

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Predmet:  
INTEGRISANI RAČUNARSKI SISTEMI 2

Projektni zadatak:  
Detektor nota u frekvencijskom domenu

Mihajlo Karličić 3131/18  
km183131m@student.etf.bg.ac.rs

29. maj 2019

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Opis projektnog zadatka</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Arhitektura hardvera sistema</b>	<b>2</b>
3.1	STM32 Nucleo–144 razvojna ploča	2
3.2	Mic click	4
3.3	OLED B click	6
<b>4</b>	<b>Softver sistema</b>	<b>7</b>
4.1	Inicijalizacija	7
4.2	Obrada signala	8
4.2.1	FIR filtriranje i decimacija	8
4.2.2	FFT i računanje amplitudske karakteristike	10
4.3	Prepoznavanje note	10
4.4	Ispis note i frekvencije	11
<b>5</b>	<b>Zaključak</b>	<b>12</b>
	<b>Literatura</b>	<b>13</b>

# 1 Uvod

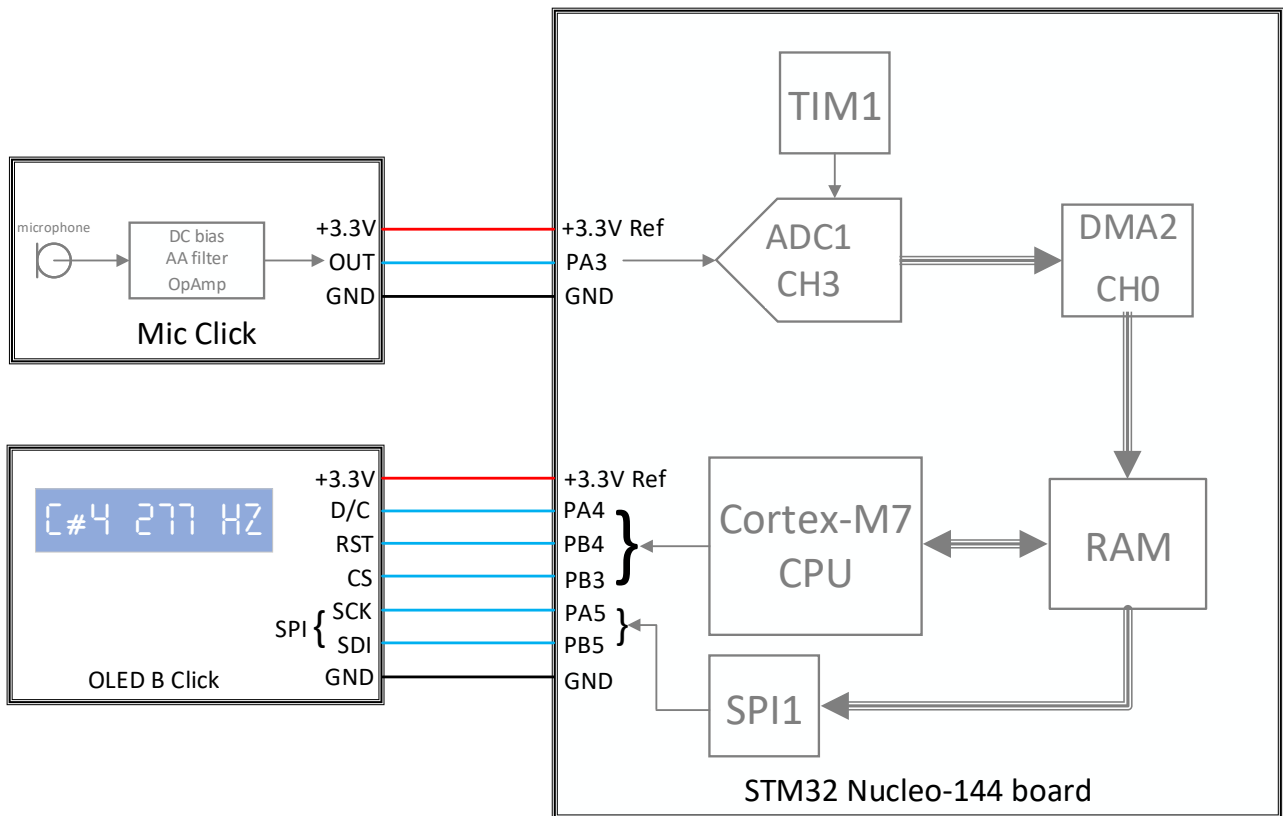
Ovaj izveštaj predstavlja dokumentaciju projekta iz predmeta Integrirani računarski sistemi 2 na master studijama odseka za elektroniku. Kako su na predmetu studenti tvorci ideja svojih projektnih zadataka, projektantu je data velika sloboda u izboru obima i izgleda projekta kao i izbora hardverskih komponenti i načina realizacije rešenja u softveru. U daljem tekstu će biti opisana osnovna ideja projekta i njena praktična realizacija.

## 2 Opis projektnog zadatka

Potrebno je realizovati namenski računarski sistem koji će detektovati muzičku notu koja se čuje u njegovoj blizini analizirajući zvuk u frekvencijskom domenu. Akvizicija se vrši analognim mikrofonom čiji se izlazni signal vodi na 32-bitni mikrokontroler koji vrši obradu zvuka. Obradom se dobija harmonik najjače amplitude u spektru zvuka koji predstavlja prepoznatu notu. Ta nota se ispisuje na displeju s kojim je mikrokontroler povezan žicom. Napravljeni uređaj se može koristiti kao jednostavni štimer muzičkih instrumenata.

