Pametni uređaji

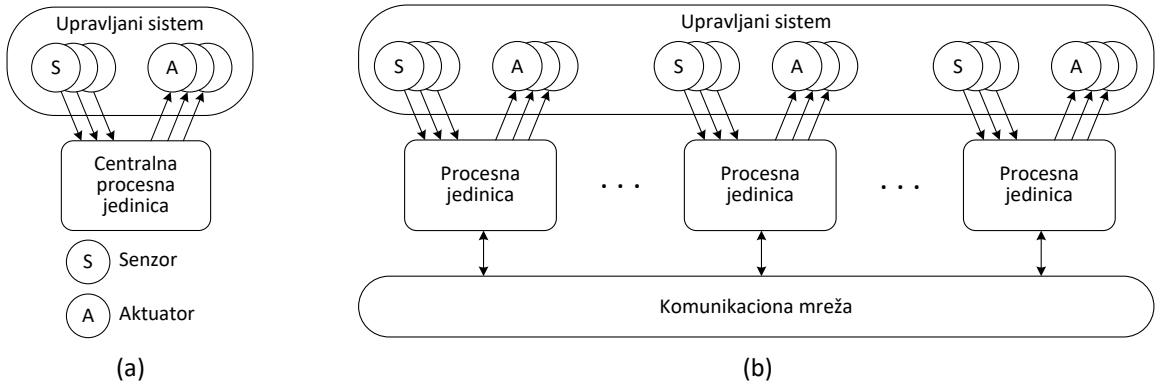
Embeded sistemi su danas sveprisutni u svakodnevnom životu i igraju ključnu ulogu u širokom spektru aplikacija. Embeded uređaji i sistemi su gotovo svuda oko nas, prisutni u različitim uređajima i sistemima, od kućnih aparata, automobila i pametnih telefona do industrijskih sistema, medicinskih uređaja itd. Jedna od osobenosti embeded sistema je direktna povezanost sa okruženjem u kojem funkcionišu. Ova povezanost je zapravo ključna za njihovu svrhu i funkcionalnost. Na primer, embeded sistemi često koriste senzore kako bi prikupili podatke o okruženju, kao i aktuatore kako bi izvršavali određene akcije u tom okruženju. Takođe, embeded sistemi često komuniciraju sa drugim uređajima u svom okruženju kako bi razmenjivali informacije, sinhronizovali rad ili delovali koordinirano. Mnogi embeded sistemi su deo mreža, bilo da se radi o lokalnim mrežama (LAN) ili internetu stvari (IoT), omogućavajući daljinsko upravljanje, nadgledanje i razmenu podataka.

Embeded sistemi se značajno razlikuju po složenosti, funkcionalnim karakteristikama i organizaciji, što sve zavisi od zahteva konkretne aplikacije. U pogledu organizacije, izdvajaju se dve glavne konfiguracije: centralizovani i distribuirani embeded sistemi.

Centralizovana organizacija embeded sistema podrazumeva da se ključne odluke donose na centralnom mestu ili glavnom uređaju, pod čijom su neposrednom kontrolom svi sistemski resursi (Sl. 1(a)). Centralizovani sistem obično ima jedinstveni kontroler (centralna procesna jedinica) koji koordinira rad svih delova sistema, regulišući rad senzora, aktuatora i drugih komponenti u skladu sa trenutnim zahtevima. Centralizovana organizacija embeded sistema ima svoje prednosti, posebno u određenim kontekstima, kao npr.:

- Jednostavnost upravljanja, koje se fokusira na centralni uređaj, što može olakšati implementaciju i održavanje sistema.
- Laka koordinacija između različitih komponenti sistema jer se odluke donose na centralnom mestu, što doprinosi efikasnijem upravljanju upravljanja resursima.
- Optimalno korišćenje resursa, kao što su procesorska snaga, memorija i energetski resursi (odluke o raspodeli resursa mogu se bolje kontrolisati na centralnom mestu).
- Jednostavna implementacija sigurnosnih mera, kao npr. autentifikacija i šifrovanje podataka
- Lakše ažuriranje softvera
- Lakše otkrivanje i otklanjanje problema

Centralizovana organizacija embeded sistema može imati ozbiljna ograničenja u situacijama gde se zahtevaju visoka skalabilnost, autonomija pojedinih delova sistema ili pouzdanost. Skalabilnost i fleksibilnost se odnosi na mogućnost nadogradnje, rekonfiguracije i dodavanja novih funkcionalnosti. Pouzdanost je u vezi sa zavisnošću od centralnog entiteta. Ako centralni entitet postane opterećen ili neispravan, to može negativno uticati na celokupni sistem.



Sl. 1 Organizacija embeded sistema: (a) centralizovana; (b) distribuirana

Distribuirana organizacija embeded sistema podrazumeva da sistemski resursi, kao što su računarski resursi, senzori, aktuatori i druge komponente, nisu centralizovani u jednoj jedinici, već su fizički raspoređeni na više procesnih jedinica koje su povezane u mrežu (Sl. 1(b)). Svaka procesna jedinica u ovom sistemu ima svoj procesor i memoriji, upravlja svojim senzorima i aktuatorima i obavlja specifičan set zadataka, komunicirajući pri tom sa drugim procesnim jedinicama radi postizanja zajedničkog cilja.

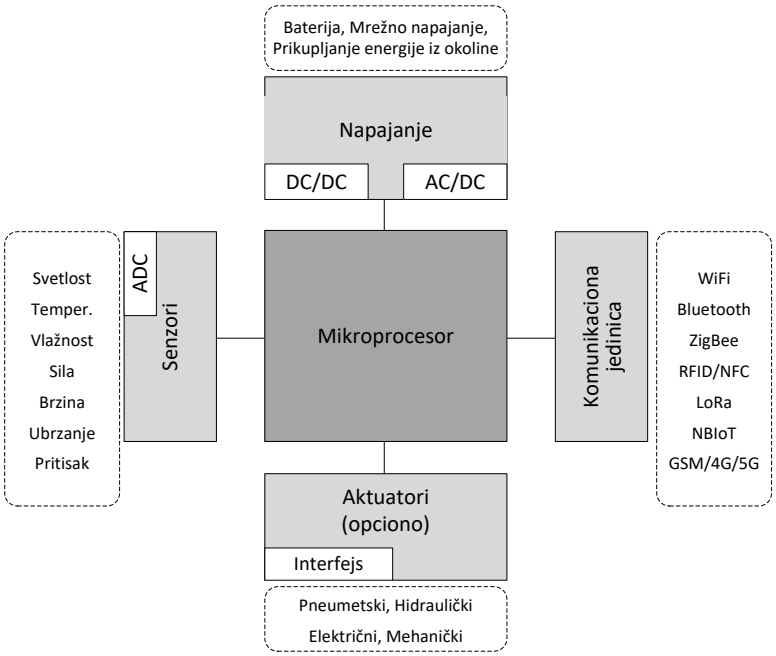
Ključne karakteristike distribuiranih embeded sistema su: decentralizacija, komunikacija i koordinacija. Decentralizacija se odnosi na raspodelu procesne inteligencije (funkcionalnosti), resursa i podataka na više procesnih jedinica ili uređaja. Komunikacija je neophodna radi razmene podataka između samih uređaja ili između uređaja i nadređenog sistema i ostvaruje se putem komunikacione mreže, koja može biti žičana (kablovska) ili bežična. Da bi se ostvarila željena funkcionalnost, umreženi uređaji moraju da koordinišu (usklađuju) i sinhronizuju svoje aktivnosti (ne svako za sebe, već svi zajedno).

Glavne prednosti distribuirane u odnosu na centralizovanu organizaciju su: fleksibilnost, skalabilnost i robusnost. Distribuirani sistemi su fleksibilni jer se lako mogu prilagoditi različitim primenama i zahtevima. Na primer, senzorski i aktuatorski uređaji se mogu dislocirati sa centralnog mesta i postaviti na fizičke pozicije koje su optimalne u pogledu izvršenja konkretnog zadatka. Takvi uređaji mogu da obavljaju većinu obrade koja se odnosi na njihov lokalni zadatak. Skalabilnost se odnosi na lakoću proširenja sistema novim procesnim jedinicama i uređajima. Lakše je priključiti novi uređaj na komunikacionu mrežu, nego proširiti procesne mogućnosti centralizovane jedinice u centralizovanom sistemu. Robusnost podrazumeva visok nivo pouzdanosti i otpornosti na greške. U distribuiranom sistemu, otkaz jedne jedinice ne mora da izazove otkaz celokupnog sistema, za razliku od centralizovanog sistema gde je centralna jedinica, kaže se, centralna tačka otkaza (njen otkaz dovodi do otkaza celog sistema).

U ovom predmetu, naš fokus je na distribuiranim embeded sistemima, konkretno na distribuiranim sistemima kod kojih se komunikacija ostvaruje bežičnim putem. Osnovna gradivna jedinica ovakvih sistem je embeded uređaj koji se odlikuje setom specifičnih karakteristika: poseduje računarske resurse, u nivou koje je neophodan za implementaciju konkretne funkcionalnosti, interaguje sa okruženjem, putem senzora i aktuatora, komunicira sa drugim uređajima, putem komunikacione mreže i poseduje specifične zahteve u pogledu potrošnje energije i napajanja (najčešće, baterijsko napajanje). Takav jedna uređaj, u ovom poglavlju, zvaćemo *pametnim uređajem*. Prvi deo poglavlja je upravo posvećen organizaciji pametnog uređaja. Drugi deo poglavlja obuhvata osnovne karakteristike komunikacionih mreža koje se koriste za formiranje distribuiranih embeded sistem.

2.1 Organizacija pametno uređaja

Pametni uređaj (ili pametni objekat) je fizički entitet koji je unapređen ugrađenim računarskim i komunikacionim mogućnostima, a koji mu omogućavaju povezivanje, interakciju i razmenu podataka sa drugim uređajima, sistemima ili mrežama. Pametni uređaji su često opremljeni senzorima, aktuatorima i procesorima, što im omogućava da prikupljaju, obrađuju i odgovaraju na podatke u realnom vremenu. Primeri pametnih uređaja obuhvataju pametne termostate, fitnes uređaje za praćenje fizičke aktivnosti, pametne kućne aparate, povezane automobile, pametne senzore za industrijske primene i različite druge uređaje koji koriste ugrađenu tehnologiju radi unapređenih funkcionalnosti i povezanosti. U većini primena, pametni uređaj nije izolovan kao samostalni objekat, već je mrežno povezan sa drugim uređajima i sistemima. Iz tog razloga, pored senzora i aktuatora, sposobnost komunikacije predstavlja ključnu karakteristiku pametnog uređaja. Koncept umreženih pametnih uređaja je ključan za širi trend stvaranja pametnijeg i povezanijeg sveta putem integracije digitalne tehnologije u svakodnevne fizičke objekte.



Sl. 2 Funkcionalni blok dijagram tipičnog pametnog uređaja

Na Sl. 2 je prikazan blok dijagram uopštene organizacije tipičnog pametnog uređaja. Glavne jedinice pametnog uređaja su:

Procesorska jedinica: Pametni uređaji, po pravilu, poseduju neku vrstu procesorske jedinice koja je optimizovana za prikupljanje podataka, obradu i analizu senzorskih merenja, upravljanje aktuatorima i različitim drugim funkcijama uređaja, što uključuje upravljanje komunikacionim i podsistemom napajanja. Po pravilu, imaju nisku potrošnju energije, kako bi se omogućilo rad na uređajima sa ograničenim izvorima napajanja (baterija, prikupljanje energije iz okoline). Takođe, često, radi zaštite podatka, poseduju ugrađenu podršku za šifrovanje podataka i druge sigurnosne mehanizme. Iako korišćeni tip procesorske jedinice zavisi od zahteva konkretne primene, u najširoj primeni su mikrokontroleri zbog svojih malih dimenzija, fleksibilnosti, lakoće programiranja, lake dostupnosti, male potrošnje energije i niske cene. Takođe, u primenama koje zahtevaju intenzivnu obradu podataka (npr. implementacija algoritama mašinskog učenja) u upotrebi su i mikroprocesore viših performansi.

