,
- PHR (PHY header), ki vsebuje informacije o dolžini okvirja,
- spremenljive dolžine paketa PSDU (PHY service data unit), ki nosi MAC podplastni okvir.

SHR		PHR		PHY tovor
preambula	SFD	dolžina okvirja (7 bitov)	rezervirano polje (1 bit)	PSDU
32 bitov	8 bitov	8 bitov		spremenljivo

Tabela 4 – Struktura PPDU paketa [24]

4.2.2 Podplast za kontrolo dostopa do medija

Naloga podplasti za kontrolo dostopa do medija (MAC, Media Access Control) je upravljanje in reguliranje dostopa do skupnega komunikacijskega medija – radia. Zadolžena je za prenos MAC

okvirjev na fizični radio kanal in je vmesni člen med fizično (PHY) plastjo in višjimi plastmi. Tako višjim plastem ponuja dve storitvi, upravljavsko storitev MAC podplasti (MAC Management Service) in podatkovno storitev MAC podplasti (MAC Data Service). Poleg tega je MAC podplast odgovorna tudi za generiranje omrežnih svetilnikov (ang. beacon), upravljanje z zajamčenim časovnim režnim (GTS, Guaranteed Time Slot) mehanizmom za visoko prioritete komunikacije, proženje CSMA-CA mehanizma ob dostopu do kanala, za potrjevanje prejetih okvirjev, dinamično izbiro kanalov in za zagotavljanje varnosti okvirjev.

4.2.2.1 Struktura protokola podatkovne enote MAC okvirja

MAC paket je sestavljen iz treh glavnih komponent: MAC glave (MHR), MAC tovara (ang. payload) in MAC noge (MFR). MAC glava vsebuje kontrolo paketa, sekvenčno številko paketa ter informacijo o naslovu in varnosti. MAC tovor (ang. payload) vsebuje informacije o tipu paketa. MAC noga vsebuje pomembne informacije glede preverjanja pravilnosti prenosa in tako vsebuje FCS (frame check sequence). Struktura MPDU (MPDU, MAC Protocol Data Unit) okvirja je podrobno prikazana v tabeli 5.

MHR						MAC tovor	MFR
kontrola okvirja	sekvenčna številka	destilacija PAN identifikatorja	naslov destilacije	izvorni PAN identifikator	izvorni naslov	tovor okvirja	FCS
		Naslovno polje					
16 bitov	8 bitov	0/16 bitov	0/16/64 bitov	0/16 bitov	0/16/64 bitov	spremenljiva	16 bitov

Tabela 5 – Struktura osnovnega MPDU okvirja [24]

FCS vsebuje 16 bitni mehanizem za ciklično preverjanje pravilnosti (CRC, Cyclic Redundancy Check), ki je namenjen odkrivanju napak v okvirjih. Za odkrivanje napak se uporablja polinomske generator 16. reda, ki je prikazan v enačbi 1.

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

Enačba 1 – Polinomska enačba, ki se uporablja za CRC

MAC podplast ima na voljo tri vrste MPDU svetilniških okvirjev, podatkovni okvir, potrditveni ukaz in MAC ukaz.

4.2.2.2 Mehanizmi dostopa do kanala z izogibanjem trkom

Poznamo dve vrsti mehanizmov za dostop do kanala z izogibanjem trkom (CSMA-CA, Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance). To sta brezrežni (ang. unslotted) in režni (ang. slotted) CSMA-CA načina.

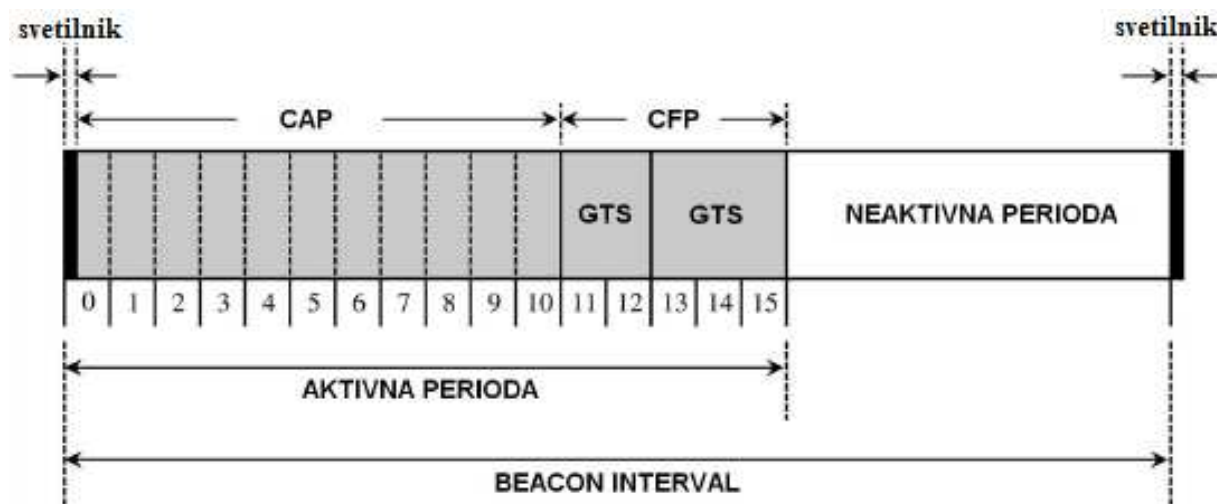
Brezrežni način (ang. unslotted) CSMA-CA se večinoma uporablja v omrežjih, kjer oddajanje ene naprave opazijo vse ostale naprave. Zaradi hkratnega oddajanja dveh ali več naprav, ki tekmujejo med seboj za prost kanal, se lahko zgodi trk poslanih paketov. Rešitev opisanega problema je, da se namerno ustvari določena zakasnitev. Pri metodi brez rež (unslotted) CSMA-CA naprava najprej počaka, da preteče naključno izbran časovni interval, preden preveri, ali je kanal prost, nakar začne oddajati. Brezrežni način (unslotted) CSMA-CA se večinoma uporablja v nesvetilniških (non-beacon) omrežjih.

Omrežja s svetilniki (beacon) uporabljajo režni (slotted) CSMA-CA mehanizem ob dostopu do kanala. Naprava, ki želi oddajati signal, najprej preveri, ali je kanal prost. Če je kanal prost, počaka naključno število časovnih oken, nakar ob naslednjem prostem robnem oknu začne oddajati. Robna okna so poravnana s svetilniki (beacon). Svetilniki (beacon) so poslani na določen časovni interval in ne uporabljajo CSMA/CA. Poleg svetilnikov (beacon) obstajata še dve vrsti paketov, ki ne uporabljata CSMA-CA. Eden takih je potrditveni okvir. Naprave v svetilniških (beacon) omrežjih lahko uporabljajo GTS (Guaranteed Time Slot) reže, ki po definiciji ne uporabljajo CSMA-CA.

4.2.2.3 Struktura super okvirja

Struktura super okvirja (Superframe Structure) je določena s standardom IEEE 802.15.4 in je eden od mehanizmov za dostopanje do fizičnega radio kanala. Struktura super okvirja je definirana s strani koordinatorja. Super okvir (slika 18) je razdeljen na 16 enako velikih rež (slots), ki so omejene s svetilniškimi (beacon) okvirji. Struktura super okvirja vsebuje poleg aktivne periode tudi neaktivno periodo. Aktivni čas trajanja super okvirne strukture SD (Superframe Duration) je določen s časovnimi intervali svetilniških (beacon) okvirjev, CAP (Contention Access Period), CFP (Contention Free Period) ter GTS (Guaranteed Time Slots). Super okvirno strukturo uporabljamo v aplikacijah, kjer potrebujemo majhne zakasnitve.

Koordinator določi časovne reže (ang. Time Slots) tistim napravam, ki potrebujejo majhne zakasnitve. Tako določene časovne reže s strani koordinatorja so garantirane časovne reže GTS (Guaranteed Time Slots).



Slika 18 – Struktura super okvirja [21]

Struktura super okvirja je sestavljena iz:

- intervala CAP (Contention Access Period), v katerem naprave tekmujejo med seboj za dostop do kanala z uporabo metode CSMA-CA,
- intervalov CFP (Contention Free Period) in GTS (Guaranteed Time Slots), kjer naprave z majhno zakasnitvijo pridobijo pravico do dostopa do kanala in nato pričnejo s pošiljanjem podatkov,
- neaktivne periode, kjer gre koordinator v režim nizke porabe; v tem času ni možno pošiljanje svetilnikov (ang. beacon) okvirjev,
- intervala svetilniških (beacon) okvirjev (BI).

Če koordinator ne želi pošiljati super okvirja, ima možnost, da kadarkoli izklopi pošiljanje svetilniških (beacon) okvirjev. Svetilniški (beacon) okvirji se uporabljajo predvsem za sinhronizacijo WPAN naprav znotraj omrežja. Vsaka WPAN naprava v omrežju, ki je pripravljena pošiljati podatke, se vključi v tekmo za pridobitev dostopne pravice do kanala takrat, kadar je časovni interval CAP točno definiran. V super okvirni strukturi sta pomembna dva parametra. To sta red super okvirja SO (SO, Superframe Order) in red svetilniškega (beacon) okvirja BO (BO, Beacon Order), ki lahko zavzameta vrednosti od 1 do 15. Prvi SO se uporablja za ugotavljanje časa trajanja super okvirja, medtem ko z drugim (BO) ugotavljamo čas trajanja posameznih svetilniških (beacon) okvirjev. Če je vrednost parametra BO enaka 15, potem

nimamo prenosa svetilniških (beacon) okvirjev. Če pa sta vrednosti parametrov SO in BO enaki 15, potem neaktivna perioda v super okvirju ni prisotna. Prenos podatkov s pomočjo svetilniškega (beacon) okvirja je možen na tri načine: od koordinatorja k napravi, od naprave do koordinatorja in med dvema enakovrednima napravama.

4.2.2.3.1 Komunikacija od koordinatorja k napravi s svetilniškim okvirjem

Koordinator ima pripravljene podatke, ki jih želi poslati napravi. Svojo željo najprej prikaže v nerazrešenem naslovnem polju svetilniškega (beacona) okvirja, ki ga nato pošlje napravi. Naprava takoj, ko sprejme svetilniški (beacon) okvir, razreši naslovno polje. Če naprava najde svoj naslov v tabeli, kjer se nahajajo še ostala nerazrešena naslovna polja, takoj pošlje koordinatorju ukaz, zahtevo za podatke. Koordinator se odzove s potrditvenim ukazom. Nato lahko pošlje podatke napravi, ki se po končanem prenosu odzove s potrditvenim ukazom. Grafični prikaz komunikacije je prikazan na sliki 19.

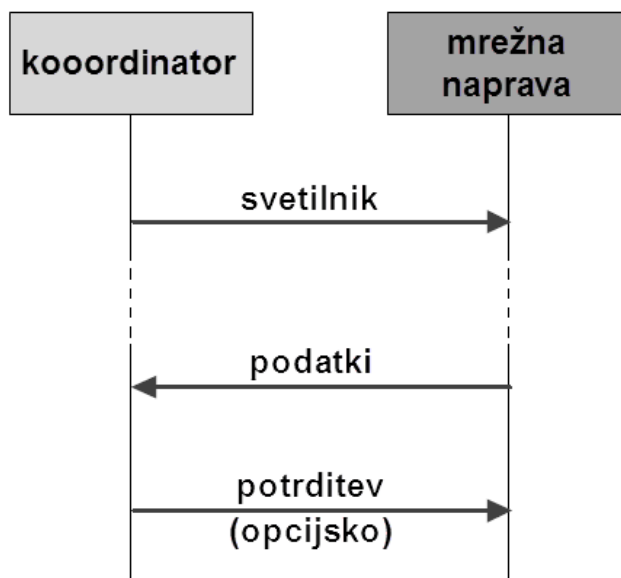


Slika 19 – Pošiljanje od koordinatorja k napravi v svetilniškem načinu

4.2.2.3.2 Komunikacija od naprave h koordinatorju s pomočjo svetilniškega okvirja

Naprava najprej posluša svetilniške (beacon) okvirje, ki jih pošilja koordinator. Ko svetilniški (beacon) okvir doseže napravo, se takoj izvede sinhronizacija super okvirne strukture. Ta

postopek nam pove začetni in končni čas, ki ga potrebujemo (CAP). Naprava nato tekmuje z ostalimi napravami za dostop do kanala. Naprava se takoj, ko pošlje podatke koordinatorju, odzove s potrditvenim ukazom. Grafični prikaz komunikacije je prikazan na sliki 20.



Slika 20 – Pošiljanje od naprave h koordinatorju v svetilniškem načinu

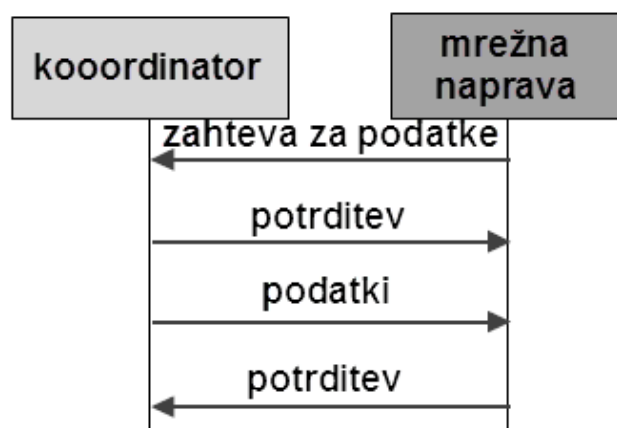
4.2.2.3.3 Komunikacija med dvema enakovrednima napravama s pomočjo svetilniškega okvirja

V točka do točka (peer to peer) osebno omrežju lahko vsaka naprava komunicira z drugo napravo. Metode za prenos podatkov so sinhronizacijske metode in metoda brezrežni (unslotted) CSMA-CA, ki lahko degradira prepustnost osebne omrežja (PAN).

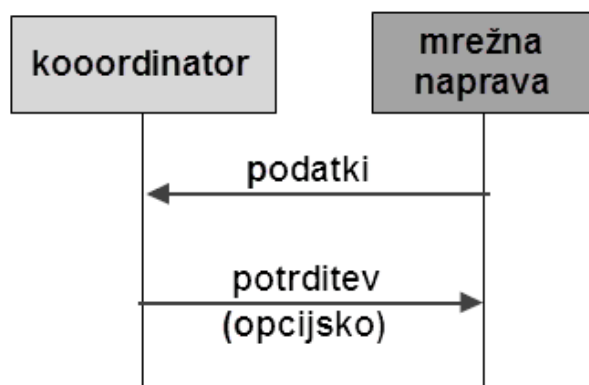
Navadna metoda CSMA (Carrier Sense Multiple Access) se uporablja v omrežjih, ki povezujejo naprave paralelno, kar pomeni, da oddajanje ene naprave opazijo vse ostale naprave. Hkratno oddajanje dveh ali več naprav, ki tekmujejo med seboj za prost kanal, naenkrat povzroči trk njunih signalov. Rešitev opisanega problema je ta, da se namerno ustvari zakasnitev. Pri metodi brez rež (unslotted) CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance) postaja najprej počaka, da preteče naključno izbran časovni interval, preden gre preverjat ali je kanal prost.

4.2.2.3.4 Komunikacija v nesvetilniškem načinu

Glavna razlika med komunikacijo v nesvetilniškem (non-beacon) načinu in komunikacijo v svetilniškem (beacon) načinu je, da koordinator ne pošilja svetilnikov (beacon), kar onemogoči časovno sinhronizacijo omrežnih naprav s koordinatorjem; zaradi tega ni GTS rež, vsi paketi od omrežnih naprav so poslani s pomočjo brezrežnega (unslotted) CSMA-CA načina in koordinatorji morajo biti vedno v delujočem stanju, kar prikazujeta sliki 21 in 22.



Slika 21 – Pošiljanje od koordinatorja k napravi v nesvetilniškem načinu



Slika 22 – Pošiljanje od naprave h koordinatorju v ne nesvetilniškem načinu

V brezžičnih omrežjih se pogosto dogaja, da naprave postanejo nedosegljive. V teh primerih nedosegljiva naprava izvede sirotno (ang. orphan) skeniranje tako, da začne pošiljati sirotna obvestila na vsak kanal. Če koordinator sprejme sirotno obvestilo, preveri, če je bila naprava del njegovega omrežja in če je bila, potem pošlje ukaz za ponovno pridružitve omrežju. V nasprotnem primeru, ko sirotno skeniranje ni uspešno, naprava predvidi izgubo povezave z omrežjem.

4.3 Brezžična senzorska omrežja ZigBee

ZigBee je brezžična tehnologija, ki temelji na standardu IEEE 802.15.4. Protokol ZigBee je bil načrtovan predvsem z namenom, da pokrije aplikacije s področja industrijske avtomatizacije, hišne avtomatizacije in medicinske telemetrije. Obenem naj bi zamenjal vse nestandardne rešitve, ki so se pojavile na teh področjih. Prav aplikacije v hiši avtomatizaciji so ZigBee-ju pomagale, da se je tako uveljavil in razvil. Razvita tehnologija je temeljila na odprtosti in je bila dostopna vsem. To so s pridom izkoristili veliki svetovni proizvajalci in ZigBee tehnologijo začeli vključevati v svoje izdelke. Tako se tehnologija vedno bolj uporablja na raznovrstnih področjih, kot so:

- hišna avtomatizacija,
- industrijska avtomatizacija in telemetrija,
- avtomatsko oddaljeno merjenje AMR (Automatic Meter Reading),
- nadzorovanje okoljskih pojavov,
- kot nadomestek za žične povezave v zahtevanih industrijskih okoljih,
- zdravstvena nega in medicinska telemetrija,
- zabavna elektronika.

