

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Petr Fančal



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA ZVUKOVÉ INTERPRETACE HUDBY METODAMI ČÍSLICOVÉHO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

ANALYSIS OF EXPRESSIVE MUSIC PERFORMANCE USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Fančal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Petr Fančal

ID: 155111

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Analýza zvukové interpretace hudby metodami číslicového zpracování signálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je provedení analýzy skladeb z hlediska agogiky a porovnání interpretace stejného díla různými interprety, ať jsou to hudebníci nebo dirigenti. Analýzu hudebních nahrávek proveďte pomocí prostředí MATLAB. Porovnání vyjádřete efektivně jak matematicky, tak i v grafické podobě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COOC, N.: Beyond the Score: Music as Performance. Oxford University Press 2013. ISBN 978-0-19-935743-7 (electronic text)

[2] KUNA, M., BLÁHA, M.: Čas a hudba: K dramaturgii časových prostředků v hudebně interpretačním výkonu. Academia, Praha 1982.

[3] SMĚKAL, Z.: Systémy a signály: 1D a 2D diskretní a číslicové zpracování. Sdělovací technika, Praha, 2013. ISBN 978-80-86645-22-0

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je provedení analýzy skladeb z hlediska časových prostředků hudby. Úvodem jsou stručně popsány základní muzikologické pojmy a veličiny, které jsou v přímém vztahu k časovým prostředkům v hudebně interpretačním výkonu. Následující část práce se věnuje známým metodám číslicového zpracování signálu vhodným pro získávání hudební informace ze zvukové nahrávky. V praktické části jsou tyto metody demonstrovány v prostředí MATLAB na třech nahrávkách a výsledky porovnány z hlediska použité agogiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

agogika, číslicové zpracování signálu, DSP, expresivní hudební interpretace, MATLAB, MIR (Music Information Retrieval), tempo.

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is the analysis of musical compositions from the standpoint of time resources of music. The introduction briefly describes the basic musicological terms and variables that are in direct relationship to the time resources in expressive music performance. The following part of the work is devoted to the known methods of digital signal processing, suitable for music information retrieval from audio recordings. In the practical part these methods are demonstrated on three recordings in MATLAB environment and the results were compared in terms of used agogics.

KEYWORDS

agogics, digital signal processing, DSP, expressive music performance, MATLAB, MIR (Music Information Retrieval), tempo

FANČAL, Petr *Analýza zvukové interpretace hudby metodami číslicového zpracování signálu*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 47 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza zvukové interpretace hudby metodami číslicového zpracování signálu“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Zdeňku Smékalovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Úvod	11
1 Muzikologické termíny	13
1.1 Délka trvání interpretačního výkonu	13
1.2 Rozmezí estetické rezonance hudby	13
1.3 Nepravidelný průběh hudby	13
1.4 Nahodilé a záměrné odchylky tempa	14
1.4.1 Nahodilé odchylky tempa	14
1.4.2 Záměrné odchylky tempa	15
1.5 Míra rovnoměrnosti tempového pohybu	15
1.6 Hudební tempo metrizované	15
1.6.1 Základní tempo	15
1.6.2 Pevné tempo	15
1.6.3 Oscilující tempo	16
1.6.4 Proměnné tempo	16
1.7 Hudební tempo s libovolnou vazbou metra	16
1.8 Hudební tempo nemetrizované	16
1.8.1 Základní tempo nemetrizovaného pohybu	17
1.8.2 Pevné tempo nemetrizovaného pohybu	17
1.8.3 Oscilující tempo nemetrizovaného pohybu	17
1.8.4 Proměnné tempo nemetrizovaného pohybu	17
1.9 Hybnost hudebního proudu	17
1.10 Detailní pojetí melodické fráze a hudební agogiky	18
2 Metody číslicového zpracování hudebního signálu	19
2.1 Popis systému MIRtoolbox	20
2.1.1 Funkce pro odhad tempa	20
2.1.2 Funkce pro detekci počátků tónů: MIRONsets('Envelope')	21
2.1.3 Funkce pro detekci počátků tónů: MIRONsets('SpectralFlux')	21
2.2 Sonic Visualiser	21
2.2.1 Mazurka projekt	21
3 Praktické využití metod číslicového zpracování signálu pro analýzu hudební agogiky	23
3.1 Aplikace M-prohlížeč	23
3.1.1 Popis aplikace	23
3.1.2 Struktura aplikace	23

3.2	Výsledky analýzy nahrávek v aplikaci M-prohlížeč	25
3.2.1	Výběr hudební skladby pro účely analýzy	25
3.2.2	Porovnání skladeb z hlediska agogiky	26
3.2.3	Průměrné tempo	29
3.2.4	Základní tempo	31
3.2.5	Proměnné tempo	32
3.2.6	Celkové porovnání výsledků	34
3.3	Porovnání výsledků aplikací M-prohlížeč a Sonic Visualiser	35
3.3.1	Výsledky analýzy interpretací v programu Sonic Visualiser	35
3.3.2	Porovnání detekcí počátků tónů	42
4	Závěr	43
	Literatura	45
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Příklad využití spektrogramu při detekci chyby synchronizace levé a pravé ruky interpreta a využití nástroje pro měření. Na svislé ose je vynesena kmitočet [Hz] a na vodorovné čas [s].	22
3.1	Grafické řešení aplikace M-prohlížeč. Na vodorovné ose je vždy vynesena čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.	24
3.2	Úprava pozic hlavních dob interpretace Y. Fliera. Na vodorovné ose je vždy vynesena čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.	26
3.3	Úprava pozic hlavních dob interpretace P. Bartona. Na vodorovné ose je vždy vynesena čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.	27
3.4	Úprava pozic hlavních dob interpretace Ch. Atzingera. Na vodorovné ose je vždy vynesena čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.	28
3.5	Typické zpoždění vrcholů modulové obálky oproti změně spektra při nástupu tónu. Na vodorovné ose je vždy vynesena čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.	29
3.6	Výstup analýzy průměrného tempa interpretace Y. Fliera	30
3.7	Výstup analýzy průměrného tempa interpretace P. Bartona	30
3.8	Výstup analýzy průměrného tempa interpretace Ch. Atzingera	31
3.9	Časový vývoj tempa interpretace Y. Fliera (Stoupající křivka představuje zpomalení tempa). Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].	32
3.10	Časový vývoj tempa interpretace P. Bartona. Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].	33
3.11	Časový vývoj tempa interpretace Ch. Atzingera. Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].	33
3.12	Srovnání výsledků všech interpretací. Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].	34
3.13	Časový vývoj tempa interpretace Y.Fliera. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je délka trvání úseku [s] mezi časovými pozicemi (označenými fialově).	36
3.14	Časový vývoj tempa interpretace Y. Fliera včetně dynamiky. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je tempo [úderů/min] (dynamika je označena oranžově).	37

3.15	Časový vývoj tempa interpretace P. Bartona. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je délka trvání úseku [s] mezi časovými pozicemi (označenými fialově).	38
3.16	Časový vývoj tempa interpretace P. Bartona včetně dynamiky. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je tempo [úderů/min] (dynamika je označena zeleně).	39
3.17	Časový vývoj tempa interpretace Ch. Atzingera. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je délka trvání úseku [s] mezi časovými pozicemi (označenými fialově).	40
3.18	Časový vývoj tempa interpretace Ch. Atzingera včetně dynamiky. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je tempo [úderů/min] (dynamika je označena modře).	41

ÚVOD

Hudba jako umělecká činnost, ve své rozmanitosti a komplexnosti nabízí velký prostor a nezodpovězené otázky pro hudebně vědecký výzkum, nazývaný též jako muzikologie či hudební teorie. Jako každá umělecká činnost, také hudba má svůj neodmyslitelně emocionální charakter, ať už daný přímo autorským záměrem skladatele, či jako intuitivní, umělecky procítěný hudebně interpretační výkon hudebníka či dirigenta. Snahou muzikologického výzkumu je najít objektivní parametry a údaje, z typicky zvukově i časově komplikovaného hudebního záznamu či produkce v reálném čase, které lze jasně a zřetelně dokumentovat, analyzovat a porovnávat.

Získávání těchto dat v muzikologickém výzkumu bylo vždy doménou hudebního teoretika v roli posluchače živé produkce či nahrávky, zaznamenávajícího postřehnutelné kvantitativní parametry hudebního proudu. Z hlediska popisu časových prostředků v hudbě jsou výhodnější hudební nahrávky než živá produkce, pro možnost jejího detailnějšího a opakovaného měření časových úseků. V nedávné historii analogových zvukových záznamů byl víceméně jediný způsob získávání časových dat pomocí ručních stopek. Tato měření byla zatížena velkou chybou vzniklou reakcí osoby, která data měřila. Studiové magnetofony přinesly možnost přesnějšího měření pomocí délek pásku při konstantní rychlosti, s rozlišením až 20ms.[1] I v takovém případě je ale získávání detailních a opakovaných měření velmi náročným úkolem.

Soudobá úroveň vývoje číslicového zpracování signálů, doprovázená i rychle rostoucím výkonem výpočetní techniky, nabízí pokročilé metody k detekci a velmi přesnému měření hudební informace ve zvukovém médiu s možnostmi vysokého stupně automatizace i jejich následné analýzy. Tato myšlenka je inspirací i pro tento projekt.

V celosvětovém měřítku je již využití výpočetní techniky v muzikologii otázkou dlouholetého vývoje, ať jsou to výpočetní modely výrazové (osobité) hudební interpretace (Computational Models of Expressive Music Performance), které slouží k samotné hudební analýze ale také pro věrnou reprodukci číslicovým zařízením, tak i metody pro získávání hudební informace z digitalizovaného zvukového záznamu Music Information Retrieval (získávání hudební informace) (MIR). Je dostupné množství vědeckých článků a projektů různé kvalitativní úrovně, od základních pitch-recognition metod vhodných pouze pro čisté a zřetelné nahrávky témbrově chudších nástrojů, až po propracované struktury metod využitelné ve zvukově komplexnějších nahrávkách.

Velmi kvalitním a propracovaným systémem Digital Signal Processing (číslíkové zpracování signálu) (DSP) metod k získávání hudební informace je výzkumný projekt Oliviera Lartillota, Petri Toiviainena z finské University of Jyväskylä. Jedním z výsledků jejich výzkumu je i MIRtoolbox [3], což je ucelená sada nástrojů pro prostředí

MATLAB. MIRtoolbox je uvolněn pod licencí GNU General Public Licence verze 2 a představuje kompletní vývojové prostředí pro další akademický výzkum. I v této práci je použito několik funkcí z MIRtoolboxu.

Tento projekt je rozdělen na 3 hlavní části, účelem první části je vymezení muzikologických termínů pro účely analýzy časových prostředků, stanovených v muzikologické práci M. Kuny a M. Bláhy: Čas a hudba: K dramaturgii časových prostředků v hudebně interpretačním výkonu.[1] V další části je stručně popsán MIRtoolbox s ohledem na analýzu časových prostředků hudby a velmi zdařilý program Sonic Visualiser [4], který je použit jako referenční aplikace. Ve třetí části jsou prezentovány výsledky analýzy agogiky 3 interpretací skladby Antonína Dvořáka: Humoreska č.7, opus č.101 [7].

1 MUZIKOLOGICKÉ TERMÍNY

1.1 Délka trvání interpretačního výkonu

Základním časovým údajem při zkoumání hudebního díla je délka trvání interpretačního výkonu. I tento zdánlivě nezajímavý parametr je vhodný pro celkový pohled na provedení hudebního díla. V neposlední řadě se délka trvání používá pro měření reálného průměrného tempa, které interpret zvolil. Důležitými hodnotami jsou délky jednotlivých hudebních vět, tzv. „durata“. Průměrné tempo je využíváno pro analýzu dalších aspektů osobitého hudebního projevu, jak bude detailněji popsáno v dalším textu.

1.2 Rozmezí estetické rezonance hudby

Tento odborný muzikologický pojem má za cíl blíže analyzovat celkovou délku trvání interpretačního výkonu. Je to takové rozmezí celkového času skladby, kdy hudební vjem rezonuje souhlasně v posluchači. Mimo toto rozmezí skladba působí neumělecky, nepříjemně až chybně. M.Kuna a M.Bláha [1] definují určení tohoto rozmezí jako nejkratší a nejdelší přednes dané skladby interpretované umělci (v rámci zkoumaného souboru skladeb). Jako střed tohoto rozmezí estetické rezonance je považován aritmetický průměr délky trvání ze všech zkoumaných nahrávek. Jednotky této veličiny jsou procenta, tedy 100% je střed a rozsah se pohybuje například od 87% do 140%.

1.3 Nepravidelný průběh hudby

Velká část posluchačů hudby se domnívá, že všechny hudební skladby jsou interpretovány v naprosto přesném tempu, daném při nasazení prvních tónů skladby nebo dokonce v přesných metrických hodnotách předepsaných v notovém partu. Tento rozšířený omyl je často způsoben školními představami, kdy se hudba vyučuje v pevném řádu s metricky označeným notovým partem a metronomem. Je zcela běžné, že tyto tištěné partitury jsou označovány přesným údajem (např. $M.M.=120$) a to i v případě, že v originále jej autor nepředepsal. Hudební proud se drží přesného tempa jen zcela výjimečně a v odůvodněných případech. Naopak běžný je nepravidelný průběh tempa zajišťující estetické působení hudby.

