

## **OPTIMIZACIJA POTROŠNJE IoT UREĐAJA IZGRAĐENIH NA AVR ARHITEKTURI**

Saša Salapura<sup>1</sup>, Nebojša Kuduz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PIM Univerzitet, Fakultet računarskih nauka, despota Stefana Lazarevića bb, 78 000 Banja Luka, Bosna i Hercegovina, sasa.salapura@gmail.com

<sup>2</sup>Mtel AD Banja Luka, Bulevar vojvode Stepe Stepanovića 161, 78 000 Banja Luka, Bosna i Hercegovina

### **SAŽETAK**

Zadnjih godina svjedočimo pojavi sve većeg broja IoT uređaja u gotovo svim sferama života. Od svih IoT uređaja, bez obzira na mobilnost ili način komunikacije, se očekuje da bez problema rade godinama i pored činjenice da uglavnom baterijsko napajanje. Zato je u ovim uređajima ključni izazov energetska efikasnost i smanjivanje potrošnje na najmanju moguću mjeru čime se olakšava održavanje i produžava vijek trajanja IoT uređaja i kompletnog sistema. U ovom radu su predstavljene neke od tehnika smanjivanja potrošnje IoT uređaja zasnovanih na AVR familiji mikrokontrolera. Osim gašenja vanjskih uređaja i senzora, ove tehnike obuhvataju stavljanje mikrokontrolera u sleep-mode rada, isključivanje pojedinih modula i registara, smanjenje radnog napona mikrokontrolera te niže radne frekvencije.

**Ključne riječi:** IoT, AVR, smanjivanje potrošnje, LoRaWAN.

### **UVOD**

Inženjeri koji se bave razvojem IoT uređaja suočeni su sa zahtjevima da IoT uređaji trebaju imati SoC koji košta do \$5 i bateriju koja traje bar 5 godina.

Ulogu računara u IoT uređajima uspješno preuzimaju mikrokontroleri – nema potrebe za računarima jer je potrebno samo prepoznati neki događaj i/ili izmjeriti neku vrijednost te poslati informaciju o tome u mrežu gdje će na aplikativnom serveru biti urađena analiza primljenih podataka i odlučivanje o narednim akcijama po definisanom dijagramu toka.

Veoma uspješnim su se pokazali uređaji zasnovani na Arduino platformi koji za prenos podataka koriste LoRaWAN mrežu (LoRa Alliance, 2021).

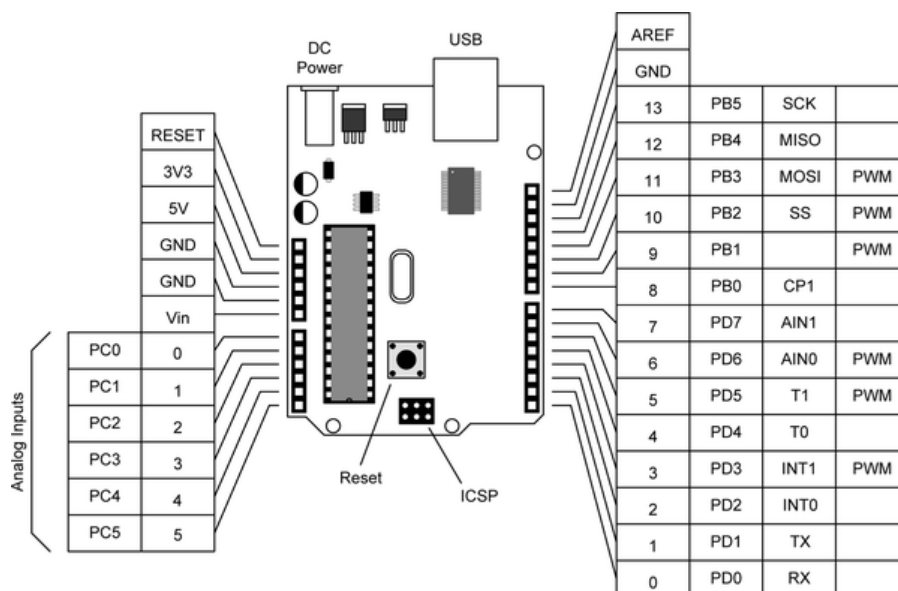
Arduino (otvorena elektronska platforma koja se zasniva na jednostavnom korišćenju hardvera i softverara) platforma se pokazala kao jeftina, veoma dostupna i rasprostranjena te predstavlja odličan izbor za razvoj IoT uređaja. U ovom poglavlju biće opisane najosnovnije osobine Arduino razvojnih ploča.