Za razvoj tehnologije ZigBee in standarda skrbita delovna skupina IEEE 802.15 in ZigBee Alliance. ZigBee Alliance (slika 23) je svetovno združenje podjetij, ki tesno sodeluje z delovno skupino IEEE 802.15 pri definiranju globalnega standarda na področju brezžičnih osebnih omrežij (WPAN). Odgovoren je razvoj omrežne (NWK) in aplikacijske (APL) plasti omrežja, ki sta višji plasti standarda ZigBee (slika 24).



Slika 23 – Logotip združenja ZigBee Alliance

Tako je bil standard ZigBee specificiran z namenom, da omogoči proizvajalcem in sistemskim integratorjem rešitve brezžičnega povezovanja naprav. Te rešitve so enostavne za uporabo, imajo nizko porabo, omogočajo gradnjo enostavno razširljivih omrežij in zagotavljajo zelo varne povezave. Omrežja ZigBee omogočajo izgradnjo cenovno ugodnih inteligentnih sistemov za

nadzor in upravljanje naprav v zahtevnih industrijskih okoljih ob nizki porabi in nizkih stroških vzdrževanja.



Slika 24 – Grafični prikaz plasti, za katere je odgovoren IEEE 802.15.4 in za katere ZigBee Alliance

ZigBee Alliance se osredotoča predvsem na:

- definiranje omrežne plasti (NWK),
- definiranje aplikacijske plasti (ALP),
- zagotavljanje in testiranje skladnosti naprav s standardom,
- promoviranje blagovne znamke ZigBee,
- vodi nadaljnji razvoj tehnologije ZigBee.

4.3.1 Naprave v omrežju ZigBee

V omrežju ZigBee poznamo več vrst naprav. Ločimo jih glede na naloge, ki jih opravljajo v omrežju in glede na način delovanja. Tako imamo naprave tipa FFD (Full Function Device), ki imajo podprte vse funkcionalnosti ZigBee-ja in RFD (Reduced Function Device), ki imajo omejene funkcionalnosti ZigBee-ja, prav tako je od tipa naprave odvisna njihova uporaba, ki jo prikazuje tabela 6.

Vrsta naprave	Namen uporabe		
	Koordinator	Usmerjevalnik	Končna naprava
FFD	da	da	da
RFD	ne	ne	ne

Tabela 6 – Namen uporabe FFD in RFD naprav v omrežju ZigBee

Koordinator je najbolj napredna naprava v omrežju in je tipa FFD naprave. Odgovoren je za inicializacijo omrežja, vzdrževanje omrežja, zbiranje podatkov iz ostalih naprav in nadzorovanje delovanja ZigBee omrežja, ki je kreirano z njegove strani. Najpogosteje se v omrežju nahaja samo en koordinator. Zaradi stalne komunikacije z napravami mora biti neprestano napajan.

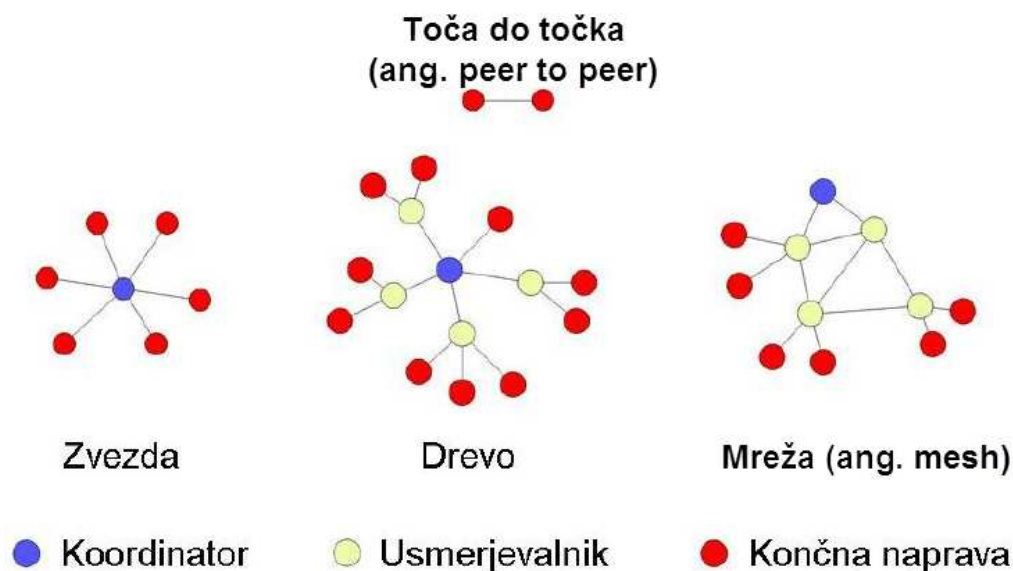
Usmerjevalnik je prav tako naprava tipa FFD. Poleg normalnega izvrševanja namenske aplikacije ima še nalogo usmerjanja podatkov ostalih naprav, ki so v njegovem dosegu. Tako usmerja podatke iz končnih naprav ali iz drugih usmerjevalnikov in s tem povečuje samo območje pokritosti. Zaradi neprestane komunikacije mora biti neprestano napajan.

Končna naprava je tipa RFD in ima le toliko funkcionalnosti, da lahko vzpostavi komunikacijo z nadrejeno napravo (koordinator ali usmerjevalnik). Na njej tečejo preproste aplikacije. Končna naprava večino časa spi in je zato primerna za baterijsko napajanje.

Splošen cilj omrežij ZigBee je povečati čas spanja naprav in tako zmanjšati porabo. V svetilniških (beacon) omrežjih so naprave aktivne samo takrat, ko se prenašajo svetilniki (beacon). V nesvetilniških (non-beacon) omrežjih pa so nekatere naprave vedno aktivne, medtem ko druge večino svojega časa preživijo v spanju.

4.3.2 Omrežna plast

Omrežna plast (NWK, Network Layer) je odgovorna za vzpostavitev omrežja in upravljanje s formacijo omrežja. Poleg tega skrbi za varnost prenosa podatkov in usmerjanje (ang. routing) paketov znotraj omrežja. Prav tako ima funkcijo, da omogoči pravilno uporabo MAC podplasti in zagotovi ustrezen vmesnik za uporabo v aplikacijski plasti. Omrežna plast koordinatorja je odgovorna tudi za ustanavljanje novih omrežij in dodeljevanje naslovov novo pridruženim napravam. Omrežna plast podpira več omrežnih topologij točka do točka (peer to peer), zvezdo, drevo in mrežno (ang. mesh) topologijo. Omrežne topologije so lepo grafično prikazane na sliki 25.



Slika 25 – ZigBee omrežne topologije

Usmerjanje je proces izbiranja poti po kateri bo sporočilo prispelo do naslovne naprave. ZigBee koordinator in usmerjevalnik (FFD) sta odgovorna za iskanje in vzdrževanje poti v omrežju, medtem ko končne naprave (RFD) ne morejo iskati ustreznih poti. Omrežna plast koordinatorja je odgovorna za postavljanje novega omrežja in izbiro omrežne topologije. Ta plast napravam prav tako dovoljuje, da se priključijo ali zapustijo omrežje.

4.3.3 Aplikacijska plast

Aplikacijska plast (APL, Application Layer) je najvišja plast, ki se nahaja v standardu ZigBee in je učinkovit vmesnik tehnologije ZigBee za svoje končne uporabnike. Zajema sestavne dele standarda ZigBee, kot so objekti ZigBee naprav (ZDO, ZigBee Device Objects), aplikacijska podplast APS (Application Support Sublayer) in aplikacijskega objekta, ki je določena s strani proizvajalca.

ZDO (ZigBee Device Objects) je odgovorna za definiranje vlog naloge znotraj omrežja (koordinator, usmerjevalnik, končna naprava) in za vodenje vlog naprav v omrežju. Prav tako ZDO odkriva nove naprave v omrežju in identificira ponujene storitve. Z novimi napravami vzpostavi varne povezave (uporaba kriptografskega sistema z javnim ključem) in odgovarja na njihove zahteve. Aplikacijska podplast APS (Application Support Sublayer) je drugi del aplikacijske plasti, ki ponuja dobro opredeljen vmesnik in nadzorne storitve. APS podplast je odgovorna za vzdrževanje veznih (ang. binding) tabel in odkrivanje ostalih naprav, ki se nahajajo

v dosegu naprave. Deluje kot most med omrežno plastjo in drugimi sestavnimi deli aplikacijske plasti. Usmerja tudi sporočila med plastmi.

Pri komunikaciji med napravami je zelo pomembno naslavljanje, ki je tudi del aplikacijske plasti. Komunikacija med napravami lahko poteka takoj po pridružitvi neke naprave že obstoječemu brezžičnemu omrežju. Da lahko naprave med seboj komunicirajo, uporabljajo skupni aplikacijski protokol, kjer so določene vrste sporočil in oblike sporočil. Glede na razpoložljive informacije o omrežju in napravah lahko odkrivanje in naslavljanje naprav poteka na več različnih načinov.

Če je omrežni naslov PAN ID (Personal Area Network Identification) znan, se pošlje zahteva po naslovu s pomočjo neposredne (ang. unicast) komunikacije. Če pa omrežni naslov PAN ID ni znan, se najprej oddajo zahteve, kjer je naslov del odgovora. Končne naprave bodo preprosto odgovorile z zahtevanim naslovom, medtem ko bodo koordinatorji in usmerjevalniki poslali naslove vseh naprav, ki so povezane z njimi. Takšno odkrivanje naprav omogoča, da izvemo čim več o napravah v celotnem omrežju in njihovih storitvah, ki jih ponujajo. Pri neposrednem naslavljanju se uporablja tako radijski naslov kot identifikator končne točke, medtem ko se pri posrednem naslavljanju uporablja radijski naslov, identifikator končne točke in vsi ostali možni atributi, ki lahko pomagajo pri naslavljanju. Pri posrednem naslavljanju so vse te informacije poslane koordinatorju, ki nato skrbi za pridružitve teh naprav in razrešuje zahteve za komunikacijo.

4.3.4 Omrežne topologije v omrežju ZigBee

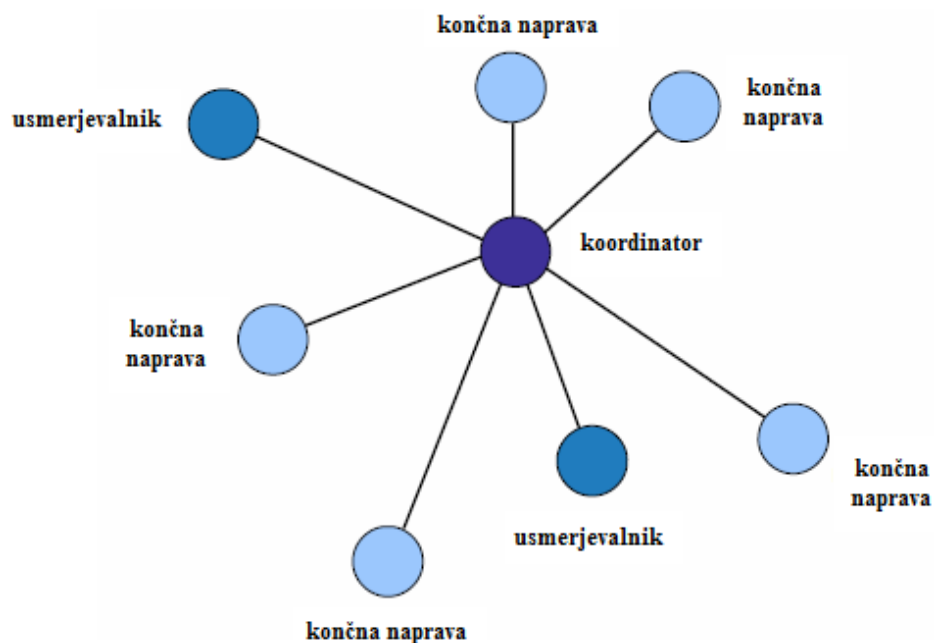
ZigBee podpira štiri vrste omrežnih topologij in sicer zvezde, točka do točka (peer to peer), mreža (mesh) in drevesa. V omrežju ZigBee je najbolj pogosta uporaba omrežne topologije mreža (mesh). Vsaka omrežna topologija, razen točka do točka (peer to peer), mora imeti vsaj enega koordinatorja. Omrežni topologiji drevo in mreža (mesh) dovoljujeta uporabo usmerjevalnikov za razširitev omrežja.

V omrežjih od točke do točke (peer to peer) (slika 26) so vse naprave enakovredne. Ker lahko vse naprave medsebojno komunicirajo, lahko uporabljamo samo FFD.



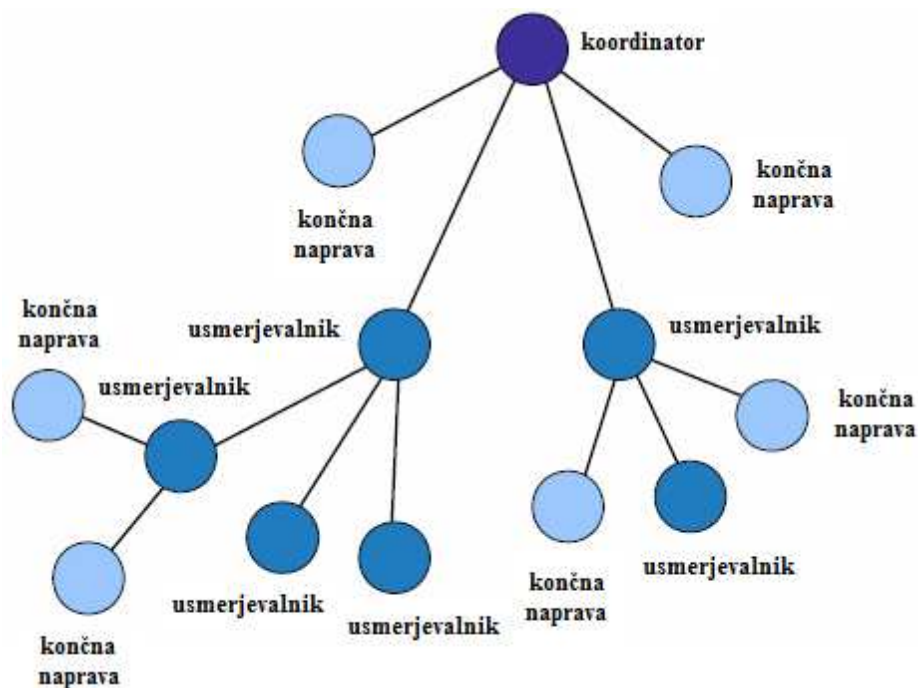
Slika 26 – Mrežna topologija točka do točka

Pri omrežni topologiji zvezda (slika 27) so vse naprave povezane v osrednje vozlišče zvezdišče oziroma koordinator. Koordinator je odgovoren za zagon in vzdrževanje končnih naprav v omrežju. Končne naprave neposredno komunicirajo s koordinatorjem. Prednost te omrežne topologije je enostavnost, saj je usmerjevanje nepomembno. Slabost te omrežne topologije je, da je zelo občutljiva na izpad osrednjega vozlišča, saj v primeru izpada zvezdišča ne more komunicirati noben par končnih naprav v omrežju.



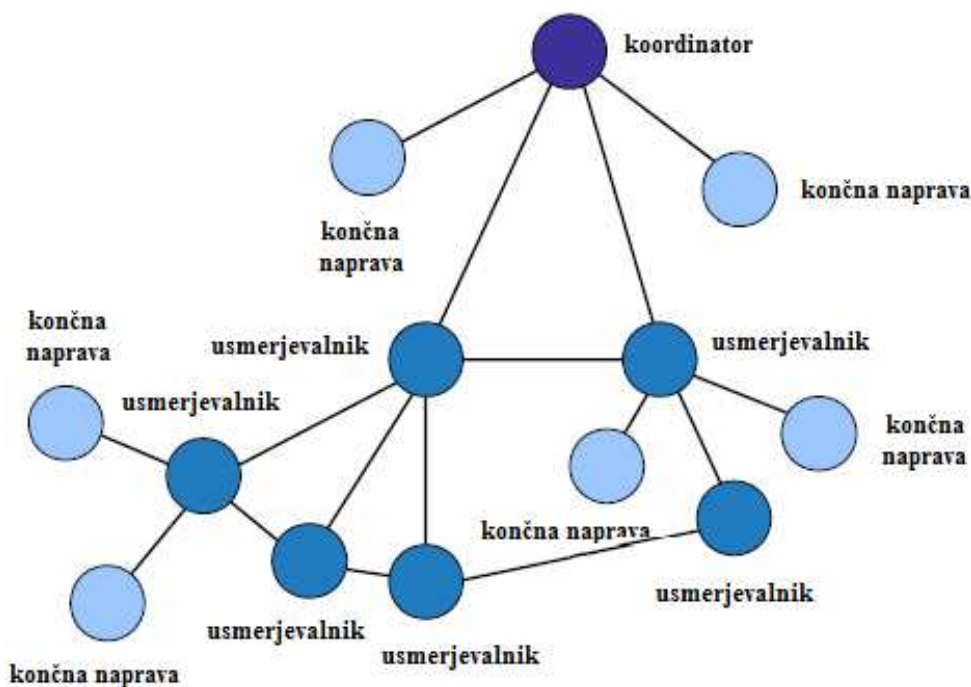
Slika 27 – Omrežna topologija zvezda

Kompleksnejša omrežna topologija kot je drevo (slika 28) ima prednost, da ni potrebno skrbeti za nastavitve naprav. Omrežje se samo organizira in popravlja sproti, ko se naprave pridružujejo omrežju, oziroma ga zapuščajo.



