

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Индустријски инжењеринг

Предмет: Производни системи

Број индекса: 2001/2014

Игор М. Јевтић

Могућности примене бежичних сензорских мрежа у области производње

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Александар Ђорђевић, доцент- ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Циљ завршног рада подразумева да кандидат изврши прегледну студију употребе бежичних сензорских мрежа у производним системима и исте опише. Након описа, кандидат треба на конкретном примеру да покаже улогу ових система за у производним системима. Кандидат треба да спроведе самосталан рад и користи одговарајућу методологију и референтну литературу. Такође, кандидат треба да спроведе и практично прикупљање података у производним системима који послују у Србији. Мотивација за реализацију рада се огледа кроз чињеницу да се кроз адекватно прикупљање и анализу података могу предложити различити начини за примену сензора и сензорских мрежа у производним системима.

Препоручена литература:

1. V. C. Gungor, G. P. Hancke, *Industrial Wireless Sensor Networks*, CRC Press, New York, 2013.
2. Q. Sun, S. Li, S. Zhao, H. Sun, Li, A. Nallanathan, *Industrial wireless sensor networks 2016*, International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017.
3. J. Fraden, *Handbook of Modern Sensor - Physics, Designs, and Application, Third Edition*, Springer, 2004,
4. G. Q Huang, P. K. Wright, S. T. Newman, *Wireless manufacturing: a literature review, recent developments, and case studies*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2009.

Крагујевац, 05.07.2019.

Ментор:

др Александар Ђорђевић, доцент

Резиме

Са почетком 21. века производна предузећа све више примењују модерне информационо-комуникационе технологије како би унапредили квалитет производа, односно производне процесе. Употреба бежичних сензорских мрежа један је од процеса који произвођачи примењују како би остварили већи ниво аутоматизованости, бољи мониторинг и контролу у оквиру индустријског постројења. На основу тога, у раду је дат преглед модерног развоја и употребе бежичних сензорских технологија. Рад такође разматра појединачно сензоре, сензорске чворове и бежичне мреже како би дао јаку основу читаоцу за боље разумевање истог. Посебна пажња посвећена је примени бежичних сензорских мрежа, нарочито у области индустрије. На крају рада приказани су практични примери и изнети су закључци.

Кључне речи: бежичне сензорске мреже, индустријске бежичне сензорске мреже, сензори, сензорски чворови...

Abstract

With the beginning of the 21st century, manufacturing companies have been increasingly using modern information and communication technologies to improve the quality of products, ie production processes. The use of wireless sensor networks is one of the processes that manufacturers apply to achieve greater levels of automation, better monitoring and control within an industrial plant. Accordingly, and with the theme of the paper, it gives an overview of the modern development and use of wireless sensor technologies. The paper also examines sensors, sensor nodes, and wireless networks individually to give a strong basis for the reader to better understand the same. Particular attention has been dedicated to the implementation of wireless sensor networks, especially in the field of industry. Practical examples are presented at the end of the paper together with conclusion.

Key words: wireless sensor networks, industrial wireless sensor networks, sensors, sensor nodes...

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	6
2. СЕНЗОРИ И ЊИХОВА КЛАСИФИКАЦИЈА.....	8
3. БЕЖИЧНЕ МРЕЖЕ	13
3.1 ПЕРСОНАЛНЕ БЕЖИЧНЕ МРЕЖЕ.....	16
3.2 БЕЖИЧНЕ МРЕЖЕ ЗА ЛОКАЛНО ПОДРУЧЈЕ.....	18
4. БЕЖИЧНЕ СЕНЗОРСКЕ МРЕЖЕ.....	21
4.1 СЕНЗОРСКИ ЧВОР	25
4.1.1 НИВОИ ПРОТОКОЛА КОД СЕНЗОРСКИХ ЧВОРОВА.....	26
4.1.2 ПРАВАЦ РАЗВОЈА И ПРИМЕРИ СЕНЗОРСКИХ ЧВОРОВА	28
4.2 БЕЖИЧНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ КОЈЕ СЕ КОРИСТЕ КОД СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА.....	31
4.3 ПРИМЕНА БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА.....	33
5. ТРЕНУТНО СТАЊЕ И МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА У ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДЊЕ	34
5.1 ТРЕНУТНО СТАЊЕ И ТЕДЕНЦИЈА УПОТРЕБЕ	35
5.2 БЕЖИЧНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ КОЈЕ СЕ КРОИСТЕ	39
5.3 МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА У ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДЊЕ.....	44
5.3.1 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ПРИ ИЗБОРУ АПЛИКАЦИЈЕ БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА	45
5.3.2 ПРИМЕНА БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА У ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДЊЕ	48
6. ЗАКЉУЧАК.....	55
ЛИТЕРАТУРА.....	57

1. УВОД

Предузећа, тј. учесници производње, требају задовољити све шире захтеве према технологији производње како би одржали своју конкурентност на тржишту. Одржавање конкурентности производње је врло важно у свим сегментима производње, будући да практично не постоји производ и производња која нема конкуренцију. Производња треба пратити захтеве настале развојем глобализма првенствено повећањем капацитета и квалитета. Поред повећања капацитета, такође је врло важно одржавање истог на високом нивоу.

У циљу задовољавања наведених захтева, у области производних система су неопходна непрекидна истраживања, као и примена унапређења добијених резултатима у пракси [1-3]. Тиме се добија да савремени производни системи користе технолошка решења која су развијена по најновијим критеријумима, критеријумима „четврте индустријске револуције“ (Индустрија 4.0) о којој ће бити више речи у раду [7-10].

У складу са наведеним, широм света спроводе се разна истраживања у циљу модернизације производње. Она обједињују разне научне области. Бројни истраживачки центри који се баве унапређењем производње исту усмерују ка што већој мери аутоматизованости, као предвонице процеса модернизације и одржавања квалитета. Развој електронике, сензорске технике, комуникационих технологија и технологија бежичних система у великој мери доприносе даљем развоју нових решења [1], [11-14].

Значајни резултати развоја на пољу електронике су развој микроелектронике и **MEMS** технологије (енг. *Micro-Electro Mechanical Systems*), смањена потрошња, већа поузданост и јефтинији производи. На пољу сензорске технике значајни су резултати минијатуризације, смањења осетљивости на шум, побољшање прецизности, смањење потрошње и проширења скупа могућих неелектричних величина за мерење. У оквирима технологија комуникације, нови протоколи су осмишљени са циљем да омогуће поуздану, тј. константну комуникацију и у околинама са сметњама (оптерећеним шумом), чиме су додатно смањене потрошње примопредајника. На пољу микроконтролера повећани су ресурси (број и квалитет аналогно–дигиталних и дигитално–аналогних претварача, дужина аритметичке јединице, итд.), убрзано је рачунање, увеличана је оперативна меморија и унапређена енергентска ефикасност. Ови резултати омогућавају локалну имплементацију комплексних алгоритама прорачуна и проширење области примене микроконтролера у разним бежичним системима.

Горе наведени резултати развоја су значајно допринели ширењу области примене бежичних сензорских мрежа. Бежична сензорска технологија **WSN** (енг. *Wireless Sensor Network technology*) је приказала свој велики потенцијал за индустријску, комерцијалну и корисничку примену. Употреба исте у оквиру производње, тј. индустријска бежична сензорска технологија је изразила велики потенцијал и нашла примену у области мониторинга и контроле процесних података попут притиска, влажности, температуре, протока, нивоа, вискозности, вибрационих померања и томе слично. Са препознавањем тог потенцијала, извршена су разна истраживања у смеру увођења Индустријских бежичних сензорских мрежа **IWSN** (енг. *Industrial Wireless Sensor Network technology*) [7,12, 15-22].

У један од могућих смерова истраживања спадају и вишеагентни системи [23-25]. Међу најактуелније апликације у индустријским системима спадају системи за надзор и прикупљање података **SCADA** (енг. *Supervisory Control And Data Acquisition*) [12, 26,28]. Затим, у великој мери су актуелне разне врсте апликација које се користе за серијску обраду, тестирање, дијагностиковање, управљање индустријским роботима итд.

Другим речима, индустријска бежична сензорска технологија **IWSN** је предводник у индустријском модерном организовању. Модерно организовање има за циљ унапређење продуктивности, редуковање трошкова, развој производа и услуга, као и успостављање нових модела за одржавање квалитета. **IWSN** повезује већ постојеће индустријске системе и сајбер мреже чиме нуди нове изазове и примене за произвођаче.

Употреба **IWSN** у оквирима производње, тј. у оквирима индустрије, има тенденцију раста из године у годину. Према истраживањима [29] било је предвиђено да ће раст **IWSN** у оквирима индустрије у периоду између 2012 и 2016 године бити остварен за преко 500%. То се и остварило. Данас, при почетку 2020. ситуација је таква да се вредност тржишта **IWSN-a** процењује на 580 милиона америчких долара, и то само у оквиру Сједињених Америчких Држава. Такође, даљи раст поменутог тржишта се процењује по годишњој стопи од 11,2%. Тиме се у 2025. години укупна вредност поменутог тржишта процењује на 1360 милиона америчких долара [30,31].

Развијене су стандардне методе за пројектовање индустријских система са бежичним сензорским мрежама [32]. Производни системи у којима је имплементирана бежична технологија, познати су и као „Бежична производња“ (енг. *Wireless Manufacturing – WM*) [32-37]. Код **WM** система, на производној линији, информације из сензора, тј. сензорских чворова се преносе бежичним путем. Квалитетна примена оваквих система је доказана у случају примене **RFID** технологије (енг. *Radio-Frequency Identification technology*). Ова технологија је добра и са аспекта праћења животног циклуса, што је потврђено разним применама [38-40]. Поред наведеног, подобна је и за праћење елемената и тока материјала у оквиру производње, читаве логистике складиштења и друге сличне апликације [37][41][42].

Термин „производња“ има врло широко значење. У оквиру овог рада, како би се рад уже усмерио на темом одређену тематику, термин производња подразумева индустријску производњу. Познавање начина рада **IWSN-a** је уско повезано са познавањем начина рада сензора [43-60]. Зато је у оквиру овог рада, друго поглавље посвећено њима. У оквиру њега, приказана је дефиниција сензора, њихова класификација и улога (на примеру аутоматског управљања, карактеристичног за **IWSN**). У трећем поглављу су изнете основе бежичних технологија и њихова подела са посебним освртом на персоналне и локалне врсте, као најчешће употребљивани у оквиру бежичних сензорских мрежа (**WSN**) [61-71]. У четвртом поглављу су изнете основне технике бежичних сензорских мрежа, начин функционисања и саставни делови сензорских чворова [72-103]. Такође, као увод у пето поглавље, у оквиру четвртог поглавља су поменуте потенцијалне глобалне примене бежичних сензорских мрежа у разним областима, мимо индустријске производње [104-129]. Пето поглавље представља суштину рада, те је у истом изнето тренутно стање у области производње (индустријске) као и тенденција примене бежичних сензорских мрежа [130-150].

2. СЕНЗОРИ И ЊИХОВА КЛАСИФИКАЦИЈА

Постоји више дефиниција сензора, осмишљених у складу од њихове врсте и намене. У глобалном значењу, *сензор се дефинише као уређај који конвертује физички феномен у електрични сигнал*. Као такви, сензори представљају део везе између физичког и света електричних уређаја, попут рачунара. Други део ове везе представљају актуатори, који претварају електричне сигнале у физичке појаве [43-47].

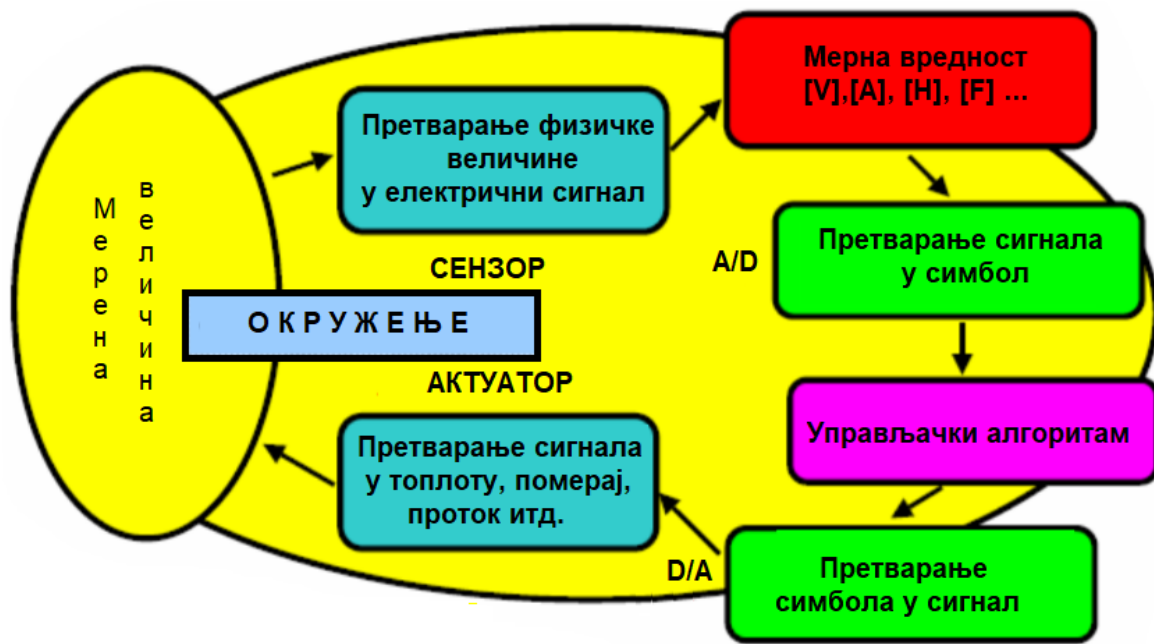
Углавном су сензори врло уско повезани са мерењем, које се издваја у систему савремених наука јер даје квантитативне информације о објекту истраживања. Као што се може приметити у претходно изнетој дефиницији, мерне информације најчешће добију форму електричног сигнала. Разлог за то је што су појачање, обрада, пренос и читање електричног сигнала усавршени, а истовремено се постиже висок метролошки квалитет статичких и динамичких карактеристика које ће бити објашњене касније. Мерење механичких, хемијских, билошких и процесних величина спроводи се помоћу разних давача, трансдјусера, трансмитера и мерних претварача. Сви они се могу сматрати, тј. сви они спадају у оквире термина „сензор“ што је последица развоја технологија, материјала, као и интеграција компоненти применом микромеханике и микроелектронике [47].

Другим речима, а у складу са наведеним, сензор је уређај који претвара мерену физичку величину у електрични сигнал. Уређај се претежно одликује са малим димензијама, изузетним техничким карактеристикама и способношћу обраде сигнала. Наведена дефиниција уноси помак у термилошко значење појма сензор, који према класичном тумачењу представља само примарни „осетни“ елемент у низу претварања мерне физичке величине у мерни сигнал.

Са друге стране, мимо дефиниције, према модернијем схватању, услед све чешћег обједињавања пратећих елемената у склоп са „осетним“ елементом (на пример, конвертор и дисплеј у истом склопу са осетним елементом), сензором се може сматрати читав склоп поменутих елемената.

Због тога, може се рећи да велика већина сензора садржи следеће основне модуле (елементе) [43]: модул за детектовање, модул за конверзију, модул за обраду и модул за приказ података.

Модул за детектовање прима сигнале из мерене средине као што су на пример температура, зрачење, магнетно поље и тако даље. Након чега, на основу добијених података (улазних сигнала) из мерене средине исте трансформише у одговарајући излазни сигнал. Модул за конверзију конвертује добијени излазни сигнал из модула за детектовање у одговарајући облик, погодан за рачунарску обраду. Модул за обраду даље врши уобличавање сигнала – често је потребно уобличити и појачати, из модула за конверзију добијене сигнале, чиме би се у модул за приказ података јасно приказале информације о мереним величинама у форми која ће бити препозната од стране корисника. Дobar пример свих наведених модула, се може видети у произвољном систему управљања, што је на **слици 2.1** и приказано.



Слика 2.1 Шематски приказ улоге сензора у системима управљања [48]

Постоји велики број карактеристика сензора. Услед огромног броја врсти и намена сензора, физичке карактеристике (температурна отпорност, величина, маса итд.) су разне. Супротно томе, статичке карактеристике сензора се могу сматрати стандардним јер су заједничке за велику већину. Најважније статичке карактеристике су [44-46]:

- Преносне функције (функције зависности између физичке улазне информације („инпута“ – *енг. Input*) и електричне, излазне информације („аутпута“ – *енг. Output*) које се могу калибрисати у зависности од потребе)
- Осетљивост (утицај мале промене улазне величине (или утицајних параметара окружења) на излазне; често изражена као извод трансферне функције;)
- Динамични опсег (*енг. Span or Dynamic Range* - опсег улазног сигнала који може бити трансформисан у излазни сигнал))
- Тачност или мерна несигурност (мери се највећим очекиваним одступањем између реалног и очекиваног сигнала)
- Хистерезис (већина сензора нема исте излазне вредности за исте улазне вредности услед цикличног понављања мерења; распон између максималног доњег и горњег одступања се назива хистерезис)
- Линеарност или нелинеарност (максимална девијација од линеарне трансферне (преносне) функције у оквиру динамичког опсега)
- Шум (код излазног сигнала увек се јавља шум – нежељене флукуације у сигналу)
- Резолуција (минимална флукуација сигнала – колики је минимални прираштај мерене величине који ће изазвати промену на излазу)
- Пропусни опсег (опсег фреквенције)

Класификација сензора

С обзиром на широки спектар употребе сензора, као и различите правце развоја сензорске технике, исти се могу класификовати на велики број начина. Најчешће коришћени начини поделе сензора заснивају се на неком од својстава сензора: врсте излазног сигнала, физичком или хемијском принципу на којим се заснива њихов рад, карактеристикама, типу мерене величине, области (подручју) примене, начину детекције, материјалу израде, габаритима и слично [44].

Према излазном сигналу, они се могу груписати у две основне категорије: аналогни и дигитални. Аналогни најчешће користе напонски или струјни сигнал у одређеном опсегу. Интерфејс дигиталних сензора користи серијску комуникацију за пренос информација до надређеног контролера или процесора [45].

Према извору енергије коју користе, на пасивне и активне. Пасивни сензори узимају енергију (за мерење и транспорт излазног сигнала) са објекта мерења. Активни сензори енергију добијају из спољашњих извора (најчешће електричних). Када се посматрају као осетни елементи и као целине, тј. као комплетни уређаји, могу се класификовати и по типу енергије коју преносе и то на [46]:

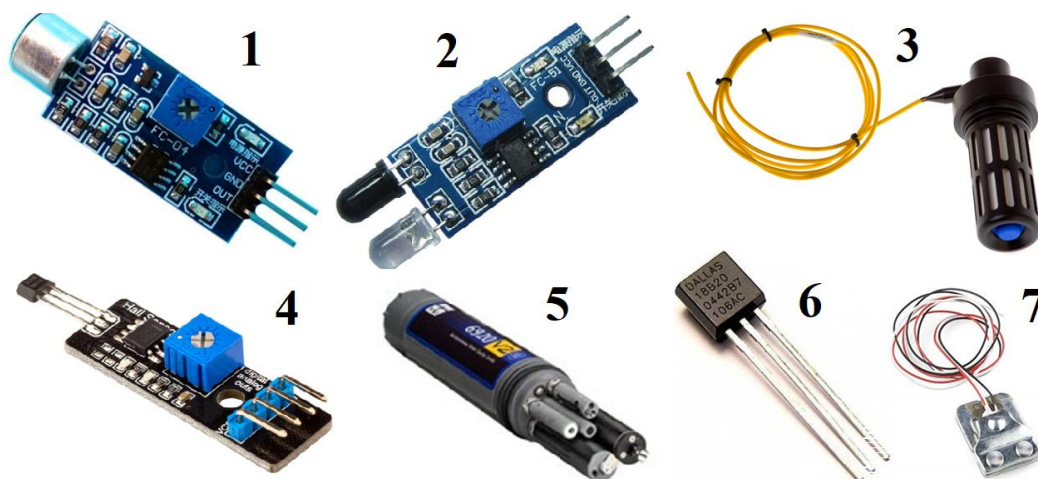
- Топлотни/температурни:
 - Температурни сензори: термометар, термостат, биментални термометар...
 - Топлотни сензори: калориметар, сензор протока...
- Електромагнетни:
 - Сензори електричног отпора: омметар, мултимер...
 - Сензори електричне струје: галванометар, амперметар...
 - Сензори електричног напона: волтметар, електроскоп...
 - Сензори електричне снаге: киловат-сат мерач...
 - Магнетни сензори: магнометар...
- Механички:
 - Сензори притиска: манометар, барометар, барограф...
 - Сензори вискозности и густине флуида: хидрометар, вискозиметар...
 - Сензори влаге: хигростат...
 - Сензори нивоа течности: нивостат...
 - Сензори протока флуида: сензор протока, пресостат, гасни сензор...
- Хемијски:
 - Сензори мириса: калај-оксид гас сензор, QCM сензор...
 - Сензори хемијских елемената: јон-селективне електроде, сензори кисеоника...