### 3 Arhitektura hardvera sistema

Hardver rešenja se sastoji iz ploče sa mikrokontrolerom, ploče sa analognim mikrofonom i ploče sa OLED displejom. Blok šema ovog sistema je data na slici 1. Osim elemenata prikazanih na slici omogućena je i opcija logovanja podataka serijskom vezom sa računarom preko USART3 modula ali kako to ne predstavlja obavezni deo rešenja, nije prikazano na slici.



Slika 1: Blok šema hardvera sistema

#### 3.1 STM32 Nucleo–144 razvojna ploča

Ploča STM32 Nucleo–144 predstavlja moćan alat u čiju glavnu komponentu predstavlja 32-bitni mikrokontroler. Najvažnije karakteristike [2] [3] mikrokontrolera za ovaj projekat su:

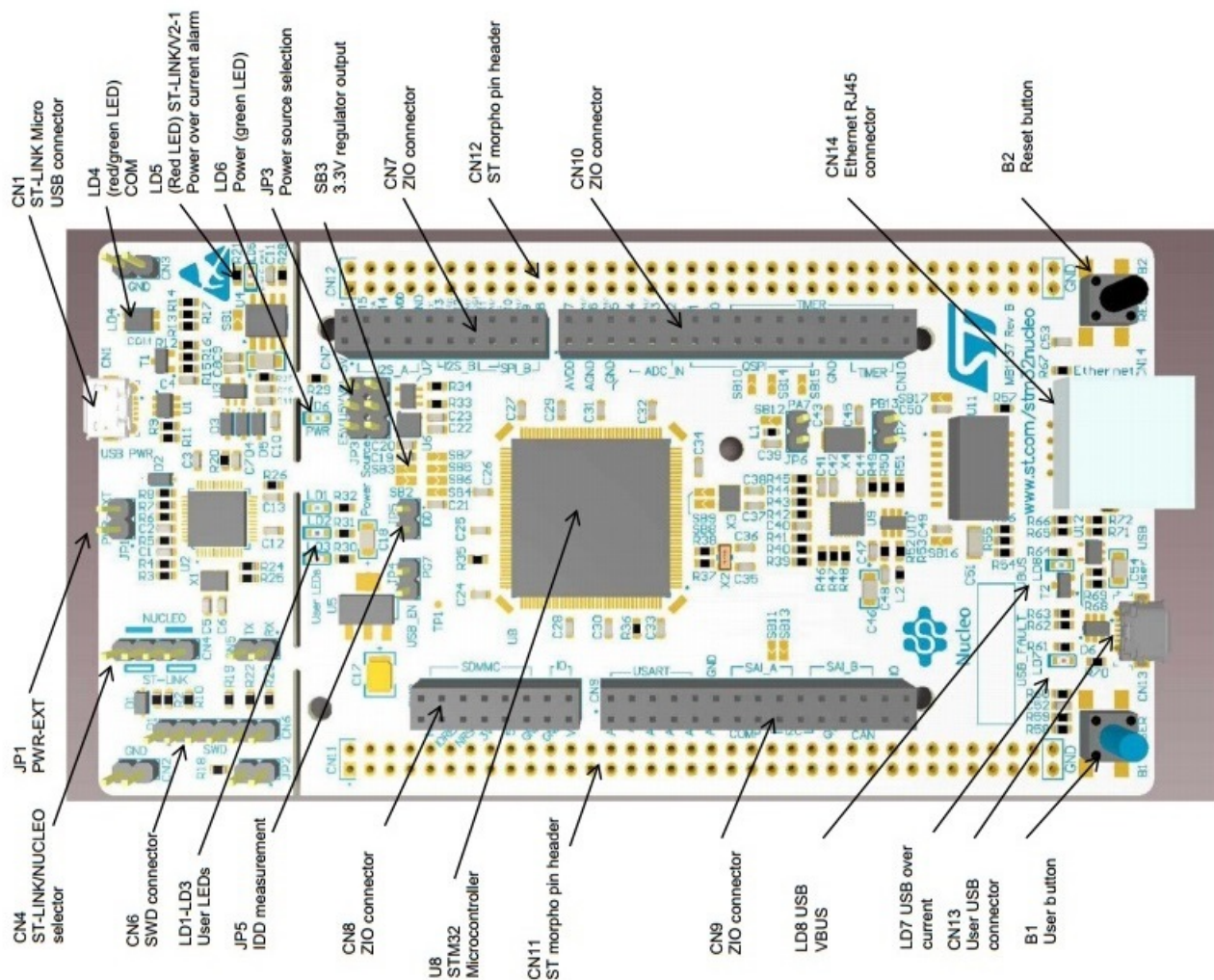
- ARM Cortex-M7 procesorsko jezgro
- 1MB fleš memorije
- 320KB RAM
- SPI, I2C, USART, CAN i USB serijski kontroleri
- Učestanost takta do 216MHz
- 3 12-bitna AD konvertora sa po 24 kanala

- 2 12-bitna DA konvertora
- 15 general purpose tajmera
- 168 GPIO porta
- 2 DMA kontrolera sa po 8 kanala itd.