Senzori i/ili aktuatori: Pametni uređaj interaguje sa fizičkim svetom putem senzora i aktuatora. Pri tom, pametni uređaj ne mora da sadrži i senzore i aktuatore. Tipovi ugrađenih senzora i/ili aktuatora, svakako, zavise od konkretne primene.

Komunikaciona jedinica: Zadatak komunikacione jedinice je povezivanje pametnog uređaja sa drugim pametnim uređajima i spoljnim svetom (putem komunikacione mreže). Komunikacija, u principu, može biti žičana ili bežična. Iz brojnih razloga bežična komunikacija je u mnogo široj upotrebi. Glavni razlozi su: cena povezivanja, nedostupnost žičane komunikacione infrastrukture na svakom mestu i lakoća instalacije. Danas je na raspolaganju širok spektar komunikacionih tehnologija za primenu u ovom domenu.

Izvor napajana: Pametnom uređaju je, naravno, neophodno napajanje. Po pravilu, najveći deo potrošnje energije otpada na komunikacionu jedinicu. Takođe, tipično, pametni uređaji poseduju izvor ograničene energije, očekuje se da imaju dug vek trajanje i često nisu lako dostupni za održavanje. Ova kombinacija zahteva, posebno u slučaju baterijskog napajanja stavlja naglasak na racionalno trošenje energije, rad u režimima smanjene potrošnje i upotrebu hardverskih komponenata ultra-niske potrošnje. U scenarijima gde su pametni uređaji teško dostupni (radi zamene ili dopune baterije), napajanje se često dobija sakupljanjem energije iz okruženja (npr. solarne ćelije) ili se dobija hibridnim postupkom (kombinacija baterije i solarne ćelije za povremenu dopunu baterije).

Danas je u upotrebi veliki broj različitih tipova pametnih uređaja, koji se razlikuju po brojnim kriterijumima, poput vrste ugrađenih senzora i aktuatora, načina komunikacije, tipa i mogućnosti procesorske jedinice, načina napajanja itd. Kao i za embeded uređaje, generalno, tako i za pametne uređaje, njihova ključna karakteristika je orijentisanost ka aplikaciji, što podrazumeva da su njihov hardver i softver optimizovani za datu primenu. U tom smislu, nema svrhe u jednostavan pametni senzor ugrađivati moćan procesor, jer se višak procesne snage ne može svrsishodno iskoristiti. Ipak, u ovoj oblasti, mogu se izdvojiti neki opšti trendovi razvoja, koji se u posledica neprekidnog tehnološkog napretka i širenja oblasti primene:

Smanjenje fizičkih dimenzija uređaja: pametni uređaji malih dimenzija lakše se ugrađuju i manje opterećuju svakodnevne objekte. Smanjenju dimenzija pametnih uređaja značajno doprinosi sve veća upotreba MEMS senzora i aktuatora.

Smanjenje potrošnje energije: uočljiv je trend smanjenja potrošnje postoji kod svih komponenata pametnog uređaja. To posebno važi za senzore, od kojih su mnogi pasivni.

Povećanje procesne moći: upotreba moćnijih procesnih jedinica je rezultat povećanja funkcionalne složenosti pametnih uređaja, koja potiče od potrebe za kompleksnijom obradom prikupljenih podataka, ali i zbog upotrebe kompleksnijih komunikacionih protokola.

Poboljšanje komunikacionih mogućnosti: posebno u domenu bežične komunikacije, što se ogleda ne samo u većim brzinama prenosa podataka i većem dometu, već i u razvoju i upotrebi specijalizovanih komunikacionih protokola.

Standardizacija u oblasti komunikacije: oslonjenost na standarde, a posebno u oblasti komunikacije, je od ključne važnosti za interoperabilnost pametnih uređaja, odnosno mogućnost povezivanja u jedinstven sistem uređaja različiti proizvođača.

Jednom rečju, trendovi razvoja su takvi da rezultuju u sve složenijim pametnim uređajima, koji izvršavaju kompleksnije zadatke sa većom efikasnošću. Ipak, u osnovi paradigme pametnih uređaja leži mogućnost povezivanja i umrežavanja uređaja, kao i komunikacija između mreže uređaja i eksternih entiteta (npr. klaud).

2.2 Senzori

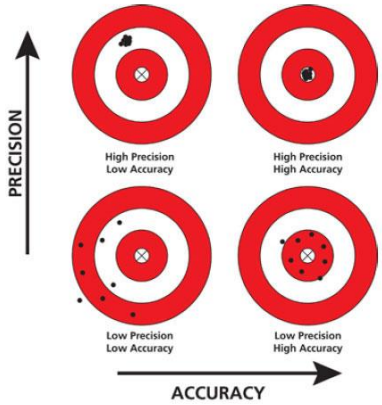
Senzor je uređaj ili instrument koji omogućava praćenje ili detekciju različitih vrsta veličina ili događaja, tako što prima i registruje fizičke ili hemijske osobine okoline i pretvara ih u električne signale ili druge merljive forme. U suštini, senzori su vrsta pretvarača, jer jednu fizičku veličinu pretvaraju u drugu (tj. konvertuju energiju iz jednog u neki drugi oblik). Na primer, senzor temperature pretvara temperaturu okoline u analogni električni signal čiji je napon srazmeran trenutnoj temperaturi. Analogni signal se, po pravilu, konvertuje u digitalnu reprezentaciju koja se obično prenosi na drugi uređaj radi transformacije u korisne podatke koji mogu biti iskorišćeni od strane pametnih uređaja ili ljudi.

2.2.1 Tačnost i preciznost

Tačnost i preciznost su ključne karakteristike koje odražavaju performanse merenja fizičke veličine od strane senzora. Naime, svako merenje je podložno grešci, u smislu da izmerena vrednost nije uvek podudarna stvarnoj vrednosti merene veličine. Takođe, uzastopna merenja iste fizičke veličine, pod istim uslovima, po pravilu, ne daju isti rezultat.

Tačnost (*accuracy*) se odnosi na to koliko je izmerena vrednost bliska pravoj ili stvarnoj vrednosti veličine koja se meri. Tačna merenja pokazuju mali odstupanje ili razliku u odnosu na pravu vrednost. Odstupanje od tačne vrednosti proizilazi iz sistematskih grešaka u merenju, tj. narušavajućih faktora koji jednako utiču na svako pojedinačno merenje. S druge strane, preciznost (*precision*) se odnosi na to koliko su ponovljena merenja konzistentna, bez obzira na njihovu tačnost, odnosno ukazuje na stepen doslednosti ili reproduktivnosti merenja kada se ponavljaju pod sličnim uslovima. Preciznost nužno ne znači tačnost; precizna merenja ne moraju biti bliska pravoj vrednosti, ali će biti dosledna međusobno. Nepreciznost je posledica slučajnih grešaka u merenju, koja mogu biti posledica promenjivih uslova u okruženju, uticaja šumova i smetnji, nesavršenosti merne tehnike i slično.

Značenje pojmova tačnosti i preciznosti se lako može razumeti na osnovu Sl. 3. Prava vrednost merene veličine je u centru mete, dok crne tačke predstavljaju ishode uzastopnih pojedinačnih merenja. Slika gore levo ilustruje merenje sa velikom preciznošću (zato što su ponovljena merenja veoma bliska), ali i malu tačnost, jer je odstupanje od prave vrednosti relativno veliko. Slika gore desno je ilustracija merenja visoke tačnosti i preciznosti, jer su gotovo sva merenja veoma bliska pravoj vrednosti. Zbog velikog rasipanja uzastopnih merenja, merenje na slici dole desno je neprecizno. Međutim, ovo merenje je tačno, jer se srednja vrednost pojedinačnih merenja dobro poklapa sa pravom vrednošću. Za merenje na slici dole levo se ne može reći ni da je tačno ni da je precizno.



Sl. 3 Tačnost i preciznost. *Napomena*: Tačna vrednost je u centru mete, dok su tačke ishodi pojedinačnih merenja

Preciznost merenja se može poboljšati usrednjavanjem uzastopnih merenja. Na primer, umesto da ultrazvučnim senzorom merimo rastojanje samo jedanput, merenje ćemo ponoviti npr. 10 puta, a kao konačni rezultat usvojićemo srednju vrednost svih ovih merenja. Na taj način se eliminiše efekat slučajnih grešaka. Tačnost merenja se poboljšava kalibracijom i kompenzacijom. Kalibracija (ili baždarenje) je postupak usklađivanja i prilagođavanja merne opreme, instrumenta ili senzora sa poznatim standardima ili referentnim vrednostima kako bi se obezbedilo što manje odstupanje izmerenih od tačnih vrednosti. Kompenzacija je postupak ili tehnika koja se koristi kako bi se korigovali ili neutralisali uticaji faktora koji mogu da izazovu greške ili odstupanja u merenjima. Na primer, na merenje rastojanja ultrazvukom utiče temperatura, jer brzina zvuka zavisi od temperature vazduha. Kompenzacija bi se u ovom slučaju sastojala u tome da se meri temperatura vazduha i taj podatak koristi za korekciju rezultata ultrazvučnog merenja rastojanja.

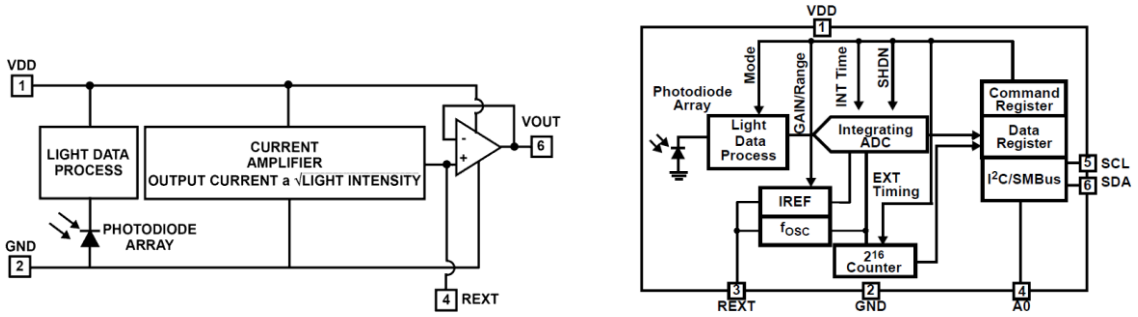
2.2.2 Klasifikacija senzora

Postoji mnoštvo različitih senzora dostupnih za merenje gotovo svih veličina u fizičkom svetu. Postoji nekoliko načina grupisanja i klasifikacije senzora u različite kategorije, uključujući sledeće:

Aktivni ili pasivni: Senzori se mogu kategorisati na osnovu toga da li aktivno interaguju sa okruženjem tokom merenja (aktivni), ili to čine bez aktivne interakcije sa okruženjem (pasivni). Aktivni senzori ulažu dodatnu energiju tokom procesa merenja, kako bi, recimo, na neki način pobudili i onda, na neki način, merili ili analizirali odziv okruženja na pobudu. Primeri aktivnih senzora su radar, sonar, ultrazvučni senzor rastojanja i slično. S druge strane, pasivni senzori su neposredno izloženi dejstvu fizičke veličine koju mere, a koja menja neku njihovu osobinu. Na primer, foto-otpornik čija se otpornost menja u zavisnosti od jačine svetla kome je izložen je primer pasivnog senzora. Kamera se može smatrati pasivnim senzorom. Međutim, kamera sa blicom je već aktivni senzor.

