



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

CENTRUM SPORTOVNÍCH AKTIVIT

CENTRE OF SPORTS ACTIVITIES

ODHAD TEPOVÉ FREKVENCE ZE SIGNÁLŮ PPG

HEART RATE ESTIMATION FROM THE PPG SIGNALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Šimčák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Kozumplík, CSc.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Sportovní technologie**

Centrum sportovních aktivit

Student: Petr Šimčák

ID: 226320

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Odhad tepové frekvence ze signálů PPG

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Vypracujte stručný přehled metod odhadu tepové frekvence (TF) z fotopletysmogramů (signálů PPG). 2) Navrhněte, realizujte a popište algoritmy pro detekci systolických maxim v signálech PPG. Algoritmy detekce a určení TF ověřte na databázi CapnoBase. 3) Dále ověřte algoritmy na databázi Brno University of Technology Smartphone PPG Database (BUT PPG). 4) Navrhněte automatické posouzení kvality testovaných signálů. 5) Získané výsledky vyhodnotěte a vypracujte studii shrnující výsledky práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] VADREHU S., MANIKANDAN M.S.: Use of Zero-Frequency Resonator for Automatically Detecting Systolic Peaks of Photoplethysmogram Signal. Healthcare Technology Letters, 2019, Vol. 6, Iss. 3, pp. 53–58.
- [2] PARK J., SEOK H.S., KIM S.-S., SHIN H.: Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review. Front. Physiol., 2022, 12:808451. pp. 1-23.

Termín zadání: 5.2.2025

Termín odevzdání: 31.5.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Kozumplík, CSc.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato bakalářská práce se zaměřuje na odhad tepové frekvence ze signálů fotopletysmografie (PPG). Práce využívá dvě databáze: CapnoBase a BUT PPG. Cílem je nejen přehledně popsat metody odhadu tepové frekvence ze signálů PPG, ale také navrhnut, implementovat a otestovat algoritmy pro spolehlivou detekci systolických vrcholů a stanovení tepové frekvence. Diskutovány jsou také výhody a omezení jednotlivých metod.

KLÍČOVÁ SLOVA

fotopletysmografie, tepová frekvence, PPG, odhad tepové frekvence, systolické vrcholy, algoritmy, CapnoBase, BUT PPG

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on heart rate estimation from photoplethysmographic (PPG) signals. The work utilizes two databases: CapnoBase and BUT PPG. The aim is not only to provide an overview of heart rate estimation methods from PPG signals but also to design, implement, and test algorithms for reliable detection of systolic peaks and heart rate determination. The advantages and limitations of each method are also discussed.

KEYWORDS

photoplethysmography, heart rate, PPG, heart rate estimation, systolic peaks, algorithms, CapnoBase, BUT PPG

ŠIMČÁK, Petr. *Odhad tepové frekvence ze signálů PPG*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Centrum sportovních aktivit, Ústav biomedicínského inženýrství, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Kozumplík, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Petr Šimčák

VUT ID autora: 226320

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2024/25

Téma závěrečné práce: Odhad tepové frekvence ze signálů PPG

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom 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*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Kozumplíkovi, CSc. za trpělivost, hodnotné rady, laskavý přístup, konzultace, podklady k práci a odborné vedení.

Obsah

Úvod	21
1 Srdeční tep	23
1.1 Srdeční tepová frekvence	23
1.2 Faktory ovlivňující tepovou frekvenci	23
1.3 Měření srdečního tepu	24
2 Fotopletysmograf	25
2.1 Složení PPG signálu	25
3 Databáze	27
3.1 CapnoBase	27
3.2 BUT PPG	27
4 Elgendiho referenční algoritmus	29
4.1 Obecná struktura algoritmu	29
4.2 Předzpracování signálu	29
4.3 Určení bloků zájmů a nalezení vrcholů	31
5 Vlastní algoritmus založený na detekci vrcholů	35
5.1 Předzpracování PPG signálu	35
5.2 Detekce vrcholů	37
5.3 Výpočet tepové frekvence	38
6 Využití Hjorthových deskriptorů na odhad TF a kvality signálů	41
6.1 Odhad TF pomocí Hjorthovy mobility	42
6.2 Využití mobility a komplexity pro hodnocení kvality signálu	44
7 Výsledky a vyhodnocení	45
7.1 Vyhodnocení na databázi CapnoBase	45
7.2 Vyhodnocení na databázi BUT PPG	47
Závěr	49
Literatura	51
Seznam symbolů a zkratek	55
Seznam příloh	57

A Některé příkazy balíčku thesis	59
A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek	59
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů	59
B Druhá příloha	61
C Příklad sazby zdrojových kódů	63
C.1 Balíček listings	63
D Obsah elektronické přílohy	67

Seznam obrázků

2.1	Snímání PPG signálu	25
2.2	Fiziologický popis PPG signálu	26
3.1	Získání PPG signálu pro databázi BUT PPG	28
4.1	Struktura Elgendiho algoritmu	29
4.2	Elgendiho předzpracování PPG signálu	30
4.3	Elgendiho zpracování pravidelného signálu	33
4.4	Elgendiho zpracování nepravidelného signálu	33
5.1	Vlastní amplitudová charakteristika Butterworthova filtru	36
5.2	Vlastní detekce vrcholů	37
5.3	Histogram IBI	39
5.4	Vlastní zpracování signálů	40
6.1	Schéma našeho algoritmu, který využívá Hjorthových deskriptorů	41
6.2	Porovnání filtrovaného a autokorelovaného signálu	42
B.1	Origo Template	61

Seznam tabulek

7.1	Srovnání metod odhadu TF na databázi CapnoBase	46
A.1	Přehled příkazů	59

Seznam výpisů

C.1	Ukázka sazby zkratek	63
C.2	Příklad Schur-Cohnova testu stability v prostředí Matlab.	64
C.3	Příklad implementace první kanonické formy v jazyce C.	65

Úvod

Tepová frekvence je jedním z klíčových zdravotních parametrů, který poskytuje důležité informace o stavu kardiovaskulárního systému subjektu. Měření a monitorování srdeční tepové frekvence se stalo nepostradatelným nástrojem nejen v medicíně, ale také ve sportovní vědě a kondičním tréninku. Tradiční metody měření tepové frekvence, jako je EKG (Elektrokardiogram), jsou přesné, ale jejich nevýhodami jsou vyšší cena a uživatelská nepřívětivost v používání EKG systémů. V posledních letech získává na popularitě PPG (Fotopletysmograf). Jedná se o neinvazivní a relativně levnou metodu, která umožňuje monitorovat tepovou frekvenci pomocí optických senzorů.

Fotopletysmografie funguje na principu detekce změn objemu krve v tkáni pomocí světla, které je absorbováno nebo reflektováno. Výhodou PPG je možnost integrace do nositelných zařízení, jako jsou chytré hodinky nebo fitness náramky, což umožňuje nepřetržité monitorování tepové frekvence v reálném čase bez zásahu do běžného života měřeného.

Cílem této bakalářské práce je popsat metody odhadu tepové frekvence z PPG signálů a navrhnout vlastní algoritmy, které umožní spolehlivé stanovení tepové frekvence. K otestování algoritmů budou využity databáze PPG signálů: CapnoBase a BUT PPG (Brno University of Technology Smartphone PPG Database).

1 Srdeční tep

Srdeční tep, nazývaný též pulz, představuje jeden z nejzákladnějších zevních projevů srdeční činnosti. Jedná se o tlakovou vlnu, která vzniká při systole (stahu) srdce a šíří se krevním řečištěm do celého těla. Tuto tlakovou vlnu lze vnímat na povrchu těla (tzv. palpačně), konkrétně v místech, kde vedou tepny v relativně mělkých oblastech. A to na příklad na zápěstí (a. radialis) nebo na krku (a. carotis) [4, 17].

Význam srdečního tepu a jeho frekvence (počtu úderů za minutu) je zásadní v klinické praxi i ve výzkumu. Vzhledem k tomu, že tepová vlna vychází přímo z cyklické práce srdce, poskytuje nám relativně přesnou a snadno dostupnou informaci o srdeční aktivitě. Srdeční tep i jeho variabilita se dnes běžně využívají k orientačnímu posouzení kardiovaskulárního zdraví a k monitorování reakce kardiovaskulárního systému na různé podněty a zátěž [19].

1.1 Srdeční tepová frekvence

Tepová frekvence (TF) je běžně užívanou veličinou pro základní posouzení srdeční činnosti. Je definována jako počet srdečních cyklů (systol a diastol) za jednu minutu. U zdravého dospělého jedince v klidovém stavu se nejčastěji pohybuje v rozmezí 60 až 90 úderů za minutu. Maximální rozsah TF lze vypočítat, když se vezme v potaz pohlaví, věk a váha [4]. Obecně se ale považují za hraniční hodnoty 30 až 200 úderů za minutu [10]. Pro klidový stav jsou hodnoty pod 60 úderů za minutu označovány jako bradykardie, u 90-ti úderů za minutu pak hovoříme o tachykardii [4, 18].

Důležitým aspektem ovlivňujícím TF je i pravidelnost srdečního rytmu. Pravidelné intervaly mezi jednotlivými údery signalizují rovnoměrné srdeční stahy. Nepravidelnosti se označují jako arytmie, které mohou poukazovat na různá onemocnění, např. fibrilace síní či extrasystoly [4].

1.2 Faktory ovlivňující tepovou frekvenci

TF může kolísat v závislosti na mnoha faktorech, které lze rozdělit na vnitřní (endogenní) a vnější (exogenní). K vnitřním faktorům patří například momentální zdravotní stav, tělesná kondice, hormonální vlivy nebo genetické predispozice. Mezi vnější faktory lze řadit fyzickou aktivitu, působení stresu, emoční zátěž či užití stimulantů (např. kofein nebo nikotin) [19].

Významným determinantem srdečních pulzů je obecně fyzická aktivita - během cvičení či zvýšené tělesné námahy musí organismus zajistit vyšší přísun kyslíku a živin do zatížených svalů, čehož dosahuje zrychlením srdeční aktivity. Podobně i

stresové situace či emoční reakce vedou ke stimulaci sympatického nervového systému, jenž zvyšuje srdeční tep. Naopak parasympatický nervový systém v klidových stavech srdeční činnost brzdí [19].

1.3 Měření srdečního tepu

Existuje řada způsobů, jak TF měřit a kvantifikovat. Základní dělení vychází z rozlišení mezi manuálními a instrumentálními metodami.

Tradičním, jednoduchým a dostupným postupem manuálního měření je již zmíněné palpační měření tepu v kapitole 1. Při něm se prsty (typicky ukazovák a prostředník) přiloží na vhodnou tepnu, často vřetenní tepnu na zápěstí (a. radialis), a po stanovenou dobu se počítají údery. Manuální metoda je i přes svoji jednoduchost relativně spolehlivá, avšak nemusí být ideální pro detekci nepravidelného rytmu nebo může být chybová při nepozornosti vyšetřujícího [18].

Instrumentální metoda je taková, která využívá moderní přístroje, jako jsou fitness náramky, chytré hodinky či specializované pulzmetry, umožňují pohodlné, dlouhodobé a relativně přesné měření srdečního tepu. Často využívá principu fotopletysmografie (PPG), kdy senzor vyhodnocuje změny průtoku krve podle odrazivosti světla ve tkáni. Ve sportovním tréninku se uplatňují také hrudní pásy, které snímají EKG a monitorují tep spolehlivě i při vyšších zátěžích.