Zadaci procesora i periferija, kao i njihovi režimi rada su sledeći:

- Tajmer **TIM1** se koristi da bi se posigao željeni sample rate signala. On je podešen tako da broji koristeći takt od 108MHz a željeni sample rate iznosi 20.4kHz (o ovom broju će biti reči kasnije). Svaki put kad tajmer izbroji do  $\frac{108\text{MHz}}{20.4\text{kHz}}$  šalje se hardverski trigger signal AD konvertoru da započne novu konverziju.
- Za AD konverziju koristi se 3. kanal konvertora **ADC1**. On je podešen tako da radi u punih 12 bita preciznosti i akviziciju započinje na eksterni trigger signal. Podaci se dobijaju u 16-bitnom formatu uz desno poravnanje (popunjeno je 12 najnižih bita). Nakon završene konverzije AD konvertor poziva DMA kontroler.
- Koristeći kanal 0 na kontroleru **DMA2** konvertovani podaci se prebacuju u RAM memoriju. Za potrebe skladištenja se koristi bafer od 20400 elemenata jer u njega staje tačno jedna sekunda zvuka. DMA podatke prebacuje u cirkularnom modu što je korisno za uštedu prostora. To je moguće jer podaci koji su već jednom obrađeni više nisu potrebni. Kad stigne do kraja bafera i pre nego što krene da ga ponovo popunjava iz početka, DMA baca prekid. Ovaj prekid je koristan za debugovanje.
- Zadatak procesora je da inicijalizuje korišćene periferije za rad u željenim režimima rada a zatim i obrada signala kada se završi njegova akvizicija. O samom softveru procesora će biti reči kasnije. Procesor se takođe koristi i za komunikaciju sa OLED displejom jer SPI linije nisu dovoljne. U zavisnosti od toga da li se kontroleru displeja šalju komande ili podaci pinovi D/C i CS imaju različite vrednosti.
- Glavna komunikacija sa OLED displejom se ipak obavlja preko **SPI1** kontrolera. Kako se vrši komunikacija jedan na jedan pri čemu samo mikrokontroler kao master šalje podatke, dovoljne su dve linije za komunikaciju.

Osim mikrokontrolera na razvojnoj ploči se nalaze LE diode, izvedeni pinovi na koje se mogu zalemiti hederi, USB OTG port, Ethernet port, korisnički tasteri, itd. kao i programator/debuger (slika 2).



Slika 2: STM32 Nucleo-144 ploča

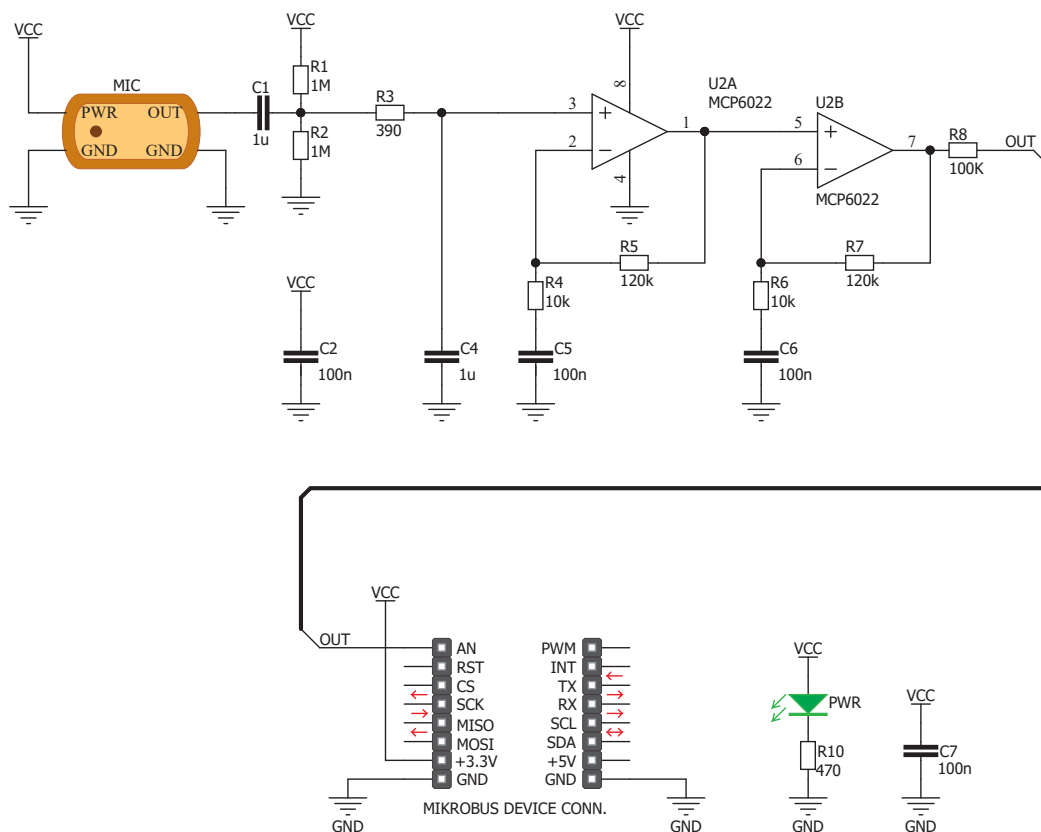
### 3.2 Mic click

Mic click [4] predstavlja štampanu ploču na kojoj se nalazi SPQ0410HR5H-B SMD mikrofoni [5]. Osim mikrofona na ploči se nalaze i analogna kola koja treba da obezbede DC biasing, AA filtriranje i pojačavanje signala sa mikrofona (slika 3).

Silikonski mikrofoni SPQ0410HR5H-B osim akustičnog senzora sadrži ulazni bafer sa niskim šumom i izlazni pojačavač. Takođe sadrži i MaxRF zaštitu od RF šuma. Mikrofoni je neusmeren, što znači da u svim smerovima snima jednako dobro. Kriva zavisnosti osetljivosti mikrofona u zavisnosti od frekvencije data je na slici 4. Osetljivost opada na niskim frekvencijama pa se ovaj mikrofoni ne može pouzdano koristiti za detektovanje nota nižih od 100Hz.

