

**Univerzitet u Kragujevcu
TEHNIČKI FAKULTET ČAČAK**

Siniša Randić

INTELIGENTNI SENZORI

**Čačak
2010. godine**

PREDGOVOR

Intenzivan razvoj poluprovodničke tehnologije u drugoj polovini 20. veka bitno je izmenio sliku savremenog sveta. Mogućnosti računara su skoro prevazišle sva maštanja i učinile da ovaj uređaj postane nezaobilazni pratilac celokupnog ljudskog življenja. Zahvaljujući tome računarstvo je od oblasti koja diktira promene u tehnici postala tehnika, koja ispunjava zahteve, kako ozbiljnih ljudskih potreba tako i one koje spadaju u domen zabave. Upravljanje procesima predstavlja jednu od oblasti kod koje je primena računra bitno promenila način realizacije celokupnog pristupa realizaciji i funkcionisanju savremenih upravljačkih sistema. Shodno tome neophodana je i promena u pristupu obrazovanju stručnjaka koji treba da se uhvate u koštac sa izazovima upravljanja u uslovima primene računara.

Ovaj priručnik ima zadatak da studente koji pohađaju diplomske studije iz oblasti upravljanja na daljinu na Tehničkom fakultetu u Čačku uvede u problematiku inteligentnih senzora kao bitne komponente za efikasno ostvarivanje upravljačkih funkcija. S obzirom da autor do sada nije izvodio nastavu iz ove oblasti kao zasebne celine smatrao je da prva verzija priručnika treba da bude samo osnovno upoznavanje studenata sa problematikom inteligentnih senzora. Obuhvatniji udžbenik moći će da se napiše tek posle iskustva u radu sa najmanje jednom generacijom studenata, pogotovu iskustva u radu sa studentima na izradi konkretnih projekata u okviru kojih će se realizovati upravljački sistemi bazirani na primeni inteligentnih senzora i njihovih mreža.

Autor se unapred zahvaljuje svim studentima i kolegama koji budu svojim predlozima i sugestijama učinili da ovaj priručni, a nadajmo se u budućnosti i udžbenik bude kvalitetan i od koristi ne samo studentima master studija, već i široj stručnoj javnosti.

U Čačku, maja 2010. godine

Autor

This text book is fully supported by



Master Studies Development Program

financed by

Austrian

Development Cooperation

SADRŽAJ

1. UVOD	1-1
2. INTELIGENTNI SENZORI U SISTEMIMA UPRAVLJANJA	2-2
2.1 Akvizicija podataka	2-4
2.1.1 Kondicioniranje signala.....	2-5
2.1.2 Analogno/digitalna konverzija	2-7
2.1.3 Akvizicija udaljenih mernih signala.....	2-9
2.2 Problemi akvizicije podataka	2-14
2.3 Inteligentni senzori	2-15
3. PRIMERI INTELIGENTNIH SENZORA	3-1
3.1 Tipični primeri inteligentnih senzora	3-1
3.1.1 Senzori temperature.....	3-2
3.1.2 Senzori pritiska i ubrzanja.....	3-5
3.1.3 Senzori obrtaja.....	3-8
3.1.4 Inteligentni opto senzori.....	3-10
3.1.5 Senzori vlažnosti	3-11
3.1.6 Hemijski i gasni inteligentni senzori.....	3-12
4. PROJEKTOVANJE SISTEMA INTELIGENTNIH SENZORA	4-1
4.1 Zahtevi savremenih upravljačkih sistema	4-1
4.1.1 Pristup definisanju zahteva za upravljački sistem.....	4-4
4.2 Povezivanje inteligentnih senzora sa računarom.....	4-5
4.2.1 SPI magistrala	4-6
4.2.2 I ² C magistrala.....	4-8
5. MREŽE INTELIGENTNIH SENZORA	5-1
5.1 Protokoli za mreže bežičnih senzora	5-2
5.2 Povezivanje inteligentnih senzora	5-3
5.2.1 Fizički sloj	5-4
5.2.2 Sloj veze	5-5
5.2.3 Sloj mreže.....	5-6
5.3 Komunikacioni standardi u mrežama inteligentnih senzora	5-7
5.4 Primene bežičnih senzorskih mreža	5-8
5.4.1 Vojne primene	5-10
5.4.2 Primene vezane za okruženje	5-10
5.4.3 Medicinske primene	5-11
5.4.4 Primene u domaćinstvu	5-11
5.4.5 Industrijske primene.....	5-12
5.4.6 Druge komercijalne primene.....	5-12
5.5 Projektovanje senzorski mreža	5-13
5.5.1 Otpornost na greške.....	5-14
5.5.2 Skalabilnost	5-14
5.5.3 Cena proizvodnje.....	5-15
5.5.4 Hardverska ograničenja.....	5-15

5.5.5	Topologija senzorskih mreža	5-18
5.5.6	Okruženje	5-19
5.5.7	Prenosni medijum.....	5-19
5.5.8	Potrošnja energije.....	5-21

LITERATURA

SPISAK SLIKA

Oznaka	Tekst	Strana
<i>Slika 1.1</i>	<i>Tok izvršavanja upravljačkih funkcija</i>	1-3
<i>Slika 1.2</i>	<i>Paraleni i serijski prenos digitalnih signala</i>	1-4
<i>Slika 1.3</i>	<i>Centralizovano upravljanje udaljenim objektima</i>	1-5
<i>Slika 1.4</i>	<i>Lanac akvizicije upravljačkih parametara</i>	1-6
<i>Slika 2.1</i>	<i>Blok shema računarski baziranog upravljačkog sistema</i>	2-3
<i>Slika 2.2</i>	<i>Uprošćeni vremenski dijagram upravljačkog procesa</i>	2-5
<i>Slika 2.3</i>	<i>Ulazni blok sistema za akviziciju podataka</i>	2-7
<i>Slika 2.4</i>	<i>Greška usled aliasing - a</i>	2-8
<i>Slika 2.5</i>	<i>Anti – aliasing filtriranje</i>	2-9
<i>Slika 2.6</i>	<i>Mogući pristupi višestrukoj digitalizaciji</i>	2-9
	<i>(a) Multipleksiranje digitalnih podataka</i>	
	<i>(b) Multipleksiranje analognih podataka</i>	
<i>Slika 2.7</i>	<i>Principska shema Sample and Hold kola</i>	2-10
<i>Slika 2.8</i>	<i>Kolo za A/D konverziju sa vremenskim dijagramom relevantnih signala</i>	2-11
<i>Slika 2.9</i>	<i>Tipičan izgled strujne petlje 4 – 20mA</i>	2-12
<i>Slika 2.10</i>	<i>Izgled konektora DB25</i>	2-15
<i>Slika 2.11</i>	<i>RS – 485 mreža</i>	2-18
<i>Slika 2.12</i>	<i>Inteligentni senzor</i>	2-20
<i>Slika 2.13</i>	<i>Informacioni parametri frekventno/vremenskih senzora</i>	2-22
<i>Slika 3.1</i>	<i>Blok shema senzora temperature sa frekventnim izlazom</i>	3-3
<i>Slika 3.2</i>	<i>Shema aktivnog senzora brzine obrtanja</i>	3-10
<i>Slika 4.1</i>	<i>Osnovni model upravljanja procesima</i>	4-2
<i>Slika 4.2</i>	<i>Semantička distanca</i>	4-4
<i>Slika 4.3</i>	<i>Osnovna struktura SPI sistema</i>	4-6
<i>Slika 4.4</i>	<i>Primer SPI vremenskog dijagrama</i>	4-6
<i>Slika 4.5</i>	<i>SPI sistem sa četiri urešaja</i>	4-8
<i>Slika 4.6</i>	<i>Shematski prikaz I2C magistrale</i>	4-9
<i>Slika 5.1</i>	<i>Komponente senzorskog čvora</i>	5-16

SPISAK TABELA

Oznaka	Tekst	Strana
<i>Tabela 2.1</i>	<i>Otpornost bakarne žice</i>	2-13
<i>Tabela 2.2</i>	<i>Raspored signala na RS – 232 konektoru (DB25)</i>	2-15
<i>Tabela 2.3</i>	<i>Raspored signala na RS – 232 konektoru (DB9)</i>	2-15
<i>Tabela 3.1</i>	<i>Performanse nekih integrisanih temperaturnih senzora</i>	3-2
<i>Tabela 4.1</i>	<i>Režimi rada SPI interfejsa</i>	4-7
<i>Tabela 5.1</i>	<i>Struktura OSI referentnog modela</i>	5-3
<i>Tabela 5.2</i>	<i>Primeri bežičnih standarda za industrijske senzore</i>	5-8
<i>Tabela 5.3</i>	<i>Frekventni opsezi raspoloživi za ISM primene</i>	5-20

1.

UVOD

Buran razvoj tehnike i tehnologije uticao je na značajne promene u pristupu obrazovanju stručnjaka sposobnih da prihvate i primene tekovine pomenutog razvoja. Posebno značajan napredak je ostvaren u oblasti poluprovodničke tehnologije, što je uticalo na stvaranje mogućnosti da danas mogu realizovati elektronska kola velike funkcionalnosti i visokih performansi u pogledu brzine rada, malih gabarita i smanjene potrošnje električne energije potrebne za njihov rad. Razvoj poluprovodničke tehnologije se možda najbolje ispoljio na planu implementacije računarskih komponenata omogućivši dobijanje računara do nivoa jednog elektronskog kola.

Ovo samo po sebi ne bi imalo značaja da minijaturizacija računara nije imala za posledicu stvaranje mogućnosti primene računara u oblastima gde to ranije, pre svega zbog veličine i potrošnje nije bilo moguće. Kao karakteristične oblasti kod kojih je došlo do ekspanzije primene računara zahvaljujući primeni razvoja poluprovodničke tehnologije mogu se navesti telekomunikacije i upravljanje sistemima i procesima.

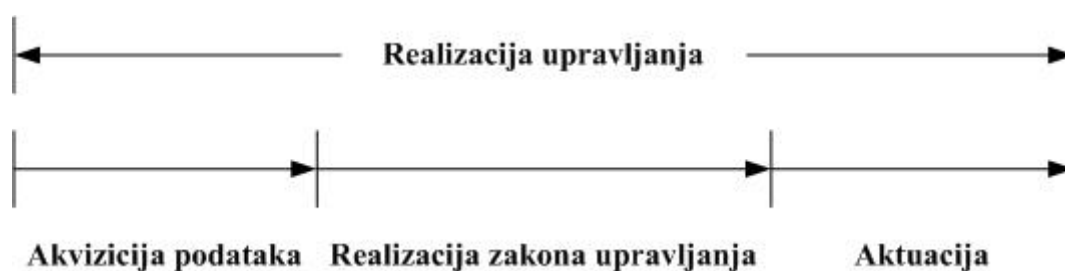
Kad su telekomunikacije u pitanju zahvaljujući minijaturizaciji računara došlo je do burnog razvoja mobilne telefonije, koja je dovela do konceptualne promene u ljudskim komunikacijama. Primena računara dovela je do prelaska sa analognih na digitalne komunikacije, što je omogućilo podizanje kvaliteta prenosa informacija i stvaranje mogućnosti da se ogromne količine podataka prenose na velika rastojanja velikom brzinom.

Mnijaturizacija računarskih komponenata i smanjenje potrošnje uticali su na promenu koncepta upravljanja sistemima i procesima, gde je takođe došlo do prelaska sa upravljanja na bazi obrade analognih signala na upravljanje korišćenjem digitalne obrade signala. Primena računara u sistemima upravljanja posebno je značajna sa aspekta ugrađene programabilnosti računara, što pruža mogućnost realizovanja visoko fleksibilnih upravljačkih sistema. Poseban napredak u primeni računara u sistemima upravljanja ostvaren je kada je postalo moguće takve, računarski bazirane upravljačke sisteme koristiti u uslovima primene upravljanja u realnom vremenu (Real Time Processing).

Posebno treba naglasiti da je zahvaljujući širenju primene računara u telekomunikacijama i sistemima upravljanja došlo do promene u pristupu projektovanja računara. Računari su se ranije projektovali kao autohtoni uređaji, kojima je ugrađivana određena funkcionalnost, koja se kasnije po potrebi koristila u okviru konkretne primene. Danas je pristup sasvim obrnut, jer zahvaljujući mogućnosti realizacije na bazi relativno jeftinih ASIC (Application Specific Integrated Circuit) ili SoC (System on Chip) integrisanih kola moguće je funkcionalnost računarskih komponenata „krojiti“ prema zahtevima konkretne primene.

Zahvaljujući burnom razvoju računarske tehnike, pre svega baziranom na razvoju poluprovodničke tehnologije došlo je do stvaranja uslova u kojima je došlo do preplitanja, pa čak i brisanja granica između pojedinih oblasti tehnike, kao što je to slučaj sa upravljanjem sistemima i telekomunikacijama. U takvim uslovima računarska tehnika sve više postaje faktor realizacije infrastrukture za realizaciju sistema u drugim oblastima. Realizacija samo zakona upravljanja bez posedovanja informacija o parametrima sistema na bazi kojih se on realizuje ili bez upravljanja određenim objektom ili procesom ne može se smatrati upravljačkim sistemom. Mogućnost dobijanja podataka o stanju udaljenih objekata i danas predstavlja jedan od ograničavajućih faktora u realizaciji kvalitetnih upravljačkih sistema. Ograničenja su uglavnom vezana za: kašnjenja u prenosu signala, mogućnost grešaka u prenosu signala, koje su najčešće uzrokovane postojanjem šuma, brojem signala koje treba preneti, itd. Korišćenje računara i ostvarivanje komunikacije između elemenata upravljačkog sistema na digitalnom nivou uticalo je da neka od napred nabrojanih ograničenja budu ublažena pa čak i eliminisana. Međutim, došlo je do pojave novih problema i ograničenja od kojih je svakako najvažnije pitanje konverzije analognih signala u njihov digitalni ekvivalent. Potreba za konverzijom unosi dodatno kašnjenje u proces prenosa podataka od mesta njihovog generisanja do bloka za realizaciju zakona upravljanja. Pri tome ne sme da se zaboravi da je veoma često, zbog potreba izvršenja upravljačke funkcije delovati na objekat upravljanja analognim signalom, što podrazumeva da je potrebno izvršiti konverziju digitalnog upravljačkog signala u

odgovarajući analogni signal. Jasno je da pomenute konverzije moraju biti ostvarene u vremenu u kome upravljački sistem mora da prihvati parametre za realizaciju zakona upravljanja, realizuje dati zakon i izvrši delovanje na objekat upravljanja u skladu sa dobijenim rezultatima. S obzirom da ovo vreme ne zavisi od toga kako je realizovan upravljački sistem mora se voditi računa o tome da njegovo trošenje na nove operacije dovodi do pojave ograničenja u pogledu načina realizacije standardnih upravljačkih funkcija. Ovaj problem može šire da se analizira korišćenjem dijagrama na slici 1.1.



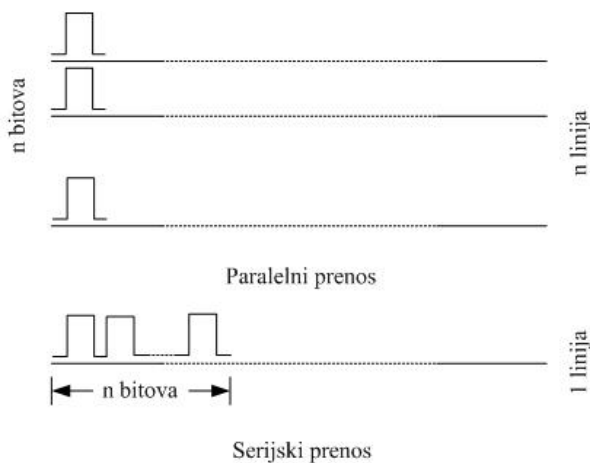
Slika 1.1 Tok izvršavanja upravljačkih funkcija

Pod akvizicijom podataka podrazumeva se postupak identifikovanja vrednosti parametara koji određuju ponašanje objekta i stanje procesa kojima se upravlja. Parametri su fizičke veličine što znači da osnovni korak u njihovoj akviziciji predstavlja merenje fizičke veličine. Merenje se ostvaruje korišćenjem odgovarajućeg senzora, koji na svom izlazu daje signal proporcionalan vrednosti merene fizičke veličine. S obzirom da se ovde govori o električnim sistemima za upravljanje sledi da je poželjno da izlaz senzora bude električni signal. Pošto to nije uvek moguće iza senzora mora da postoji odgovarajući uređaj koji će signal sa izlaza pretvoriti u odgovarajući analogni električni signal (napon, struju, ...). U zavisnosti od načina realizacije zakona upravljanja na ulaz odgovarajućeg bloka moguće je direktno dovesti električni signal koji sa sobom nosi informaciju o izmerenoj vrednosti upravljačkog parametra. U slučaju prenosa mernog signala na daljinu u analognom obliku u opštem slučaju može doći do njegovog slabljenja ili kvarenja usled delovanja šuma, što za posledicu ima da na ulaz bloka za realizaciju zakona upravljanja dolazi signal koji je različit od onog sa izlaza senzora/pretvarača. S druge strane treba naglasiti da je prenos signala u analognom obliku krajnje jednostavan, jer zahteva angažovanje minimalnog hardvera. Prenos mernih signala na daljinu može da se ostvari žično ili bežično – radio putem. Oba pristupa imaju svojih dobrih i loših strana, što se najčešće vrednuju kroz zahteve koje treba zadovoljiti pri izgradnji komunikacione infrastrukture, mogućnost postizanja određene brzine prenosa podataka, osetljivost signala koji se prenosi na smetnje, potrošnju električne energije pri svakoj od datih tehnika prenosa, daljinu na koju signali mogu da se prenose.

Imajući u vidu nedostatke prenosa signala u analognom obliku kao alternativa se nametnula potreba za digitalizacijom mernih signala i prenos informacija o upravljačkim parametrima procesa i objekata u digitalnom obliku. Naravno ovakav pristup je omogućio ublažavanje nekih problema koji su postojali kod prenosa analognih signala, pre svega povećanje pouzdanosti prenosa, ali i pojavu nekih novih problema, kao što je pitanje unošenja kašnjenja u prenos signala zbog potrebe da se izvrši proces analogno – digitalne konverzije.

Uvođenje digitalnog računara i baziranje realizacije upravljačkog sistema na obradi digitalnih signala donelo je sa sobom neke nove zahteve pri implementaciji procesa upravljanja. S jedne strane digitalni sistemi upravljanja omogućili su visok stepen fleksibilnosti, ali su doneli i probleme vezane za njihovu primenljivost u sistemima kod kojih je važan faktor vreme. Naravno treba ukazati i na usložnjavanje hardvera na kome se bazira celokupan informacioni lanac u kome se odvija digitalno upravljanje, jer se pojavljuje potreba za novim uređajima koji nisu bili neophodni kod kontinualnih sistema upravljanja. Srećna je okolnost da, zahvaljujući razvoju poluprovodničke tehnologije i minijaturizaciji elektronskih komponenata pomenuto usložnjavanje danas ne predstavlja manu digitalnih sistema upravljanja.

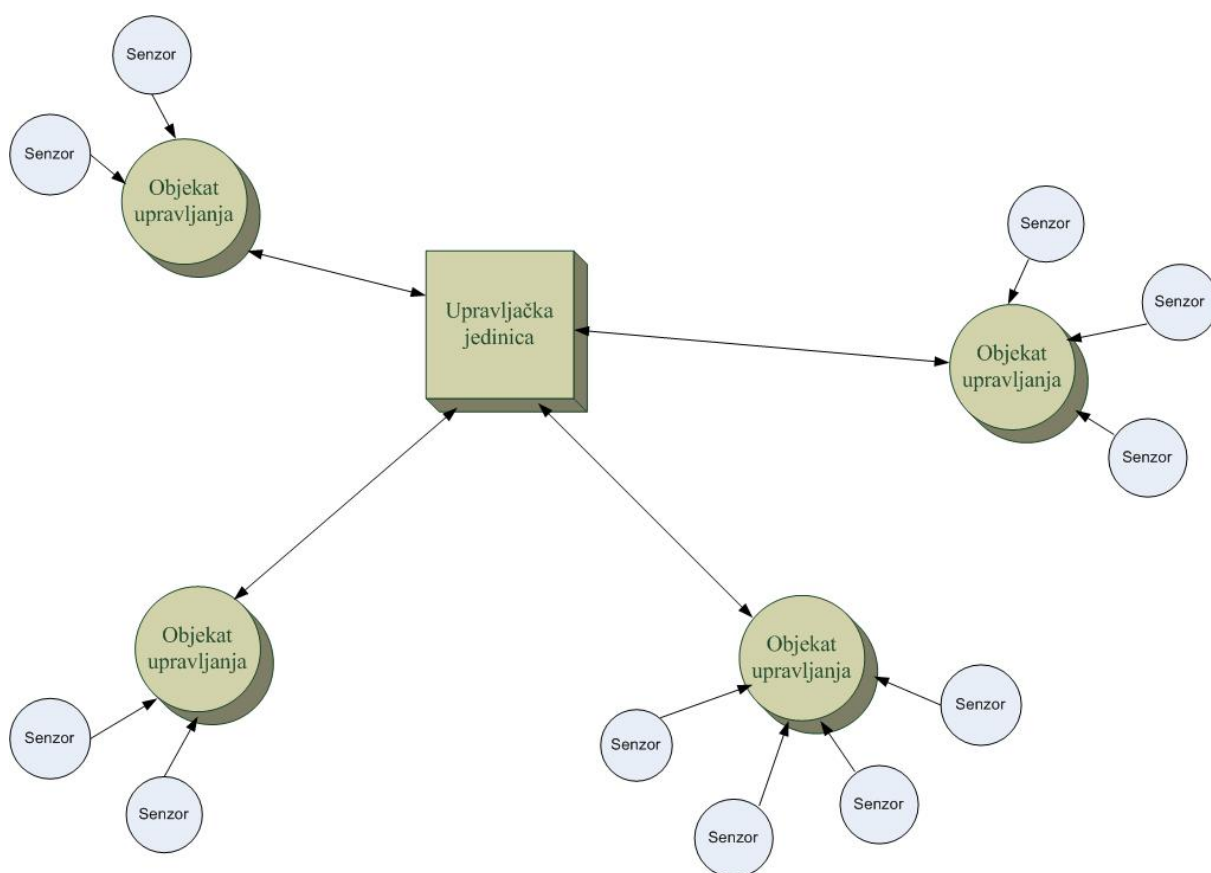
Rad sa podacima u digitalnom obliku ima značajnije reperkusije na proces komunikacije, jer se u principu umesto potrebe da prenosimo jedan analogni signal pojavljuje potreba za istovremenim prenosom n impulsa koji zajedno čine digitalnu predstavu izvornog analognog signala. Pojednostavljeno rečeno umesto jedne linije potrebno nam je n linija. Jasno je da to značajno poskupljuje realizaciju upravljačkog sistema. Alternativa ovakvom paralelnom prenosu svih bitova je njihov serijski prenos *bit po bit* jednom linijom. Međutim, takav pristup ima posledicu da se vreme prenosa jednog podatak od mesta generisanja do mesta korišćenja produžava, jer umesto jednog vremenskog intervala sada je za prenos potrebno n vremenskih intervala, kao što je prikazano na slici 1.2.



Slika 1.2 Paralelni i serijski prenos digitalnih signala

Izbor mogućih rešenja za realizaciju pojedinih segmenata upravljačkog sistema sa ciljem zadovoljenja određenih zahteva i postizanja željenih performansi je suština inženjerskog posla. Pri tome treba ukazati da razmatranje pogodnosti mogućih rešenja za konkretni sistem može imati širi značaj kroz definisanje zahteva za projektovanjem novih komponenata, što primena VLSI tehnologije, kroz ASIC i SoC koncept u potpunosti omogućava.

Problem komunikacije između pojedinih elemenata upravljačkog sistema, pre svega sa aspekta brzine implicirao je traženje novih koncepata u realizaciji upravljačkih sistema. Ova potreba došla je do izražaja u uslovima postojanja distribuiranih objekata čije ponašanje treba pratiti preko centralizovanog upravljačkog sistema, kao što je prikazano na slici 1.3.



Slika 1.3 Centralizovano upravljanje udaljenim objektima

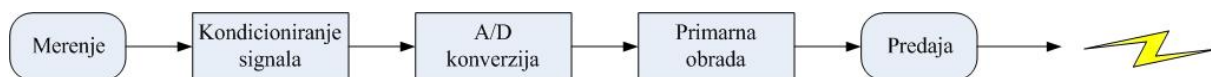
U zavisnosti od potrebe svaki objekat zahteva identifikovanje određenog broja parametara na bazi čije vrednosti se realizuje zakon upravljanja. Za merenje vrednosti upravljačkih parametara koriste se odgovarajući senzori, a u zavisnosti od načina njihovog funkcionisanaj javlja se potreba za pretvaranjem fizičke veličine koju na svom izlazu generiše senzor u analognu električnu veličinu. Ovo je neophodno u slučajevima kada je upravljački sistem – električni uređaj. Osim toga u zavisnosti od tipa upravljačkog sistema (analogni/digitalni) izlaz senzora/pretvarača mora da bude po potrebi i digitalizovan. Imajući

u vidu sve te potrebe, radi opštosti može se pretpostaviti da senzor sa slike 1.3 u sebi sublimira karakteristike senzora – pretvarača – A/D konvertora.

Upravljački sistem baziran na centralizovanom računarskom uređaju javljao se kao posledica korišćenja skupih računara velikih gabarita. Očigledno je da korišćenje takvih računara za upravljanje pojedinačnim objektima nije bilo racionalno. Međutim, i tada, ali i danas ovakav centralizovani upravljački sistem mora da se koristi kod upravljanja udaljenim objektima, čije je funkcionisanje predstavlja deo istog procesa. Odnosno kada se upravljanje nekim sistemom ostvaruje preko upravljanja međusobno uslovljenim ponašanjem objekata, posebno ako se radi o međusobno udaljenim objektima. Nije teško pretpostaviti da će upravljanje sistemom koji se sastoji od velikog broja udaljenih objekata sa većim brojem upravljačkih parametara zahtevati složenu komunikacionu infrastrukturu za povezivanje senzora sa upravljačkom jedinicom. Zanemarujući način prenosa informacija o upravljačkim parametrima treba konstatovati da se očekuje da te informacije na ulazu upravljačke jedinice moraju da zadovolje sledeće minimalne uslove:

- Da budu dovedene pravovremeno na ulaz upravljačke jedinice. Pod pravovremenosti se podrazumeva da su sve informacije o parametrima raspoložive u trenutku koji obezbeđuje da zakon upravljanja bude realizovan i generisani upravljački signali tako da se može izvršiti potrebna korekcija stanja sistema odnosno objekta;
- Podaci koji dolaze na ulaz upravljačke jedinice ne smeju da budu promenjeni pod delovanje eksternih faktora, pre svega šuma iz sredine kroz koju se vrši prenos signala koji nose informaciju.

Na slici 1.4 je prikazan niz operacija koje se izvršavaju u lancu akvizicije upravljačkih parametara počev od merenja odgovarajućih fizičkih velična do njihovog prenosa do upravljačke jedinice.



Slika 1.4 Lanac akvizicije upravljačkih parametara

Ako se pogleda skup operacija koje se izvršavaju u lancu akvizicije upravljačkih parametara može se zaključiti da se on može učiniti autonomnim ako se izvrši njihova lokalizacija primenom računarskih komponenata. U principu to znači da se primarna obrada vrednosti upravljačkih parametara ostvaruje na jednom više nivou, koje pre svega podrazumeva proveru odstupanja njihove vrednosti u odnosu na zadate vrednosti ili u kontekstu vrednosti dobijenih prethodnim merenjima. Zahvaljujući ovakvoj primarnoj obradi moguće je potrebu za komunikacijom sa upravljačkom jedinicom smanjiti samo na slučajeve

kada je odstupanje vrednosti upravljačkih parametara takvo da se zahteva aktiviranje upravljačke jedinice. Smanjenjem intenziteta komunikacije senzora sa upravljačkom jedinicom ublažavaju se zahtevi u pogledu performansi komunikacionog podsistema upravljačkog sistema.

Lokalizacijom primarne obrade vrednosti upravljačkih parametara neposredno na nivou senzora dolazi se do pojma **inteligentnog senzora** čime se u oblast upravljanja procesima uvodi nova dimenzija posebno u slučajevima kada se upravljanje ostvaruje u uslovima prostorno distribuiranih objekata nad kojima se sprovodi nadzor i upravljanje. Zadatak ovog priručnika je da čitaoca uvede u problematiku inteligentnih senzora.

2.

INTELIGENTNI SENZORI U SISTEMIMA UPRAVLJANJA

Razvoj tehnologija, a posebno poluprovodničke uticao je da dođe do opšteg napretka na planu tehnike, što se možda najbolje vidi na primeru računarske tehnike. Nepotrebno je praviti paralele između karakteristika i performansi računara, sa početka računarske ere i današnjih računara, jer su takva poređenja danas postala krajnje bizarna. Međutim, kada su računari u pitanju treba ukazati na promenu koja se na tom planu desila tokom poluvekovne istorije računarske tehnike. U početku računari su se projektovani kao autohtoni uređaji, koji su u različitim oblastima ljudske delatnosti bili korišćeni u skladu sa kompatibilnošću između zahteva primene i karakteristika računara. Pri tome značajan ograničavajući faktori u primeni računara bili su njihovi gabaritni, potrošnja električne energije, pouzdanost, a naravno i cena. Autohtonost računara ogledala se u činjenici da su prvi računari bili projektovani kao uređaji opšte namene, prvenstveno namenjeni naučno – tehničkim, a nešto kasnije i poslovnim proračunima.