Pro analýzu nepravidelnosti tempa v celé délce trvání skladby se využívá průměrná délka taktu T [s], získaná aritmetickým průměrem délky několika počátečních taktů,

tvořících spolu tektonickou oblast¹:

$$T = \frac{l}{n} \quad [s] \quad (1.1)$$

kde T je průměrná délka trvání taktu, l je délka trvání proměřovaného úseku a n počet taktů proměřovaného úseku.

Tato oblast dostatečně reprezentuje nasazené tempo skladby. Zde je vhodné připomenout, že interpret není povinen nasadit udané tempo, a to i v případě, že je autor přesně určil značením „Mälzelův metronom (M.M.)“. Jediná možnost objektivního posuzování je výpočet průměrného tempa hry interpreta, jak bude uvedeno v dalším textu.

V případě pravidelného průběhu hudby se průměrné tempo nemění a získáváme teoretickou hodnotu, tzv. předpokládanou délku skladby P [s]. Poměrem k reálnému času r [s] pak získáme veličinu míra reálného času skladby [1] R [%]. Můžeme ji též vyjádřit vztahem :

$$R = \frac{r}{P} \quad [%] \quad (1.2)$$

kde R je míra reálného času hudby, r je reálný čas skladby a P je předpokládaný čas skladby.

1.4 Nahodilé a záměrné odchylky tempa

Jak již bylo uvedeno, tempo skladby není určeno skladatelem, ale interpretujícím hudebníkem. Člověk s reálným nástrojem však není schopen produkovat matematicky přesné tempo, ale dochází k odchylkám od ideálního metrického tempa a to i v případě vysoké úrovně techniky hry.

1.4.1 Nahodilé odchylky tempa

Tempové odchylky vztahujeme k průměrnému tempu měřené skladby, podle úseku, který posuzujeme, tedy průměrný takt nebo průměrná hudební doba². Nahodilé odchylky jsou nevýrazné a nejsou vědomým záměrem interpreta. Mají povahu malých odchylek souměrných kolem osy průměrného tempa. Jejich původem je intuitivní hra, ale také technická nedokonalost hudebníka.

¹Tektonická oblast v kontextu výstavby uměleckého díla znamená uzavřenou oblast s pevnými a logickými vztahy.

²Hudební struktura metrického charakteru je složena ze základních taktů, rozdělených na jednu přízvučnou a jednu či více nepřízvučných dob.

1.4.2 Záměrné odchylky tempa

Záměrné odchylky musí být nápadné, musí výrazně vystupovat z pásma nahodilých odchylek. V tomto místě je vhodné připomenout, že agogika představuje pouze záměrné změny tempa, ať již předepsané skladatelem nebo v rámci interpretační volnosti interpreta. Tyto záměrné změny tempa zvyšují emocionální napětí uměleckého přednesu (Jedná se o pojmy jako fermata, accelerando, ritartando a další).

Při měření průměrné doby taktu nesmíme počítat úseky se záměrnými odchylkami, aby nedošlo k velkému zkreslení průměrného tempa.[1]

1.5 Míra rovnoměrnosti tempového pohybu

Další veličinou je míra rovnoměrnosti tempového pohybu[1], kterou posuzujeme v rámci celé analyzované skladby. Získáme ji statistikou tempových odchylek všech taktů od průměrného taktu skladby. Neboť zde není účelem posuzovat přesnost hry podle nahodilých odchylek, do výpočtu průměrného taktu se zahrnují i záměrné odchylky. Výpočet je dán vztahem:

$$E = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T - t_i)}{nT} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.3)$$

kde E je míra rovnoměrnosti, T je průměrná délka trvání taktu, t_i je délka trvání jednotlivých taktů a n je celkový počet taktů měřeného úseku skladby.

1.6 Hudební tempo metrizedované

Pro bližší analýzu průběhu hudebního tempa jsou popsány níže uvedené charaktery temp.

1.6.1 Základní tempo

Základní tempo je definováno jako průměrné tempo interpretačního výkonu, ve kterém jsou započítány i agogické změny. V rámci rozsáhlé skladby je zajímavé určovat průměrné tempo i z menších úseků, pro přehled jak se vyvíjí v čase.

1.6.2 Pevné tempo

Pevné tempo je definováno jako stabilní tempo po dobu alespoň 3 sekvenčních taktů[1], kdy nedochází ani k nahodilým ani k záměrným odchylkám. Pevné tempo

jako výsledek analýzy je tedy závislé na určení minimálního časového úseku, po který je tempo vyrovnané se zvolenou přesností.³

1.6.3 Oscilující tempo

Nahodilými odchylkami, oscilujícími kolem matematicky zjištěného základního tempa, vzniká časově proměnné tempo, které je nazýváno jako oscilující tempo. Tento typ tempa má charakter malých časových odchylek vracejících se zpět k základnímu tempu. I zde je tedy nutné stanovit základní parametry, jako maximální odchylka, při které je změna tempa vnímána stále jako nezáměrná. Důležité je připomenout, že oscilující tempo není způsobeno pouze technickou nedokonalostí hry, ale i agogickým cítěním interpreta.

1.6.4 Proměnné tempo

U tohoto typu tempa jde o realizaci záměrných odchylek, a to i v rámci jednoho taktu (např. fermata nad poslední notou⁴). Změna tempa musí být zřetelná. Proměnné tempo je výsledkem agogického záměru skladatele či interpreta a vnáší do hudební produkce emoční napětí.

1.7 Hudební tempo s libovolnou vazbou metra

Toto tempo bylo uvedeno[1] pro postihnutí skladeb, kde metro není předepsáno, ale jedná se stále o rytmizovaný pohyb hudby, ve kterém jsou předepsány základní doby. Umístění přízvuchných a nepřízvuchných dob je ponecháno jako záměrná volnost pro interpretační kreaci. Analýza tohoto typu skladeb se odlišuje od skladeb s metrizovaným tempem pouze v neexistenci taktů, proto pro stanovení průměrného tempa jsou používány jednotlivé hudební doby.

1.8 Hudební tempo nemetrizované

U dalšího typu skladeb skladatelé dávají maximální prostor interpretovi. Stanovují pouze časový prostor skladby, označený sekundovým údajem v orientačních bodech. Notový zápis postrádá menzury (taktové čáry) i pozice přízvuchných a nepřízvuchných dob. Je určena pouze výška jednotlivých tónů, ale nikoliv jejich časová délka.

³Posluchač pocítuje pevné tempo po 3 a více taktech při přesnosti (resp. zaokrouhlení) na 0,05s, u taktů delších než 5s je vhodnější přesnost 0,1s.[1]

⁴fermata představuje časové prodloužení tónu noty, nad kterou je značena, a to o polovinu své délky.

1.8.1 Základní tempo nemetrizovaného pohybu

Stejně jako v metrické hudbě je pro jakékoliv objektivní posuzování výsledků měření nutný časový údaj daný notovým partem. Zde je tedy průměrná časová jednotka matematicky určena z označeného úseku skladby. Její název byl popsán M.Kunou a M.Bláhou[1] jako „subjektivně pocítovaná sekunda“. Získáme ji jako podíl reálného času hudebního přednesu a předepsaného času skladatelem.

1.8.2 Pevné tempo nemetrizovaného pohybu

Jedná se analogicky s metrickou hudbou o tempo blížíící se průměrné časové jednotce, tedy rovnoměrně pocítované sekundě. Toto tempo v praxi vzniká za pomoci stopek přímo při hudební produkci.

1.8.3 Oscilující tempo nemetrizovaného pohybu

U oscilujícího tempa se projevují nahodilé odchylky od průměrné časové jednotky. V praxi vzniká při hře snahou o přesné tempo bez použití stopek.

1.8.4 Proměnné tempo nemetrizovaného pohybu

Také zde jsou záměrné odchylky od průměrné časové jednotky původcem proměnného tempa. Toto tempo je charakteristické vloženou agogikou.

1.9 Hybnost hudebního proudu

Pojem hybnosti hudby je definován jako počet slyšitelných impulzů hudby za minutu. U metrizovaného tempa jde o přesnou vazbu hybnosti a tempa. Byl stanoven koeficient K_h , jako počet impulsů na základní metrickou dobu (například čtvrtovou notu). Pokud dochází ke zrychlení základního tempa, zrychlí se úměrně i hybnost. Koeficient K_h samozřejmě není stálý přes celou skladbu, mění se dle struktury taktů, ale pouze v množině celých čísel.

U ametrické hudby dochází k nahodilému střetu souzvuků, které znemožňují přesně určit hybnost hudby z notového partu. Je ale možný odhad s využitím počtu pravděpodobnosti.

1.10 Detailní pojetí melodické fráze a hudební agogiky

Dosud bylo pojednáváno o analýze větších struktur hudební skladby. Z hlediska hudebního výzkumu je vhodná také analýza kratších úseků a struktur.

Při analýze melodie samotné získáváme časové údaje o jednotlivých tónech. Tyto pak lze názorně vynést graficky pomocí grafů porovnávací zkoumané nahrávky. Tento postup je volen i v případě nemetrizovaného tempa hudby.

Agogické změny jsou realizovány na úrovni taktů, proto sledujeme vývoj délky taktu v relaci od prvního zvoleného taktu měřeného úseku nebo posledního průměrného taktu před agogickým prvkem.

2 METODY ČÍSLICOVÉHO ZPRACOVÁNÍ HUDEBNÍHO SIGNÁLU

Výzkum v oblasti získávání hudební informace z hudebních záznamů trvá již mnoho let a k dispozici je velké množství různých strukturovaných řešení zakládajících se na základních a dobře známých principech číslicového zpracování signálu.

Pro muzikologický výzkum je podstatné především časové intervaly mezi tóny a dynamika skladby. Jedná se tedy o potřebu detekovat, nebo jinak řečeno „uslyšet“ tón a jeho parametry v reálném zvukovém prostředí nahrávky obsahující šum, rezonance a další rušivé prvky. A to i v případě technicky kvalitní bezztrátové a nezkreslené nahrávky.

Mnoho vědeckých prací se zabývá plnou automatizací detekce hudby, při kterém je nutné spolehlivě identifikovat zvukový objekt (tón). K tomu využívají známých metod aplikovaných při detekci řeči a podobně, jako jsou MFCC koeficienty, vlnková transformace či lineárně predikční analýza. Jiné projekty, více praktického charakteru, se zabývají získáváním hudební informace změnami hlavních parametrů zvuku, kterými jsou :

- **Změny spektra (spectral flux):** Změna nasazení tónu či barvy zvuku nástroje je spojena se změnou spektra.
- **Tvar energetické obálky (power envelope):** Hudební metro je vždy tvořeno přízvučnými a nepřízvučnými dobami, které přinášejí zvýšení hlasitosti (dynamiky či energie) tónu při jeho nasazení. Hudební nástroje perkusního typu, jako je klavír, mají pevněji definovanou tónovou obálku s dynamicky vyšším začátkem.
- **Spektrogram:** Zobrazení intenzity jednotlivých frekvencí obsažených ve spektru umožňují lépe určit pozice tónů i v polyfonicky složitějším zvuku. Ze spektrogramu lze vyčíst intonaci (výšku) jednotlivých tónů a pomocí notové partitury lze identifikovat konkrétní tóny. Spektrogram lze samozřejmě primárně využít při kontrole intonace hudebního přednesu.

Touto kategorií analyzujících aplikací se zabývá i tato diplomová práce.

2.1 Popis systému MIRtoolbox

Pro účely tohoto projektu byl vybrán modulární MIR systém MIRtoolbox, který je přímo určen pro akademické účely hudebního výzkumu. Jak již bylo zmíněno v úvodu, MIRtoolbox je velmi kvalitním a propracovaným systémem DSP metod pro získávání hudební informace a je to výzkumný projekt Oliviera Lartillota, Petri Toiviainena z finské University of Jyväskylä[3].

Jedná se o komplexní sadu funkcí, velmi propracované struktury umožňující plnou kompatibilitu mezi jednotlivými součástmi. MIRtoolbox lze označit za integrovaný systém typu framework. Jeho návrh byl zaměřen na jednoduchost použití. Systém je postaven od jednodušších principů ke složitějším, využívajícím existující funkce. Je možné volat i parametrizovat přímo tyto elementární funkce, případně přímo využít makro funkci, jejíž parametry i datové struktury jsou kompatibilní s nižšími funkcemi. Proto je možné syntax zjednodušit extrémně až na jeden příkaz s několika parametry, neboť většina parametrů je velmi vhodně zvolena ve výchozích hodnotách. Paleta všech funkcionalit MIRtoolboxu je velmi rozsáhlá, zahrnující detekce výšky tónu, rytmu i zvukové barvy zahrnující známé metody DSP v časové, frekvenční oblasti, MFCC, banky filtrů či statistické funkce.