Slika 28 – Omrežna topologija drevo

V mreža (mesh) topologiji (slika 29) je koordinator odgovoren za zagon omrežja in za nastavitev ključnih nastavitev omrežja. Podobno kot pri omrežni topologiji drevo se omrežje samo organizira in popravlja sproti, ko se naprave pridružujejo omrežju, oziroma ga zapuščajo. Tako zgrajeno omrežje je zelo prilagodljivo in razširljivo ter omogoča pokrivanje večjega območja. Komunikacija med napravami, ki so v različnih omrežjih, lahko poteka preko koordinatorjev ali usmerjevalnikov, ki so povezani med sabo z omrežno topologijo točka do točka (peer to peer).



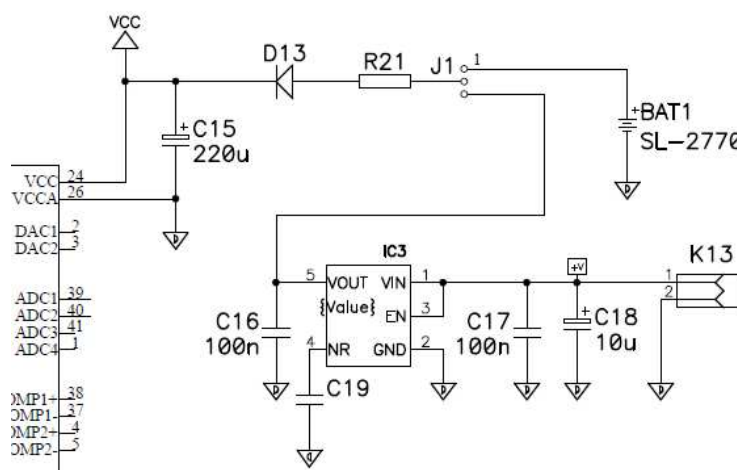
Slika 29 – Omrežna topologija mreža

5 Izdelava tiskanine

Pri izdelavi tiskanine naprav smo upoštevali zahteve po uporabnosti naprave in priporočila proizvajalca mikrokrmilniškega sistema Jennic. Vezje omogoča tako baterijsko kot stalno napajanje. Prav tako je pomembna velikost tiskanine, ki naj bi bila čim manjša in standardna zaradi vgradnje v standardno ohišje.

5.1 Napajalni del

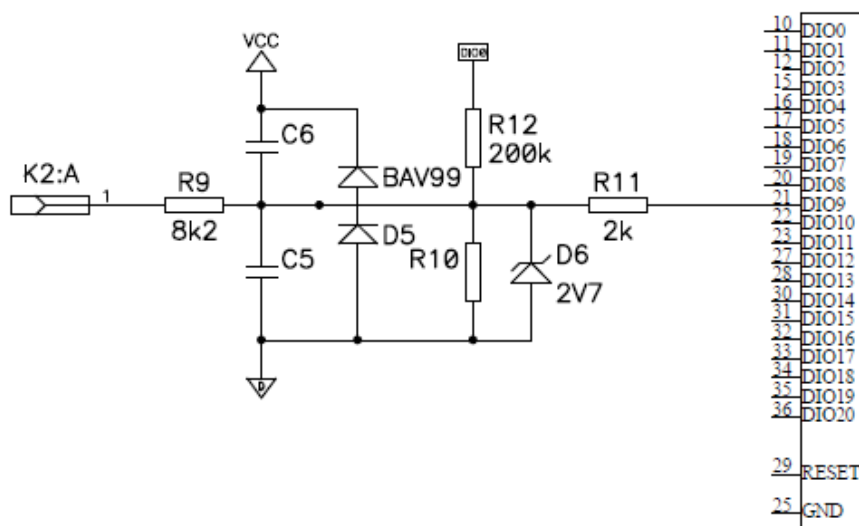
Napajalni del naprave (slika 30) omogoča tako baterijsko kot stalno napajanje. Naprava je lahko napajana le z enega vira. Izbiro opravimo s konektorjem J1. Napajanje s stalno napetostjo zahteva napetost od 3 V do 16 V. Regulacijo napetosti nam zagotavlja regulator LP2985AIM5-3.3 proizvajalca National Semiconductor [29]. Pri baterijskem napajanju se uporablja litijonska baterija standardne velikosti C in napajalne napetosti 3,6 V ter kapacitete 8,5Ah.



Slika 30 – Napajalni del naprave

5.2 Napetostni digitalni vhodi

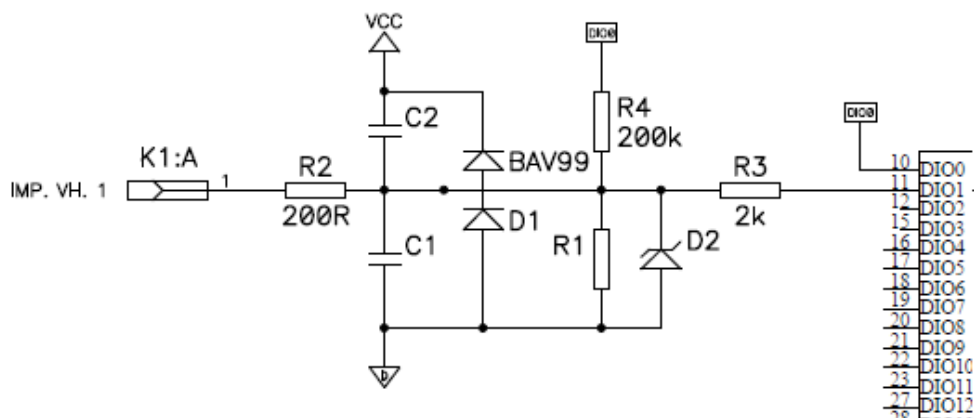
Na tiskanini sta izvedena dva napetostna digitalna vhoda (slika 31). Omogočata priključitev napetostnih signalov do 24 V. Predvidena sta za spremljanje digitalnih stanj drugih naprav. Frekvenca vzorčenja digitalnih vhodov je 20 Hz. Za izločanje visokofrekvenčnih motenj je izveden tudi strojni umeritveni (ang. debounce) del, ki filtrira motnje, ki prihajajo po ožičenju.



Slika 31 – Shema napetostnega digitalnega vhoda

5.3 Kontaktni digitalni vhodi

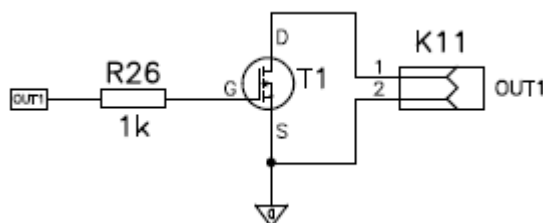
Na tiskanini sta izvedena dva kontaktna digitalna vhoda (slika 32). Predvidena sta za števec, saj sta izvedena tako, da je poraba samo ob sklenitvi kontaktov. Omogočata priklop preklopnih (ang. reed) kontaktov. Izbira za ta način sloni na dejstvu, da večina merilnih števecv omogoča zunanji priklop preklopnih kontaktov in s tem omogoča odčitavanje njegovega stanja. Frekvenca vzorčenja kontaktnih vhodov je 20 Hz. Za izločanje visokofrekvenčnih motenj je izveden tudi strojni umeritveni (ang. debounce) del, ki filtrira motnje, ki prihajajo po ožičenju.



Slika 32 – Shema kontaktnega digitalnega vhoda

5.4 Digitalni izhodi

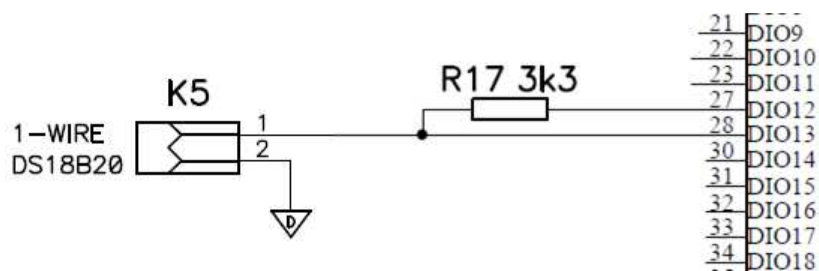
Za krmiljenje ali proženje procesov sta na tiskanini dva digitalna izhoda (slika 33). Krmiljenje poteka preko tranzistorja SI4134DY-T1-GE3 proizvajalca VISHAY [30]. Uporabljata se lahko za izklapljanje, vklapljanje ali proženje raznovrstnih procesov ali opravil.



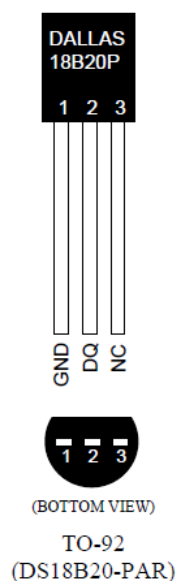
Slika 33 – Shema digitalnega izhoda

5.5 1-Wire

Za priklop zunanjih senzorjev je na tiskanini predvidena povezava (slika 34) za 1-Wire senzorje. Izvedena je varianta s parazitnim napajanjem senzorja. To pride v poštev predvsem pri baterijsko napajanih napravah, ko nimamo možnosti zunanjega napajanja senzorja. V našem primeru smo na 1-Wire priključek priklopili temperaturni senzor DS18B20-PAR [27] (slika 35), ki se parazitno napaja.



Slika 34 – Shema 1-Wire priklopa



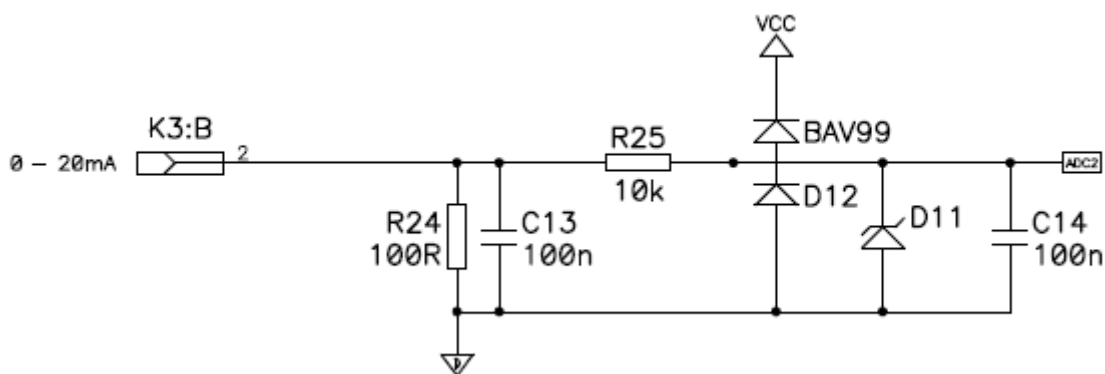
PIN DESCRIPTION

GND - Ground
DQ - Data In/Out
NC - No Connect

Slika 35 – Temperaturni senzor DS18B20-PAR in njegove priključitvene sponke

5.6 Analogni tokovni vhod

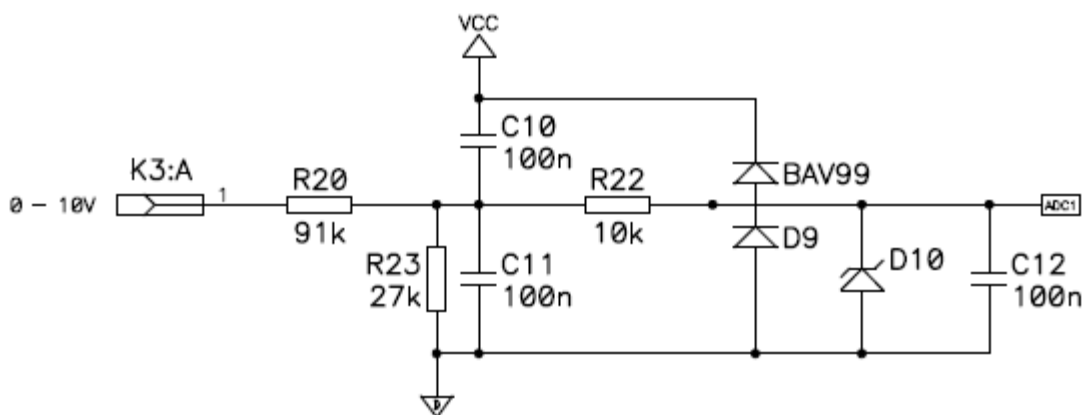
Izvedba analognega tokovnega vhoda je prikazana na sliki 36. Na analognem vhodu lahko merimo tokove od 0 mA do 20 mA. Mikrokrmilniški modul nam omogoča 12-bitno pretvorbo. Analogni vhodi na modulu so napetostni, zato je potrebno tok speljati preko bremena. Napetost na vhodu modula je lahko 2,4 V. Vezje je zaradi netočnosti elementov zasnovano tako, da je mogoče programsko umerjanje vhoda.



Slika 36 – Shema analognega tokovnega vhoda

5.7 Analogni napetostni vhod

Na tiskanini je en analogni napetostni vhod (slika 37) za merjenje napetosti od 0 V do 10 V. Mikrokrmilniški modul nam omogoča 12-bitno pretvorbo. Napetost na vhodu modula je lahko 2,4 V. Zato je izveden napetostni delilnik. Vezje pa je zaradi netočnosti elementov zasnovano tako, da je mogoče programsko umerjanje vhoda.

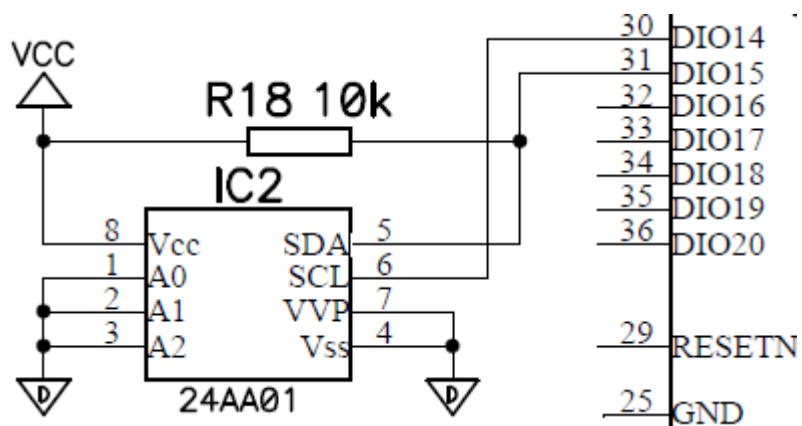


Slika 37 – Shema analognega napetostnega vhoda

5.8 Zunanji pomnilnik

Na tiskanini je prisoten zunanji pomnilnik (slika 38) 24AA01 [31] proizvajalca Microchip. Pomnilnik je tipa EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) in je velikosti 1Kbit. Odlikuje ga majhna poraba tako pri branju, pisanju in v času mirovanja. Omogoča več kot en milijon izbrisov in vpisov. Komunikacija z mikrokrmilnikom je izvedena

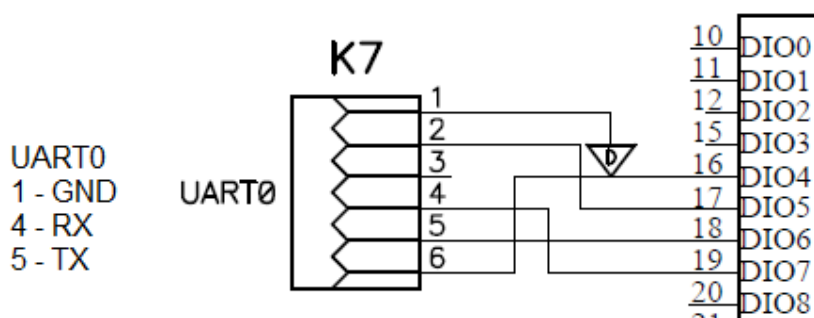
preko I2C vodila. Uporablja se za shranjevanje nastavitev naprav, shranjevanje kalibracijskih parametrov analognih vhodov in za zapise podatkov.