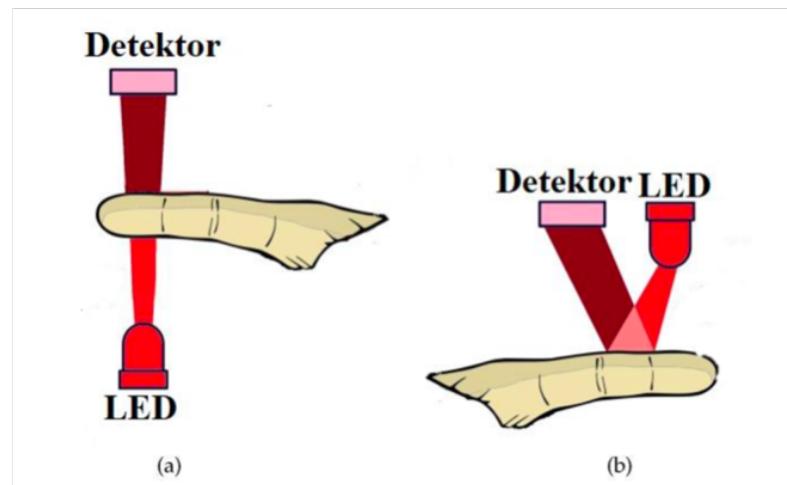
Výsledkem měření je výše popsaná tepová frekvence popsaná v podkapitole 1.1, vyjádřená v počtech úderů za minutu. Moderní přístroje nabízejí trvalé monitorování s automatickým záznamem tepové frekvence, což usnadňuje dlouhodobé sledování a vyhodnocování dat.

2 Fotopletysmograf

Fotopletysmografie (PPG) je neinvazivní optická metoda sloužící k monitorování změn objemu krve v mikrovaskulárním řečišti tkáně, obvykle na prstu, zápěstí či ušním lalůčku [20]. Zejména díky snadné integraci do nositelných zařízení (např. chytrých hodinek) a relativně nízkým nákladům na realizaci se PPG stává klíčovým nástrojem pro dlouhodobé sledování kardiovaskulárních parametrů, jako je tepová frekvence (TF), saturace krve kyslíkem (SpO_2) či hodnocení variability tepových intervalů [9].

Na Obr. 2.1 jsou znázorněny dvě základní měřicí konfigurace. Transmisní režim (a), kde je zdroj světla a fotodetektor na opačných stranách tkáně (typicky při měření na prstu či ušním lalůčku). A reflexní režim (b), zde je umístěn zdroj světla i detektor na téže straně tkáně, což se používá v běžných sportovních zařízeních, jakou jsou chytré hodinky. Tento režim je z morfologických důvodů náchylnější k chybám [15].

Metoda PPG je založena na měření intenzity světla, která se po interakci s tkání dostane k detektoru. Množství absorbovaného/odraženého světla závisí na aktuálním průtoku krve, který je modulován srdečními cykly [20].



Obr. 2.1: Transmisní režim (a) a reflexní režim (b), upraveno z [4].

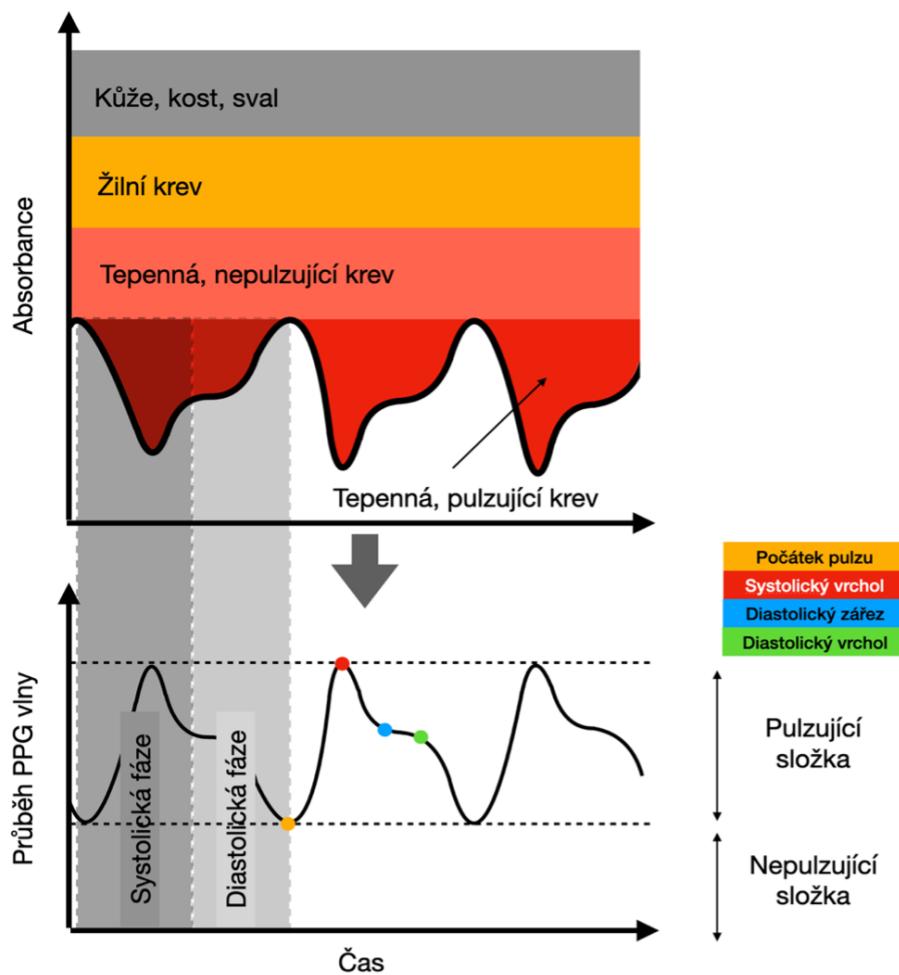
2.1 Složení PPG signálu

Jak ukazuje Obr. 2.2, naměřený PPG signál zahrnuje pulzní (AC) složku synchronizovanou se srdeční aktivitou a stabilní, nepulzní (DC) složku. AC složka odráží periodické změny objemu arteriální krve v rozsahu typického frekvenčního pásma srdeční činnosti (zhruba 0,5–3 Hz) a je klíčová pro přesnou detekci TF. DC složka

představuje základní linii danou absorpcí tkání a žilní krve a ovlivňuje ji například barva kůže, okolní osvětlení a anatomické poměry měřené oblasti [4, 20]. Je důležité si uvědomit, že PPG signál je inverzní k měřenému optickému signálu, protože reprezentuje objem krve v tkání, nikoli množství světla dopadajícího na senzor, což je patrné i z Obr. 2.2.

Za počátek pulzu v PPG signálu se obvykle považuje nejnižší bod předcházející systolické fázi, který odpovídá minimálnímu objemu krve v měřené oblasti. Pro výpočet TF se využívají systolické vrcholy, tedy body s maximálním objemem krve, z nichž lze určit intervaly mezi srdečními údery a následně stanovit TF.

Po systolickém vrcholu přichází diastola, což je fáze srdečního cyklu, během které dochází k relaxaci srdečního svalu a plnění srdce krví. V průběhu diastoly bývá často patrný typický dikrotický zářez, který odráží elastické vlastnosti cévní stěny a uzávěr aortální chlopně. Jeho přítomnost a tvar mohou poskytovat užitečné informace o stavu kardiovaskulárního systému [9, 20].



Obr. 2.2: Princip získání PPG křivky a její popis. Upraveno z [20].

3 Databáze

V této práci jsme využívali dvě databáze fotopletysmografických signálů: *CapnoBase* a *Brno University of Technology Smartphone PPG Database*, pro kterou budeme v této práci používat zkrácený název BUT PPG.

Na těchto databázích jsme testovali a porovnávali výsledky použitých algoritmů. U databáze CapnoBase jsme porovnávali naměřené systolické vrcholy s referenčními hodnotami a díky tomu jsme porovnávali i rozdíl v srdeční tepové frekvenci (TF). U databáze BUT PPG nebyly referenční hodnoty systolických vrcholů k dispozici, ale byly zde referenční hodnoty TF signálů a ty jsme porovnávali s naměřenými výsledky.

3.1 CapnoBase

CapnoBase je veřejně dostupná databáze, která obsahuje osmiminutové záznamy od 42 dětských i dospělých pacientů, podstupujících plánované chirurgické zákroky včetně anestezie [3].

Součástí databáze jsou PPG, EKG a respirační signály, se vzorkovací frekvencí 300 Hz. Pro každý záznam jsou navíc ručně označeny systolické vrcholy v PPG, odvozené z EKG, což umožňuje přesné ověření správnosti detekce tepů. Autoři však nedoporučují databázi používat k trénování či doložování algoritmů [3]. Proto jsme ji použili pouze k testování použitých algoritmů a k porovnání výsledků s referenčními hodnotami.

Díky svým vlastnostem je CapnoBase vhodná k posouzení robustnosti a přesnosti metod v klinických situacích [8, 6].

3.2 BUT PPG

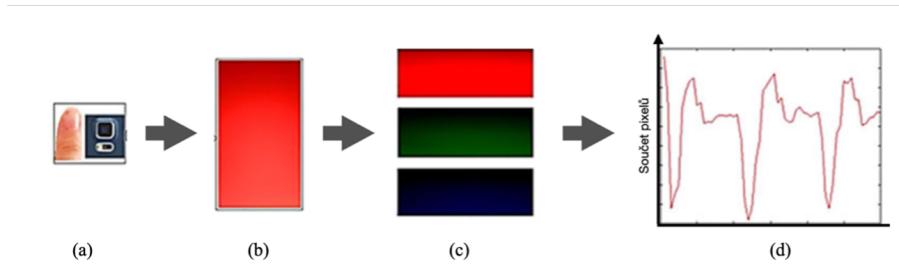
Databáze BUT PPG vznikla na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT za účelem zkoumání kvality PPG záznamů a odhadu TF. V nové rozšířené verzi obsahuje 3,888 desetisekundových měření od 50 dobrovolníků (25 žen a 25 mužů) ve věku 19 až 76 let, a to v klidu i při různých typech pohybových aktivit. Fotopletysmografické záznamy byly pořízeny chytrými telefony *Xiaomi Mi9* a *Huawei P20 Pro* se vzorkovací frekvencí 30 Hz. Pro referenční EKG a akcelerometrická (ACC) data byl použit mobilní senzor *Bittium Faros 360* (nebo 180) se vzorkovacími frekvencemi 1,000 Hz pro EKG a 100 Hz pro ACC [1]. Surový PPG signál byl extrahouvan z červené složky nahraného videa (viz. Obr. 3.1).

Každý PPG záznam byl synchronizován s EKG a rozdělen do desetisekundových segmentů, které následně hodnotilo tři až pět expertů. Pro označení kvality vycházeli

výhradně z rozdílu mezi TF odhadnutou z PPG a referenční tepovou frekvencí z EKG. Pokud byla odchylka do pěti úderů za minutu, bylo dané měření označeno jako „dobré“ (1), jinak jako „špatné“ (0). Tato hranice vychází z mezinárodní normy IEC 60601-2-27 a v databázi BUT PPG je aplikována ještě přísněji [1].

Přibližně polovina záznamů vznikla přiložením prstu na zadní kameru a LED, druhá pak snímáním ucha v poloze připomínající telefonování. V novější části databáze se rozšiřuje množství subjektů i situací, včetně manipulací s osvětlením, vyšším tlakem prstu na čočku, mluvením či chůzí, a nově se přidávají i údaje o krevním tlaku, glykémii a saturaci krve kyslíkem.

Díky této variabilitě podmínek a bohatým anotacím je BUT PPG unikátním zdrojem pro testování robustnosti algoritmů detekce TF a pro posuzování použitelnosti krátkých PPG signálů z mobilního telefonu v reálné praxi.



Obr. 3.1: Záznam videa na kameru mobilního telefonu (a), jeden vybraný snímek ze záznamu (b), snímek rozložen na tři barevné složky (c), PPG signál vykreslený z červené složky (d), upraveno z [5].

Spojením klinicky orientované databáze CapnoBase a mobilně zaměřené BUT PPG vzniká možnost vzájemného porovnání a ověření přesnosti algoritmů, které musejí obstarát v rozdílných kontextech: v relativně stabilním, klinickém, prostředí a v krátkých záznamech z chytrého telefonu.