2.1.1 Funkce pro odhad tempa

MIRtoolbox obsahuje doporučený postup k odhadu tempa skladby, ucelený do funkce **mirtempo**.

Jak autoři [3] popisují a ukazují na schematu, hlavním principem je modelace lidského sluchového vjemu hudby. Výchozím parametrem je 'Envelope', tedy modulová obálka v časové doméně. Tato detekce vychází z faktu, že při většině nástupů tónů dochází k dynamické špičce.

Zvuková navzorkovaná data (audio soubor) se nejprve rozloží na určitý počet samostatných frekvencí pomocí banky filtrů. Počet filtrů je otázkou parametrizace, např. 20 až 40 frekvencí. Jednotlivé kanály se detekují na energetické obálky, tyto se usměrňují na kladné půl-vlny a jsou diferencovány. Teprve po té se znovu sčítají pomocí funkce **mirsum**, jejímž výstupem je energetická obálka vypovídající o pozicích jednotlivých tónů. Tuto informaci lze získat přímo příkazem **mironsets** využitou pro demonstraci v praktické části této práce. Důležité je si uvědomit, že vrcholy energetické obálky představují začátek znělé a stabilní části tónu (sustain), nikoliv jeho náběh (attack).

Funkce **mirtempo** dále pokračuje detekcí pravidelností již zdetekovaných začátků tónů pomocí autokorelace. Tento periodogram[3] se dále filtruje pomocí rezonanční křivky, která podle autorů ponechává lépe slyšitelné začátky. Nakonec se opět detekují

výsledné špičkové hodnoty a funkce vybírá definovaný počet nejvíce pravděpodobných odhadů tempa skladby. Tyto jsou převedeny na metrické tempo v beats per minute (počet úderů za minutu) (BPM).

2.1.2 Funkce pro detekci počátků tónů: funkce MIRONsets('Envelope')

Pro studium agogiky je podstatná funkce MIRONsets ze souboru MIRtoolbox. Jejím výchozím nastavením je generování energetické obálky s vyznačením vrcholů. Výsledky jsou optimalizovány pomocí paralelního zpracování pouze některých frekvencí a pomocí usměrnění signálu, jak již bylo uvedeno výše. Tato funkce je doporučena jako primární při analýze v aplikaci M-prohlížeč 3.1, která je základem této práce.

2.1.3 Funkce pro detekci počátků tónů: funkce MIRONsets('SpectralFlux')

Jak již bylo uvedeno, změny spektra jsou velmi výhodné pro posuzování začátků tónů. Jejich spolehlivost je velmi vysoká a jsou nezbytné v některých dynamicky plochých hudebních pasážích. Jejich výhoda oproti spektrogramu je možnost snadného nalezení vrcholů změnové křivky a tím i možnost automatizace detekčního procesu.

2.2 Sonic Visualiser

Sonic Visualiser [4] je velmi kvalitním analyzátozem, prohlížečem a anotačním nástrojem zvukových souborů. Je dílem autorů z Queen Mary University of London. Sonic Visualiser používá i muzikolog Nicolas Cook [6].

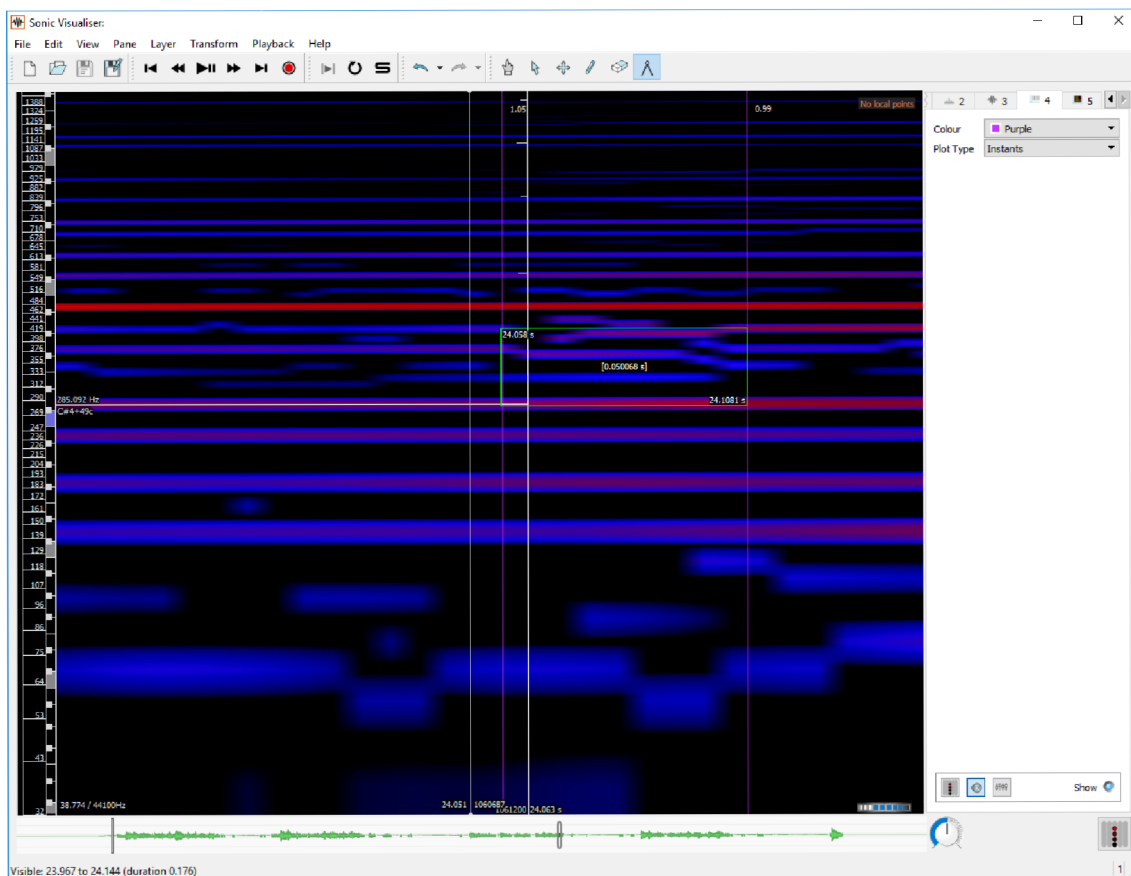
Jak bude blíže uvedeno v praktické části, Sonic Visualiser je program vyvíjený v jazyce C++ v prostředí Qt. Je velmi optimalizován pro muzikologickou práci, včetně možnosti notové stopy s MIDI importem. Obsahuje též v základním prostředí optimalizované spektrogramy nebo možnost ručního označování nástupů tónů během přehrávání. Na obrázku 2.1 je uveden příklad použití spektrogramu v praktické části této práce. Jeho silnou vlastností je systém zásuvných modulů **VAMP**, který z této aplikace vytváří otevřený systém.

2.2.1 Mazurka projekt

Mazurka project plugins for Sonic Visualiser [5] je jedním z celkem 27 existujících zásuvných modulů pro Sonic Visualiser. Jeho tvůrcem je Craig Sapp ze Stanfordské

univerzity a byl vytvořen pro muzikologický **Mazurka project**, analyzující soubor Mazurek skladatele F. Chopina.

V praktické části této práce byly využity jeho funkce *MzSpectralFlux* a pro vizualizaci dynamiky přednesu funkce *MzPowerCurve*.



Obr. 2.1: Příklad využití spektrogramu při detekci chyby synchronizace levé a pravé ruky interpreta a využití nástroje pro měření. Na svislé ose je vynesena kmitočet [Hz] a na vodorovné čas [s].

3 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ METOD ČÍSLICOVÉHO ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU PRO ANALÝZU HUDEBNÍ AGOGIKY

3.1 Aplikace M-prohlížeč

Jádrem této diplomové práce je praktická realizace muzikologického prohlížeče hudební informace ve zkoumané nahrávce hudebního díla a její přehledné grafické výstupy pro další muzikologickou práci. Jedná se o aplikaci nazvanou zkráceným názvem M-prohlížeč, vycházející z názvu „muzikologický prohlížeč“.

3.1.1 Popis aplikace

M-prohlížeč je řešen v souladu se zadáním této práce v prostředí MATLAB. Toto prostředí není nutné představovat, jedná se o dobře známé vývojové prostředí s bohatou zásobou tématických funkcí a také s velmi silnou grafickou podporou. Aplikace je řešena otevřeným přístupem umožňujícím další rozšiřování funkcí jak při analýze, tak pro vytváření vhodných výstupních grafů, bez nutnosti dalšího zpracování v tabulkovém editoru.

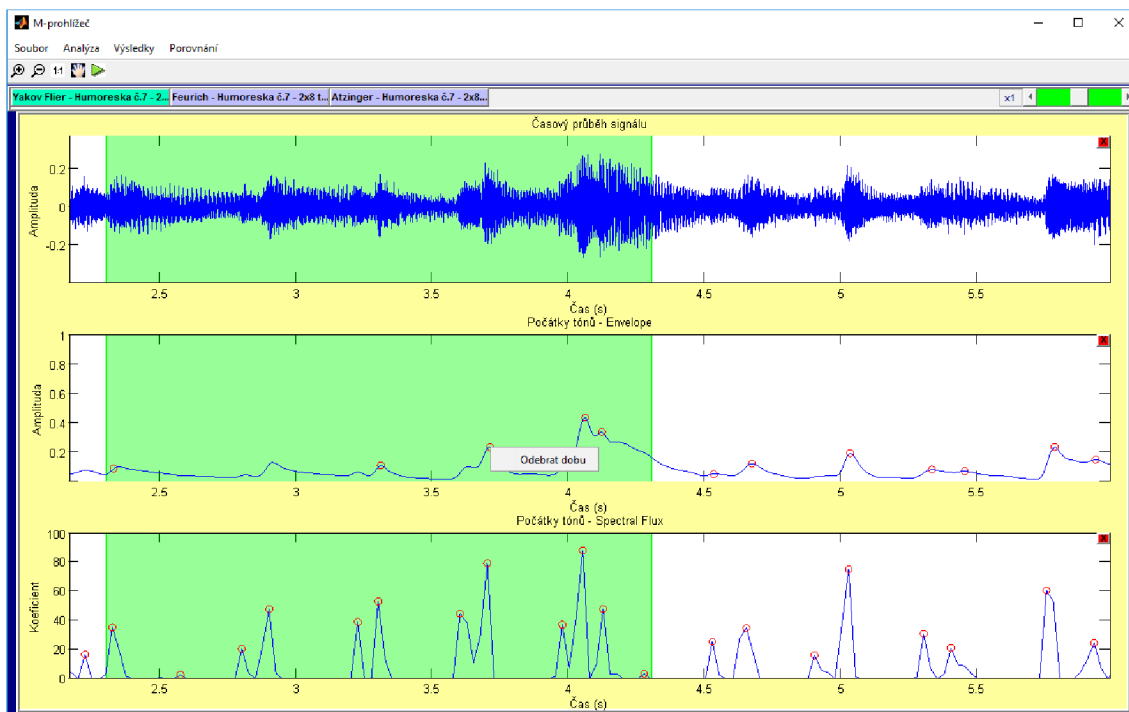
Aplikace M-prohlížeč je navržena pro přímé použití v muzikologické praxi, proto je řešena poloautomatickým přístupem uživatele. Plně automatický přístup analýzy není zatím plně spolehlivý a není proto prakticky použitelný pro vědeckou práci muzikologa.

3.1.2 Struktura aplikace

Dalším záměrem bylo využití aplikace M-prohlížeč pro ohodnocení funkcí MIRtoolboxu, resp. použitelnosti výstupních dat, různých kombinací jeho funkcí a jejich parametrizace pro získání nejvhodnějších výsledků pro řešení zadaných muzikologických úloh.

Řešením struktury aplikace je přehledné grafické prostředí tvořící mnoho kanálový přehrávač analyzované nahrávky s možností plynulého zpomalení rychlosti přehrávání. Toto zpomalení je velmi vhodné v rychlých pasážích, kde muzikolog potřebuje vyhodnotit změny v rozlišení i několika milisekund. Muzikolog je tak schopen sluchově zjistit, či jen ověřit svůj zkušenostmi zdokonalený sluch. Nezbytným nástrojem je také možnost přehrání pouze přesně vymezené oblasti nahrávky. K tomu slouží nástroj pro výběr v nástrojové liště.

Základním postupem při analýze je výběr požadované metody z menu aplikace. M-prohlížeč následně využívá funkce souboru MIRtoolbox a uloží získané výsledky v dynamických buňkových polích typu cell nebo polích datových struktur.



Obr. 3.1: Grafické řešení aplikace M-prohlížeč. Na vodorovné ose je vždy vyneseno čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.

