

MIKROPROCESORSKI MERNO-INFORMACIONI SISTEMI

Sara Kasapović, Platon Sovilj, Sanja Mandić, Sara Bratić, Ivan Tomić, Đorđe Novaković

Ključne reči: mikroprocesori, merno-informacioni sistemi, laboratorijski sistemi, projektovanje i razvoj

KRATAK SADRŽAJ

Razvojni mikroprocesorski sistemi predstavljaju bitan alat u projektovanju i razvoju mikroprocesorskih merno-informacionih sistema. Na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, jedna od ključnih tačaka u obrazovanju inženjera elektrotehnike i računarstva na studijskom programu Merenje i regulacija i studijskom modulu Merno-informacioni sistemi (studijskog programa Energetika, elektronika i telekomunikacije), kao i inženjera biomedicinskog inženjerstva na studijskom programu Biomedicinsko inženjerstvo, jeste usvajanje znanja i razvoj veština koje se tiču upravo projektovanja i razvoja mikroprocesorskih merno-informacionih sistema. U ovom radu su prikazani laboratorijski sistemi i metodološki pristupi koji služe kao podrška tom usvajanju i razvoju.

MICROPROCESSOR BASED MEASUREMENT-INFORMATION SYSTEMS

Keywords: microprocessors, measurement-information systems, laboratory systems, design and development

ABSTRACT

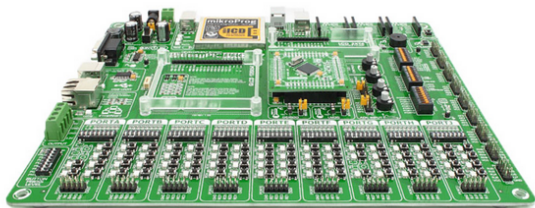
Microprocessor development systems represent an essential tool in the design and development of microprocessor measurement and information systems. At the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, one of the key points in the education of electrical engineering and computer science engineers studying the Measurement-Information Technologies and Control Engineering program and the Measurement and Information Systems module (part of the Power, Electronic and Telecommunication Engineering study program), as well as biomedical engineering engineers in the Biomedical Engineering study program, is acquiring knowledge and developing skills related to the design and development of microprocessor measurement and information systems. This paper presents laboratory systems and methodological approaches that support this acquisition and development.

UVOD

Mikroprocesorski sistemi su od izuzetnog značaja za rad u industriji. U svakom digitalnom uređaju koji se danas može pronaći na tržištu, nalazi se bar jedna vrsta mikroprocesora. Imaju značajnu ulogu u automatizaciji i kontroli procesa u industriji, povećanju efikasnosti, smanjenju energetske potrošnje i optimizaciji raznih industrijskih sistema. Svaki mikroprocesor je jedinstven, ali za uspešan rad sa njima potrebne su iste osnove hardverskog znanja i embedded programiranja. Na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, studenti studijskog programa Merenje i regulacija, kao i studijskog modula Merno-informacioni sistemi, studijskog programa Energetika, elektronika i telekomunikacije, kroz predmet Mikroprocesorski merno-informacioni sistemi 1 imaju priliku da nauče osnove rada sa mikroprocesorskim sistemima, perifernim uređajima (senzori, aktuatori, displeji, memorijski uređaji) i komunikacionim protokolima. Takođe, važno je napomenuti da se predmet izvodi sa nešto drugačijim gradivom i na trećoj godini studijskog programa Biomedicinsko inženjerstvo, pod imenom Biomedicinska instrumentacija.

RAZVOJNI MIKROPROCESORSKI SISTEM KAO OSNOVA LABORATORIJSKIH VEŽBI

Za rad u laboratoriji koristi se razvojni sistem EasyPIC PRO v7, koje proizvodi firma Mikroelektronika. EasyPIC PRO v7 je napredni razvojni sistem koji je dizajniran za rad sa mikrokontrolerima iz PIC18 serije kompanije Microchip, uključujući mikrokontroler PIC18F87K22 (Slika 1). Ova razvojna ploča je namenjena kako početnicima, tako i iskusnim inženjerima za brzo i efikasno razvijanje i testiranje *embedded* sistema.