Slika 38 – Shema prikopa zunanjega EEPROM pomnilnika

5.9 Serijska povezava

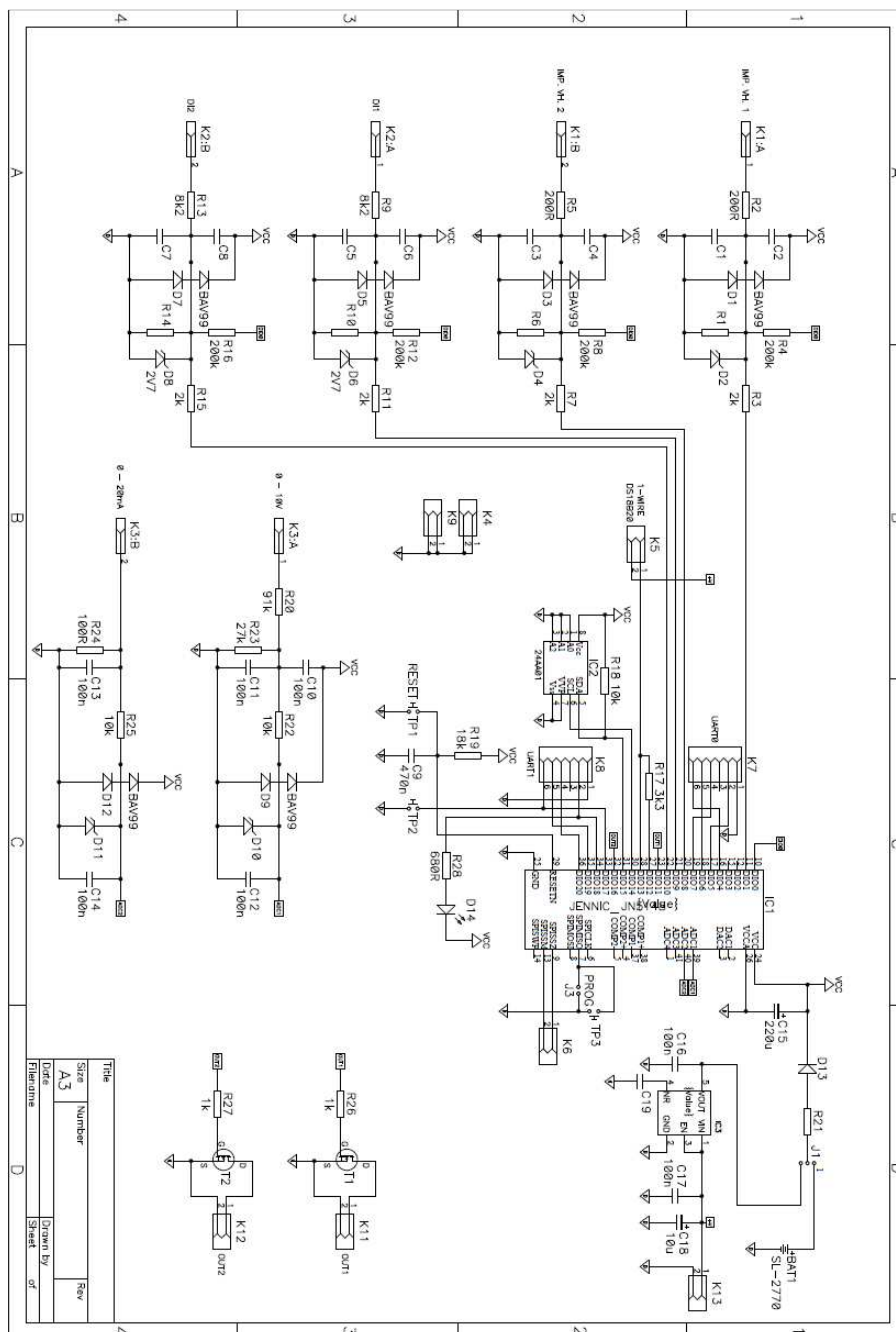
Za potrebe nalaganja programa, nastavljanja parametrov, testiranja in komunikacije z drugimi napravami sta na tiskanini prisotna dva UART-a (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) priključka, ki uporabljata 3V TTL nivoje (slika 39). Pri implementaciji koordinatorja se UART1 uporablja za komunikacijo z GsmBox2.



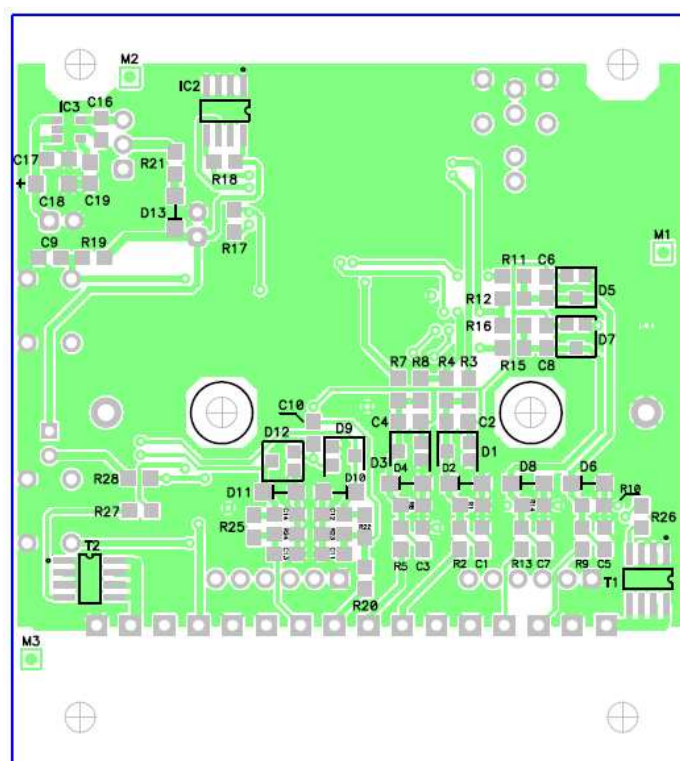
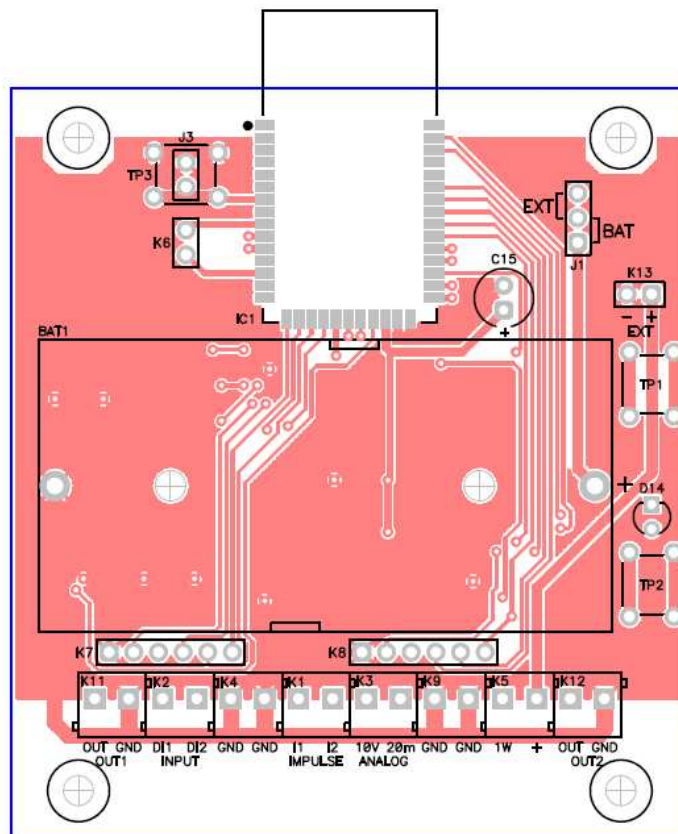
Slika 39 – Shema UART priključka

5.10 Sheme celotne tiskanine

Sheme tiskanine koordinatorja, usmerjevalnika in končne naprave so prikazane na slikah 40, 41 in 42. Za vse naprave se zaradi optimizacije stroškov uporablja le ena tiskanina.



Slika 40 – Električna shema naprave



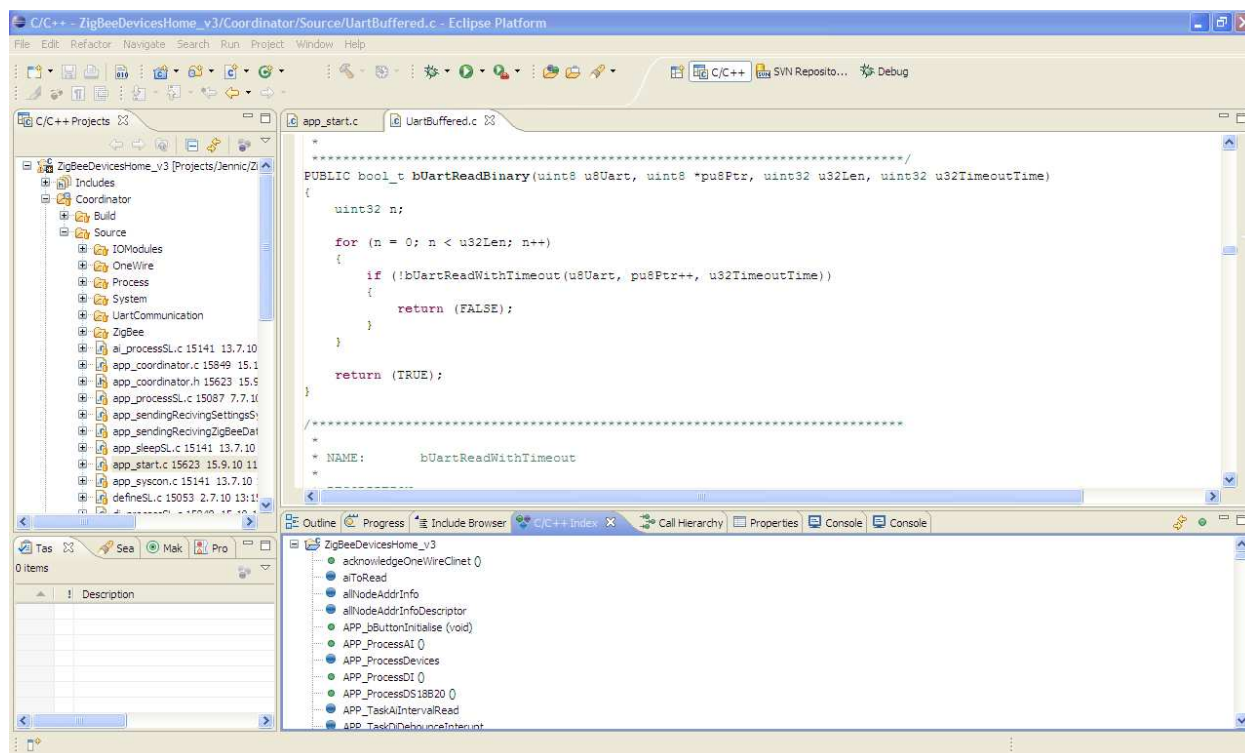
6 Programska implementacija

Pri programski implementaciji se je bilo tako potrebo osredotočiti na zahteve naprave in prenos podatkov preko omrežja ZigBee. Potrebno je bilo podrobno preučiti zmožnosti naprave in kar najboljše uporabiti že pripravljene funkcije in rutine s strani Jennic. Na voljo sta bila dva večja API-ja (Application Programming Interfaces), s katerima je bilo mogoče dostopati do perifernih naprav, prekinitvenih rutin, časovnikov, registrov ter do nastavitev ZigBee in protokola ZigBee. To nam je delo precej olajšalo, saj se ni bilo potrebno v večji meri posebej posvečati nižjim nivojem protokola ZigBee. Delo je potekalo v programskem okolju Eclipse IDE.

Tako smo programsko implementirali tri naprave koordinator, usmerjevalnik in končno napravo. Vse tri naprave uporabljajo isto tiskanino, vendar različno programsko opremo. Zaradi specifičnosti delovanja in želje po čim večji odzivnosti se koordinator uporablja samo za zbiranje podatkov in posredovanje preko serijske povezave UART. Na usmerjevalniku je implementirana cela končna naprava ter funkcije usmerjevalnika in posredovanje sporočil drugih naprav. Končna naprava, ki je po navadi baterijsko napajana, ima implementirane samo zahtevane lastnosti naprave in okrnjeno implementacijo ZigBee, saj obstaja želja po čim manjši porabi in času budnosti.

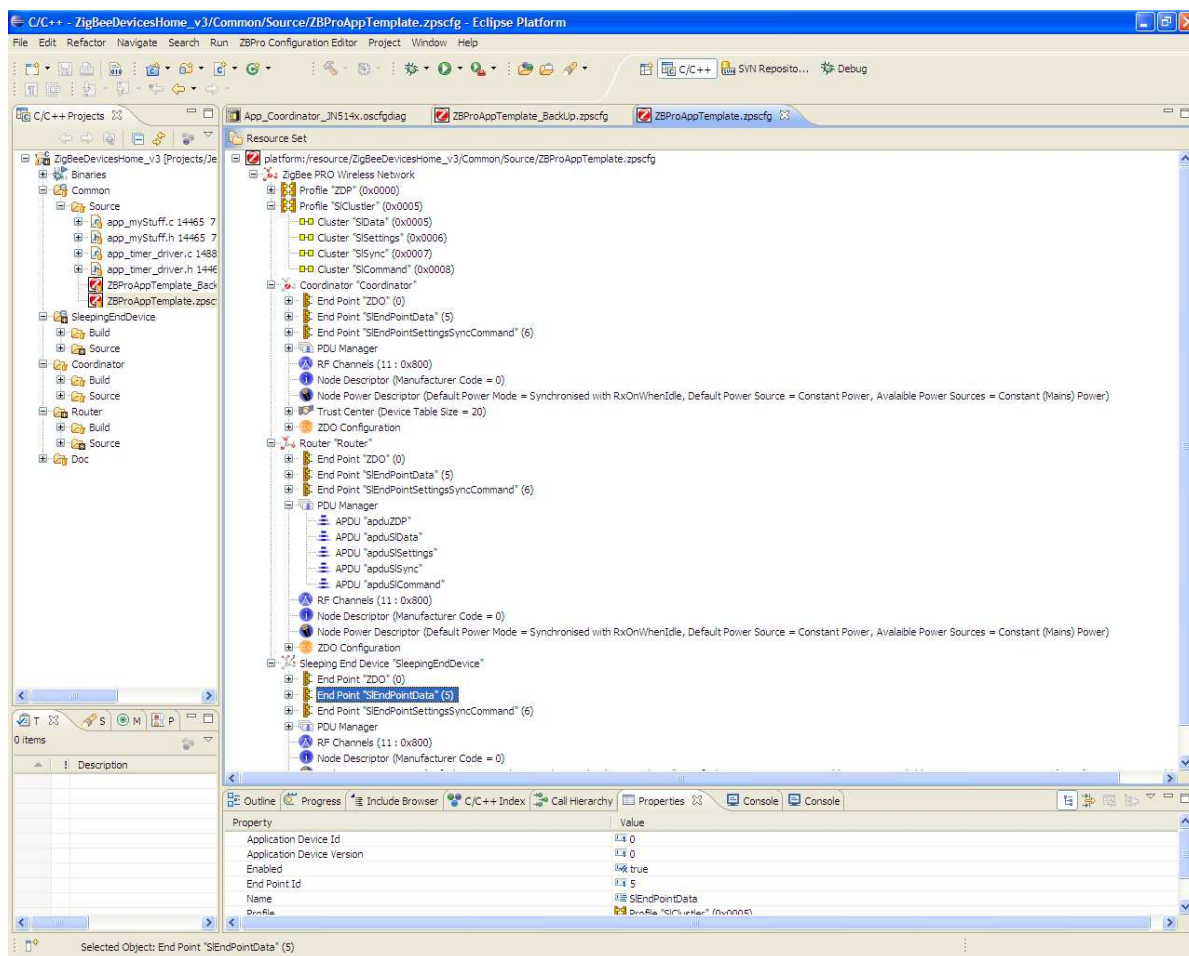
6.1 Programsko okolje

Izvedba programske implementacije je potekala v odprto kodnem programu Eclipse IDE (Integrated Development Environment), ki je prikazana na sliki 43. Jennic je za delo v tem okolju izdelal potrebne vmesnike (ang. plugin), grafični konfigurator za RTOS (real-time operating system), konfigurator ZigBee omrežja, navzkrižni prevajalnik (cross compiler), ki podpira njihove module. Programiranje je potekalo v programskem jeziku C/C++. Ker je programsko okolje zelo sposobno, nam je delo precej olajšalo. Z dodatkom SVN (Sub Version Control) je bilo mogoče kodo neprestano spremljati in dopolnjevati.



