

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Audiometr  
Zdeněk Rath

Bakalářská práce  
2025

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Zdeněk Rath**  
Osobní číslo: **I21093**  
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Audiometr**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

## Zásady pro vypracování

Navrhněte a realizujte tónový audiometr.

Provedte úvodní rešerši v rozsahu maximálně 10 stran.

Zvolte vhodný typ mikrokontroléru a obvod pro generování akustických signálů (například některý z běžně dostupných kodeků) pro řešení této úlohy. Po konzultaci s vedoucím práce navrhněte obvodové řešení. Vytvořte potřebný firmware pro mikrokontrolér. Realizujte audiometr na desce plošných spojů. Regulace hlasitosti musí být v rozsahu -10 až +100 dB nezávisle pro dva kanály v krocích po 1 dB. Kmitočet generovaného tónu musí být nastavitelný ve slyšitelné oblasti s krokem 10 Hz a též pevně na kmitočty obvyklé pro tónovou audiometrii. Musí být umožněna kalibrace hlasitosti.

Dále vytvořte jednoduchou aplikaci pro osobní počítač pro sestavení tónového audiogramu na základě provedeného měření sluchu včetně jeho tisku.

Součástí řešení budou měření výsledných parametrů signálu. Především odstupů signál-šum, odstupů mezi oběma kanály, přenos nastavení kmitočtu signálu, určení zkreslení signálu a dalších parametrů obvyklých u konvenčních audiometrů. Výsledné parametry musí být srovnatelné s konkurečními zařízeními.

Při návrhu desky plošných spojů je nezbytně nutné dbát na správné odstínění digitální a analogové části. Respektujte základní pravidla bezpečnosti při práci s elektrickým proudem.

Rozsah pracovní zprávy: **40 stran A4**  
Rozsah grafických prací: **grafy naměřených charakteristik**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BROHM, František. Praktická audiometrie. Praha: Avicenum, 1971. Příručka pro střední zdravotnické pracovníky.  
HYBÁŠEK, Ivan. Ušní, nosní a krční lékařství. Praha: Galén, 1999. ISBN 80-7262-017-7.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bc. David Matoušek, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2023**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2024**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.** v.r.  
děkan

LS.

**doc. Ing. Jan Pidanič, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2024

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Práci s názvem Audiometr jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 11.5.2025

Zdeněk Rath

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat rodině a všem, kterým mě podporovali během studia. Dále bych především rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Bc. Davidu Matouškovi, Ph.D. za poskytnutí mnoha věcných rad při vypracovávání bakalářské práce, dále také za ochotu, trpělivost a rychlou zpětnou vazbu.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá konstrukcí a využitím tónového audiometru. Dále bylo třeba navrhnout plošný spoj pro celý výrobek, uložení jednotlivých dílů, ovládání celého výrobku, vytvoření firmwaru pro samotný mikroprocesor ATmega328P U, firmware pro aplikaci ve Windows pro vykreslování tónového audiogramu a měření výsledných veličin pro odzkoušení funkčnosti výsledného signálu. V potaz bylo vzato i bezpečnostní riziko nesprávně nastaveného audiometru, jelikož by mohlo dojít k trvalému poškození sluchu, kdyby byla nastavena příliš vysoká hladina intenzity zvuku.

## **Klíčová slova**

Mikrokontroler, ATmega328, tónová audiometrie, generování signálu,

## **Title**

Audiometer

## **Annotation**

This thesis deals with the design and use of a tone audiometer. Furthermore, it was necessary to design the circuit board for the whole product, the placement of the individual parts, the control of the whole product, the creation of firmware for the ATmega328P U microprocessor itself, firmware for the Windows application to plot the tone audiogram and the measurement of the resulting quantities to test the functionality of the resulting signal. The safety risk of an incorrectly set audiometer was also taken into account, as permanent hearing damage could occur if the sound intensity level was set too high.

## **Keywords**

Microcontroller, ATmega328, tone audiometry, signal generation,

## Obsah

Seznam zkratk.....	8
Seznam obrázků (tento seznam doplním až bude text kompletní) .....	9
Seznam tabulek.....	9
Úvod.....	10
<b>1 Sluch.....</b>	<b>11</b>
1.1 Zvuk.....	11
1.1.1 Hluk .....	12
1.1.2 Tón.....	12
1.2 Anatomie ucha.....	12
1.2.1 Vnější ucho ( <i>auris externa</i> ) .....	13
1.2.2 Střední ucho ( <i>auris media</i> ) .....	13
1.2.3 Vnitřní ucho ( <i>auris interna</i> ) .....	13
<b>2 Tónová audiometrie.....</b>	<b>14</b>
2.1 Struktura a funkce audiometru .....	14
2.2 Interpretace audiogramu .....	14
2.3 Historie a vývoj tónové audiometrie .....	9
<b>3 Návrh hardwaru .....</b>	<b>11</b>
3.1 Mikrokontroler .....	11
3.2 Komunikační rozhraní USART .....	13
3.2.1 Popis funkce .....	13
3.2.2 Příznaky chyb přijímače .....	15
3.3 Komunikační rozhraní SPI .....	15
3.4 Komunikační rozhraní I2C/TWI .....	17
3.4.1 Popis rámců/Paketů .....	18
3.4.2 Registry jednotky TWI pro ATmega328P .....	19
3.5 Generování tónů pomocí přímé digitální syntézy.....	20
3.5.1 AD9833 .....	20
3.6 Tlumení signálu na požadovanou hladinu intenzity zvuku .....	21
3.6.1 LM1971 .....	21
3.7 Test zapojení a funkce součástek.....	22
3.7.1 Popis kódu .....	23
3.7.2 Zkouška obvodu v laboratoři.....	24
3.8 LCD display.....	25
<b>4 Konečné provedení .....</b>	<b>26</b>
4.1 Automatický režim .....	28

4.2	Manuální nastavení.....	33
4.3	Jemné manuální nastavení.....	34
<b>5</b>	<b>Měření parametrů signálu .....</b>	<b>35</b>
5.1	Přesnost nastavené hodnoty kmitočtu.....	35
5.2	Zkreslení signálu .....	35
5.3	Odstup signál-šum .....	37
5.4	Odstup mezi oběma kanály .....	38
	<b>Závěr .....</b>	<b>40</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>41</b>
	<b>Příloha A – Schéma audiometru a návrh plošného spoje Audiometr.sch.....</b>	<b>43</b>
	<b>Příloha B – Zdrojový kód souboru testad9833.in.....</b>	<b>44</b>
	<b>Příloha C – Zdrojový kód souboru ATmega328PURathZdenekBP.....</b>	<b>45</b>
	<b>Příloha D – Zdrojový kód souboru Audiometrie05.sln.....</b>	<b>46</b>

## Seznam zkratek

DDS	Direct Digital Synthesis
NCO	Numerically Controlled Oscillator
USPHS	United States Public Health Service
ASA	American Standards Association
ANSI	American National Standards Institute
ISO	International Organization for Standardization
I/O	Input/Output
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
TXD	Transmitted Data
RXD	Received Data
CS/SS	Chip Select/Slave Select
BR	Baud Rate
LSB	Least Significant Bit
MSB	Most Significant Bit
FE	Frame Error
DOR	Data Overrun
PE	Parity Error
SCK	Serial Clock
MOSI	Master Out Slave In
MISO	Master In Slave Out
TWI	Two-Wired Interface
LCD	Liquid Crystal Display
SDA	Serial Data
SCL	Serial Clock
ACK	Acknowledge
SNR	Signal-to-Noise Ratio
THD	Total Harmonic Distortion

## Seznam obrázků (tento seznam doplním až bude text kompletní)

Obrázek 1: Graf pole prahu sluchu a prahu bolesti [6] .....	12
Obrázek 2: Anatomie ucha [2].....	13
Obrázek 3: Ukázka audiogramu [5].....	15
Obrázek 4: Ladící vidličky [14] .....	9
Obrázek 5: ATmega328P – Konfigurace pinů [7].....	11
Obrázek 6: Schéma zapojení analogové části projektu .....	12
Obrázek 7: Příklad rámce pro UART [7] .....	13
Obrázek 8: Blokové schéma jednotky USART [7] .....	14
Obrázek 9: Formáty přenosu dat pro SPI [7].....	17
Obrázek 10: Zapojení TWI sběrnice [7].....	18
Obrázek 11: Digram rámce pro Start/Stop bity [7] .....	18
Obrázek 12: Formát adresního rámce. [7] .....	19
Obrázek 13: Formát datového rámce [7] .....	19
Obrázek 14: Blokové schéma funkce DDS generátoru AD9833 [8].....	21
Obrázek 15: Zapojení atenuátoru LM1971 [13].....	22
Obrázek 16: Časový diagram pro příjem dat atenuátoru LM1971 [13] .....	24
Obrázek 17: Snímek obrazovky osciloskopu z měřené testovacího zapojení .....	25
Obrázek 18: Plošný spoj přední strana .....	26
Obrázek 19: Plošný spoj zadní strana.....	26
Obrázek 20: Přední strana tónového audiometru - hl. menu .....	27
Obrázek 21: Zadní strana tónového audiometru .....	28
Obrázek 22: Tónový audiometr – automatický režim .....	29
Obrázek 23: Aplikace k vytváření audiogramu .....	30
Obrázek 24: Aplikace k vytváření audiogramu – načtení dat .....	31
Obrázek 25: Tisk audiogramu .....	32
Obrázek 26: Tónový audiometr – manuální nastavení.....	33
Obrázek 27: Tónový audiometr – jemné manuální nastavení .....	34
Obrázek 28: Měření zkreslení signálu .....	35
Obrázek 29: Měření odstup signál-šum.....	37
Obrázek 30: Měření vzájemného ovlivňování kanálů .....	38
Obrázek 31: Měření vzájemného ovlivňování kanálů .....	39

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Popis použitých pinů .....	11
Tabulka 2: Volba přenosové rychlosti pro ATmega328P .....	16
Tabulka 3: Režimy synchronizace dat.....	16
Tabulka 4: Porovnání modelů DDS generátorů .....	20
Tabulka 5: Příklady použití hodnot útlumů [13] .....	22
Tabulka 6: Měření kmitočtů pro ověření nastavených hodnot .....	35
Tabulka 7: Měření hodnot pro výpočet THD .....	36
Tabulka 8: Výpočet hodnot jednotlivých harmonických .....	36

## Úvod

Sluch, je jeden z nejdůležitějších lidských smyslů, který nám umožňuje komunikovat a orientovat se v prostoru. Jeho oslabení či ztráta může velmi ovlivnit kvalitu života. Včasná diagnostika a monitorování sluchových funkcí jsou proto klíčové pro zajištění vhodné péče.

Jedním ze základních nástrojů pro diagnostiku je audiometr. Toto zařízení slouží k přesnému měření sluchové citlivosti v různých frekvencích a intenzitách zvuku. Výsledky měření poskytují cenné informace o typu a stupni případné ztráty sluchu.

Cílem této práce je navrhnout a sestavit funkční tónový audiometr, který bude disponovat podobnými funkcemi a množnostmi jako jsou u konkurenčních zařízení.

V práci budou popsány základní principy fungování sluchového ústrojí, charakteristiky zvuku a popis a historie tónové audiometrie. A dále popis konstrukce vlastního zařízení a výsledky z jeho měření.

# 1 Sluch

Sluch je jedním z pěti základních smyslů člověka, který umožňuje vnímání zvukových vln z okolí. Sluchové ústrojí člověka neslouží pouze k lokalizaci zdrojů zvuku, ale i k rozeznávání různých tónů, frekvencí a intenzit zvuků, což je důležité pro mezilidskou komunikaci, orientaci v prostoru a ochranu před nebezpečím. [2]

## 1.1 Zvuk

Zvuk je mechanická energie, která potřebuje médium pro svůj přenos v prostoru (například vzduch, vodu či pevnou látku). Jedná se tedy o mechanické vlnění v látkovém prostředí. Mezi hlavní vlastnosti při měření zvuku patří **frekvence**. Frekvence zvukové vlny označuje počet cyklů (kmitů) za sekundu, určuje výšku tónu a je měřena v jednotkách Hertz [Hz]. Lidský sluch je schopen rozeznávat zvuky v rozmezí zhruba od 16 Hz po 20 000 Hz. [2] Další významnou vlastností zvuku je jeho **intenzita**. Když se zvuková vlna šíří vzduchem, způsobuje změny tlaku ve vzduchu. Tyto tlakové změny jsou vibrace, které naše ucho dokáže zachytit a převést na sluchové vjemy. Amplituda těchto tlakových změn tedy určuje, jak hlasitý zvuk slyšíme. Vztah pro intenzitu zvuku [I] je průměrná energie vlnění [P], kterou zvuková vlna přenesla kolmo na jednotkovou plochu [S] za jednotku času. [1]

$$I = \frac{P}{S \cdot t}$$

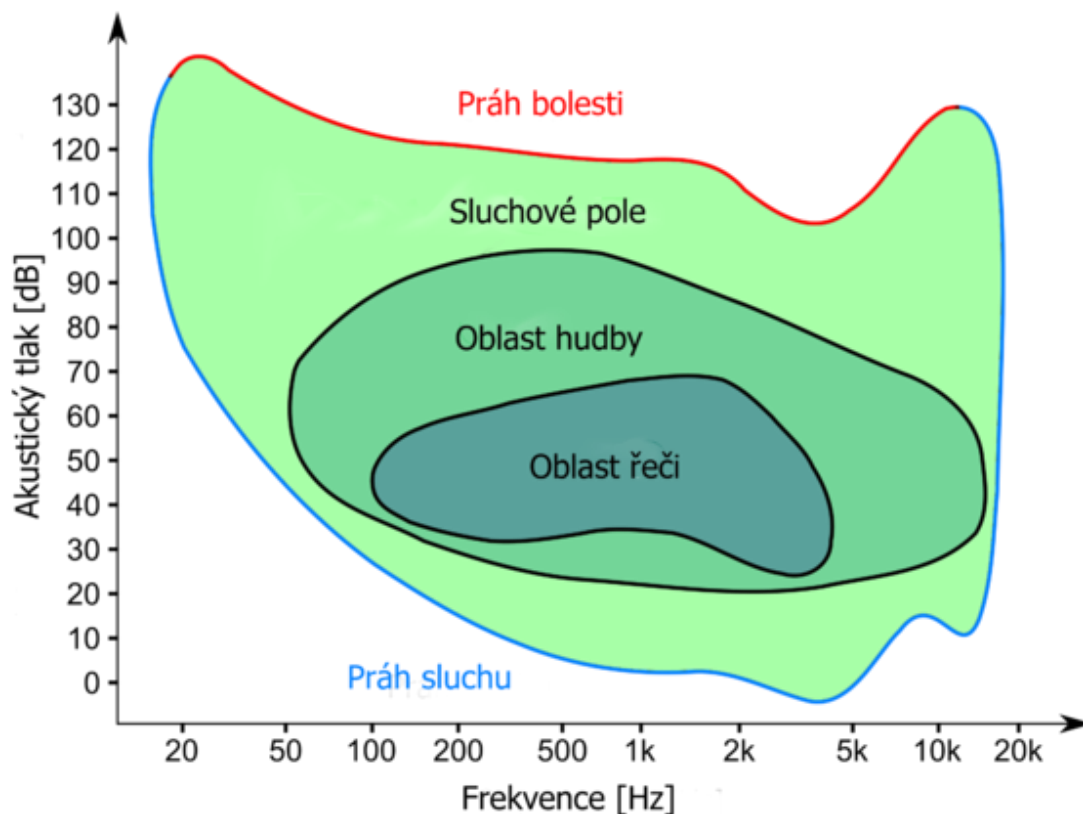
1-1

Nej slabší tlaková změna, kterou dokáže lidské ucho vnímat, je zhruba  $10^{-5}$  Pa. Tato velmi slabá změna tlaku je právě tou nejnižší hladinou zvuku, kterou může člověk s průměrným sluchem ještě slyšet, a proto se jí říká **práh slyšení**. Naopak tlakovou změnu kolem  $10^2$  Pa je ucho schopno vnímat, ale při této intenzitě už může dojít k poškození sluchu. Tak silný zvuk může způsobit nepříjemné pocity nebo dokonce bolest, proto se této úrovni tlaku říká **práh bolesti**. Rozsah hodnot intenzity zvuku, který ucho dokáže vnímat, je obrovský proto je daleko výhodnější tento rozsah převést na **hladinu intenzity zvuku**, která se vyjadřuje pomocí decibelů (dB) jako logaritmická stupnice intenzity zvuku vůči referenční hodnotě  $I_0$  (nejmenší slyšitelný zvuk). [1]

$$B = 20 \log \frac{I}{I_0}$$

1-2

Jako zdroj zvuku, vybraný v této práci, je reproduktor ve sluchátkách a jako přijímač ucho pacienta. Zvuk se dále rozděluje na tón a hluk (občas nazývaný jako šum, ale v akustické technice mají lehce odlišné významy). [1]