- Остали:
 - Сензори зрачења: Гајгеров бројач, бројач искри, досиметар, детектор неутрона...
 - Акустички: микрофон, хидрофон, сеизмометар...
 - Сензори кретања:
 - Сензори покрета: радарски пиштољ, брзинометар, такометар...
 - Сензори оријентације: жироскоп, вештачки хоризонт...
 - Оптички:
 - Светлосни сензори или фотодетектори...
 - Сензори близине...
 - Ласерски скенер...

Према наведеном, рад сваког од осетних елемената, тј. рад сваког од сензора може бити: биолошки, хемијски, електромагнетни, топлотни, температурни, механички, радиоактивни и други - што се исто може посматрати као класификација.

Према доменима примене, исти се могу класификовати: сензори примењени у агрокултури, аутомобилизму, војној индустрији, медицини, бродоградњи, телекомуникацијама, свемирској технологији, производњи играчака, метрологији, и осталима.

На основу мерне величине, класификација сензора се може извршити на следећи начин: електрични сензори (напон, струја, електрично поље, проводљивост), акустични сензори (брзина таласа, спектар), магнетни сензори (магнетно поље), биолошки и хемијски (мерење концентрације биомасе и компонената), оптички (рефлексивност, индекс лома, оптички сензор), температурни (температура, специфична топлота), механички (сила, убрзање, притисак...) [46,47,49]. Примери разних сензора према оваквој класификацији су приказани на **слици 2.2**.



Слика 2.2 Примери изгледа сензора класификовани према мереној величини
1 – акустични [50], 2 – оптички [51], 3 – електрични [52], 4 – магнетни [53],
5 – хемијски [54], 6 – температурни [55], 7 – механички [56]

У оквиру бежичних сензорских мрежа, могуће је применити било који од већ поменутих сензора, све у зависности од намене сензорске мреже. Према [57-59] може се закључити да је намена разноврсна, почевши од војне, медицинске, преко агркултурне па до загађења ваздуха и детекције шумских пожара (детаљније о употреби бежичних сензорских мрежа биће у четвртом поглављу). Због тога не постоји јасно дефинисана класификација сензора за употребу у сензорским мрежама. Додатно, у оквиру једног бежичног сензорског чвора може се користити више сензора. Међутим, према [43,60] могу се издвојити најчешће употребљивани сензори у оквиру индустрије (производње):

- сензори температуре,
- сензори притиска, силе и њима слични,
- сензори протока,
- сензори нивоа,
- ултразвучни (акустични) сензори,
- сензори убрзања (акцелометри).

С обзиром, на све наведено а у складу са обимом овог рада, у наставку неће бити приказани начини функционисања наведених сензора већ ће се рад фокусирати на бежичне мреже као основе функционисања бежичних сензорских мрежа.

3. БЕЖИЧНЕ МРЕЖЕ

Убрзан развој телекомуникационих технологија у последњих двадесетак година узроковао је употребу оптичких система преноса реда Tb/s, преноса података *Etharnet* протоколом брзином и до 100 Gb/s, огромног броја корисника мобилне телефоније и друго. Такође, интернет умрежавање се проширило у област мобилности што је даље направило простор мобилном интернету да по броју корисника престигне фиксни интернет. [61-64].

Поред убрзаног развоја мобилних мрежа, што увођење и стандардизација 5G система потврђује, паралелно се врши убрзани развој осталих типова бежичних мрежа, посебно бежичних рачунарских мрежа које омогућавају брзине преноса веће него у мобилним мрежама. Такође, актуелна је и примена **бежичних сензорских мрежа** и *Intenet of Things* (IoT) концепта умрежавања [61].

Бежичне мреже карактерише нижа цена уградње од фиксних мрежа – у фиксним мрежама је висока цена постављања каблова, цене производње каблова, инсталације, грађевинских радова, немогућности мењања инфраструктуре старих и заштићених објеката и слично [64].

Генерално, комуникације бежичног типа имају врло динамичан развој, што потврђује фреквентно увођење нових комуникационих технологија, стандарда и протокола. Развијен је читав низ телекомуникационих мрежа за различита подручја примене (корисничка подручја) које су са фиксних прешле на бежичне технологије. Подела бежичних технологија а у складу са преласком са фиксних може се извршити на следећи начин:

- бежичне мреже за персонално подручје – **WPAN** (енг. *Wireless Personal Area Networks*),
- бежичне мреже за локално подручје – **WLAN** (енг. *Wireless Local Area Networks*),
- бежичне мреже за градско подручје – **WMAN** (енг. *Wireless Metropolitan Area Networks*),
- бежичне мреже за велика подручја – **WWAN** (енг. *Wireless Wide Area Networks*) и
- широкопојасне сателитске мреже – **BSN** (енг. *Broadband Satellite Network*).

Захтеви за сваку појединачну намену базирају се на параметрима као што су: преносна брзина, неопходна ширина опсега, снага, неопходна растојања, локација корисника, понуђене услуге, власништво над мрежом итд.

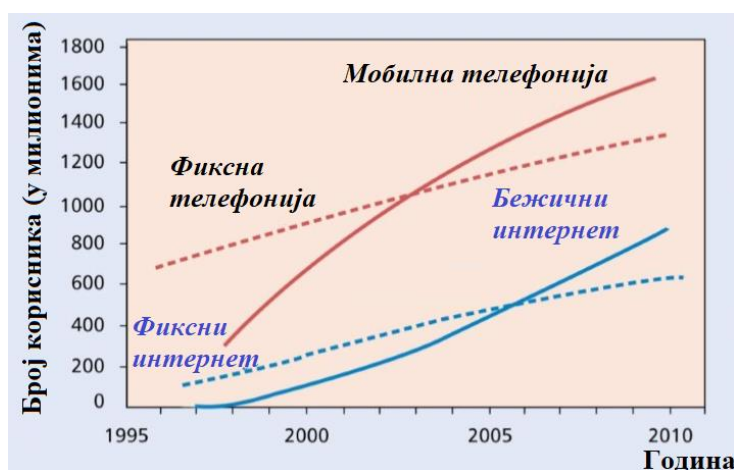
Бежичне приступне мреже широког појаса, корисницима обезбеђују услуге преноса података, говора и слике (енг. *Triple and Quadruple Play Service*). Такође обезбеђују велики капацитет. Оне имају посебно значајну примену у градским високо насељеним срединама где постојећа инфраструктура не задовољава тренутне и нове захтеве корисника. Такође, значајна је примена и у руралним подручјима у којим не постоји жична мрежа, а постоји потреба за брзим одговором на захтеве корисника за широкопојасним приступом [64].

Како би бежичне технологије функционисале неометано у свом фреквентном опсегу, њих је неопходно стандардизовати. Стандардизацијом бежичних технологија бави се више стандардизационих тела попут:

- Институт за електрично и електронско инжењерство – **IEEE** (енг. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*),
- Институт за европске телекомуникационе стандарде – **ETSI** (енг. *European Telecommunications Standardization Institute*),
- Светски форум за истраживање бежичних комуникација – **WWRF** (енг. *Wireless World Research Forum*),
- Пројекат треће генерације партнерства – **3GPP** (*Third-Generation (3G) Partnership Project*),
- Пројекат партнерства за инфраструктуру пете генерације – **5GPPP** (енг. *5G Infrastructure Public Private Partnership*),
- Мобилни мултимедијални приступни комуникациони системи – **MMAC** (енг. *Multimedia Mobile Access Communications Systems*),
- Bluetooth SIG, **Zigbee** алијанса,
- **UMTS** форум,
- **OMA** (енг. *Open Mobile Alliance*) [62,63,65].

Горе наведени интероперабилни стандарди *IEEE* и *ETSI* су основно фокусирани на ширекопојасне пакетски оријентисане мреже. Стандард *3GPP* је усмерен на мобилне и целуларне системе треће генерације.

Према подацима међународне уније за телекомуникације *ITU* (енг. *International Telecommunication Union*) од 2003. године, број корисника мобилне телефоније већи је од корисника фиксне, што такође аналогно важи и код фиксног и бежичног интернета (слика 3.1). Нова генерација бежичних система истовремено укључује услуге преноса мултимедијалног садржаја, говора и разних података у реалном времену. Ове услуге се користе код преноса података великим брзинама за потребе аудио-визуелних комуникација.



Слика 3.1 Тренд раста корисника комуникационих технологија [65]

Све бежичне телекомуникационе мреже могу се поделити у две групе:

- ћелијски (целуларни) и
- нећелијски телекомуникациони системи.

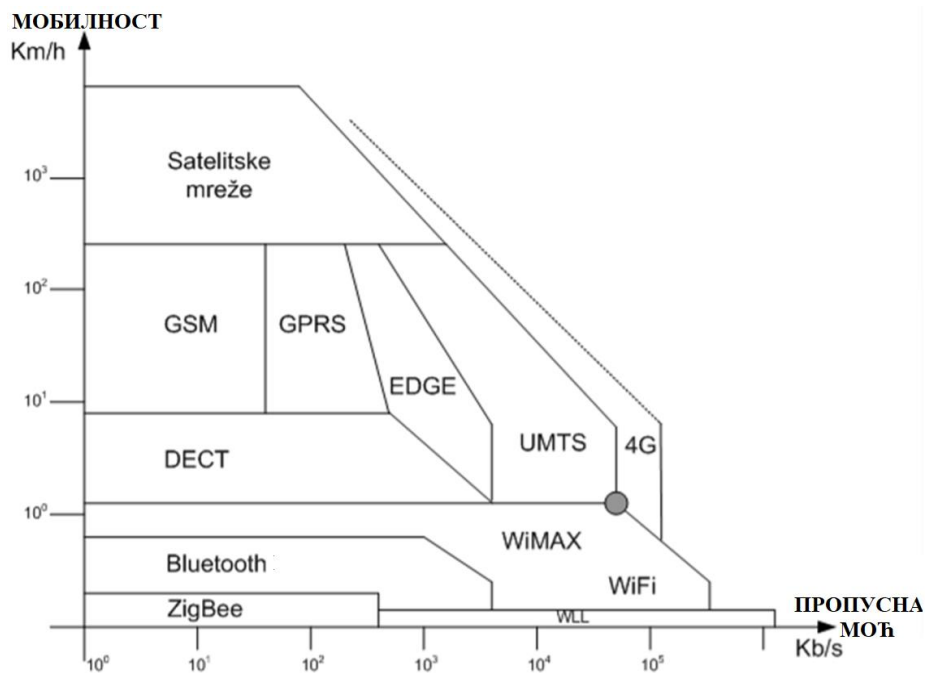
У ћелиском систему као што је **GSM** (енг. *The Global System for Mobile Communications*), мрежа се састоји од ћелија. Корисник (мобилни терминал) се може кретати преко граница ћелије захваљујући преусмеравању везе (енг. *Handover*). Ово подразумева велике инфраструктурне трошкове, веома комплексне протоколе и сигнализацију [62,63].

Код нећелијских мрежа, као што је на пример **WLAN**, није неопходно имати инфраструктуру када се користе **ад-хок** радни режим (енг. *Ad-hoc* – односи се на тип мреже који чине индивидуални уређаји који комуницирају између себе директно, чиме заобилазе централизовану приступну тачку). На тај начин, комплетан систем се може сматрати покретним.

Тренутно, не постоји ни једна технологија која задовољава потребе свих корисника, везане за покривеност, брзину, квалитет услуга и безбедност. У **табели 3.1** су приказане основе карактеристике актуелних бежичних мрежа, где ће о **WPAN** и **WLAN** групама бити више речи у наставку рада. Такође, на **слици 3.2** је дат дијаграм (покривеност/брзина) са комерцијалним називима мрежа, који поменуте карактеристике илуструје.

Табела 3.1 Основне карактеристике актуелних бежичних мрежа [62]

Мрежа	Стандард	Брзина	Фреквентни опсег	Покривеност
WPAN	IEEE 802.15.1	1 Mb/s	2,4 GHz	100 m
	IEEE 802.15.3a	200 Mb/s	3,1-10,6 GHz	10 m
	IEEE 802.15.4	250 kb/s	2,4 GHz	30 m
WLAN	IEEE 802.11a	54 Mb/s	5 GHz	300 m
	IEEE 802.11b	11 Mb/s	2,4 GHz	
	IEEE 802.11g	54 Mb/s	2,4 GHz	
	HIPERLAN 2	54 Mb/s	5 GHz	
WMAN	IEEE 802.16	134 Mb/s	10-66 GHz	30 km
	IEEE 802.16a	70 Mb/s	2-11 GHz	
WWAN	GSM	9,6/57,6 kb/s	900/1800/1900 MHz	35 km
	GPRS	115 kb/s		
	EDGE	384 kb/s		
	UMTS/WCDMA	2 Mb/s	1900-2025 MHz	20 km
BSN	BGAN	492 kb/s	1,5-1,6 GHz	globalna



Слика 3.2 Однос пропусне моћи и мобилности за различите бежичне мреже [63]

Код примене бежичних сензорских мрежа у оквиру производње, највише се употребљавају персоналне бежичне мреже (*WPAN*) и бежичне мреже за локално подручје (*WLAN*). Због тога, у даљем наставку овог поглавља, биће приказно више детаља везано за њих.

3.1 ПЕРСОНАЛНЕ БЕЖИЧНЕ МРЕЖЕ

WPAN технологија користи бежичне линкове кратког домета, па има ограничено подручје покривености сигналом, али и широку примену у повезивању података између *PDA* (енг. *Personal Digital Assistant*) уређаја, телефона, рачунара и пратећих периферних уређаја [65,66].

Један од првих стандарда који је коришћен за креирање *WPAN* мрежа је *IrDA* (енг. *Infrared Data Association*) стандард за пренос података помоћу инфрацрвене светлости на кратким растојањима. При поређењу са радио системима, предности овог система су у томе што нема интерференције са другим уређајима, већа безбедност итд. Недостаци су потребна оптичка видљивост између два примопредајника и пренос података малим брзинама. Из *WPAN* групе, најчешће коришћен стандард је *IEEE 802.15.1*, под широко познатим комерцијалним именом - **Bluetooth** [66,67,68].

Уређаји који функционишу на бази истоименог стандарда су примопредајници који имају врло малу снагу (не већу од 100 mW). Они функционишу у *ISM* (енг. *Industrial, Scientific and Medical*) опсегу фреквенције. Захваљујући природи радио-таласа и *FHSS* (енг. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) техници преноса, уређаји не морају бити у линији оптичке видљивости како би се остварила комуникација. *Bluetooth* остварује довољно велику брзину преноса у реалном времену за пренос говора и података [68].

Bluetooth уређаји, имају примену у многим савременим телекомуникационим системима, омогућавајући корисницима да на једноставан начин размјењују информације. То је првенствено због велике флексибилности, ниске цене и малих димензија. [67].

Један од новијих стандарда из WPAN групе је **ZigBee** (IEEE 802.15.4). Он у исто време представља нов концепт **LR** (енг. *Low Rate*) персоналних бежичних мрежа, који омогућава јефтино, једноставно и ефикасније повезивање разних уређаја у бежичне сензорске мреже **WSN** (енг. *Wireless Sensor Network*) које функционишу у *ISM* опсегу (915 MHz у САД, 868 MHz у Европи и 2,4 GHz у свету). Предности су му хардверска и софтверска једноставност уређаја и мала потрошња. Ова мрежа има малу брзину преноса информација што задовољава само наменске апликације, као на пример у оквиру „интелегентних“ станова, канцеларија, инфраструктуре, итд.

У Нокији је развијена једна нова WPAN технологија, која је позната под називом **WiBree**. Она је дизајнирана као допуна осталим бежичним технологијама мањег домета те самим тим истим не представља конкуренцију. На пример, при узпотреби *Bluetooth* стандарда, позната истоимена **WiBree** позната је као **Bluetooth Low Energy (BLE)**.

Функционише у *ISM* опсегу од 2,4GHz са радијусом покривања од 10m до 100m, врло мале потрошње и преносом података брзином до 1Mb/s, а може се имплементирати у виду посебног чипа у виду „*dual-mod*“-а *Bluetooth – BLE* чипа.

Развој нових WPAN комуникационих корисничких уређаја који подржавају мултимедијалне апликације усмерен је ка:

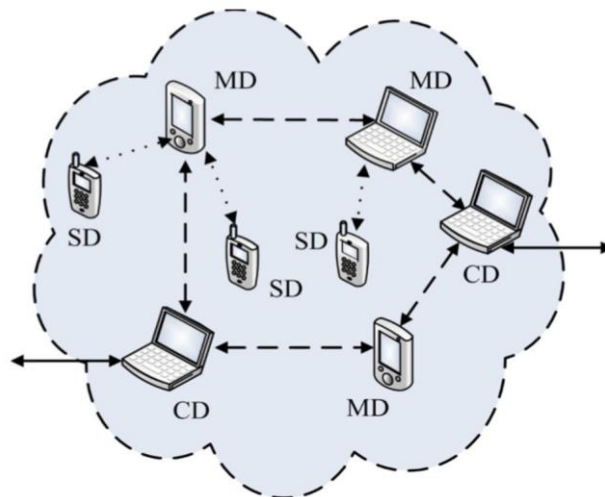
- повећању брзине преноса,
- смањењу цене и
- смањењу потрошње енергије.

UWB (енг. *Ultra Wide Band*) је пример нове технологије која покрива широки спектар сигнала. Под њега спадају сви сигнали који заузимају минимум 500 MHz опсега у оквиру ширине 7,5 GHz (3,1 -10,6 GHz), а истовремено чија емитована снага сигнала се налази испод 3mW. Она подразумева пренос поворки кратких импулса, уз коришћење мале излазне снаге. Тиме се остварују веће брзине емитовања података, али само на мањим дистанцама. Она такође има значајну улогу у хетерогеним мрежама и очекује се да ће имати примену у:

- мултимедијалним WPAN мрежама, као основни бежични интерфејс,
- **IWAN** мрежама (енг. *Intelegent Wireless Area Network*) и
- **OPPN** мрежама (енг. *Open Point-to-Point Network*).

Повезивањем WPAN уређаја (уређаји који подржавају одређени WPAN стандард) у ад-хок мрежу формира се бежична персонална мрежа према **слици 3.3**, коју чине:

- Комуникациони уређаји **CD** (енг. *Communication Device*),
- Мастер уређаји **MD** (енг. *Master Device*) и
- Подређени уређаји **SD** (енг. *Slave Device*) [68].



Слика 3.3 Пример WPAN мреже [65].

Комуникациони уређаји се понашају као гејтвеј (енг. *Gateway*) уређаји између WPAN и других жичаних или бежичних мрежа. Пиконет (енг. *Piconet*) мрежу чине од два до осам уређаја, који су повезани топологијом „тачка-тачка“ или „тачка - више тачака“. Више пиконет мрежа формира тзв. Скатернет (енг. *Scatternet*).

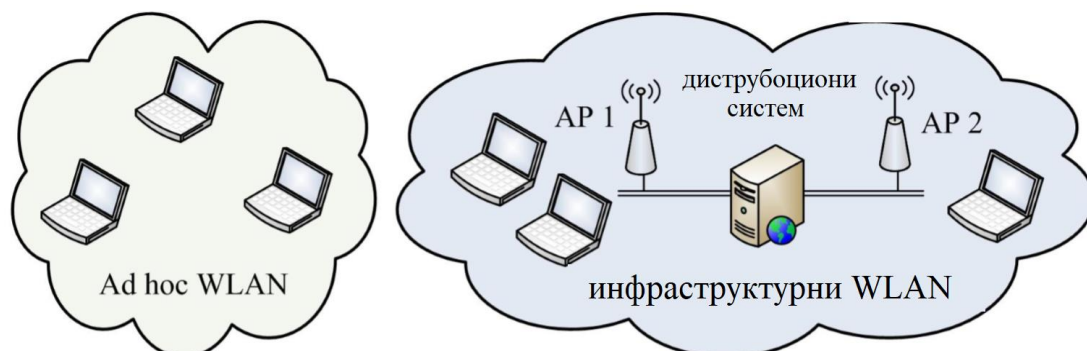
Тренутно, у складу са захтевима већине апликација бежичних сензорских мрежа (о којима ће бити у даљем току рада више речи), од персоналних бежичних мрежа, најупотребљивије су *ZigBee* и *Bluetooth* бежичне мреже.

3.2 БЕЖИЧНЕ МРЕЖЕ ЗА ЛОКАЛНО ПОДРУЧЈЕ

WLAN – бежична мрежа за локално подручје је најучесталија технологија у области бежичних рачунарских мрежа. Бежичне локалне мреже функционишу као проширење или као алтернатива класичним *Ethernet* мрежама.

WLAN мреже могу бити конфигуриране као:

- Ад-хок, или
- Инфраструктурне мреже (видети слику 3.4).



Слика 3.4 WLAN мрежа и њена топологија [65]

У инфраструктурном режиму међусобно повезивање раних станица и повезивање на дистрибуциони систем остварује се преко приступних тачака **AP** (енг. **Access Point**). Подручје које покрива сигнал само једне приступне тачке назива се основно сервисирано подручје **BSS** (енг. **Basic Service Set**), док комплетна ћелијска структура представља проширено сервисно подручје **ESS** (енг. **Extended Service Set**) [69].