Grafická oblast je řešena kompaktním způsobem v rámci jediného okna, využitím grafického objektu figure. Aplikace je schopna porovnat různé hudební nahrávky. Každá nahrávka i její analýza je organizována v grafických objektech typu uipanel, který sdružuje zobrazovací oblasti typu kartézských souřadnic, tedy grafických objektů axes. Všechny tyto zobrazovací oblasti mají horizontální časovou osu a jsou navzájem synchronizovány. První dvě soustavy jsou povinné. První obsahuje vždy časový průběh signálu a druhá musí obsahovat grafické vyhodnocení vrcholů, které přímo poskytují funkce MIRtoolboxu. Tyto vrcholy lze dále upravovat, přidávat i odebírat tak, aby definovaly časové okamžiky nástupu základních hudebních dob, případně všech tónů skladby. Tento soubor vrcholů, ověřený muzikologem, je dále postoupen pro vyhodnocení a porovnání výsledků analýzy.

3.2 Výsledky analýzy nahrávek v aplikaci M-prohlížeč

3.2.1 Výběr hudební skladby pro účely analýzy

Jako vhodná demonstrační skladba pro analýzu metrického tempa byla vybrána Humoreska č.7 opus 101, Antonína Dvořáka.

Antonín Dvořák[7], jedna z nejvýznamnějších osobností české kultury v mezinárodním kontextu, v průběhu prázdnin ve funkci ředitele konzervatoře v New Yorku přebýval ve svém letním sídle ve Vysoké u Příbrami, kde přes léto roku 1894 zkomponoval soubor osmi humoresek, které patří k nejslavnějším dílům klasické hudby. Všechny tyto skladby mají jednotné dvoučtvrtvé metrum a osmi taktové celky. Pro účely této práce bylo vybráno pouze prvních 8 taktů s repeticí, tedy celkem 16 taktů. Tempo skladby stanovené autorem v rukopisu je *Poco lento e grazioso*, M.M. = 72, tedy 72 čtvrtových dob za minutu.

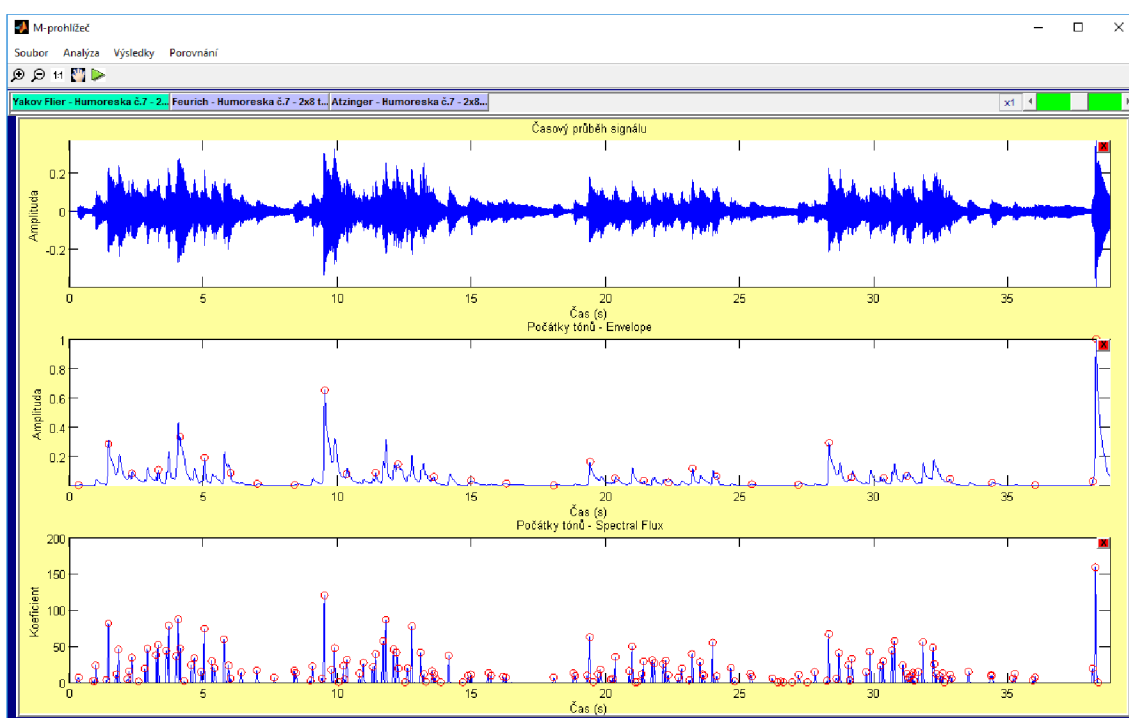
Vybraná skladba je vhodná pro demonstrační účely pro její velkou popularitu ve své době ale i v současnosti. Humoresky Antonína Dvořáka mají ve svém repertoáru přední světoví umělci, a to především ve verzích pro housle v doprovodu klavíru, jak je tomu i v případě Josefa Suka mladšího, pravnuka Antonína Dvořáka, nebo v provedení sólového klavíru. Pro demonstraci muzikologického využití programu M-prohlížeč byly vybrány interpretace Humoresky č.7 následujících umělců:

1. Yakov Flier (1912-1977)[8]
Ruský klavírní virtuóz a pedagog.[9]
2. Paul Barton[10]
Britský grafik, sochař i klavírní interpret a učitel. Vybraná nahrávka je z veřejně dostupného kanálu P.Bartona na serveru Youtube[12], v rámci propagace 4 pedálového klavíru firmy FEURICH[11] z Vídně.
3. Christopher Atzinger[13]
Vybraná nahrávka je z koncertu ve St. Olaf College, Urness Recital Hall, 17.11.2014.[14]

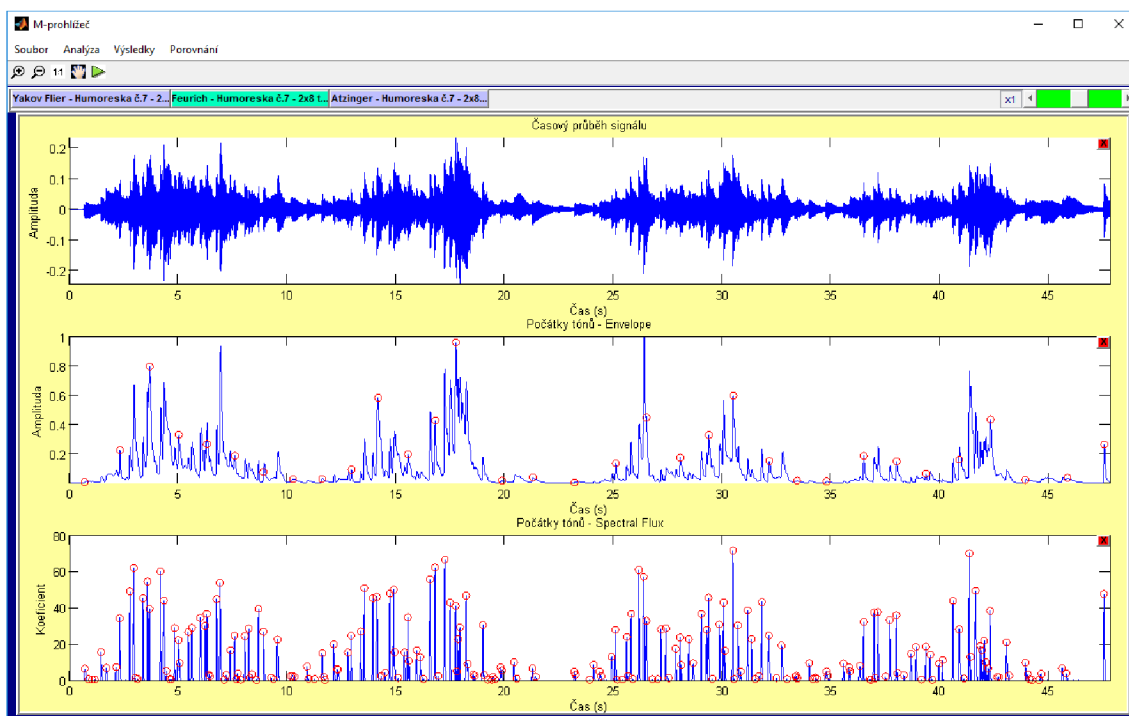
Nahrávky byly upraveny pro získání co nejjednoznačnějších výsledků analýzy. Byla provedena normalizace skladeb a sdružení stereo nahrávek do mono verze pomocí audio editoru.

3.2.2 Porovnání skladeb z hlediska agogiky

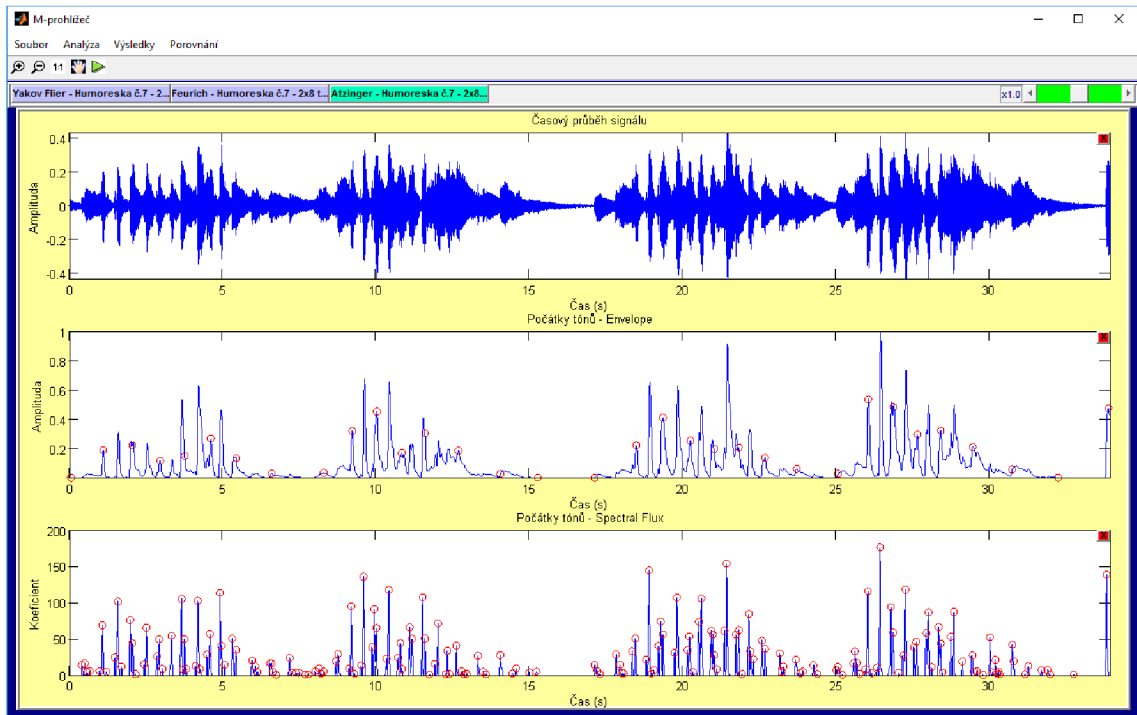
Prvním krokem pro porovnávání metrického tempa je určení základního tempa skladby (kap. 1.6). Skladby byly automaticky analyzovány funkcí MIRONsets s parametry pro modulovou obálku (Envelope) nebo změny spektra (SpectralFlux). Navržené vrcholy těmito funkcemi byly sluchově porovnány se zvukovou stopou a byly ponechány pouze vrcholy odpovídající metru skladby, tedy čtvrtové doby, tzn. při metru 2/4 musíme dodržet dva vrcholy na jeden takt pro správnou interpretaci výsledků. Na následujících obrázcích jsou záznamy grafického prostředí po ukončení analýzy 3.2 3.3 3.4.



Obr. 3.2: Úprava pozic hlavních dob interpretace Y. Fliera. Na vodorovné ose je vždy vyneseno čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.

