



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Ivan Rašović

**PRAKTIČNA REALIZACIJA ZIGBEE MREŽA U INDUSTRIJSKIM
POSTROJENJIMA**

MASTER RAD

Podgorica, 2021.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: **Ivan Rašović**

Datum i mjesto rođenja: **23.08.1993. godine, Nikšić, Crna Gora**

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore, Elektronika, telekomunikacije i računari, 180 ECTS kredita, 2016.

Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore, Elektronika, telekomunikacije i računari (Smjer: Elektronika), 60 ECTS kredita, 2017.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Studijski program: Akademske magistarske studije, studijski program: Elektronika, telekomunikacije i računari

Naslov rada: **Praktična realizacija Zigbee mreža u industrijskim postrojenjima**

Fakultet na kojem je rad odbranjen: **Elektrotehnički fakultet, Podgorica**

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 20.11.2019.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 20.05.2020.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta:

1. **Prof. dr Radovan Stojanović**
2. **Prof. dr Zoran Mijanović**
3. **Prof. dr Nedeljko Lekić**

Mentor: Prof. dr Zoran Mijanović

Komisija za ocjenu rada:

1. **Prof. dr Radovan Stojanović**
2. **Prof. dr Zoran Mijanović**
3. **Prof. dr Nedeljko Lekić**

Komisija za odbranu rada:

1. **Prof. dr Radovan Stojanović**
2. **Prof. dr Zoran Mijanović**
3. **Prof. dr Nedeljko Lekić**

Datum odbrane: 28.06.2021.

Datum promocije: _____

Predgovor

Prikazani master rad, predstavlja nastojanje autora da na jednostavan i razumljiv način, kroz teorijski i praktični rad, čitaocu predoči potencijal Zigbee tehnologije.

Zahvaljujem se svome mentoru, prof. dr Zoranu Mijanoviću, na ukazanom povjerenju, kao i na savjetima i podršci prilikom izrade ovoga rada. Zahvaljujem mu se i na kontinuiranom podsticaju tokom osnovnih i master studija.

Takođe, koristim ovu priliku da izrazim zahvalnost prijateljima i kolegama na podršci i pomoći tokom studija. Ovaj rad posvećujem svojoj porodici – baki Zorici, ocu Rajku, majci Biljani i bratu Marku, bez čije pomoći, podrške, i podsticaja ne bi ni bilo ovoga rada.

Podgorica, jun 2021. godine

Ivan Rašović

Sažetak

Rad "Praktična realizacija Zigbee mreža u industrijskim postrojenjima" predstavlja aktuelnu temu iz oblasti bežičnih komunikacionih tehnologija i bavi se višestranom analizom Zigbee protokola kao što su pitanja njegove arhitekture, značaja i najčešće primjene (opisna i strukturna analiza), zatim digitalizacijom industrijskih postrojenja (funkcionalna analiza), kao i prikupljanjem i obradom podataka korišćenjem različitih računarskih alata i programerskih rješenja (kauzalna analiza).

Dolazak do zaključaka po predmetu ovog rada (Zigbee mreže) odvija se kroz nekoliko prostora opisne, strukturne, funkcionalne i kauzalne analize. U prvom, opisnom i strukturnom koraku, analizirani su principi Zigbee mreže, njena specifičnost i avangardnost kao osnova za razvoj komunikacione mreže ostvarene preko mikrokontrolerske razvojne platforme Arduino i digitalnog radio modula XBee. Funkcionalnom analizom je utvrđeno da Zigbee sistem omogućava pouzdanu bežičnu komunikaciju između udaljenih čvorova, čak iako ne postoji neposredan put između njih. Projektovani sistem, uz minimalne izmjene hardverske i softverske strukture, ima veoma širok spektar primjene.

Praktični prilog ovog rada se ogleda u strukturiranju i angažovanju sistema za kontrolu i monitoring industrijskog postrojenja „na daljinu“. Simulacija rada projektovanog sistema bežične komunikacije, predloženog u ovom radu, je izvršena u realnom industrijskom okruženju. Takođe, rezultati mjerenja, najznačajnijih parametara pouzdanog rada sistema, su predstavljeni u ovom radu.

Istraživanje je sprovedeno sa ciljem razvijanja sistema bežične industrijske komunikacije i kontrole industrijskog postrojenja. Znajući nedostatke i ograničenja konvencionalnih sistema industrijske komunikacije, svrha ovog rada je doprinos većem integrisanju bežičnih tehnologija na proizvodnim linijama, kao i smanjenju troškova implementiranja i održavanja takvog sistema. U radu je dat predlog sistema čije su značajne osobine njegova laka implementacija, mobilnost i jednostavnost upotrebe, efikasnost i pristupačna cijena.

Ključne riječi: industrijska proizvodnja, Zigbee, XBee, Arduino.

Abstract

The thesis "Practical implementation of Zigbee networks in industrial plants" is a actual topic in the field of wireless communication technologies and deals with the multifaceted analysis of Zigbee protocols such as its architecture, significance, and most common application (descriptive and structural analysis), then digitalization of industrial plants (functional analysis), as well as data collection and processing using various computer tools and programming solutions (causal analysis).

Conclusions on the subject of this paper (Zigbee network) take place through several spaces of descriptive, structural, functional, and causal analysis. In the first, descriptive and structural step, the principles of the Zigbee network, its specificity, and avant-garde as a basis for the development of the communication network realized through the microcontroller development platform Arduino and digital radio module XBee were analyzed. Functional analysis has shown that the Zigbee system enables reliable wireless communication between remote nodes, even if there is no direct path between them. The designed system, with minimal changes in hardware and software structure, has a very wide range of applications.

The practical contribution of this paper is reflected in the structuring and engagement of the system for control and monitoring of the industrial plant "remotely". The simulation of the operation of the designed wireless communication system, proposed in this paper, was performed in a real industrial environment. Also, the results of measuring the most important parameters of reliable system operation are presented in this paper.

The research was conducted to develop a system of wireless industrial communication and control of an industrial plant. Knowing the shortcomings and limitations of conventional industrial communication systems, the purpose of this paper is to contribute to the greater integration of wireless technologies on production lines, as well as to reduce the costs of implementing and maintaining such a system. The paper presents a proposal of a system whose significant features are its easy implementation, mobility and ease of use, efficiency, and affordable price.

Keywords: industrial production, Zigbee, XBee, Arduino.

Sadržaj

Popis slika	3
Popis tabela	5
Popis shema	5
1. Uvod	6
2. Bežične mreže	8
2.1 Elektromagnetno polje	8
2.1.1 Apsorpcija elektromagnetnih talasa	13
2.1.2 Difrakcija elektromagnetnih talasa	13
2.1.3 Refrakcija elektromagnetnih talasa	15
2.1.4 Refleksija elektromagnetnih talasa	15
2.1.5 Rasijanje radio signala	18
3. Komunikacioni protokoli	19
3.1 Standard RS-232	20
3.2 Standard RS-485	21
4. Zigbee protokol	24
4.1 Arhitektura Zigbee protokola	26
4.2 Vrste Zigbee uređaja	29
4.3 Topologije mreže.....	30
4.3.1 Topologija “Dva uređaja”	30
4.3.2 Topologija „Zvijezda“	30
4.3.3 Topologija “Stabla”	31
4.3.4 “Meš” topologija	32
4.4 Internet stvari (IoT)	33
4.5 Zigbee i druge bežične tehnologije	34
5. XBee uređaj i XCTU softver	38
5.1 Režim rada AT	39

5.2	API režim rada	41
5.2.1	API okvir.....	41
5.3	Režim spavanja	43
5.4	XCTU aplikacija	43
5.4.1	Podešavanje koordinatora	43
5.4.2	Podešavanje rutera	44
6.	Razvijeni sistem i rezultati simulacija.....	46
6.1	Hardverske komponente razvijenog sistema.....	51
6.1.1	USB adapter	51
6.1.2	Arduino Uno mikrokontroler	52
6.1.3	XBee shield.....	53
6.2	Arduino kod.....	56
6.3	Matlab GUI	57
6.4	Excel.....	59
6.5	VPN.....	60
6.5.1	LogMeIn Hamachi	61
6.6	Vijek trajanja baterije	63
6.7	Eksperimentalni rezultati.....	64
6.8	Cijena sistema	70
7.	Zaključak.....	71
8.	Literatura.....	72

Popis slika

Slika 1. Idejno rješenje predloženog sistema	7
Slika 2. Elektromagnetni spektar	9
Slika 3. Neke karakteristike elektromagnetnog talasa	10
Slika 4. Prostiranje elektromagnetnog talasa	11
Slika 5. Polarizacija elektromagnetnih talasa	11
Slika 6. Difrakcija radio signala.....	14
Slika 7. Difrakcija niskofrekventnog signala.....	14
Slika 8. Refrakcija elektromagnetnog talasa.....	15
Slika 9. Refleksija radio talasa.....	16
Slika 10. Parabolična antena	16
Slika 11. Refleksija radio talasa.....	17
Slika 12. Refleksija, difrakcija i rasijanje talasa	17
Slika 13. Rasijanje radio talasa	18
Slika 14. Upredanje žica	22
Slika 15. Topologije RS-485 protokola	23
Slika 16. IEEE 802 radne grupe.....	24
Slika 17. Topologije IEEE 802.15.4 standarda.....	25
Slika 18. Arhitektura Zigbee protokola	27
Slika 19. Komunikacioni kanali Zigbee tehnologije.....	28
Slika 20. Zigbee mreža	29
Slika 21. Topologija “Dva uređaja”.....	30
Slika 22. Topologija “Zvijezda”	31
Slika 23. Topologija “Stabla”	31
Slika 24. Topologija “Meš”	32
Slika 25. Wi-Fi komunikacioni kanali	34
Slika 26. Preklapanje Zigbee i Wi-Fi komunikacionih kanala	34
Slika 27. Poređenje bežičnih tehnologija.....	35
Slika 28. BLE komunikacioni kanali	36
Slika 29. XBee RF modul	38
Slika 30. Podešavanje AT režima rada	40
Slika 31. AT režim rada	40
Slika 32. API okvir	41

Slika 33. API režim rada.....	42
Slika 34. Podešavanje koordinatora.....	44
Slika 35. Podešavanje rutera.....	45
Slika 36. Proizvodni pogon Uniprom pekare.....	49
Slika 37. Jedan dio proizvodnog pogona „Uniprom“ pekare	49
Slika 38. Proizvodni pogon pekare „Uniprom“	50
Slika 39. USB adapter.....	51
Slika 40. Struktura Arduino Uno mikrokontrolera	52
Slika 41. Unutrašnja arhitektura Atmega328P i raspored pinova.....	53
Slika 42. XBee shield.....	54
Slika 43. Fritzing šema el. veza	55
Slika 44. Realizovani modul.....	55
Slika 45. Matlab GUI.....	57
Slika 46. Excel tabela.....	59
Slika 47. Grafik učinka mašina.....	60
Slika 48. Princip rada VPN-a.....	61
Slika 49. LogMeIn Hamachi.....	61
Slika 50. Podešavanje Hamachi mreže	62
Slika 51. MaxStream kalkulator	63
Slika 52. Odabir optimalnog kanala za prenos podataka.....	65
Slika 53. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 5 m	65
Slika 54. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 10 m	65
Slika 55. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 20 m	66
Slika 56. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 40 m	66
Slika 57. Procenat uspješnosti prenosa paketa podataka	66
Slika 58. Procenat uspješnosti prenosa paketa podataka	67
Slika 59. Propusnost sistema.....	68
Slika 60. Propusnost sistema.....	68
Slika 61. Komunikacija XBee uređaja.....	69
Slika 62. Komunikacija XBee uređaja.....	69

Popis tabela

Tabela 1. Stepen apsorpcije.	13
Tabela 2. Maksimalni dometi RS-232 standarda.	20
Tabela 3. Karakteristike XBee S2C uređaja	38
Tabela 4. Cijena predloženog sistema	70

Popis shema

Shema 1. Predloženi Zigbee sistem.....	48
--	----

1. Uvod

Stepen izgrađenosti privrede predstavlja najbolji pokazatelj cjelokupnog napretka jednog društva, tj. može se reći da je privreda jedan od najvažnijih pokretača razvoja. Samim tim, jedan od glavnih zamajaca društva predstavlja industrijska proizvodnja. Da bi preduzeća koja se bave industrijskom proizvodnjom bila konkurentna na savremenom tržištu, potrebno je zadovoljiti niz faktora među kojima je najbitniji kvalitet proizvoda koji napušta proizvodnu liniju. Zahvaljujući modernim komunikacionim tehnologijama unaprijeđuje se proizvodni proces, čime je i ostvarivanje zahtijevanog kvaliteta proizvoda značajno olakšano. Potreba za stvaranjem savremenih komunikacionih protokola datira od 50-ih godina prošlog vijeka, za koje se vezuje početak rapidnog razvoja računara i elektronike. Može se reći i da je potreba za računarskim umrežavanjem i razvojem današnjih protokola uslovljena i podstaknuta napretkom informacionih tehnologija i potrebom za dijeljenjem računarskih resursa. Pod umrežavanjem elektronskih uređaja misli se na njihovo povezivanje, radi dijeljenja resursa, odnosno razmjene podataka. Da bi bila moguća komunikacija između umreženih uređaja oni moraju koristiti isti komunikacioni protokol, sa ciljem obavljanja nekog zadatka [1].

Uređaje je moguće umrežiti kako žičanom infrastrukturom, tako i bežičnim tehnologijama. Bežičnim umrežavanjem uređaja izbjegava se korišćenje fizičkih medijuma (kablova), i ovako umrežena infrastruktura se naziva *bežičnom mrežom*. Zahvaljujući elektromagnetnim talasima, koji predstavljaju nosioce bežičnih tehnologija, podatke je moguće poslati na velike udaljenosti. Potreba za implementiranjem bežične mreže naročito se ogleda u nepristupačnim sredinama, gdje bi se upotrebom žičane infrastrukture naglasili nedostaci u smislu praktičnosti, složenosti sistema, komplikovanom instaliranju mreže, finansijskog opterećenja, itd. Kako bežični prenos informacija nesumljivo predstavlja budućnost komunikacije, tako je predmet istraživanja ovog rada Zigbee mreža i njena implementacija.

Zbog svoje energetske štedljivosti Zigbee protokol, kao i IEEE 802.15.4 standard na kojem se Zigbee protokol zasniva, nalaze svoju primjenu u velikom broju sfera ljudske djelatnosti. Ove bežične tehnologije nalaze primjenu u:

- medicini [2]-[6],
- poljoprivredi [7]-[9],
- stočarstvu [10]-[12],
- prehrambenoj industriji [13]-[15],
- pametnim kućama [16]-[19],
- kontrolisanju i prevenciji požara [20], [21],
- bezbjednosti na radu [22]

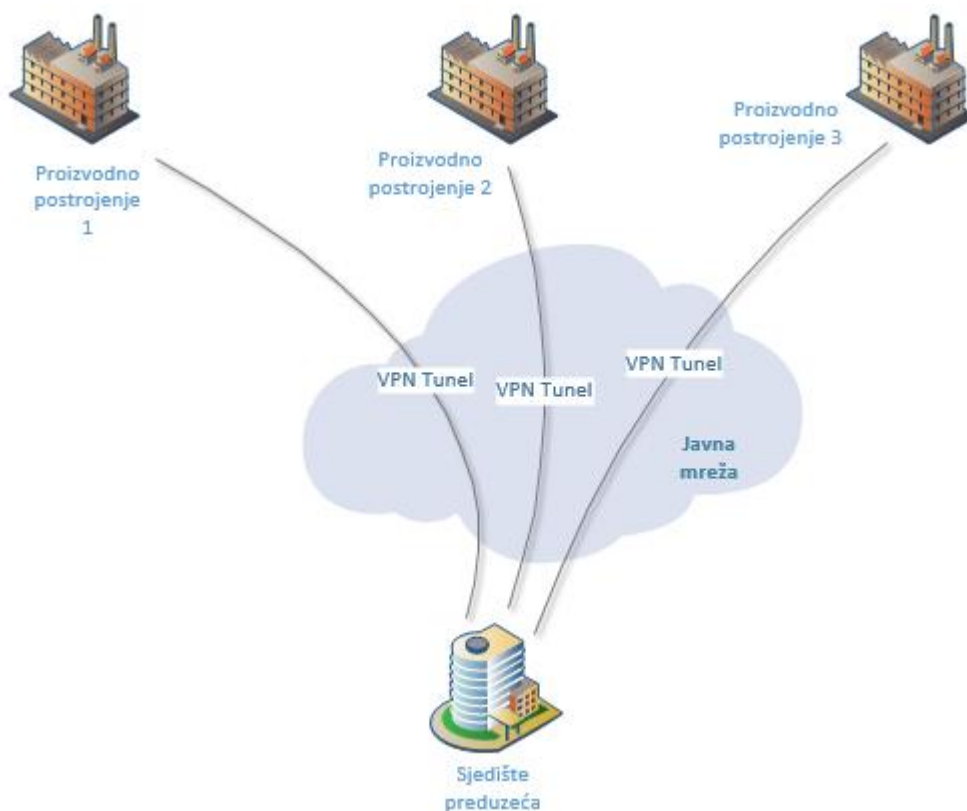
Jedna od industrijskih primjena bežičnog standarda IEEE 802.15.4 (Zigbee) je data u radu [13] gdje se monitoring i kontrola kvaliteta šećera obavlja bežičnim putem. Ovaj rad ima za cilj praćenje i održavanje viskoziteta soka od trske korišćenjem pare i tople vode. Zigbee protokol nalazi primjenu i u zdravstvu [3] gdje sa RFID tehnologijom čini sistem pomoću kojeg se odvija monitoring zdravstvenog stanja pacijenata (u slučaju njegovog nestanka oglašava se alarm), angažovanosti medicinskog osoblja, itd. U publikaciji [10] predloženo je rješenje elektronskog zvona sa ciljem praćenja stoke na farmi. Predloženi sistem je ekonomski isplativ i zasnovan na je Zigbee tehnologiji. Radom [8] je predstavljen sistem automatskog

navodnjavanja (“kap po kap”) korišćenjem Zigbee tehnologije. Pomoću ovog sistema prikupljaju se podaci vezani za vlažnost zemljišta, temperaturu, itd.

Zigbee tehnologija nalazi primjenu u kontroli i prevenciji šumskih požara. Ovaj proces monitoringa šumskih požara je veoma značajan obzirom da šume predstavljaju “pluća planete”. Jedan od mogućih sistema bežičnog praćenja požara predstavljen je radom [20], gdje Zigbee tehnologija predstavlja bitnu kariku sistema. Zigbee tehnologija ima značajnu ulogu i u sistemima pametnih kuća, kao što je prikazano publikacijom [16], gdje je sistem zasnovan na GPRS mreži i Zigbee tehnologiji. Pomoću ovog sistema moguće je prikupljanje podataka i upravljanje domaćinstvom.

Iz navedenog se može zaključiti da Zigbee mreža ima višestruku primjenu, kao i da je interoperabilna sa drugim tehnologijama.

Master rad „Praktična realizacija Zigbee mreža u industrijskim postrojenjima“ se bavi projektovanjem sistema industrijske bežične komunikacije, kao i predstavljanjem mogućnosti koje bežične tehnologije pružaju modernoj industriji. Cilj sprovedenog istraživanja jeste stvaranje jednostavnog, pouzdanog, mobilnog, fleksibilnog i energetski štedljivog sistema industrijske komunikacije zasnovanog na Zigbee tehnologiji. Pomoću predloženog sistema moguće je monitoring produktivnosti industrijskog postrojenja, kao i upravljanje mašinama. Prikupljenim podacima od interesa je moguće pristupiti sa bilo koje udaljene lokacije preko Interneta. Idejno rješenje sistema je dato Slikom 1.



Slika 1. Idejno rješenje predloženog sistema

2. Bežične mreže

Bežična mreža (engl. Wireless Network) podrazumijeva povezivanje elektronskih uređaja radio-talasima. Nastanak bežičnih tehnologija možemo vezati za 19-i vijek i naučnike Džejsma Maskvela i Hajnriha Herca, zahvaljujući čijim teoretskim i eksperimentalnim radom se otkriva i potvrđuje postojanje *elektromagnetnog polja*, koje predstavlja temelj bežičnih komunikacija. Nakon iznošenja teorije elektromagnetnog polja i definisanja osnovnih postulata (Maksvelove jednačine) od strane Džejsma Maksvela, Hajnrih Herc je uspio eksperimentalnim putem dokazati postojanje elektromagnetnog polja. Ova otkrića, pokazaće se, započinju jednu novu eru komunikacija (bežična komunikacija) koja će u ogromnoj mjeri oblikovati sve oblasti ljudske djelatnosti i života. Uviđanjem mogućnosti koje nosi bežični prenos informacija Giljermo Markoni započinje eksperimente sa ciljem stvaranja radio komunikacije. Komercijalna upotreba radio uređaja započinje početkom 20-og vijeka. Nakon tog perioda, do danas, bežični komunikacioni sistemi doživljavaju ekspanziju.

Koliko su značajne bežične tehnologije govori i istraživanje koje pokazuje da je učešće bežične industrije u ekonomiji SAD-a 475 milijardi dolara. Ovo istraživanje takođe pokazuje da bežična industrija omogućava 4.7 miliona radnih mjesta u Sjedinjenim Američkim Državama [23].

Kako za bežičnu komunikaciju nije potreban fizički medijum za prenos podataka, postoje brojne prednosti upotrebe takve tehnologije u odnosu na žičane komunikacione protokole. Prilikom povezivanja uređaja bežičnim tipom mreže povećava se mobilnost i fleksibilnost same mreže [24]. Ovo znači da uređaji ne moraju biti na tačno određenom mjestu stacionirani, gdje je izveden mrežni priključak. Ukoliko se koristi žičana tehnologija, novim kablom je potrebno povezati uređaj koji zahtijeva pristup mreži, čime se povećava žičana infrastruktura, što nepovoljno utiče na mobilnost i fleksibilnost takve mreže.

U modernom dobu svaki korisnik posjeduje veći broj prenosivih uređaja (mobilni telefoni, tablet računari, laptop računari, zvučnici) tako da žičano mrežno povezivanje nije praktično. Ova nepraktičnost se pogotovo primjećuje u industrijskim postrojenjima. Neki nedostaci bežičnih prenosa podataka su mala maksimalna brzina prenosa podataka, kao i pitanje sigurnosti (mogućnost hakovanja) [24].

Jedan od problema koji se javlja prilikom instalacije bežične mreže jesu fizičke prepreke koje slabe signal. Ovaj problem se može riješiti odabirom odgovarajuće bežične tehnologije i topologije mreže, kojom bi se ostvarila bolja pokrivenost postrojenja signalom, kao i rasporedom komunikacionih čvorova projektovanog sistema. Kako bežične tehnologije predstavljaju budućnost komunikacije, njihovim svakodnevnim razvojem i unaprjeđivanjem se umanjuju pomenuti nedostaci.

2.1 Elektromagnetno polje

Elektromagnetno polje se sastoji od dvije povezane i neraskidive komponente: promjenjivog električnog (\vec{E}) i promjenjivog magnetnog polja (\vec{H}). Ova dva polja su normalna jedno na drugo i uzročno posljedična. Džejsm Maksvel je definisao teoriju elektromagnetnog polja.

Naime, ako u nekoj tački prostora nastane promjenjivo magnetno polje ono će u susjednoj tački stvoriti promjenjivo vrtložno električno polje. Zatim, promjenjivo vrtložno električno polje će indukovati promjenjivo vrtložno magnetno polje, itd.

Još jedna bitna osobina elektromagnetnog polja jeste da se prostire u svim pravcima u prostoru, konačnom brzinom koja je u vakuumu jednaka brzini svjetlosti:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \dots\dots\dots(1),$$

gdje je ϵ_0 [F/m]- Dielektrična permitivnost vakuuma, μ_0 [N/A²]- Magnetska permeabilnost vakuuma.

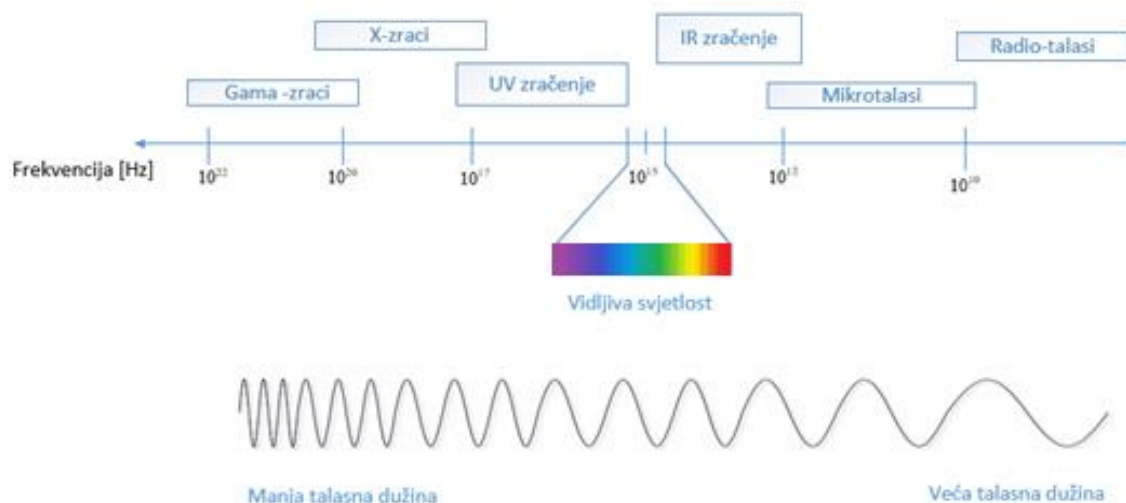
Može se reći da elektromagnetni talas predstavlja proces širenja elektromagnetnog polja kroz prostor. Brzina širenja elektromagnetnog talasa u vazduhu je nešto manja od brzine širenja u vakuumu, međutim ova razlika se zanemaruje i smatra se da je brzina širenja elektromagnetnog talasa jednaka brzini svjetlosti (c).

Brzina talasa data je relacijom:

$$c = f \cdot \lambda \dots\dots\dots(2),$$

gdje je λ [m] talasna dužina, a f frekvencija [Hz].

Za razliku od mehaničkih talasa (talasi u vodi, zvučni talasi, itd.), kod kojih je potrebna materijalna sredina za prostiranje, kod elektromagnetnih talasa to nije slučaj. Za formiranje i prostiranje elektromagnetnog talasa nije potreban medijum. Ova osobina elektromagnetnih talasa predstavlja osnovu bežičnih tehnologija. Drugim riječima, velika brzina prostiranja i nezavisnost od fizičke sredine (medijuma) čine elektromagnetne talase idealnim za bežični prenos informacija. Na Slici 2 je prikazan elektromagnetni spektar. Kao što je prikazano u publikaciji [25], elektromagnetni spektar sačinjava sedam cjelina, a to su: radio-talasi (opseg λ : 0.1 m - 10⁴ m), mikrotalase (opseg λ : 0.3m - 10⁻⁴ m), infracrveno zračenje (opseg λ : 10⁻³ - 7 · 10⁻⁷ m), vidljiva svjetlost (opseg λ : 4 · 10⁻⁷ - 7 · 10⁻⁷m), UV zračenje (opseg λ : 4 · 10⁻⁷- 6 · 10⁻¹⁰ m), X-zruci (opseg λ : 10⁻⁸ - 10⁻¹²m) i Gama-zruci (opseg λ : 10⁻¹⁰ - 10⁻¹⁴m).



Slika 2. Elektromagnetni spektar

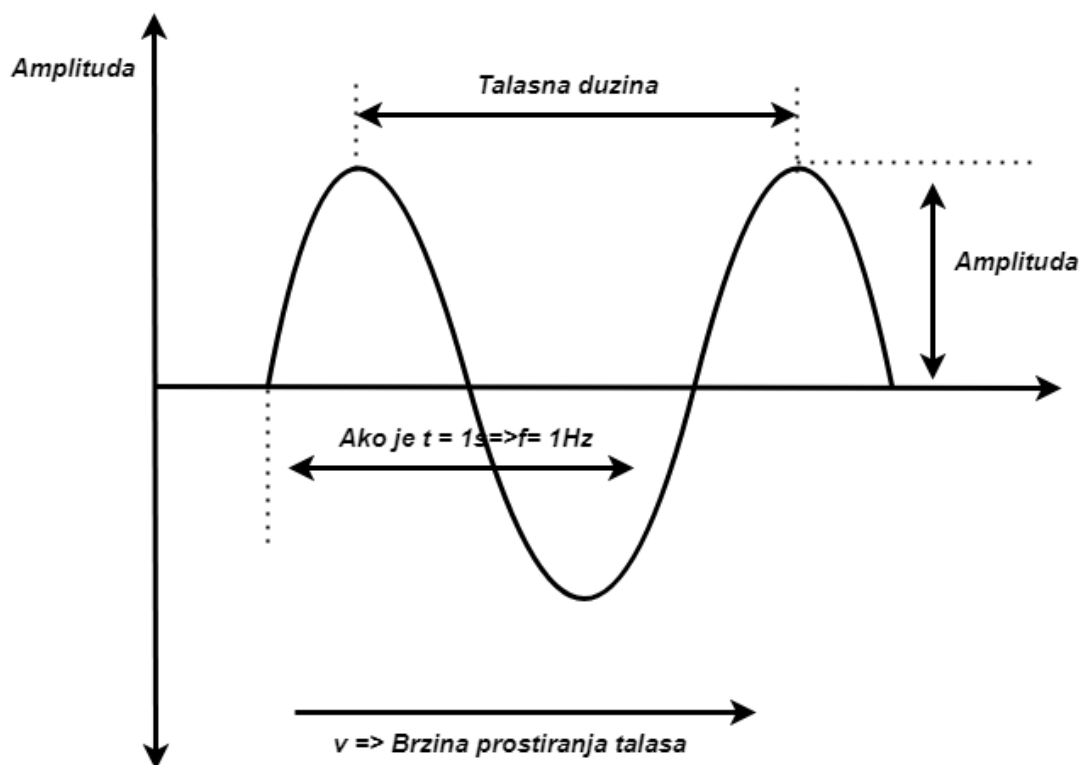
Važno je naglasiti da prikazani frekvencijski opsezi nijesu tačno definisani, već se preklapaju. Na primjer, na Slici 2 je uočljivo da jasna granica između opsega X-zraka i njima susjednih Gama i UV zračenja ne postoji. Uzevši ovo u obzir, X-zraci obuhvataju i djelove opsega Gama (γ) i UV zraka. Isti princip važi kod ostalih tipova elektromagnetnih talasa.

Na slici možemo uočiti da se frekvencija povećava sa desna na lijevo. Povećanje frekvencije rezultira smanjenjem talasne dužine u skladu sa jednačinom (2). Takođe, energija talasa se povećava sa desna na lijevo.

Elektromagnetni talasi opsega $10^3 - 10^{10}$ Hz, koji najčešće služe za bežični prenos informacija, nazivaju se *radio talasima*. Najčešće korišćene frekvencije za bežičnu komunikaciju između entiteta, su one manje od 3000 MHz zbog njihove otpornosti na atmosferske efekte [26].