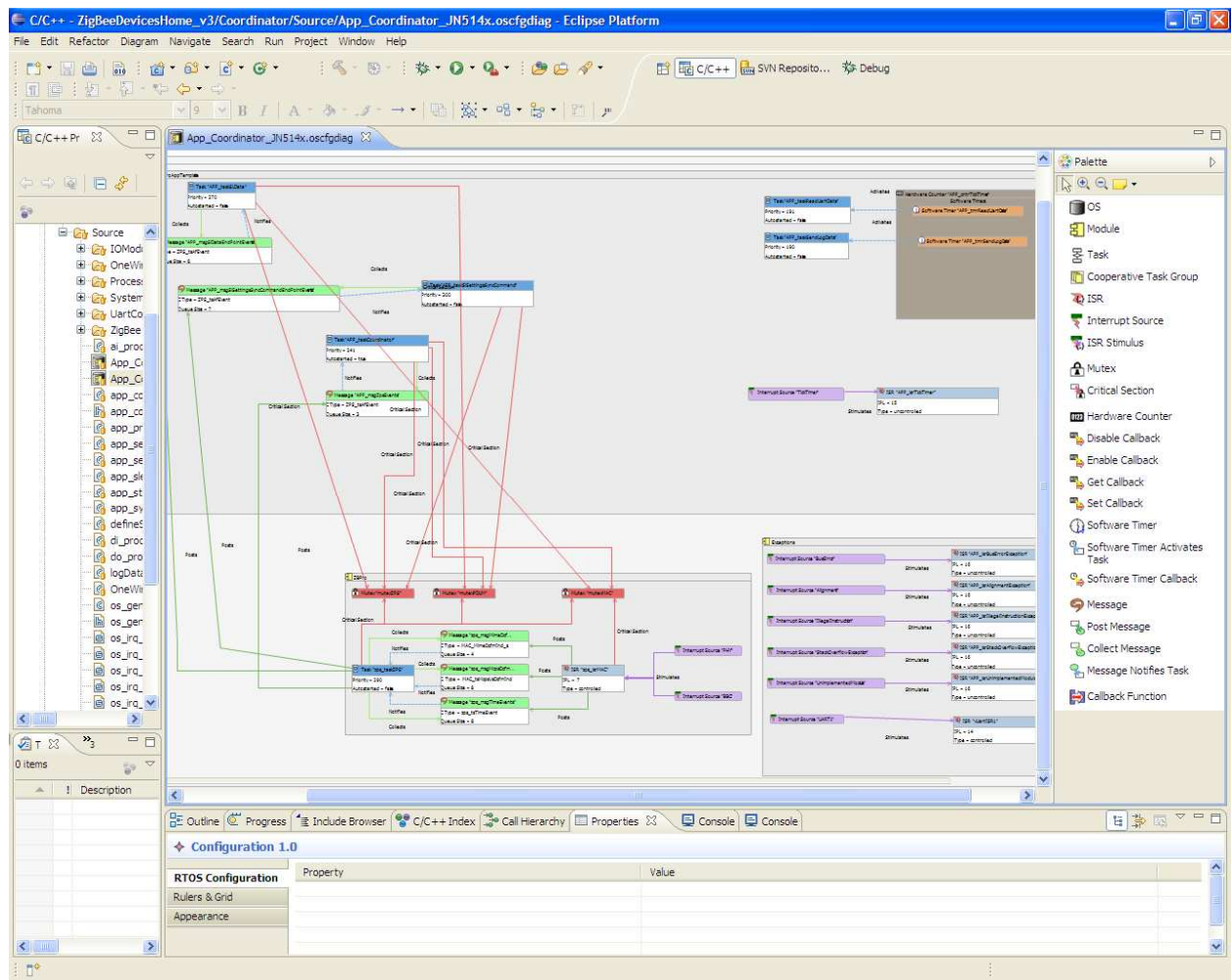
Slika 43 – Programsko okolje Eclipse IDE

Vmesnik za nastavljanje ZigBee nastavitev (slika 44) je izdelan s strani Jennic. Vsebuje vse potrebne nastavitve in parametre za konfiguriranje ZigBee omrežja. Tako se da nastavljanje nastavitev koordinatorja, usmerjevalnika in končne naprave. Pred uporabo gručnih (ang. cluster) ZigBee (slika 44) spremenljivk v kodi jih je potrebno definirati in nastaviti v ZigBee vmesniku. Tu se nastavi smer komunikacije, velikost in pripadnost profilom. Prav tako je potrebno nastaviti nastavitve naprav, kar se tiče napajanja, komunikacije in režima delovanja. Med pomembnimi nastavitvami so tako varnostni ključ omrežja, delovni kanal omrežja, PAN ID omrežja, kakšni so časi pošiljanja, zakasnitve v omrežju, kakšno je ponavljanje nedostavljenih paketov in velikosti pomnilnika rezerviranega za ZigBee sklad.



Slika 44 –Vmesnik v Eclipse IDE za nastavljanje ZigBee nastavitev

Vmesnik za nastavljanje procesov ROTS (slika 45) je grafično orientiran. Vsebuje različne gradnike za izgradnjo sistema. Ti gradniki se navezujejo na prekinitve, prekinitvene funkcije, procese, časovnike, medprocesna sporočila in prioritete izvajanja procesov. Prav tako vsebuje varnostne mehanizme-semaforje, ki nam pomagajo pri večprocesnem izvajanju. To je zelo pomembno, saj ne želimo nenadzorovane uporabe perifernih naprav s strani procesov.



Slika 45 – Vmesnik v Eclipse IDE za nastavljanje procesov ROTS

6.2 Protokol prenosa sporočil po omrežju

Protokol za prenos sporočil, nastavitev, komand in sinhronizacije je bil zasnovan tako, da bi kar najmanj obremenjeval omrežje in naprave. Poudarek je bil na čim manjši velikosti izmenjanih paketov. S tem smo pridobili tudi na podaljšani življenjski dobi baterijsko napajanih naprav. Protokol vsebuje štiri vrste sporočil, ki se izmenjavajo med napravami, in sicer:

- logirani telemetrijski podatki naprav,
- nastavitve naprav,
- komande za naprave,
- sinhronizacija naprav.

6.2.1 Logirani telemetrijski podatki naprav

Tip podatka	Številka vhoda	Časovna značka podatka	Vrednost
števnico stanje – CNT	0..3	čas v mili sekundah	0..4,294,967,295
digitalno stanje – DI	0..3	čas v mili sekundah	0 / 1
delovne ure – WH	0..3	čas v mili sekundah	0..4,294,967,295
analogno stanje – AI	0..1	čas v mili sekundah	0..1024
temperatura – OW	0	čas v mili sekundah	-55..125
digitalni izhod - DO	0..1	čas v mili sekundah	0 / 1

Tabela 7 – Struktura logiranih telemetrijskih podatkov

Tip podatka	Številka vhoda	Časovna značka podatka	Vrednost
8 bitov	8 bitov	32 bitov	32 bitov

Tabela 8 – Velikost posameznih elementov za logirane telemetrijske podatke

Telemetrijske podatke pošiljata samo usmerjevalnik in končna naprava koordinatorju. Sporočilo za pošiljanje podatkov je prilagojeno tako, da lahko pošljamo z enim sporočilom vse telemetrijske podatke, ki jih omogoča naprava. Struktura sporočila je prikazana v tabeli 7, velikost sporočil pa v tabeli 8.

6.2.2 Nastavitve naprav

Ob zagonu je naprava nastavljena na neke prej nastavljene nastavitve. Nastavitve se nanašajo na delovanje vhodov, vrsto vhoda, intervalov branja ali vzorčenja. Če bi želeli spremeniti delovanje naprave, ji moramo spremeniti nastavitve posameznih vhodov. Da ne bi ponovno fizično posegali v napravo, ji je možno nastavitve poslati preko omrežja. Struktura sporočila je predstavljena v tabeli 9, velikosti posameznih elementov sporočila pa v tabeli 10. Koordinator prejme nastavitve od GsmBox2, ta pa jih posreduje določeni napravi. Ko naprava prejme nove nastavitve, jih obdela in shrani v zunanji pomnilnik.

Tip podatka	Številka vhoda	Časovni interval branja
števnico stanje – CNT	0..3	čas v mili sekundah
digitalno stanje – DI	0..3	čas v mili sekundah
delovne ure – WH	0..3	čas v mili sekundah
analogno stanje – AI	0..1	čas v mili sekundah
temperatura – OW	0	čas v mili sekundah

Tabela 9 – Struktura nastavitvenih podatkov

Tip podatka	Številka vhoda	Časovni interval branja
8 bitov	8 bitov	32 bitov

Tabela 10 – Velikost posameznih elementov za nastavitve

6.2.3 Komande za naprave

Po prejeti zahtevi s strani GsmBox2 se komanda, ki ima strukturo (tabela 11) ter velikost elementov (tabela 12), pošlje preko serijske povezave na koordinator. Koordinator komando obdela in jo posreduje namenjeni napravi. S komandami imamo možnost, da na oddaljenih napravah vklapljam in izklapljam digitalna izhoda.

Tip podatka	Številka izhoda	Vrednost
digitalni izhod - DO	0..1	0..1

Tabela 11 – Struktura komand

Tip podatka	Številka izhoda	Vrednost
8 bitov	8 bitov	8 bitov

Tabela 12 – Velikost posameznih elementov za komande

6.2.4 Sinhronizacija naprav

Za delovanje naprav je zelo pomembna sinhronizacija. Vsi procesi, ki se odvijajo v napravi, so vsaj posredno povezani z uro. Zato se sinhronizacija izvaja tako, da ko naprave pošljejo telemetrijske podatke, koordinator pošlje še sinhronizacijsko sporočilo, ki ima strukturo, predstavljeno v tabeli 13. To nam omogoča, da ne glede na vrsto naprave, usmerjevalnik ali končno napravo, sporočilo prispe do naslovnika. Velikost sporočila je tudi zato tako majhna (tabela 14).

Ura v mili sekundah
0.. 86,400,000

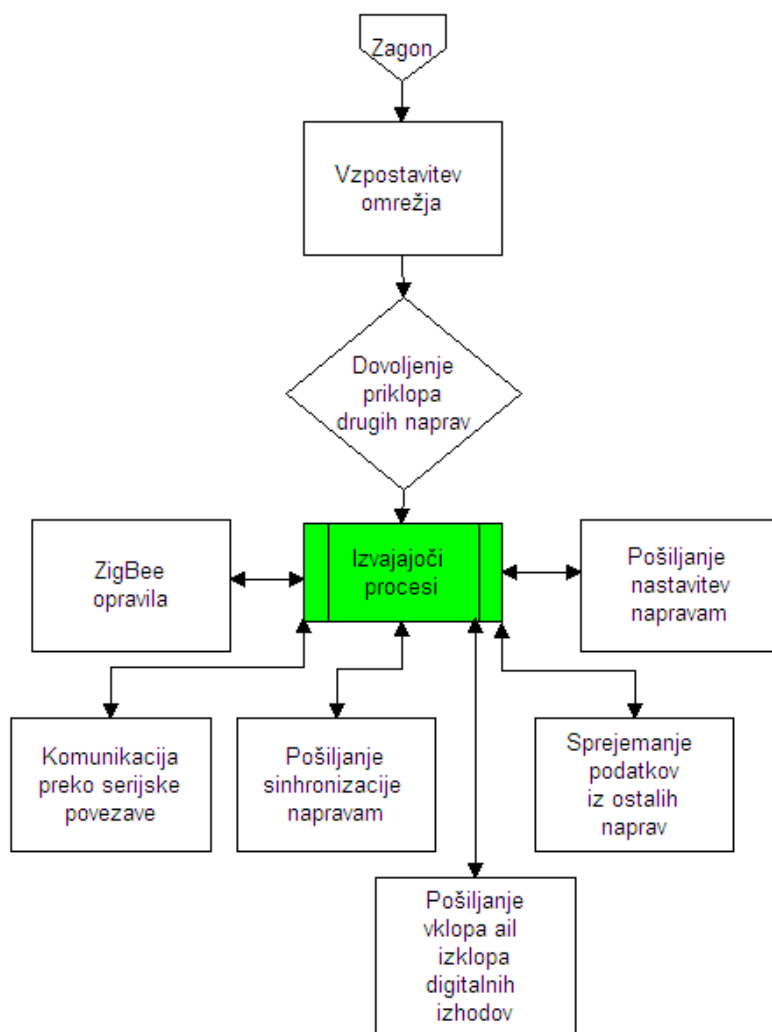
Tabela 13 - Struktura sinhronizacije

Ura v mili sekundah
32 bitov

Tabela 14 – Velikost sinhronizacijskega elementa

6.3 Koordinator

Koordinator je prvenstveno namenjen postavitvi omrežja, njegovemu nadzoru ter sprejemanju in pošiljanju sporočil ostalim napravam. V omrežju ima vlogo gospodarja in ostale naprave so mu podrejene. Na njem se izvajajo ločeni procesi, ki so prikazani na sliki 46.



Slika 46 – Shema delovanja koordinatorja in procesov, ki se izvajajo

V našem primeru koordinator poleg dela z omrežjem opravlja še naslednje naloge:

- sprejemanje podatkov,
- pošiljanje nastavitve napravam,
- pošiljanje sinhronizacije napravam,
- pošiljanje vklopa in izklopa digitalnih izhodov,
- komunikacija preko serijske povezave z GsmBox2,
 - o pošiljanje sprejetih podatkov,

- o sprejemanje nastavitev za naprave,
- o sprejemanje komand za naprave,
- o sprejemanje sinhronizacije.

Pri sprejemu podatkov iz ostalih naprav se podatki shranjujejo v pomnilnik in se hranijo do pošiljanja preko serijske povezave. Zaradi tega smo v pomnilniku implementirali krožni vnos podatkov, ki zagotavlja neprestano polnjenje in praznjenje.

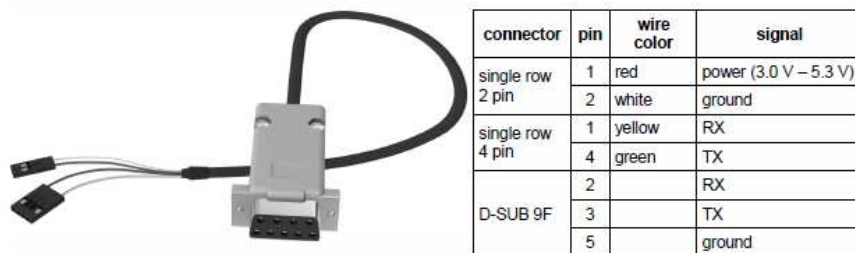
Če želimo spremeniti delovanje usmerjevalnika ali končne naprave je možno poslati spremenjene nastavitve naprave. Te nastavitve se tičejo telemetrijskih vhodov in izhodov. Tako je možno spreminjanje načina delovanja digitalnih vhodov, analognih vhodov, 1-Wire vhoda, intervalov vzorčenja, intervalov pošiljanja in izklopa določenih vhodov. Koordinator prejme nastavitve naprav po serijski povezavi od GsmBox2.

Ko oddaljena naprava pošlje podatke, se ji poleg potrditve pošlje še ura, ki je v formatu UTC. Oddaljena naprava, ki je lahko baterijska ali stalno napajana, se v primeru prevelikega odstopanja lahko sinhronizira. Sinhronizacija je izvedena zato, ker je nemogoče sinhronizirati naprave, ki so v spanju. V tem primeru pa poleg potrditve pošljemo še uro in s tem prihranimo na energiji naprave.

Vklop ali izklop digitalnih izhodov prejme koordinator po serijski povezavi od GsmBox2. Koordinator prejeto komando obdela in jo pošlje zahtevani oddaljeni napravi. V potrditev dobi novo stanje digitalnega izhoda.

6.3.1 Protokol med koordinatorjem in GsmBox2

Serijski protokol med koordinatorjem in GsmBox2-om se uporablja za prenos logiranih podatkov, nastavitev in sinhronizacije. Serijska komunikacija poteka pri hitrosti 115200 Bd (baud rate), brez paritete, 8 podatkovnih bitov, 1 stop bit in brez kontrole prenosa (none flow control). Ker na koordinatorju uporabljamo UART TTL nivoje na GsmBox2 pa RS-232, smo koordinator in GsmBox2 povezali z UART - RS-232 konvertorjem, ki je prikazan na sliki 47.



Slika 47 – Slika UART - RS-232 konvertorja CAB-SER-02 in priključitvena shema [28]

6.3.1.1 Pošiljanje sprejetih podatkov

Koordinator po sprejetju telemetrijskih podatkov od oddaljenih naprav podatke vpiše v sklad. Interval proženja pošiljanja sprejetih podatkov po serijski povezavi poteka na 5 sekund. Zakasnitev je tu prisotna zaradi prioritete sprejemanja podatkov iz naprav, saj ob takojšnjem pošiljanju lahko ne bi uspeli sprejeti podatke iz vseh naprav. Podatki se pošiljajo po naslednji strukturi tabela 15. Struktura je zasnovana tako, da je enotna za vse vrste podatkov (tabela 16), le vrednosti so drugačne. S tem smo poenostavili postopek pošiljanja in se izognili raznovrstnim transformacijam podatkov.