Skoro dramatičan razvoj poluprovodničke tehnologije uticao je na bitnu promenu u pristupu projektovanju računara. Pored toga što je bio omogućen razvoj računara boljih performansi uz manju cenu, računari su počeli sve više da se projektuju u skladu sa zatevima konkretne primene, a to je značilo da su sve više postajali specijalizovani uređaji. Istovremeno sa poboljšanjem performansi, smanjenjem gabarita i cene došlo je do širenja oblasti primene računara.

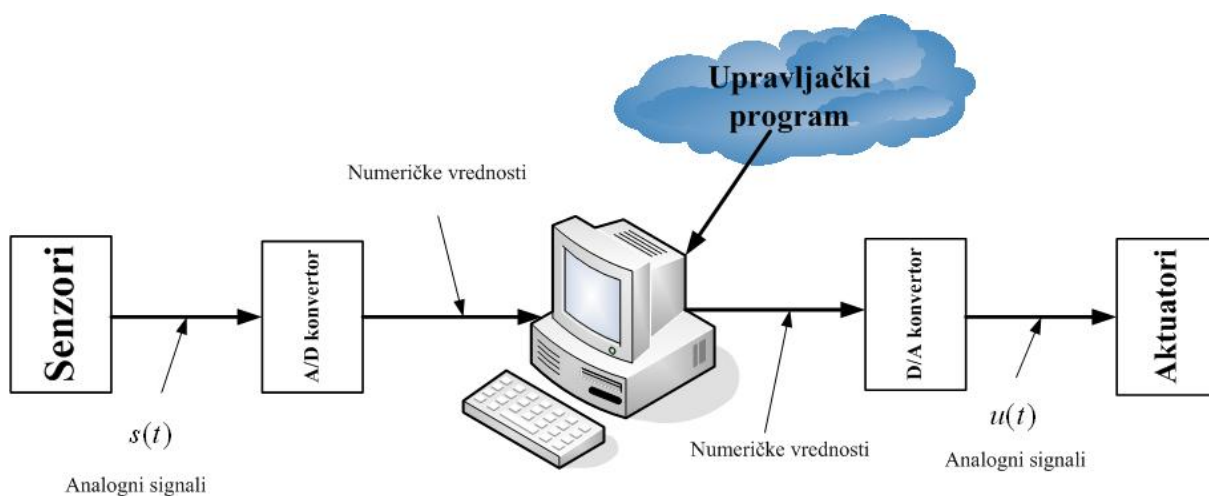
Posebno treba naglasiti primenu računara u oblasti nadzora i upravljanja fizičkim procesima. Procesiranje signala koji odgovaraju fizičkim procesima i njihovim parametrima ima određene osobenosti koje prvi digitalni računari nisu mogli da zadovolje. U prvom redu signali koji se identifikuju pri praćenju fizičkih procesa, tj. merenje odgovarajućih fizičkih veličine ne podrazumeva rad sa električnim signalima, što je preduslov da oni budu tretirani primenom računara. S druge strane, čak i da se merenjem neke fizičke veličine, kao njen reprezentant dobije električni signal on je po svojoj prirodi analogni, što je nekompatibilno sa načinom funkcionisanja digitalnih računara. S druge strane identifikacija određene fizičke veličine, tj. njeno merenje u opštem slučaju ne podrazumeva da će vrednost date fizičke veličine biti predstavljena električnim signalom. Shodno tome praćenje ponašanja neke fizičke veličine korišćenjem računara podrazumeva najmanje dve operacije:

- Predstavljanje vrednosti merene fizičke veličine u obliku električne veličine;
- Transformisane dobijene električne veličine u oblik koji je pogodan za obradu korišćenjem digitalnog računara.

Za merenje vrednosti različitih fizičkih veličina koriste se uređaji koji se u opštem slučaju nazivaju **senzori**. Iz fizike je poznato da se za merenje temperature može koristiti efekat širenja živinog stuba na bazi čega su konstruisani živini termometri. Takođe, za merenje temperature može da se koristi i efekat savijanja bimetalnog vlakna. Međutim, ni u jednom od od pomenutih načina merenja temperature, njena veličina nije izražena električnom veličinom. Shodno tome može da se postavi pitanje primenljivosti ovih načina merenja u sistemima za računarsko praćenje temperature. Međutim, postoje efekti koji omogućavaju da se promena temperature direktno predstavlja električnim veličinama. Najšire se koristi tzv. termoelektrični efekat, koji je otkrio Tomas Johan Sibek (Thomas Johann Seebeck) 1821. godine pa se još naziva i Sibekov efekat. Kada se spoj dva metala izloži temperaturi na krajevima kola se pojavljuje potencijalna razlika, koja je proporcionalna temperaturi spoja. Ovakve kombinacije dva metala koji se koriste za merenje temperature na bazi termoelektričnog efekta nazivaju se *termoelementi* ili *termoparovi*. Za merenje temperature mogu da se koriste i tzv. termo zavisni otpornici kod kojih se otpornost menja u zavisnosti od temperature kojoj su izloženi. U ovom slučaju potrebno je obezbediti merenje veličine otpornosti. Najjednostavniji način merenja otpornosti bazira se na indirektnom merenju, koje se zasniva na merenju neke druge električne veličine proporcionalne veličini otpornosti. Npr. ako se kroz ovakav temperaturno zavisan otpornik uspostavi konstantna struja poznate jačine potencijalna razlika na krajevima otpornosti biće direktno proporcionalna veličini otpornosti, a to znači i temperaturi kojoj je ovakva otpornost izložena $\theta \approx u = R(\theta)I_{const}$. Na sličan način temperatura može da se meri ako se na krajeve temperaturno

zavisnog otpornika priključi izvor konstantnog napona. U ovom slučaju struja kroz otpornost zavisice od temperature kojoj je izložena otpornost, $\theta \approx i = \frac{1}{R(\theta)} U_{const}$.

Od svih električnih veličina koje bi na svom izlazu dali senzori najpogodniji za računarsko praćenje vrednosti fizičkih veličina su **napon** ili **struja**. S obzirom da su ove veličine u svom izvornom obliku kontinualne prirode potrebno je da na ulazu u digitalni računar budu konvertovane u digitalni oblik. U principu senzori fizičkih veličina na svom izlazu ne moraju da daju električni signal, što zahteva da u sistemu za merenje pored takvog senzora mora da postoji **pretvarač**, čiji je zadatak da promene koje se dešavaju unutar senzora pretvori u odgovarajući električni signal.



Slika 2.1 Blok šema računarski baziranog upravljačkog sistema

Proces upravljanja nekim fizičkim procesom podrazumeva generisanje određenog upravljačkog signala kojim se deluje na parametre procesa. Po pravilu upravljački signali su električne prirode i njihovo neposredno delovanje na željeni parametar procesa ostvaruje se preko uređaja koji se nazivaju **aktuatori**. U slučaju da je potrebno da upravljački signal bude kontinualan potrebno je da se digitalna informacija na izlazu računara konvertuje u odgovarajući analogni električni signal.

Praktična primena računara u sistemima upravljanja procesima ogleda se u realizaciji upravljačke funkcije. To podrazumeva da se na osnovu trenutnih vrednosti relevantnih parametara upravljanog procesa izračunavaju vrednosti upravljačkog signala čijim delovanjem će se uticati na ponašanje procesa u budućnosti.

Na slici 2.1 prikazana je uprošćena šema primene digitalnih računara u procesu nadgledanja i upravljanja fizičkim procesima. Na njoj su prikazani svi relevantni uređaji koji se koriste za realizaciju jednog ovakvog sistema.

Signal sa izlaza senzora ili dobijen korišćenjem pretvarača, $s(t)$ najčešće je kontinualnog karaktera. Da bi on bio prihvaćen i obrađen od strane računara neophodno je da bude izvršena analogno – digitalna konverzija. U postupku analogno – digitalne konverzije kontinualni signal se predstavlja nizom numeričkih vrednosti, koje odgovaraju amplitudama analognog signala posmatranim u vremenskim trenucima koji obezbeđuju da data numerička vrednost validno predstavlja posmatrani signal. Analogno – digitalna konverzija se bazira na mogućnosti diskretizacije signala zasnovanoj na *Teoremi o odmeravanju*, koja se može iskazati na sledeći način:

Ako kontinualna vremenska funkcija $f(t)$ ima spektar koji se nalazi u intervalu od 0 do f_{max} onda je ta funkcija u potpunosti definisana svojim trenutnim vrednostima uzetim u vremenski ekvidistantnim tačkama koje obrazuju niz čiji je interval $\Delta t = T_s = \frac{1}{2f_{max}}$.

Teorema o odmeravanju je poznata i kao Nikvistov (Nyquist) uslov odmeravanja, a učestanost odmeravanja $f_s = \frac{1}{T_s} = 2f_{max}$ naziva se i Nikvistova učestanost, a interval u kome se vrši odmeravanje T_s naziva se periodom odmeravanja. S druge strane Klod Šenon (Claude Shannon) definisao je uslove pod kojima je moguće izvršiti rekonstrukciju originalnog kontinualnog signala iz njegovih odmeraka. Ova teorema je važna, jer ona ukazuje na uslove pod kojima diskretizovani i na bazi njega digitalizovani signal „verno“ predstavljaju originalni kontinulani signal. Šenonova teorema glasi:

Ako je kontinualni vremenski signal $x(t)$ frekvencijski ograničen sa f_{max} onda se on može tačno rekonstruisati iz svojih odmeraka $x[n]=x(nT_s)$, pod uslovom da je učestanost odmeravanja f_s veća od $2f_{max}$.

Iz Šenonove teoreme jasno sledi da je za digitalizaciju signala neophodno da on bude frekvencijski ograničen. Povoljna je okolnost da većina signala u prirodi ima takav frekvencijski spektar, tj. da signali, po pravilu nemaju značajnijih komponenta iznad neke maksimalne frekvencije, što omogućava da se njihov frekvencijski opseg može da ograniči. Jasno je da minimalna učestanost odmeravanja zavisi od frekvencijskih komponenata koje sadrži kontinualni signal. Kao dobar primer može da posluži zvučni signal. S obzirom da ljudsko uho može da čuje zvučne signale koji se nalaze između 20Hz i 20kHz digitalizacija signala za potrebe snimanja na CD realizuje se odmeravanjem učestanošću od 44.1kHz što je malo više od 2 puta 20kHz, što je najveća učestanost koju ljudsko uho može da čuje.

Jedan od najznačajnijih aspekta primene računara u sistemima za nadzor i upravljanje procesima predstavlja mogućnost pamćenja informacija stanju procesa tokom vremena odnosno realizacija zakona upravljanja na bazi računarskog programa. Programskom

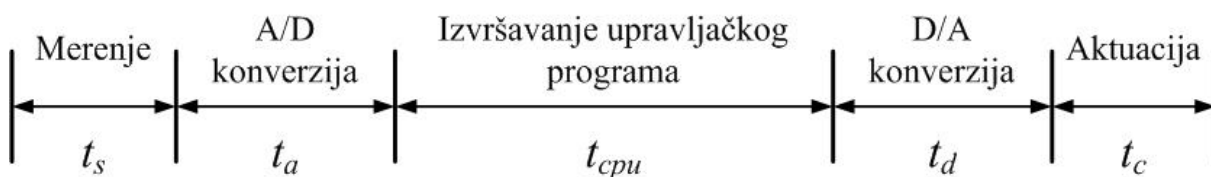
realizacijom zakona upravljanja postiže se visok stepen fleksibilnosti celokupnog sistema upravljanja, jer nije potrebna izmena u hardveru, kao kod klasičnih upravljačkih sistema.

Pošto upravljački program na svom izlazu generiše niz diskretnih upravljačkih vrednosti, u slučaju kada je na aktuator, kao izvršni uređaj u lancu upravljanja, potrebno delovati kontinualnim električnim signalom neophodno je izvršiti digitalno – analognu konverziju. U postupku digitalno – analogne konverzije vrši se transformacija niza numeričkih vrednosti u odgovarajući analogni električni signal. Pored fleksibilnijeg upravljačkog sistema digitalni računari omogućavaju realizaciju upravljačkih funkcija višeg nivoa, a takođe i korišćenje složenijih algoritama. Čak se može reći da većina savremenih složenih upravljačkih sistema ne može da realizuje bez primene digitalnih računara.

Maksimalna učestanost u frekvencijskom spektru signala koji odgovaraju određenom parametru nadgledanog odnosno upravljanog procesa značajna je i sa aspekta kašnjenja koje se može uneti u proces obrade informacija o datom procesu. Ovo je posebno značajno sa aspekta primene računara, jer je u intervalu između dva odmeravanja signala, u principu potrebno:

- Izvršiti digitalizaciju uzetog odmerka, tj. izvršiti analogno – digitalnu konverziju;
- Obraditi dobijenu numeričku vrednost signala u skladu sa definisanim zakonom upravljanja i generisati odgovarajuću numeričku vrednost upravljačkog signala;
- Istovremeno sa realizacijom zakona upravljanja, po pravilu je potrebno izvršiti i pamćenje numeričke vrednosti koja predstavlja parametar(e) nadgledanog/upravljanog procesa;
- U slučaju da upravljački signal mora da bude kontinualan mora se izvršiti i odgovarajuća digitalno – analogna konverzija.

Shodno ovome značajan aspekt primene digitalnih računara u nadgledanju i upravljanju fizičkim procesima predstavlja i odnos brzine rada računara i zahteva obrade signala koji karakterišu odgovarajući fizički proces. Od trenutka kada se pomoću senzora izmere vrednosti parametara koji karakterišu proces kojim se upravlja do trenutka delovanja preko aktuatora na proces, protiče određeno vreme, kao što je prikazano na slici 2.2.



Slika 2.2 Uprošćeni vremenski dijagram upravljačkog procesa

Vremena t_s i t_c odgovaraju operacijama koje postoje i u slučaju klasičnog i računarskog upravljanja procesima. Međutim, kod klasičnog upravljanja vremena t_a , t_{cpu} i t_d ne postoje, što znači da se kod računarskog upravljanja unosi kašnjenje u proces upravljanja. Zbog toga delovanje upravljačkog signala na proces posredstvoma aktuatora može da bude neblagovremeno, jer će se u intervalu generisanja upravljačkog signala stanje procesa toliko promeniti da ga upravljački signal ne može dovesti u željeno stanje. Zbog toga kod računarski podržanih upravljačkih sistema dodatno dolazi do problema upravljanja u **realnom vremenu** (Real – time Control) tj. nemogućnosti upravljačkog sistema da odgovori na brze promene parametara upravljanog procesa.

Kod primene digitalnih računara u upravljanju ne sme se zanemariti ni aspekt gabarita samih računara i različite električne karakteristike, kao što su npr. naponi napajanja odnosno potrošnja električne energije. Očigledno je da su tek zahvaljujući poluprovodničkoj revoluciji i pojavi mikroprocesora i mikrokontrolera stekli uslovi da računari svojim gabaritima i električnim karakteristikama budu primenljivi za upravljanje kod najšireg skupa procesa odnosno objekata upravljanja koji njima odgovaraju.

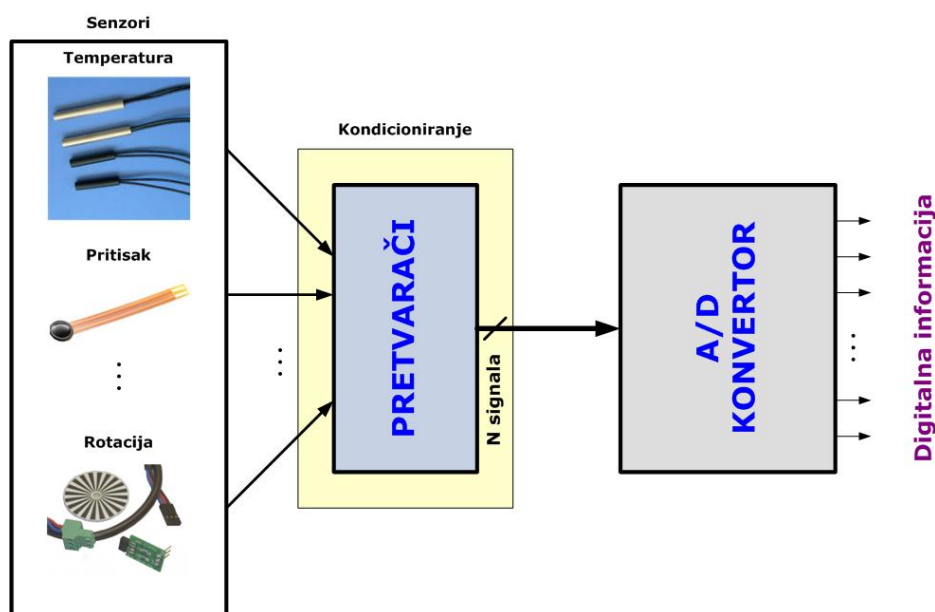
Takođe treba ukazati i na činjenicu da je razvoj komunikacionih tehnologija omogućio da se stvore uslovi za široku primenu računara u upravljanju procesima. Na to je presudno uticao razvoj standarda koji se primenjuju u povezivanju računara u računarske mreže. Posebno treba ukazati na tzv. **bežične računarske mreže**, kod kojih se komunikacija među elementima mreže ostvaruje radio putem. Primena bežičnih računarskih mreža omogućila je upravljanje procesima kod kojih su izvori parametara i objekti upravljanja međusobno udaljeni.

2.1 Akvizicija podataka

Sistem za akviziciju podataka (Data Acquisition System) predstavlja spregu između realnog sveta, karakterisanog određenim fizičkim parametrima i sveta u kome se vrši obrada tih parametara i po potrebi upravlja realnim svetom. Naglasak na digitalnim sistemima za obradu podataka i upravljanje učinio je da funkcija sistema za akviziciju podataka postane još važnija. Zahvaljujući reativno jeftinim uređajima, koji poseduju visok nivo tačnosti i koji su pored svoje složenosti relativno jednostavni za implementaciju, mikroracunari bazirani na mikroprocesorima i mikrokontrolerima postali su dominantni na planu realizacije složenih mernih i upravljačkih funkcija.

Moderno industrijsko društvo u velikoj meri svoju produktivnost duguje sistemima upravljanja baziranim na računarskoj podršci. Skoro da nema oblasti industrije u kojoj se danas ne koriste takvi automatski sistemi.

Posmatrano sa strane računara moglo bi se zaključiti da je u lancu akvizicije podataka najvažnija komponenta A/D konvertor (Analog – to – Digital Converter) koja obezbeđuje da na ulaz računara dolazi povorka numeričkih vrednosti koje odgovaraju ponašanju određenog fizičkog parametra, umesto signala u izvornom obliku. S obzirom da su sistemi upravljanja po pravilu bazirani na električnim uređajima nameće se potreba da signal na ulazu A/D konvertora takođe bude električne prirode. To znači da bi senzor, kojim se registruje određena fizička veličina na svom izlazu trebalo da generiše električni signal, što nažalost zbog prirode samog senzora nije uvek moguće. Da bi se obezbedilo da na ulaz A/D konvertora dođe električni signal u slučajevima kada to ne obezbeđuje sam senzor na njegov izlaz se postavlja uređaj koji fizičku veličinu koja je registrovana senzorom najčešće pretvara u analogni električni signal. Reč *najčešće* nije upotrebljena slučajno, jer postoje situacije kada sam uređaj za pretvaranje na svom izlazu generiše direktno digitalne signale. Uređaji za predstavljanje neke fizičke veličine analognim električnim signalom jednostavno se nazivaju **pretvarači** (Transducers). Shodno tome ulazni deo svakog računarski podržanog sistema za nadzor i upravljanje procesima može da se predstavi šemom datom na slici 2.3.



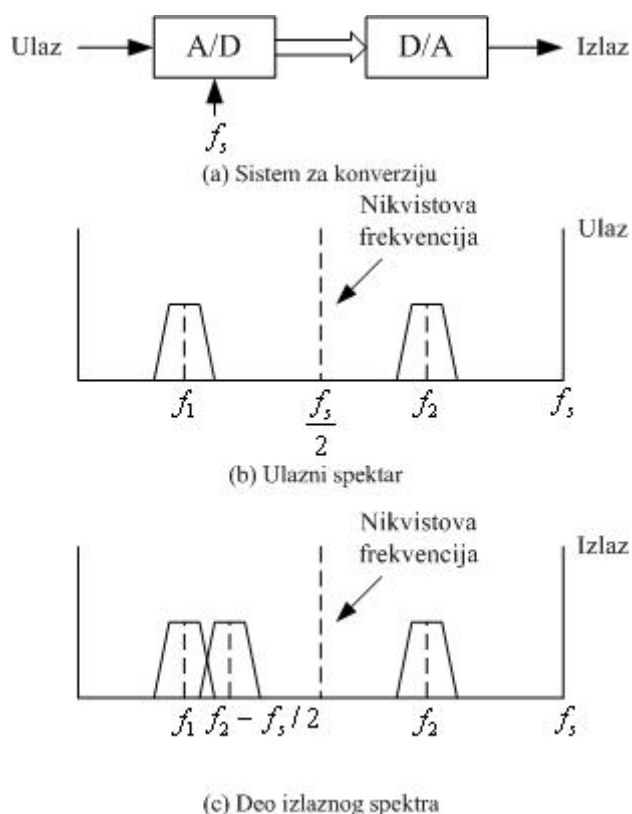
Slika 2.3 Ulazni blok sistema za akviziciju podataka

2.1.1 Kondicioniranje signala

S obzirom da se neki proces opisuje sa većim brojem parametara sledi da svakom od njih odgovara najmanje jedan signal koji posle digitalizacije treba dovesti na ulaz računara. To bi moglo da znači da za svaki od njih treba obezbediti poseban A/D konvertor, čiji izlaze zatim treba multipleksirati na ulaznu magistralu podataka da bi mogli da budu prihvaćeni od strane računara. Alternativa ovakvom pristupu bi bilo multipleksiranje analognih signala i

korišćenje jednog A/D konvertora. Kod identifikacije vrednosti parametara procesa korišćenjem senzora može se desiti da nivo dobijenog električnog signala bude mali što zahteva njegovo pojačavanje. Takođe, signali na izlazu senzora mogu da budu praćeni signalom šuma, što podrazumeva njegovo filtriranje da bi se dati šum eliminisao. Postojanje frekvencijskih komponentata u spektru realnih signala, koje nisu od značaja pružaju mogućnost da se propuštanjem signala kroz niskopropusni filter ograniči njegov spektar i stvore uslove da se na njega mogu primeniti teoreme o odmeravanju i Šenonova teorema. Sve ove operacije nad signalom jednim imenom se nazivaju **kondicioniranje** signala, čime se stvaraju uslovi za uspešnu digitalizaciju signala i njihovu računarsku obradu.

U okviru kondicioniranja signala značajno je pomenuti korišćenje filtera u cilju sprečavanja tzv. *aliasing* – a signala – fenomena koji se pojavljuje kada je signal odmeravan suviše sporo. Nikvistov uslov odmeravanja definiše da kada se vrši odmeravanje analognih signala, bilo koja komponenta, čija je učestanost veća od jedne polovine učestanosti odmeravanja, će se pojaviti u odmeravanom podatku kao niskofrekventni signal. Da bi se objasnio problem *aliasing* – a može da posluži slika 2.4.

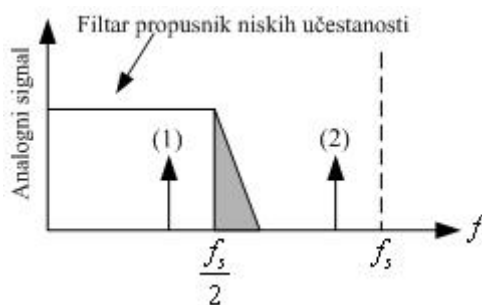


Slika 2.4 Grška usled *aliasing* – a

Iako šema koverzionog sistema prikazana na sklici 2.4a nije realna ona može da se iskoristi sa upoznavanjem problema *aliasing* – a. Ulazni signal sadrži dva frekventna spektra centrirana oko f_1 i f_2 , kao što je prikazano na slici 2.4b. Izlazni spektar u slučaju ovakvog

systema je prikazan na slici 2.4c. Pod Nikvistovom učestanošću se podrazumeva polovina učestanosti odmeravanja i koja predstavlja najvišu učestanost koja može da se procesira u konverzionom sistemu, a da pri tome ne dođe do izobličenja spektra. Spektar oko f_2 , koja je viša od Nikvistove učestanosti postoje i u izlaznom spektru, ali se takođe pojavljuju u izlaznom spektru i na nižoj učestanosti $f_2 - f_s/2$. Međutim, ova učestanost predstavlja izobličenje spektra, koje se naziva *aliasing* učestanosti ulaznog signala. Pošto u ovom slučaju ne postoji verna reprodukcija ulaznog signala. Ako se u ovakvim situacijama ne postupa ispravno može da dođe do značajnih izobličenja signala.

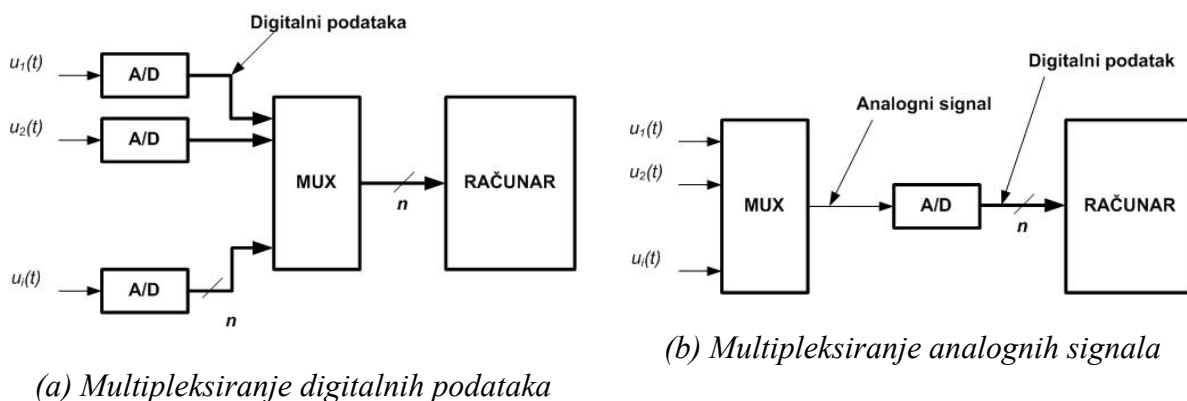
Ova distorzija signala može da se prevaziđe odstranjivanjem bilo koje komponente signala koja je iznad polovine učestanosti odmeravanja sa niskopropusnim filtrom pre uzorkovanja signala, kao što je prikazano na slici 2.5.



Slika 2.5 Anti – aliasing filtriranje

2.1.2 Analogno/digitalna konverzija

Signali, nad kojima je izvršeno kondicioniranje u toku daljeg procesiranja, da bi mogli da budu obrađeni pomoću digitalnih računara moraju da budu digitalizovani. Za to se koriste **analogno/digitalni konvertori**. U opštem slučaju na ulaz akvizicionog sistema dolazi veći broj signala tako da se postavlja problem kako realizovati višestruku digitalizaciju. Moguća rešenja prikazana su na slici 2.6a i 2.6b.



(a) Multipleksiranje digitalnih podataka

(b) Multipleksiranje analognih signala

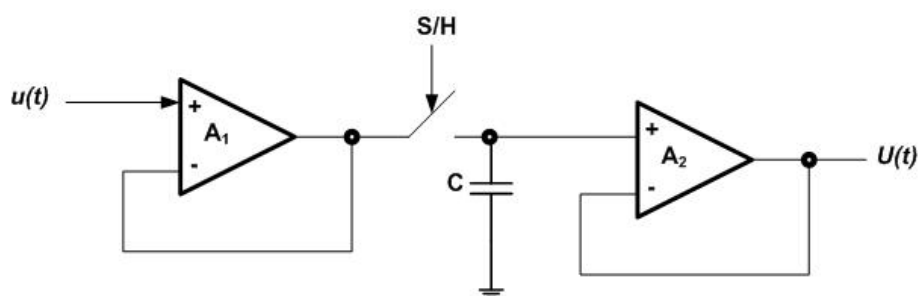
Slika 2.6 Mogući pristupi višestrukoj digitalizaciji

Očigledno je da digitalizacija više analognih signala zahteva multipleksiranje:

- Digitalnih podataka dobijenih u postupku A/D konverzije, kao što je prikazano na slici 2.6a;
- Analognih signala, kao što je prikazano na slici 2.6b.

S obzirom da broj analognih signala koje je potrebno obuhvatiti postupkom akvizicije varira od slučaja do slučaja kao bolje rešenje za analogno/digitalnu konverziju nameće se pristup prikazan na slici 2.6b. Jednostavno, racionalnije je razviti sklop za analogno/digitalnu konverziju sa rezervom u pogledu broja ulaza u multiplekser analognih signala, odnosno odgovarajućim blokom za upravljanje njime, nego praviti procenu na nivou broja A/D konvertora.

S druge strane proces digitalizacije analognih signala bazira se na prethodnoj diskretizaciji, koja de facto predstavlja proces odmeravanja analognog signala u skladu sa Nikvistovim pravilom. Za diskretizaciju analognih signala se koriste tzv. „uzmi i zadrži“ (Sample and Hold) kola. Ovaj postupak pri digitalizaciji analognih kola je neophodan da bi se obezbedilo da vrednost odmerka uzetog od analognog signala bude konstantna u toku postupka njegove digitalizacije, tj. pretvaranja u odgovarajuću digitalnu vrednost. Na slici 2.7 je data principna šema izgleda Sample and Hold kola.