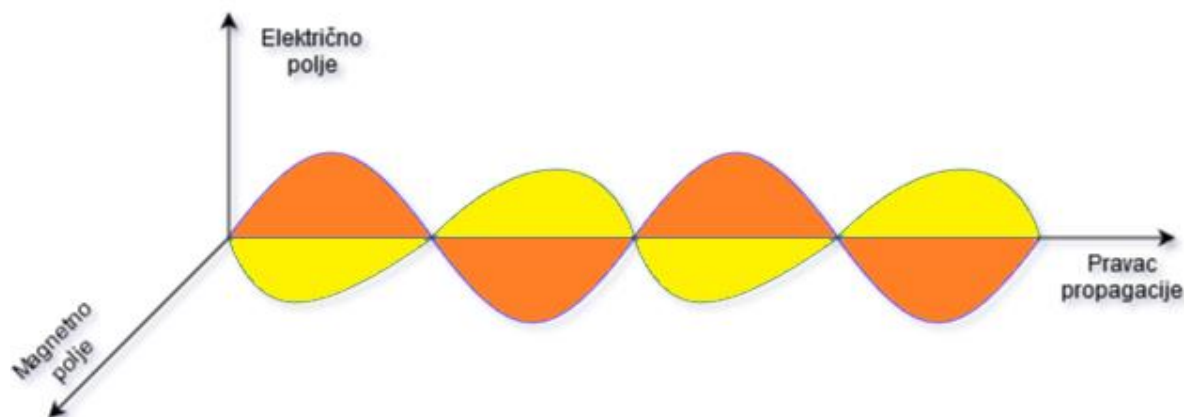
Svaki talas posjeduje određenu brzinu, frekvenciju, talasnu dužinu i amplitudu. Na Slici 3 grafički su prikazane ove karakteristike talasa.

Talasna dužina predstavlja jedan ciklus talasa i mjeri se kao minimalno rastojanje između dvije tačke koje osciluju u istoj fazi (npr. maksimum), dok frekvencija predstavlja broj brijegova u jedinici vremena, koji prođu kroz jednu tačku. Relacijom (2) prikazana je veza frekvencije i talasne dužine. Amplituda predstavlja najveću vrijednost periodično promjenjive veličine u jedinici vremena.



Slika 3. Neke karakteristike elektromagnetnog talasa

Kako je ranije naglašeno, elektromagnetni talas (radio talas) se sastoji od dvije komponente: električne i magnetne. Ove dvije komponente su upravne jedna na drugu. Na Slici 4 je prikazano prostiranje elektromagnetnog talasa.



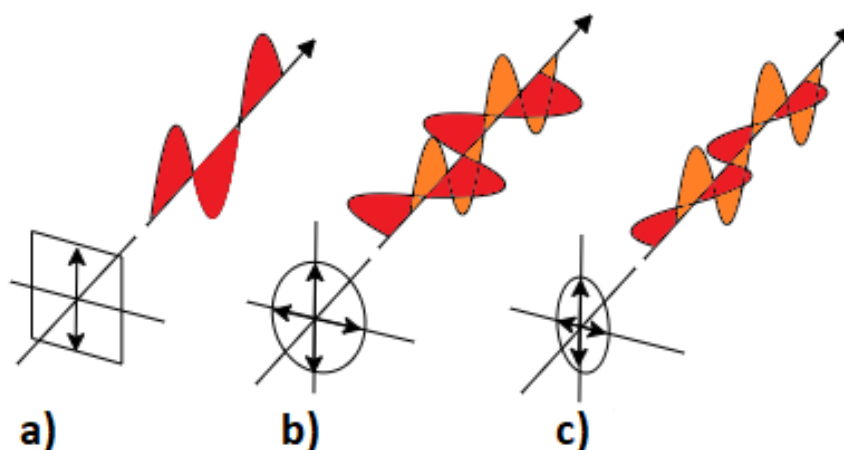
Slika 4. Prostiranje elektromagnetnog talasa

Veoma važan parametar elektromagnetnih talasa jeste *polarizacija* koja je određena usmjerenjem električne komponente elektromagnetnog talasa u prostoru.

Postoje tri tipa polarizacije:

- Linearna
- Kružna
- Eliptična

Na Slici 5 su prikazani ovi tipovi polarizacije.



Slika 5. Polarizacija elektromagnetnih talasa (a- Linijska polarizacija, b- Kružna polarizacija, c- Eliptična polarizacija)

Kružna polarizacija se dijeli na lijevu i desnu, zavisno od smjera prostiranja električne komponente u odnosu na prostiranje talasa. Dakle, intenzitet vektora električnog polja je konstantan dok mu se mijenja smjer (rotira konstantnom brzinom). Češće upotrebljavana jeste linearna polarizacija koja može biti vertikalna i horizontalna.

Kod horizontalne polarizacije vektor električnog polja je paralelan sa površinom Zemlje (zauzima horizontalnu ravan), dok je kod vertikalne polarizacije normalan na površinu Zemlje (zauzima vertikalnu ravan).

Kod eliptične polarizacije se mijenjaju smjer i intenzitet vektora električne komponente. Značajnu ulogu u primopredaji različito polarizovanih radio talasa imaju antene koje se koriste. Okolina i efekti koji utiču na radio talas (npr. refleksija) mogu prouzrokovati promjenu polarizacije nakon njegovog emitovanja [27].

Prilikom emitovanja elektromagnetnog talasa između predajnika i prijemnika, u slobodnom prostoru na određenoj udaljenosti, odnos snaga na predajnoj i prijemnoj strani je dat Friis-ovom jednačinom:

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, d > 0 \dots\dots\dots(3)$$

gdje je: P_R – snaga primljenog signala [W], P_T – emitovana snaga [W], G_R – dobitak prijemne antene, G_T – dobitak predajne antene, λ – talasna dužina signala [m], d – udaljenost koju signal pređe [m]. Dakle, snaga primljenog signala opada sa kvadratom rastojanja u odnosu na predajnik (d).

Frisova jednačina se može zapisati i kao:

$$P_R = P_T + G_R + G_T + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \dots\dots\dots(4)$$

gdje je: P_R – snaga primljenog signala [dBm], P_T – emitovana snaga [dBm], G_R – dobitak prijemne antene [dBi], G_T – dobitak predajne antene [dBi], λ – talasna dužina signala [m], d – udaljenost koju signal pređe [m].

Gubitak u slobodnom prostoru:

$$L_p = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots(5)$$

Pretpostavlja se da je udaljenost između antena veća od talasne dužine, kao i da su isto polarizovane. Međutim, ova jednačina predstavlja idealizovan slučaj gdje nijesu uzeti u obzir efekti koji utiču na prostiranje talasa.

Na jačinu signala utiče veći broj činilaca kao što su: snaga predajnika, osjetljivost prijemnika (mogućnost da slabije radio signale prevede u električne), tip antene, itd. Međutim, pokrivenost industrijskog postrojenja radio signalom u velikoj mjeri zavisi i od okruženja koje slabi signal. Drugim riječima, jačina signala u industrijskom postrojenju zavisi i od uticaja više fenomena na radio-talasa, kao što su:

- Apsorpcija
- Difrakcija
- Refrakcija
- Refleksija
- Rasijanje

2.1.1 Apsorpcija elektromagnetnih talasa

Kako elektromagnetni talasi imaju različite namjene, od komunikacionih tehnologija do medicinske primjene, to njihovo apsorbovanje predstavlja veoma značajan faktor prilikom projektovanja sistema bežične komunikacije [28]. Prilikom prolaska elektromagnetnog talasa kroz neku sredinu (materiju) dolazi do slabljenja njegovog intenziteta. Koliki će gubitak snage biti zavisi od frekvencije talasa i sredine kroz koju prolaze. Materijal koji apsorbuje elektromagnetni talas nezavisno od smjera njegovog upadnog zraka, frekvencije, polarizacije predstavlja idealni materijal apsorpcije [28].

Neki apsorpcijski materijali, kao što su metal, voda, beton, drvo, itd. “upijaju” visoko frekventne elektromagnetne talase. Kao što je poznato, kiša, magla, snijeg i druge prirodne pojave utiču na bežičnu komunikaciju, što znači, vremenske prilike umnogome mogu uticati na kvalitet iste. Što se tiče drveća i predmeta napravljenih od drveta njihov uticaj varira od slučaja do slučaja. Na primjer, u drveću se nalazi velika količina vode pa ono slabi bežičnu komunikaciju, dok je kod predmeta napravljenih od drveta taj udio vode značajno manji pa su isti skoro transparentni za talase.

U Tabeli 1 je prikazan uticaj nekih materijala na jačinu signala [29].

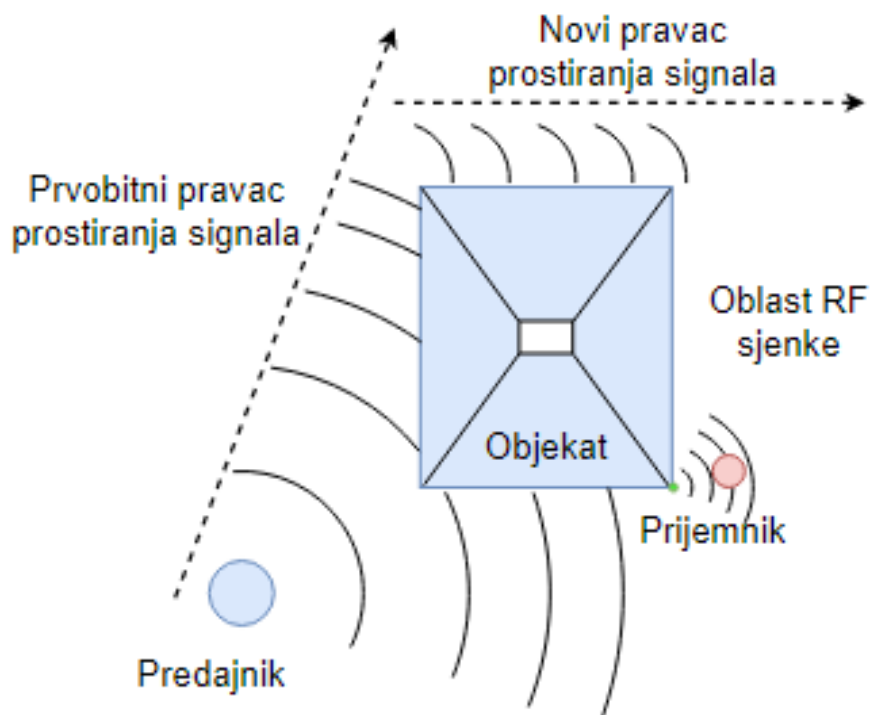
Materijal	Stopa apsorpcije
Gipsani zid	3-5 dB
Stakleni zid sa metalnim ramom	6 dB
Metalna vrata	6-10 dB
Prozor	3 dB
Betonski zid	6-15 dB
Zid od blokova	4-6 dB

Ljudi i životinje se sastoje od velike količine vode pa je stepen apsorpcije talasa veliki. Dakle, izvodi se zaključak da bi prilikom projektovanja bežične mreže trebalo voditi računa da signal nije usmjeren kroz područja gdje je prisutna veća cirkulacija ljudi [29].

2.1.2 Difrakcija elektromagnetnih talasa

Promjena intenziteta i pravca prostiranja talasa prilikom nailaska na prepreku ili otvor naziva se *difrakcija* [29]. Difrakcija uveliko zavisi od talasne dužine elektromagnetnog talasa i dimenzija otvora ili prepreke. Naime, ovaj proces je najlakše primjetiti ukoliko su dimenzije prepreke reda talasne dužine elektromagnetnog talasa (približnih dimenzija), uslijed čega talas mijenja pravac prostiranja. Dakle, prilikom ovog skretanja (savijanja) radio signala, formiraju se novi pravci prostiranja elektromagnetnih talasa.

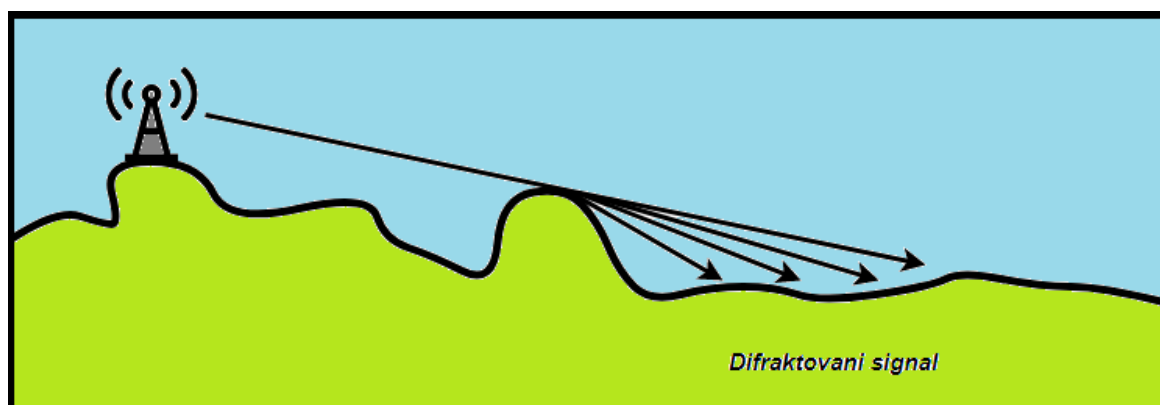
Treba istaći da difraktovani talas ima manju snagu od talasnog fronta koji mu je uzrok. Na Slici 6 je prikazana ova pojava.



Slika 6. Difrakcija radio signala

Iako nema optičke vidljivosti od predajnika do prijemne strane, signal će se difraktovati oko prepreke i početi da se širi u zaklonjeni prostor [27]. Drugim riječima, moguća je komunikacija između predajnika i prijemnika sa Slike 6, iako nema optičke vidljivosti (prijemnik je zaklonjen objektom).

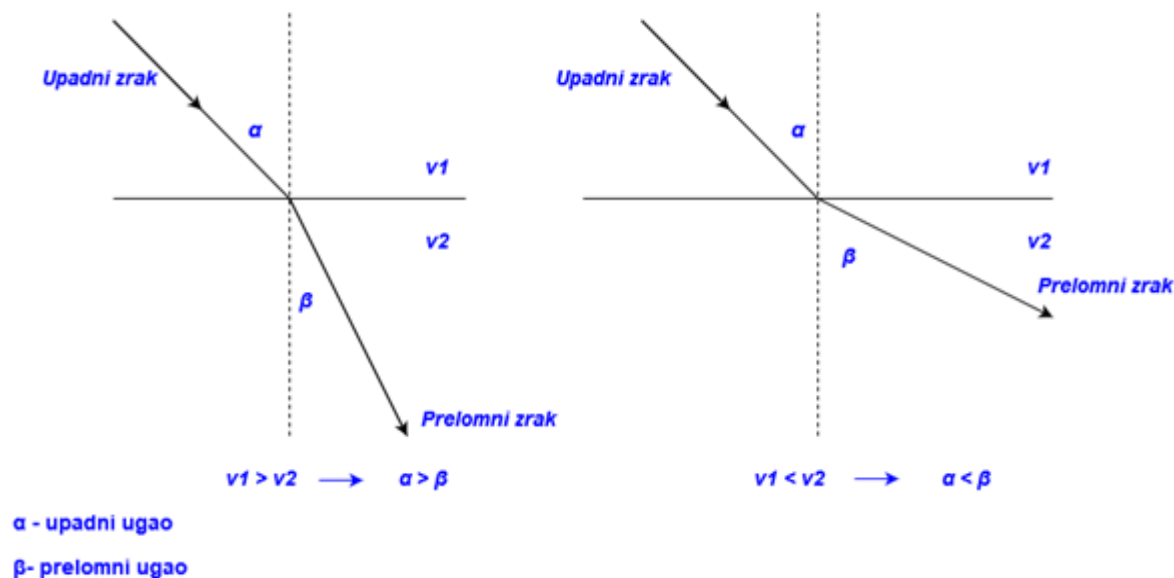
Niskofrekventni signali značajnije difraktuju od signala sa većom frekvencijom. Upravo zbog ove prirode, talasi sa većom talasnom dužinom obezbjeđuju bolju pokrivenost brdovitog terena signalnom. Slikom 7 je prikazan ovaj fenomen.



Slika 7. Difrakcija niskofrekventnog signala

2.1.3 Refrakcija elektromagnetnih talasa

Promjena smjera kretanja elektromagnetnog talasa, nastala usled prelaska talasa iz jedne sredine u drugu naziva se *refrakcija*. Nailaskom talasa na novu sredinu dolazi kako do djelimičnog odbijanja i apsorpcije, tako i do njegovog prelaska u drugi medijum. Elektromagnetni talas u novoj sredini je iste frekvencije, međutim, njegova brzina se mijenja. Fenomen refrakcije je dat Slikom 8.



Slika 8. Refrakcija elektromagnetnog talasa

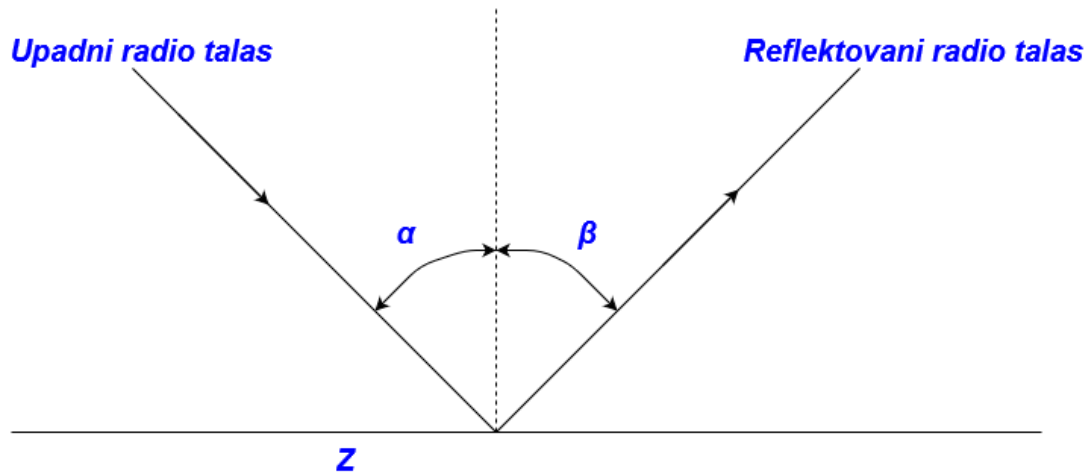
Na slici su data dva slučaja, i to kada je brzina prostiranja u prvoj sredini veća (a), kao i kada je brzina prostiranja u drugoj sredini veća (b). Fenomen refrakcije je opisan Snelijusovim zakonom refrakcije (prelamanja) talasa, i dat je izrazom:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots(6),$$

pri čemu su n_1 , n_2 indeksi prelamanja talasa.

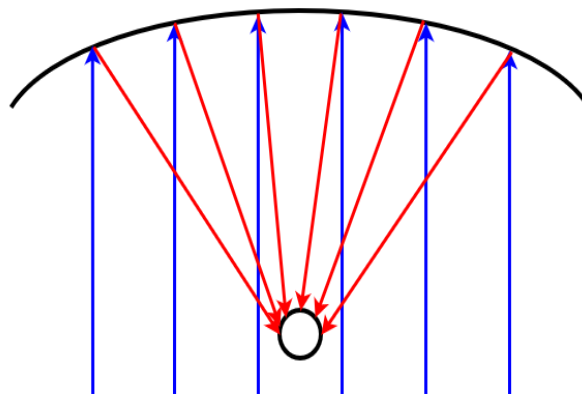
2.1.4 Refleksija elektromagnetnih talasa

Refleksija predstavlja promjenu pravca prostiranja talasa na graničnoj površini između dvije sredine. Za radio talase, koji su sfera interesa ovog rada, glavni reflektivni material na koji se nailazi jeste metal, kao i sve glatke površine čije su dimenzije veće od talasne dužine radio talasa [29]. Na Slici 9 je prikazana refleksija radio talasa. Kod refleksije upadni ugao radio talasa je isti kao i ugao reflektovanog radio talasa, tj: $\alpha = \beta$



Slika 9. Refleksija radio talasa

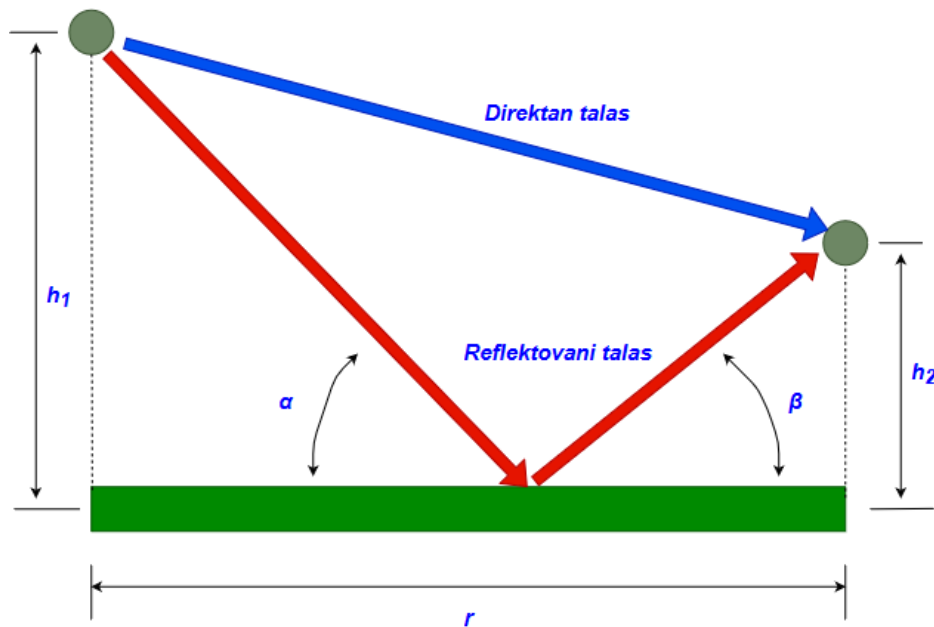
Reflektovani signali su slabiji zato što reflektujući materijal apsorbira dio energije talasa [29]. Efekat refleksije se koristi prilikom projektovanja i izgradnje antena (Slika 10). Naime, korišćenjem parabolično oblikovanih reflektora, postiže se usmjeravanje snopa radio signala u jednu tačku.



Slika 10. Parabolična antena

U zatvorenim industrijskim halama, za koje se razvija sistem bežične industrijske komunikacije, zbog velikog broja metalnih elemenata različitih oblika i drugih površina, dolazi do izraženog uticaja refleksije na emitovani signal. Reflektovani talas je fazno pomjeren pa će se na prijemnoj strani konstruktivno ili destruktivno sabirati sa direktno emitovanim talasom [30]. Kako direktni i reflektovani talas prelaze različite putanje, tako do prijemne strane dolaze u različitim vremenskim trenucima.

Na Slici 11 je prikazan efekat refleksije talasa.



Slika 11. Refleksija radio talasa (modifikovano [30])

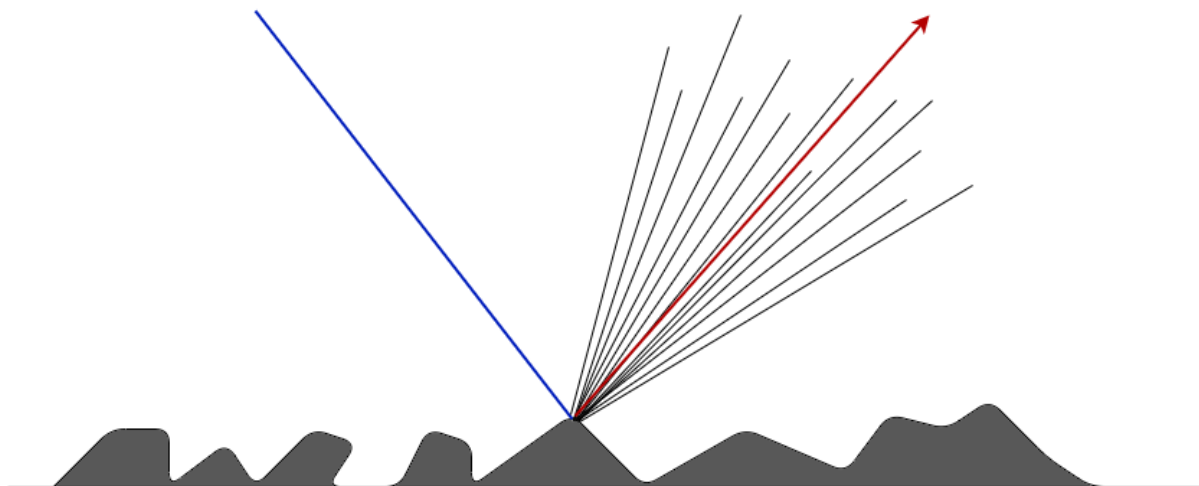
Prostriranje emitovanog signala većim brojem putanja predstavlja *multipath* efekat. Međutim, efekat *multipath*-a se ne pojavljuje samo zbog refleksije, već i zbog efekata difrakcije i rasijanja. Na Slici 12 je prikazan uticaj refleksije, difrakcije i rasijanja kao uzrok *multipath*-a.



Slika 12. Refleksija, difrakcija i rasijanje talasa (modifikovano iz programa Live Home 3D)

2.1.5 Rasijanje radio signala

Do ove pojave dolazi kada radio talas prilikom svog prostiranja dođe u kontakt sa predmetom manjih dimenzija u odnosu na njegovu talasnu dužinu. Nakon kontakta, radio talas se raspršuje (odbija) u više smjerova, kao što je dato Slikom 13.



Slika 13. Rasijanje radio talasa

Takođe, smatra se da što je površina hrapavija veća je vjerovatnoća za rasijanje signala prilikom kontakta sa tom površinom [31].

U zatvorenim halama sa velikim brojem prepreka prisutnost rasijanja je veoma izražena. Rayleigh-ov kriterijum hrapavosti je dat nejednačinom:

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \dots\dots\dots(7)$$

Gdje je λ (lambda) talasna dužina a θ upadni ugao zraka. Ukoliko je izraz zadovoljen površina se smatra glatkom. Takođe, 1982 godine je predložen Fraunhofer-ov krijerijum po kojem je dato:

$$h < \frac{\lambda}{32 \cos \theta} \dots\dots\dots(8)$$

Iz datih izraza se uviđa da je Fraunhofer-ov krijerijum hrapavosti rigorozniji. Može se zaključiti, po Rayleigh-ovom kriterijumu hrapavosti, da ukoliko je promjena na površini veća od osmine talasne dužine elektromagnetnog talasa, tu površinu smatramo hrapavom i doći će do rasijanja signala.

Osim predstavljenih parametara elektromagnetnog polja, kao i fenomena koji utiču na izobličavanje signala u slobodnom prostoru, veoma važna karakteristika pri prenosu informacija su i protokoli koje komunikacione tehnologije primjenjuju. Protokoli definišu najvažnije parametre komunikacije, čime utiču na komunikaciju u smislu kvaliteta (utiču na cjelovitost isporuke podataka), fleksibilnosti i robustnosti mreže.

3. Komunikacioni protokoli

Protokol predstavlja unaprijed dogovorena pravila i procedure prenosa podataka (informacija) između elektronskih uređaja (računara, pametnih telefona, tablet računara, mikrokontrolera, televizora itd). Projektovanje komunikacionog protokola je kompleksno i zahtjevno sa stanovišta pronalaska najpogodnijih rješenja u smislu efikasnosti, pouzdanosti, funkcionalnosti, prilagodljivosti i jednostavnosti upotrebe. Samim tim, prilikom dizajniranja protokola isti treba smatrati netačnim i nepouzdanim dok se ne dokaže suprotno [32].

Komunikacioni protokoli se ne vežu samo za elektronske uređaje, već su kroz čitavu istoriju ljudske civilizacije dokumentovani pokušaji prenosa informacija i komuniciranja na daljinu. Neki su na više, neki na manje uspješan način prenosili informacije, dok je svima zajednička bila nemogućnost prilagođavanja neočekivanim situacijama i prilično siromašan spektar informacija koje su se mogle poslati i primiti. Većina tih pokušaja nema pisanih tragova već se prenosila usmenim putem.

Prvi dokumentovani pokušaji komuniciranja u vidu dimnih signala, zabilježeni su od strane kineskih vojnika, stacioniranih duž Kineskog zida. Oni su ove signale slali ne bi li predočili opasnosti u okruženju. Ovaj vid komunikacije su koristili i Aboridžini da bi obavijestili ostale o svojoj prisutnosti. I Grci su koristili sličan sistem prenošenja informacija na veće udaljenosti, koji je kasnije usavršio i unaprijedio Grčki historičar Polibije. Nešto složeniji sistem komunikacije (protokol) stvorili su Indijanci. Naime, vatru bi zapalili obično na vrhu brda, da bi bila lako uočljiva i uz pomoć tkanine kojom bi pokrili vatru slali dimne signale.

U industriji je prisutan veliki broj praktično zastarelih komunikacionih tehnologija koje se i danas koriste u vremenu ekspanzije mikrokontrolera, robotike, bežičnih senzorskih mreža, itd. Ove tehnologije su i dalje prisutne zbog pružanja pouzdanog rada i performansi koje zadovoljavaju industrijske potrebe [33].

U ugrađenim sistemima (engl. Embedded Systems) komunikacioni standardi definišu pravila po kojim se razmjenjuju podaci između mikrokontrolera u formi bitova. Pomenute komunikacione standarde možemo podijeliti na serijske i paralelne. Paralelna komunikacija predstavlja metod prenosa više bitova istovremeno. Ovaj tip komunikacije nudi veću maksimalnu brzinu prenosa podataka i koristi se za prenos podataka na kraćim relacijama. Takođe, cijena ove tehnologije je značajno veća, usljed potrebe za većim ožičenjem. Zbog navedenih razloga u industriji se koristi serijska komunikacija.

Serijska komunikacija predstavlja jedan od metoda komunikacije između uređaja od interesa korišćenjem malog broja linija za prenos podataka (najčešće jedna ili dvije). Ovakva razmjena podataka među uređajima je moguća korišćenjem zajedničkog komunikacionog kanala (engl. Data Bus) tako što se podaci šalju/primaju bit po bit. Dakle, serijska komunikacija je svojevrsan opozit paralelnoj komunikaciji. Neki od serijskih komunikacionih standarda koji su najprisutniji (između ostalog i u industriji) su RS-232 i RS-485 [34], [35]. Međutim, korišćenje žičanih protokola sa sobom nosi niz nedostataka, koje je moguće prevazići upotrebom bežičnih komunikacionih protokola. Uviđanjem potrebe tržišta za stvaranjem pouzdanih protokola komunikacije, Zigbee Alijansa početkom 21-og vijeka definiše Zigbee protokol koji bi zadovoljio potrebe umrežavanja većeg broja uređaja bežičnim putem.

