

Izbor prekidača pri optimizaciji potrošnje senzora u senzorskim čvorovima

Tijana Begović

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

tijana.begovic@etf.ues.rs.ba

Sažetak—Senzorski čvorovi posljednjih godina predstavljaju ključan aspekt u nadzoru i upravljanju okolinom. Najčešće se napajaju iz akumulatorskih i nepunljivih baterija sa ograničenim radnim vijekom, što predstavlja veliko ograničenje u radu čvora. U literaturi je predstavljeno više različitih metoda optimizacije potrošnje, ali one uglavnom ne obuhvataju potrošnju senzora u neaktivnom režimu rada, koja se ne smije zanemariti, te je u ovom radu razmotren princip primjene PG tehnike pri optimizaciji potrošnje senzora u senzorskim čvorovima. Primjena ove tehnike zasniva se na odspajanju neaktivnih komponenti od napajanja korišćenjem elektronskih prekidača. Stoga je cilj rada izabrati odgovarajući tip prekidača na osnovu postavljenih kriterijuma u skladu sa specifičnim zahtjevima primjene senzora u senzorskim čvorovima.

Ključne riječi—potrošnja, optimizacija, senzorski čvor, senzor.

I. UVOD

Razvoj tehnologije tokom posljednje decenije uslovio je primjenu uređaja Interneta stvari (eng. Internet of Things) u širokom spektru oblasti života i rada ljudi. Bežične senzorske mreže, kao ključan aspekt Interneta stvari, omogućavaju nadzor okoline i objekata [1]. Stoga, senzori imaju vrlo važnu u ulogu u uređajima Interneta stvari. Osnovni zadatak senzora je da daju podatke o vrijednostima parametara koji se prate, te na taj način omoguće uvid u stvarno stanje sistema koji se prati ili sistema kojim se upravlja i izazovu neophodnu i pravovremenu reakciju [2].

Senzori pretvaraju konkretnu fizičku veličinu (npr. jačinu zvuka, intenzitet svjetlosti, temperaturu i slično) u odgovarajući električni signal, koji je mjerljiv i moguće ga je očitati uz pomoć različitih elektronskih sklopova [3]. Klasifikacija senzora se ne može izvršiti prema jednom kriterijumu. Mogu da se razlikuju u odnosu na vrstu izlaznog signala, način rada, prirodu mjerene veličine, pouzdanost i preciznost, izvedbu i strukturu, te uslove u kojima mogu da rade [4].

Primjena modernih tehnologija u cilju unaprjeđenja i poboljšanja života i rada, uslovlja je integraciju senzora u sisteme u različitim oblastima. Stoga su senzori, u okviru senzorskih čvorova i senzorskih mreža, našli primjenu u poljoprivredi, industriji, kućnoj automatizaciji, nadzoru i zaštiti

životne sredine, vojsci, te u prenosivim elektronskim uređajima [5]-[11]. Bez obzira na oblast primjene, vrlo često senzorski čvorovi rade sa ograničenim izvorima energije te je od velikog značaja obezbijediti njihovu energetska efikasnost. Prije svega neophodno je optimizovati potrošnju senzora, ali istovremeno obezbijediti nesmetan i pouzdan rad senzorskog čvora u cjelini.

Senzorski čvorovi su uglavnom postavljeni na nepristupačnim lokacijama, bez dostupne infrastrukture za napajanje (distributivna mreža). Tradicionalni izvor napajanja u ovakvim slučajevima jesu akumulatorske baterije [12]. Akumulatorske, kao i nepunjive baterije imaju ograničen kapacitet, a u ovakvim primjenama zamjena ili punjenje baterije često nisu izvodljivi ili se ne isplate. Stoga je vrlo bitno izvršiti prilagođenje strukture i načina funkcionisanja čvora u cilju optimizacije potrošnje i produženja radnog vijeka baterije [13]. Pored toga, na radni vijek utiče i degradacija materijala od kog je baterija napravljena [14], te je vrlo važno predvidjeti uslove rada u kojima se potrošnja može značajno smanjiti.

U radu će biti razmotrena primjena PG (eng. *power gating*) tehnike u svrhu optimizacije potrošnje senzora u senzorskim čvorovima, a cilj je postaviti kriterijume za izbor prekidača pri njenoj primjeni. U drugom odjeljku izvršena je analiza potrošnje senzora u različitim režimima rada. Treći odjeljak daje pregled principa primjene PG tehnike u optimizaciji potrošnje. Kriterijumi za izbor prekidača koji se primjenjuju u PG tehnici predstavljeni su u četvrtom odjeljku, dok peti odjeljak opisuje različite tipove poluprovodničkih prekidača i razmatra mogućnost njihove primjene.