Obrázek 1: Graf pole prahu sluchu a prahu bolesti [6]

### 1.1.1 Hluk

Hluk je zvuk bez pravidelné frekvence, který může nabývat různých amplitud. Hluk často vnímáme jako nepříjemný, protože jeho nepravidelnost je obtížněji zpracovatelná pro lidský mozek a může působit rušivě. Hluk také může být pro lidský sluch škodlivý, zvláště pokud je intenzivní a dlouhodobě působí na uši.[2]

### 1.1.2 Tón

Za tón se považuje každý zvuk s pravidelnou frekvencí, nebo v případě složených tónů, několik složených frekvencí, které tvoří harmonické složky. Lidské ucho je nejcitlivější na tóny v rozmezí zhruba 2000 Hz až 5000 Hz. Toto rozmezí odpovídá frekvencím, které korespondují s běžnou lidskou řečí. [2]

## 1.2 Anatomie ucha

Ucho se skládá ze tří hlavních částí: vnějšího ucha, středního ucha a vnitřního ucha. Zvukové vlny procházející zvukovodem a narazí na bubínek, který se rozvibruje. Vibrace se přenášejí přes sluchové kůstky do vnitřního ucha, kde se ve hlemýždi přeměňují na elektrické signály, které následně putují do mozku, kde jsou interpretovány jako zvuk.[2]



## 2 Tónová audiometrie

Tónová audiometrie je vyšetření sluchu, při kterém se pacientovy pouští do sluchátek jednotlivé tóny **od 125 Hz až po 8 kHz**, přičemž každý tón začíná na hladině intenzity zvuku -10 dB a postupně se tato intenzita zvyšuje, dokud pacient tón neuslyší. Když pacient poprvé uslyší tón o dané frekvenci, tak dá signál člověku, který vede vyšetření, nebo sám zmáčkne tlačítko či pedál na tónovém audiometru, který poté zaznamená hladinu intenzity zvuku k dané frekvenci jako práh slyšení pacienta. Vyšetření se odehrává ve zvukotěsné komoře, aby okolní zvuky neovlivnily výsledky testů. [3][4]

### 2.1 Struktura a funkce audiometru

Tónový audiometr je zdravotnický přístroj, který se používá při diagnostice poruch sluchu pacienta, jako jsou třeba vystavení nadměrnému hluku, nebo ztráta sluchu stárnutím či dědičnými vadami. Jádrem audiometru je **procesor**, který řídí jednotlivé kroky. Další částí je obvod, který generuje jednotlivé čisté tóny o daných frekvencích. Po vytvoření signálu se obvod rozdělí na dvě části, resp. **kanály**. Jelikož se při vyšetření testuje každé ucho zvlášť, je třeba vždy jeden kanál utlumit. K tomu jsou v obvodu zahrnuty tzv. atenuátory, což jsou elektronické součástky, které se používají k přesnému snížení intenzity signálu (dá se říct, že jsou to operační zesilovač se záporným ziskem). Přístroj tedy vždy ze začátku vyšetřování sluchu každé frekvence, pomocí atenuátorů, kompletně utlumí oba kanály a poté bude postupně snižovat útlum na jednom z kanálů. Signál bude dál putovat do sluchátek a poté do sluchového ústrojí pacienta. Když tedy pacient vydá signál o tom, že tón uslyšel, tak se testování pro danou frekvenci kanálu ukončí a započne opět testování pro další frekvenci. Dosažená data se poté dosadí do tzv. audiogramu. [3][4]

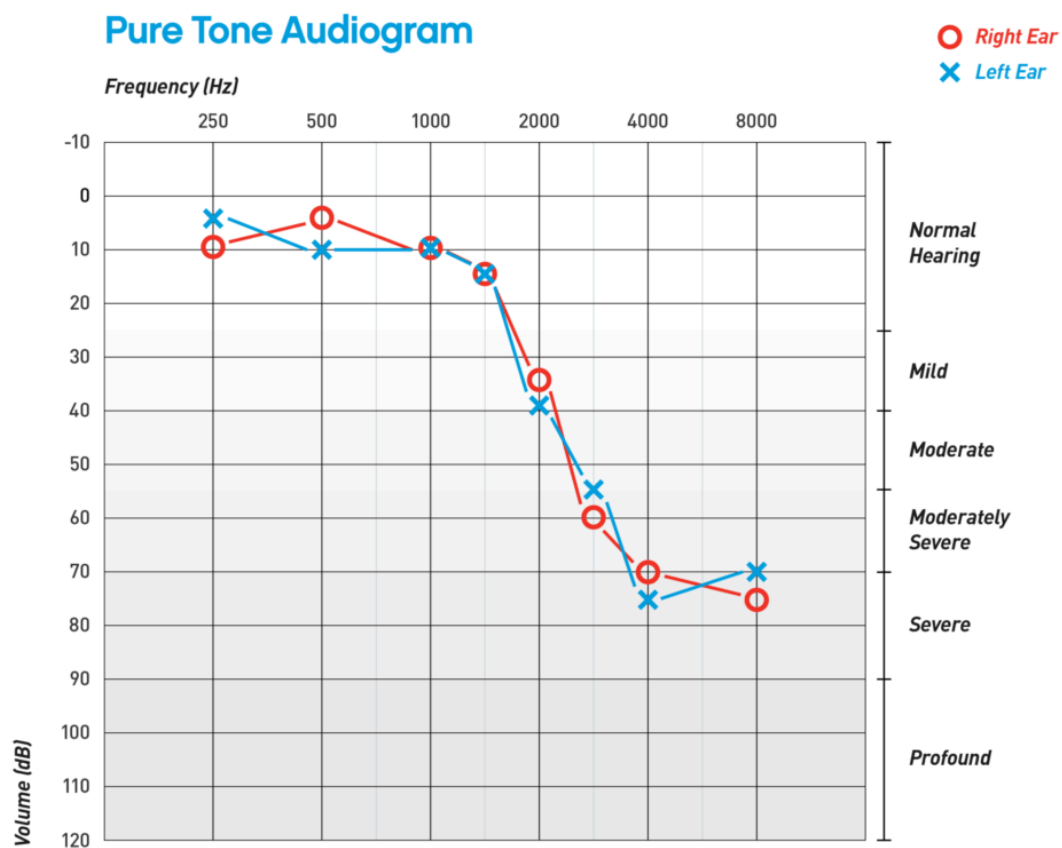
### 2.2 Interpretace audiogramu

Jedná se o graf, ve kterém jsou znázorněny data zachycená z vyšetření a ze kterého poté profesionál odvodí kvalitu sluchu pacienta:

1. Analýza kvality sluchu pacienta dle ztrátovosti sluchu v dB:
  - **Normální sluch:** 0 až 25 dB,
  - **Mírná ztráta sluchu:** 26 až 40 dB,
  - **Střední ztráta sluchu:** 41 až 55 dB,
  - **Středně těžká ztráta sluchu:** 56 až 70 dB,
  - **Těžká ztráta sluchu:** 71 až 90 dB,
  - **Hluboká ztráta sluchu:** nad 91 dB.
2. Tvar audiogramu:
  - **Rovný:** všechny prahy jsou přibližně v na stejné úrovni,
  - **Skloněný:** zhoršené slyšení v oblastech vyšších frekvencí,
  - **Stoupající:** zhoršené slyšení v oblastech nižších frekvencí,
  - **Korytový:** zhoršené slyšení v oblasti středních frekvencí,
  - **Ostrý pokles:** náhlý pokles u určité frekvence.

3. Porovnání prahů pro jednotlivé ucho:

- Symbol pro pravé ucho: O,
- Symbol pro levé ucho: X. [4][5]



Obrázek 3: Ukázka audiogramu [5]

## 2.3 Historie a vývoj tónové audiometrie

Daleko před vývojem počítačů se k objektivnímu testování sluchu používaly takzvané **ladící vidličky**. V roce 1845 používal Ernst Weber ladící vidličky k vytvoření takzvaného **Webrova testu**, který se používal k rozlišení převodní a percepční nedoslýchavosti. O deset let později vyvinul svůj test (**Rinneho test**) Heinrich Rinne, který sloužil k diagnostice typu sluchové poruchy (kostní či vzdušné). Tyto testy jsou dodnes stále používány díky své jednoduchosti. [15][16]



Obrázek 4: Ladící vidličky [14]

První metody, které by se daly považovat za audiometrii prahových hodnot sluchu pomocí čirých tónů, vytvořil na konci 19. století **Gustav Theodor Fechner**. Jeho výzkum byl základním kamenem k vývoji tónové audiometrie, jak je známa dnes. V roce 1903 **Max Wein** poprvé zjistil závislost mezi frekvenčním rozsahem a sluchovými prahy. Přístroj, který by se dal považovat za první tónový audiometr vytvořil roku 1899 **Carl C. Seashore**. Tento audiometr, s názvem Keeness of Hearing (**ostrost sluchu**), však fungoval jen v jednom frekvenčním rozsahu. Audiometr s rozsahem od 30 Hz až 10 KHz byl prezentován **Cordia C. Bunchem** roku 1919 a nesl název Pitch Range Audiometer. Po roce 1919 se stále objevovaly nové prototypy audiometrů, ale chyběla jim standardizovaná kalibrace, což vedlo k nekonzistentním výsledkům. [16]

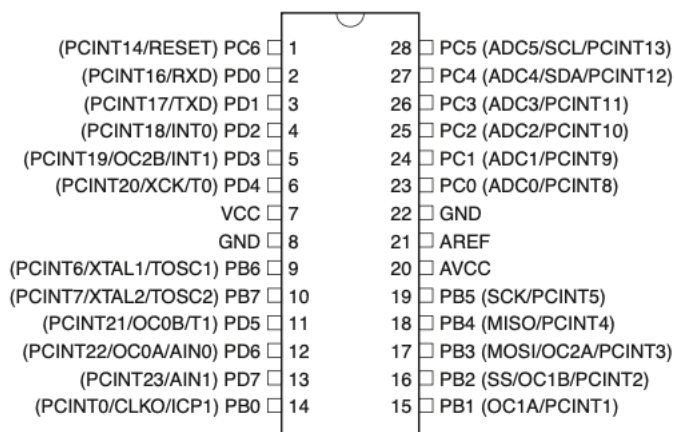
V roce 1935 zahájila United States Public Health Service (USPHS) průzkum sluchové ostrosti amerických občanů, aby **standardizovala výsledky testů audiometrů**. Tato studie je známá jako **Beasleyho průzkum**. Díky tomuto výzkumu byly shromážděny výsledky o

průměrných normálních sluchových prazích ve frekvenčním rozsahu 128 Hz až 8192 Hz. V roce 1951 Americká organizace **ASA (American Standards Association)**, pomocí sjednocených výsledků hodnot prahů ke každé z frekvenci jako 0 dB (threshold line), vytvořila systém pro vytváření tónových audiogramů. Tím vznikl celosvětově uznávaný standard pro prahové hodnoty sluchu a brzy na to se ostatní země přidaly do sjednocování výsledků pro Beasleyho průzkum. Po sjednocení výsledků i z ostatních zemí vznikl globální standard **ISO-64**. Tento standard byl ještě dvakrát změněn, a to v roce 1969, kdy byla dolní hladina slyšitelnosti posunuta o 10 dB a poslední změna nastala v roce 1996, kdy byl tento standard přejmenován na **ANSI-96** (podle přejmenované asociace ASA na ANSI – American National Standards Institute). [16]

### 3 Návrh hardwaru

#### 3.1 Mikrokontroler

Jako procesor do tohoto projektu jsem vybral, díky jeho dostupnosti a flexibilitě, osmibitový mikrokontroler ATmega328P z rodiny AVR od společnosti Microchip Technology. Poskytuje až 23 I/O pinů a podporu SPI, I2C a USART protokolů. [7]



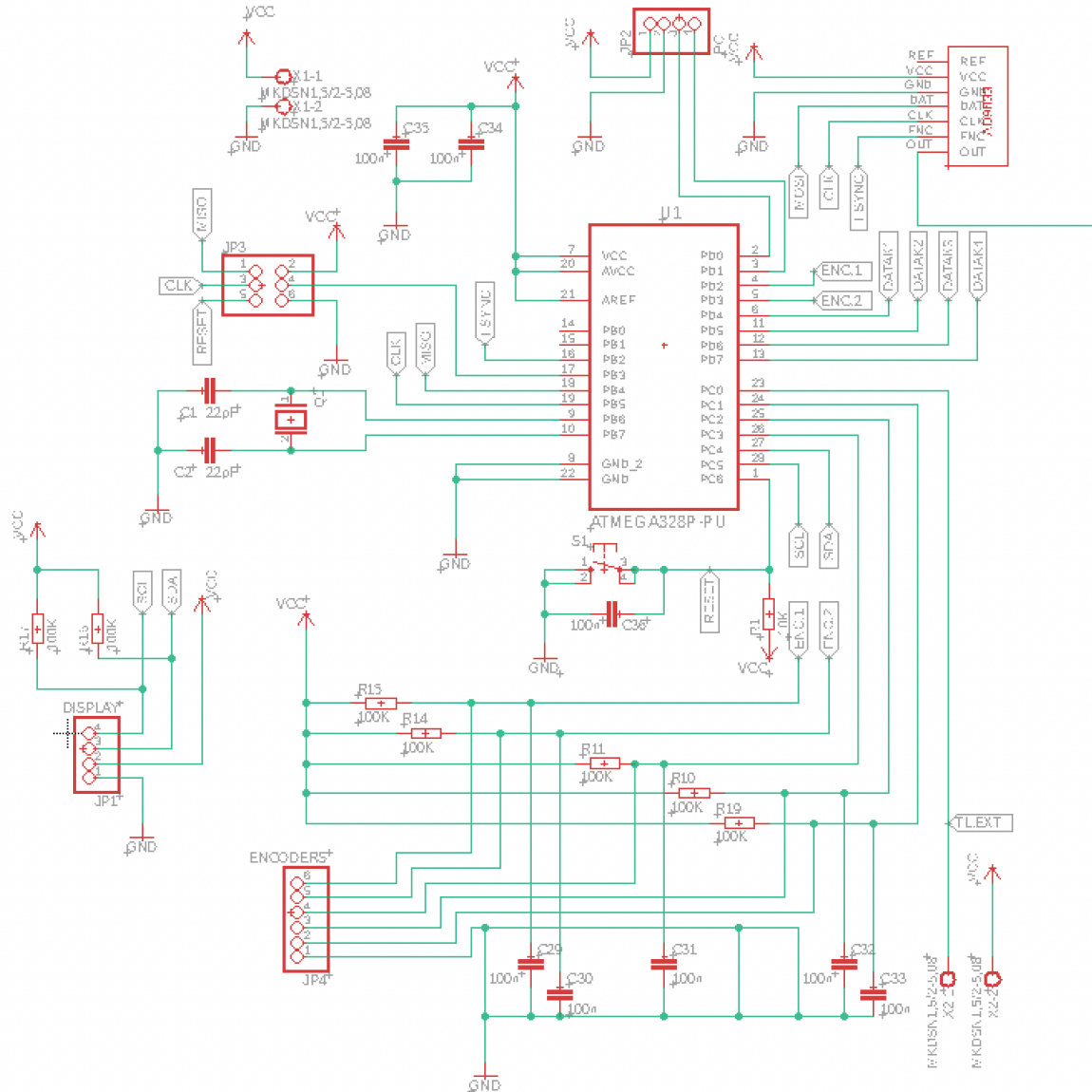
Obrázek 5: ATmega328P – Konfigurace pinů [7]

Z možných 28 pinů bylo využito 24. Využití a připojení do konkrétního obvodu je zaznamenáno v tabulce [1]. Schéma zapojení mikrokontroleru je na obrázku [5]

Tabulka 1: Popis použitých pinů

Název pinu	Použití	Periferie/Obvod
1 – PC6	RESET	Tlačítko S1
2 – PD0	RXD	Komunikace s PC
3 – PD1	TXD	Komunikace s PC
4 – PD2	ENC1	Enkodér 1
5 - PD3	ENC2	Enkodér 1
6 – PD4	DATAK1	LM1971M – IC3
7 – VCC	Napájení	-
8 – GND	Napájení	-
9 – PB6	-	Obvod XTAL
10 – PB7	-	Obvod XTAL
11 – PD5	DATAK2	LM1971M – IC6
12 – PD6	DATAK3	LM1971M – IC5
13 – PD7	DARAK4	LM1971M – IC4
14 – PD0	-	-
15 – PB1	-	-
16 – PB2	FSYNC	AD8933
17 – PB3	MOSI	AD8933, FT232RL, LM1971M – IC3, IC4, IC5, IC6,
18 – PB4	MISO	FT232RL
19 – PB5	CLK	AD8933, FT232RL, LM1971M – IC3, IC4, IC5, IC6,
20 - AVCC	Napájení	-
21 – AREF	Napájení	-
22 – GND	Napájení	-
23 – PC0	TL.EXT	Tlačítko pacient
24 – PC1	ENC5	Enkodér 2