Sa razvojne ploče Nucleo-144 je potrebno obezbediti napajanje za analogna kola a izlaz sa Mic click ploče je analogni izlaz koji nosi signal zvuka.

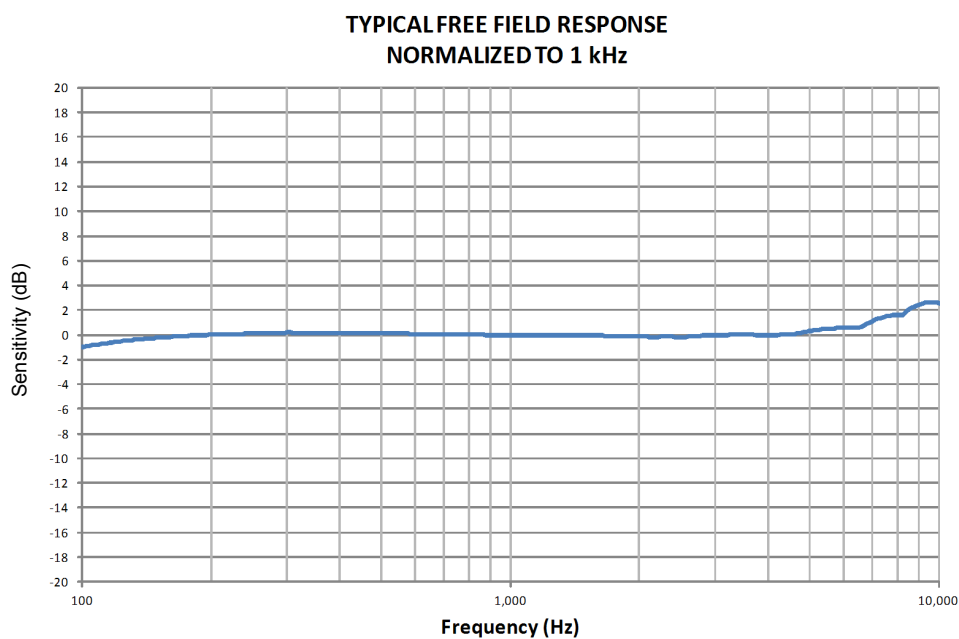
## Mic click schematic v100



[www.mikroe.com](http://www.mikroe.com)

MikroElektronika assumes no responsibility or liability for any errors or inaccuracies that may appear in the present document. Specification and information contained in the present schematic are subject to change at any time without notice. Copyright©2017 MikroElektronika. All rights reserved.