LoRaWAN mreža se pokazala kao jeftina zamjena drugim mobilnim mrežama pri čemu nije narušen domet. Pri razvoju bilo kog IoT uređaja treba voditi računa o potrošnji električne energije te načinu upravljanja potrošnjom. Bez obzira na namjenu ili način napajanja, od uređaja se očekuje višegodišnji rad. U ovom poglavlju biće opisana tri tipa uređaja u LoRaWAN mreži. To su: CLASS A, CLASS B i CLASS C. Svaki uređaj mora da zadovolji LoRaWAN specifikaciju i da bude realizovan kao jedan od ova tri tipa uređaja pri čemu svi uređaji moraju podržavati tip CLASS A.

### **Arduino**

Za početni nivo Arduino nudi više različitih razvojnih ploča. Zajedničko im je da mikrokontroleri pripadaju familiji AVR. Osim mikrokontrolera, na razvojnoj ploči se nalaze elementi koji uveliko olakšavaju rad sa pločom: priključak za vanjsko napajanje, USB priključak, reset dugme, pinovi koji mogu generisati ili pročitati digitalne ili analogne vrijednosti, pinovi za serijsku komunikaciju (RX/TX), zajednički pinovi koji sadrže vrijednosti napona napajanja i uzemljenja. Sve na ploči je označeno i lako dostupno, upravo iz razloga što se radi o razvojnoj ploči.

A to je i najveći razlog zašto bi uređaj izgrađen na ovoj razvojnoj ploči bio veliki potrošač. Na razvojnoj ploči se osim mikrokontrolera nalaze i komponente za prilagođavanje USB porta na serijsku komunikaciju, naponski regulatori te nekoliko LED dioda. Svi ovi dodatni elementi utiču na značajno veću potrošnju nego što je potrebno.



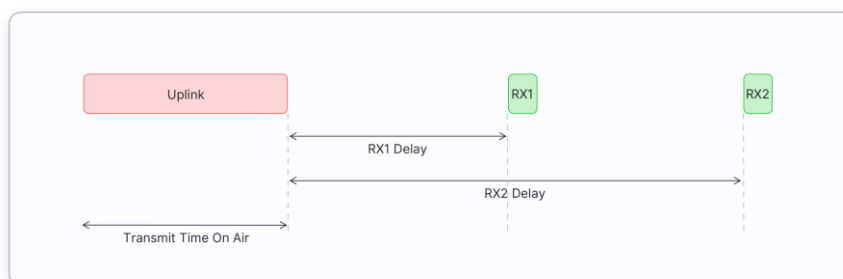
Slika 1. Arduino Uno razvojna ploča (Arduino, 2021).

Figure 1. Arduino Uno board (Arduino, 2021).

U radu će biti prikazano da se uklanjanjem ili zamjenom pojedinih komponenti mogu ostvariti značajna poboljšanja u smislu smanjenja potrošnje električne energije. Takođe će biti pokazano da se najveće uštede postižu kombinacijom hardverskih i softverskih izmjena.

### Klase LoraWAN uređaja

Uređaji klase A podržavaju komunikaciju između uređaja i bazne stanice u oba smjera: poruke od uređaja (najčešće senzora) prema baznoj stanici nazivaju se *uplink* poruke, dok se poruke od bazne stanice nazivaju *downlink* porukama. Bazne stanice prihvataju poruke sa uređaja i proslijeđuju ih na mrežne i aplikativne servere koji opet mogu imati poruku koju bazne stanice trebaju uputiti uređajima. Poruku uređaj može poslati u bilo kom trenutku, pa će neko vrijeme ostaviti ‘otvoren prozor’ za prijem poruke za bazne stanice – možda postoji potreba da se potvrdi prijem poslanih podataka sa uređaja ili da se uređaju pošalje komanda za promjenom nekog parametra rada. Klasa A omogućava 2 vremenska prozora nakon svakog slanja poruka sa uređaja.