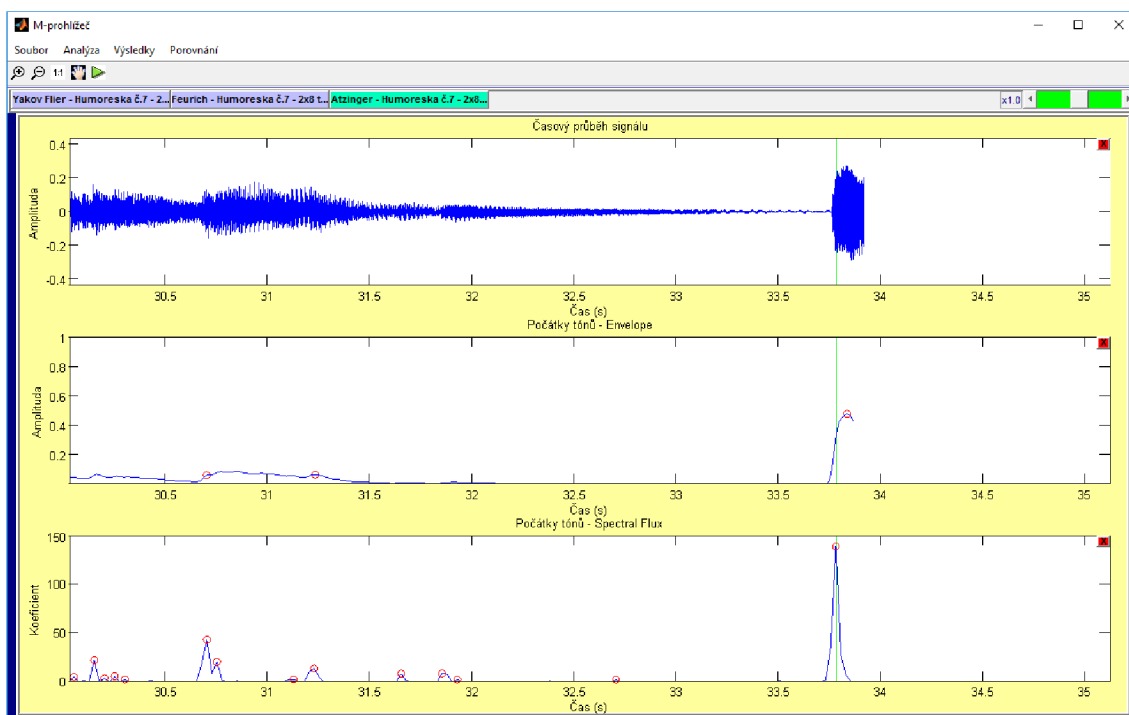


Obr. 3.3: Úprava pozic hlavních dob interpretace P. Bartona. Na vodorovné ose je vždy vyneseno čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.



Obr. 3.4: Úprava pozic hlavních dob interpretace Ch. Atzingera. Na vodorovné ose je vždy vynesena čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.

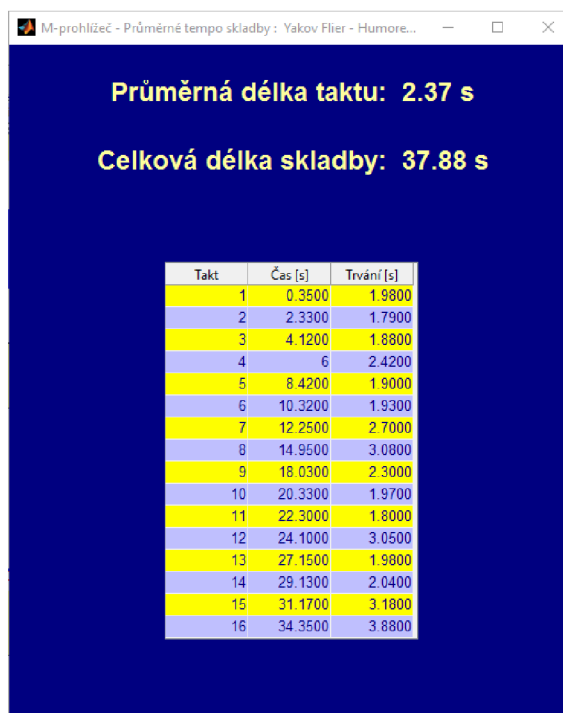
Pro vyhodnocení výsledků časových parametrů hudby v rámci této práce byly považovány počátky nástupů tónů (počátek attack fáze) jako rozhodující okamžiky. Jak je vidět na obrázku, funkce modulové obálky generuje vrchole až v okamžiku plného rozeznění tónu, kdy je dynamicky tón nejsilnější. To je platné u perkusního typu nástroje jako je klavír. Funkci pro detekci nástupu tónu nelze spolehlivě použít obecně v méně hlasitých úsecích. Naproti tomu funkce SpectralFlux vyhodnocuje změny barvy tónů, a to i v tišších úsecích skladby nebo i tam, kde je dynamika zvuku konstantní. Falešné detekce tónů tato funkce podává například při rezonanci souzvuků nebo dalších různých druhů změn barvy zvuku.



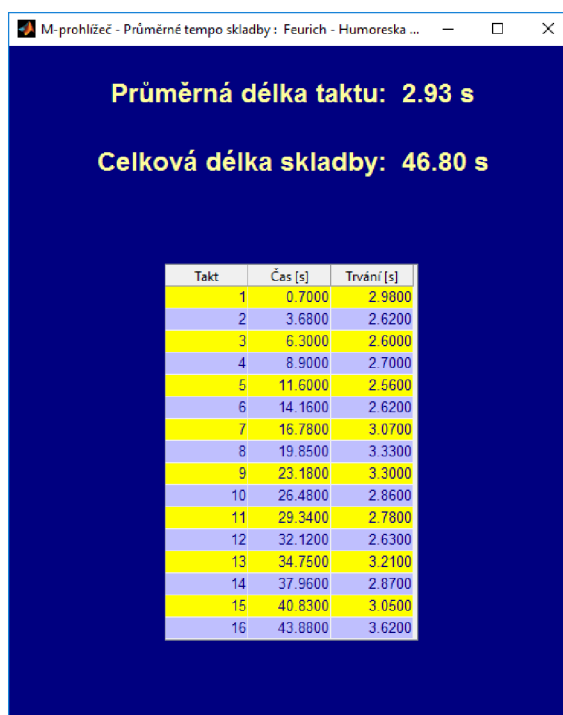
Obr. 3.5: Typické zpoždění vrcholů modulové obálky oproti změně spektra při nástupu tónu. Na vodorovné ose je vždy vynesena čas [s] a na svislé v 1. a 2. grafu amplituda, ve 3. grafu koeficient derivace spektra.

3.2.3 Průměrné tempo

Základní tempo skladby bylo definováno jako průměrné tempo 1.1. Je tedy nutné získat průměrnou dobu trvání taktů. Pro aktuální krátkou ukázkou prvních 16 taktů tvoří tektonický celek, výpočet tedy provedeme z tohoto úseku skladby. Následující obrázky demonstrují výstup z aplikace M-prohlížeč 3.6 3.7 3.8.



Obr. 3.6: Výstup analýzy průměrného tempa interpretace Y. Fliera



Obr. 3.7: Výstup analýzy průměrného tempa interpretace P. Bartona

Takt	Čas [s]	Trvání [s]
1	0.0500	2.0000
2	2.0500	1.7000
3	3.7500	1.6800
4	5.4300	2.8500
5	8.2800	1.7300
6	10.0100	1.5700
7	11.5800	2.4500
8	14.0300	3.0700
9	17.1000	2.2300
10	19.3300	1.6700
11	21	1.6500
12	22.6500	2.3800
13	25.0300	1.8000
14	26.8300	1.5400
15	28.3700	2.3300
16	30.7000	3.1300

Obr. 3.8: Výstup analýzy průměrného tempa interpretace Ch. Atzingera

3.2.4 Základní tempo

Metrické tempo je definováno jako počet hudebních dob (úderů metronomu) za minutu a lze jej určit [1] podle vzorce 3.1.

$$M.M. = \frac{b \cdot 60}{T} \quad [\text{úderů/s}] \quad (3.1)$$

kde b je počet dob zvolených pro určení tempa a T je délka trvání měřeného úseku (jinými slovy „jak dlouho trvá b dob“, většinou se jedná o délku taktu T).

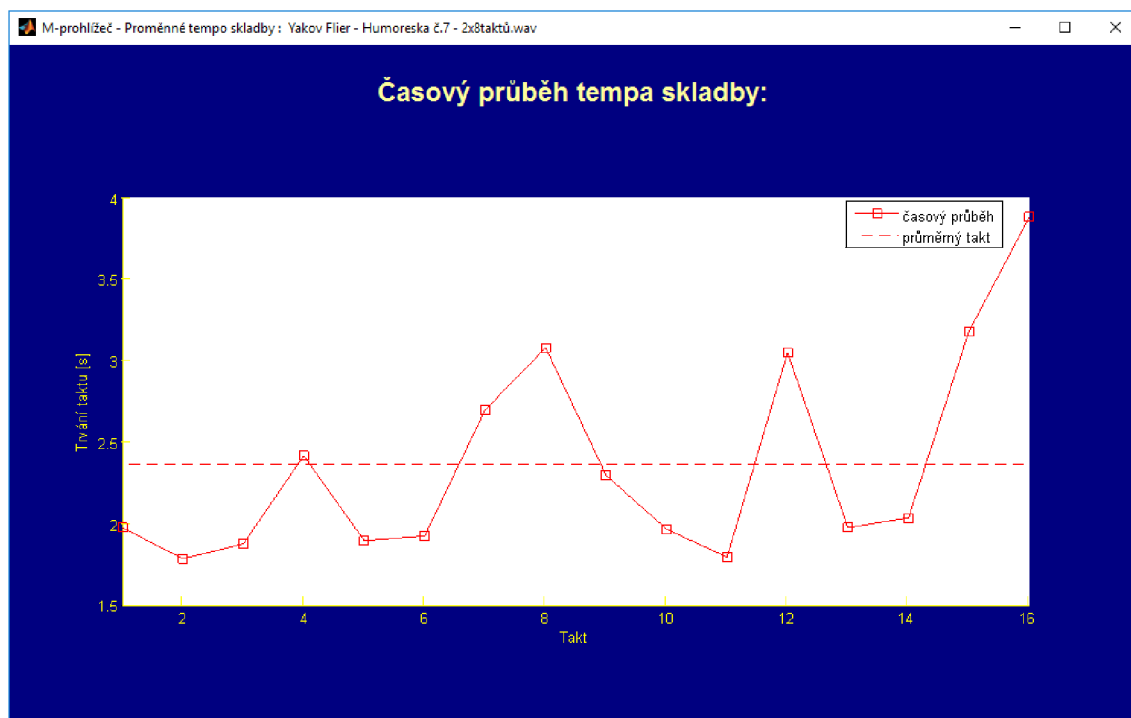
Pro určení základního tempa bude nutné zvolit hudební „dobu“ pro definici metrického tempa. Pro metrum 2/4 je vhodné zvolit běžněji používanou notu čtvrtovou. Výsledné hodnoty jsou tyto:

1. Y. Flier : M.M. = 51 [úderů/min]
2. P. Barton : M.M. = 41 [úderů/min]
3. Ch. Atzinger : M.M. = 57 [úderů/min]

U výsledků základního tempa všech skladeb je vidět znatelné zpomalení hry oproti předepsanému tempu $M.M.=72$ autorem skladby. To je způsobeno především vlivem započítaných agogických odchylek.

3.2.5 Proměnné tempo

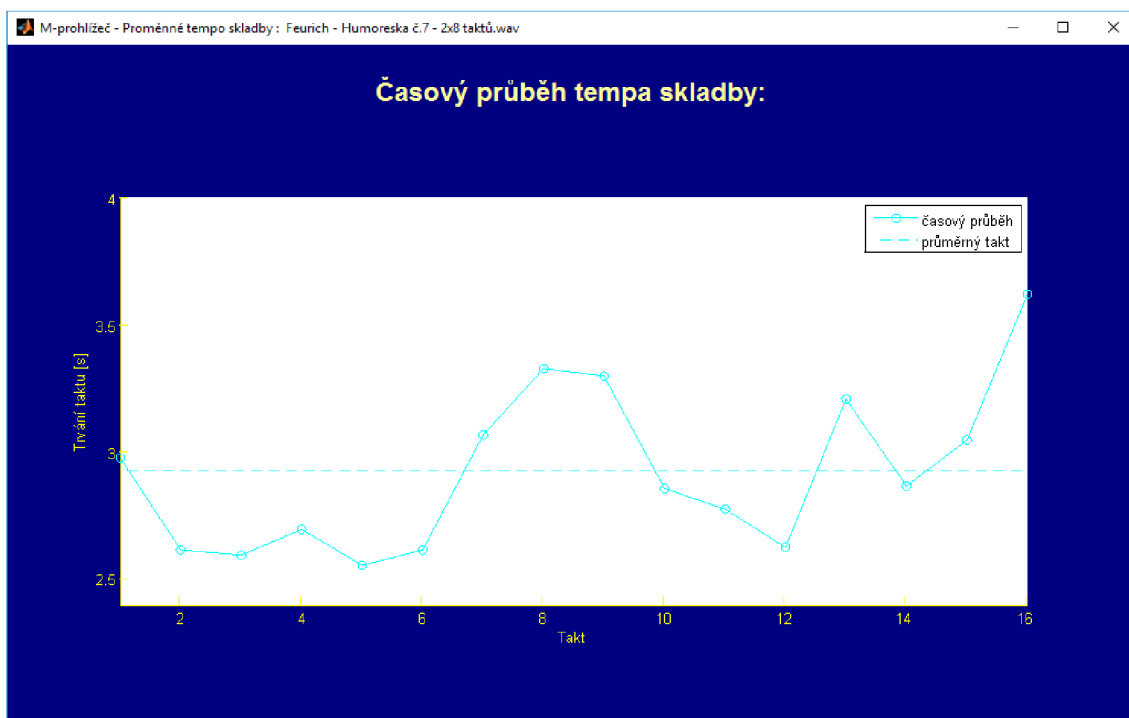
Na obrázku 3.9 je graficky znázorněn časový průběh změny tempa na úrovni jednotlivých taktů. U první nahrávky je vidět asi typický průběh, kdy odchylky od průměrného tempa jsou nad pomyslnou hranicí nahodilých odchylek, tj. 0,05 s. Jedná se o rubatový¹ styl hry. Poslední takt je výrazně prodloužen. Dále je zde vidět příprava na koncové zpomalení již v předposledním taktu měřeného úseku, jak popisují M.Kuna a M.Bláha[1].