Kako je Zigbee tehnologija zasnovana na bežičnoj komunikaciji, neophodno je sagledati njene prednosti i nedostatke u odnosu na standarde industrijske komunikacije RS-232 i RS-485. Na ovaj način, stvara se jasna slika u kojem domenu bi primjena ovakve tehnologije predstavljala iskorak u odnosu na postojeće standarde.

3.1 Standard RS-232

Iako predstavlja jedan od najstarijih protokola asinhronne serijske komunikacije, nastao 60-ih godina prošlog vijeka, RS-232 standard i danas ima veoma veliku upotrebu u industriji i industrijskoj automatizaciji. Ovaj standard podržava *full-duplex* režim rada, što znači da omogućava istovremeno primanje i slanje podataka. RS -232 protokol spada u protokole nižeg nivoa koje karakteriše niža maksimalna brzina prenosa podataka, kraća rastojanja na kojima je moguć uspješan prenos podataka, kao i jednostavnost i pouzdanost prilikom prenosa podataka. Pouzdanost prenosa podataka se odnosi na otpornost na elektromagnetni šum. Brzina prenosa podataka kod RS-232 sandarda zavisi od dužine medijuma za prenos podataka (kabla) i vrste kabliranja [36].

Standard RS-232 koristi nebalansirani prenos signala (engl. Single-Ended Signaling), što znači da je za prenos n signala potrebno $n+1$ vodova (za svaki signal po jedan vod, i jedan vod za zajedničku masu). Drugim riječima, povećanjem funkcionalnosti sistema industrijske komunikacije zasnovanog na ovoj tehnologiji povećavaju se i troškovi, za razliku od bežičnih mreža. Dakle, povećanje troškova se odnosi na troškove montaže i održavanja sistema žičane komunikacije usled povećanja žičane infrastrukture. Ovaj standard definiše domet od oko 15 m (preporučena dužina kabla), zasnovan na maksimalnoj kapacitivnost kabla od 2500 pF [36]. Međutim, u publikaciji [37] je prikazano da domet ove tehnologije može da varira zavisno od brzine prenosa podataka i tipa kabla (15-30 m). Dakle, povećanje dometa ove tehnologije je moguće ostvariti korišćenjem kablova manje kapacitivnosti, kao i smanjivanjem brzine prenosa podataka.

U tabeli 2 su predstavljeni eksperimentalno utvrđeni maksimalni dometi RS-232 standarda, zavisno od brzine prenosa podataka [38].

Baud Rate [bps]	Dužina kabla [m]
110	850
300	800
600	700
1200	500
2400	200
4800	100
9600	70
19 200	50
115 K	20

Nedostaci RS-232 protokola pokazuju se u vidu malog dometa, male brzine prenosa podataka, mogućnosti povezivanja samo jednog prijemnika i predajnika, ograničenosti integrisanja sa drugim sistemima jer većina mikrokontrolera posjeduje samo jedan hardverski serijski port [37], [39].

Korišćenjem Zigbee bežične tehnologije ove nedostatke, u smislu jednostavnosti povezivanja novih uređaja na mrežu, smanjenu funkcionalnost mreže, nisku maksimalnu brzinu prenosa podataka, potrebu za velikim ožičenjem je moguće neutralisati. Pomenuti nedostaci RS-232 protokola dolaze do izražaja usljed tehnološkog napretka i potrebe postojanja većeg broja primopredajnika koji se nalaze na različitim rastojanjima.

3.2 Standard RS-485

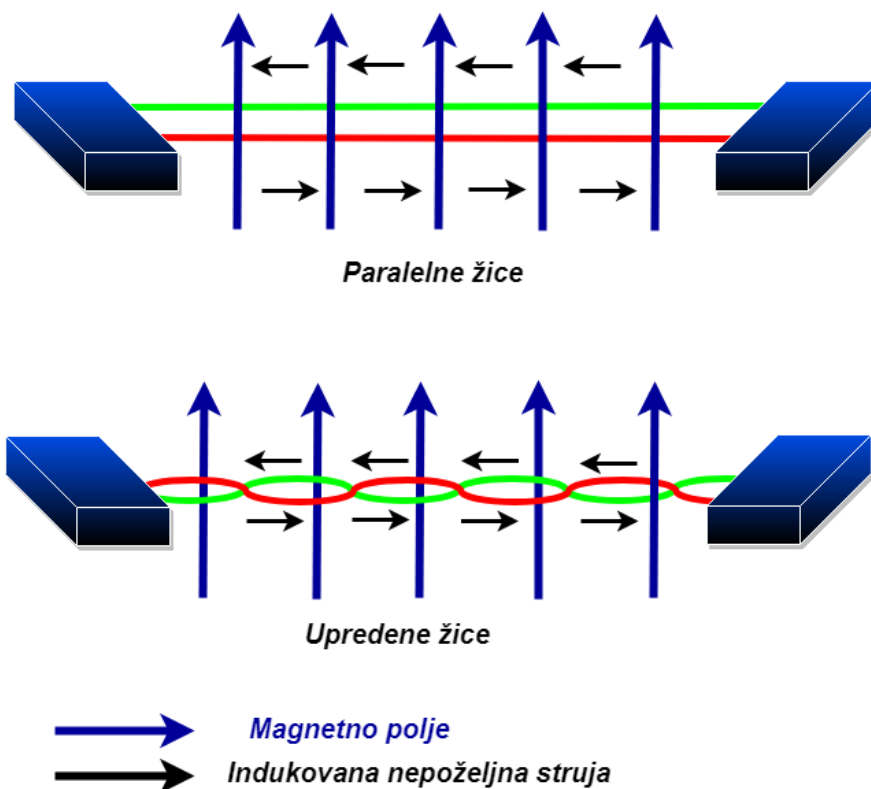
Usljed navedenih nedostataka RS-232 protokola javlja se potreba za protokolom koji će omogućiti kako veću brzinu prenosa podataka, tako i komunikaciju sa većim brojem računara, senzora ili aktuatora na mreži. Da bi se zadovoljile pomenute potrebe industrijske komunikacije RS-485 standard definiše EIA (engl. Electronics Industry Alliance). Samim tim, RS-485 ima široku primjenu u industriji [40]. Pomenuti standard nalazi primjenu u sistemima ventilacije i klimatizacije prostora (engl. Heating, Ventilation and Air Conditioning), automatizaciji procesa i postrojenja, kontroli mašina, itd.

Ovaj protokol se može koristiti kao *full-duplex* i *half-duplex* asinhrona mreža [41], što znači da je moguća komunikacija u oba smjera. Ukoliko se koristi jedna parica (*half-duplex*) nije moguća istovremena bidirekciona komunikacija, međutim, ukoliko se koriste dvije parice podatke je moguće slati u oba smjera istovremeno (*full-duplex*). Nedostatak *full-duplex* RS-485 mreže je u povećanom ožičenju što dodatno povećava cijenu sistema. Kako je riječ o serijskom komunikacionom protokolu i ovdje se podaci prenose kao niz bitova. RS-485 omogućava komunikaciju 32 predajnika i 32 prijemnika [39].

Zahvaljujući diferencijalnom prenosu podataka uticaj elektromagnetnih smetnji koje su svojstvene industrijskim postrojenjima se smanjuje. Nedostatak diferencijalnog prenosa (balansirani prenos signala) je u tome što je za n signala potrebno $2n$ vodova, čime se povećava cijena sistema u odnosu na jednovodne sisteme (RS-232). Podaci se najčešće prenose UTP kablom (engl. Unshielded Twisted-Pair). Brzina prenosa podataka zavisi od dužine kabla, pa su tako za rastojanja od 15 m moguća brzina od 10 Mb/s, dok za udaljenost od 1200 m brzina prenosa podataka opada na 90 kb/s [37]. Povećanje dometa mreže se ostvaruje korišćenjem ripitera (engl. Repeaters). Brzina prenosa podataka je nesumnjivo na strani RS-485 standarda, u odnosu na Zigbee protokol. Međutim, Zigbee tehnologija je dizajnirana za male maksimalne brzine prenosa podataka sa ciljem ostvarivanja veće autonomije uređaja. Samim tim, Zigbee tehnologija nije ni bila takmac u tom segmentu sa postojećim standardima.

Prednost RS-485 protokola se ogleda u većoj otpornosti na smetnje u postrojenjima, u odnosu na bežične tehnologije. Otklanjanje elektromagnetnih smetnji riješeno je upređanjem parice. Kao što je vidljivo sa Slike 14 u prvom primjeru, kada se fizičke linije voda nalaze paralelno jedna sa drugom pod uticajem okolnog magnetnog polja dolazi do indukovanja strujnog šuma, zatim i do akumulacije ovog nepoželjnog efekta. Ova pojava smanjuje kvalitet prenosa podataka. Upređanjem žica, indukovane nepoželjne struje su suprotnih smjerova i dolazi do

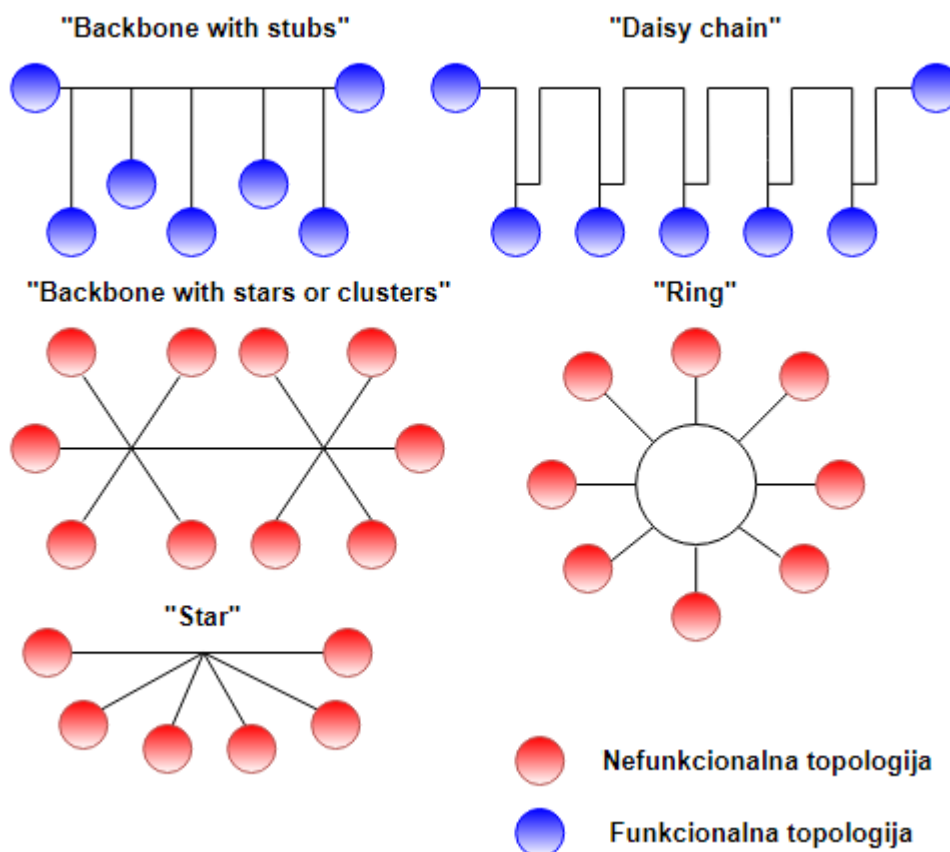
njihovog poništavanja [42]. Usled ovoga, nastali efekat pojave šuma se umnogome smanjuje, pa je samim tim je prisutan i kvalitetniji prenos podataka. Omotavanjem parica dodatno se doprinosi pouzdanijem prenosu podataka. Na Slici 14 je prikazano upredanje žica.



Slika 14. Upredanje žica

Međutim, rješavanje problema koji su bili prisutni kod RS-232 protokola uticalo je na povećanje cijene instalacije i održavanja RS-485 standarda u postrojenjima. Takođe, instaliranje ovog protokola u opasnim sredinama (hemikalije, štetni gasovi, itd.) predstavlja složen proces. Usložnjavanjem procesa instalacije povećava se i cijena takvog sistema. Takođe, pridruživanje novih entiteta mreži u takvoj sredini je kompleksno, dok upotrebom Zibgee tehnologije taj proces je uprošćen. Na Slici 15 su prikazane moguće topologije RS-485 protokola.

Kao što je vidljivo sa Slike 15, ovaj standard preporučuje upotrebu topologija "Daisy-Chain" i "Backbone with stubs", dok bi topologije "Star", "Ring", "Backbone with stars or clusters" trebalo izbjegavati.



Slika 15. Topologije RS-485 protokola

Nedostatak protokola RS-485 se ogleda u smanjenom spektru funkcionalnih topologija, gubljenju podataka pri većim brzinama prenosa, otežanom *backup-u* sistema, potrebi za većim ožičenjem, što utiče na praktičnost primjene kao i na cijenu instalacije. U pogledu funkcionalnosti topologija Zigbee protokol predstavlja značaj iskorak u mrežnom povezivanju, jer osim većeg broja funkcionalnih topologija podržava i meš topologiju, koja omogućava bolju interkonekciju uređaja.

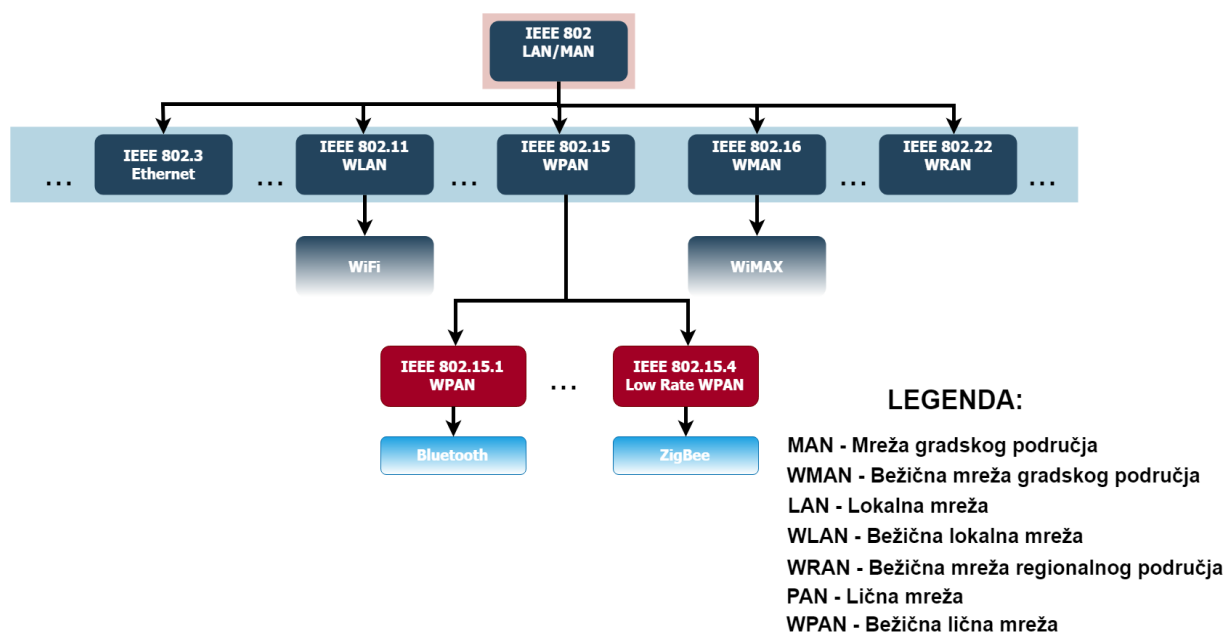
Kako pomenuti industrijski standardi (RS-232 i RS-485) počivaju na žičanoj infrastrukturi, ukoliko dođe do oštećenja kabla, veza između uređaja se trajno gubi. Kod Zigbee tehnologije to nije slučaj zahvaljujući mehanizmu samozacjeljenja, koji omogućava automatsko pronalaženje alternativne putanje podataka do svog odredišta, ukoliko dođe do kvara nekog komunikacionog čvora. Na ovaj način ne može doći do trajnog gubljenja neophodnih podataka, čime se značajno povećava pouzdanost sistema za monitoring u industrijskom postrojenju. Takođe, identifikovanje kvara kod Zigbee mreže je značajno olakšano zahvaljujući dostupnim alatima pomoću kojih je moguće otkloniti zastoje u komunikaciji.

4. Zigbee protokol

U nastavku ovog rada je predstavljen sistem industrijske komunikacije koji je zasnovan na Zigbee protokolu. Ne bi li se поближе prikazale mogućnosti takvog sistema, u ovom poglavlju će biti riječi o nekim osobinama Zigbee protokola, koji je po svojoj arhitekturi pouzdan i siguran, dok je hardver pristupačan gledajući sa ekonomskog aspekta [43].

Zigbee protokol se oslanja na IEEE 802.15.4 standard, dominantno na njegov fizički sloj i MAC podsloj (engl. Medium Access Control Sublayer) OSI modela (engl. Open Systems Interconnection). Jedna od vodećih organizacija koje se bave standardizacijom jeste IEEE (engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers), čiji ciljevi su obrazovno i tehničko unapređenje elektrotehnike i elektronike, računarski inženjering i srodne discipline [44]. U tom cilju 2003 godine odobren je IEEE 802.15.4 standard koji predstavlja preteču i osnovu Zigbee protokola. Osim najpoznatijeg, Zigbee protokola, i drugi protokoli se oslanjaju na IEEE 802.15.4 standard, kao što su: Wireless HART, ISA-SP100, IETF IPv6-LoWPAN.

Ciljna grupa ovog standarda su uređaji male snage i potrošnje. Ovakvi uređaji se mogu baterijski napajati duži vremenski period. Takođe, jedna od glavnih karakteristika ovakvih uređaja je mala maksimalna brzina protoka podataka. Ovaj standard se nalazi u okviru radne grupe IEEE 802 komiteta, koji se bavi izrađivanjem standarda lokalnih (engl. Local Area Network) i gradskih (engl. Metropolitan Area Network) komunikacionih mreža. U okviru ovog komiteta se nalazi veći broj aktivnih i neaktivnih radnih grupa među kojima su: Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, Ethernet, itd. Na Slici 16 je prikazano stablo radnih grupa u okviru IEEE 802 komiteta.



Slika 16. IEEE 802 radne grupe

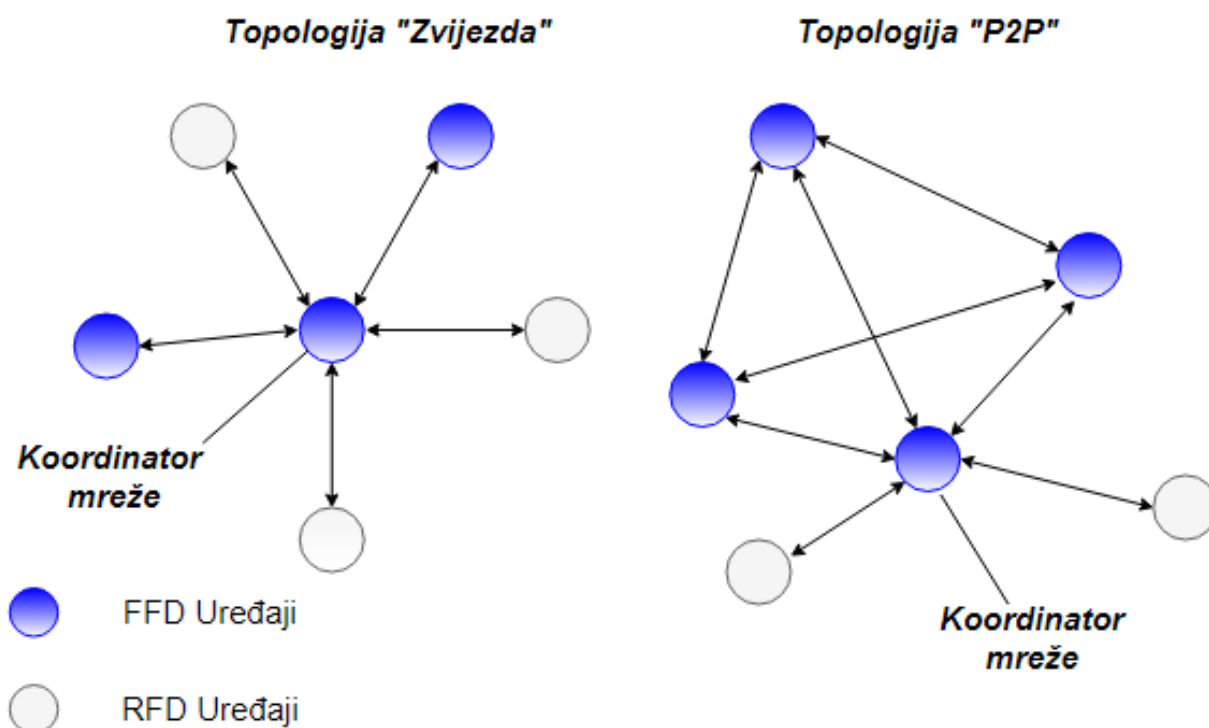
IEEE 802.15.4 tehnologija radi u ISM (engl. Industrial, Scientific and Medical) nelicenciranim opsezima koji su definisani tim standardom.

Ova tehnologija koristi sljedeće frekvencijske opsege [45]:

- Opseg 2.4 GHz (ima 16 radio kanala, numerisanih od 11 do 26)
- Opseg 915 MHz (ima 10 radio kanala, koristi se u SAD i Australiji)
- Opseg 868 MHz (ima 1 radio kanal, koristi se u EU)

Međutim, upotreba opsega od 2.4 MHz je najučestalija.

Standard IEEE 802.15.4 može biti primijenjen u bilo koji ugrađeni sistem (engl. Embedded System) u vojne, medicinske, industrijske i druge namjene. Pomenuti standard podržava "Zvijezda" i "P2P" (engl. Peer-To-Peer) mrežne topologije, koje su prikazane na Slici 17:



Slika 17. Topologije IEEE 802.15.4 standarda

Kao što je vidljivo sa slike, u ovoj tehnologiji postoje dvije vrste uređaja:

- FFD (engl. Full Function Device)
- RFD (engl. Reduced Function Device)

FFD uređaji imaju sve funkcije propisane ovim protokolom, mogu primiti i slati podatke, takođe mogu imati ulogu rutera. RFD imaju ulogu krajnjeg uređaja. Dakle, funkcionalnost im je ograničena, ne mogu imati ulogu rutera i komuniciraju isključivo sa FFD uređajima.

IEEE 802.15.4 standard je razvijen kao podloga protokolima koji će predstavljati poboljšanje ovog standarda i unaprijediti bežičnu komunikaciju. Zigbee protokol dodaje niz funkcionalnosti i mehanizama koji unaprijeđuju bežičnu komunikaciju čija je jedna od glavnih osobina energetska štedljivost.

Zigbee protokol je produkt Zigbee Alijanse, koju danas čini preko 300 kompanija u svijetu (Texas Instruments, Google, Lutron, Samsung, LG, Huawei, Amazon, Apple, itd).

Pomenuti protokol je projektovan u cilju stvaranja jednostavnog, pouzdanog i bezbjednog bežičnog prenosa podataka. Takođe, kao i IEEE 802.15.4 standard, i Zigbee protokol je namijenjen uređajima male potrošnje i snage koji se pomoću baterije mogu napajati duži vremenski period. Zigbee je bežična, jeftina tehnologija dvosmjerne komunikacije male potrošnje, napravljena u cilju stvaranja lične računarske mreže (engl. PAN- Personal Area Network) [45]. Komunikacija uređaja PAN mreže je moguća u radijusu od nekoliko metara do nekoliko desetina metara. Neke od tehnologija bežičnih ličnih mreža koje su doživjele ekspanziju su: Bluetooth, BLE (engl. Bluetooth Low Energy), Zigbee, IrDA, itd. Primjena Zigbee tehnologije naročito je pogodna u industrijskim postrojenjima gdje omogućava veliku energetska autonomiju, kao i povezivanje velikog broja senzora, aktuatora, i drugih uređaja. Takođe, zahvaljujući širokom spektru dostupnih topologija i osobini rutiranja podataka ova tehnologija omogućava veliki stepen povezanosti mašina u proizvodnim postrojenjima.

4.1 Arhitektura Zigbee protokola

U počecima oblikovanja komunikacionih mreža nepostojanje referentnog modela kojim će se opisati njihova arhitektura, dovodi do problema interoperabilnosti mreža različitih proizvođača. Međunarodna organizacija za standardizaciju (engl. International Organization for Standardization) rješava ovaj problem definisanjem OSI referentnog modela povezivanja sistema (engl. Open System Interconnection). Na ovaj način, definisan je šablon zahvaljujući kome je moguće razumjeti način kretanja podataka mrežom. Kako je koncept komunikacionih mreža po svojoj prirodi kompleksan, njegovim raslojavanjem komunikacija je uprošćena. Koncept slojeva se koristi kod mrežnih protokola ne bi li se komponente i funkcije grupisale u jedinstvene cjeline koje se kasnije mogu objediniti na različite načine. OSI model definiše sedam slojeva, a to su:

- Aplikacioni sloj
- Sloj Prezentacija
- Sloj Sesije
- Transportni sloj
- Mrežni sloj
- Sloj veze
- Fizički sloj

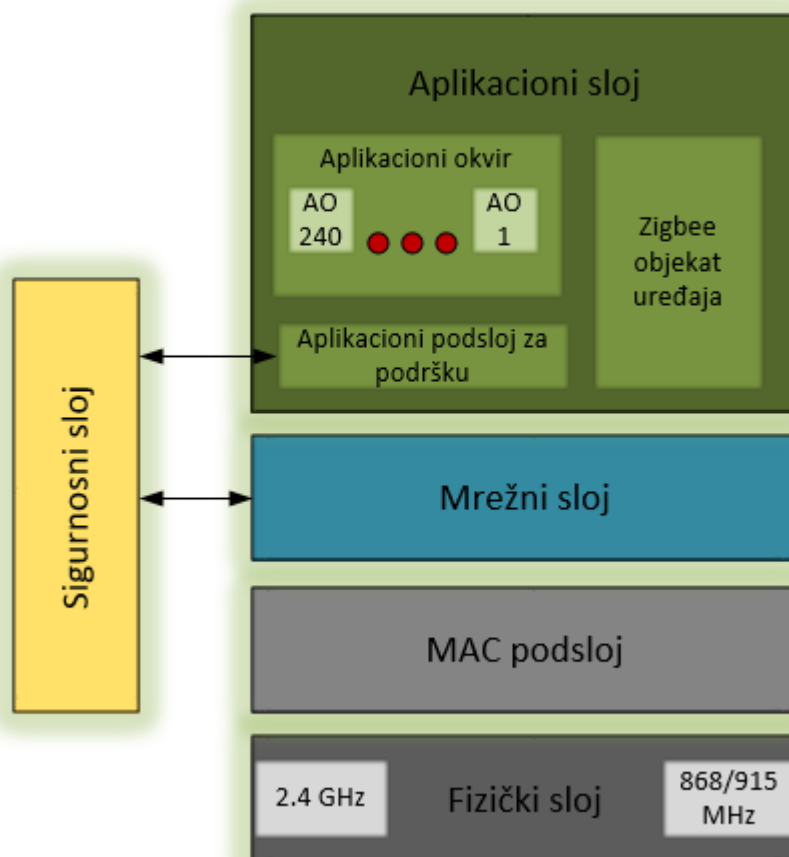
Arhitektura Zigbee protokola je podijeljena na četiri dijela različite namjene (sloja). Svaki sloj je namijenjen određenom dijelu protokola i na raspolaganju je višim slojevima u Zigbee arhitekturi. Arhitektura Zigbee tehnologije počiva na IEEE 802.15.4 standardu. Osnovu ovog protokola predstavljaju fizički sloj (engl. PHY- Physical Layer) i MAC podsloj (engl. MAC- Media Access Control).

Gornji slojevi Zigbee protokola, koji su implementirani na IEEE 802.15.4 standard, dodaju ovom protokolu neke prednosti [46]:

- Rutiranje – pomoću tabela definiše se način prenošenja poruke kroz mrežu uređaja, do krajnjeg odredišta
- Stvaranje ad hoc mreže – automatizovan proces kreiranja i povezivanja mreže

- Self healing mesh – prilikom odsustva jednog ili više uređaja iz mreže, obavlja se rekonfiguracija mreže sa ciljem stvaranja novih ruta prenosa podataka

Slikom 18 je data arhitektura Zigbee protokola.



Slika 18. Arhitektura Zigbee protokola (modifikovano [45][47])

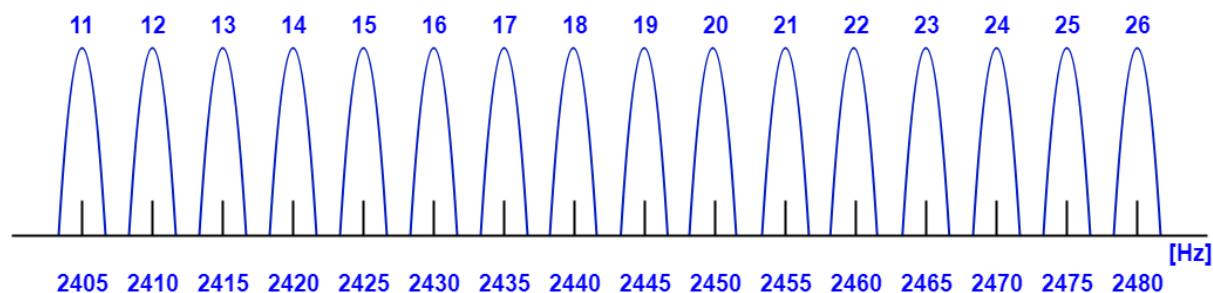
Kao što je vidljivo sa Slike 18. Zigbee protokol je definisan sljedećim slojevima: Fizički sloj, MAC podsloj, Mrežni sloj (engl. Network Layer) i Aplikacioni sloj (engl. Application Layer).

Fizički sloj predstavlja najniži sloj i zadužen je za: uključivanje/isključivanje radio-primopredajnika, slanje i primanje paketa podataka, mjerenje energetskeg nivoa signala, odabir kanala, kvalitet linka (engl. Link Quality Indicator) [48].

Kako je ranije napomenuto, Zigbee tehnologija koristi sledeće frekvencijske opsege: 868 MHz, 915 MHz i 2.4 GHz. Ova komunikacija se obavlja sledećim brzinama prenosa podataka: 20, 40 i 250 kb/s, respektivno. Na Slici 19 su prikazani kanali Zigbee tehnologije u frekvencijskom opsegu od 2.4 GHz. Kao što je ranije pomenuto postoji 16 kanala koji imaju širinu od 2 MHz. Centralna frekvencija se računa po formuli:

$$F_c = 2405 + 5 \cdot (k - 1) \dots \dots \dots (9),$$

gdje je F_c dato u MHz, dok k predstavlja broj kanala ($k=11, 12, \dots, 26$).



Slika 19. Komunikacioni kanali Zigbee tehnologije

MAC podsloj omogućava pristup Zigbee kanalima za prenos podataka, potvrđuje isporuku podataka, upravlja mrežnim *beacon* zahtjevima (upitima), obavlja validaciju okvira podataka, omogućava korišćenje određenih sigurnosnih mehanizama [48]. Dakle, može se kazati da MAC podsloj predstavlja jednostavan i fleksibilan protokol, razvijen sa ciljem omogućavanja pouzdane isporuke podataka [49].