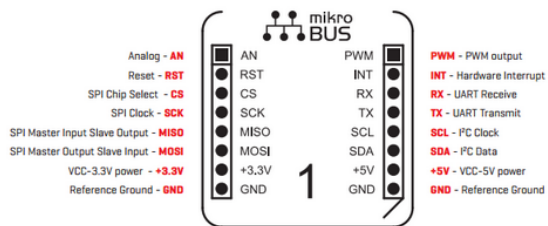


Slika 1. Razvojni sistem EasyPIC Pro v7

Mikrokontroler PIC18F87K22 je 8-bitni mikrokontroler koji nudi visok nivo performansi i nisku potrošnju energije. Dolazi sa 128 KB flash memorije, 3.8 KB S-RAM memorije i bogatim skupom periferija, uključujući 10-bitni

ADC, tajmere, PWM module, USB i napredne mogućnosti serijske komunikacije.

Sistem dolazi sa integrisanim mikroProg programatorom i debagerom, što omogućava programiranje i testiranje programa direktno sa ploče bez potrebe za dodatnim alatima. MikroProg je kompatibilan sa popularnim razvojnim okruženjima, uključujući MPLAB razvojno okruženje, koje je sastavni deo ovog kursa. Ovaj razvojni sistem ima širok spektar ulazno-izlaznih modula, uključujući LED diode, tastere, prekidače, 7-segmentni displej i LCD displej, što omogućava jednostavno testiranje i vizualizaciju različitih funkcionalnosti mikrokontrolera, i prevashodno razumevanje gradiva koje se predaje u sklopu predmeta. Razvojna ploča omogućava lako povezivanje i testiranje različitih perifernih uređaja kao što su analogno-digitalni konvertori (ADC), digitalno-analogni konvertori (DAC), UART, I2C i SPI interfejsi.



Slika 2. mikroBUS standard

Ono što čini Mikroelektronika razvojne sisteme jedinstvenim je postojanje tzv. mikroBUS standarda, koji služi za povezivanje senzorskih modula. Omogućuje povezivanje preko 1000 različitih senzorskih modula na standardizovani konektor prikazan na slici 2. Ovaj standard objedinjuje najčešće korišćene protokole poput I2C, SPI i UART protokola, kao i analogne senzore i sl.

SADRŽAJ PREDMETA

Tokom trinaest nedelja trajanja kursa, predavanja se izvode sa ciljem da upoznaju studente sa teorijskim osnovama rada sa mikrokontrolerima, i pripreme ih za rad u laboratoriji.

