

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Bakalářská práce

Hudební přehrávač s tvorbou psychoaktivní složky

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Daniel WÉBR**
Osobní číslo: **A18B0356P**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informatika**
Téma práce: **Hudební přehrávač s tvorbou psychoaktivní složky**
Zadávající katedra: **Katedra informatiky a výpočetní techniky**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s technikami tvorby akustických psychoaktivních komponent (binaural beats, alfa/beta/delta vlny, apod.), prostudujte mechanismy jejich přimíchávání do akustického signálu tak, aby nedocházelo k podstatné degradaci původního signálu.
2. Navrhněte a implementujte aplikaci, která bude přehrávat hudební záznamy (alespoň ve formátu MP3, ale raději i v jiných rozšířených formátech) s aditivně přidanou uživatelem zvolenou psychoaktivní komponentou.
3. Vyvinutou aplikaci důkladně otestujte, např. metodou subjektivního poslechového testu na několika subjektech, ovladatelnost aplikace pak také např. metodou scénářového testování.
4. Vše podrobně zdokumentujte a popište dosažené výsledky v textu bakalářské práce.

Rozsah bakalářské práce: **doporuč. 30 s. původního textu**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Dodá vedoucí bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Kamil Ekštein, Ph.D.**
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **6. května 2021**

L.S.

Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová
děkanka

Doc. Ing. Přemysl Brada, MSc., Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne 5. května 2021

Daniel Wébr

Abstract

This bachelor's thesis deals with the creation of a web application offering music playback together with a psychoactive component, which is exclusively represented by binaural beats. The aim of this music player is to combine music and binaural beats without compromising the musical quality. The intent of the theoretical part is to introduce the topics of sound, human hearing, digital sound processing, frequency analysis, music and binaural beats. This is followed by a practical part dedicated to the music player. There is described the process of designing, implementing and testing the application. Test scenarios and user tests were implemented to verify the functionality of the application. At the end of the thesis there is a description of suitable extensions.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou webové aplikace nabízející přehrávání hudby společně s psychoaktivní složkou, která je výhradně reprezentována binaurálními rytmy. Snahou tohoto hudebního přehrávače je spojení hudby a binaurálních rytmů bez narušení hudební kvality. Cílem teoretické části je seznámení se zvukem, lidským sluchem, digitálním zpracováním zvuku, frekvenční analýzou, hudbou a binaurálními rytmy. Následuje praktická část věnující se hudebnímu přehrávači. Je popsán proces návrhu, implementace a testování aplikace. K ověření funkčnosti jsou realizovány testovací scénáře a uživatelské testy. V závěru práce se vyskytuje popis vhodných rozšíření.

Obsah

1	Úvod	9
2	Zvukový signál	10
2.1	Barva tónu	11
2.2	Výška tónu	12
2.3	Hlasitost tónu	12
2.3.1	Akustický tlak	12
2.3.2	Akustická intenzita	13
2.3.3	Hladina akustického tlaku a hladina akustické intenzity	13
3	Lidský sluch	15
3.1	Weberův-Fechnerův psychofyzikální zákon	15
3.2	Křivky stejné hlasitosti	15
3.3	Váhové filtry	16
3.4	Vlastnosti sluchu	17
3.5	Maskování	18
3.5.1	Frekvenční maskování (kmitočtové)	18
3.5.2	Časové maskování (dočasné)	18
4	Skládání vln	19
4.1	Skládání vln stejných frekvencí	19
4.2	Skládání vln různých frekvencí	19
4.3	Skládání vln blízkých frekvencí	20
5	Digitální zvuk	21
5.1	Vzorkování signálu	22
5.2	Kvantování signálu	22
5.3	Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém	23
5.4	Aliasing	23
5.5	Dithering	24
5.6	Formáty kódování zvuku	24
6	Frekvenční analýza	25
6.1	Fourierova analýza	25
6.2	Princip nejistoty	26
6.3	Diskrétní Fourierova transformace	27

6.4	Rychlá Fourierova transformace	27
6.5	Krátkodobá Fourierova transformace	27
7	Hudba	28
7.1	Hudební interval	28
7.2	Stupnice	29
7.3	Konsonance a disonance	29
7.4	Způsoby ladění	30
7.5	Účinky hudby na člověka	31
8	Binaurální rytmy	33
8.1	Mozkové vlny	34
8.2	Pozitivní účinky	35
9	Návrh aplikace	36
9.1	Účel aplikace	36
9.2	Funkční požadavky	37
9.3	Volba platformy	37
9.4	Uživatelské rozhraní	38
10	Implementace aplikace	40
10.1	Využité technologie	40
10.1.1	TypeScript	40
10.1.2	Verzování aplikace	41
10.1.3	GitLab pages	41
10.2	Využité knihovny a prostředky	41
10.2.1	Web Audio API	41
10.2.2	Font Awesome	42
10.2.3	Adobe Fonts	42
10.3	Struktura projektu	42
10.4	Práce se zvukem v aplikaci	44
10.4.1	Frekvenční analýza skladby	45
10.4.2	Přidání binaurálních rytmů do zvukové stopy	45
10.4.3	Dynamická intenzita binaurálních rytmů	46
10.4.4	Dynamická základní frekvence binaurálních rytmů	46
10.4.5	Zvukové uzly v aplikaci	50
11	Testování aplikace	54
11.1	Testovací scénáře	54
11.2	Uživatelské testování	56

12 Možná rozšíření aplikace	59
12.1 Optimalizace vytváření efektu binaurálních rytmů	59
12.2 Optimalizace grafického rozhraní	59
12.3 Rozšířené možnosti přehrávání hudebních souborů	60
12.4 Optimalizace platformy aplikace	60
12.5 Optimalizace distribuce aplikace	61
13 Závěr	62
14 Přehled zkratk	63
Literatura	65
A Uživatelské hodnocení	69
B Návod na spuštění aplikace	70
C Uživatelská dokumentace	71
D Obsah přiloženého DVD	73

1 Úvod

Binaurální rytmy se poslední roky na internetu těší velké oblibě. Jedná se o speciální zvukové stopy, které jsou především využívány za cílem dosažení určitých duševních stavů. Mezi ně patří např. relaxace nebo soustředění. Těchto účinků se snaží docílit manipulací s mozkovými vlnami posluchače, ty mají totiž přímý vliv na psychický stav jedince.

Jestli a jak binaurální rytmy skutečně ovlivňují mozkové vlny není prokazatelně vědecky vysvětleno. I tak existuje početná skupina jejich pravidelných uživatelů, kteří jsou přesvědčeni, že příznivé účinky mají. Záměrem této bakalářské práce není jejich efekty potvrzovat či vyvracet.

Jedná se o frekvenčně blízké tóny přehrávané samostatně do levého a pravého ucha. Jejich poslech může působit monotónně, nezajímavě a pro některé jedince i nepříjemně. To může určitou skupinu uživatelů odrazovat od jejich pravidelného užívání. Cílem této práce je vytvořit hudební přehrávač kombinující právě binaurální rytmy a hudbu, tím docílit atraktivnějšího zážitku z poslechu. Kromě toho hudba sama o sobě má velkou vazbu na lidskou psychiku a emoce, proto může navíc přispívat k požadovaným efektům. Snahou aplikace bude co nejméně narušit hudební kvalitu přehrávané skladby, ale zároveň poskytovat benefity spojené s poslechem binaurálních rytmů.

Teoretická část bakalářské práce bude věnována tématům spojeným se zvukem, jeho zpracováním a analýzou, lidských sluchem, hudbou a následně právě binaurálními rytmy. Cílem praktické části je vytvořit a podrobně popsat průběh vzniku zmíněného hudebního přehrávače. Tento proces se bude skládat z několika kroků. Jako první bude uskutečněn návrh aplikace. Ten zahrnuje definici účelu aplikace, sepsání funkčních požadavků, volbu platformy a návrh uživatelského rozhraní. Následuje implementace aplikace. Budou popsány využití technologie a prostředky, struktura projektu a především hlavní problematika, kterou je zpracování a přehrání zvuku a binaurálních rytmů v aplikaci. Kvalita vytvořené aplikace bude následně ověřena testovacími scénáři a uživatelskými testy. Na závěr budou navržena vhodná rozšíření aplikace.

2 Zvukový signál

Zvuk je **mechanické kmitání** (vlnění), které se šíří pružným prostředím. Část spektra kmitů se projevuje jako slyšitelný zvuk, což je akustické kmitání pružného prostředí v pásmu frekvencí přibližně od 16 Hz do 20 kHz, schopné vyvolat zvukový vjem u člověka se zdravým sluchem. Zvuky mimo toto pásmo neslyšíme. Zvuky pod slyšitelnou hranicí označujeme jako infra-zvuk, zvuky nad slyšitelnou hranicí jako ultrazvuk. Vědní obor zabývající se zvukem se nazývá **akustika** [15].

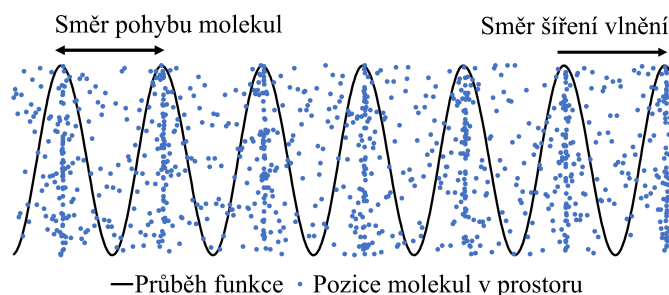
U plynů a kapalin se vyskytuje pouze **podélné akustické vlnění**, protože tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. V pevných elastických látkách se může vyskytovat vlnění podélné i příčné [13].

V médiu se tedy vytváří oblasti vyššího a nižšího tlaku (viz obrázek 2.1). Proto o zvukových vlnách se dá také mluvit jako o **tlakových vlnách**. Rychlost šíření těchto vln je proměnlivá a závisí na prostředí.

V technické akustice se **výchylka hmotného bodu**, kterým je přenášen akustický signál, značí písmenem u . Její časová závislost je dána rovnicí (2.1) [13].

$$u = u_0 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi) \quad (2.1)$$

Kde u_0 je amplituda akustické výchylky, ω frekvence a φ fázový posun.

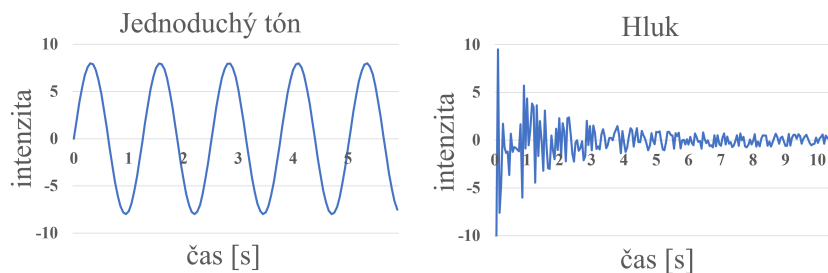


Obrázek 2.1: Šíření zvuku prostorem

Zvuky se dělí na dvě kategorie, kterými jsou **tóny** a **hluky** (viz obrázek 2.2). **Tóny** jsou charakteristické svým **periodickým** vlnovým průběhem. Vyskytují se především v hudbě a jako **samohlásky** v lidské řeči.

Většina hudebních nástrojů je vytvořena tak, aby vytvářela zvuky s periodickým průběhem (tóny). Právě takové zvuky jsou lidskému sluchu příjemné až atraktivní [6].

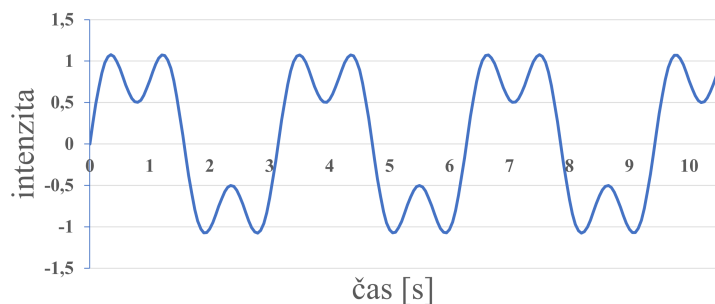
Hluky periodičnost postrádají. I tak jsou ale důležitou součástí hudby a lidské řeči. Můžeme do nich zařadit **souhlásky**. Své hudební znění získávají především **rytmickým** opakováním v hudbě. Mezi hudební nástroje vytvářející především neperiodické zvuky se řadí např. bubny nebo činely [6].



Obrázek 2.2: Tón a hluk

Zvukové tóny můžeme dále dělit na **jednoduché** a **složené**. Vlnovým průběhem **jednoduchých tónů** je funkce sinus. Takové průběhy mohou být plně popsány pomocí frekvence, maximální amplitudy a fáze. V přírodě se s takovými zvuky prakticky nesetkáme.

U **složených tónů** zvuk obsahuje kromě základní frekvence ještě i tzv. **vyšší harmonické frekvence** (viz kapitola 2.1). Každý složený tón má svoji **základní frekvenci**, také označovanou jako první harmonickou frekvenci. S ní se vlnový průběh opakuje.



Obrázek 2.3: Složený tón

Zvukové tóny mají tři základní charakteristiky, kterými jsou **barva**, **výška** a **hlasitost**.

2.1 Barva tónu

Barva tónu určuje, zdali kromě **základní frekvence** se ve zvuku vyskytují ještě tzv. **vyšší harmonické frekvence (aliquotní tóny)**. Jejich frekvence

se rovná celočíselnému násobku frekvence základní ($2\times, 3\times, 4\times, \dots$). Proto nemění základní frekvenci, ale pouze upravují tvar vlnového průběhu. Barva tónu je definována nejen počtem vyšších harmonických frekvencí obsažených ve složeném tónu, ale také jejich amplitudami [17]. Skupina kmitočtů s touto vlastností společně vytváří tzv. **harmonickou řadu (sérii)**.

Právě díky **aliquótním tónům** jsme schopni např. poslechem rozpoznat, o jaký se jedná hudební nástroj. Obecně nástroje s ostřejším zvukem (trubka, pozoun) mají silnější aliquotní tóny, které jsou lichým násobkem základní frekvence. Aliquotní tóny rovny sudému násobku základní frekvence dávají zvuku spíše teplo a měkkost. [33].

2.2 Výška tónu

Výška tónu je určena frekvencí. U jednoduchých tónů s harmonickým průběhem určuje frekvence těchto tónů **absolutní výšku tónu** [17]. Mluvíme-li o absolutní výšce tónu u složených tónů, myslíme tím první harmonickou frekvenci (základní frekvenci).

Pro subjektivní hodnocení zvuků je důležitější **relativní výška tónu**, která je určena podílem frekvence daného tónu k frekvenci **referenčního tónu**. V hudební akustice bývá často tímto referenčním tónem tón o frekvenci 440 Hz (komorní A), v technické praxi je to tón o frekvenci 1 kHz [17].

Protože **hudební tóny** využívají referenční tón, jedná o relativní vyjádření výšky tónu.

2.3 Hlasitost tónu

Hlasitost je **subjektivní** veličina, která není ovlivňována pouze fyzikálními vlastnostmi prostředí, ale mj. i lidskou fyziologií a psychikou. V této kapitole jsou popsány fyzické jevy mající vliv na výslednou hlasitost zvuku. V kapitole 3 je popsán vztah mezi těmito objektivními skutečnostmi a výslednou hlasitostí vnímanou subjektem.

2.3.1 Akustický tlak

Lidské ucho reaguje na výchylky od aktuální hodnoty **atmosférického tlaku** v prostředí. S tím souvisí změny celkového statického tlaku vzduchu p_s , který je dán součtem středního barometrického tlaku p_b a **akustického tlaku** p . Velikost akustického tlaku p , který lidské ucho vnímá, je přitom

řádově menší ve srovnání s barometrickým tlakem. Pro harmonický signál lze akustický tlak p měřený v Pa vyjádřit rovnicí (2.2) [13].

$$p = p_0 + \cos(\omega(\tau - \frac{x}{c})) \quad (2.2)$$

Kde p_0 je amplituda akustického tlaku, x vzdálenost od počátku šíření a c konstanta rychlosti šíření v homogenním prostředí.

2.3.2 Akustická intenzita

Adekvátní veličina s akustickým tlakem je **akustická intenzita** I , která je definovaná podílem výkonu P zvukového vlnění a plochy S , kolmé na směr šíření, kterou vlnění prochází [17]. Její výpočet je dán rovnicí (2.3) a je měřena ve W/m^2 .

$$I = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

2.3.3 Hladina akustického tlaku a hladina akustické intenzity

Jelikož rozsah intenzit zvuků v přírodě je značný, a také proto, že lidské ucho vnímá zvuk spíše v logaritmické stupnici (viz Weberův-Fechnerův zákon v kapitole 3.1), zavádí se **hladiny akustických veličin** [3]. Ty převádějí jednotky do již zmíněné logaritmické stupnice, která výrazným způsobem snižuje řády [17].

Získáme tím **hladinu akustického tlaku** L_p a **hladinu akustické intenzity** L_i . Jednotky těchto veličin jsou dB. Referenční hodnoty jsou stanoveny jakožto minimální hodnoty, které ještě může lidské ucho při použití čistého tónu o frekvenci 1 kHz zaregistrovat. **Prahový akustický tlak** P_0 je standardně definován jako $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. **Prahová intenzita zvuku** I_0 je standardně definována jako 10^{-12} W/m^2 . Výpočet hladiny akustického tlaku je dán rovnicí (2.4) a výpočet hladiny intenzity zvuku rovnicí (2.5) [13].