Analogni i digitalni: Analogni senzor generiše na svom izlazu signal ili napon koji je srazmeran veličini koja se meri i pri tom je kontinualan u vremenu i neprekidno, svojom amplitudom prati promene merene fizičke veličine. Fizičke veličine poput temperature, brzine, pritiska, pomaka, sile i sl. su kontinualne. Analogni senzor zahtevaju upotrebu AD konvertora kako bi se analogni napon na izlazu senzora konvertovao u digitalnu vrednost. S druge strane, digitalni senzor generiše na svom izlazu informaciju u digitalnom obliku, tipično u binarnom obliku (0 ili 1, ON ili OFF). Na primer, kontaktni senzor za detekciju otvorenih/zatvorenih vrata spada u ovu kategoriju.

Senzori su obično dostupni u obliku IC koja objedinjuju senzorski element (NTC otpornik, foto-otpornik, foto-dioda i slično) sa pratećom elektronikom za obradu signala senzora. Primera radi, na Sl. 4(a) je prikazan blok dijagram unutrašnje strukture IC analognog senzora ambijentalnog svetla, koji sadrži foto-diodu (kao senzorski element) i elektronska kola za generisanje izlaznog analognog napona. Da bi se jedno ovakvo IC povezalo sa mikrokontrolerom, neophodan je A/D konvertor za konverziju izlaznog napona senzora u digitalnu veličinu. Većina mikrokontrolera koji se koriste kod pametnih uređaja poseduje ugrađeni A/D konvertor. U kategoriji digitalnih senzora spadaju i u osnovi analogni senzori, ali upakovani u IC sa digitalnim izlazom. Primer ovakvog senzorskog IC prikazan je na Sl. 4(b). To je ponovo senzor ambijentalnog svetla, ali sada u digitalnoj varijanti. Kao što vidimo, ovo IC, u odnosu na IC sa Sl. 4(a), dodatno sadrži A/D konvertor, unutrašnju logiku za regulaciju postupka merenja, kao komunikacioni interfejs I2C za spregu sa mikrokontrolerom. Mikrokontroler izdaje komande IC-u i preuzima rezultat merenja putem I2C.



(a) (b)

Sl. 4 Senzor ambijentalnog svetla: (a) analogna varijanta; (b) digitalna varijanta

Apsolutni i relativni: Apsolutni senzor meri fizičku veličinu u okviru apsolutne fizičke skala, nezavisno od uslova merenja. Relativni senzor meri fizičku veličinu u odnosu na određenu referentnu vrednost. Primer apsolutnog senzora je termistor (temperaturno osetljivi otpornik) čija je otpornost direktno srazmerna apsolutnoj temperaturu (u Kelvinima). Za razliku od toga, termopar (još jedna vrsta temperaturnog senzora) je relativni senzor jer generiše napon koji je srazmeran razlici temperature na svoja dva kraja. Slično, apsolutni senzor pritiska meri pritisak u odnosu na vakuum (apsolutna nula na skali pritiska), dok relativni senzor pritiska meri pritisak u odnosu na određenu referencu (npr. u odnosu na atmosferski pritisak).

Kontaktni i beskontaktni: Kontaktni senzori zahtevaju direktni fizički kontakt sa objektom koji se meri, dok beskontaktni senzori omogućavaju merenje bez direktnog dodira. Na primer, kontaktni termometar meri temperaturu tako što direktno dolazi u kontakt sa površinom objekta čiju temperaturu merimo. Infracrveni termometar je beskontaktni senzor, jer meri temperaturu bez kontakta sa objektom (zapravo, meri intenzitet infracrvenog zračenja koje objekat emituje).

Podela prema načinu merenja: Na osnovu fizičkog mehanizma koji se koristi za merenje senzori mogu biti: termoelektrični, elektrohemijski, piezootporni, optički, električni, fluidni mehanički, fotoelastički, itd.

Podela prema fizičkoj veličini koju mere: videti tabelu:

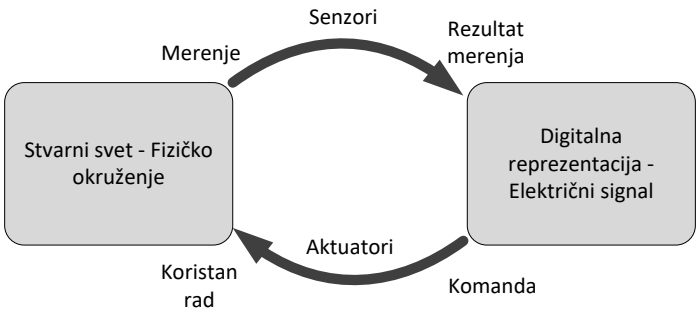
Sensor Types	Description	Examples
Position	A position sensor measures the position of an object; the position measurement can be either in absolute terms (absolute position sensor) or in relative terms (displacement sensor). Position sensors can be linear, angular, or multi-axis.	Potentiometer, inclinometer, proximity sensor
Occupancy and motion	Occupancy sensors detect the presence of people and animals in a surveillance area, while motion sensors detect movement of people and objects. The difference between the two is that occupancy sensors generate a signal even when a person is stationary, whereas motion sensors do not.	Electric eye, radar
Velocity and acceleration	Velocity (speed of motion) sensors may be linear or angular, indicating how fast an object moves along a straight line or how fast it rotates. Acceleration sensors measure changes in velocity.	Accelerometer, gyroscope
Force	Force sensors detect whether a physical force is applied and whether the magnitude of force is beyond a threshold.	Force gauge, viscometer, tactile sensor (touch sensor)

Pressure	Pressure sensors are related to force sensors, measuring force applied by liquids or gases. Pressure is measured in terms of force per unit area.	Barometer, Bourdon gauge, piezometer
Flow	Flow sensors detect the rate of fluid flow. They measure the volume (mass flow) or rate (flow velocity) of fluid that has passed through a system in a given period of time.	Anemometer, mass flow sensor, water meter
Acoustic	Acoustic sensors measure sound levels and convert that information into digital or analog data signals.	Microphone, geophone, hydrophone
Humidity	Humidity sensors detect humidity (amount of water vapor) in the air or a mass. Humidity levels can be measured in various ways: absolute humidity, relative humidity, mass ratio, and so on.	Hygrometer, humistor, soil moisture sensor
Light	Light sensors detect the presence of light (visible or invisible).	Infrared sensor, photodetector, flame detector
Radiation	Radiation sensors detect radiation in the environment. Radiation can be sensed by scintillating or ionization detection.	Geiger-Müller counter, scintillator, neutron detector
Temperature	Temperature sensors measure the amount of heat or cold that is present in a system. They can be broadly of two types: contact and non-contact. Contact temperature sensors need to be in physical contact with the object being sensed. Non-contact sensors do not need physical contact, as they measure temperature through convection and radiation.	Thermometer, calorimeter, temperature gauge
Chemical	Chemical sensors measure the concentration of chemicals in a system. When subjected to a mix of chemicals, chemical sensors are typically selective for a target type of chemical (for example, a CO_2 sensor senses only carbon dioxide).	Breathalyzer, olfactometer, smoke detector
Biosensors	Biosensors detect various biological elements, such as organisms, tissues, cells, enzymes, antibodies, and nucleic acid.	Blood glucose biosensor, pulse oximetry, electrocardiograph

Source: J. Holdowsky et al., *Inside the Internet of Things: A Primer on the Technologies Building the IoT*, August 21, 2015, http://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/internet-of-things/iot-primer-iot-technologies-applications.html.

2.3 Aktuatori

Aktuatori su, može se tako reći, prirodna dopuna senzora. Simetrija i komplementarnost ova dva tipa uređaja je ilustrovana na Sl. 5. Senzori mere varijable (veličine) u fizičkom svetu, konvertuju merenja u električni signal ili digitalnu reprezentaciju, koju potom konzumira neka vrsta inteligentnog agenta (uređaj ili čovek). S druge strane, aktuatori su uređaji ili komponente (električne, elektro-mehaničke, hidrauličke ili pneumatske), koje na prijem određenog tip upravljačkog signala (električni signal ili digitalna komanda) pokreću određeni fizički efekat, obično neku vrstu pokreta, sile, itd. Ili, drugačije rečeno, aktuatori je uređaj koji transformišu električne signale u konkretno kretanje ili rad, često kao odgovor na komande ili promene u okruženju.



Sl. 5 Senzori i aktuatori: senzori mere, aktuatori deluju

Poput senzora, aktuatori se mogu klasifikovati po brojnim kriterijumima. Uobičajena klasifikacija uključuje sledeće podele:

Tip kretanja: Efekat aktuatora je uvek neko kretanje, bilo da je u pitanju linearno, rotaciono ili kretanje po jednoj, dve ili tri ose (tj. 1D, 2D, ili 3D).

Snaga: Aktuatori se razlikuju po izlaznoj snazi, odnosno po snazi koju isporučuju okruženju tokom svog rada. Tako, postoje:

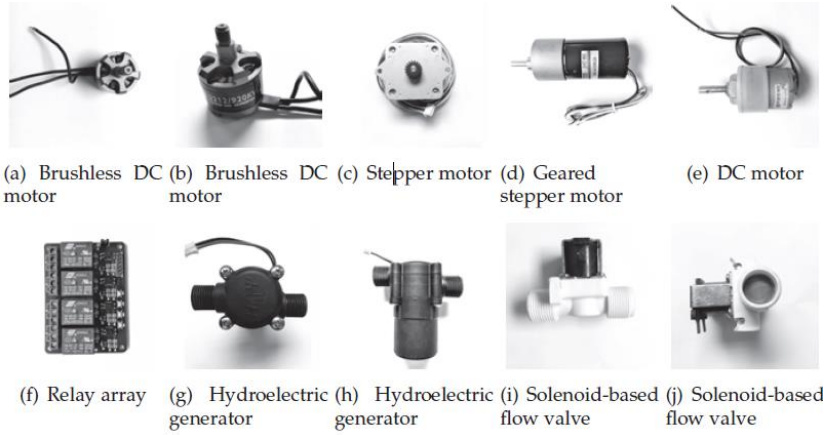
- *Aktuatori velike snage*: koriste se tamo gde je potrebno delovati velikom silom ili izazvati veliko kretanje,
- *Aktuatori male snage*: karakterišu se srednjim nivoom izlazne snage i koriste se u primenama gde je precizna kontrola kretanja od primarne važnosti.
- *Aktuatori mikro snage*: pogodni za primene gde je glavni prioritet mala potrošnja energije.

Binarni ili kontinualni: Ova podela se odnosi na broj stabilnih stanja aktuatora. Binarni, takođe poznati kao *on/off* ili diskretni aktuatori imaju samo dva stabilna stanja: aktivno ili neaktivno (električni prekidač, relej, solenoid, pneumatski ventil itd.) Kontinualni, takođe poznati kao analogni ili proporcionalni aktuatori karakteristični su po kontinualnom (neprekidnom) opsegu vrednosti. Omogućavaju varijabilno upravljanje izlazom (proporcionalni ventil, servo sistemi, hidraulički cilindri itd.)

Vrsta energije: Prema vrsti energije koju koriste za rad, aktuatori se svrstavaju u sledeće kategorije (videti Tabela 1 i Sl. 6).