Mrežni sloj upravlja adresiranjem i rutiranjem. Takođe je zadužen i za stvaranje mreže, priključivanje/uklanjanje uređaja iz mreže, usmjeravanje poruke do željenog uređaja. Mrežni sloj takođe primjenjuje i sigurnosne mehanizme radi obezbjeđivanja bezbjednog protoka podataka [45]. Ovaj sloj podržava više topologija kao što su: zvijezda, topologija stabla, meš [45] [49].

Aplikacioni sloj se sastoji od Aplikacionog okvira, Aplikacionog podsloja za podršku i Zigbee objekta uređaja.

Aplikacioni okvir (engl. Application Framework) predstavlja okruženje u kojem se nalaze aplikacioni objekti (engl. Application Object) [45], koji su ustvari djelovi softvera koji kontrolišu hardver i nalaze se u čvorovima mreže. Moguće je definisati do 240 aplikacionih objekata, kao što je vidljivo sa slike 18.

Zigbee objekat uređaja (engl. Zigbee Device Object) – zadužen je za stvaranje sigurne veze između uređaja, definisanje uloge uređaja u mreži (koordinator, ruter ili krajnji uređaj), otkrivanje uređaja koji su dio mreže, iniciranje i odgovor na vezujuće zahtjeve (engl. Binding Request) [45][49].

Aplikacioni podsloj za podršku (engl. Application Support Sublayer) – služi kao interfejs mrežnog i aplikacionog sloja i zadužen je za: tabele veza (engl. Binding Tables) koje služe za povezivanje uređaja, kao i za prosljeđivanje poruka između povezanih entiteta [45], [50]. Takođe omogućava direktno, indirektno, kao i *broadcast* adresiranje. Koordinator u mreži upravlja tabelama veza [49], [50].

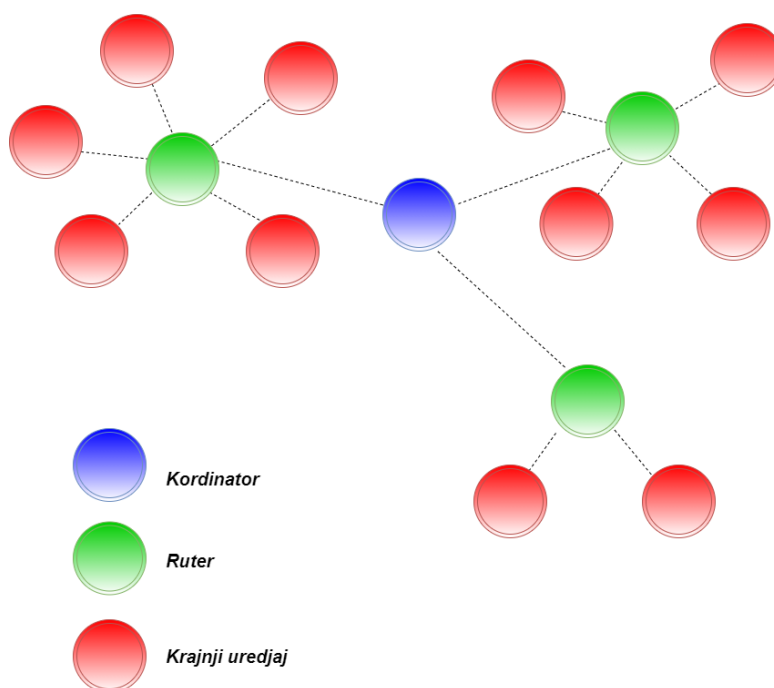
Zahvaljujući prisutnosti sigurnosnih mehanizama u više Zigbee slojeva, ova tehnologija se može smatrati bezbjednom za korišćenje. Takođe se u aplikacionom sloju prožima i *sigurnosni sloj* koji omogućava mehanizme zaštite podataka. Podaci su zaštićeni 128-bitnim ključem. Naime, prilikom prenosa podataka predajna i prijemna strana dijele isti 128-bitni ključ, koji omogućava siguran prenos podataka.

Komunikacija među Zigbee uređajima je moguća ukoliko su poznate njihove adrese. Postoje tri vrste adresa [46]:

- 64-bitna adresa koja ne može biti promijenjena i jedinstvena je za svaki Zigbee uređaj
- 16-bitna adresa koja se dinamički dodjeljuje kada uređaj pristupa mreži. Ovu adresu dodjeljuje koordinator mreže
- Identifikator čvora (engl. Node Identifier) – dodjeljivanje naziva (stringa) čvoru radi lakšeg prepoznavanja u mreži od strane korisnika

4.2 Vrste Zigbee uređaja

U Zigbee mreži postoje tri tipa uređaja. Centralni dio Zigbee mreže zauzima koordinator bez kojeg ne bi bilo moguće formirati mrežu. Zatim, još postoje ruter i krajnji uređaj.



Slika 20. Zigbee mreža

Koordinator (engl. Coordinator) – Prvenstveno služi stvaranju mreže i čuvanju informacija o istoj. Pomoću koordinatora moguće je povezivanje sa drugim mrežama.

Ruter (engl. Router) – Predstavlja uređaj (čvor) pomoću kojeg je moguće slati, primiti, prosljeđivati poruke. Korišćenjem osobine prosljeđivanja moguća je razmjena informacija između dva udaljena čvora među kojima nema direktne veze. Dakle, ruter ima veoma značajnu ulogu u indirektnoj komunikaciji mreže. Zigbee mreža može imati veliki broj rutera. U teoriji Zigbee mrežu može činiti više od 65 000 uređaja [49].

Krajnji uređaj (engl. End Device) – Predstavlja uprošćenu verziju rutera. Ima mogućnost slanja i primanja poruka u mreži ali nema osobinu prosljeđivanja. Posjeduje *režim spavanja* (engl. Sleep Mode) zahvaljujući kojem uređaj nije aktivan kada ne postoji potreba da učestvuje u komunikaciji u mreži. Na ovaj način štedi energiju.

Krajnjem uređaju je potreban “roditeljski čvor” (engl. Parent Node), u vidu koordinatora ili rutera, koji mu omogućava pristup mreži i čuva poruke koje su mu upućene dok je bio u režimu spavanja. U Zigbee mreži može postojati veliki broj krajnjih uređaja.

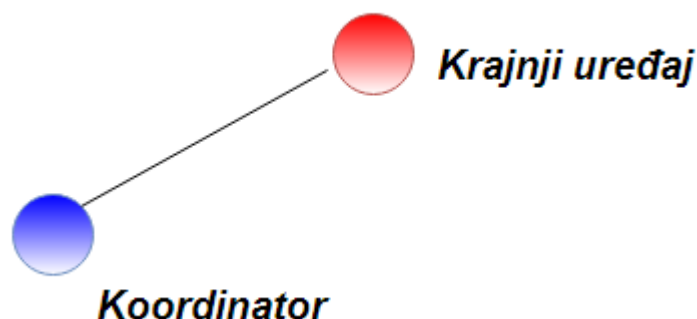
4.3 Topologije mreže

Mrežna topologija predstavlja tehniku povezivanja komunikacionih elemenata sa ciljem uspostavljanja komunikacione mreže. Postoje različiti načini povezivanja Zigbee uređaja kao što su: povezivanje “Dva uređaja”, “Zvijezda”, “Meš”, kao i “Stablo”.

4.3.1 Topologija “Dva uređaja”

Kao što samo ime kaže, ova topologija povezuje dva Zigbee uređaja i ovo je najjednostavniji tip mreže. Da bi se mreža oformila jedan uređaj mora biti konfigurisan kao koordinator dok drugi član mreže može biti krajnji uređaj ili ruter [46]. Ovakav tip topologije može da se koristi u jednostavnim senzorskim mrežama za mjerenje vlažnosti vazduha, temperature, itd.

Na Slici 21 je prikazana ova mreža.



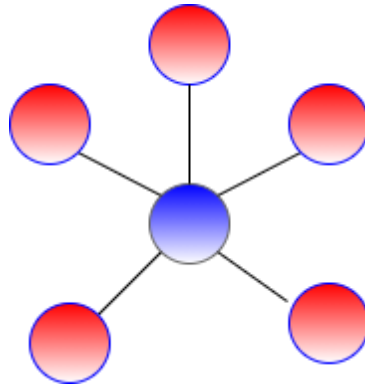
Slika 21. Topologija “Dva uređaja”

4.3.2 Topologija „Zvijezda“

Kod ovakvog tipa uređenja mreže koordinator zauzima centralni položaj (kao na Slici 22, koordinator – plava boja), dok su ostali članovi Zigbee mreže krajnji uređaji. Svaka poruka prolazi kroz koordinator i on je preusmjerava na potrebnu adresu [46]. Drugim riječima, komunikacija među krajnjim uređajima se isključivo obavlja preko koordinatora.

Nedostatak ove topologije ogleda se u manjem dometu. Naime, kako se sva komunikacija obavlja preko koordinatora, tako svi uređaji koji komuniciraju moraju biti u dometu koordinatora čime se ograničava domet mreže. Usljed toga, domet ove topologije je određen dometom koordinatora. Takođe, jedan od nedostataka ove topologije je u tome da ukoliko dođe do kvara na koordinatoru doći će do prestanka rada čitave mreže [51].

Na Slici 22 je prikazana topologija “Zvijezda”.

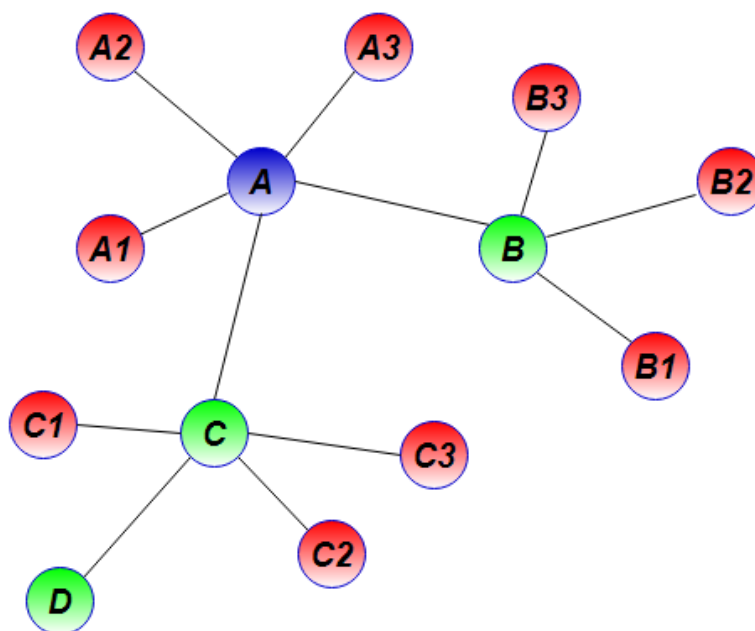


Slika 22. Topologija “Zvijezda”

4.3.3 Topologija “Stabla”

U ovom tipu topologije osim koordinatora i ruteri imaju centralnu ulogu [46]. Oko njih su grupisani krajnji uređaji i ruteri, i ovi grupisani uređaji mogu komunicirati i prenositi poruku samo preko rutera ili koordinatora (“roditeljski čvorovi”). Takođe, ruterima koji su već dio mreže je moguće pridružiti nove ruter uređaje čime se mreža proširuje. Ovaj tip mreže je fleksibilniji u odnosu na topologiju “Zvijezda” [51]. Treba napomenuti da krajnji uređaji ne mogu dodavati druge čvorove mreži.

Ukoliko je potrebna komunikacija čvora B1 sa čvorom C2, putanja kojom se šalju podaci je sljedeća: B1->B->A->C->C2. Dakle, komunikacija se odvija precizno definisanim putanjama (preko roditeljskih čvorova), što može dovesti do problema prilikom korišćenja ove topologije u kompleksnim sistemima. Na Slici 23 je prikazana Zigbee topologija “Stabla”.



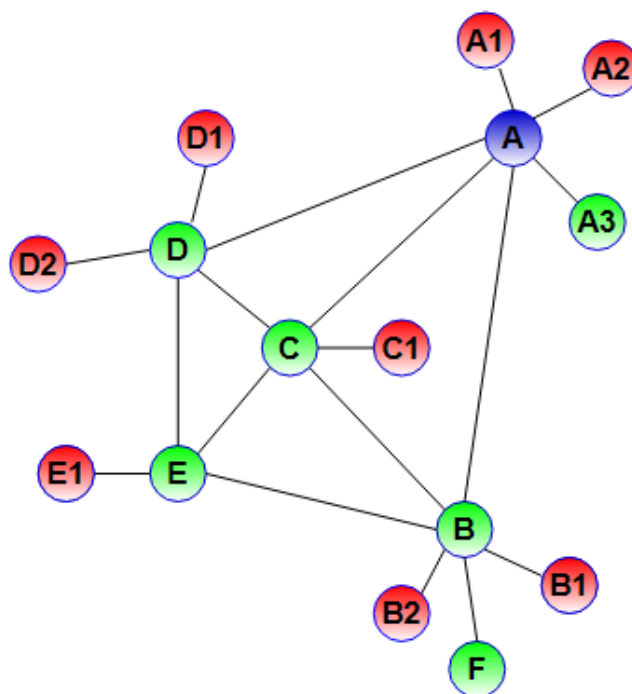
Slika 23. Topologija “Stabla”

4.3.4 “Meš” topologija

Ovaj tip mreže je decentralizovan (čime bežična mreža dobija na fleksibilnosti), i koristi rutere u svrhu prenošenja poruke do krajnjih uređaja. Dakle, svaki čvor (uređaj) ima mogućnost samostalnog istraživanja mreže. Koordinator upravlja mrežom i takođe može prenositi poruke.

Veliki broj krajnjih uređaja različitih namjena mogu biti povezani sa ruterom ili koordinatorom. Krajnji uređaji mogu generisati i primiti informaciju, međutim, samo uz pomoć roditeljskog uređaja mogu komunicirati sa drugim čvorovima [46]. Takođe, ruteri mogu samostalno komunicirati međusobno, bez pomoći “roditeljskog čvora” [51].

Kod ove topologije čvorovi su praktično svi međusobno povezani, što znači da postoji više mogućih putanja između čvorova. Pomoću Meš tabele za rutiranje, putanje među čvorovima se dopunjuju i optimizuju. Zigbee mesh ima sposobnost samozacjeljenja (engl. Self-Healing) koja omogućava rekonfigurisanje putanje rutiranja kada neki čvor napusti mrežu. Ova sposobnost je veoma značajana u složenim sredinama (npr. industrijskom pogonu), gdje može doći do iznenadnog kvara na nekom čvoru. Na Slici 24 je prikazana mesh topologija. Ukoliko krajnji uređaj E1 komunicira sa koordinatorom mreže, postoji više putanja kojima je moguće postignuti pomenutu komunikaciju. Neke od putanja su: E1->E->B->A, E1->E->C->A, E1->E->D->A, itd.



Slika 24. Topologija “Meš”

Korišćenjem Meš topologije povećava se funkcionalnost, robustnost i pouzdanost sistema bežične komunikacije. Samim tim, ova topologija nalazi primjenu u sistemu industrijske komunikacije, predstavljenom ovim radom.

Ovako koncipirana mreža, nalazi primjenu u IoT sistemu (engl. Internet of Things), čime se dodaje dodatni kvalitet razvijenom modelu industrijske komunikacije. Samim tim, moguća je razmjena informacija preko Interneta kao i njihova obrada, što može dati veliki doprinos unaprijeđenju rada postrojenja nakon analize sakupljenih podataka.

4.4 Internet stvari (IoT)

Prve vizije koncepta IoT mogu se vezati za 19-i vijek i početak komunikacije uređaja “na daljinu”. Zatim, konstruisanjem računara i razvojem Internet protokola u 20-om vijeku ovaj koncept poprima svoj današnji oblik. Prvi IoT uređaj je nastao 1990 godine, kad je Džon Romki uspio da upali/isključi toster preko Interneta. Međutim, smatra se da koncept IoT doživljava popularizaciju od 2010 godine.

Napredak i značaj tehnologije IOT najbolje pokazuje vrijednost tržišta koje pokriva. Neke stručne procjene ukazuju da će do 2025. godine biti više od 30 milijardi IoT veza, odnosno skoro 4 IoT uređaja po osobi [52]. Uzimajući u obzir, da će pomenuti IoT uređaji imati veći broj senzora koji će prikupljati podatke, dolazi se do zaključka da će se obrađivati velika količina podataka zahvaljujući ovoj mreži. McKinsey Global Institut predviđa da će do 2025. godine godišnji ekonomski uticaj IoT biti između 3.9 i 11.1 biliona dolara [53].

Spektar primjene Internet stvari je praktično neograničen, i ovu tehnologiju možemo podijeliti:

- Potrošački IoT
- Komercijalni IoT
- Industrijski IoT

Poseban akcenat ovog rada je stavljen na razvijanje industrijskog IoT (engl. Industrial Internet of Things), koji uz minimalne adaptacije nudi primjenu u velikom broju industrijskih grana. Kako je značaj monitoringa proizvodnje nemjerljiv za industriju, tako primjenom razvijenog sistema proizvodnja se prati u realnom vremenu, uočavaju se neregularnosti i nedostaci tokom iste, što omogućava pravovremeno reagovanje i uklanjanje neželjenih efekata.

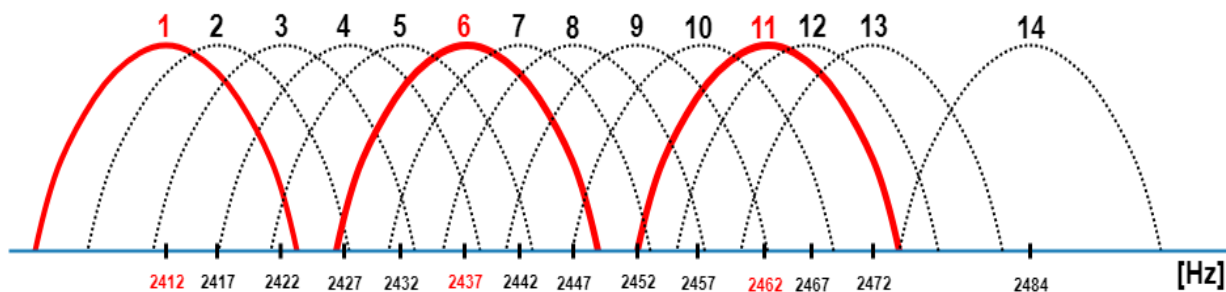
Na ovaj način moguće je pratiti rad postrojenja i prikupljati neophodne parametre sa udaljenih lokacija. Dakle, upotrebom ovakvog koncepta, moguć je pristup najznačajnijim parametrima proizvodnje preko Interneta, što je i jedan od ciljeva ovog master rada. Na taj način, razvijeni sistem dobija na značaju i proširuje svoju funkcionalnost. Neki od pomenutih parametara su: broj radnih sati mašina, produktivnost zaposlenih, kvalitet proizvoda, temperatura i vlažnost vazduha u komorama, itd. Primjenom sistema zasnovanog na IOT povećava se stepen automatizacije postrojenja, a samim tim i njegova produktivnost.

Da bi se omogućilo iskorišćavanje svih kapaciteta koje ovakav sistem nudi, potrebno je utvrditi stepen koegzistencije takvog sistema sa drugim tehnologijama, a da sistem zadržava pouzdanost pri radu. Takođe, potrebno je i uporediti Zigbee mrežu (prednosti i mane) u odnosu na druge bežične tehnologije, koje predstavljaju svojevrsan pandan u industrijskom okruženju, ne bi li se dobila konkretnija slika o mogućnostima Zigbee mreže i njenom mjestu u industrijskoj proizvodnji.

4.5 Zigbee i druge bežične tehnologije

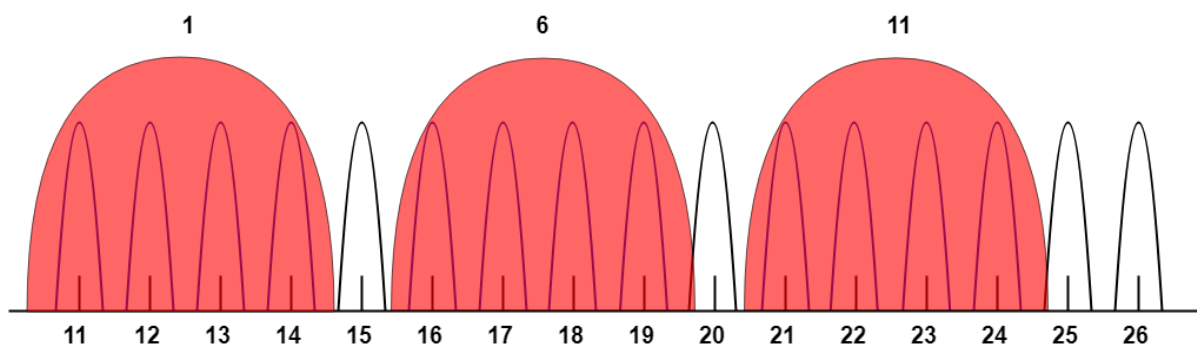
Kao što je pomenuto u ovom poglavlju, Zigbee tehnologija radi u nelicenciranom opsegu od 2.4 GHz. Neke od najrasprostranjenijih tehnologija koje rade u ovom opsegu su Wi-Fi i Bluetooth. Kako ove tehnologije koegzistiraju u istom opsegu, može doći do interferencija prilikom prenosa podataka.

Wi-Fi (IEEE 802.11) predstavlja de facto standard bežične komunikacije, kao i najčešće korišćenu bežičnu LAN mrežu (eng. WLAN). Pomoću ovog standarda je moguće bežično umrežiti više uređaja u lokalnoj mreži. Takođe, ovaj standard omogućava uređajima pristup Internetu. Prilikom razvoja ovog standarda vodilo se računa o njegovoj interoperabilnosti sa do tada dominantno korišćenim žičanim standardima (Ethernet). Odbor IEEE 802, 1990 godine, formira novu radnu grupu IEEE 802.11 sa ciljem razvijanja WLAN mreže. Najčešće korišćeni opsezi ovog standarda su oni od 2.4 i 5 GHz. Ovi opsezi su podijeljeni u više kanala, a kako opseg od 2.4 GHz koristi i Zigbee tehnologija, dolazi do preklapanja kanala komunikacije što utiče na kvalitet i pouzdanost prenosa podataka u Zigbee mreži. Na Slici 25 su prikazani Wi-Fi kanali koji se nalaze u ovom frekventnom opsegu.



Slika 25. Wi-Fi komunikacioni kanali

Kao što je vidljivo sa slike, Wi-Fi mreža ima 14 kanala a može imati samo tri nepreklapajuća kanala u funkciji, npr: 1, 6, 11. Pomenuti Wi-Fi kanali koriste isti frekvencijski opseg kao i Zigbee tehnologija. Širina Wi-Fi kanala iznosi 22 MHz. Preklapanje Zigbee i Wi-fi kanala je dato Slikom 26.

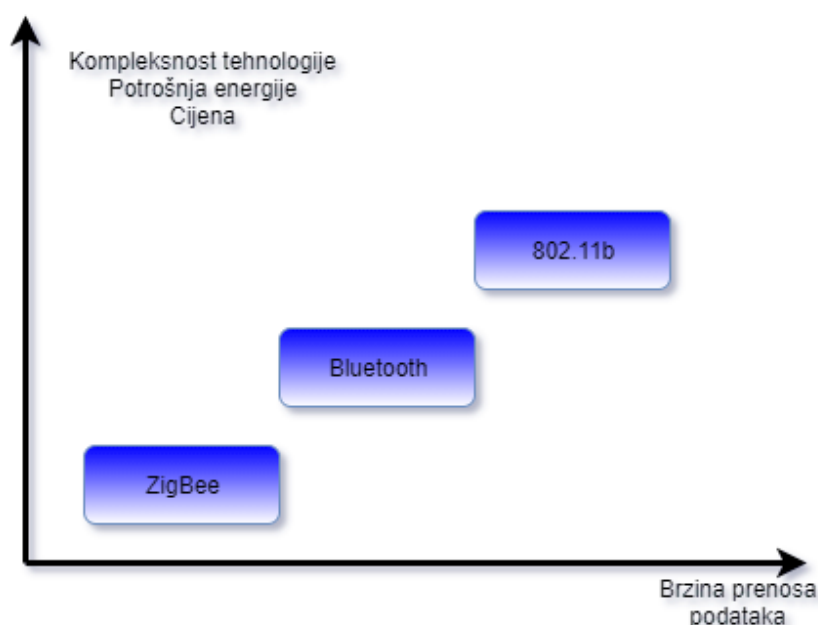


Slika 26. Preklapanje Zigbee i Wi-Fi komunikacionih kanala

Iz pomenutog se može zaključiti da je jedno od značajnih pitanja prilikom projektovanja Zigbee mreže šum koji nastaje usled preklapanja Zigbee kanala sa Wi-Fi kanalima. Kao što je vidljivo sa Slike 26, Zigbee kanali 11-24 koriste isti frekvencijski opseg kao Wi-Fi nepreklapajući kanali 1, 6, 11 i najveći broj interferencija prilikom slanja/primanja paketa podataka Zigbee mrežom će biti prisutno na ovim kanalima.

Bluetooth je bežični standard pomoću kojeg se podaci razmjenjuju UHF radio talasima (engl. Ultra High Frequency). Ovaj tip prenosa podataka veoma je pogodan za transfer audio i video sadržaja, slika itd. Maksimalna brzina prenosa podataka ovim standardom može biti i više Mb/s, zavisno od verzije standarda. Domet prenosa podataka ovog standarda je 10-15m. Za razliku od Bluetooth-a, Zigbee tehnologija ima domet od više desetina metara, međutim protok podataka je na strani Bluetooth tehnologije. Obje tehnologije koriste isti frekventni opseg od 2.4 GHz. Bluetooth tehnologija radi na principu domaćin/gost, gdje se domaćin može povezati sa do sedam (7) gost uređaja. Veličina mreže, odnosno broj uređaja koji mogu oformiti mrežu, je na stranu Zigbee tehnologije. Bluetooth tehnologija je pogodna za namjene gdje je potrebno poslati veliku količinu podataka, usled velike propusnosti, međutim, jedan od nedostataka ove tehnologije je kompleksnost implementiranja takve mreže i potrebe za uparivanjem uređaja.

Kao što je prikazano u radu [54], u industrijskim postrojenjima, Zigbee tehnologija zadovoljava širi spektar primjena usljed mogućnosti baterijskog napajanja duži vremenski period, većeg dometa, veće fleksibilnosti i pouzdanosti mreže.



Slika 27. Poređenje bežičnih tehnologija

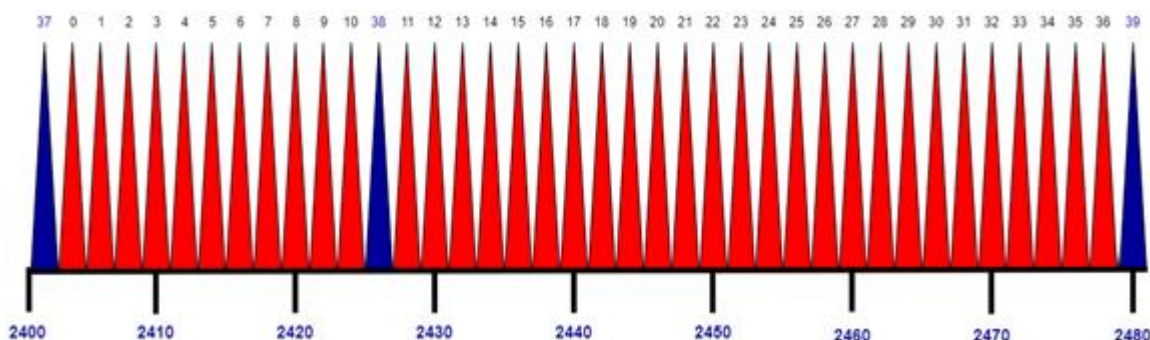
Na Slici 27 je prikazano poređenje potrošnje energije, kompleksnosti, cijene i protoka podataka kod Zigbee, Bluetooth, i IEEE 802.11b tehnologija. Kao što je uočljivo sa slike, količina protoka podataka je na strani Bluetooth i IEEE 802.11b tehnologija kojima se mogu prenositi slike, audio i video klipovi. Prednosti Zigbee tehnologije je u maloj potrošnji i cijeni, kao i u jednostavnoj upotrebi.

Zigbee tehnologija koristi manje pakete podataka u poređenju sa Wi-Fi i Bluetooth-om, i smatra se da Zigbee tehnologija sa sobom nosi veći stepen sofisticiranosti u odnosu na Wi-Fi i Bluetooth tehnologije [55]. Upravo zbog velike potrošnje i nemogućnosti štednje energije, u IIoT namjene Wi-Fi i Bluetooth tehnologije nije pogodno koristiti. U tu namjenu, Bluetooth razvija tehnologiju BLE (engl. Bluetooth Low Energy) koja predstavlja svojevrsan pandan Zigbee mreži u tom segmentu.

BLE predstavlja ogranak Bluetooth tehnologije, nastao 2010 godine, pa samim tim koristi isti opseg od 2.4 GHz. Prednost ove tehnologije u odnosu na Zigbee protokol je u tome što je podržava veliki broj operativnih sistema (IOS, Android, Windows, Linux). Drugim riječima, svi uređaji koji podržavaju Bluetooth 4.0 standard podržavaju i BLE.

Obzirom da je na tržištu sve veći broj računara, pametnih telefona, tableta, tržište koje pokriva BLE standard rapidno raste. Kako je predstavljeno u radu [56] cijena hardvera BLE tehnologije je manja od cijene Zigbee tehnologije, a jedan od faktora koji mogu uticati na cijenu je i veliko tržište koje BLE pokriva.

Princip rada BLE tehnologije se zasniva na dugim periodima spavanja uređaja, nakon čega se uređaji bude i šalju podatke (veoma kratki vremenski intervali), da bi se zatim ponovo našli u režimu spavanja do novog uspostavljanja veze. Fizički sloj omogućava korišćenje 40 kanala za prenos podataka (širina kanala je 2 MHz), dok je brzina prenosa podataka 1 Mbit/s.



Slika 28. BLE komunikacioni kanali

Međutim, iako je maksimalna brzina prenosa podataka na strani BLE tehnologije, Zigbee (IEEE 802.15.4) omogućava fizički veću mrežu [57]. U radu [58] analizirani su fizički slojevi BLE i IEEE 802.15.4 tehnologija gdje je utvrđeno da je prilikom slanja okvira podataka BLE tehnologija energetska efikasnija, dok IEEE 802.15.4 tehnologija nudi bolju pokrivenost. Međutim, isto istraživanje ukazuje na veću energetska efikasnost IEEE 802.15.4 protokola u sredinama gdje se jačina signala nalazi ispod -98 dBm (engl. Received Signal Strength Indicator), što znači da IEEE 802.15.4 nudi bolju energetska efikasnost u mrežama koje razmjenjuju podatke blizu praga osjetljivosti. Treba napomenuti, da pomenuta mjerenja važe isključivo za fizički sloj, dok cjelokupna energetska efikasnost bežične tehnologije zavisi i od viših slojeva arhitekture protokola [58].