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (2.4)$$

$$L_i = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.5)$$

Hladina akustické intenzity a **hladina akustického tlaku** si nejsou zcela rovny, protože pro obě veličiny jsou stanoveny nezávisle referenční hodnoty I_0 a P_0 . Referenční hodnoty si odpovídají jen pro určitou hodnotu vlnového odporu prostředí. Hodnota je splněna jen pro vzduch a určité atmosférické podmínky, tj. pro určitý tlak a určitou teplotu. Při těchto podmínkách

jsou si hladina akustického tlaku a hladina intenzity zcela rovny. Ovšem v rozmezí běžných atmosférických podmínek bývá rozdíl mezi hladinou intenzity a hladinou akustického tlaku menší než 0,2 dB, a tak se rozdíl mezi hladinou intenzity a hladinou akustického tlaku většinou zanedbává [3] [13].

$$L_i = L_p - 0,2 \cong L_p \quad (2.6)$$

3 Lidský sluch

Sluchový vjem je **akustická informace** zachycená lidským **sluchovým orgánem** a zpracovaná mozkiem. Proto se ve sluchových vjemech projevují jevy, které nemají fyzikální podstatu. Přesto však lze říci, že základním akustickým fyzikálním veličinám odpovídají vlastnosti sluchového vjemu. **Akustické intenzitě a tlaku** odpovídá **hlasitost**, **kmitočtu** odpovídá **výška tónu a spektrálnímu (frekvenčnímu) složení** akustické vlny **barva tónu**. Tyto souvislosti však nejsou jednoduché [3].

Vztahy mezi fyzikálním a psychickým světem se zabývá **psychofyzika**, konkrétně vnímáním zvuku se zabývá **psychoakustika**.

3.1 Weberův-Fechnerův psychofyzikální zákon

Mezi velikostí **podnětu** (fyzikální příčiny) a velikostí **fyziologického** vjemu je **logaritmická** závislost. Objevil to německý fyziolog Ernst Heinrich Weber (1795 – 1878). Později ji zdůvodnil zakladatel psychofyziky, Němec Gustav Theodor Fechner (1801 – 1887). Weberův-Fechnerův psychofyzikální zákon tedy říká: „Mění-li se fyzikální podněty působící na naše smysly řadou geometrickou, vnímáme jejich změnu v řadě aritmetické.“ Tato závislost tedy platí mj. i pro vnímání hlasitosti a frekvence zvuku [17].

3.2 Křivky stejné hlasitosti

Citlivost lidského sluchu na různé frekvence různých intenzit je popsána pomocí **křivek stejné hlasitosti** neboli **izofónami**. Dnes standardizované křivky (ISO 226:2003) vychází z **Fletcher-Munsonových křivek** popsaných v roce 1933. Znázorněny jsou na obrázku 3.1.

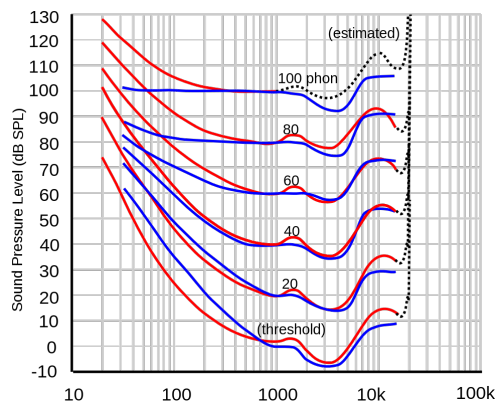
Hladina hlasitosti pro tón frekvence 1 kHz je rovna hladině akustického tlaku (viz rovnice 3.1) [3].

$$L_N = L_p \quad (3.1)$$

Tónu o frekvenci 1 kHz splňující tuto podmínku říkáme **referenční zvuk**.

Pro ostatní kmitočty je nutno hladinu hlasitosti stanovit **porovnáním s referenčním zvukem**. Otologicky normální osoba (osoba, jejíž sluchový

orgán má vlastnosti stanovené konvencí) musí zvuk o jiné frekvenci než 1 kHz slyšet stejně hlasitě jako referenční zvuk. Docílíme toho tak, že intenzitu zvuku při zkoumané frekvenci buď zesílíme nebo zeslabíme podle citlivosti lidského sluchového orgánu. Tímto způsobem dostaneme grafické vyjádření vztahů mezi **hladinou intenzity** zvuku a **hladinou hlasitosti**, kterým jsou křivky stejné hlasitosti. Podél křivky je hladina hlasitosti **konstantní**. Tyto křivky jsou zároveň křivkami citlivosti lidského sluchového orgánu. Vyšší hodnota křivky je nižší citlivost lidského sluchového orgánu [3]. Bezrozměrnou jednotkou hladiny hlasitosti je **fón (Ph)**.

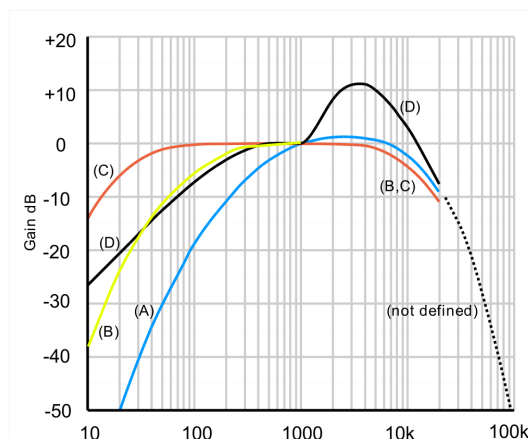


Obrázek 3.1: Porovnání Fletcher-Munsonových křivek (modře) s křivkami definovanými v ISO 226:2003 (červeně) [39]

Měření ukázala, že hladina hlasitosti ve fónech nevyjadřuje přesně míru fyziologického vjemu zvuku. Proto byla zavedena přesnější veličina **hlasitost N**. Jednotkou hlasitosti je bezrozměrný **son**. Tuto hlasitost má zvuk o hladině hlasitosti 40 Ph [3].

3.3 Váhové filtry

Mezinárodně byly definovány čtyři **váhové filtry označované A, B, C, D** (viz obrázek 3.2). Ty jsou inverzní ke křivkám stejné hlasitosti. Nejpoužívanější je A-křivka, která odpovídá křivce stejné hlasitosti o hlasitosti 40 Ph. Používá se ale obecně pro všechny hlasitosti a převedená hodnota intenzity zvuku je pak udávána v dB(A) [22].



Obrázek 3.2: Filtr A (modře), B (žlutě), C (červeně), D (černě) [39]

3.4 Vlastnosti sluchu

Frekvenční rozsah zvuku, který většina lidí vnímá, začíná kolem 16 Hz a dosahuje k 16 kHz (teoreticky je oblast slyšitelnosti 16 Hz – 20 kHz). S rostoucím věkem horní hranice výrazně klesá. Nejvýznamnější rozsah je 2 – 4 kHz, který je nejdůležitější pro srozumitelnost řeči a na něj je lidské ucho nejcitlivější. Nejvyšší informační hodnota řeči je přenášena v pásmu 0,5 – 2 kHz [21].

Zvuky, které u posluchače vyvolají sluchový vjem lze zařadit do tzv. **sluchového pole** (viz obrázek 3.3). Jeho tvar je individuální pro každého člověka. Zdola je vymezen křivkou, popisující práh slyšitelnosti (zvuky pod tímto prahem neslyšíme), seshora pak křivkou prahu bolesti (zvuky nad tímto prahem vyvolávají bolestivý vjem a mohou vést k poškození psychiky i samotného sluchového orgánu) [15].

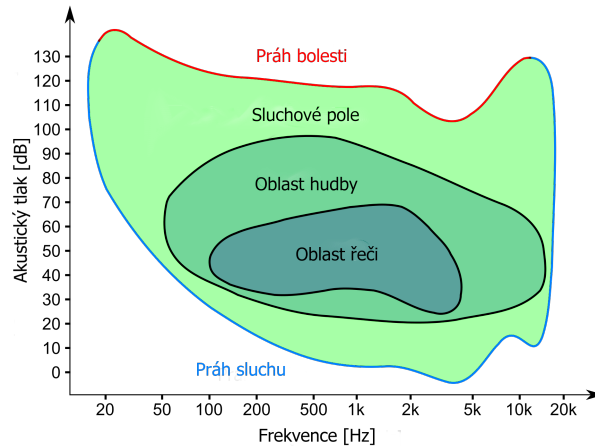
Dynamický rozsah lidského ucha (rozdíl mezi nejhlasitějším a nejtišším vnímatelným zvukem) je uprostřed slyšitelného frekvenčního pásma asi 120 dB. Na okrajích pásma je mnohem menší [21].

Schopnost **rozlišit frekvence tónů** se u každého člověka liší a je frekvenčně závislá. Uprostřed slyšitelného frekvenčního pásma za ideálních podmínek lze rozlišit změnu frekvence o několik centů¹. Na okrajích pásma je rozlišovací schopnost výrazně nižší [21].

Je patrné, že lidský sluch je **málo citlivý na tóny o nízké frekvenci**. Tato citlivost se ještě více snižuje u zvuků slabé intenzity. Proto například hudební skladby přehrávané s malou intenzitou zvuku často postrádají hlu-

¹1/100 temperovaného půltónu

boké tóny. Naopak po zvýšení intenzity zvuku mohou být nízké tóny výrazné až moc.



Obrázek 3.3: Sluchové pole [40]

3.5 Maskování

Maskování je jev, při kterém jeden ze zvuků **částečně nebo zcela překryje druhý**, a tím potlačí jeho slyšitelnost. Dělí se na časové a frekvenční [16].

3.5.1 Frekvenční maskování (kmitočtové)

Frekvenční maskování je jev, při kterém se vyskytuje maskující zvuk ve **stejném okamžiku** jako maskovaný. V případě tónového zvuku se maskování projevuje v kmitočtovém okolí maskujícího signálu. To, jak velké je maskovací okolí, do velké míry ovlivňuje intenzita maskujícího zvuku [24].

3.5.2 Časové maskování (dočasné)

Efekt maskování se projevuje nejen při současném znění zvuků, ale také v případě, kdy maskující **zvuk zní před a po znění zvuku maskovaného**. První případ nazýváme **pre-masking**. Tento efekt se projevuje v řádu několika ms a je způsoben rychlejším zpracováním silnějšího podnětu. Když maskovaný zvuk časově předchází maskující, mluvíme o **post-masking** (také dodatečné maskování) [24].

4 Skládání vln

Složené kmitání je kmitání, které vzniká skládáním (superpozicí) několika kmitavých pohybů v pohyb jeden. Mají-li jednotlivé harmonické kmitavé pohyby okamžité výchylky y_1, y_2, \dots, y_n , je okamžitá výchylka výsledného kmitání rovna $y = y_1 + y_2 + \dots + y_n$. Časový průběh výsledného kmitání závisí na **amplitudě** okamžité výchylky, **frekvenci** a **počáteční fázi** jednotlivých jeho složek [17].

Pro jednoduchost bude v této kapitole popsáno pouze skládání dvou vlnění šířících se ve **stejně přímce a směru**. Tento případ je totiž při zpracovávání zvukového signálu nejvíce podstatný.

4.1 Skládání vln stejných frekvencí

Výsledné vlnění je opět **harmonické** vlnění se **stejnou frekvencí** ω jako obě dílčí akustická vlnění. Má ale obecně jinou **amplitudu** u_0 a jiný **fázový posun** φ . Velikost amplitudy tohoto vlnění závisí na rozdílu fázových úhlů obou vlnění [13].

Zvláštním případem tohoto vlnění může být situace, kdy dochází k vzájemnému rušení obou vlnění (tzv. protifáze). Takový děj nastane tehdy, jestliže amplitudy obou vlnění jsou stejné a fázový posun mezi těmito vlněními je roven π [13]. Tohoto efektu se například využívá u technologií **aktivního potlačování zvuku**.

4.2 Skládání vln různých frekvencí

Superpozicí harmonických kmitání různé frekvence vzniká kmitání, které již nemá sinusový průběh a nemusí být vždy periodické. Periodické je v případě, že frekvence složek jsou v **poměru celých čísel**. Jestliže např. frekvence f_1, f_2 dvou kmitání jsou v poměru celých čísel k_1, k_2 ($f_1 : f_2 = k_1 : k_2$), pak pro frekvenci výsledného kmitání platí vztah (4.1) [14] [1].

$$f = \frac{f_1}{k_1} = \frac{f_2}{k_2} \quad (4.1)$$

Zvláštní případ nastane při superpozici kmitání, pro která platí $f_k = k f_z$, kde $k = 1, 2, 3, \dots$ a f_z je **základní frekvence**. Kmitání s frekvencí $f_1 = f_z$ je **první harmonická složka** (v akustice základní tón). Kmitání s frekvencemi $f_2 = 2f_z, f_3 = 3f_z, \dots$ jsou **vyšší harmonické složky** (v akustice vyšší

harmonické tóny) [14]. Vyšší harmonické složky způsobují zbarvení tónu (viz kapitola 2.1).

4.3 Skládání vln blízkých frekvencí

Tento případ složeného kmitání označujeme jako **rázy (zázněje)**. Výsledné kmitání je harmonické a jeho frekvence je aritmetickým průměrem frekvencí složek [1].

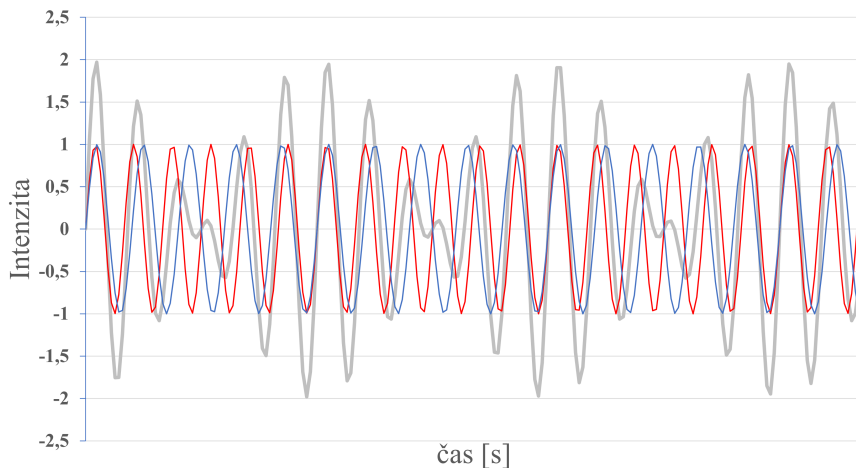
$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (4.2)$$

Amplituda výsledného kmitání periodicky kolísá (viz obrázek 4.1). Její frekvence je rovna rozdílu frekvencí složek (viz rovnice 4.3) [1].

$$f_r = f_1 - f_2 \quad (4.3)$$

Při postupném přibližování frekvencí se frekvence rázů zmenšuje, až při $f_1 = f_2$ rázy zanikají. Tohoto jevu se využívá v technické praxi např. při měření frekvence [17]. V hudební praxi se využívá při ladění nástroje podle referenčního tónu (např. z ladičky).

Pro rázy se často používá označení **zázněje**. Akustická terminologie někdy označuje jako rázy kmitání o frekvenci v oblasti pod 20 Hz a jako zázněje rozdílové tóny o frekvenci nad 20 Hz [1].



Obrázek 4.1: Skládání vln blízkých frekvencí

5 Digitální zvuk

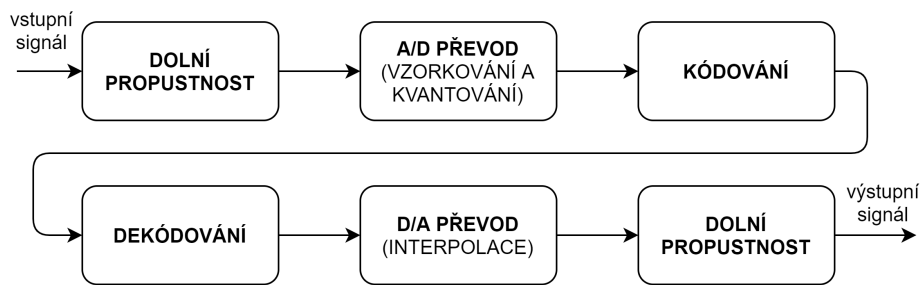
V minulosti se zvukový signál uchovával výhradně spojitou křivku představovanou určitou fyzikální veličinou (např. magnetickým polem). Tento způsob reprezentace dat je často označován jako **analogový**. Jako první zaznamenal zvuk roku 1877 Thomas Alva Edison pomocí fonografu. Mezi nejpopulárnější analogová média pro záznam zvuku patřily vinylové desky a magnetické pásky. Výhodou byl záznam spojitého signálu. Nevýhodou bylo, že kopírováním původního záznamu vždy dochází ke **zkreslení**, tedy **ztrátě kvality** záznamu. Dále měla analogová média oproti digitálním malou kapacitu, velké rozměry, byla náchylnější na poškození a opotřebování a často obsahovala kromě zvukového signálu také velké množství šumu [41].

Digitalizace zavádí **logické úrovně**. Ty v případě **binárních** dat jsou právě dvě. Pevně dané úrovně lze lépe odlišit a nedochází tedy ke ztrátám kvality při přenosu. Digitální zvuk je možno zpracovávat, generovat a ukládat (i za pomoci komprese) v počítači. Digitální popis zvuku není spojitý jako u analogového. Obsahuje ale informace jak tento spojitý průběh reprodukovat. Vlnový průběh je popsán **diskrétně**, je složen z konečného počtu hodnot amplitud v čase, které získáme tzv. navzorkováním původního signálu. Častou formou digitálního popisu signálu je **pulzně kódová modulace (PCM)** [35]. Proces této formy digitalizace signálu a zpětného převodu do analogové podoby je znázorněn na obrázku 5.1.