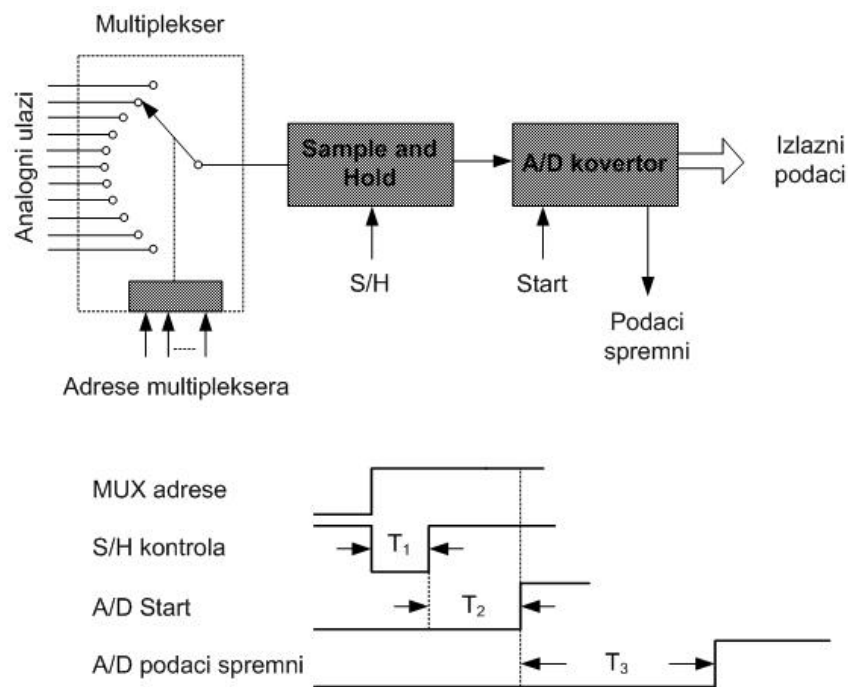


Slika 2.7 Principna šema Sample and Hold kola

U opštem slučaju Sample and Hold kolo se može realizovati na bazi običnog kondenzatora, na čiji ulaz se preko prekidača, kojim se upravlja S/H signalom dovodi analogni signal koji se digitalizuje. Zatvaranjem prekidača dolazi do punjenja kondenzatora na trenutni nivo analognog signala. Nakon toga se prekidač otvara, a proces A/D konverzije može da započne, jer je kondensator vezan na ulaz A/D konvertora. Kondensator je u vreme kada je prekidač zatvoren povezan na izlaz analognog multipleksera koji ima određenu izlaznu otpornost koja onemogućava da se napon na kondensatoru brzo približi trenutnoj vrednosti analognog signala. S druge strane kondensator je povezan na ulaz A/D konvertora koji takođe ima konačnu ulaznu otpornost što znači da u toku konverzije dolazi do smanjenja napona na kondensatoru, a time se unosi greška u proces konverzije. Idealno bi bilo kada bi

izlazna otpornost multipleksera bila jednako 0, a ulazna otpornost A/D konvertora bila ∞ . Da bi se stvorili uslovi bliski idealnim Sample and Hold kolu na ulazu i izlazu sadrži kola koja imaju zadatak da transformišu otpornosti elemenata u lancu akvizicije, kao što je prikazano na slici 2.7. Ta kola su realizovana na bazi operacionih pojačavača jediničnog pojačanja sa povratnom spregom, koji imaju jako malu ulaznu otpornost i veoma veliku izlaznu otpornost.

Imajući u vidu prethodna razmatranja, koja podrazumevaju da se kod akvizicije više analognih signala koristi jedan A/D konvertor uz multiplekser analognih signala, principna šema kola za A/D konverziju u sistemu za računarsku akviziciju podataka, može da se prikaže kao na slici 2.8.



Slika 2.8 Kolo za A/D konverziju sa vremenskim dijagramom relevantnih signala

Za bolje razumevanje rada kola za A/D konverziju na slici 2.8 prikazan je i vremenski dijagram relevantnih signala, kojima se kontroliše njegov rad:

- Signali na ulazu u analogni multiplekser kojima se definiše ulaz sa koga će se selektovati analogni signal za digitalizaciju – **Adrese multipleksera**;
- Signal za kontrolu Sample and Hold kola – **S/H**;
- Signal za startovanje procesa A/D konverzije – **Start**;
- Signal koji ukazuje da je proces A/D konverzije okončan i da su podaci na njegovom izlazu spremni za dalje procesiranje – **Podaci spremni**.

Po okončanju procesa A/D konverzije računar može da preuzme dobijenu numeričku vrednost sa izlaza A/D konvertora i izvrši njenu obradu ili je zapamti radi kasnije obrade. Na taj način postupak akvizicije podataka se okončava. U prikazu postupka akvizicije mernih

podataka u obzir nije uzeta mogućnost da izvor analognog signala bude udaljen od računara u kome treba da se procesira njegov digitalni ekvivalent.

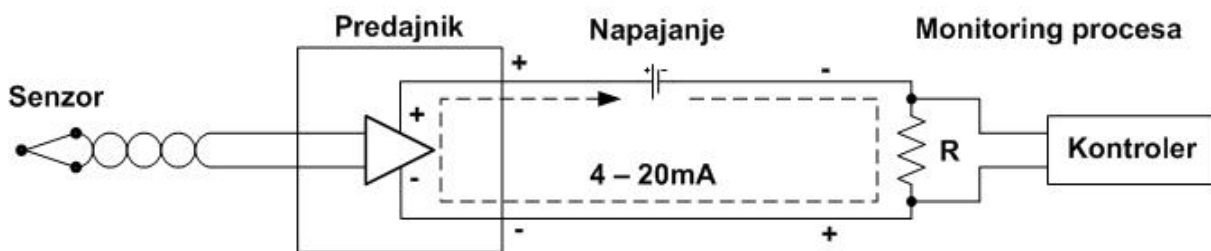
2.1.3 Akvizicija udaljenih mernih signala

U praksi postoji realna mogućnost da izvor mernog signala bude udaljen od računara koji treba da realizuje njegovu akviziciju. U takvim slučajevima postavlja se pitanje kako obezbediti signal bez slabljenja ili superponiranja šuma, što bi dovelo do njegove degradacije bude prosleđen računaru. Jasno je da informacija o mernom signalu može biti prenet na dva načina:

1. U osnovnom, tj. analognom obliku, što podrazumeva da će se A/D konverzija izvršiti neposredno na ulazu u računar;
2. U digitalnom obliku, što podrazumeva da se A/D konverzija izvršava na mestu generisanja analognog mernog signala.

U prvom slučaju ako se prenos vrši u obliku naponskog signala rastojanje na koje se signal može preneti ograničeno je slabljenjem koje će ovakav signal pretrpeti pri prenosu. Naime ako se ne koriste uređaji sa visokim ulaznim impedansama, pri prenosu naponskih signala na velika rastojanja signal do prijemnika dolazi oslabljen proporcionalno otpornosti linija za prenos i konektora. S druge strane instrumenti sa visokim impedansama mogu da budu osetljivi na šum, koji se superponira korisnom signalu pošto linije za prenos na daljanu često prolaze pored izvora elektromagnetnog zračenja. Za samnjenje uticaja šuma mogu da se primene oklapljene prenosne linije, ali njihova visoka cena može da bude ograničavajući faktor prenosa signala na velika rastojanja.

Alternativa ovom prenosu bila bi ako bi se umesto naponskog prenosio ekvivalentni strujni signal. Radi se o uobičajenoj tehnici prenosa analognih signala na veća rastojanja korišćenjem strujnog signala u opsegu od 4 – 20mA, što podrazumeva prethodnu konverziju izvornog naponskog u dati strujni signal. Ovakav pristup prenosa signala od senzora do mesta gde se vrši njihova obrada, posebno u industrijskim uslovima, poznat je pod nazivom **strujna petlja 4 – 20mA**.



Slika 2.9 Tipičan izgled strujne petlje 4 – 20mA

Strujna petlja 4 – 20mA, čiji princip rada je prikazan na slici 2.9, posebno je korisna kod prenosa informacija na velika rastojanja, 300m i više.

Način rada strujne petlje 4 – 20mA je veoma jasan: signal sa izlaza senzora se prvo konvertuje u proporcionalni strujni signal, kod koga 4mA normalno predstavljaju nulti nivo sa izlaza senzora, a 20mA predstavlja pun opseg signala na izlazu senzora. Prijemnik na udaljenoj kraju petlje konvertuje 4 – 20mA struju u odgovarajući naponski signal koji može dalje da se procesira od strane računara ili nekog drugog elektronskog uređaja.

Prenos struje na velike daljine dovodi do smanjenja napona proporcionalno dužini linija za prenos. Međutim, ovo smanjenje napona ne dovodi do smanjenja struje 4 – 20mA, jer se ono može kompenzovati pomoću napona napajanja predajnika i strujne petlje. U opštem slučaju Za strujnu petlju na slici 2.9 može da se napiše sledeća jednačina:

$$V_g - (R + R_w)I_{MAX} = 0$$

gde je:

V_g - napon izvora za napajanje

R - otpornost otpornika preko koga se vrši konverzija struje u napon na prijemu

R_w - otpornost linija za prenos signala

I_{MAX} - maksimalna veličina struje u petlji, što za konkretan slučaj iznosi 20mA.

Na osnovu ove jednačine uz poznavanje otpornosti konverzionog otpornika i dužine prenosne linije i njene podužne otpornosti može da se izračuna napon izvora za napajanje koji će obezbediti da u takvoj strujnoj petlji ne dođe do smanjenja struje, a time i gubljenja informacije koja je sadržana u strujnom signalu. Da bi mogla napraviti procena otpornosti linija za prenos signala u funkciji njihove dužine u Tabeli 2.1 prikazane u vrednosti podužnih otpornosti bakarnih žica različitog poprečnog preseka:

Tabela 2.1 Otpornost bakarne žice

American Wire Gauge	Presek [mm ²]	Podužna otpornost [Ω/km]
14	2.080	8.2860
16	1.310	13.170
18	0.823	20.950
20	0.518	33.310
22	0.326	52.960
24	0.205	84.220

Prenos u digitalnom obliku ima značajnu prednost u odnosu na analogni prenos, jer je manje osetljiv na šum. U slučaju da se prenos na daljinu vrši u digitalnom obliku, tj. ako se na daljinu prenosi signal dobijen posle A/D konverzije mogu da se uoče sledeći glavni problemi:

- Pošto se radi o prenosu naponskog signala postoji problem slabljena signala;

- Linija za prenos zbog postojanja kapacitivnosti i induktivnosti ponaša se kao filter što dovodi do degradacije digitalnog signala, što u kombinaciji sa prethodno pomenutim slabljenjem može da dovede do degradacije signala pa i do njegovog potpunog gubitka;
- Signal na izlazu A/D konvertora je predstavljen određenim brojem binarnih cifara, što znači da za prenos svake od njih treba obezbediti posebnu liniju/žicu, značajno utiče na cenu koju treba platiti da bi se obezbedio paralelan prenos svih bitova.

Da bi se iskoristile dobre osobine prenosa informacija u digitalnom obliku, a usput eliminisali neki nedostaci najčešće se prenos umesto paralelnog prenosa više bitova vrši po serijskom principu bit – po – bit. Na taj način se postižu uštede u pogledu broja kablova za prenos signala, ali se smanjuje efektivna brzina prenosa, jer dok je kod paralelnog prenosa za prenos, npr. n bitova potreban jedan vremenski interval, kod serijskog prenosa potrebno n vremenskih intervala. Mogućnosti digitalnog serijskog prenosa su uticale da se razviju različiti interfejsi, koji su postali standardi za ovu vrstu prenosa. Najpoznatiji od ovih standarda su:

- RS – 232;
- RS – 422/485.

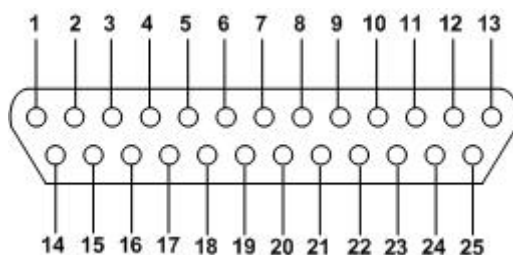
Iskustva u primeni pomenutih standarda uticala su na definisanje širokog spektra komunikacionih magistrala za prenos digitalnih signala u industrijskim uslovima, poznatih pod zajedničkim nazivom **Field Bus**. Najpoznatije komunikacione magistrale tog tipa su:

- ProfuBus;
- ModBus;
- CAN

RS – 232

Radi se o standardu koji definiše digitalnu, serijsku komunikaciju između tzv. DTE (Data Terminal Equipment) i DCE (Data Communication Equipment) uređaja. Prvobitno je bio zamišljen za povezivanje računara i terminala, koji predstavljaju DTE uređaje sa modemima, kao DCE uređajima za potrebe povezivanja sa, u to vreme skupim centralnim računarima. Standardom su definisane električne karakteristike, raspored signala i konektori preko kojih se ostvaruje povezivanje uređaja. Standard je definisala EIA (Electronic Industries Association) asocijacija i danas se koristi varijanta standarda pod oznakom RS – 232C, što ukazuje da se radi o trećem izdanju pomenutog standarda.

Osnovni standard za povezivanje uređaja kod RS – 232 interfejsa predviđa korišćenje tzv. DB25 konektora, kao što je prikazano na slici 2.10. Raspored signala po kontaktima konektora dat je u tabeli 2.2.



Slika 2.10 Izgled konektora DB25

Razlikuju se tzv. “muški” konektori kod kojih se kontakti ostvaruju preko nožica (pin) i “ženski” konektori kod kojih se kontakti ostvaruju preko rupica (socket). “Muški” konektori se uvek nalaze na DTE uređajima (računari), a “ženski” konektori se uvek nalaze na DCE uređajima, npr. modemu.

Tabela 2.2 Raspored signala na RS – 232 konektoru

1	Zaštitno uzemljenje	14	Transmit Data (2)
2	Transmit Data	15	Transmitter Clock (DCE)
3	Receive Data	16	Receive Data (2)
4	Request to Send	17	Receiver Clock
5	Clear to Send	18	
6	Data Set Ready	19	Request to Send (2)
7	Signalna masa	20	Data Terminal Ready
8	Data Carrier Detect	21	Signal Quality Detector
9	Test pin	22	Ring Indicator
10	Test Pin	23	Data Signal Rate Indicator
11		24	Transmitter Clock (DTE)
12	Data Carrier Detect (2)	25	
13	Clear to Send (2)		

Danas se za prenos signala prema RS – 232 standardu češće koristi samo 9 signala, korišćenjem DB9 konektora, iako je komunikacija moguća i sa samo 3 signala. Signali koji se koriste pri 9 – signalnoj komunikaciji dati su u tabeli 2.3.

Tabela 2.3 Raspored signala na DB9 konektoru

1	Data Carrier Detect (DCD)
2	Receive Data (Rx)
3	Transmit Data (Tx)
4	Data Terminal Ready (DTR)
5	Masa
6	Data Set Ready (DSR)
7	Request to Send (RTS)
8	Clear to Send /CTS)
9	Ring Indicator (RI)

Svi signali mogu da se podele u dve grupe:

- Podaci (Tx i Rx);
- Kontrolni signali.

Signali podataka koriste binarna stanja, a kontrolni logička stanja. U električnom pogledu RS – 232 standard propisuje korišćenje napona u opsegu od -12V do +12V iako se tolerišu i naponi u opsegu od -15V do +15V. Naponski nivoi iznad +3V smatraju se binarnom “0”, odnosno logičkom “1”. S druge strane naponski nivoi ispod -3V smatraju se binarnom “1” odnosno logičkom “0”. Ovakvim izborom napona dobijeno je široko zaštitno područje (-3V do +3V) u kome signali imaju nedefinisana stanja.

U pogledu brzine prenosa standard RS – 232 omogućava brzine do 20kbps (tačnije 19200bps – bita u sekundi). Maksimalno rastojanje na koje signali mogu da budu preneti je 15m (50feet).

RS – 485

RS – 232 metod serijske komunikacije je svakako najpoznatiji interfejs ovog tipa, jer je implementiran na skoro svim današnjim računarima. Međutim, neka od njegovih ograničenja uticala su da neki drugi serijski interfejsi postanu interesantni. Osnovno obeležje RS – 232 standarda je da on omogućava povezivanje jednog DTE uređaja sa jednim DCE uređajem maksimalnom brzinom od 20kbps na maksimalno rastojanje od 15m. Ovo je bilo zadovoljavajuće u vremenu kada su skoro svi računari sa udaljenim uređajima bili povezivani putem modema. Međutim, danas su potrebni interfejsi koji imaju jednu ili više od sledećih karakteristika:

- Povezivanje DTE uređaja direktno bez modema;
- Povezivanje više DTE uređaja u mrežnu strukturu;
- Mogućnost komunikacije na veća rastojanja;
- Mogućnost komuniciranja većom brzinom.

RS – 485 je komunikacioni standard, definisan od strane EIA asocijacije, koji dobro podržava sva četiri prethodna zahteva. Zbog toga je RS – 485 danas široko korišćeni komunikacioni standard u akviziciji podataka i upravljačkim aplikacijama kod kojih više čvorova međusobno komunicira.

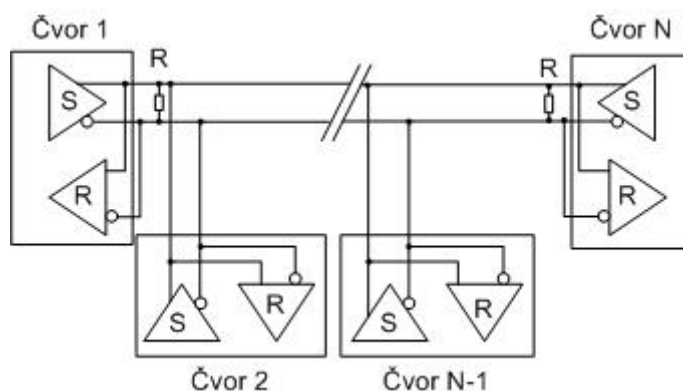
Jedan od glavnih nedostataka RS – 232 interfejsa je nedostatak otpornosti na šum duž prenosne linije. Predajnik i prijemnik kod ovog interfejsa signale podataka i potvrđivanja računaju u odnosu na zajedničku referentnu liniju. Zbog toga promene referentnog nivoa (ground level) mogu da imaju katastrofalne posledice. Da bi se to ublažilo nivo na kome dolazi do promene značenja signala kod RS – 232 interfejsa je postavljen relativno visoko na

$\pm 3V$. Ipak šum relativno lako može da preže ovu granicu, što ograničava maksimalno rastojanje na koje signal može da se prenese i maksimalnu brzinu komunikacije. Suprotno ovome RS – 485 interfejs ne poseduje zajedničku referentnu liniju u odnosu na koju se određuju signali. Zbog toga nekoliko volti razlike u referentnim nivoima na strani predajnika i prijemnika (ground level) neće da izazove nikakve probleme. Signali kod RS – 485 „plivaju“ i svaki signal se prenosi preko **Sig+** i **Sig-** linije. Predajnik u okviru RS – 485 interfejsa poredi naponske razlike između ovih linija umesto apsolutnih naponskih nivoa na signalnim linijama, čime se izbegava postojanje petlji po referentnim linijama (ground loops), koje su osnovni izvor problema pri komunikaciji. Najbolji rezultati se postižu ako su Sig+ i Sig- linije dodatno realizovane kao upredene parice. Diferencijalni signali i upredene parice omogućavaju da se korišćenjem RS – 485 može komunicirati na znatno veće rastojanje nego što je to bilo moguće korišćenjem RS – 232. Korišćenjem RS – 485 može da se komunicira na rastojanja do 1200m. Diferencijalne signalne linije takođe omogućavaju veće brzine komuniciranja. Zahvaljujući tome današnji RS – 485 interfejsi su tako projektovani da mogu da omoguće brzine od 35Mbps. Međutim, RS – 232 interfejs ima jednu prednost u odnosu na RS – 485. S obzirom da se kod njega koriste odvojene linije za slanje i prijem podataka, što omogućava da komunikacija korišćenjem ovog interfejsa može biti full – duplex. Zahvaljujući tome sa dobro napisanim softverskim protokolom za komunikaciju RS – 232 može da obezbedi veću efektivnu brzinu prenosa podataka od drugih interfejsa pri istoj brzini prenosa bitova.

Mogućnost realizacije rada u mreži je glavni razlog što je RS – 485 danas najčešće korišćeni interfejs među svim sličnim interfejsima koji omogućavaju serijsku komunikaciju između uređaja. On je jedini interfejs koji omogućava međusobnu komunikaciju više predajnika i prijemnika u istoj mreži. Korišćenjem standardnog RS – 485 prijemnika sa ulaznom otpornošću od $12k\Omega$ moguće je formirati mrežu od 32 uređaja. Savremeni RS – 485 prijemnici sa viskom ulaznom otpornošću dozvoljavaju da se ovaj broj uređaja proširi do 256. Povećanje broja uređaja u RS – 485 mreži i na nekoliko hiljada može da se ostvari korišćenjem RS – 485 pojačavača (repeater). Pri tome mreža može da bude raširena i na više kilometara. Takođe je važno naglasiti da softverska podrška RS – 485 interfejsu nije mnogo komplikovanija u odnosu na onu potrebnu za rad RS – 232 interfejsa. Sve je to uticalo da RS – 485 interfejs bude jako popularan kod realizacije komunikacije između računara, PLC (Programmable Logic Controllers), mikrokontrolera i inteligentnih senzora u naučnim i tehničkim primenama.

Na slici 2.11 prikazan je opšti izgled mrežne topologije baziran na RS – 485 interfejsu. Da bi se ostvarile veće brzine i komunikacija na veća rastojanja neophodno je postavljanje

terminacionih otpornika na oba kraja prenosne linije da bi se eliminisale refleksije. Vrednost ovih otpornika treba da bude 100Ω . RS – 485 mreža mora da bude projektovana kao linijska topologija, a ne kao topologija tipa zvezda.



Slika 2.11 RS – 485 mreža

Na kraju treba se upoznati sa funkcionalnošću RS – 485 interfejsa. Inicijalno, svi predajnici (S) na RS – 485 magistrali se nalaze u tri – state satnju visoke impedanse. U praksi jedan od čvorova je definisan kao „gazda“, koji šalje zahteve ili komande preko RS – 485 magistrale. Svi drugi čvorovi primaju ove podatke. Zavisno od toga kakva je informacija poslata, više čvorova ili nijedan od njih koji su povezani na liniju odgovara „gazdi“. Takođe postoje i druge implementacije RS – 485 mreže kod kojih svaki čvor može da startuje svoju sopstvenu sesiju prenosa podataka. Kod ove mreže je veoma važna činjenica da predajnik ne mora eksplicitno da isključuje RS – 485 drajver, jer se on automatski vraća u stanje visoke impedanse nekoliko milisekundi pošto pošalje podatke. Zbog toga nije potrebno da postoji kašnjenje između paketa koji se šalju preko RS – 485 magistrale. Inače RS – 485 se koristi kao električni nivo kod mnogih poznatih standarda za povezivanje uključujući Profibus i Modbus. Shodno tome očekuje se da će RS – 485 interfejs biti korišćen još dugo vremena.

2.2 Problemi akvizicije podataka

U prethodnim sekcijama ukazano je na okvire u kojima se realizuje proces upravljanja procesima sa aspekta primene digitalnih računara. Pri tome je najveća pažnja posvećena akviziciji podataka na bazi koje se realizuje upravljanje, a koja u sebe uključuje:

- Identifikaciju vrednosti fizičkih veličina, koje određuju proces kojim se upravlja. Ovaj proces podrazumeva korišćenje odgovarajućih **senzora**, tj. uređaja koji mere fizičke veličine i omogućavaju da izmerena vrednost bude čitljiva od strane posmatrača ili drugog uređaja;

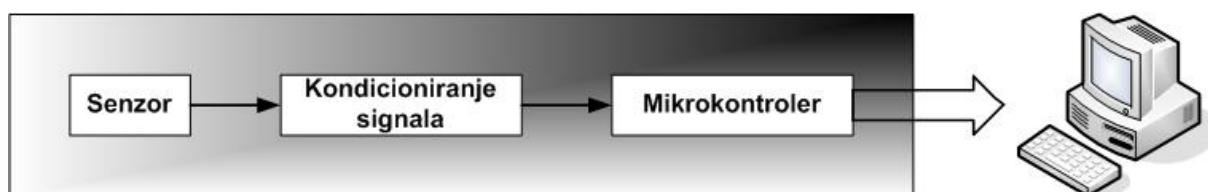
- Izražavanje izmerenih vrednosti u obliku vrednosti električnih veličina (napon, struja, otpornost, itd.) koje su neophodne za realizaciju elektronski i računarski baziranog upravljanja. U slučaju da se na izlazu senzora ne dobija direktno električni signal neophodno je primeniti postupak pretvaranja izmerene vrednosti u vrednost analogne električne veličine. Takvi uređaji su poznati pod nazivom **pretvarači** (transducers);
- Prenos dobijenog električnog signala od mesta gde je generisan kao mera posmatrane fizičke veličine do mesta gde se realizuje upravljanje. Pri tome se postavljaju pitanja, kao što su: koliko je rastojanje na koje se mogu preneti signali; kakva je osetljivost prenošenih signala na šum, itd.;
- U slučaju računarski podržane akvizicije podataka odnosno upravljanja neophodno je izvršiti digitalizaciju analognih električnih signala da bi mogli da budu procesirani od strane računara. Pošto digitalizacija analognih električnih signala podleže Nikvistovom kriterijumu u slučaju veoma brzih signala postavlja se pitanje mogućnosti da računar izvrši sve operacije u intervalu uzimanja dva uzorka analognog signala i njihove digitalizacije.
- U opštem slučaju upravljanje udaljenim objektima i odgovarajuća akvizicija podataka podrazumevaju da na mestu objekta kojim se upravlja postoje odgovarajući senzorski, pretvarački i komunikacioni uređaji koji treba da obezbede merenje fizičkih veličina i njihovo prosleđivanje do mesta gde se vrši njihova akvizicija i realizuje zakon upravljanja. U principu izvori parametara na kojima se bazira upravljanje mogu da budu distribuirani na širokom prostoru, zbog čega se postojanje udaljenog upravljačkog sistema nameće kao imperativ. Senzorski, pretvarački i komunikacioni uređaji zahtevaju odgovarajuće električno napajanje što zbog potrebe obezbeđenja električne energije na udaljenim lokacijama može predstavljati značajan problem.

Nabrojani problemi zahtevaju da se problemu akvizicije podataka sa udaljenih objekata u sistemima upravljanja na daljinu posvećuje posebna pažnja. Pošto se ovakvi sistemi po pravilu realizuju u sredinama gde je nivo šuma veliki, kao bolje rešenje nameće se prenos signala u digitalnom obliku, a to znači da se A/D konverzija mora izvršiti na mestu merenja. Takođe prostorna distribuiranost mernih tačaka zahteva izradu odgovarajuće komunikacione infrastrukture. U tom pogledu digitalizacija mernih signala na mernoj strani pogoduje primeni savremenih digitalnih bežičnih komunikacija. Međutim, problem napajanja udaljenih mernih komunikacionih stanica i velika potrošnja, na koju posebno utiče potrošnja radio predajnika nameću kao ideju da se značajan deo obrade podataka vrši na mernoj strani, a da se samo

onda kada je neophodno podaci prenose na upravljačku stranu sistema. Ovakav pristup uticao je na razvoj specijalizovanih uređaja koji na strani gde se vrši identifikacija praćenih fizičkih veličina omogućavaju njihovo merenje korišćenjem odgovarajućih senzora, pretvaranje u analogni električni signal, njegovo kondicioniranje, digitalizaciju i primarnu obradu odnosno distribuciju digitalnih podataka do sistema gde se mogu koristiti. Ovakvi uređaji poznati su kao inteligentni senzori.

2.3 Inteligentni senzori

Jedan od najvažnijih napredaka u oblasti automatskog upravljanja predstavlja razvoj i primena tzv. **inteligentnih** ili **pametnih senzora**. S obzirom da je ovaj udžbenik posvećen inteligentnim sensorima neophodno je da se oni definiše. Kao početna definicija ovog pojma može da posluži ona po kojoj se pod inteligentnim sensorima podrazumevaju merni instrumentacioni uređaji koji su upravljani od strane mikroprocesora ili mikrokontrolera i poseduju karakteristike kao što su mogućnost komunikacije i sopstvene dijagnostike, koja obezbeđuje informacije za sistem monitoringa procesa i/ili operatera sa ciljem povećanja operacione efikasnosti i redukovanja cene opsluživanja. Shodno tome blok dijagram inteligentnog senzora može da se prikaže kao na slici 2.12.



Slika 2.12 Inteligentni senzor

Mikrokontroler se tipično koristi za digitalno procesiranje signala (npr. digitalno filtriranje), analogno/digitalnu konverziju, razna izračunavanja i povezivanje sa okruženjem. Za potrebe povezivanja sa okruženjem mikrokontroleri mogu da bud kombinovani ili nadgrađeni sa standardnim uređajima za povezivanje. Pri tome mnogi mikrokontroleri mogu da sadrže i različite magistrale koje su pogodne za komunikaciju na kraća rastojanja, kao što je **I2C Bus** (Prilog 8.1) ili serijske intefejse RS – 232/RS – 485 za komunikaciju na relativno velika rastojanja.

Bitna razlika između običnih senzora i inteligentnih senzora je u njihovim inteligentnim svojstvima, koja podrazumevaju posedovanje funkcija samodijagnosticiranja (self – diagnostics), samoidentifikacije (self – identification) ili samoadaptacije (self – adaptation). Po pravilu ove funkcije implementira „ugrađeni“ mikrokontroler ili digitalni signal procesor (DSP). Dodavanje novih funkcija i mogućnost modifikovanja njihovih performansi su glavne

prednosti inteligentnih senzora. Shodno tome inteligentni senzor se može prilagođavati mernom procesu sa aspekta optimizacije maksimalne tačnosti, brzine i potrošnje energije.