25 – PC2	ENC4	Enkodér 2
26 – PC3	ENC3	Enkodér 1 – tlačítko
27 – PC4	SDA	Display
28 – PC5	SCL	Display



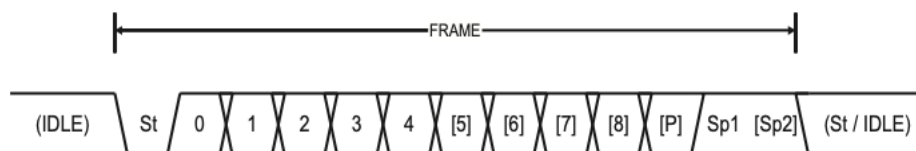
Obrázek 6: Schéma zapojení analogové části projektu

## 3.2 Komunikační rozhraní USART

Ke komunikaci mezi osobním počítačem a mikrokontrolerem, k odesílání dat pacienta, je použito asynchronního sériového přenosu. Hlavní rozdíl asynchronního přenosu oproti synchronnímu je, že asynchronní rozhraní nepoužívá zvláštního synchronizačního signálu (tudíž pouze **TXD** a **RXD**). Požadavek na tuto práci je, že by na mikrokontroleru nebylo třeba používání pinu pro RXD, ale z hlediska testování mikrokontroleru a jednotlivých částí obvodů, byla zahrnuta i tato část přenosu. [12]

### 3.2.1 Popis funkce

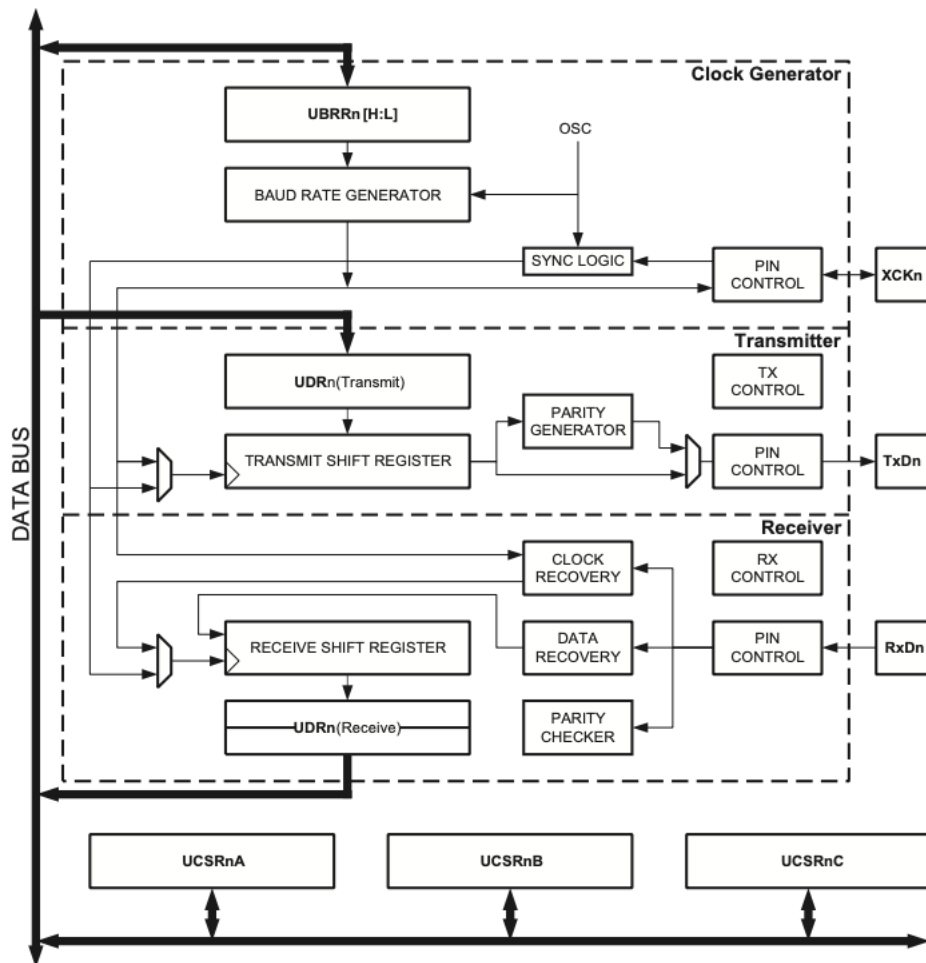
K umožnění správného fungování asynchronního přenosu je třeba nastavení stejné přenosové rychlosti (**BR** – Baud Rate) na obou stranách přenosu. Dále obě strany musí dodržovat takzvanou strukturu rámce jejíž délka a tvar se může lišit. Níže je příklad rámce a popis jednotlivých složek rámce:



Obrázek 7: Příklad rámce pro UART [7]

- **IDLE** – nečinný stav, komunikace vždy odpovídá log. 1,
- **St** – start bit, jedná se o přechod z nečinného stavu do log. 0,
- 5 až 9 **datových bitů**, používají se k přenášení informace, bity jsou posílány postupně od nejméně významného (LSB) až po nejvýznamnější bit (MSB),
- **P** – žádný nebo jeden paritní bit, tento bit se používá k zabezpečení přenosu (Dá se jím detekovat chyba parity – PE),
- **Sp** – jeden či dva stop bity, označují přechod do nečinného stavu (vždy log. 1). [12][7]

Na obrázku 8 je uvedeno blokové schéma jednotky USART, která se skládá ze tří hlavních částí:



Obrázek 8: Blokové schéma jednotky USART [7]

- **Clock Generator** – používá oscilátor pro synchronizaci signálů vstupů a výstupů. Generátor hodin podporuje čtyři módy nastavení rychlosti:
  1. Normální asynchronní režim,
  2. Asynchronní režim s dvojnásobnou rychlostí,
  3. Synchronní režim master,
  4. Synchronní režim slave.

V tomto projektu je využito asynchronního režimu s normální rychlostí, jelikož je méně choulostivý na rušení okolními signály. K nastavení přenosové rychlosti  $f_{BR}$  se v mikrokontroleru nachází 16bitový registr **UBRR**. Níže je vzorec pro výpočet přenosové rychlosti:

$$f_{BR} = \frac{f_0}{16(UBRR + 1)}$$

3-1

Kde  $f_0$  je taktovací rychlost mikrokontroleru (v případě této práce 16MHz).

- **Vysílač** – obsahuje především vysílací registr **UDR**, ze kterého dále převezme odesílací posuvný registr data pro odeslání. Dále se zde nachází generátor parity, který může do rámce přidat paritní bity (nastavení funkce generátoru parity se nastavuje bity **UPM1** a **UMP0** v řídicím a stavovém registru **UCSRC**). Poté se v obvodu nachází řídicí jednotka, která zajišťuje chod vysílání rámců. Vysílač je zinicizován nastavením bitu **TXEN** z řídicího a stavového registru **UCSRB**. Přenos dat je zahájen zapsáním do vysílacího registru **UDR**.
- **Přijímač** – krom posuvného registru, dvouúrovňového přijímacího registru, řídicí jednotky a detektoru parity, se zde nachází jednotky pro rekonstrukci hodinového signálu a dat (tyto jednotky jsou nezbytné pro používání jednotky **USART** v asynchronním režimu). Přijímač je zinicizován bitem **TXEN** z řídicího a stavového registru **UCSRB**. Přijímač započne svou funkci v bodě, kdy detekuje platný start-bit. Zbytek rámce je poté vzorkován nastavenou přenosovou rychlostí a přejímán do posuvného registru, kde se informace rámce drží do té doby, dokud není přijat první stop-bit. Celá informace se poté přesune do přijímacího registru **UDR**. [7][12]

### 3.2.2 Příznaky chyb přijímače

K detekování nesprávného příjmu dat slouží tři příznaky chyb. Všechny tyto příznaky lze přečíst z řídicího a stavového registru **UCSRA**.

- **Chyba rámce** – FE (frame error), tento příznak změní svou hodnotu na FE = 1 pokud je detekována log.0 na místě odpovídajícímu stop-bitu,
- **Ztráta dat** – DOR (data overrun), tento příznak nastane tehdy, kdy je dvouúrovňový přijímací registr plný a posuvný registr neměl přijatou informaci dále kam poslat, a tudíž došlo k jejímu vymazání.
- **Chyba parity** – PE (parity error), tento příznak nastane, když se nastavení paritního bitu nerovná skutečnému stavu bitů.

### 3.3 Komunikační rozhraní SPI

V této práci je komunikace mezi generátorem signálu AD9833 s mikrokontrolerem zajištěna pomocí **sériové komunikační jednotky SPI**. Mikrokontroler ATmega328P může být použit v režimu jak **Master**, tak i **Slave**, ale v tomto projektu je primárně využit jako řídicí obvod tudíž bude pracovat v režimu **Master**. SPI rozhraní také disponuje plným duplexem (tj. schopnost současně přijímat a vysílat data) a 7 programovatelnými rychlostmi. [12]

Vývody pro SPI jsou na mikrokontroleru ATmega32P označeny na vývodech **PB3**, **PB4** a **PB5**, jak je vidno na obrázku 4. Aby mohl Master posílat data do jednotlivých periférií zvlášť používá se ještě signál **SS** – Slave Select (někdy také **CS** – Chip Select). Pokud je signál SS v log. 0, pak je tím pádem Slave aktivní a může započít přenos dat z **MOSI** (vodiče propojují vždy stejně pojmenované vývody/přívody). Celý přenos je synchronizován hodinovým signálem **SCK**, který je vždy generován masterem. Hodinový signál udává rychlost přenosu dat a je možné ho nastavit dělicími poměry na bitech **SPR0** a **SPR1** v centrálním řídicím registru **SPCR** a bitem **SPI2X** ve stavovém registru **SPSR**. ATmega328P má hodinový oscilátor 16MHz

**Tabulka 2: Volba přenosové rychlosti pro ATmega328P**

SPI2X	SPR1	SPR0	Dělicí poměr	SCK pro 16MHz
0	0	0	4	4MHz
0	0	1	16	1MHz
0	1	0	64	250KHz
0	1	1	128	125KHz
1	0	0	2	8MHz
1	0	1	8	2MHz
1	1	0	32	500KHz
1	1	1	64	250KHz

Jednotka SPI je vždy ovládána třemi registry:

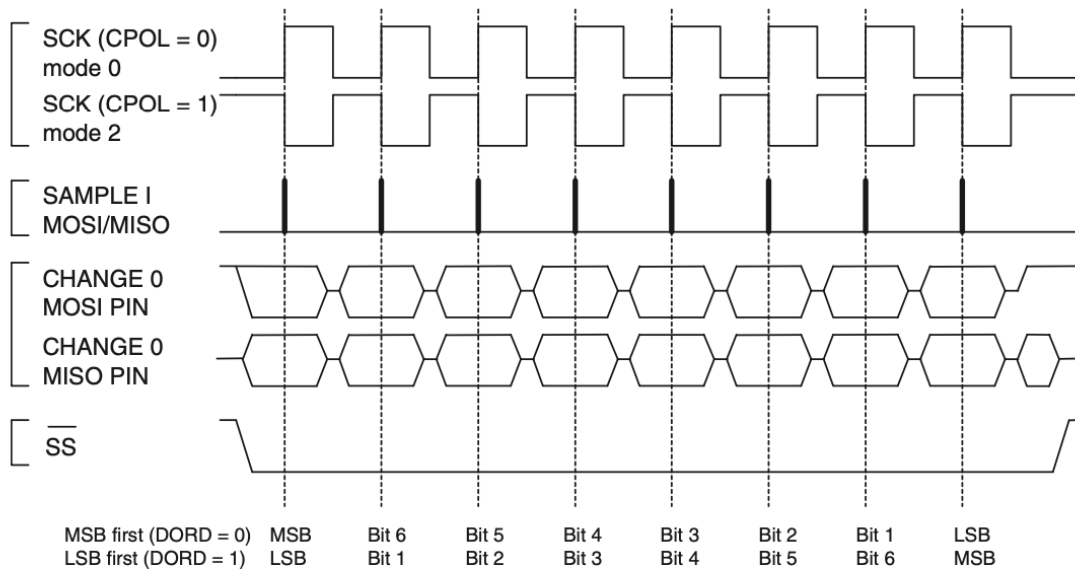
- **SPCR** – řídicí registr
- **SPSR** – stavový registr
- **SPDR** – datový registr

Každé SPI zařízení může vyžadovat jiné nastavení synchronizace, proto je třeba ho nastavit dle specifikace daného zařízení. K synchronizaci dat se používají 4 režimy komunikace, které se nastavují bity **CPHA** (určuje fázi hodin SCK) a **CPOL** (určuje polaritu hodin SCK) v registru **SPCR**. Jednotlivé režimy jsou popsány v tabulce 3. [7][12]

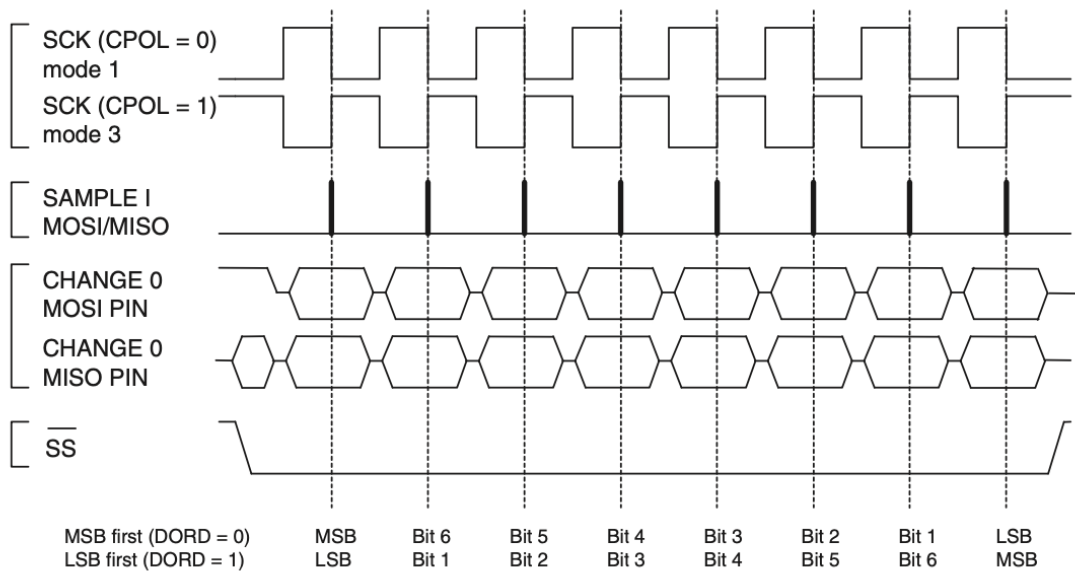
**Tabulka 3: Režimy synchronizace dat**

CPOL	CPHA	Režim	Přední hrana	Zadní hrana
0	0	0	Vzorkování – náběžná	Příprava – sestupná
0	1	1	Příprava – náběžná	Vzorkování – sestupná
1	0	2	Vzorkování – sestupná	Příprava – náběžná
1	1	3	Příprava – sestupná	Vzorkování – náběžná

### SPI Transfer Format with CPHA = 0



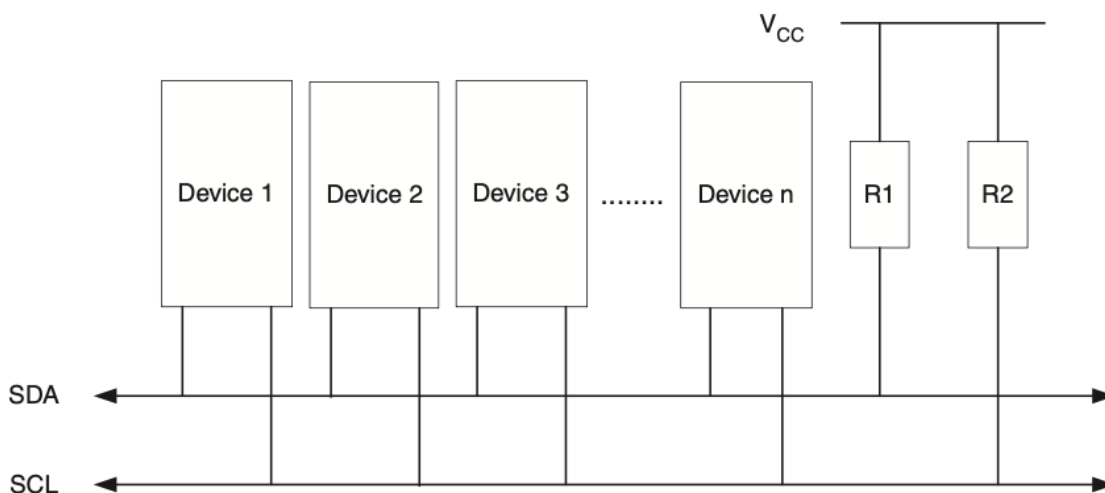
### SPI Transfer Format with CPHA = 1



Obrázek 9: Formáty přenosu dat pro SPI [7]