Proces funguje správně pouze na signálu, který je **frekvenčně omezený**. Před převodem analogového zvuku na digitální je tedy potřeba určit nejvyšší frekvenci, kterou chceme ještě zachovat. Signálu se následně odeberou všechny vyšší frekvence pomocí **antialiasingového filtru** (filtr typu dolní propust). Poté je provedeno **vzorkování** (kapitola 5.1) a **kvantování** (kapitola 5.2). Vznikne množina diskrétních vzorků (viz obrázek 5.2).

Následně je uskutečněno **kódování**, které má za úkol převod vzorků na čísla binární, která jsou součástí určitých kódů, např. inverzních, doplňkových, apod. [20] [17].

Při převodu digitálního zvuku na analogový projde schodový průběh digitálního signálu stejným filtrem typu dolní propustnost. Ten vyhladí hrany způsobené vysokými frekvencemi a vznikne hladký signál. I když se jedná o velice věrnou reprodukci signálu, nepodaří se perfektně obnovit nikdy. Je to především vlivem kvantizační chyby (viz kapitola 5.2) a dalších jevů [18].



Obrázek 5.1: Proces digitalizace zvukového signálu

5.1 Vzorkování signálu

Vzorkování je proces, při kterém se získá ze spojitého signálu **diskrétní** množství hodnot. **Vzorkovací frekvence** určuje, kolik vzorků se vytvoří za jednotku času. V praxi většinou 8 kHz, 16 kHz, 32 kHz, 44,1 kHz, 48 kHz, 96 kHz nebo 192 kHz.

Vzorkovací frekvence musí být $2\times$ vyšší než nejvyšší frekvence, která je v signálu obsažena (viz kapitola 5.3). Většinou chceme zachovat všechny frekvence, na které je citlivé lidské ucho. V praxi často volíme vzorkovací frekvenci vyšší než přesně dvojnásobek nejvyšší požadované frekvence, jelikož filtr typu dolní propustnost obecně nefunguje perfektně. Je tím větší pravděpodobnost zamezení poškození signálu jevem nazývaným **aliasing** (viz kapitola 5.4).

Vyšší vzorkovací frekvence vytváří větší množství hodnot, ale umí zachytit vyšší frekvence a může být žádoucí pro budoucí zpracování dat.

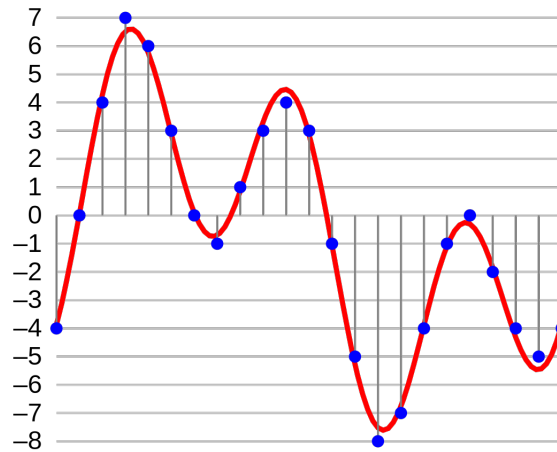
5.2 Kvantování signálu

Kvantizace je proces přiřazující vzorkům hodnoty z **konečné** množiny čísel. **Bitová hloubka** b určuje počet hodnot, ke kterým jsou vzorky přiřazovány. Celkem je tedy 2^b hodnot. Často užívané hodnoty jsou 16 bitů a 24 bitů.

Proces kvantování se řídí tzv. **rozhodovacími úrovněmi**, které se nacházejí v poloviční vzdálenosti mezi **kvantizačními hladinami**. Tento způsob kvantování, ve kterém jsou rozhodovací úrovně přesně v polovině vzdálenosti mezi kvantizačními hladinami, se nazývá **lineární kvantování** [17]. Aby bylo zřejmé, že se jedná o lineární rozdělení hladin, často je základní PCM kódování označováno jako LPCM [22].

Diskretizací signálu vzniká tzv. **kvantizační chyba** (rozdíl oproti sku-

tečné hodnotě signálu). Ta se ve výsledném signálu především projevuje jako **kvantizační šum** (zkreslení). Poměr šumu se často vyjadřuje v dB, jakožto poměr požadovaného signálu k šumu. Velká míra šumu je spojena s malou bitovou hloubkou (tedy velkou kvantizační chybou). Větší bitová hloubka disponuje kromě menší úrovně šumu také větším **dynamickým rozsahem**.



Obrázek 5.2: Digitální a analogový signál [39]

5.3 Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém

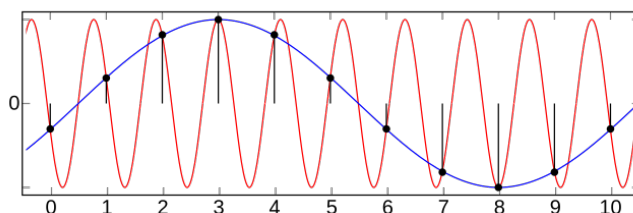
Také například nazývaný Nyquistův teorém (podmínka), Kotělnikovův teorém, vzorkovací teorém. Určuje **vzorkovací frekvenci**, se kterou se musí signál zaznamenat, aby ho bylo možné zpětně zrekonstruovat. Tvrdí, že vzorkovací frekvence musí být větší než **dvojnásobek nejvyšší obsažené frekvence** (viz rovnice 5.1). Při splnění podmínky existuje pouze jeden vlnový průběh, který protne všechny body a zároveň neobsahuje vyšší frekvence, než je stanoveno. Pokud vyšší frekvence signál obsahoval, dojde k nežádoucímu efektu nazývaného **aliasing** (viz kapitola 5.4).

$$f_{vz} > 2f_{max} \tag{5.1}$$

5.4 Aliasing

Aliasing je zkreslení signálu způsobené **podvzorkováním** při diskretizaci signálu. Dojde tedy ke **ztrátě informace** v okamžiku vzorkování. Pokud tento jev nastane, nelze již k vzorkům navzorkovaného původního signálu

najít správný spojitý časový průběh. Aby k tomu nedocházelo, musí vzorkovací frekvence splňovat Nyquistovo kritérium (viz kapitola 5.3). Frekvence nesplňující tuto podmínku se v datech projevují jako frekvence nižší (viz obrázek 5.3). Pro odebrání vyšších frekvencí se využívá **antialiasingový filtr** (filtr typu dolní propustnost). Ten před vzorkováním signálu odebere všechny vyšší frekvence než dvojnásobek vzorkovací. Jev se také např. vyskytuje u digitálního videa (např. rotující tělesa) a digitálního obrazu (moiré) [34] [20].



Obrázek 5.3: Aliasing [39]

5.5 Dithering

Dithering je proces záměrného **přidávání šumu** do signálu pro potlačení nežádoucích jevů způsobených **kvantizační chybou**. U digitálního zvuku pomáhá zachovat konstantní úroveň šumu rozprostřenou skrze všechny frekvence, a tím eliminuje nežádoucí rušivé zvuky. Možné je tvarování šumu, a tedy přesouvání šumu do frekvencí, kde je lidské ucho méně citlivé (viz kapitola 3.2). Celkové množství šumu tedy zůstane stejné, ale bude méně výrazné a rušivé.

5.6 Formáty kódování zvuku

Používají se pro přenos a ukládání digitálního zvuku. Většinou se liší podle toho, jaký využívají způsob **komprimování dat**. Dělí se na bezkompresní, ztrátově kompresní a bezztrátově kompresní. Zakódovaná zvuková data jsou většinou zapouzdřena v tzv. **kontejneru**, který obsahuje navíc metadata. Kódování a dekodování zvuku do určitého formátu zajišťuje nástroj označovaný jako **kodek**. Mezi nejznámější formáty kódování zvuku patří **MP3**, **FLAC** a **WAV**.

6 Frekvenční analýza

Frekvenční analýza zkoumá, jaké **harmonické frekvence** tvoří výsledný signál. K tomu je potřeba signál, který je popsán závislostí amplitudy v čase transformovat. Většinu funkcí lze vyjádřit jako superpozici harmonických funkcí, ovšem každé s jinou vahou a fázovým posuvem (zpravidla jsou obě hodnoty zahrnuty do komplexní váhové funkce). **Množina váhových koeficientů** tedy udává, jaké frekvence je nutno použít v superpozici, aby bylo možno z harmonických funkcí zpětně sestavit původní funkci. Tímto procesem se zabývají některé **integrální transformace** jako například Fourierova transformace, kosinová transformace a vlnková transformace. Obecně se dělí na **spojité** a **diskrétní** [35] [4].

Vzájemné uspořádání frekvenčních složek signálu je označováno jako **frekvenční struktura** a její numerický či grafický zápis jako **frekvenční spektrum**. Spektrum periodického signálu se vyznačuje tím, že obsahuje oddělené diskrétní složky, které vzájemně zaujímají harmonické vztahy, a proto je označováno jako **diskrétní** nebo **čárové** [1].

V dnešní době je nejpopulárnější metodou pro získání hodnot frekvenčního spektra Fourierova analýza díky její relativní jednoduchosti a rychlosti. Je vhodná pro řešení problematiky analýzy zvukového signálu v této bakalářské práci, proto následující texty se budou věnovat především jí. Ve vytvořené aplikaci bude tato metoda využita pro získání hodnot frekvenčního spektra hudební skladby, ty poslouží k dynamické konfiguraci parametrů binaurálních rytmů.

6.1 Fourierova analýza

Fourierova analýza je matematická metoda, která je úspěšně použitelná k analyzování signálů. V obecném případě se jedná o vyjádření funkce popisující signál v jiných proměnných pomocí integrální transformace (v podstatě vyjádření funkce v jiné bázi). Ve speciálním případě se uvažuje tzv. **trigonometrická Fourierova transformace**, která za bázové funkce pokládá $\sin(kt)$, $\cos(kt)$ nebo v komplexním tvaru e^{ikt} , kde k je celé číslo v případě **Fourierovy řady** nebo reálná proměnná v případě **Fourierovy transformace** [4].

Jedná se o dvojici rovnic. První rovnice transformuje časově závislý signál do frekvenčně závislého. Druhá rovnice provádí inverzní převod.

Využívá se **Eulerovy rovnosti**:

$$e^{xi} = \cos(x) + i \cdot \sin(x) \quad (6.1)$$

Při převodu signálu popsaného závislostí amplitudy v čase do frekvenčního spektra je výpočtem Fourierova koeficientu určen **poměr energie** zastoupené v daném frekvenčním pásmu a **fázový posun**.

Dělí se na několik rovnic dle vlastností zpracovávaného signálu:

- **Fourierova řada** – Fourier Series (FS) – Pro periodické funkce spojité v čase. Frekvenční spektrum je diskrétní.
- **Fourierova transformace** – Fourier Transform (FT) – Pro neperiodické funkce spojité v čase. Frekvenční spektrum je spojité.
- **Fourierova transformace s diskrétním časem** – Discrete-Time Fourier Transform (DTFT) – Pro neperiodické funkce diskrétní v čase. Frekvenční spektrum je spojité.
- **Diskrétní Fourierova transformace** – Discrete Fourier Transform (DFT) – Pro periodické funkce diskrétní v čase. Frekvenční spektrum je diskrétní.

Rovnice výpočtu koeficientů Fourierovy transformace a inverzní Fourierovy transformace, kde $\xi \in (-\infty, \infty)$ je frekvence a $2\pi\xi$ je úhlová frekvence, mají následující tvar [11]:

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi it\xi} dt \quad (6.2)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\xi)e^{2\pi it\xi} d\xi \quad (6.3)$$

6.2 Princip nejistoty

Všechny dvojice signálů v čase a jejich Fourierova obrazu jsou vázány **principem nejistoty**. Signálu krátkého trvání náleží ve Fourierovu obrazu široké frekvenční pásmo, tedy lze obtížně určit jeho přesnou frekvenci. U signálů delšího trvání platí opak. Tento princip je podobný s **Heisenbergovým principem neurčitosti** z kvantové mechaniky. Ten omezuje přesnost, s níž lze určit polohu částice a její hybnost [11].

6.3 Diskrétní Fourierova transformace

Jedná se o Fourierovu transformaci s **diskrétními daty**. Jelikož počítače pracují s konečným množstvím hodnot, používá se pro počítačové výpočty právě DFT. Počítá se pomocí **DFT matice**. Pro vypočtení je potřeba n^2 operací, tedy složitost je $\mathcal{O}(n^2)$.

Uvažujme vstupní signál (posloupnost) $f(n)$, $n = 0, 1, \dots, N - 1$. Necht $F(k)$ označuje Fourierovo spektrum (výsledek diskrétní Fourierovy transformace) signálu $f(n)$ a $k = 0, 1, \dots, k - 1$ frekvenci [11]. Vztahy pro DFT (rovnice 6.4) a inverzní DFT (rovnice 6.5) vypadají následovně:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (6.4)$$

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (6.5)$$

6.4 Rychlá Fourierova transformace

Známa také jako Fast Fourier Transform (FFT). Jedná se o algoritmus pro **efektivní výpočet DFT a inverzní DFT**. Využívá vlastnosti, že DFT posloupnosti délky N lze vyjádřit jako součet dvou DFT posloupností délky $N/2$, v jedné jsou liché a ve druhé sudé vzorky [11]. Je zapotřebí pouze $n \log_2(n)$ operací, což je veliký pokrok oproti počítání DFT nezjednodušenou metodou. V dnešní době je to velmi důležitý algoritmus. Využívá se například v kompresi zvuku a obrazu a řešení parciálních diferenciálních rovnic. Je často implementován v matematických knihovnách programovacích jazyků.

6.5 Krátkodobá Fourierova transformace

Známa také jako Short-Time Fourier Transform (STFT). Fourierova transformace pro signály vyvíjející se v čase je ovlivňována **celou délkou signálu** a není možná jakákoliv konkrétnější **časová lokalizace** tohoto popisu. STFT rozděluje signál na **stejně dlouhé úseky**, které jsou zvláště podrobeny Fourierově transformaci (nejčastěji FFT) [32]. To umožňuje částečnou časovou lokalizaci.

Na výstupní data STFT má zásadní vliv způsob, jak dojde k rozdělení signálu na úseky, neboli jaká váhová funkce je k tomuto aktu použita. Tato funkce se nazývá **okénkovou funkcí**. Při určení velikosti okénka je vhodné brát v potaz zmíněný princip nejistoty (viz kapitola 6.2).

7 Hudba

Snahy o definici hudby většinou nezbuzují u laické i profesionální veřejnosti velkou důvěru. Zavedení a určení, nebo dokonce objasnění obsahu či významu pojmu „hudba“ bývá často v obecných i specializovaných encyklopediích spojované s „druhem umění, jehož výrazovými prostředky jsou tóny a základními složkami harmonie, melodie, rytmus, a barva“. Současné definice též připouštějí, že hudba je organizovaný systém zvuků, jehož výběr, rytmické členění a systém uspořádání určují kvalitu, funkci a estetické působení hudby. Toto estetické působení hudby se může uplatnit pouze v rámci historicky proměnných pravidel a dobového vkusu za minimálního vlivu psychofyziologie slyšení. Definování hudby může být pojato i v mnohem širším smyslu „zvukového umění“, které zahrnuje nejenom tradičně i aktuálně pojímanou elektroakustickou hudbu, ale též její nejrůznější mediální i multi-mediální klony [7].

7.1 Hudební interval

V hudbě jsou převážně užívány jen definované tóny, jejichž relativní výšky jsou dány určitými poměry. Relativní výšku neboli poměr dvou absolutních výšek tónu nazýváme jako **hudební interval**. Základním intervalem je **oktáva**. Je to interval mezi dvěma tóny, jejichž poměr frekvencí je 2:1 [25].

Díky extrémní konsonanci oktávy vnímá lidský mozek dva tóny vzdálené o oktávu téměř jako totožné [23]. Proto tóny vzdálené o oktávu nazýváme stejně a doplňujeme, v jaké oktávě se nacházejí. Označení může být číselné (např. C4, C5, ...) nebo dle speciální čárkové notace (např. c' (jednočárkované c), c'' (dvoučárkované c), ...).

Mezi základní intervaly v hudbě patří:

- čistá prima – 1:1
- malá sekunda (půltón) – 16:15
- velká sekunda (tón) – 9:8
- malá tercie – 6:5
- velká tercie – 5:4
- velká kvarta – 4:3

- čistá kvinta – 3:2
- malá sexta – 8:5
- velká sexta – 5:3
- malá septima – 9:5
- velká septima – 15:8
- čistá oktáva – 2:1

7.2 Stupnice

Stupnice je řada tónů seřazených podle určitých pravidel od nejnižšího k nejvyššímu nebo naopak. Ve skladbách tóny ale většinou takto seřazeny nebývají. Naopak znějí v jiném pořadí, opakují se, vynechávají, zkrátka vytvářejí různá seskupení. Přesto ale zpravidla pocházejí z určité stupnice. Podle toho, ze které stupnice tóny ve skladbě vychází, říkáme, že jsou napsány v příslušné **tónině**, například v G dur. Tónina je tedy příslušnost tónového materiálu skladby k nějaké stupnici [5].

Mezi nejznámější stupnice se řadí **durové a mollové**. Můžeme se setkat s tvrzením, že samotný výběr stupnice má vliv na emoční působení skladby (mollová stupnice je smutná a durová veselá). Tento postoj ale vznikl již v době, kdy nebyly ustáleny způsoby ladění hudebních nástrojů jako dnes. Existuje nespočet skladeb, které toto tvrzení popírá, proto zaručeně nelze být považováno za fakt.