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	MAC naslov naprave	Tip podatka	Številka vhoda	Časovna značka podatka	Vrednost	End of text	Konec sporočila
0x01	DATA	0x02	MAC ⁴	števnico stanje – CNT	0..3	čas v mili sekundah	0..4,294,967,295	0x03	0x0d
0x01	DATA	0x02	MAC	digitalno stanje – DI	0..3	čas v mili sekundah	0 / 1	0x03	0x0d
0x01	DATA	0x02	MAC	delovne ure – WH	0..3	čas v mili sekundah	0..4,294,967,295	0x03	0x0d
0x01	DATA	0x02	MAC	analogno stanje – AI	0..1	čas v mili sekundah	0..1024	0x03	0x0d
0x01	DATA	0x02	MAC	temperatura – OW	0	čas v mili sekundah	-55..125	0x03	0x0d
0x01	DATA	0x02	MAC	digitalni izhod – DO	0..1	čas v mili sekundah	0 / 1	0x03	0x0d

Tabela 15 – Struktura logiranih podatkov, ki se pošiljajo GsmBox2-u

⁴ MAC (Media Access Control Address) je unikatni naslov naprave, ki je zapisan z EUI-64 standardom in velikosti 64 bitov

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	MAC naslov naprave	Tip podatka	Številka vhoda	Časovna značka podatka	Vrednost	End of text	Konec sporočila
8 bitov	32 bitov	8 bitov	64 bitov	8 bitov	8 bitov	32 bitov	32 bitov	8 bitov	8 bitov

Tabela 16 – Velikost posameznih elementov logiranih podatkov

6.3.1.2 Sprejemanje nastavitev za naprave

Nastavitvene naprave se kadarkoli pošiljajo iz GsmBox2 na koordinator. Tako imamo možnost, da kadarkoli spremenimo posamezne nastavitve oddaljene naprave in s tem njeno delovanje. Struktura sporočil (tabela 17) in velikosti (tabela 18) je poenotena za vse vrste vhodov, kar nam je omogočilo preprostejšo izvedbo. V sporočilu je najbolj pomemben MAC naslov, saj moramo poznati naslovnika, ki mu pošiljamo nastavitve. Ostali elementi sporočila so standardni in so podobni drugim sporočilom. Če se naslovnik ne nahaja na omrežju, sporočilo čaka v posebnem skladu. Ko se naslovnik prijavi, pošlje podatke in iz sklada mu posredujemo to nastavitveno sporočilo. Pri digitalnih vhodih je možno nastavljanje načina vzorčenja in interval vzorčenja. Analognim in 1-Wire vhodu pa lahko nastavljamo samo interval vzorčenja.

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	MAC naslov naprave	Tip podatka	Številka vhoda	Časovni interval branja	End of text	Konec sporočila
0x01	INIT	0x02	MAC	števnico stanje – CNT	0..3	čas v mili sekundah	0x03	0x0d
0x01	INIT	0x02	MAC	digitalno stanje – DI	0..3	čas v mili sekundah	0x03	0x0d
0x01	INIT	0x02	MAC	delovne ure – WH	0..3	čas v mili sekundah	0x03	0x0d
0x01	INIT	0x02	MAC	analogno stanje – AI	0..1	čas v mili sekundah	0x03	0x0d
0x01	INIT	0x02	MAC	temperatura – OW	0	čas v mili sekundah	0x03	0x0d

Tabela 17 – Struktura nastavitvenih podatkov, ki jih prejema koordinator od GsmBox2-a

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	MAC naslov naprave	Tip podatka	Številka vhoda	Časovni interval branja	End of text	Konec sporočila
8 bitov	32 bitov	8 bitov	64 bitov	8 bitov	8 bitov	32 bitov	8 bitov	8 bitov

Tabela 18 – Velikost posameznih elementov nastavitvenih parametrov

6.3.1.3 Sprejemanje komand za naprave

Ko pošlje GsmBox2 koordinatorju komando (struktura tabela 19 in velikost tabela 20) za vklop nekega digitalnega vhoda, koordinator najprej komando vpiše v sklad zaradi primera, da naslovljena naprava ni prisotna na omrežju. MAC naslov naprave nam predstavlja bistveni del sporočila, saj mora biti naslovnik znan.

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	MAC naslov naprave	Tip podatka	Številka vhoda	Vrednost	End of text	Konec sporočila
0x01	CMD	0x02	MAC	digitalni izhod - DO	0..1	0 / 1	0x03	0x0d

Tabela 19 – Struktura komand, ki jih prejema koordinator od GsmBox2-a

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	MAC naslov naprave	Tip podatka	Številka vhoda	Vrednost	End of text	Konec sporočila
8 bitov	24 bitov	8 bitov	64 bitov	8 bitov	8 bitov	32 bitov	8 bitov	8 bitov

Tabela 20 – Velikost posameznih elementov komand

6.3.1.4 Sprejemanje sinhronizacije

GsmBox2 pošilja sinhronizacijska sporočila (struktura tabela 21 in velikost tabela 22) koordinatorju vsakih 15 minut. S tem zagotavljamo časovno sinhronizacijo koordinatorja in ZigBee omrežja. Sinhronizacija je zelo pomembna pri pošiljanju podatkov in prejemanju alarmnih stanj, saj le tako lahko točno analiziramo zbrane podatke. Sinhronizacijska ura je zapisana v milisekundah in v UTC formatu. Z UTC formatom smo se izognili prestavljanju ure, kar včasih predstavlja velike težave. Uskladitev podatkov v pravi časovni pas in časovno obdobje se uredi na strežniški strani.

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	Ura v mili sekundah	End of text	Konec sporočila
0x01	SYNC	0x02	0.. 86,400,000	0x03	0x0d

Tabela 21 – Struktura sinhronizacijskega niza, ki ga prejema koordinator od GsmBox2-a

Start of heading	Tip podatkov	Start of text	Ura v mili sekundah	End of text	Konec sporočila
8 bitov	32 bitov	8 bitov	32 bitov	8 bitov	8 bitov

Tabela 22 – Velikost posameznih elementov sinhronizacijskega niza

6.4 Usmerjevalnik

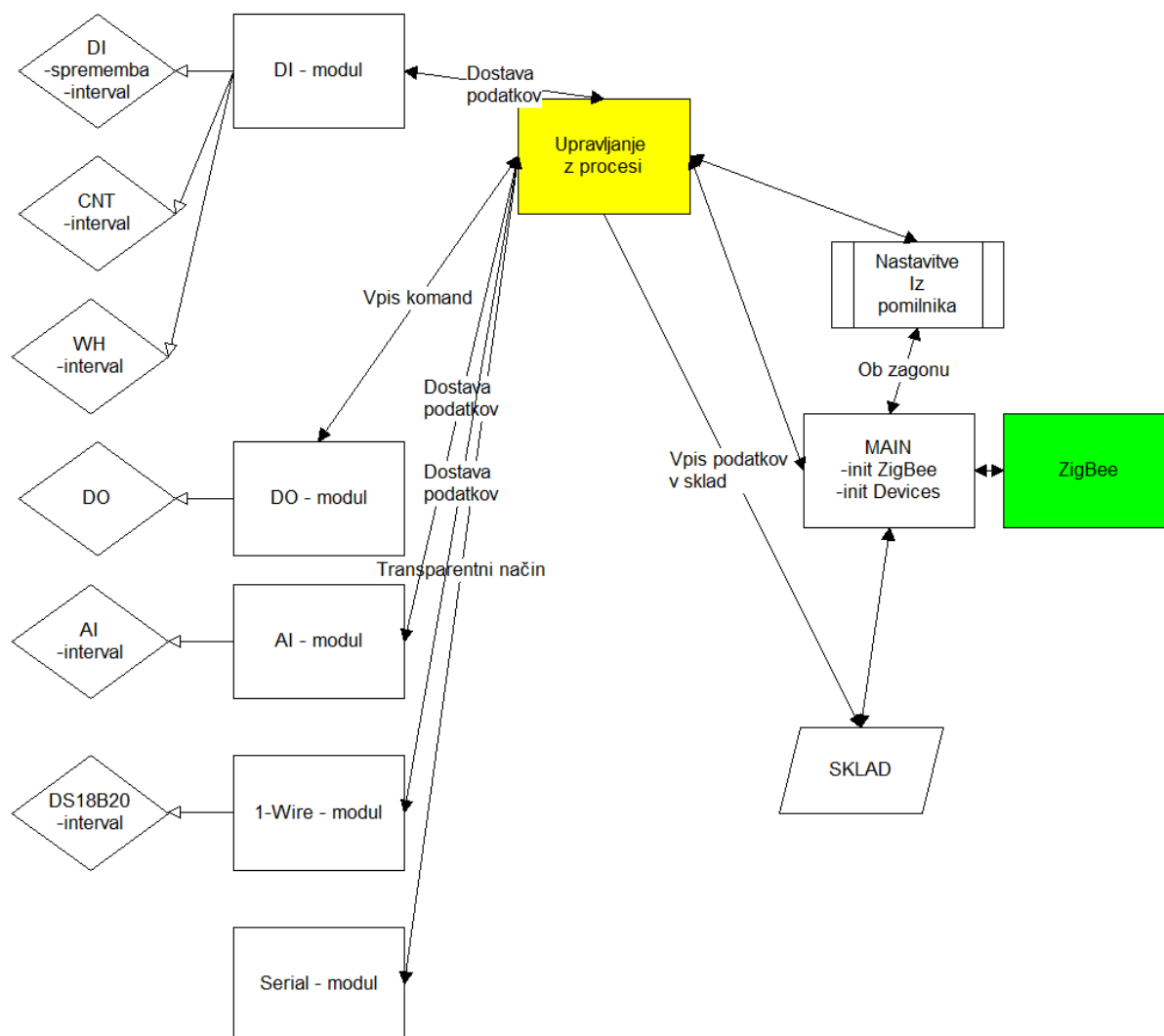
Delovanje usmerjevalnika se od končne naprave razlikuje samo po razširjeni implementaciji ZigBee protokola. Naloge in opravila, ki jih tako dodatno opravlja, so sprejemanje novih naprav v omrežje in posredovanje sporočil med koordinatorskim in napravami. Tako je zaradi specifičnosti delovanja neprestano napajan in vedno odziven na različne zahteve. Usmerjevalnik v svojem spominu hrani tabelo svojih sosedov in naprav, s katerimi je komuniciral. Tako mu ni potrebno vedeti, kje je koordinatorski, temveč samo, na kateri drugi usmerjevalnik je priključen. Podatke za koordinatorski vedno naslavlja nanj, in ne na povezano napravo. Za samo usmerjanje in vzdrževanje povezav skrbi ZigBee protokol. Shema procesov, ki se izvajajo na usmerjevalniku, je prikazana na sliki 48.

6.5 Končna naprava

Končna naprava je najmanj sposobna naprava ZigBee omrežja. Njena naloga je predvsem beleženje telemetrijskih podatkov in njihovo posredovanje koordinatorski ali usmerjevalniku. Njena omejena sposobnost izhaja iz dejstva, da večino časa naprava prespi in se zbujajo le v določenih trenutkih, na nastavljene intervale ali ob prekinitvah. Te prekinitve se nanašajo na digitalne vhode, ki so lahko nastavljeni na spremljanje stanja, številčno stanje ali delovne ure. Intervalno zbujanje je povezano z nastavitvijo naprave, odvisno od tega, kako je nastavljeno branje posameznih vodnih signalov (digitalni vhodi, analogni vhodi, 1-Wire vhod). S takim delovanjem končne naprave dosežemo, da se njena življenjska doba podaljša, saj je ponavadi baterijsko napajana. Shema procesov, ki se izvajajo na končni napravi, je prikazana na sliki 48.

6.6 Programska implementacija procesnih modulov

Zaradi lažjega dela in kasnejšega dograjevanja naprave smo si implementacijo procesov, ki upravljajo in nadzorujejo napravo, zamislili po principu modulov (slika 48). Tako je možno posamezne že implementirane module dodajati ali odstranjevati, najbolje pa je to, da je dodajanje novih modulov enostavno.



Slika 48 – Shema procesov, ki tečejo na napravi

6.6.1 Inicializacija naprave in priklop na omrežje

Ob prvem zagonu naprave se mora naprava inicializirati in priklopiti na omrežje ZigBee. Pri inicializaciji se iz pomnilnika preberejo privzete nastavitve naprave, naložijo se kalibracijski

parametri za analogne vhode naprave, zažene se časovnik in ura realnega časa (RTC). Po inicializaciji naprava začne s priklopom na ZigBee omrežje. Najprej je potrebno naložiti in zagnati ZigBee sklad. Sedaj je mogoče začeti z iskanjem omrežja. Če je omrežje na voljo, začnemo s procesom priklapljanja, če pa ni, naprava ponovi iskanje čez določen interval. Če je to končna naprava, po izvedbi teh rutin preide v spanje.

6.6.2 Digitalni vhodi

Digitalni vhodi podpirajo tri možne načine beleženja spremljanja stanja, spremljanja števnega stanja in spremljanja delovnih ur. Zato je vsako od spremljanj teh stanj nekoliko drugačne izvedeno. Tako smo za potrebe spremljanja stanj implementirali dva načina, intervalno spremljanje stanj in spremljanje stanj na spremembo s prekinitvami. Branje digitalnih vhodov ima implementirano umeritveno (debounce) funkcijo vhoda, tako da je možno izločiti motnje, ki bi se lahko pojavile na povezavi od vira dajalnika stanj do naprave. Način spremljanja digitalnega vhoda pa je odvisen od nastavitev naprave.

Pri beleženju digitalnega stanja se uporabljata spremljanje na interval in spremljanje na prekinitve. Tako se ob spremembi digitalnega stanja naprava odzove in obdela potrebna opravila. Pri tej spremembi si naprava zabeleži čas spremembe in shrani stanje v sklad in pošlje podatke o dogodku. V primeru intervalnega branja pa naprava, po preteku določenega intervala, sproži proces branja digitalnega vhoda in odpošlje zabeležene podatke.

Spremljanje števnega stanja poteka na določeni interval in prav tako njegovo pošiljanje. Ob spremembi digitalnega stanja se naprava odzove in poveča vrednost števca. Po preteku določenega intervala se števčno stanje zabeleži, vpiše v sklad in odpošlje.

Delovne ure se uporabljajo za merjenje časa delovanj posameznih naprav. Potrebno je spremljanje spremembe digitalnih stanj in beleženje njihovih časovnih trajanj. Te vrednosti se prištevajo k sami vrednosti. Ko preteče nastavljena vrednost beleženja, se vrednost odčita, shrani v sklad in odpošlje.

6.6.3 Digitalni izhodi

Po prejemu komand po omrežju ZigBee se naprava odzove in sproži proces nastavljanja želenega digitalnega stanja izhoda. Po nastavitvi digitalnega stanja izhoda naprava prebere digitalno izhodno stanje, ga zabeleži v sklad in odpošlje. Ponovno branje in pošiljanje digitalnega izhodnega stanja izhaja iz tega, da je potreben nek varnostni postopek zagotovitve in potrditve, da se je komanda dejansko izvedla.

6.6.4 Analogni vhodi

Pri programski implementaciji analognih vhodov smo bili pozorni na to, da je možno tudi programsko umerjanje vhoda. Tako je možno iz dveh odčitanih točk določiti odstopanje analognega vhoda. Z nastavitvijo dveh parametrov vhod kalibriramo in zagotovimo njegovo pravilno delovanje. Branje analognih vhodov je izvedeno intervalno. Po preteku intervala naprava prebere stanje analognega vhoda, ga zabeleži v sklad in odpošlje.

6.6.5 Temperaturni senzor

Za senzor temperature smo uporabili digitalno tipalo DS1820-PAR podjetja Dallas Semiconductors. Senzor parazitno napajamo tako, da ne potrebujemo dodatnega napajanja. Osnovna lastnost senzorja je, da sta merjenje in pretvorba temperature v digitalno obliko združena v enem integriranem vezju. Za potrebe branja temperaturnega senzorja je bilo potrebno implementirati 1-Wire protokol. Zato smo v ta namen porabili dva digitalna vhoda/izhoda. S spreminjanjem in branjem digitalnih vhodov/izhodov smo izdelali funkcije za branje in pisanje za sam senzor. 1-Wire protokol nam omogoča, da lahko priključimo več senzorjev na eno vodilo. Za delovanje na skupnem vodilu potrebuje vsak senzor svoj naslov. Ta naslov je zapisan v obliki 13-bitne CRC kode, ki je identična vsakemu senzorju posebej. Ko je naslov prebran in potrjen, lahko steče komunikacija med mikrokontrolnikom in tipalom.

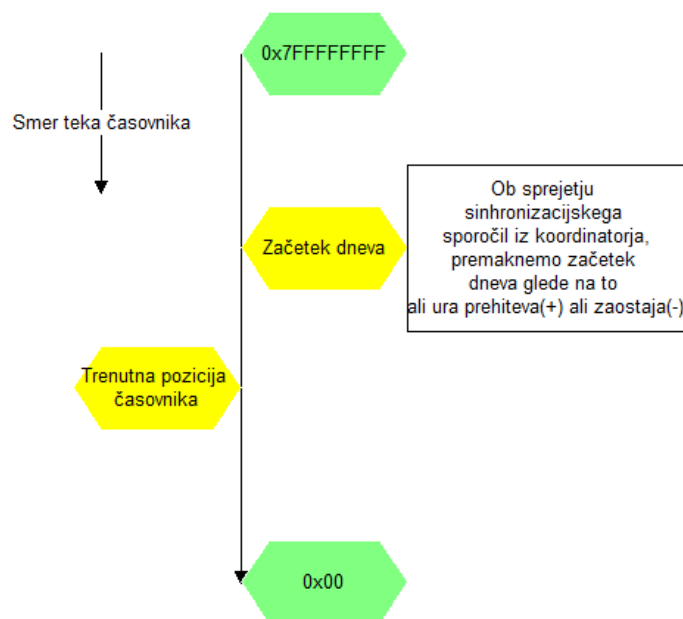
Tehnične značilnosti tipala DS1820-PAR:

- 1-Wire vodilo,
- merjenje temperature od -55 °C do +125 °C na 0,5 °C natančno,
- ne potrebuje zunanjih komponent,
- lahko ga napajamo preko podatkovne linije (parazitno napajanje),

- temperatura je zapisana v 9-bitni digitalni obliki,
- pretvorba temperature v digitalno obliko se izvrši v maksimalno 250 ms,
- nastavitve brez napajalne alarmne temperature,
- možnost uporabe kot temperaturni regulator.