## 3.4 Komunikační rozhraní I2C/TWI

K zobrazení nastavených hodnot tónového audiometru, je použito LCD displeje. K tomuto displeji je od výrobce připájený I2C sériový modul pro ovládání. Toto rozhraní používá pro datový přenos pouze dva vodiče (dle toho název TWI – Two Wire Interface, které je plně kompatibilní s rozhraním I2C), jeden z vodičů nese název SDA (pro přenos dat) a druhý SCL (pro hodinový signál). [7]

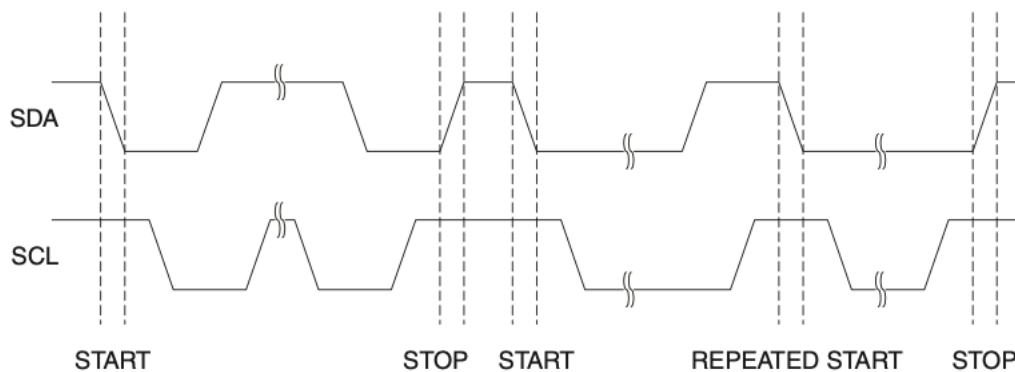


Obrázek 10: Zapojení TWI sběrnice [7]

Z obrázku 10 je zřejmé, že kromě jednotlivých zařízení, je nutné ke každé lince připojit jeden pull-up rezistor, který bude v nečinném stavu držet linku na log. 1 tak, aby se snížilo možné rušení na vstupu zařízení. Na této sběrnici může být připojeno až 128 zařízení, toto číslo je dané 7bitovou adresou, které má každé zařízení přidělené ( $2^7 = 128$ ). Hodinový puls je generován vždy ze zařízení master. [7][12]

### 3.4.1 Popis rámců/Paketů

Přenos započne po odeslání Start-bitu, který Slave zařízení rozpozná tak, že sestupná hrana SDA bude oproti SCL v log. 1. Naopak Stop-bit bude odpovídat náběžné hraně SDA na log. 1 u SCL.



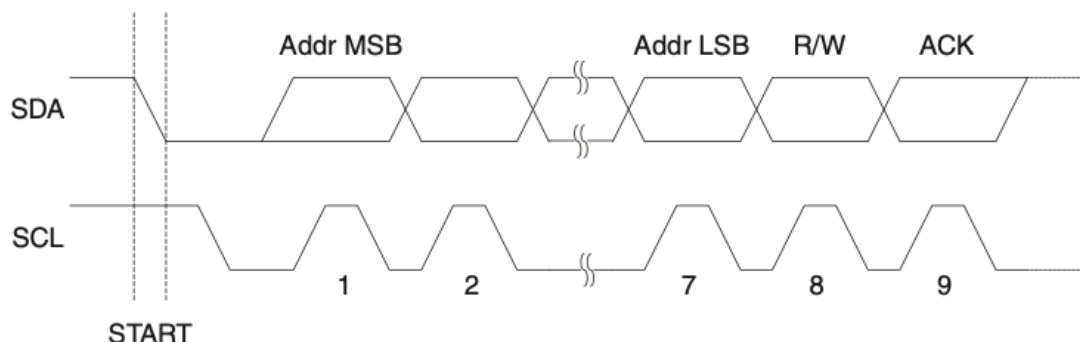
Obrázek 11: Digram rámce pro Start/Stop bity [7]

#### 3.4.1.1 Adresní rámec

Tento 9bitový rámec se skládá ze:

- 7bitové adresy,
- Řídícího bitu R/W (log.1 = Read, log.0 = Write),
- Potvrzovacího bitu ACK (Acknowledge).

V okamžiku, kdy zařízení pozná že je adresováno, stáhne SDA linku v 9. cyklu hodin do log.0 a tím odešle zařízení master ACK bit.

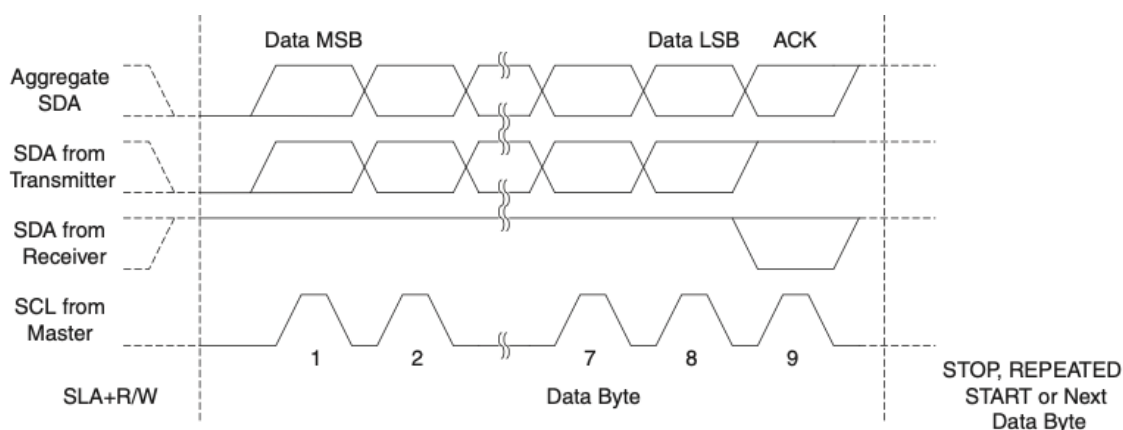


Obrázek 12: Formát adresního rámce. [7]

Jednotky TWI vždy nejprve odesílají MSB až LSB. [7][12]

### 3.4.1.2 Datový rámec

Tento rámec je také dlouhý 9 bitů, přičemž 8 bitů odpovídá pro odesílání dat opět s prvním MSB až LSB. Poté zas následuje potvrzovací bit ACK ze strany slave zařízení.[7]



Obrázek 13: Formát datového rámce [7]

### 3.4.2 Registry jednotky TWI pro ATmega328P

- **TWBR** – tento registr slouží k nastavení přenosové rychlosti (Baud Rate),
- **TWCR** – řídicí registr – slouží k nastavení přerušení, generování potvrzovacích pulzů ACK, generování START/STOP bitů, aktivaci rozhraní TWI, příznaky kolize, příznak přerušení,
- **TWSR** – obsahuje bity, které určují stav TWI jednotky a umožňuje nastavení předděličky pro přenosovou rychlost,
- **TWDR** – datový registr,
- **TWAR** – adresní registr. [12]

### 3.5 Generování tónů pomocí přímé digitální syntézy

DDS neboli Direct Digital Synthesis je metoda generování signálu s laditelnou fází a frekvencí. Tato metoda poskytuje velké frekvenční rozlišení výstupního signálu, díky možnosti dlouhé šířky binárního ladícího slova (24-48 bitů). Vzorec pro výpočet výstupní frekvence signálu je uveden níže: [8]

$$f = \frac{f_{MCLK} \times M}{2^N}$$

3-2

Kde  $f_{MCLK}$  – hlavní hodinová frekvence  
M – hodnota ladícího slova  
N – šířka ladícího slova

Přičemž:

$$0 < M < 2^N - 1$$

3-3

Níže je tabulka s porovnáním různých typu DDS generátoru. Porovnávané parametry byly vybrány dle požadavků na projekt. Data pro porovnávání pořizovacích cen byla čerpány z internetového obchodu Mouser Electronics.

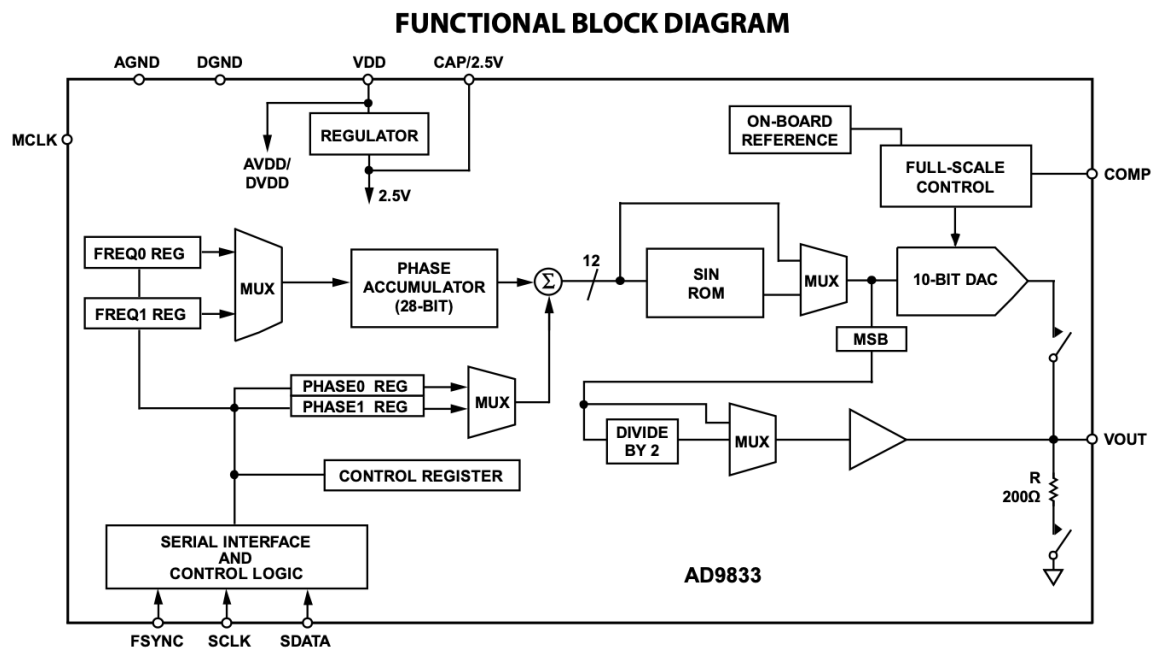
**Tabulka 4: Porovnání modelů DDS generátorů**

Model	Maximální frekvence	Napájecí napětí	Bitová hloubka rozlišení	Počet kanálů	Tvary signálů	Pořizovací cena
AD9833	12,5MHz	2,3 V – 5,5 V	28	1	Sinus, trojúhelník, obdélník	340Kč
AD9834	75MHz	2,3 V – 5,5 V	28	1	Sinus, trojúhelník, obdélník	356Kč
AD9850	125MHz	2,7 V – 5,5 V	32	1	Sinus, obdélník	896Kč
AD9859	500MHz	1,8 V – 3,3 V	32	4	Sinus, obdélník	1002Kč

Vzhledem k požadavkům audiometrického vyšetření, kdy je třeba testovat práh slyšení v rozmezí 125 Hz až 8 KHz, je vhodný Model **AD9833**. [8][9][10][11]

#### 3.5.1 AD9833

Tento čip od společnosti Analog Devices komunikuje přes 3 drátová SPI rozhraní. Jednou z hlavních částí principu funkce tohoto čipu je **NCO** (Numerically Controled Oscilator), který obsahuje dva registry (**FREQ0** a **FREQ1**). Hodnota uložená v těchto dvou registrech přímo ovlivňuje hodnotu frekvence výsledného signálu. Další část tohoto oscilátoru je modulátor fáze, který také obsahuje dva 12bitové fázové registry (**PHASE0 REG** a **PHASE1 REG**), jejich obsah se poté přičte k nejvýznamnějším bitům NCO. Fázové rozlišení těchto registrů je  $2\pi/2096$ .



Obrázek 14: Blokové schéma funkce DDS generátoru AD9833 [8]

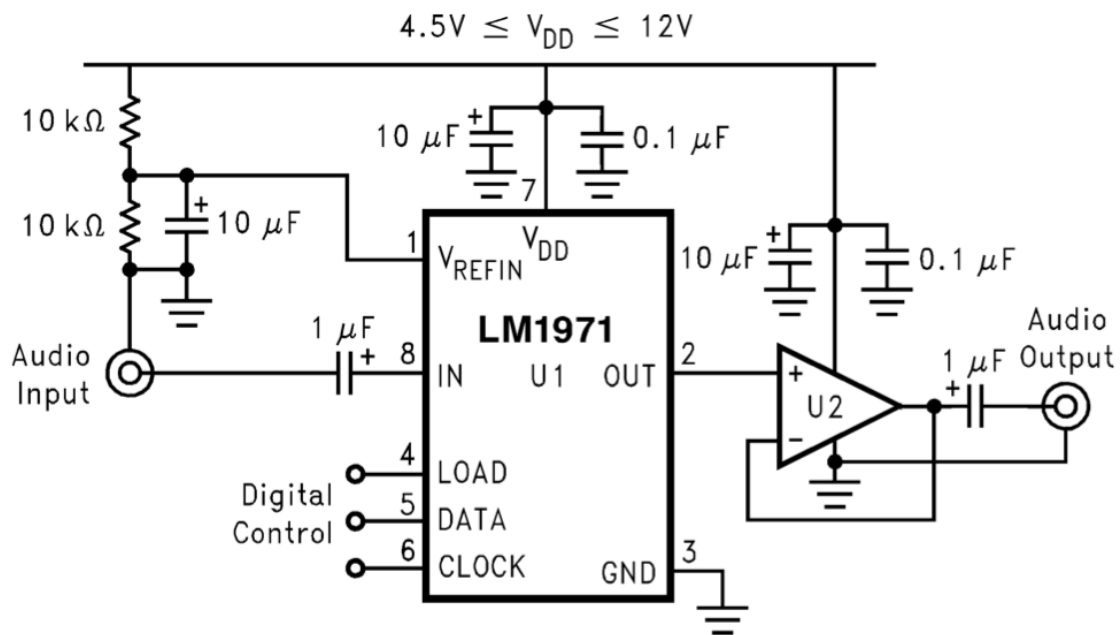
Další podstatnou částí tohoto čipu je tabulka sinusových hodnot (v blokovém diagramu označená jako **SIN ROM**). V této části je informace o signálu převedena na sinusovou hodnotu. Převádí ji tak, že použije informace z fázového akumulátoru a přiřadí tyto informace k hodnotám uloženým v tabulce (lookup table). [8]

### 3.6 Tlumení signálu na požadovanou hladinu intenzity zvuku

Poté co DDS generátor vytvoří sinusový signál, je ho třeba regulovat pomocí atenuátorů. Pro jemnější krok nastavení útlumu a pro snížení šumu na nízkých hlasitostech, jsou v obvodu jednoho kanálu zahrnuty dva atenuátory v sérii (to znamená, že jsou v analogové části zapojení celkem čtyři atenuátory).