Tabela 1 Klasifikacija aktuatora prema vrsti energije

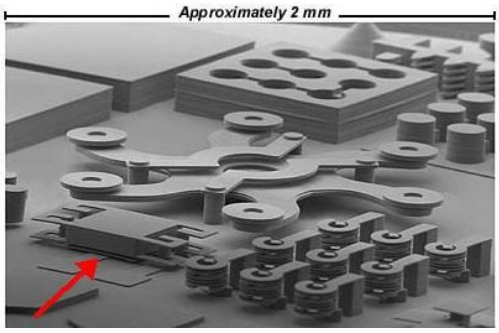
Type	Examples
Mechanical actuators	Lever, screw jack, hand crank
Electrical actuators	Thyristor, biopolar transistor, diode
Electromechanical actuators	AC motor, DC motor, step motor
Electromagnetic actuators	Electromagnet, linear solenoid
Hydraulic and pneumatic actuators	Hydraulic cylinder, pneumatic cylinder, piston, pressure control valves, air motors
Smart material actuators (includes thermal and magnetic actuators)	Shape memory alloy (SMA), ion exchange fluid, magnetorestrictive material, bimetallic strip, piezoelectric bimorph
Micro- and nanoactuators	Electrostatic motor, microvalve, comb drive



Sl. 6 Različite vrste aktuatora: (a) i (b) motor jednosmerne struje (DC) bez četkica; (c) stap (koračni) motor; (d) step motor sa zupčanicima; (e) DC motor; (f) relejni niz; (g) i (h) hidraulični generator; (i) i (j) solednoidni ventil

2.4 MEMS

MEMS je skraćenica od "*Micro-Electro-Mechanical Systems*", što se može prevesti kao "*Mikroelektromehanički sistemi*". MEMS je tehnologija koja omogućava integraciju mikroelektronskih i mikromehaničkih sklopova na vrlo malom prostoru, obično na čipu veličine nekoliko milimetara ili manje (Sl. 7). MEMS često obuhvataju male mehaničke strukture, senzore, aktuatore i mikroelektronske komponente na jednom čipu. MEMS uređaji mogu izvršavati različite funkcije, uključujući merenje, detekciju, upravljanje i druge zadatke, a koriste se u mnogim oblastima, uključujući elektroniku, telekomunikacije, medicinu, transport, senzorske mreže i druge.

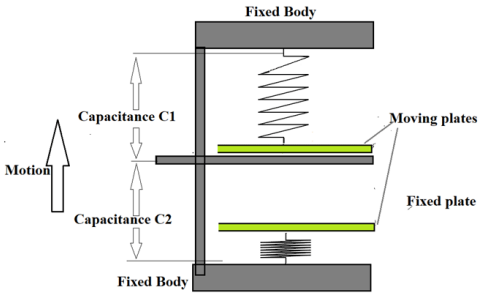


Sl. 7 MEMS – mikromehaničke strukture na čipu

Postoji brojni primeri MEMS uređaja koji se koriste u različitim oblastima. Evo nekoliko primera MEMS uređaja: akcelerometar (merenje ubrzanja), žiroskop (merenje rotacione orijentacije), mikrofon (minijaturni mikrofoni male potrošnje i visoke osetljivosti), senzor pritiska, inercioni senzori (merenje ubrzanja, brzine i orijentacije), DLP projektorski čipovi (digitalni svetlosni procesori - za projekciju slike u televizorima i projektorskim sistemima), BioMEMS (koriste se u medicini za analizu bioloških materijala, dijagnostiku bolesti i druge medicinske primene), MEMS spektrometri (Koriste se u analitičkoj hemiji za identifikaciju i analizu hemijskih supstanci).

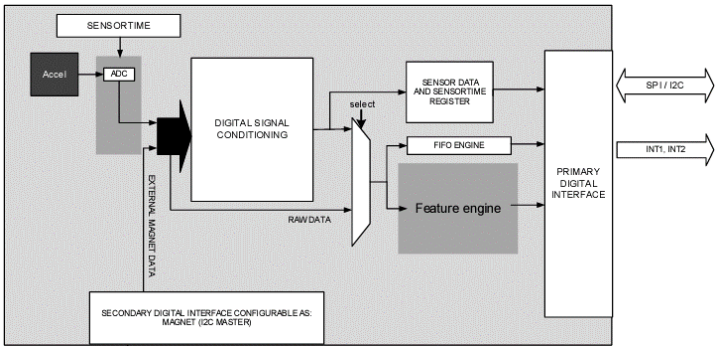
MEMS akcelerometar
Na Sl. 8(a) prikazan je princip realizacije MEMS akceleromentra - elektromehanički senzor za merenje ubrzanja. Princip rada se lako može naslutiti. Dve metalne ploče, oprugama pričvršćene za čvrstu armaturu, formiraju dva kondenzatora prema nepokretnoj metalnoj ploči u sredini, $C1$ i $C2$. Ako se cela ova konstrukcija kreće i to ubrzano, na metalne ploče deluje sila zbog čega se opruga isteže ili sabija. Slučaj na Sl. 8(a) odgovara ubrzanom kretanju u pravcu vertikalno-naviše. Što je ubrzane veće, to će opruga u gornjem delu biti razvučenija, a ona u donjem delu sabijenija. Pomeraji metalnih ploča dovode do promene kapacitivnosti, čijim

merenjem se može odrediti iznos ubrzanja. Celokupna ova elektromehanička konstrukcija je upakovana u MEMS senzor, veoma malih dimenzija (Sl. 8(b)). Osim senzora ovo IC sadrži i A/D konvertor i dodatna elektronska kola za procesiranje signala senzora u digitalnom domenu i realizaciju digitalnog interfejsa prema host-mikroprocesoru (Sl. 8(c)). Tipičan MEMS akcelerometar sadrži tri senzora, za merenje ubrzanja u tri upravna pravca. Jedna od primena akceleratora je npr. brojanje koraka. Podrška za ovu i još neke napredne funkcionalnosti dolazi kroz blok „*Feature engine*“.



(a)

(b)

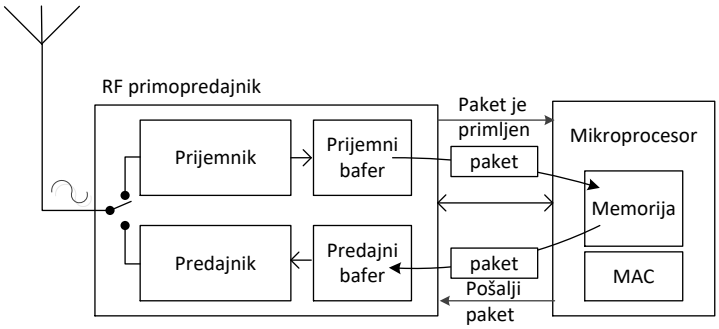


(c)

Sl. 8 MEMS akcelerometar: (a) princip; (c) izgled i dimenzije odgovarajućeg IC; (d) unutrašnja struktura

2.5 Komunikaciona jedinica

Savremeni trend je da se za povezivanje pametnih uređaja u mreže pametnih uređaja koristi bežična komunikacija. Otuda, neizbežna i ključna komponenta svakog pametnog uređaja je bežična komunikaciona jedinica. Radi ostvarenja dvosmerne komunikacije neophodno je da svaki uređaj ili stanica u bežičnoj mreži poseduje i RF predajnik i RF prijemnik. Iz praktičnih razloga, ove dve komponente su objedinjene u jednu, tzv. RF primopredajnik ili *RF transiver*, koja po potrebi obavlja funkciju RF predajnika ili RF prijemnika (Sl. 9). Funkcija RF transivera je da na predajnoj strani konvertuje informaciju koju treba preneti iz digitalnog u analogni domen, odnosno u RF signal koji se putem antene pretvara u elektromagnetni talas. Na prijemnoj strani, RF transiver konvertuje primljeni RF signal nazad u digitalni signal, koji se dalje procesira.

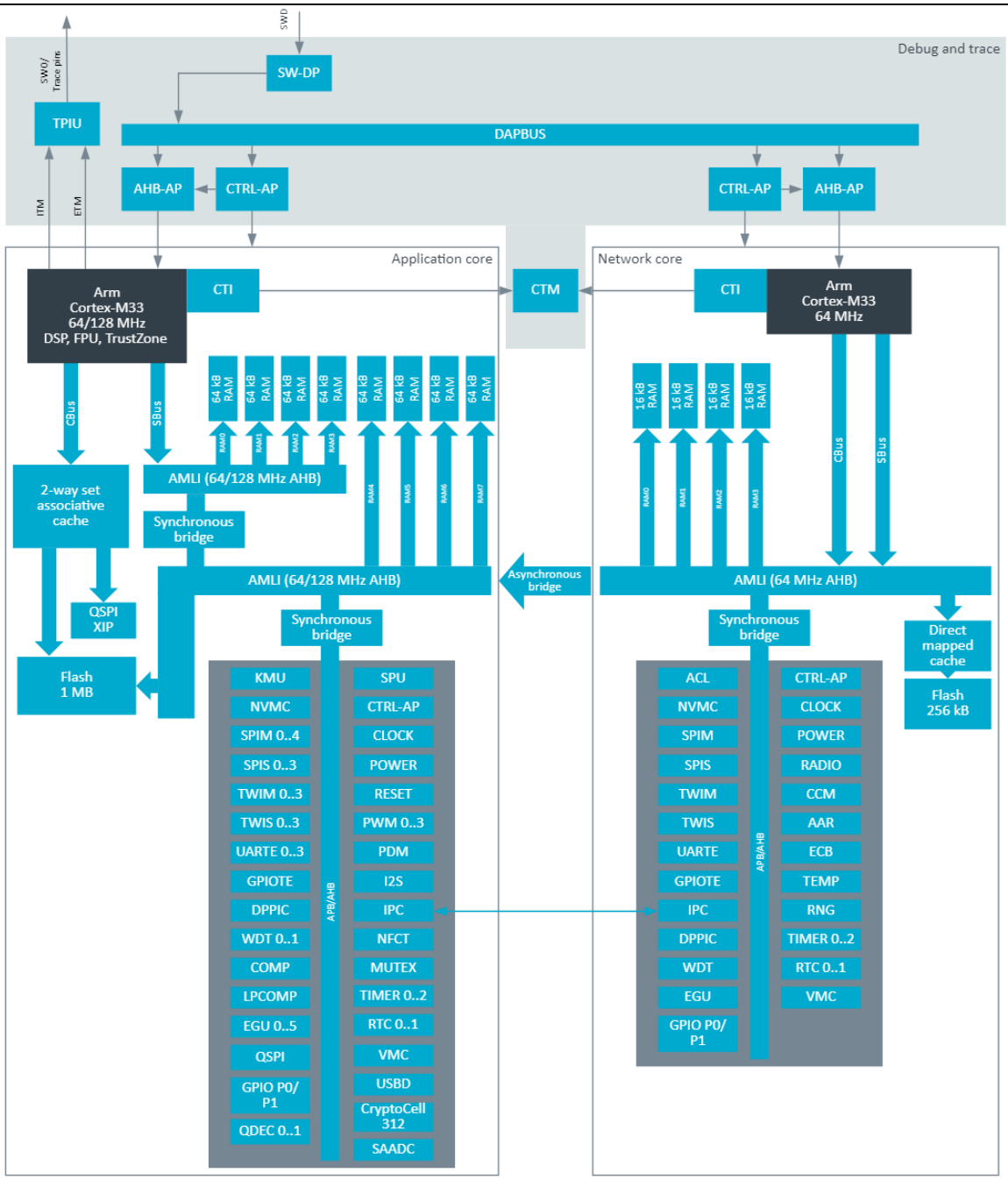


Sl. 9 Struktura RF primopredajnika i sprega sa mikroprocesorom

U pametnim uređajima, RF transiver je periferijska jedinica, pod kontrolom host-mikroprocesora. Host priprema podatke za slanje i dostavlja ih RF transiveru. Na prijemnoj strani, RF transiver ekstrahuje podatke iz primljenog RF signala i prosleđuje ih hostu. Blok „Predajnik“ u blok dijagramu na Sl. 9 obavlja digitalnu modulaciju, kao i dodatnu obradu modulisanog analognog signala (filtriranje, pojačanje). Blok „Prijemnik“ obrađuje primljeni signal iz antene (filtriranje, pojačanje), a zatim vrši demodulaciju. Većina RF primopredajnika pruža podršku za paketski način rada. To znači da mikroprocesor razmenjuje sa RF primopredajnikom pakete podataka (obično, određene maksimalne dužine). Paket sadrži poruku zajedno sa adresama primaoca i pošiljaoca. Ako želi da pošalje poruku, zadatak mikroprocesora bi bio da pripremljeni paket upiše u predajni bafer RF primopredajnika, dok bi zadatak RF primopredajnika bio da obavi sve aktivnosti koje su potrebne da bi se paket (kao digitalna informacija) transformisao u analogni signal za pobudu antene. Slično, prilikom prijema, RF primopredajnika obavlja sve šta je potrebno da bi se iz prijemnog analognog signala izdvojio paket i smestio u prijemni bafer. Po prijemu paketa, RF primopredajnik obaveštava mikroprocesor koji kopira paket u svoju memoriji i nastavlja dalju obradu. Takođe, host-mikroprocesor može da podešava brojne parametre rada transivera (izbor noseće frekvencije, brzine prenosa podataka, modulacione šeme itd.), kao i da upravlja njegovim radom (postavljanje u različite režime rada – predaja/prijem, i slično). Treba napomenuti da RF primopredajnik rešava problem fizičke komunikacije, ali ne i probleme koji se tiču kontroler pristupa medijumu. Kontrola pristupa medijumu je u nadležnosti mikroprocesora, odnosno softvera.