Slika 3: Električna šema Mic click pločice

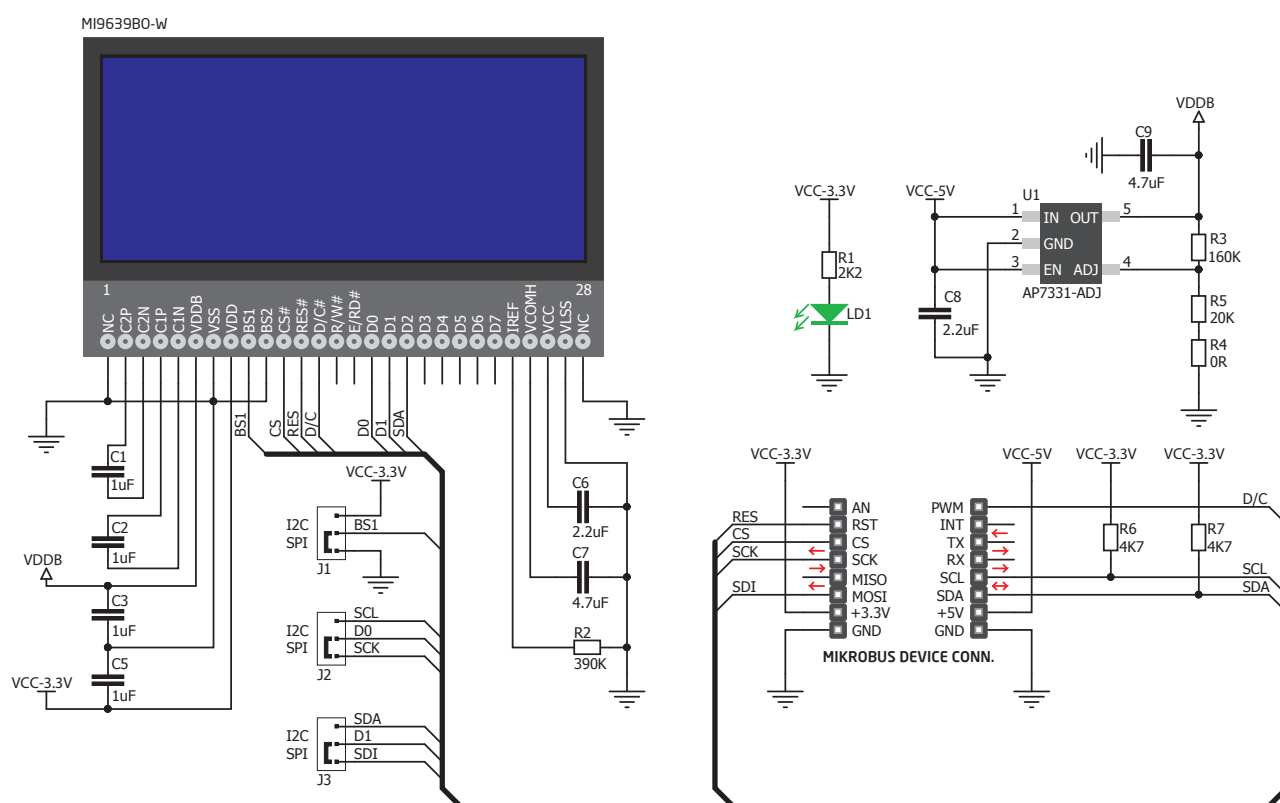


Slika 4: Zavisnost osetljivosti mikrofona od frekvencije

### 3.3 OLED B click

Štampana ploča OLED B click [6] se u ovom projektu koristi za prikazivanje rezultata obrade signala tj. za prikaz prepoznate note. Električna šema je prikazana na slici 5. Ovaj click ima  $96 \times 39\text{px}$  plavi monohromatski matrični OLED displej. Displej pokreće SSD1306 kontroler [7]. Ugrađene funkcionalnosti ovog kontrolera uključuju kontrolu kontrasta, mogućnost horizontalnog i vertikalnog skrola, invertovanje slik, itd. Ovaj click komunicira sa mikrokontrolerom koristeći SPI ili I2C interfejs. Izbor između ova dva interfejsa je moguć preko džampera koji su dostupni na ploči ali potrebno je lemljenje da bi se promenio izbor sa podrazumevanog SPI na I2C. To je ujedno i razlog zašto je za ovaj projekat izabran SPI. Za SPI se koriste samo MOSI i SCK linije.

Kao što je i ranije pomenuto, za komunikaciju nisu dovoljne samo ove linije već je potrebno da se dodatni signali šalju preko GPIO pinova mikrokontrolera. Pinovi D/C i CS se koriste da se razlikuje između komande i podatka. Prilikom slanja komande se na oba pina šalju logičke nule, pošalje se komanda pa se na CS pin vrati logička jedinica. Prilikom slanja podatka za ispis se CS obori na nulu a na D/C se postavi jedinica. Nakon slanja podatka se na CS pin postavi jedinica. Ploča se resetuje koristeći RST pin.

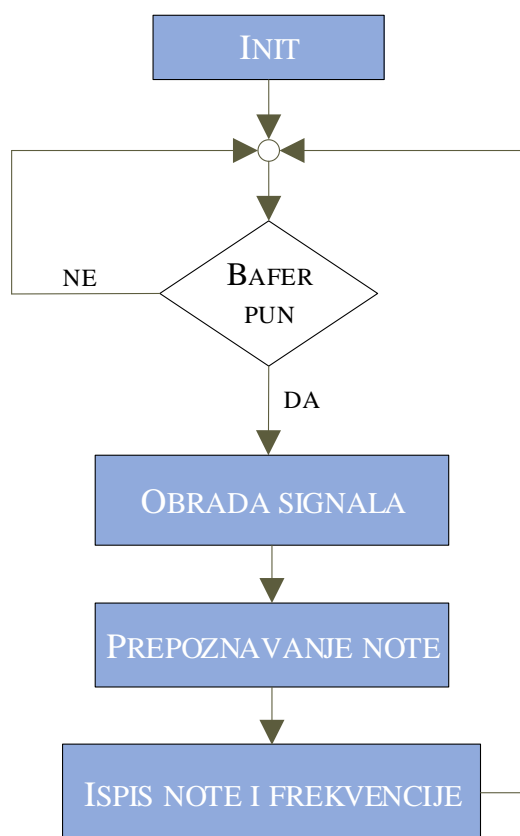


Slika 5: Električna šema OLED B click ploče



## 4 Softver sistema

Softver sistema tj. programski poslovi mikrokontrolera obuhvataju inicijalizaciju integrisanih periferija, OLED displeja i struktura podataka, obradu podataka i prikaz rezultata. Dijagram toka softvera mikrokontrolera dat je na slici 6. U daljem tekstu će detaljnije biti opisana svaki od koraka.



Slika 6: Dijagram toka softvera

### 4.1 Inicijalizacija

Najpre je potrebno inicijalizovati sve periferije mikrokontrolera tako da rade u željenim režimima rada. Omogućuje se korišćenje keš memorije procesora i korišćenje signala takta od 216MHz. Zatim se inicijalizuju periferije mikrokontrolera kao što je opisano u poglavlju 3.1. Osim tih periferija potrebno je inicijalizovati i OLED B click pločicu. Za podešavanje ove pločice preuzeta je biblioteka sa stranice MPLAB Xpress IDE [8]. Kako je biblioteka pisana za PIC mikrokontroler, potrebno je samo izmeniti deo koji se tiče SPI komunikacije da bi se koristila na STM32 mikrokontroleru.

Osim hardvera, potrebno je inicijalizovati i odgovarajuće strukture podataka da bi se mogle koristiti DSP funkcije iz CMSIS DSP biblioteke. Dokumentacija i primeri korišćenja biblioteke se mogu naći na zvaničnom sajtu za CMSIS [9]. Ova biblioteka ima dve varijante u zavisnosti od toga koji tip podataka se koristi u projektu. Postoje različite funkcije koje rade sa floating point podacima

i funkcije koje rade sa fixed point podacima. S jedne strane, na mikrokontroleru je dostupan FPU koji bi ubrzao rad sa floating point podacima, a s druge, svakom mikrokontroleru je prirodniji rad sa celobrojnim podacima (fixed point podaci se tretiraju kao celobrojni). Izabrani su fixed point podaci iz nekoliko razloga. Manjak iskustva u radu s njima i nepotrebna preciznost od 32 bita koju zahteva floating point su samo neki od tih razloga. Korisna uputstva za rad sa ovom bibliotekom i prednostima i manama svakog od ovih tipova podataka se mogu naći na YouTube kanalu korisnika Eli Hughes [10].