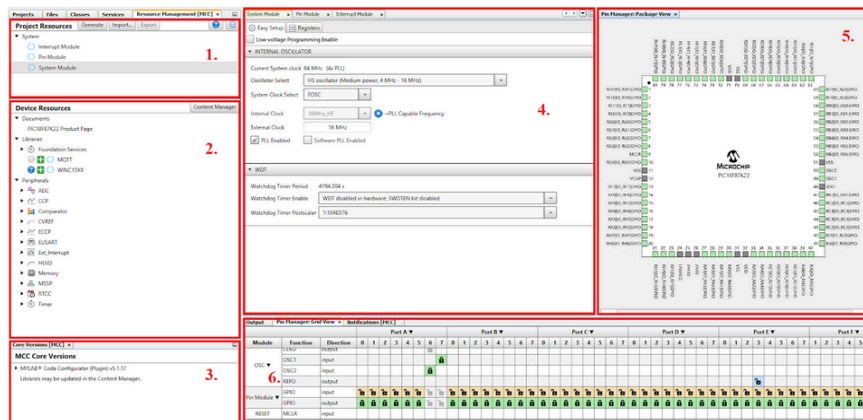
- Razvojni sistem EasyPICPROv7 i mikrokontroler PIC18F87K22: Objašnjava se struktura mikrokontrolera, koja obuhvata i strukturu radne memorije sa pregledom svih memorijskih registara. Pored toga, studenti se upoznaju sa procesom prevođenja kôda na mašinski jezik, kao i XC8 kompajlerom, koji je odabrani kompajler za rad u MPLAB programskom okruženju.
- Osnove programskog jezika C: Studenti se na predavanju upoznaju sa različitim tipovima podataka, petljama, *if-else* naredbama, funkcijama, strukturama, unijama i mnogobrojnim drugim blokovima koji su neophodni za razumevanje gradiva na laboratorijskim vežbama. Takođe, kako je veliki deo kursa namenjen upravo komunikacionim protokolima, predaju se važni pojmovi za prenos podataka kao što su rad sa stringovima, *ASCII* tabela, pokazivači, i *endianness*.
- GPIO (*General Purpose Input Output*): GPIO pinovi su univerzalni digitalni ulazno-izlazni pinovi na mikrokontroleru koji omogućavaju interakciju sa spoljnim svetom. Oni predstavljaju jedan od najvažnijih delova mikrokontrolera jer omogućavaju povezivanje sa različitim perifernim uređajima, senzorima, aktuatorima i drugim komponentama.
- UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) komunikacioni protokol: UART je jedan od najstarijih i najčešće korišćenih serijskih komunikacionih protokola u *embedded* sistemima. Na predavanjima studenti uče osnovne karakteristike asinhronne komunikacije kao što je *baud rate*, brzine prenosa i problemi i greške kod ovog tipa prenosa podataka, ali takođe i način implementacije protokola za mikrokontroler PIC18F87K22.
- Analogno-digitalni konvertori: A/D konvertori su ključni elementi u *embedded* sistemima, jer omogućavaju mikrokontrolerima i drugim digitalnim uređajima da obrađuju analogne signale iz stvarnog sveta. Proces A/D konverzije je opisan u tri koraka (odabiranje, kvantizacija, kodovanje), objašnjeni su različiti tipovi A/D konvertora, razlike između jednokanalnog i diferencijalnog merenja, i detaljno je opisana implementacija A/D konverzije za PIC18F87K22 mikrokontroler.
- Prekidi (*Interrupt*): Prekidi predstavljaju mehanizam implementiran unutar mikrokontrolera koji omogućava uređaju da privremeno zaustavi izvršavanje trenutnog zadatka kako bi obradio neki hitan događaj ili uslov. Objašnjene su razlike između prekida i *polling* metode, koja podrazumeva stalno proveravanje (anketiranje) statusa određenih uređaja, senzora, ili periferija u glavnom programu kako bi se utvrdilo da li se dogodio neki događaj koji zahteva reakciju, što okupira procesor i troši resurse. Detaljno je objašnjena implementacija prekida za mikrokontroler PIC18F87K22, nabrojani su najčešći izvori prekida sa različitim prioritetima za ovaj mikrokontroler.
- CCP (*Compare Capture PWM*) modul: CCP modul je specijalizovani hardverski modul koji omogućava precizno upravljanje i merenje vremenskih događaja, kao i generisanje Pulse Width Modulation (PWM) signala, što ga čini veoma korisnim za razne aplikacije u *embedded* sistemima, kao što su kontrola motora, upravljanje osvetljenjem, merenje vremena i generisanje signala.
- I2C (*Inter-Integrated Circuit*) komunikacioni protokol: Studenti se upoznaju sa I2C komunikacionim protokolom, od teorijskih osnova kao što su tip komunikacije, broj uređaja koji može biti povezan na liniju, maksimalna brzina, do hardverskog načina realizacije ovog protokola preko *open drain* konfiguracije. Posmatra se struktura I2C poruke za različite slučajeve slanja i primanja podataka, kao i način implementacije ovog protokola za PIC18F87K22 mikrokontroler.
- SPI (*Serial Peripheral Interface*) komunikacioni protokol: SPI je serijski komunikacioni protokol koji omogućava brzu razmenu podataka između mikrokontrolera i perifernih uređaja kao što su senzori, memorijski uređaji, ekrani i druge periferije. Predaju se teorijske osnove koje se tiču tipa

komunikacije, brzine, potrebnog broja linija za komunikaciju, modovi rada, i hardverska implementacija za PIC18F87K22 mikrokontroler, uz objašnjenje *push-pull* konfiguracije.