II. ANALIZA POTROŠNJE SENZORA U SENZORSKIM ČVOROVIMA

Kao što je navedeno u uvodnom dijelu, senzori imaju ključnu ulogu u različitim primjenama Interneta stvari, prije svega u okviru bežičnih senzorskih mreža kao sastavni dijelovi senzorskih čvorova. Senzorski čvorovi se u opštem slučaju sastoje od više gradivnih jedinica, a to su: jedinica za upravljanje i obradu podataka (mikrokontroler), jedinica za komunikaciju, jedinica za mjerenje i prikupljanje podataka (senzor). Iako se češće razmatra potrošnja ostalih gradivnih jedinica u senzorskim čvorovima (jedinica za upravljanje i

obradu podataka i komunikacijska jedinica), potrošnja senzora se ne smije zanemariti. Najprije zavisi od učestanosti uzorkovanja mjerene veličine i faktora ispune rada senzora [15], ali značajan uticaj na potrošnju ima i način na koji ugrađeni softver (upravljačka jedinica čvora) upravlja hardverom uključujući i sam senzor [16].

Iako se klasifikacija senzora može izvršiti na osnovu više različitih kriterijuma, sa stanovišta potrošnje izdvaja se podjela prema učestanosti i načinu uzorkovanja mjerene veličine. Postoje senzori koji kontinuirano mjere zadatu veličinu, te senzori koji mjere zadatu veličinu u konkretnim vremenskim trenucima po zahtjevu upravljačke jedinice. Senzori iz prve grupe zahtijevaju više energije budući da su uvijek u aktivnom režimu rada, kada je potrošnja dosta veća u odnosu na neaktivni režim. Iako senzori koji mjere po zahtjevu uglavnom rade u neaktivnom režimu i imaju manju potrošnju energije, ne smije se zanemariti ni njihova potrošnja, kao i potrošnja koja se javlja tokom prelaska iz aktivnog u neaktivno stanje i obrnuto [15].

S obzirom da radni vijek baterije u senzorskim čvorovima predstavlja ključno ograničenje, prilikom projektovanja čvora neophodno je predvidjeti modele potrošnje energije senzora kako bi se ona mogla adekvatno smanjiti [17]. Prediktivni modeli predstavljeni u [18] i [19] ukazuju na to da prikupljanje informacija iz okoline putem senzora obuhvata procese uzorkovanja i konverzije signala, te slanja izmjerenih podataka. Izvršavanje navedenih procesa zahtijeva različite količine energije koje se ne smiju zanemariti. Potrošnja energije senzora u aktivnom režimu rada (E_{on}) predstavljena je jednačinom (1):

$$E_{on}=E_s+E_w=V_{sup}I_sT_s+V_{sup}I_wT_w \quad (1)$$

gdje su E_s – potrošnja energije tokom procesa mjerenja, E_w – potrošnja energije tokom procesa slanja podataka, V_{sup} – napon napajanja, I_s – struja neophodna za proces mjerenja (uzorkovanje i konverzija signala), I_w – struja neophodna za slanja podataka, te T_s i T_w vremena mjerenja i slanja podataka respektivno.

Pored potrošnje u aktivnom režimu rada senzora, veliki uticaj na ukupnu potrošnju energije imaju i struje praznog hoda tokom neaktivnog režima rada [20]. Stoga, ukupna potrošnja senzora (E) data jednačinom (2) obuhvata i potrošnju energije u neaktivnom stanju (E_{off}) koja može biti kritičan faktor, naročito u slučajevima primjene senzora za mjerenje sporo promjenljivih veličina koji najveći dio vremena provode u neaktivnom stanju (faktor ispune rade senzora je vrlo mali).

$$E=E_{on}+E_{off} \quad (2)$$

Uz adekvatno predviđanje potrošnje energije senzora, moguće je već prilikom projektovanja senzorskog čvora preduzeti korake u cilju optimizacije potrošnje. Budući da

potrošnja u aktivnim režimima rada u velikoj mjeri zavisi od karakteristika senzora na koje se ne može uticati, fokus u procesu optimizacije potrošnje bi trebalo da bude smanjivanje potrošnje u neaktivnom stanju.