Са својим карактеристикама (врло мале цене, адекватан фреквентни опсег, задовољавајуће брзине преноса) ове технологије су изузетно популарне онда када је примена истих прешла са пословне и кућне примене на јавне, такозване *Hotspot* примене.

Тиме су мултимедијалне апликације постале доступне широком кругу корисника, што је узроковало револуцију у свету бежичних комуникација. Захваљујући новим стандардима и техникама преноса, овај тренд се наставља и у следећим етапама развоја бежичних мрежа.

Почетне етапе развоја бежичног стандарда *IEEE 802.11* (WLAN) су формиране 1997. године, тиме што су дефинисане фреквенције рада од 2,4 GHz, као и брзине преноса података од 1 и 2 Mb/s за *Ethernet* системе. Након дефинисања основних слојева (физичког и *MAC*), овог стандарда оформљене су разне подгрупе, међу којима са најзначајније следеће:

- *TG 802.11a*, подгрупа која има за циљ унапређење првенственог стандарда *IEEE 802.11*. Такође, одређује функционисање у нелиценцираном опсегу (5GHz) за САД (не за велику већину осталих земаља),
- *TG 802.11b*, подгрупа која одређује брз пренос информација (мањи од 11 Mb/s) у опсегу *ISM-a* (2,4 GHz),
- *TG 802.11d*, подгрупа која ради на усклађивању међународних правилника о слободним радио-фреквенцијама,
- *TG 802.11e*, подгрупа одређена за развој и унапређивање QoS-а у оквиру технологије бежичних мрежа за лаколно подручје,
- *TG 802.11g* и *TG 802.11n*, подгрупе које су одређене за развој и унапређење брзине преноса.

Технике мултиплексирања дефинисане постојећим стандардима су:

- **DSSS** (енг. **Direct Sequence Spread Spectrum**) – пренос у проширеном спектру методом директне секвенце за *IEEE 802.11*,
- **CCK** (енг. **Complementary Code Keying**) – тастовање комплементарних кодова за *IEEE.802.11b* и
- **OFDM** (енг. **Orthogonal Frequency Division Multiplexing**) – за *IEEE.802.11a* и *IEEE.802.11g* мултиплексирање расподелом ортогоналних фреквенција.

Wi-Fi (енг. **Wireless-Fidelity**) корпорација је развила истоимени бренд, који даје сертификате за бежичне локалне мреже, тј. уређаје подржане стандардима *IEEE 802.11*.

HIPERLAN (енг. **High Performance Radio LAN**) је мање познат али јако добар стандард за WLAN мреже. ETSI је осмислио поменути стандард у оквиру **BRAN** (енг. **Broadband Radio Access Networks**) пројекта као европска алтернатива *IEEE 802.11* стандарду. Карактеристике постојећих BRAN стандарда приказане су у **табели 3.2** [70].

Табела 3.2 Карактеристике BRAN стандарда [65]

HIPERLAN/1 WLAN	HIPERLAN/2 Бежични IP, ATM и UMTS	HIPERACCESS Бежични IP и ATM даљински приступ	HIPERLINK Бежична широкопојасна интерконекција
MAC	DLC	DLC	DLC
PHY (5GHz) 25 Mb/s	PHY (5GHz) 54 Mb/s	PHY (разни опсези) 25 Mb/s	PHY (17 GHz) 155 Mb/s

Како би се направила подршка асинхроног трансмитовања података већим брзинама у окружењима бежичних локалних мрежа, 1996. године осмишљен је *HIPERLAN/1*. Следећа верзија, из 2000. године (*HIPERLAN/2*), подржава асинхроно трансмитовање података и у оквиру мултимедијалних услуга осетљивих на кашњење. Дobar пример таквих услуга су пакетизовани видео и говор, који сами по себи садрже специфичне QoS захтеве. Овај стандард има врло сличне протоколе у оквиру физичког слоја као IEEE 802.11a (у опсегу од 5GHz).

Међутим, *HIPERLAN/2* је бољи при односу синхронизованих података, јер има бољу подршку за QoS и безбедност, а због фиксне дужине протоколске јединице података **PDU** (енг. *Protocol Data Unit*), трансмитовање података није директно зависно од величине истих. *HIPERLAN/2* стандардом дефинисани су физички, DLC (енг. *Data Link Control*) и слој конвергенције [65,71].

4. БЕЖИЧНЕ СЕНЗОРСКЕ МРЕЖЕ

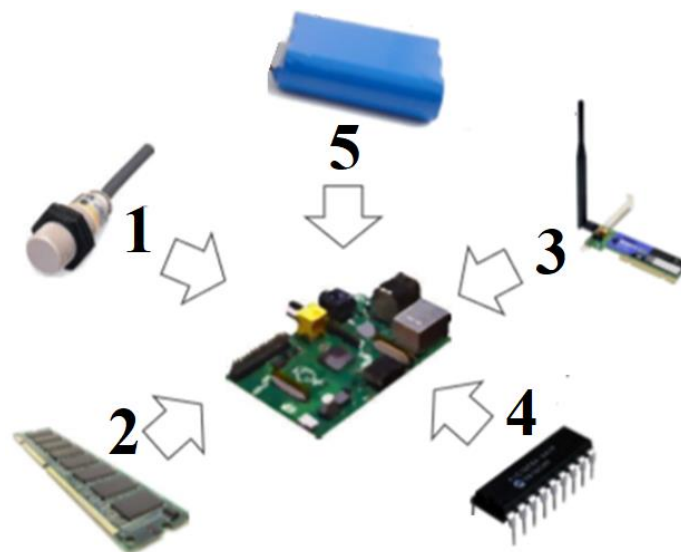
Дистрибутиван систем сачињен од сензорских поља, тј. различитог типа сензорских чворова (о којима ће у даљем тексту бити речи) међусобно повезаних одговарајућом мрежом чини сензорску мрежу (енг. *Sensor Network*). Генерални случај је да су сви подаци које сензори сакупе у оквиру система дељиви. Они се скупљају на улазу дистрибутивног система како би се извршила њихова естимација. Основни задатак на улазу овог система је издвајање најквалитетније (најпоузданије, најпотпуније) информације из сензора о одговарајућем надгледаном систему [72].

Бежична технологија је ушла у свакодневни живот и нашла је примену на пољу информационих технологија. Њиховим развојем, и упоредним развојем сензора, развиле су бежичне сензорске мреже (БСМ), тј. сензорске мреже које су међусобно повезане бежичном мрежом.

Дефиниција истих би могла бити: БСМ су скуп сензорских чворова (претежно сензора врло малих габарита који су напајани батеријом) са могућношћу интеграције у великом броју средина у оквиру разних услова, који независно формирају бежичну структуру, у којој сакупљају, обрађују и међусобно деле податке како би исте проследили надређеним рачунарима [73,74,75].

У зависности од области примене, сензорски чворови могу бити разни, тј. могу бити сачињени од разних компонената. Углавном их чине следеће компоненте (сл. 4.1):

1. сензорска јединица - генератор података (за прикупљање података из околине),
2. процесорском јединицом (један или више процесора који врше контролу функционисања сензора заједно са примо-предајницима, процесирају податке и имплементирају мрежне и протоколе за рутирање),
3. јединицом за комуникацију (најчешће, бежични/радио примо-предајник),
4. урађеном меморијом (јединица за смештање података) и
5. аутномним извором напајања (енергије) [76].



Слика 4.1 Компоненте сензорског чвора [76]

У највећем броју случајева сензорски чворови функционишу попут „*data-centric*“ система а не попут „*addresscentric*“ система. Другим речима, сви упити (енг. *queries*) се шаљу одређеној регији коју чине разни сензори спојени у кластер групу а не одређеној адреси сензора. Унутар једне групе, тј. једног кластера постоји један агрегатор (чвор), који сакупља податке од осталих сензорских чворова придружених том кластеру, врши њихову анализу и агрегацију, након које шаље, тј. предаје даље. Тај чвор се још и назива: главни сензорски чвор (енг. *Sink*).

Генерално, укупну анализу података на локалном нивоу, врши агрегатор који се налази унутар кластер групе. На тај начин, врши се редукција разних захтева у смислу комуникационе пропусности. Такође, тачност се унапређује заједно са инкопорирањем редундантности података што даље компезује разне врсте кварова које могу настати у чворовима.

Ако се узме у обзир да се чворови углавном напајају уз помоћ батерије, те је самим тим количина енергије ограничена, ефикасност у енергетском смислу директно утиче на животни век сензора. Чим исти остане без електричне енергије, сензорска мрежа не може рачунати на податке емитоване из њега. То даље утиче на успех и квалитет рада целокупне мреже. Зато, врло велику важност има енергентска ефикасност при самом пројектовању сензора (модула) односно читаве БСМ [77-81].

Процесу коришћења сензорских мрежа претходи неколико фаза:

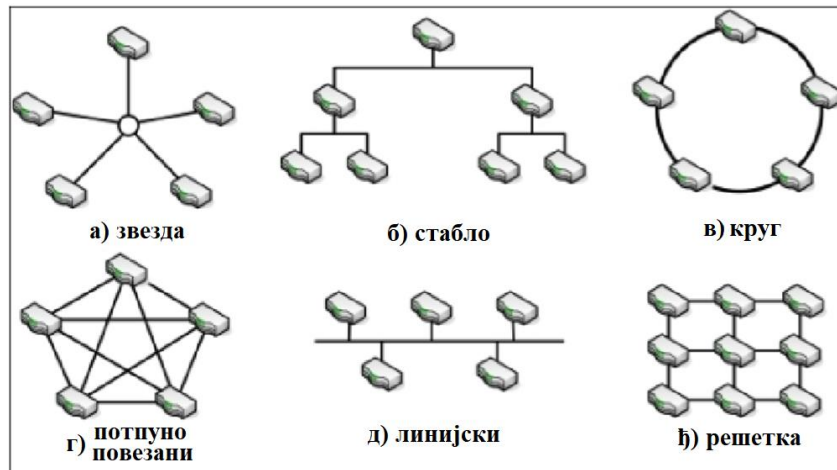
- дефинисање и испуњавање захтева пројектовања БСМ,
- постављање сензорске мреже,
- покретање система,
- само-организација,
- дисеминација и адаптација.

Захтеви који требају бити испуњени за реализацију једне бежичне сензорске мреже могу бити разни. Они зависе од врсте бежичне мреже која се користи. Најћешћи захтеви су:

- доступност путем интрнета,
- да буде хијерархиски организована у циљу повезивања различитих области истраживања,
- животни век сензорске мреже одређен је параметрима који се надгледају, омогућено управљање на даљину,
- рад инфраструктуре не сме бити ометан или прекидан од стране природних процеса али и људске активности,
- БСМ би требало бити стабилне и предвидљиве. Такође требају бити способне да понављају своје понашање када год је могуће,
- складиштење резултата мерења и анализа и благовремено слање података су од велике важности [82,83].

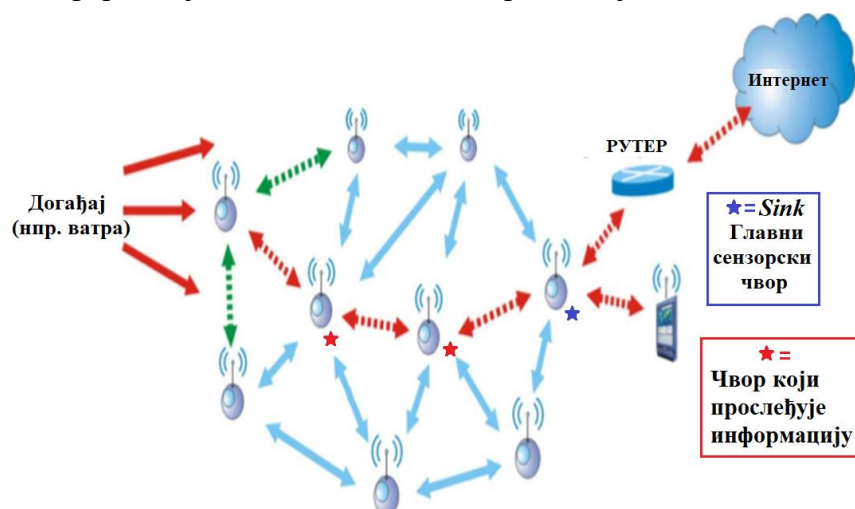
Принципи постављања бежичних сензорских мрежа може бити случајно или планско. Случајно постављање може бити најчешће униформно. Планско распоређивање најчешће се врши при праћењу саобраћаја у градовима, при индустријским применама, за праћење шумских пожара, надгледање процеса и томе слично. Примери планског постављања могу бити као на **слици 4.2** (где је један од чворова „централни“). Њихова инфраструктурна топологија подразумева следеће:

- постојање главног „централног чвора“ (сви чворови у мрежи су повезани са њим),
- тај чвор може представљати спрегу између бежичне и жичане мреже. Такође спроводи комуникацију чворова у оквиру мреже [82,83].



Слика 4.2 Примери планског постављања сензорских чворова [84]

Након покретања система следи организација рада бежичне мреже, тј. само-организација. Типично за *ad-hoc* бежичне мреже, између чворова се успостављају везе, за потребе рутирања се организује топологија, успостављају разни механизми који служе да контролишу и додељују приступ мрежи коришћењем протокола и то искључујући употребу базних станица и њима сличних. Пример успостављања међусобних веза и прослеђивања информација без базних станица приказан је на **слици 4.3**.



Слика 4.3 Регистровање и прослеђивање информација [84]

Дакле, централни (главни) чвор не постоји код ад-хок мрежа. Код њих сваки чвор комуницира са осталима (директно, када су у одређеном домету) без неопходности за додатном инфраструктуром. Дисеминација и адаптација се могу сматрати као завршна фаза само-организације [85,86].

У зависности од интеракције између извора и одредишта, као и природне догађаја који се посматра разликују се неколико стандардних начина прикупљања података:

1. Детекција догађаја – сензорски чворови шаљу податке надређеном чвору (*sink* чвору) само онда када се деси промена у посматраном региону.

2. Периодично јављање – сензорски чворови шаљу податке о нагледаној појави у тачно одређеним временским периодима претходно дефинисаних на основу карактеристика надгледане појаве.

3. Константно надгледање – континуално праћење неког објекта, човека или животиње у одређеном посматраном простору.

Предвиђање догађаја – сви подаци које сензорски чворови прикупљају са различитих места могу се посматрати као одређена функција тог места. Постоје могућност за апроксимирање функција (временских, просторних итд.) а на основу тих постављених функција могуће је предвидети неке будуће догађаје (локације, путање, особине надгледаног објекта, израда температурне мапе итд у простору који се посматра.

Бежичне сензорске мреже, у зависности од примене могу имати разне карактеристике. Најчешће карактеристике истих могу бити:

- велики број чворова (сензора),
- комуникације изазване питањима или догађајима,
- СЧ се напајају уз помоћ батерије,
- Мали трошкови одржавања, готово статичка топологија
- Мала тежина СЧ,
- дифузијске комуникације уместо тачка – тачка линија,
- чворови немају глобални **ID** (енг. *Identification number*) као ни **IP** број (енг. *Internet Protocol*),
- несиметрични ток информација и ограничена сигурност.

Проблеми код примене бежичних сензорских мрежа могу бити разни. На пример, још није решен процес стандардизовања хардверских и софтверских компоненти. При константном раду сензорских чворова геерише се велика количина података чиме се повећава могућност преоптерећења комуникационог канала. Ти генерисани подаци, у великом већини су сувишни јер обезбеђују само ограничене вредности надгледане појаве. Такође, слаба робусност сензорских чворова и велики проценат лоше примљених пакета (велики број ретрансмисија). Постојећи комуникациони протоколи нису применљиви у бежичним сензорским мрежама (БСМ) и захтевају промене што отежава повезивање ових мрежа са постојећом ИТ структуром. БСМ су познате као мреже са у којима имамо изражену латенцију тј. кашњење при пријему информације те због тога нису одговарајуће решење за неке реал-тима апликације. Поред тога, ограничен капацитет електричне енергије којим располаже сензорски чвор је увек велики проблем код бежичних система [80,82].

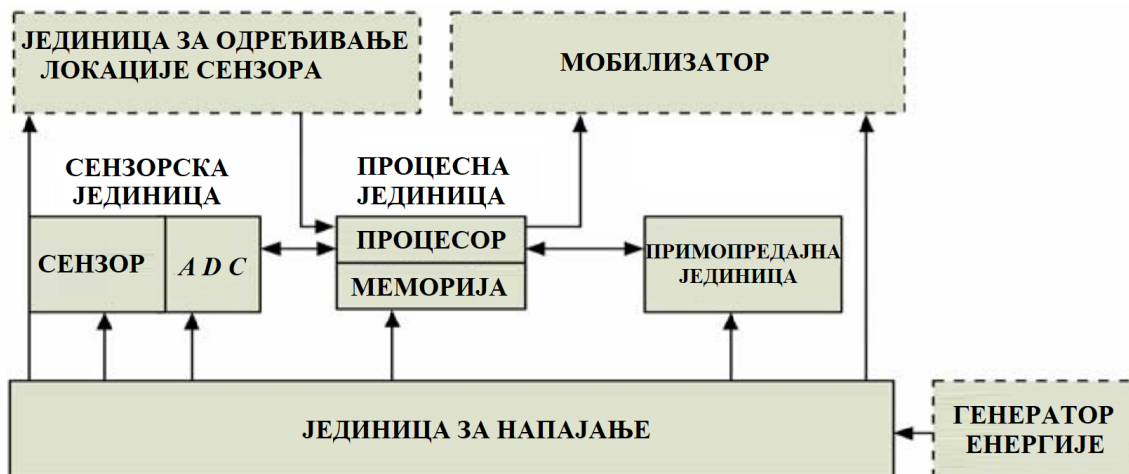
4.1 СЕНЗОРСКИ ЧВОР

Према мрежама у које се уграђују, постоје два типа сензорских чворова:

- Сензорски чворови који су део проактивне мреже. За овакав вид СЧ је карактеристично да се чворови повремено укључују, изврше мерење пошаљу податке и искључе се, тј. оду у фазу спавања.
- Сензорски чворови који су део реактивне мреже. За овакав вид СЧ карактеристично је да су исти константно „будни“, и да у сваком тренутку реагују на промене у оквиру мреже. Овакви СЧ су одлични за апликације бежичних сензорских мрежа који морају имати константни надзор, тј. функционишу у у реалном времену [87,88].

Као што је већ поменуто и приказано (слика 4.1), сензорски чвор чине: сензорска јединица (енг. *Sensing unit*), јединица за напајање (енг. *Power unit*), процесна јединица (енг. *Processing unit*) и примпоредна јединица (енг. *Transceiver unit*) у навећем броју случајева. То су заправо четири основна градивна блока, тј. модула. Међутим, неретко се користе и остале „опционе“ компоненте попут:

- јединице за одређивање локације сензора – какав је рецимо *GPS* пријемник,
- мобилизатор – блок за покретање сензорских чворова (користи се када СЧ треба постати мобилан),
- генератор енергије – блок који врши конверзију енергије (на пример соларна батерија), чији је блок дијаграм у склопу сензорског чвора приказан на слици 4.4.



Слика 4.4 Компоненте сензорског чвора [89]

Сензорски чвор функционише тако што првенствено осетни елемент врши мерење тако што одређену физичку величину трансформише у ел. сигнал. После кодирања, сигнал се доводи на улаз у аналогно дигитални конвертер (енг. *ADC - Analog Digital Converter*) па се по обављеној конверзији шаље у процесор. У процесору се даље трансформише према, унапред дефинисаном програму, и добијена информација се шаље даље у мрежу посредством примопредајне јединице [90].

Код сензорских чворова најпајаних батеријом, енергетска ефикасност сензорског чвора има директни утицај на време живот сензора. Када сензорски чвор престане са радом, не престаје само његово прикупљање података него мрежа губи расположивост сензорског чвора за даље прослеђивање (рутирање) података. На основу тога, може се доћи до закључка да енергетска ефикасност сензорског чвора има директни утицај на то колико дуго ће бежична сензорска мрежа успешно функционисати. Врло је битно посматрати проблем енергетске ефикасности са аспекта свих детаља који су везани за пројектовање модула (сензорског чвора) тако и рада целе мреже [91].

Правила којима су дефинисани синтакса, семантика и синхронизација комуникације (у оквирима стручне терминологије) се називају протоколи. Они могу бити мрежни и интернетни. Постоје различити мрежни протоколи, при чему код сензорских чворова, на више различитих нивоа сваки има своју улогу и посебно место.

4.1.1 НИВОИ ПРОТОКОЛА КОД СЕНЗОРСКИХ ЧВОРОВА

Протоколи које користе сензорски чворови комбинују приступ дизајну са аспекта потрошње и са аспекта рутирања (енг. *Power and routing awareness*). Они делују на више нивоа у различитим равнима управљања (слика 4.5). Ове равни су карактеристичне са аспекта задатка, потрошње (енергије) и мобилности. Уз помоћ њих се лакше управља сензорским чворовом, тј. лакше се координира задатком а истовремено се прати енергетска потрошња [86,90].