- 1-Wire komunikacioni protokol: 1-Wire je serijski komunikacioni protokol koji omogućava komunikaciju između mikrokontrolera i perifernih uređaja. Studenti se upoznaju sa 1-wire komunikacionim protokolom, od teorijskih osnova kao što su tip komunikacije, broj uređaja koji može biti povezan na liniju, broj žica neophodan za komunikaciju, maksimalna brzina, različite realizacije napajanja, do hardverskog načina realizacije ovog protokola preko *open drain* konfiguracije. Posmatra se način implementacije ovog protokola za PIC18F87K22 mikrokontroler, i objašnjava se formiranje CRC koda za proveru ispravnosti paketa poslatih ovim protokolom.
- *Fixed point* i *floating point* aritmetika: Dva različita pristupa reprezentaciji realnih brojeva u računarima, a oba imaju svoje specifične primene i prednosti u kontekstu digitalnih sistema. Razumevanje oba pristupa je ključno za optimizaciju performansi i efikasnosti u dizajnu digitalnih sistema. Objašnjava se razlika između *fixed point* i *floating point* aritmetike, način zapisa, osnovne matematičke operacije, kao i vremenska efikasnost oba pristupa kada su u pitanju slabiji 8-bitni mikrokontroleri kao što je PIC18F87K22.
- LCD (*Liquid Crystal Display*) i GLCD (*Graphic Liquid-Crystal Display*): dva tipa tečnih kristalnih displeja koji se koriste za prikaz informacija. Studenti se upoznaju sa pojmom LCD displeja, vrste memorije koje postoje kod ovih displeja, načini zapisa karaktera i kako da sami naprave svoj karakter koji kasnije mogu da ispišu na displeju. Objašnjava se i način povezivanja displeja sa mikrokontrolerom, broj potrebnih linija za komunikaciju, i komande koje su definisane za komunikaciju mikrokontrolera sa displejem. Takođe, studenti se upoznaju i sa GLCD displejem, rasporedom pinova i načinom povezivanja sa mikrokontrolerom. Objašnjavaju se neki od najpoznatijih algoritama za iscrtavanje oblika na ekranu (algoritam polarnih koordinata, Brezenhamov algoritam, algoritam srednje tačke).
- RTCC (*Real Time Clock Calendar*) modul: RTCC modul je komponenta koja omogućava precizno praćenje trenutnog vremena i datuma u elektronskim sistemima, obezbeđuju trenutno vreme (sati, minuti, sekunde) i datum (dan, mesec, godina). Ovi moduli su ključni za aplikacije koje zahtevaju tačno praćenje vremena, kao što su vremenski zakazani zadaci, vođenje evidencije, i sistemski nadzor. Objašnjava se i BCD (*Binary Coded Decimal*) format u kom se ispisuju podaci pomoću ovog modula.

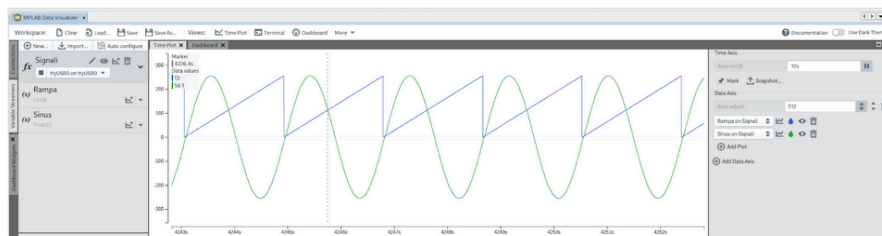
Teme laboratorijskih vežbi su odabrane na način da prate predavanja, i dopunjuju ih konkretnim primerima implementacije senzora ili drugih periferija. Nabrojani su alati sa kojima se studenti upoznaju, kao i elementi koji se implementiraju u sklopu laboratorijskih vežbi:

- Rad sa MCC (*MPLAB Code Configurator*) grafičkim okruženjem: Pre prvog zadatka, potrebno je da se studenti upoznaju sa MCC grafičkim okruženjem, čija je namena konfigurisanje određenih periferija i funkcionalnosti mikrokontrolera za specifičnu namenu (slika 3). Pomoću ovog alata inicijalna podešavanja mikrokontrolera, kao i dodavanje odgovarajućih biblioteka je znatno olakšano. Na osnovu podešavanja mikrokontrolera u MCC-u generiše se odgovarajući kôd u C programskom jeziku, koji sadrži sve neophodne funkcije za konfigurisanje mikrokontrolera, a u njega je dalje potrebno dodati korisnički kôd.