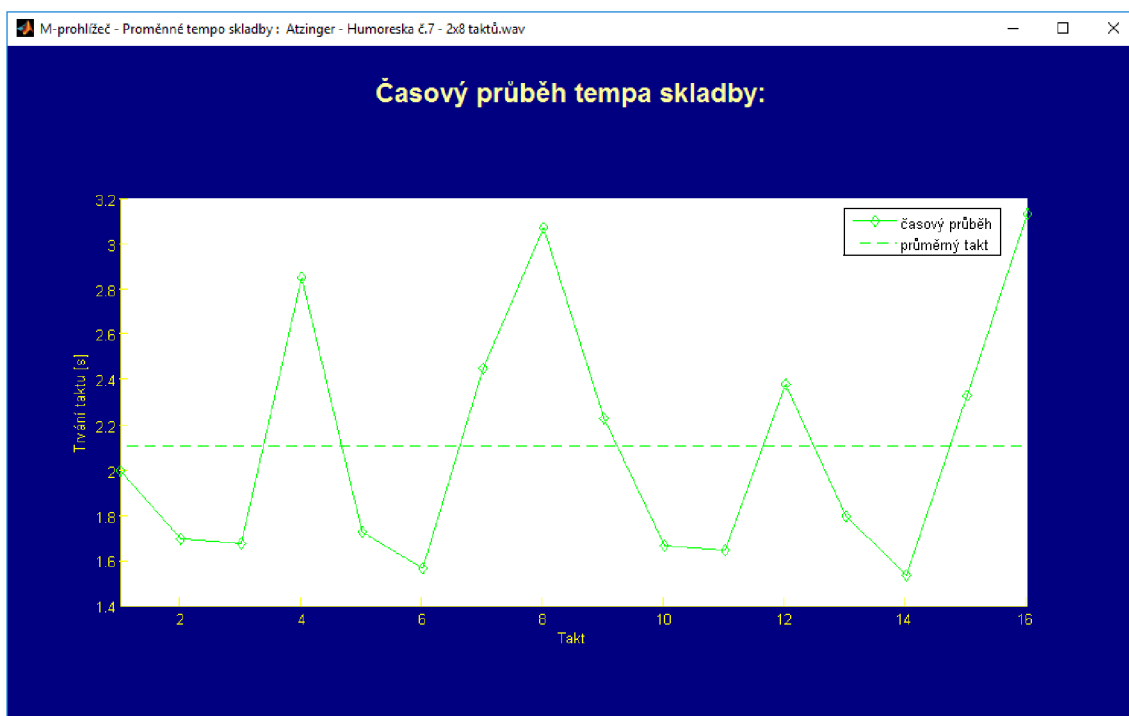
Obr. 3.9: Časový vývoj tempa interpretace Y. Fliera (Stoupající křivka představuje zpomalení tempa). Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].

U druhé nahrávky je poslední takt také typicky prodloužen 3.10.

¹Rubato je označení pro tempově volnější styl hry, jeden z nepoužívanějších výrazových prostředků osobitého hudebního projevu.



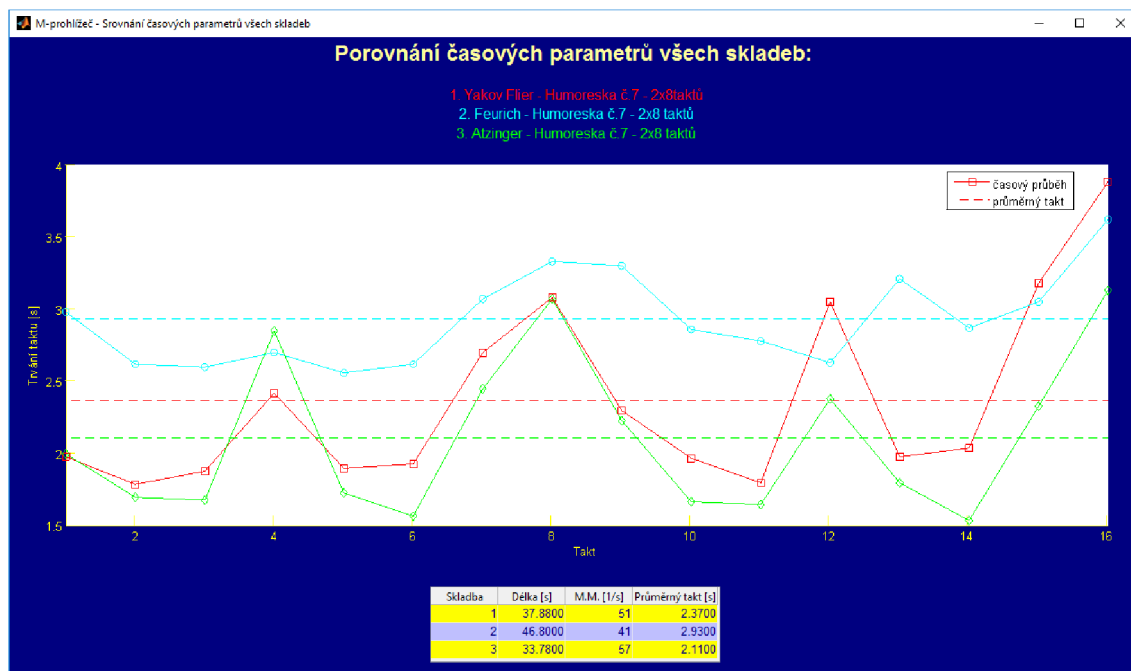
Obr. 3.10: Časový vývoj tempa interpretace P. Bartona. Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].



Obr. 3.11: Časový vývoj tempa interpretace Ch. Atzingera. Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].

3.2.6 Celkové porovnání výsledků

Aplikace M-prohlížeč umožňuje i společné zobrazení vývoje tempa 3.12 všech nahrávek najednou.



Obr. 3.12: Srovnání výsledků všech interpretací. Na vodorovné ose jsou vyneseny takty a na svislé délka trvání taktu [s].

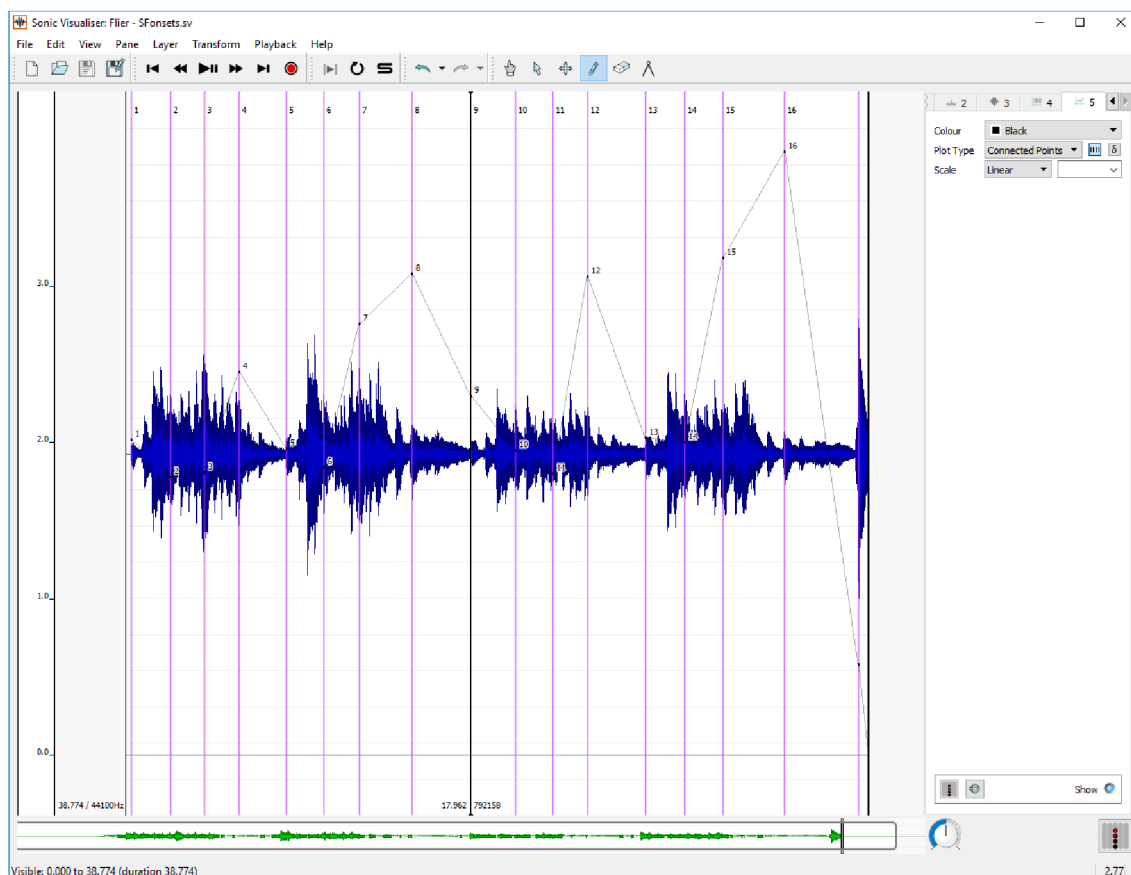
Tento společný graf byl do aplikace zahrnut pro rychlé a velmi přehledné srovnání všech analyzovaných hudebních skladeb, a to bez nutnosti využití externích programů. Vidíme zde například nápadně podobné interpretace Y.Fliera a Ch.Atzingera a výrazně pomalejší a rovnoměrnější styl hry P.Bartona na klavíru Feurich 218. Důvodem je nejspíše fakt, že se jedná o demonstrační výukovou nahrávku.

3.3 Porovnání výsledků aplikací M-prohlížeč a Sonic Visualiser [4]

Aplikace M-prohlížeč i Sonic Visualiser s vhodnými zásuvnými moduly patří do stejné kategorie. Pro přehlednější porovnání a posouzení využitelnosti pro muzikologický výzkum byla provedena analýza všech 3 interpretací v programu Sonic Visualiser.

3.3.1 Výsledky analýzy interpretací v programu Sonic Visualiser

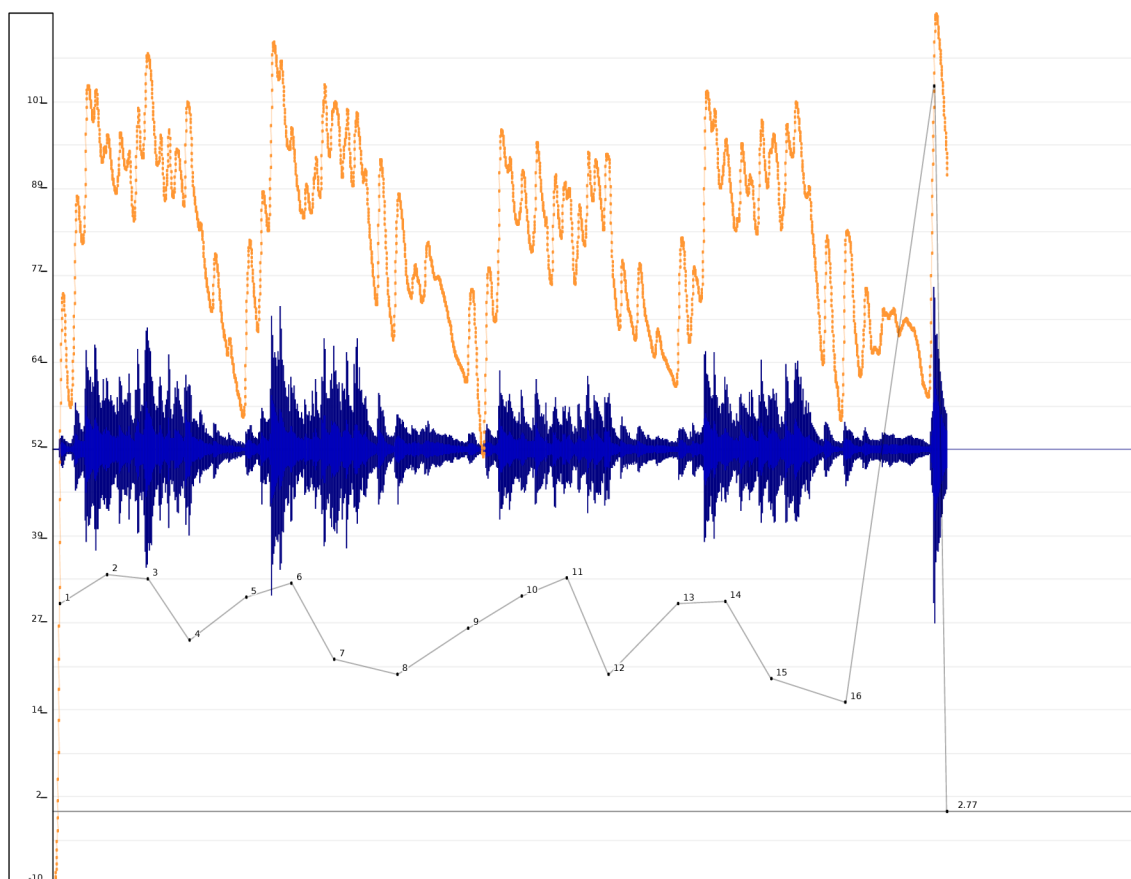
Na obrázku 3.13 je zachycen graf s výsledky získané pomocí zásuvného modulu MzSpectralFlux:Onset times [5]. Tyto výsledky byly sluchově upraveny pouze ponecháním všech nástupů tónů, které tvoří počátek každého taktu. Sonic Visualiser nezahrnuje vliv metra skladby, proto by výsledky nevykazovaly požadované průběhy při použití více hudebních dob na jeden takt.