Слика 4.5 Нивои протокола [86]

Задужења **физичког нивоа** су: избор фреквенције (енг. *Frequency selection*), детекцију сигнала (енг. *Signal detection*), заштиту података (енг. *Data protection*), пропагационе ефекте (енг. *Propagation effects*), модулациону шему (енг. *Modulation scheme*) и енергетску ефикасност (енг. *Power efficiency*) [86,90,91].

Фреквентни опсег RF 915 MHz ISM-ов је најчешће коришћен за пренос сигнала код сензорских чворова. Сигнал се детектује на основу следећег принципа: из мноштва информација и вредности које се надгледају, одређује се која је хипотеза истинита. На основу изабраних коефицијената за Фуријеову трансформацију заснива се процена параметара, тј. истинитости хипотезе. Како би се избегли разни ефекти пропагације сигнала, распоред чворова унутар одређеног простора (који у неким случајевима може бити јако нераван попут котлина, брда итд.) треба бити густ (чворови требају бити што ближи један другом). Тиме се повећава вероватноћа постизања квалитетне везе, као и отклањање разних негативних ефеката везаних за сигналну пропагацију.

Одговорност **нивоа везе** је следећа: формирање оквира (енг. *framing*), мултиплексирање низова података (енг. *Multiplexing data streams*), физичко адресирање (енг. *Physical addressing*), управљање протоком (енг. *Flow control*), контролу грешака у преносу (енг. *Error control*) и метод приступа (енг. *Access control*).

Под нивоом везе, спада и **ниво контроле медијума** за приступ **MAC** (енг. *Medium Access Control Layer*). Пошто се пренос радио сигнала за велики број предајника остварује на сличној фреквенцији, често може доћи до њихове интерференције. Због тога, као финални случај настаје коализија. Сврха MAC-а лежи у идентификацији начина на који чворови предају информације у оквиру бежичног комуникационог канала. Основни MAC атрибути које треба идентификовати су [92,93]:

- избегавање колизије (енг. *collision avoidance*),
- енергетска ефикасност (енг. *energy efficiency*),
- скалабилност и адаптивност (енг. *scalability & adaptivity*),
- ефикасно коришћење пропусног опсега (енг. *efficient bandwidth utilization*),
- латенција (енг. *latency*),
- пропусност (енг. *throughput*).

Главни атрибути **мрежног нивоа** су: агрегација података, ефикасно рутирање и потрошња. Информација унутар сензорске мреже треба задовољити већи број атрибута, а истовремено да се не захтева размена информација међу чворовима. Додатно, када се узме у обзир да чворови у окружењу имају сличне податке и исте атрибуте, њихово слање ка главном чвору се не врши директно, већ се врши агрегација података уз помоћ неког од великог броја протокола који сакупљају исте уз помоћ упита постављених од корисника. Ти централни чворови (*Sink* - главни чворови) шаљу упитите одређеним чворовима у циљаним подручјима и врше сакупљање података.

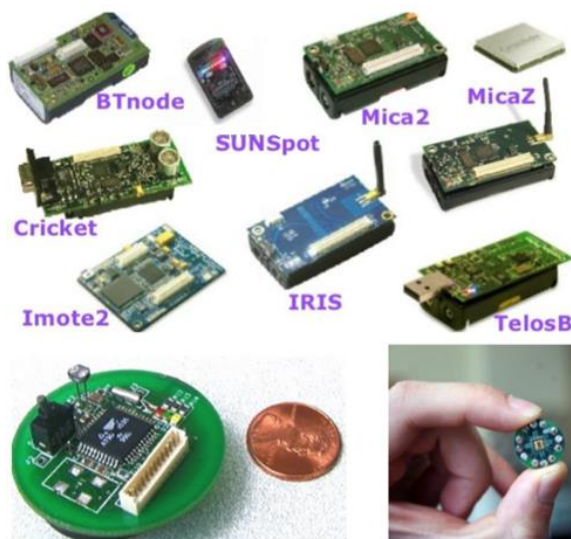
Транспортни ниво, TCP (енг. *Transmission Control Protocol*) чине протоколи који су специјално намењени за БСМ. Они су дефинисани тако да буду енергетски ефикасни а истовремено довољно једноставни за имплементацију у софтвер и хардвер што различитијих апликација БСМ [86,88-93].

На **апликационом нивоу** позната су три протокола:

1. Протокол менаџмента сензора **SMP** (енг. *Sensor Management Protocol*) - омогућују транспарентност софтвера и хардвера за разне апликације уз помоћ којих сенторска мрежа функционише. Администратори система комуницирају са сензорским чворовима употребом SMP-а.
2. Протокол за доделу задатака и расејавање података **TADAP** (енг. *Task Assignment and Data Advertisement Protocol*) – осигурава корисницима одговарајући интерфејс везан за расејавање података у оквиру њиховог софтвера.
3. Протокол за ширење података и упит сензора **SQDDP** (енг. *Sensor Query and Data Dissemination Protocol*) – осигурава упуте апликацијама коришћених од стране корисника, врши одазиве на исте и њихово прикупљање.

4.1.2 ПРАВАЦ РАЗВОЈА И ПРИМЕРИ СЕНЗОРСКИХ ЧВОРОВА

Развој бежичних сензорских чворова (примери изгледа истих су приказани на **слици 4.6**) се одвија у два правца. Први правац развоја је ка интеграцији процесорске јединице и примопредајне јединице у један склоп. Сензори као посебни модули за проширење, повезују се на базну плочицу преко специфичних прикључака. У том правцу су ишли инжењери фирме *Crossbow* [94] (касније *Memsic* [95]) при развоју својих сензорских чворова. Промена начина имплементације чвора представља знатну предност јер се сензори могу лако мењати, док базна плочица остаје иста [87].



Слика 4.6 Примери сензорских чворова разних произвођача [76]

Решење фирме *Crossbow* је типично решење за модуларну реализацију сензорског чвора. Посебно постоји процесорска јединица са примопредајником, а посебно се проширује сензорским модулима. *Crossbow* базна плочица подржава модуле који поседују сензор осветљености, сензор температуре, сензор убрзања (2-осни), магнетни сензор, сензор звука (микрофон), мали пиезо звучник и GPS пријемник. Постоји и модул за сопствени развој сензора (*developer board*), на којем су изведени прикључци микропроцесора.

Други правац развоја је развој компактних бежичних сензора, при чему се процесорска јединица интегрише са сензорима у оквиру исте штампане плочице. И овде постоји могућност проширивања, али не у том обиму као код горе поменутих сензорских чворова. Такве сензоре развијају истраживачи фирме *Moteiv* [96]. Велика предност ових сензора је веома ниска цена производње и велика робусност.

Осим ових праваца развоја, развоја компактних сензора и модуларних сензора, истраживачи су развили *Sun SPOT* уређаје (*Sun* - лабораторија из компаније *Oracle*; ***SPOT*** - ***Small Programmable Object Technology***), веома популарну и погодну серију бежичних сензора [96]. *Sun SPOT* подржава сензор осветљености, температурни сензор и 3-осни сензор убрзања. У овом случају се процесорска јединица и примопредајна јединица налазе на истој плочици са поменутим сензорима. Поред сензора, имплементирани су микро прекидачи, *LED*-ови и прикључци за улазе/излазе. Са таквом структуром, добијен је поуздан и квалитетан бежични сензорски чвор, који се лако програмира у *JAVA* програмском језику.

Велика већина постојећих бежичних сензорских чворови су базирани на радио комуникацији по стандарду *IEEE 802.15.4*. Брзина преноса може бити и до 250 kbps, а домет може бити и до 100 m у зависности од средине. Комуникација се остварује на фреквенцији од 2.4 GHz. У трећем поглављу (табела 3.1) дате су основне карактеристике поменутих бежичних мрежа.

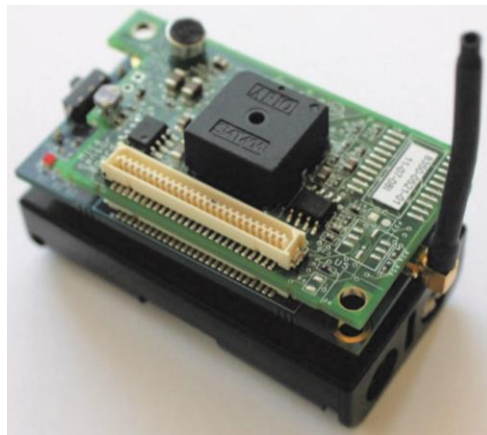
Сензорски чворови углавном користе батерије типа AA, AAA или акумулатор за напајање. У већем броју случајева, габарите чвора на првом месту ограничава батерија, а сама електроника може бити занемарљивих димензија. Код неких апликација преферирају се алтернативни извори енергије, као што су на пример соларне ћелије.

Када је реч о оперативном систему бежичних чворова, код БСМ је веома битна брзина реаговања на догађаје. У складу са овим захтевом развијен је *TinyOS* оперативни систем [98,99], који је базиран на догађајима (енг. *event-based*). *TinyOS* се користи код сензорских чворова произвођача *Crossbow* и *Moteiv*. Оператив и систем као и програми који се извршавају на њему писани су у програмском језику *NesC*. Овај програмски језик је базиран на задацима (енг. *task based*) и прекидима (енг. *interrupt*). У програму се извршавају задаци, све док не дође до прекида који се генеришу догађајима из спољашње средине. Прекиди су вишег приоритета, и извршавају се независно од задатака. Веома важна карактеристика *NesC* језика је да се читање са сензора или радио комуникација извршава у раздвојеној фази (енг. *split-phase*).

То значи да се у случају читавања стања сензора, позива задатак за читавање вредности, а након тога се извршавање програма наставља следећим задатком који је на реду. Након успешног регистровања, тј. читавања сензора, врши се генерисање прекида. Након прекида, позива се следећи задатак у којем се врши обрада информација [100,101].

Sun SPOT бежични сензорски чворови немају оперативни систем, већ само *Squawk* виртуалну машину [97], на којој се извршавају Јава апликације. Као што је већ наведено, *Sun SPOT* сензори се програмирају у Јава програмском језику помоћу програмског окружења *Sun SPOT SDK*.

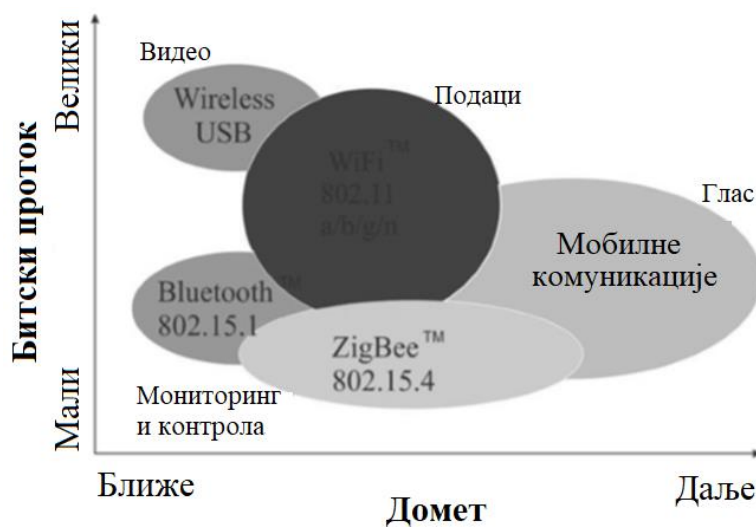
Скоро сваки сензорски чвор је могуће искористити за различите примене захваљујући стандардном 51-пинском конектору помоћу којег су могућа прошириња основне плочице. У зависности од конкретне апликације постоји много врста сензорских плочица које је могуће применити. На пример, сензорска плочица MTS 300 је једна од најпопуларнијих. То је зато јер иста поседује сензор за температуру, сензор за јачину осветљености, сензор звука као и мали звучник. На **слици 4.7** је приказан *Iris* чвор проширен *Crossbow MTS300* сензорском плочицом.



Слика 4.7 Crossbow Iris бежични сензорски чвор
Са MTS300 сензорском плочицом [94]

4.2 БЕЖИЧНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ КОЈЕ СЕ КОРИСТЕ КОД СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА

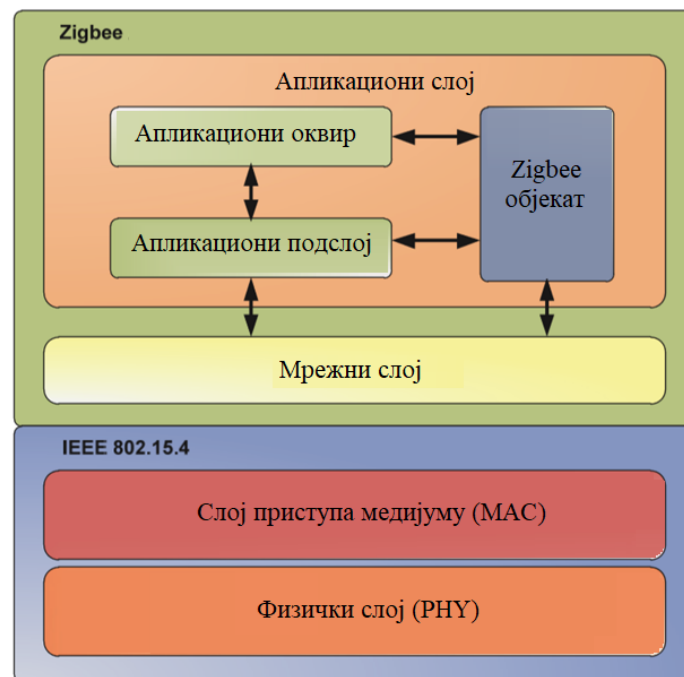
Код сензорских мрежа, могуће је применити све врсте бежичних технологија поменуте у трећем поглављу. Тренутно, у складу са захтевима већине апликација, најупотребљивији су IEEE 802.15.4 стандард, тј. употреба *ZigBee* бежичне мреже. Његов оквиран положај у дијаграму приказан је на **слици 4.8**, а детаљније објашњен у трећој глави овог рада [102].



Слика 4.8 Поређење појединих бежичних мрежа [103]

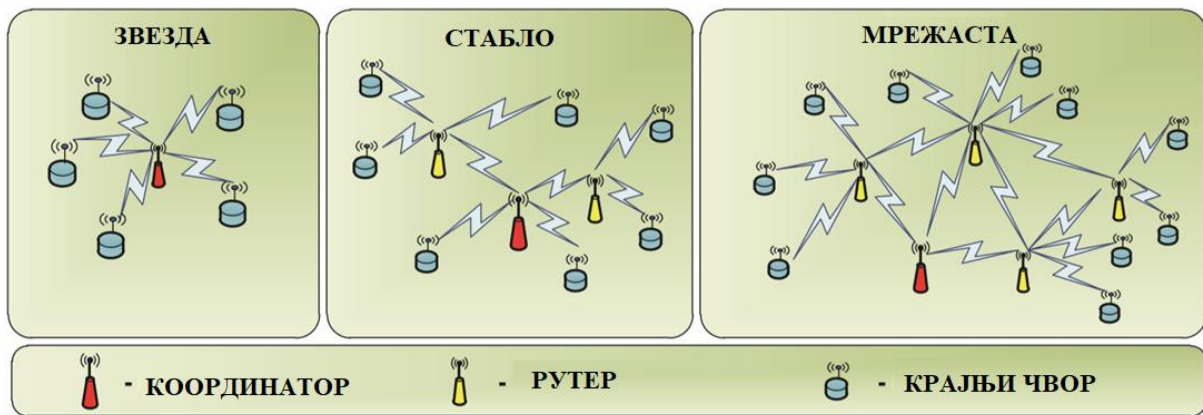
Стандард IEEE 802.15.4 је првенствено дефинисан за **LR-WPAN** (енг. *Low Rate Wireless Personal Area Network*) комуникационе сервисе. Погодан је за бежичне апликације за контролу и мониторинг, где се захтева ниска енергетска потрошња. Овај стандард је постао популаран захваљујући *Zigbee* алијанси, савету за развој *Zigbee* протокола, и веома се успешно користи у многобројним апликацијама. Велика предност стандарда са *Zigbee* протоколом је ниска енергетска потрошња. Комуникација се обавља на фреквенцији од 868 MHz (у Европи), на фреквенцији од 915 MHz у (и Америци и Аустралији) и на фреквенцији од 2.4 GHz (широм света). Максимална преносна брзина (250 Kb/s) се достиже на преносној фреквенцији од 2.4 GHz. Кодирање сигнала се извршава помоћу **DSSS** (енг. *Direct Sequence Spread Spectrum*) модулације. У зависности од фреквенције, модулација за **DSSS** пренос може бити **OQPSK** (енг. *Offset Quadrature Phase Shift Keying*) метода за апликације са фреквенцијом од 2.4 GHz или **BPSK** (енг. *Binary Phase Shift Keying*) метода за апликације са фреквенцијом од 868 MHz или 915 MHz [65].

У оквиру *Zigbee* мреже (*Zigbee* протокола), стандард *IEEE 802.15.4* је дефинисао ниже слојеве *OSI* (енг. *Open Systems Interconnection*) модела, као што је *MAC* слој (енг. *Medium Access Control* - слој приступа медијуму) и физички слој (енг. *Physical* - **PHY** - физички). На **слици 4.9** су приказани поменути слојеви. У физичком слоју су дефинисане хардверске структуре и преносна фреквенција бежичне комуникације. У *MAC* слоју дефинисан је тип бежичног чвора и принцип комуникације (на пример комуникација са **CSMA-CA** (енг. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) преносом). Бежични чворови могу бити типа **FFD** (енг. *Full Function Device* - уређај с потпуном функционалношћу) или типа **RFD** (енг. *Reduced Functional Device* – уређај са ограниченом функционалношћу) [103].



Слика 4.9 Zigbee протокол [103]

Zigbee алијанса дефинише горње слојеве, као што су мрежни и апликациони. У мрежном слоју је дефинисана врста *Zigbee* уређаја и топологија бежичне мреже. *Zigbee* уређај може бити рутер, координатор или крајњи чвор. Рутер успоставља комуникациону везу, додељује адресе и координира комуникацију у оквиру мреже. Рутер је необавезан члан мреже, зависно од топологије (слика 4.10). Главна улога рутера је повећање домета помоћу његове примопредајне улоге. Финални, извршни елементи бежичне мреже могу бити сензори или актуатори. Рутер и координатор су **FFD** уређаји, док су крајњи уређаји најчешће **RFD**. У мрежном слоју је описана топологија мреже, која може бити топологија звезде, стабла или мреже (слика 4.10). Најједноставнија структура мреже је топологија звезде. У овом случају, у центру се налази координатор преко којег се обавља комуникација. Врло је типично да се мрежаста или топологија стабла користи код већине апликација које функционишу преко више тачака (*multihop* комуникацију). У мрежастој структури највећу улогу имају рутери, преко којих се обавља највећи део комуникације [76,82,83,85,86].



Слика 4.10 Мрежне топологије Zigbee алијансе [102]

4.3 ПРИМЕНА БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА

Примена бежичних сензорских мрежа се најчешће заснива на апликацијама које имају улогу прикупљања података из околине [60]. У зависности од апликације уз помоћ бежичних сензора могу да буду извршена разна мерења и аквизиције података [104]. Претежно се користе за надгледање животне средине, војне апликације, праћење здравствених стања људи, итд [105-129]. Свакако, области примене и изазови истраживања су разни и међусобно се преклапају (на пример индустријске и војне примене се преклапају у војној индустрији и томе слично):

- **индустријске примене,**
- војне примене,
- јавна безбедност,
- пољопривреда,
- медицинске примене,
- надгледање окружења и детекција догађаја,
- надгледање објеката од важности,
- саобраћај и логистика,
- научне, биолошке и еколошке примене,
- комерцијалне примене,
- праћење животне средине
- прецизна локација људи и возила,
- интелигентне зграде [60,104].

Осим наведених апликација, постоје многобројна научна истраживања везана за имплементације бежичних сензора у готово свим сегментима људског деловања, нарочито у оквиру **производње (индустрије)**, што је уједно у складу са темом рада, посебно приказано у оквиру следећег поглавља.

5. ТРЕНУТНО СТАЊЕ И МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА У ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДЊЕ

Као што је речено у уводу, модерна производна предузећа све више примењују напредне информационо-комуникационе технологије како би унапредили управљање производним процесима. Овај тренд се најчешће означава као четврта индустријска револуција, односно: „Индустрија 4.0“.

Индустрија 4.0 је истовремено садашња/наредна фаза у дигитализацији производног сектора. Осим даљег смањења трошкова производње и унапређења квалитета постојећих производа Индустрија 4.0 доноси и суштинске промене у виду дигитално унапређених производа и услуга, као и нове пословне моделе. На **слици 5.1** приказане су области за које се очекује да ће претрпети суштинску трансформацију у наредним годинама као и пословне или технолошке полуге које покрећу наведене промене. На истој се може уочити да су сензорске мреже сврстане у оквиру везе између физичког и дигиталног света, тј. у оквиру индустрије 4.0 [130].