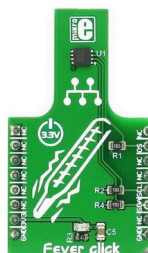
Slika 3. MCC grafičko okruženje

- *Data Visualizer* alat: *Data Visualizer* alat je još jedna pogodnost MPLAB programskog okruženja koja omogućava grafički prikaz podataka koji su pristigli na port računara, odnosno iscertavanje različitih tipova signala i njihovo praćenje u vremenu (slika 4).

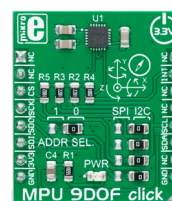


Slika 4. Primer iscertanih signala u *Data Visualizer* alatu kao deo zadatka sa laboratorijskih vežbi

- DS18S20: Digitalni temperaturni senzor poznat po svojoj tačnosti, jednostavnosti i mogućnosti da komunicira putem jednog pina, što ga čini vrlo praktičnim za različite projekte. Ovaj senzor ima digitalni izlaz, što znači da ne postoji potreba za analogno-digitalnim pretvaračima. Koristi 1-Wire komunikacioni protokol, što znači da može komunicirati putem samo jedne linije, odnosno za uspešno povezivanje sa mikrokontrolerom potreban je samo jedan pin.



Slika 5. Fever Click modul



Slika 6. MPU 9DOF Click modul

- Fever Click pločica (MAX30205): Fever Click pločica (*MIKROC Click board*) koja se koristi za merenje telesne temperature (Slika 5). Temperatura se uzorkuje pomoću 16-bitnog sigma delta A/D konvertora, a podaci se prenose putem I2C magistrale, sa rezolucijom od 0,00390625 °C po LSB.
- MPU 9DOF Click pločica (MPU-9250): MPU 9DOF Click je pločica (*MIKROE Click board*) koja sadrži čipove za merenje položaja i pomeraja u prostoru sa 9 osa (Slika 6). Ova pločica koristi InvenSense-ov MPU-9250, modul koji se sastoji od 3-osnog žiroskopa, akcelerometra i magnetometra sa tri 16-bitna ADC-a. Na laboratorijskim vežbama su implementirane samo odabrane funkcionalnosti ove pločice, preko I2C protokola.

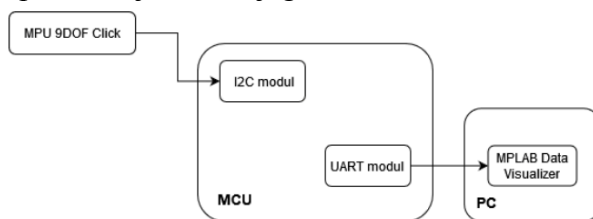
- LED Ring R click pločica: Pošto je SPI protokol kompatibilan sa radom pomeračkih (shift) registara moguće ga je koristiti i za upravljanje istim. LED Ring R click predstavlja modul sa četiri osmobarbitna pomeračka registra povezanih u daisy chain konfiguraciju. Na svaki od pinova ovih registara povezana je po jedna LED, čime je moguće nezavisno uključivati do 32 diode.
- DC Motor 2 Click pločica: Kao primer korišćenja CCP modula mikrokontrolera, predstavljeno je upravljanje DC motorom korišćenjem DC Motor 2 Click pločice i PWM podešavanja CCP modula. Brzina motora se kontroliše pomoću PWM signala koji se dovodi na jedan pin, dok se mod rada i smer obrtanja motora kontrolišu sa još dva dodatna ulazna pina.

PRIMER NAPREDNOG ZADATKA SA LABORATORIJSKIH VEŽBI

U ovom primeru data je realizacija filtracije podataka očitanih sa akcelerometra MPU9250 pomoću FIR niskopropusnog filtra. Ovaj senzorski modul je bio tema u poglavlju rada sa I2C modulom, gde su se studenti prvi put susreli sa njegovom implementacijom.

Hardver realizovanog sistema

Razvojna ploča EasyPIC PRO v7 korišćena je za realizaciju ovog sistema. Na MicroBus konektor postavljena je MPU 9DOF Click pločica. Razvojna ploča je zatim povezana putem USB konektora sa računarom u laboratoriji, ovim putem će se vršiti grafički prikaz podataka pomoću Data Visualizer alata na samom računaru. Na slici 7 prikazan je blok dijagram hardvera realizovanog sistema.