#### 3.6.1 LM1971

LM1971 je digitálně řízený atenuátor s rozsahem útlumu od 0 do -62 dB s nastavitelným krokem po 1 dB, 2 dB či 4 dB. Tento čip také disponuje funkcí absolutního útlumu (úplně odpojí vstup od výstupu zapojení). Pro nastavení útlumu tento čip využívá třívodičového sériového rozhraní (podobnému SPI). Napájecí napětí je v rozmezí 4,5 V až 12 V. Maximální kmitočet regulovaného signálu je 200 KHz. Níže je doporučené zapojení od výrobce:



Obrázek 15: Zapojení atenuátoru LM1971 [13]

Před vstupem čipu pro referenční napájení, se nachází dva 10 KΩ rezistory, které společně tvoří dělič napětí. Dále se zde nachází několik elektrolytických kondenzátorů, které stabilizují kolísání napětí. Elektrolytické kondenzátory 1 µF slouží k blokadě stejnosměrné složky do obvodu. Na vývodu čipu se nachází operační zesilovač, který funguje jako buffer a upravuje signál pro další použití. [13]

K nastavení množství útlumu je třeba poslat do atenuátoru vždy dva bajty, přičemž první řídicí bajt musí mít vždy binární hodnotu 0 aby, se atenuátor zinicilizoval. Druhý bajt už slouží k přesnému nastavení hodnoty v dB. Hodnota útlumu v dB je rovna binární hodnotě poslané v druhém bajtu, přičemž je-li přesažena hodnota 62 dB, tak dojde k úplnému utlumení signálu. Níže je tabulka [5] s příklady nastavených hodnot útlumů:

Tabulka 5: Příklady použití hodnot útlumů [13]

Binární hodnota	Útlum [dB]
0000 0001	1
0011 1110	62
0011 1111	Úplný útlum
1111 1111	Úplný útlum

### 3.7 Test zapojení a funkce součástek

Pro ověření funkce všech atenuátorů, DDS generátoru a okolních obvodů, byl do mikrokontroleru ATmega328P nahrán testovací firmware. Níže je ukázka podstatné části testovacího kódu, která inicializuje všechny atenuátory a na jednom z kanálů nastaví útlum 6 dB (to odpovídá útlumu cca 50 %) a na druhém o 3 dB (zde to odpovídá útlumu zhruba o 30 %). Dále je třeba povolit funkce DDS generátoru, který se nastaví na kmitočet 1 KHz.

```

void sendTo(uint8_t value, uint8_t chipSelect) {
    digitalWrite(chipSelect, LOW); // Aktivace zařízení
    digitalWrite(CLK, LOW);

    for (int i = 7; i >= 0; i--) {

        digitalWrite(MOSI, (value >> i) & 1); // Nastavení datového bitu
        delayMicroseconds(10);
        digitalWrite(CLK, HIGH); // Hodinový puls
        delayMicroseconds(10);
        digitalWrite(CLK, LOW);
    }

    digitalWrite(chipSelect, HIGH); // Deaktivace zařízení
}

void setup()
{
    pinMode(CS_AT1, OUTPUT);
    pinMode(CS_AT2, OUTPUT);
    pinMode(CS_AT3, OUTPUT);
    pinMode(CS_AT4, OUTPUT);
    pinMode(CLK, OUTPUT);
    pinMode(MOSI, OUTPUT);

    digitalWrite(CS_AT1, HIGH); // Deaktivace při startu
    digitalWrite(CS_AT2, HIGH);
    digitalWrite(CS_AT3, HIGH);
    digitalWrite(CS_AT4, HIGH);

    sendTo(0 , CS_AT1);
    sendTo(0 , CS_AT2);
    sendTo(0 , CS_AT3);
    sendTo(0 , CS_AT4);

    sendTo(3 , CS_AT1);
    sendTo(3 , CS_AT3); // 6 dB útlum

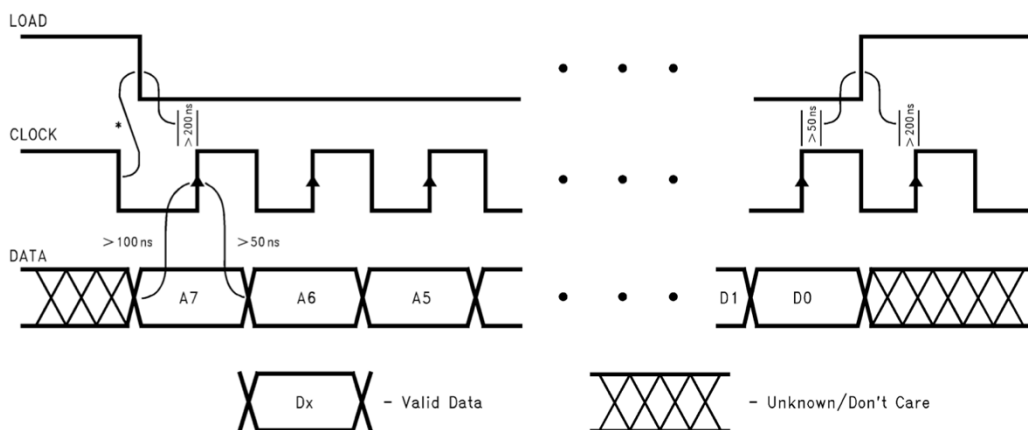
    sendTo(2 , CS_AT2);
    sendTo(1 , CS_AT4); // 3 dB útlum

    SPI.begin();
    AD.begin();
    AD.setFrequency(1000, 0); // 1000 Hz.
    AD.setWave(AD9833_SINE);
}

```

### 3.7.1 Popis kódu

Ve vrchní části kódu je funkce **sendTo**, která umožňuje zasílání dat do atenuátorů, pomocí postupného sestavování bitového čísla. Aby bylo posílání možné, bylo třeba nastavit prodlevu tak, aby korespondovala s **časovým diagramem** atenuátoru LM1971, který je uveden níže na obrázku 16:



Obrázek 16: Časový diagram pro příjem dat atenuátoru LM1971 [13]

Dále jsou ve funkci **setup** nastaveny jednotlivé piny, pro aktivaci atenuátorů, hodinového signálu a signálu pro odesílání dat na mikrokontroleru, jako výstup. Poté se všechny CS piny atenuátorů nastaví na log.1, aby nedošlo k přijímání nežádoucích signálů. Dále se, pomocí funkce **sendTo**, zinicilizuje každý z atenuátorů tím, že se mu vyšle bajt, jehož hodnota je 0. První dvojice atenuátorů má za úkol ztlumit signál o 50 % to zhruba odpovídá útlumu o 6 dB. Níže je vzorec pro výpočet útlumu napětí pro 6 dB:

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{U_{out}}{U_{in}} \right) \quad 3-4$$

Po doplnění za A a úpravě rovnice dostaneme:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = 10^{\frac{-6}{20}} \approx 0,501 \quad 3-5$$

Podobně budeme postupovat při výpočtu útlumu pro druhý kanál, který bude ztlumen o 3 dB.

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = 10^{\frac{-3}{20}} \approx 0,707 \quad 3-6$$

V poslední fázi kódu se pomocí SPI rozhraní aktivuje DDS generátor a nastaví se na něm sinusový signál o kmitočtu 1000 Hz.

### 3.7.2 Zkouška obvodu v laboratoři

Po připojení sondy C3 na výstup generátoru, sondy C1 na první kanál a sondy C2 na druhý kanál, se dá na osciloskopu vyčíst, že jednotlivé hodnoty napětí jsou:

- 632,81 mV na výstupu generátoru
- 332,03 mV na výstupu atenuátorů pro první kanál
- 451,17 mV na výstupu atenuátorů pro druhý kanál



Obrázek 17: Snímek obrazovky osciloskopu z měřeného testovacího zapojení

Po použití vzorce pro výpočet útlumu prvního kanálu:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{332,03}{632,81} \approx 0,524$$

3-7

A po výpočtu útlumu pro druhý kanál:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{451,17}{632,81} \approx 0,712$$

3-8

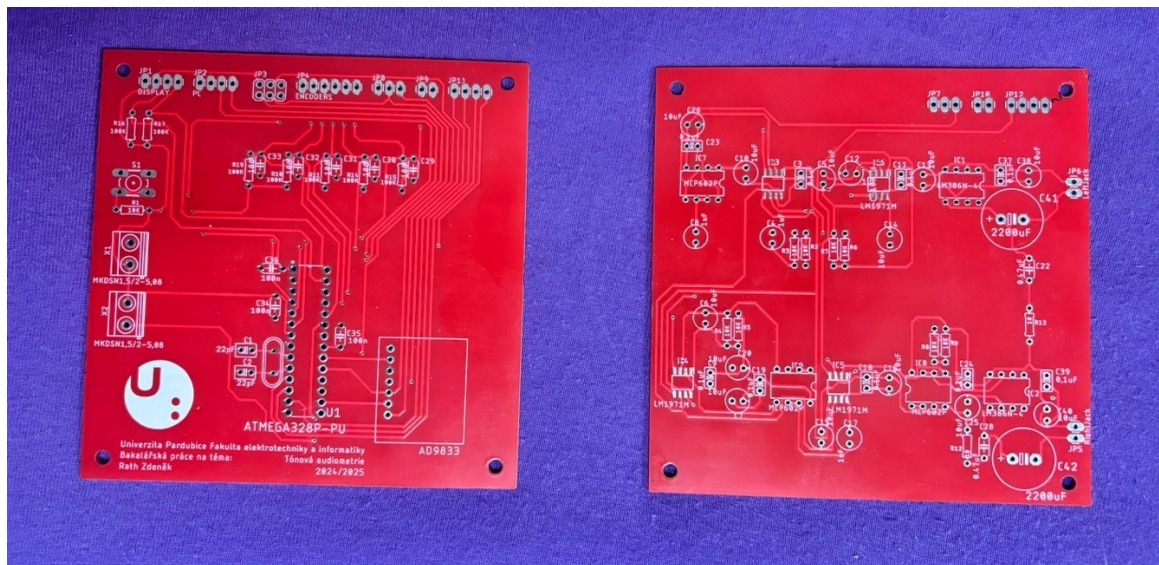
Z výpočtů je zřejmé, že attenuátory mají drobnou odchylku.

### 3.8 LCD display

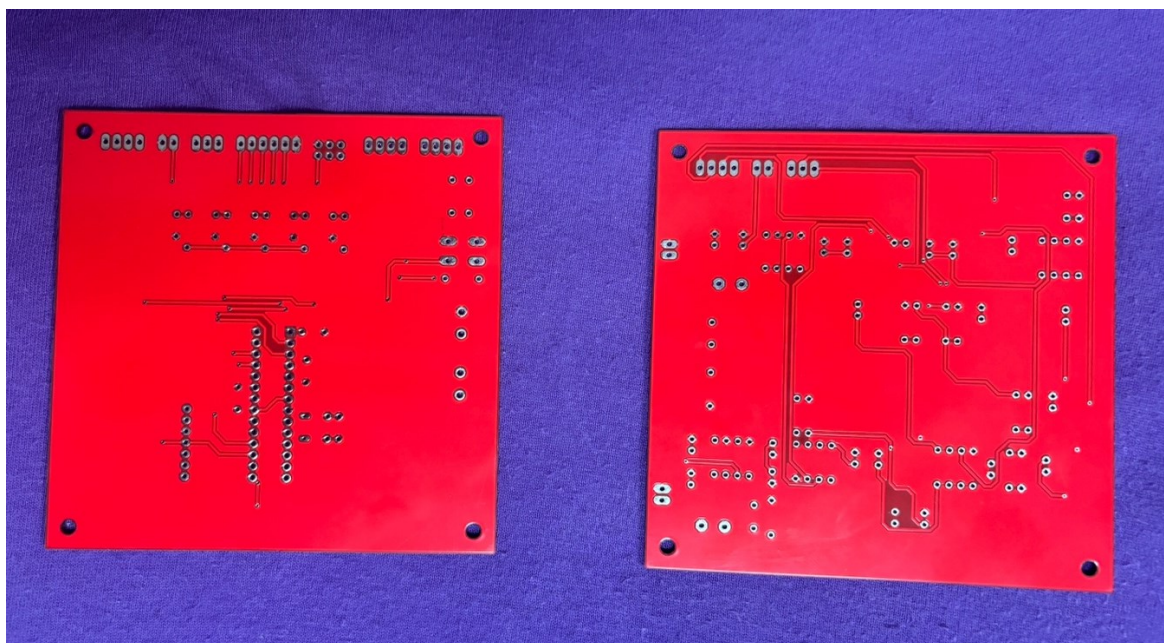
K zobrazování nastavovaných hodnot frekvence a hladiny intenzity zvuku je zde využit display **LDC2004**. Tento čtyřřádkový display umožňuje zobrazit až 20 znaků na jeden řádek. Display je běžně napájen 5 V stejnosměrného napětí a s přidaným převodníkem je ovládání řešeno rozhraním TWI, což ve výsledku znamená, že pro napájení a ovládání tohoto displeje je třeba pouze čtyř vodičů. Pro ovládání LCD displeje je dále použita knihovna pro snadnou manipulaci.

## 4 Konečné provedení

Jedním z kritérií v zadání bylo správné odstínění analogové a digitální části zapojení. Tento problém je zde řešen vyplněním spodní vrstvy vrchní desky mědí, která je zároveň použita jako digitální zem, aby nedocházelo k rušení analogových signálů. Oddělení je dále zajištěno vzduchovou mezerou mezi deskami, jelikož majoritní většiny analogových součástek je na desce druhé.

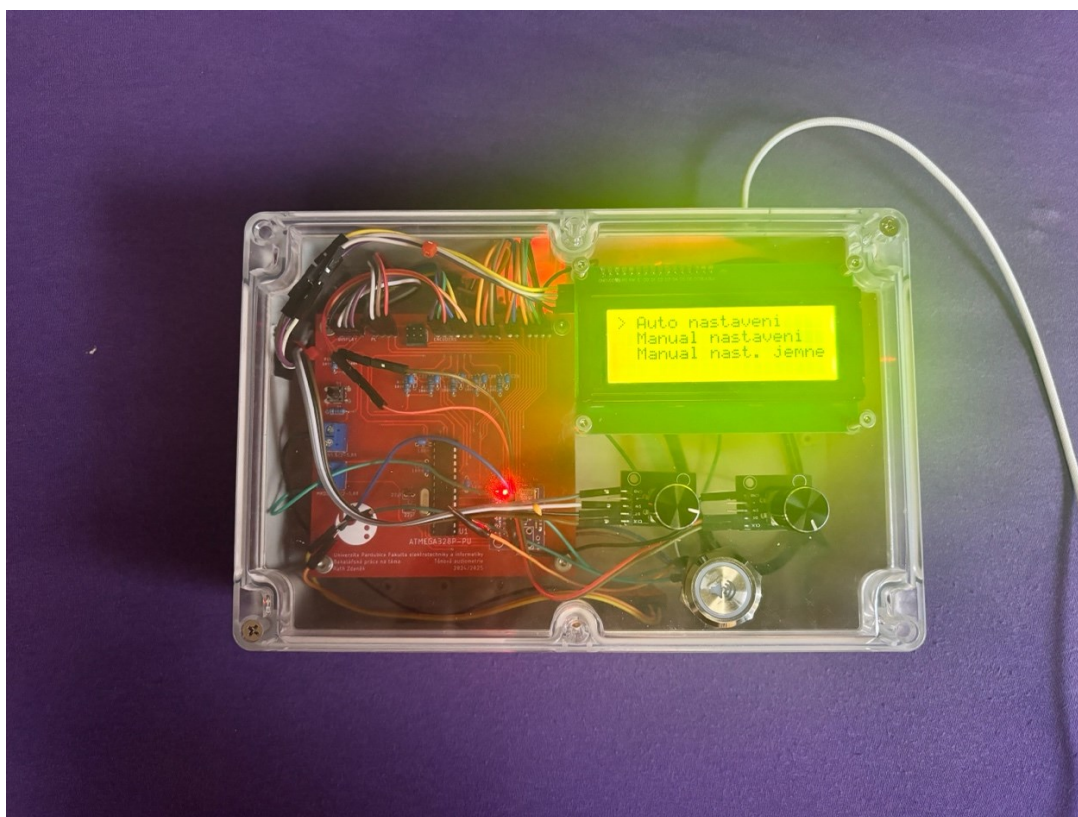


Obrázek 18: Plošný spoj přední strana



Obrázek 19: Plošný spoj zadní strana

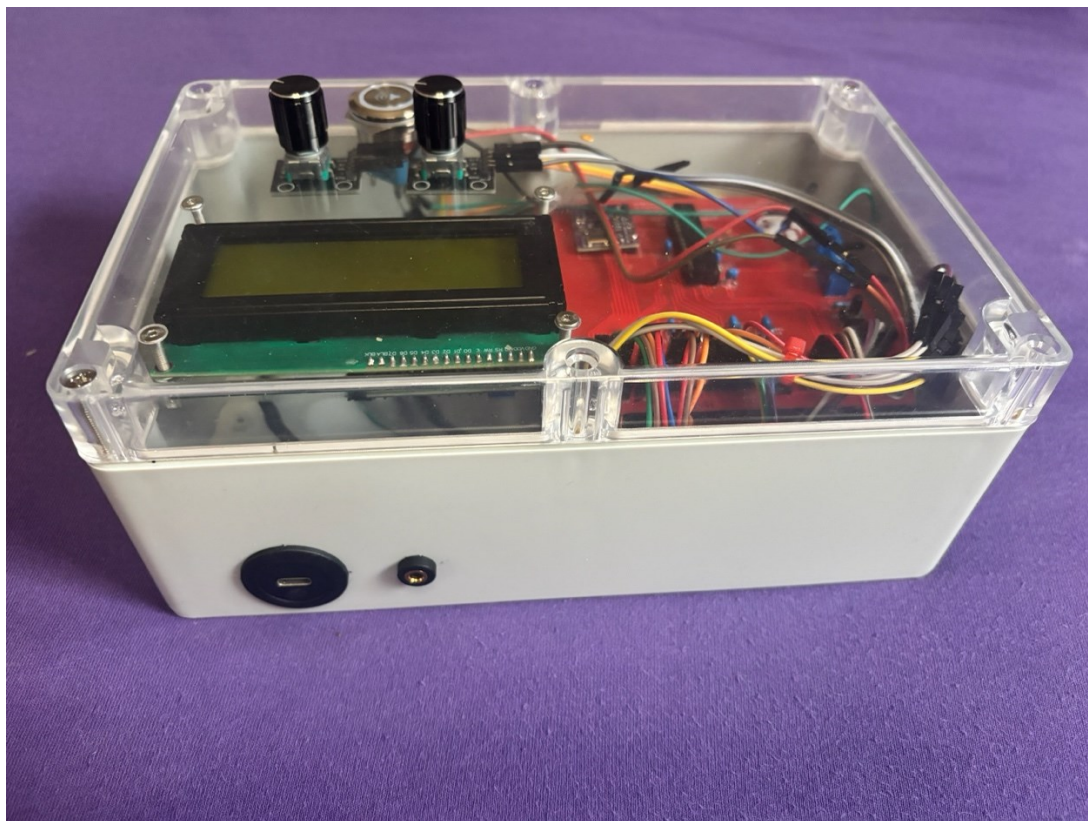
Zapojení a rozmístění součástek bylo navrženo v softwaru Eagle (dokumenty ze softwaru Eagle jsou dostupné v elektronické příloze).