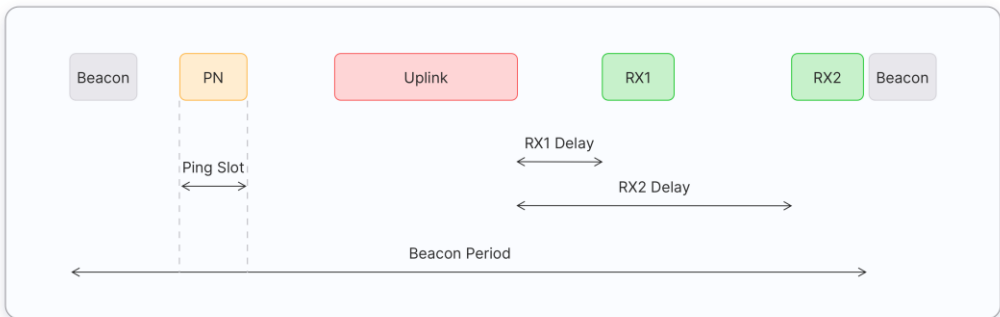
Slika 2. Class A slanje i prijem poruka (The Things Network, 2021).

Figure 1. Class A Receive Window Diagram (The Things Network, 2021).

Server svoju poruku može poslati u prvom ili drugom vremenskom prozoru: ako odgovori u prvom prozoru, drugi prozor se neće ni otvoriti. Ako server nije poslao svoju poruku, sljedeća prilika je prilikom narednog javljanja uređaja. Nakon isteka vremena odvojenog za prijem poruka uređaji odlaze u tzv. ‘sleep mode’, tj. u način rada sa minimalnom potrošnjom.

Uređaji klase A se obično napajaju baterijom pa su, u zavisnosti od namjene, periodi javljanja uređaja najčešće 30 ili 60 minuta, što znači da je potrošnja baterije par sekundi svakih 30 ili 60 minuta. Uređaji klase A imaju najmanju potrošnju (najviše vremena su u režimu spavanja), a relativno dugi intervali između dva uzastopna javljanja uređaja dovode do velikog kašnjenja koji se šalju uređaju (da bi uređaj primio podatak, mora prvo da se probudi radi slanja podataka).

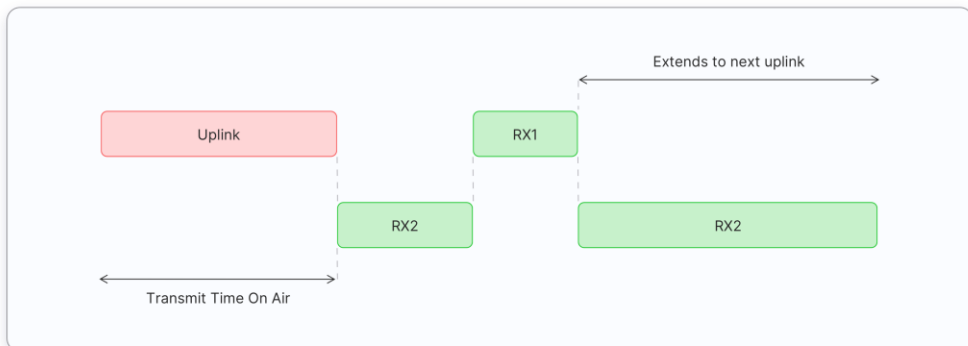
Uređaji klase B rade slično uređajima klase A – razlika je u postojanju dodatnih vremenskih prozora u kojim je moguće uređaju poslati poruku. Ovi prozori će biti otvoreni u tačno i precizno određenim i iniciranim vremenskim intervalima (*beacon period*). Dok je otvoren prozor (*ping slot*), uređaj može primiti poruku koju je poslao server.



Slika 3. Klasa B slanje i prijem poruka (The Things Network, 2021).  
Figure 2. Class B Receive Window Diagram (The Things Network, 2021).