7.3 Konsonance a disonance

Pokud zní více tónů současně, jedná se o **souzvuk**. Jestliže souzvuk zní příjemně, říkáme, že je **konsonantní (libozvučný)**, naopak, pokud nezní příjemně, je **disonantní (nelibozvučný)**. Míru harmonie lze také určitým způsobem spočítat. Takové poměry frekvencí, které jsou tvořeny malými čísly, zní konsonantněji. Čím jednodušší je poměr frekvencí dvou tónů, tím konsonantnější je jejich interval. To z toho důvodu, že tyto frekvence mají více společných násobků. Libozvučnost souzvuku určuje tedy více vzájemný poměr frekvencí nežli jejich absolutní hodnoty [23] [1].

Souzvuky lze zařadit na stupnici od nejvíce konsonantního po nejméně. Jejich zařazení není zcela objektivní a i v průběhu staletí se obecný názor značně měnil. Dnes jsou převážně intervaly čisté primy, malé a velké tercie, velké kvarty, čisté kvinty, velké a malé sexty a čisté oktávy považovány za

konsonantní a další intervaly za disonantní. Disonantní intervaly se často projevují výskytem akustických zánějů (viz kapitola 4.3).

Hudba je silně spjata s kulturou, a tak ovlivňuje i náš názor na libozvučnost. Ta tedy není pouze ovlivňována intervaly tónů, ale také tím, na co jsme „zvyklí“. Výše popsané názory dnes sdílí velká část populace (především západní). V různých částech světa se ale mohou lišit.

Na závěr je nutné zmínit, že disonance není v hudbě zcela zavrhaná, jelikož pomáhá utvářet emoční napětí, drama a kontrast. Právě stimulace emocí je u většiny hudebních skladeb podstatná.

7.4 Způsoby ladění

Ladění stanovuje přesné vzdálenosti jednotlivých tónů v c stupnici, a tím určuje frekvence jednotlivých tónů a poměry mezi nimi [23]. Existuje mnoho způsobů ladění, které se v průběhu historie vyvíjely. Všechny druhy se snaží o co nejkonstantnější znění souzvuků a každý má svoje výhody i nevýhody. Jeho volba především závisí na hudebním nástroji a kontextu. Mezi nejznámější patří přirozené, Pythagorejské a temperované ladění.

Jelikož je tón o oktávu vyšší svým charakterem prakticky shodný s tónem původním, omezujeme se na tóny, které budou pouze v intervalu jedné oktávy. Všechny ostatní tóny pak budou vzhledem k nim jen o oktávu (nebo několik oktáv) vyšší či nižší [12]. Existuje řada teorií pro matematický popis hudby, ale podle nejznámějšího pravidla musí být frekvence tónů v poměru malých celých čísel, přičemž takový systém se nazývá **přirozené ladění**. Mezi tóny nejsou pravidelné intervaly, a tak transpozice hudby do jiné tóniny je velmi komplikovaná. Problémy vznikaly také při konstrukci hudebních nástrojů [9]. **Rovnoměrně temperované ladění** řeší některé problémy přirozeného ladění. Jeho základem je **temperovaný půltón**, který vznikne, když se celá oktáva rozdělí na 12 stejných intervalů. Dva půltóny dohromady vytváří **celý tón**. Interval temperovaného půltónu je tedy $\sqrt[12]{2}$ [9] [25].

Číslo dvanáct bylo zvoleno z toho důvodu, že takto vzniklé ladění dobře aproximuje ladění přirozené a přitom jeho složitost zbytečně nenarůstá. Temperované ladění je tedy nedokonalé, ale předpokládá se, že většina lidí nedokáže rozeznat rozdíl a nebude vnímat hudbu jako rozladěnou. Pro stanovení frekvence f_i tónu na pozici i vzhledem k referenčnímu tónu komorního A (440 Hz) je výpočet následující [9] [25].

$$f_i = 440 \cdot 2^{\frac{i}{12}} \quad (7.1)$$

7.5 Účinky hudby na člověka

Hudba na nás může působit pestrými způsoby, zprostředkovává nám nejrůznější sdělení a mnohdy dokáže proniknout do hlubších částí lidské psychiky než mluvené slovo. Zvukové vjemy ovlivňují rovněž fyziologické pochody člověka. Sounáležitost s hudebním prožitkem přispívá k tvůrčímu rozvoji osobnosti člověka a aktivuje jeho emoce [2].

Již myslitelé v antice, jako byli Pythagoras a Platón, zdůrazňovali význam hudby a jak je důležitá pro **vývoj lidské osobnosti**. Například Pythagorejci používali hudbu jako prostředek **psychoterapie**. Platón spojuje hudbu s lidskou přirozeností, kterou zušlechťuje a vede k **poznání krásy**. Aristoteles zase tvrdil, že člověk má smysl pro rytmus a melodii, a tak mu hudba může pomoci a poskytnout radost. Dále zastával názor, že mu také dokáže pomoci s psychickými stavy, především s tísnivými [26].

Vliv hudby na naše tělesné funkce závisí na aktuální náladě, temperamentu či přístupnosti daného jedince, ale také na našich zkušenostech a prostředí. Při vytváření i vnímání hudby je kromě celého těla dominantní **zapojení mozku**. Pro terapeutické využití hudby je třeba zdůraznit její podstatný vliv na **limbický systém**. Toto komplexní uskupení mozkových struktur je naším **centrem emocí**. Vliv má také na frekvenci komunikace neuronů v mozku (viz kapitola 8.1). Některé aktivity spojené s provozováním či poslechem hudby již vědci vysvětlili, ale mnohé nadále zůstávají neprobádané. Právě silná vazba hudby na lidskou psychiku a především emoce je jeden z hlavních důvodů popularity hudby po tisíciletí [2].

Hudba je natolik svázána s lidským životem, že ji slyšíme téměř každý den, aniž bychom ji museli aktivně vyhledávat. Je využívána v mnoha kontextech a za různými účely. Dokáže skvěle **navozovat a vyjadřovat emoce**. Toho se využívá například v reklamách a filmech.

Vliv hudby na člověka záleží na mnoha faktorech. Obecně skladba, která má pomalé tempo, přináší pocit **klidu a uvolnění**, zato skladba v tempu rychlém vyvolává pocit **radosti a nadšení**. Charakter hudby má také vliv na změny v těle. Výška, tempo a melodický vzorec, to všechno ovlivňuje nálady a fyzické procesy. Například u vysoké výšky, zrychleného rytmu a vzestupně melodické pasáži většina lidí cítí zvýšení úzkosti a napětí a někdy dokonce vede ke ztrátě kontroly a paniky. Opačně platí, že hudba s nízkou výškou vytváří uklidňující účinek. Pomalé tempo a sestupná melodie často způsobuje pocit smutku a deprese. Když se člověk cítí v depresi, pohybuje

se pomalu, zatímco když je nervózní, tak se jeho srdce a dýchání zrychlí [26] [2].

Terapeutické působení zvuku na člověka od ryze fyzických či fyziologických účinků přes navození hypnotických stavů až po léčení psychických poruch provází dějiny civilizace od nepaměti. Zvuk můžeme s největší pravděpodobností považovat za vůbec nejstarší fyzioterapeutický prostředek s účinkem více psychickým než fyzickým [7].

Hudba je dnes ale tak **všudypřítomná**, že máme tendenci ji brát za samozřejmost. Z toho důvodu ji často přesouváme na pozadí našeho vnímání. To způsobuje, že hudbě zřídka opravdu věnujeme plnou pozornost, ale bereme ji spíše jako kulisu. To může potlačovat její potenciál na pozitivní vliv na člověka.

8 Binaurální rytmy

Binaurální rytmy jsou speciální zvukové stopy. Jak slovo binaurální napovídá, využívají vlastnosti, že vnímáme zvuky kolem sebe dvěma ušima. Snaží se aktivovat specifické části mozku a podpořit komunikaci pravé a levé hemisféry. Dosahují toho tím, že se pokouší manipulovat frekvencí **mozkových vln**. Ty odráží psychický stav jedince. Jsou spojeny se stavy jako je relaxace a soustředění a vylepšují například kreativitou či paměť (viz kapitola 8.1) [26].

Principem je, že nahrávka pustí do každého ucha (většinou za použití sluchátek) jiné harmonické tóny **blízké frekvence**. Frekvence binaurálních rytmů je dána rozdílem mezi těmito tóny. Například pokud je čistý tón o frekvenci 400 Hz pouštěn do levého ucha a zároveň jiný čistý tón s mírně vyšší frekvencí 410 Hz do pravého ucha, tak rozdíl těchto hodnot, v tomto případě 10 Hz, je **binaurální tón (frekvence binaurálních rázů)**. Frekvence o hodnotě 400 Hz se označuje jako **základní (nosná) frekvence**. Základní frekvence může také označovat aritmetický průměr obou frekvencí (v příkladu by byla rovna 405 Hz). Nosná frekvence by se měla pohybovat v rozmezí 100 – 1000 Hz. Pro správný efekt by binaurální tón měl mít frekvenci mezi 1 – 30 Hz [36] [26] [31].

Vzniká podobný jev jako u **skládání vln blízkých frekvencí** (viz kapitola 4.2). Vyskytují se tedy akustické **rázy**, projevující se periodickými změnami hlasitosti. Jejich frekvence je rovna rozdílu dílčích frekvencí. V případě **binaurálních rytmů** se zvukové frekvence neskládají v prostoru, vznikají ale v mozku poté, co jsou frekvence slyšeny odděleně levým a pravým uchem. Proto je důležité použití sluchátek.

Při poslechu binaurálních rytmů na reproduktorech se vlny setkají dříve, než dorazí do lidského ucha. Ve výsledném zvuku jsou stále patrné akustické rázy, ty ale nevznikají v mozku, ale již v prostoru. Pro vnímání těchto rázů není potřeba binaurálního slyšení. Neprobíhá tedy stimulace mozku, jako při poslouchání frekvencí odděleně.

Předpokládá se, že při poslechu binaurálních rytmů se vyskytuje jev **synchronizace**, v tomto případě sjednocení frekvence mozkových vln a binaurálního tónu. S obdobným jevem synchronizace frekvencí se dá setkat i v jiných systémech (např. jev synchronizace metronomů). Lidské tělo dokáže

sjednotit i frekvenci např. srdečního tepu či dechu s různými dalšími podněty přicházející z vnějšku (jako např. hudba či záblesky světla) [7] [26].

Zvukové nahrávky binaurálních rytmů mají často své zaměření (např. navození relaxace, kreativity, ...). Ty se především liší tím, jaké frekvence mozkových vln se snaží u posluchače navodit (za pomoci frekvence binaurálního tónu). Mohou také navíc obsahovat různé jiné zvuky, jako je klidná hudba nebo např. zvuky moře.

8.1 Mozkové vlny

Mozek je tvořen velkým množstvím **nervových buněk (neuronů)**, které si navzájem přenášejí informace pomocí **elektromagnetických signálů**. Neurony v jednotlivých částech mozku mají často stejnou frekvenci komunikace. Tuto frekvenci lze měřit pomocí **elektroencefalografie (EEG)** [29].

Nejrozšířenější metodou vyhodnocování naměřeného záznamu EEG je **Fourierova analýza** (viz kapitola 6.1), která provádí transformaci zvoleného úseku grafu z časové do frekvenční domény [29].

V každém okamžiku lze v mozku naměřit škálu různých frekvencí komunikace neuronů. Při jejich analýze se převážně zabýváme tím, jaké frekvence jsou dominantní a jaké potlačené [29].

Při měření rozlišujeme základní rytmy **alfa, beta, theta, delta a gama**, které se liší především podle frekvenčního rozsahu a amplitudy. Jednotlivé rytmy jsou charakteristické oblastmi v mozku, kde se převážně vyskytují. Frekvence jsou asociované s psychickým stavem člověka. Přičemž vyšší frekvence jsou spojovány s větší pozorností a energií. Nižší frekvence jsou zase spojovány s klidem, relaxací až spánkem.

- **Gama 30 – 100 Hz**

Bývají obvykle naměřeny ve stavech vysokého výkonu (fyzického i psychického), kdy je zapotřebí velkého soustředění a koncentrace. Výzkumy uvádějí jejich výskyt i během meditačních stavů. Jedná se o nejrychlejší frekvence, na jakých může mozek pracovat [29] [36].

- **Beta 13 – 30 Hz**

Tento druh aktivity nalezneme při běžné mentální a fyzické činnosti [29]. U vyšších frekvenčních hodnot se vyskytuje stres, úzkost, panika a větší míra sebekritiky. Naopak nízké hodnoty podporují stavy, kdy je vědomí soustředěné, pozorné. Zlepšena je také kreativita a paměť [26] [36] [31].

- **Alfa 8 – 13 Hz**

Objevuje při relaxaci, v klidovém stavu a při zavřených víčkách. Je spojován s větší produkcí endorfinů neboli hormonů štěstí a tedy potlačováním negativních psychických stavů jako úzkost a stres [26] [31] [29].

- **Théta 4 – 8 Hz**

Vyskytují se během lehké fáze spánku (REM), meditace, hluboké relaxace, silných emocionálních prožitků a stavů kreativního myšlení [36].

- **Delta 1 – 4 Hz**

Nejnižší frekvence na kterých mozek pracuje. U dospělých jedinců se převážně vyskytují v hlubších stádiích spánku [29] [31].

8.2 Pozitivní účinky

Účinky binaurálních rytmů se různí dle osob. Ne všichni z nich benefitují a některým lidem mohou být dokonce nepříjemné. Je velice důležité brát v potaz **frekvenci binaurálních rázů**, která má veliký vliv na výsledný efekt.

Je mnoho důvodů proč jsou využívány. Mohou mít pozitivní dopad na **snížení úzkostí, zlepšení spánku, zlepšení paměti, zlepšení koncentrace i snížení bolesti**. Také mohou pomoci navodit **relaxační a meditační stavy**. **Alfa vlny** jsou považovány za nejzdravější a nejbezpečnější frekvenci pro dosažení většiny pozitivních výsledků [19] [27] [8].

Pro dostavení efektu je důležité poslouchat po určitý časový interval (alespoň 15 – 30 minut). Během této doby by se měl posluchač uvolnit a nevěnovat pozornost jiným činnostem. Důležitá je také **pravidelnost** užívání. Vhodné je minimálně 5× týdně, ale nejlépe každý den po dobu alespoň několika týdnů. Doporučuje se využívat již sestavené zvukové stopy s binaurálními rytmy. Ty pracují na správných kmitočtech a do nízkých frekvencí přecházejí postupně [27] [8] [19].

Většina studií zahrnuje malé množství dat. Převážně potvrzují hypotézu, že binaurální rytmy mohou mít zdravotní účinky, především na zmírnění úzkostí a stresu [37]. Ale existují i studie, které nenašly žádný efekt [28]. V současné době není tedy jasný důkaz potvrzující, ale ani vyvracející, pozitivní efekty binaurálních rytmů. Díky jejich dostupnosti je ale dnes může vyzkoušet téměř každý a zjistit, jaké mají účinky právě pro něj/ni.

9 Návrh aplikace

Kapitola má za úkol přiblížit čtenáři aplikaci, která vznikne v rámci bakalářské práce. Je zde popsáno, za jakým účelem má být aplikace vytvořena, jaké funkce by měla umět a na jaké platformě bude implementována. Jako poslední je popsán návrh jejího uživatelského rozhraní. Návrh aplikace bude veden o využití poznatků popsaných v teoretické části bakalářské práce.

9.1 Účel aplikace

Aplikace se snaží spojit **hudbu a binaurální rytmy**, tím nabídnout uživateli společně hudební zážitek a možnost cílené manipulace mozkovými vlnami. Přední vlastností aplikace je, že na základě analýzy právě přehrávané hudby dokáže upravovat základní frekvenci a hlasitost binaurálních rytmů. Tím se snaží potlačit rušivý efekt těchto frekvencí na hudební dojem z přehrávané skladby.

Výhodou spojení binaurálních rytmů s hudbou oproti poslouchání pouze binaurálních rytmů je to, že výsledný zvuk zní zajímavěji. Je předpoklad, že si uživatel zvolí hudbu, kterou má rád a je mu příjemná. Tím se na výsledný zvuk dokáže lépe soustředit po delší dobu než při poslechu bez hudby. Samotné binaurální rytmy mohou působit monotónně a někomu mohou být až nepříjemné, především při poslechu po delší časový úsek. Právě doba poslechu hraje velkou roli v tom, aby se dostavily požadované účinky.

Aplikace je určena uživatelům, kteří chtějí navodit určitý psychický stav (např. relaxaci či soustředění) pomocí binaurálních rytmů, ale zároveň poslouchat hudbu (popř. jinou zvukovou nahrávku). Ta může posloužit jako další stimulant k vyvolání požadovaného psychického stavu (např. zvuky moře pro relaxaci, motivační hudba pro soustředění a energii při fyzickém výkonu) nebo pouze jako zpříjemňující element od jednotvárných binaurálních rytmů.

Jelikož binaurální rytmy a jejich účinky jsou stále předmětem debat, aplikace může také být použita pro jejich výzkum a dopady při spojení s hudbou. Zajímavé by bylo porovnat, jestli poslouchání binaurálních rytmů společně s hudbou jejich účinek stimuluje či potlačuje.

9.2 Funkční požadavky

Tyto uvedené základní požadavky by měla aplikace splňovat a vychází ze zadání bakalářské práce:

- přehrání zvukového souboru (různé formáty),
- přidání binaurálních rytmů ke zvukové stopě,
- zvolení frekvence rázů binaurálních rytmů uživatelem,
- zvolení intenzity binaurálních rytmů uživatelem,
- automatické určení základní frekvence binaurálních rytmů na základě analýzy frekvenčního spektra, se snahou co nejméně narušit hudební kvalitu skladby.