III. OPTIMIZACIJA POTROŠNJE SENZORA PRIMJENOM PG TEHNIKE

U praksi se najčešće koriste bežične senzorske mreže sastavljene od većeg broja senzorskih čvorova, sa baterijskim napajanjem. Zbog specifičnih uslova instalacije i rada, potrebno je obezbijediti dovoljno dug radni vijek cijele mreže uslovljen radnim vijekom napajanja [21]. Optimizacija potrošnje mreže u cjelini postiže se adekvatnim projektovanjem pojedinačnih čvorova i primjenom različitih metoda za produženje radnog vijeka napajanja. Posljednjih godina, u literaturi je predstavljeno više metoda koje se primjenjuju u cilju produženja radnog vijeka senzorskih čvorova. Neke od njih su statičke, dok su neke dinamičke i prilagođavaju se i mijenjaju tokom rada čvora.

Prvi pristup čine metode podešavanja funkcionisanja mikrokontrolera (kao upravljačke i procesne cjeline), ali i čvora u cjelini, u različitim režimima rada [22]-[24]. Date metode zasnovane su na činjenici da rad u neaktivnom režimu (*eng. sleep mode*) troši znatno manje količine energije. Ove metode nisu uvijek primjenljive (npr. kada je potrebno kontinuirano mjerenje). Međutim, vrlo česte su primjene senzorskih čvorova kada je učestanost mjerenja i skladištenja podataka (aktivan rad) vrlo mala, odnosno mjerenje se vrši poslije dugih intervala mirovanja. Ove metode mogu da smanje potrošnju senzorskog čvora, ali ne rješavaju problem koji je istaknut u drugom odjeljku, odnosno potrošnju samih senzora u neaktivnom stanju. Iako senzor ne obavlja funkcije čitanja i slanja podataka, on i u neaktivnom stanju troši energiju koja se ne smije zanemariti, budući da je i dalje spojen na napajanje.

Drugi pristup produženju radnog vijeka senzorskih čvorova je baziran na omogućavanju punjenja akumulatorskih baterija koje napajaju čvorove, a energija za punjenje se prikuplja iz okoline [25], [26]. Primjenom pomenutog pristupa se prevazilazi ograničenje radnog vijeka senzorskog čvora koji je uslovljen kapacitetom akumulatorske baterije. Međutim, ovakav pristup zahtijeva upotrebu dodatnih elektronskih kola koja će na adekvatan način prikupljenu energiju (solarnu, termalnu, radijacijsku) pretvoriti u električnu. Data kola usložnjavaju proces projektovanja senzorskih čvorova i povećavaju cijenu uređaja čime se dovodi u pitanje isplativost pristupa.

Treći značajan pristup u optimizaciji potrošnje jeste primjena PG tehnike [27], [28], koja omogućava odspajanje neaktivnih komponenti od napajanja. Kao što je ranije navedeno, na senzore otpada veliki udio ukupne potrošene energije tokom neaktivnog stanja usljed struja praznog hoda te se pomenuta tehnika nameće kao pogodno rješenje pri optimizaciji potrošnje senzorskih čvorova. PG tehnika se svodi na ugradnju i upravljanje elektronskim prekidačima koji senzore odspajaju od napajanja kada nisu aktivni [29].

Realizacija PG kola nije jednostavna, jer se pri projektovanju mora razmotriti uticaj kola na druge dijelove uređaja, potrošnja prekidača, te karakteristike prelaznih procesa

[30]. Ova kola treba da imaju što manji pad napona na prekidaču i obezbijede pravovremeno spajanje/odspajanje na/od napajanja. Osnovu kola čine visokoperformansi prekidači najčešće zasnovani na PMOS i NMOS tranzistorima [31]. U skladu sa tim, izbor prekidača tokom projektovanja kola predstavlja ključan segment u primjeni PG tehnike za optimizaciju potrošnje senzora u senzorskim čvorovima. Njena primjena nosi i određenu cijenu te je neophodno razmotriti zahtjeve i uspostaviti kriterijume za izbor prekidača.

IV. KRITERIJUMI ZA IZBOR PREKIDAČA

Odspajanje senzora od napajanja tokom neaktivnog režima rada primjenom PG tehnike ima za cilj optimizaciju potrošnje senzorskog čvora. PG je tehnika koja ima široku primjenu u digitalnim sklopovima u kojima je neophodno smanjenje potrošnje energije. Smanjenje se postiže odspajanjem od napajanja neaktivnih dijelova sistema, čime se smanjuje potrošnja energije u stanju mirovanja. Cilj primjene je postizanje energetske efikasnosti bez narušavanja performansi sistema [32]. Pored senzora, moguće je odspajati i druge jedinice u senzorskom čvoru. Međutim, cilj ovog rada je prikaz izbora prekidača pri optimizaciji potrošnje senzora u senzorskom čvoru.