Uređaji klase B imaju nešto veću potrošnju od uređaja klase A (manje vremena provode u režimu spavanja), ali postojanje više vremenskih prozora za prijem poruka smanjuje kašnjenje i čini uređaje dostupnijim.

I uređaji klase C su izvedeni od uređaja klase A na način da je na uređaju stalno otvoren vremenski prozor za prijem poruka: uređaj periodično šalje poruke, a između uzastopnih slanja osluškuje da li ima neka nova poruka za prijem.



Slika 4. Class C devices extend Class A by keeping the receive windows (The Things Network, 2021).  
Figure 3. Class C devices extend Class A by keeping the receive windows (The Things Network, 2021).

Ovo uređaje čini jako dostupnim, kašnjenje je minimalno, ali se uređaji stalno nalaze u režimu pripravnosti zbog čega su veliki potrošači električne energije (nikada nisu u režimu spavanja) te su najčešće priključeni na stalno napajanje.

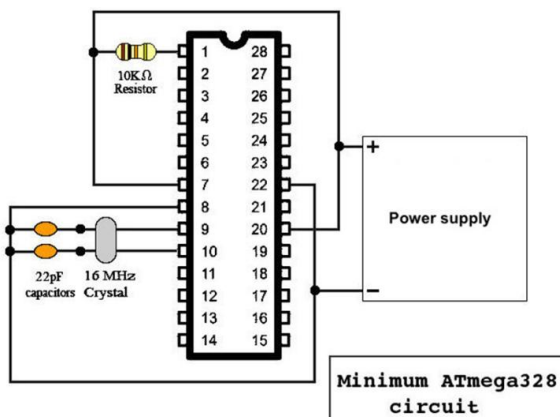
## IZMJENE HARDVERA

Razvoj mikrokontrolera je doveo do novih verzija Arduino razvojnih ploča koje su značajno štedljivije od prethodnih generacija. Tako je Arduino Pro Mini energetski mnogo ekifasniji od Arduino UNO razvojne ploče. Da bi se značajno smanjila potrošnja Arduino UNO, potrebno je: postojeći linearni regulator zamijeniti sa DC-DC pretvaračem, izmjeniti napajanje USB priključka, ukloniti (odlemiti) LED diode na ploči.

Ove izmjene, uz softversko dovođenje mikrokontrolera u stanje mirovanja mogu smanjiti potrošnju u praznom hodu Arduino UNO razvojne ploče na samo 5% od početne vrijednosti.

### Minmalna konfiguracija mikrokontrolera ATmega328

Najveći element na razvojnoj ploči predstavlja mikrokontroler – u slučaju razvojne ploče Arduino Uno (Slika 1) radi se o mikrokontroleru ATmega328 koji može raditi i samostalno, bez razvojne ploče (Slika 5).



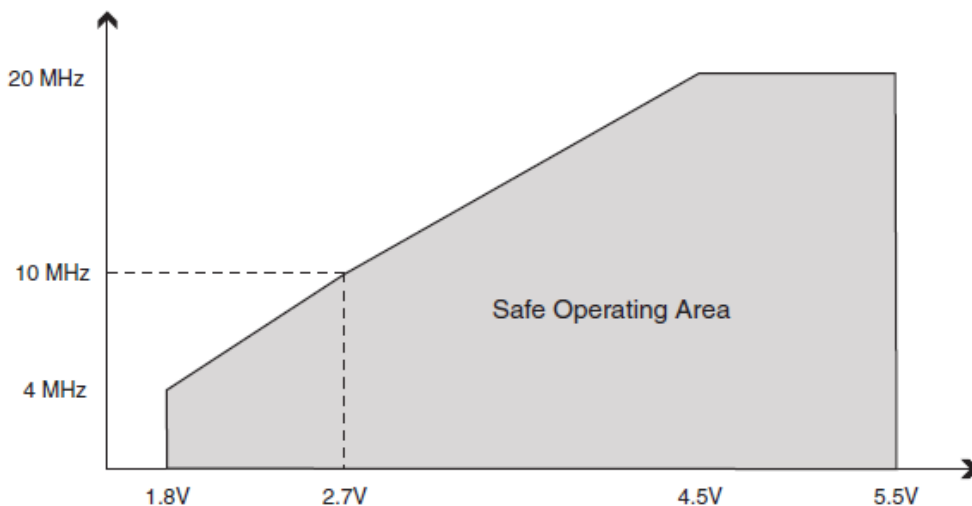
Slika 5. Minimalna konfiguracija sa ATmega 328 (DefProc Engineering, 2021).  
Figure 4. Minimum ATmega328 circuit (DefProc Engineering, 2021).