Danas postoje mnogi različiti tipovi inteligentnih senzora. Brz napredak tehnika projektovanja VLSI (Very Large Scale Integrated) kola obezbedio je tehnološku bazu za realizaciju inteligentnih senzora i otvorio put ka dobijanju integrisanih senzora prilagođenih različitim namenama, koji istovremeno zadovoljavaju zahteve u pogledu performansi, veličine i cene. Time se stvara mogućnost integrisanja senzora i elektronskih kola i realizacija kompletnog sistema za akviziciju podataka kao jedinstvenog integrisanog kola. Pri tome glavni problem fabrikacije jednog ovakvog kola predstavlja pitanje kompatibilnosti njegovih elemenata, kao što su senzor, odgovarajuća analogna mikro kola i digitalna kola za spregu i razvoja odgovarajućeg procesa za njihovu integraciju. U principu takav proces može da se razvije, ali je veoma skup tako da samo veliki broj proizvedenih kola može da opravda cenu razvoja. Da bi neki projekat integrisanog senzora mogli da smatramo uspešnim on mora da ima prihvatljivu složenost i da bude primenljiv u širokom opsegu merenja. Tehnologija koja se zove Micro Electro Mechanical System (MEMS) omogućava minijaturizaciju senzora i u isto vreme integraciju senzorskih elemenata sa mikroelektronskim funkcijama na minimalnoj površini. Ova tehnologija pored poboljšanja funkcionalnosti i minijaturizacije senzora takođe omogućava proizvodnju senzora velikog obima uz poboljšanje odnosa cena – performanse.

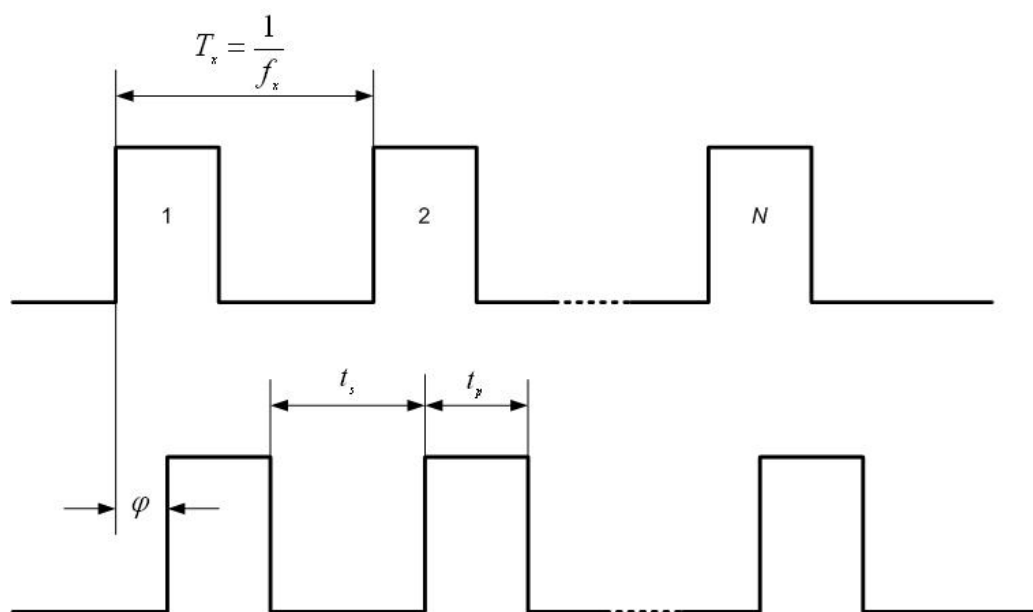
Implementacija mikrokontrolera na istom integrisanom kolu zajedno sa senzorskim elementom i kolima za kondicioniranje signala je elegantno i poželjno inženjersko rešenje. Međutim, primenom tzv. hibridnih inteligentnih senzora mogu da se postigne značajan nivo tehničkih i metroloških performansi i da se dobije uređaj za kraće vreme bez korišćenja skupih CAD alata. Hibridni inteligentni senzori umesto realizacije uređaja na jedinstvenom integrisanom kolu podrazumevaju realizaciju senzorskog elementa i elektronskih kola u okviru istog kućišta.

Jedan od značajnih aspekata oblasti inteligentnih senzora podrazumeva korišćenje tzv. frekventno/vremenskih senzora. Ovakvi senzori su bazirani na fenomenima rezonancije i promenljivim oscilatorima kod kojih se informacija ne predstavlja amplitudom, već frekvencijom ili vremenskim parametrima izlaznog signala. Ovi senzori imaju:

- Frekvenciju (f_x);
- Periodu ($T_x = \frac{1}{f_x}$);
- Širinu impulsa – pulse width (t_p);
- Širinu pauze – spacing interval (t_s);

- Odnos signal/perioda – duty cycle ($\frac{t_p}{T_x}$);
- Vremenski odnos – off – duty factor ($\frac{T_x}{t_p}$);
- Broj impulsa (N);
- Fazni pomeraj – phase shift (φ);
- Vremenski interval (τ)

kao što je prikazano na vremenskom dijagramu na slici 2.13.



Slika 2.13 Informacioni parametri frekventno/vremenskih senzora

Pošto navedeni parametri istovremeno imaju i analogna i digitalna svojstva odgovarajući senzori se još nazivaju i „kvazi digitalni“ senzori. U okviru ovog tipa senzora najbrojniju grupu čine senzor sa frekvencijskim izlazom. Da bi se video značaj ovakvih senzora razmotriće se glavne prednosti senzora sa frekvencijskim izlazima:

- *Velika otpornost na šum.* Frekvencijski senzori omogućavaju postizanje veće tačnosti u poređenju sa analognim sensorima. Ovo svojstvo potiče od velikog imuniteta na šum, jer odgovara frekventnoj modulaciji na koja je osnovna pretpostavka rada frekvencijskih senzora. Frekventni signal se može distribuirati komunikacionim linijama na mnogo veća rastojanja od analognih i digitalnih signala. Takođe za prenos ovakvog signala dovoljne su samo dve linije. U poređenju sa uobičajenim serijskim digitalnim prenosom ovi signali imaju prednost, jer ne zahtevaju nikakvu sinhronizaciju. Frekventni signal je idealan za visoko šumno industrijsko okruženje.

- *Velika snaga izlaznog signala.* Senzorski signali mogu da budu grupisani u šest energetske domena: *električni, termalni, mehanički, hemijski, radijantni i magnetni.* Danas je najpoželjniji električni oblik signala. Zbog toga je projektovanje senzora usmereno na razvoj pretvarača koji konvertuju oblike signala različitih energetske domena u neku od veličina iz električnog domena. Sa stanovišta energije blok za prenos signala od izlaza senzora do ulaza pojačavača je najteži za projektovanje u kanalu za prenos mernog signala, jer se na ovom nivou prenose signali veoma male energije. Gubici koji se dese u ovom bloku ne mogu se nadoknaditi nikakvim procesiranjem signala. Izlazna snaga frekventnijskih senzora je po pravilu velika. U ovom slučaju, snaga koja utiče na stabilnost generisane frekvencije zavisi od promene snage u oscilatornoj petlji. Međutim, zbog visokog kvaliteta faktora oscilatorne petlje njegova snaga je velika.
- *Širok dinamički opseg.* Pošto signal ima oblik frekvencije dinamički opseg nije ograničen naponom napajanja i šumom. Zbog toga se lako može postići dinamički opseg preko 100dB.
- *Visoka tačnost frekventnijskih standarda.* Frekventnijske reference, npr. kristalni oscilatori mogu da se naprave da budu stabilnije od naponskih referenci. Ovo se može objasniti na isti način kao informacione karakteristike amplitudno modulisanih i frekventno modulisanih signala.
- *Jednostavnost komunikacije i povezivanja.* Parazitarne elektro – motorne sile, tranzientne otpornosti i preslušavanje kanala analognih multipleksera kod analognih senzora povećavaju nivo grešaka. Frekventno modulisani signal nije osetljiv na nabrojane faktore. Multiplekseri kod frekventnijskih senzora i pretvarača su dovoljno jednostavni da ne utiču na pojavu grešaka.
- *Jednostavnost integracije i kodovanja.* Precizna vremenska integracija izlaznih signala iz frekventnijskih senzora može da se realizuje veoma jednostavno. Impulsni brojač je idealan integrator sa neograničenim vremenom merenja. Istovremeno frekventnijski signal može da se procesira korišćenjem mikrokontrolera bez bilo kog dodatnog kola za spregu.

Nabrojane karakteristike čine projektovanje i korišćenje različitih frekventno/vremenskih inteligentnih senzora veoma efikasnim. Uzimajući frekventno/vremenski domen kao polazište može se ukratko prikazati projektovanje inteligentnih senzora.

- *Adaptivnost.* Inteligentni senzori treba da budu adaptivni sa ciljem da se optimizira merni proces. Npr., zavisno od uslova merenja, poželjno se promene u tačnosti

merjenja da bi se povećala brzina i obratno, a takođe da se menja potrošnja u slučajevima kada velika brzina i tačnost nisu neophodne. Takođe je poželjno da se može podešavati frekvencija kristalnog oscilatora zavisno od temperature okruženja.

- *Tačnost.* Greška merjenja treba da bude programablina. Samo kalibracija će dozvoliti smanjenje sistemskih grešaka, koje su urukovane, npr., netačnošću parametara sistema. Korišćenjem statističkih algoritama omogućava smanjenje slučajnih grešaka, koje su posledica npr., interferencije, šuma ili nestabilnosti.
- *Pouzdanost.* Ovo je jedan od najvažnijih zahteva, posebno kod primena u industriji. Samodijagnosticiranje se koristi za proveru performansi sistema i proveru komunikacije sa senzorom.

3.

PRIMERI INTELIGENTNIH SENZORA

Postojanje ugrađenih procesnih elemenata predstavlja bitan preduslov realizacije uređaja koji se nazivaju inteligentni senzori. Imajući u vidu da implementacija inteligentnih senzora podrazumeva zadovoljenje nekih drugih osnovnih zahteva, kao što su:

- Mali gabariti;
- Mala potrošnja energije;
- Mogućnost komunikacije sa nadređenim uređajima.

kao njihovu procesnu osnovu nameće mikroprocesorske komponente, pre svega mikrokontrolere. Primena mikrokontrolera dobija na značaju ako se ima u vidu da oni pored procesnih mogućnosti u sebe integrišu i mogućnost izvršavanja A/D i D/A konverzije, odnosno podršku za realizaciju različitih komunikacionih interfejsa i protokola.

3.1 Tipični primeri inteligentnih senzora

Da bi se identifikovali zahtevi u pogledu procesnih karakteristika inteligentnih senzora poslužiće primeri njihove realizacije za nekoliko važnih fizičkih veličina, kao što su:

- Temperatura;
- Pritisak;
- Ubrzanje;
- Brzina obrtanja;

- Svetlost.

3.1.1 Senzori temperature

Temperaturni senzori igraju važnu ulogu u mnogim mernim i upravljačkim sistemima. Senzori na bazi integriranih kola stekli su prednost zahvaljujući svojstvima poluprovodničkih materijala da menjaju otporne karakteristike u funkciji temperature. Ovakvi uređaji na svom izlazu omogućavaju dobijanje signala koji imaju linearnu promenu učestanosti ili širine impulsa u funkciji temperature u opsegu od -55°C do $+150^{\circ}\text{C}$ uz malu cenu koštanja. S obzirom da ovi uređaji obezbeđuju direktno očitavanje temperature u digitalnom obliku eliminisana je potreba za A/D konvertorima. Takođe senzori na bazi integriranih kola mogu da imaju memoriju, mogu će ih je veoma precizno kalibrisati i mogu da rade u multisenzorskom okruženju kod primena kao što su komunikacione mreže. Mnogi senzori ovog tipa nude ugrađene komunikacione protokole za primenu u akvizicionim sistemima koji su bazirani na magistralnom povezivanju, što uključuje mogućnost njihovog adresiranja i po potrebi prozivanja radi razmene podataka.

Izlaz inteligentnog temperaturnog senzora treba da bude digitalni signal prilagođen daljoj računarskoj obradi. Ovaj signal može da bude vremenski signal, kod koga je merena veličina predstavljena signalom promenljive frekvencije ili trajanjem impulsa ili može da bude prava digitalna (numerička) vrednost koja se šalje procesoru koji vrši dalju obradu preko magistrale podataka. Mogućnosti integracije senzorskih i procesnih funkcija u okviru istog integriranog kola su smanjene zbog određenih ograničenja, kao što su:

- Ograničena površina integriranog kola;
- Postojanje tolerancija u parametrima uređaja;
- Postojanje intefrencije na digitalnom nivou.

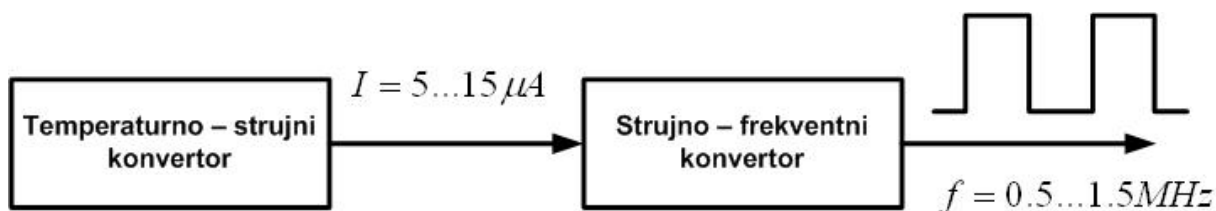
U tabeli 3.1 date su performanse nekih integriranih temperaturnih senzora.

Tabela 3.1 Performanse nekih integriranih temperaturnih senzora

Senzor	Tip izlaza	Karakteristika	Površina [mm ²]	Tehnologija
1	Digitalni	I→F konvertor+DSP	4.5	CMOS
2	Duty – cycle	Duty – cycle modulacija	5.16	Bipolarna
3	Frekvencija	I→F konvertor	6	Bipolarna

CMOS tehnologija se danas najšire koristi u integraciji temperaturnih senzora visokih performansi ova tehnologija, jer nudi jeftina digitalna kola koja omogućavaju kondicioniranje signala i digitalnu obradu signala u okviru istog integriranog kola.

Primer jednog integrisanog temperaturnog, baziranog na konverziji struje u frekvenciju dat je blok šemom na slici 3.1. Kod ovog senzora analogni strujni signal sa CMOS temperaturnog senzora se konvertuje u kvazi – digitalni signal korišćenjem strujno – frekventnog konvertora.



Slika 3.1 Blok šema senzora temperature sa frekvencijskim izlazom

Izlazna struja I_{out} iz temperaturno – strujnog konvertora i njena „kopija“ dobijena strujnim ogledanjem koriste se za punjenje/praznjenje kondensatora C_x na ulazu strujno – frekventnog konvertora. Napon sa kondensatora se dovodi na diferencijalni komparator i poredi sa referentnim naponom, koji ima dve vrednosti V_C i V_D . Na bazi toga na izlazu se dobija frekvencija za koju važi analitički izraz:

$$f_{out} = \frac{I_{out}}{2C_x(V_C - V_D)} \quad (3.1)$$

Ovakvi senzori imaju osetljivost od $-0.808\%/^{\circ}C$ i izlazni signal čija frekvenmcija se kreće u opsegu od 0.5 – 1.3MHz. Kompletno kolo zauzima površinu od samo 0.018mm^2 korišćenjem $1\mu\text{m}$ CMOS procesa. Ovakvo kolo ima veoma malu osetljivost na promene napona napajanja, a ukupna potrošnja ovog senzora je oko $200\mu\text{W}$. Ovaj senzor ima dosta linearnu karakteristiku i izlazna frekvencija u funkciji temperature može da se aproksimativno predstavi izrazom

$$f_{out} = f_{20^{\circ}C} e^{\gamma(T_{20^{\circ}C} - 20^{\circ}C)} \quad (3.2)$$

Ako se ovakvi senzori realizuju na nivou projektovanja integrisanih kola, moraju da budu implemenirana i dodatna kola sa ciljem da se obezbedi pristup takvim sensorima. U tom pogledu ovakvi integrisani senzori mogu da budu kombinovani sa kolima za testiranje. Tzv. Boundary Scan arhitektura je pogodna za monitoring ponašanja temperaturnih senzora. Ova arhitektura je opisana IEEE 1149.1 standardom, poznatim i kao JTAG što je skraćenica od Joint Test Action Group.

Firma Smartec je razvila sofisticirani silicijumski temperaturni senzor, male potrošnje, koji na izlazu daje duty – cycle modulisani impulsni niz u funkciji temperature. Ovaj izlazni signal čiji se duty – cycle menja linearno u odnosu na promenu temperature može da se opiše jednačinom:

$$DC = \frac{t_p}{T_x} = t_p f_x = 0.320 + 0.00470t \quad (3.3)$$

gde je t_p trajanje impulsa; T_x perioda; f_x frekvencija; t je temperatura u °C. Izlaz zahteva jednu liniju za direktno povezivanje sa svim vrstama mikrokontrolera bez A/D konverzije. Temperaturni opseg je -45°C - +150°C. Senzor ima visoku tačnost i frekventni opseg od 1 – 4kHz. CMOS izlaz može da pobuđuje kabl dužine do 20m, što senzore ovog tipa čini veoma pogodnim za merenje na daljinu i primene u upravljanju. Ovaj temperaturni senzor predstavlja značajnu novinu u razvoju pretvaračke tehnologije, jer njegov nov pristup u povezivanju zadovoljava uske zahteve elektronskog sektora u pogledu direktnog povezivanja na mikrokontrolerske ulaze, što obezbeđuje direktnu i pouzdanu komunikaciju. U primenama gde se koristi više ovakvih senzora, multipleksiranje se može lako realizovati korišćenjem više mikrokontrolerskih ulaza ili korišćenjem jednostavnih i jeftinih digitalnih multipleksera.

Kada se govori o senzorima koji na izlazu daju numerički ekvivalent temperature mora da se ukaže na odgovarajuće razvoje firmi kao što su Analog Devices, Dallas Semiconductor i National Semiconductor. Posebno interesantna rešenja nudi firma Dallas Semiconductor, koja uključuju 1 -, 2 -, 3- žične i senzore sa SPI magistralom, koji mogu da obezbede direktnu podršku za čitav niz primena. Ova široka proizvodna gama Dallas senzora uključuje različite tzv. „direct – to – digital“ temperaturne senzore koji imaju tačnost i karakteristike kojima se lako poboljšavaju performanse i pouzdanost sistema. Zahvaljujući ovim uređajima moguće je redukovati broj kola na ploči, a i samu složenost ploče dobijanjem digitalnog podatka bez korišćenja posebnog A/D konvertora. Ovi senzori imaju tačnost u opsegu od ±0.5°C do ±2.5°C u širokom opsegu temperatura i napona napajanja, a mogu da rade u temperaturnom opsegu od -50°C do +125°C.

Vreme konverzije temperature u digitalni signal se kreće u intervalu od 750ms do 1.2s. 1 – i 2 – žični uređaji dopuštaju većem broju senzora da budu adresirani na istoj magistrali. Dodatno, neke uređaji u sebi, pored sensorisanja temperature uključuju i druge korisne karakteristike, kao što su E2PROM nizovi, sat realnog vremena ili monitoring temperature procesora. Veoma zanimljivu karakteristiku Dallas – ovih temperaturnih senzora predstavlja mogućnost proširenja rezolucije od 9 do 13 bita ili konfigurisanja rezolucije od strane korisnika u opsegu 9, 10, 11 ili 12 bita.

Dallas – ov DS1616 Temperature Data Recorder sa 3 – ulaznim A/D konvertorom pruža snažnu senzorsku osnovu ne samo za praćenje temperature već i vlažnosti, pritiska, napona, spoljašnjeg temperaturnog senzora ili bilo kog drugog senzora sa analognim naponskim izlazom. DS1616 obezbeđuje sve elemente višekanalnog sistema za akviziciju podataka na istom integrisanom kolu. On može da meri signale na izabranim kanalima u intervalima koje

programira korisnik, zatim podatke zajedno sa vremenskim trenucima u kojima su izmereni pamti u postojećoj memoriji radi kasnije distribucije kroz jedan od serijskih kanala.

3.1.2 Senzori pritiska i ubrzanja

Slično sensorima temperature i senzori pritiska su široko rasprostranjeni. U Evropi je prvi potpuno integrisani senzor pritiska bio projektovan još 1968. godine u Philips – u, a prvi monolitni integrisani senzor pritiska sa digitalnim (frekventnim) izlazom bio je projektovan i testiran 1971. godine na Case Western Reserve University kao deo istraživanja u oblasti biomedicinskih aplikacija. Senzor se sastojao od minijaturene silicijumske dijafragme sa otpornim mostom u centru dijafragme i pričvršćenom za osnovni *wafers* legurom zlato – kalaj i mogao je da se koristi u raznim aplikacijama.

Senzori pritiska konvertuju spoljašnji pritisak u električni izlazni signal. Da bi se ovo ostvarilo, poluprovodnički senzor pritiska koristi monolitni piezootpornik. Otporni element, koji predstavlja senzorski element nalazi se u tankoj silicijumskoj dijafragmi. Primenjujući pritisak na silicijumsku dijafragmu dolazi do njenog uvijanja i promene u naprezanju kristalne rešetke. To utiče na mobilnost slobodnih nosilaca i rezultuje u promeni otpornosti pretvarača ili piezootpornosti. Debljina dijafragme, kao i geometrijski oblik otpornosti su određeni opsegom tolerancije pritiska. Prednosti ovakvih pretvarača su:

- Velika osetljivost;
- Dobra linearnost;
- Mali histerezis;
- Kratko vreme odziva.

Izlazni parametri piezootpornosti su temperaturno zavisni i zahtevaju kompenzaciono kolo u slučaju da se senzor koristi u širokom opsegu temperatura. Međutim, pojava inteligentnih senzora i MEMS greška zbog temperature može da se kompenzuje korišćenjem ugrađenog temperaturnog senzora.

Većina savremenih MEMS pretvarača pritiska sastoji se od Vitstonovog mosta sa četiri otpornika, koja se napravljena na monolitnom kristalu. Piezootporni elementi integrisani su u senzor nalaze se duže periferije dijafragme u tačkama koje se koriste za merenje deformacije.

Projektanti mogu da biraju jedan od dva pristupa za kompenzaciju senzora:

- Konvencionalno procesiranje analognog senzorskog
- Procesiranje digitalnog senzorskog signala.

Zahvaljujući tehnologiji CMOS integrisanih kola koja rade sa mešovitim signalima moguće je ugraditi sofisticirane digitalne procesore signala (DSP) u sam senzorski kompenzator. Ovaj

procesor signala se projektuje prema specifičnostima određivanja kompenzacije omogućavajući da senzorski izlaz ima punu preciznost.

Savremeni integrisani senzori pritiska koriste specijalno projektovane procesore signala i postajnu memoriju za kalibraciju i temperaturnu kompenzaciju ovih senzora koji se zahvaljujući tome mogu da koriste u širokom spektru upravljačkih aplikacija. U klopu takvih sistema moguće je realizovati i programabilne uređaje za kondicioniranje signala, koji rade u digitalnom domenu, koristeći kalibracione algoritme čime se postižu bolji efekti od onih koji se dobijaju kod većine pristupa kondicioniranju signala na analognom nivou. Interesantno je da je kod mnogih senzora ovog tipa, zahvaljujući razvoju digitalnih komunikacionih interfejsa moguće izvršiti kalibraciju senzora preko odgovarajućeg kontakta pošto je senzorski modul u potpunosti formiran i smešten u kućište. Na taj način je eliminisana potreba za postprocesiranjem i podešavanjem, jer se kalibracija izvršava kao integralni deo procesa proizvodnje i završnog testiranja senzorskog modula.

Da bi se videle karakteristike savremenih senzora pritiska treba ukazati na neke od karakterističnih primera komercijalno raspoloživih komponenata. I ovde je pažnja posvećena razvoju senzora pritiska sa frekvencijskim izlazom. Prvi senzori ovog tipa bili su bazirani na *Voltage to Frequency Converter (VFC)* i imali su tačnost do 1%, i efektivni opseg merenja frekvencije od 0 – 2kHz u opsegu pritiska od 0 – 40MPa. Drugi tipovi senzora su bazirani na korišćenju piezorezonatora. Povezivanjem ovog uređaja u samooscilujuće kolo dobija se signal čija frekvencija je proporcionalna sili. Relacija između merenog pritiska p i frekvencije izlaznog signala može da se predstavi sledećom jednačinom:

$$p = \frac{(f - f_0)}{K_p}; K_p = K_F \cdot S_{eff}$$

gde je f_0 je frekvencija pri $p = 0$; f je merena frekvencija; K_p je faktor konverzije pritiska u frekvenciju; K_F je faktor osetljivosti na silu; S_{eff} je efektivna površina membrane.

Firma Kulite proizvodi senzore sa frekvencijskim izlazom, na bazi poluprovodničkog piezootpornog senzorskog elementa, koji ima izuzetnu pouzdanost i tačnost. Može da meri pritiske u opsegu od 1.7 – 350Bar – a uz izlaznu frekvenciju od 5 – 20kHz i tačnost od $\pm 2\%$.

Odličan primer senzora predstavlja uređaj firme ADZ Sensortechnik GmbH kod koga se ostvaruje konverzija $x(t) \rightarrow V(t) \rightarrow F(t)$. Izlazna frekvencija ovakvog konvertora je u opsegu 1 – 23kHz za oseg pritiska 0 – 8.8Bar – a.

Geophysical Research Corporation nudi tržištu pretvarač koji koristi kristalni kvarcni senzor, koji reaguje na naprezanje koje nastaje usled pritiska. Usled toga dolazi do promene rezonantne frekvencije. Njena zavisnost od pritiska je blago nelinearna, ali se to može lako

korigovati u toku kalibracijekorišćenjem polinoma trećeg reda. Važno je napomenuti da kristalni kvarc ima izuzetnu elastičnost koja se odražava u izvanrednoj ponovljivosti što je jedan od važnih zahteva kod ove vrste senzora. U okviru ovog uređaja postoje dva dodatna kvarcna senzora: jedan za merenje temperature, a drugi se koristi kao izvor stabilnog referentnog signala. Merenje temperature je važno zbog dinamičke temperaturne kompenzacije kristala pritiska, dok se referentni signal koristi kao vremenska baza za određivanje frekvencije. Ovaj senzor može da meri pritiske do 10000psi (pound per square inch) i ima izlaznu frekvenciju u opsegu 10 – 60kHz.

Dalji razvoj inteligentnih senzora u oblasti merenja pritiska ide u pravcu postizanja visoke tačnosti (do 0.01%) kod digitalnih senzora i pretvarača pritiska. Npr. inteligentni pretvarač pritiska firme Paroscientific Inc. ima pretvarač pritiska na bazi kristala kvarca i digitalni sprežni blok integrisane u jednom kućištu. Komande i zahtevi za podacima se šalju preko RS – 232 kanala, a predajnik vrađa podatak preko iste dvosmerne magistrale. Digitalni izlazi su obezbeđeni direktno u inženjerskim jedinicama sa tipičnom tačnošću od 0.01% u širokom temperaturnom opsegu. Ovaj nivo tačnosti se postiže zahvaljujući korišćenju odgovarajućeg kvarcnog kristala za temperaturnu kompenzaciju, koji je specijalno projektovan da obezbedi potrebni temperaturni signal. Ovaj inteligentni senzor može da radi kao poseban uređaj sa standardnim izlazom o registrovanom pritisku i prikazivanjem na odgovarajućem displeju ili kao integrisana komponenta koja je adresibilna i kontrolisana od strane računara. Kao što je rečeno ovaj pretvarač koristi kristal kvarca kao senzorski element i za merenje pritiska i temperature zbog ugrađene stabilnosti i preciznosti. Senzorski element pritiska je kvarcni štapić koji menja rezonantnu frekvenciju pod uticajem aksijalnog opterećenja. Zavisnost frekvencije od opterećenja može da se predstavi jednostavnim matematičkim modelom što omogućava postizanje visoko preciznog merenja pritiska i parametara koji su vezani za pritisak. Inače izlaz ovakvog pretvarača je povorka pravougaonih impulsa promenljive učestanosti.

Kao drugi primer senzora baziranih na merenju pritiska na bazi promene rezonantne frekvencije kvarcnog oscilatora indukovane naprežanjem koje potiče od postojanja pritiska na rezonantni element mogu da posluže senzori firme QuartzonixTM. Ovi senzori imaju izlazne signale čija je frekvencija u opsegu 30 – 45kHz i mogu da postignu tačnost od $\pm 0.01\%$ punog opsega. Precizna temperaturna kompenzacija je obezbeđena preko integrisanog kvarcnog temperaturnog senzora, koji se koristi za merenje radne temperature pretvarača. Ovi pretvarači koriste RS – 485 interfejs za prenos ASCII karaktera brzinom od 9600Baud – a, što omogućava povezivanje u mrežu do 31 pretvarača preko iste magistrale. Osim toga korisnik može da programira merenje pritiska, kao i vreme ažuriranja merenja.

Drugu vrstu primene poluprovodničkih senzora za merenje mehaničkih veličina predstavljaju akcelerometri. Merenje ubrzanja ili nekog sličnog svojstva, kao što su vibracije, udari ili nagib postali su svakodnevna aktivnost kod širokog spektra uređaja. Za ovakva merenja koriste se različiti tipovi senzora, kao što su piezofilmovi, elektromehanički servo senzori, piezoelektrični senzori, piezorezistivni senzori, kapacitivni senzori i slično. Svaki od njih ima različite karakteristike u pogledu izlaznog signala, cene razvoja, i radnog okruženja u kome najbolje funkcioniše. Najduže u upotrebi su piezoelektrični senzori. Ovi senzori zahtevaju odgovarajuća kola za kondicioniranje signala. Radni opseg ovih uređaja je poslednjih godina proširen tako da obuhvataju frekvencije od 0.1Hz do 30kHz.