Kako se PG tehnika svodi na upravljanje odgovarajućim prekidačem, koji je potrebno integrisati u čvor, u nastavku će biti razmotreni kriterijumi za adekvatan izbor prekidača.

Uslov isplativosti primjene PG tehnike pri optimizaciji potrošnje je da ukupni gubici energije koje prekidač unosi ne smiju nadmašiti uštedu. Ranije je zaključeno da je potrošnja energije najveća u aktivnom režimu rada senzora. Prilikom primjene PG tehnike se ta potrošnja dodatno povećava usljed gubitaka na prekidaču kada je uključen. Gubici na uključenom prekidaču zavise od unutrašnje otpornosti prekidača, koja treba da bude što manja. Međutim, ovakav pristup pri optimizaciji potrošnje ima za cilj smanjenje gubitaka u neaktivnom režimu rada, te se ne smiju zanemariti ni gubici na prekidaču kad je isključen, a koji su uslovljeni strujama praznog hoda prekidača i odgovarajućih upravljačkih i zaštitnih kola [29]. Takođe, značajnu ulogu igraju i dinamičke karakteristike prekidača, odnosno energija koju prekidač potroši prilikom prelaznih procesa [31]. Prekidač treba biti izabran tako da ima mala vremena uključenja i isključenja, kako bi se izbjegli dodatni gubici. Stoga je, prilikom primjene ove tehnike potrebno predvidjeti vremena tokom kojih će senzor biti uključen/isključen, izvršiti procjenu utroška energije u odnosu na gubitke na prekidaču (u svim režimima rada), te razmotriti odnos uštede i gubitaka.

Pad napona na prekidaču utiče na nivo napona napajanja senzora. Budući da gradivne jedinice senzorskih čvorova, samim tim i senzori, zahtijevaju precizne napone napajanja pad napona na prekidaču treba da bude što manji [32]. Radni naponi većine tipova senzora u senzorskim čvorovima su u opsegu od 3,3 V do 12 V. Stoga je poželjno da maksimalni pad napona na uključenom prekidaču bude do nekoliko stotina

mV, kako naponi napajanja ne bi odstupali od dozvoljenih granica za nesmetan rad senzora.

Kako se komponente koje se isključuju primjenom PG tehnike nalaze u blizini komponenti koje su uvijek spojene na napajanje, potrebno je obezbijediti adekvatno razdvajanje ovih komponenti [30]. Spajanje/odspajanje senzora na/od napajanja ne smije uticati na rad ostalih komponenti i gradivnih jedinica čvora. U tu svrhu pogodno je koristiti prekidač sa ugrađenim zaštitnim funkcijama, poput zaštita od prekostruje, prenapona, inverznih struja i slično.

Senzori su sastavni dijelovi većih sistema (senzorskih čvorova), te je poželjna upotreba prekidača ili prekidačkih modula koji se lako integrišu u kompleksne sisteme. Takođe, upravljanje pomenutim prekidačima ne treba da usložnjava rad čvora. Stoga je pogodna upotreba prekidača koji se mogu upravljati direktno putem izlaznih pinova mikrokontrolera (kao upravljačke jedinice čvora).

Na osnovu navedenih zahtjeva, moguće je postaviti kriterijume koje bi trebalo da zadovolje prekidači pri primjeni PG tehnike za optimizaciju potrošnje senzora u senzorskim čvorovima. Pregled osnovnih kriterijuma dat je u Tabeli I.