Razvojna ploča Arduino Uno je veoma praktična za učenje i razvoj novih uređaja. Na jednostavan način se razvojna ploča može priključiti na računar (USB port) čime se ujedno dovodi i napajanje; lako je spojiti razne senzore na odgovarajuće nožice i na taj način testirati rad uređaja sa više senzora istovremeno. Sve navedeno olakšava razvoj ali jako povećava potrošnju uređaja. Zato razvojna ploča nikako nije zgodna za finalni proizvod. Mnogo jednostavnije je koristiti samo mikrokontroler i minimum komponenti koje će mu obezbijediti odgovarajuće napajanje i radnu frekvenciju.

Minimalna konfiguracija neophodna za rad mikrokontrolera ATmega328 prikazana je na Slika 5. Na mikrokontroler je dovedeno napajanje i vanjski kvarc koji određuje radni takt. Sve ostale komponente sa razvojne ploče su nepotrebne u finalnom proizvodu (programiranje mikrokontrolera ATmega328 će se morati uraditi prije ugradnje u finalni proizvod).

### Izmjene radnog napona i frekvencije

Potrošnja električne energije u IoT uređajima može biti još niža smanjenjem vrijednosti napona napajanja te radne frekvencije. U tehničkoj specifikaciji mikrokontrolera ATmega328 naveden je odnos radne frekvencije i napona napajanja, kao što prikazuje Slika 6. Jasno je da napajanje od 5V odgovara radnoj frekvenciji od 16MHz, ali da smanjivanje radnog napona na 3V pri istoj radnoj frekvenciji može dovesti do smanjivanja pouzdanosti. Zato je potrebno voditi računa o odnosu napona i frekvencije koji obezbjeđuje stabilan rad.



Slika 6. Minimalna frekvencija u zavisnosti od napona napajanja (MicroChip, 2020).  
Figure 5. Speed Grades (MicroChip, 2020).

## IZMJENE SOFTVERA

Osim izmjena na hardveru, uštede u potrošnji se mogu ostvariti i na softverskom nivou dovođenjem mikrokontrolera u stanje dubokog sna. Iz ovog stanja mikrokontroler se može probuditi i nastaviti sa radom nakon određenog (zadanog) vremena ili nakon što se registruje vanjska pobuda. Uštede u potrošnji (svega nekoliko mA) ostvaruju se i kada se svi digitalni pinovi konfigurišu kao izlazni, bez obzira da li se koriste ili ne. Najviše uštede se ostvaruju isključivanjem pojedinih modula u mikrokontroleru te postavljanjem mikrokontrolera u režim spavanja. Mikrokontroler ATmega328 razlikuje šest modova rada u mirovanju: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby i Extended Standby. Prema tehničkoj specifikaciji, u slučaju rada na sobnoj temperaturi, kada je napon napajanja 1.8V a radna frekvencija 1MHz, potrošnja u aktivnom modu (redovno stanje mikrokontrolera) je 0.2mA, dok je u power-save modu potrošnja 0.75 $\mu$ A a u power-down modu potrošnja je svega 0.1 $\mu$ A. IoT uređaji koji se mogu sresti u praksi obično imaju veći napon napajanja (3.7V) a instalirani su na otvorenom.