Слика 5.1 Индустрија 4.0 [130]

Две деценије уназад, интензивно су развијене баш те технологије које значајно унапређују начин интеракције између физичког и дигиталног света. У овоме делу рада је посебна пажња посвећена индустријским бежичним сензорским мрежама које представљају „чула“ за аутономне системе управљања.

Индустријске бежичне сензорске мреже (*IWSN*) заправо репрезентују нову, софистициранију методу и систем комуницирања између више даљински позиционирана уређај без прекида. Они се битно не разликују по начину функционисања од класичних бежичних сензорских мрежа за разне примене наведене у четвртом поглављу. Суштина је да систем садржи чворове који се понашају као примопредајници чиме креирају напредан систем комуникације. Разлика је углавном у одабиру бежичне мреже. У индустријским бежичним сензорским мрежама, сензорски чворови су повезани употребом бежичних технологија које су енергетски ефикасније, попут *ZigBee*, *Wi-Fi*, *Bluetooth* и њима сличних чији ће детаљни разлози примене у оквиру *IWSN*-а бити детаљније објашњени у наставку. Повећање бежичне комуникације условљава развој мрежне инфраструктуре, која је доживела велику експанзију у претходној деценији [60]. Због тога је првенствено неопходно увидети тренутно стање и тенденцију употребе истих.

5.1 ТРЕНУТНО СТАЊЕ И ТЕНДЕНЦИЈА УПОТРЕБЕ

Употреба бежичне технологије у оквирима производње, тј. унутар индустријских система, расте свакодневно. Према истраживањима [29] било је предвиђено да ће раст бежичних апликација у оквирима индустрије у периоду између 2012 и 2016 године бити остварен за преко 500%. То се и остварило. Данас, на почетку 2020. ситуација је таква да се вредност тржишта *IWSN*-а процењује на 580 милиона америчких долара, и то само у оквиру Сједињених Америчких Држава. Такође, даљи раст поменутог тржишта се процењује по годишњој стопи од 11,2%. Тиме се у 2025. години укупна вредност поменутог тржишта процењује на 1360 милиона америчких долара [30,31,132,133].

Скорашњи прогрес у пољу **IoT** (енг. *Internet of Things* -и вештачке интелигенције (енг. *Artificial Intelligence* - **AI**) у оквиру највећих светских индустрија (попут нафтне, гасне, аутомобилске индустрије) додатно захтевају развој бежичне сензорске мреже која обезбеђује још јачу повезаност, тј. комуникацију између елемената исте [131].

Услед лаке имплементације и цене исте, бежична технологија има потенцијал да се уведе првенствено код управљања и мониторинга великих монтажних производних система. Са препознавањем тог потенцијала, извршена су разна истраживања у смеру увођења *IWSN* [15-22]. У један од могућих смерова истраживања спадају и вишеагентни системи [23-25].

Међу најактуелније апликације у индустријским системима спадају системи за надзор и прикупљање података **SCADA** (енг. *Supervisory Control And Data Acquisition*) [26-28]. Затим, веома су актуелне и апликације везане за дијагностику, тестирање, серијску обраду, управљање индустријским роботима итд. Тренутно, код највећег броја актуелних сензорских система у индустријској примени, претежно се користи жица, тј. исти се базирају *Ethernet* TCP/IP, RS-232, RS-485 и RS-422 комуникационим протоколима.

Бежична комуникација тренутно не спада у најпримењивије, али свакако спада у најпопуларније индустријске комуникационе протоколе. Тренутно главно циљно подручје бежичне сензорске технологије је најнижи ниво аутоматизације индустријских система о којима ће у наставку рада бити више речи [15,132,133]. То је тако услед коришћење великог броја и врсти „жичаних“ сензора који захтевају велике инсталационе трошкове и чије је реконфигурисање система врло нефлексибилно. На овом степену употребе (на нивоу аутоматизовања процеса) налазе се разни сензори и актуатори повезани са контролном јединицом, најчешће **PLC**-ом (енг. *Programmable Logic Controller*).

У оквиру њих, развијене су и стандардизоване методе за пројектовање индустријских система са бежичним сензорским мрежама [32]. Производни системи у којима је имплементирана бежична технологија, познати су и као „Бежична производња“ (енг. *Wireless Manufacturing – WM*) [32-37]. Јасно је да код **WM** система, на производној линији, информације из сензора, тј. сензорских чворова се преносе бежичним путем. Квалитетна примена оваквих система је доказана у случају примене **RFID** технологије (енг. *Radio-Frequency Identification technology*). Ова технологија је добра и са аспекта праћења животног циклуса, што је потврђено разним применама [38-40]. Поред наведеног, подобна је и за праћење елемената и тока материјала у оквиру производње, читаве логистике складиштења и друге сличне апликације [37,41,42].

Примена бежичних сензора у оквирима индустрије, као и у осталим, већ поменутих је врло актуелна област [133-140]. Могућности и изазови индустријских бежичних сензорских мрежа су разни. У оквирима већ поменутих истраживања [133] примене индустријских бежичних сензорских мрежа могу бити класификоване у три групе:

1. Надзор околине (енг. *Environmental Sensing*);
2. Мониторинг стања (енг. *Condition Monitoring*);
3. Аутоматизација процеса (енг. *Process Automation*).

Надзор околине генерално представља најширу област примене индустријских бежичних сензорских мрежа. Индустријских бежичних сензорских мрежа апликације за надзор околине обухватају праћење загађења ваздуха, воде (уједно са отпадним водама), као и надгледање околине у оквиру производње (енг. *Pollution*). У опасним (енг. *Hazard*) подручјима, где постоји потреба за надгледање због могућности настанка пожара, хаварија, поплава и осталих опасних и штетних догађаја, исто се убрајају у надзор околине. Безбедоносна питања су активна у области чувања информација од конкуренције и томе сличн [7, 12, 15].

Мониторинг стања покрива проблеме са праћењем структура (попут зграда, индустријских хала, мостова у оквиру индустријских посројења, путева итд) и праћењем машина у оквиру аутоматске производње. Зато је ова група апликација индустријских бежичних сензорских мрежа врло значајна за производњу у свим индустријским гранама.

Апликације у оквиру аутоматизације процеса корисницима обезбеђују информације о ресурсима производње и самим пружањем услуга (везаним за сировине, залихе и статусе ланца набавке, као и број радника укључених у индустријски процес). На крају, једна од најпеспективнијих примена, у оквиру аутоматизације процеса, је мониторинг перформанса, оцењивање и унапређење које се остварује употребом индустријских бежичних сензорских мрежа [12,26,28,133].

У **табели 5.1** може се наћи листа главних грана и сектора индустрије са одређеном групом апликација које се примењују у одређеној грани. У оквиру табеле се разматрају четири индустријска сектора: примарни (вађење ресурса директно са земље, укључује пољопривреду, рударство и сечу без обраде производа), секундарни (прерада производа у примарном сектору), терцијални (пужање услуга) и квартални (научна и технолошка истраживања) [133].

Табела 5.1 Примена IWSN-а у индустрији [133]

Сектор	Грана	Надзор околине			Мониторинг стања		Аутоматизација процеса	
		Загађење	Опасност	Безбедност	Структуре	Опreme	Процена	Унапређење
I	Рударство	x	x	x	x	x	x	x
I,II	Енергетика		x	x	x	x	x	x
I,II	Агрокултура	x	x				x	x
II	Хемијска инд.		x	x	x	x		
II	Машинство			x	x	x	x	x
II	Електромашинство			x	x	x	x	x
II,III	Производни процеси		x	x		x	x	x
III	Транспорт	x	x	x	x		x	
III	Војна инд.	x	x	x	x	x	x	x
III	Медицинска инд.		x			x	x	
III	Комуникације			x		x	x	
III,IV	Безбедност			x		x		

Јасно је да је примера употребе бежичних сензорских мрежа за потребе индустрије много. Нека од њих су у фази испитивања, нека се увелико примењују. Нека од већ постојећих, комерцијалних, решења за надгледање инфраструктуре и опреме укључују комплетно решење бежичног система, које укључује бежично прикупљање података, вибрационе сензоре, кондиционирање сигнала за вибрационе сензоре и софтвер за обраду сигнала за предвиђање и дијагностику опреме. Сензори и мрежни хардвер који се користе у овим решењима могу се носити са већином наведених технолошких изазова код бежичних мрежа. **Табела 5.2** садржи списак услуга и добављача комерцијалних апликација [23-25].

Табела 5.2 Комерцијална решења и сервис провајдери IWSN-а [133]

Бр.	Име	Надзор окоLINE			Мониторинг стања		Аутоматизација процеса		Website
		Затађење	Опасност	Безбедност	Структура	Опремене	Процена	Унапређење	
1	ABB					x	x	x	abb.com
2	Accutech Instruments					x	x		accutechinstruments.com
3	AES	x	x		x	x	x	x	aessolutions.com.au
4	Aginova	x	x			x	x		aginovasolutions.com.au
5	Apprion				x	x	x		apprion.com
6	Augusta			x	x	x	x		augusta-ag.de
7	AVIDwireless	x	x			x	x	x	avidwireless.com
8	Azbil					x	x	x	azbil.com
9	Banner	x				x	x		bannerengineering.com
10	Bridge Diagnostic Inc.				x				bridgetest.com
11	Coalesenses	x	x						coalesenses.com
12	Dust					x	x		dustnetworks.com
13	Electrochem	x	x		x	x			electrochemsolutions.com
14	Elpro								elpro.com
15	Emerson					x	x	x	emerson.com
16	Endress + Hauser	x	x			x	x	x	endress.com
17	Ferguson Beauregard	x				x	x	x	fergusonbeauregard.com
18	FreeWave	x	x	x		x	x	x	freewave.com
19	GridSense					x			gridsense.com
20	GST				x	x			globalsensortech.com
21	Hitachi	x	x	x	x	x			hitachi.com
22	Invensy					x	x		invensy.com
23	Invisible Systems				x	x	x	x	invisible-systems.com
24	Meastrim					x	x	x	meastrim.com
25	Memsic	x	x			x	x		memsic.com
26	National Instruments					x	x	x	ni.com
27	Nivis	x	x			x	x	x	nivis.com
28	On-Ramp Wireless				x	x	x		onrampwireless.com
29	Panasonic	x		x		x			panasonic.com
30	Pepperl+Fuchs					x	x	x	pepperl-fuchs.co.uk
31	RF Code			x					rfcode.com
32	Rockwell	x	x	x		x			rockwellautomation.com
33	Scanmetrics				x	x	x		scanmetrics.com
34	Sensormetrix	x	x	x			x	x	sensormetrix.co.uk
35	Siemens	x	x	x	x	x			automation.siemens.com
36	SKF				x	x			skf.com

5.2 БЕЖИЧНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ КОЈЕ СЕ КРОИСТЕ

На основу свега до сада изнетог у раду јасно је да се код бежичних сензорских мрежа, у зависности од врсте апликације, могу користити било које од бежичних технологија наведених у трећем поглављу. Такође је наведено да се у оквиру индустријских апликација претежно користе жичане мреже базиране на *Etharnet* комуникационим протоколима. Међутим, честа је тенденција да се овакве мреже мењају са бежичним мрежама (типа ад-хок), типично при индустријској аутоматизацији као предводнику процеса модернизације производних система употребом бежичних сензорских мрежа.

У складу са наведеним, од многих мрежа, у оквиру индустрије највећу употребу имају:

- *Bluetooth* (IEEE 802.15.1),
- *WLAN* (IEEE 802.11),
- *ZigBee* (IEEE 802.15.4),
- *UWB* (IEEE 802.15.3a),

и њихове карактеристике су приказане у **табели 5.3.** [78,133,141].

Табела 5.3 Табела карактеристика [141]

Параметар	Bluetooth	WLAN	ZigBee	UWB
Подручје	10 m	100 m	30 - 100 m	10 m
Придружени стандард	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11a/b/g	IEEE 802.15.4	IEEE 803.15.3a
Фрекв. Подручје	2.4 GHz	2.4 GHz или 5 GHz	0.858, 0.915, 2.4 GHz	3.1 - 10.6 GHz
Физички слој	FHSSS	DSSS или OFDM	DSSS	UWB SS
Макс. Брзина преноса	1 MBps	5.5/11/54 MBps	20/40/250 kbps	40/480 Mbps
Просечна RF енергија	1/2.5/100 mW	40 - 800 mW	200 - 500 mW	20 - 40 mW
Трајање батерије	1-7 дана	0.5 - 5 дана	100 -1000 дана	30 дана
Максимално подручје	10 - 100 m	20 - 100 m	30 - 100 m	10 -15 m
Мрежна топологија	Звезда, piconet, scatternet	Звезда	Звезда, мрежа, грозд	Зависи од стандарда
Макс. број чворова	7 slave-ова	32 AP-а	65	Зависи од стандарда
Време прикупљања чвора	3 s	2 s	30 ms	/
Време опоравка чвора	3 s	1s	15 ms	/
Цена по чвору	15 \$	20 \$	10 \$	10 \$
Трошкови индраструктуре	400 \$ по мастеру	100 \$ по AP	100 \$ по AP	/
Ресурси система	250 kB	1 Mb	4 - 20 kB	/
Заштита	40-битни RC4	128-bitni RC4	128-bit AES	Инхерентна
Главна примена	Замена каблова	Wireless Ethernet, мобилни уређаји	Надзор и управљање, аутономни уређаји	Кратко подручне високо брзе апликације

Bluetooth технологија се темељи на малом чипу који стаје чак и у најмање врсте мобилних уређаја (пример је приказан на **слици 5.2**). Излазна снага му је врло мала, што минијатурним уређајима посебно погодује због мале потрошње електричне енергије. У додатан прилог економској страни иде и чињеница да је тренутна производна цена *Bluetooth* чипа мања од 10 долара.



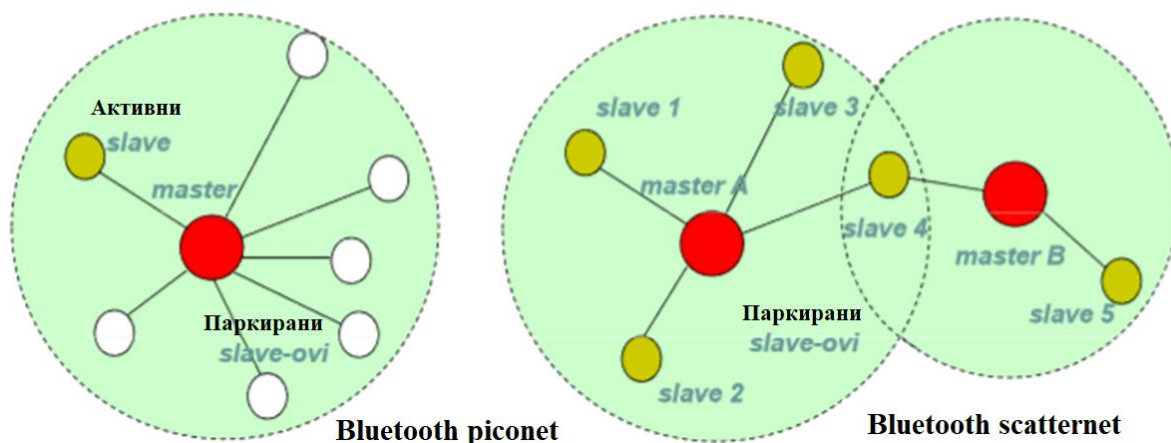
Слика 5.2 Примери уређаја са *Bluetooth*-ом [141]

Тренутна стопа омогућује брзине преноса од 2 Mb/s. Функционише у 2.4 GHz бесплатном лиценцираном појасу коришћењем FHSS (енг. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) приступа. Код ове мреже подручје од 2.4 до 2.4835 GHz подељено је у велики број канала (најчешће 79 потпуно одвојених канала) и псеудо-случајна „*hopping*“ шема се користи на номиналној брзини од 1.600 hops/s.

Главна предност фреквенцијског „*hopping*“ је повећана еластичност на неповољне радио сметње (шумове). Ово такође помаже у превенцији од прислушкивања, иако је он само потребан да „ухвати“ један преносни пакет за синхронизацију са комуникацијом.

Bluetooth пружа веома квалитетне услуге **QoS** (енг. **Quality of Service**), гарантује ниску латентност за активне чворове, али је време „буђења“ успаваних чворова око 3 секунде. Прикладан је за примене где се захтева висок квалитет услуга и где је напајање доступно, нпр. комуникација између *wireless* слушалица и мобилних телефона.

Bluetooth мреже су карактеристичне по томе да их у највећем броју случајева чине максимално седам чворова типа *Slave*, које користе топологију звезде са мастер чвором у центру. Тај тип *Bluetooth* мреже се другачије зове *Piconet*. Главни, мастер чвор, даје специфичне адресе свим *Slave* чворовима повезаним са њим и тиме омогућава повезивање физичких података. Истовремено, *Bluetooth* чворови имају карактеристику да имају у исто време буду део више мрежа и са тиме дефинишу тзв. раздвајајуће („*Scatternets*“) (видети **слику 5.3**) [65,141].



Слика 5.3 Bluetooth мреже [141]

Ова мрежа садржи одређене карактеристике које ограничавају њено коришћење у индустријској аутоматизацији:

1. Иако се ова мрежа претежно употребљава код нискобуџетних апликација, и апликација које специфицирају мање снаге, потрошња енергије је директно пропорционална оствареном преносном подручју и он није упоредив са стандардима типа *ZigBee*.
2. *Piconet* мреже могу бити сачињене од максимално седам *Slave* чворова спојених на један мастер.
3. *Bluetooth master/slave* архитектуре не могу остварити више од једне рефлексије (*hop*) између два мастер чвора након оформљавања *scatternet*.
4. Успавани чворови имају веома дуго време „буђења“. Код већине успаваних чворова потребно је углавном око 3 секунде. То је истовремено знатан изазов за потрошњу енергије [76,82,83,85,86].

Према свим наведеним разлозима *Bluetooth* није адекватан за ад-хок мреже у индустријским срединама са већим бројем сензора. Због тога се континуално технологија усавршава. Побољшање перформанси, сигурности, потрошње енергије и прикладности је следеће:

1. **Перформансе и потрошња енергије.** *Bluetooth 2.0 + EDR* (енг. *Enhanced Data Rate*) омогућују повећање брзине преноса до 3 Mb/s уз истовремено смањење потрошње енергије.
2. **QoS, сигурности и потрошња енергије.** У 2005 години *Bluetooth SIG* (енг. *Special Interest Group*) је тестирала и пробала нову верзију будућег повећања употребљивости вишеуређајних сценарија, омогућавајући бољу заштиту приватности помоћу дужих алфанумеричких *PIN*-ова, као и побољшања *QoS* преко приоритизације промета. Могућности повезивања 255 *slave*-а на мастер и додатно смањење потрошње енергије учиниће *Bluetooth* прикладнијим за захтеве сензорских мрежа.
3. **Multicast, сигурност и перформансе.** Повећање подручја до 100 метара уз задржавање ниске потрошње енергије, *multicast* функционалности и повећане заштите приватности.

Насупрот *Bluetooth*-а **бежичне мреже за локална подручја (WLAN-** у трећем поглављу је дат кратак преглед исте) су врло прикладне за ад-хок мреже у индустријским срединама са већим бројем сензора. Она представља најраспрострањенију технологију у области бежичних рачунарских мрежа. Бежичне локалне мреже функционишу као проширење или као алтернатива класичним *Ethernet* мрежама. Оне су енергетски мање ефикасне при поређењу са *Bluetooth* мрежама а и вишеструко скупље од *Bluetooth*.

Доступност *off-the-shelf* производа и смањење цене чини га идеалним за веома брзе бежичне апликације, као и техничке апликације. Због већих захтева за потрошњом енергије он није погодан за комуникацију између малих аутономних уређаја. Такође, стварна латентност и осетљивост на сметње са другим уређајима који раде на 2.4 GHz чини **WLAN** потенцијално деликатним решењем за *real-time* апликације [65,85,86,141].

Проширења као на пример 802.11n и 802.11s ће евентуално премостити наведена ограничења и недостатке тренутно доступних **WLAN** стандарда:

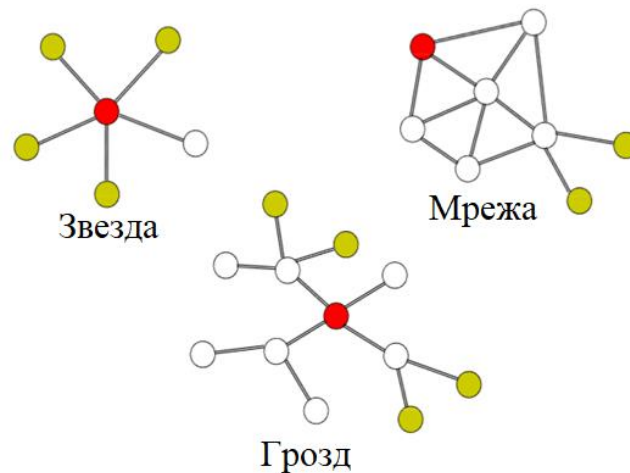
1. **802.11n** дефинише стандард за **WLAN**-ове са брзинама већим од 200 Mb/s. Неколико група великих индустријских предузећа настоји се појавити са одвојеним, јасним предлозима побољшања својих производа увођењем овог стандарда. Око 60 предлога у 2006 години.
2. **802.11s** има за циљ успоставити повезану мрежу 802.11 фамилије. Овај подстандард ће омогућити мултихоп комуникацију између 32 AP-а начинивши *ад-хок* архитектуру могућу за **WLAN**.