TABELA I. PREGLED OSNOVNIH KRITERIJUMA ZA IZBOR PREKIDAČA

Karakteristika	Zahtjev	Obrazloženje
Gubici/potrošnja prekidača u isključenom stanju	Mala struja praznog hoda.	Ukoliko gubici prevazilaze uštedu, nema smisla vršiti optimizaciju na ovaj način.
Gubici/potrošnja prekidača u uključenom stanju	Mala unutrašnja otpornost.	
Dinamičke karakteristike prekidača	Što manja vremena prekidanja (prelaska iz stanja „uključen“ u stanje „isključen“ i obrnuto).	Veća vremena prekidanja unose veće gubitke.
Pad napona na prekidaču	Mali pad napona na prekidaču.	Pad napona na prekidaču smanjuje vrijednost napona napajanja senzora koji mora biti u okviru dozvoljenih granica i povećava gubitke u odgovarajućem stanju senzora.
Zaštitne funkcije	Ugrađene zaštitne funkcije (od prekostruje, prenapona i sl.).	Ugrađene zaštitne funkcije štite senzor i sprječavaju uticaj na ostale dijelove čvora.
Mogućnost upravljanja prekidačem i integracije u čvor	Jednostavna integracija prekidača u kompleksije sisteme. Mogućnost direktnog upravljanja prekidačem sa mikrokontrolera.	Ugrađivanje prekidača i prekidačkih modula u postojeće senzorske čvorove, te direktno upravljanje ne treba da utiču na funkcionalnost čvora u cjelini.

U narednom odjeljku biće dat pregled i opis različitih tipova prekidača zasnovanih na poluprovodničkoj tehnologiji,

te razmotrena mogućnost njihove primjene u optimizaciji potrošnje senzora u skladu sa datim kriterijumima.

V. PREGLED RAZLIČITIH TIPOVA PREKIDAČA I MOGUĆNOST NJIHOVE PRIMJENE

U ovom odjeljku biće razmotreno nekoliko tipova poluprovodničkih prekidača uključujući diskretne PMOS/NMOS tranzistore, *sleep* tranzistor, poluprovodnički relej, transmisioni gejt i *load switch*.

Većina elektronskih prekidača zasnovana je upravo na tranzistorima, kao osnovnim elementom integrisanih kola. Klasični PMOS/NMOS tranzistori se mogu samostalno koristiti kao prekidači. Imaju tri terminala za povezivanje, od koji je jedan upravljački i koristi se za uključenje/isključenje tranzistora [33]. Diskretni tranzistorski prekidači dostupni na tržištu pogodni su za upotrebu u PG tehnici budući da imaju vrlo male vrijednosti struja praznog hoda, unutrašnje otpornosti i mali pad napona kada je prekidač uključen, te dobre dinamičke karakteristike. Ipak, njihova primjena zahtijeva dodavanje upravljačkih i zaštitnih sklopova za ostvarenje svih funkcija što može povećati cijenu i kompleksnost projektovanja PG kola.

Sleep tranzistor je specijalna varijanta PMOS ili NMOS tranzistora čija je osnovna funkcija razdvajanje komponenti unutar konkretnog elektronskog kola od napajanja u periodima neaktivnog stanja. Najčešće se sastoji od mreža paralelno vezanih tranzistora sa ugrađenim zaštitnim sklopovima, koji mogu istovremeno da spajaju/odspajaju veći broj komponenti od napajanja [34]. *Sleep* tranzistori imaju izrazito dobre karakteristike, prema ranije postavljenim kriterijumima, zbog čega su najčešće korišćeni prekidači u PG tehnici. Naročito je pogodna njihova primjena u čvorovima u kojima je potrebno odspajati veći broj komponenti od napajanja.

Poluprovodnički releji su snažni prekidači sa ugrađenim upravljačkim kolima koji se koriste umjesto elektromehaničkih releja za uključenje/isključenje dijelova električnih kola [35]. Jednostavni su za upravljanje i imaju široku primjenu u različitim tipovima elektronskih uređaja (manje i veće kompleksnosti) [36]. Budući da su prvenstveno namijenjeni za primjene na većim naponima, njihova primjena u optimizaciji potrošnje senzora u senzorskim čvorovima ne predstavlja pogodno rješenje.

Transmisioni gejt je veoma kvalitetan bidirekcionni prekidač načinjen od paralelno vezanih PMOS i NMOS tranzistora. [37]. Transmisioni gejtovi su uglavnom namijenjeni za realizaciju logičkih funkcija, te stoga rade sa malim naponima (3,3–5 V) i strujama i ne mogu naći univerzalnu primjenu u PG tehnici (senzori u senzorskim čvorovima vrlo često rade na većim naponima napajanja i sa strujama većim od onih koje transmisioni gejt podnosi) [38].