Obr. 3.13: Časový vývoj tempa interpretace Y.Fliera. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je délka trvání úseku [s] mezi časovými pozicemi (označenými fialově).

Fialové svislé čáry označují časové okamžiky počátků dob (zde i taktů) a černá linka označuje časový průběh skutečné délky taktu, tedy vyšší hodnoty znamenají pomalejší tempo.

Další obrázek 3.14 demonstruje využití grafu dynamiky pro muzikologickou práci. Časový vývoj délky taktu je zde upraven tak, aby vyšší hodnoty znamenaly rychlejší tempo a tím sledovaly i typický průběh dynamiky. Určitá nevýhoda při ignorování metra vzniká na svislé ose tempa, které má pouze poloviční hodnoty oproti skutečnému tempu, neboť každý dvoučtvrtový takt začíná každou lichou dobou.

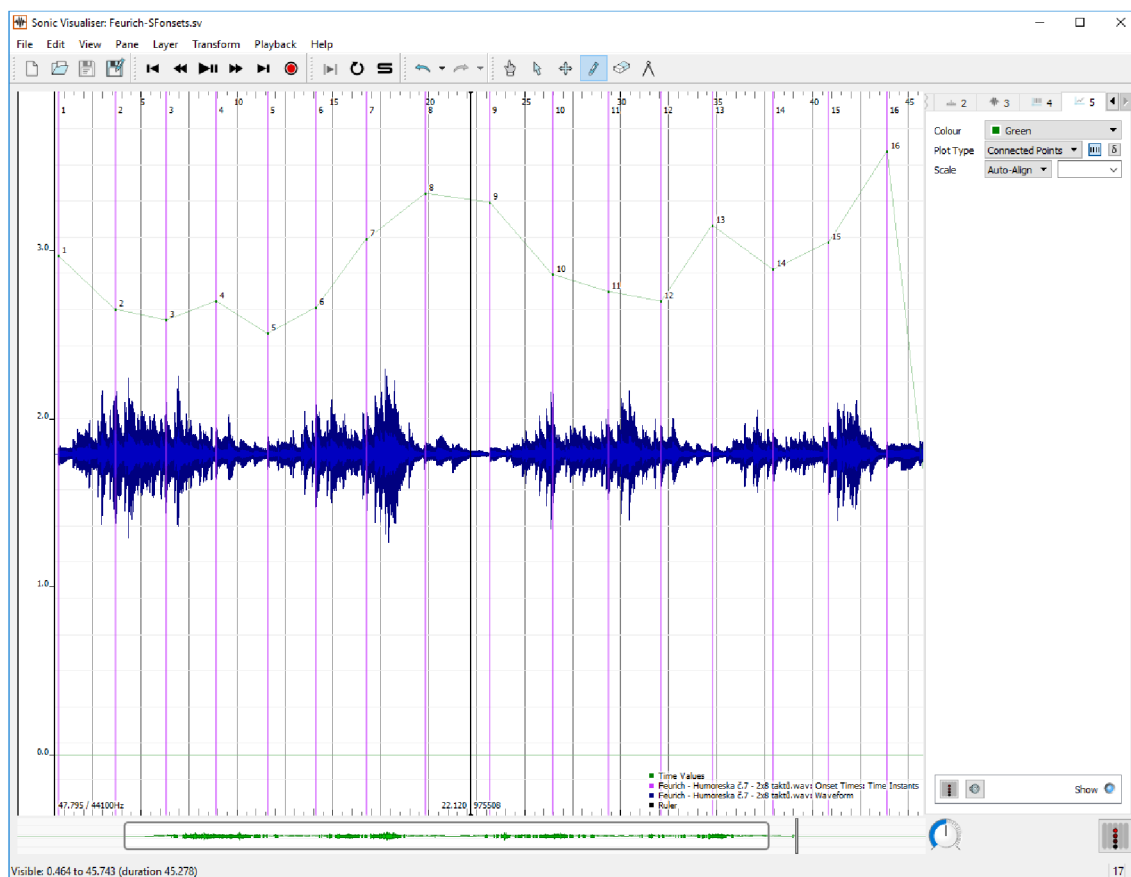


Obr. 3.14: Časový vývoj tempa interpretace Y. Fliera včetně dynamiky. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je tempo [úderů/min] (dynamika je označena oranžově).

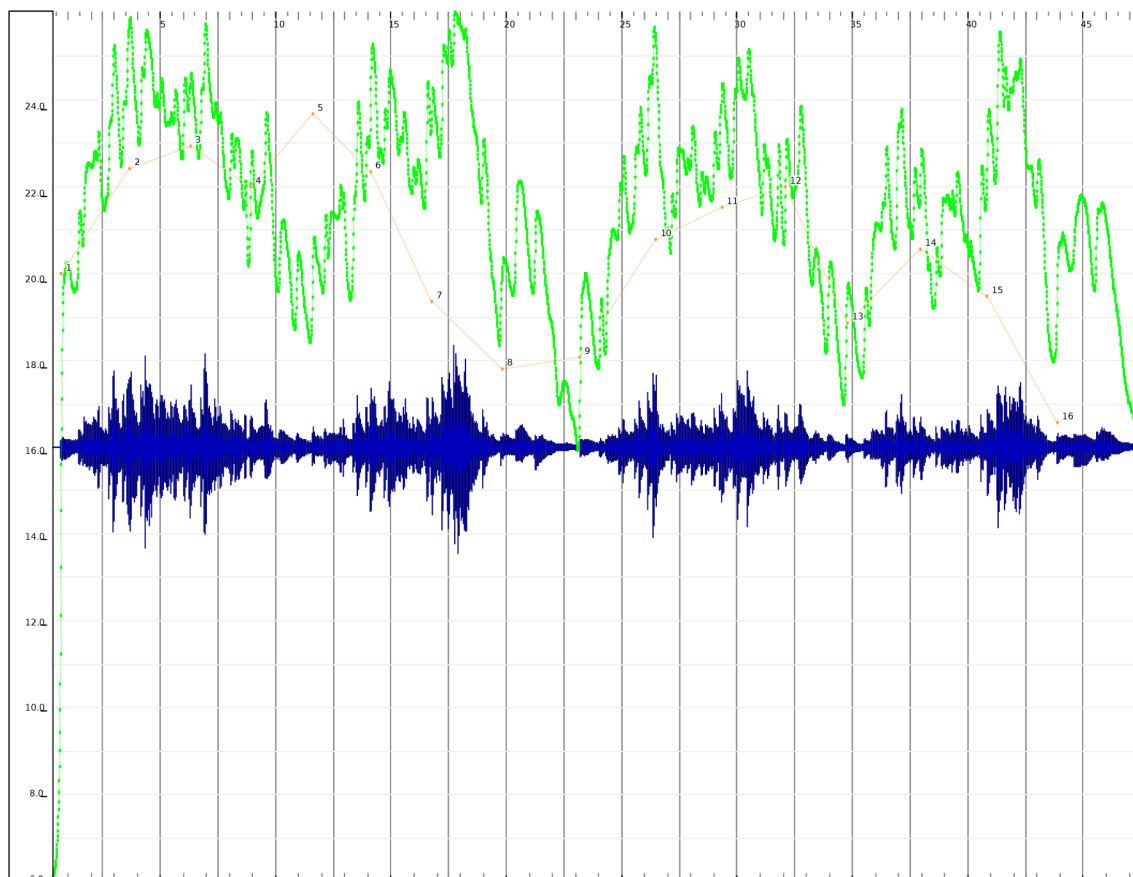
Dynamika obvykle zesiluje se zrychlováním tempa hry. Sonic Visualiser neposkytuje další grafické statistiky jako je průměrné tempo, základní tempo či délka skladby, tzv. durata. Zde je nutné použít export dat anotační vrstvy do externí aplikace.

Pro vykreslení dynamiky hry při interpretaci je velmi vhodný zásuvný modul MzPowerCurve:Smoothed Power [5] poskytující vyhlazený výkonový průběh. Graf na obrázku 3.14 je vektorovým výstupem do formátu SVG, což je velmi zajímavá funkce programu Sonic Visualiser.

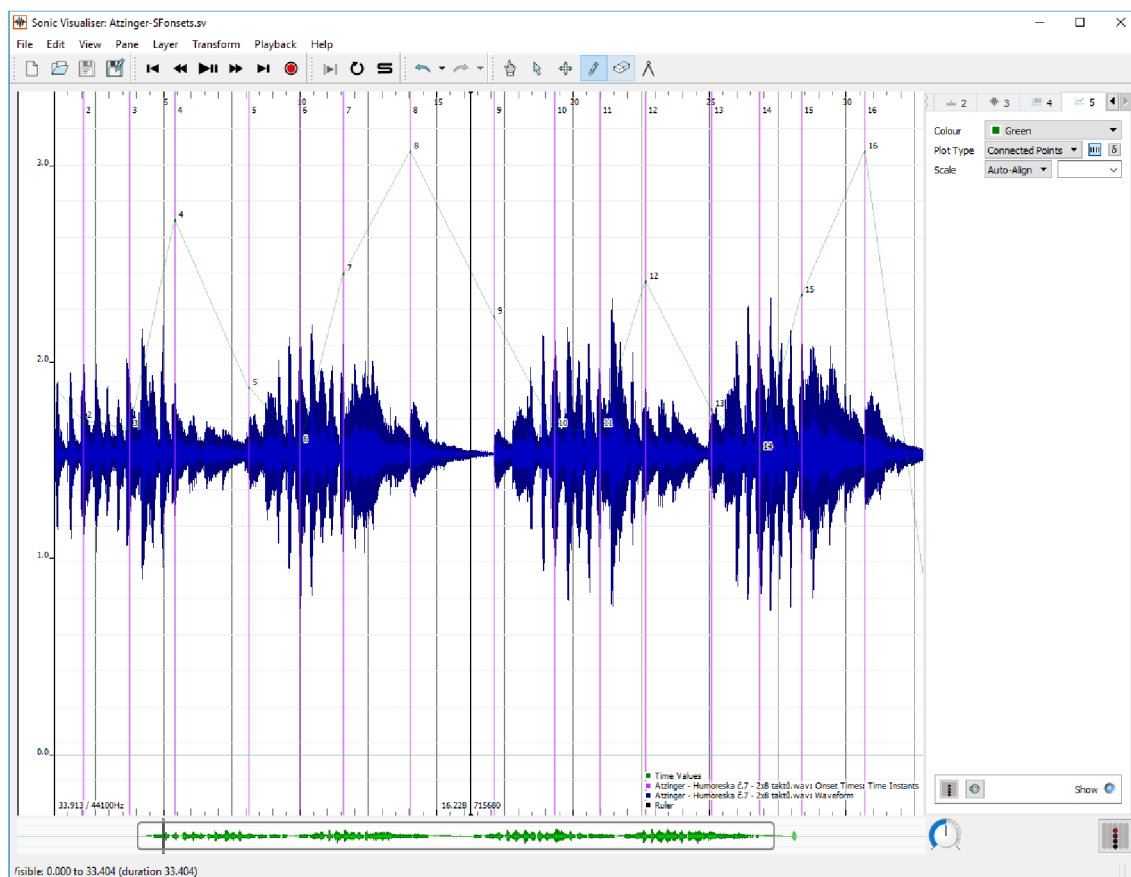
Na zbývajících obrázcích 3.15 3.16 3.17 3.18 jsou výsledky analýzy dalších dvou interpretací.