ZigBee стандард, темељен на *IEEE 802.15.4* стандарду има фокус на оперативност међу основним јединицама у оквиру аутоматизације стамбених простора, индустријском надзору и управљању, као и у периферним рачунарима. Додатан фокус има на унапређењу енергетске ефикасности. У случају када се не захтева блиска синхронизација, овај стандард је остварио уз помоћ врло малог *duty cycle*-ом да чворови могу функционисати са истим, релативно јефтиним батеријама на вишегодишњем нивоу,

Код **ZigBee** мрежа, *IEEE 802.15.4* физички слој је темељен на **DS-SS** –у (енг. *Direct Sequence Spread Spectrum*). Исти садржи могућност детектовања енергије пријемника, одређивање да ли је канал слободан као и да приказ и индикацију квалитет везе. Код ове мреже разликују се спојне и беспојне методе приступа каналу. Оне имају највећу пакетну дужину од 128 бајтова. Користећи 64-bit *IEEE* и 16-bit- но адресирање, једна мрежа може истовремено имати преко 65000 чворова.

MAC слој (код *IEEE 802.15.4*) омогућује повезивање и разграновање повезаних мрежа, има опциону *super-frame* структуру са фаровима за временску синхронизацију и механизам гарантованог времена *slot*а за високо приоритетне комуникације. Истовремено користи **CSMA/CA** (CA – *collision avoidance*) метод приступа каналу.

ZigBee дефинише мрежу, сигурност и примену профила оквира за *IEEE 802.15.4* системе. Три основне врсте топологија су карактеристичне код мрежног слоја: звезда, мрежа (енг. *mesh*) и грозд (енг. *cluster tree*) – видети на **слици 5.4**.



Слика 5.4 ZigBee топологија [102]

Звездаста топологија обезбеђује да операције могу имати дуг век трајања (тј. дуг век батерије), док мрежаста топологија омогућава високи ниво поузданости и скалирања кроз *multihop* преносе. Грозд мреже користе хибридную звезда/мрежасту топологију која комбинује предности обе мреже за високе нивое подршке напајању и поузданости истог.

ZigBee сигурност је темељна на **AC** (енг. *Access Control*) листама, временским сатом пакета и 128-bit – ном енкрипцијом. Апликације које захтевају брзо процесуирање и прослеђивање информација претежно троше мање енергије што даље доводи до дужег века трајања батерија. Код примене у индустрији, првентвено ће бити укључени сензори који су енергетски ефикасни, који садрже аутономне елементе и склопове малих габарита [65,102,141].

UWB (енг. *Ultra Wideband Communications*) је новија комуникациона технологија, чији корени су из 60-тих година и повезани су са радарским преносом. Велика већина истраживања вазаних за ову технологију су извршена у оквиру програма владе САД до 1994. године. Након ње, укључују се разни истраживачи широм света.

Ова технологија тренутно није стандардизована те су због тога разне компаније развиле сопствена решења темељена на *UWB* технологији. Неки од њих, нпр. *Freescale's XS110* је постао кандидат за будући стандард. Један од главних фаворита од свих кандидата је IEEE 802.15.13а који се темељи на WPAN.

Ова технологија се може слободно дефинисати попут произвољен бежићне комуникације пропусног појаса већег од $\frac{1}{4}$ централног фреквенционог опсега, или распона већег од 1,5 GHz. У пракси, распон сигнала може бити шири од неколико GHz.

UWB комуникације се разликују од традиционалних радио фреквенционих (*RF*) технологија; уместо носиоца података из уског фреквенционог појаса, исти се простиру дуж широког спектра фреквенција – претежно од 3 до 10 GHz. [65].

UWB не захтева велика иницијална улагања, као и велику енергетску потрошњу *RF* компоненти, попут филтера и осцилатора. При поређењу са ускопојасним *NB* (енг. *Narrow Band*) техникама, *UWB* техника ради на различитим фреквенцијама (од 3-6 GHz) и користи мање енергије. Сектрална енергија не прелази -41 dBm/MHz.

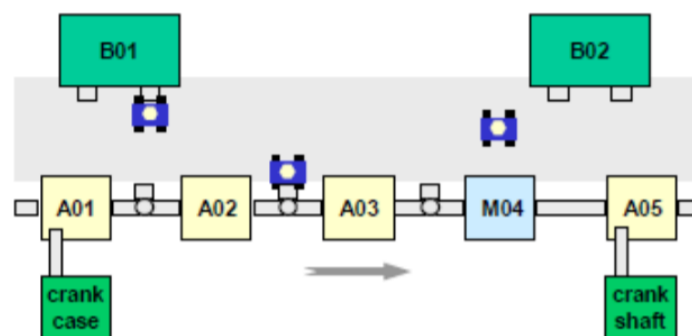
Потенцијалне предности UWB-а:

- висока брзина преноса података, добра контрола емитовање енергије, робусност,
- могућност високо-прецизне локализације,
- унапређена сигурност при поређењу са ускопојасним техникама,
- стабилност код аутоматизације процеса у оквиру индустрије. Због малог домета деловања(10m) и тренутних FCC (енг. *Federal Communications Commission*), примена је за сада ограничена само на поједине информационе системе [65,141].

5.3 МОГУЋНОСТИ ПРИМЕНЕ БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА У ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДЊЕ

На основу целокупног рада, може се закључити да примена БСМ у оквиру производње готово да нема стриктних ограничења и да ће се у наредном периоду све више примењивати - нарочито у оквиру Индустрије 4.0.

Већ је приказано да се, код највећег броја сензорских система који су актуелни у индустријској примени, претежно користи жица, тј. исти се базирају *Ethernet TCP/IP*, RS-232, RS-485 и RS-422 комуникационим протоколима. Тенденција је постепено их заменити бежичним сензорским мрежама. Додатно, пошто технологија бежичних сензорских мрежа убрзано постаје наповољније решење за мониторинг и контролу разних нивоа производних аутоматизованих система, развијени су начини пројектовања истих у оквирима производње [32]. У њима се користе IEC 61499 функционални блокови који представљају нови индустријски стандард у контексту производне аутоматизације. Такав начин „моделирања“ (са функционалним блоковима – слика 5.5) обезбеђује квалитетну флексибилност, мониторинг и контролу [12,26,28].



Слика 5.5 Пример БСМ у оквиру производне линије за склапање мотора [150]

Начин и квалитет функционисања БСМ унутар производног система зависи од мноштва фактора, тј. параметара. Њих је, мимо поменутог стандарда за пројектовање сензорских мрежа [32], првенствено потребно идентификовати а потом дефинисати у оквирима изабране примене бежичне сензорске мреже. Без њиховог познавања и разумевања, пројектовање бежичних сензорских мрежа и њихово увођење у индустријске процесе су незамисливи. Додатно, било каква дискусија о могућностима примене БСМ у оквиру производње, без познавања параметара неопходних за избор апликације је нелогична. Зато се следеће поглавље бави поменутим параметрима [85].

5.3.1 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ПРИ ИЗБОРУ АПЛИКАЦИЈЕ БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА

Како би се унапред отклониле одређене сметње у индустријском окружењу, тј. како би се превентивно деловало на све потенцијалне проблеме које бежичне сензорске мреже могу имати у оквиру неког производног система. Добри примери утицаја на јачину сигнала су: бука у производњи, рефлексија од зидова, јаке вибрације, сметње и шумови са разних уређаја, честице у ваздуху итд) потребно је унапред знати/дефинисати све горе поменуте параметре. Основни параметри при избору бежичних сензорских мрежа [32,142-145]:

1. размештај сензорских чвороваћ,
2. мобилност сензорских чворова,
3. цена, величина и ресурси сензорског чвора,
4. хетерогеност сензорских чворова,
5. начин комуникације,
6. инфраструктура,
7. мрежна топологија,
8. област покривеност подручја осматрања,
9. повезаност,
10. величина мреже,
11. животни век апликације,
12. QoS захтеви.

Размештај сензорских чворова је један од параметара. Сензорски чворови могу бити насумично (енг. *random*) или плански позиционирани на одређене позиције. Размештај истих могу знатно утицати на параметре рада бежичне сензорске мреже као што су: локација позиционирања чворова, густина покривености, тачност примљених података на одређеним позицијама, степен одзива сензорске мреже као и дужина животног века рада бежичне сензорских мрежа итд. Активност инсталирања може бити једнократна или континуирана. Активности око инсталирања и коришћења чворова су строго одвојене активности [60,141].

Мобилност сензорских чворова је врло битан параметар код апликација подложних природним утицајима, као што су ветар или вода. Њихова мобилност варира од тотално стационираних па до самосталног кретања (ношени роботима, актуаторима и слично). Разликују се мобилност свих или делимичног броја сензорских чворова. Степен мобилности може да буде повремени или континуални. Утиче на избор мрежних и транспортних протокола и дистрибуцију алгоритама. Велика брзина промене локације може изазвати омање прекиде у трансмитовању података.

Цена, величина и ресурси сензорског чвора – Цена се креће од пар центи до више стотина евра. Величина сензорског чвора варира од неколико μm^3 до реда величина од неколико dm^3 . Ресурси су директно пропорционални цени и габаритима. Сва ограничења ресурса ограничавају комплексност софтвера.

Степен хетерогености примењених сензорских чворова представља значајан фактор јер он значајно утиче на избор одговарајућег програма (софтвера). Тиме се утиче на апликациону ефикасност рада у оквиру БСМ-а. Почетком развоја БСМ, типична БСМ је била хомогена и сачињена од уређаја који су били идентични у погледу хардвера и софтвера. Нису имали ни јединствену идентификацију (*ID*). Данас у многим апликацијама оне су хетерогене, састоје се од веома великог броја различитих СЧ који имају различите намене [65,133,141].

Код одређивања протокола одвијаних на другом нивоу референтног модела, **начин комуникације** је врло битан фактор. Радио таласи су ту свакако најпремењиванији. Након њих начин комуникације може бити инфрацрвеним таласима, ласером, индуктивно/капацитивним техникама или звучним сигнаlima. Код доста мањих растојања између чворова, користе се капацитивна и индуктивна комуникација што доприноси ефикаснијој потрошњи енергије.

Параметар је такође да ли је мрежа заснована на **инфраструктури** и/или ад-хок мрежи без инфраструктуре. У ад-хок мрежама (*multihop*) чворови имају двоструку улогу. Некада се користи и комбинација ад-хок и инфраструктурних мрежа. То је погодно у случају када се специфични кластери (ад – хок мрежа) уз помоћ мастер чвора конектују са инфраструктурном мрежом (на пример интернетом). Добро је узети у обзир да се наведени разлоти не односе и примењују само на комуникацију између сензорских чворова. Они се такође односе и на локализацију и синхронизацију у реалном времену (на пример уз помоћ *GPS*-а).

Један од битнијих фактора је **избор топологије мреже**. То је зато јер има велики утицај на карактеристике мреже, попут кашњења у трансмитовању података, мрежне опорности на отказе, робусности, капацитета, избора протокола за обраду и рутирање итд. У најједноставнијем облику *WSN* формира мрежу са једним скоком. Мреже које се базирају на једнобазној станици формирају инфраструктуру на звездастој топологији. Мултихоп мреже претежно формирају насумичан распоред чворова, али се такође њихова топологија може свести на стабло или мешовиту топологију [59,65].

Област покривености подручја осматрања може бити:

- делимична - само у случају када су неки делови одређене области обухваћене,
- потпуна - у случају када је потпуно подручје обухваћено,
- редундантна покривеност – у употреби су више различитих чворова који покривају једну област.

Стварни ниво покривености неке области, може се одређивати на више начина. Углавном је одређен у односу на степен прецизности и редуваности која је дефинисана самом апликацијом, односно захтевима исте. У зависности од нивоа покривености бира се избор алгоритама који се користе првенствено за обраду и потом за слање обрађених података. Ниво покривености такође битно утиче и на животни век једне апликације у БСМ [59,65,133,141].

Повезаност може бити разнолика:

- потпуно повезана (енг. *full connected*) увек постоји мрежна комуникација,
- периодична повезаност - ако су неки чворови само периодично повезани или улазе унутар комуникационог опсега осталих чворова периодично,
- сензорски чворови имају опцију да буду комплетно повезани у оквиру одређених група (партиција) између којих не постоји комуникација. Поједине БСМ решавају такав вид проблема уз помоћ мобилних чворова.

Повезивање углавном утиче на избор протокола комуникације и начина сакупљања података.

Величина мреже може бити од неколико чворова па све до неколико хиљада сензорских чворова. Број чворова који учествују у бежичној сензорској мрежи је директно пропорционалан захтевима који дефинишу мрежну покривеност, повезаност и величине подручја. Параметри скалабилности под утицајем су броја сензорских чворова у мрежи, а све у односу на изабране алгоритме и протоколе. То је зато што већи број чворова умањује избор алгоритама и протокола који се могу применити.

У зависности од апликације, **животни век апликације** код бежичних сензорских чворова може бити разнолик – од пар сати до пар година. Животни век има пресудан утицај при избору батерије, тј. избора врсте напајања, као и нивоа робусности и енергетске ефикасности чворова.

QoS захтеви (енг. *Quality of Service*) у генералном случају су следећи:

- *real-time* - физички догађај мора бити пријављен унутар одређеног временског интервала,
- *robustness* - мрежа треба да остане оперативна чак и у случају појаве унапред дефинисаних пропуста,
- *tamper-resistance* - мрежа треба да остане оперативна чак и у случају намерног напада спољних субјеката,
- *eavesdropping-resistance* - спољни субјекти не смеју имати могућност прислушкивања комуникационог канала,
- *unobtrusiveness or stealth* - присуство мреже мора невидљиво тј. тешко за откривање,
- QoS захтеви могу да утичу на избор других параметра БСМ.

5.3.2 ПРИМЕНА БЕЖИЧНИХ СЕНЗОРСКИХ МРЕЖА У ОБАСТИ ПРОИЗВОДЊЕ

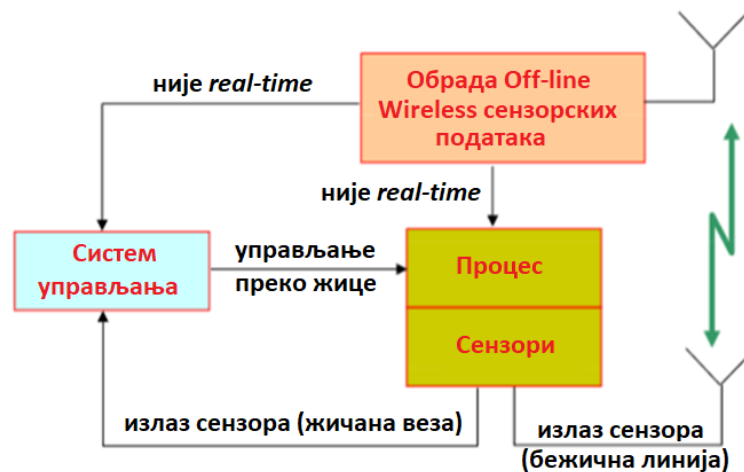
Примена може бити у оквирима разних индустријских сектора: нафтоводи и термоелектране, рафинерије, војна индустрија, медицинска индустрија, фармацеутске, хемијске компаније и њима слични већ приказани у **табели 5.1**. Када се погледа већ наведена примена бежичних сензорских мрежа у разним областима, може се закључити да је за у оквиру производње подела следећа [60,141]:

- надгледање и контрола индустријске опреме и процеса,
- надгледање производње,
- контрола фабричких процеса,
- **индустријска аутоматизација,**
- праћење и надгледање квалитета производа,
- праћење робе у магацинима,
- детекција провала у индустријским постројењима,
- контрола цурења отровних материја
- опремање транспортних добара („контејнер“) са сензорским чвором
- логистичко праћење робе током сваког трена,
- надзор и превентивно одржавање машина и друге.

Готово код сваке од наведених примена, односно наведених подела примена, врши се мониторинг одређених параметара (попут јачине струје, притиска, температуре, разних сила, протока, електрохемијске корозије, података о тренутном стању и позицији машина, производа и тако даље) и индустријска аутоматизација, тј. **аутоматско управљање**. У складу са наведеним, посебна пажња биће посвећена системима управљања (затвореним и отвореним) чији се рад базира на бежичним сензорским мрежама [65, 133-145].

Примена код отвореног система управљања

Примена бежичних сензорских мрежа код отвореног система управљања је карактеризована поседовањем бежичних линија искључиво за сакупљање информација (података) (**слика 5.6**). Излазне величине сензора који детектују стање процеса, прослеђују се до система управљања. Не постоји бежична веза у повратној вези система управљања услед могућности „кварења“ сигнала, кашњења услед рефлексије истог итд. Дакле, код оваквог система, реални процес се управља преко различитих врста актуатора повезаних жицом са системом управљања. То искључује употребу бежичних линија у оквиру обраде или операција, у оквиру класичне повратне везе система управљања. На **слици 5.6** је дат шематски приказ примера таквог система [65,146-149].



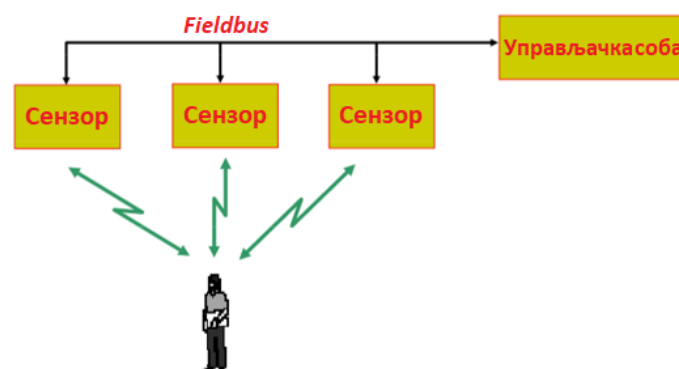
Слика 5.6 Пример отвореног система управљања [65]

Примери употребе отворених система су разни. Најчешћи системи су: **мобилно одржавање** (енг. *Mobile maintenance*), **управљање процесима ад-хок усклађености** (енг. *Benchmarking*), **редунданција** и **мобилност**.

За сваку од наведених примена постоји различити скуп спецификација које су усредсређене на потрошњу енергије, пропусни опсег, време одазива итд. Заједничко за све ове примене, а што ће додатно бити размотрено, јесте да исте садрже инсталирану жичану структуру, уз помоћ које се врше операције управљања.

Мобилно одржавање - у околинама процесног управљања сервисно особље често се сусреће са уређајима, било за потребе тестирања, калибрације или праћења појаве квара. Традиционално, техничко особље остварује жичану везу са овим уређајима на одговарајући начин како би их физички одржавало (слика 5.7). Избацивањем жице, тј. употребном бежичне комуникације значајно се повећавају могућности и број операција у оквиру самих већ наведених процеса [65,141].

Прво, стварна веза са уређајима није у потпуности физичка. На овај начин оператор има једноставнији приступ уређајима којима је тешко приступити. Друго, коришћење радио везе са уређајима олакшан је кориснику приступ информацијама на осетљивим локацијама, нпр. видокруг проматрача може бити лимитиран на уређаје који су физички близу и подаци се могу сакупљати и презентовати у односу на функционалност или размештај. На овај начин добијени подаци обично се могу поставити на терминал и користи за каснију *off-line* обраду или складиштење.



Слика 5.7 Принципијална шема мобилног одржавања [141]

Захтеви за ширину пропусног опсега могу бити знатни ако се подаци одржавања преносе преко ваздушног интерфејса. Међутим, не постоје ограничења на латентност и веома „лежерна“ ограничења енергије, чинећи ово идеалном апликацијом бежичних ад-хок мрежа.

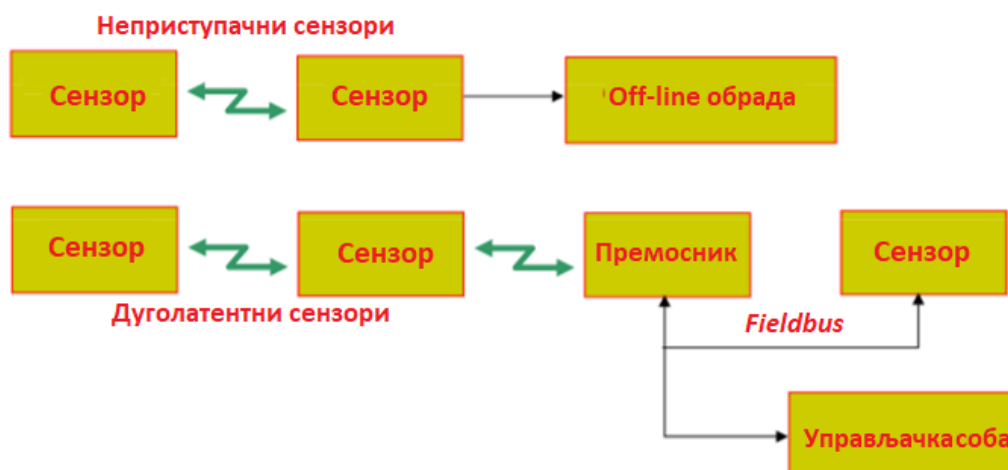
Управљање процесима - друга веома важна примена је приступ процесним инструментима који нису типично повезани и чији подаци нису неопходни у формирању интегралног дела главне управљачке петље.