Aplikace by měla být **jednoduchá** a **intuitivní**, aby ji mohl používat běžný uživatel. Měla by mu jednoduše pomoci zjistit, jak binaurální rytmy působí na něj. Také by měla být vhodná k **pravidelnému** používání, tak jak jsou binaurální rytmy určeny.

9.3 Volba platformy

Pro realizaci aplikace se dá využít mobilní, webová i desktopová¹ platforma. Z těchto možností byla po úvaze zvolena **webová aplikace**. Toto rozhodnutí bylo učiněno proto, že webové aplikace disponují snadnou přístupností na většině zařízení, které podporují moderní webové prohlížeče.

V případě mobilní či PC aplikace je nevýhodou potřeba implementace pro určitý operační systém (např. Android, iOS, Windows, macOS, ...). Takové aplikace ale mají i své výhody, mezi které patří např. lepší optimalizace a snadnější práce s lokálními soubory. Aplikace je nutné do zařízení nainstalovat pomocí instalačního balíčku. Následně je k aplikaci přístup i bez internetového připojení, což pro webové aplikace obecně neplatí.

Webová aplikace je snadno dostupná, ale je zapotřebí internetové připojení. Aby uživatel mohl aplikaci používat i bez internetového prostředí, dá se aplikaci upravit tak, aby spadala pod kategorii progresivní webové aplikace (PWA). Tím uživatel získá možnost si ji stáhnout do svého zařízení, a to jak do mobilního, tak do PC.

¹aplikace spustitelné lokálně v OS počítače

Cílem bakalářské práce je vytvořit webovou aplikaci primárně pro počítačové prohlížeče. Praktické rozšíření aplikace v budoucnu je implementovat upravené grafické rozhraní pro mobilní zařízení a zpřístupnit možnost stažení aplikace.

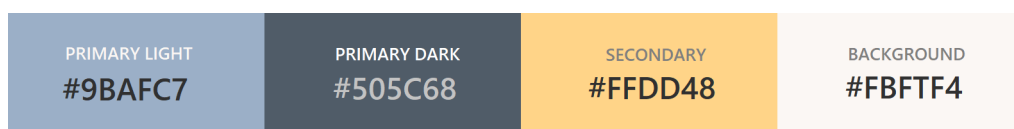
9.4 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je navrženo tak, aby jej tvořila jedna obrazovka. Ta bude obsahovat všechny ovládací prvky potřebné k použití aplikace. Při načítání aplikace se navíc zobrazí načítací obrazovka s cyklickou animací. Ta dává uživateli najevo, že aplikace pracuje.

Celý design aplikace byl navrhnout pomocí aplikace **Adobe XD**. Vytvořený návrh následně usnadnil implementaci, jelikož poskytuje přípravné stylování stránky ve formě CSS a nabízí export prvků do SVG. Při návrhu aplikace bylo dbáno na to, aby byla snadno ovladatelná a uživatelsky přívětivá.

Jelikož se binaurální rytmy často používají pro navození klidu a relaxace, vzhled aplikace byl navrhnut tak, aby také působil tímto dojmem.

Při tvorbě uživatelského rozhraní bylo zvoleno několik barev, které se následně opakují v celé aplikaci. Bylo potřeba zvolit dostatečně kontrastní barvy, aby jednotlivé prvky společně nesplývaly.



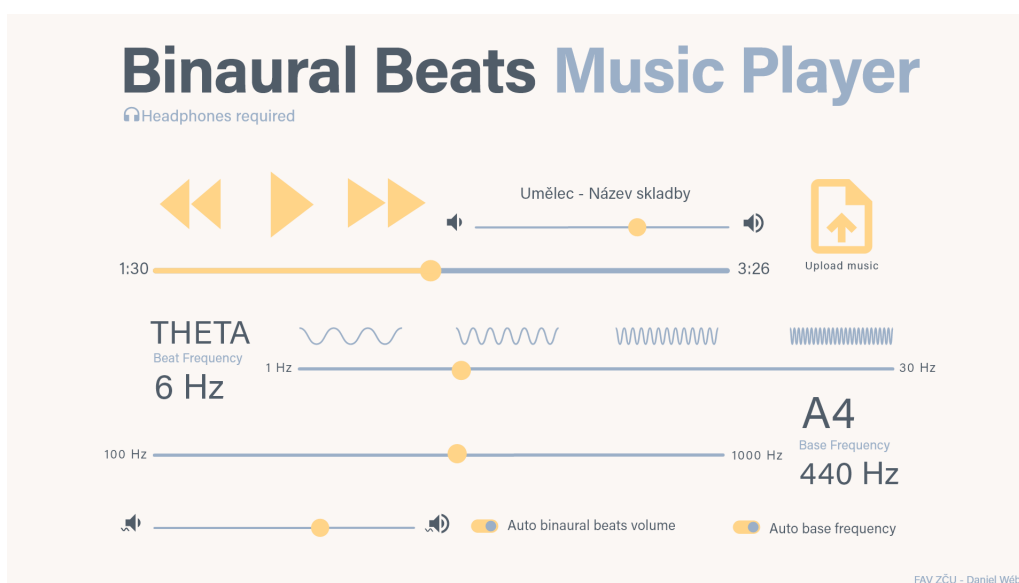
Obrázek 9.1: Barevná paleta aplikace

Na obrazovce se vyskytují tyto prvky:

- tlačítko pro zastavení/spuštění skladby,
- tlačítko pro přepnutí na předchozí/další skladbu,
- text s názvem aktuální skladby,
- posuvník pro nastavení celkové hlasitosti,
- posuvník pro zobrazení a úpravu aktuálního času skladby,
- tlačítko pro nahrání souboru ze zařízení,
- posuvník pro nastavení frekvence rázů binaurální rytmy,
- text sdělující frekvenci rázů a do jaké třídy mozkových vln spadá,

- posuvník pro nastavení základní frekvence binaurálních rytů,
- text sdělující základní frekvenci binaurální rázů a odpovídající notu,
- posuvník pro nastavení hlasitosti binaurálních rázů,
- přepínač pro aktivaci automatické hlasitosti binaurálních rytů,
- přepínač pro aktivaci automatické základní frekvence binaurálních rytů.

Posuvníky pro nastavení hlasitostí a frekvencí jsou navrženy tak, aby pracovaly s **exponenciálním rozsahem**. Takové chování lépe odpovídá lidskému sluchu a působí přirozeněji.



Obrázek 9.2: Návrh uživatelského rozhraní aplikace

10 Implementace aplikace

V této kapitole je popsán způsob, kterým byla aplikace implementována. Jsou zde také přiblíženy technologie a postupy, pomocí kterých aplikace vznikla. Implementace vychází z návrhu aplikace a byly čerpány znalosti získané z teoretické části bakalářské práce.

K aplikaci je možné přistupovat pomocí následující doménové adresy:

```
https://dwebr.gitlab.io/bb-music-player/
```

10.1 Využité technologie

Jelikož měla vzniknout webová aplikace, která pracuje na straně klienta, byl zvolen pro implementaci programovací jazyk **TypeScript**. Webová stránka a její vzhled jsou definovány pomocí **značkovacího jazyka HTML a kaskádových stylů**.

Jako vývojové prostředí bylo zvoleno **Visual Studio Code** s rozšířeními usnadňující psaní a ladění kódu. Mezi hlavní rozšíření patří HTML CSS Support, Live Server, Prettier – Code formater, Visual Studio IntelliCode a ESLint.

10.1.1 TypeScript

Jedná se o nadstavbu nad jazykem **JavaScript**, který je rozšířen o statické typování, třídy, rozhraní a další věci známé z objektově orientovaného programování. Do kódu vnáší přehlednost, zejména díky zavedení kontroly datových typů, z čehož je odvozený i jeho název [38]. Přehlednost kódu se stává podstatnou zejména u větších a komplexnějších projektů.

Statické typování dělá kód bezpečnější a pomáhá odhalovat chyby již při psaní kódu. Další nemalou výhodou statického typování je nápověda dostupných metod a parametrů ve vývojovém prostředí. Ta je možná, jelikož u proměnných a konstant jsou známé datové typy.

Pro spuštění kódu napsaného v TypeScriptu je potřeba převod do JavaScriptového kódu. Ten umí spustit JavaScriptové enginy (např. V8 nebo SpiderMonkey), které jsou součástí webových prohlížečů. K tomuto převodu kódu slouží tzv. **transpiler**. Ten čte kód napsaný v jednom jazyce a produkuje stejně fungující kód v jazyce jiném, v tomto případě produkuje kód

v programovacím jazyku JavaScript [38]. Při převodu je také možné určit požadovanou verzi JavaScriptu (např. ES2015). To je vhodné, pokud chceme, aby kód fungoval na více prohlížečích, které používají různou verzi. Není nutné psát kód vícekrát pro každou verzi.

10.1.2 Verzování aplikace

Jelikož se jedná o rozsáhlejší a dlouhodobější projekt, je samozřejmostí zajistit verzování kódu. To je zapotřebí především pro zaznamenávání funkčních verzí kódů a možnosti se k nim v případě potřeby vracet. Další podstatnou funkcí je nahrávání kódu na vzdálený server. Tím se zdrojové kódy zálohují a zabraňuje se jejich nenávratné ztráty v případě poškození nebo ztráty disku.

Verzování bylo vyřešeno pomocí systému **Git** a privátního repositáře na serveru od společnosti GitLab.

10.1.3 GitLab pages

Distribuce aplikace je vyřešena pomocí bezplatné služby GitLab pages. Ta pracuje s větví *master* v Git repositáři. Definovaná webová stránka je dostupná pomocí doménové adresy, jejíž název lze z části definovat. To umožňuje snadné sdílení aplikace s ostatními již při jejím vývoji.

Výhodou je, že proces je automatizován a aktualizuje stránku automaticky při nahrání kódu na server. Je tedy vždy zobrazena nejnovější verze. Tento způsob nenabízí možnost plně určit doménový název stránky a nezaručuje dostupnost a technické vlastnosti serveru.

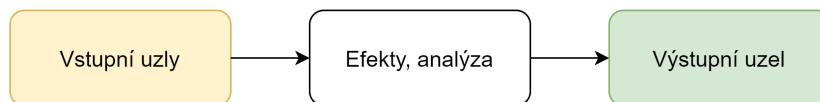
10.2 Využití knihovny a prostředky

V rámci aplikace je využita knihovna **Web Audio API**, ikony ze sady **Font Awesome** a font **Acumin** poskytovaný službou **Adobe Fonts**.

10.2.1 Web Audio API

Pro práci se zvukem je v aplikaci využito rozhraní Web Audio API. Jedná se o knihovnu pro JavaScript poskytující například nástroje pro ovládání, generování, zpracování a vizualizování zvuku na webu. V době psaní bakalářské práce je většina funkcí standardně podporována moderními webovými prohlížeči (např. Chrome, Firefox). Problémovým se stává prohlížeč Safari, který v době psaní této práce podporuje jen základní funkcionalitu Web Audio API.

Knihovna funguje na principu **modulárního routování**. To znamená, že zvukový signál v aplikaci putuje přes zvukové uzly, které zvuk generují, upravují nebo analyzují. Jednotlivé uzly mají různé počty vstupů a výstupů. Ty jsou mezi sebou propojeny. Pro přehrání zvukové stopy na reproduktorech je potřeba směřovat zvuk směrem do výstupního uzlu. Každý uzel je reprezentován objektem z knihovny Web Audio API.



Obrázek 10.1: Princip modulárního routování ve Web Audio API

10.2.2 Font Awesome

V aplikaci je pro jednoduchost a přehlednost využíváno velké množství ikon. Většina z nich pochází se sady ikon Font Awesome. Ta nabízí širokou škálu moderních ikon vhodných pro použití v aplikacích. Využité ikony jsou nabízeny zdarma pod licencí CC BY 4.0.

10.2.3 Adobe Fonts

V aplikaci je využíván font písma s názvem Acumin, ten byl do projektu importován pomocí služby Adobe Fonts. Byl zvolen pro jeho jednoduchý a moderní vzhled. Jelikož se nejedná o standardní font, předpokládá se, že také dokáže uživatele více zaujmout.

10.3 Struktura projektu

Přehlednost projektu je zvýšena rozdělením souborů dle jejich typu do jednotlivých složek. Celý projekt se skládá z těchto složek a souborů:

Složka media

Obsahuje bitmapové soubory využité v aplikaci. Převážně se jedná o ikony, které nebylo možno využít ze sady Font Awesome.

Složka scripts

Obsahuje zdrojové kódy napsané v jazyku TypeScript. Dále obsahuje složku *dist* obsahující zdrojové kódy v jazyku JavaScript (vytvářené transpilerem). Obsahuje následující zdrojové kódy:

- *app.ts*
Jedná se o hlavní skript obsahující velkou část logiky aplikace.
- *constants.ts*
Obsahuje definici konstant využitých v rámci aplikace.
- *freqClass.ts*
Obsahuje definici výčtového typu a funkcí spojených s třídami mozkových vln.
- *note.ts*
Obsahuje definici funkcí pro práci s frekvencemi a notami.
- *oscillator.ts*
Obsahuje definici stejnojmenné třídy, která obaluje objekt Web Audio API *OscillatorNode*. Reprezentuje oscilátor a poskytuje základní operace.
- *song.ts*
Obsahuje definici stejnojmenné třídy, která obaluje objekt Web Audio API *AudioBufferSourceNode*. Třída reprezentuje zvukový soubor a usnadňuje práci s ním, jako například přehrávání a pozastavování.
- *tsconfig.json*
Obsahuje definice potřebné pro transpiler kódu převádějící kód napsaný v TypeScriptu do JavaScriptu. Nachází se zde například informace, do jaké verze JavaScriptu se má kód přeložit.
- *utils.ts*
Obsahuje definice ostatních funkcí využívaných na různých místech v aplikaci.

Složka songs

Obsahuje skladby, které se načtou při počátečním spuštění aplikace. Jedná se o skladby, na které se nevztahují autorská práva. Slouží především na vyzkoušení aplikace bez nutnosti nahrávat vlastní soubory.

Složka styles

Obsahuje soubor s kaskádovými styly definující vzhled elementů na stránce.

Soubor index.html

Jedná se o HTML soubor definující elementy uživatelského rozhraní aplikace.

10.4 Práce se zvukem v aplikaci

V této kapitole je popsána hlavní problematika vyskytující se při návrhu a implementaci aplikace. Většina funkcí je řešena za pomoci rozhraní Web Audio API. Byly zde využity poznatky především popsané v kapitolách zabývajících se digitálním zvukem, binaurálními rytmy a lidským sluchem.

Jak bylo zmíněno v kapitole o funkčních požadavcích aplikace (viz kapitola 9.2), základní frekvenci a intenzitu binaurálních rytmů si uživatel může určit **staticky** nebo zvolit možnost **dynamického** nastavení dle **frekvenční analýzy skladby**.

Analýza frekvenčního spektra probíhá vždy při přehrávání zvukové stopy, a to za účelem zobrazení frekvenčního zastoupení energie formou **histogramu**. Pokud uživatel aktivuje dynamické určování intenzity nebo základní frekvence binaurálních rytmů, vypočtené spektrum je podrobena ještě následnému zpracování (viz kapitoly 10.4.3 a 10.4.4).

Pro eliminaci nežádoucích a rušivých zvuků při zastavení a spuštění skladby se tyto události navozují pozvolna postupnou úpravou intenzity zvuku. Při zastavení skladby se tedy během krátkého časového intervalu nastaví minimální hlasitost a až poté se skladba zastaví. Při spuštění skladby proběhne obrácený proces. Čas přechodu je nastaven na 0.3 sekundy. Pokud by událost nastala okamžitě, vyskytla by se ve průběhu signálu ostrá hrana projevující se nežádoucími frekvencemi převážně ve vyšších částech spektra.

Aplikace podporuje většinu běžných zvukových formátů. Konkrétně se jedná o formáty **MP3**, **WAV**, **OGG**, **FLAC**, **AAC**, **OPUS**, **WMA** a **M4A**. Tuto vlastnost zajišťuje knihovna Web Audio API a konkrétní podporované formáty se mohou na různých webových prohlížečích lišit. Základní formáty jako např. MP3, FLAC a WAV by měly spolehlivě fungovat na drtivé většině moderních webových prohlížečů. Podpora všech výše uvedených zvukových formátů na jednotlivých webových prohlížečích je ověřena testováním aplikace (viz kapitola 11).

10.4.1 Frekvenční analýza skladby

Pro získání frekvenčního spektra přehrávané skladby probíhá frekvenční analýza předzpracovaného signálu **algoritmem FFT**. Jak proces získávání těchto dat v aplikaci probíhá, je přibliženo v kapitole 10.4.5.

Jelikož zastoupení frekvencí v přehrávané skladbě se zpravidla neustále mění, je potřeba analýzu provádět periodicky v krátkých intervalech. Toho je docíleno funkcí *setInterval*, která je nastavena tak, aby spouštěla funkci provádějící analýzu každých 15 ms.

Vykreslování frekvenčního spektra je řešeno funkcí *draw*, která se cyklicky volá pomocí funkce *requestAnimationFrame*. Frekvenci volání metody *draw* určuje samotný webový prohlížeč. Většinou je rovna 60 Hz a obecně by se měla rovnat obnovovací frekvenci monitoru zařízení. Tento způsob je optimalizovaný a šetří výpočetní prostředky zařízení tím, že animaci zastaví, pokud okno není viditelné.

10.4.2 Přidání binaurálních rytmů do zvukové stopy

Pro vytvoření efektu binaurálních rytmů je potřeba do zvukového signálu přidat dvě harmonické frekvence. Existují dva přístupy jak frekvenci do vstupního signálu přidat:

- sečtením průběhů signálů v časové doméně,
- přidáním frekvence úpravou dat frekvenčního spektra a provedení inverzní FFT.