4 Elgendiho referenční algoritmus

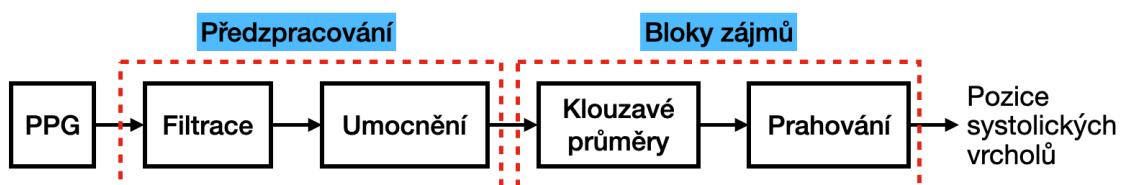
Tato kapitola popisuje, jak lze ve fotopletysmografickém (PPG) signálu nalézt systolické vrcholy s využitím Elgendiho algoritmu, který je implementován v knihovně NeuroKit2.

Tato knihovna reaguje na „krizi reprodukovanosti“, což je problém, kdy vědecké studie nelze opakovat kvůli nedostupnosti kódu a dat. Proto nabízí otevřený zdrojový kód, strukturovanou dokumentaci i podporu k začleňování funkcí přímo do výzkumných prací [13]. Zdrojový kód pro NeuroKit2 je dostupný na <https://github.com/neuropsychology/NeuroKit> a dokumentace na <https://neurokit2.readthedocs.io/>. Knihovnu je možné průběžně modifikovat a vyvíjet.

V kapitole 2 byly již podrobně shrnutý principy PPG, proto se zde zaměříme na samotnou detekci vrcholů a její realizaci.

4.1 Obecná struktura algoritmu

Algoritmus se skládá z několika kroků: *filtrace* pomocí pásmové propusti, *umocnění* signálu, vytvoření dvou *klouzavých průměrů* a dvou *prahů* (Obr. 4.1) [12]. Vstupem je surový fotopletysmografický záznam, zatímco výstupem jsou konkrétní časové pozice nalezených systolických vrcholů.



Obr. 4.1: Zjednodušené schéma Elgendiho algoritmu [12].

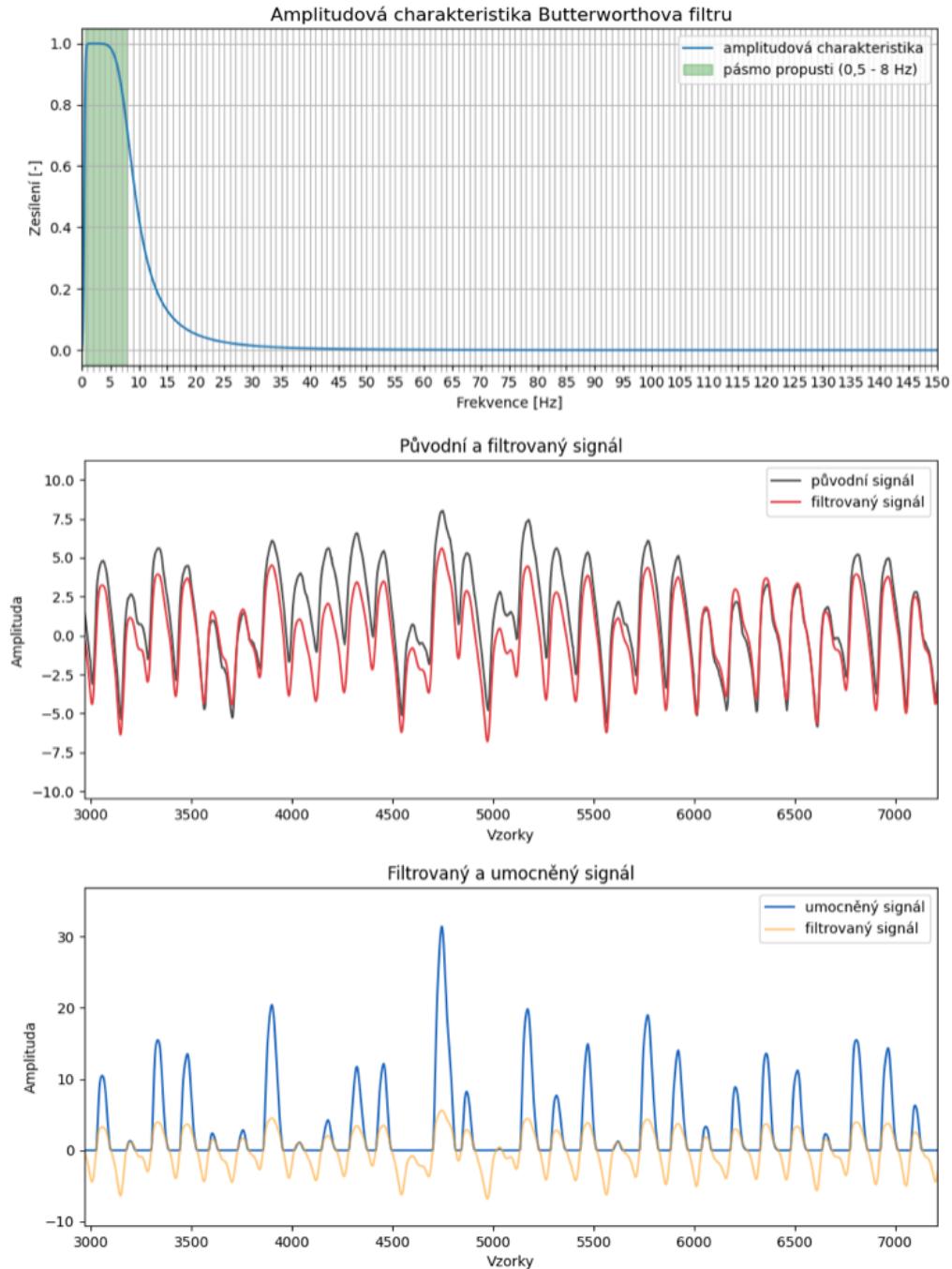
4.2 Předzpracování signálu

Před samotnou detekcí je vhodné potlačit šum a odstranit pomalé změny amplitudy. Elgendi [12] používá druhý řád Butterworthova filtru se zpracováním v přímém i reverzním směru (tzv. filtrace s nulovým fázovým posuvem). Frekvenční charakteristika filtru byla nastavena na pásmo 0,5–8 Hz, což postačuje pro typické PPG kmitočty a dostatečně potlačí pásmový posun i vyšší frekvence nesouvisející se systolickými vrcholy. Na Obr. 4.2 je ukázka amplitudové charakteristiky a zfiltrovaného úseku signálu.

Po filtraci je kladná část signálu umocněna na druhou viz. (4.1). To je provedeno s cílem zdůraznit rozdíly mezi systolickou vlnou a ostatními složkami, jako jsou diastolické zářezy nebo šum [12]. Výsledná hodnota $y[n]$ po umocnění je dána vztahem:

$$y[n] = \begin{cases} Z[n]^2, & \text{pokud } Z[n] > 0, \\ 0, & \text{pokud } Z[n] \leq 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

kde $Z[n]$ představuje již vyfiltrovaný signál. Porovnání filtrovaného a umocněného signálu je ilustrováno na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Filtrace PPG signálu pomocí Butterworthova filtru a umocnění.

4.3 Určení bloků zájmů a nalezení vrcholů

Po úvodní filtrace a umocnění fotopletysmografického signálu, vypočítává Elgendiho algoritmus dva klouzavé průměry (MA), které se od sebe liší v samotné šířce průměrujícího okna [12].

Kratší okno W_1 je nastaveno tak, aby sloužilo ke zdůraznění systolické špičky, zatímco delší okno W_2 se vybralo tak, aby zdůraznilo období celého srdečního cyklu. Tyto konstanty odpovídají šírkám oken v milisekundách, ve kterých se počítají klouzavé průměry (4.2) a (4.3). Pro vypočítání konkrétních velikostí oken bylo provedeno metodou „hrubé sily“ vhodných parametrů tak, že se vyzkoušely různé kombinace délek těchto a dalších a konstant. Jako nejlepší kombinace se vybrala ta, po které dosahoval algoritmus nejvyššího skóre v citlivosti (Se) a pozitivní prediktivní hodnotě (PPV) na trénovací sadě dat [12]. Pro W_1 byla zvolena hodnota 111 (odpovídající milisekundám) a pro W_2 hodnota 667.

Výpočet klouzavých průměrů

Elgendi definuje umocněný a vyfiltrovaný PPG signál jako $y[n]$. Klouzavý průměr s kratším oknem MA_{peak} se pro každý bod n vypočítá rovnicí

$$MA_{peak}[n] = \frac{1}{W_1}(y[n - \frac{W_1 - 1}{2}] + \dots + y[n] + \dots + y[n + \frac{W_1 - 1}{2}]), \quad (4.2)$$

kde je W_1 konstanta popsána v podkapitole 4.3 [12]. Podobně se s delším oknem W_2 vypočítá MA_{beat} , který reprezentuje přibližnou délku jednoho srdečního cyklu:

$$MA_{beat}[n] = \frac{1}{W_2}(y[n - \frac{W_2 - 1}{2}] + \dots + y[n] + \dots + y[n + \frac{W_2 - 1}{2}]). \quad (4.3)$$

Výsledky výpočtů jsou zobrazeny na Obr. 4.3 a Obr. 4.4. Tyto klouzavé průměry slouží k vypočítání THR_1 a následných bloků zájmu, které vedou k určení systolických vrcholů.

Nastavení dvou dynamických prahů

Pro další zpracování se zvolí dvě prahové hodnoty. První dynamický prah THR_1 se vypočítá posunutím signálu MA_{beat} o konstantu β vynásobenou průměrnou hodnotou umocněného signálu \bar{z} viz. (4.4). Tato průměrná hodnota se vypočítává z celého umocněného signálu. β je jedním z parametrů, který se nastavuje metodou „hrubé sily“ a nejlepší výsledky vyšly, když se β nastavila na hodnotu 2 [12].

$$THR_1[n] = MA_{beat}[n] + \beta \cdot \bar{z}. \quad (4.4)$$

První práh je vykreslen na Obr. 4.3 a Obr. 4.4 společně s klouzavými průměry a umocněným signálem. Z těchto obrázků je patrné, že parametry β ani \bar{z} nemají na práh THR_1 příliš významný viditelný efekt, tudíž je křivka THR_1 velmi podobná křivce MA_{beat} .

Porovnáním $MA_{\text{peak}}[n]$ s $THR_1[n]$ získáme časové úseky (tzv. bloky zájmu), které odpovídají částem, kde je signál nad úrovní MA_{beat} .