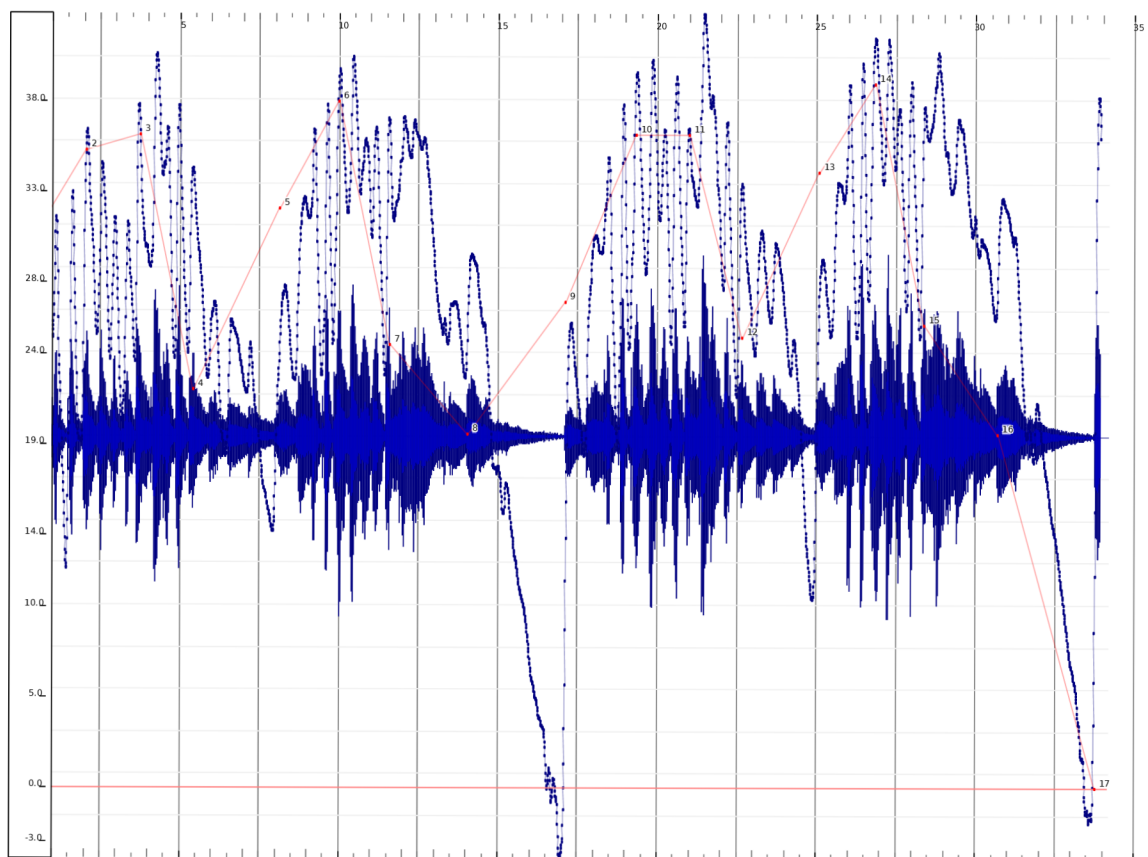
Obr. 3.15: Časový vývoj tempa interpretace P. Bartona. Na vodorovné ose je vyneseno čas [s] a na svislé ose je délka trvání úseku [s] mezi časovými pozicemi (označenými fialově).



Obr. 3.16: Časový vývoj tempa interpretace P. Bartona včetně dynamiky. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je tempo [úderů/min] (dynamika je označena zeleně).



Obr. 3.17: Časový vývoj tempa interpretace Ch. Atzingera. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je délka trvání úseku [s] mezi časovými pozicemi (označenými fialově).



Obr. 3.18: Časový vývoj tempa interpretace Ch. Atzingera včetně dynamiky. Na vodorovné ose je vynesena čas [s] a na svislé ose je tempo [úderů/min] (dynamika je označena modře).

3.3.2 Porovnání detekcí počátků tónů

V níže uvedené tabulce 3.1 jsou porovnány detekované počátky tónů v místech počátku taktů. Je zřetelné, že aplikace Sonic Visualiser se zásuvným modulem Mz-SpectralFlux detekuje jako počátky tónů již počátky derivace spektra, nikoliv jejich vrcholy jako je to v případě MIRONsets funkce. Detekce jsou v předstihu průměrné odchylky 0,03s, obě aplikace, resp. výsledky pro aktuální skladby jsou srovnatelné pro praktické použití.

Takt	M-prohlížeč čas [s]	Sonic Visualiser čas [s]	Odchylka čas [s]
1.	0,35	0,31	0,04
2.	2,33	2,33	0,00
3.	4,12	4,11	0,01
4.	6,00	5,92	0,08
5.	8,42	8,37	0,05
6.	10,32	10,33	-0,01
7.	12,25	12,17	0,08
8.	14,95	14,93	0,02
9.	18,03	18,01	0,02
10.	20,33	20,31	0,02
11.	22,30	22,26	0,04
12.	24,10	24,06	0,04
13.	27,15	27,12	0,03
14.	29,13	29,15	-0,02
15.	31,17	31,15	0,02
16.	34,35	34,33	0,02
Průměrná odchylka d [s]			0,03

Tab. 3.1: Průměrná odchylka výsledků aplikací M-prohlížeč a Sonic Visualiser

4 ZÁVĚR

Zadáním této diplomové práce bylo provedení analýzy skladeb z hlediska agogiky a porovnání interpretace stejného díla různými interprety, ať jsou to hudebníci nebo dirigenti.

V první části byl uveden přehled muzikologických termínů popisujících časové parametry hudby. Tyto parametry jsou nezbytné pro analýzu, srovnání a vyhodnocení agogických změn, které do přednesu vnáší interpret v souladu se svým uměleckým cítěním.

Druhá část práce měla za cíl popsat nejběžněji používané metody číslicového zpracování signálu používané pro získání hudební informace z hudebních nahrávek. V současnosti je k dispozici několik ucelených systémů, které využívají tyto metody od těch nejjednodušších v časové oblasti až po nejsložitější v kmitočtové oblasti. Tyto metody mají nepřeberné možnosti parametrizace a často se využívají kombinovaně.

Systémy vhodné pro použití v muzikologickém výzkumu můžeme rozdělit na plně automatické a polo-automatické. Plně automatické systémy vyhodnocující hudební nahrávky využívají různé identifikační metody a jejich nejrůznější variace. V současnosti není znám plně spolehlivý systém tohoto typu, neboť jejich spolehlivost není dostatečná pro polyfonní zvukový signál, který je přítomen v každé hudební skladbě. Polo-automatické systémy využívají optimální konfigurace metod schopných detekovat nástupy tónů a další požadované informace. Tyto systémy pouze označují nejpravděpodobnější hodnoty, ale ponechávají konečné vyhodnocení na muzikologovi, resp. na jeho zkušeném hudebním sluchu. Díky tomu je možné analyzovat i méně kvalitní zvukové nahrávky či velmi komplikované hudební scény jako jsou velké orchestry.

Jedním z takových systémů je popisovaný MIRtoolbox, který je uceleným souborem na sebe navazujících funkcí. Funkce z tohoto souboru využívá i uživatelská aplikace M-prohlížeč, která je základem této práce. Další takovou aplikací je Sonic Visualiser. Jedná se o uživatelskou aplikaci s grafickým rozhraním, která je prakticky využívána muzikology. Jedná se o čistě interaktivní aplikaci, automatickou část zajišťují moduly zásuvného systému VAMP.

Ve třetí, praktické části této práce byla provedena demonstrační analýza a srovnání prvních 16ti taktů 3 skladeb. Tato analýza byla provedena v obou aplikacích, jak M-prohlížeč tak i Sonic Visualiser. Přesnost jejich detekcí počátků tónů je prakticky srovnatelná, neboť bylo využito podobných metod detekujících změny spektra signálu. Obě aplikace se odlišují především v metodách práce s grafickým prostředím a možnostech výstupu získaných dat. Aplikace M-prohlížeč je vybavena přímým výstupem muzikologických dat a grafů, jak byly popsány v první části této práce. Vzhledem k polo-automatickému přístupu aplikace M-prohlížeč je možné

analyzovat nejen perkusní nástroje, které mají stabilní průběh energetické obálky tónu, ale i smyčcové nástroje vykazující jiný charakter tónu. Aplikace je schopna analyzovat i mnoho nástrojové hudební tělesa, u kterých lze detekovat dominantní změny obecných parametrů, tedy energetické obálky a derivace spektra.

Mezi možnostmi dalšího vývoje se nabízí zvyšování stupně automatizace analýzy, případně plně automatické řešení. Toto řešení by mělo zásadní význam v úspoře času u většího muzikologického projektu, zpracovávajícího velké množství hudebních nahrávek. Zvýšení pravděpodobnosti výsledků analýzy by mohlo pomoci zavedení notového záznamu do aplikace a tím využití předpokládané pozice tónů ve skladbě. Zajímavým doplňkem by mohl být export dat v MIDI formátu.

LITERATURA

- [1] KUNA, Milan a Miloš Bláha. *Čas a hudba: K dramaturgii časových prostředků v hudebně interpretačním výkonu*. Academia, Praha 1982
- [2] SMÉKAL, Zdeněk. *Systémy a signály: 1D a 2D diskrétní a číslicové zpracování*. Sdělovací technika, Praha, 2013. ISBN 978-80-86645-22-0
- [3] LARTILLOT, Olivier and Petri TOIVIAINEN. "A Matlab Toolbox for Musical Feature Extraction From Audio", International Conference on Digital Audio Effects [online]. Bordaux: 2007, poslední aktualizace 11.01.2008 [cit. 30.1.2017]. Dostupné z URL: <http://dafx.labri.fr/main/dafx07_proceedings.html>.
- [4] CANNAM, Chris, Christian LANDONE and Mark SANDLER. *Sonic Visualiser: An Open Source Application for Viewing, Analysing, and Annotating Music Audio Files*, in Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference [online]. [cit. 15.3.2017]. Dostupné z URL: <<http://sonicvisualiser.org/sv2010.pdf>>.
- [5] SAPP, Craig Stuart. *Mazurka Project Plugins for Sonic Visualiser* [online]. Poslední aktualizace 6.5.2006 [cit. 15.3.2017]. Dostupné z URL: <<http://sv.mazurka.org.uk/>>.
- [6] COOK, Nicolas. *Beyond the Score: Music as Performance*. Oxford University Press 2013. ISBN 978-0-19-935743-7 (electronic text)
- [7] ŠUPKA, Ondřej. *Antonín Dvořák* [online]. Ondřej Šupka, 2005-2017 [cit. 5.2.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.antonin-dvorak.cz>>.
- [8] Yakov Flier. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 3.4.2017]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Yakov_Flier>
- [9] Yakov Flier plays Dvorak Humoresque Op.101 No.7 (piano). In: *Youtube* [online]. Zveřejněno 21.9.2014 [cit. 3.4.2017]. Dostupné z URL: <<https://www.youtube.com/watch?v=uM9MMPTNG10>>
- [10] Paul Barton Artist. [online]. [cit. 5.4.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.paulbartonartist.com>>
- [11] FEURICH. Sound samples. *Feurich.com: PÉDALE HARMONIQUE* [online]. Wien: FEURICH Wien. [cit. 5.4.2017]. Dostupné z URL: <<https://www.feurich.com/pedale-harmonique/sound-samples/comments-fr>>

- [12] Dvořák Humoresque No.7 in G flat - P. Barton FEURICH piano. In: *Youtube* [online]. Zveřejněno 6. 7. 2015 [cit. 3. 4. 2017]. Dostupné z URL: <https://www.youtube.com/watch?v=IZ1y_IRJEsA>
- [13] ATZINGER, Christopher. *Christopher Atzinger Pianist* [online]. New York: Christopher Atzinger, 2017 [cit. 10. 4. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.christopheratzinger.com>>
- [14] Christopher Atzinger, piano - Dvořák Humoresque, Op. 101, No. 7. In: *Youtube* [online]. Zveřejněno 5. 10. 2015 [cit. 10. 4. 2017]. Dostupné z URL: <https://www.youtube.com/watch?time_continue=4&v=xtpNw_ORX6s>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

accelerando	zrychlení současného tempa skladby
agogické změny	předepsané i nepředepsané změny současného tempa skladby
attack	počáteční část tónu se vzrůstající intenzitou – náběhu tónu
BPM	beats per minute (počet úderů za minutu)
DSP	Digital Signal Processing (číslicové zpracování signálu)
durata	časová délka úseku hudební skladby
fermata	předepsané časové prodloužení tónu nad příslušnou notou v notovém záznamu
metrum	metrum je střídání těžkých a lehkých dob v taktu
menzura	menzura jsou svislé čáry vymezující jednotlivé takty v notovém zápise
MFCC	Mel-frequency cepstral coefficients (melovské keprální koeficienty)
MIR	Music Information Retrieval (získávání hudební informace)
M.M.	Mälzelův metronom
ritardando	zrychlení současného tempa skladby
rubato	označení pro rytmicky volnější styl hry
sustain	statická část tónu s trvalou intenzitou (trvání tónu)
témbr	označení pro charakteristické zvukové zabarvení nástroje nebo tónu.
E	míra rovnoměrnosti tempového pohybu [%]
H	hybnost hudebního proudu [impulzů/min]
K_H	koeficient hybnosti hudebního proudu [-]
l	časová délka měřeného úseku [s]
n	počet taktů měřeného úseku skladby [-]
P	předpokládaná časová délka skladby [s]
R	míra reálného času hudby [%]
T	časová délka průměrného taktu měřeného úseku [s]