Један добар пример је *real-time* добијање података о температури топлотних машина. Овде се ради о локацији којој је тешко приступити компонентама које користе жичане каблове.

У процесној индустрији се користе бројни сензори и актуатори. Многе компаније желе користити бежичне комуникације између њих. Централни проблем за апликацију су интерфејси између уређаја.

Генералне препреке су због типова сензора и конзервативне природе већине производних система. Предпостављајући да ће у будућности препреке оваквог типа бити решене, опет постоји потенцијална потешкоћа у додавањима нисколатентних сензора на постојећу инфраструктуру. Због тога поред бежичних сензорских мрежа, постоји и потреба за нове уређаје који ће служити као преносиоци између самоорганизујућих чворова и жичаних мрежа [147].

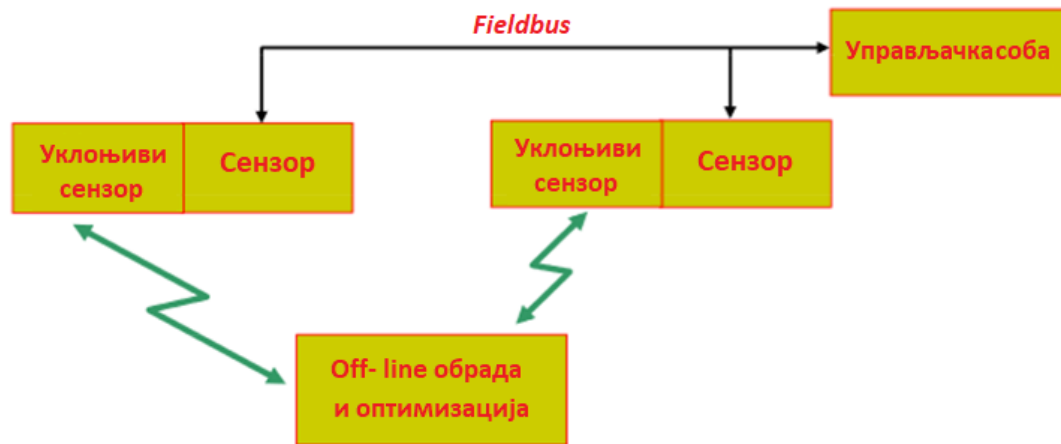
Премоштавање је потребно да би се омогућило бројним сензорским јединицама са постојећим интерфејсом да се прикаче на „сакупљач информација“ (енг. *Field bus*). Скуп захтева у оквиру премоштавања се мења зависно од конфигурације и типа сензора. Шематски приказ коришћења ад-хок бежичног умрежавања у управљању процесима приказан је на **слици 5.8** испод.



Слика 5.8 Основна шема управљања процеса на основу ад-хок умрежавања [141]

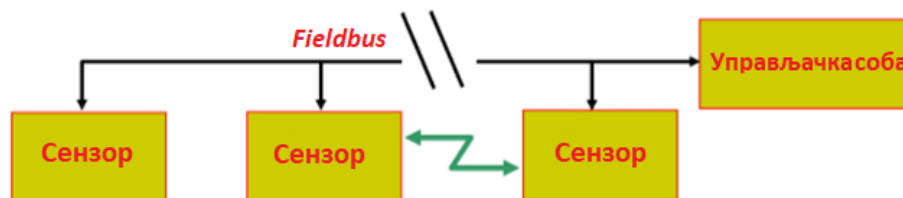
Ад-хок усклађеност представља изразито ново подручје у процесној аутоматизацији је. Користе се такозвани „уклоњиви сензори“ који се углавном смештају на централној локацији процеса. Чим се први пут поставе, истовремено се успоставља ад-хок мрежа и даље се усмеравају своје измерене вредности према некој агрегацијској тачки за потребе *off-line* обраде (**слика 5.9**).

Драж овог приступа је у следећем: систем је једноставно инсталирати, самоконфигурисати и може се виšekратно користити на различитим локацијама. Када се развије нова и оптимизована управљачка стратегија могуће је имплементирати у регулатор или у појединачне делове опреме.



Слика 5.9 Ад-хок усклађеност [65]

Редунданција - од система који траже висок ниво сигурности често се захтева да имају уграђену редунданцију у смислу опажања, комуникације и обраде. Овај захтев се типично сусреће у нафтној и гасној индустрији, било на копну или у мору, где се рукује са експлозивним супстанцама и где кварови могу узроковати катастрофалне последице. Током квара примарног система, секундарна мрежа ће на себе преузети пренос података (слика 5.10).



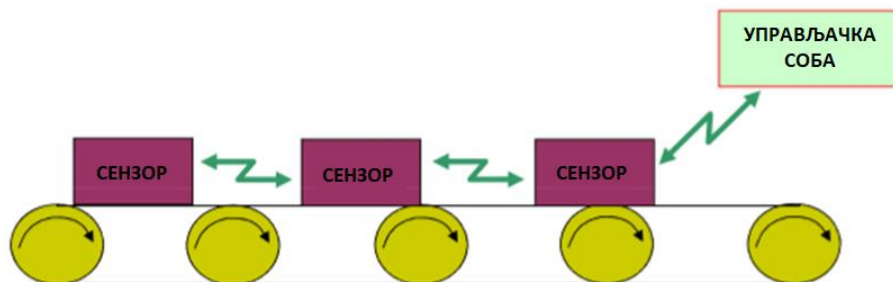
Слика 5.10 Пример редундантног система [65]

Насупрот другим апликацијама, бежична мрежа ће овде преносити виталне податке. Међутим, пренос се обавља само као “задња опција”, у случају пуцања кабла или кварова на другој опреми. У бројним случајевима погодно је омогућити већи ниво сигурности система будући да користи у целости различиту инфраструктуру, смањујући ризик деловања квара на *backup* систем.

Појас пропуштања и латентност примарног система могу бити јако слаби. Дакле, може бити неопходно имплементирати уређаје алгоритмима “повлачења”, где се систем повлачи у мање захтеван скуп захтева чим се квар примарног система детектира. Бежичне *ад-хок* мреже требају бити оперативне цело време, шаљући “ја сам жив” пакете да информишу менаџмент систем да је *backup* функционалан [148].

Мобилност је важан пример апликације отвореног система прикладног за бежичне ад-хок мреже. Пример производног процеса са мобилним јединицама на покретној траци (слика 5.11). Јединице се крећу и оне тешко успостављају везу са фиксном инфраструктуром.

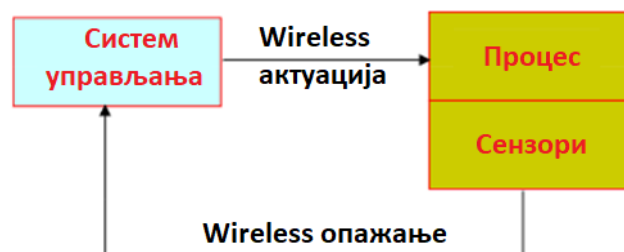
Осим поменутог, мобилни сензори се често користе за мерење разних физичких параметара врло важних за перформансе укупног процеса. Тренутне примене су у папирној и месној индустрији. Сензори су додати да прате процес сушења папирне масе, мерење влажности и температуре дуж ланца. Подаци се прикупљају, преносе се од сензора до сензора, или шаљу до једне од неколико стационарних базних станица повезаних на фиксну инфраструктуру. Након тога се измерене вредности обрађују и користе за подешавање процеса сушења [149].



Слика 5.11 Пример апликације са мобилним сензорима [65]

Примена код затвореног система управљања

Поред употребе *ад-хок* бежичних мрежа за сакупљање података или надзор процеса, њихова употреба иде до преоса информација у оквиру целокупне управљачке петље - од прикупљања података (осетних елемената) до извршења одређене команде (актуатора) (слика 5.12). Атрактивно подручје, на којем је активан велики број истраживача је управо дистрибуирано управљање чије су повратне везе затворене бежичне линије. На основу већ поменутих истраживања [12,14,15,21,150] и тенденције развоја ове области, сматра се да *Wireless* управљање у затвореној петљи постепено постаје природни елемент у целости децентрализованих аутоматизованих архитектура. Један од сценарија затворене петље, где се опажање и актуација врши преко *wireless* линије приказан је на слици 5.12 [65].



Слика 5.12 Пример шематског приказа затвореног система управљања [65]

Градња дистрибуираних система коришћењем *wireless* сензорских (актуатор) мрежа није добро решење. Како би се испунило једноставно управљање системом, трансмитовање података уз помоћ индустријских мрежа мора бити тачно, поуздано и најбитније *real-time*.

За *wireless* везе то је знатан изазов, са обзиром на то да оне садрже губитке информација и кашњења због појачавања сигнала, интерференције и више коришћења истог преноса. У индустријском окружењу, тј. у околини производних линија, остваривање затворене петље управљања базиране на *wireless* вези, другачије се може дефинисати као: дизајнирање децентрализованих ад-хок *wireless* мрежа која максимално умањују утицај комуникационих кварова (грешака) на систем управљања [65,143].

Постоји већи број комуникационих параметра који привлаче посебну пажњу са становишта управљања:

- брзина преноса података,
- висока вредност значи високу временску грануларност,
- латентност,
- мала вредност имплицира брз одзив,
- губитак пакета,
- мала вероватноћа за остваривање поуздане комуникационе везе.

Дакле, промене у дизајну податковног слоја су неопходне код затворених система које примењују *wireless* технологију. Истовремена оптимизација комуникационих и управљачких варијабли произлази као најбоље решење.

Управљање процесима - *wireless* затворена петља је идеално прикладна за побољшање аутоматизације процеса. Поред функционалних предности на организационом нивоу (попут реконфигурације процеса и једноставна инсталација) Ад-хок мреже, садрже самоорганизујућу структуру чиме олакшавају обављање постојећих операција [133,141].

Једноставне примене користе податке са *wireless* сензора директно у регулатору. На пример мрежаста (енг. *mesh*) мрежа се најчешће користи за подршку процесу третмана вода. Циљ коришћења мреже био је повезати мераче загађености воде са системом управљања.

Инсталација и поузданост су циљеви једне овакве апликације. Инсталација је велики изазов са становишта радио комуникације (због најчешће употребљиваних бетонских зидова и металних степеница) где вишерефлексијски преноси олакшавају комуникацију са краја на крај где би традиционалне тачка-тачка *wireless* везе захтевале дуго и сложено мрежно планирање.

Слични примери сензорских апликација су у високо захтевним околинама, као што су нафтна и гасна индустрија, где се улажу континуирани напори на смањењу трошкова будући да је њихово истраживање изузетно скупо.

Велике мреже са сложеним сензорским и актуаторским интеракцијама у високо критичним системима управљања захтевају робусно и оптимално управљање и комуникацијске алгоритме.

Производна аутоматизација и производне линије такође могу имати велику корист од бежичних мрежних технологија. Дистрибуиране аутоматизоване арихитектуре се постижу тако што се затварање управљачких петљи помоћу бежичних линија и бежично повезивање врши са разним актуаторима и сензорима. У том случају, мобилност није важан параметар за фабричку производњу [15-22].

Велика брзина преноса података се такође не захтева, будући да се у фабричкој производњи комуникација обавља над малим бројем података, обично ограничени на бинарне улазе/излазе.

Вишерефлексионо рутирање је обично прихватљив задатак и оваквим применама. Истовремено, поузданост и чување енергије су два важна фактора производне аутоматизације. **ABB** је развио **WPS** (енг. *Wireless Proximity Sensor*) који користи одговарајући протокол који осигурава поуздану испоруку порука у кратком временском интервалу коју захтевају тренутни *PLC*-ови.

Напајање је постигнуто индуктивном спрегом секундарног намотаја са сензорском јединицом. Постојање властитог напајања у потпуности елиминише потребу за кабловима или замену батерија.

6. ЗАКЉУЧАК

Бежична технологија је ушла у свакодневни живот и нашла је примену на пољу информационих технологија. Њиховим развојем, и упоредним развојем сензора, развиле су бежичне сензорске мреже, тј. сензорске мреже које су међусобно повезане бежичном мрежом. Свему томе су допринели значајни резултати на пољу електронике, минијутаризација компоненти, тј. развој микроелектронике, повећањем енергетске ефикасности, остваривањем веће поузданост и јефтинијим производима.

Индустријске бежичне сензорске мреже (бежичне сензорске мреже у производњи) представљају унапређену комуникациону методу између више сензорских чворова без прекида у оквиру производње. Они се битно не разликују по начину функционисања од класичних бежичних сензорских мрежа за разне примене наведене у четвртном поглављу. Суштина је да систем садржи чворове који се константно понашају као приступне тачке. Тиме се креира напредан комуникациони систем што даље омогућава да се специфични аутоматски процеси изводе континуално и квалитетно. У индустријским бежичним сензорским мрежама, сензорски чворови су повезани употребом разних бежичних технологија попут *ZigBee*, *Wi-Fi*, *Bluetooth* и њима сличних.

Сензорски чвор, кога у основи минимално чине сензорска јединица (сензори), јединица за напајање (нпр. батерија), процесна јединица (нпр. микроконтролер), меморија и примопредајна јединица (нпр. радио антена), је основни извршни елемент бежичне сензорске мреже. Сензорски чвор функционише тако што сензор прихвата на улазу мерену величину и конвертује је у електрични сигнал. Након кодирања, сигнал се доводи на улаз у аналогно дигитални конвертер па се по обављеној конверзији прихвата од стране процесора. Исти процесуира сигнал, и на основу програма који садржи, предаје одговарајућу и истовремено резултујућу информацију према мрежи уз помоћ примопредајника.

Поменуте бежичне технологије су дефинисане у оквиру IEEE 802.15 стандарда и врло су погодне код бежичних апликација за контролу и мониторинг, где се захтева ниска енергетска потрошња. Исти стандард обухвата дефинисање слојева модлеа као што је слој за приступ медијуму, физички слоја, апликациони и мрежни. У физичком слоју су дефинисане хардверске структуре и преносна фреквенција бежичне комуникације. У слоју за приступ медијуму (MAC слоју) дефинисан је тип бежичног чвора и принцип комуникације. За мрежни ниво су везани ефикасно рутирање, ефикасна потрошња и агрегација података. Апликациони ниво се везује за протоколе менаџмента сензора, доделу задатака и расејавање података.

Како би се бежична сензорска мрежа успешно применила у оквиру било које области примене, потребно је узети у обзир одређене параметре попут: размештај сензорских чворова, мобилност сензорских чворова, цена, величина и ресурси сензорског чвора, хетерогеност сензорских чворова, начин комуникације, инфраструктура, мрежна топологија, област покривеност подручја осматрања, повезаност, величина мреже, животни век апликације и QoS захтеве.

Примена бежичних сензора у оквирима индустрије, као и у осталим, већ поменутих је врло актуелна област. Могућности и изазови индустријских бежичних сензорских мрежа су разни. У оквирима већ поменутих истраживања примене индустријских бежичних сензорских мрежа могу бити класификоване у три групе: надзор околине, мониторинг стања и аутоматизација процеса. Мимо те поделе, када се погледа већ наведена примена бежичних сензорских мрежа у разним областима, може се закључити да је за у оквиру производње подела следећа: аутоматизација производних система надгледање комплетне производње, контрола фабричких процеса, праћење и надгледање квалитета појединачних производа, надгледање специфичне опреме и процеса - као и њихова контрола, праћење робе у магацинима, контрола изливања токсичних материја, опремање транспортних средстава (на пример контејнера) са сензорским чвором, логистичко праћење кретања и стање робе у сваком тренутку, надзор и превентивно одржавање машина, детекција провале у магацинима итд.

Међу најактуелније апликације у индустријским системима спадају системи за надзор и прикупљање података. Осим њих, актуелне су и апликације повезане са серијском обрадом, тестирањем и дијагностиком, управљањем индустријским роботима итд. Тренутно, код највећег броја актуелних сензорских система у индустријској примени, претежно се користи жица, тј. исти се базирају *Ethernet* TCP/IP, RS-232, RS-485 и RS-422 комуникационим протоколима.

Бежична комуникација тренутно не спада у најпримењивије, али свакако спада у најпопуларније индустријске комуникационе протоколе. Тренутно циљно подручје бежичне сензорске технологије је најнижи ниво аутоматизације индустријских система - тенденција је да се *Ethernet* замени бежичним мрежама или да се за почетак комбинује са истим.. На овом нивоу су бројни сензори и актуатори повезани са контролном јединицом, најчешће *PLC*-ом.

Поред наведених достигнућа у развоју, али и области у којима ће се бежичне сензорске мреже тек развијати, битно је узети у обзир и изазове на које ће у индустрији наилазити. На пример, *снага* је одувек представљала изазов за бежичне сензорске мреже. Један од начина како би се продужио животни век мреже налази се у дизајнирању енергетски ефикасних алгоритама и алгоритама који користе снагу на интелигентан начин. Потом, *цена хардвера* представља можда један од највећих изазова заједно са безбедношћу информација, прилагодљивост мрежним условима и друго.

Не постоје јавно доступни подаци о производним системима који користе бежичне сензорске мреже у оквиру својих процесних и производних делатности у Србији. Те су овим радом, у складу са поставком истог, прикупљени и анализирани одговарајући подаци који би били корисни при генералној апликацији бежичних сензорских мрежа у било којим производним постројењима. Највећа пажња је посвећена аутоматизацији у складу са тренутним стањем и тенденцијом примене бежичних сензорских мрежа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. Hozdić, *Smart Factory For Industry 4.0, A Review*, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 2015.
- [2] M. Filipović, Ž. Jakovljević, *Automatizacija proizvodnje*, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet u Beogradu, Begorad 2011.
- [3] Lazić, B. Ž., *Osnovi računarske tehnike*, Akademski misao, Beograd, 2006.
- [4] L. Zheng, *Industrial wireless sensor networks and standardizations: The trend of wireless sensor networks for process automation*, in Proceedings of SICE Annual Conference 2010, August 2010.
- [5] Z. Jakovljevic, S. Mitrovic, M. Pajic, *Cyber Physical Production Systems – An IEC 61499 Perspective*, Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH 2017.
- [6] W. Grezechca, *Different Structures of Manufacturing Systems in Low Production Demand*, Journal of Machine Engineering, 2012.
- [7] J. Akerberg, M. Gidlund, M. Björkman, *Future Research Challenges in Wireless Sensor and Actuator Networks Targeting Industrial Automation*, in IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, May 2011.
- [8] I. Ćosić, Z. Anišić, M. Lazarević, *Tehnološki Sistemi u Montaži*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 2012.
- [9] B. Holdsworth, C. Woods, *Digital Logic Design*, Newnes, 2002.
- [10] W. Grayechca, *Final Results of Assembly Line Balancing Problem*, Assembly Line – Theory and Practice, InTech, 2011.
- [11] D. Felix, A. D. Tews, *WiFi position estimation in Industrial environments using Gaussian processes*, Intelligent Robots and Systems, 2008.
- [12] G. Zhao, *Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey*, Network Protocols and Algorithms, 2011.
- [13] O. Fidelis, *Wireless Sensor Networks (WSN) In Industrial Automation: Case study of Nigeria Oil and Gas Industry*, International Journal of Engineering, 2013.
- [14] M. Yi-Jen, C.M. Lin, I. J. Rudas, *Wireless Sensor Network (WSN) Control for Indoor Temperature Monitoring*, Acta Polytechnica Hungarica, 2012.
- [15] K.S. Low, N.N. Win, J.E. Meng, *Wireless Sensor Networks for Industrial Environments*, Proceedings of the 2005 International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, IEEE Computer Society, 2005.
- [16] S. Kolavennu, P. Gonia, *Wireless gas sensors for industrial life safety*, Industrial Wireless Sensor Networks, Elsevier, 2016.
- [17] M. Paavola, K. Leiviskä, *Wireless Sensor Networks in Industrial Automation*, Factory Automation, InTech, 2010.
- [18] L. Hou, N.W. Bergmann, *Novel Industrial Wireless Sensor Networks for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012.