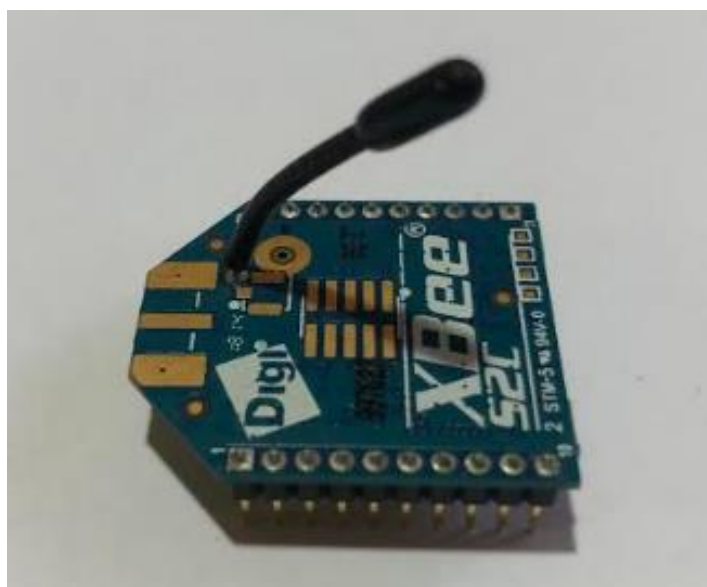
Zigbee predstavlja nešto efikasniji protokol, u smislu odnosa korisnih podataka od interesa koji se šalju i ukupne dužine paketa podataka, u odnosu na BLE. Kod Zigbee-ja je efikasnost 76 % (102/133), dok je kod BLE taj odnos 66 % (31/47) [59].

Može se smatrati da je glavna prednost BLE u odnosu na Zigbee veliki broj uređaja koji omogućavaju hardversku i softversku podršku ovoj tehnologiji. Ovaj faktor može donijeti prevagu na strani BLE u zastupljenosti na tržištu.

Međutim, konstantnom tehnološkim razvojem hardverskih i softverskih rješenja vezanih za Zigbee protokol (npr. XBee uređaj i XCTU softver), Zigbee i dalje predstavlja bitnu kariku i bilježi konstantan rast udjela u tržištu bežičnih senzorskih mreža i industrijske komunikacije.

5. XBee uređaj i XCTU softver

U ovom poglavlju će biti opisan XBee uređaj, koji predstavlja srž ovoga rada. Takođe, predstaviće se i XCTU platforma za komunikaciju i testiranje bežične komunikacione mreže. U ovom radu su korišćeni XBee S2C moduli, pomoću kojih se formira bežična komunikaciona mreža. Na Slici 29 je prikazan ovaj uređaj. Uređaji serije S2C predstavljaju napredniju verziju XBee uređaja (u odnosu na serije 1 i 2) u smislu većeg dometa, veće energetske efikasnosti, poboljšane osjetljivosti prijemnika, itd. Iako su uređaji serije 1 jednostavniji za upotrebu, u komplikovanijim industrijskim okruženjima pogodnije rješenje predstavljaju XBee S2C uređaji.



Slika 29. XBee RF modul

Ono što karakteriše XBee S2C uređaj jesu veoma male dimenzije, svega nekoliko cm. Dakle, ovaj uređaj predstavlja kompaktno rješenje za ostvarivanje bežične industrijske komunikacije. XBee uređaje serije 2 nije moguće povezati sa uređajima serije 1. Međutim, uređaji serije S2C, koji su korišćeni u ovom radu, mogu da komuniciraju sa serijama 1 i 2.

Neke karakteristike XBee S2C uređaja date su u tabeli 3 [60].

Karakteristike	XBee S2C
Domet u zatvorenom	do 60 m
Domet na otvorenom (linija vidljivosti)	do 1200 m
Izlazna snaga	3.1 mW (+5 dBm)
Brzina prenosa podataka	250 kb/s
Osjetljivost prijemnika	-100 dBm

Kao što je prikazano tabelom, domet ovih uređaja u zatvorenom prostoru je do 60m, dok je domet ovih uređaja na brisanom prostoru do 1,2 km. Zbog male energetske zavisnosti ova pločica predstavlja idealno rješenje prilikom stvaranja *mesh* mreže.

Kako je u poglavlju 3 istaknuto, protokol predstavlja skup pravila definisanih u cilju ostvarivanja komunikacije među uređajima u mreži [61]. Osim Zigbee protokola XBee radio primopredajnici podržavaju i sljedeće protokole [61]:

- Digimesh
- IEEE 802.15.4
- Zigbee Smart Energy
- ZNet
- IEEE 802.11 (Wi-Fi)
- Point-to-multipoint (Digi proprietary)
- XSC (XStream-compatible)

XBee S2C radio modul ima širok spektar primjene, kao npr:

- Automatizacija kuća i zgrada
- Kontrola industrijskih postrojenja
- Vojne svrhe
- Medicina
- Alarmni sistemi
- Poljoprivreda
- Stočarstvo

Postoje tri režima rada XBee uređaja:

- Režim rada AT
- Režim rada API
- Režim rada API 2

Od pomenutih režima rada najjednostavniji za podešavanje i korišćenje jeste AT režim rada. Međutim jednostavnost ove komunikacije sa sobom nosi teret ograničene primjene. Ovi režimi rada XBee uređaja će biti obrađeni u narednim potpoglavljima.

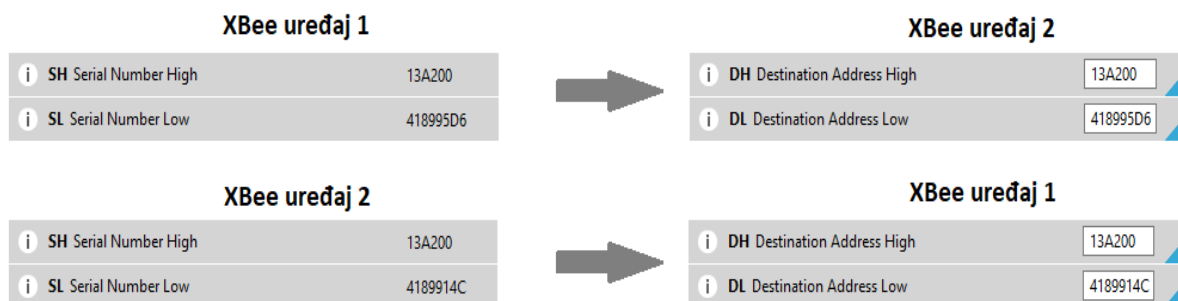
5.1 Režim rada AT

Ovaj režim rada naziva se transparentnim (engl. Application Transparent) zbog svojstva XBee uređaja da prenosi podatke na isti način kao što ih i prima. Dakle, XBee uređaj, koji je predajnik, serijski prima podatke koje zatim šalje bežičnim putem drugom XBee uređaju, koji predstavlja prijemnu stranu mreže. Kako se ovaj režim rada najčešće koristi za *point-to-point* komunikaciju, da bi ista bila moguća, potrebno je konfigurirati adrese uređaja koji komuniciraju. Podešavanjem parametara DH (engl. Destination Address High) i DL (engl. Destination Address Low) konfigurira se adresa modula zaduženog za prijem podataka [60].

Kao što je pomenuto u poglavlju 4.1, uređaji koji komuniciraju Zigbee protokolom mogu imati tri vrste adresa, a u ovom sličaju se koristi 64-bitna adresa da bi se ostvarila komunikacija AT režimom rada.

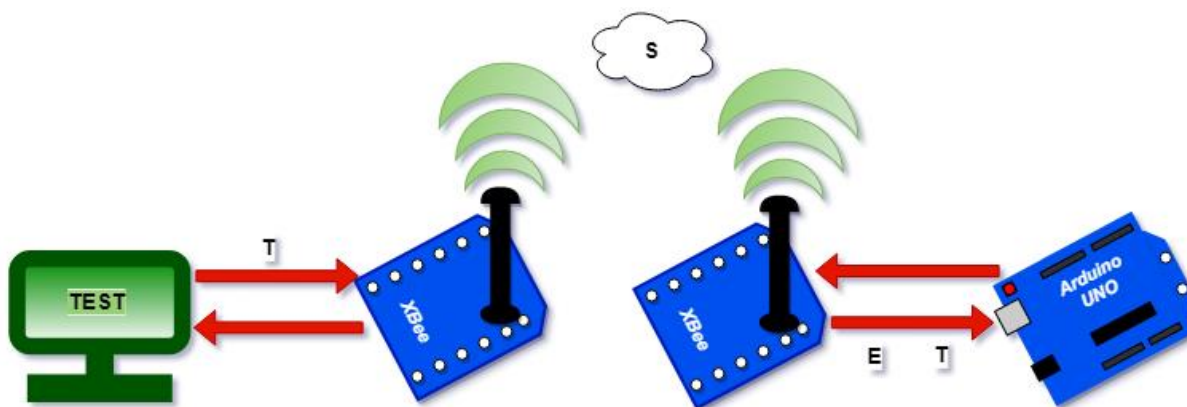
Kao što je ilustrovano na Slici 30, ostvarivanje komunikacije među modulima je moguće ukoliko se DH i DL parametri XBee uređaja 2 podese tako da odgovaraju parametrima adrese XBee uređaja 1: SH i SL, respektivno. Isti princip važi i kod XBee uređaja 1.

Nakon ovoga procesa, “vezivanja” XBee uređaja preko njihovih adresa, moguća je komunikacija istih. Kao što je moguće zaključiti (Slika 30), uspostavljanje komunikacije između uređaja (podešavanje adresa), predstavlja proces koji nepogodno utiče na fleksibilnost komunikacije (npr. ukoliko je potrebno promijeniti adresu destinacije). Samim tim, ovaj režim rada nije pogodan za komunikaciju sa više od dva čvora.



Slika 30. Podešavanje AT režima rada

Naime, ukoliko se šalje riječ „Test“, serijskom komunikacijom predajnik dobija bit po bit od PC uređaja, zatim primljene bitove istim redoslijedom bežično prosljeđuje prijemnoj strani. Nakon toga, prijemni XBee uređaj prosljeđuje poruku putem serijskog porta na isti način kako je primljena. Dakle, u pomenutom slučaju, redoslijed karaktera koji se prenose je sledeći: T->E->S->T. Princip rada ovakvog režima je prikazan na Slici 31.



Slika 31. AT režim rada

Neke od osobina AT režima rada su:

- Jednostavan prenos podataka i konfigurisanje
- Automatsko prosljeđivanje pristiglih podataka adresi koja se čuva u memoriji XBee modula
- Nije potrebno formiranje paketa podataka

- Izražena fleksibilnost usled interoperabilnosti sa svim uređajima koji podržavaju serijsku komunikaciju

Kao što je ranije navedeno, za uspješnu AT komunikaciju među modulima potrebno je poznavati 64-bitnu adresu. Nedostatak ovog načina prenosa podataka dolazi do izražaja prilikom korišćenja više modula [62], naime, prilikom svakog slanja poruke (mijenjanja komunikacione rute) potrebno je definisati adresu modula koji prima podatke, što znači da je brza promjena adrese nemoguća. Obzirom da je ovaj režim rada uprošćen, neki veoma bitni parametri komunikacije nijesu poznati (npr. adrese učesnika komunikacije, indikatori uspješnosti komunikacije, itd.)

Ovaj režim rada se koristi kada je potrebna *point-to-point* komunikacija među modulima: prilikom korišćenja mreže sa sensorima gdje isti šalju izmjerene vrijednosti masteru, iliti u svim primjenama gdje komunikacija zasnovana na XBee modulima služi kao zamjena serijskom kablju.

5.2 API režim rada

Komplikovaniji i napredniji način komunikacije sa XBee modulom predstavlja API režim rada (eng. Application Programming Interface). API režim transfera podataka zasnovan je na organizovanoj strukturi paketa podataka koji se prenose, API *okvirima* (engl. Frame). Dok se kod AT režima podaci prenose u istoj formi kako ih modul i prima, ovdje se prvo grupišu u pakete podataka koji se potom emituju. Ovi paketi osim podataka sadrže i komande, adrese, informacije o dužini paketa, kontrolne sume, itd. Prilikom kreiranja složenijih mreža AT režim rada nije pogodan, usljed čega se koristi API režim koji ima veliki broj funkcija za slanje, primanje i podešavanje XBee modula uopšte.

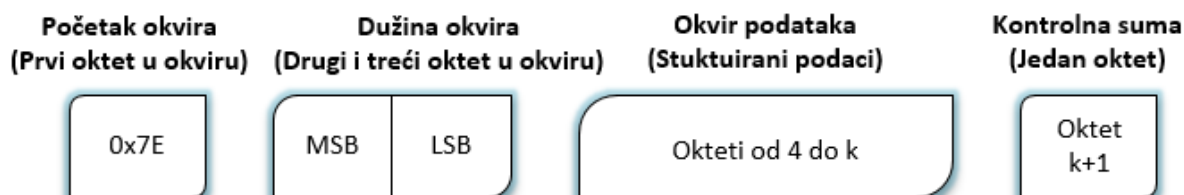
Koristeći API moguće je podesiti udaljene module u mreži, omogućiti prenos podataka sa više mrežnih čvorova, imati podatke o uspješno/neuspješno isporučenim paketima podataka, poznavati adrese svih čvorova u interakciji, itd [61].

Postoje dva tipa API režima rada:

- Standard (AP=1)
- Escaped (AP=2)

5.2.1 API okvir

Struktura API okvira kojim moduli komuniciraju je data na Slici 32.



Slika 32. API okvir

Svaki paket podataka počinje *oktetom* (osam bita) koji označava početak sekvence (početak okvira podataka) i svi podaci koji su primljeni prije ove početne sekvence bivaju odbačeni. Ukoliko je došlo do bilo kakve greške prilikom prijema paketa podataka, isti se odbacuju i ističe se tip greške. Početna sekvenca zauzima memorijski prostor od jednog bajta (okteta) i vrijednost joj je uvijek ista: 0x7E. Nakon početne sekvence slijede polja u kojima se upisuje dužina paketa podataka od interesa. Ova dužina se ne odnosi na početnu sekvencu, dužinu paketa podataka ili kontrolnu sumu (*checksum*), već predstavlja isključivo dužinu paketa podataka koji se prenose. Ovo polja zauzimaju dva okteta (bajta) memorijskog prostora [61].

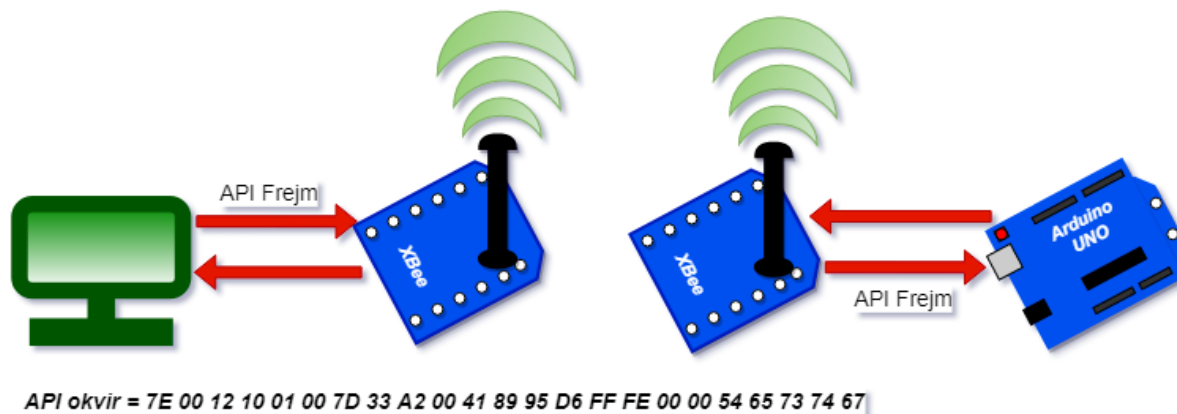
Prvi oktet polja gdje se nalaze podaci predstavlja *tip okvira* koji govori o vrsti okvira koja se koristi i na koji način su organizovani podaci u ovom polju. Posljednji bajt (oktet) API paketa podataka predstavlja *kontrolnu sumu* pomoću koje se detektuju greške prilikom prenosa podataka.

Escaped API (AP=2) predstavlja iskorak u odnosu na obični API režim rada što se tiče pouzdanosti prenosa podataka. Dok kod API režima rada (AP=1) kvalitet prenosa podataka zavisi od okteta za početak sekvence (engl. Start Delimiter) i okteta dužine polja (engl. Length Byte), ovdje to nije slučaj. Naime, ukoliko se izgubi podatak kod API režima rada (AP = 1), vrijednost polja dužine neće biti tačna i naredni API paket podataka će biti izgubljen. Korišćenjem ovoga režima rada (AP=2), sprečava se konflikt podataka sa nekim specijalnim karakterima [61]. Specijalni karakteri kod ovog režima rada su:

- 0x7E
- 0x7D
- 0x11
- 0x13

Dakle, prilikom projektovanja kompleksnijeg sistema bežične komunikacije, API režim rada predstavlja pogodnije rješenje. Kod ovog režima rada nije potrebno osmisлити protokol po kojem će uređaji komunicirati (npr. kao kod AT režima rada), pošto samo postojanje okvira (frejmova) podataka obesmišljava takvu ideju.

Princip prenošenja API paketa je prikazan na Slici 33.



Slika 33. API režim rada

5.3 Režim spavanja

Režim spavanja (engl. Sleep Mode) je razvijen u cilju smanjenja potrošnje energije i produžavanja životnog vijeka baterije kojom se uređaj napaja. Kada se nalazi u ovom režimu rada uređaj nije u mogućnosti da prima ili šalje podatke sve do trenutka njegovog buđenja. Postoje dva tipa ovog režima: *kontrolisanje spavanja pinom* i *ciklično spavanje*. Prvi način uštede resursa kontroliše se pomoću pina 9 XBee uređaja. Kod cikličnog spavanja uređaj miruje određeni vremenski period, unaprijed određen od strane korisnika. Ispravno planiranom upotrebom ovog režima životni vijek baterije koja napaja XBee uređaj može biti i par godina. Teorijska analiza vijeka trajanja baterije XBee uređaja je data u poglavlju 6.6.

5.4 XCTU aplikacija

XCTU je multifunkcionalna, besplatna i jednostavna za upotrebu aplikacija razvijena od strane kompanije Digi International. Funkcija ove aplikacije jeste podešavanje XBee uređaja i omogućavanje komunikacije među njima, kao što je prikazano u priručnicima [61], [63].

U cilju podešavanja XBee uređaja korišćen je USB adapter o kome će se govoriti u potpoglavlju 6.1. Kao što je prethodno pomenuto, ova aplikacija je razvijena od Digi International-a i njeno preuzimanje sa Interneta je besplatno. U ovom poglavlju je objašnjeno ispravno korišćenje ove aplikacije i podešavanje Zigbee protokola na XBee module. Kako je ova aplikacija veoma značajna prilikom podešavanja i testiranja radio komunikacije, analizirane su publikacije [46] [61], [63] [64] koje prikazuju neke od njenih mogućnosti.

Nakon preuzimanja aplikacije sa zvaničnog sajta Digi International-a i njenog ispravnog instaliranja potrebno je povezati računar sa XBee modulom. Prilikom priključenja USB modula na USB port, računar će ga prepoznati kao „USB Serial Port“ i potrebno je uočiti na kojem se portu nalazi XBee uređaj od interesa, ne bi li njegovo konfigurisanje bilo moguće. Pomoću ovog programa moguće je podesiti XBee module, testirati komunikaciju, kao i pribaviti podatke značajne za projektovanje bežične mreže. Dakle, u nastavku su data podešavanja nekih parametara XBee uređaja koji će činiti Zigbee mrežu (koordinator, ruter ili krajnji uređaj).

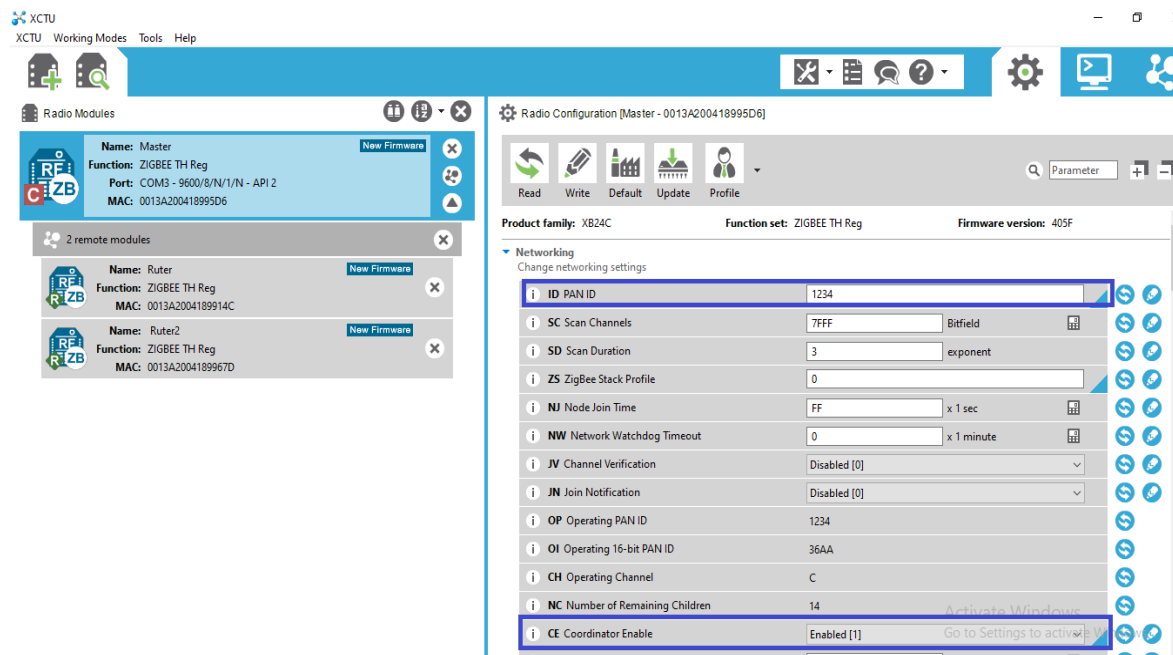
5.4.1 Podešavanje koordinatora

Klikom na *“Discover radio modules connected”* otvara se prozor na kojem se označi komunikacioni port od interesa a zatim se konfigurira modul.

Posle dodavanja uređaja u padajuću listu potrebno je podesiti parametre koji se nalaze pod opcijom *“Configuration Working mode”*, kao na Slici 34. Korišćenjem ove opcije moguće je i ažurirati firmver (engl. Firmware).

Zigbee mesh mreža mora imati jedan uređaj koji je koordinator da bi funkcionisala i po pravilu prvi uređaj koji se konfigurira predstavlja koordinator. Prvim poljem definiše se *PAN ID*, koji mora biti isti za sve uređaje, da bi bila moguća komunikacija u mreži, kao što je vidljivo na Slikama 34 i 35.

Ukoliko se u ovim poljima ne unesu iste vrijednosti za svaki uređaj ponaosob komunikacija među njima je nemoguća. Ovim stavkama je moguće dodijeliti bilo koju vrijednost.



Slika 34. Podešavanje koordinatora

Druga važna opcija prilikom podešavanja koordinatora jeste *Coordinator Enable*. Ovaj parametar je potrebno postaviti na Enabled [1] da bi uređaj bio definisan kao koordinator. Nakon ovoga, u padajućoj listi biraju se opcije Destination High (DH), Destination Low (DL) i Node Identifier, čije su vrijednosti: FFFF, FFFF i Master, respektivno. Parametrom *AP* podešava se režim rada uređaja (AT, API 1 ili API 2).

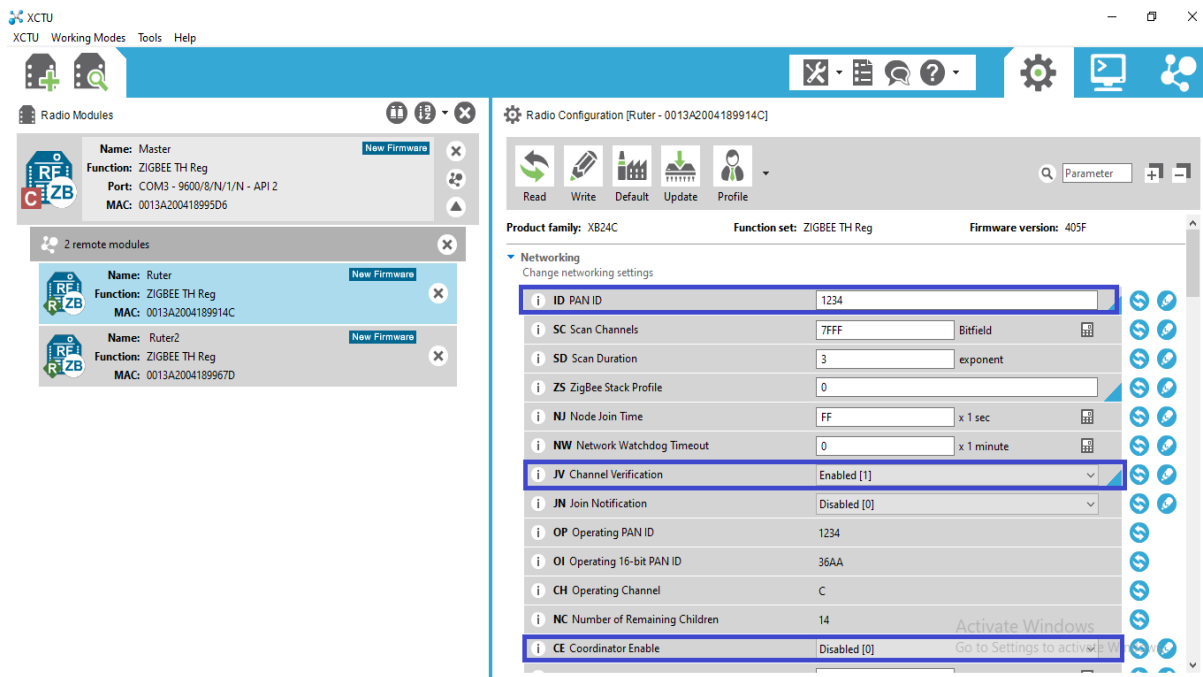
Osim ovih parametara, postoji mnogo opcija kojima se preciznije definiše komunikacija (definisanje broja skokova podataka, radijusa prenosa, itd).

5.4.2 Podešavanje rutera

Nakon opštih podešavanja, koja su ista kao kao kod koordinatora, ruter se podešava na sljedeći način (Slika 35).

Dakle, *Channel* i *PAN ID* opcije imaju iste vrijednosti kao kod koordinatora, C i 1234, respektivno. Opcija *Coordinator Enable* je potrebno postaviti na Disabled [0]. Postavljanjem opcije *Channel Verification* na a Enabled [1] omogućava se potvrda prisustva rutera ispravnom kanalu komunikacije. Ova opcija je značajna da bi se omogućila pouzdana komunikacija. I u ovom slučaju, radi lakšeg raspoznavanja XBee modula u mreži, ovom ruter uređaju se dodjeljuje string (*Node Identifier* = "Ruter"). Kao i slučaju podešavanja koordinatore uređaja, i ovdje postoji više parametara za podešavanje mreže, adresiranja, sigurnosti prenosa, itd.

Instaliranje firmvera (engl. Firmware) i podešavanja parametara Zigbee komunikacije predstavlja prvi korak u dizajniranju sistema bežične komunikacije. U narednom poglavlju su pobliže objašnjeni softverski i hardverski segmenti razvijenog sistema, kao i rezultati simulacija.



Slika 35. Podešavanje rutera

6. Razvijeni sistem i rezultati simulacija

Pojava i ekspanzija mikrokontrolera unijela je revoluciju u industrijskim procesima. Samim tim, može se reći da mikrokontroleri i industrijski komunikacioni protokoli predstavljaju nosioce digitalizovane industrijske proizvodnje i komunikacije, kao i da nemjerljivo olakšavaju automatizaciju u postrojenjima.

Da bi se omogućio kvalitetan i konkurentan proizvod savremenom tržištu, potrebna je pouzdana mreža industrijske komunikacije, sa ciljem omogućavanja efikasne analize rada postrojenja. Kao što je diskutovano u poglavlju 3, standardizovani protokoli industrijske komunikacije koji su najzastupljeniji (RS-232 i RS-485) još su u upotrebi zbog svoje otpornosti na elektromagnetni šum i pouzdanosti pri prenosu podataka. Međutim, njihovom upotrebom se javljaju i nedostaci kao što su: potreba za velikim ožičenjem, mala maksimalna brzina prenosa podataka, ograničena fleksibilnost i mobilnost, itd.

Navedeni nedostaci, kao i modernizacija industrijskih postrojenja ukazuju na važnost primjene i razvoja bežične industrijske komunikacije. Unaprjeđivanjem bežičnih tehnologija smanjuje se jaz u pouzdanosti u odnosu na postojeće žičane protokole. Istovremeno, ove tehnologije omogućavaju relativno veliki domet [60], [65]. Ubrzanim razvojem ovih tehnologija, može se očekivati neprestani rast njihovog dometa.

Usljed navedenog, cilj dizajniranja i implementiranja sistema industrijske komunikacije koji je prikazan u ovom radu jeste minimalizacija pomenutih ograničavajućih faktora. Takođe, akcenat pri izradi ovog sistema je stavljen na njegovom pouzdanom radu, kao i omogućavanju pristupa prikupljenim podacima preko Interneta. Zbog male potrošnje, jednostavnog podešavanja i implementiranja sistema, osobine samozacjeljenja (engl. *Self-healing*) razvijeni sistem bežične industrijske komunikacije, zasnovan na Zigbee tehnologiji, je pogodan za monitoring i upravljanje pogonom na daljinu.

Takođe, dijagnostiku ove bežične mreže i nastale kvarove je veoma lako uočiti korišćenjem raznih softvera bez izlaska na lice mjesta (npr. XCTU softver). Korišćenjem Zigbee bežične tehnologije industrijska postrojenja dobijaju pametnu automatizovanu mrežu industrijske komunikacije. Automatizacijom postrojenja na ovaj način, smanjuju se troškovi i povećava stepen iskorišćenja resursa postrojenja, za kraći vremenski period. Takođe, ovakav sistem je vrlo jednostavan za montažu i održavanje, i njegovom upotrebom se dobija na mobilnosti proizvodne linije. Kao što je objašnjeno u [66], smanjivanje troškova i dodavanje novih mogućnosti je veoma značajno za unaprjeđivanje proizvodnje, i ovakvim sistemom bi se mogla voditi svakodnevna analiza rada postrojenja i na taj način dobio konkurentan proizvod. Takođe, u knjizi [66] je naglašen značaj prikupljanja podataka u realnom vremenu na primjerima farmaceutske i prehrambene industrije, kao i industrije za proizvodnju papira.