Load switch je integrisani elektronski prekidač zasnovan na FET tranzistoru, a ima ulogu da opterećenje spoji ili odspoji

od napajanja [39]. FET tranzistori na kojima su zasnovani imaju vrlo dobre električne i dinamičke karakteristike, uključujući malu unutrašnju otpornost, male vrijednosti struja praznog hoda, te mala vremena uključanja i isključanja prekidača, što *load switch* čini vrlo dobrim kandidatom za primjenu u PG tehnici. Takođe, pogodnost čine i sklopovi za zaštitu od struja kratkog spoja, inverzne struje i prenapona, te sklopovi za pražnjenje viška naelektrisanje dodati u *load switch* [40]–[42].

Izbor prekidača u konkretnom slučaju zavisi od specifičnih zahtjeva primjene senzora, vodeći računa o kompleksnosti, isplativosti i cijeni. Na osnovu kriterijuma predstavljenih u prethodnom odjeljku, te opisa predstavljenih prekidača kao najbolje rješenje ističu se *sleep* tranzistor i *load switch* integrisani prekidač. Odlikuju se dobrim dinamičkim karakteristikama (vremena uključanja/isključanja prekidača reda μ s), malim gubicima (unutrašnja otpornost reda $m\Omega$, struje praznog hoda reda nekoliko stotina nA do nekoliko μ A), jednostavni su za integraciju u složenije sisteme, te imaju ugrađene dodatne upravljačke i zaštitne sklopove.

VI. ZAKLJUČAK

Primjena senzora i senzorskih čvorova u različitim oblastima donijela je mnoge prednosti i unaprjeđenja. Ograničenje u radu predstavlja radni vijek baterijskog napajanja, te je vrlo važno primijeniti različite metode optimizacije potrošnje energije. Veliki udio potrošnje u senzorskim čvorovima čini potrošnja energije senzora u neaktivnom stanju. Kao vrlo efikasna metoda ističe se PG tehnika koja se zasniva na odspajanju neaktivnih komponenti od napajanja korišćenjem elektronskih prekidača.

Kako prekidači predstavljaju ključan segment primjene PG tehnike za odspajanje senzora od napajanja, potrebno je postaviti kriterijume za njihov adekvatan izbor. Osnovni zahtjev prilikom primjene PG tehnike je da gubici na prekidaču ne smiju nadmašiti uštedu. Kriterijumi prilikom izbora su mala unutrašnja otpornost prekidača, male vrijednosti struja praznog hoda, što manja vremena uključanja/isključanja, mali pad napona na prekidaču, ugrađene zaštitne funkcije i jednostavna integracija i upravljanje prekidačem.

U radu je analizirano nekoliko tipova prekidača i njihovih karakteristika u skladu sa postavljenim kriterijumima. Kao najbolje rješenje istakli su se *sleep* tranzistor i *load switch*. Oba tipa prekidača imaju dobre dinamičke karakteristike, malu unutrašnju otpornost, male struje praznog hoda, jednostavni su za integraciju u složenije sisteme, te imaju ugrađene dodatne upravljačke i zaštitne sklopove. U budućem radu, biće izvršena eksperimentalna provjera izvedenih zaključaka na primjeru konkretnih senzorskih čvorova.

Autor se zahvaljuje prof. dr. Milomiru Šoji na pomoći i sugestijama prilikom pisanja rada.