- [19] Q. Sun, S. Li, S. Zhao, H. Sun, Li, A. Nallanathan, *Industrial wireless sensor networks 2016*, International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017.
- [20] V. C. Gungor, G. P. Hancke, *Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches*, IEEE Trans. Industrial Electronics, 2009.
- [21] J. Song, A. K. Mok, D. Chen, M. Nixon, *Challenges of wireless control in process industry*, Workshop on Research Directions for Security and Networking in Critical Real-Time and Embedded Systems, 2006.
- [22] M. Antoniou, M. C. Boon, P. N. Green, P. R. Green, T. A. York, *Wireless sensor networks for industrial processes*, IEEE Sensors Applications Symposium, 2009.
- [23] A. Hamzi, M. Koudil, J.P. Jamont, M. Occello, *Multi-Agent Architecture for the Design of WSN Applications*, Research Gate, 2013.
- [24] R. Tynan, D. Marsh, D. O’Kane, G.M.P. O’Hare, *Intelligent Agents for Wireless Sensor Networks*, Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multi agent systems, 2005.
- [25] M. Vinayals, J.A Rodriguez-Aguilar, J. Cerquides, *A Survey on Sensor Networks from a Multi-Agent perspective*, The Computer Journal, 2006.
- [26] Y. Hongcheng, *Design of the Remote Monitoring System for Workshop Based on ZigBee Wireless Sensor Networks*, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [27] Y. Qingqing, C.Han, *A Routing Algorithm in Wireless Sensor Network for Monitoring System of Machine Tools*, Advances in Electronic Commerce, Web Application and Communication, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [28] Z.C. Zalina, *Wireless Mesh Network in Integrated Web Base Monitoring Systems for Production Line Automation*, Signal Processing and Information Technology, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [29] M. Hatler, *Industrial Wireless Sensor Networks: Trends and developments*, InTech, 2012.
- [30] Marketwatch blog: *Industrial Wireless Sensor Networks (IWSN) Market 2019 Industry Share, Size, Segmentation, Application, Technology, Trends and Opportunities Forecasts to 2025*, dostupno na: <https://www.marketwatch.com/press-release/industrial-wireless-sensor-networks-iwsn-market-2019-industry-share-size-segmentation-application-technology-trends-and-opportunities-forecasts-to-2025-2019-08-30>, The Expresswire, 2019.
- [31] ON World Blog: *\$35 Billion Industrial Wireless Sensing IoT Market by 2021*, dostupno na: <https://www.prnewswire.com/news-releases/35-billion-industrial-wireless-sensing-iot-market-by-2021-300392528.html>, San Diego, 2017.
- [32] R. Abrishambaf, M. Bal, M. Hashemipour, *Distributed Control Architecture for Wireless Sensor Networks Using IEC 61499 Function Blocks for Industrial Automation*, International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2011.
- [33] G. Q. Huang, Y. F. Zhang, X. Chen, S. T. Newman, *RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control*, Journal of Intelligent Manufacturing, 2008.
- [34] C. Meng, *Cloud service-oriented dashboard for work cell management in RFID-enabled ubiquitous manufacturing*, Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013.

- [35] Q. Ting, L. Zhang, Z. Huang, Q. Dai, X. Chen, G. Q. Huang, H. Luo, *RFID-enabled smart assembly workshop management system*, In Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013.
- [36] G. Q Huang, P. K. Wright, S. T. Newman, *Wireless manufacturing: a literature review, recent developments, and case studies*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2009.
- [37] G. Q Huang, Y. F. Zhang, P. Y. Jiang, *RFID-based wireless manufacturing for realtime management of job shop WIP inventories*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008.
- [38] M. Lazarević, G. Ostojić, I. Ćosić, S. Stankovski, Đ. Vukelić, I. Zečević, *Product lifecycle management (PLM) methodology for product tracking based on radio-frequency identification (RFID) technology*, Scientific Research and Essays, 2011.
- [39] S. Stankovski, G. Ostojić, M. Lazarević, *RFID technology in product lifecycle management*, Engineering the Future, InTech, 2010.
- [40] D. Vukelic, G. Ostojic, S. Stankovski, M. Lazarevic, B. Tadic, J. Hodolic, N. Simeunovic, *Machining fixture assembly/disassembly in RFID environment*, Assembly Automation, 2011.
- [41] Y. S. Tsai, R.S. Chen, Y. C. Chen, C. P. Yeh, *An RFID-based manufacture process control and supply chain management in the semiconductor industry*, International Journal of Information Technology and Management, 2013.
- [42] C. Sun, *Application of RFID Technology for Logistics on Internet of Things*, AASRI Conference on Computational Intelligence and Bioinformatics, 2012.
- [43] J. S. Wilson, *Sensor Technology Handbook*, Elsevier, 2005.
- [44] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensor - Physics, Designs, and Application, Third Edition*, Springer, 2004,
- [45] I. R. Sinclair, *Sensors and Transducers, Third Edition*, Newnes, 2001.
- [46] D. S. Nyce, *Linear Position Sensors*, John Wiley & Sons, 2004.
- [47] M. Popović, *Senzori i merenja*, Četvrto izdanje, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Srpsko Sarajevo, 2004.
- [48] Скрипта о сензорима, доступно на: <http://www.sau.ac.me/Brodskaautomatika/senzori.pdf>, приступљено, 20.09.2019.
- [49] Блог о сензорима, доступно на: <https://gavrilo95.wordpress.com/2014/05/14/podela-po-velicinama-koje-se-mere/>, приступљено 20.09.2019.
- [50] Слика акустичког сензора, преузета са: <https://www.aliexpress.com/item/32670530538.html>, приступљено 20.09.2019.
- [51] Слика оптичког сензора, преузета са: https://www.kupindo.com/Elektronika/22265307_Modul-opticki-senzor, приступљено 20.09.2019.
- [52] Слика електричног сензора, преузета са: <https://www.ultra-pmes.com/products-and-services/sensor-systems/electric-field-sensors>, приступљено 20.09.2019.
- [53] Слика магнетног сензора, преузета са: <https://www.aliexpress.com/item/32653988546.html>, приступљено 20.09.2019.
- [54] Слика хемијског сензора, преузета са: <https://www.lakescientist.com/chemical-sensors/>, приступљено 20.09.2019.

- [55] *Слика температурног сензора*, преузета са: <https://www.shenzhen2u.com/One-Wire-Digital-Temperature-Sensor-DS18B20.html>, приступљено 20.09.2019.
- [56] *Слика механичког сензора*, преузета са: <https://www.amazon.com/SparkFun-Load-Sensor-50kg/dp/B00LPV8E2E>, приступљено 20.09.2019.
- [57] M. A. Matin, M. M. Islam, *Wireless Sensor Network – Technology and Protocols*, Intech Open, 2012.
- [58] G. Rakočević, *Overview of Sensors for Wireless Sensor Networks*, IPSI BgD Transaction, 2004.
- [59] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari and R. Verdone, *An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution*, Sensors, 2009.
- [60] M. Erdelj, N. Mitton, E. Natalizio, *Applications of Industrial Wireless Sensor Networks*, Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards, 2013.
- [61] M. Gast, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, O'Reilly, Sebastopol, 2012.
- [62] M. A. Matin, *Introduction to Wireless Networks*, Brunei, 2012.
- [63] S. Rackley, *Wireless Networking Technology: From Principles to Successful Implementatio*, Elsevier, 2007.
- [64] M. Dahiya, *Evolution of Wireless LAN in Wireless Networks*, International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE), 2017.
- [65] Г. Гардашевић, *Скрипта из предмета: Радио – приступне технологије*, Електротехнички факултет Универзитета у Бања Луци, Бања Лука 2015.
- [66] Sargun, S. Maan, S. B. Rana, *Wireless Personal Area Networks architecture and protocols for multimedia applications*, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 2015.
- [67] R. C. Braleya, I. C. Giffordb, R. F. Heilec, *Wireless Personal Area Networks: An Overview of the IEEE P802.15 Working Group*, Mobile Computing and Communications Review, 2010.
- [68] J. Kooker, *Bluetooth, ZigBee, and Wibree: A Comparison of WPAN Technologies*, 2008.
- [69] I. A. Shourbaji, *Overview of Wireless Local Area Networks*, International Journal of Computer Science and Information Security, 2013.
- [70] S. Banerji, R. S. Chowdhury, *On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology*, International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT), 2013.
- [71] S. Dhanalakshmi, M. Sathiya, *An Overview of IEEE802.11 Wireless LAN Technologies*, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2015.
- [72] M. Salahuddin, *Introduction to Wireless Sensor Networks*, Research Gate, 2015.
- [73] G.P. Joshi, S. Y. Nam , S. W. Kim, *Cognitive Radio Wireless Sensor Networks: Applications, Challenges and Research Trends*, Sensors, 2013.
- [74] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, R. Verdone, *An overview on wireless sensor networks technology and evolution*, Sensors, 2009.
- [75] P. Rawat, H. Chaouchi, J. M. Bonnin , *Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies*, The Journal of Supercomputing, 2013.
- [76] *Скрипта, Бежичне сензорске мреже*, преузета са: <https://www.scribd.com/document/428439830/14-Bezicne-Senzorske-Mreze-2018>, приступљено 03.02.2020.

- [77] P. Rawat, H. Chaouchi, J. M. Bonnin, *Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies*, The Journal of Supercomputing, 2013.
- [78] E. Yoneki, J. Bacon, *A survey of wireless sensor network technologies: research trends and middleware's role*, University of Cambridge. 2005.
- [79] P. Rentala, R. Musunuri, S. Gandham, U. Saxena, *Survey on sensor networks*, In: Proceedings of international conference on mobile computing and networking, 2001.
- [80] J. Rodrigues, P. Neves, *A survey on IP-based wireless sensor network solutions*, Int J Commun, 2010.
- [81] S. Ullah, *A comprehensive survey of wireless body area networks*, J Med Syst, 2012.
- [82] B. Deb, S. Bhatnagar, B. Nath, *A Topology Discovery Algorithm for Sensor Networks with Applications to Network Management*, Rutgers University, 2002.
- [83] F. Hua, H. Shuang, *Optimal Sensor Node Distribution Based on the New Quantum Genetic Algorithm*, Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008.
- [84] M. Bokare, A. Ralegaonkar, *Wireless Sensor Network: A Promising Approach for Distributed Sensing Tasks*, Excel Journal of Engineering Technology and Management Science, 2012.
- [85] J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal, *Routing Techniques In Wireless Sensor Networks: A Survey*, IEEE Wireless Communications, 2004.
- [86] K. Akkaya, M. Younis, *A survey on routing protocols for wireless sensor networks*, Ad Hoc Network, 2005.
- [87] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Ltd., 1996.
- [88] Дипломски рад, *Примопредајник за бежичне мреже сензора*, преузета са: <http://es.elfak.ni.ac.rs/Papers/DiplomskiRadIvicaVasovic.pdf>, приступљено 02. 02. 2020.
- [89] J. N. Al-Karaki, A. E. Kamal, *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey*, IEEE Wireless Communications, 2004.
- [90] Y. Al-Obaisat, R. Braun, *On Wireless Sensor Networks: Architectures, Protocols, Applications, and Management*, Sydney, 2007.
- [91] X. S. Yi, P. J. Jiang, X. W. Wang, S. C. Zhang, *Survey of energy-saving protocols in wireless sensor networks*, In: 2011 first international conference on robot, vision and signal processing (RVSP), IEEE, New York, 2011.
- [92] P. Naik, K. Sivalingam, *A survey of MAC protocols for sensor networks*, Wireless sensor networks, 2004.
- [93] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. Mutk, N. Xi, *The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: a survey*, IEEE Commun Surv Tutor, 2013.
- [94] Crossbow Technology Inc. <http://www.xbow.com>, приступљено 02. 02. 2020.
- [95] MEMSIC delivers Powerful Sensing Solutions, www.memsic.com, приступљено 02. 02. 2020.
- [96] Moteiv Corporation, <http://www.moteiv.com>, приступљено 02. 02. 2020.
- [97] Sun SPOT World Community, <http://www.sunspotworld.com>, приступљено 02. 02. 2020.
- [98] TinyOs Community Forum, <http://www.tinyos.net>, приступљено 02. 02. 2020.

- [99] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D.E. Culler, K.S.J. Pister, *System architecture directions for networked sensors*, in: Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-IX), Cambridge, MA, USA, 2000.
- [100] J. Ansari, D. Pankin, P. Mähönen, *Demo abstract: Radio-triggered wake-ups with addressing capabilities for extremely low power sensor network applications*, 5th European Conference on Wireless Sensor Networking, 2008.
- [101] V. Vujović, M. Maksimović, *Raspberry Pi as a Wireless Sensor Node: Performances and Constraints*, MIPRO, Opatija 2014.
- [102] Zigbee Alliance, <http://www.zigbee.org/>, приступљено 02. 02. 2020.
- [103] I. Dumančić, *Analiza i usporedba performansi bežičnih mesh protokola*, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek 2018.
- [104] M. P. Косановић, Бежичне сензорске мреже, Скрипта доступна на: <http://vtsnis.edu.rs/wp-content/plugins/vts-predmeti/uploads/BSM%20Predavanje%201%202018.pdf>, приступљено 05.02.2020.
- [105] M. Durisic, Z. Tafa, G. Dimic, V. Milutinovic, *A survey of military applications of wireless sensor networks*, Mediterranean conference on embedded computing (MECO), IEEE, New York, 2012.
- [106] M. A. Jan, P. Nanda, X. He, R. P. Liu, *A Sybil Attack Detection Scheme for a Forest Wildfire Monitoring Application*, Elsevier Future Generation Computer Systems (FGCS), 2016.
- [107] M. Sunita, J. Malik, S. Mor, *Comprehensive Study of Applications of Wireless Sensor Network*, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 2012.
- [108] P. Ananyachatterjee, M. Pandey, *Practical Applications of Wireless Sensor Network Based on Military, Environmental, Health and Home Applications, A Survey*, International Journal of Scientific & Engineering Research, 2014.
- [109] L. M. Oliveira, J. J. Rodrigues, *Wireless sensor networks: a survey on environmental monitoring*, J Commun, 2011.
- [110] B. Latré, B. Braem, I. Moerman, C. Blondia, P. Demeester, *A survey on wireless body area networks*, Wirel Netw, 2011.
- [111] A. Kadri, E. Yaacoub, M. Mushtaha, A. Abu-Dayya, *Wireless sensor network for real-time air pollution monitoring*, 1st international conference on communications, signal processing, and their applications (ICCSPA), IEEE, New York, 2013.
- [112] I. Ituen, G. Sohn, *The Environmental Applications of Wireless Sensor Networks*, International Journal of Contents, 2007.
- [113] R. N. Handcock, D.L. Swain, G. J. Bishop-Hurley, K.P. Patison, T. Wark, P. Valencia, P. Corke, C. J. O'Neill, *Monitoring Animal Behaviour and Environmental Interactions Using Wireless Sensor Networks, GPS Collars and Satellite Remote Sensing*, Sensors, 2009.
- [114] H. Alemdar, C. Ersoy, *Wireless sensor networks for healthcare: a survey*, Computer Networks, 2010.
- [115] P. Khan, A. Hussain, *Medical Applications of Wireless Body Area Networks*, International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2009.

- [116] M. Bottero, B. Dalla Chiara, F. P. Deflorio, *Wireless sensor networks for traffic monitoring in a logistic centre*, Elsevier, 2013.
- [117] M. A. Kafi, Y. Challal, D. Djenouri, M. Doudou, A. Bouabdallah, N. Badache, *A Study of Wireless Sensor Networks for Urban Traffic Monitoring: Applications and Architectures*, Procedia Computer Science, 2013.
- [118] A. Y. Nooralahiyan, H. R. Kirby, D. McKeown, *Vehicle classification by acoustic signature*, Mathematical and Computer Modelling, 1998.
- [119] B. Barbagli, L. Bencini, I. Magrini, G. Manes, and A. Manes, *A real-time traffic monitoring based on wireless sensor network technologies*, Proceedings of the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC '11), 2011.
- [120] Y. Jo and I. Jung, *Analysis of vehicle detection with wsn-based ultrasonic sensors*, Sensors, 2014.
- [121] A. Duzdar and G. Kompa, *Applications using a low-cost baseband pulsed microwave radar sensor*, Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001.
- [122] Y. Zhao, *Mobile phone location determination and its impact on intelligent transportation systems*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000.
- [123] C. D. Moreno, M. Brox-Jiménez, A. A. Gersnoviez-Milla, M. Márquez-Moyano, M.A. Ortiz-López, F.J. Quiles-Latorre, *Wireless Sensor Network for Sustainable Agriculture*, MDPI Proceeding, 2018.
- [124] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, I. Robla, *A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends*, Sensors, 2009.
- [125] M. Ryu, J. Yun, T. Miao, I. Ahn, S.C. Choi, J. Kim, *Design and Implementation of a Connected Farm for Smart Farming System*, Proceedings of the IEEE SENSORS, 2015.
- [126] T. Popović, N. Latinović, A. Pešić, Ž. Zečević, B. Krstajić, S. Djukanović, *Architecting an iot-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study*, Comput. Electron. Agric. 2017.
- [127] C. Gomez, J. Paradells, *Wireless home automation networks: a survey of architectures and technologies*, IEEE Commun Mag, 2010.
- [128] D. L. Mascarenas, M. D. Todd, G. Park, C. R. Farrar, *Development of an impedance-based wireless sensor node for structural health monitoring*, Smart Materials And Structures, 2007.
- [129] R. Kavitha, G. M. Nasira, N. Nachamai, *Smart Home Systems Using Wireless Sensor Network – A Comparative Analysis*, International Journal Of Computer Engineering & Technology (IJCET), 2012.
- [130] D. Damnjanović, *Primena Internet Of Things (Iot) rešenja u upravljanju održavanjem u proizvodnji*, Atoms and Bits, 2017.
- [131] A. Naphade, *Industrial Wireless Sensor Networks (IWSN) Market by Technology, Application & Geography Analysis & Forecast to 2025*, доступно на: <http://itresearchbrief.com/industrial-wireless-sensor-networks-iwsn-market-by-technology-application-geography-analysis-forecast-to-2025>, приступљено 04.02.2020.

- [132] S. Ukarde, *Industrial Wireless Sensor Networks market growth opportunities to 2025*, Semiconductor & Electronics Market Research News, 2019. Доступно на: <https://www.whatech.com>, приступљено 04.02.2020.
- [133] V. C. Gungor, G. P. Hancke, *Industrial Wireless Sensor Networks*, CRC Press, New York, 2013.
- [134] S. X. Ding, P. Zhang, S. Yin, E. L. Ding, *An Integrated Design Framework of Fault-Tolerant Wireless Networked Control Systems for Industrial Automatic Control Application*, IEEE Transactions On Industrial Informatics, 2013.
- [135] A. Frotzsch, U. Wetzker, M. Bauer, M. Rentschler, M. Beyer, S. Elspass, H. Klessig, *Requirements and current solutions of wireless communication in industrial automation*, Workshop on 5G Technologies, 2017.
- [136] X. Shen, Z. Wang, Y. Sun, *Wireless Sensor Networks for Industrial Applications*, Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004.
- [137] Q. Chi, H. Yan, L. D. Xu, *A Reconfigurable Smart Sensor Interface for Industrial WSN in IoT Environment*, IEEE Transactions On Industrial Informatics, 2014.
- [138] S. Saadaoui, M. Tabaa, F. Monteiro, A. Dandache, *IWSN Based on DWPT Using an Industrial Noisy Channel for Industry 4.0 Wireless Applications*, Proceedings of the 2018 International Conference on Software Engineering and Information Management, 2018.
- [139] A. Tiwari, F. L. Lewis, S. S. Ge, *Wireless sensor network for machine condition based maintenance*, In Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004.
- [140] P. Wright, D. Dornfeld, N. Ota, *Condition monitoring in end-milling using wireless sensor networks*, Transactions of NAMRI/SME, 2008.
- [141] J. Velagi, *Bežične mreže u industrijskoj automatizaciji*, Distribuirani sistemi, 2013.
- [142] S. Santini, B. Ostermaier, A. Vitaletti, *First experiences using wireless sensor networks for noise pollution monitoring*, Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks, REALWSN '08, USA, 2008.
- [143] F. Stajano, N. Hault, I. Wassell, P. Bennett, C. Middleton, K. Soga, *Smart bridges, smart tunnels: Transforming wireless sensor networks from research prototypes into robust engineering infrastructure*, Ad Hoc Networks, 2010.
- [144] I. Stoianov, L. Nachman, S. Madden, T. Tokmouline, *Pipeneta wireless sensor network for pipeline monitoring*, In IPSN, 2007.
- [145] R. A. Swartz, J. P. Lynch, B. Sweetman, R. Rolfes, S. Zerbst, *Structural monitoring of wind turbines using wireless sensor networks*, Environment, 2008.
- [146] A. Furness, *Machine-readable data carriers – a brief introduction to automatic identification and data capture*, Assembly Automation, 2000.
- [147] D. Fitzek, *Application of RFID in the grocery supply chain: universal solution for logistics problems in the CGP industry or a mere hype*, University of St. Gallen, 2003.
- [148] AAB Fasth, *Application of RFID in the production industry: a field study at Volvo Trucks in Umea*, Chalmers University of technology, 2004.
- [149] G. Q. Huang, *RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control*, Journal of Intelligent Manufacturing, 2008.
- [150] S. Bussmann, J. Sieverding, *Holonic Control of an Engine Assembly Plant an Industrial Evaluation*, Proceedings of the IEEE Systems, 2001.