Prije početka izrade prototipa sistema bežične industrijske komunikacije zasnovanog na Zigbee tehnologiji određeni su kriterijumi koje ovaj sistem mora da ispuni:

- Pouzdan rad sistema
- Jednostavna implementacija

- Omogućavanje prenosa podataka indirektnim putem. Ukoliko ne postoji direktna komunikacija među čvorovima od interesa, susjedni komunikacioni čvor preuzima ulogu rutera (usmjerava podatke do naznačene adrese)
- Automatizovano skladištenje podataka u Excel tabelu. Excel tabela je izabrana za skladištenje podataka zato što omogućava naknadnu obradu podataka, bez pisanja novog softvera. Takođe, dodatni razlog predstavlja i rasprostranjenost poznavanja rada u Excel programu (npr. zaposleni ekonomske struke prilikom pisanja izvještaja o produktivnosti postrojenja na jednostavan način mogu imati uvid u potrebne podatke)
- Pristup prikupljenim podacima preko Interneta. Kako se komunikacioni sistem, predložen u ovom radu, nalazi u okviru LAN mreže preduzeća, nije mu moguće pristupiti “na daljinu”. Uvođenjem opcije pristupa sa Interneta moguć je pristup podacima i iz drugih LAN mreža, odnosno sa udaljenih lokacija.

Prilikom primjene stečenih znanja i iskustva, posebna pažnja je usmjerena na razvijanje i korišćenje softverskih i hardverskih rješenja koja bi omogućila multifunkcionalnost sistema, kao i njegovu široku primjenu.

Predloženi sistem se sastoji od:

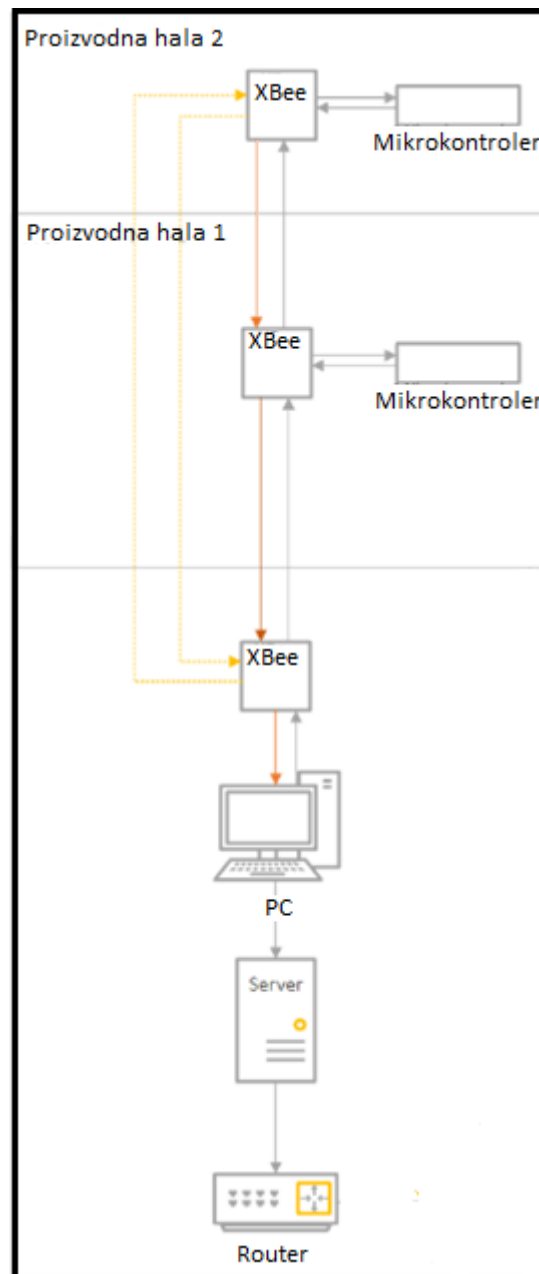
- Centralnog PC računara
- Dva Arduino Uno mikrokontrolera
- Tri XBee S2C RF modula
- Jednog USB adaptera
- Dva XBee shielda
- Razvijenog Matlab i Arduino softvera
- Excel baze podataka
- LogMeIn Hamachi servisa

Mogućnosti Zigbee tehnologije koje nudi u ovakvim sistemima industrijske komunikacije su praktično neograničene. Stručne procjene sugerišu da će se do 2023. godine milijardu Zigbee uređaja isporučivati godišnje širom planete [67]. Iste procjene sugerišu da će do 2023 godine ukupan broj prodatih IEEE 802.15.4 uređaja iznositi 4.5 milijardi, gdje će udio Zigbee tehnologije iznositi 85 %. Tako da se iz ovih stručnih procjena može zaključiti značaj i uticaj Zigbee tehnologije na industriju i industrijsku proizvodnju. Na osnovu iznesenog, da se zaključiti da je implementacija Zigbee sistema (predloženog ovim radom) značajno olakšana, na osnovu velike zastupljenosti Zigbee uređaja i njihove niske cijene.

Prilikom projektovanja i testiranja predloženog sistema industrijske komunikacije, korišćeni kompjuterski programi, alati i platforme garantuju fleksibilnost i jednostavnost implementiranja. Projektovani sistem industrijske komunikacije sakuplja podatke od interesa u realnom vremenu. Shemom 1 prikazana je realizacija predloženog sistema industrijske komunikacije.

Ovaj sistem je zasnovan na tipu komunikacije *glavni/periferni* uređaj:

- glavni uređaj je povezan na centralni PC računar, i upravlja radom i kontrolom pogona
- periferni uređaji su povezani na proizvodne mašine (glodalice, numerički strugovi, itd.)



Shema 1. Predloženi Zigbee sistem (modifikovano [47])

Razvijeni sistem je testiran u proizvodnom pogonu “Uniprom” pekare. Proizvodnju ove pekare čini veći broj automatskih i poluautomatskih proizvodnih linija. Kako proizvodnja u ovoj pekari nije u potpunosti automatizovana, moguće je unaprijediti proizvodni proces, sistemom predloženim u ovom master radu. Samim tim, odrađena je simulacija rada razvijenog sistema u realnom industrijskom okruženju, radi otkrivanja eventualnih grešaka i nedostataka pri radu, kao i njihovom otklanjanju. Na Slici 36 je prikazan proizvodni pogon ove pekare.



Slika 36. Proizvodni pogon Uniprom pekare

Sistem bežične komunikacije, predložen u ovom radu, primjenu može naći u upravljanju proizvodnom trakom i mjerenjem učinka proizvodnje. Na ovaj način, proizvodnju bi bilo moguće pokrenuti na daljinu, kao i imati uvid u obim proizvodnje i njen rad.



Slika 37. Jedan dio proizvodnog pogona „Uniprom“ pekare

Takođe, jedan od najvažnijih djelova proizvodnog procesa predstavlja i komora u kojoj se čuvaju neophodne sirovine za proizvodnju. Kako u ovom slučaju, ne postoji sistem koji bi javljao promjenu temperature u komorama, već kontrolu robe obavlja radnik, velika količina skladištenih sirovina se kviri i postaje neupotrebljiva usled nedovoljno razvijenog sistema za monitoring. Predloženi sistem komunikacije zasnovan na Zigbee tehnologiji umanjio bi mogućnost greške (npr. kontrolisanja temperature komore) usled uticaja ljudskog faktora.



Slika 38. Proizvodni pogon pekare „Uniprom“

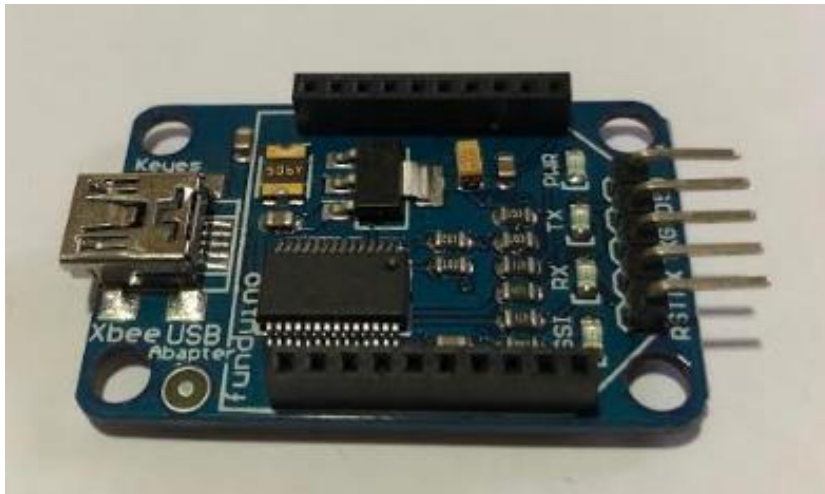
Implementiranjem sistema predloženog ovim radom, podaci se dobijaju u realnom vremenu i na osnovu njih je moguće preduzeti pravovremene akcije sa ciljem suzbijanja gubitaka sirovina koje utiču i na ekonomsko poslovanje kompanije. Jedan od problema prilikom umrežavanja ovog proizvodnog pogona predstavlja i relativno velika udaljenost između pojedinih proizvodnih mašina. Najveća udaljenost iznosi 40 m i uvođenje žičane infrastrukture ne bi predstavljalo pogodno rješenje usled ograničene slobode u manevrisanju, kao i toga da bi implementiranje takve infrastrukture dovelo do prekida proizvodnje, što nije pogodno za poslovanje kompanije. Korišćenjem razvijenog sistema komunikacije omogućava se dobra pokrivenost postrojenja, dok njegova implementacija ne utiče na sami proces proizvodnje, pa bi se ove dvije radnje (implementacija sistema i proizvodnja postrojenja) odvijale paralelno jedna sa drugom. Na Slici 38, prikazana je najveća udaljenost između komunikacionih čvorova u proizvodnom pogonu.

6.1 Hardverske komponente razvijenog sistema

Centralni dio ovog prototipa sistema predstavljaju XBee S2C moduli, koji omogućavaju bežičnu komunikaciju. Kako je o XBee uređaju i njegovom podešavanju bilo riječi u poglavlju 5, u nastavku ovog potpoglavlja će se prikazati ostale hardverske komponente sistema.

6.1.1 USB adapter

Povezivanje XBee uređaja na centralni PC računar se obavlja preko USB porta uz pomoć XBee USB adaptera koji je prikazan na Slici 39. Trebalo bi napomenuti da je ovaj adapter moguće koristiti ne samo kod XBee S2C modula, već i kod svih XBee modula serije 1 i 2. Kao što je vidljivo sa Slike 39, ovaj XBee adapter se povezuje sa računarom preko mini USB porta. Ovaj USB adapter sadrži i veći broj LED koje umnogome pomažu pri indentifikovanju i otkljanjanju grešaka prilikom testiranja sistema.



Slika 39. USB adapter

Osnovu ovog adaptera čine:

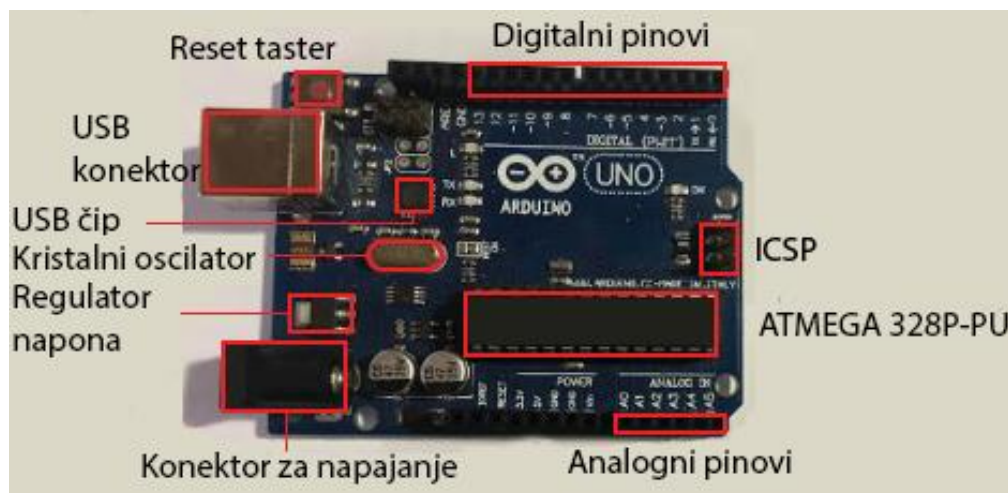
- Linearni regulator napona
- FT232RL čip

FT232RL predstavlja *USB to Serial* integrisano kolo. Jedan dio EEPROM memorije ovog čipa je rezervisan za korisnike shodno njihovim potrebama. Brzina prenosa podataka varira između 300 i 3 Mbaud. FIFO baferi za prijem i slanje podataka imaju kapacitet od 128 i 256 bajtova, respektivno [68].

Komunikacija se, dakle, obavlja serijskim portom i na jednostavan način je moguće glavni (master) XBee uređaj ovoga sistema povezati sa PC računarom, na kojem se nalaze prethodno instalirana softverska rješenja u vidu Matlab GUI aplikacije.

6.1.2 Arduino Uno mikrokontroler

Arduino predstavlja open-source razvojnu platformu, koja nudi širok spektar funkcionalnosti zahvaljujući jednostavnom za upotrebu, hardveru i softveru [69]. Za potrebe ovog rada je korišćen Arduino Uno mikrokontroler koji, zajedno sa XBee modulom, predstavlja centralni dio ovoga rada. Arduino Uno mikrokontroler je dat Slikom 40.



Slika 40. Struktura Arduino Uno mikrokontrolera

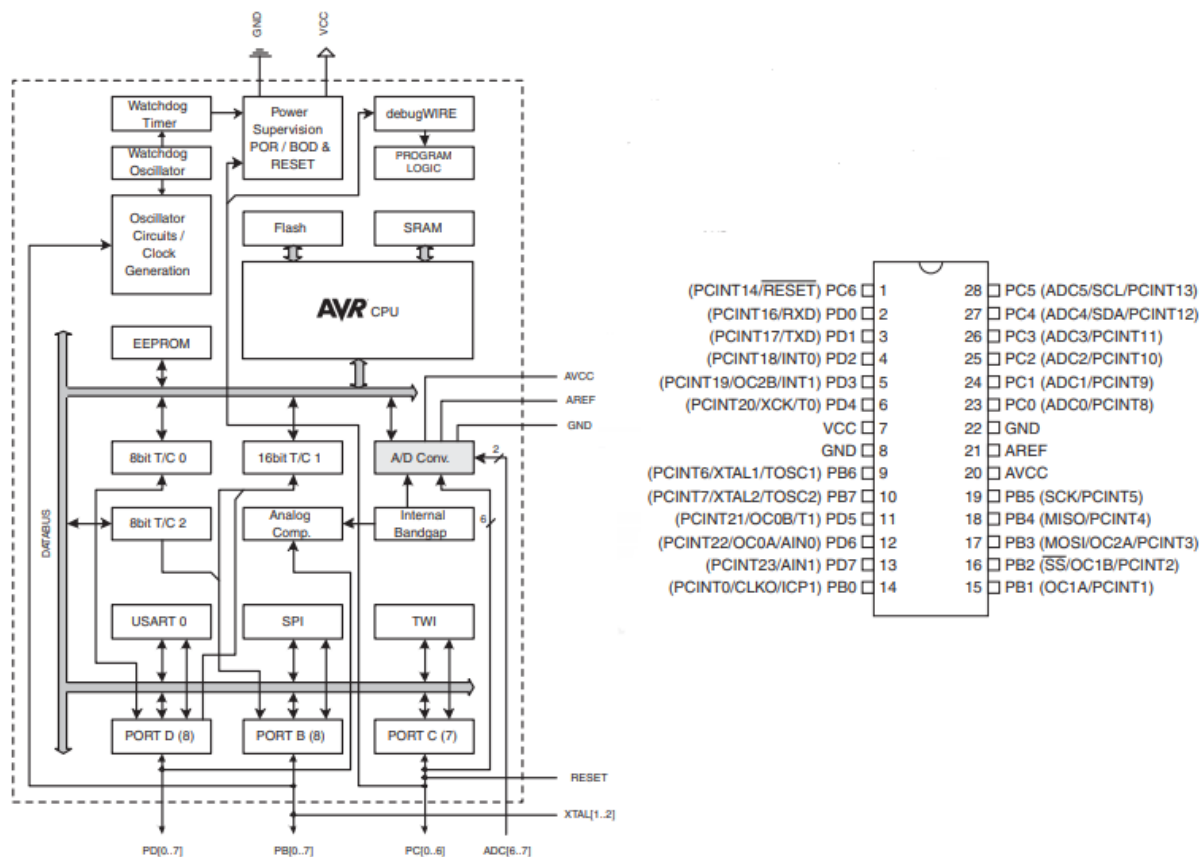
Kao što je vidljivo sa slike najvažniji dijelovi Arduino modula su: reset taster, USB konektor, USB interfejs čip, kristalni oscilator (16 MHz), regulator napona, konektor za napajanje, itd. Ovaj uređaj je moguće napajati preko USB priključka ili *Power Jack-a*.

Srž Arduino Uno modula predstavlja ATMEGA328P mikrokontroler koji ima 32 kilobajta fleš memorije, 1 kilobajt EEPROM, 2K bajta SRAM memorije [70]. Na Arduinou postoji 6 analognih pinova i 14 digitalnih. Pinovi 3, 5, 6, 9, 10, 11 mogu biti korišćeni kao PWM pinovi (engl. Pulse-width Modulation). Komunikacija između Arduino Uno mikrokontrolera i XBee RF modula se obavlja hardverskim serijskim portom, preko pinova Rx i Tx. Stanja pinova RX i TX je moguće pratiti pomoću RX i TX LED, koje trepere prilikom primanja/slanja podataka,.

Ovaj mikrokontroler ima samo jedan serijski port, dok postoje i Arduino mikrokontroleri sa većim brojem hardverskih serijskih portova (npr. Arduino Mega koja ima 4 hardverska serijska porta). Ovakva serijska komunikacija se obavlja korišćenjem biblioteke *Serial*.

Ukoliko je to potrebno, serijsku komunikaciju je moguće obavljati i preko softverskog serijskog porta. Na ovaj način je moguće oponašati hardversku serijsku komunikaciju preko postojećih digitalnih pinova. Ova mogućnost, koju nude Arduino moduli, koristi se u sistemima gdje je potrebna višestruka serijska komunikacija. U svrhu omogućavanja softverske serijske komunikacije se koristi biblioteka *SoftwareSerial*.

Unutrašnja arhitektura i raspored pinova ATMEGA328P mikrokontrolera su dati na Slici 41.



Slika 41. Unutrašnja arhitektura Atmega328P i raspored pinova [70]

6.1.3 XBee shield

Prilikom izrade ovog sistema industrijske komunikacije, povezivanje Arduino Uno i XBee S2C modula je omogućeno posredstvom odgovarajućih šildova (eng. Shield), kao na Slici 42. Na ovaj način (povezivanjem Arduino i XBee modula), omogućava se bežična komunikacija sa Arduino Uno mikrokontrolerima u industrijskom postrojenju.

Montiranjem Arduino šilda preslikavaju se pinovi mikrokontrolera i moguće ih je koristiti u druge svrhe. Ujedno, ovaj šild obezbeđuje radni napon od 3.3V XBee modulu. Sem S2C verzije XBee modula koja je upotrijebljena u ovom radu, pomenuti šild je moguće koristiti i za druge XBee module (npr. XBee serije 1 i 2, kao i njihove PRO verzije).

Osim preslikanih pinova, reset tastera, i drugih značajnih komponenti, na ovim šildovima se nalazi i prekidač sa dva položaja:

- USB
- XBEE

Kada se prekidač nalazi u položaju USB, moguće je programirati Arduino Uno mikrokontroler. Nakon pomenutog procesa, prebacivanjem u prekidača u položaj XBEE, montirana bežična mreža postaje aktivna, tj. omogućava se komunikacija (prenos podataka) između komunikacionih čvorova u postrojenju.



Slika 42. Xbee shield

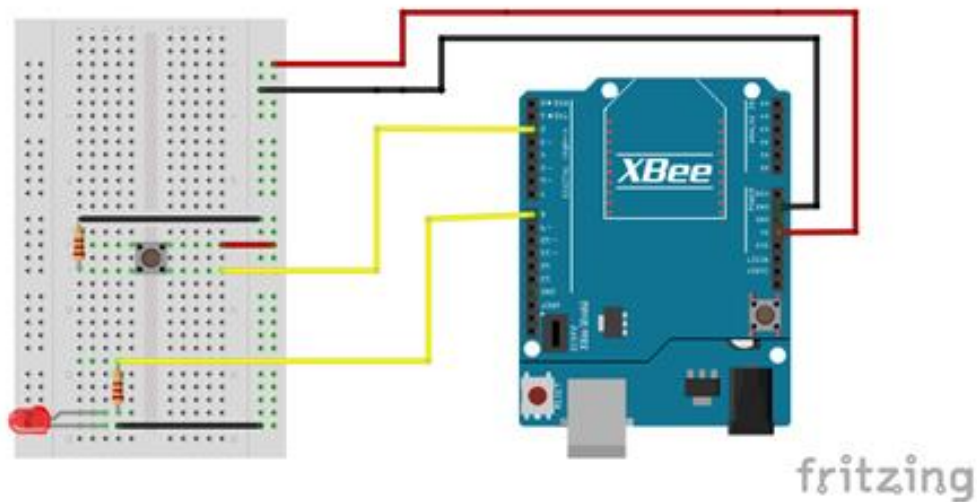
XBee S2C modul ima dva serijska porta preko koji je moguća komunikacija sa drugim mikrokontrolerima (U ovom slučaju Arduino Uno):

- UART
- SPI

Ova dva porta ne mogu istovremeno biti u funkciji, već samo jedan. Ukoliko nije naznačeno drugačije podrazumijevani port za komunikaciju je UART.

Dijagram šema realizacije jednog čvora sistema je data na Slici 43. Naime, radi simuliranja rada industrijskog pogona, na svaki čvor ponaosob povezana je LED kao i taster. Uključivanje/isključivanje LED simulira zadavanje komande mašini (npr. uključi/isključi mašinu, pokretnu traku, agregat mašine, relej, itd). Brojem pritisaka na taster simulira se produktivnost date proizvodne mašine. Postavljene LED diode vizuelno prikazuju kako komande izlaze iz XBee uređaja do Arduino mikrokontrolera.

Nakon toga, Arduino mikrokontroler upravlja pogonom (uključuje/isključuje LED). Takođe, tasterom se simulira očitavanje podataka od Arduino mikrokontrolera, koji ih zatim formira u okvir podataka i predaje XBee uređaju. Podatke je potrebno slati u formi okvira podataka, zato što se koristi API režim rada, gdje su podaci strogo strukturisani. Ovako koncipirana simulacija, predstavlja mogućnost XBee uređaja da predaje podatke mašini, kao i da ih prima i prenosi do glavnog uređaja.



Slika 43. Fritzing šema el. veza

U ovoj simulaciji su korišćeni otpornici $R_1 = 220\Omega$, $R_2 = 10\text{ K}\Omega$. Otpornik R_1 je povezan na LED, dok R_2 služi kao *pull-up* otpornik na tasteru.

Implementirani Arduino Uno – XBee S2C modul je prikazan na Slici 44. Kao što je uočljivo sa slike, konekcija između Arduino i XBee modula je ostvarena korišćenjem XBee šilda, koji je predstavljen u poglavlju 6.1.3.



Slika 44. Realizovani modul [47]

Obzirom da Arduino Uno mikrokontroler predstavlja veoma važnu kariku u razvijenom sistemu (monitoring i upravljanje postrojenjem), razvijen je i softver koji ima dvojaku funkciju: osluškivanje naredbi od XBee uređaja, kao i praćenje obima proizvodnje.

6.2 Arduino kod

Kao što je ranije istaknuto, sastavni dio razvijenog sistema industrijske komunikacije jeste Arduino Uno platforma. Arduino IDE (engl. Integrated Development Environment) Open-source razvojno okruženje omogućava razvijanje, testiranje i debugovanje softverskih rješenja predloženog sistema bežične komunikacije. Nakon kompajliranja programskog koda, isti se ubacuje u fleš memoriju (engl. Flash) mikrokontrolera pomoću USB serijskog interfejsa.

Dvije funkcije čine izvršni program, a to su:

- `setup()` – Izvršava se jednom, pomoću ove funkcije se obavlja inicijalizacija parametara
- `loop()` – Nakon inicijalizacije, ova funkcija se izvršava u beskonačnoj petlji

Arduino u razvijenom prototipu sistema komunikacije obavlja više funkcija: primanje podataka i njihovu obradu, slanje podataka (odgovora masteru), upravljanje i monitoring mašina.

U `loop` funkciji se obavljaju dva značajna procesa: osluškivanje pristiglih podataka, kao i slanje odgovora na pristigle okvire podataka (frejmovi). Pristigli okviri se upisuju u bafer pristiglih podataka, nakon čega se i obrađuju. Protokol je koncipiran tako, da na osnovu pristiglih okvira i njihove obrade, odvija se automatizovan proces manipulisanja proizvodnim mašinama kao i slanje odgovora masteru mreže o zadatom procesu.

Ako je prvi pristigli oktet podatkovnog dijela okvira 1, povratni okvir podataka se generiše sa izbrojanim pritiscima na taster. Nakon generisanja okvira, isti se šalje glavnom uređaju. Ukoliko je prvi pristigli oktet 2, mašina se uključuje i šalje povratnu informaciju centralnom PC-u o njenom aktivnom stanju, a ukoliko je prvi pristigli oktet 3 mašina se isključuje i automatski se šalje povratna informacija o njenom pasivnom stanju. Softver je razvijen tako da je njegov radni dio koji zavisi od primjene sistema, vrlo prilagodljiv i lako ga je izmijeniti.

U ovom softverskom rješenju se koristi digitalni prekid (engl. Interrupt), samim tim i prekidna funkcija (engl. Interrupt Subroutine) čija je uloga simulacija učinka mašina (učinak mašine simuliraju pritisci na taster). U nastavku je dat programski kod prekidne funkcije (na pin 8 Arduino mikrokontrolera je povezana LED radi vjerodostojnije simulacije). Ova podrutina se poziva prilikom pojave eksternog prekida na digitalnom pinu 2. Kako u ovom slučaju proizvodnju simulira pritisak na taster, posebnu pažnju treba obratiti na treperenje kontakta tastera. Treperenje kontakta je moguće odstraniti hardverski, ili softverski kao što je ovdje slučaj. Pomoću prekida (engl. Interrupt) se dobija na smanjenju opterećenja mikrokontrolera, efikasnosti, kao i na fleksibilnosti. Takođe, oslobađa se prostor u `loop` petlji koji se koristi za serijsku komunikaciju.

```
void buttonPressed(){
  delayMicroseconds(debounceTime);
  if (digitalRead(TasPin) == HIGH && debTas == false){
    debTas=true;
    //digitalWrite(8,HIGH); //korisno prilikom debugovanja sistema
    counter++; //prilikom pritiska na taster brojač se uvećava
    //Serial.print(counter); //korisno prilikom debugovanja sistema
  }
}
```



```

else if (digitalRead(TasPin) == LOW && debTas == true){
    debTas=false;
    //digitalWrite(8,LOW); //korisno prilikom debugovanja sistema
}
}

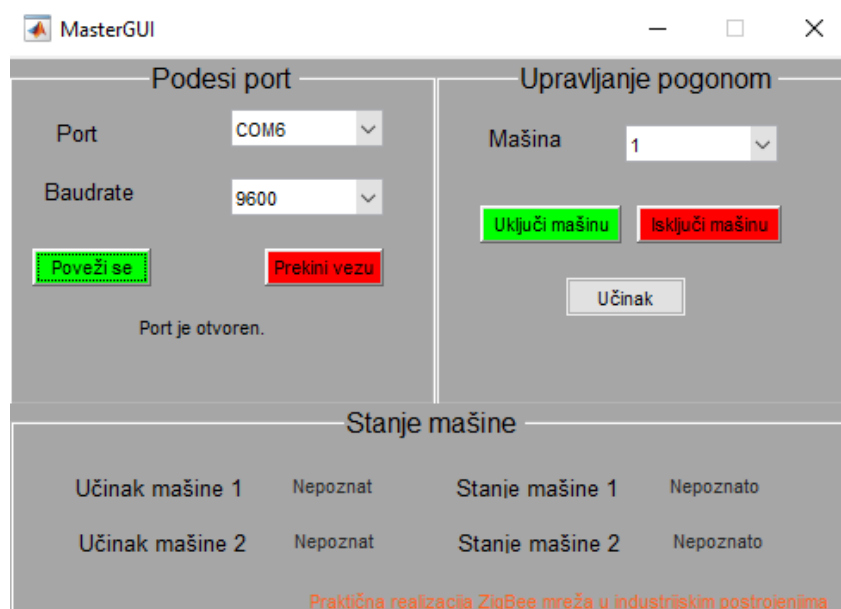
```

Osim navedenih uređaja (XBee, USB adapter, Arduino Uno, XBee šild), dio predloženog sistema industrijske komunikacije predstavlja centralni PC računar i razvijeni korisnički interfejs, pomoću kojeg se koristi predloženi sistem. U tu namjenu, korišćen je Matlab program.

6.3 Matlab GUI

Upravljanje industrijskim pogonima “na daljinu” obavlja se pomoću razvijene Matlab aplikacije. Program Matlab dolazi do izražaja kada je potrebno raditi obradu podataka istovremeno sa prikupljanjem istih. Sve pomenute funkcionalnosti sistema (upravljanje mašinama i monitoring istih) objedinjuje ova aplikacija.

Na Slici 45 je prikazan razvijeni Matlab GUI.



Slika 45. Matlab GUI

U panelu *Podesi port* iz padajuće liste bira se koji će se od aktivnih portova koristiti prilikom komunikacije sa industrijskim postrojenjem. Zatim, podešava se željeni *Baudrate*, kako se komunikacija kod ostatka sistema odvija pri brzini od 9600, i u ovom slučaju će biti tako konfigurisana. Ukoliko je inicijalizacija porta protekla kako treba, nakon klika na *Poveži se* tekst “*Stanje porta*” u ovom panelu će se promijeniti u “*Port je otvoren*”. Pritiskom na *Prekini vezu* tekst u pomenutom panelu se mijenja u “*Port je zatvoren*”.

U panelu *Upravljanje pogonom* iz padajuće liste *Mašina* obavlja se odabir mašine sa kojom se zahtijeva komunikacija. Nakon odabira mašine, pritiskom na *Učinak* šalje se okvir podataka koji sadrži adresu mašine (XBee uređaja) od interesa, kao i zahtjev za slanje za učinkom navedene mašine u određenom vremenskom periodu. Nakon toga, udaljena mašina posredstvom XBee uređaja sa kojim je povezana šalje okvir sa potrebnim podacima centralnom PC računaru. Kako nije moguće ostvariti direktnu komunikaciju između centralnog PC računara i mašine od interesa (usled velike udaljenosti) komunikacija se odvija preko rutera, tj susjednog XBee uređaja. Zahvaljujući podacima o MAC adresi uređaja koji su sastavni dio okvira podataka, pomenuti podaci od interesa pronalaze put do kako do mašina, tako i do centralnog PC računara. Pristigli okvir sa podacima se obrađuje i ispisuje kako u Excel tabelu tako i u panel *Stanje mašine* ovoga GUI-a.