Kapacitivne akcelerometre sa integrisanom elektronikom, koji ne zahtevaju spoljašnje pojačavače razvila je firma Rieker Inc. Ovi akcelerometri su raspoloživi sa analognim DC izlazom, kao digitalni impulsi sa modulisanom širinom ili kao frekventno modulisanim izlaznim signalom.

Veoma jednostavno kolo može da se koristi za merenje ubrzanja na bazi akcelerometra koji je razvijen u firmi Analog Devices. Ovi akcelerometri imaju mogućnost direktnog povezivanja sa najpoznatijim mikroprocesorima i vreme akvizicije od 1ms. Za povezivanje akcelerometara koji imaju analogni izlazni signal sa mikrokontrolerima Analog Devices je predložio korišćenje kola koje vrši konverziju ubrzanje – frekvencija bazirano na VFC konvertoru, čime se na izlazu dobija signal promenljive frekvencije. U tom slučaju mikrokontroler može da bude programiran da meri frekvenciju i izračunava odgovarajuće ubrzanje.

3.1.3 Senzori obrtanja

Postoje mnogobrojni principi merenja brzine obrtanja i na bazi njih razvijeno je više komercijalno raspoloživih senzora. Većina ovih senzora je bazirana na registrovanju magnetnih efekata (Hall – ov efekat, magnetnoresistivni senzori) i električnih pojava (induktivni senzori). Ovi senzori najčešće na svom izlazu daju impulse čija je frekvencija proporcionalna vrednosti merenih parametara. Kod ovih senzora fluks je povezan sa uglom obrtanja sledećom jednačinom:

$$\Psi = \Psi_m \cdot \cos \theta \quad (3.5)$$

shodno čemu je indukovana elektromotorna sila (ems) u senzorskom elementu jednaka:

$$e = \frac{d\varphi}{dt} = \Psi_m \cdot \sin \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} = E_m \cdot \sin \theta \quad (3.6)$$

i može se odrediti trenutnom frekvencijom u bilo kom vremenskom trenutku:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.7)$$

koja je proporcionalna trenutnoj ugaonoj brzini:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.8)$$

Tekuća srednja ugaona brzina ω u intervalu h merena u jedinicama 2π predstavlja frekvenciju obrtanja i određena je Steklovljevom funkcijom:

$$n(t) = \frac{1}{2\pi h} \int_{t-0.5h}^{t+0.5h} \omega(\tau) d\tau \quad (3.9)$$

Za opisivanje brzine obrtanja celishodno je koristiti izraze kojima se vrši urednjavanje:

$$n(t) = \frac{1}{2\pi h} \int_{t-h}^t \omega(\tau) d\tau = \frac{1}{2\pi h} \int_0^h \omega(t-\tau) d\tau \quad (3.10)$$

Merenje frekvencije brzine obrtanja je dato izrazom

$$n_x = f_x \frac{60}{Z} \quad (3.11)$$

gde je Z broj koji ukazuje na rezoluciju enkodera sa kojom se meri brzina.

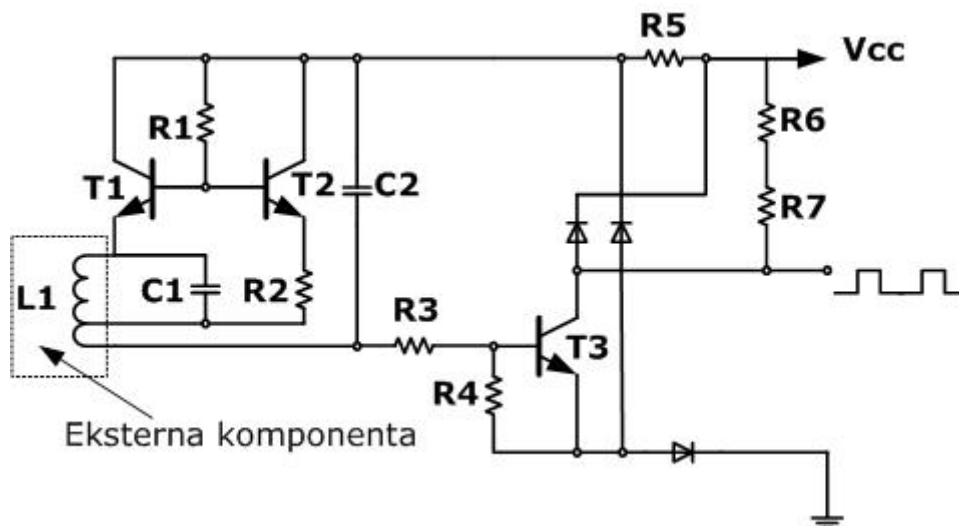
Za savremene aplikacije potrebno je da senzor brzine obrtanja obezbeđuje digitalni i kvazi digitalni izlaz kompatibilan sa standardnim tehnologijama. To znači da senzor i kolo za procesiranje signala, bazirano na mikrokontroleru može da bude realizovano u istom integrisanom kolu. Dobro rešenje po mnogim aspektima predstavlja slučaj kada je iz oscilatora dobijen izlazni signal u obliku povorke pravougaonih impulsa, čija je frekvencija linearno zavisna od brzine obrtanja.

Na slici 3.2 je prikazana električna šema aktivnog senzora brzine obrtanja (Active Sensor of Rotation Speed). Ovaj senzor se sastoji od generatora frekvencije ($f = 1MHz$), senzorskog elementa (namotaj), pojčavača, naponskog stabilizatora i izlaznog tranzistora za uobličavanje. Za projektovanje senzora primenjena je tehnologija „chip & wire“ koja kombinuje prednosti obe tehnologije – monolitne i hibridne tehnologije. Elektronska kola su realizovana na istom integrisanom kolu, a samo su induktivnost, dva otpornika i kolo za stabilizaciju realizovani u skladu sa hibridnom tehnologijom.

U principu amplituda izlaznog signala ovih senzora je konstantna i ne zavisi od temperature i smera obrtanja. Takođe duti – cycle od 50% je nezavisan od rastojanja. Međutim, u frekventnim opsezima koji odgovaraju brzinama iznad 50000rpm (Rotate per Minute) dolazi do povećanja širine impulsa.

Aktivni senzori broja obrtaja na bazi magnetnih i Hall – ovog efekta su pogodniji u situacijama kada treba odrediti trenutak zaustavljanja. S druge strane prednost aktivnih senzora na bazi poluprovodnika je u mogućnosti rada sa nemagnetnim rotorskim zubima. Zbog toga merni rotor može da bude napravljen od plastike, a zubi mogu da budu samo

metalizirani. To bitno povećava proizvodljivost takvih senzora uz smanjenje cene koštanja. Sa izuzetkom bezkontaktnih senzora za merenje brzine obrtanja, ovakvi senzori mogu da budu korišćeni i kao senzori ugaone pozicije, pozicioni senzori, brojači metalnih elemenata i kao krajnji prekidači. Dodatno, inteligentni senzori realizovani na ovim principima dozvoljavaju merenje i obrtnog (ugaonog) ubrzanja.



Slika 3.2 Šema aktivnog senzora brzine obrtanja

Aktivni poluprovodnički senzori nisu pod uticajem spoljašnjih magnetnih polja u poređenju sa sensorima na bazi Hall – ovog efekta. Kod senzora na bazi Hall – ovog efekta treba u obzir uzeti postojanje inicijalnog nivoa izlaznog signala između elektroda Hall – ovog elementa u odsustvu magnetnog polja i njegovo odstupanje. To je posebno karakteristično u širokom temperaturnom opsegu. Senzor za merenje brzine obrtanja na bazi Hall – ovog efekta zahteva postojanje enkodera sa magnetnim polovima.

3.1.4 Inteligentni opto senzori

Svetlost je realan signal koji se često meri direktno ili se koristi kao indikator neke druge veličine. Većina svetlosnih senzora konvertuje svetlost u analogni signal koji predstavlja struju ili napon, dok se struja foto – diode može konvertovati u frekvencijski izlazni signal. Intenzitet svetlosti može da varira u opsegu nekoliko redova veličine, čime se komplikuje problem rezolucije i odnosa signal – šum u širokom opsegu ulaznog signala. Konvertovanje intenziteta svetlosti u frekvenciju prevazilazi ograničenja nametnuta dinamičkim opsegom napona napajanja, šumom i rezolucijom pri A/D konverziji.

Uređaj ovakvog tipa proizvodi firma Texas Instruments. Tipičan primer je jeftini programabilni silicijumski senzor sa monolitnim svetlosno – frekvencijskim konvertorom. Izlaz ovog kola je povorka pravougaonih impulsa frekvencije u opsegu 0 – 1MHz, koja je

linearno proporcionalna intenzitetu svetlosti u vidljivom i infracrvenom spektru. Dodatno, uređaj obezbeđuje programabilna svojstva sa ciljem podešavanja ulazne osetljivosti i skalirana izlaznog signala. Ova svojstva su realizovana pomoću jednostavne elektronske tehnike, izborom različitog broja od 100 elemenata u foto – diodnoj matrici. Da bi se postigla prihvatljiva cena za frekventno – digitalnu konverziju može da se koristi jeftini mikrokontroler. Nivoi svetlosti od 0.001 do 100000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ mogu da budu identifikovani direktno bez filtriranja.

Pošto se konverzija izvršava direktno na integrisanom kolu, efekti spoljašnje interferencije i struje curenja su minimizirani i rezultatni frekvencijski izlaz, koji je imun na šum se lako prenosi čak i iz udaljenih delova sistema. Izolacija se lako postiže putem optičkih spojnica ili transformatora.

Interesantno rešenje integrisanog inteligentnog optičkog senzora razvijeno je na Delft University of Technology. Integrisani senzor boje je projektovan i realizovan sa ciljem da se dobije digitalni izlaz za IS2 format magistrale. Očitavanje foto – dioda je realizovana na takav način da se dobije niz impulsa sa frekvencijom koja je proporcionalna intenzitetu svetlosti (Luminance), a duty – cycle je proporcionalan boji (Chrominance). Informacija o boji je dobijena korišćenjem zavisnošću koeficijenta apsorpcije svetlosti u silicijumu od talasne dužine.

3.1.5 Senzori vlažnosti

Senzori vlažnosti i rose koji na izlazu daju frekvencijske signale mogu da se realizuju na bazi konverzije vlažnost – kapacitivnost – frekvencija (ili duty – cycle). Shodno tome većina takvih senzora relativne vlažnosti je bazirana na korišćenju kapacitivnih ćelija i tajmera NE555 na bazi čega se ostvaruje konverzija $x(t) \rightarrow C(t) \rightarrow F(t)$. Iako pomenuti tajmeri nisu precizni greška retko prelazi 1%. Tipični frekventni opseg ovih senzora je 5978 – 7825Hz. U velikom broju slučajeva ovakvi senzori su razvijeni za OEM (Origin Manufacture Equipment) primene kod kojih je potrebno pouzdano i tačno merenje. Direktno povezivanje sa mikrokontrolerima je omogućeno preko odgovarajućih modula koji generišu frekvencijski izlaz za merenje u opsegu od 10 – 95% RH (Relative Humidity) relativne vlažnosti.

Neke druge firme razvile su senzore na istim principima $x(t) \rightarrow C(t) \rightarrow F(t)$ konverzije, ali kod kojih se za opsege merenja relativne vlažnosti od 5 – 95% RH generišu izlazi sa frekvencijama u opsegu od 54 – 47kHz odnosno 33 – 27kHz.

3.1.6 Hemijski i gasni inteligentni senzori

U okviru saradnje akademskih institucija i industrije u Velikoj Britaniji je razvijen „elektronski nos“ kao niz senzora koji simuliraju ljudsko čulo mirisa. Senzori koji čine niz su izabrani zbog svojih hemijskih svojstava i u principu su bazirani na polimernim filmovima koji imaju svojstvo hemijske apsorpcije. U principu ovi senzori se koriste tako što se „čitanjem“ svakog senzora iz niza kreira izlaz. Idealni odgovor senzorskog niza bi bio da svaki izlaz odgovara samo jednoj analizi ili hemijskom jedinjenju. Primer ovakvog senzora je baziran na piezoelektričnom kristalu kvarca sa visokim Q faktorom i prirodnom rezonantnom učestanošću od 500MHz. Površina kristala je kontrolisana malim termoelektričnim elementom kojim se sprečava kondenzacija para na njoj i kojim se greje površina radi čišćenja između analiza. Kondenzacijom dodata masa na površini kristala smanjuje frekvenciju vibracija direktno proporcionalno sloju kondenzata. Ova frekvencija se meša sa referentnom frekvencijom i međufrekvencija (obično oko 100kHz) se broji pomoću mikrokontrolera.

Za gasna merenja koriste se tzv. akustički senzori, kod kojih se sa visokom rezolucijom meri brzina zvuka u gasom punjenim ćelijama i kontroliše frekvencija oscilatora preko vremena potrebnog da se zvuk prenese od ultrazvučnog predajnika do prijemnika. Kolo za upravljanje, procesiranje signala i komunikaciju bazirano je na PIC17C44 mikrokontroleru koji može da radi direktno sa frekvencijskim signalom, a zahvaljujući postojanju D/A konvertora može da generiše izlazni analogni signal koji odgovara širinskoj impulsnoj modulaciji (PWM).

Hemijski senzori mogu da budu korišćeni ne samo za merenje različitih hemijskih veličina i sastava gasnih smeša već i za merenje nehemijskih veličina kao što je npr. brzina obrtanja, za koju se obično koriste električni i magnetni senzori. Elektrohemijske oscilacije se često mogu identifikovati uranjanjem gvožđa u rastvor fosfornog acida i hidrogen peroksida. Ove oscilacije se interpretiraju kao posledica unakrsnog povezivanja elektrohemijskih reakcija i procesa prenosa masa u okolini elektrode. Zbog toga se očekuje da frekvencija oscilacija odražava brzinu protoka oko elektrode. Aparatura za odgovarajuća merenja se sastoji od štapića ugljeničnog čelika koji je montiran na obrtni disk. U mešavini 0.5Mol fosfornog acida i 1.5Mol hidrogen peroksida pojavljuju se visoko stabilne elektrohemijske oscilacije. Amplituda ovih oscilacija je u opsegu 600mVp-p, a frekvencija oscilovanja je funkcija osetljivosti na brzinu obrtanja i nalazi se u opsegu od 100 do 2000rpm.

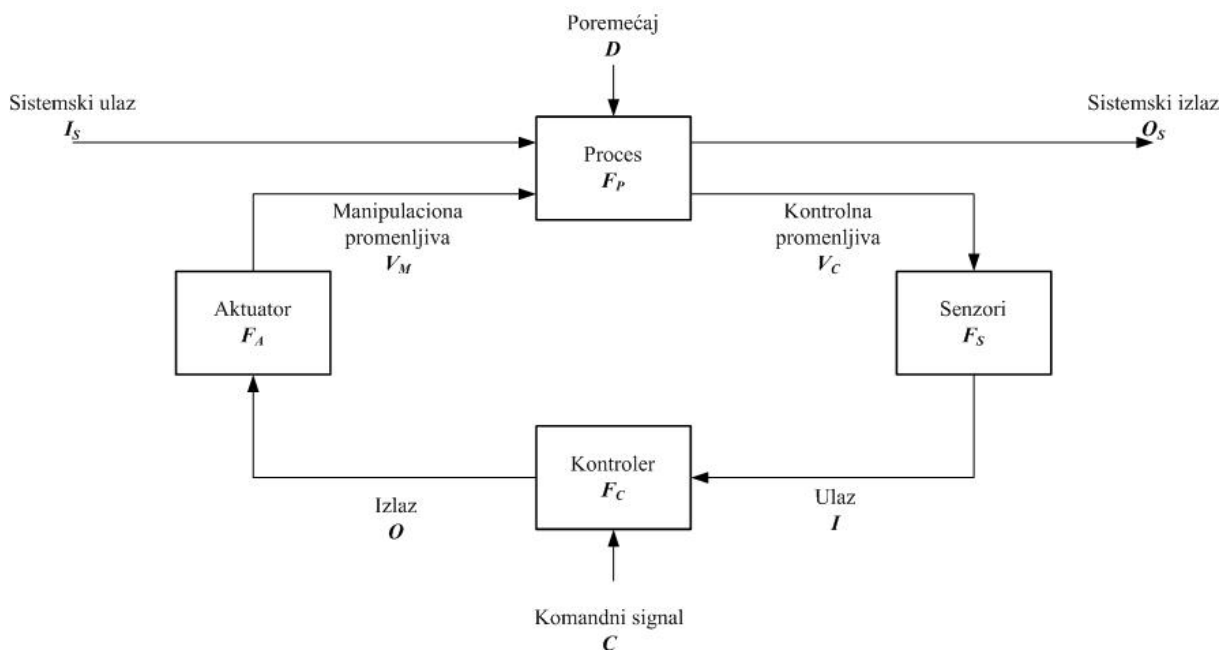
4.

PROJEKTOVANJE SISTEMA INTELIGENTNIH SENZORA

Razvoj računarske tehnike i telekomunikacija uticao je na značajne promene u razvoju, projektovanju i implementaciji savremenih upravljačkih sistema. Naročito značajne promene su nastale sa pojavom inteligentnih senzora koji su omogućili da upravljanje procesima postane globalizovano, tj. da se akvizicija podataka, realizacija upravljačkih funkcija i delovanje na upravljani proces može ostvarivati na daljinu. Mogućnosti prenosa podataka na proizvoljna rastojanja uticali su da se promeni filozofija u projektovanju upravljačkih sistema. S druge strane projektovanje inteligentnih senzora vezano je za njihovu konkretnu primenu i potrebe njihovog povezivanja u senzorske mreže sa ciljem efikasnog zadovoljenja zahteva konkretne primene.

4.1 Zahtevi savremenih upravljačkih sistema

Sistem je skup komponenata koje rade zajedno sa ciljem postizanja nekog zajedničkog cilja. Da bi se projektovao jedan sistem neophodno je da se definišu odgovarajući zahtevi koje taj sistem treba da realizuje. Ako se posmatra sistem za upravljanje procesima može se reći da je cilj svakog ovakvog sistema da opslužuje vremensku funkciju $F(t)$ koja definiše odnos između ulaza u sistem (I_s) i izlaza iz sistema (O_s) u prisustvu poremećaja (D), kao što je prikazano na slici 4.1. Ovi odnosi uključuju fundamentalne hemijske, mehaničke, aerodinamičke i druge zakone sadržane u unutar strukture i realizacije procesa.



Slika 4.1 Osnovni model upravljanja procesima

Kao što je prikazano na slici 4.1 sistem za upravljanje procesima može da se podeli u četiri tipa komponenti:

- Proces;
- Senzori;
- Aktuatori;
- Kontroler.

Ponašanje procesa se prati preko kontrolisane promenljive (V_C), a kontroliše preko manipulacione promenljive (V_M). Proces može da se opiše funkcijom F_P koja dobija preslikavanjem $V_M \times I_S \times D \times t \rightarrow O_S \times V_C$. Nažalost, obično je teško da se dobije matematički model procesa zbog činjenice da je većina procesa visoko nelinearna, tj. karakteristike procesa od nivoa operacije i čak pri konstantnom operativnom nivou, karakteristike procesa se menjaju u vremenu, tj. proces je nestacionaran. Bilo koji pokušaj da se obezbedi opis procesa na bazi matematičke jednačine podrazumeva uprošćavanja i zbog toga neće biti savršen. Međutim, neke od karakteristika procesa mogu da budu opisane i ti opisi mogu da se koriste da se dobije i proveriti upravljačka funkcija.

Senzori se koriste da prate aktuelno ponašanje procesa merenjem kontrolne promenljive. Npr., termometar može da meri temperaturu rastvarača u hemijskom procesu ili visinomer može da meri visinu aviona iznad nivoa mora. Sensorna funkcija F_S preslikava se kao $O \times t \rightarrow I$.

Aktuatori su uređaji koji su projektovani da manipulišu ponašanjem procesa, npr. ventili kontrolišu protok fluida ili pilot menja smer i brzinu aviona. Aktuatori fizički izvršavaju

komande koje zadaje kontroler sa ciljem da se promeni manipulaciona promenljiva. Funkcionalnost aktuatora je opisana aktuatorskom funkcijom koja se preslikava kao $O \times t \rightarrow V_M$.

Kontroler je analogni ili digitalni uređaj koji se koristi za implementaciju upravljačke funkcije. Funkcionalno ponašanje kontrolera se opisuje upravljačkom funkcijom F_C koja se preslikava kao $I \times C \times t \rightarrow O$, gde C označava spoljašnji upravljačke signale. Procesu mogu da menjaju stanje ne samo preko unutrašnjih uslova i manipulacionih promenljivih već i preko poremećaja (D) koji nisu subjekat za podešavanje i upravljanje kontrolera. Osnovni upravljački problem je podešavanje manipulacionih promenljivih tako da se sistemski cilj uprkos poremećajima.

Prikazani model je apstrakcija – odgovornost za implementaciju upravljačke funkcije može u praksi da bude distribuirana među nekoliko komponenata, uključujući analogne uređaje, digitalne računare ili ljude. Dalje, kontroler može da ima samo delimičnu kontrolu nad procesom – promena stanja u procesu može da se desi u skladu sa unutrašnjim uslovima u procesu ili zbog spoljašnjih poremećaja ili aktuator nije reagovao kao što se očekivalo. Npr., pilot u sistemu za prevazilaženje saobraćajnih kolizija (Traffic Collision Avoidance System – TCAS) može da ne sledi savete koji dolaze iz sistema TCAS, kao što je npr. manevar izbegavanja.

Namena specificiranja zahteva za upravljački sistem je definisanje sistemskih ciljeva i ograničenja, funkcije F_C , pretpostavki vezanih za druge komponente upravljačke petlje, jer:

1. Realizator treba to da zna da bi mogao da implementira korektno upravljačku funkciju;
2. Sistem inženjeri i analitičari treba da znaju kako da provere model sa aspekta sistemskih ciljeva i ograničenja.

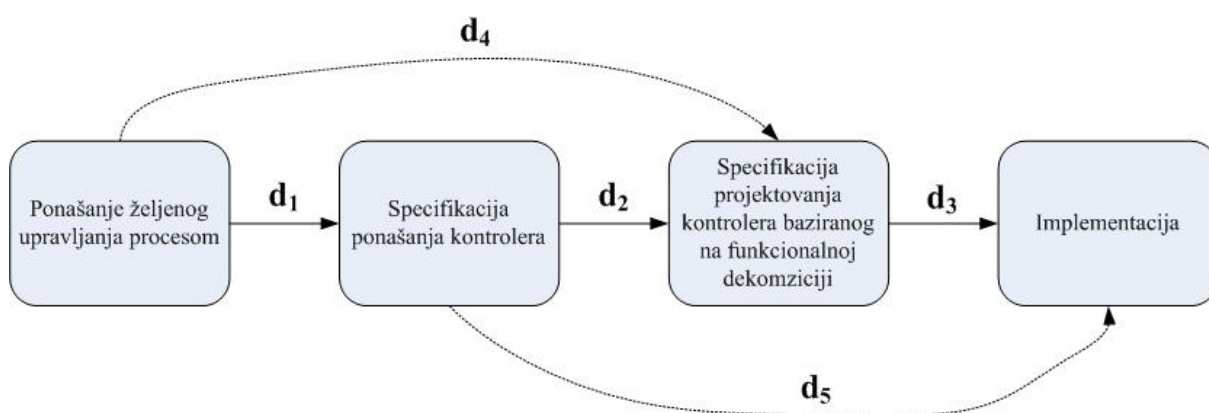
Informacije o stanjima procesa se dobijaju merenjem. Npr., kod TCAS relativna pozicija drugog aviona se računa na bazi vremena propagacije poruke do tog aviona i natrag. Teoretski, funkcija F_C može da bude definisana korišćenjem samo prave vrednosti kontrolne promenljive ili komponente stanja (npr. prave pozicije aviona). Međutim, u bilo kom trenutku, kontroler ima samo izmerene vrednosti komponenti stanja (što može biti posledica kašnjenja u sistemu ili netačnog merenja) pa kontroler mora da koristi ove merne vrednosti da izvede zaključak o pravim uslovima u procesu i mogućoj korekciji izlaza (O) da bi opsluživao upravljačku funkciju. Kod TCAS npr., senzori obuhvataju uređaje kao što su visinomer (nije potrebna prava visina) i antene za komunikaciju sa drugim avionom. Primarni aktuator TCAS je pilot, koji može, a ne mora da odgovori na preporuke sistema. Kašnjenje pilotovog odgovora je važno vreme koje mora da se uzme u obzir pri projektovanju kontrolne funkcije.

Ovakva kašnjenja u stvarnom procesu mogu da uzrokuju ograničenja u pogledu performansi aviona.

4.1.1 Pristup definisanju zahteva za upravljački sistem

Ponašanje kontrolera, tj. funkcije F_C koju treba da izračunava kontroler, specificira se korišćenjem modela stanja mašine. Izlazi kontrolera su specificirani u skladu sa promenama stanja u modelu na bazi informacije o tekućem stanju koja je dobijena preko kontrolne promenljive V_C . Kod TCAS npr., upravljačka funkcija je specificirana korišćenjem modela stanja svih aviona u prostoru glavnog aviona, stanja komponenta glavnog aviona (npr., visinomera, avionskih diskretnih statusa i displeja u kabini), stanja bliskog zemaljskog radara. Informacija o ovim stanjima prima se sa senzora i komande se šalju aktuatorima (npr. pilotima, antenama i transponderima).

Model stanja mašine upravljačke funkcije je iterativno fino podešen u toku specifikacije zahteva. Ovaj model je bitna apstrakcija ponašanja systemske funkcije F , jer on modelira sve relevantne aspekte komponenta upravljačke petlje procesa. Greške u modelu stanja mašine predstavljaju nesaglasnost između ovog modela i željenog ponašanja upravljačke petlje, uključujući proces. Definiše se neformalni koncept *semantičke distance* (slika 4.2) kao obima napora potrebnih da se translira iz jednog modela u drugi. Ovde se veruje da, u cilju da se maksimizira sposobnost aplikacionog eksperta da nađe grešku specifikaciji zahteva, da semantička distanca (d_1) između ponašanja željenog upravljanja procesom i specifikacije tog ponašanja mora da bude minimizirana. S druge strane to implicira da zahtevi moraju da budu specificirani u potpunosti u okvirima komponenta i promenljivih stanja kontrolisanog sistema. Specijalno, „privatne“ promenljive koje se tiču samo implementacije zahteva i nisu deo viđenja kontrolisanog sistema od strane aplikacionog eksperta neće biti korišćene.



Slika 4.2 Semantička distanca

Pregled zahteva procesa uključuje validaciju odnosa između promena u svetu realnih procesa i specificiranih promena i odgovora u modelu upravljačke funkcije. Zbog toga mogućnost pregleda će biti poboljšana ako specifikacija zahteva eksplicitno pokazuje ovaj odnos. Čak šta više, kada opis ponašanja zahtevanog kontrolera uključuje npr., i projektovanje softvera i funkcionalnu dekompoziciju tada semantička distanca (d_4) između ponašanja upravljanja procesom i specificiranog ponašanja kontrolera se povećava, a odnos između njih postaje teži za validaciju. TCAS aplikacioni eksperti, koji znaju veoma malo ili ništa o računarima ili softveru mogu da budu sposobni da čitaju zahteve modela TCAS i nađu greške u njemu.

Dodatno model ponašanja omogućava:

1. Matematičku verifikaciju različitih željenih svojstava, kao što su konzistentnost upravljačkog modela sa sistemskim ciljevima i ograničenjima;
2. Generisanje standardnog inženjerskog sistema i sistema analize bezbednosti, kao što je stablo grešaka;
3. Primenu formalnih kriterijuma tačnosti i robusnosti za specificirani model.

Iako se veruje da ovakav tip specifikacije ponašanja je lakši za aplikacione eksperte za prikazivanje i lakši za validaciju korišćenjem formalnih procedura za analizu, semantička distanca (d_5) između zahteva i standardne implementacije bazirane na funkcionalnoj dekompoziciji se povećava. Ako zahtevi performansimogu da budu zadovoljeni specifikacija može da se implementira direktno bez posrednog projektnog koraka.

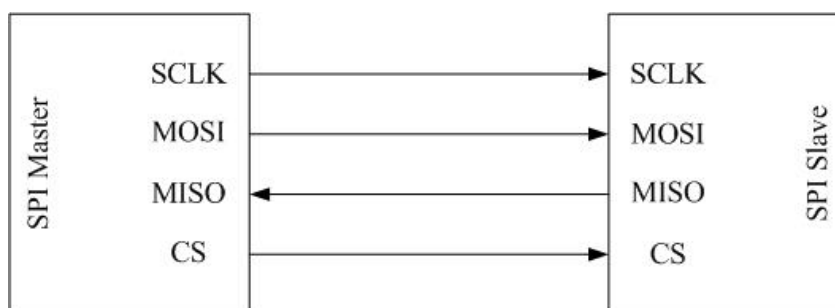
4.2 Povezivanje inteligentnih senzora sa računarom

U principu svaki inteligentni senzor može samostalno da komunicira sa upravljačkom jedinicom. Međutim, treba imati u vidu da u tom slučaju svaki takav uređaj mora da ima posebnu predajnu jedinicu, što se često može pokazati kao neracionalno. Zbog toga se često vrši grupisanje signala sa različitih senzora na istom računaru, koji onda vrši primarnu obradu i prenos ovih signala prema upravljačkoj jedinici. Ovo je naročito pogodno u slučajevima kada treba obezbediti praćenje većeg broja parametara na udaljenom objektu. Da bi se ostvarila koncentracija/multipleksiranje izlaza više senzora na isti računar, koji je po pravili realizovan na bazi mikroprocesora/mikrokontrolera neophodno je obezbediti komunikaciju između senzora i računara. Za tu namenu je razvijeno nekoliko specijalizovanih magistrala, kao što su SPI (Serial Peripheral Interface) i I²C (Inter – Integrated Circuit) koji će ovde detaljnije biti objašnjeni.