LITERATURA

- [1] B.B. Guptha, M. Quamara, „An overview of Internet of Things (IoT): Architectural aspects, challenges, and protocols“, Concurrency and Computation: Practice and Experience, Vol. 32, Issue 21, Wiley, Septembar 2018.
- [2] J. Salazar and S. Silvestre, „Internet of Things“, European Virtual Learning Platform for Electrical and Information Engineering, 2017. ISBN 978-80-01-06232-6.
- [3] AnalogDevices: Sensor, [Online] Dostupno na: <https://www.analog.com/en/resources/glossary/sensor.html>, Pristupljeno: 15. decembar 2024.
- [4] M. Popović, „Senzori i mjerenja“, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva Srpsko Sarajevo, Srpsko Sarajevo, 2004.
- [5] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trinchero, M. Fossa, „Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review“, Sensors 2024, Vol. 24, Issue 8, 2024, <https://doi.org/10.3390/s24082647>.
- [6] Y. Jiang, S. Yin, J. Dong and O. Kaynak, „A Review on Soft Sensors for Monitoring, Control, and Optimization of Industrial Processes“, IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 11, pp. 12868-12881, Jun 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3033153.
- [7] S. Pirbhulal, H. Zhang, M.E. E Alahi, H. Ghayvat, S.C. Mukhopadhyay, Y.T. Zhang, W. Wu, „A Novel Secure IoT-Based Smart Home Automation System Using a Wireless Sensor Network“, Sensors 2017, Vol. 17, Issue 1, Decembar 2016, <https://doi.org/10.3390/s17010069>.
- [8] T. Begović, Z. Mandić, N. Kukrić, D. Jokić, S. Lubura, „Razvoj senzorskog čvora za praćenje vodostaja rijeka“, LXVIII Konferencija ETRAN, Niš, 3 - 6. Jun 2024.
- [9] G. Mois, S. Folea, T. Sanislav, „Analysis of Three IoT-Based Wireless Sensors for Environmental Monitoring“, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 8, pp. 2056-2064, Avgust 2017, doi: 10.1109/TIM.2017.2677619.
- [10] M. P. Đurišić, Z. Tafa, G. Dimić, V. Milutinović, „A survey of military applications of wireless sensor networks“, 2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Bar, Crna Gora, 2012, pp. 196-199.
- [11] Y.G. Park, S. Lee, J.U. Park, „Recent Progress in Wireless Sensors for Wearable Electronics“, Sensors 2019, Vol. 19, Issue 20, Oktobar 2019, <https://doi.org/10.3390/s19204353>.
- [12] A. Dewan, S. U. Ay, M. N. Karim, H. Beyenal, „Alternative power sources for remote sensors: A review“, Journal of Power Sources, Vol. 245, 2014, pp. 129-143, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.081>.
- [13] G. Nikolic, M. Stojcev, Z. Stamenkovic, G. Panic, „Wireless Sensor Node with Low-Power Sensing“, FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics, Vol. 27(3), pp. 435 – 453, Septembar 2014.
- [14] X. Hu, L. Xu, X. Lin, M. Pecht, „Battery Lifetime Prognostics“, Joule, Vol. 4, Issue 2, 2020, pp. 310-346, ISSN 2542-4351, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.11.018>.
- [15] J. T. Ogbiti, H. C. Ukwuoma, S. Danjuma, M. Ibrahim, „Energy Consumption in Wireless Sensor Network“, Computer Engineering and Intelligent Systems, Vol. 7, No. 8, IISTE, 2016.
- [16] L. Barboni, M. Valle, „Experimental Analysis of Wireless Sensor Nodes Current Consumption“, 2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008), Cap Esterel, Francuska, 2008, pp. 401-406, doi: 10.1109/SENSORCOMM.2008.14.
- [17] O. Landsiedel, K. Wehrle, S. Gotz, „Accurate prediction of power consumption in sensor networks“, The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, 2005. EmNetS-II., Sidnej, NSW, Australija, 2005, pp. 37-44, doi: 10.1109/EMNETS.2005.1469097.
- [18] M. N. Halgamuge, M. Zukerman, K. Ramamohanarao, H. L. Vu, „An Estimation of Sensor Energy Consumption“, Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 12, pp. 259–295, 2009.
- [19] H-Y. Zhou, D-Y. Luo, Y. Gao, D-C. Zuo, „Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks“, Wireless Sensor Network, Vol 23, pp. 18-23, 2011.
- [20] E. Popovici, M. Magno, S. Marinkovic, „Power Management Techniques for Wireless Sensor Networks: A Review“, 5th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces IWASI, IEEE, 2013.
- [21] O. Brini, D. Deslandes, F. Nabki, „A Model-Based Approach for the Design of Ultra-Low Power Wireless Sensor Nodes“, 2018 16th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), IEEE, 2018.
- [22] J. Yiu, „Low Power and System Control Features.“ In the Definitive Guide to Arm® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors, Newnes, pp. 289 – 326, 2014.
- [23] H. Wu, C. Chen, K. Weng, „An Energy-Efficient Strategy for Microcontrollers“, Applied Science, Vol. 11, Issue 6, MDPI, March 2021.
- [24] S. You, J. K. Eshraghian, H. C. Iu, K. Cho, „Low-Power Wireless Sensor Network Using Fine-Grain Control of Sensor Module Power Mode“, Sensors, Vol. 21, Issue 9, MDPI, May 2021.
- [25] T. Sanislav, G. D. Mois, S. Zeadally, S. C. Folea, „Energy Harvesting Techniques for Internet of Things (IoT)“, IEEE Access, Vol. 9, pp. 39530-39549, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3064066.
- [26] Z. J. Chew, T. Ruan, M. Zhu, „Power Management Circuit for Wireless Sensor Nodes Powered by Energy Harvesting: On the Synergy of Harvester and Load“, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, Issue 9, IEEE, 2019.
- [27] M. Pinzi, A. Pozzebon, „Low-cost power gating solution to increase energy efficiency optimizing duty cycling in wireless sensor nodes with power-hungry sensors“, IET Wireless Sensor Systems, Vol. 9, Issue 1, IET, pp. 25 – 31, 2018.
- [28] G. Panic, Z. Stamenkovic, R. Kraemer, „Power Gating in Wireless Sensor Networks“, 2008 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing, IEEE, pp. 499 – 503, 2008.
- [29] S. Henzler, „Power Management of Digital Circuits in Deep Sub-Micron CMOS Technologies“, 1st Edition, Springer, Januar 2007.
- [30] Y. Shin, J. Seomun, K-M. Choi, T. Sakurai, „Power gating: Circuits, design methodologies, and best practice for standard-cell VLSI designs“, ACM Trans. Des. Autom. Electron. Syst. 15, 4, Article 28 (Septembar 2010), <https://doi.org/10.1145/1835420.1835421>.
- [31] Hailin Jiang, M. Marek-Sadowska and S. R. Nassif, „Benefits and costs of power-gating technique“, 2005 International Conference on Computer Design, San Jose, CA, USA, 2005, pp. 559-566, doi: 10.1109/ICCD.2005.34.
- [32] A. Prasad, P. Chawda, „Power management factors and techniques for IoT design devices“, 2018 19th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED), Santa Clara, CA, USA, 2018, pp. 364-369, doi: 10.1109/ISQED.2018.8357314.
- [33] X. Chen, N. A. Touba, „CHAPTER 2 - Fundamentals of CMOS design“, Electronic Design Automation, Morgan Kaufmann, 2009, pp. 39-95, ISBN 9780123743640, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374364-0.50009-6>.
- [34] K. Shi, D. Howard, „Sleep Transistor Design and Implementation - Simple Concepts Yet Challenges To Be Optimum“, 2006 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test, Hsinchu, Tajvan, 2006, pp. 1-4, doi: 10.1109/VDAT.2006.258121.
- [35] OMRON, „Technical Explanation for Solid-state Relays“, [Online] Dostupno na: https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/18/ssr_tg_e_9_2.pdf, Pristupljeno: 10. januar 2025.
- [36] Galco, „Introduction to Solid-State Relays“, [Online] Dostupno na: https://pim.galco.com/Manufacturer/Carlo%20Gavazzi/TechDocument/Introduction%20to%20Solid%20State%20Relays/introduction_to_solid_state_relays_crdmh2.pdf, Pristupljeno: 10. januar 2025.
- [37] D. M. Harris, S. L. Harris, „1 - From Zero to One“, Digital Design and Computer Architecture (Second Edition), Morgan Kaufmann, 2013, pp. 2-52, ISBN 9780123944245, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394424-5.00001-X>.