Druhý práh THR_2 slouží k pročištění již stanovených bloků zájmů. Je roven konstantě W_1 , jak je definováno v rovnici (4.5). Elgendi využívá tento práh pro eliminaci všech bloků zájmů, které jsou kratší než předem stanovená konstanta reprezentující očekávanou šířku systolické vlny [12].

$$THR_2 = W_1. \quad (4.5)$$

Určení bloků zájmů

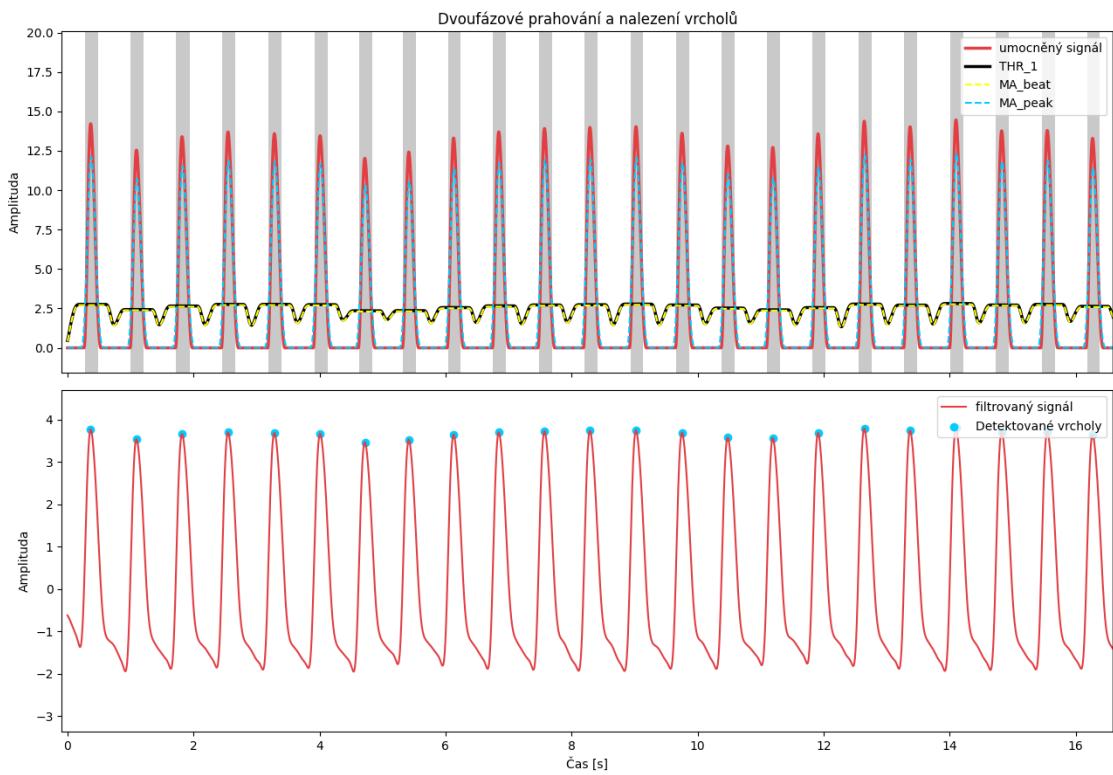
Porovnáním výše uvedeného klouzavého průměru MA_{peak} a prvního prahu (THR_1) jsou určeny bloky zájmu. Tyto bloky jsou definovány jako úseky, kde je MA_{peak} větší než THR_1 a zároveň jejich šířka je větší než THR_2 viz. (4.6) [12]. Bloky zájmu jsou zobrazeny jako šedé úseky na Obr. 4.3 a 4.4.

$$\{n : MA_{\text{peak}}[n] > THR_1[n] \wedge okno > THR_2\}. \quad (4.6)$$

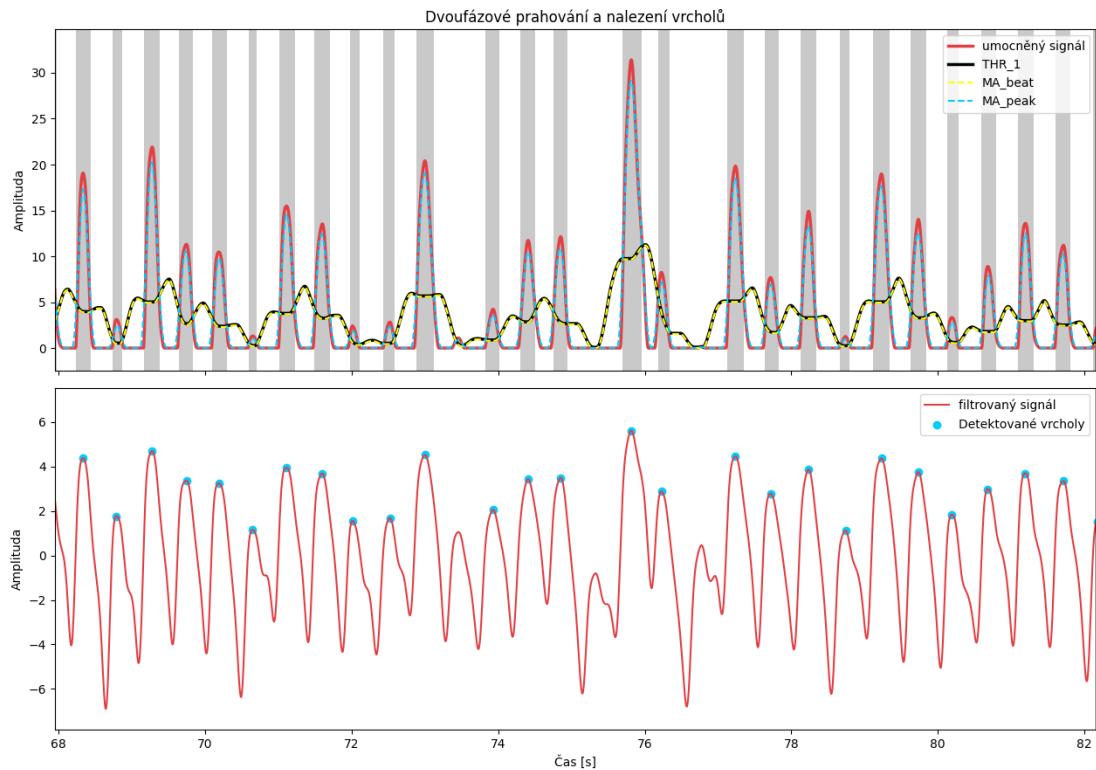
Na Obr. 4.4 vidíme tři systolické vrcholy, které nebyly detekovány (kolem vzorků 4000, 4600 a 5000). U prvního z nich je patrné, že umocněný signál překračuje THR_1 , avšak blok je příliš krátký, a proto je vyřazen. Druhý a třetí vrchol mají ve filtrovaném signálu příliš nízkou amplitudu, což způsobuje, že po umocnění nejsou dostatečně výrazné.

Nalezení vrcholů

Samotné systolické vrcholy jsou určeny jako lokální maxima v oblastech bloků zájmu. Funkce `find_peaks` z knihovny NeuroKit2 zpracovává jednodimenzionální signál a porovnáváním hodnot v každém bloku zájmu určuje lokální maxima [13].



Obr. 4.3: Nastavení bloků zájmu a určení systolických vrcholů pro pravidelný signál.



Obr. 4.4: Nastavení bloků zájmu a určení systolických vrcholů pro nepravidelný signál.

5 Vlastní algoritmus založený na detekci vrcholů

V této kapitole se zaměříme na popis vlastního algoritmu pro detekci systolických vrcholů a odhad srdeční tepové frekvence z fotopletysmografických signálů.

Našim cílem je vytvořit jednoduchý a efektivní algoritmus, který poskytne spolehlivé výsledky pro různé typy PPG signálů.

5.1 Předzpracování PPG signálu

Načtení signálů

Jelikož pracujeme se dvěma databázemi - *CapnoBase* a *BUT PPG*, výstupem po načtení signálů jsou dvě odlišné knihovny, které zpracováváme samostatně později. Obě databáze mají odlišnou strukturu souborů a formát signálů, což vyžaduje samostatný přístup při jejich načítání.

Databáze *CapnoBase* obsahuje signály uložené v `.mat` souborech. Z každého souboru načítáme signál PPG, referenční systolické vrcholy a vzorkovací frekvenci [3]. Navíc si vygenerujeme referenční tepovou frekvenci (TF) z referenčních vrcholů, a to pomocí stejného algoritmu, který později použijeme pro výpočet TF z našich detekovaných vrcholů. Pro účely čitelnější vizualizace a zpracování ukládáme též identifikátor záznamu, což jsou první čtyři znaky názvu souboru.

Oproti tomu databáze *BUT PPG* používá formát WaveForm Database (WFDB) a obsahuje PPG záznamy v `.dat` a `.hea` souborech. Tato databáze původně obsahovala 48 záznamů, které byly později rozšířeny o dalších 3 840 záznamů. Při načítání bylo nutné zohlednit, že starší PPG signály byly uloženy v jednom kanálu, zatímco ostatní signály byly rozděleny do tří kanálů, odpovídajících třem různým barevným složkám signálu [2]. Z novějších záznamů jsme jako referenční PPG signál vybrali pouze červenou složku, která nejvíce odpovídá standardnímu PPG signálu.

Výsledkem načtení jsou dvě knihovny, které obsahují dostupná data z obou databází ve formátu vhodném pro další zpracování.

Rozdelení záznamů

Záznamy v databázi *CapnoBase* jsou dlouhé osm minut. Tuto délku jsme považovali za nevhodnou pro výpočet tepové frekvence, protože výsledná hodnota TF by mohla být zkreslená kratšími úseky se zvýšenou nebo sníženou TF. Mohlo by se tedy stát, že referenční a naše tepové frekvence by vykazovaly podobné výsledky, přestože by se v jednotlivých úsecích mohly výrazně lišit.

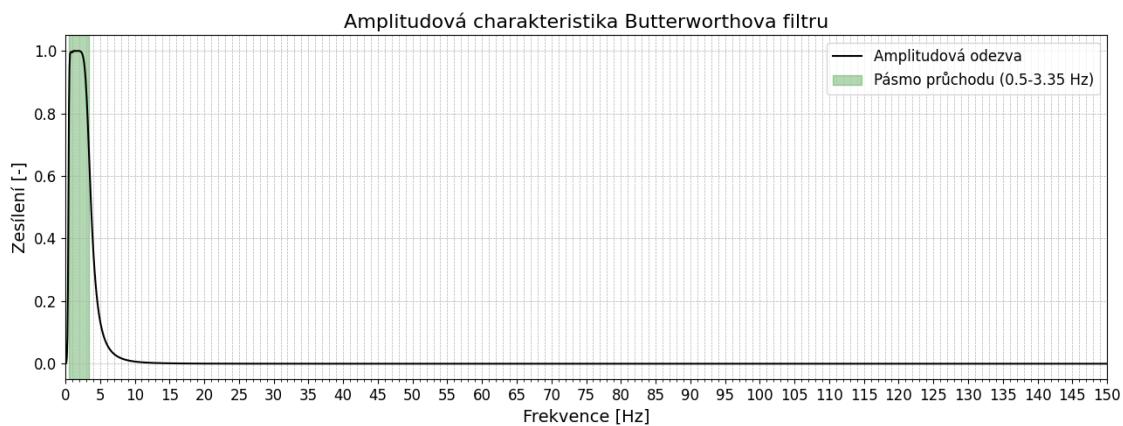
Proto jsme přistoupili k rozdělení každého dlouhého záznamu na kratší, minutové segmenty, které měly pětiprocentní překryv. Takový překryv byl zaveden proto, abychom testovali algoritmy na všech vrcholech v záznamu a nedošlo k vynechání některých vrcholů na začátku nebo na konci segmentu. Navíc takový překryv vyhovoval i proto, že počet oken popsaných v podkapitole 5.2 se rozšíří pouze o jeden. Rozdělený signál je znázorněn na Obr. 5.2. Výsledné, 63 sekund dlouhé úseky byly dále považovány za samostatné signály, které byly zpracovány jednotlivě.

Filtrace

Po načtení a případném rozdělení záznamů následovalo filtrování signálu. Na filtraci jsme použili pásmový filtr čtvrtého řádu typu Butterworth, jehož parametry jsme nastavili s ohledem na fyziologické vlastnosti PPG signálu. Dolní mez frekvence byla nastavena na 0,5 Hz (30 úderů za minutu) a horní mez na 3,35 Hz (201 úderů za minutu). Amplitudová charakteristika filtru je znázorněna na Obr. 5.1.

Tento rozsah byl zvolen tak, aby odstranil velmi pomalé změny v signálu, například dechovou frekvenci. Zároveň tak, aby potlačil vysokofrekvenční šum, který by mohl negativně ovlivnit detekci vrcholů. V nastavení prahů vycházíme z obecných hraničních hodnot lidské tepové frekvence popsané v kapitole 1.1.

Samotný Butterworthův filtr byl zvolen pro jeho rovnost v propustném pásmu, takže amplitudová charakteristika filtru je hladká a nevykazuje vlnění, které je typické pro některé jiné typy filtrů. Čtvrtý řád zajišťuje dostatečný kompromis mezi strmostí přechodu a numerickou stabilitou filtru. Pro odstranění fázového posunu, který je charakteristický pro použitý filtr, jsme použili nulofázový filtr, jenž provádí filtraci v obou směrech.



Obr. 5.1: Amplitudová charakteristika Butterworthova filtru.