Slika 7. Blok dijagram hardvera

Firmver realizovanog sistema

Napisana je biblioteka za rad sa senzorom koja olakšava njegovu implementaciju. Neke od najvažnijih funkcija implementirane za rad sa senzorom su:

- Funkcija *MPU9250_who_am_i*: očitava vrednost registra *WHO AM I* koji sadrži fabrički upisanu vrednost 0x71. Na ovaj način moguće je testirati ispravnost komunikacije sa senzorom.
- Funkcija *MPU9250_init*: podešava niz registara kako bi se senzor pripremio za slanje podataka.
- Funkcija *MPU9250_read_accel*: očitava vrednosti koristeći *I2C1_ReadDataBlock* funkciju koja ima mogućnost da očita više sukcesivnih registara.

Zatim je odrađena implementacija FIR filtra. U heder fajlu definisana je konstanta koja predstavlja broj odbiraka odnosno broj koeficijenata koji figurišu u proračunu izlaza prilikom filtriranja. Generisan je tip strukture *FIR_filter_t* koja opisuje digitalni FIR filter i sadrži:

- niz koji sadrži ograničen broj najsvežijih odbiraka
- promenljivu koja čuva poziciju najsvežijeg (poslednjeg) odbirka u cirkularnom baferu
- niz koji čuva koeficijente filtera.

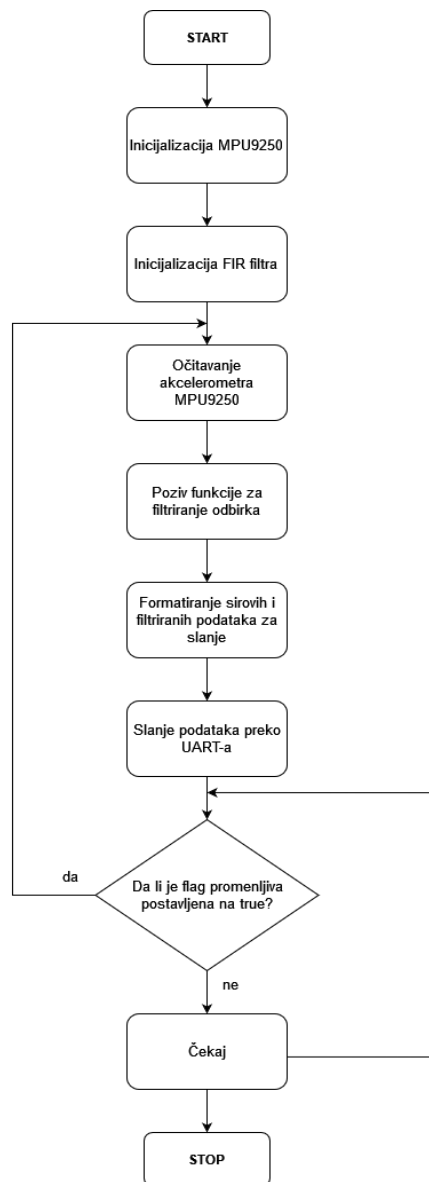
Nakon čega su definisani prototipovi funkcija koje su implementirane u .c fajlu:

- Funkcija *FIR_filter_Init*: zadatak ove funkcije je da formira novi filter, na osnovu šablona (struktura *FIR_filter_t*), da popuni niz odbiraka nulama, da postavi pokazivač na najsvežiji odbirak na početak cirkularnog bafera, kao i da učita prosleđene koeficijente filtera.

- Funkcija `FIR_Filter_FilterSignal`: uz pomoć podataka o prethodno inicijalizovanom filteru i za svaku novoprosledenu vrednost očitane sa senzora, vrednost se skladišti u cirkularni bafer, i računa se trenutna vrednost izlaza.

Kako bi se signal sa akcelerometra odabirao ekvidistantno, realizovan je prekid tajmerskog modula na svakih 10 ms koji promenljivu flag postavlja na true. Tako je generisana frekvencija odabiranja od 100 Hz.