RF transiver se može realizovati u vidu integrisanog kola (IC), koje je putem nekog od standardnih serijskih komunikacionih interfejsa (I2C, SPI ili UART) povezano sa mikroprocesorom. Danas su za primenu u pametnim uređajima veoma zastupljene tzv. RF SoC (*System on Chip*) komponente, kod kojih su RF transiver i host-mikrokontroler integrisani u jedno kompaktno IC. Prednost RF SoC je u tome što se smanjuje ukupan broj komponenata i zauzima manji prostor na štampanoj ploči. Danas su dostupni su RF SoC za sve važne komunikacione standarde, poput Bluetooth, ZigBee, WiFi itd.

nRF5340 – RF SoC
Na Sl. 10 je prikazan blok dijagram RF SoC komponente nRF5340 kompanije *Nordic Semiconductors*. Ova kompleksna komponenta sadrži dva ARM procesor iz serije Cortex-M33 (*dual-core ARM*), sa brojnim pridruženim standardnim periferijskim jedinicama i memorijom (RAM i Flash). Jedan procesor je aplikacioni, odnosno izvršava aplikacioni program koji realizuje sve funkcije pametnog uređaja. Drugi procesor je mrežni procesor i na njemu se izvršava komunikacioni softver (protokol-stek). RF transiver je ovde prikazan kao blok RADIO u delu periferijskih jedinica mrežnog procesora. Konkretno reč je RF transiveru za Bluetooth i 802.15.4 komunikaciju. RF SoC podržava standardne komunikacione interfejse (I2C, SPI) koje se koriste za povezivanje sa okolnim senzorima.



Sl. 10 Blok dijagram RF SoC komponente nRF5340

2.5.1 Karakteristike

Osnovne karakteristike RF primopredajnika su:

Frekventni opseg: RF primopredajnik radi u određenom opsegu frekvencija, što određuje vrste signala koje može da emituje i prima. Većina komercijalnih RF primopredajnika radi u nekom od ISM opsega frekvencija. Frekventni opseg je, tipično, podeljen na više frekventnih kanala. U tom smislu, bitna je mogućnost izbora radne frekvencije (kanala) primopredajnika.

Modulacija: RF primopredajnici koriste različite modulacione šeme, a neretko, postoji mogućnost izbora tipa modulacije. Uobičajeno su podržani osnovni tipovi modulacije: AKS, FKS i PKS.

Izlazna snaga: Izlazna snaga predajnika određuje snagu emitovanja signala. Pri tom, postoji mogućnost izbora izlazne snage. Što je veća izlazna snaga, to je veći domet primopredajnika. RF transiveri za primenu kod pametnih uređaja su karakteristični po relativno maloj izlaznoj snazi i to iz dva razloga. Prvo, velika izlazna snaga znači i veliki utrošak energije, što nije poželjno u većini slučajeva. Drugo, korišćenje radio-frekventnog spektra je podložno strogoj regulativi, koja, između ostalog specificira i maksimalnu izlaznu snagu predajnika. Ograničenje izlazne snage na male nivoe je upravo karakteristično za ISM opseg.

Osetljivost prijemnika: Osetljivost prijemnika određuje minimalni nivo RF signala koji može da detektuje. Prijemnik veće osetljivosti može da registruje slabije signale. RF domet je podjednako određen izlaznom snagom predajnika i osetljivošću prijemnika. Prijemnik visoke osetljivosti moći će uspešno da prima RF signal niže snage, omogućavajući komunikaciju sa predajnikom na većem rastojanju u poređenju sa prijemnikom niže osetljivosti.

Brzina prenosa podataka: Odnosi se na brzinu kojom se informacija predaje i prima. Izražava se u jedinicama Kbs (kilobita u sekundi) ili Mbs (megabita u sekundi). Zavisi od modulacione šeme, propusnog opsega i odnosa signal-šum u komunikacionom kanalu. Kod mnogih RF primopredajnika postoji mogućnost izbora brzine prenosa podataka. Za veće brzine prenosa, potrebno je širi propusni opseg i dovoljno visok odnos signal-šum.

Polu-dupleksni način rada: RF primopredajnici rade u polu-dupleks režimu, što znači da primopredajnik može ili da emituje ili da prima, ali ne oba u isto vreme. Po pravilu, za predaju i prijem se koristi ista antena. RF komponenta koja omogućava da se antena deli između predajne i prijemne sekcije, omogućavajući RF transiveru da koristi istu antenu za oba procesa (predaju i prijem) bez mešanja signala, naziva se *duplekser* (na Sl. 9 je prikazana kao dvopoložajni preklopnik).

Interfejs: RF primopredajnik, tipično, poseduje interfejs (I2C, SPI, UART) za povezivanje sa drugim uređajima, kao što je to npr. mikrokontroler, radi kontrole rada i razmene podataka.

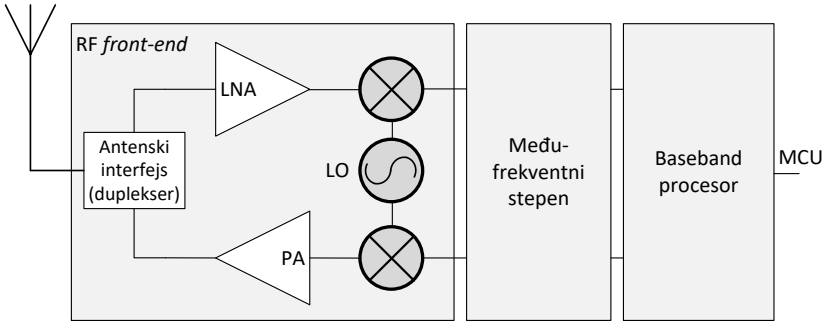
Kao što se može primetiti, većina parametar rada RF primopredajnika se može podešavati, tj. programirati. To se odnosi na noseću frekvenciju (kanal), tip modulacije, izlaznu snagu, brzinu prenosa podataka. Naravno, da bi komunikacija između dva primopredajnika bila moguća, njihovi parametri komunikacije moraju biti usaglašeni. Domet komunikacije zavisi od mnogo faktora. Domet je veći ako je izlazna snaga predajnika veća i/ili je osetljivost prijemnika veća. Takođe, izloženost signala pojačanom šumu, smanjuje domet. Pri istim uslovima prenosa, veća brzina prenosa podataka znači manji domet. Uz sve to, na domet značajno utiče i okruženje. Prvo, da li se signal prenosi u otvorenom ili zatvorenom prostoru (domet je veće u otvorenom prostoru). Drugo, da li u prostoru između predajnika i prijemnika postoje prepreke, odnosno da li je prisutna refleksija signala i feding.

Zanimljivost: The data transmission rate for communication with the Voyager probes is approximately **160 bps**. This extremely slow data rate is a result of the extreme distance between Earth and the Voyager probes, which are currently in interstellar space. The signals from the probes is affected by various factors, including cosmic radiation and interference and take a considerable amount of time to travel back to Earth. Under these conditions, the low data rate allows for more reliable communication.

2.5.2 Struktura RF primopredajnika

RF transiver je složena komponenta, koja objedinjuje analogne i digitalne sklopove. Analogni deo transivera je zadužen za obradu visoko-frekventnog RF signala (procesiranje primljenog RF signala i generisanje RF signala za emitovanje). Modulacija/demodulacija se po pravilu obavlja na tzv. među-frekvenciji, koja je značajno niža od frekvencije RF signala. Modulacija/demodulacija signala se može obavljati kako u analognom, tako i u digitalnom domenu, mada je kod savremenih transivera, ova funkcija uglavnom realizovana u digitalnom domenu, što zahteva upotrebu A/D i D/A konvertora.

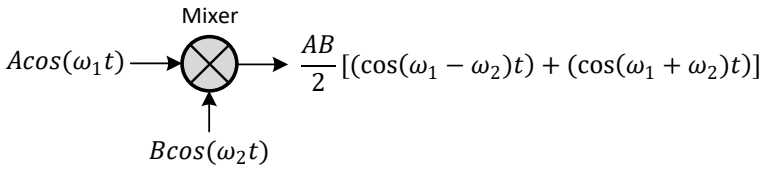
RF transiver se, generalno, sastoji iz tri dela: RF *front-end*, među-frekventni stepen i *baseband* procesor (Sl. 11). *RF front-end*, ili prednji deo RF transivera (onaj prema anteni) je odgovoran za emitovanje i prijem RF signala. U ovom delu, signali se procesiraju u analognom domenu na RF frekvenciji predaje/prijema. Obično sadrži: antenu, malošumni pojačavač (LNA – *Low-Noise Amplifier*), mešač, lokalni oscilator (LO) i pojačavač snage (PA – *Power Amplifier*). *Baseband* procesor (ili, procesor osnovnog opsega) je deo transivera prema host-mikroprocesoru i zadužen je za obradu i manipulaciju podacima pre nego što se prenesu na viši frekventni opseg za bežičnu komunikaciju, kao i za komunikaciju sa host-mikroprocesorom. Na primer, manipulacija CRC-om je u nadležnosti ovog stepena, filtriranje paketa po adresi i sl. Među-frekventni (*Intermediate Frequency*) stepen je smešten između *font-end* i *baseband* stepena. Glavni zadatak ovog stepena je modulacija i demodulacija signala. Sledi detaljniji opis pojedinih delova RF transivera.



Sl. 11 Detaljnija struktura RF primopredajnika. *Napomena*: LNA – malošumni pojačavač; PA – pojačavač snage; LO – lokalni oscilator; blokovo označeni sa " × " su mešači

LNA (Low-noise amplifier), ili malošumni pojačavač: Funkcija LNA je pojačanje slabog RF signala, primljenog antenom, na nivo koji se lako može obraditi narednim stepenima u prijemniku, uz minimalni unos dodatnog šuma. Obično se nalazi blizu antene, kako bi se minimizirali gubici signala i poboljšao odnos signal-šum. LNA mora imati visoku linearnost, kako bi se izbeglo unošenje distorzije i inter-modulacionih produkata, i širok dinamički opseg, kako bi mogao da pojačava i slabe i jake signale bez prekoračenja i zasićenja. Upotreba LNA poboljšava osetljivost prijemnika i omogućava prijem slabih signala u prisustvu šuma i interferencije.