Klikom na *Uključi mašinu*, odnosno *Isključi mašinu*, šalje se okvir koji osim adrese sadrži i komandu za uključenje, odnosno isključenje. Nakon izvršenja ove naredbe, Arduino mikrokontroler odgovara okvirom u kojem se osim adrese centralnog PC računara, tipa okvira, njegove dužine, kontrolne sume, nalaze i podaci o izvršenju date naredbe. Takođe, i u ovom slučaju ukoliko nije moguća direktna komunikacija između glavnog uređaja (PC računara) i sporednog uređaja (odabrane mašine), ona se odvija posredstvom susjednog čvora, odnosno XBee uređaja.

Nakon obrade pristiglog okvira od interesa, onog u kojem se nalaze podaci da li je mašina uključena ili ne, isti se upisuju u Excel tabelu, kao i u panel *Stanje mašine*. U nastavku se nalaze neki djelovi razvijenog Matlab GUI. Da bi se otvorio serijski port za komunikaciju prvo je potrebno kreirati objekat serijskog porta:

```
s=serial(comPort,'BaudRate',baud,'DataBits',8,'Timeout',2,'Parity','None','StopBit',1,'Terminator','CR');
```

Kreiranjem ovog objekta određuje se serijski port kojim će se odvijati komunikacija sa XBee RF modulom (glavnim uređajem u ovoj konfiguraciji), bira se *baudrate* te komunikacije (podrazumijevani je 9600), zatim se podešavaju *Data bits*, *Timeout*, *Parity*, *Stop bit*, *Terminator*, respektivno.

Dostupni portovi se dodjeljuju promjenjivoj *comPort* korišćenjem Matlab funkcije *seriallist*. Nakon kreiranja objekta moguće je otvoriti serijski port, i to funkcijom:

```
fopen(s);
```

Funkcija za zatvaranje serijskog porta glasi:

```
fclose(s);
```

Treba istaći da se ista logika krije iza izvršavanja sva tri procesa omogućena ovim programom (Komande *Uključi/Isključi*, *Učinak*), tj. Matlab kod je praktično isti u sva tri slučaja, jedina razlika je u sadržaju okvira podataka koji se šalju.

U nastavku su dati djelovi koda funkcije *Kontr_mas()*, koja obrađuje pristigle podatke i automatski ih upisuje u Excel tabelu.

```
recData=fread(s,40,'uint8'); %učitavanje pristiglog okvira podataka
```

Nakon smještanja pristiglih podataka u promjenjivu *recData*, provjerava se adresa sa koje je poslat okvir podataka, nakon čega se isti obrađuju i smještaju u Excel tabelu.

Excel program je dio ovoga sistema zbog njegove široke primjene, kao i pružanja mogućnosti obrade podataka na jednostavan način.

```
ExcelFile = 'C:\Users\Ivan\Desktop\ExcelTest';
SheetNum = 1;
[~,~,Range] = xlsread(Excelfile,SheetNum);
Free_row = size(Range,1) + 1;
xlRange = ['A',num2str(Free_row)]; %slobodan red
```

6.4 Excel

Kao što je pomenuto u prethodnom potpoglavlju, svi prikupljeni podaci se čuvaju u Excel tabeli, koja je prikazana na Slici 46. Radi povećanja funkcionalnosti čitavog sistema, uvedena je mogućnost pristupa Excel tabeli sa Interneta .

	A	B	C	D	E	F
1	Datum	Vrijeme	Masina	Tip frejma	Stanje masine	Ucinak
2	Nov 10, 2020	1:01 PM	1	Stanje masine	Masina nije aktivna	
3	Nov 10, 2020	1:01 PM	1	Stanje masine	Masina je aktivna	
4	Nov 10, 2020	1:02 PM	1	Ucinak masine		5
5	Nov 10, 2020	1:02 PM	1	Ucinak masine		7
6	Nov 10, 2020	1:02 PM	1	Ucinak masine		15
7	Nov 10, 2020	1:02 PM	1	Ucinak masine		20
8	Nov 10, 2020	1:03 PM	1	Ucinak masine		23
9	Nov 10, 2020	1:03 PM	1	Ucinak masine		27
10	Nov 10, 2020	1:03 PM	1	Ucinak masine		30
11	Nov 10, 2020	1:04 PM	2	Stanje masine	Masina nije aktivna	
12	Nov 10, 2020	1:04 PM	2	Stanje masine	Masina je aktivna	
13	Nov 10, 2020	1:05 PM	2	Ucinak masine		2
14	Nov 10, 2020	1:05 PM	2	Ucinak masine		6
15	Nov 10, 2020	1:05 PM	2	Ucinak masine		8
16	Nov 10, 2020	1:05 PM	2	Ucinak masine		11
17	Nov 10, 2020	1:06 PM	2	Ucinak masine		17
18	Nov 10, 2020	1:06 PM	2	Ucinak masine		31
19	Nov 10, 2020	1:07 PM	1	Stanje masine	Masina nije aktivna	
20	Nov 10, 2020	1:07 PM	2	Stanje masine	Masina nije aktivna	

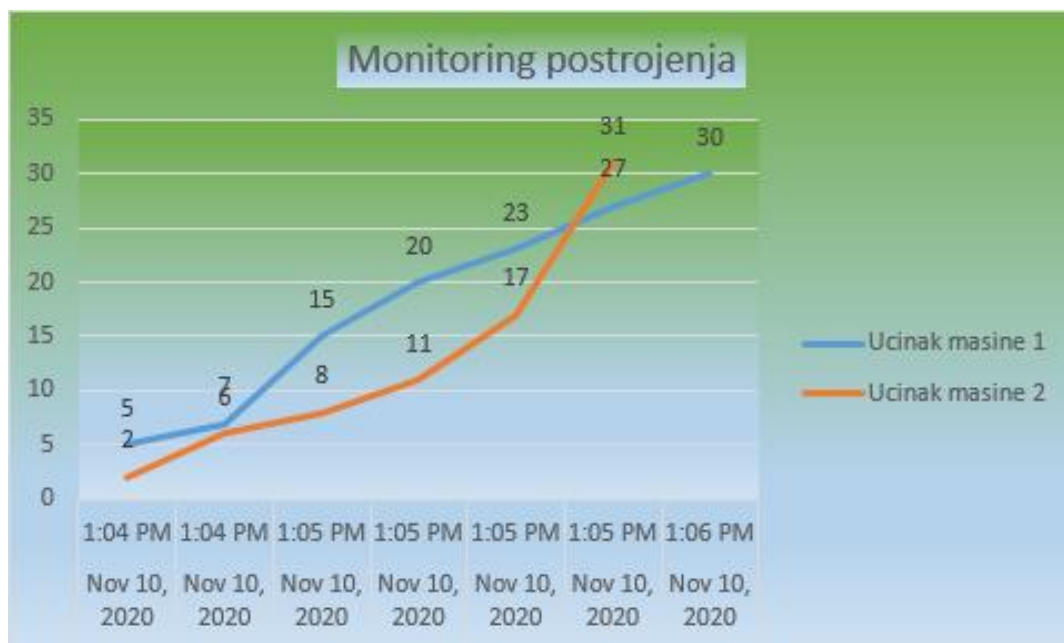
Slika 46. Excel tabela

Excel tabela ima 6 kolona u koje se upisuju datum i vrijeme, mašina od koje je pristigao okvir podataka, tip okvira (frejma) kao i informacije da li je mašina uključena ili ne (Stanje mašine) i informacije o učinku date mašine. Postoje tri tipa okvira: 1, 2, 3. Okvir tipa jedan označava da je riječ u okviru kojim se prenosi učinak mašine. Okvir tipa dva se odnosi na frejm podataka kojim se uključuje mašina, dok okvir tipa tri isključuje određenu mašinu. Ovako osmišljenim sistemom komunikacije, u svakom trenutku možemo znati da li je mašina u pogonu ili nije, kao što i uvijek možemo imati informacije o učinku u zadatom vremenu.

Na taj način direktno utičemo na proizvodnju i kvalitet proizvoda u industrijskom pogonu, vodimo monitoring postrojenja.

Zahvaljujući podacima od značaja koji se čuvaju u Excel fajlu, moguće je statističko sagledavanje radnog iskorišćenja mašina, efikasnosti pogona po smjenama, ispunjavanje normi postrojenja, itd.

Obradom podataka iz ove tabele, u Excel-u se može generisati grafik na kome je učinak mašina u proizvodnom pogonu. Na Slici 47 je grafički prikazana radna angažovanost mašina.



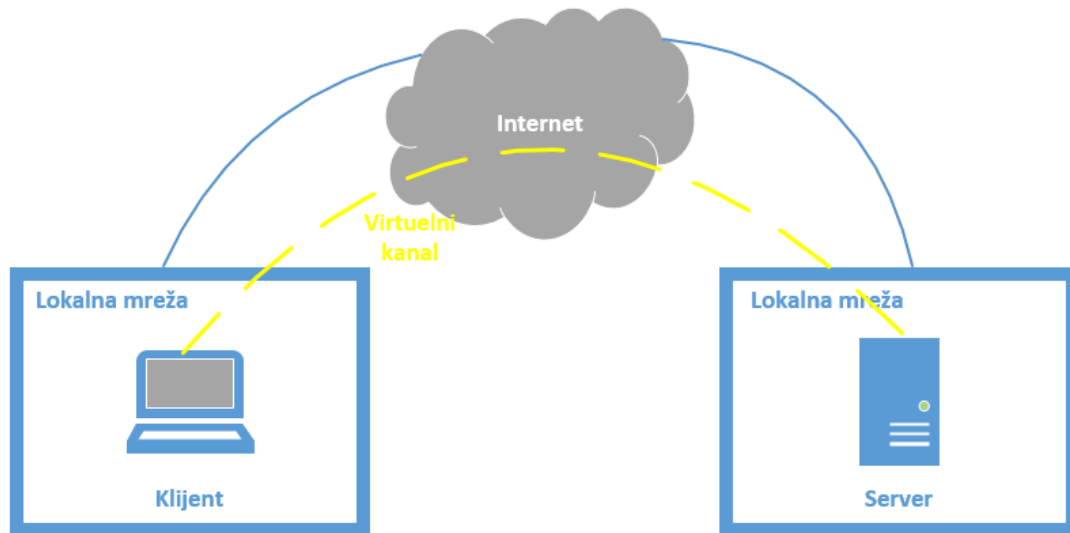
Slika 47. Grafik učinka mašina

Mogućnost naknadne obrade prikupljenih podataka je moguća u ovom slučaju samo iz postrojenja, što nije praktično. Da bi bila moguća obrada podataka i sa udaljenih lokacija, koristi se VPN tehnologija, odnosno Hamachi servis.

6.5 VPN

Da bi se prikupljenim podacima u Excel tabeli moglo pristupiti van lokalne privatne mreže koristi se virtualna privatna mreža - VPN (engl. Virtual Private Network). Dodavanjem ove funkcionalnosti sistemu olakšava se razmjena podataka tako što se obavlja tuneliranje između dvije lokalne privatne mreže, i one na taj način postaju dio iste virtuelne privatne mreže. Uređaji unutar ovakve mreže su međusobno vidljivi i moguća je direktna razmjena podataka. Na taj način, prikupljenim podacima je moguće pristupiti sa bilo koje udaljene lokacije sa Interneta.

Na Slici 48 je prikazan način funkcionisanja VPN servisa.

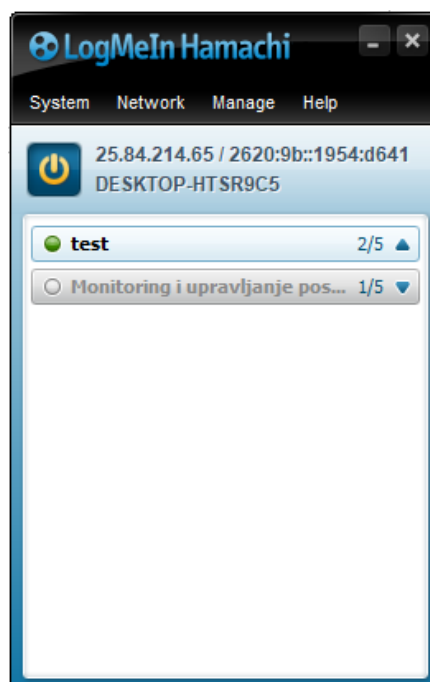


Slika 48. Princip rada VPN-a

Na ovaj način, moguć je pristup prikupljenim i obrađenim podacima industrijskog pogona iz upravne zgrade.

6.5.1 LogMeIn Hamachi

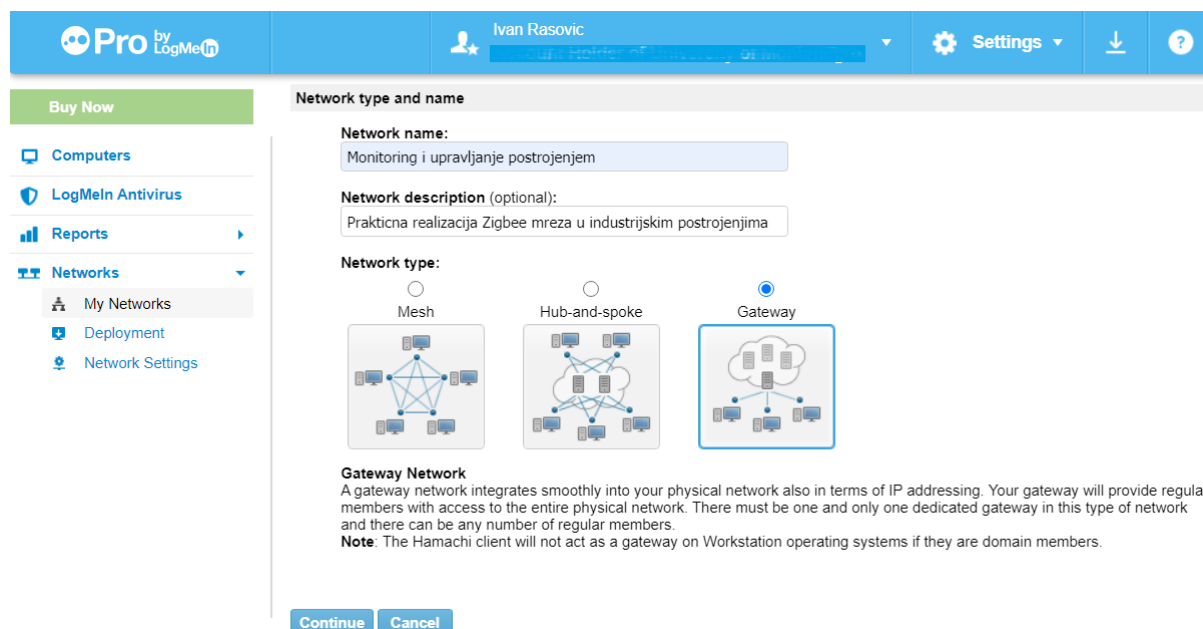
Pristup prikupljenim i obrađenim podacima sa Interneta je omogućen korišćenjem LogMeIn Hamachi VPN servisa. VPN mreža ima kapacitete proširivanja lokalne privatne mreže posredstvom javne mreže. Na ovaj način, slanje/primanje podataka se odvija neometano, iako su uređaji sa kojih korisnici pristupaju podijeljenim podacima van privatne mreže.



Slika 49. LogMeIn Hamachi

Nakon preuzimanja i instaliranja ovog servisa sa Interneta [71] potrebno je izvršiti određena podešavanja. Dodavanjem LogMeIn Hamachi servisa razvijenom sistemu bežične industrijske komunikacije zaokružuje se cjelina automatizacije pomenutog sistema. Da bi bio omogućen pristup centralnom PC računaru sa udaljenih klijenata potrebno je zaobići ruter njegove lokalne mreže, koji predstavlja svojevrsan graničnik između privatne i javne mreže. Ovdje se Hamachi pokazuje kao vrlo kompaktno i jednostavno rješenje za korišćenje.

Na Slici 50 su prikazana neophodna podešavanja Hamachi mreže. Prvi korak predstavlja kreiranje nove mreže. Kao što je vidljivo sa Slike 50, postoje tri vrste Hamachi mreže: Meš (engl. Mesh), Glavno čvorište (engl. Hub-And-Spoke) i Mrežni prolaz (engl. Gateway). Pomoću Meš Hamachi mreže moguće je povezati sve klijente da međusobno komuniciraju, kao što je prikazano na Slici 50. Kod tipa mreže Glavno čvorište, jedan ili više uređaja je moguće odrediti kao server uređaj (habovi) dok ostali uređaji predstavljaju radne stanice (engl. Workstation ili engl. Spoke). Ovaj tip mreže karakteriše mogućnost povezivanja server uređaja sa svim drugim uređajima u mreži, dok radne stanice se ne mogu međusobno povezivati, već isključivo sa serverima. Pomoću Mrežnog prolaza, jedan računar ima ulogu mrežnog prolaza, dok ostali računari koji su dio mreže imaju pristup svim resursima mreže kojim može pristupiti centralni računar (računar koji ima ulogu mrežnog prolaza). Kod ovakvog tipa Hamachi mreže, maksimalan broj članova mreže je 5 (besplatna verzija Hamachi servisa).



Slika 50. Podešavanje Hamachi mreže

Radi povećanja sigurnosti mreže, koristi se opcija obaveznog unošenja lozinke za pristup mreži, kao i mehanizam odobravanja pristupa mreži.

Nakon prvobitnih podešavanja i odabira odgovarajućeg tipa mreže (tip mreže: Glavno čvorište), kao i instaliranja klijent softvera na uređajima od interesa (PC računaru u industrijskom postrojenju kao i odgovarajućim udaljenim računarima), određuju se uloge računara u ovoj Hamachi mreži. Uspostavljanjem ovakve mreže, moguće je pristupiti centralnom PC računaru u industrijskom postrojenju, kao i svim podacima koje skladišti.

6.6 Vijek trajanja baterije

Kao što je ranije napomenuto, razvijeni sistem komunikacije je sistem male energetske potrošnje (engl. Low Power), što znači da je potrebna minimalna količina energije za njegov rad i višegodišnje napajanje. Računanje vijeka trajanja baterija je moguće korišćenjem formule koja je data izrazom (10). Treba napomenuti da prilikom procjene vijeka trajanja baterije nije uzeta u obzir potrošnja Arduino Uno mikrokontrolera, već samo XBee modula.

$$t = \frac{C_{ak}}{I_n} \dots\dots\dots(10),$$

gdje t predstavlja radni vijek baterije izraženo u radnim satima (eng. Battery life), C_{ak} (eng. Battery Capacity) predstavlja kapacitet baterije u mAh, dok je I_n (eng. Load Current) potrošnja uređaja u mA. Jedinica vijeka trajanja baterije u ovom slučaju je h, tako da se dobija vrijednost koja označava kontinuirani rad uređaja bez prestanka. Prilikom računanja baterijskog vijeka treba uzeti u obzir da se u praksi pokazuje da je efektivni kapacitet baterije uvijek manji od nominalnog, što znači da nije uvijek moguće iskoristiti maksimalne mogućnosti baterije.

Radi detaljnije analize funkcionalnosti i stepena iskorišćenja resursa sistema korišćen je MaxStream, Inc kalkulator [72] čijom upotrebom se došlo do sljedećih rezultata.

Scenarios		A	B	C	D	E	F
		Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D	Scenario E	Scenario F
Time	Units						
Sleep	min	30	30	60	60		
Idle/Receive	ms	500	500	500	500		
Transmit	ms	500	500	500	500		
Radio type		XBee	XBee	XBee	XBee		
# of bytes transmitted							
Total System Current							
Sleep	mA	0.001	0.001	0.001	0.001		
Idle/Receive	mA	28	31	28	31		
Transmit	mA	33	45	33	45		
Power usage comparison							
Sleep	%	5.57%	4.52%	10.56%	8.65%	0.00%	0.00%
Idle/Receive	%	43.34%	38.94%	41.06%	37.26%	0.00%	0.00%
Transmit	%	51.08%	56.53%	48.39%	54.09%	0.00%	0.00%
% of scenario 'A'			123%	53%	64%	0%	0%
Average current							
	mA	0.0179345	0.022099	0.00947	0.0115523	0	0
Design Goals							
System efficiency		90%	90%	90%	90%	90%	90%
Target battery life	yr	2	2	2	2	2	2
Required battery capacity	mAh	349.36	430.49	184.47	225.04	0.00	0.00
Given battery capacity	mAh	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Estimated battery life	yr	5.72	4.65	10.84	8.89	0.00	0.00

Slika 51. MaxStream kalkulator

Analizirano je više slučajeva (zavisno od unesenih karakteristika), od kojih su neki prikazani Slikom 51. U slučajevima A i B XBee uređaj izlazi iz režima spavanja svako 30 minuta i prelazi u aktivno stanje koje traje 1s.

Potrošnja u režimu spavanja je ispod $1 \mu A$ [60]. Međutim, ovu potrošnju je veoma teško dostići, dok je opšte priznat stav da XBee uređaj ima potrošnju manju od $10 \mu A$. Rezultati koji su prikazani ovom simulacijom zasnovani su pod pretpostavkom da je potrošnja u režimu spavanja $1 \mu A$.

Idle/Receive struja iznosi 28 mA u normalnom režimu rada, a 31 mA u pojačanom režimu rada (engl. Boost) [60]. *Transmit* struja iznosi 33 mA u normalnom i 45 mA u *boost* režimu rada [60]. Kao što je uočljivo, za korišćenje pojačanog režima rada potrebna je veća struja. Međutim, omogućavanjem ovog režima rada, povećavaju se predajna snaga i osjetljivost XBee uređaja, što pozitivno utiče na ostvarivi maksimalni domet. Kao što rezultati pokazuju, zahtijevani kapacitet baterije za period rada od dvije godine jeste 349.36 mAh (sa karakteristikama Zigbee mreže kao u slučaju A), ukoliko je uređaj aktivan (budan) svako 30 min na period od 1s. Međutim, ukoliko je period spavanja 60 min (slučaj B), za period od dvije godine rada uređaja, potrebni baterijski kapacitet iznosi 184.47 mAh. Povećavanjem kapaciteta baterije na 1000 mAh sistem bi u teoriji mogao da funkcioniše više godina.

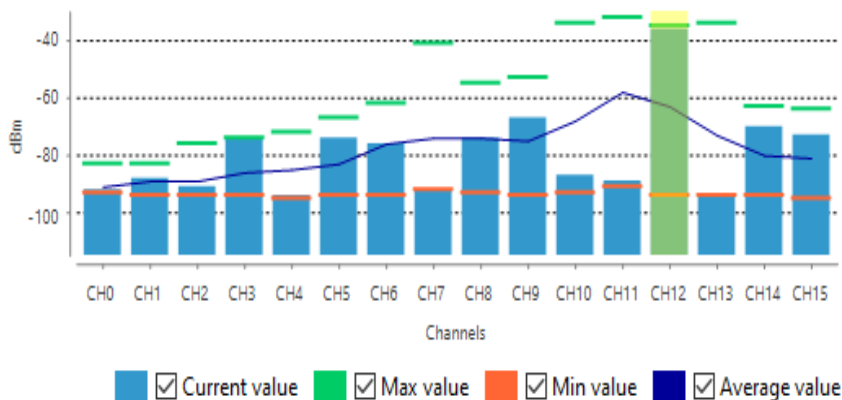
Zahvaljujući ovim proračunima moguće je odrediti stepen autonomije sistema, režim rada uređaja, kao i najpogodnije napajanje Zigbee mreže.

6.7 Eksperimentalni rezultati

Prilikom projektovanja i testiranja pomenutog sistema značajnu ulogu imala je XCTU platforma i njeni dostupni alati. Jedna od najčešće prisutnih bežičnih mreža jeste Wi-Fi mreža, kao što je prikazano u poglavlju 4.5. Samim tim, neizbježno je doći u situaciju da Wi-Fi i Zigbee tehnologije dijele isti radni prostor. Kako ove dvije tehnologije rade na istoj frekvenciji od 2.4 GHz, nameće se i pitanje nastalih smetnji prilikom prenosa podataka. Takođe, i drugi uređaji (mikrotalasne pećnice, bežični fiksni telefoni, itd.) mogu raditi u istom opsegu što dodatno opterećuje komunikaciju.

Dakle, ukoliko dođe do preklapanja komunikacionih kanala ove dvije tehnologije (Wi-Fi i Zigbee), pouzdanost prenosa podataka Zigbee mrežom neizbježno je pod uticajem smetnji prouzrokovanih prisustvom Wi-Fi tehnologije. Ne bi li se izbjegla nepouzdana komunikacija uzrokovana pomenutim smetnjama, uz pomoć XCTU platforme najprije se mjeri prisutnost šuma u Zigbee kanalima.

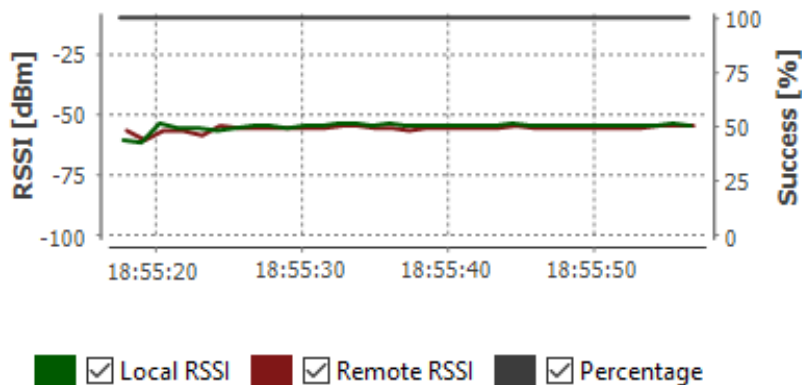
Spectrum Analyzer, alat XCTU softvera, u realnom vremenu mjeri nivo šuma koji je prisutan u svakom od 16 kanala frekvencijskog spektra od 2.4 GHz, kao što je prikazano Slikom 52. Uz pomoć prikupljenih podataka, moguće je otkloniti greške na mreži i izbjeći korišćenje kanala sa prisustvom veće količine smetnji. Na ovaj način, moguće je stvaranje pouzdane bežične komunikacije. Prilikom konfigurisanja ovog alata parametri *Sampling interval* i *Number of samples* su imali vrijednosti 30s, odnosno 120 [47]. Kao što se vidi sa Slike 52, veći broj kanala (npr. CH9, CH12, CH14 i CH15, itd) je u značajnoj mjeri pod uticajem smetnji. Ova pojava se može objasniti prisutnošću većeg broja Wi-Fi mreža u okruženju (i/ili drugih tehnologija), koje koriste različite komunikacione kanale.



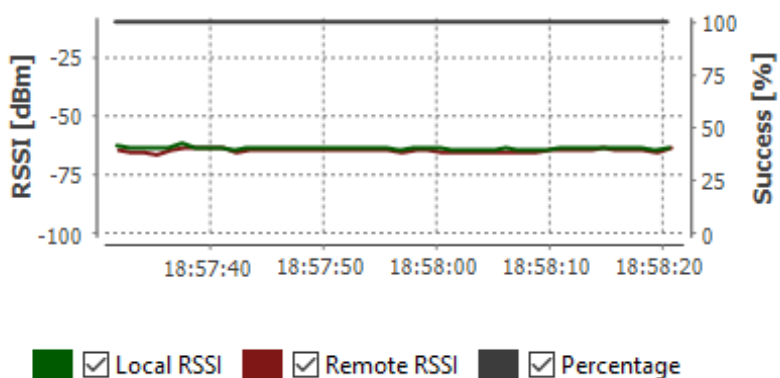
Slika 52. Odabir optimalnog kanala za prenos podataka [47]

Kao ilustraciju sakupljenih podataka, naredne slike daju grafički prikaz izmjerene jačine signala [dBm] u zavisnosti od rastojanja, kao i postotak uspješno isporučenih paketa podataka na rastojanjima od 5, 10, 20, 40 m u zatvorenom prostoru, respektivno [47]. Prikupljeni podaci o jačini signala su dobijeni korišćenjem XCTU softvera.

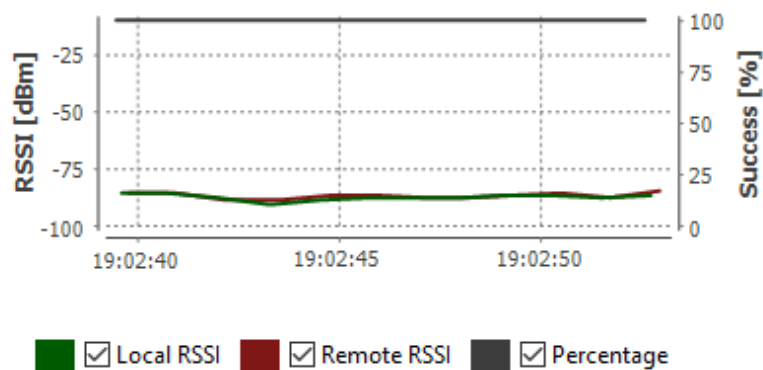
Treba napomenuti da su podaci o lokalnim i udaljenim RSSI (engl. Received Signal Strength Indicator) vrijednostima dati zelenom, odnosno crvenom bojom. Sivom bojom je predstavljen procenat uspješnosti prenosa paketa podataka prilikom mjerenja.



Slika 53. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 5 m [47]



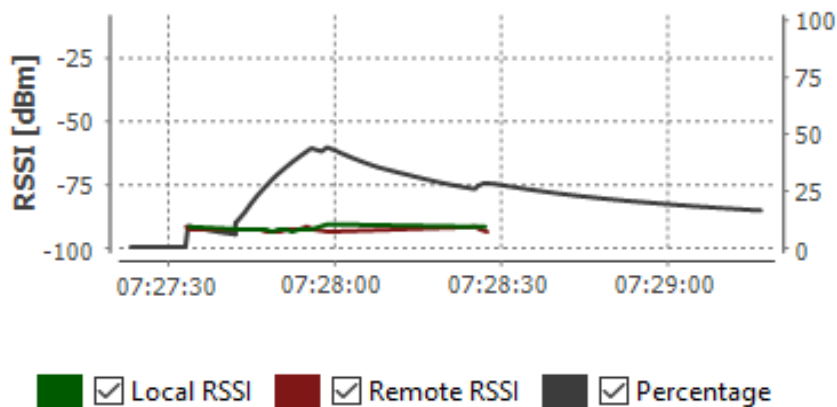
Slika 54. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 10 m [47]



Slika 55. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 20 m [47]

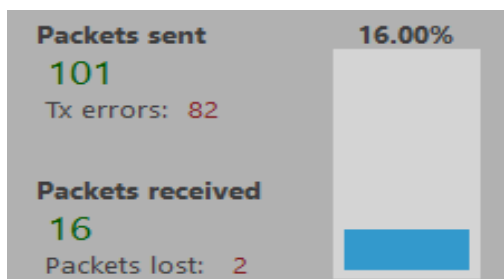
Treba istaći da je tokom testiranja, u sva tri prethodno navedena slučaja, procenat uspješnosti prenosa paketa podataka 100%, i ovaj procenat uspješnosti se zasniva na uzorku od 50 uzastopno poslanih paketa [47].