Po filtraci jsme signál standardizovali do rozsahu od -1 do 1 . Tato normalizace zajišťuje jednotné měřítko napříč všemi záznamy, což je důležité pro následné kroky

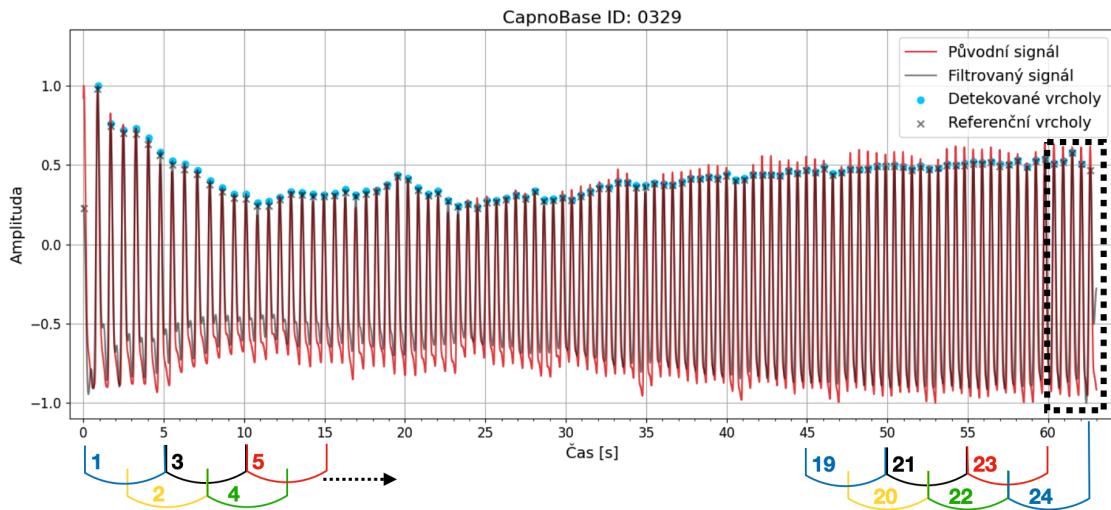
detekce, kde algoritmus pracuje s relativními prahy.

Výsledky filtrace a standardizace jsou zřetelné z Obr. 5.4. Po těchto krocích jsme získali očištěný a normalizovaný signál, připravený pro detekci systolických vrcholů.

5.2 Detekce vrcholů

Hledání vrcholů probíhá v pětisekundových oknech, která se překrývají o 50%. Funguje to tak, že nejprve analyzujeme prvních 5 sekund signálu, poté posuneme okno o 2,5 sekundy a analyzujeme dalších 5 sekund, přičemž prvních 2,5 sekund se překrývají s předchozím oknem. Tímto způsobem pokryjeme celý signál a zajistíme, že žádný vrchol nebude vynechán. Na jeden minutový úsek obvykle připadá 23 oken, ale protože máme 5% překryv celého minutového záznamu, délka výsledného signálu je 63 sekund, a proto analyzujeme o jedno okno navíc. Vizuálně je to znázorněno na Obr. 5.2.

Pro celý signál jsme nastavili dva prahy. První prahová hodnota odpovídala minimální výšce vrcholu, který považujeme za platný. Tato hodnota byla nastavena na 0,3 a měla za cíl odlišit skutečné vrcholy od diastolických zárezů a šumu. Druhá prahová hodnota odpovídala minimálnímu časovému intervalu mezi dvěma po sobě jdoucími vrcholy. To bylo nastaveno na počet vzorků odpovídající 200 tepů za minutu.



Obr. 5.2: Druhá minuta záznamu s vizualizací oken a s překryvem.

V každém okně jsme provedli standardizaci signálu do rozsahu od -1 do 1, abychom zajistili, že nastavené prahy budou co nejpřesněji odpovídat předpokládaným morfologickým vlastnostem PPG signálu. U signálů jako je zobrazený na Obr. 5.2 je opětovná standardizace potřebná, protože se amplituda systolické vlny

může snižovat a nastavený prah na minimální výšku vrcholu by mohl být příliš nízký, což by vedlo k falešně negativním výsledkům.

Samotná detekce vrcholů je realizována jednoduchým algoritmem hledající lokální maxima. Funguje tak, že každý vzorek v okně je porovnán se svým předchozím a následujícím sousedem. Pokud je jeho hodnota větší než hodnota obou sousedů a současně překračuje oba zadané prahy, je tento vzorek označen jako systolický vrchol.

V závěru se odstraní případné duplicitní detekce, které vznikly vlivem překrývání oken. Vrchol detekovaný na stejném časovém vzorku ve dvou sousedních oknech je ponechán pouze jednou. Tento krok je důležitý zejména pro budoucí hodnocení algoritmu, kde pracujeme nejen s informací o pozici vrcholů, ale také s jejich počtem v jednotlivých úsecích. Duplicitní detekce by vedly ke zkreslení metrik a nesprávné interpretaci výsledků.

Posledním krokem je zpětná kontrola minimální vzdálenosti mezi detekovanými vrcholy. Bez této kontroly by se mohlo stát, že bychom detekovali vrchol na konci prvního okna a u dalšího okna bychom detekovali nový vrchol příliš blízko, protože si nové okno nepamatuje pozici předchozího vrcholu. Příklad takové chyby je zobrazen na Obr. 5.4, ve druhém okně.

5.3 Výpočet tepové frekvence

Základní veličinou pro tento výpočet je interval mezi dvěma po sobě následujícími vrcholy, označovaný jako tepový interval - IBI (z anglického „Inter-Beat Interval“). Ten jsme vypočítali tak, že jsme vzali rozdíl mezi časem detekce aktuálního vrcholu a časem detekce předchozího vrcholu:

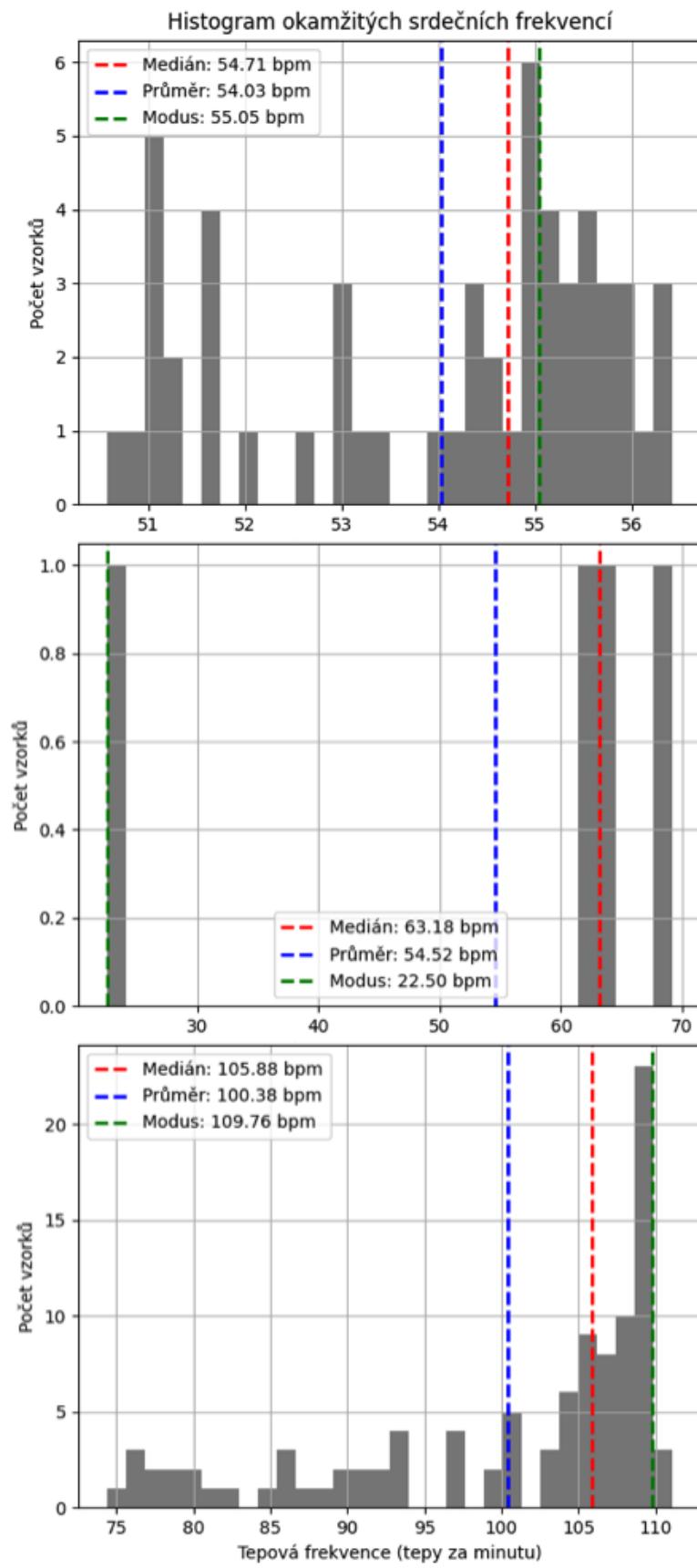
$$IBI_i = t_i - t_{i-1}. \quad (5.1)$$

Výsledkem je sekvence hodnot, které odpovídají časovým intervalům mezi jednotlivými systolickými vrcholy.

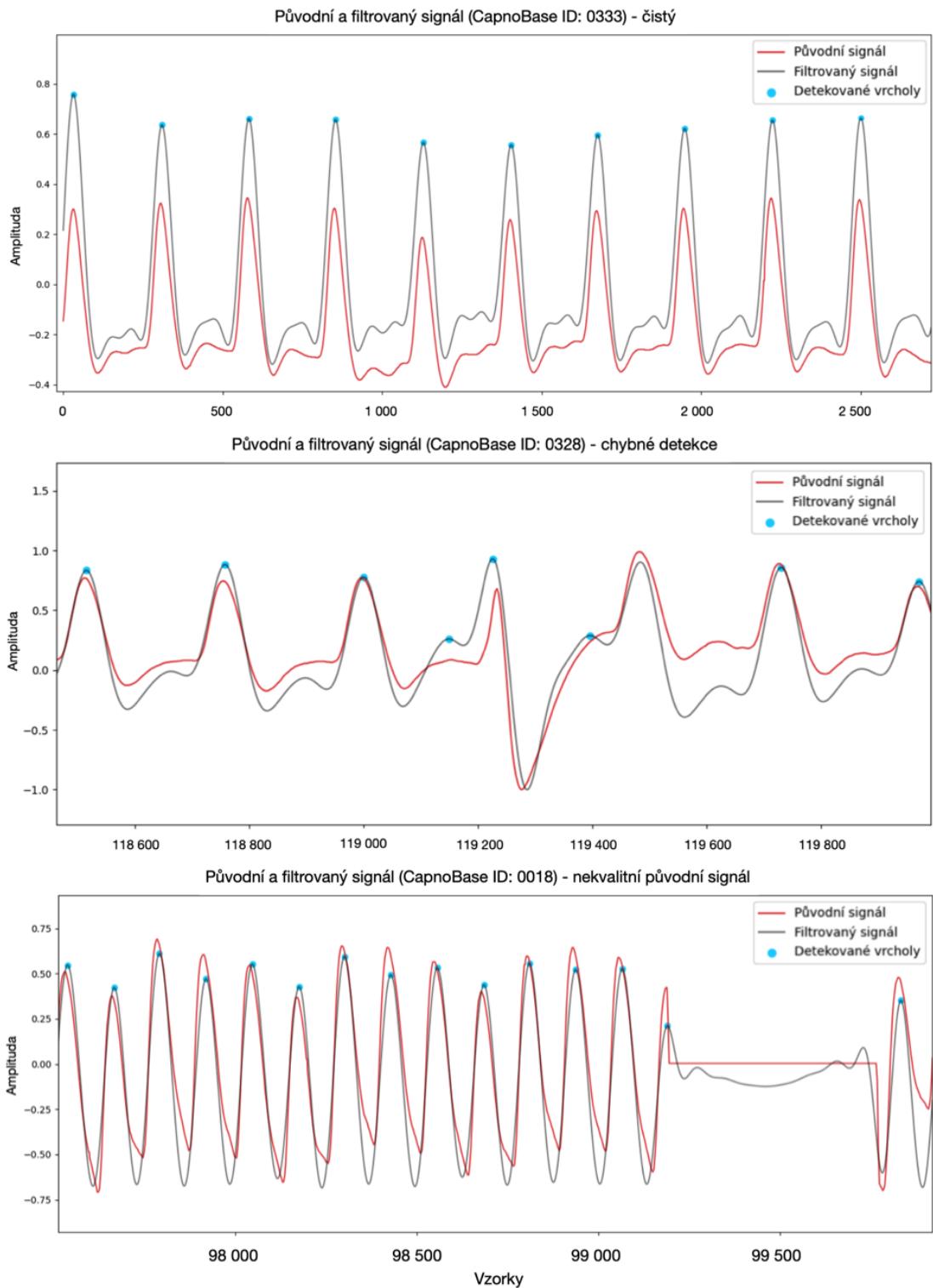
Z těchto intervalů jsme odvodili tepovou frekvenci pomocí vztahu popsaném rovnicí (5.2).

$$TF = \frac{60}{IBI_{median}} \quad (5.2)$$

Po volbě mezi průměrem, mediánem a modusem jsme se rozhodli pro medián. Na rozdíl od modusové a průměrné hodnoty byl medián nejméně citlivý na extrémní hodnoty, které by mohly zkreslit výpočet průměru. Na příklad na Obr. 5.3 vidíme, jak se může lišit průměr, modus a medián u signálů z našich databází.