Kako bi se generisali koeficijenti FIR filtera korišćen je *T filter*, onlajn alat za projektovanje digitalnih filtara. Pomoću definisanja propusnog opsega *passband* i nepropusnog opsega *stopband* može se dobiti željena prenosna karakteristika filtra. Pri završetku projektovanja digitalnog filtra, dobija se lista koeficijenata u odabranom numeričkom formatu. U ovom primeru korišćena je *floating point* aritmetika. Podaci se zatim smeštaju u promenljivu `coeff` koja će se kao parametar proslediti funkciji `FIR_filter_Init` kako bi se inicijalizovao filter. Na slici 8 prikazan je dijagram toka programa, a zatim listing koda glavne petlje programa na slici 9.



Slika 8. Dijagram toka programa

```

47
48     MPU9250_init();
49
50     FIRfilter_Init(&fir_NF_filter, coeffs);
51
52     while (1)
53     {
54         MPU9250_read_accel(&akcelometar);
55         ax = akcelometar.accel_x_raw/4096.0;
56         FIRFilter_FilterSignal(&fir_NF_filter, ax);
57
58         memcpy(accelX, &ax, 4);
59         memcpy(accelX_filt, &fir_NF_filter.y, 4);
60
61
62         EUSART1_Write(0x03);
63         EUSART1_Write(accelX[0]);
64         EUSART1_Write(accelX[1]);
65         EUSART1_Write(accelX[2]);
66         EUSART1_Write(accelX[3]);
67
68         EUSART1_Write(accelX_filt[0]);
69         EUSART1_Write(accelX_filt[1]);
70         EUSART1_Write(accelX_filt[2]);
71         EUSART1_Write(accelX_filt[3]);
72         EUSART1_Write(0xFC);
73         while(!flag);
74         flag = false;
75

```

Slika 9. Listing koda glavne petlje programa

ZAKLJUČAK

Razvoj mikroprocesorskih sistema igra ključnu ulogu u obrazovanju inženjera na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. Ovi sistemi omogućavaju studentima da stiču praktična znanja i veštine u dizajniranju i razvoju merno-informacionih sistema kroz upotrebu naprednih laboratorijskih sistema kao što je EasyPIC PRO v7. Kroz ovaj proces, studenti se upoznaju sa osnovnim principima rada sa mikrokontrolerima, komunikacionim protokolima, programiranjem u jeziku C, kao i sa raznim perifernim uređajima i sensorima, što ih priprema za primenu ovih tehnologija u industriji. Kako se ove tehnologije dalje razvijaju, javlja se potreba za unapređenjem kursa. Neke od ideja koje treba uzeti u razmatranje su npr. povećanje broja i obima praktičnih projekata koji bi uključivali složenije sisteme, uvođenje sadržaja koji povezuju mikrokontrolere sa drugim oblastima, kao što su robotika, automatizacija, i bežična komunikacija, razvoj novih metoda evaluacije koje ne bi samo testirale teorijsko znanje, već i praktične veštine i sposobnost rešavanja problema, i uvođenje novih i naprednijih mikrokontrolera i razvojnih platformi koje su popularne u industriji.

Važno je napomenuti da se na ovaj kurs nadovezuje kurs Mikroprocesorski i merno-informacioni sistemi 2, koji se održava u šestom semestru. Na ovom kursu se radi sa mikrokontrolerom boljih performansi iz PIC32 serije, i znanje koje studenti usvoje na prvom predmetu predstavlja podlogu za dalji rad i učenje na ostalim kursevima ovog tipa.

LITERATURA

- [1] *Microcontroller Theory and Applications with the PIC18F, 2nd Edition*, M. Rafiqzaman, 2017.
- [2] *Programming PIC Microcontrollers with XC8: Mastering Classical Embedded Design (Maker Innovations Series)*, A. Subero, 2024.
- [3] *C Programming for the PIC Microcontroller: Demystify Coding with Embedded Programming 1st ed. Edition*, H. H. Ward, 2019.
- [4] EasyPIC PRO v7 user manual
<https://download.mikroe.com/documents/full-featured-boards/easy/easypic-pro-v7/easypic-pro-v7-manual-v101.pdf>
- [5] MCU datasheet
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39960d.pdf>