Z výše uvedených dvou přístupů bylo zvoleno sečtení průběhů signálů v časové doméně. To umožňuje přesnější určení přidávané frekvence. Navíc knihovna Web Audio API nabízí třídu *OscillatorNode*, ta dokáže generovat harmonický signál určité frekvence.

U druhého přístupu by se musela pravidelně provádět inverzní FFT, která není v rozhraní Web Audio API nabízena a musela by se implementovat nebo využít jiná knihovna. Proto byl zvoleno jednodušší, ale pro tento případ plně dostačující, řešení generování časového průběhu signálu a jeho následné sečtení se signálem vstupním.

Do přehrávané skladby jsou tedy přidávány dva signály. Ty jsou generovány oscilátory *OscL* (obsahuje pouze levý kanál) a *OscR* (obsahuje pouze pravý kanál). Oba oscilátory generují sinusový signál. Pomocí základní frekvence f_z a frekvence rázů f_r binaurálních rytmů jsou frekvence oscilátorů

F_{OscL} a F_{OscR} určeny takto:

$$F_{OscL} = f_z - \frac{f_r}{2} \quad F_{OscR} = f_z + \frac{f_r}{2} \quad (10.1)$$

Příčemž základní frekvence se získá dynamicky analýzou přehrávaného signálu nebo staticky od uživatele pomocí posuvného elementu uživatelského rozhraní. Frekvence rázů binaurálních rytmů vždy určuje uživatel za využití grafického rozhraní na základě toho, jaké mozkové vlny chce navodit.

10.4.3 Dynamická intenzita binaurálních rytmů

Intenzita binaurálních rytmů se určuje ve funkci *setAutoAmplitude*. Je vypočítána na základě energie, která se nachází v určitém frekvenčním rozmezí analyzované zvukové stopy. Rozmezí je nastaveno mezi 200 Hz – 5 kHz. Dolní hranice 200 Hz je nastavena proto, aby hlasitost nebyla příliš ovlivňována rytmickými prvky. Ty se často nachází v nízkých frekvencích a měly by za následek nežádoucí periodické výkyvy v hlasitosti binaurálních rytmů.

Výsledná hodnota je navíc vyhlazena na základě předchozí hodnoty. To zamezuje prudkým a častým změnám hlasitosti.

Je nastavena minimální hlasitost binaurálních rytmů. To zajišťuje, aby byly binaurální rytmy vždy slyšitelné, i když je aktuální intenzita skladby velmi nízká nebo nulová.

10.4.4 Dynamická základní frekvence binaurálních rytmů

Možností, jak dynamicky určit základní frekvenci binaurálních rytmů na základně aktuálního frekvenčního spektra přehrávané skladby, je mnoho. Metody se musí snažit splňovat to, aby přidané frekvence **nepůsobily rušivě a disonantně**. V ideálním případě aby se skladbou tzv. splynuly a kopírovaly její **hlavní melodii**.

Dále by frekvence binaurálních rytmů neměly překročit **hranici 1000 Hz**, nad kterou mohou postrádat účinnost. V praxi je tato hranice však ještě nižší, jelikož harmonické tóny o takto vysoké stálé frekvenci nejsou příjemné na dlouhodobý poslech. Frekvence binaurálních rytmů je omezena i spodní hranicí. Tam jí především omezuje možnost přehrání frekvence reproduktory a citlivost lidského sluchu na nízké frekvence. Proto nejsou vhodné frekvence pod hodnotou **100 Hz**.

Také není žádané, aby se určená frekvence **často měnila a o velké hodnoty**. To může při poslechu působit rušivě a nepřírozně. Navíc to může

mít nepříznivý vliv na požadované efekty binaurálních rytmů. Ty ve většině nahrávek zachovávají po celou dobu trvání stejnou základní frekvenci.

Jelikož FFT pracuje s diskrétními a časově omezenými daty, nedokáže přesně určit zastoupené frekvence, ale pouze frekvenční rozsahy. Pro nalezení konkrétní frekvence je učiněn předpoklad, že se ve skladbě vyskytují hudební tóny. Proto proces vždy produkuje frekvenci určitého hudebního tónu. To napomáhá větší **libozvučnosti**, jelikož je větší pravděpodobnost, že frekvence bude v **konsonantním** intervalu vzhledem k ostatním frekvencím v hudební skladbě.

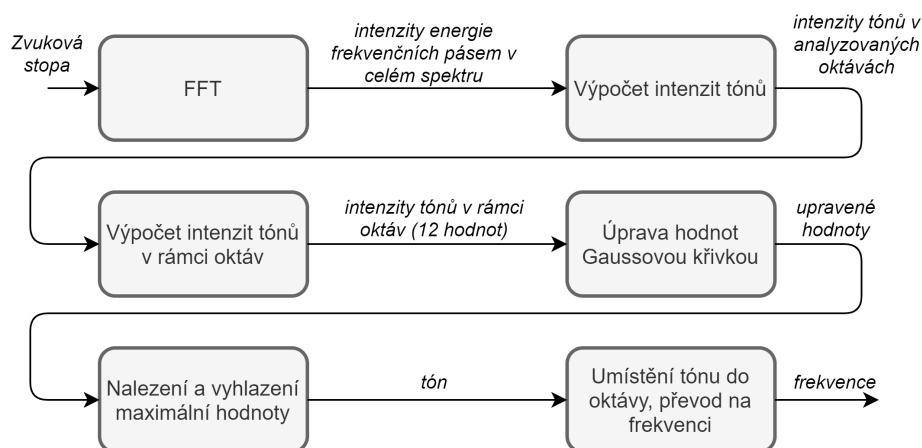
Při dynamickém určení základní frekvence binaurálních rytmů se tedy očekává, že se jedná o hudební nahrávku v **rovnoměrně temperovaném ladění s referenčním tón komorního A**. Pokud by se jednalo o jiné zvukové nahrávky (např. zvuky moře či deště), proces nemusí fungovat správně. To může především nastat u zvuků s rovnoměrným rozložením frekvenčního spektra. U takových nahrávek je doporučeno nastavit základní frekvenci binaurálních rytmů staticky.

Při analýze zvukové stopy jsou důležité tyto 3 oktávy:

- **jednočárkovaná oktáva** C4 (261,63 Hz) – H4 (493,88 Hz),
- **dvoučárkovaná oktáva** C5 (523,25 Hz) – H5 (987,77 Hz),
- **tříčárkovaná oktáva** C6 (1046,5 Hz) – H6 (1975,533 Hz).

Analýza probíhá ve frekvenčním intervalu určeném těmito oktávami. Jelikož analýza celého spektra by byla výpočetně náročná a neposkytovala by optimální výsledky, byl zvolen tento přístup. Navíc jsou především důležité ty frekvence, ve kterých se může nacházet základní frekvence binaurálních rytmů. V příliš nízkých kmitočtech se nevyskytují často melodické prvky hudební skladby, ale spíše rytmické. Analýza těchto frekvencí tudíž není vhodná.

Na následujícím obrázku 10.2 je vyobrazen diagram znázorňující proces zpracování dat frekvenčního spektra poskytnutých algoritmem FFT. Výsledkem je vždy jedna konkrétní frekvence vycházející z požadavků popsaných dříve v této kapitole. Ta se následně použije jako základní frekvence binaurálních rytmů.



Obrázek 10.2: Proces dynamického určení základní frekvence binaurálních rytů

Výpočet intenzit tónů

Výsledkem FFT jsou data reprezentující poměrné zastoupení energie frekvenčních pásem ve frekvenčním spektru, ale následující procesy pracují s daty reprezentující zastoupení tónů ve frekvenčním spektru, proto je nutný převod.

Mapování dat získaných z FFT na tóny probíhá tak, že hodnota je vždy přiřazena nejbližšímu tónu. Nastává situace, že tónům vyšších frekvencí připadá více hodnot než tónům frekvencí nižších. Tato situace nastává z důvodu, že jednotlivé hodnoty jsou ve frekvenčním spektru rozloženy lineárně, ale hudební tóny jsou umístěny ve frekvenčním spektru exponenciálně.

Intenzita tónu je rovna aritmetickému průměru všech hodnot, které tónu náleží.

Tímto procesem je získáno 12 hodnot pro každou oktávu (náležejících jednotlivým tónům), na které je proces analýzy prováděn. V případě analýzy tří oktáv je tedy výstupem 36 hodnot.

Výpočet intenzit tónů v rámci oktáv

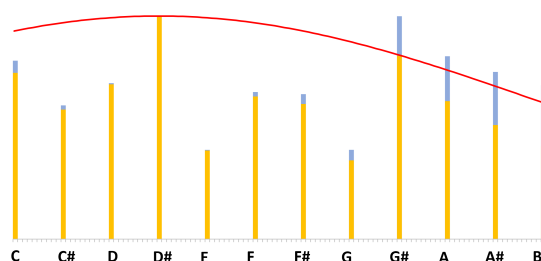
Následně se spočítá aritmetický průměr tónů vzdálených o interval oktávy (tzn. např. C4, C5 a C6). Interval oktávy je považován za nejvíce konsonantní a je součástí harmonické řady (viz kapitola 2.1).

Výstupem tohoto procesu je 12 hodnot. Každá hodnota reprezentuje intenzitu tónu v rámci všech analyzovaných oktáv.

Úprava hodnot Gaussovou křivkou

Hodnoty jsou upraveny využitím Gaussovy funkce se středem v předchozím zvoleném tónu. Tato operace se děje za účelem upřednostnění aktuálního tónu před ostatními. To má za cíl snížení četnosti výběru jiné frekvence než frekvence aktuální a zamezit velkým změnám frekvence. Vzdálenější tóny jsou zredukovány více než tóny bližší. Redukce ale probíhá jenom do té míry, aby i vzdálené tóny měly možnost převyšovat tón aktuální.

Znázornění procesu se středem Gaussovy funkce v tónu D[#] se nachází na obrázku 10.3. Data na vstupu jsou vyznačena šedě a výstupní upravená data jsou vyznačena žlutě.



Obrázek 10.3: Úprava hodnot Gaussovou křivkou

Nalezení a vyhlazení maximální hodnoty

Z upravených hodnot Gaussovou křivkou se vybere maximální hodnota N_{max} . Ta je následně váhována využitím předchozí maximální hodnoty $N_{prevMax}$ (rovnice 10.2). Vyhlazovací konstanta je nastavena na 0,9. Tím vznikne výsledná hodnota N_{res} . Její hodnota se uloží do $N_{prevMax}$ a je zaokrouhlena na celé číslo. Toto číslo je v rozsahu 0 – 11 a odpovídá 12 tónům v jedné oktávě.

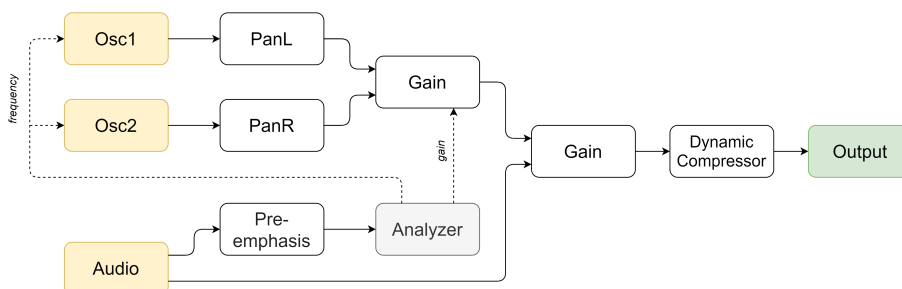
$$N_{res} = 0,9N_{prevMax} + 0,1N_{max} \quad (10.2)$$

Umístění tónu do oktávy a převod na frekvenci

Pozici tónu v oktávě je potřeba převést na frekvenci určitého tónu. Je tedy nutné určit oktávu, ve které se frekvence bude nacházet. Pro tento převod byla zvolena **oktáva jednočárkovaná**. Ta byla určena jako nejvhodnější, jelikož její frekvenční rozsah je optimální pro základní frekvenci binaurálních rytmů (261.63 Hz – 493.88 Hz). Následně je získána frekvence tónu pomocí vzorce rovnoměrného ladění s referenční tónu komorního A (viz vzorec 7.1). Tato hodnota je následně použita jako základní frekvence binaurálních rytmů.

10.4.5 Zvukové uzly v aplikaci

Na následujícím obrázku 10.4 je vyobrazen graf zvukových uzlů Web Audio API využitých v aplikaci a jejich vzájemné propojení. Zvukové signály vznikající na žlutých uzlech vlevo a postupují přes jednotlivé vrcholy grafu až k zelenému výstupnímu uzlu. Ten reprezentuje reproduktory zařízení.



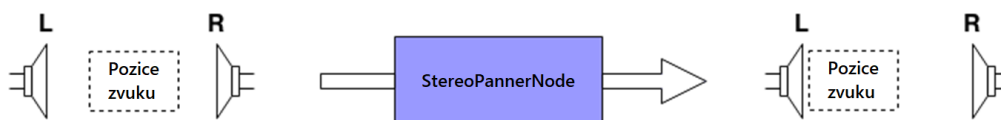
Obrázek 10.4: Graf uzlů

Oscilátory

Jsou realizovány pomocí *OscillatorNode*. Generují sinusový signál o určité frekvenci. Nemají žádné vstupy a právě jeden výstup. *OscillatorNode* může být spuštěný pouze jednou. Proto při opětovném spuštění se vytváří nový objekt funkcí *createOscillator*. V aplikaci se vyskytují dva oscilátory, jelikož pro vytvoření efektu binaurálních rytmtů jsou potřeba dvě různé frekvence. Pro snazší použití je v projektu objekt obalen třídou *Oscillator*.

Panner uzly

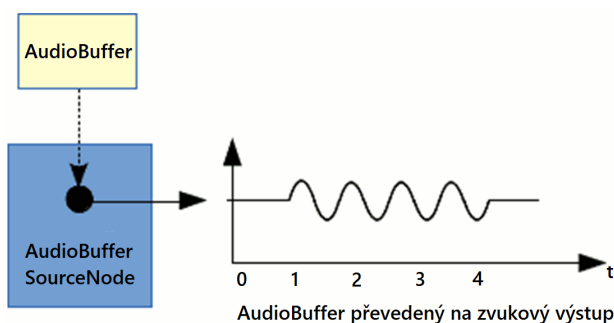
Jsou realizovány pomocí *StereoPannerNode*. Dokáží manipulovat s jednotlivými kanály zvukového signálu. Mají tedy právě jeden vstup a jeden výstup. V aplikaci se vyskytují dva panner uzly a používají se k oddělení signálů generovaných z oscilátorů do pouze levého a pravého kanálu. Na obrázku 10.5 je znázorněn přesun signálu umístěného ve středu do levého kanálu.



Obrázek 10.5: funkce *StereoPannerNode* [10]

Zvukový vstup

Je realizován pomocí *AudioBufferSourceNode*. Používá se k přehrání skladby, která je nahrána v paměti a reprezentována pomocí *AudioBuffer*. Je možný spustit vždy maximálně jednou, proto pro opětovné přehrání se vytváří nový objekt funkcí *createBufferSource*. Nemá žádné vstupy a má právě jeden výstup. V aplikaci se nachází jeden a reprezentuje právě přehrávanou skladbu (nebo skladbu připravenou ke spuštění). Pro snazší použití je v projektu objekt obalen třídou *Song*.



Obrázek 10.6: funkce *AudioBufferSourceNode* [10]

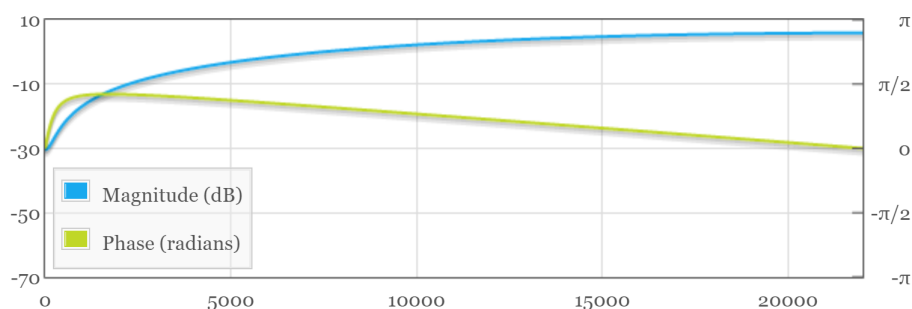
Preemfáze

Je realizována pomocí *IIRFilterNode*, který přijímá jeden vstup a má jeden výstup. V aplikaci slouží k utlumení nízkých frekvencí před frekvenční analýzou signálu. Výsledné frekvenční spektrum je následně rovnoměrněji rozložené a vhodnější na další zpracování, nikoliv však k přehrání na reproduktorech. Proto preemfáze a následná analýza zvukové stopy jsou uspořádány paralelně. U hudebních skladeb jsou často nízké frekvence nejvíce dominantní, jelikož je na ně lidský sluch málo citlivý.

Preemfáze je realizována pomocí filtru s nekonečnou impulzní odezvou (IIR). Dala by se realizovat i pomocí jednoduššího filtru s konečnou impulzní odezvou (FIR). Ten ale není v knihovně Web Audio API nabízen a zvukový uzel by musel být implementován. Proto byl zvolen *IIRFilterNode*.

Frekvenční odezva filtru při následující koeficientech a a b má podobu znázorněnou na obrázku 10.7.