Obr. 5.3: Stanovení TF z IBI pomocí průměru, mediánu a modusu.



Obr. 5.4: Ukázky zpracování signálů.

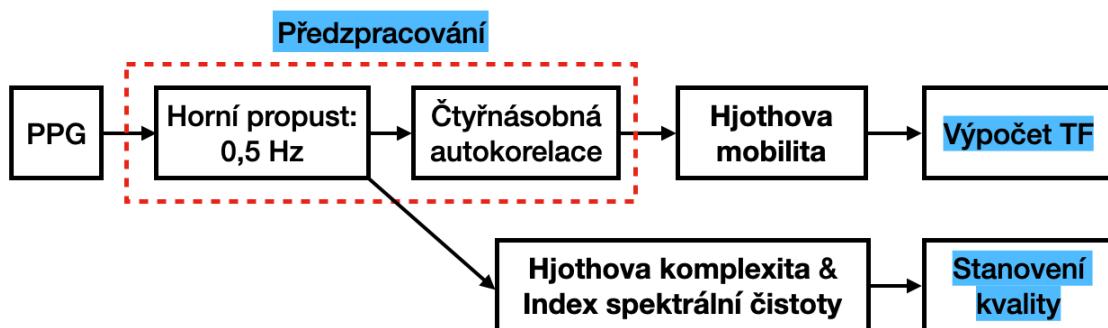
6 Využití Hjorthových deskriptorů na odhad TF a kvality signálů

V této kapitole je popsán alternativní přístup k odhadu srdeční tepové frekvence (TF) z fotopletysmografického signálu (PPG), využívající Hjorthovy deskriptory (také označované jako Hjorthovy parametry). Na rozdíl od standardních metod [4, 6, 13], které se opírají o detekci jednotlivých systolických vrcholů a výpočet IBI, využívá tento přístup frekvenční vlastnosti analyzovaného signálu. To je výhodou v případech, kdy je signál poškozen šumem, artefakty, nebo když je kladen důraz na výpočetní náročnost a rychlosť algoritmu.

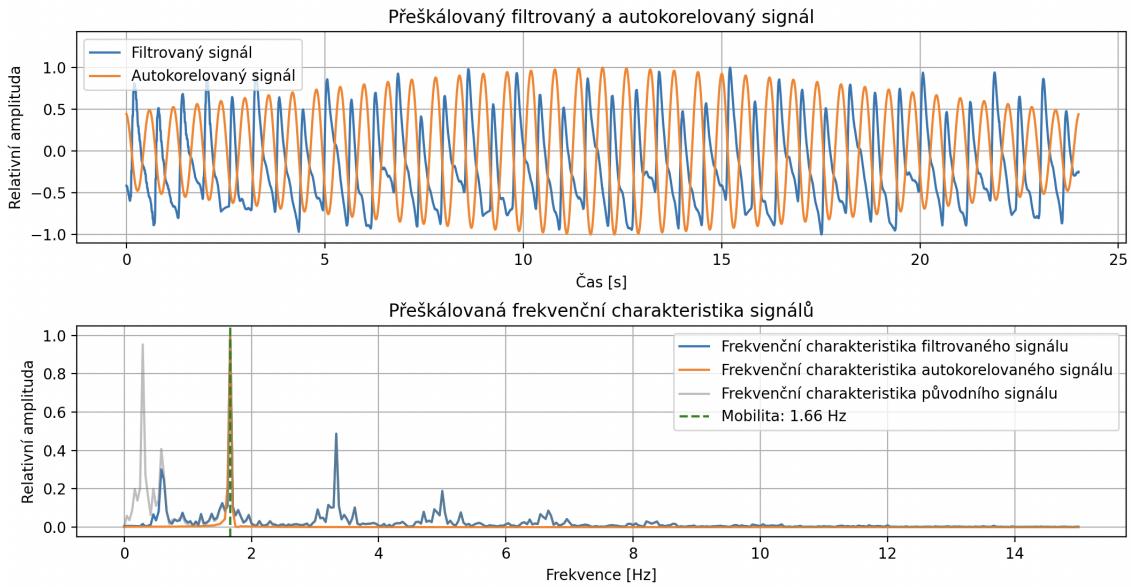
V podkapitole 6.2 je popsán způsob využití Hjorthových deskriptorů pro hodnocení kvality signálu.

Hjorthovy deskriptory představují trojici časových charakteristik, původně zavedených Hjorthem v roce 1970 pro kvantitativní popis elektroencefalografických (EEG) signálů [14]. Jedná se o parametry *aktivita* (H_0), *mobilita* (H_1) a *komplexita* (H_2), které odrážejí střední výkon, střední úhlovou frekvenci a šířku pásma. Jejich výpočet vychází čistě z časové domény a nevyžaduje transformaci do frekvenční oblasti.

V oblasti zpracování PPG signálů byly Hjorthovy parametry doposud využívány převážně pro hodnocení kvality signálu a detekci artefaktů [15]. Právě proto je v naší práci navržen a realizován nový způsob odhadu TF na základě Hjorthovy *mobility* (H_1). Tu počítáme na filtrovaných a několikanásobně autokorelovaných signálech. Struktura navrženého algoritmu je znázorněna na Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Blokové schéma našeho využití Hjorthových deskriptorů.



Obr. 6.2: Porovnání filtrovaného a autokorelovaného signálu.

6.1 Odhad TF pomocí Hjorthovy mobility

Jak již bylo uvedeno, Hjorthova *mobilita* (H_1) představuje odhad střední (resp. dominantní) úhlové frekvence signálu v časové oblasti a to bez nutnosti výpočtu Fourierovy transformace. Tímto způsobem lze efektivně odhadnout frekvenční charakteristiku i v reálném čase, bez transformace do frekvenční oblasti.

Načtení signálů z databází probíhá stejným způsobem jako u našeho prvního algoritmu, popsaného v podkapitole 5.1. Odlišně jsme však přistoupili k rozdelení signálů. Zatímco v předchozím algoritmu jsme signály z *CapnoBase* databáze dělili na minutové úseky, zde si můžeme ve vstupu funkce zvolit libovolný počet úseků, na které signál rozdělíme. Maximální počet těchto úseků odpovídá situaci, kdy jeden úsek trvá 10 s. Pokud na konci po rozdelení signálu zůstane jeho část, pak je tato část ignorována.

Předzpracování

Nejprve jsme odstranili stejnosměrnou (DC) složku signálu, tedy jeho střední hodnotu μ . To jsme učinili proto, aby neovlivňovala výpočet rozptylu signálu a tudíž ani nesnižovala výslednou hodnotu mobility. Abychom zabránili přetečení data u (6.4) a (6.5), a zároveň zachovali tvar signálu, vydělili jsme signál bez μ jeho směrodatnou odchylkou σ . Rovnice pro standardizaci signálu je následující:

$$x[n] = \frac{x[n] - \mu}{\sigma}. \quad (6.1)$$

Následně byl signál filtrován hornopropustným filtrem s mezní frekvencí 0,5 Hz, který jsme navrhli k potlačení respirační složky signálu. Prahová frekvence byla zvolena na základě předpokládané minimální hodnoty TF, zmíněné již v podkapitole 1.1. Použit byl Butterworthův filtr čtvrtého rádu.

Získaný signál byl dále pětkrát za sebou autokorelován. Autokorelace je operace, při které se signál koreluje sám se sebou při různých časových posunech. Pětinásobná autokorelace byla zvolena na základě Cílem opakované autokorelace je zvýraznit periodickou strukturu signálu a potlačit nepravidelné nebo náhodné oscilace. U čistého PPG signálů jsou periodické složky rovny systolickým fázím, diastolickým fázím a respiračním složkám. Klasická autokorelační funkce diskrétního signálu $x[n]$ je definovaná jako:

$$r_x[n] = \sum_{k=0}^{N-n-1} x[k] \cdot x[k+n], \quad (6.2)$$

kde N je délka signálu a n je zpoždění. Výpočet v praxi probíhal ve frekvenčním spektru pomocí rychlé Fourierově transformaci, což snižuje výpočetní náročnost na $O(i \cdot N \log N)$, kdy i je počet iterací autokorelace.

Porovnání filtrovaného a autokorelovaného signálu je znázorněno na Obr. 6.2 společně s jejich frekvenčními charakteristikami a navíc i frekvenční charakteristikou původního signálu.

Výpočet TF z mobility

Z výsledného signálu po čtvrté iteraci autokorelace jsme vypočítali Hjorthovu mobilitu [14, 16]. Ta je definována jako druhá odmocnina poměru rozptylu první derivace signálu ku rozptylu signálu samotného:

$$H_1 = \sqrt{\frac{\text{var}(x[n] - x[n-1])}{\text{var}(x[n])}} = \sqrt{\frac{\text{var}(x')}{\text{var}(x)}} \text{ [rad/s].} \quad (6.3)$$

Jelikož pracujeme v diskrétním prostředí, derivaci jsme approximovali pomocí první diference. Rozptyl signálu x je definován jako průměr hodnot signálu umocněných na druhou:

$$\text{var}(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n])^2, \quad (6.4)$$

kde N je délka okna a střední odchylka μ je již odečtena v rámci předzpracování, tudíž je rovna nule. Podobně je definován i rozptyl první derivace signálu x' :

$$\text{var}(x') = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - x[n-1])^2. \quad (6.5)$$

Z hodnoty H_1 [rad/s] jsme následně odvodili dominantní frekvenci f_{dom} [Hz], kterou jsme vynásobili šedesáti, abychom dostali odpovídající hodnotu TF v tepech za minutu:

$$TF_{Hjorth} = 60 \cdot f_{dom} = \frac{60 \cdot H_1}{2\pi}. \quad (6.6)$$

Přestože mají klasické metody detekce vrcholů [12] lineární průchod signálem se asymptotickou složitostí $O(N)$, jejich praktická výpočetní náročnost může být vyšší kvůli víceprůchodovým algoritmům, adaptivním prahům, filtrováním nebo nastavování bloků zájmu, jak je uvedeno v podkapitole 4.3. Naopak výpočet Hjorthovy mobility po i iteracích autokorelace (prováděné pomocí FFT) má složitost $O(i \cdot N \log N)$, avšak díky své jednoduchosti a absenci větvení může být v praxi rychlejší.

Výsledky odhadu TF na základě Hjorthovy mobility jsou diskutovány v kapitole 7, přičemž porovnání rychlosti exekuce algoritmů je uvedeno v podkapitole XX.