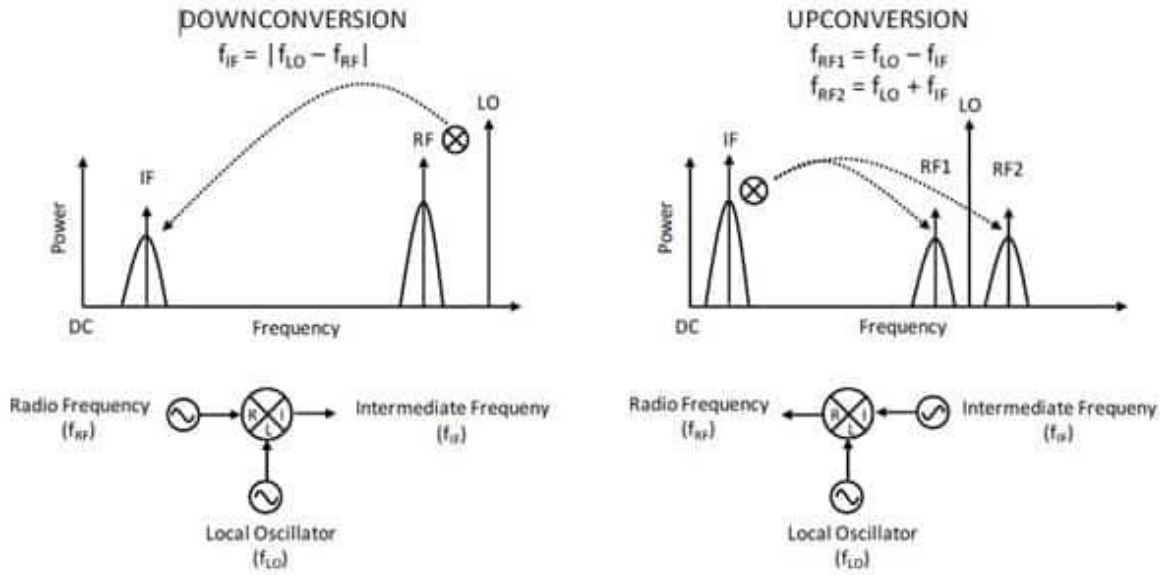
Mešač, ili mikser, je ključna komponenta transivera koja se koristi u procesu konverzije frekvencija. Njegova funkcija je da meša, tačnije množi dva signala različitih frekvencija i generiše signal nove frekvencije koja je jednaka zbiru ili razlici frekvencija ulaznih signala. Kod transivera, mešač se koristi za konverziju frekvencije primljenog visoko-frekventnog RF signala u signal niže, tzv. među-frekvencije (IF). Ovaj proces se naziva *down*-konverzija. Takođe se koristi i na predajnoj strani, za konverziju signala među-frekvencije u visoko-frekventni RF signal, što bi odgovaralo *up*-konverziji. Princip je ilustrovan na Sl. 12: proizvod dva prostoperiodična signala frekvencija w_1 i w_2 je zbir dve prostoperiodične komponente čije su frekvencije: $w_1 - w_2$ i $w_1 + w_2$. Nakon miksera sledi filter kojim se odstranjuje neželjena komponenta, tako da nakon filtriranja ostaje samo komponenta $w_1 - w_2$, u slučaju *down*-konverzije, odnosno $w_1 + w_2$, za slučaj *up*-konverzije.



Sl. 12 Princip frekventnog mešanja

Lokalni oscilator (LO). LO je komponenta RF transivera koja se koristi u procesu *up*- i *down*-konverzije signala. LO generiše lokalni prosto-periodični signal sa frekvencijom koja je bliska željenoj RF frekvenciji, ali ne i identična. Signal LO-a se meša sa dolaznim RF signalom da bi se generisao IF signal; odnosno, meša se sa IF signalom, da bi se generisao RF signal za emitovanje. LO mora imati veoma stabilnu frekvenciju i mali nivo šuma da bi se osiguralo da RF transiver radi sa visokom tačnošću i minimalnom interferencijom. LO se tipično konstruiše upotrebom kristalnog oscilatora (koji garantuje frekventnu stabilnosti) i PLL kola (koje omogućava preciznu kontrolu frekvencije). Promenom frekvencije LO se zapravo bira RF kanal na kome će transiver raditi.

Na Sl. 13 su ilustrovani procesi *up*- i *down*-konverzije. Grafikon na levom delu Sl. 13 odgovara *down*-konverziji. Ulazni signali miksera su signal LO-a i dolazni RF signal. RF signal je modulisan digitalnom informacijom ASK, FSK, PSK ili QAM modulacija i zbog toga njegov spektar zauzima određeni opseg frekvencija oko centralne, noseće frekvencije, f_{RF} (odgovara vertikalnoj strelici sa oznakom RF). Frekvencija LO-a, f_{LO}, je nešto viša od noseće frekvencije RF signala, tako da se mešanjem generiše među-frekventni signal čija je centralna frekvencija $f_{IF} = |f_{LO} - f_{RF}|$. Ovde je suština u tome da je mešanjem svaka frekventna komponenta RF signala preslikana u odgovarajuću frekventno komponentu IF signala, što znači da *down*-konverzijom informacija koja je sadržana u RF signalu nije izgubljena. Primera radi, za $f_{RF} = 900\ MHz$ i $f_{LO} = 910\ MHz$, centralna IF frekvencija će biti $f_{IF} = 10\ MHz$. Ako je propusni opseg RF signal npr. $1\ MHz$, tada će IF signal zauzimati opseg frekvencija od $9\ MHz$ do $11\ MHz$. IF signal, budući da je značajno niže frekvencije, može se mnogo lakše obrađivati (filtrirati, pojačavati, demodulisati) od visoko-frekventnog RF signala, što zapravo i razlog za primenu *down*-konverzije. U procesu *up*-konverzije (desni deo Sl. 13) ulazi u mikser su signal lokalnog oscilatora i IF signal, koji je modulisan digitalnom informacijom. Mešanjem, proizvode se dve visoko-frekventne „slike“ od kojih svaka sadrži potpunu informaciju iz IF signala. Jedna od ovih „slika“ se odstranjuje filtriranjem, a druga se šalje ka anteni radi emitovanja.



Sl. 13 Konverzija frekvencije: (a) *down*-konverzija; (b) *up*-konverzija

Pojačavač snage (PA – *Power Amplifier*). Funkcija PA je pojačanje RF signala sa izlaza mešača na nivo pogodan za prenos putem antene. Nivo pojačanja koji je potreban zavisi od specifične primene i rastojanja na koje signal treba biti prenet. Pojačanje snage je poslednja faza u predajnom lancu transivera. Performanse PA su važne da bi se osiguralo da izlazni signal ispunjava

regulatorne zahteve koji se tiču izlazne snage i spektralne čistoće (širina spektra). Takođe, efikasnost PA mora biti visoka, kako bi se minimizirala potrošnja energije i disipacija toplote.

Među-frekventni stepen (IF – *Intermediate Frequency section*). Obrada među-frekventnog signala obuhvata demodulaciju, na prijemnoj, i modulaciju na predajnoj strani transivera. Kod mnogih savremenih transivera, među-frekventni signal, dobijen u procesu *down*-konverzije se digitalizuje (primenom A/D konvertora), tako da se dalja obrada (demodulacije) obavlja u digitalnom domenu. Slično, na predajnoj strani, i modulacija se obavlja u digitalnom domenu, a među-frekventni signal se generiše D/A konvertorom i prosleđuje mešaču za *up*-konverziju.

2.5.3 Režimi rada

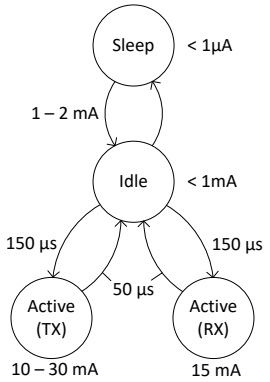
RF transiveri, koji se tipično koriste kod pametnih uređaja, obično podržavaju nekoliko operativnih režima kako bi se postigla ravnoteža između male potrošnje energije i performansi:

Režim mirovanja (*Sleep Mode*): U ovom režimu, najveći deo RF transivera je isključen sa napajanja što onemogućava RF komunikaciju. Konkretno, isključeni su RF *front-end* i među-frekventni stepen, dok je *baseband* procesor, i to samo jednom delu, uključen, kako bi mogao da reaguje na komande host-mikroprocesora. Ovaj režim je koristan za štednju energije kada transiver nije u upotrebi. Potrošna transivera u ovom režimu je minimalna (npr. struja potrošnje je tipično manja od $1\mu A$).

Režim pripravnosti (*Idle Mode*): Kao u režimu mirovanja, i u režimu pripravnosti pojedini delovi RF transivera su isključeni sa napajanja, tako da transiver aktivno niti emituje niti prima podatke, ali je zato spreman da veoma brzo, na komandu host-mikroprocesora, pređe u režim predaje/prijema. Prelazak iz režima mirovanja u režim predaje/prijema zahteva izvesno vreme (reda ms), što može da dovede do problema u komunikaciji kada je potrebna brza reakcija transivera. Ovaj problem ne postoji u režimu pripravnosti, ali po cenu povećane potrošnje (struja reda mA).

Aktivni režim: U ovom režimu, transiver je u stanju predaje ili stanju prijema podataka. Aktivni režim je režim najveće potrošnje, koja zavisi od tipa transivera i izlazne snage. Na primer, struja potrošnje za komunikaciju kratkog dometa (nekoliko desetina do stotinak metara) i malu brzinu prenosa podataka (od nekoliko desetina Kbs do nekoliko Mbs) struja potrošnje je reda nekoliko desetina mA (npr. Bluetooth). Za komunikaciju na malom rastojanju, ali velikom brzinom prenosa, struja potrošnje je reda $100 - 300mA$ (npr. WiFi). Međutim, kada govorimo o komunikaciji na velikim rastojanjima, kao što je to slučaj u mobilnim mrežama, struja potrošnje može dostići i $2A$. Stoga, ključna strategija za smanjenje potrošnje energije jeste minimiziranje vremena koje transiver provodi u aktivnom režimu.

Na Sl. 14 je prikazan dijagram stanja tipičnog RF transivera, koji prikazuje dozvoljene prelaze između radinih režima, kao i okvirne vrednosti struje potrošnje u svakom stanju, zajedno sa vremenima prelaska između režima rada. Režimi mirovanja i pripravnosti su režimi smanjene potrošnje. U ovim režimima, transiver troši značajno manje energije nego u aktivnom režimu, što je naročito bitno kod baterijski napajanih uređaja. Generalno važi da što je veći deo transivera isključen to je veća ušteda energije, ali je vreme koje je potrebno za prebacivanje u aktivni režim duže. Na primer, za prelazak iz režima mirovanja u aktivni režim neophodno je obaviti kompletnu inicijalizaciju i konfiguraciju transivera.



Sl. 14 Dijagram stanja RF transivera

U „blažem“ obliku mirovanja, kakav je režim pripravnosti, obustavljen je rad pojedinih delova transivera, ali je zato konfiguracija transivera (tj. sadržaj konfiguracionih registara) očuvana, što eliminiše potrebu za ponovnom inicijalizacijom prilikom prelaska u aktivni režim.

Prebacivanjem između različitih režima rada transivera upravlja host-mikrokontroler shodno trenutnim i očekivanim potrebama za komunikacijom, pri tom težeći da se koliko god je to moguće redukuje potrošnja energije. Otežavajuća okolnost je činjenica da promena operativnog režima transivera sama po sebi unosi utrošak vremena i energije. Tako npr. težnja da RF transiver provodi što manje vremena u aktivnom režimu, a koja vodi ka previše čestim promenama režima, može da ima suprotan efekat.

Još jedna bitna karakteristika RF transivera male snage (kakvi su većina koji se koriste kod pametnih uređaja) je ta da je potrošnja energije u režimu prijema približna potrošnji u režimu predaje. Primera radi, LNA, koji mora biti uključen u režimu prijema, relativno je veliki potrošač energije. Stoga, strategija gde se transiver drži u režimu prijema uvek kada ne postoji potreba za emitovanje ne doprinosi uštedi energije. Ušteda se postiže tek prebacivanjem transivera u neki od režima smanjene potrošnje.

U zavisnosti od tipa transivera, mogu postojati i neki drugi režimi rada, koji su usklađeni sa konkretnim komunikacionim protokolom. Na primer, transiver može realizovati režim periodičnog buđenja, gde transiver najveći deo vremena provodi u stanju mirovanja (spavanja) i periodično se budi na kratak vremenski period, da bi poslao ili primio podatke. Ili, pojedini transiveri pružaju podršku za periodično emitovanje tzv. bikona, tj. kratkih poruka kojima uređaj oglašava svoje prisustvo okolnim uređajima.