## 4.2 Obrada signala

Obrada signala počinje nakon što se bafer sa podacima prvi put napuni tj. nakon što bude spremna 1s podataka ili 20400 sempla. Kako je bafer cirkularan, svaki sledeći put ima dovoljno podataka za obradu. Obrada signala obuhvata sledeće korake:

- predobrada
- FIR filtriranje i decimacija
- FFT i računanje amplitudske frekvencijske karakteristike

Predobrada obuhvata oduzimanje DC komponente signala koja postoji kao rezultat DC biasinga na Mic click pločici. Kako je rezultat AD konverzije 12-bitni broj DC komponenta ima digitalnu reprezentaciju  $2^{11} = 2048$ .

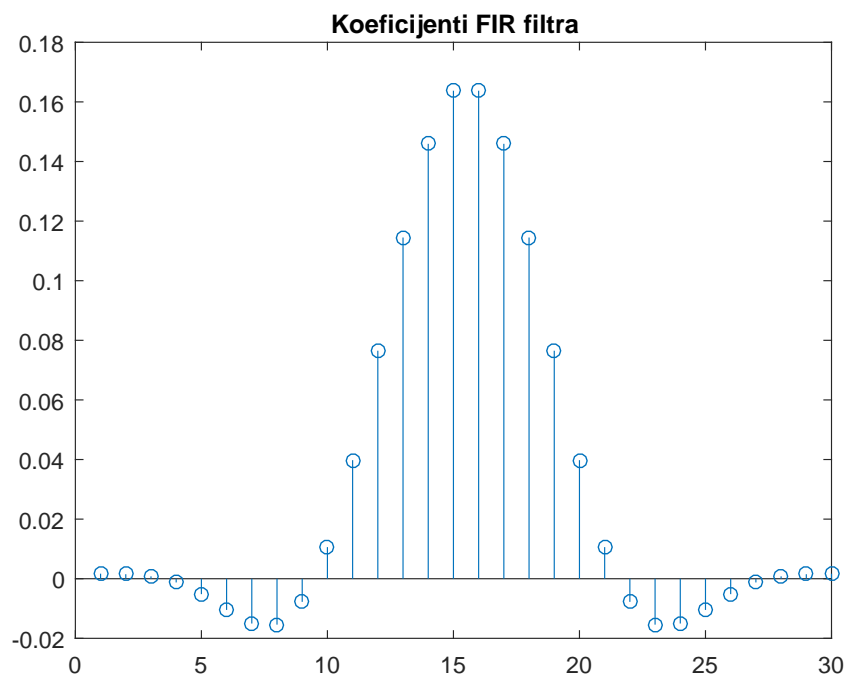
### 4.2.1 FIR filtriranje i decimacija

Ovaj korak se može činiti suvišnim ako se problem posmatra iz ugla korišćenja MATLAB ili Octave alata ali na mikrokontroleru je neophodan. Željena rezolucija detektora u ovom projektu je 1Hz a maksimalan broj tačaka u kom se može računati kompleksni FFT u CMSIS biblioteci je 4096. To znači da signal mora da se decimira da bi se dobio sample rate od 4096 a da bi se izbegao aliasing mora se prethodno filtrirati NF filtrom granične učestanosti od oko 2048. Dakle, faktori koji utiču na izbor brojke za sample rate su sledeći:

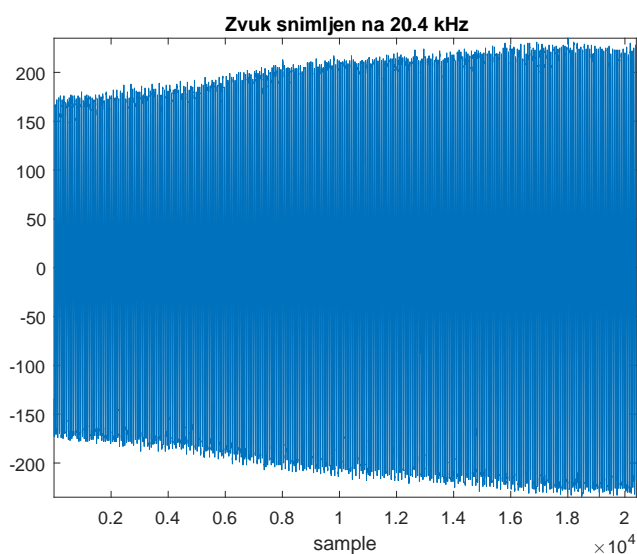
- da bi se izbegao aliasing pri semplovanju konvertora sample rate mora biti makar 20kHz
- rezolucija izbora brojke za sample rate je  $\frac{108\text{MHz}}{2^{16}}$  jer je korišćeni tajmer 16-bitni
- sample rate AD konvertora mora biti celobrojni umnožak 4096 ili nekog bliskog broja (pa bi se ostatak popunio nulama tzv. zero padding) jer se od početnog signala uzima svaki n-ti odbirak, gde je n ceo broj.

Sample rate koji najbolje ispunjava ove uslove je 20.4kHz - veći je od 20kHz, uz malu grešku (nedovoljnu da se poremete rezultati detekcije) se može dobiti uz pomoć tajmera, 5 puta je veći od broja 4080 (koji je dovoljno blizak 4096).