Obrázek 20: Přední strana tónového audiometru - hl. menu

Na předním krytu audiometru jsou umístěny:

1. **Display** – slouží k orientaci ve firmwaru,
2. **Inkrementální enkodér 1** – slouží k ovládání kurzoru a výběru mezi jednotlivými položkami,
3. **Inkrementální enkodér 2** – slouží k nastavení hodnot frekvence a hladiny intenzity zvuku,
4. **Tlačítko pro pacienta** – umožňuje pacientovy vyslat signál programu o tom, že slyšel daný zvuk.



**Obrázek 21: Zadní strana tónového audiometru**

Na zadní straně krytu jsou umístěny:

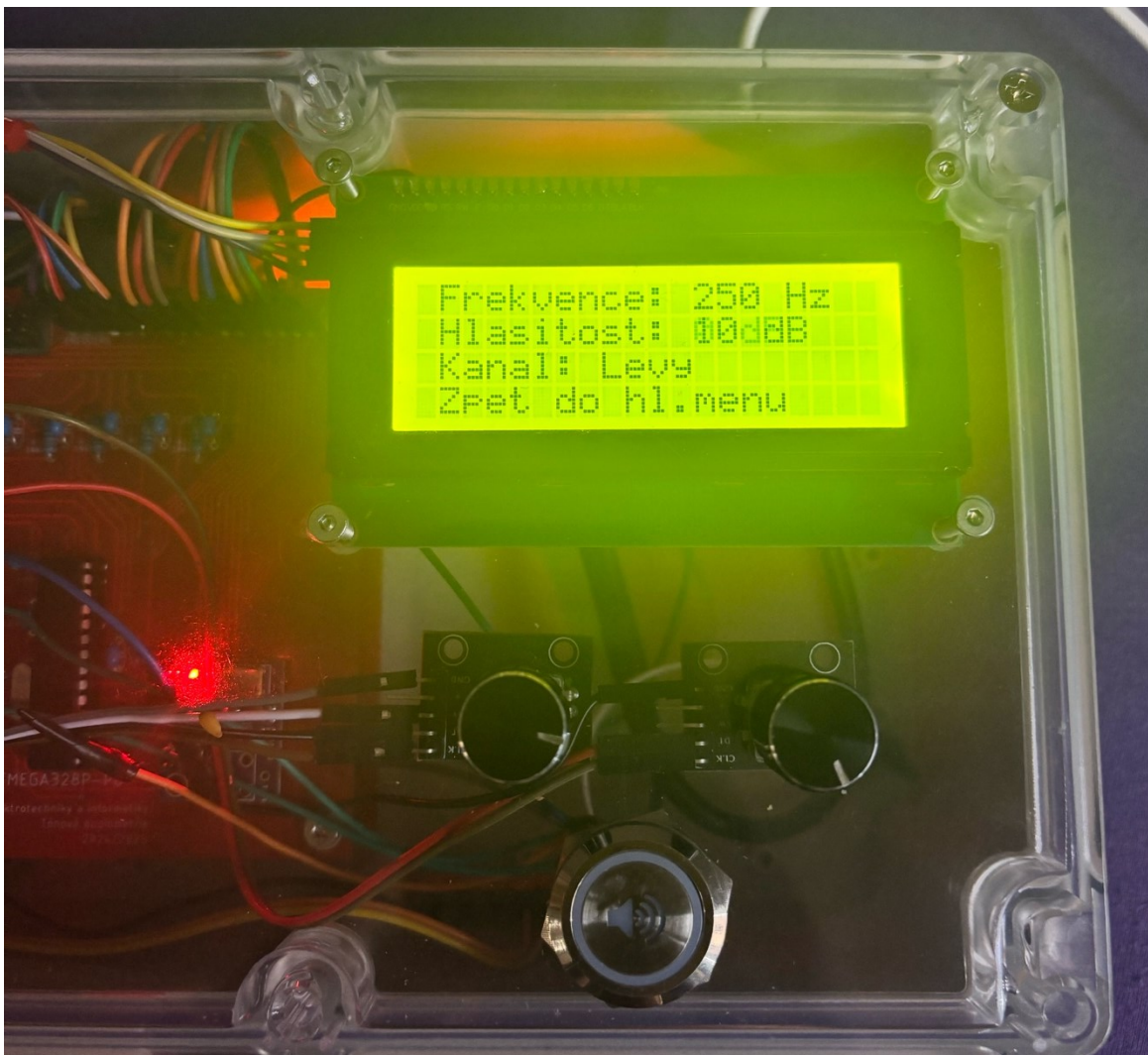
1. **USB-C konektor** – slouží k napájení audiometru a, v automatickém režim, pro odesílání dat do osobního počítače,
2. **Audio Jack 3,5mm** – slouží k připojení sluchátek pro pacienta.

Finální provedení audiometru má několik módů pro různé funkce použití:

#### **4.1 Automatický režim**

Po zvolení automatického režimu v hlavním menu se zapne sekvence, kdy se postupně zvyšuje hladina intenzity zvuku. Poté, co pacient stiskne tlačítko nebo intenzita hlasitosti překročí hodnotu 100 dB, se nastavená frekvence zvýší na další hodnotu. Poté, co jsou otestovány všechny kmitočty na jednom kanálu přepne se vysílání signálu na kanál druhý. Jednotlivé možné hodnoty v automatickém režimu:

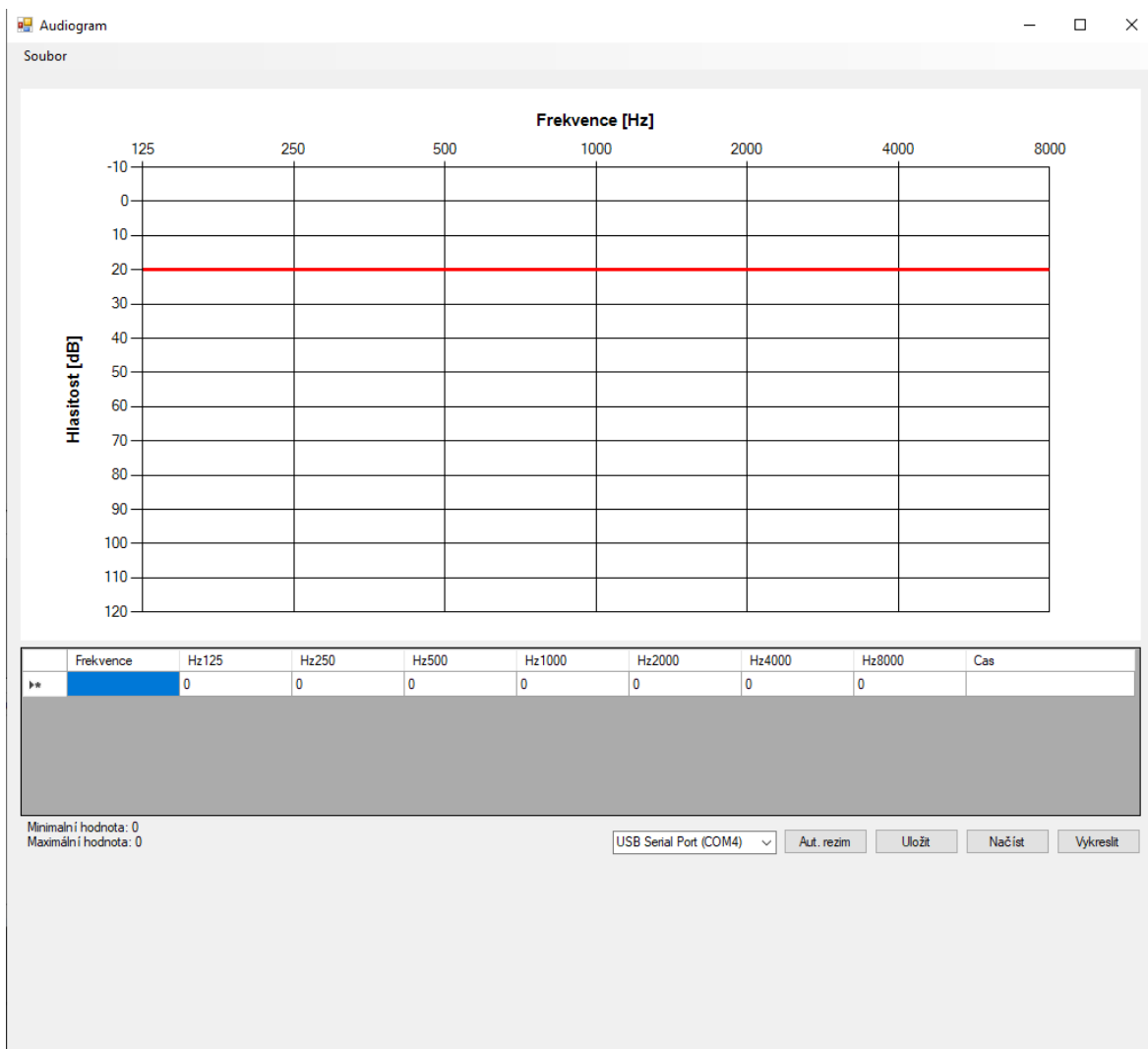
1. **Frekvence:** 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000,
2. **Hladina intenzity zvuku:** -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100,
3. **Kanály:** Levý, Pravý.



Obrázek 22: Tónový audiometr – automatický režim

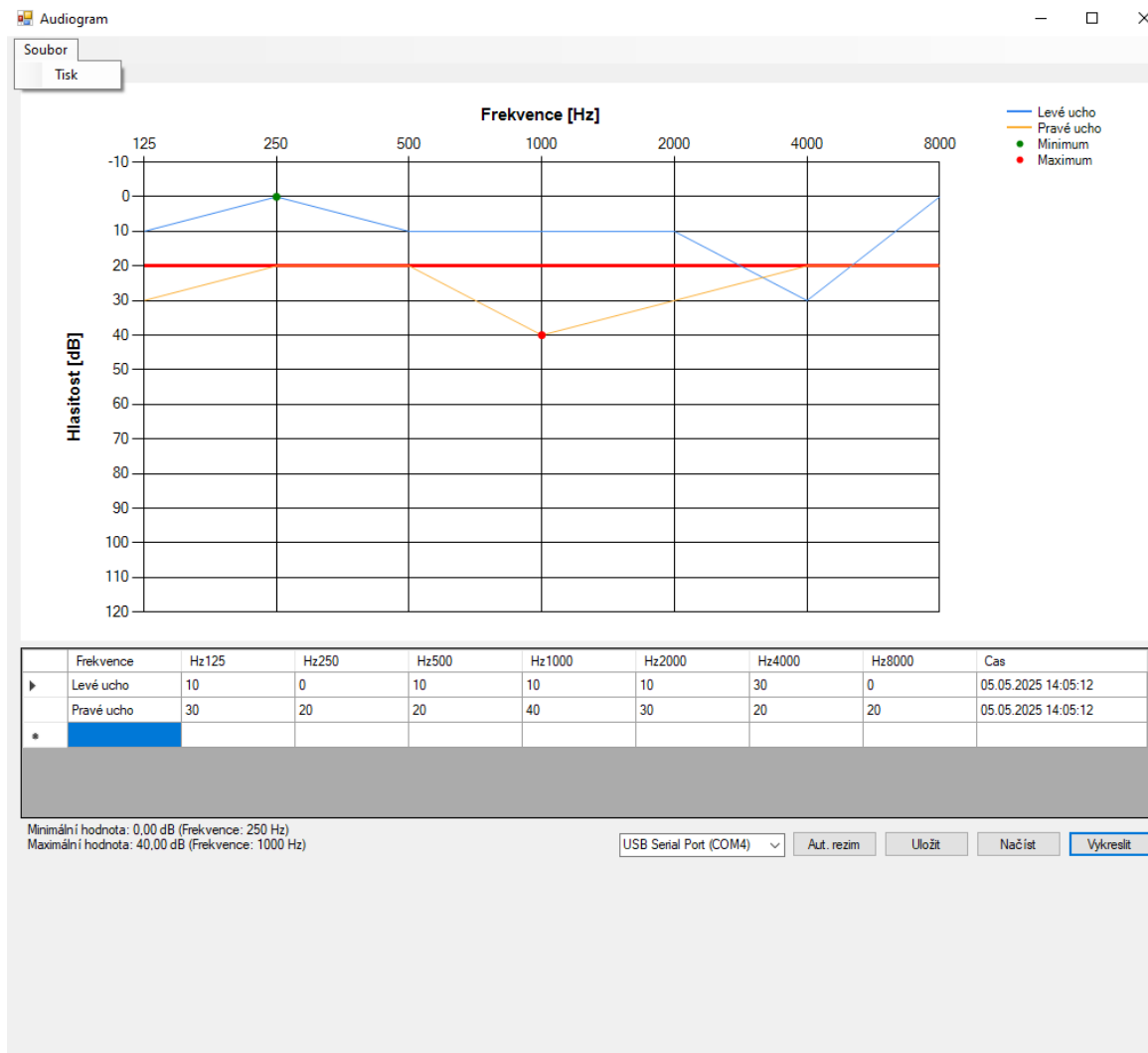
Poté, co pacient potvrdí že uslyšel tón, se v daný okamžik pošle, po komunikačním rozhraní UART, packet s informací ohledně signálu do osobního počítače a aplikace začne s vykreslováním audiogramu:

```
if (digitalRead(SAVE_BUTTON) == LOW) {  
  Serial.print("@");  
  Serial.print(kanal);  
  Serial.print(";");  
  Serial.print(freq);  
  Serial.print(";");  
  Serial.print(db);  
  Serial.println(";");  
}
```



**Obrázek 23: Aplikace k vytváření audiogramu**

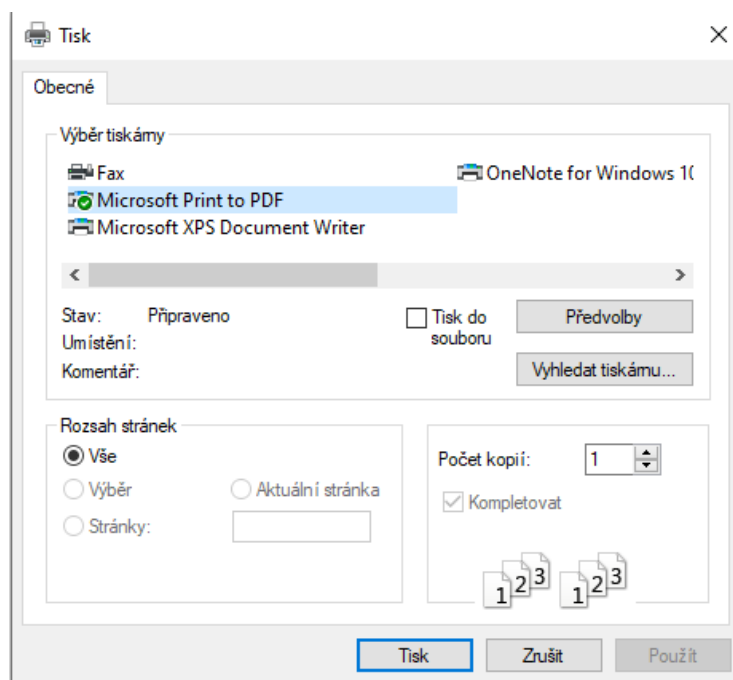
V aplikaci je nejdříve nutno zvolit správný sériový port (v tomto případě: USB Serial Port COM4). Následně zmáčkne tlačítko pro Aut. režim a poté můžeme zapnout na audiometru sekvenci s automatickým režimem.