- a : 1; -0,97
- b : 1



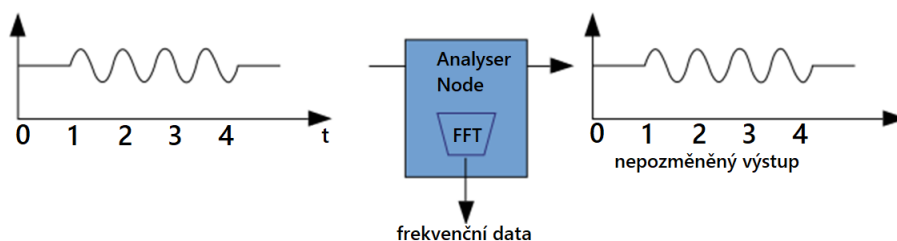
Obrázek 10.7: Frekvenční odezva IIR filtru při preemfázi [30]

Zvukový analyzátor

Je realizován pomocí *AnalyserNode*. Má právě jeden vstup a jeden výstup (který je stejný jako vstupní signál), ten v aplikaci není využit. Provádí FFT vstupního signálu. Aktuální data o zastoupení frekvencí v signálu se získávají pomocí funkce *getByteFrequencyData*. Ta vrací hodnoty z intervalu 0 – 255 reprezentující relativní zastoupení energie ve frekvenčním spektru. Počáteční hodnota začíná na frekvenci 0 Hz a poslední hodnota končí frekvencí, která je rovna polovině vzorkovací frekvence.

Velikost okna FFT je nastavena na 16384. Počet vzorků je roven polovině velikosti okna, tedy 8192. Takovou velikost mají data vrácená metodou *getByteFrequencyData*. Při vzorkovací frekvenci 48 kHz je maximální frekvence rovna 24 kHz a jedna hodnota reprezentuje frekvenční pásmo o přibližné šířce 2,93 Hz.

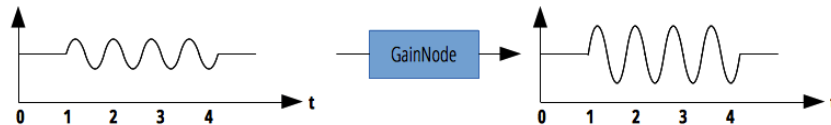
Je nastavena vysoká hodnota vyhlazení dat. To má za následek, že odhad frekvenčního spektra je do vysoké míry ovlivňován předešlým průběhem. V jednotlivých okamžicích tedy nejsou patrné velké změny spektra, ale odhad frekvenčního spektra se mění pozvolna.



Obrázek 10.8: Funkce *AnalyserNode* [10]

Gain uzly

Jsou realizovány pomocí *GainNode*. Jedná se o jednoduché uzly s jedním vstupem a jedním výstupem. Jejich hlavním účelem je úprava intenzity vstupního zvukového signálu. V aplikaci se nachází dva. První slouží pro úpravu intenzity binaurálních rytů. Druhý slouží pro úpravu intenzity celkového výstupního signálu aplikace. Funkce *GainNode* je znázorněna na obrázku 10.9.



Obrázek 10.9: Funkce *GainNode* [10]

Dynamická komprese

Je realizována pomocí *DynamicsCompressorNode*. Má jeden vstup a jeden výstup. V aplikaci se nachází před samotným výstupem na reproduktory. Analyzuje celkovou intenzitu přehrávané skladby a v případě potřeby dokáže dynamicky snížit její hlasitost. Slouží pro zamezení efektu nazývaného clipping, který způsobuje zkreslení zvuku. K tomu dochází v případě překročení maximální hranice amplitudy zvukového signálu. Hranice, nad kterou je zahájena komprese, je nastavena na -16 dB.

11 Testování aplikace

Tato kapitola se zabývá problematikou ověření funkčnosti aplikace. Je zde popsáno a zdůvodněno, jakým způsobem bylo testování navrženo a provedeno. Pro zajištění korektního fungování webové stránky byly vytvořeny **testovací scénáře**. K analýze efektů a použitelnosti aplikace bylo provedeno **uživatelské testování**.

11.1 Testovací scénáře

K ověření funkčnosti aplikace a odhalení defektů bylo zvoleno testování formou **scénářů**. To přistupuje k testování systematicky pomocí předem stanoveného **testovacího plánu**. Toto rozhodnutí vychází především ze zadání bakalářské práce. Testy nejsou automatizované a je tedy nutná účast osoby, která provádí jednotlivé kroky testu a vyhodnocuje výsledky. To činí tento způsob časově náročnější, ale umožňuje ověřovat i takové vlastnosti aplikace, které jsou programově obtížně zjistitelné.

Aplikace, která vznikla v rámci bakalářské práce, se skládá pouze z jedné obrazovky. Plní jeden účel (přehrání skladby s přidávanými binaurálními rytmy). Navíc pro interakci s uživatelem jsou využity takové elementy, které neumožňují zadání neočekávaných hodnot. Tyto skutečnosti snižují počty případů, které je potřeba otestovat.

Pro organizaci testů je využita webová aplikace **Test Collab**. Ta je v základní verzi dostupná zdarma. Umožňuje snadné vytváření testovacích plánů a jejich provádění. Nabízí také přehlednou analýzu defektů v aplikaci a možnost týmového přístupu.

Každý test se zaměřuje na ověření funkce elementu/sekce na stránce. Testování se také věnuje ověření funkčnosti všech zvukových formátů uvedených v kapitole 10.4.

Celkem je vytvořeno 12 testů. Všechny se nachází ve stejném testovacím plánu, jehož provedení trvá okolo 15 minut.

Jednotlivé testovací scénáře obsahují přibližně pět testovacích kroků a testují následující aspekty:

- tlačítko přehrání/zastavení skladby,

- tlačítko přepnutí na další skladbu,
- tlačítko přepnutí na předchozí skladbu,
- tlačítko nahrání souborů,
- posuvník celkové hlasitosti,
- posuvník aktuálního času skladby,
- posuvník frekvence rázů binaurálních rytmů,
- posuvník základní frekvence binaurálních rytmů,
- posuvník hlasitosti binaurálních rytmů,
- tlačítko automatická hlasitost binaurálních rytmů,
- tlačítko automatická frekvence rázů binaurálních rytmů,
- patička stránky.

Níže je uveden příklad testovacího scénáře ověřujícího funkčnost posuvníku sloužícího k nastavení frekvence rázů binaurálních rytmů.

Krok	Akce	Očekávaný výsledek
1	Na stránce se vyskytuje posuvník frekvence rázů binaurálních rytmů	ano
2	Posuvník frekvence rázů binaurálních rytmů je ve stavu enabled	ano
3	Posuvník frekvence rázů binaurálních rytmů má tool-tip	Set binaural beats tone frequency
4	Výchozí hodnota	10 Hz (Alpha)
5	Spuštění skladby, posun posuvníkem	mění se frekvence rázů (poslechem), aktualizuje se značka s aktuální frekvencí, aktualizují se třídy, do kterých frekvence spadá

Testovacím plánem byla ověřena funkčnost aplikace na těchto operačních systémech a webových prohlížečích:

OS	Webový prohlížeč	Verze	Funkčnost
Mac OS	Google Chrome	90.0.4430.85	ANO
Mac OS	Safari	14.0.3	NE
Ubuntu (Linux)	Brave	1.23.71	ANO
Ubuntu (Linux)	Google Chrome	89.0.4389.90	ANO
Ubuntu (Linux)	Mozilla Firefox	86.0	ANO
Ubuntu (Linux)	Opera	75.0.3969.171	ANO*
Windows 10	Google Chrome	90.0.4430.72	ANO
Windows 10	Microsoft Edge	90.0.818.41	ANO
Windows 10	Mozilla Firefox	87.0	ANO
Windows 10	Opera	75.0.3969.171	ANO

* podpora pouze formátů: MP3, FLAC, WAV, OPUS, OGG

Aplikace není podporována webovým prohlížečem Safari, jelikož ten zatím podporuje pouze základní funkcionalitu knihovny Web Audio API. To znemožňuje korektní chod aplikace.

11.2 Uživatelské testování

Cílem tohoto testování je získat informace o **dojmu** a **efektech** aplikace z pohledu uživatele. Zatímco scénářové testování slouží především k odhalení defektů v aplikaci, uživatelské testování slouží převážně k její **optimalizaci**. Pomáhá zjistit, jaké funkce uživatelé očekávají a jaké vlastnosti aplikace jim nevyhovují. Jednotlivá uživatelská hodnocení jsou dostupná v příloze A.

Testování proběhlo na malé skupině osob. Měly možnost si zvolit vlastní hudební skladby, které znají a rádi poslouchají. Žádoucí bylo, aby aplikace byla otestována na různorodé škále hudebních stylů. Poslech probíhal za využití **sluchátek** po minimální dobu **20 minut**. Frekvence rázů binaurálních rytmů byla nastavena na **10 Hz**, tedy na frekvenci odpovídající mozkovým vlnám **Alfa**. Tyto kmitočty jsou spojovány se stavy **relaxace**. Dynamická základní frekvence a intenzita binaurálních rytmů byly po celou dobu trvání testu aktivní. Po dobu poslechu bylo uživateli doporučeno se uvolnit a nevěnovat pozornost jiným činnostem.

Po provedení testování byli uživatelé požádáni o vyplnění krátkého **dotazníku**. Otázky v něm jsou převážně zaměřeny na binaurální rytmy v apli-

kaci. Důležitým údajem je především uživatelský názor na **rušivost** přidaných frekvencí ve výsledné hudební skladbě. Při tvorbě aplikace byla snaha o minimální poškození hudebního znění skladby binaurálními tóny. Pokud by aplikace tuto vlastnost nevykazovala, poslech by byl nepříjemný a uživatelé by postrádali důvod ji používat. Nejedná se o čistě objektivní vlastnost, proto se názory uživatelů na toto téma mohou rozcházet. Navíc se výkon může poměrně lišit v závislosti na vlastnostech hudební skladby, která byla v aplikaci poslouchána.

Byly také zjišťovány informace o dosažení **uklidňujícího efektu**. Odpovědi na tuto otázku mohou být ale zavádějící. Účinky binaurálních rytmů jsou velice subjektivní a pro jejich výskyt je vhodný pravidelný poslech. Navození stavu relaxace při použití aplikace může být navíc spojené s tzv. placebo efektem. Pro větší vypovídající hodnotu výsledků o vlastnostech aplikace by bylo nutné uskutečnit kvalitnější testování (zejména s větší skupinou osob).

V dotazníku bylo požadováno zhodnocení následujících aspektů:

- Na stupnici 1–10 ohodnoťte, jak přidané binaurální tóny narušovaly hudební poslech. (1 – vůbec nenarušovaly, 10 – poslech byl velice nepříjemný)
- Přidané binaurální tóny na Vás působily rušivě z následujících důvodů. (nepovinné)
 - Jsou moc hlasité.
 - Nereflektují melodii skladby.
 - Moc často mění frekvenci.
 - Působí v hudební skladbě nepřírozně.
 - Binaurální rytmy mi nezní příjemně.
 - jiná odpověď...
- Na stupnici 1–10 ohodnoťte, jaký měl na Vás poslech uklidňující efekt. (1 – žádný, 10 – silně znatelný)
- Jaké další funkce/vylepšení aplikace byste ocenili?

Uživatelská hodnocení se přikláněla k tomu, že binaurální rytmy jsou pouze mírně rušivé při přehrávání hudební skladby. Mezi odpověďmi je uvedeno, že důvodem rušivosti binaurálních rytmů je vysoká hlasitost a nepřirozené znění. K tomu dochází zejména proto, že se frekvence binaurálních

rytmů vyskytují neustále s poměrně vysokou hlasitostí. Přidané frekvence musí být dostatečně slyšitelné, aby mohly plnit svůj účel, nelze tedy očekávat nulové narušení hudební kvality. Je zřejmé, že proces dynamické manipulace se základní frekvencí a intenzitou binaurálních rytmů napomáhá k posluhačsky přívětivějšímu výsledku.

Uklidňující efekt se u většiny uživatelů dostavil pouze mírný či žádný. Jak bylo dříve zmíněno v této kapitole, vzhledem k povaze testování nelze z těchto dat odvozovat závěry o účincích aplikace a binaurálních rytmů. Pro kvalitnější zhodnocení by bylo vhodné brát v potaz charakter poslouchané hudby.

Uživatelé by ocenili možnost stažení aplikace do telefonu pro offline používání a funkci umožňující úpravu pořadí přehrávaných skladeb.

12 Možná rozšíření aplikace

Tato kapitola slouží k představení vhodných rozšíření a vylepšení aplikace. Níže zmíněné funkce nejsou součástí základních požadavků, ale mohly by mít pozitivní vliv na uživatelský dojem a účinnost aplikace.

12.1 Optimalizace vytváření efektu binaurálních rytmů

Způsob dynamického určení základní frekvence binaurálních rytmů a jejich přidání do hudební skladby by se dal zajisté dále optimalizovat. Jelikož binaurální rytmy a hudba vytvářejí převážně subjektivní prožitek, je těžké objektivně hodnotit účinnost procesu. Pro nalezení nejúčinnější metody by bylo vhodné implementovat více procesů a následně tyto způsoby podrobit testování na početné skupině osob. Data by se získala pomocí formulářů vyplněných po vyzkoušení všech metod, případně měřením mozkové aktivity pomocí EEG. Využitím těchto dat by bylo snazší zvýšit efektivitu aplikace, jedná se ale o zdrojově náročný proces. Proto se vývoj aplikace řídil převážně poznatky zmíněnými v teoretické části bakalářské práce a subjektivním pozorováním autora práce.

12.2 Optimalizace grafického rozhraní

Grafické rozhraní aplikace je vytvořené pro optimální vzhled na PC. Rozložení prvků na stránce je při zobrazení na mobilním telefonu stejné jako u obrazovek počítačů. To není příliš vhodné řešení. Za příhodné rozšíření aplikace je tedy považováno zajištění optimálního rozložení elementů i na malých obrazovkách mobilních zařízení.

Další vlastností spojenou s grafickým rozhráním aplikace, kterou by uživatelé mohli ocenit, je noční režim. Po zvolení tohoto nastavení by aplikace využívala převážně tmavé barvy. To má za následek, že obrazovka ve tmě tolik nesvítí a produkuje méně modrého světla. Tím je šetrnější pro oči a vhodnější na používání při nízkém osvětlení převážně v nočních hodinách.

12.3 Rozšířené možnosti přehrávání hudebních souborů

Uživatel si do aplikace nahrává vlastní hudební soubory. Aplikace je následně postupně přehrává a umožňuje přepnutí na další/předchozí skladbu. Uživatel ale nemá možnost úpravy pořadí přehrávání. Vhodné by bylo zobrazení fronty skladeb, kterou by mohl uživatel upravovat dle potřeby. Navíc by byla vhodná možnost odebrání a přidání jednotlivých souborů.

V dnešní době se velice rozmáhají hudební streamovací platformy (např. Spotify, Apple music, Amazon music, Youtube music, ...). To má za následek, že uživatelé nemají přístup přímo k souborům hudebních skladeb. Přistupují k nim totiž bezprostředně pomocí příslušné aplikace. I když platformy umožňují stažení hudby pro offline přehrávání, neumožňují přístup přímo k souborům. To se děje především z důvodů autorských práv. Některým uživatelům tato skutečnost může zkomplikovat přehrání skladby v aplikaci vytvořené v bakalářské práci. Ta totiž požaduje nahrání hudebního souboru ze zařízení.

Vytvořená aplikace by tedy mohla nabízet možnost přihlášení pomocí API k uživatelem zvolené hudební streamovací platformě. Z té by následně aplikace nabízela hudbu k přehrávání a přidávala k ní frekvence binaurálních rytmů. To by vyžadovalo větší síťový přenos dat, ale uživatel by nemusel disponovat hudebními soubory na disku. Streamovací služby by ale tuto možnost musely plně podporovat a následná implementace by se pro každou tuto platformu lišila.

12.4 Optimalizace platformy aplikace

Aplikace pro svoji funkci nepotřebuje internetové připojení, ale pro její zobrazení je potřeba, jelikož její kód se nachází na webovém serveru. Tato vlastnost může limitovat uživatele, kteří chtějí využívat aplikaci a přístup k internetu v dané chvíli nemají. Tento problém se dá vyřešit pomocí nainstalování aplikace do zařízení. Webové stránky, které tuto možnost nabízejí se nazývají PWA (progresivní webové aplikace). Ty musí splňovat určitá kritéria, aby pod tuto kategorii spadaly. Webový prohlížeč následně umožní uživateli stránku stáhnout a užívat jako běžnou aplikaci. Instalace ale není nutná a uživatel může nadále využívat webovou aplikaci běžným způsobem v prohlížeči.

Mezi vhodnou úpravou aplikace se také řadí zajištění podpory webového prohlížeče Safari. To by znamenalo využití pouze těch vlastností Web Audio

API, které tento prohlížeč podporuje. Bylo by nutné najít jiné způsoby, jak chybějící funkcionality docílit. Ta by se musela implementovat přímo v aplikaci, využít jiná knihovna nebo najít jiný podporovaný způsob, jak pomocí Web Audio API docílit stejné funkce.

12.5 Optimalizace distribuce aplikace

Nyní se aplikace nachází na serveru a doméně poskytovaných zdarma službou společnosti GitLab. Tento způsob je omezující a neumožňuje zvolit celé doménové jméno. Navíc nenabízí žádnou kontrolu nad serverem, na kterém se aplikace nachází. Není tedy možné optimalizovat, spravovat ani analyzovat jeho výkonnostní vlastnosti.

Pro oficiální distribuci by bylo vhodné zakoupit vlastní doménové jméno a zajistit tak hosting aplikace optimálním způsobem.

13 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit aplikaci pro přehrávání hudby společně s binaurálními rytmy. Tvorbě aplikace nejprve předcházela teoretický rozbor. Ten se zabýval zvukovým signálem, lidským sluchem, skládáním vln, digitálním zvukem, frekvenční analýzou, hudbou a nakonec binaurálními rytmy. Praktická část práce se zabývala návrhem, implementací a testováním aplikace. Na závěr jsou navržena možná rozšíření.