2.6 Napajanje

Generalno, postoje tri opcije za napajanje pametnih uređaja: (1) eksterni, neprekidni izvora napajanja (električna mreža 220V), (2) sopstveni izvora napajanja (baterija) ili (3) prikupljanje energije iz okoline. U nastavku će biti razmatrane opcije (2) i (3), kao najzastupljenije kod pametnih uređaja.

2.6.1 Baterijsko napajanje

Baterijski napajani uređaji su danas široko rasprostranjeni i igraju ključnu ulogu u bežičnim komunikacijama, Internetu stvari (IoT) i drugim aplikacijama koje zahtevaju fleksibilnost i autonomiju napajanja. Nekoliko glavnih prednosti baterijskog napajanja su sledeće:

Mobilnost: baterijsko napajanje omogućava uređajima visok stepen mobilnosti, jer nisu vezani za fiksni izvor napajanja. To je posebno korisno u slučajevima gde je potrebna fleksibilnost u rasporedu i lokaciji uređaja.

Smanjenje žičane infrastrukture: baterijski napajani uređaji eliminišu potrebu za stalnim priključenjem na električnu mrežu, što pojednostavljuje instalaciju i smanjuje potrebu za žičanom infrastrukturom.

Senzorske aplikacije: baterijski napajani uređaji često se koriste u senzorskim aplikacijama, kao što su praćenje okoline, merenje temperature, vlažnosti ili praćenje pokreta. U ovim slučajevima, baterijsko napajanje omogućava postavljanje senzora na mestima gde nije dostupna električna energija.

Glavni nedostatak baterijskog napajanja, naravno, potiče od konačnog energetskog kapaciteta baterije. Iz tog razloga, ovaj tip uređaja često je projektovan tako da minimizira potrošnju energije kako bi se produžilo vreme trajanja baterije. To uključuje korišćenje energetski efikasnih komponenti,

primenu različitih strategija uštede energije i, u nekim slučajevima, korišćenje različitih režima rada. Kod pametnih uređaja, često, glavni potrošač energije je komunikacija. Stoga, jedna od bitnih strategija smanjenje potrošnje je redukcija komunikacije, kako redukcija količine podataka koji se prenose, tako i redukcija radio dometa, jer veći domet zahteva veću snagu zračenja.

Za primenu kod pametnih uređaja postoje dva generalna tipa baterija:

Primarne (*nepunjive*) baterije. Primarne baterije su namenjene jednokratnoj upotrebi. Kada se potroše, ne mogu se ponovo puniti, već se obično zamenjuju novim. Ove baterije ne zahtevaju kompleksnu elektronike za punjenje, što ih čini jednostavnim za korišćenje u uređajima gde zamena baterija jeste praktičnija opcija, ili gde je očekivano vreme trajanja baterije veoma dugo (npr. od jedne do nekoliko godina, pa čak i deset godina). Svaka baterija se prazni i kada se ne koristi. Zbog toga, za primenu kod pametnih uređaja, primarne baterije moraju imati veoma malu struju samo-pražnjenja.

Sekundarne baterije se mogu više puta puniti i prazniti tokom svog životnog veka, što ih čini ekonomičnim izborom u slučajevima gde redovno punjenje baterije jeste moguće. Za punjenje sekundarnih baterija potrebna je posebna elektronika, često u obliku specijalizovanih IC, koja su, tipično, sastavni deo samog uređaja. Često, IC za punjenje je praćeno i IC-om za monitoring baterije, koje, tokom punjenja meri količinu energije koja je predata bateriji, a tokom normalnog rada, meri količinu potrošene energiju. Na osnovu ovih merenje moguće je odrediti količinu preostale energije, što u mnogim scenarijima predstavlja bitnu informaciju samom uređaju, ili korisniku uređaja.

Osnovni parametri i karakteristike baterija su:

Nominalni napon baterije je standardni ili prosečni napona na krajevima baterije, koji se uobičajeno povezuje sa konkretnim tipom baterije. Na primer, standardni, ili nominalni napon alkalne baterije je $1.5V$. To ne znači da će celog svog životnog veka ova baterija imati napon od $1.5V$, jer se napon baterije menja pražnjena. Na početku životnog veka, alkalna baterija može imati napon od recimo $1.8V$, a na kraju životnog veka od samo $0.8V$. Nominalni napon Li-Ion baterije je $3.7V$, dok je tipičan opseg napona $4.2V$ (puna), do $3.1V$ (prazna).

Kapacitet baterije je količina električne energije koju baterija može da uskladišti, odnosno koju može da proizvede tokom svog rada. Kapacitet baterije se izražava u jedinicama Ah (amper-sati), odnosno mAh (miliamper sati). Jedan amper-sat znači da baterija može obezbediti struju od jednog ampera tokom jednog sata. Ako je prosečna struja potrošnje uređaja koji se napaja ovom baterijom $1\ mA$, tada će ta baterija trajati $1000\ h$ oko (41 dan).

Glavna mera koja karakteriše moć skladištenja energije baterije je energetska gustina, tj. uskladištena energija po jedinici zapremine, J/cm^3. Energetska gustina se nekada izražava i u jedinicama J/kg (ili J/g), odnosno po jedinici težine.

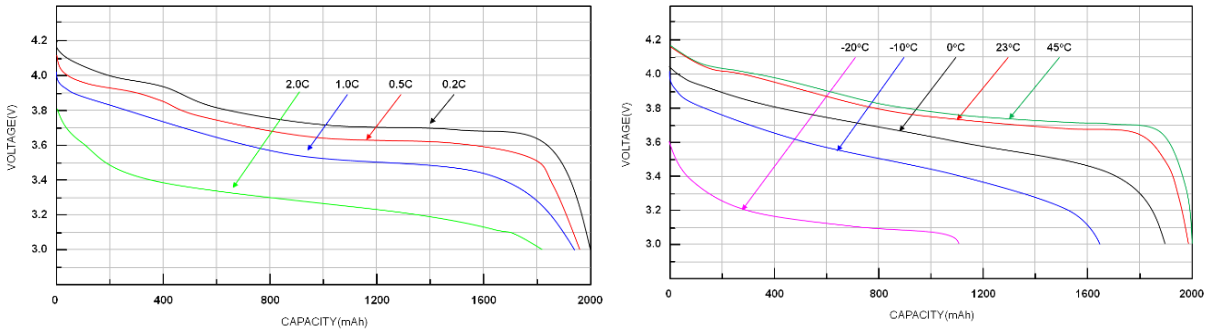
Primer: energetska gustina Li-Ion baterija se kreće u opsegu $900 - 2500\ J/cm^3$. Usvojimo, da ja energetska gustina konkretne Li-Ion baterije $1500\ J/cm^3$ i da su njen deklarisani kapacitet i napon $1000\ mAh$ i $3.7V$. Jednostavna računica nas dovodi do zaključka da je zapremina ove baterije približno $8\ cm^3$ – ako je izrađena u obliku kocke, svaka stranica bi bila dužine $2\ cm$. Gustina energije po jedinici težine Li-Ion baterija je u granicama $540 - 900\ J/g$. Ako usvojimo da je energetska gustina po gramu analizirane baterije $700\ J/g$, to bi onda značilo da je njena težina oko $19g$.

Maksimalna struja: misli se na maksimalno dozvoljenu struju pražnjena baterije. Posebno se definiše: *maksimalna kontinualna struja* i *maksimalna struja u piku*. Ako se baterija neprekidno prazni, tada prosečna struja pražnjenja ne bi trebalo da bude veća od maksimalno dozvoljene kontinualne struje. Dozvoljeno je da povremeno struja pražnjena bude veća od ovog

ograničenja, ali samo u veoma kratkom vremenskom intervalu, tj. u piku, (reda ms) i da pri tom ne prekorači maksimalno dozvoljenu struku u piku. Prekoračenje ovih strujnih ograničena može trajno da ošteti bateriju ili da smanji njen kapacitet. Primera radi, maksimalna kontinualna struja Li-Ion baterija se izražava u jedinicama C i za standardnu bateriju ovog tipa iznosi $1C$. Ovde „C“ označava kapacitet baterije. Recimo, maksimalna kontinualna struja $1C$ Li-Ion baterije kapaciteta $1000\ mAh$, iznosi $1000\ mA$. Treba napomenuti da su elektronski uređaji karakteristični po značajnim varijacijama u potrošnji tokom vremena. Na primer, možemo očekivati da će struja napajanja nekog pametnog uređaja varirati u opsegu od reda μA do nekoliko desetina ili stotina mA, zavisno od trenutnog režima rada.

Samo-pražnjenje. Odnosi se na pojavu spontanog pražnjenje baterije (gubitak uskladištene energije u odsustvu potrošača). Samo-pražnjenje je posledica hemijskih reakcija i drugih procesa i faktora unutar same baterije. Stopa samo-pražnjenja zavisi od tipa bateriji i uslova eksploatacije (npr. temperatura). Primera radi, stopa samo-pražnjenja Li-Ion baterija je $1-2\%$ na mesečnom nivou (tokom jednog meseca kapacitet opada za navedeni iznos čak iako se baterija ne koristi). NiMH baterije su primer baterija sa visokom stopom samo-pražnjenja, koja iznosi $20-30\%$ na mesečnom nivou. Stopa samo-pražnjena alkalnih i litijumskih baterija je veoma mala, reda $1-2\%$ na godišnjem nivou (zbog toga se često koriste kao permanentne baterije za pametne uređaje sa dugim očekivanim periodom zamene baterije).

Karakteristika pražnjenja: opisuje kako se napon i kapacitet baterije menja tokom njenog pražnjenja. Predstavlja se u obliku grafikona zavisnosti napona na bateriji od potrošenog kapaciteta baterije. Ova zavisnost se može dati za različite struje pražnjena, ili za različite temperature okoline. Na Sl. 15 su prikazani grafikoni pražnjenja tipične Li-Ion baterije. Kapacitet ove baterije je $2000\ mAh$. Vidimo da se deklarisani kapacitet može iskoristiti samo ako je baterija prazni relativno malom strujom ($0.2C$) pri temperaturama koje su u rangu sobnih temperatura. Za veće struje pražnjenja i niže temperature, kapacitet koji se može iskoristiti je manji. Npr. ako se baterija prazni strujom $2C$ i temperatura baterije je -20^oC, iz baterije će moći da se „izvuče“ samo oko 50% uskladištene energije ($1000mAh$). Takođe, na ovim grafikonima vidimo kako tokom pražnjenja napon baterije postepeno opada. Nagli pada napona se dešava tek pri kraju ciklusa pražnjenja, što predstavlja dobru osobinu ovog tipa baterije.



(a) (b)

Sl. 15 Karakteristika pražnjenja Li-Ion baterije: (a) pri različitim strujama pražnjenja; (b) na različitim temperaturama

Tabela 2 Karakteristike različitih tipova baterija

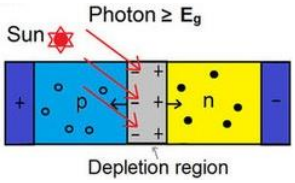
Feature	Alkaline	Lithium-ion (Li-ion)	Lithium-ion Polymer (Li-Po)	Lead-acid	Nickel-metal hydride (NiMH)
Chemistry	Zinc-manganese dioxide	Lithium metal oxide	Lithium polymer electrolyte	Lead and lead oxide	Nickel and metal hydride
Nominal voltage (V)	1.5	3.7	3.7	12	1.2
Energy density (Wh/kg)	250-350	150-700	250-450	30-80	150-300
Power density (W/kg)	100-200	250-1500	300-1000	150-200	250-400
Rechargeable	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Lifespan (cycles)	N/A	300-1000	500-1200	300-500	300-500
Cost per unit of energy	Low	High	High	Low	Medium
Self-discharge rate	Low	Moderate	High	Moderate	High
Operating temperature range	-20°C to 50°C	0°C to 45°C	-20°C to 60°C	-20°C to 50°C	-20°C to 45°C
Safety	Safe	Potentially flammable	Potentially flammable	Corrosive acid	Less toxic than lead-acid
Common uses	Disposable devices, low-drain electronics	Laptops, smartphones, cameras	Drones, RC vehicles, power tools	Cars, motorcycles, boats	Power tools, hybrid vehicles

2.6.2 Sakupljanje energije iz okruženja

Sakupljanje energije iz okoline je atraktivan način napajanja pametnog uređaja, posebno u situacijama kada je pristup energetskoj mreži ograničen i/ili kada je dopuna ili zamena baterija nepraktična opcija. Nažalost, po pravilu, reč je o veoma slabim izvorima energija sa značajnim ograničenjima u mogućnostima efikasnog korišćenja.