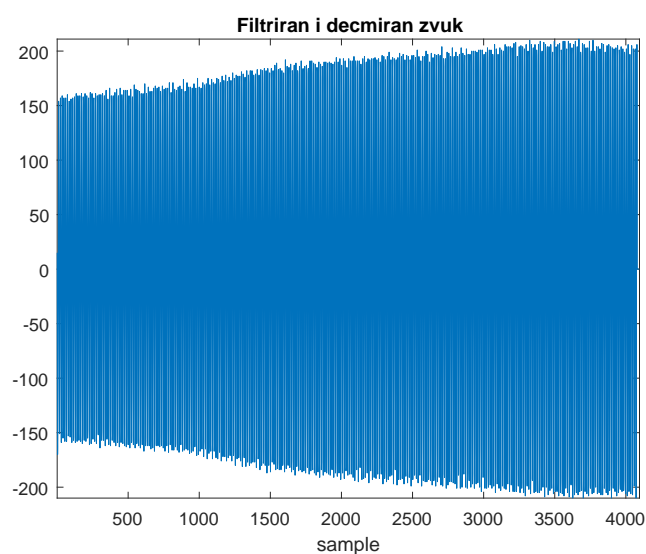
Dakle, potrebno je NF filtrom filtrirati signal na 2040Hz i zadržati svaki 5 odbirak, dodati 16 nula na kraj i signal je spreman za računanje FFT. CMSIS DSP biblioteka nudi veliku olakšicu za ovako nešto jer postoji jedna funkcija koja obavlja obe stvari na optimalan način. Funkcija `arm_fir_decimate_fast_q15` za prosledene koeficijente FIR filtra i faktor decimacije daje potrebni rezultat - filtrirani i decimirani signal u Q15 fixed point notaciji. Pri tom, radi brže nego dve odvojene funkcije jer računa filtrirani rezultat samo za one odbirke koji će biti sačuvani nakon decimacije. Na slici 7 su dati koeficijenti filtra dok su na slikama 8 i 9 jedan pored drugog prikazani primeri signala pre i posle filtriranja i decimacije.



Slika 7: Koeficijenti FIR filtra



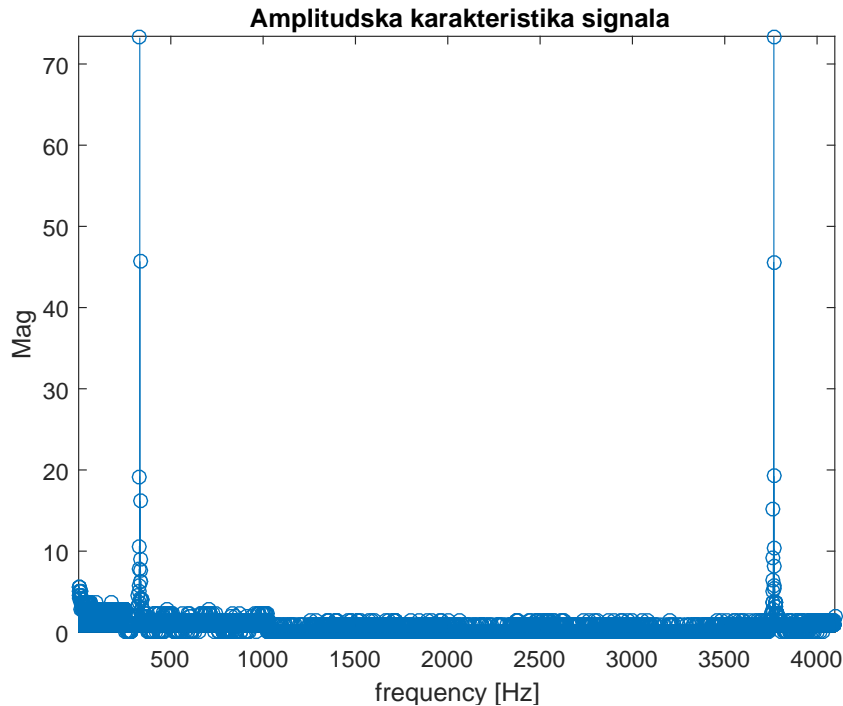
Slika 8: Zvuk pre filtriranja



Slika 9: Zvuk posle filtriranja

### 4.2.2 FFT i računanje amplitudske karakteristike

Ovaj korak je dosta jednostavniji nego prethodni i obuhvata poziv CMSIS DSP funkcije za računanje FFT u 4096 tačaka - `arm_cfft_q15`, i nakon ove funkcije izračunati amplitudsku frekvencijsku karakteristiku. Rezultat ovog koraka primenjenog na signal prikazan na slici 9 dat je na slici 10. Za ovaj primer je korišćen signal koji ima jednu spektralnu komponentu na 330Hz.



Slika 10: Amplitudski frekvencijski spektar signala

## 4.3 Prepoznavanje note

U literaturi postoje različiti načini za prepoznavanje muzičke note [11]. U vreme razvijanje osnovne ideje za rešavanje projektnog zadatka metoda “harmonic product spectrum” je izgledala kao najbolji izbor, međutim, testiranjem u samom kodu pokazala se kao jednako dobra ili lošija od jednostavnog nalaženja najjačeg harmonika i njegovog izbora za prepoznatu notu. Iako to nije definicija muzičke note (najjači harmonik ne mora da odgovara osnovnom tonu koji je odsviran) zadržano je kao rešenje u ovom projektu. Za prepoznati najjači harmonik se traži najbliža nota u listi nota koja se nalazi u memoriji mikrokontrolera. Ovakva jedna lista je data na slici 11, s tim što su vrednosti nota u Hz zaokružene na najbliži ceo broj. Zbog ograničenja mikrofona najniži ton koja se može prepoznati se nalazi na 100Hz. Najviši se nalazi na 999Hz jer se note iznad toga retko koriste u muzici.