6.2 Využití mobility a komplexity pro hodnocení kvality signálu

7 Výsledky a vyhodnocení

Tato kapitola prezentuje výsledky odhadu tepové frekvence a hodnocení kvality PPG signálů pomocí tří různých metod: referenčního Elgendiho algoritmu, vlastního algoritmu založeného na detekci systolických vrcholů a nově navržené metody využívající Hjorthovy deskriptory.

Výsledky jsou vyhodnoceny samostatně pro obě použité databáze: CapnoBase a Brno University of Technology Smartphone PPG Database.

7.1 Vyhodnocení na databázi CapnoBase

U této databáze máme k dispozici referenční hodnoty systolických vrcholů, a proto můžeme použít statistické metody pro vyhodnocení kvality detekce, jako je senzitivita (Se), pozitivní prediktivní hodnota (PPV) a F1 skóre. Senzitivita vyjadřuje procento vrcholů, které použitý algoritmus správně rozpoznal z celkového počtu *referenčních* vrcholů:

$$Se = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%. \quad (7.1)$$

Pozitivní prediktivní hodnota vyjadřuje procento vrcholů, které vybraný algoritmus určil správně z celkového počtu *detekovaných* vrcholů:

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP} \cdot 100\%. \quad (7.2)$$

F1 skóre je harmonický průměr senzitivity a PPV vyjádřen v procentech:

$$F1 = \frac{2 \cdot Se \cdot PPV}{Se + PPV} \cdot 100\%. \quad (7.3)$$

Tyto metriky počítáme pouze pro Elgendiho algoritmus a vlastní algoritmus detekce vrcholů, kvůli povaze algoritmu využívajícího Hjorthovu mobilitu, který neprovádí detekci vrcholů, ale přímo odhaduje tepovou frekvenci. Když jsme je ale počítali, nastavili jsme toleranční pásmo pro výpočet matice záměn na XX ms, které nám definuje, jak daleko od referenčního vrcholu se může detekovaný vrchol nacházet, aby byl považován za správně detekovaný.

Krom Se , PPV a F1 skóre jsme též počítali průměrnou absolutní chybu (MAE) mezi referenční a odhadovanou tepovou frekvencí (7.4), abychom porovnali kvalitu odhadů TF pro jednotlivé algoritmy na celé databázi.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |TF_{i,ref} - TF_{i,est}| \quad (7.4)$$

Dále jsme stanovili poměr mezi „dobře“ a „špatně“ odhadnutou tepovou frekvencí. Toho jsme dosáhli nastavením prahové hodnoty MAE na XX tepů za minutu.

Pokud je MAE menší než tato hodnota, považujeme odhad za „dobrý“, jinak za „špatný“.

Poslední metrikou je čas, který algoritmus potřeboval na zpracování databáze na našem počítači (MacBook Pro s čipem M1). Jedná se pouze o orientační hodnotu, která slouží k porovnání rychlosti jednotlivých algoritmů. Aby bylo porovnání spravedlivé, odpovídá čas zpracování všech signálů v databázi CapnoBase a v původní délce osmi minut. Není vhodné porovnávat časy pro CapnoBase a BUT PPG, protože databáze mají odličnou vzorkovací frekvenci, počet signálů v databázi i jiný datový formát.

Metriky přesnosti pro všechny tři algoritmy jsou uvedeny v tabulce 7.1, a to vždy pro různé délky vstupního signálu. Jednotlivé metody jsou podrobně rozebrány v následujících podkapitolách.

Tab. 7.1: Srovnání metod odhadu TF.

Metoda (délka [s])	Se [%]	PPV [%]	F1 [%]	MAE [bpm]	Poměr [d:š]	Čas [s]
Elgendi (480)	98,6	96,2	97,4	1,20	40:2	12,3
Elgendi (62,5)	98,6	96,2	97,4	1,20	40:2	12,3
Vlastní vrcholová detekce (480)	95,1	97,5	96,3	1,48	40:2	14,8
Vlastní vrcholová detekce (62,5)	95,1	97,5	96,3	1,48	40:2	14,8
Hjorth (480)	—	—	—	0,65	40:2	2,5
Hjorth (60)	—	—	—	0,65	40:2	2,5

Referenční algoritmus - Elgendi

Vlastní algoritmus - detekce vrcholů

Vlastní algoritmus - Hjorthovy deskriptory

7.2 Vyhodnocení na databázi BUT PPG

Referenční algoritmus - Elgendi

Vlastní algoritmus - detekce vrcholů

Vlastní algoritmus - Hjorthovy deskriptory

Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřila na odhad tepové frekvence (TF) z fotopletysmografických (PPG) signálů. Cílem bylo jednak poskytnout stručný přehled existujících metod pro odhad TF z PPG signálů, jednak navrhnout a popsat algoritmy pro spolehlivé stanovení tepové frekvence.

V teoretické části byla popsána fotopletysmografie jako neinvazivní optická metoda monitorování změn objemu krve v tkáních, která se používá zejména pro sledování kardiovaskulárních parametrů. Byly představeny základní principy PPG signálů a faktory, které mohou ovlivnit jejich kvalitu a přesnost měření.

Praktická část práce se soustředila na implementaci a testování několika algoritmů pro detekci systolických vrcholů v PPG signálech, včetně Aboyova algoritmu, jeho vylepšené verze Aboy++, Elgendiho algoritmu, Rezonátoru s nulovou frekvencí (ZFR) a nově navrženého Upraveného Aboyova algoritmu. Algoritmy byly testovány na dvou databázích: CapnoBase a BUT PPG.

Výsledky ukázaly, že Rezonátor s nulovou frekvencí (ZFR) dosahuje nejlepších výsledků na databázi CapnoBase, přičemž vykazuje vysokou citlivost a pozitivní prediktivní hodnotu. Elgendiho algoritmus se prokázal jako nejspolehlivější na databázi BUT PPG, přičemž dosahoval nejnižší průměrné odchylky mezi detekovanou a referenční TF.

Jedním z klíčových cílů této práce byl vývoj a implementace upraveného Aboyova algoritmu. Tento algoritmus dosahuje lepších odhadů TF na databázi CapnoBase ve srovnání s původní verzí, a to zejména díky zjednodušení a odstranění některých kroků, které způsobovaly přehlížení skutečných systolických vrcholů. Na databázi BUT PPG však vykazoval vyšší odchylky TF, což naznačuje potřebu další optimalizace pro spolehlivější detekci.

Dalším krokem pro zlepšení přesnosti odhadu TF by mohlo být využití pokročilejších technik strojového učení a hlubokých neuronových sítí, které mohou nabídnout lepší adaptaci na různé typy signálů a zlepšit robustnost algoritmů vůči šumu a artefaktům.

Literatura

- [1] NEMCOVA, Andrea, Enikö VARGOVA, Radovan SMISEK, Lucie MARSA-NOVA, Lukas SMITAL, Martin VITEK a Mihajlo JAKOVLJEVIC. Brno University of Technology Smartphone PPG Database (BUT PPG): Annotated Dataset for PPG Quality Assessment and Heart Rate Estimation. *BioMed Research International* [online]. 2021-09-06, 2021, 1-6 [cit. 2024-05-23]. ISSN 2314-6141. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2021/3453007>
- [2] Nemcova, A., Smisek, R., Vargova, E., Maršánová, L., Vitek, M., Smital, L., Filipenska, M., Sikorova, P., a Gálík, P. Brno University of Technology Smartphone PPG Database (BUT PPG) (version 2.0.0). PhysioNet. 2024 [cit. 2025-04-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.13026/tn53-8153>
- [3] KARLEN, Walter. CapnoBase IEEE TBME Respiratory Rate Benchmark. *Borealis* [online]. 2021 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5683/SP2/NLB8IT>
- [4] VARGOVÁ, Enikö. *Stanovení kvality a odhad tepové frekvence ze signálu PPG* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134388>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce Andrea Němcová.
- [5] SIDDIQUI, Sarah Ali, Yuan ZHANG, Zhiquan FENG a Anton KOS. A Pulse Rate Estimation Algorithm Using PPG and Smartphone Camera. *Journal of Medical Systems* [online]. 2016, 40(5) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0148-5598. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0485-6>
- [6] CHARLTON, Peter H, Kevin KOTZEN, Elisa MEJÍA-MEJÍA, et al. Detecting beats in the photoplethysmogram: benchmarking open-source algorithms. *Physiological Measurement* [online]. 2022-08-19, 43(8) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ac826d>
- [7] CHARLTON, Peter H, John ALLEN, Raquel BAILÓN, et al. The 2023 wearable photoplethysmography roadmap. *Physiological Measurement* [online]. 2023-11-29, 44(11) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6579/acead2>
- [8] KARLEN, Walter, S. RAMAN, J. M. ANSERMINO a G. A. DUMONT. Multi-parameter Respiratory Rate Estimation From the Photoplethysmogram. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* [online]. 2013, 60(7), 1946-1953 [cit.

2024-04-16]. ISSN 0018-9294. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2246160>

- [9] ORPHANIDOU, Christina. *Signal Quality Assessment in Physiological Monitoring* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [cit. 2024-05-20]. SpringerBriefs in Bioengineering. ISBN 978-3-319-68414-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68415-4>
- [10] GODA, Márton Á, Peter H CHARLTON a Joachim A BEHAR. pyPPG: A Python toolbox for comprehensive photoplethysmography signal analysis. *Physiological Measurement* [online]. 2024-04-08, 45(4) [cit. 2024-05-20]. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ad33a2>
- [11] PŘIBIL, Jiří, Anna PŘIBILOVÁ a Ivan FROLLO. Analysis of Heart Pulse Transmission Parameters Determined from Multi-Channel PPG Signals Acquired by a Wearable Optical Sensor. *Measurement Science Review* [online]. 2023, 23, 217-226 [cit. 2025-2-20]. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264289667>
- [12] ELGENDI, Mohamed, Ian NORTON, Matt BREARLEY, Derek ABBOTT, Dale SCHUURMANS a Vladimir E. BONDARENKO. Systolic Peak Detection in Acceleration Photoplethysmograms Measured from Emergency Responders in Tropical Conditions. *PLoS ONE* [online]. 2013-10-22, 8(10) [cit. 2024-05-20]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076585>
- [13] MAKOWSKI, Dominique, Tam Pham, Zuo Jia Lau, et al. NeuroKit2: A Python toolbox for neurophysiological signal processing. *Behavior Research Methods* [online]. 2021, 53, 1689–1696 [cit. 2024-05-20]. ISSN 1554-3528. Dostupné z: <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01516-y>
- [14] HJORTH, Bo. The physical significance of time domain descriptors in EEG analysis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* [online]. 1973, 34(3), 321-325 [cit. 2025-05-14]. ISSN 00134694. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(73\)90260-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(73)90260-5)
- [15] PERALTA, Elena, Jesus LAZARO, Eduardo GIL, Raquel BAILÓN a Vaidotas MAROZAS. Robust Pulse Rate Variability Analysis from Reflection and Transmission Photoplethysmographic Signals [online]. 2017-09-14, - [cit. 2025-04-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.22489/CinC.2017.205-286>
- [16] KAUSHIK, Geetika, Pramod GAUR, Rishi Raj SHARMA a Ram Bilas PA-CHORI. EEG signal based seizure detection focused on Hjorth parameters

- from tunable-Q wavelet sub-bands. *Biomedical Signal Processing and Control* [online]. 2022, 76 [cit. 2024-05-20]. ISSN 1746-8094. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103645>
- [17] MOUREK, Jindřich. *Fyziologie: učebnice pro studenty zdravotnických oborů*. 2. dopl. vydání Praha: Grada. Sestra (Grada), 2012. ISBN 978-80-247-3918-2
- [18] SOUČEK, Miroslav, Petr SVAČINA a kolektiv. *Vnitřní lékařství v kostce*. Praha: Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-271-2289-9.
- [19] GONZAGA, Luana Almeida, Luiz Carlos Marques VANDERLEI, Rayana Loch GOMES a Vitor Engrácia VALENTI. Caffeine affects autonomic control of heart rate and blood pressure recovery after aerobic exercise in young adults: a crossover study. *Scientific Reports* [online]. 2017, 7(1) [cit. 2024-05-15]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14540-4>
- [20] PARK, Junyung, Hyeon Seok SEOK, Sang-Su KIM a Hangsik SHIN. Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review. *Frontiers in Physiology* [online]. 2022-03-01, 12 [cit. 2022-12-18]. ISSN 1664-042X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.808451>
- [21] POVEA, Camilo E. a Arturo CABRERA. Practical usefulness of heart rate monitoring in physical exercise. *Revista Colombiana de Cardiología* [online]. 2018, 25(3), e9-e13 [cit. 2024-05-15]. ISSN 01205633. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2018.05.004>
- [22] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 690:2022 (01 0197), *Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Čtvrté vydání. Praha, 2022.
- [23] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 7144 (010161), *Dokumentace – Formální úprava disertací a podobných dokumentů*. Praha, 1997.
- [24] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN ISO 31-11, *Veličiny a jednotky – část 11: Matematické znaky a značky používané ve fyzikálních vědách a v technice*. Praha, 1999.
- [25] FARKAŠOVÁ, B.; GARAMSZEGI T.; JANSOVÁ L.; KONEČNÝ L.; KRČÁL M. et al. *Výklad normy ČSN ISO 690:2022 (01 0197) účinné od 1. 12. 2022*. Online. První vydání. 2023. Dostupné z: <https://www.citace.com/Vyklad-CSN-ISO-690-2022.pdf>. [cit. 2023-09-27].