4.2.1 SPI magistrala

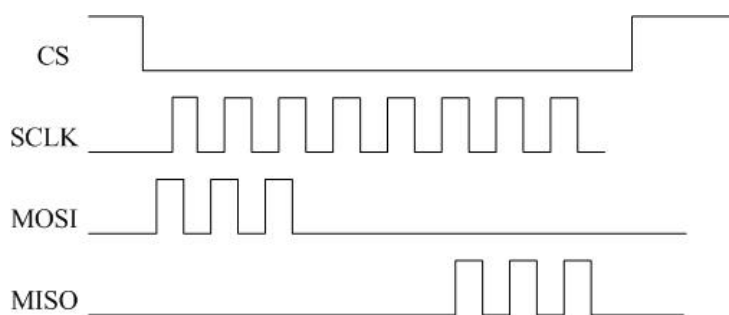
Ova magistrala predstavlja 4 – žični serijski komunikacioni interfejs koji se koristi za povezivanje mnogih periferija sa mikroprocesorima u full – duplex režimu komunikacije. SPI omogućava sinhroni serijski prenos podataka, brzinom od 1MBaud u režimu Master/Slave. SPI master inicira sve prenose podataka. U principu ova magistrala može da podržava brzine do 10Mbps. Ovaj sistem se sastoji iz sledećih signala, kao što je prikazano na slici 4.3:

- SCLK (Serial Clock) koji se šalje od *master* uređaja ka *slave* uređaju;
- SDI (Serial Data In), koji se još naziva i MOSI (Master Out Slave In) koji polazi od *master* uređaja;
- SDO (Serial Data Out), koji se još naziva MISO (Master In Slave Out) koji polazi od *slave* uređaja;
- CS (Chip Select) koji generiše *master* uređaj.



Slika 4.3 Osnovna struktura SPI sistema

Više *slave* uređaja može da bude uključeno u sistem multipleksiranjem CS linije. SPI podaci se pomeraju sa izlaza *master* uređaja na ulaz *slave* uređaja. Takođe pomeranjem se vrši prenos podataka sa izlaza *slave* na ulaz *master* uređaja. U oba slučaja se sinhronizacija vrši signalom SCLK. U zavisnosti koji tip *slave* uređaja je implementiran podaci se pomeraju bilo počev od MSB (Most Significant Bit) ili LSB (Least Significant Bit) bita. *Slave* uređaj može da koristi CS ulaz bilo na bazi signala sa aktivno visokim nivoom ili signala sa aktivno niskim nivoom. Na slici 4.4 prikazan je primer SPI vremenskog dijagrama.



Slika 4.4 Primer SPI vremenskog dijagrama

SPI interfejs ima 4 režima rada na bazi faze takta (CPHA) i polariteta takta (CPOL), koji su poznati kao Mode 0, Mode 1, Mode 2 i Mode 3. U tabeli 4.1 je dat prikaz ovih režima rada.

Tabel 4.1: Režimi rada SPI interfejsa

Režim	CPOL	CPHA
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

Za CPOL = 0 osnovno (neaktivno) stanje SCLK je 0. U tom režimu:

- Kada je CPHA = 0 podaci se čitaju na usponsku ivicu SCLK, a podaci će biti taktovani na izlaz na opadajuću ivicu SCLK;
- Kada je CPHA = 1 podaci se čitaju na opadajuću ivicu SCLK, a podaci će biti taktovani na izlaz na usponsku ivicu SCLK.

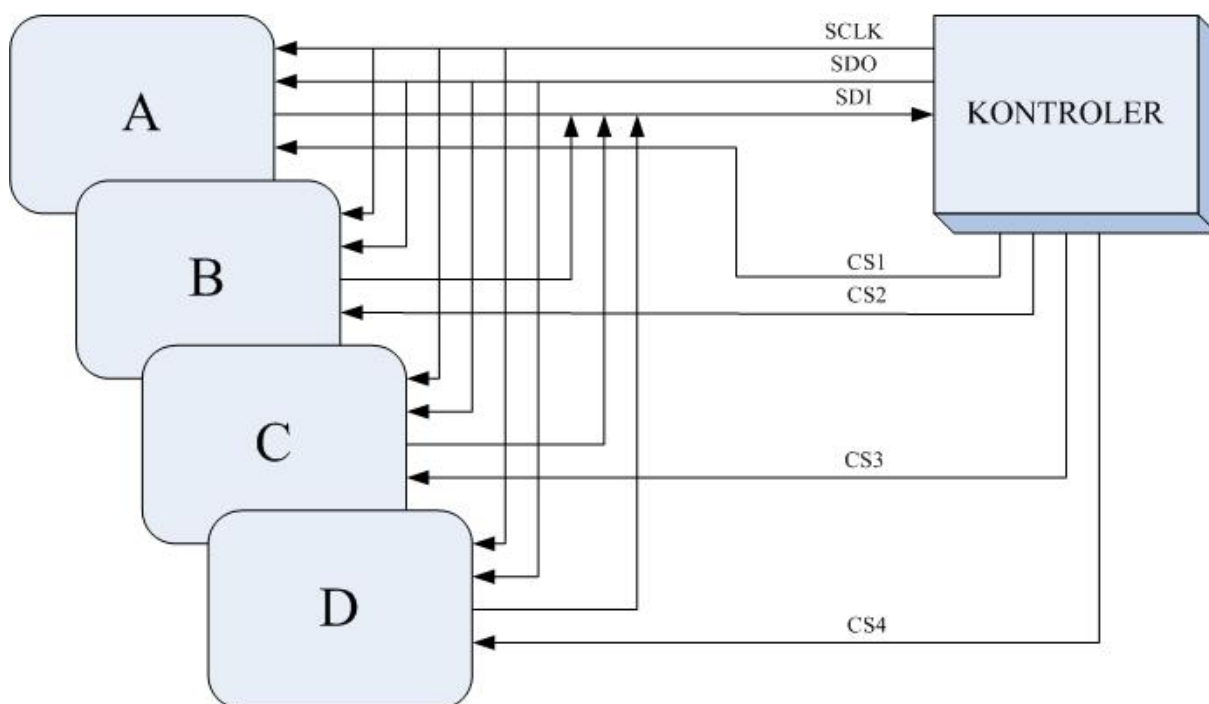
Za CPOL = 1 osnovno (neaktivno) stanje SCLK je 1. U tom režimu:

- Kada je CPHA = 0 podaci se čitaju na opadajuću ivicu SCLK, a podaci će biti taktovani na izlaz na usponsku ivicu SCLK.
- Kada je CPHA = 1 podaci se čitaju na usponsku ivicu SCLK, a podaci će biti taktovani na izlaz na opadajuću ivicu SCLK;

U principu SPI je pogodan za sisteme koji mogu da se realizuju na istoj štampanoj ploči (PCB), jer je on i projektovan od strane Motorola – inih stručnjaka sa idejom da se preko njega razmenjuju podaci između ranih integrisanih kola (IC) i to velikom brzinom, npr. korišćenjem sinhronizacionog takta učestanosti 180MHz i više. S obzirom na datu učestanost linije ove magistrale ne mogu da budu dugačke, jer bi došlo do značajnog povećanja reaktanse pa bi magistrala postala neupotrebljiva. Međutim, SPI Bus može da se koristi i izvan jedne štampane ploče, ali na niskim učestanostima, što nije sasvim praktično, jer on zahteva 4 komunikacione linije, što je više u poređenju sa 1 ili 2 linije koje su obično potrebne za efikasnu komunikaciju sa uređajima koji su smešteni izvan štampane ploče.

Korišćenje SPI magistrale na jednoj štampanoj ploči je veoma korisno, jer se na magistralu može povezati proizvoljan broj integrisanih kola. U principu SPI magistrala ima tri linije (SCLK, SDI, SDO). Dodatno je potrebno da se za svaki uređaj sa strane *master* uređaja generiše poseban signal dozvole (CS_i). Kada se želi uspostaviti komunikacija sa određenim kolom/uređajem onda mikrokontroler/mikroprocesor prvo generiše odgovarajući signal CS, a zatim se šalje poruka serijski bit po bit. Ostali uređaji za to vreme neće raditi ništa, jer nisu

dobili signal dozvole. Na slici 4.5 je prikazana struktura povezivanja mikrokontrolera sa uređajima A, B, C i D preko SPI magistrale.



Slika 4.5 SPI sistem sa četiri uređaja

Dobru stranu SPI magistrale predstavlja full – duplex rad što omogućava da kontroler može istovremeno da šalje i prima poruke od istog uređaja. Ova karakteristika SPI magistrale je posebno korisna za mikrokontroler – mikrokontroler komunikaciju. Mnogi mikrokontroleri imaju ugrađenu hardversku podršku za SPI Bus. Međutim, tamo gde nema ugrađene podrške moguće je lako implementirati SPI intefejs korišćenjem I/O pinova mikrokontrolera i razvojem odgovarajućeg *firmware*.

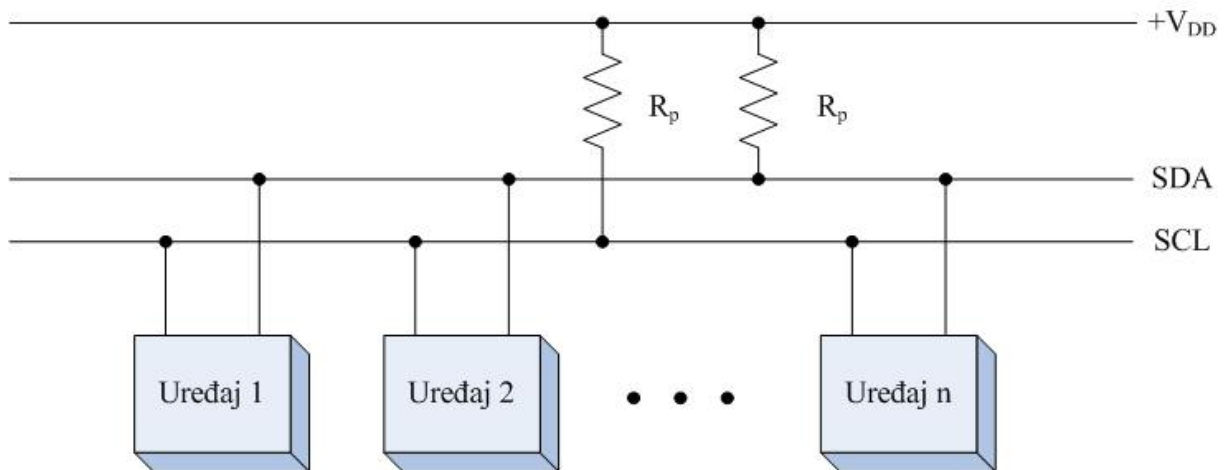
4.2.2 I²C magistrala

I²C magistrala je razvijena u kompaniji Philips ranih 80 – tih godina prošlog veka sa ciljem da se omogući laka komunikacija između komponenata na istoj štampanoj ploči. Magistrala je u originalnoj izvedbi radila na brzini od 100Kbps što je zadovoljavalo mnoge praktične primene. Kasnije je postignuta brzina od 400Kbps, a posle 1998. godine i brzina od 3.4Mbps. Treba naglasiti da se I²C magistrala ne mora da se korsiti samo za komunikaciju u okviru štampane ploče, već može da povezuje i komponente koje su povezane kablom. Jednostavnost i fleksibilnost su ključne karakteristike koje ovu magistralu čine atraktivnom kod mnogih primena. Njene najznačajnije karakteristike su:

- Zahtevaju se samo dve komunikacione linije;

- Ne zahteva se striktno određeni *baud rate* slično kao kod RS232, *master* uređaj generiše sinhro signal magistrale;
- Postoji jednostavan *master/slave* odnos između svih komponenta. Svaki uređaj povezan na magistralu je softverski adresibilan preko jedinstvene adrese;
- I²C magistrala je *multi – master* magistrala na kojoj postoji arbitracija i detekcija kolizije.

U fizičkom smislu I²C magistrala je definisana preko linije za podatke (SDA) i linije takta (SCL), kao što je prikazano na slici 4.6. Ove dve linije formiraju sinhronu serijsku magistralu. Broj uređaja koji može da bude povezan na magistralu ograničen je samo dozvoljenom ukupnom kapacitivnošću magistrale koja iznosi 400pF. Pošto je većina integrisanih kola koja se povezuju na I²C magistralu male snage, niske CMOS impedanse na magistralu se može u principu povezati veliki broj uređaja.



Slika 4.6 Šematski prikaz I²C magistrale

Signal takta na magistrali generiše jedan od *master* uređaja koji su povezani na magistralu. Kada su neaktivne linije SDA i SCL su preko odgovarajućih *pull – up* otpornika vezani na napon napajanja. Nivoi napona napajanja su fleksibilni. Napr. za napajanje magistrale i uređaja može da se koristi napon +5V, ali i napon koji je manji od +2V. To omogućava da I²C magistrala može da bude implementirana na bazi nekoliko tipova kola bez potrebe da svako ima sopstveni napon napajanja. Pomeraci nivoa mogu da se koriste kada I²C magistrala sadrži dve sekcije sa različitim naponima napajanja, npr. 3.3V i 5V. I²C ulazi u slučajevima rada na velikim brzinama mogu da koriste *Schmit – trigger* logiku da bi se smanjio uticaj šuma.

Prenos podataka na magistrali mogu da iniciraju samo *master* uređaji. Kada *master* uređaj želi da komunicira sa *slave* uređajem on prvo preuzima kontrolu nad magistralom. To je moguće samo u slučaju da je magistrala neaktivna, tj. oba signala SDA i SCL su na

visokom nivou. Tada *master* kreira START stanje da bi signalizirao drugim uređajima da će preuzeti kontrolu. Za kreiranje START stanja, takt linija SCL ostaje na visokom nivou, dok se linija SDA prebacuje na nizak nivo. To je jedinstvena situacija, jer u toku normalnog prenosa podataka SDA linija se menja samo kada je SCL linija na niskom nivou. Na ovaj način je omogućena resinhronizacija u slučajevima kada se pojavi greška u toku prethodnog prenosa podataka i neki uređaji izgube sinhronizaciju.

Kraj komunikacije se indicira STOP stanjem. Ovo stanje se generiše prebacivanjem SDA linije na visok nivo, dok je SCL linija takođe na visokom nivou. Slično kao kod START stanja, ova SDA promena ne može da se desi u toku normalnog prenosa podataka. Posle generisanja STOP stanja I²C magistrala se posle određenog vremena smatra slobodnom. Vreme oslobađanja magistrale zavisi od brzine magistrale.

Ponavljanje START stanja može da se desi kada se START stanje generiše bez STOP stanja kojim se završava prethodna sesija prenosa podataka. Posle ponovljenog START stanja magistrala ostaje zauzeta i može se u opštem slučaju smatrati kao normalno START stanje.

Između START i STOP stanja odvija se normalni prenos podataka. Jedinica prenosa na I²C magistrali je bajt tako da se prenos od *master* uređaja ka *slave* uređajima i obratno odvija na nivou bajtova. Prvi bajt svakog podatka prenosi adresu *slave* uređaja. Samo sedam od osam bitova u adresnom bajtu se koristi da definiše adresu uređaja. Bit najmanje težine ukazuje na zahtev za čitanjem odnosno upisom. 0 ukazuje na upis, a 1 na čitanje. Podaci se prenose tako što se prvo prenosi bit najveće težine.

U toku prenosa podataka *master* uređaj menja stanje takta periodično sa visokog na niski nivo i obratno. Podaci na SDA linije se mogu menjati samo kada je SCL linija na niskom nivou. Pošto se SDA linija promeni na željenu vrednost SCL linija se prebacuje na visok nivo obavestavajući druga kola na I²C magistrala da na SDA liniji postoji važeći podatak. Uređaji na I²C magistrali često imaju ograničenu brzinu i veoma ograničenu memoriju zbog čega je neophodno da svaki bajt bude potvrđen od strane prijemnika. Pošto *master* pošalje bajt on šalje devet taktnih impulsa u toku kojih se odvija ovo potvrđivanje. *Slave* uređaj postavlja SDA liniju na nizak nivo u toku ovih devet impulsa. Ako pak SDA linija ostane na visokom nivou *master* zna da je došlo do greške u toku prenosa podataka.

Jedno od važnih svojstava I²C magistrale je mogućnost da se na nju može povezati više od jednog *master* uređaja. Shodno tome može doći do problema izvora, jer svi masteri moraju da generišu sopstveni signal takta. Brzina takta može da varira tako da može da dođe do sinhronizacionih problema. Dalje, sistem mora da bude implementiran tako da se spreči da više od jednog *master* uređaja bude aktivno na magistrali u datom trenutku. Oba problema se rešavaju sinhronizacionom i arbitracionom logikom u *master* uređajima.

5.

MREŽE INTELIGNETNIH SENZORA

Mreže inteligentnih senzora predstavljaju mreže koje se sastoje od velikog broja individualnih senzorskih uređaja, koji se nazivaju čvorovi (eng. *node*). Ovi uređaji su sposobni da prate određenu pojavu, procesiraju izmerene podatke i da ih bežično šalju centralnom uređaju u mreži. Mreže inteligentnih senzora imaju široku primenu, od sistema kućne bezbednosti i automatizacije, primene u industriji i medicini, u praćenju prirodnih pojava, vojnoj industriji, itd.

Mreže ovakvih uređaja se raspoređuju na širem području od interesa, bez ikakvog prethodnog planiranja (eng. *ad-hoc networks*). Zbog ovakvog načina distribucije senzora, mreže ovakog tipa moraju biti sposobne da se same formiraju (inicijalizuju). Takođe, pošto senzori mogu biti pokretni (mobilni) mreže ovakog tipa moraju biti vrlo adaptivne i prilagođavati se promeni broja senzora u mreži. Pošto je prostor koji zauzima mreža mnogo veći od dometa radio primopredajnika inteligentnog senzora, on mora koristiti napredne algoritme za rutiranje, kako bi poruku mogao poslati centralnom uređaju, preko drugih uređaja.

Takođe sami inteligentni senzori predstavljaju uređaje vrlo malih dimenzija sa ograničenim resursima, kako po pitanju napajanja, tako i po pitanju procesorske snage i radne memorije. Uređaji su uglavnom baterijski napajani, gde je proželjno da uređaj radi mesecima

ili čak godinama samo pomoću jedne baterije. U velikom broju slučajeva ovi uređaji su namenjeni za jednokratnu upotrebu, jer je zamena baterije najčešće nepraktična i neisplativa.

Senzorski uređaji postižu tako dug životni vek, zahvaljujući vrlo niskoj potrošnji električne energije koju ostvaruju provodeći veći deo vremena u stanju vrlo niske potrošnje, kada senzorski uređaj ništa ne radi. Uređaji se povremeno uključuju kako bi izmerili podatke i poslali ih centralnom uređaju u mreži. Jedan od najvećih potrošača energije u pametnom senzoru predstavlja radio primo – predajnik, koji troši čak do 80% energije celokupnog senzora. Zbog toga je, potrebno obezbediti jako efikasan pristup medijumu, kako bi se izbegli svi nepotrebni gubici energije i što više produžio životni vek senzora.

Najnoviji razvoji u MEMS (Micro Electro – Mechanical Systems) tehnologiji, bežičnim komunikacijama i digitalnoj elektronici ogleda se u projektovanju jeftinih, multifunkcionalnih senzorskih čvorova, male snage i malih dimenzija, koji mogu da komuniciraju na kratkim rastojanjima. Povećanje mogućnosti ovakvih senzorskih čvorova, koji se sastoje od senzorskih elemenata, bloka za procesiranje podataka i komunikacionih komponenata omogućilo je realizaciju bežičnih senzorskih mreža (WSN – Wireless Sensor Network) baziranih na međusobnoj „saradnji“ velikog broja čvorova.

Bežične senzorske mreže imaju širok dijapazon aplikacija, kao što su:

- Nadgledanje okruženja;
- Biomedicinska istraživanja;
- Praćenje i prikazivanje čoveka;
- Vojne primene.

I polako postaju integralni deo naših života. Pri tome najveći deo istraživanja u pogledu implementacije bežičnih senzorskih mreža je usmeren ka zadovoljenju zahteva određenog broja primena kod kojih se podrazumeva sensorisanje i praćenje parametara procesa.

5.1 Protokoli za mreže bežičnih senzora

Protokol predstavlja skup pravila koje mora ispoštovati svaki uređaj koji želi učestvovati u radu određene mreže. Zbog velikog broja funkcija koje mrežni protokol mora da obavi u okviru mrežnih komunikacija, njihova struktura se najčešće analizira preko odgovarajućih referentnih modela. S obzirom da protokoli de facto predstavljaju „jezik međusobnog sporazumevanja“ uređaja povezanih u mrežu uvođenje referentnog modela imalo je za cilj i standardizaciju samih protokola radi njihove lakše implementacije na različitim uređajima. Istorijski gledano razvoj mrežnih protokola vezan je za pojedine firme koje su realizovale računarske mreže primenjujući pri tome sopstvena rešenja. Posledica takvog pristupa bila je da su međusobno mogli da komuniciraju samo računari istog

proizvođača. Najpoznatiji mrežni standardi koje su razvijale pojedine računarske kompanije bili su:

- System Network Architecture (IBM)
- DECNet (Digital Equipment Corporation)
- Netware (Novell)
- AppleTalk (Apple)

Da bi se prevazišli ovi problemi bilo je neophodno razviti otvoreni model protokola, koji bi omogućio da se u istu mrežu povezuju računari različitih proizvođača. Najpoznatiji takav model je tzv. OSI (Open System Interconnection) model, koji je definisan od strane međunarodne organizacije za standarde (ISO). Pomoću njega se opisuje interakcija između uređaja, programa, servisa i protokola pri mrežnim komunikacijama. Zahvaljujući tome koristi se pri izučavanju računarskih mreža, a po pravilu ga proizvođači koriste i pri njihovom projektovanju. OSI model deli strukturu mreže u sedam logičkih slojeva, gde svaki sloj ima tačno definisanu ulogu. Svakom od slojeva odgovaraju funkcije, servisi i protokoli koji na njemu funkcionišu. Struktura OSI referentnog modela prikazana je u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Struktura OSI referentnog modela

Sloj	Funkcije, servisi, procesi	Objekat	Protokoli
Aplikacija	Mrežni procesi vezani za aplikaciju	Podatak	HTTP, FTP, Telnet, DNS, DHCP, POP/SMTP
Prezentacija	Enkripcija i kodiranje podataka	Podatak	
Sesija	Uspostavljanje sesije krajnjih korisnika	Podatak	NetBIOS, PAP, CHAP, SSH
Transport	Veza, pouzdanost transport	Datagram	TCP, UDP
Mreža	Logičko adresiranje i rutiranje	Paket	IP, ICMP, ARP, RARP
Sloj veze	Fizičko adresiranje, pristup medijumu	Okvir	PPP, HDLC
Fizički sloj	Prenos signal	Bit	Token Ring, IEEE 802.11

5.2 Povezivanje inteligentnih senzora

U mrežama inteligentnih senzora, protokoli su takođe podeljeni u slojeve s im što su poslednja četiri sloja spojena u jedan, koji se naziva **aplikacioni sloj**. Ovaj sloj predstavlja inerfejs između bežične mreže i korisničkih aplikacija na inteligentnom senzoru. Ispod njega se nalazi sloj mreže čija je osnovna funkcija formiranje mreže i transport paketa kroz mrežu.

Sloj veze je zadužen za uspešno uspostavljanje veze između dva uređaja, dok fizički sloj je zadužen za slanje paketa preko radio primopredajnika.

Slojevi međusobno komuniciraju kroz prisupne tačke (Service Access Points – SAP) pomoću servisnih primitiva. Konceptom servisnih primitiva, obezbeđeno je da sloj pruža usluge svom nadređenom sloju i zahteva usluge od svog podređenog sloja. Postoje četiri servisne primitive:

- zahtev,
- indikacija,
- odgovor i
- potvrda.

Zahtev predstavlja servisnu primitivu kojom sloj N+1 zahteva od nižeg sloja N da mu pruži određenu uslugu. Kada sloj N izvrši zahtev koji je uputio viši sloj, on mu odgovara sa potvrdom pri čemu ga obaveštava o statusu izvršene usluge. Takođe, ukoliko niži sloj N primeti da je se desio neki događaj bitan za viši sloj, on ga obaveštava pomoću indikacione servisne primitive, a na osnovu nje viši sloj N+1 reaguje na novonastali događaj i šalje odgovor nižem sloju.

U mrežama osnovna jedinica prenosa podataka je paket, koji predstavlja strukuiran skup podataka. Formiranje paketa započinje se na najvišem sloju, gde se podaci iz aplikacije smeštaju u transportno polje paketa i dodaju se neophodna zaglavlja na početak i kraj paketa. Tako novoformiran paket se šalje nižem sloju gde se on smešta u transportno polje i dodaju se nova zaglavlja i ponovo se šalju sledećem nižem sloju. Kada paket dođe do primopredajnika, on se šalje kao niz bitova, koji primaju svi primopredajnici koji su njegovom radio dometu. Slojevi zatim proveravaju njihova zaglavlja i ukoliko su korektna, oni ih uklanjaju i transportno polje šalju višem sloju, sve dok podaci ne signu do korisničke aplikacije.

5.2.1 Fizički sloj

Fizički sloj bilo kog mrežnog protokola, predstavlja skup funkcija kojima se upravlja radom primopredajnika. Primopredajnici koji se koriste u mrežama inteligentnih senzora su uglavnom predviđeni za korišćenje nelicenciranih delova radio spektra, pri čemu je snaga njihove radio emisije ograničena lokalnim propisima. Nelicencirani delovi spektra koji se koriste na našim prostorima su 433MHz, 868MHz i 2.4GHz, dok snage radioemisije ne bi trebalo da prelaze prag od 50mW. Radio primopredajnici koriste savremena mehanizme modulacije kako bi se komunikacija između uređaja bila što sigurnija i otpornija na smetnje, koje su jako česte u bežičnim mrežama. Najčešće korišćene modulacije su razne vrste digitalnih faznih modulacija (BPSK, QPSK, O-QPSK) i širokopojasnih modulacija

(DSSS, FHSS, CSS). UWB predstavlja najnoviju digitalnu modulaciju koja koristi širok pojas licenciranog dela spektra, pri čemu je snaga radiemisije ispod nivoa šuma od -41.3dBm/MHz . Ova modulacija koristi kanale širine 500MHz , čime se mogu ostvariti vrlo velike brzine prenosa.

ZigBee standard podržava nekoliko vrsta modulacija, ali za sada su na raspolaganju uglavnom bili dostupni primopredajnici koji rade na 2.4GHz i koriste O-QPSK modulaciju sa brzinom prenosa od 250Kbit/s .

5.2.2 Sloj veze

Sloj veze je zadužen da obezbedi ravnopravan pristup medijumu, kako i se izbeglo nepotrebno trošenje energije koje nastaje usled kolizija paketa. Kolizija predstavlja situaciju kada dva uređaja emituju pakete istovremeno, pri čemu dolazi do potpunog ili delimičnog oštećenja paketa. Oštećeni paketi se moraju odbaciti i ponovo poslati, što uzrokuje nepotrebnu potrošnju energije. Postoje dva pristupa u organizaciji pristupa medijumu, jedan je zasnovan na zakazivanju svog saobraćaja u mreži dok je drugi zasnovan slučajnom pristupu kanalu.

Kod pristupa medijuma sa zakazivanjem koristi se vremenska raspodela kanala na slotove (TDMA), gde centralni uređaj dodeli svakom od uređaja određeni vremenski slot, koji će taj isključivo taj uređaj koristiti za komunikaciju sa centralnim uređajem. U toku trajanja slota ostali uređaji se mogu biti u stanju neaktivnosti, pri čemu neće trošiti energiju na nepotrebno slušanje kanala. Prednost ovog pristupa je u jednostavnosti realizacije i efikasnosti pristupa medijumu. Velika mana je nedostatak direktne komunikacije između uređaja u mreži, jer se sav saobraćaj mora odvijati preko centralnog uređaja. Takođe iskorišćenje kanala nije efikasno, jer se vremenski slotovi rezervišu za sve uređaje, bez obzira da li oni imaju potrebu da šalju podatke. Mreže ovog tipa, poseduju slabu adaptivnost, jer je prilikom prijavljivanja ili odjavljivanja uređaja iz mreže potrebno potpuno promeniti organizaciju pristupa kanalu.