Eksperimentalni podaci pokazuju da Zigbee mreža počinje da nepouzdana radi na rastojanju od 40 m u zatvorenom prostoru [47], dok su uslovi pod kojima je sprovedeno testiranje identični u svakom od prethodno navedenih slučajeva (5m, 10, 20m, 40m). Rezultati testiranja jačine signala na rastojanju od 40 m su prikazani na Slici 56.



Slika 56. Jačina signala između dva susjedna Zigbee uređaja na rastojanju od 40 m [47]

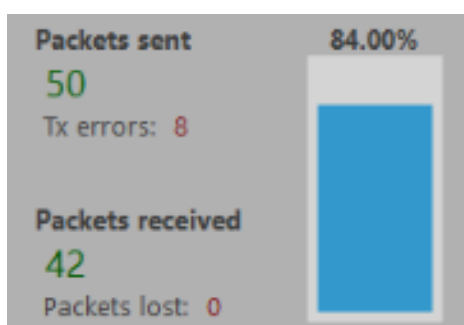
Kao što je vidljivo na Slici 57, procenat uspješnosti prenosa paketa podataka, pri rastojanju od 40 m, je 16 % [47]. Ovi rezultati su dobijeni na osnovu uzorka od 101 poslanog paketa podataka, korišćenjem XCTU softvera [47].



Slika 57. Procenat uspješnosti prenosa paketa podataka [47]

Predloženi sistem bežične industrijske komunikacije je testiran između dva objekta sa većim brojem fizičkih prepreka u vidu armiranih zidova, kao i u prisustvu drugih bežičnih tehnologija (Wi-Fi, telefoni, kamere), dok su se Zigbee uređaji nalazili na visini od 1m [47]. Nakon izloženih inicijalnih testiranja dometa Zigbee tehnologije, ista je testirana u industrijskom okruženju „Uniprom“ pekare. U ovom industrijskom okruženju, pomenuta tehnologija je ostvarila bolje rezultate u vidu maksimalnog dometa između čvorova. Eksperimentalni podaci pokazuju da je komunikacija, na udaljenosti od 40 m, moguća sa uspjehom prenosa paketa podataka od 84%, na uzorku od 50 poslatih paketa podataka. Naime, kao što je vidljivo sa Slike 58, 42 paketa podataka su uspješno primljena.

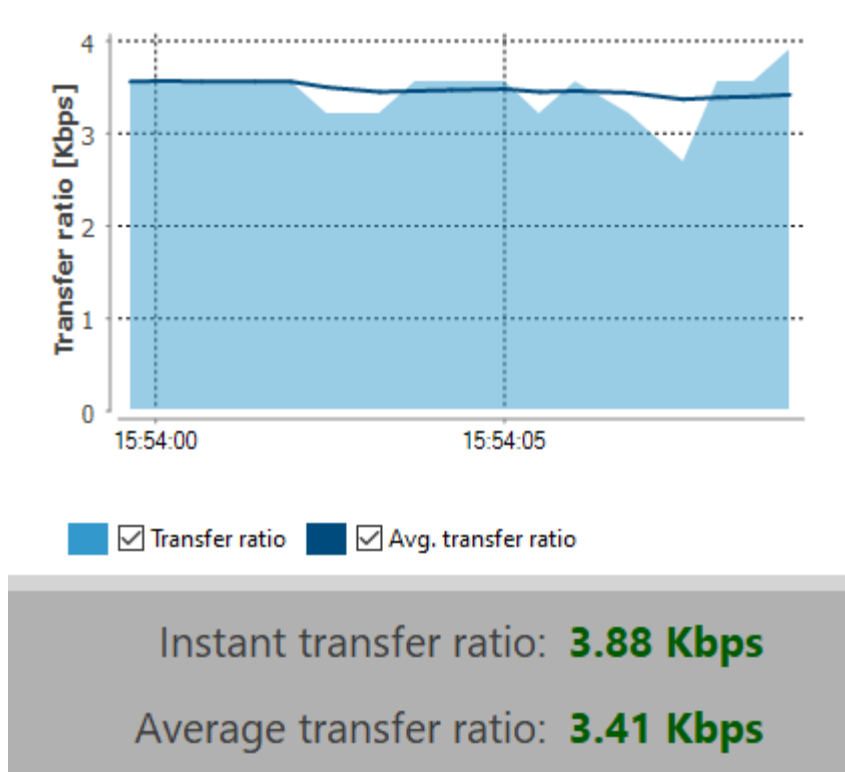
Ovakvi rezultati se mogu opravdati rasterećenošću prostora „Uniprom“ pekare (manji broj fizičkih prepreka u pogonu), kao i manjem prisustvu komunikacionih tehnologija koje rade u opsegu od 2.4 GHz.



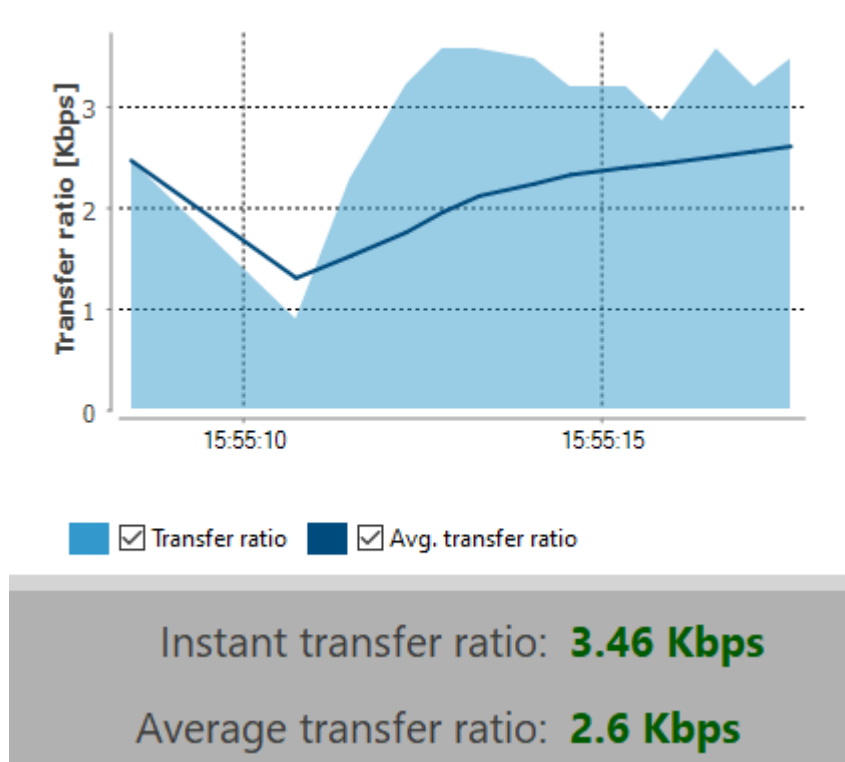
Slika 58. Procenat uspjehnosti prenosa paketa podataka

Korišćenjem *Troughput* alata XCTU softvera može se izmjeriti propusnost mreže, tj. broj uspješno prenesenih bita u mreži u posmatranom vremenskom intervalu. Propusnost sistema zavisi od broja skokova informacija. Pod skokom informacije se podrazumijeva kretanje paketa podataka od jednog uređaja do drugog. Ukoliko informacija mora da pređe putanju na kojoj se nalazi više uređaja, povećava se i broj skokova podataka. Eksperimentalni podaci pokazuju da je propusnost sistema veća ukoliko putanja kojom se prenosi ima manji broj skokova, dok se povećavanjem broja skokova propusnost sistema smanjuje.

Na Slici 59 je prikazana propusnost kada nema skokova paketa podataka, tj. kad postoji direktna veza između koordinatora i rutera, dok je na Slici 60 prikazana propusnost kada se informacija prenosi između koordinatora i udaljenijeg rutera, posredstvom rutera (čvora) koji se nalazi u dometu koordinatora. U nastavku su prikazani rezultati mjerenja korišćenjem *Troughput* alata XCTU softvera:



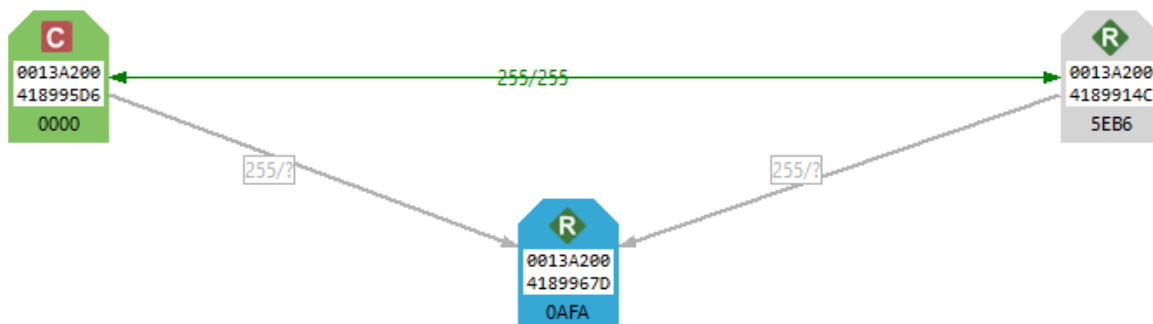
Slika 59. Propusnost sistema



Slika 60. Propusnost sistema

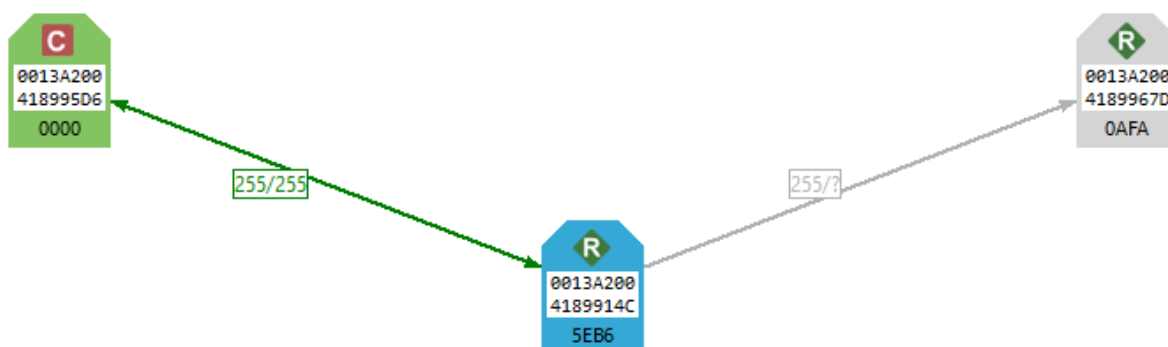
Korišćenjem XCTU softvera na Slici 61 grafički je prikazana komunikacija između mastera (centralnog PC računara) i dva slave-a koji su smješteni u proizvodnim pogonima.

Na Slici 61 je prikazana mesh komunikacija gdje svi uređaji međusobno komuniciraju, dok se na Slici 62 sva komunikacija odvija posredstvom rutera 1.



Slika 61. Komunikacija XBee uređaja

Naime, ukoliko nema direktne veze između koordinatora (glavnog uređaja) i rutera od interesa, sva komunikacija će se preusmjeriti i obavljati posredstvom susjednih Zigbee čvorova (rutera), kako je i teoretski analizirano u poglavlju 4. Dakle, samo RF moduli koji su konfigurisani kao ruter (i/ili koordinator) uređaji mogu prenositi (usmjeravati) informacije.



Slika 62. Komunikacija XBee uređaja

Testiranjem ovog sistema potvrdila se njegova robusnost i funkcionalnost. Projektovanjem ovakvog sistema mesh bežične industrijske komunikacije pogon postaje pristupačniji za monitoring i upravljanje. Potvrđuje se pretpostavka da se povećava mobilnost čitavog postrojenja ovakvim sistemom, dok se ujedno mjeri angažovanost i produktivnost pogonskih mašina. Testiranjem funkcionalnosti ovoga sistema potvrđuje se ispravnost i pouzdanost pri radu (uključivanje/isključivanje industrijskih mašina, kao i uzimanje stanja od istih). Takođe, potvrđene su i pomenute funkcionalnosti udaljenih mašina, kod kojih ne postoji direktna linija komunikacije.

6.8 Cijena sistema

Proračunati troškovi izrade sistema industrijske komunikacije zasnovanog na Zigbee tehnologiji (tabela 4.) ukazuju na isplativost izrade sistema predloženog u ovom radu. Treba napomenuti da je preuzimanje i korišćenje svih programa u ovom radu besplatno (izuzev Matlab-a) što predstavlja značajnu prednost ovakvog sistema sa ekonomskog aspekta.

U tabeli 4 su date su cijene elemenata predloženog sistema Zigbee komunikacije. Ove cijene su podložne promjenama u zavisnosti od proizvođača i broja naručenih komponenti.

Element	Broj komada	Cijena(€)
Arduino Uno	3	3,8
XBee S2C	3	18,2
Arduino šild	2	1,2
Usb adapter	1	2,3
Ukupno:		70,7€

7. Zaključak

Predmet ovog rada je realizacija sistema bežične industrijske komunikacije zasnovanog na Zigbee tehnologiji, kao i predstavljanje mogućnosti koje ona nudi industrijskim postrojenjima. Korišćenjem Zigbee tehnologije predstavlja se alternativa praktično zastarelim tehnologijama industrijske komunikacije (npr. standardi RS-232 i RS-485). Master radom „Praktična realizacija Zigbee mreža u industrijskim postrojenjima“ je potvrđeno da su karakteristike i mogućnosti razvijenog sistema naprednije od konvencionalnih sistema industrijske komunikacije.

Realizovani sistem bežične industrijske komunikacije zasnovan na Zigbee tehnologiji, predstavljen u ovom radu, je testiran u realnom industrijskom okruženju. Razvijeni sistem prikuplja podatke u realnom vremenu, koje zatim objedinjuje radi naknadne obrade i analize. Sistem je koncipiran tako da može da prikuplja i druge vrste podataka dodavanjem različitih senzora i na taj način se lako prilagođava za druge namjene, kao što je upravljanje protivpožarnom zaštitom, rasvjetom, grijanjem objekata, itd. Na periferne uređaje je moguće spojiti i druge vrste digitalnih i analognih senzora kao što su davači temperature, vlažnosti vazduha, nivoa osvijetljenja, buke, itd. Na ovaj način zadržane su sve funkcionalnosti i prednosti koje nudi bežična mreža, dok su se nedostaci žičanih infrastruktura izbjegli. Posebno je naglašena multifunkcionalnost i mobilnost sistema. Naime, nepromijenjena hardverska konfiguracija je primjenjiva u više industrijskih grana, u zavisnosti od implemetiranog softvera.

Funkcionalnost sistema je proširena omogućavanjem pristupa prikupljenim podacima sa udaljenih lokacija, preko Interneta. Iako bežične tehnologije sa sobom nose određene sigurnosne rizike, korišćenjem savremenih mehanizama zaštite bežičnog prenosa podataka, ovaj rizik se svodi na minimum. Međutim, iako pomenuti sigurnosni rizici mogu uticati na upotrebu bežičnih tehnologija, ove tehnologije nedvojbeno predstavljaju budućnost industrijske komunikacije. Korišćenje sistema zasnovanog na Zigbee tehnologiji garantuje fleksibilnost, mobilnost, jednostavnu montažu i održavanje, sa ciljem stvaranja pouzdane, robustne i ekonomski isplative komunikacione mreže. Na kraju, može se zaključiti da su uspješno ostvareni ciljevi zadatog sistema, kao i potvrđivanje postavljenih hipoteza.

Dalji rad na predloženom sistemu industrijske komunikacije omogućioće povećanje funkcionalnosti sistema. Kako je ovaj sistem koncipiran da uz minimalne izmjene ostvaruje veliku fleksibilnost i širok spektar primjene, moguće je ostvariti upravljanje industrijskim pogonom sa interneta i postići njegovu potpunu automatizaciju. Omogućavanjem ovih izmjena u automatizaciji postrojenja praktično je zagarantovan kvatitet plasiranih proizvoda na tržištu.

8. Literatura

- [1] J. F. Kurose, K. W. Ross, „Computer Networking: A Top-Down Approach“ , Sixth Edition, pp. 7-9, ISBN-10: 0132856204, Pearson, 2013.
- [2] H. Pan, X. Yang, “Application of Internet of Things Technology in 3D Medical Image Model”, IEEE Access, Volume 7, pp. 5508 – 5518, Electronic ISSN: 2169-3536, December 2018.
- [3] J. Bag, S. Roy, S. K. Sarkar, “FPGA Implementation of Advanced Health Care system using Zig-Bee enabled RFID Technology”, 2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC), Electronic ISBN: 978-1-4799-2572-8, March 2014.
- [4] Y.C. Du, Y.Y. Lee, Y.Y. Lu, C.H. Lin, M.J. Wu, C.L. Chen, T. Chen, “Development of a Telecare System Based on ZigBee Mesh Network for Monitoring Blood Pressure of Patients with Hemodialysis in Health Care Centers”, Journal of Med. Syst., pp. 877-883, DOI: 10.1007/s10916-010-9513-0, 2011.
- [5] H.C Tung, V. Rakočević, K. F. Tsang, L. L. Lai, "ZigBee mobility management for Multipurpose Patient Monitoring system", IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, DOI:10.1109/iecon.2013.6700552, Vienna, Austria, 2013.
- [6] W.C. Lee, Joseph Ng, L.F. Yeung, "Sensitivity improved ZigBee RF receiver for a medical sensor", IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, DOI:10.1109/iecon.2013.6700550, Vienna, Austria, 2013.
- [7] T. Kalaivani, A. Allirani, P. Priya, “A Survey on Zigbee Based Wireless Sensor Networks in Agriculture”, 3rd International Conference on Trendz in Information Sciences & Computing (TISC2011), Electronic ISBN: 978-1-4673-0133-6, Chennai, India, Dec. 2011.
- [8] X. Xiang, D. Li, Y. Liu, Y. Chen, "Design of Fuzzy Drip Irrigation Control System Based on ZigBee Wireless Sensor Network", Computer and Computing Technologies in Agriculture IV Volume 344, DOI:10.1007/978-3-642-18333-1_58, 2011
- [9] T. Veeramanikandasamy, K. Sambath, K. Rajendran, D. Sangeetha, "Remote monitoring and closed loop control system for social modernization in agricultural system using GSM and Zigbee technology", 2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), DOI:10.1109/ICAEE.2014.6838438, Vellore, India, 2014.
- [10] J. A. Gay-Fernández, I. Cuiñas, M. García Sánchez, A. V. Alejos, “Radio-Electric Validation of an Electronic Cowbell Based on ZigBee Technology”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Volume 53, Issue 4, pp. 40-44, Print ISSN: 1045-9243, 2011.
- [11] P. K. M. Nkwari, S.Rimer, B.S.Paul, H. Ferreira, "Heterogeneous wireless network based on Wi-Fi and ZigBee for cattle monitoring", 2015 IST-Africa Conference, DOI:10.1109/ISTAFRICA.2015.7190522, Lilongwe, Malawi, 2015.

- [12] J. I. Huircan, C. Munoz, H. Young, L. von Dossow, J. Bustos, G. Vivallo, M. Toneatti, "ZigBee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields", *Computers and Electronics in Agriculture* Volume 74, DOI:10.1016/j.compag.2010.08.014, 2010.
- [13] V. Saravanan, S. Arivoli, K. Valarmathi, "Zigbee based monitoring and control of melter process in sugar industry", 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), Electronic ISBN: 978-1-4799-2320-5, Coimbatore, 2014.
- [14] L. Ruiz-Garcia, P. Barreiro, J.I. Robla, "Performance of ZigBee-Based wireless sensor nodes for real-time monitoring of fruit logistics", *Journal of Food Engineering* Volume 87, Issue 3, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2007.12.033, 2008.
- [15] D. Xu, P. Wang, B. Shen, "Food Pollution Remote Intelligent Monitoring System Based on ZigBee Technology", *Advance Journal of Food Science and Technology* Volume 11, DOI:10.19026/ajfst.11.2415, ISSN: 2042-4868, 2016.
- [16] W. Zhang, G. Li, W. Gao, "The Embedded Smart Home Control System Based on GPRS and Zigbee", *MATEC Web of Conferences*, DOI:10.1051/mateconf/20153404010, 2015.
- [17] D.M. Han, J.H. Lim, "Smart Home Energy Management System using IEEE 802.15.4 and ZigBee", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Volume 56, Issue 3, pp. 1403 – 1410, Print ISSN: 0098-3063, Aug. 2010.
- [18] J. Han, C.S. Choi, W. Park, I. Lee, S.H. Kim, "Smart Home Energy Management System Including Renewable Energy Based on ZigBee and PLC", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Volume 60, Issue 2, pp. 198 - 202, Print ISSN: 0098-3063, 2014.
- [19] M. Collotta, G. Nicolosi, E. Toscano, O. Mirabella, "A ZigBee-based network for home heating control", 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, DOI:10.1109/IECON.2008.4758389, Orlando, USA, 2008.
- [20] G. Wang, J. Zhang, W. Li, D. Cui, Y. Jing, "A forest fire monitoring system based on GPRS and ZigBee wireless sensor network", DOI:10.1109/ICIEA.2010.5515417, 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Taichung, Taiwan, 2010.
- [21] Y. Hongyan, G. Shuqin, H. Ligang, W. Jinhui, P. Xiaohong, W. Wuchen, "Research of Fire Detecting System Based on ZigBee Wireless Network", *IEEE 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering (ICICEE)*, DOI:10.1109/ICICEE.2012.73, Xi'an, China, 2012.
- [22] F. Feng, H. Shengyu, X. Qi, "The Research of the ZigBee and RFID Fusion Technology in the Coal Mine Safety", *IEEE 2010 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII)*, DOI:10.1109/ICIII.2010.330, Kunming, China, 2010.
- [23] https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-74/Accenture-Strategy-Wireless-Industry-Powers-US-Economy-2018-POV.pdf (poslednji put pristupano 25.09.2020)

- [24] E. Wright, D. Reynders, "Practical Telecommunications and Wireless Communications ", pp. 248-249, ISBN: 9780750662710, Newnes, 2004.
- [25] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, "Fundamentals of physics, extended edition [8th Edition]", pp. 1093-1095, ISBN 13: 9780471758013, Wiley, 2007.
- [26] C. Haslett, „Essentials of Radio Wave Propagation“, p.152, ISBN 10: 052187565X, Cambridge University Press, 2008.
- [27] S. Farahani, „ZigBee Wireless Networks and Transceivers“, pp. 176, 177, 194, ISBN: 978-0-7506-8393-7, Newnes, 2008.
- [28] Y. Kotsuka, "Electromagnetic Wave Absorbers: Detailed Theories and Applications, First Edition", pp. 1-3, ISBN: 9781119564126q, John Wiley & Sons, 2019.
- [29] T. Carpenter, J. Barrett, "Certified Wireless Network Administrator, 4th Edition", pp. 52-58, ISBN 10:0071494901, McGraw-Hill, 2008.
- [30] J. F De Paz, D. I. Tapia, R. S. Alonso et al, "Mitigation of the ground reflection effect in real-time", pp. 195-200, DOI 10.1007/s10115-012-0479-8, Springer, 2012.
- [31] T. Dean, "Network+ Guide to Networks 5th Edition", pp.367- 368, ISBN 10: 1423902459, Course Technology, 2010.
- [32] G. J. Holzmann, „Design And Validation Of Computer Protocols“, p. 15, ISBN 10: 0135399254, Prentice Hall, 1990.
- [33] A. Gilchrist, "Industry 4.0: The Industrial Internet of Things", pp. 96- 97, ISBN-13: 978-1-4842-2046-7, Apress, 2016.
- [34] J. Sanchez, M. Canton, "Embedded Systems Circuits and Programming", p.544, ISBN 10: 1138074063, CRC Press, 2012.
- [35] R. Zurawski, "Industrial Communication Technology Handbook, Second Edition", ch. 11 pp. 3-4, ISBN 10: 9781482207323, CRC Press, 2014.
- [36] L. Frenzel, "Handbook of Serial Communications Interfaces: A Comprehensive Compendium of Serial Digital Input/Output (I/O) Standards", pp. 109-112, p. 118, ISBN 10:0128006293, Newnes, 2015.
- [37] J. Axelson, "Serial Port Complete: Programming and Circuits for Rs-232 and Rs-485 Links and Networks", pp. 118-119, p. 193, ISBN 10:0965081974, Lakeview Research, 2002.
- [38] J. Park, S. Mackay, E. Wright, "Practical Data Communications for Instrumentation and Control", pp. 44-45, ISBN 07506 57979, Newnes, 2003.
- [39] <https://www.elektronika.ftn.uns.ac.rs/et-mikroracunarska-elektronika/wp-content/uploads/sites/138/2018/03/Async.pdf> (poslednji put pristupano: 28.11.2020)
- [40] L. E. Frenzel, "Electronics Explained: The New Systems Approach to Learning Electronics", pp. 140-141, ISBN 978-1-85617-700-9, Newnes, 2010.

- [41] J. K. Petersen, "Fiber Optics Illustrated Dictionary", pp. 828-829, ISBN 10: 0-8493-1349-X, CRC Press, 2002.
- [42] A. When, "Dot-Dash to Dot.Com", pp. 103- 104, ISBN 978-1-4419-6759-6, Springer, 2011.
- [43] D.Gislason, "Zigbee Wireless Networking", pp 1-11, ISBN 10:0750685972, Newnes, 2008.
- [44] <https://www.ieee.org/about/ieee-history.html>, (poslednji put pristupano 28.11.2020)
- [45] <https://www3.nd.edu/~mhaenggi/ee67011/zigbee.pdf>, "ZigBee Document 053474r06, Version 1.0", pp. 17-18, pp. 29-36, Zigbee Alliance, 2004. (poslednji put pristupano 28.11.2020)
- [46] R. Faludi, „Building Wireless Sensor Networks“, pp. 17-21, pp. 26-29, pp. 32-56, ISBN 13: 978-0-596-80773-3, O'Reilly Media, 2011.
- [47] I. Rašović, Z. Mijanović, "Proposal of an industrial communication system based on ZigBee technology", 24th International Conference on Information Technology (IT) , DOI 10.1109/IT48810.2020.9070659, February 2020.
- [48] https://www.silabs.com/content/usergenerated/asi/cloud/attachments/siliconlabs/en/community/wireless/proprietary/forum/jcr:content/content/primary/qna/802_15_4_promiscuous-tbZR/hivukadin_vukadi-iTXQ/802.15.4-2015.pdf, IEEE Standard for Low-Rate, pp. 46-49, ISBN 978-1-5044-0846-2 STDPD20893, 2015. (poslednji put pristupano 28.11.2020)
- [49] G.Z. Yang, "Body Sensor Networks", pp. 162-174, ISBN-10: 1-84628-272-1, Springer, 2006.
- [50] C. Wang, T. Jiang, Q. Zhang, "ZigBee® Network Protocols and Applications" pp. 34-36, pp. 239-240, ISBN 13: 978-1-4398-1602-8, CRC Press, 2016.
- [51] S.H. Yang, "Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications", pp. 34-37, ISBN 13: 978-1-4471-5504-1, Springer, 2014.
- [52] <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>, (poslednji put pristupano 23.01.2021).
- [53] <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digital/Our%20Insights/How%20can%20we%20recognize%20the%20real%20power%20of%20the%20Internet%20of%20Things/How-can-we-recognize-the-real-power-of-the-Internet-of-Things.pdf>, (poslednji put pristupano 29.11.2020)
- [54] N. Baker, "ZigBee and Bluetooth strengths and weaknesses for industrial applications," in *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 20-25, doi: 10.1049/cce:20050204, April-May 2005,.

- [55] A. Elahi, and A. Gschwender, "ZigBee Wireless Sensor and Control Network", pp. 33- 34, ISBN 13 9780137134854, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
- [56] J. Lin, T. Talty and O. K. Tonguz, "On the potential of bluetooth low energy technology for vehicular applications", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 267-275, doi: 10.1109/MCOM.2015.7010544, January 2015.
- [57] Information Resources Management Association, "Fog Computing: Breakthroughs in Research and Practice", p. 73, ISBN-10 : 1522556494, IGI Global; 1st edition (June 4, 2018).
- [58] X. Fafoutis, E. Tsimballo, W. Zhao et al., "BLE or IEEE 802.15.4: Which Home IoT Communication Solution is more Energy-Efficient?", doi: 10.4108/eai.1-12-2016.151713, EAI, 2016.
- [59] M. Ghamari et al., "A Survey on Wireless Body Area Networks for eHealthcare Systems in Residential Environments", *Sensors (Basel)*, pp. 13-15. doi:10.3390/s16060831; 2016;16(6):831, Published 2016.
- [60] <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002002.pdf>, p. 17, 84, 85, Digi, (poslednji put pristupano: 28.11.2020)
- [61] <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001458-13.pdf>, pp. 17-20, pp. 46-130, pp. 143-210, Digi, (poslednji put pristupano: 28.11.2020)
- [62] https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90001942-13/concepts/c_transparent_mode_detailed.htm?tocpath=XBee%20transparent%20mode%7CXBee%20transparent%20mode%20in%20detail%7C_____0, (poslednji put pristupano: 28.11.2020)
- [63] <http://www.science.smith.edu/~jcardell/Courses/EGR328/Readings/XCTU%20Guide.pdf>, pp. 1-16, Digi International, 2008, (poslednji put pristupano: 28.11.2020)
- [64] J. Titus, "The Hands-on XBEE Lab Manual", pp. 1–11, pp. 77-93, ISBN 13:978-0-12-391404-0, Newnes, 2012.
- [65] https://www.digi.com/pdf/chart_xbee_rf_features.pdf, p.1, Digi, (poslednji put pristupano: 20.11.2019).
- [66] K. Ake, J. Clemons, M. Cubine, "Information technology for manufacturing", pp. 80-93, ISBN: 978-1-57444-359-2, St. Lucie Press, 2003.
- [67] https://zigbeealliance.org/news_and_articles/analysts-confirm-half-a-billion-zigbee-chipsets-sold-igniting-iot-innovation-figures-to-reach-3-8-billion-by-2023/, (poslednji put pristupano: 28.11.2020)
- [68] https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf, pp. 13-14, Future Technology Devices International Ltd, (poslednji put pristupano: 28.11.2020)
- [69] <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>, (poslednji put pristupano: 28.11.2020).

- [70] <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>, p. 1, 12, 15, (poslednji put pristupano 08.12.2020).
- [71] <https://www.vpn.net/>, (poslednji put pristupano: 28.11.2020).
- [72] <http://ftp1.digi.com/support/utilities/batterylifecalculator.xls>, (poslednji put pristupano: 28.11.2020).

Ime i prezime autora: **Ivan Rašović**, Spec. Sci

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom:

"Praktična realizacija Zigbee mreža u industrijskim postrojenjima",
moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Ivan Rašović, Spec. Sci

U Podgorici, dana 21.06.2021. godine