Seznam symbolů a zkratek

f_{vz}	vzorkovací kmitočet
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CESA	Centrum sportovních aktivit
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
BUT PPG	Brno University of Technology Smartphone PPG Database
WFDB	WaveForm Database
PPG	Fotopletysmograf
EKG	Elektrokardiogram
EEG	Elektroencefalogram
ACC	Akcelerometr
TF	Tepová frekvence
IBI	Tepový interval
MTF	Maximální tepová frekvence
LED	Elektroluminiscenční dioda
AC	Střídavý proud, pulzující složka
DC	Stejnosměrný proud, nepulzující složka
MA	klouzavý průměr
MA_{peak}	klouzavý průměr pro zvýraznění vrcholu
MA_{beat}	klouzavý průměr pro zvýraznění tepu
THR_1	práh 1
THR_2	práh 2
FIR	Filtr s konečnou impulzní charakteristikou
IIR	Filtr s nekonečnou impulzní charakteristikou
FFT	Rychlá Fourierova transformace

TN	Pravdivě negativní
TP	Pravdivě pozitivní
FN	Falešně negativní
FP	Falešně pozitivní
PPV	Pozitivní prediktivní hodnota
Se	Senzitivita
F1	F1 skóre
MAE	Průměrná absolutní chyba
RMSE	Průměrná kvadratická chyba
var	rozptyl
Hz	Hertz
rad	Radián
s	Sekunda
min	Minuta
ms	Milisekunda

Seznam příloh

A Některé příkazy balíčku thesis	59
A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek	59
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů	59
B Druhá příloha	61
C Příklad sazby zdrojových kódů	63
C.1 Balíček listings	63
D Obsah elektronické přílohy	67

A Některé příkazy balíčku thesis

A.1 Příkazy pro sazbu veličin a jednotek

Tab. A.1: Přehled příkazů pro matematické prostředí

Příkaz	Příklad	Zdroj příkladu	Význam
<code>\textind{...}</code>	β_{\max}	$\$\\beta_\\textind{max}\\$$	textový index
<code>\const{...}</code>	U_{in}	$\$\\const{U}_\\textind{in}\\$$	konstantní veličina
<code>\var{...}</code>	u_{in}	$\$\\var{u}_\\textind{in}\\$$	proměnná veličina
<code>\complex{...}</code>	u_{in}	$\$\\complex{u}_\\textind{in}\\$$	komplexní veličina
<code>\vect{...}</code>	\mathbf{y}	$\$\\vect{y}\\$$	vektor
<code>\mat{...}</code>	\mathbf{Z}	$\$\\mat{Z}\\$$	matice
<code>\unit{...}</code>	kV	$\$\\unit{kV}\\$$ či $\$\\unit{kV}\\$$	jednotka

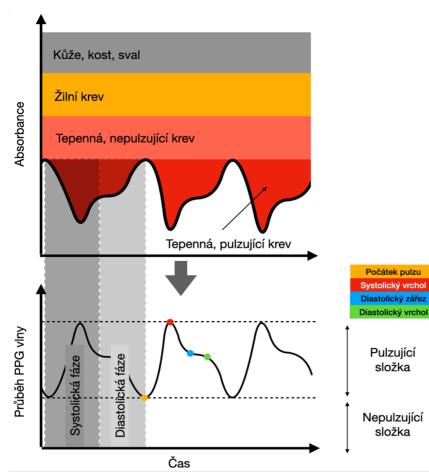
A.2 Příkazy pro sazbu symbolů

- `\E`, `\eul` – sazba Eulerova čísla: e,
- `\J`, `\jmag`, `\I`, `\imag` – sazba imaginární jednotky: j, i,
- `\dif` – sazba diferenciálu: d,
- `\sinc` – sazba funkce: sinc,
- `\mikro` – sazba symbolu mikro stojatým písmem¹: μ,
- `\uppi` – sazba symbolu π (stojaté řecké pí, na rozdíl od `\pi`, což sází π).

Všechny symboly jsou určeny pro matematický mód, vyjma `\mikro`, jenž je použitelný rovněž v textovém módu.

¹znak pochází z balíčku `textcomp`

B Druhá příloha



Obr. B.1: Signál PPG.

Pro sazbu vektorových obrázků přímo v L^AT_EXu je možné doporučit balíček TikZ. Příklady sazby je možné najít na T_EXample. Pro vyzkoušení je možné použít programy QTikz nebo TikzEdt.

C Příklad sazby zdrojových kódů

C.1 Balíček `listings`

Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít balíček `listings`. Balíček zavádí nové prostředí `lstlisting` pro sazbu zdrojových kódů, jako například:

```
\section{Balíček lstlisting}
Pro vysázení zdrojových souborů je možné použít
    balíček \href{https://www.ctan.org/pkg/listings}%
    {\texttt{listings}}.
Balíček zavádí nové prostředí \texttt{lstlisting} pro
    sazbu zdrojových kódů.
```

Podporuje množství programovacích jazyků. Kód k vysázení může být načítán přímo ze zdrojových souborů. Umožňuje vkládat čísla řádků nebo vypisovat jen vybrané úseky kódu. Např.:

Zkratky jsou sázeny v prostředí `acronym`:

6 `\begin{acronym}[KolikMista] % [KolikMista] určuje šířku sloupce pr`

Šířka textu volitelného parametru `KolikMista` udává šířku prvního sloupce se zkratkami. Proto by měla být zadávána nejdélší zkratka nebo symbol. Příklad definice zkratky f_{vz} je na výpisu C.1.

Výpis C.1: Ukázka sazby zkratky

Ukončení seznamu je provedeno ukončením prostředí:

26 `\acro{LED} {Elektroluminiscenční dioda}`

Poznámka k výpisům s použitím volby jazyka `czech` nebo `slovak`:

Pokud Váš zdrojový kód obsahuje znak spojovníku `-`, pak překlad může skončit chybou. Ta je způsobena tím, že znak `-` je v českém nebo slovenském nastavení balíčku `babel` tzv. aktivním znakem. Přepněte znak `-` na neaktivní příkazem `\shorthandoff{-}` těsně před výpisem a hned za ním jej vratte na aktivní příkazem `\shorthandon{-}`. Podobně jako to je ukázáno ve zdrojovém kódu `šablony`.

Na výpisu C.2 naleznete příklad kódu pro Matlab, na výpisu C.3 zase pro jazyk C.

Výpis C.2: Příklad Schur-Cohnova testu stability v prostředí Matlab.

```
1 %% Priklad testovani stability filtru
2
3 % koeficienty polynomu ve jmenovateli
4 a = [ 5, 11.2, 5.44, -0.384, -2.3552, -1.2288];
5 disp( 'Polynom:' ); disp(poly2str( a, 'z' ))
6
7 disp('Kontrola pomocí korenů polynomu:');
8 zx = roots( a );
9 if( all( abs( zx ) < 1 ) )
10     disp('System je stabilní')
11 else
12     disp('System je nestabilní nebo na mezi stability');
13 end
14
15 disp(''); disp('Kontrola pomocí Schur-Cohn:');
16 ma = zeros( length(a)-1, length(a) );
17 ma(1,:) = a/a(1);
18 for( k = 1:length(a)-2 )
19     aa = ma(k,1:end-k+1);
20     bb = fliplr( aa );
21     ma(k+1,1:end-k+1) = (aa-aa(end)*bb)/(1-aa(end)^2);
22 end
23
24 if( all( abs( diag( ma.' ) ) ) )
25     disp('System je stabilní')
26 else
27     disp('System je nestabilní nebo na mezi stability');
28 end
```

Výpis C.3: Příklad implementace první kanonické formy v jazyce C.

```

// první kanonická forma
short fxdf2t( short coef[][][5], short sample)
{
    static int v1[SECTIONS] = {0,0}, v2[SECTIONS] = {0,0};
    int x, y, accu;
    short k;

    x = sample;
    for( k = 0; k < SECTIONS; k++){
        accu = v1[k] >> 1;
        y = _sadd( accu, _smpy( coef[k][0], x));
        y = _ssh1(y, 1) >> 16;

        accu = v2[k] >> 1;
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][1], x));
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][2], y));
        v1[k] = _ssh1( accu, 1);

        accu = _smpy( coef[k][3], x);
        accu = _sadd( accu, _smpy( coef[k][4], y));
        v2[k] = _ssh1( accu, 1);

        x = y;
    }
    return( y);
}

```


D Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha je často nedílnou součástí semestrální nebo závěrečné práce. Vkládá se do informačního systému VUT v Brně ve vhodném formátu (ZIP, PDF ...).

Nezapomeňte uvést, co čtenář v této příloze najde. Je vhodné okomentovat obsah každého adresáře, specifikovat, který soubor obsahuje důležitá nastavení, který soubor je určen ke spuštění, uvést nastavení kompilátoru atd. Také je dobré napsat, v jaké verzi software byl kód testován (např. Matlab 2018b). Pokud bylo cílem práce vytvořit hardware zařízení, musí elektronická příloha obsahovat veškeré podklady pro výrobu (např. soubory s návrhem DPS v Eagle).

Pokud je souborů hodně a jsou organizovány ve více složkách, je možné pro výpis adresářové struktury použít balíček `dirtree`.

```
/..... kořenový adresář přiloženého archivu
  logo ..... loga školy a fakulty
    BUT_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
    BUT_color_PANTONE_EN.pdf
    FEEC_abbreviation_color_PANTONE_EN.pdf
    FEKT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    UTKO_color_PANTONE_CZ.pdf
    UTKO_color_PANTONE_EN.pdf
    VUT_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    VUT_symbol_barevne_PANTONE_CZ.pdf
    VUT_zkratka_barevne_PANTONE_CZ.pdf
  obrazky ..... ostatní obrázky
    soucastky.png
    spoje.png
    ZlepseWilsonovoZrcadloNPN.png
    ZlepseWilsonovoZrcadloPNP.png
  pdf ..... pdf stránky generované informačním systémem
    student-desky.pdf
    student-titulka.pdf
    student-zadani.pdf
  text ..... zdrojové textové soubory
    literatura.tex
    prilohy.tex
    reseni.tex
    uvod.tex
    vysledky.tex
    zaver.tex
    zkratky.tex
  sablona-obhaj.tex ..... hlavní soubor pro sazbu prezentace k obhajobě
  sablona-prace.tex ..... hlavní soubor pro sazbu kvalifikační práce
  thesis.sty ..... balíček pro sazbu kvalifikačních prací
```