Drugi pristup je baziran na činjenici da ce samo uređaji koji imaju potrebu da šalju podatke koristiti kanal. Najjednostavnija realizacija je korišćenjem ALOHA protokola, kod koga stanica odmah pristupa slanju podataka, bez obzira da li je kanal slobodan ili ne. Mana ovog pristupa je u čestim kolizijama koje se mogu javiti i u vrlo malom iskorišćenju kanala. Za potrebe bežičnih mreža razvijen je CSMA/CA pristup medijumu gde stanica pre nego što pošalje podake proveriti da li je kanal slobodan, pa tek onda pristupa slanju podataka. Ovaj pristup je jedino efikasan ukoliko je uređaj u stanju da čuju sve ostale uređaje u mreži, što je redak slučaj. U bežičnim mrežama dolazi do problema skrivenih stanica. Ako dva uređaja A i C koji se međusobno ne čuju, žele da šalju podatke uređaju B, oni će utvrditi da je kanal slobodan i otpočeće transmisiju, ali ce oba uređaja izazvati koliziju na uređaju B, a da toga

neće biti ni svesni. Jedno rešenje koje prevatilazi ovaj problem je upotreba RTS/CTS handshake mehanizma, u kojem stanica kada želi da pošalje podatke prvo šalje RTS paket kojim obavešava sve stanice u njenom radio dometu da je spremna za slanje paketa. Kada određena stanica primi RTS paket, ona odgovara sa CTS paketom, pri čemu će je sve stanice u njenoj okolini čiti i znaće da će ubrzo uslediti prenos podataka i za to vreme će ostati neaktivne.

ZigBee mreže koriste CSMA/CA mehanizam pristupa medijumu, pri čemu podržavaju dva režima rada: zakazani i nezakazani režim rada. U zakazanom režimu rada glavni uređaj šalje specijalan paket, koji se naziva beacon, koji obavešava sve uređaje u mreži o rasporedu pristupa medijumu u toku sledećeg intervala, koji se naziva superfrejm. Svaki superfrejm predstavlja vremensku strukturu koja se sastoji od aktivnog i neaktivnog dela i koji je ograničen beacon paketima. Svaki aktivan deo je podeljen na 16 vremenskih slotova koji su podeljeni na deo sa negarantovanim i garantovanim prenosom. U delu sa negarantovanim prenosom uređaji se nadmeću kako bi dobili pristup nad kanalom, korišćenjem slotovanog CSMA/CA, dok u garantovanom delu svaki slot je rezervisan za određeni uređaj koji ga može koristiti bez ikakvog mehanizma pristupa kanalu. U neaktivnom delu superfrejma sva komunikacija između uređaja je onemogućena i uređaji se nalaze u stanju neaktivnosti.

U nezakazanom režimu rada, ne postoji nikakva organizacija pristupa kanalu, uređaji mogu u bilo kom trenutku prispupiti kanalu korišćenje CSMA/CA mehanizma.

5.2.3 Sloj mreže

Osnovni zadatak sloja mreže je da objedini sve uređaje u jednu jedinstvenu mrežu i da omogući prenos paketa kroz mrežu. U bežičnim senzorskim mrežama, uređaji se mogu podeliti u dve grupe, potpuno funkcionalne uređaje i uređaje sa redukovanim funkcijama. Potpuno funkcionalni uređaji mogu imati bilo koju ulogu u mreži i podržavaju sve funkcije predviđene standardom za koji su predviđeni. Oni su uglavnom imaju primarno napajanje iz električne mreže, pa je njihov radio primopredajnik uvek uključen jer nema potrebe za štednjom energije. Uređaji sa redukovanim funkcijama imaju ulogu da prate određenu veličinu i njeno stanje prosleđuju kroz mrežu i nemogu prosleđivati pakete kroz mrežu. Oni su baterijski napajani i oni prelaze u neaktivno stanje čim završe sa slanjem izmerenih podataka.

Prema načinu formiranja bežičnih mreža, razlikujemo sledeće topologije: zvezda, razgranato stablo i mreža (mesh). U zvezdastoj topologiji, mreža se sastoji od centralnog uređaja i niza uređaja koji mogu samo komunicirati sa centralnim uređajem. Ovu topologiju odlikuje jednostavnost. Velika mana joj je mala pokrivenost mrežom, jer u mreži mogu učestvovati samo uređaji koje se nalaze u radio dometu centralnog uređaja. Unapređenu verziju

ove topologije predstavlja razgranato stablo, gde centralni uređaj predstavlja koren stabla i formira inicijalnu mrežu koju ostali uređaji proširuju, stvarajući grane stable. Svaki uređaj u mreži ima svog jedinstvenog roditelja, dok svaki uređaj koji se preko njega zakači na mrežu predstavlja dete. Krajnji uređaji, se nazivaju listovi stabla i oni ne mogu primiti ni jedno dete. Prednost ove mrežne topologije je što zadržava jednostavnost zvezdaste topologije, pri čemu proširuje njen domet. Velika mana je nedostatak redundantnih putanja, jer između bilo koja dva čvora u mreži postoji samo jedna putanja i otkazivanjem bilo kojeg uređaja na toj putnji komunikacija će biti onemogućena i taj deo mreže će morati da bude nanovo formiran.

5.3 Komunikacioni standardi u mrežama inteligentnih senzora

Jedan od najvećih izazova sa kojima se sreću kompanije koje se bave oblašću bežičnih senzora predstavlja različitost standarda, protokola i metoda njihove komunikacije odnosno formata podataka u kojima se ta komunikacija odvija. Organizacije koje su se bavile problemima standardizacije u oblasti bežičnih mreža, kao što su ZigBee, WirelessHART i ISA SP100 su pokušale da učine da bežični standardi postanu pogodniji za industrijske aplikacije. Kao što je poznato osnove standarda se u principu sporo i teško menjaju, što nije pogodno za bilo koju kompaniju pogotovu što jedna kompanija teško da će na duži rok koristiti samo jedan standard. Zbog toga su standardi veoma važni za prihvatanje tehnologije bežičnih senzora. Usvajanje standarda po pravilu vodi do razvoja gotovih uređaja baziranih na tim standardima. Međutim, konfuzija vezana za poređenje standarda i izbora koji je od njih najbolji za korisničku aplikaciju može da dovede do blokiranja tržišta. Kooperativnost na nivou pojedinih ili svih standarda može da pomogne u pogledu prihvatanja tehnologije bežičnih senzora.

S druge strane treba uočiti da danas ne postoje standardi u pogledu formata podataka. Dok su metode prenosa paketa podataka definisane postojećim standardima, metode i formati podataka koji se šalju izvan mreže nisu. Za ilustraciju može da posluži ZigBee mreža, kod koje su brzina prenosa, potrošnja energije i konfiguracija uključeni u standard, dok je način kako se podaci predaju aplikaciji ostavljen neposrednoj implementaciji krajnjeg uređaja od strane proizvođača. Ovo može da stvori konfuziju kod korisnika koji nabavljaju ZigBee uređaje od različitih proizvođača, jer se može desiti da strukture podataka sa kojima ti uređaji rade ne budu iste.

U tabeli 5.2 data je kratak spisak nekih od standarda koji se koriste u bežičnim senzorskim mrežama. Postoje platforme koje omogućavaju kooperativnost između svih ovih uređaja sa ciljem da se kreira okruženje koje će dozvoliti krajnjem korisniku pristup bežičnom senzoru, bez obzira koji se standard koristi.

Tabela 5.2 Primeri bežičnih standarda za industrijske senzore

Bežični standard	Opis
802.11	Familija specifikacija koje je razvio IEEE za lokalne računarske mreže. U principu omogućava širok propusni opseg, veliku brzinu prenosa podataka i prenos velikih paketa podataka.
802.15	Familija specifikacija koje je razvio IEEE za personalne računarske mreže. Po pravilu namenjeni su mrežama u kojima se ostvaruje prenos malom snagom, sa niskom brzinom prenosa podataka i malim paketima podataka.
Bluetooth	Bežični standard kratkog dometa, koji radi na nelicenciranom frekventnom opsegu od 2.4GHz.
ISA SP100	Otvoreni industrijski standard koji pokušava da podržava više protokola u okviru istog standarda. Uključuje 2.4GHz i 802.14.5 radio prenos.
WiFi	Wireless Fidelity – tehnologija bazirana na 802.11 standardu.
WiMax	World Interoperability for Microwave Access? Standard za širokopoljasni bežični prenos na velike daljine baziran na IEEE 802.16.
WirelessHART	Otvoreni standard za bežične komunikacije projektovan od strane HART Communication Foundation za procese merenja i upravljačke primene. Baziran na 802.15 standardu i tehnologiji Frequency Hopping Spread Spectrum.
ZigBee	Dvosmerni standard namenjen malim brzinama prenosa za potrebe automatizacije kuća i mreža podataka. Koristi sisteme sa veoma malom potrošnjom za kreiranje okastih (mesh) mreža korišćenjem 802.14 radio prenosa.
Zwave	Komunikacioni standard namenjen mrežama u kojima se prenos ostvaruje malim snagama i malim brzinama prenosa u kojima se ostvaruje kooperacija između sistema i uređaja. Namenjen uređajima koji se koriste u kućama.

5.4 Primene bežičnih senzorskih mreža

Aplikativnost senzorskih mreža odavno se razmatra sa aspekta potencijalnih primena koje mogu da se realizuju korišćenjem bežičnih senzorskih mreža. U ovoj sekciji će biti prikazane postojeći komercijalni i akademski proizvodi koji koriste koncept umrežavanja senzora, a takođe će biti dat pregled postojećih primena bežičnih senzorskih mreža.

U principu bežična senzorska mreža može da se sastoji iz više tipova senzora, kao što su seizmički, magnetni, termalni, optički, infracrveni, akustički, koji su sposobni da prate širok varijetet uslova okruženja. Shodno tome moguće je realizovati širok opseg primena baziranih na konceptu bežičnih senzorskih mreža. U te aplikacije spadaju:

- Zaštitna životnog prostora;
- Praćenje svemira radi otkrivanja pretnji koje mogu da potiču od naprava proizvedenih od strane čoveka;
- Praćenje stanja tla i vode;
- Praćenje okruženja;
- Prikupljanje odbrambenih podataka;

- Analiza vremena i klime i njihovo predviđanje;
- Istraživanje sunčevog sistema;
- Praćenje seizmičkih pojava;
- Praćenje temperature;
- Praćenje brzine vetra;
- Prikupljanje GPS podataka.

Heterogenost u raspoloživim senzorskim tehnologijama i aplikacijama zahtevaju odgovarajuću standardizaciju da bi se postigao visok nivo praktičnosti u realizaciji senzorskih mreža za industrijske primene. Shodno tome definisan je standard IEEE 802.15.4 koji je namenjen za bežični prenos podataka malom brzinom uz malu potrošnju električne energije, što podrazumeva dugo trajanje baterija za napajanje i malu složenost urežaja. Za komunikaciju su izabrana tri različita opsega:

- 2.4GHz – globalno;
- 915MHz – Amerika;
- 868MHz – Evropa.

Fizički sloj koristi BPSK modulaciju na 868/915MHz opsezima i O-QPSK modulaciju na 2.4GHz opsegu. MAK sloj omogućava komunikaciju na bazi topologija zvezda, mesh i cluster. Domet prenosa je 10 – 100m za brzine prenosa 20Kbps do 250Kbps. U aplikacije koje koriste komunikaciju zasnovanu na ovom standardu spadaju:

- Senzorisanje i upravljanje uređajima u industriji;
- Automatizacija uređaja u poslovnim i stambenim objektima;
- Povezivanje igračaka.

Na bazi primene standarda IEEE 802.15.4 formirano je udruženje ZigBee kao neprofitni industrijski konzorcijum vodećih proizvođača poluprovodnika i prateće tehnologije. Ovo udruženje je stvoreno da bi se zadovoljile potrebe tržišta za jeftinim standardizovanim rešenjima za bežično umrežavanje koja podržavaju male brzine prenosa, malu potrošnju uz posedovanje odgovarajuće zaštite i pouzdanosti. Takođe, 2003. godine formirana je Wireless Industrial Networking Alliance (WINA) sa idejom da se stimuliše razvoj i promoviše prihvatanje bežične mrežne tehnologije i praktično pomogne povećanje industrijske efikasnosti. Prvi korak ove grupe snabdevača i krajnjih korisnika bio je da definiše potrebe krajnjih korisnika i prioritet industrijskih bežičnih sistema. Takođe uočeno je da standardi kao što su Bluetooth i WLAN nisu pogodni za senzorske aplikacije male snage. S druge strane standardizacioni pokušaji kao što su ZigBee i WINA mogu da omoguće brza poboljšanja u bežičnim senzorskim mrežama u industriji.

5.4.1 Vojne primene

Bežične senzorske mreže su karakterisane autonomnošću u korišćenju, brzom razvoju, samokonfigurabilnošću i otpornošću na greške korišćenih protokola. Zbog toga se koriste kao sastvni delovi vojnih sistema namenjenih za komandovanje, upravljanje, komunikacije, računanje, obaveštavanje, nadzor, osmatranje i navođenje – C⁴ISRT (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance).

Dust Networks obezbeđuje senzorske mreže za vojne operacije u protivničkom okruženju gde je suviše opasno da učestvuju ljudi. Preko bežičnih senzorskih mreža se dobijaju informacije potrebne da se procene kritične situacije na bojnopolju. U okviru ovih primena podrazumeva se korišćenje bežičnih senzorskih mreža za prikupljanje podataka o neprijateljskim pokretima, opasnim hemijskim materijama i stanju infrastrukture.

5.4.2 Primene vezane za okruženje

Ova vrsta aplikacija obuhvata primene u okviru kojih se može pratiti kretanje ptica, detektovati šumski požari i pratiti bio – kompleks okruženja.

CORIE je realizovan od strane Center for Coastal and Land Margin Research na Oregon Graduate Institute. On se sastoji iz senzorskih stanica koje su postavljene na ušću reke Kolumbije sa ciljem da prenose informacije o različitim parametrima okruženja. U te parametre spadaju:

- Temperatura;
- Salinitet;
- Nivo vode;
- Brzina rečnog toka.

Informacije prikupljene sa ovih senzora se koriste za on – line upravljanje plovilima, istraživanje marine i njenu zaštitu i istraživanje ekosistema i upravljanje njime. Duž ušća je postavljeno 13 senzorskih stanica i jednom koja je postavljena na plivajućoj bovi. Stanice međusobno komuniciraju preko Frewave DGR-115 bežične mreže proširenog spektra. Dodatno, prenos signala može da se obavlja i preko ORBCOMM LEO satelita u slučaju prekida normalne komunikacije.

Osmatrački sistem, Global Environmental MEMS Sensors (GEMS), koji poseduje karakteristike bežične mreže vazdušnih sonde projektovan je od strane ENSCO, velike američke kompanije koja se bavi razvojem u oblasti sigurnosti i kriznog inženjerstva na polju avio i kosmičke industrije posebno sa aspekta predviđanja globalnih vremenskih prilika i uslova okruženja. Ovaj sistem sadrži vazdušne sonde, koje mogu da mere nad svim regionima Zemlje sa velikom prostornom i vremenskom rezolucijom. Mala veličina omogućava

sondama da budu puštane u atmosferu i budu nošene vazдушnim strujama u dugom vremenskom periodu u kojima vrše merenja okruženja sa ciljem poboljšanja u tačnosti predavanja vremenskih prilika. Korišćenjem modularne senzorske opreme, sonde mogu da budu korišćene i za akustičkih, hemijskih, bioloških, nuklearnih ili drugih parametara koji su od interesa za odbrambene agencije, zaštitu od ratnih opasnosti i praćenje urbanih problema.

5.4.3 Medicinske primene

Razvoj biomedicinskih uređaja koji imaju mogućnost implantacije i inteligentnih integrisanih senzora omogućio je korišćenje senzorskih mreža za biomedicinske primene. Shodno tome veliki broj primena u ovoj oblasti baziran je na korišćenju senzorskih mreža.

Smart Sensor and Integrated Microsystem (SSIM) projekat, koji se realizuje na Wayne State University i Kresge Eye Institute pomaže da se ugradi veštačka retina ljudima sa oštećenim vidom. Senzorsko kolo se sastoji iz 100 mikrosenzora u obliku niza 10×10 i postavlja se duž retine. Ovi senzori daju električne signale koji su konvertovani u bazičnom tkivu u odgovarajuću hemijsku reakciju. Hemijski signali se nakon toga prenose do mozga putem optičkih nerva. Hemijski signali koji dolaze od mozga prihvataju se od strane mikrosenzora i inteligentni senzor na retini je stimulisan u skladu sa njima.

Receptori duž retine imaju različitu funkcionalnost. Periferijski su specijalizovani za vremenske događaje, dok su centralni specijalizovani za prostorno orijentisane informacije. Da bi imitirali funkcionalnost retine, raspored i principi prenosa inteligentnih senzora na svakom segmentu retine moraju posebno da se definišu. Međutim, pošto se razmeštaj senzora vrši u okviru preciznih medicinskih operacija mobilnost i problemi sa lokacijom koji se sreću kod tipičnih senzorskih mreža ovde nisu toliko značajni.

Praćenje nivoa šećera i tretiranje dijabetisa mogu da se poboljšaju korišćenjem bežičnih senzora. Bežični biomedicinski senzori mogu da se implantiraju u telo pacijenta tako da se praćenje nivoa šećera može vršiti kontinualno. Dodatno, može se automatizovati doziranje insulina.

5.4.4 Primene u domaćinstvu

Bežične senzorske mreže omogućavaju povezivanje različitih uređaja u stambenim objektima sa ciljem upravljanja različitim poslovima u domaćinstvu.

Cricket projekt na univerzitetu MIT koristi ultrazvučnu metodu za određivanje položaja korisnika, kada se oni kreću kroz unutrašnjost i ostvaruju interakciju sa okruženjem. Pri tome se koriste i fiksni i mobilni bežični čvorovi. *Cricket* obezbeđuje precizne informacije o položaju koje mogu da se obrađuju pomoću aplikacija, koje se izvršavaju na ručnim

računarima, laptop – ovima i senzorskim čvorovima. *Cricket* koristi kombinaciju RF i ultrazvučne tehnologije za dostavljanje informacije o lokaciji odgovarajućem nadzornom uređaju. Korišćenjem *Cricket* – a u okviru mnogih aplikacija mogu se koristiti precizne informacije o položaju raznih uređaja. Kao primer može da posluži praćenje kretanja voza – igračke pomoću laptop – a ili ručnog računara.

5.4.5 Industrijske primene

Pojava bežičnih senzorskih mreža ima veliki uticaj na oblasti kao što su akvizicija podataka i upravljanje u industriji, automatizacija zgrada i kontrola pristupa objektima.

Sensicast je napravio *H900 Sensor Network Platform*, koja predstavlja „mesh“ mrežni sistem, koji može da se koristi u mnogim industrijskim aplikacijama. *Xsilogy*, takođe proizvodi sisteme za praćenje u realnom vremenu za širok opseg industrijskih aplikacija, uključujući upravljanje otpadnim vodama, distribucijom nafte i gasa, upravljanje komunalnim otpadom ili železnicom.

Soflinx je razvio sistem za zaštitu, koji obezbeđuje detekciju u realnom vremenu potencijalne opasnosti od eksplozija odnosno nuklearnih, hemijskih i bioloških napada terorista. Korišćena je *Datalinx* tehnologija koja omogućava da se postupak obaveštavanja korišćenjem mreže približi izvoru podataka i korišćenjem „gateway“ uređaja koji se nalaze u mreži omogući pojedinačnim komponentama da ostvare automatsku reakciju na te podatke. Takođe, razvijene su i prenosne verzije ovakvih uređaja.

Grupa za razvoj mreža u INTEL – u je radila na mrežama sa velikim brojem bežičnih senzorskih čvorova uz održavanje velikog nivoa mrežnih performansi. Predloženo je rešenje koje koristi 802.11 „mesh“ mrežu krajnjih čvorova koji prekrivaju senzorsku mrežu. Ovi krajnji čvorovi služe kao magistrala preko koje senzorska mreža ispod njih može da koristi kao poprečne puteve. Predviđeno je da ovakav mrežni koncept bude korišćen u INTEL – ovoj fabrici poluprovodnika. Za sada, hiljade ovakvih senzora prate vibracije koje dolaze iz različitih delova opreme. Mašine se prate kontinualno sa ciljem da se odredi uticaj značajnih faktora na njihovo dobro funkcionisanje. S obzirom da je formiranje žične mreže senzora skupo, 802.11 „mesh“ topologija sa bežičnim senzorskim mrežama biće korišćena u INTEL – ovim fabrikama.

5.4.6 Druge komercijalne primene

Bežični automatski čitači merača (Automatic Meter Reading – AMR) predstavljaju jedan od sistema sa najbržim rastom na tržištu radio uređaja. Bežično prikupljanje mernih podataka o korišćenju električne energije, vode ili gasa predstavlja veoma jeftin način

prikupljanja podataka o potrošnji odnosno obračunu troškova. *Chipcon* proizvodi jeftino, integrisano radio kolo male snage i predajnike za bežične automatske čitače merača.

Grejanje, ventilacija i kondicioniranje (HVAC) predstavljaju drugi skup primena kod kojih bežične senzorske mreže imaju važan uticaj. U komercijalnim zgradama potrebno je obezbediti centralizovano upravljanje velikim brojem prostorija sa jednim HVAC uređajem i kontrolerom. Zbog toga je sistem se obično zasniva tako da se kontrola vrši sa po jednim senzorom u svakoj od prostorija. Međutim, jeftina bežična sensoraska tehnologija nudi mogućnost zamene jednog senzora u prostoriji, mrežom senzora gde postoji najmanje jedan senzor po prostoriji. *ZenSys* proizvodi bežične RF – baziranu komunikacionu tehnologiju projektovanu za komercijalne primene u oblasti upravljanja i očitavanje statusa aplikacija, kao što su čitanje merača, upravljanje osvetljenjem i raznim uređajima.

U okviru zajedničkog projekta koji su realizovale četiri institucije na departmanu za mašinsko inženjerstvo na Univerzitetu u Berkliju:

- Center for the Built Environment (CBE);
- Berkeley Sensor and Actuator Center (BSAC);
- Berkeley Wireless Research Center (BWRC);
- Integrated Manufacturing Lab

bežične senzorske mreže se koriste za upravljanje unutrašnjošću zgrada. Pre svega sprovedeno je dugotrajno merenje brzine vazduha. Cilj je bio da se ovakve mreže koriste za vizuelizaciju kretanja vazduha u unutrašnjosti zgrada što bi trebalo da pomogne da se proceni toplotni komfor, kvalitet vazduha u zgradama i potrošnja energije.

Primene bežičnih senzorskih mreža su dovele do značajnog povećanja interesovanja za njih i njihov dalji razvoj. Iako su postojeće primene stvorile širok dijapazon mogućnosti gde se fenomen bežičnih senzorskih mreža može eksploatisati i dalje postoji čitav niz oblasti gde se očekuje dalji prodor ove tehnologije. Takođe, dalje poboljšavanje u protokolima bežičnih senzorskih mreža će proširiti postojeće primene. ali i otvoriti nove oblasti za primenu bežičnih senzorskih mreža.

5.5 Projektovanje senzorskih mreža

Na projektovanje senzorskih mreža utiču mnogi faktori, kao što su:

- Otpornost na greške;
- Skalabilnost;
- Cena proizvodnje;
- Operativno okruženje;
- Topologija senzorskie mreže;

- Hardverska ograničenja;
- Prenosni medijum;
- Potrošnja energije.

5.5.1 Otpornost na greške

Neki od čvorova mogu da pogreše ili da budu blokirani usled gubitka napajanja, fizičkog oštećenja ili uticaja okruženja. Greška senzora ne bi trebalo da utiče na ukupan posao koji izvršava senzorska mreža. Takva pojava se naziva pouzdanost ili otpornost na greške. Otpornost na greške je sposobnost očuvanja funkcionalnosti senzorske mreže odnosno prekida njenog rada u slučaju da dođe do greške pojedinih čvorova. Pouzdanost $R_k(t)$ ili otpornost na greške senzorskog čvora može da se modelira korišćenjem Poasonove raspodele verovatnoće da se neće desiti greška unutar vremenskog intervala $(0, t)$:

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t) \quad (5.1)$$

gde je λ_k intenzitet greške čvora n , a t vremenski interval.

Treba voditi računa da protokoli i algoritmi mogu da budu projektovani da određuju nivo otpornosti na greške koja se zahteva od senzorske mreže. Ako okruženje u kome funkcioniše senzorski čvor ima nizak nivo uticaja u tom slučaju protokol može da bude manje strog. Npr. ako se senzorski čvor nalazi u kući sa ciljem da prati nivo temperature i vlažnosti, nivo tolerantnosti na greške može da bude niži, jer se ova vrsta senzorskih mreža može teže oštetiti ili se promeniti njeno ponašanje pod uticajem šuma okruženja. S druge strane ako senzorski čvor se nalazi na bojnopolju radi nadzora i detekcije otpornost na greške mora da bude visoka, jer prikupljeni podaci su kritični, a senzorski čvorovi mogu da budu uništeni od protivnika. Kao rezultat, nivo otpornosti na greške zavisi od primene senzorske mreže i ona se mora projektovati imajući na umu tu činjenicu.

5.5.2 Skalabilnost

Broj senzorskih čvorova korišćenih u razmatranim primenama može da bude reda stotina, pa i hiljada. Zavisno od primene broj može da dostigne i ekstremnu vrednost reda miliona čvorova. Shodno tome novi tipovi mreža moraju da budu da budu sposobne da rade sa tim brojem čvorova. Takođe, ovakve mreže mogu da budu raspoređene na malom prostoru, što ukazuje na mogućnost velike prostorne gustine senzorskih mreža. Ova gustina može da varira u opsegu od nekoliko senzorskih čvorova do nekoliko stotina senzorskih čvorova u prostoru čiji prečnik može da bude manji od 10m. Gustina može da se računa na bazi formule

$$\mu(R) = (N \cdot \pi \cdot R^2) / A \quad (5.2)$$

gde je N broj senzorskih čvorova u oblasti A i R je prenosni opseg radia. U osnovi $\mu(R)$ daje broj čvorova unutar prenosnog poliprečnika svakog od čvorova u oblasti A .

Dodatno, broj čvorova u oblasti može da se koristi za ukazivanje na gustinu čvorova. Gustina čvorova zavisi od primene u kojoj se čvorovi koriste. Za primene za mašinsku dijagnostiku gustina čvorova je oko 300 senzorskih čvorova u oblasti veličine $5m \times 5m$, dok je gustina za primenu kod praćenja vozila oko 10 senzorskih čvorova po oblasti. Generalno, gustina može da bude najviše 20 senzorskih čvorova/ m^3 . U kućama se mogu koristiti oko 2 tuceta uređaja, koji sadrže senzorske čvorove. Međutim, ovaj broj će da raste ako senzori počnu da se ugrađuju u nameštaj i druge objekte u domaćinstvu. Za praćenje uslova životne sredine broj senzorskih čvorova se kreće u opsegu od 25 do 100 po oblasti.

5.5.3 Cena proizvodnje

Pošto se senzorske mreže sastoje od velikog broja senzorskih čvorova, cena jednog čvora je veoma važna za pravdanje ukupne cene mreže. Ako je cena mreže veća nego što se može postići korišćenjem standardnih senzora onda korišćenje senzorske mreže nije opravdano. Shodno tome potrebno je da cena svakog senzorskog čvora bude mala. Pri sadašnjoj tehnologiji cena Bluetooth radio sistema može da bude manja od 10\$. Takođe, postavljen je cilj da cena PicoNode – a bude manja od 1\$. Cena Bluetooth radia, koji je poznat kao jeftin uređaj je i dalje deset puta veća od ciljane cene za senzorski čvor. Treba voditi računa da senzorski čvor takođe ima dodatne jedinice, kao što su senzorska i procesna jedinica. Takođe, on može da bude snabdeven i sa sistemima za nalaženje položaja, mobilizatorima ili generatorima napajanja zavisno od primene senzorske mreže. Shodno tome cena senzorskog čvora je veoma izazovna, jer se dati nivo funkcionalnosti plaća manje od 1\$.

5.5.4 Hardverska ograničenja

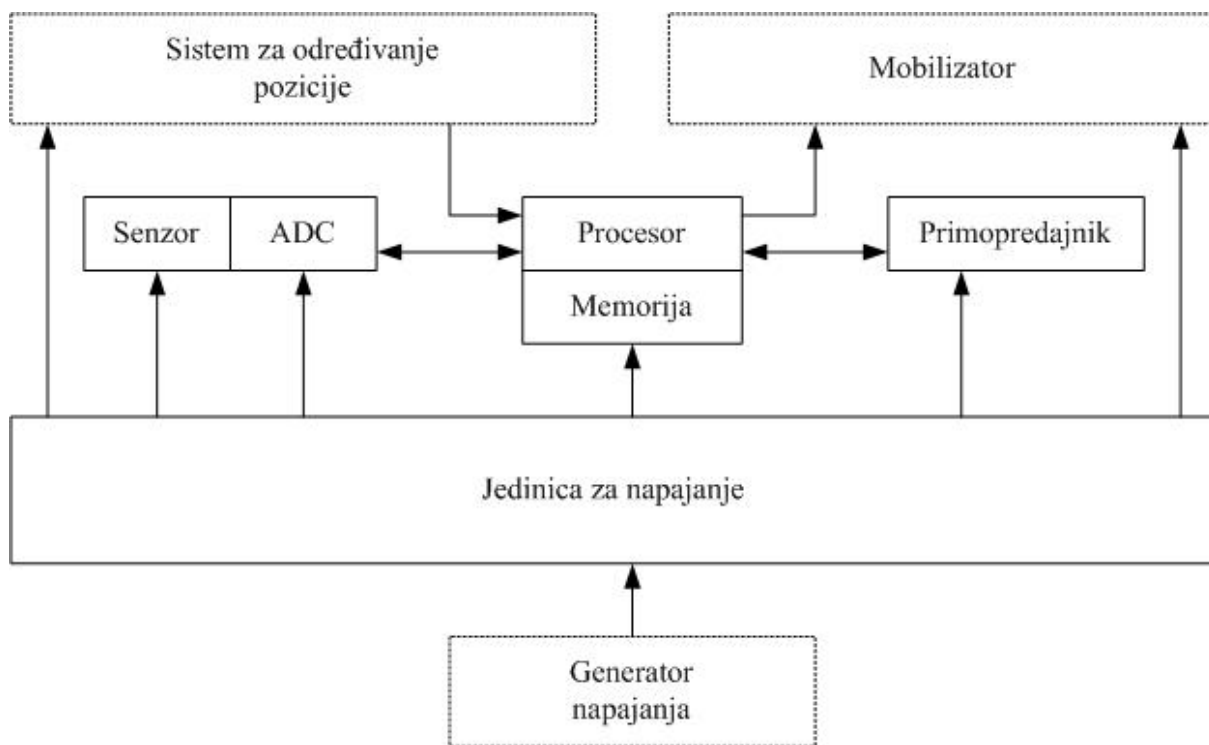
Senzorski čvor se sastoji iz četiri osnovne komponente, kao što je prikazano na slici 5.1:

- Senzorske jedinice;
- Procesne jedinice;
- Primopredajne jedinice;
- Jedinice za napajanje.