6.6.6 Ura realnega časa

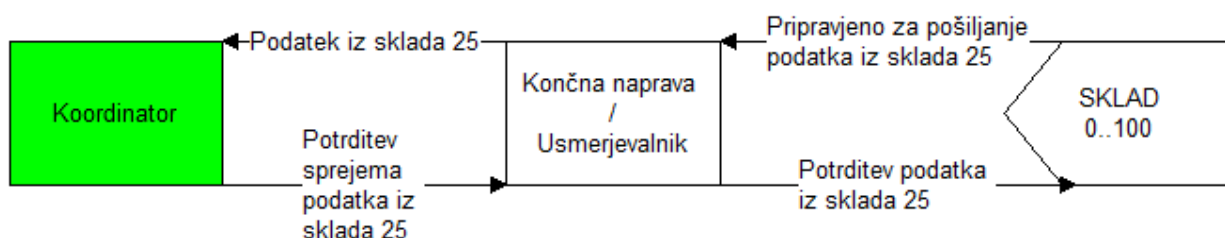
Za točno logiranje podatkov in natančno spremljanje dogodkov potrebujemo uro, ki je sinhronizirana na neko referenčno napravo. Ta naprava je v našem omrežju koordinator. Ker modul JN5148 nima integrirane ure realnega časa (RTC, real time clock), ga je bilo potrebno implementirati na drugačen način. Težavo predstavljajo že končne naprave, ki prehajajo iz stanja budnosti v stanje spanja. Zato smo uporabili strojni časovnik modula, ki ima možnost teči tudi v spalnem načinu delovanja modula. Zaradi preprostosti naprav in nezahtevnega urnika naprav nismo potrebovali implementacije celotnega koledarja. Tako smo lahko implementirali samo en dan. Časovnik, ki teče v modulu, je odštevalni. Ob prehodu 0 začne ponovno pri maksimalni vrednosti, ki je 35-bitna in ima maksimalno vrednost 0x7FFFFFFF. Tako smo pustili, da časovnik neprestano teče, mi pa premikamo samo začetek dneva (slika 49). Pri sinhronizaciji ure tako samo premikamo začetek dneva. Resolucija ure je v milisekundah.



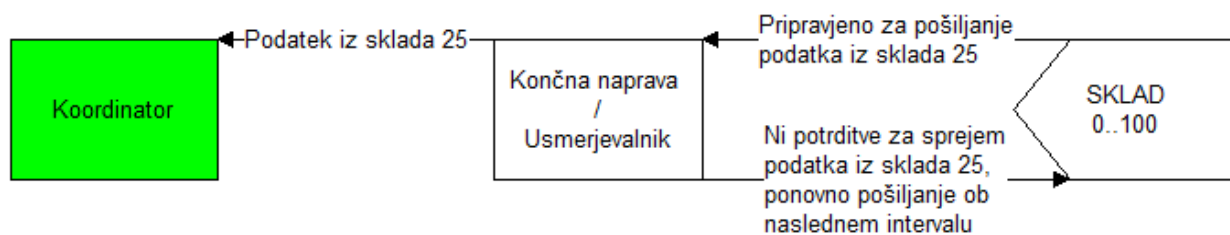
Slika 49 – Shema teka časovnika, ki je implementiran kot ura realnega časa

6.6.7 Pošiljanje in potrjevanje podatkov

Pri pošiljanju zalogiranih telemetrijskih podatkov je bilo potrebno uvesti nek potrjevalni mehanizem. Tako smo implementirali sklad, kamor se shranjujejo vsi zalogirani podatki. To nam omogoča, da v primeru nedostavljenega podatka koordinatorju ali nedostopnosti omrežja podatke lahko pošljemo naslednjič. Mehanizem deluje na principu pošiljanja in potrjevanja. Zalogiran podatek pošljemo koordinatorju, ta pa nam mora potrditi njegovo sprejetje (slika 50). Če koordinators tega ne naredi, menimo, da sporočilo ni bilo uspešno dostavljeno (slika 51). To si zabeležimo v prej omenjenem skladu. Tako pri ponovnem pregledu sklada in ugotovitvi, da obstajajo še kakšna nedostavljena sporočila, postopek pošiljanja ponovimo. Zaradi omejene velikosti sklada, je sklad organiziran na principu krožnega pomnilnika.



Slika 50 – Primer uspešnega pošiljanje podatka iz sklada



Slika 51 – Primer neuspešnega pošiljanje podatka iz sklada

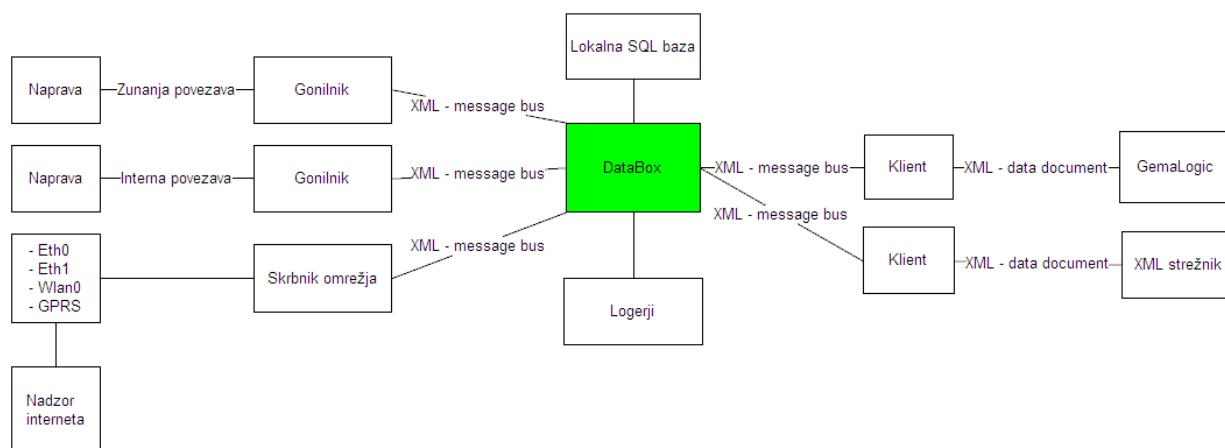
7 Vključitev v sistem Solvere Lynx

Pri specifikaciji brezžičnih senzorskih naprav je bil eden od pogojev tudi vključitev v obstoječi sistem Solvere Lynx. To je pri napravah drugih proizvajalcev predstavljalo precej težav, ki so se kazale v različnih prenosih podatkov na strežniške sisteme. Pri lastnem razvoju brezžičnih naprav se je že v razvoju naprav predhodno prilagodil protokol prenosa sporočil iz koordinatorskega na GsmBox2, ki je prikazan na sliki 52.



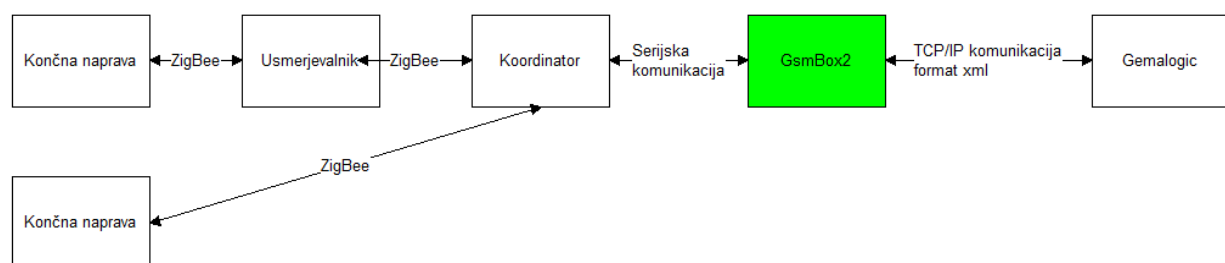
Slika 52 – GsmBox2

GsmBox2 je druga generacija koncentradorja za različne vrste senzorskih in merilnih naprav. Zasnovan je bil tako, da je nanj mogoče priklopiti najrazličnejše senzorske in merilne naprave. Naprava je vgrajen sistem (ang. embedded system) z operacijskim sistemom Linux. Sistem, ki je bil vzpostavljen na napravi, je bil zgrajen na principu modularnosti. Jedro je glavni proces DataBox, ki skrbi za delovanje ostalih procesnih modulov. Ti procesni moduli so internetna povezava, GPRS komunikacija, sinhronizacija, shranjevanje logiranih podatkov v bazo in moduli, ki se uporabljajo za odčitavanje ali zbiranje podatkov iz različnih naprav. Struktura in komunikacije med moduli so prikazane na sliki 53.



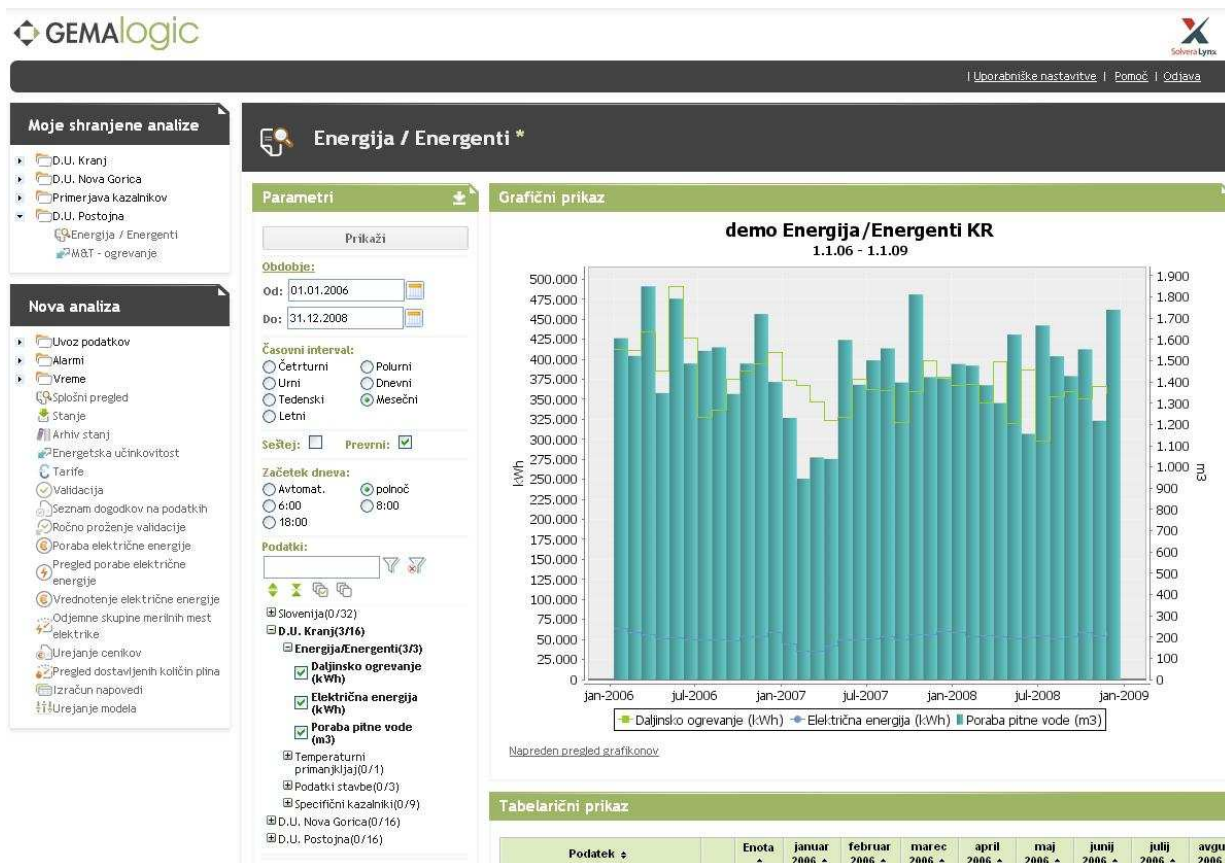
Slika 53 – Shema procesov v GsmBox2

Priključitev koordinatorskega modula na GsmBox2 tako ni delala večjih težav. Shematični prikaz komunikacij je prikazan na sliki 54. Potrebno je bilo le napisati gonilnik in komunikacijski modul za komunikacijo s koordinatorskim modlom, v katerem so implementirana vsa sporočila, ki si jih naprave izmenjujejo. Za pošiljanje na strežnik tako skrbi GsmBox2. Tako se v primeru nepovezanosti z oddaljenim strežnikom logirani podatki zapisujejo v bazo, ko pa se povezava vzpostavi, se odpošljejo. Za analizo podatkov, ki se zbirajo na strežniku, skrbi informacijski sistem za energetskega menedžmenta GemaLogic.



Slika 54 – Prikaz komunikacije med brezžičnimi napravami, GsmBox2-om in GemaLogic

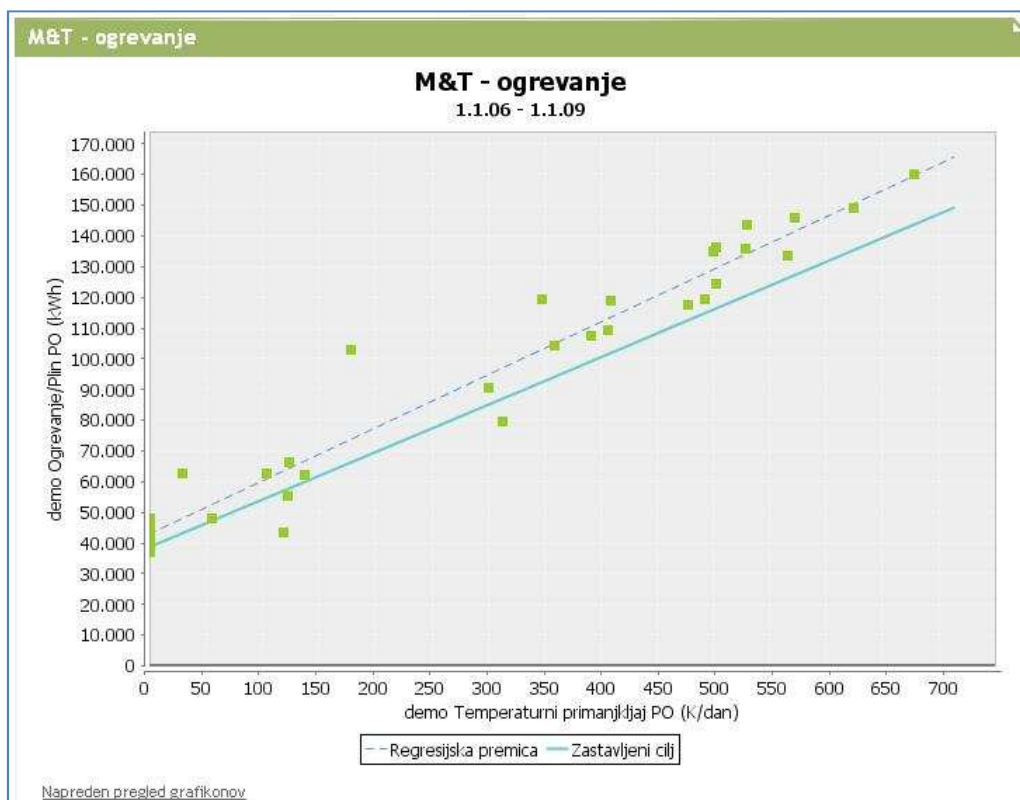
GemaLogic omogoča popolno informacijsko podporo v skladu z zahtevami standarda za upravljanje z energijo EN16001 po informacijski podpori delovanja standarda ter podjetju predstavlja celovito informacijsko in komunikacijsko orodje na področju energetske učinkovitosti, hkrati pa ponuja ustrezno podporo načrtovanju, izvajanju in uporabi standarda za upravljanje z energijo EN16001 [3].



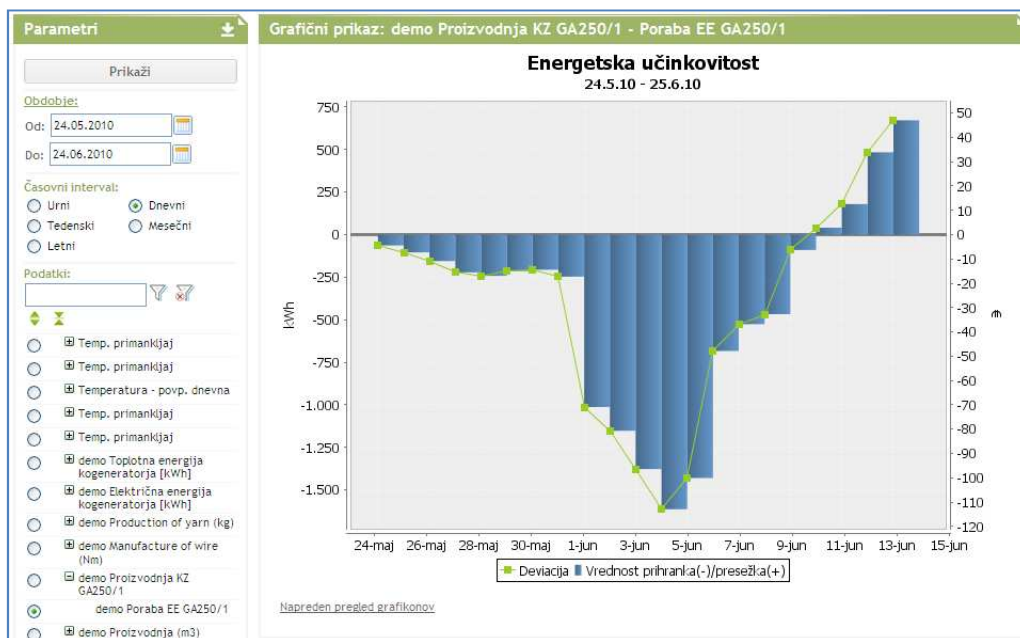
Slika 55 – Splošni pregled podatkov v informacijskem sistemu [2]

Uporabniku takšnega informacijskega sistema, ki vsebuje več energetske in stroškovne analize (slika 56, slika 57), je zagotovljeno:

- spremljanje procesnih podatkov,
- takojšnje opozorilo, če je prišlo v proizvodnji ali zgradbi do kakšnih alarmov,
- sprotno spremljanje trendov porabe energije in energetske (karakteristične) kazalnike (slika 55),
- možnost vrednotenja posameznih varčevalnih ukrepov, bodisi organizacijskih ali investicijskih,
- možnost napovedovanja porabe goriv in ostale energije za naslednjo sezono,
- boljše upravljanje proizvodnje in sistemov in posledično prihranek pri stroških energije.