**Obrázek 24: Aplikace k vytváření audiogramu – načtení dat**

Poté, co test skončí, se všechna data sama zapíší do tabulky v aplikaci. Pro vytvoření audiogramu je třeba stisknout tlačítko **Vykreslit**. Po stisknutí tohoto tlačítka se vytvoří graf v horní části aplikace a vyplní se poslední pole s aktuálním časem. Tyto výsledky je poté možno uložit. Dále se v grafu označí nejnížší a nejvyšší naměřená hodnota. Červená linie u 20 dB značí mírné překročení ztráty sluchu.

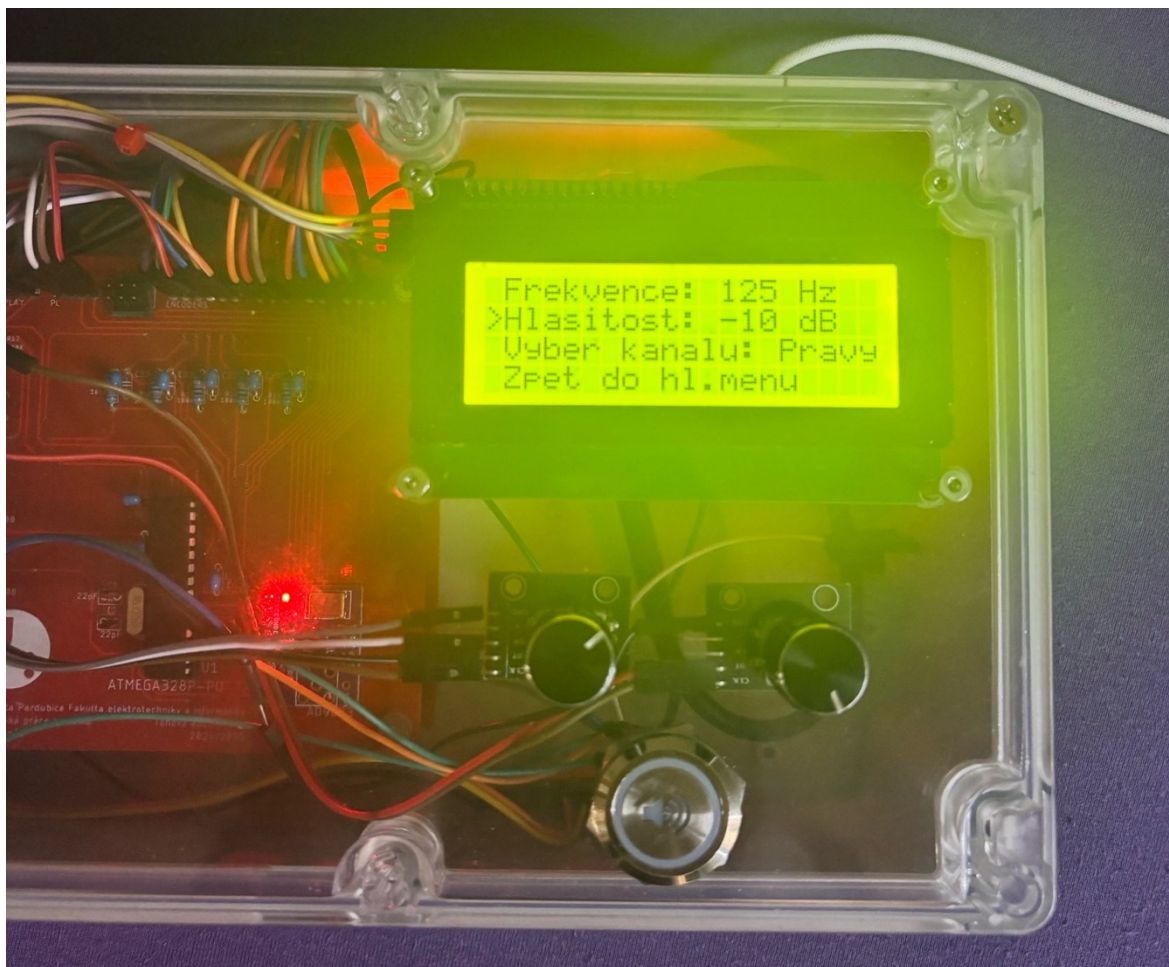
V levém horním rohu (obr.24) se nachází položka soubor, ve které je možnost vytisknout celý audiogram.



Obrázek 25: Tisk audiogramu

## 4.2 Manuální nastavení

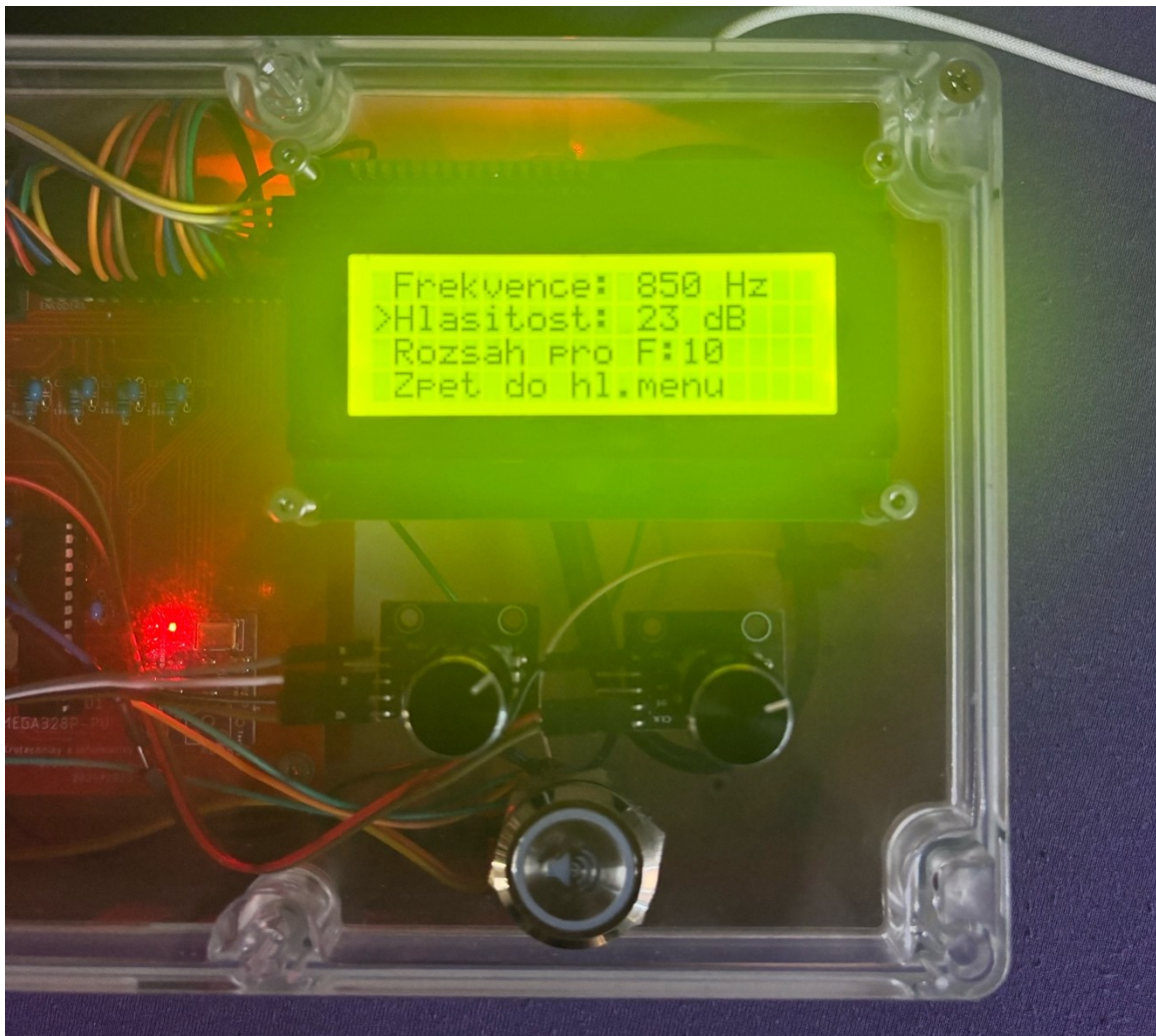
V tomto režimu se hodnota frekvence, hladina intenzity zvuku a výběr kanálu vybírají manuálně pomocí pravého enkodéru. Možnosti nastavených hodnot jsou stejné jako v automatickém režimu. Nastavování hladiny intenzity zvuku je zde po skoku jednoho dB, opět v rozsahu -10 dB až 100 dB.



Obrázek 26: Tónový audiometr – manuální nastavení

### 4.3 Jemné manuální nastavení

Tento režim umožňuje nastavit jednotlivé hodnoty frekvence v rozsahu 20 Hz až 20 000 Hz. Aby bylo umožněno efektivnější nastavování frekvence, je zde aplikována možnost výběru rozsahu, pomocí stisku levého enkodéru na řádku frekvence.



Obrázek 27: Tónový audiometr – jemné manuální nastavení

## 5 Měření parametrů signálu

Výsledný signál byl ovlivňován různými faktory jako třeba kvalita zdroje, či vzájemné ovlivňování kanálů. Níže jsou proto uvedeny výsledky měření jednotlivých parametrů.

### 5.1 Přesnost nastavené hodnoty kmitočtu

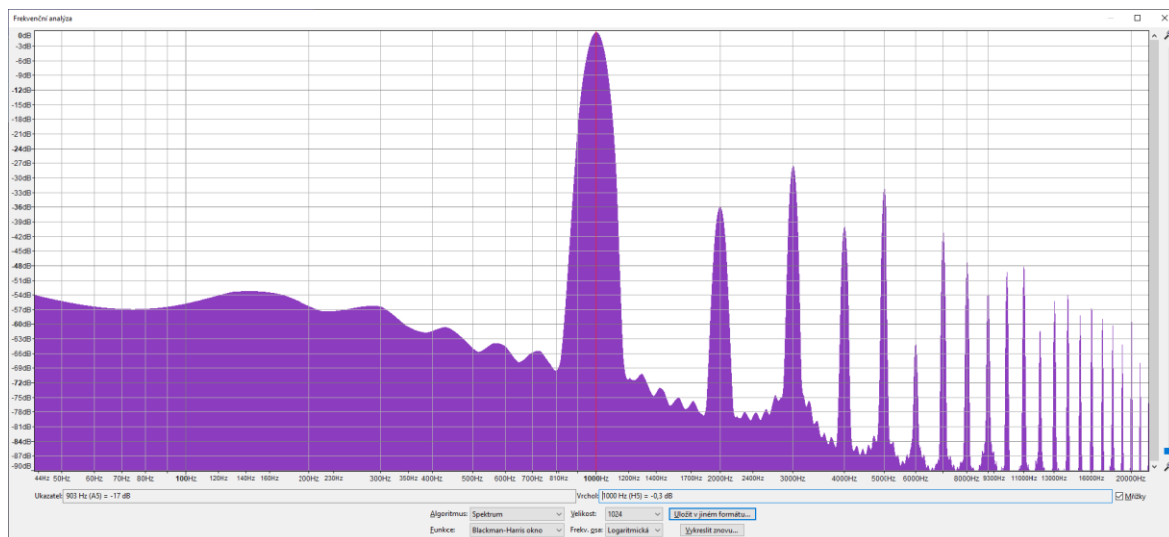
Cílem tohoto měření bylo ověřit, zda výsledné hodnoty DDS generátoru skutečně odpovídají nastavené hodnotě. Níže je uvedena tabulka s nastavenými hodnotami a hodnotami naměřenými.

Tabulka 6: Měření kmitočtů pro ověření nastavených hodnot

Nastavené hodnoty [Hz]	Naměřené hodnoty [Hz]
20	19,93
50	50,11
100	100,4
200	200,77
500	499,61
1000	998,36
2000	2005
4000	3995
8000	8003,7
20000	20062

### 5.2 Zkreslení signálu

Měření zkreslení sinusového signálu neboli THD, se vypočítá součtem výkonu vyšších harmonických vůči výkonu hlavní harmonické.



Obrázek 28: Měření zkreslení signálu

Níže je tabulka naměřených harmonických kmitočtů od 2kHz do 10kHz:

**Tabulka 7: Měření hodnot pro výpočet THD**

Harmonické kmitočty [kHz]	Naměřené hodnoty [dB]
2	-36
3	-27,6
4	-39,9
5	-32,1
6	-63,5
7	-41,1
8	-47,2
9	-52,4
10	-49,2

Vzorec pro výpočet THD napětí je:

$$\text{THD}_u = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad 5-1$$

Nejprve je však nutné převést naměřené hodnoty na hodnoty amplitud:

$$U = 10^{(dB/20)} \quad 5-2$$

Následně je i nutné tyto hodnoty pro finální výpočet umocnit:

**Tabulka 8: Výpočet hodnot jednotlivých harmonických**

Naměřené hodnoty [dB]	Přepočet na U	$U^2$
-36	0,015849	0,000251
-27,6	0,041687	0,001738
-39,9	0,010116	0,000102
-32,1	0,024831	0,000617
-63,5	0,000668	4,47E-07
-41,1	0,00881	7,76E-05
-47,2	0,004365	1,91E-05
-52,4	0,002399	5,75E-06
-49,2	0,003467	1,2E-05

První harmonická je rovna 0 dB proto po výpočtu pro  $U_1 = 1$ .

Po sečtení a doplnění do vzorce:

$$\text{THD}_u = \frac{\sqrt{0,002823}}{1} \cdot 100\% \quad 5-3$$

Vyjde výsledek  $\text{THD}_u = 5,31\%$

### 5.3 Odstup signál-šum

V tomto měření bylo za úkol zjistit, jak moc ovlivňuje šum výsledný signál. Měřený signál je na obrázku na kanálu 2. Osciloskop na funkci peak-to-peak naměřil, že hodnota napětí při nastaveném kmitočtu 1000 Hz je 1,3867 V. A pomocí kurzorů byla naměřena přibližná hodnota signálu bez šumu, která vyšla 1,3232 V.

Pro výpočet hodnoty šumu je třeba odečíst hodnotu signálu od hodnoty peak-to-peak:

$$U_{\text{šum}} = 1,3867 - 1,3232 = 0,0635 \text{ [V]}$$

Pro výpočet odstup signál šum je třeba použít vzorec:

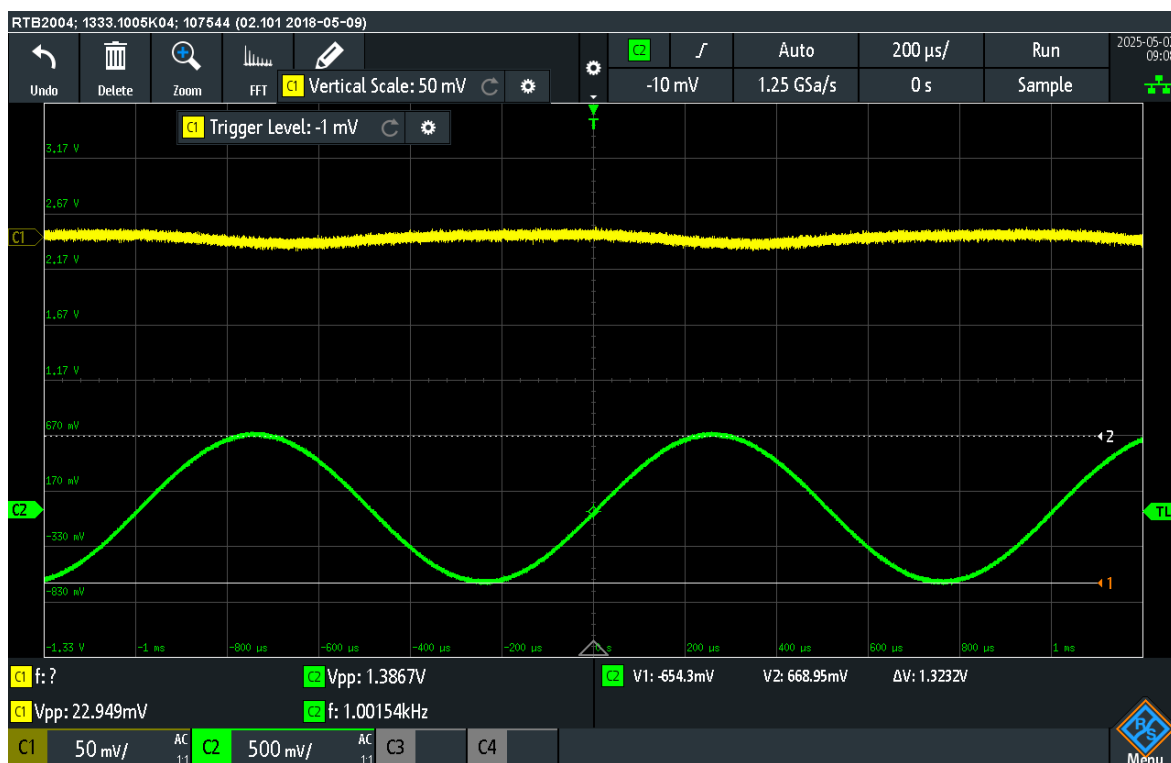
$$SNR = 20 \log \frac{U_{\text{signál}}}{U_{\text{šum}}} \text{ [dB]}$$

5-4

Po dosazení:

$$SNR = 20 \log \frac{1,3867}{0,0635} \approx 26.7841 \text{ [dB]}$$

5-5



Obrázek 29: Měření odstup signál-šum

## 5.4 Odstup mezi oběma kanály

Toto měření mělo ověřit, zda se kanály navzájem ovlivňují, když je jeden zcela vypnutý a na druhém je poslán signál do sluchátek. Nejprve bylo nutné úplně utlumit oba kanály a změřit na nich napětí.