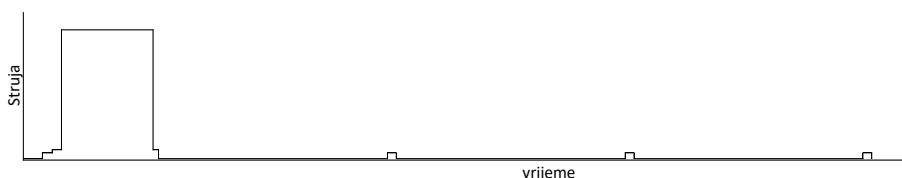
Jedan od većih potrošača unutar mikrokontrolera koji treba isključiti je ADC (analogno-digitalni kontroler). Takođe, isključivanje BOD detekcije (dok je mikrokontroler u režimu spavanja) dovodi do dodatne uštede.

Uobičajeni režim rada IoT uređaja je da se mjerenje (i slanje izmjerenih podataka) obavlja periodično. To znači da je uređaj skoro uvijek u stanju dubokog sna a nakon što istekne određeni vremenski period (npr. 60 minuta) mikrokontroler se budi, obavlja mjerenje, šalje podatke i opet ide u stanje dubokog sna. Nije moguće mikrokontroler uspavati na 60 minuta. Maksimalno vrijeme koje mikrokontroler može provesti u sleep modu je 8 sekundi nakon čega se budi. Zato, da bi uređaj spavao 60 minuta (3600 sekundi), mikrokontroler mora uzastopno 450 puta otići u mod spavanja da bi se konačno probudio i obavio postavljeni zadatak.

Mikrokontroler se iz dubokog sna može probuditi na dva načina: nakon isteka perioda spavanja (postavljanjem watchdog tajmera) ili vanjskom pobudom (interapt).

## RADNI VIJEK BATERIJE

IoT uređaj većinu vremena spava da bi se nakon isteka zadanog vremena probudio, obavio mjerenja i slanja te ponovo ušao u mod spavanja. Iz tog razloga potrošnja struje u vremenu može izgledati kao na slici:



Slika 7. Potrošnja struje u vremenu.  
Figure 6. Current consumption.

Prvi veliki impuls potrošnje dešava se kada je uređaj budan, obavlja mjerenje te šalje podatke. Nakon toga mikrokontroler odlazi u sleep mod. Na slici je moguće uočiti periodično pojavljivanje veoma malih vrijednosti struje. To je buđenje mikrokontrolera svakih 8 sekundi – u slučaju čekanja od 60 minuta to će se desiti 450 puta da bi se uređaj konačno probudio i obavio mjerenja i slanja.

Prosječnu potrošnju struje moguće je izračunati formulom (1)

$$I_{avg} = (t_0 \cdot I_0 + t_1 \cdot I_1 \dots + t_x \cdot I_x) / (t_0 + t_1 \dots + t_x) \quad (1)$$

tj. zbirom svih različitih potrošnji u pojedinačnom vremenskom periodu u odnosu na ukupno vrijeme. Prosječni radni vijek baterije (izražen u satima) se može izračunati formulom (2)

$$\text{radni vijek baterije} = \text{kapacitet baterije [mAh]} / \text{prosječna struja [mA]} \quad (2)$$

## REZULTATI

Sva mjerenja su rađena sa osnovnim Arduino IDE primjerom Blink.ino koji se sastoji od svega nekoliko linija kôda, gdje se ugrađena LED dioda naizmjenično pali i gasi svakih nekoliko sekundi. Arduino UNO ploča napajana je stabilnim mrežnim ispravljačem.

### Arduino UNO

Kao najveći potrošač na Arduino UNO razvojnoj ploči je naponski regulator koji ograničava ulazni napon na utičnici mrežnog ispravljača: ulazni napon se svodi na 5V kojima se napaja regulator pri čemu se gubi skoro 60% vrijednosti. Uklanjanjem ugrađenog regulatora i ugrađivanjem bilo kojeg jeftinog DC-DC pretvarača (imaju efikasnost i do 90%) smanjiće se gubici energije. Uz glavni mikrokontroler ATmega328 na razvojnoj ploči postoji i UART čip za pretvaranje USB u serijsku vezu (ATmega16U2) koji radi nesmanjenom potrošnjom kada je u praznom hodu iako se ne koristi kao pretvarač. Ako postoji USB konekcija, čip će se napajati iz nje, a ako ne postoji napajaće se iz ulaznih 5V. Izmjenom da se UART čip napaja samo iz USB konekcije, tj. samo kada postoji konekcija može se smanjiti potrošnja za skoro 50%. Na razvojnoj ploči postoji LED dioda koja označava da li je ploča uključena ili isključena i koja se može ukloniti čime se smanjuje potrošnja za 10%.