U zavisnosti od primene čvorovi mogu da imaju i dodatne komponente, kao što su:

- Sistem za određivanje položaja;
- Generator napajanja;
- Mobilizator.

Senzorska jedinica je po pravilu sastavljena od dve komponente: senzora i analogno – digitalnog konvertora. Analogni signali koje generiše senzor na bazi opservacije praćenog fenomena se konvertuju u digitalne signale od strane analogno – digitalnog konvertora, nakon čega se prosleđuju procesnoj jedinici.



Slika 5.1 Komponente senzorskog čvora

Procesna jedinica, koja je generalno povezana sa malom memorijom, upravlja procedurama koje omogućavaju senzorskom čvoru da saraduje sa drugim čvorovima. Predajna jedinica povezuje čvor na mrežu. Jedna od najvažnijih komponenta senzorskog čvora je jedinica za napajanje. Ova jedinica može da bude podržana od strane uređaja kao što je npr. solarna ćelija. Takođe postoje i druge jedinice u zavisnosti od primene. Većina senzorskih mreža za ostvarivanje tehnike rutiranja informacija zahteva poznavanje položaja sa veoma visokom tačnošću. Shodno tome senzorski čvorovi imaju sistem za određivanje položaja. Takođe, ponekad je potrebno da mobilizator pomeri senzorski čvor kada se to zahteva u skladu sa postavljenim zadacima.

Može da se pojavi potreba da se sve komponente sistema smeste u modul veličine kutije za šibice. Može se desiti da zahtevana veličina bude manja i od kubnog centimetra, koji zbog svoje lakoće može da ostane da lebdi u vazduhu. Pored veličine postoje ineka druga ograničenja u pogledu realizacije senzorskih čvorova. Tako čvorovi moraju da:

- Troše ekstremno malo energije;
- Rade u u uslovima velike gustine;

- Imaju nisku proizvodnu cenu koštanja;
- Budu autonomni i rade bez nadzora;
- Budu adaptivni na okruženje.

Pošto može da se desi da senzorski čvorovi budu nedostupni, životni vek senzorskih mreža zavisi od životnog veka energetskih resursa čvorova. Snaga je takođe važan resurs i zbog ograničenja u pogledu veličine. Npr., kod sistema WINS ukupna srednja struja sistema mora da bude manja od $30\mu A$ da bi se obezbedio dugačak vek trajanja. Čvorovi u ovom sistemu se napajaju iz obične litijumske pločaste ćelije (2.5cm prečnika, 1cm debljine). Moguće je produžiti radni vek senzorske mreže pomoću dodatnih izvora napajanja, koji su u stanju da uzimaju energiju iz okruženja. Solarne ćelije su primer tehnike koja se koristi u ovu namenu.

Primopredajna jedinica senzorskog čvora može da bude pasivni ili aktivni optički uređaj ili radio (RF) uređaj. Radio komunikacija zahteva modulaciju, pojasno filtriranje, demodulaciju i kola za multipleksiranje, što takve čvorove čini kompleksnijim i skupljim. Takođe gubici pri prenosu signala između dva čvora proporcionalni su četvrtom stepenu rastojanja između čvorova, jer su antene senzorskih čvorova spojene na masu. Međutim, bez obzira na sve navedeno, radio komunikacija je u prednosti kod većine postojećih projekata iz oblasti senzorskih mreža, jer paketi koji se prenose u okviru senzorskih mreža su mali, brzina prenosa podataka je takođe mala (u opštem slučaju manja od 1Hz), a korišćena visoka noseća frekvencija je pogodna za kratka komunikaciona rastojanja. Ove karakteristike omogućavaju da se koriste elektronski sistemi sa malim odnosom signal/pauza za senzorske mreže. Međutim, projektovanje energetski – sefikasnih kola sa malim odnosom signal/pauza predstavlja tehnički izazov. Današnje komercijalne radio tehnologija, kao što je ona koja se koristi kod Bluetooth nije dovoljno efikasna za senzorske mreže, jer prelaz između stanja uključenosti (on) i isključenosti (off) troši mnogo energije.

Iako se veća procesna snaga može dobiti iz sve manjih i manjih procesora, procesni elementi i meomorija senzorskih čvorova i dalje ostaju ograničavajući resurs. Npr., procesna jedinica kod Smart Dust Mote prototipa senzora je 4MHz Atmel AVR 8535 mikrokontroler sa 8Kb instrukcijske *flash* memorije, 512 bajta RAM i 512 bajta EEPROM. TinyOS operativni sistem koji se koristi kod ovog procesora zahteva 3500 bajtova za programski kod i 4500 bajtova radnog prostora. Procesna jedinica prototipa drugog senzorskog čvora, poznatog pod imenom μ AMPS koristi SA-1110 mikroprocesor koji radi na učestanosti od 59 do 206MHz. Višenitni μ -OS operativni sistem se izvršava na ovom bežičnom senzorskom čvoru.

Kod većine operacija sensorisanja zahteva se poznavanje pozicije senzora. Pošto su senzorski čvorovi u opštem slučaju postavljeni slučajno i rade bez nadzora potrebno je da

imaju sistem za određivanje pozicije. To često podrazumeva da svaki senzorski čvor ima Global Positioning System (GPS) jedinicu koja ima tačnost od najmanje 5m. Alternativni pristup podrazumeva da ograničeni broj senzorskih čvorova koristi GPS i pomaže drugim čvorovima da nađu sopstvenu poziciju.

5.5.5 Topologija senzorskih mreža

Mogući broj nedostupnih i čvorova koji rade bez nadzora, ako mogućnost velikog intenziteta njihovih otkaza čine topologiju senzorskih mreža veoma važnom, a njeno projektovanje velikim izazovom. Tome doprinosi i velika prostorna gustina senzora koja dostiže i nivo od 20 čvorova/m³. Istraživanja pitanja vezanih za održavanje topologije senzorskih mreža i njene promene mogu da se posmatraju kroz tri faze:

1. *Priprema za raspoređivanje i faza raspoređivanja senzora*: Senzorski čvorovi mogu da se ubace u prostor ili postave jedan pored drugog na neki od sledećih načina:
 - Bacanjem iz aviona;
 - Izbacivanjem u okviru artiljerijskih granata ili raketa;
 - Katapultiranjem (npr. sa broda);
 - Postavljanjem u fabrici;
 - Postavljanjem jedan po jedan na čoveka ili robota.

Iako ogroman broj senzora i njihov rad bez nadzora po pravilu isključuje postavljanje na bazi pažljivo razrađenog plana, šeme za početno raspoređivanje moraju da:

- Redukuju cenu instalacije;
 - Eliminšu potrebu za bilo kakvu promenu organizacije i plana;
 - Povećaju fleksibilnost organizacije;
 - Omoguće samo – organizovanje i otpornost na greške.
2. *Faza posle raspoređivanja*: Posle raspoređivanja, promene topologije se odvijaju u skladu sa promenama u senzorskim čvorovima, kao što su:
 - Pozicija;
 - Dostupnost (zbog ometanja, šuma, postojanja pokretnih prepreka, itd.)
 - Raspoloživa energija;
 - Kvarovi;
 - Zahtevi primene.

Senzorski čvorovi mogu da se raspoređuju i statički. Međutim, otkazi uređaja su normalna pojava, kao i događaji vezani za gubljenje energije ili uništavanje čvorova. Takođe, je moguće da postoje senzorske mreže sa veoma mobilnim čvorovima. Pored toga čvorovi i mreže zbog postavljenih zadataka mogu da se menjaju dinamički, a mogu

da budu i predmet namernog ometanja. Zbog toga, topologije senzorskih mreža su sklone promenama posle raspoređivanja čvorova.

3. *Faza raspoređivanja dodatnih čvorova*: Dodatni čvorovi mogu da budu raspoređeni u bilo koje vreme da bi se zamenili pokvareni čvorovi ili zbog promena u dinamici zadataka. Osim toga novi čvorovi nameću potrebu da se reorganizuje mreža. Suočavanje sa čestim promenama topologije u ad hoc mrežama i vrlo stroga ograničenja u pogledu potrošnje energije zahtevaju posebne protokole za rutiranje podataka u takvim mrežama.

5.5.6 Okruženje

Senzorski čvorovi su gusto raspoređeni veoma blisko ili direktno unutar fenomena koji posmatraju. Zbog toga oni obično rade bez nadzora u udaljenim geografskim oblastima. Shodno tome oni mogu da rade:

- U unutrašnjosti velikih mašina;
- Na dnu okeana;
- Na površini okeana u toku tornada;
- U biološki i hemijski kontaminiranim oblastima;
- Na bojnopolju iza neprijateljskih linija;
- U kućama ili velikim zgradama;
- U velikim skladištima;
- Ugrađeni u divotinje;
- Postavljeni na vozila u pokretu;
- Na ušćima ili rekama krećući se zajedno sa njenim tokom.

Navedeni spisak daje ideju o tome u kakvim uslovima se očekuje da će raditi senzorski čvorovi. Može da se vidi da oni treba da rade pod velikim pritiscima na dnu okeana, u grubim uslovima kao što je bojno polje, pod ekstremnim temperaturama, kakve vladaju na ulazima u avionske motore ili u arktičkim oblastima ili u uslovima ekstremnog šuma, kakvi postoje kod namernog ometanja.

5.5.7 Prenosni medijum

U *multi – hop* senzorskim mrežama, komunikacioni čvorovi su povezani bežičnim medijumom. Ovi linkovi mogu da budu formirani na bazi radio, infracrvenih ili optičkih signala. Da bi se omogućio globalni rad ovakvih mreža izabrani prenosni medijum mora da bude raspoloživ širom sveta.

Jednu od opcija za radio link predstavlja korišćenje Industrial, Scientific and Medical (ISM) opsega, koji nudi slobodnu komunikaciju u većini zemalja. U tabeli 5.3 dat je spisak nekih od frekventnih opsega koji mogu da se koriste za ISM primene:

Tabela 5.3 Frekventni opsezi raspoloživi za ISM primene

Frequency Band	Center Frequency
6765-6795kHz	6780kHz
13553-13567kHz	13560kHz
26957-27283kHz	27120kHz
40.66-40.70MHz	40.68MHz
433.05-434.79MHz	433.92MHz
902-928MHz	915MHz
2400-2500MHz	2450MHz
5725-5875MHz	5800MHz
24-24.25GHz	24.125GHz
61-61.5GHz	61.25GHz
122-123GHz	122.5GHz
244-246GHz	245GHz

Neki od ovih frekventnih opsega su već korišćeni za komunikaciju u bežičnim telefonskim sistemima i kod bežičnih lokalnih računarskih mreža (Wireless Local Area Network – WLAN). Pored standardnih zahteva koje treba da zadovolje čvorovi u senzorskim mrežama postoje i određena hardverska ograničenja u pogledu izbora između efikasnosti antena ograničenja u pogledu potrošnje i izbora noseće frekvencije za takve primopredajnike. U Evropi ISM opseg je 433MHz, a u Severnoj Americi je 915MHz. Glavna prednost korišćenja ISM opsega je da se radi o besplatnom radio prenosu i globalnoj raspoloživosti. Ovaj opseg nije ograničen nikakvim standardom, što daje veliku slobodu za implementaciju strategija štednje energije u senzorskim mrežama. S druge strane, postoje određena pravila i ograničenja, slično energetske ograničenjima i stetnoj interferenciji od strane postojećih aplikacija. Ovaj frekventni opseg se takođe označava i kao neregulisane frekvencije.

Većina današnjeg hardvera za senzorske čvorove bazirana je na projektovanju RF kola. μ AMPS bežični senzorski čvor, koristi 2.4GHz primopredajnik, koji je kompatibilan sa Bluetooth – om, sa integrisanim frekventnim sintisajzerom.

Drugi mogući režim komunikacije između senzorskih čvorova u senzorskim mrežama je korišćenje infracrvenih signala. Ova vrsta komunikacije takođe ne zahteva licenciranje i otporna je na interferencije od strane električnih uređaja. Primopredajnici bazirani na infracrvenoj tehnologiji su jeftiniji i laki za izradu. Mnogi od današnjih laptop računara, ručnih računara (Personal Digital Assistant – PDA) i mobilnih telefona nude Infrared Data Association (IrDA) interfejs. Glavni nedostatak ove tehnologije je da mora da postoji optička vidljivost između predajnika i prijemnika. Zbog toga ovaj prenosni medijum se nerado koristi kod senzorskih mreža.

Interesantan razvoj predstavlja tehnologija primenjena kod sistema Smart Dust Motem koji predstavlja autonomni senzorski, računarski i komunikacioni sistem koji koristi optički medijum za prenos podataka. Koriste se dve prenosne šeme, pasivna transmisija korišćenjem Corner – Cube Retrorefractor (CCR) i aktivna komunikacija korišćenjem laserskih dioda i usmerenog ogledala. Dalje se koriste laserske diode na samoj ploči i aktivna usmerena laserska komunikacija da se pošalje dobro fokusiran svetlosni snop prema željenom prijemniku.

Nestandardni zahtevi aplikacija senzorskih mreža čine izbor prenosnog medijuma veoma izazovnim. Npr., primene na moru mogu da zahtevaju prenos kroz vodu. Tada se moraju koristiti dugi talasi da bi mogli da prođu kroz površinu vode. Primene na negostoljubivom terenu ili bojnopolju mogu da kao posledicu imaju greške usled velike interferencije. Takođe, senzorska antena može da nema dovoljnu visinu i snagu zračenja. Zbog toga prenosni medijum mora da bude podržan odgovarajućim sistemom kodovanja i modulacionim šemama koje efikasno modeliraju različite karakteristike kanala.

5.5.8 Potrošnja energije

Bežični senzorski čvorovi, kao mikroelektronske komponente mogu da budu opremljene sa ograničenim izvorom napajanja (<0.5Ah, 1.2V). Kod nekih primena zamena izvora napajanja može da bude nemoguća. Zbog toga životni vek senzorskog čvora pokazuje veliku zavisnost od životnog veka baterije. Kod *multi – hop ad – hoc* senzorskih mreža svaki čvor ima dvostruku ulogu:

- Izvora podataka;
- Ruter podataka.

Prestanak funkcionisanja nekoliko čvorova može da uzrokuje promenu putanje paketa i reorganizaciju mreže. Zbog toga, čuvanje energije i upravljanje snagom ima dodatnu važnost. Iz tih razloga istraživači se danas fokusiraju na projektovanje protokola koji štede energiju i algoritama za rad senzorskih mreža.

Kod drugih mobilnih i ad – hoc mreža potrošnja energije može da bude važan faktor pri projektovanju, ali nije primarni problem, jer izvor napajanja korisnik može jednostavno da zameni. Naglasak je više na kvalitetu servisa (QoS) nego na energetskej efikasnosti. Kod senzorskih mreža energetska efikasnost je važna mera performansi koja direktno utiče na životni vek mreže. Protokoli, koji su prilagođeni specifičnoj aplikaciji mogu da budu projektovani odgovarajućim poređenjem energetske efikasnosti i njenim uticajem na druge performanse, kao što su kašnjenje i propusni opseg.

Glavni zadatak senzorskog čvora u polju senzora je da detektuje događaje, izvrši brzo lokalno procesiranje podataka i pošalje podatke. Shodno tome potrošnja energije može da bude podelena u tri domena:

- Sensorisanje;
- Procesiranje podataka;
- Komunikacija.

Potrošnja za sensorisanje varira u skladu sa prirodom primene. Sporadično sensorisanje može da zahteva manje energije od konstantnog praćenja događaja. Složenost procesa detekcije događaja takođe igra bitnu ulogu u određivanju potrošnje energije. Visok nivo ambijentalnog šuma može da uzrokuje značajno kvarenje signala i povećanje složenosti detekcije.

1. *Komunikacija.* Od pomenuta tri domena senzorski čvor najviše energije troši na prenos podataka. Tu je uključen i predaja i prijem podataka. Može se pokazati da pri komunikaciji na kratka rastojanja energija potrebna za predaju i prijem koštaju približno isto. Mikseri, frekventni sintisajzeri, naponski kontrolisani oscilatori (VCO), fazne petlje (PLL) i pojačavači snage troše dosta energije u primopredajnim kolima. Veoma je važno da za procenu ove potrošnje u obzir treba uzeti ne samo aktivnu snagu, već i start – up snagu koja se troši u primopredajnim kolima. Start – up vreme, koje je reda od 100s do μ s utiče da start – up snaga ne bude zanemarljiva. Vrednost start – up vremena može da se opiše kao vreme potrebno da se izvrši operacija u PLL. Sa redukovanjem veličine prenošenog paketa, start – up snaga počinje da postaje dominantana u odnosu na aktivnu potrošnju. Kao rezultat dobija se neefikasnost prebacivanja primopredajnika u ON i OFF stanje zbog velike snage koja se troši na ponovno uključivanje primopredajnika. Snaga RF prenosa može da se prikaže izrazom:

$$P_C = N_T[P_T(T_{ON} + T_{ST}) + P_{OUT}(T_{ON})] + N_R[P_R(R_{ON} + R_{ST})] \quad (5.3)$$

gde je $P_{T/R}$ je snaga koju troši predajnik/prijemnik. P_{OUT} je izlazna snaga predajnika, T/R_{ON} je vreme uključenja transmitera/prijemnika. T/R_{ST} je start – up vreme predajnika/prijemnika i $N_{T/R}$ je broj uključivanja predajnika/prijemnika u jedinici vremena. Ovaj broj zavisi od zadatka koji se izvršava i Medium Access Control (MAC) šeme koja se koristi. T_{ON} se može napisati kao L/R gde je L veličina paketa, a R brzina prenosa podataka. Današnje stanje tehnologije radio predajnika male snage je takvo da su tipične vredosti $P_{T/R}$ oko 20dBm, a P_{OUT} je blisko 0dBm. Treba obratiti pažnju da PicoRadio radi sa vrednošću P_C od -20dBm.

2. *Procesiranje podataka.* Potrošnja energije kod procesiranja podataka je mnogo manja u poređenju sa prenosom podataka. Ako se uzme u obzi Relejev feding i slabljenje energije sa rastojanjem cena energetska cena prenosa 1Kb na rastojanje od 100m je približno ista kao kod izvršavanja 3 miliona instrukcija na procesoru koji izvršava 100 milona instrukcija u sekundi. Zbog toga je lokalno procesiranje podataka od bitne važnosti za minimiziranje utroška energije u *multi – hop* senzorskim mrežama.

Senzorski čvor treba da ima ugrađene procesne mogućnosti i da bude sposoban da interaguje sa okruženjem. Ograničenja u pogledu cene i veličine vode ka izboru CMOS tehnologije za izradu procesorskih elemenata. Nažalost, ova tehnologija ima ugrađena ograničenja u pogledu energetske efikasnosti. CMOS tranzistorski par troši energiju svaki put kada se prebacuje iz jednog stanja u drugo. Ova snaga prekidanja je proporcionalna prekidačkoj učestanosti, kapacitivnosti uređaja (koja zavisi od površine) i kvadratu naponskih promena. To znači da je smanjenje napona napajanja jedan od načina za smanjenje potrošnje energije u aktivnom stanju. Dynamic Voltage Scaling (DVS) pomaže da se izvrši adaptacija napona napajanja procesora i radne frekvencije da se prilagodi opterećenje. Kada mikroprocesor opslužuje računsko opterećenje koje vremenski varira jednostavnim redukovanjem radne učestanosti u toku peride redukovane aktivnosti dolazi do linearnog smanjenja potrošnje energije, ali smanjenje radnog napona daje smanjenje sa kvadratnim faktorom. S druge strane ovo utiče na maksimalne performanse procesora. Značajna ušteda energije može da se dobije uzimanjem u obzir da maksimalne performanse nisu uvek potrebne i da zbog toga procesorski radni napon i frekvencija mogu da se dinamički menjaju da bi se zadovoljili zahtevi procesiranja.

Potrošnja energije kod procesiranja podatka P_p može da se prikaže jednačinom:

$$P_p = CV_{DD}^2 f + V_{DD} I_0 \exp\left(\frac{V_{DD}}{nV_T}\right) \quad (5.4)$$

gde je C ukupna kapacitivnost prekidanja, V_{DD} je naponska promena, a f frekvencija prekidanja. Drugi član se odnosi na gubitke energije zbog struje curenja. Smanjenje napona praga da bi se zadovoljili zahtevi performansi rezultuje u povećanju struje curenja. U sprezi sa malim odnosom signal/pauza u toku rada mikroprocesora u senzorskom čvoru odgovarajući gubici energije postaju značajni.

Treba obratiti pažnju da u praksi svaki senzorski čvor može da ima neka dodatna kola namenjena kodovanju i dekodovanju. U nekim slučajevima mogu se koristiti i kola na bazi Application Specific Integrated Circuit (ASIC) tehnologije. U svim tim

slučajevima projektovanje senzorskih mreža i protokola utiče na odgovarajuću potrošnju energije.

LITERATURA

- [1] Huddleston, C., „Intelligent Sensor Design – Using the Micrichip dsPIC“, Elsevier, 2007
- [2] Kirianaki, N., Yurish, S., Shpak, N., Deynega, V., „Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensor“, John Wiley and Sons, Ltd., 2001.
- [3] Zwolinski, M., „Digital Design with VHDL“, Second Edition, Pearson – Prentice Hall, 2004.
- [4] Kilts, S., „Advanced FPGA Design: Architecture, Implementation and Optimization“, John Wiley and Sons, 2007.
- [5] Swanson, D., „Signal Processing for Intelligent Sensor Systems“, Marcel Decker, Inc., 2000.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks (Elsevier) Journal*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [7] S.D. Feller, et al., “Tracking and imaging humans on heterogeneous infrared sensor arrays for law enforcement applications,” *SPIE Aerosense 2002*, April, 2002.
- [8] S.D. Feller, et al., “Tracking and imaging humans on heterogeneous infrared sensor array for tactical applications,” *SPIE Aerosense 2002*, April, 2002.
- [9] MICA Motes and Sensors, available at http://www.xbow.com/Products/Wireless_Sensor_Networks.htm.
- [10] L. Schwiebert, S. K. S. Gupta, and J. Weinmann, “Research challenges in wireless networks of biomedical sensors,” in *Proc. ACM/IEEE MOBICOM '01*, pp. 151 -165, 2001.
- [11] D. Steere, A. Baptista, D. McNamee, C. Pu, J. Walpole, “Research challenges in environmental observation and forecasting systems,” in *Proc. ACM/IEEE MOBICOM '00*, Boston, August 2000.
- [12] IEEE 802.15.4, “Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)”, October 2003.

- [13] L. Schwiebert, S. K. S. Gupta, and J. Weinmann, "Research challenges in wireless networks of biomedical sensors," in *Proc. ACM/IEEE MOBICOM '01*, pp. 151 -165, 2001.
- [14] N. Lin, C. Federspiel and D. Auslander, "Multi-sensor Single- Actuator Control of HVAC Systems," *Int. Conf. For Enhanced Building Operations*, Richardson, TX, 2002.
- [15] G. Hoblos, M. Staroswiecki, and A. Aitouche, "Optimal Design of Fault Tolerant Sensor Networks," *IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 467-472, Anchorage, AK, September 2000.
- [16] D. Nadig, and S. S. Iyengar, "A New Architecture for Distributed Sensor Integration," *Proceedings of IEEE Southeastcon '93*, Charlotte, NC, April 1993.
- [17] C. Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo, "Sensor Information Networking Architecture and Applications," *IEEE Personal Communications*, pp. 52-59, August, 2001.
- [18] K. Kalpakis, K. Dasgupta, and P. Namjoshi, Maximum Lifetime Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks, *Proceedings of IEEE International Conference on Networking (NETWORKS'02)*, Atlanta, GA, August 2002.
- [19] Shih, E. et al., Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, *ACM Mobicom'01*, pp. 272-286, Rome, Italy, July 2001.
- [20] E. M. Petriu, N. D. Georganas, D. C. Petriu, D. Makrakis, and V. Z. Groza, "Sensor-Based Information Appliances," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, pp. 31-35, December 2000.
- [21] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva Jr., D. Patel, and S. Roundy, "PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking," *IEEE Computer Magazine*, pp. 42-48, 2000.
- [22] J. Rabaey, J. Ammer, J. L. da Silva Jr., and D. Patel, "Pico-Radio: Ad-hoc Wireless Networking of Ubiquitous Low-Energy Sensor/Monitor Nodes," *Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Workshop on VLSI (WVLSI'00)*, pp. 9-12, Orlando, Florida, April 2000.
- [23] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks, *Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00)*, Boston, MA, August 2000.
- [24] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors," *Communications of the ACM*, vol. 43, no. 5, pp. 551-8, May 2000.

- [25] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust," *Proc. of the ACM MobiCom'99*, pp.271-278, Washington, USA, 1999.
- [26] S. Vardhan, M. Wilczynski, G. Pottie, and W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors (WINS): Distributed in Situ Sensing for Mission and Flight Systems," *IEEE Aerospace Conference*, Vol. 7, pp. 459-463, March 2000.
- [27] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva Jr., D. Patel, and S. Roundy, "PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking," *IEEE Computer Magazine*, pp. 42-48, 2000.
- [28] Shih, E. et al., Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, *ACM Mobicom'01*, pp. 272-286, Rome, Italy, July 2001.
- [29] A. Perrig, R. Szewczyk, V. Wen, D. Culler, and J. D. Tygar, "SPINS: Security Protocols for Sensor Networks," *Proc. of ACM MobiCom'01*, pp. 189-199, Rome, Italy, 2001.
- [30] L. Li and J. Y. Halpern, Minimum Energy Mobile Wireless Networks Revisited, *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'01)*, Helsinki, Finland, June 2001.
- [31] A. Savvides, C. Han, and M. Strivastava, Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors, *ACM MobiCom 2001*, pp. 166-179, Rome, Italy, July 2001.
- [32] S. Meguerdichian, and et al., Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks, *IEEE INFOCOM 2001*, Vol. 3, pp. 1380-1387, Anchorage, Alaska, April 2001.
- [33] A. Woo, and D. Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks," *Proc. of ACM Mobi-Com'01*, pp.221-235, Rome, Italy, July 2001.
- [34] B. Warneke, B. Liebowitz, and K. S. J. Pister, "Smart Dust: Communicating with a Cubic-Millimeter Computer," *IEEE Computer*, pp. 2-9, January 2001.
- [35] National Semiconductor Corporation, LMX3162 Single Chip Radio Transceiver, Evaluation Notes and Datasheet, March 2000.
- [36] A. Sinha and A. Chandrakasan, "Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks," *IEEE Design and Test of Computers*, March/April 2001.
- [37] K. Govil, E. Chan, and H. Wasserman, "Comparing Algorithms for Dynamic Speed-Setting of a Low-Power CPU," in *Proc. of ACM MobiCom '95*, pp. 13-25, Berkeley, CA, November 1995.
- [38] M. Weiser et al., "Scheduling for Reduced CPU Energy," in *Proc. of 1st USENIX Symp. on Operating System Design and Implementation*, pp. 13-23, November 1994.

- [39] J. Lorch and A. Smith, "Reducing Processor Power Consumption by Improving Processor Time Management in a Single-User Operating System," in *Proc. of ACM MobiCom '96*, 1996.
- [40] N. Bulusu, D. Estrin, L. Girod, and J. Heidemann, "Scalable Coordination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems," *International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001)*, Ambleside, UK, July 2001.
- [41] A. Cerpa, J. Elson, M. Hamilton, and J. Zhao, "Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology," *ACM SIGCOMM'2000*, Costa Rica, April 2001.

Senzorske mreže – WEB prezentacije

- [42] <http://www.zigbee.com>.
- [43] <http://www.wireless4industrial.org>.
- [44] <http://www.dust-inc.com>.
- [45] <http://www.ccalmr.ogi.edu>.
- [46] <http://www.ensco.com>.
- [47] <http://nms.lcs.mit.edu/projects/cricket>.
- [48] <http://www.sensicast.com>.
- [49] <http://www.xsilogy.com>.
- [50] <http://www.soflinx.com>.
- [51] <http://www.intel.com/research/exploratory/heterogeneous.htm>.
- [52] http://www.intel.com/research/exploratory/deep_networking.htm.
- [53] <http://www.zen-sys.com>.
- [54] <http://www.elec.york.ac.uk/research/comms/wireless/sensorNets.html>

Senzorske mreže – tekstovi PDF format

- [55] <http://www.ee.kth.se/~pidm/publications/thesis.pdf>
- [56] <http://www.icgst.com/cnir/Volume8/Issue2/P1140841393.pdf>
- [57] http://www.eurojournals.com/ejsr_37_4_15.pdf
- [58] <http://compilers.cs.ucla.edu/emsoft05/DuttaGrimmerAroraBibykculler05.pdf>
- [59] <http://eprints.ucl.ac.uk/930/1/ewsn.pdf>
- [60] http://www.ctr.kcl.ac.uk/iwwan2005/papers/82_invited_Roberto.pdf
- [61] <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/6/4195/pdf>