Řešení bylo implementováno jako webová aplikace s názvem *Binaural beats music player*. K realizaci byl využit programovací jazyk TypeScript a knihovna Web Audio API. Aplikace splňuje všechna požadovaná kritéria, která byla v zadání uvedena. Umí přehrávat hudební soubory různých formátů společně s binaurálními rytmy. Jejich základní frekvenci a intenzitu lze nastavit jako dynamickou (určuje aplikace) nebo statickou (určuje uživatel). Frekvenci rázů binaurálních rytmů určuje vždy uživatel na základě mozkových vln, které chce navodit.

Mezi požadovanou funkcí aplikace patřilo potlačování rušivého efektu přidávaných frekvencí v hudební skladbě. Toho bylo dosaženo dynamickou změnou základní frekvence a intenzity binaurálních rytmů. Proces určení těchto parametrů využívá hodnoty aktuálního frekvenčního spektra skladby získané algoritmem FFT.

Aplikaci se podařilo úspěšně otestovat testovacími scénáři. Tím byla potvrzena korektní funkčnost na většině moderních webových prohlížečů kromě prohlížeče Safari. To z důvodu nedostatečné podpory knihovny Web Audio API. Následovalo také uživatelské testování. Při něm skupina testovacích uživatelů hodnotila především rušivost binaurálních rytmů při poslechu skladby. Tyto recenze se většinou přikláněly k tomu, že aplikace plní svůj hlavní účel a dokáže efektivně potlačit rušivé vlastnosti binaurálních rytmů přehrávaných společně s hudební skladbou.

Kvalitu procesu dynamického přidávání binaurálních frekvencí je těžké objektivně zhodnotit, a proto také vhodně optimalizovat. Pro zajištění ideálního fungování této funkcionality by bylo zapotřebí většího experimentování a následného testování navržených procesů. Existuje široké spektrum hudebních skladeb a žánrů, lze tedy očekávat, že tento proces probíhá optimálně jen pro určité skladby. U elektronické hudby lze snadněji dosáhnout přirozenějšího a hudebnějšího znění. To proto, že často již obsahuje obdobné tóny. Horší výsledky lze očekávat např. u akustické hudby.

14 Přehled zkratek

- **A/D** – Analog to Digital
- **AAC** – Advanced Audio Coding
- **API** – Application Programming Interface
- **CC** – Creative Commons
- **CSS** – Cascading Style Sheets
- **D/A** – Digital to Analog
- **dB** – decibel
- **DFT** – Discrete Fourier Transform
- **DTFT** – Discrete-Time Fourier Transform
- **DVD** – Digital Video Disc
- **EEG** – Electroencephalography
- **FFT** – Fast Fourier Transform
- **FIR** – Finite Impulse Response
- **FLAC** – Free Lossless Audio Codec
- **FS** – Fourier Series
- **FT** – Fourier Transform
- **HTML** – Hypertext Markup Language
- **HTTP** – Hypertext Transfer Protocol
- **Hz** – hertz
- **IIR** – Infinite Impulse Response
- **ISO** – International Organization for Standardization
- **LPCM** – Linear Pulse-Code Modulation
- **m** – metr
- **M4A** – MPEG-4
- **MP3** – MPEG-1 Audio Layer III/MPEG-2 Audio Layer III
- **OS** – Operating System

- **PC** – Personal Computer
- **PCM** – Pulse-Code Modulation
- **PDF** – Portable Document Format
- **PWA** – Progressive Web Application
- **Pa** – pascal
- **Ph** – phon
- **STFT** – Short-Time Fourier Transform
- **SVG** – Scalable Vector Graphics
- **s** – sekunda
- **W** – watt
- **WAV** – Waveform Audio File Format
- **WMA** – Windows Media

Literatura

- [1] SYROVÝ, V. *Hudební akustika*. Akademie múzických umění v Praze, 2003. ISBN 80-7331-901-2.
- [2] GERLICOVÁ, M. *Muzikoterapie v praxi: Příběhy muzikoterapeutických cest*. Grada, 2014. ISBN 978-80-247-4581-7.
- [3] SCHAUER, P. *Vybrané statě z akustiky* [online]. Ústav fyziky Stavební fakulty VUT v Brně, 2008. [cit. 2020/12/03]. Doplnkové texty DB01. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf.
- [4] KUBÍNEK, R. *(Diskrétní) Fourierova transformace* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, 2003. [cit. 2021/02/12]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>.
- [5] MAHELKA, V. *Přehled učiva hudební nauky* [online]. ZUŠ Praha - Zbraslav. [cit. 2021/02/23]. I. část hudební teorie. Dostupné z: <https://www.zuszbraslav.cz/images/hudebninauka/Prehled%20uciva%20HN%20-%20teorie.pdf>.
- [6] HEWITT, M. J. *Music theory for computer musicians*. Course Technology, CENGAGE Learning, 2008. ISBN 1-59863-503-4.
- [7] SYROVÝ, V. *Hudební zvuk*. Akademie múzických umění v Praze, 2009. ISBN 978-80-7331-161-2.
- [8] CHAIEB, L. et al. Auditory beat stimulation and its effects on cognition and mood States. *Front Psychiatry*. 2015, 6, s. 70. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4428073/>.
- [9] MARTINEK, J. *Frekvenční analýza zvuku* [online]. Ústav fyziky Stavební fakulty VUT v Brně. [cit. 2021/02/23]. Dostupné z: <http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/martinek/frekvanalzvuku.pdf>.
- [10] *Web Audio API* [online]. MDN Web Docs. [cit. 2021/04/02]. Dostupné z: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Web_Audio_API.
- [11] HLAVÁČ, V. *Digitální zpracování obrazu* [online]. České vysoké učení technické v Praze. [cit. 2021/01/23]. Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky. Dostupné z: <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZpr0br/>.

- [12] HALAS, Z. *Matematika a hudba* [online]. 2019. [cit. 2021/02/23]. Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/personal/becvamar/seminar_ss/Hudba-text.pdf.
- [13] VAŠINA, M. *Environmentální fyzika* [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. [cit. 2020/12/29]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika.
- [14] LEPIL, O. *Mechanické kmitání a vlnění* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. [cit. 2021/01/10]. Studijní modul. Dostupné z: http://mofy.upol.cz/vystupy/02_texty/modul_me_mkv.pdf.
- [15] BERNAT, P. *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. [cit. 2021/01/03]. Dostupné z: http://www.anatomie-varhan.cz/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm.
- [16] BENEK, J. *Posuzování elektromagnetického hluku pohonu psychoakustickými veličinami* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2017. [cit. 2021/01/17]. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, diplomová práce. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/28813/1/Posuzovani%20elektromagnetickeho%20hluku%20pohonu%20psychoakustickymi%20velicinami.pdf>.
- [17] REICHL, J. – VŠETIČKA, M. *Encyklopedie fyziky - zvukové vlnění* [online]. Multimedialní encyklopedie fyziky. [cit. 2020/12/10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/152-zvukove-vlneni>.
- [18] FORRO, D. *Počítače a hudba*. Grada, 1994. ISBN 80-85623-57-9.
- [19] GARCIA-ARGIBAY, M. – SANTED, M. A. – REALES, J. M. Efficacy of binaural auditory beats in cognition, anxiety, and pain perception: a meta-analysis. *Psychol Res*. Mar 2019, 83, 2, s. 357–372. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30073406/>.
- [20] HANZÁLEK, P. *Praktické ukázky zpracování signálů* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2019. [cit. 2021/01/23]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, diplomová práce. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=190016.
- [21] HOLCMANOVÁ, N. *Hluk a zdraví v pracovním prostředí. Poškození zdraví způsobené hlukem*. [online]. Univerzita Karlova v Praze, 2012. [cit. 2021/01/10]. Klinika pracovního a cestovního lékařství, bakalářská práce. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/96227/>.

- [22] JAHODA, R. *Mezi tichem a šumem - komprese zvuku* [online]. Tvfreak, 2008. [cit. 2021/01/07]. Dostupné z: <https://www.tvfreak.cz/mezi-tichem-a-sumem-komprese-zvuku/2600>.
- [23] KLÁPOVÁ, M. *Matematický pohled na různá hudební ladění a jejich vývoj* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2010. [cit. 2021/02/23]. Katedra matematické analýzy a aplikací matematiky, diplomová práce. Dostupné z: <https://theses.cz/id/kycyoq/1075470>.
- [24] KOBLIŽKA, M. *Analýza maskování řeči hlukem v hromadných dopravních prostředcích* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2019. [cit. 2021/02/13]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, bakalářská práce. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193938.
- [25] KRÁLOVÁ, M. *Techmania encyklopedie - Akustika* [online]. Techmania science center - eduportál. [cit. 2020/12/10]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika>.
- [26] KŘÍŽOVÁ, K. *Stimulace psychických stavů člověka hudbou a zvukem* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2015. [cit. 2021/02/23]. Fakulta pedagogická, Katedra hudební kultury, bakalářská práce. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/19749/1/Bc%20Krizova.pdf>.
- [27] LE SCOUARNEC, R. P. et al. Use of binaural beat tapes for treatment of anxiety: a pilot study of tape preference and outcomes. *Altern Ther Health Med*. Jan 2001, 7, 1, s. 58–63. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11191043/>.
- [28] LÓPEZ-CABALLERO, F. – ESCERA, C. Binaural Beat: A Failure to Enhance EEG Power and Emotional Arousal. *Front Hum Neurosci*. 2017, 11, s. 557. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5694826/>.
- [29] MIŠELNICKÁ, J. *Aktivita mozku při poslechu a představě hudby* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, Filozofická fakulta, 2018. [cit. 2021/02/23]. Katedra psychologie, diplomová práce. Dostupné z: <https://theses.cz/id/bomxeg/24754008>.
- [30] *Filter frequency response grapher* [online]. EarLevel Engineering. [cit. 2021/04/02]. Dostupné z: <https://www.earlevel.com/main/2016/12/08/filter-frequency-response-grapher/>.
- [31] PADMANABHAN, R. – HILDRETH, A. J. – LAWS, D. A prospective, randomised, controlled study examining binaural beat audio and

- pre-operative anxiety in patients undergoing general anaesthesia for day case surgery. *Anaesthesia*. 2005, 60, 9, s. 874–877. Dostupné z: <https://associationofanaesthetists-publications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2044.2005.04287.x>.
- [32] PALKO, L. *Úvod do Gaborovy transformace a její srovnání s vlnkovou transformací* [online]. *Elektrorevue*, 2006. [cit. 2021/02/12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/06033/index.html>.
- [33] PIKNEROVÁ, J. *Matematika a hudba* [online]. Masarykova univerzita, 2009. [cit. 2021/02/22]. Fakulta přírodovědecká, diplomová práce. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/cn7ah/Matematika_a_hudbaN.pdf.
- [34] SÚKUPOVÁ, L. *Vzorkování signálu a aliasing* [online]. 2015. [cit. 2021/01/07]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/vzorkovani-signalu-a-aliasing/>.
- [35] TRÁGE, D. *Časově-frekvenční analýza* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2009. [cit. 2021/02/12]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav radioelektroniky, bakalářská práce. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15486.
- [36] VEJBOR, R. *Efektivita binaurálních rytmů pro navození relaxačních stavů* [online]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, 2015. [cit. 2021/02/28]. Katedra pedagogiky a psychologie, bakalářská práce. Dostupné z: https://theses.cz/id/yl8hf1/Efektivita_binauralnich_rytmu_pro_navozeni_relaxa_nich_st.pdf.
- [37] WAHBEH, H. – CALABRESE, C. – ZWICKEY, H. Binaural beat technology in humans: a pilot study to assess psychologic and physiologic effects. *J Altern Complement Med*. 2007, 13, 1, s. 25–32. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17309374/>.
- [38] *TypeScript* [online]. ITNetwork - Typescript. [cit. 2021/04/02]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/javascript/typescript>.
- [39] *Wikimedia* [online]. [cit. 2020/12/29]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/>.
- [40] *Wikiskripta sluch* [online]. [cit. 2020/12/23]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Pr%C3%A1h_sluchu_a_sluchov%C3%A9_pole.
- [41] ZAVADIL, J. *Analogová a digitální zařízení* [online]. 2010. [cit. 2021/01/10]. Dostupné z: http://www.jardaz.cz/articles.php?article_id=19.

A Uživatelské hodnocení

Na stupnici 1–10 ohodnoťte, jak přidané binaurální tóny narušovaly hudební poslech. (1 – vůbec nenarušovaly, 10 – poslech byl velice nepříjemný)

1. uživatel: 4
2. uživatel: 5
3. uživatel: 4
4. uživatel: 3

Přidané binaurální tóny na Vás působily rušivě z následujících důvodů. (nepovinné)

1. uživatel: -
2. uživatel: Jsou moc hlasité.
3. uživatel: Působí v hudební skladbě nepřirozeně.
4. uživatel: -

Na stupnici 1–10 ohodnoťte, jaký měl poslech uklidňující efekt. (1 – žádný, 10 – silně znatelný)

1. uživatel: 3
2. uživatel: 2
3. uživatel: 5
4. uživatel: 4

Jaké další funkce/vylepšení aplikace byste ocenili?

1. uživatel: žádné
2. uživatel: využívání offline v telefonu
3. uživatel: žádné
4. uživatel: úprava skladeb v playlistu a náhodné pořadí skladeb

B Návod na spuštění aplikace

Prvním krokem pro spuštění aplikace napsané v programovacím jazyce **TypeScript** je překlad do programovacího jazyka **JavaScript**. K tomuto procesu slouží překladač TypeScriptu **tsc**. Ten lze např. získat využitím správce balíčků pro JavaScript **npm**. Příkaz pro získání TypeScript překladače využitím npm vypadá následovně:

```
npm install -g typescript
```

Překlad souboru se provádí příkazem *tsc*. Ten vytvoří stejnojmenný soubor s příponou *.js*. Příklad příkazu pro soubor *app.ts* má následující tvar:

```
tsc app.ts
```

Pro spuštění aplikace je potřeba **HTTP server** a **webový prohlížeč**. Server může být realizován přímo na lokálním stroji nebo kdekoliv na dostupném serveru.

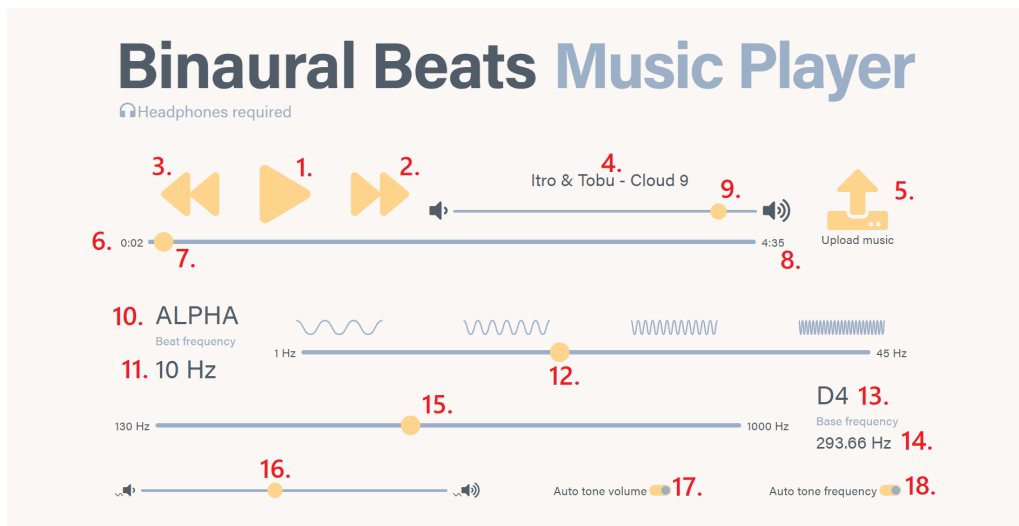
Pro vytvoření lokálního HTTP serveru existuje mnoho způsobů. Mezi snadné varianty se například řadí využití programovacího jazyka **Python3** a služby **http.server**. Ta vytvoří lokální server přístupný pod portem 8000 s obsahem aktuální složky následujícím příkazem:

```
python3 -m http.server
```

Pro spuštění aplikace ve webovém prohlížeči je nutno zadat následující adresu:

```
localhost:8000
```

C Uživatelská dokumentace



Obrázek C.1: Uživatelská dokumentace aplikace

1. spuštění/zastavení přehrávání
2. přepnutí na další skladbu
3. přepnutí na předchozí skladbu
4. název aktuální skladby
5. nahrání vlastních hudebních souborů z disku
6. aktuální čas skladby
7. nastavení aktuálního času skladby
8. celkový čas skladby
9. nastavení celkové hlasitosti přehrávání
10. skupina mozkových vln pod které spadá aktuální frekvence rázů binaurálních rytmů
11. aktuální frekvence rázů binaurálních rytmů
12. nastavení frekvence rázů binaurálních rytmů

13. tón odpovídající základní frekvenci binaurálních rytmů
14. aktuální základní frekvence binaurálních rytmů
15. nastavení základní frekvence binaurálních rytmů
16. nastavení hlasitosti binaurálních rytmů
17. aktivace/deaktivace dynamické hlasitosti binaurálních rytmů
18. aktivace/deaktivace dynamické základní frekvence binaurálních rytmů

D Obsah přiloženého DVD

Na přiloženém DVD se nacházejí následující složky:

- *doc* obsahující dokumentaci bakalářské práce ve formátu PDF,
- *app* obsahující zdrojové kódy aplikace a další soubory potřebné pro její běh,
- *tests* obsahující PDF soubor definující testovací scénáře aplikace.