Ukupna ušteda u potrošnji nakon uklanjanja ili zamjene određenih komponenti na Arduino UNO razvojnoj ploči prikazana je u Tabela 1.

Tabela 1. Potrošnja nakon uklanjanja ili zamjene komponenti na Arduino UNO.

Table 1. Changing regulator, UART power and indicator LED on Arduino UNO.

	LED ugašena	LED upaljena
1. Arduino UNO bez izmjena	49mA	53mA
2. bez regulatora, sa DC-DC pretvaračem (80% efikasnosti)	23mA	24mA
3. USB napajanje za UART	25mA	27mA
4. uklonjena LED dioda – indikator uklj/isklj	42mA	44mA
5. Potrošnja 2+3+4	15mA	16mA

### Minimalna konfiguracija ATmega328 i izmjena softvera

Bez ikakvih izmjena testnog programa Blink, mikrokontroler ATmega328 u minimalnoj konfiguraciji troši oko 17-18mA kada je LED diode ugašena te 20mA kada je LED diode uključena. Postavljanjem svih digitalnih pinova da rade kao izlaz potrošnja se smanjuje za dodatnih 4-5mA.

Softverskim izmjenama u samom mikrokontroleru ostvarena je veoma niska potrošnja u deepsleep stanju (oko 5  $\mu$ A, ili čak manje od 1 $\mu$ A kada je softverski isključen watchdog timer), dok je po buđenju potrošnja oko 10-15mA.

Tabela 2. Zahrati koje je potrebno uraditi u aplikaciji.

Table 2. Capture what needs to be done in the application.

	LED ugašena	LED upaljena
1. minimalna konfiguracija ATmega328, 5V, 16MHz	18mA	20mA
2. svi digitalni izlazi konfigurisani kao OUTPUT	13mA	16mA
3. power-down mod rada	0.4mA	16mA
4. power-down mod + isključen ADC	0,06mA	16mA
5. power-down mod + isključen ADC + isključen BOD	0.33 $\mu$ A	16mA

### Izmjene radnog napona i frekvencije

Ako se u minimalnoj konfiguraciji mikrokontrolera smanji radni napon sa 5V na 3V pri radnoj frekvenciji od 16MHz, ostvariće se značajna ušteda u režimu rada (50%) i ušteda od 20% u deepsleep načinu rada što je idealno za upotrebu Li-Ion baterija.

Smanjivanje frekvencije sa 16MHz na 8MHz pri naponu od 5V dovodi do smanjenja potrošnje u radnom režimu od skoro 30%, a pri naponu od 3V ušteda je i veća od 50%.

Tabela 3. Smanjivanje radnog napona i frekvencije.

Table 3. Lower the Votage and Frequency.

Napajanje	Frekvencija	budan	duboki san
1. 5V	16MHz	11.5mA	6.5 $\mu$ A
2. 3V	16MHz	5.5mA	4.5 $\mu$ A
3. 5V	8MHz	8.5mA	7 $\mu$ A
4. 3V	8MHz	4mA	5 $\mu$ A

Ako se koristi Li-Ion baterija, više će odgovarati napajanje od 3V, ali za smanjivanje radne frekvencije potrebno je znati da nema vremenski zahtjevnih dijelova procesa koji se odvija u IoT uređaju pa ako se problem može uraditi sa dvostruko sporijim mikrokontrolerom, onda ima smisla smanjiti radnu frekvenciju. Pri tome treba imati na umu da će mikrokontroleru trebati dva puta više vremena da uradi sve što treba, tj. dva puta duže će raditi i trošiti više od pola struje. Važno je napomenuti i to da mikrokontroleri koriste različite verzije firmware-a za rad na 16 ili 8MHz.