- [38] J. B. Burr, W. Li, A. M. Peterson, "VLSI Signal Processing", Control and Dynamic Systems, Academic Press, Vol. 68, 1995, pp. 1-88, ISSN 0090-5267, ISBN 9780120127689, [https://doi.org/10.1016/S0090-5267\(06\)80037-X](https://doi.org/10.1016/S0090-5267(06)80037-X).
- [39] A. Huang, E. Roth, "Basics of Power Switches", Application Report, Texas Instruments, April 2019.
- [40] B. Mak, "Basics of Load Switches", Application Report, Texas Instruments, September 2018.
- [41] NXP, "Load Switch Basics", [Online] Dostupno: https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/NXP_Load_Switch_Basics.pdf, Pristupljeno 11. januar 2025.
- [42] TOSHIBA, "Basics of Load Switch ICs", Application Note, Mart 2021.

ABSTRACT

In recent years, sensor nodes represent a key aspect in the monitoring and management of the environment. They are mostly powered by rechargeable and non-rechargeable batteries with a limited working life, which represents a major limitation in the node's operation. Several different consumption optimization methods are presented in the

literature, but they generally do not include sensor consumption in idle mode, which must not be neglected, so in this paper the principle of the power gating technique application in the optimization of sensor consumption in sensor nodes is considered. The application of this technique is based on disconnecting inactive components from the power supply using electronic switches. Therefore, the goal of the work is to choose the appropriate type of switch based on the set criteria in accordance with the specific requirements of sensor application in sensor nodes.

Selection of Switches When Optimizing Sensor Consumption in Sensor Nodes

Tijana Begović