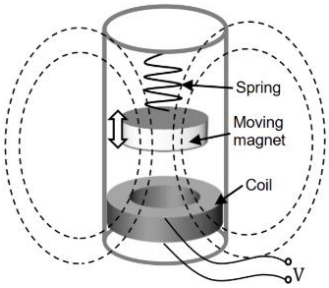
Prirodni izvori energije postoje u različitim okruženjima, kako na otvorenom, tako i u zatvorenom prostoru, koji se, posebnim postupcima energetske konverzije, mogu pretvoriti u oblik potreban za napajanje elektronskih kola. Postoje različite tehnike sakupljanja energije, a neki od najčešćih metoda uključuju:

Solarna Energija: korišćenje solarnih (foto-naponskih) ćelija za pretvaranje energije sunčeve svetlosti u električnu energiju. Energija koja se može dobiti iz solarne ćelije zavisi od toga da li se uređaj nalazi na otvorenom ili u zatvorenom prostoru, od perioda dana kao i od vremenskih uslova. Rezultujuća snaga je između $10\ \mu W/cm^2$ u zatvorenom i $15\ mW/cm^2$ na otvorenom prostoru. Jedan solarna ćelija daje relativno stabilan napon od oko $0.6V$ sve dok je struja opterećenja manja od kritičnog praga, koji zavisi, između ostalog, od intenziteta svetala. Snažniji izvori napajanja se formiraju povezivanje više solarnih ćelija. Sakupljanje solarne energije je pogodno za uređaje koji su izloženi sunčevom svetlu, kao što su senzori u pametnim domovima, nosivi uređaji i senzori u poljoprivredi.



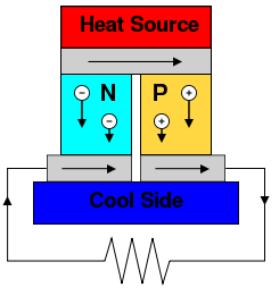
Princip: pn-spoj sa metalnim kontaktima na krajevima (kao dioda). Između p- i n- oblast (kao što znamo) formira se osiromašena oblast (bez elektrona i šupljina). Svetlost obasjava osiromašenu oblast. Foton svetlosti izbija elektron iz atomskog omotača – pravi se par elektron-šupljina. Elektron ide ka p-, a šupljina ka n- oblasti – stvara se električna struja.

Vibraciona energija. Generisanje električne energije korišćenjem vibracija ili pokreta. Dostupna energija zavisi od amplitude i frekvencije vibracija i kreće se od $0.1\,\mu W/cm^3$ do čak $10{,}000\,\mu W/cm^3$ u nekim ekstremnim slučajevima. Vibracije se mogu konvertovati u električnu energiju na različite načine, na bazi: elektromagnetnog, elektrostatičkog ili piezoelektričnog principa.



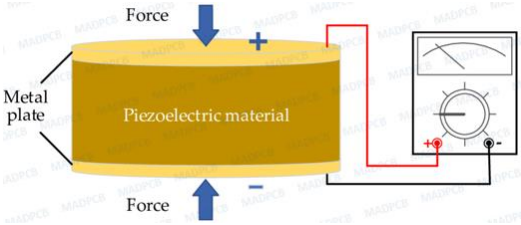
Princip: Pod dejstvom mehaničkih vibracija, pokreće se magnet, koji je pričvršćen oprugom za nepokretnu konstrukciju. Pomeranje magneta indukuje struju u kalemu.

Termoelektrično sakupljanje energije: Generisanje električne energije iskorišćavanjem temperaturne razlike pomoću tzv. termoelektričnih materijala. Teorijski, čak i mala razlika od recimo $5K$ može da proizvede značajnu snagu. Nažalost, praktični uređaji za ovu namenu su po svojoj efikasnosti daleko od teorijskog limita (npr. $80\,\mu W/cm^2$ na oko $1V$ i $5K$ temperaturne razlike).



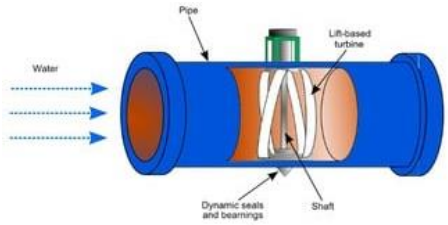
Princip: dve poluprovodničke pločice, jedna n- i druga p-tip. Sivi blokovi su metalni kontakti. Strelica ukazuje na smer struje. Slobodni nosioci naelektrisanja se kreću u smeru od toplijeg ka hladnijem kraju.

Piezoelektrično Sakupljanje Energije: Korišćenje piezoelektričnih materijala koji generišu električnu energiju kao odgovor na mehanički pritisak ili deformaciju. Može se primeniti u uređajima koji su podložni mehaničkom stresu, kao što su koraci, vibracije ili pokreti.



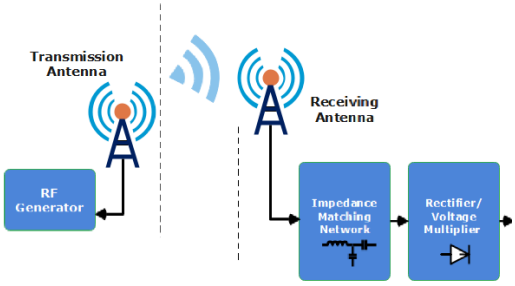
Princip: pod dejstvom mehaničke sile, na oblogama piezoelektričnog materijala nagomilava se naelektrisanje.

Sakupljanje energije protoka fluida. Odnosi se na upotrebu turbina na vazduh ili vodu. Izazov je minijaturizacija.



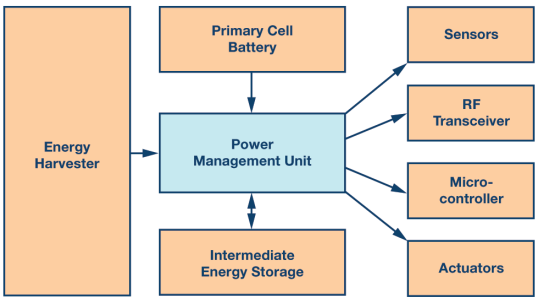
Princip: u cev je ugrađena mikro-turbina koja se okreće pod dejstvom protoka tečnosti. Rotacija turbine se konvertuje u električnu energiju.

Sakupljanje RF energije. Prikupljanje energije iz radio talasa, poput WiFi signala ili signala mobilne telefonije.



Princip: Za prikupljanje RF energije iz okoline koristi se antena. Impedansa antene je prilagođena (*impedance matching network*) kao bi se maksimizirala efikasnost prikupljanja energije. Naizmenični RF signal iz antene se diodama konvertuje (ispravlja) u jednosmerni signal, koji se dalje koristi za napajanje uređaja.

Energija sakupljena iz okruženja se može koristiti za napajanje samo uređaja veoma male potrošnje. Poseban problem je i to što izvori energije dostupni u okruženju često nisu u stanju da obezbede konstantno napajanje, jer njihova snaga varira u vremenu. Solarna ćelija proizvodi energiju samo ako je obasjana svetlom, vibracioni generator samo kada postoje vibracije i sl. Zbog toga, sakupljanje energije se često kombinuje sa baterijom, kako dopunskim izvorom energije. Dijagram na Sl. 16 prikazuje sistem napajanja koji koristi sakupljanje energije iz okoline i dva tipa baterija radi efikasnijeg upravljanja energijom. U ovom sistemu, prikupljena energija se skladišti u sekundarnoj (punjivoj) bateriji. Uređaj se napaja iz sekundarne baterije dok god ona ima dovoljno energije. Kada se kapacitet sekundarne baterije iscrpi, napajanje se prebacuje na primarnu bateriju. Ovaj pristup omogućava balansiranje varijacija u proizvodnji i potrošnji energije, čime se produžava životni vek primarne baterije.



Sl. 16 Sistem za sakupljanje energije iz okoline. Napomena: *Energy Harvester* - uređaj koji prikuplja energiju iz okruženja; *Intermediate Energy Storage* – elemenat za skladištenje energije (sekundarna baterija); *Power Management Unit* – jedinica za upravljanje sistemom napajanja

2.7 Vodič za učenje

- Centralizovana i distribuirana organizacija embeded sistema. Osnovne karakteristike, prednosti i nedostaci centralizovane i distribuirane organizacije. (Nije neophodno da pamtite sve taksativno nabrojane prednosti/nedostatke, ali bi trebalo da imate preciznu predstavu o opštim karakteristikama dve organizacije.)

Organizacija pametnog uređaja

- Šta je to pametni uređaj? Organizacije pametnog uređaja (Sl. 2) i funkcije njenih glavnih komponenata (podsistema).
- Trendovi u razvoju pametnih uređaja

Senzori

- Šta je to senzor?
- Tačnost i preciznost. Šta znači jedno, a šta drugo. Razumevanje Sl. 3. Kako se poboljšava tačnost i preciznost?
- Klasifikacija senzora. Aktivni i pasivni. Analogni i digitalni. Apsolutni i relativni. Kontaktni i beskontaktni.
- Podela prema fizičkoj veličini koju mere. (Nije potrebno da pamtite sve tipove senzora, ali bi trebalo da možete da nabrojite nekoliko tipova i da znate njihovu upotrebu.)

Aktuatori

- Šta su to aktuatori? Senzori vs. aktuatori

- Klasifikacija aktuatora. Prema tipu kretanja, snazi, binarni i kontinualni.
- Prema vrsti energije (nije potrebno da učite napamet sve tipove, ali bi trebalo da znate bar nekoliko tipova i odgovarajuće primere primene).

MEMS

- Šta je to MEMS? Koje su prednosti MEMS u odnosu na klasične načine realizacije senzora/aktuatora?

Komunikaciona jedinica

- Generalna struktura RF primopredajnika (Sl. 9).
- Šta znači paketski prenos i kako se ostvaruje interakcija mikroprocesor-primopredajnik?
- Načini realizacije RF primopredajnika, IC i RF SoC.
- Karakteristike RF primopredajnika. Od frekventnog opsega do interfejsa.
- Od čega zavisi RF domet?
- Struktura RF primopredajnika (Sl. 11) i uloga unutrašnjih blokova i jedinica.
- LNA, Mešač, Lokalni oscilator, PA, uloga među-frekventnog stepena.
- Konverzija frekvencije. Zašto je neophodna? Princip *down*- i *up*-konverzije frekvencije (Sl. 13)
- Režima rada. Režim mirovanja, pripravnosti i aktivni režim. Dijagram stanja i prelazi.
- Specifičnosti RF primopredajnika male snage.

Napajanje

- Baterijsko napajanje. Primena i prednosti baterijskog napajanja u odnosu na napajanje iz električne mreže.
- Primarne i sekundarne baterije.
- Karakteristike baterija. Nominalni napon, kapacitet, maksimalna struja, samo-pražnjenje, karakteristika pražnjenja (trebalo bi da znate da okvirno skicirate grafikon ove karakteristike)
- Sakupljanje energije iz okruženja. Metode sakupljanja energije (trebalo bi da znate koje su to metode i njihove osnovne karakteristike i osnovne principe (ne više od onog što je dato u materijalu)
- Princip realizacije podsistema napajanja sa sakupljanjem energije iz okoline (Sl. 16 i objašnjenje)

- ♦ ♦ ♦ -