### Izbor baterije

Realan slučaj je da se LoRaWAN uređaj javlja svakih 60 minuta, da mjerenje i slanje podataka traje 3.2 sekunde pri čemu troši 85mA a da u stanju deepsleep troši 5 $\mu$ A. Baterija potrebnog kapaciteta koja će raditi zadani vremenski period se može izabrati na osnovu podataka u Tabeli koji su dobijeni na osnovu formule (2).

Tabela 4. Životni vijek baterije.

Table 4. Battery Life.

slanje svakih 60 minuta  
trajanje slanja: 3.2 sekunde  
potrošnja pri slanju: 85mA  
potrošnja sleep mode: 5µA

1.	Baterija (mAh)	2000	3000	5800
2.	sati	24828	37243	49567
3.	dana	1034	1551	2069
4.	godina	2,8	4,25	8,2

## ZAKLJUČCI

Za izbor odgovarajuće platforme za izradu IoT uređaja, potrebno je unaprijed znati namjenu uređaja, okruženje u kom će raditi te na osnovu toga izvršiti izbor tehnologije za razvoj uređaja. U radu su prikazani različiti načini smanjivanja potrošnje u IoT uređajima, većinom hardverski i softverski zahvati. Prikazani su načini koji podrazumijevaju hardverske zahvate na samoj razvojnoj ploči Arduino UNO, tj. uklanjanje ili zamjenu odgovarajućih komponenti (zamjena postojećeg naponskog regulatora, zamjena načina napajanja USB priključka, uklanjanje LED dioda). Prikazane su neophodne softverske izmjene u aplikaciji da bi se značajno smanjila potrošnja uređaja. Opisan je i 'ekstremni pristup', da se umjesto razvojne ploče može koristiti 'goli' mikrokontroler u minimalnoj konfiguraciji. Najbolji rezultati postignuti su primjenom kombinacije svih predloženih metoda, tj. softverskim izmjenama u minimalnoj konfiguraciji mikrokontrolera.

Pokazano je da je uz primjenu navedenih principa i dalje moguće koristiti Arduino uređaje zasnovane na dobro poznatoj AVR familiji jeftinih mikrokontrolera uz komunikaciju zasnovanu na savremenoj LoRaWAN mreži.

## LITERATURA

- Arduino. (2021). Arduino Uno board. Retrieved May 1, 2021, from <https://www.arduino.cc/>
- LoRa Alliance. (2021). LoRaWAN. Retrieved May 1, 2021, from <https://lora-alliance.org/>
- The Things Network. (2021). LoRaWAN - The Things Fundamentals - Device Classes. Retrieved May 1, 2021, from <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>
- DefProc Engineering. (2021). Guide to reduce the Arduino Power Consumption. Retrieved May 1, 2021, from [www.defproc.co.uk](http://www.defproc.co.uk)
- MicroChip. (2020). megaAVR® Data Sheet ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P. Retrieved May 1, 2021, from 2020 <https://www.microchip.com/>.

## **OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION OF AVR BASED IoT DEVICES**

Saša Salapura<sup>1</sup>, Nebojša Kuduz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PIM University, Faculty of Computer Science, despota Stefana Lazarevića bb, 78 000 Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, sasa.salapura@gmail.com

<sup>2</sup>Mtel JSC Banja Luka, Bulevar vojvode Stepe Stepanovića 161, 78 000 Banja Luka, Bosna i Hercegovina

### **ABSTRACT**

In recent years, we have witnessed an increasing number of IoT devices in almost all spheres of life. Regardless of mobility or mode of communication, it is expected from IoT devices to work for years without failure, despite the fact that they are battery powered. Therefore, the key challenge is energy efficiency and to reduce battery consumption to a minimum, which will facilitate maintenance and extend the life of IoT devices and the complete system. This paper presents some of the techniques for reducing the battery consumption of IoT devices based on the AVR family of microcontrollers. In addition to turning off external devices and sensors, these techniques include putting the microcontroller into sleep mode, turning off individual modules and registers, reducing the operating voltage of the microcontroller and using lower operating frequencies.

**Keywords:** IoT (Internet of Things), AVR, low power.