Pro první kanál se napětí rovná:

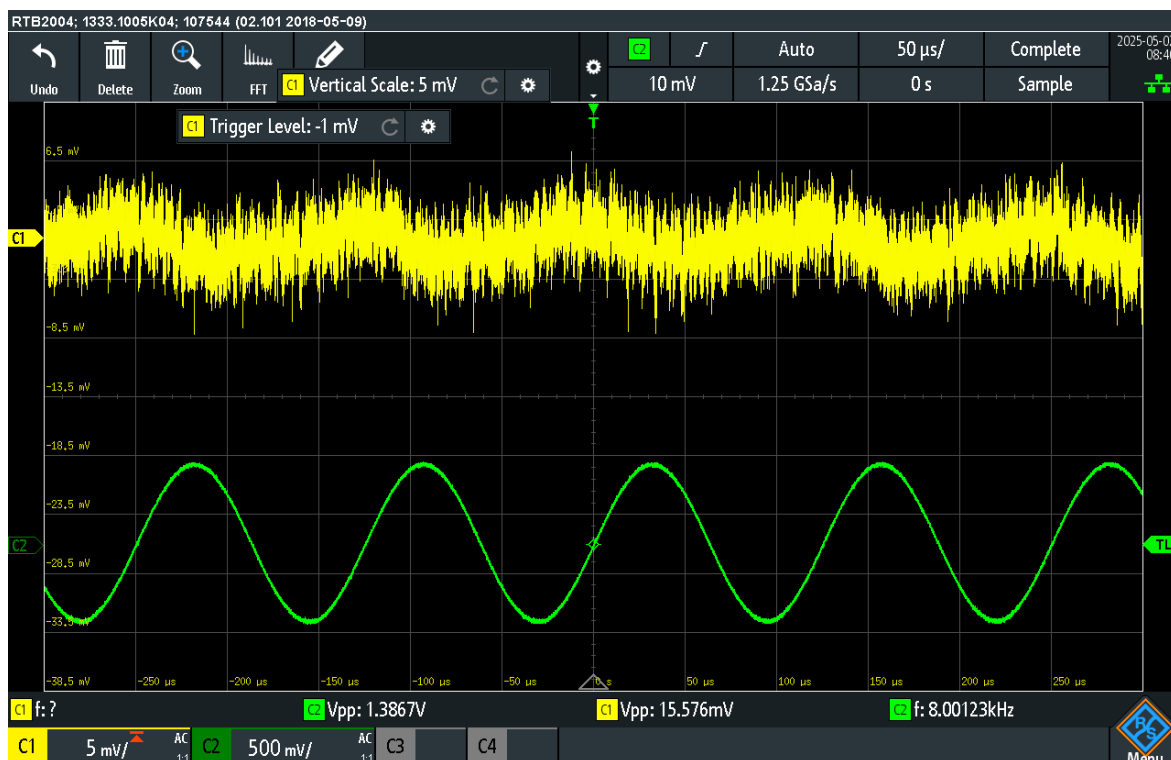
$$U_{K1} = 7,4219 \text{ mV}$$

5-6

Pro druhý kanál:

$$U_{K2} = 8,0078 \text{ mV}$$

5-7



Obrázek 30: Měření vzájemného ovlivňování kanálů

Při měření napětí na prvním kanálu, přičemž na kanálu dva je pouštěn signál o hodnotě 1,3862 V, vyjde napětí:  $U_1 = 15,576 \text{ mV}$ .

Po odečtení  $U_{K1}$  od  $U_1$  vyjde přidaná hodnota šumu způsobená druhým kanálem:

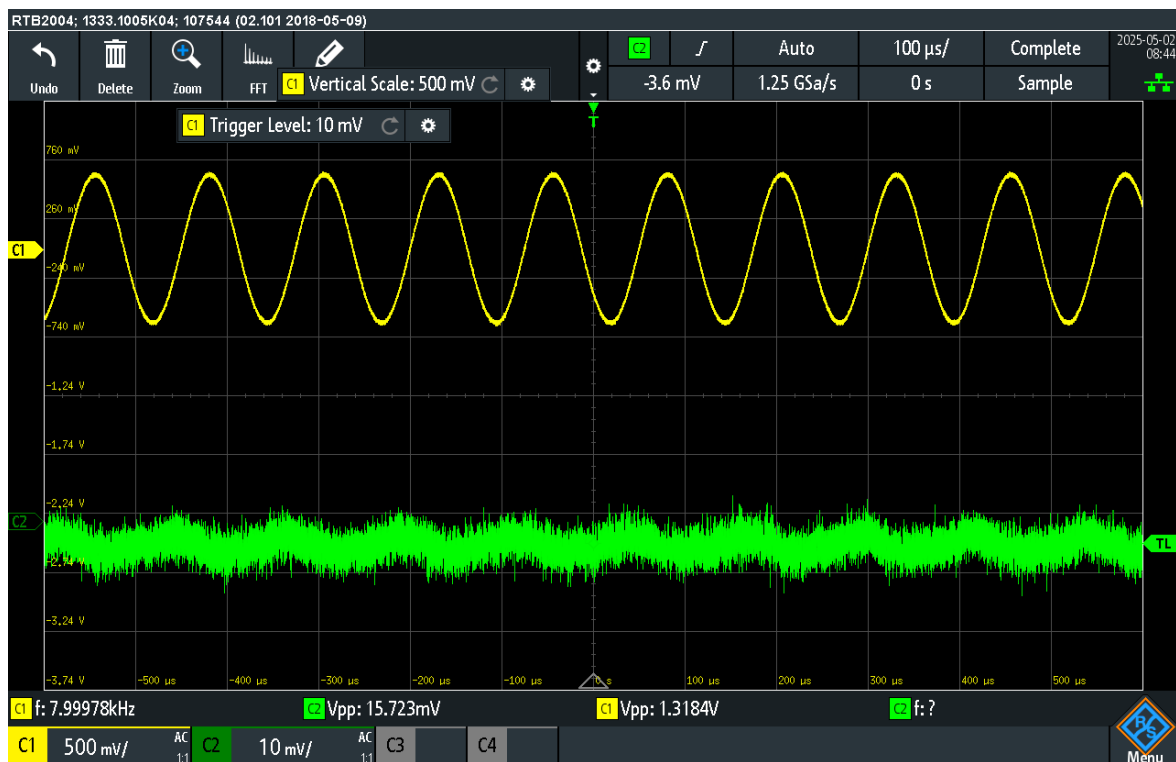
$$15,576 - 7,4219 = 7,994 \text{ mV}$$

5-8

Odstup kanálu jedna vůči kanálu dvě bude tedy:

$$20 \log(1,3862/0,007994) \approx 44,78 \text{ dB}$$

5-9



Obrázek 31: Měření vzájemného ovlivňování kanálů

Při měření napětí druhého kanálu, přičemž na kanálu jedna je pouštěn signál o hodnotě 1,3184V, vyjde napětí:

$$U_2 = 15,723 \text{ mV.} \quad 5-10$$

Po odečtení  $U_{K2}$  od  $U_2$  vyjde přidaná hodnota šumu způsobená druhým kanálem:

$$15,723 - 8,0078 = 7,7152 \text{ mV} \quad 5-11$$

Odstup kanálu dva vůči kanálu jedna bude tedy:

$$20 \log(1,3184/0,0077152) \approx 44,65 \text{ dB} \quad 5-12$$

Laboratorní měření bylo uskutečněno pomocí osciloskopu R&S®RTB2004. Přesnost měření je dána vybraným rozsahem měřeného napětí. Při použití citlivosti do 5mV/dílek byla odchylka v rozmezí  $\pm 1,5 \%$ . Za použití citlivosti větší, byla odchylka  $\pm 2\%$  (konkrétně u měření odstupů mezi oběma kanály).

## Závěr

Cílem této práce bylo uplatnění jednotlivých zkušeností z dob studia na vysoké škole, a to především znalostí z předmětů elektrotechniky, elektroniky, mikroprocesorové techniky a elektrických měření.

Nejzdlouhavějším podílem praktické části byl návrh desky plošných spojů, jelikož se ze zadání jednalo o kombinaci analogových a digitálních signálů, což pro návrh neslo jisté potíže. Dále jistý problém nesla konfigurace všech periférií mikroprocesoru a jejich fyzické umístění na kryt audiometru. Určité potíže také neslo vytváření obou firmwarů jak pro ATmega328P U, tak pro aplikaci vykreslování audiogramů v operačním systému Windows. Vnitřní zapojení je zhotoveno pomocí dokupovaných drátků, což není z praktického hlediska zcela ideální, jelikož často dochází k náhodnému odpojení některých z enkodérů či tlačítka pacienta. V budoucím provedení by bylo lepší využít slaněných vodičů, které by bylo možno zakrátit a přidělat na ně koncovky, bohužel těmito prostředky jsem v době konstrukce nedisponoval.

V teoretické části bylo důležité seznámit čtenáře s problematikou sluchových poruch, a využití tónových audiometrů. Dále zde byl kladen důraz na popis čipu atenuátoru, DDS generátoru a jednotlivých rozhraní využitých touto prací. Nejdůležitější částí bylo však konečné měření výstupních signálů obou kanálů audiometru. Bohužel při měření zkrácení signálu došlo k chybě načítání screenshotu do osobního flashdisku, proto bylo měření uskutečněno přes osobní počítač za pomoci programu Audacity. Dále při porovnání výsledků odstupů mezi kanály došlo k závěru, že odstup mezi oběma kanály je cirká 44 dB, což není konstrukčního zcela ideální. Tato chyba by se dala do budoucna eliminovat lepším odstíněním jednotlivých kanálů k připojení do jacku. Avšak zařízení je i v potaz parazitním parametřům srovnatelné s konkurenčními zařízeními.

## Literatura

- [1] TECHMANIA SCIENCE CENTER. Intenzita zvuku [online]. Plzeň: Techmania Science Center, [cit. 2025-01-28]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/intenzita-zvuku>
- [2] SYMPTOMY.CZ. Ucho [online]. [cit. 2025-01-28]. Dostupné z: <https://www.symptomy.cz/anatomie/ucho>
- [3] INTERACOUSTICS. Pure tone audiometry: Introduction [online]. [cit. 2025-01-28]. Dostupné z: <https://www.interacoustics.com/academy/audiometry-training/pure-tone-audiometry/pure-tone-audiometry-introduction>
- [4] *Ušní, nosní a krční lékařství*. Galén, 1999. ISBN 80-7262-017-7.
- [5] HEAR.COM. What is an audiogram & how to read it? [online]. [cit. 2025-01-28]. Dostupné z: <https://www.hear.com/resources/hearing-loss/what-is-audiogram-how-to-read-it/>
- [6] WIKISKRIPTA. Audiometrie [online]. [cit. 2025-01-28]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Audiometrie>
- [7] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash [online]. [cit. 2025-01-28]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATMEGA328P>
- [8] ANALOG DEVICES. *AD9833: Low Power, Programmable Waveform Generator*. [online]. Analog Devices, 2017. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9833.pdf>
- [9] ANALOG DEVICES. *AD9834: 75 MHz Low Power DDS Waveform Generator*. [online]. Analog Devices, 2015. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9834.pdf>
- [10] ANALOG DEVICES. *AD9850: CMOS 125 MHz DDS/DAC Synthesizer*. [online]. Analog Devices, 1999. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>
- [11] ANALOG DEVICES. *AD9959: 4-Channel, 500 MSPS, 14-Bit DAC Direct Digital Synthesizer*. [online]. Analog Devices, 2008. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9959.pdf>
- [12] DAVID, Matoušek. *Programování mikrokontrolérů ATmega bez předchozích znalostí*. Brno: Computer Press, 2022. ISBN 978-80-251-5042-9.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. LM1971: Digitally Controlled Audio Attenuator [online]. [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1971.pdf>
- [14] NORFOLK INTERNATIONAL. Guide to tuning forks and how they work 2024 [online]. [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: <https://norfolk-intl.com/2023/12/02/guide-to-tuning-forks-and-how-they-work-2024/>
- [15] WIKISKRIPTA. Vyšetření sluchu [online]. [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Vyšetření\\_sluchu](https://www.wikiskripta.eu/w/Vyšetření_sluchu)

- [16] AUDITDATA. The history of audiometry and the evolution of audiometers [online]. [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: <https://www.auditdata.com/insights/blog/the-history-of-audiometry-and-the-evolution-of-audiometers/>

## **Příloha A – Schéma audiometru a návrh plošného spoje Audiometr.sch/Audiometrie.brd**

Schéma desky a návrh plošného spoje jsou dostupné v elektronickém souboru bakalářské práce.

## Příloha B – Zdrojový kód souboru testad9833.in

```
#define CS_AT1 4
#define CS_AT2 5
#define CS_AT3 6
#define CS_AT4 7
#define CLK 13
#define MOSI 11
#include "AD9833.h"
AD9833 AD(10);

void sendTo(uint8_t value, uint8_t chipSelect) {
    digitalWrite(chipSelect, LOW); // Aktivace zařízení
    digitalWrite(CLK, LOW);

    for (int i = 7; i >= 0; i--) {

        digitalWrite(MOSI, (value >> i) & 1); // Nastavení datového bitu
        delayMicroseconds(10);
        digitalWrite(CLK, HIGH); // Hodinový puls
        delayMicroseconds(10);
        digitalWrite(CLK, LOW);
    }

    digitalWrite(chipSelect, HIGH); // Deaktivace zařízení
}

void setup()
{
    pinMode(CS_AT1, OUTPUT);
    pinMode(CS_AT2, OUTPUT);
    pinMode(CS_AT3, OUTPUT);
    pinMode(CS_AT4, OUTPUT);
    pinMode(CLK, OUTPUT);
    pinMode(MOSI, OUTPUT);

    digitalWrite(CS_AT1, HIGH); // Deaktivace při startu
    digitalWrite(CS_AT2, HIGH);
    digitalWrite(CS_AT3, HIGH); // Deaktivace při startu
    digitalWrite(CS_AT4, HIGH);

    sendTo(0 , CS_AT1);
    sendTo(0 , CS_AT2);
    sendTo(0 , CS_AT3);
    sendTo(0 , CS_AT4);

    sendTo(3 , CS_AT1);
    sendTo(3 , CS_AT3); // 6 dB útlum

    sendTo(2 , CS_AT2);
    sendTo(1 , CS_AT4); // 3 dB útlum

    SPI.begin();
    AD.begin();
    AD.setFrequency(1000, 0); // 1000 Hz.
    AD.setWave(AD9833_SINE);
}

void loop()
{}
```

## **Příloha C – Zdrojový kód souboru ATmega328PURathZdenekBP**

Zdrojový kód firmwaru pro mikrokontroler ATmega328P U je dostupný v elektronickém souboru bakalářské práce.

## **Příloha D – Zdrojový kód souboru Audiometrie05.sln**

Zdrojový kód firmwaru pro vykreslování audiogramu, je dostupný v elektronickém souboru bakalářské práce.