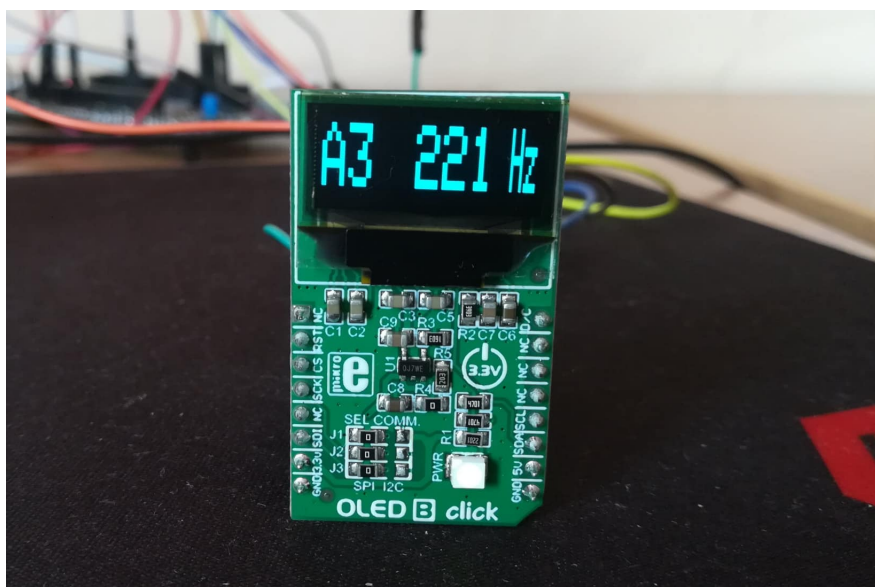
	Octave 0	Octave 1	Octave 2	Octave 3	Octave 4	Octave 5	Octave 6	Octave 7	Octave 8
C	16.35	32.70	65.41	130.81	261.63	523.25	1046.50	2093.00	4186.01
C#	17.32	34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46	4434.92
D	18.35	36.71	73.42	146.83	293.66	587.33	1174.66	2349.32	4698.64
D#	19.45	38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02	4978.03
E	20.60	41.20	82.41	164.81	329.63	659.26	1318.51	2637.02	5274.04
F	21.83	43.65	87.31	174.61	349.23	698.46	1396.91	2793.83	5587.65
F#	23.12	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96	5919.91
G	24.50	49.00	98.00	196.00	392.00	783.99	1567.98	3135.96	6271.93
G#	25.96	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44	6644.88
A	27.50	55.00	110.00	220.00	440.00	880.00	1760.00	3520.00	7040.00
A#	29.14	58.27	116.54	233.08	466.16	932.33	1864.66	3729.31	7458.62
B	30.87	61.74	123.47	246.94	493.88	987.77	1975.53	3951.07	7902.13

©2011 ArtificialTunes.tumblr.com

Slika 11: Lista nota i njihovih frekvencija

## 4.4 Ispis note i frekvencije

Kao i frekvencije, u memoriji mikrokontrolera nalaze se i imena nota. Koristeći već pomenutu biblioteku za rad sa OLED displejom ispisuje se prvo ime note a zatim i njena frekvencija. Učestanost ispisa prepoznatih nota je 100ms.



Slika 12: Izgled rezultata ispisanih na displeju

## 5 Zaključak

Ovaj projekat predstavlja spoj fakultetske obaveze i hobija na takav način da je bilo zadovoljstvo raditi na njemu. Obuhvatao je podsećanje na zaboravljene detalje iz prethodnih predmeta, upoznavanje sa novom arhitekturom mikrokontrolera i čitanje o stvarima iz sveta muzike.

Iako je početni cilj projektovanja detektora note postignut i dalje postoje mesta gde se rešenje može unaprediti. Mikrofon se može zameniti kvalitetnijim ili džekom na koji bi se povezao električni instrument, prikaz na displeju bi mogao da se učini lepšim, razne tačke obrade signala bi mogle dalje da se razrade i unaprede i sve bi to dovelo do globalno kvalitetnijeg rešenja.

Primer rada u detektora u praktičnim uslovima može se videti na YouTube kanalu projektanta.

# Literatura

- [1] Materijali sa časova predavanja i vežbi predmeta Integrisani računarski sistemi 2  
<http://tnt.etf.bg.ac.rs/~ms1bmp/>
- [2] Datasheet mikrokontrolera STM32F746xx  
<https://eu.mouser.com/datasheet/2/389/stm32f745ie-956321.pdf>
- [3] Reference manual STM32F57xx i STM32F74xx mikrokontrolera  
[https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/c5/cf/ef/52/c0/f1/4b/fa/DM00124865.pdf/files/DM00124865.pdf/jcr:content/translations/en.DM00124865.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/c5/cf/ef/52/c0/f1/4b/fa/DM00124865.pdf/files/DM00124865.pdf/jcr:content/translations/en.DM00124865.pdf)
- [4] Mic click  
<https://www.mikroe.com/mic-click>
- [5] Datasheet SPQ0410HR5H-B mikrofona  
<https://download.mikroe.com/documents/datasheets/spq0410hr5h-b.pdf>
- [6] OLED B click  
<https://www.mikroe.com/oled-b-click>
- [7] Datasheet SSD1306 OLED/PLED kontrolera  
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>
- [8] Stranica sa koje je preuzeta biblioteka za OLED B click  
<https://mplabxpress.microchip.com/mplabcloud/example/details/103>
- [9] Dokumentacija CMSIS DSP biblioteke  
<http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>
- [10] Tutorial snimci na sajtu YouTube  
<https://www.youtube.com/channel/UCBNkMQx10Iktoi2QbDDbeKg>
- [11] Algoritmi za prepoznavanje muzičke note  
<https://ccrma.stanford.edu/~pdelac/154/m154paper.htm>