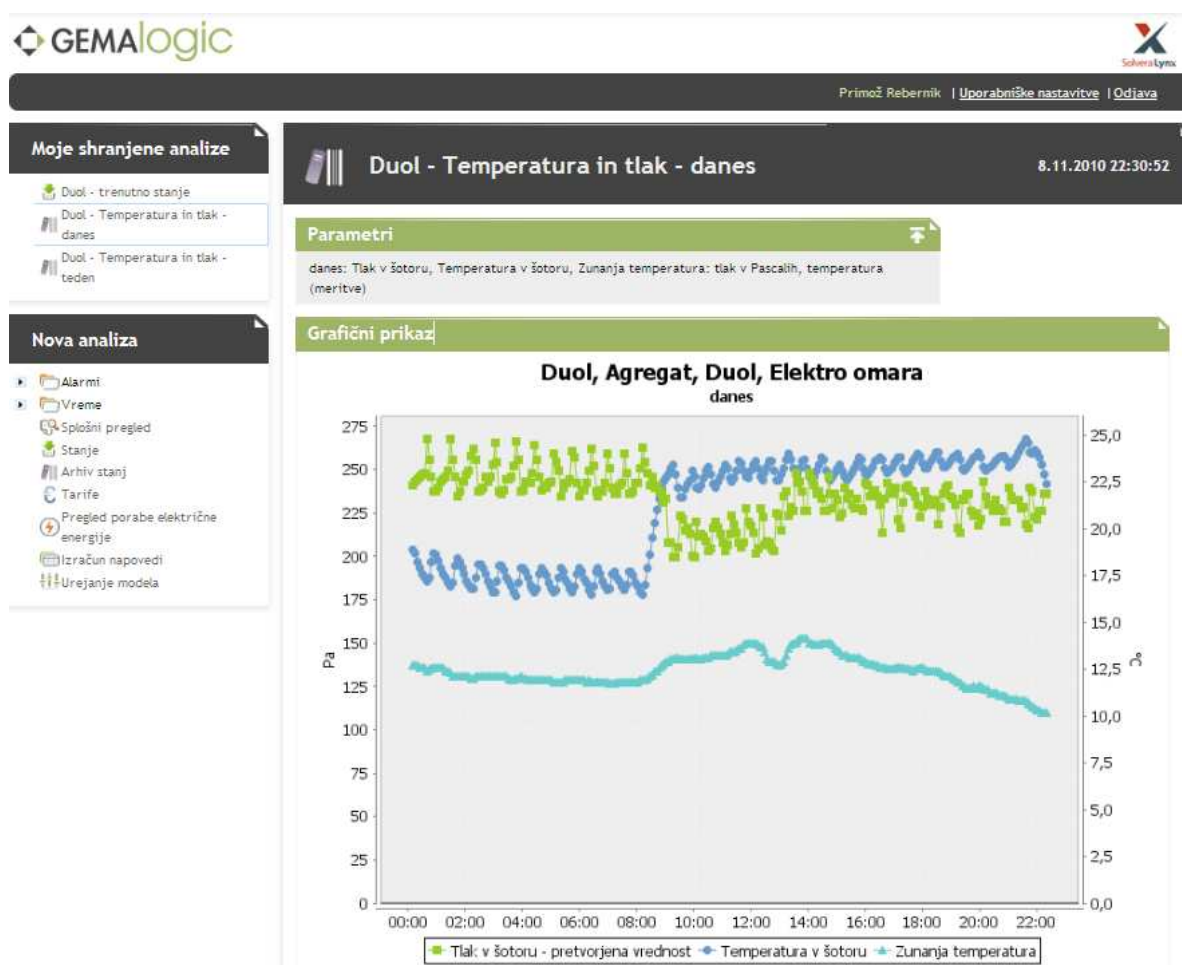
Slika 56 – Diagram ciljnega spremljanja rabe energije



Slika 57 – CuSum analiza za sprotno spremljanje energetske učinkovitosti tako z energijskim kot tudi s finančnim vrednotenjem

8 Primeri rabe naprav

Prvi sistem ZigBee telemetrijskih naprav je bil postavljen na Osnovni šoli Brezovica za krmiljenje in nadzor samostojnega napihljivega šotoru. Šotor deluje na osnovi nadtlaka v šotoru. Kolikor ta pade pod določeno mejo, se šotor začne sesedati. Tako smo s podjetjem Duol d.o.o, postavili pilotni projekt za nadzor in spremljanje. Nadzor in krmiljenje vključujeta spremljanje procesnih podatkov (delovanja ventilatorja, delovanje generatorja, tlaki, zunanja temperatura, notranja temperatura, delovanje luči,...) in krmiljenje ogrevanja ter razsvetljave šotoru. Ti podatki omogočajo upravljavcu šotoru nadzor in krmiljenje, kar se lahko vidi iz slike 58.

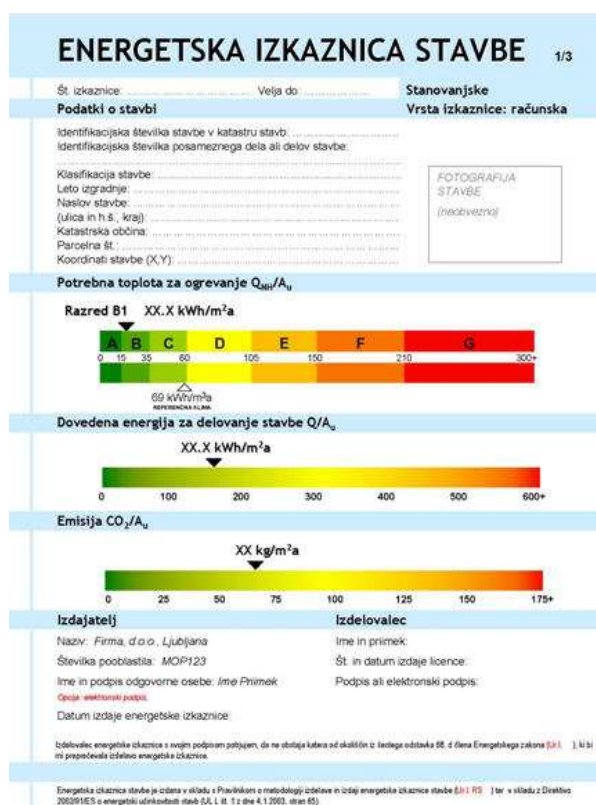


Slika 58 – Prikaz tlaka, zunanje temperature in notranje temperature za šotor

Po končani fazi testiranja naprav želimo naprave uporabiti za spremljanje energetske izkaznice stavb. Za zmanjšanje porabe energije v stavbah je v energetskem zakonu predvidena izdelava energetskih izkaznic stavb, s katero se dokazuje energetska učinkovitost stavb. V informacijskem sistemu bo mogoče dobiti vse potrebne podatke za izdelavo energetske izkaznice. Potrebni energijski kazalniki za izdelavo energetske izkaznice so naslednji:

- letna dovedena energija ($\text{kWh/m}^2\text{a}$),
- letna emisija CO_2 ($\text{kg/m}^2\text{a}$),
- letna poraba električne energije ($\text{kWh/m}^2\text{a}$) - pri obstoječih nestanovanjskih stavbah,
- letna potrebna toplota za ogrevanje ($\text{kWh/m}^2\text{a}$) - pri novozgrajenih in stanovanjskih stavbah.

Vse meritve so izmerjene na enoto uporabne površine stavbe (m^2).



ENERGETSKA IZKAZNICA STAVBE 1/3

Št. izkaznice: _____ Velja do: _____ Stanovanjske
 Podatki o stavbi Vrsta izkaznice: računska

Identifikacijska številka stavbe v katastru stavb: _____
 Identifikacijska številka posameznega dela ali delov stavbe: _____

Klasifikacija stavbe: _____
 Leto izgradnje: _____
 Naslov stavbe: _____
 (ulica in h.š., kraj): _____
 Katastrska občina: _____
 Parcelna št.: _____
 Koordinati stavbe (X,Y): _____

FOTOGRAFIJA STAVBE (neobvezno)

Potrebna toplota za ogrevanje Q_{og}/A_u

Razred B1 XX.X $\text{kWh/m}^2\text{a}$

0 15 35 60 105 150 210 300+

Dovedena energija za delovanje stavbe Q/A_u

XX.X $\text{kWh/m}^2\text{a}$

0 100 200 300 400 500 600+

Emisija CO_2/A_u

XX $\text{kg/m}^2\text{a}$

0 25 50 75 100 125 150 175+

Izdajatelj Izdelovalec

Naziv: Firma, d.o.o., Ljubljana Ime in priimek: _____
 Številka pooblastila: MOP123 Št. in datum izdaje licence: _____
 Ime in podpis odgovorne osebe: Ime Priimek Podpis ali elektronski podpis: _____
 Datum izdaje energetske izkaznice: _____

Izdelovalec energetske izkaznice s svojim podpisom potrjuje, da ne obstaja katera od okoliščin iz četrtega odstavka 88. člena Energetikega zakona (E.Z.), ki bi mu preprečevala izdelavo energetske izkaznice.

Energetska izkaznica stavbe je izdelana v skladu s Pravilniki o metodologiji izdelave in izdaji energetske izkaznice stavbe (SI) ter v skladu z Direktivo 2002/91/ES o energetski učinkovitosti stavb (A, L št. 1 z dne 4.1.2003, stran 85).

Slika 59 – Energetska izkaznica stavbe [1]

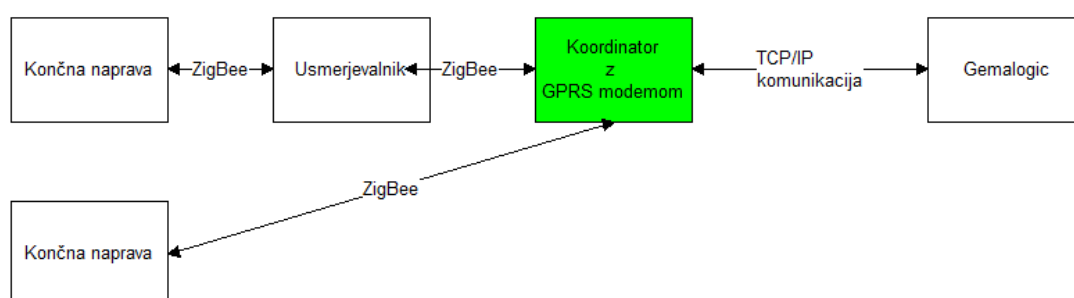
Na podlagi meritev, ki se lahko pridobijo iz informacijskega sistema, se stavbo uvrsti v določen energetski razred (novozgrajene in obstoječe stanovanjske stavbe) ali pa se stavbo prikaže na barvnem poltraku za porabo energije oz. emisij CO_2 (obstoječe nestanovanjske stavbe) (slika 59).

9 Zaključek

Diplomsko delo je plod dela in razvoja brezžičnih telemetrijskih naprav v podjetju Solvera Lynx d.d. Naprave so bile razvite zaradi potrebe po novih možnostih odčitavanja raznovrstnih telemetrijskih podatkov. Tako je bila zasnovana in razvita univerzalna tiskanina za koordinator, usmerjevalnik in končno napravo. Za vse naprave je bila razvita programska oprema. Naprave omogočajo odčitavanje telemetrijskih podatkov, medsebojno povezovanje in pokrivanje večjih območij. Za povezovanje in razširjanje dosega naprav je bila uporabljena tehnologija ZigBee, ki je bila zasnovana in razvita prav v te namene. Naprave nimajo velike praktične vrednosti, če analiza njihovih podatkov ni kakovostna. Zato podatke analiziramo in prikazujemo na zmogljivem orodju GemaLogic, ki je v neprestanem.

Delo na napravah še ni popolnoma zaključeno, saj bi bilo potrebno nekatere procese še nekoliko optimizirati in zagotoviti zanesljivejše delovanje. Prav tako se lahko vedno pojavijo nove zahteve kupcev po drugačnih načinih odčitavanja podatkov in po novih komunikacijah z zunanji senzorji.

V prihodnosti nas čaka posodobitev koordinatorja, tako da bi se izognili serijski povezavi z GsmBox2-om in bi koordinatorju dogradili GPRS modem, kar je prikazano na sliki 60. S tem bi dosegli večjo fleksibilnost sistema in privarčevali na ceni sistema, obenem pa bi lahko koordinator zaprli v samostojno ohišje.



Slika 60 – Shema novega sistema, pri katerem koordinator komunicira z GPRS modemom

10 Literatura

10.1 Literatura

- [1] Interna dokumentacija Solvera Lynx: Gradivo za EP - stavbe
- [2] Interna dokumentacija Solvera Lynx: Informacijski sistem industrija
- [3] Interna dokumentacija Solvera Lynx: Povezava GemaLogic - standard EN16001

10.2 Spletni viri (dostopnost november 2010)

- [4] Solvera Lynx d.d. : <http://www.solvera-lynx.com/>
- [5] GemaLogic : <http://www.gemalogic.eu/>
- [6] Gradniki telekomunikacijskih sistemov: <http://gtk.hopto.org/zikula/>
- [7] Coronis - Metering, Telemetry, RFID:
http://www.coronis.com/en/metering_telemetry_RFID.html
- [8] ZigBee Converter & ZigBee I/O Module:
http://www.icpdas.com/products/GSM_GPRS/wireless/solutions.htm#6
- [9] PICDEM Z Demonstration Kit :
http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en021925&part=DM163027-4
- [10] Drop-in Networking Starter Kit:
<http://www.digi.com/products/wirelessdropinnetworking/dinstarterkit.jsp#overview>
- [11] ATAVRRZ201 AVR Z-Link 5-pack 2.4 GHz RCB:
http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=4186
- [12] MeshNetics/Development Tools/Development Kit: <http://www.meshnetics.com/dev-tools/zdk/>

- [13] JN5148 Evaluation Kit:
http://www.jennic.com/products/development_kits/jn5148_evaluation_kit
- [14] InSight Development Kits:
http://www.ember.com/products_zigbee_development_tools_kits.html
- [15] Data Sheet - JN5148-001: http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-DS-JN5148-1v4.pdf
- [16] Product Brief - JN5148: http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-PB-JN5148-1v2_2.pdf
- [17] Data Sheet - JN5148-001-Myy: http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-DS-JN5148MO-1v2.pdf
- [18] Product Brief - JN5148 Module - Preliminary:
http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN5148-MO-PB%201v0.pdf
- [19] IEEE 802.15.4 Wireless Networks User Guide:
http://www.jennic.com/files/support_files/JN-UG-3024-IEEE802.15.4-1v1.pdf
- [20] IEEE 802.15 Working Group for WPAN: <http://www.ieee802.org/15/>
- [21] Merjenje oddaljenosti objektov s pomočjo brezžičnega omrežja ZigBee: <http://dkum.uni-mb.si/IzpisGradiva.php?id=11313>
- [22] Lokalizacijske tehnike v brezžičnih senzorskih omrežjih: <http://dkum.uni-mb.si/IzpisGradiva.php?id=12309>
- [23] IEEE 802.15.4 MAC User Guide:
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc5182.pdf
- [24] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs):
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>
- [25] Microchip predstavil Zigbee razvojno platformo z brezplačnim programskim skladom:
<http://www.svet-el.si/revija/index.php?Action=DETAIL&idd=119>
- [26] ZigBee kompatibilni moduli WL242: <http://www.atech.si/index.php?lang=1&page=16>
- [27] DS18S20-PAR Parasite-Power Digital Thermometer - Overview: <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/2816>

- [28] IQRF RS-232 CableUser's Guide:
http://www.iqrf.com/weben/edit_support/downloads.php?s=MNCABSER02_100720.pdf
- [29] Micropower 150 mA Low-Noise Ultra Low-Dropout LP2985:
<http://www.national.com/ds/LP/LP2985.pdf>
- [30] Vishay Siliconix - Si4134DY :<http://www.vishay.com/docs/68999/si4134dy.pdf>
- [31] 24AA01/24LC01B Data Sheet:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21711G.pdf>

IZJAVA

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Primož Rebernik

Šenčur, november 2010