

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Neinvazní měřicí přípravek pro kontrolu přesnosti mechanických hodinových
strojků

Bc. Milan Trnka

Diplomová práce

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan Trnka**
Osobní číslo: **I15366**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Neinvazivní měřicí přípravek pro kontrolu přesnosti
mechanických hodinových strojků**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Pro precizní seřízení mechanických hodinových strojků je nutné znát velmi přesně dobu kyvu kotvy poháněné setrvačkou, resp. počet kyvů za hod (udáván výrobcem hodinových strojků). Neinvazivní měření je možné provádět akusticky odposlechem úderů kotvy o krokové kolo, které rezonuje v pouzdře hodin.

Seznamte se s metodami zpracování akustických signálů a se způsoby záznamu tichých signálů. Zaznamenejte chod několika hodinových strojů a proveďte rozbor a určete, které parametry by bylo vhodné analyzovat. Použijte hodinky různého stáří a různé kvality, které si pro daný účel sám obstaráte.

Vytvořte přípravek s mikrofonom, či jiným snímačem schopným analyzovat přesnost a rovnoměrnost chodu z krátkodobého akustického záznamu. Přípravek umožní provést měření postupně v pěti různých polohách (Certifikace COSC). Tento přípravek posléze určí počet kyvů. Přípravek bude schopen spočítat rozdíl naměřené a nominální hodnoty (udané výrobcem) a zobrazí jej ve formě přepočtené odchylky (např. s/24 hod), či graficky. Přípravek dále umožní provést dlouhodobé měření (viz. způsob měření při certifikaci COSC).

Přípravek může být realizován jako zcela samostatné zařízení s CPU, či jako periferie k PC. Během konstrukce se snažte minimalizovat rozměry a spotřebu zařízení.

Zásady pro vypracování:

1. Analýza problematiky měření přesnosti a rovnoměrnosti chodu hodinových mechanických strojů. Seznámení a popis základních typů hodinových kroků.
2. Návrh zařízení a DPS.
3. Konstrukce řídicí části.
4. Konstrukce a oživení přístroje.
5. Experimentální ověření funkčnosti s min. Pěti různými typy hodinových strojků.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **40-60**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] Certifikace chronometrů COSC -Controle Officiel Suisse Chronometres
<http://www.svycary.cz/certifikat-cosc>.
- [2] Katalog BECO, str. 228-235, dostupný na stránkách firmy Parexo Pardubice,
http://www.oblibene.biz/userdata/shopping/parexo/File/uhrentechinik_211_244.pdf.
- [3] SW Biburo, akustický měřič oscilace kotvy
- [4] Přípravek Microset Watch time,
<http://www.bmumford.com/mset/modelwatch1.html>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2016**

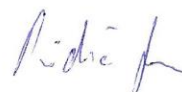
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2017**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Jan Pidanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 18. 8. 2017

Bc. Milan Trnka

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Martinu Dobrovolnému, Ph.D. za vedení této diplomové práce a odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat všem vyučujícím, kteří se podíleli na rozvoji mých vědomostí. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině, za podporu a to nejen při studiu.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá návrhem a stavbou neinvazního měřicího přístroje určeného pro kontrolu přesnosti a rovnoměrnosti chodu mechanických hodinových strojků. Teoretická část práce obsahuje analýzu chodu mechanických hodinových strojků a možnosti zpracování jimi vydávaného akustického signálu. V následující části je teoreticky i prakticky v programu Matlab nastíněna problematika vhodného předzpracování zaznamenaného akustického signálu pro pozdější detekci hodinového tiků. Praktická část práce popisuje návrh, konstrukci a zdrojový kód měřicího přístroje. V poslední části jsou zaznamenané výsledky měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přesnost chodu mechanických hodin, piezoelektrický senzor, Matlab, STM32F4

TITLE

Measurement device for calibration and accuracy control of watch movements

ANNOTATION

This thesis is focused on the design and construction of a noninvasive measuring device designed to check the accuracy and uniformity of the mechanical watches movements. The theoretical part of the thesis consists of an analysis of mechanical watch movements and the possibility of processing an acoustic signal. In the following part, the issue of appropriate pre-processing of the recorded acoustic signal for later detection of the watch ticking is theoretically and practically outlined in the Matlab program. The practical part describes the design, construction and source code of the measuring device. In the last part, the measurement results are recorded.

KEYWORDS

Accuracy of mechanical watches, piezoelectric sensor, Matlab, STM32F4

OBSAH

0	ÚVOD	13
1	ÚVOD DO HODINOVÝCH MECHANICKÝCH STROJŮ	14
1.1	Oscilátor	15
1.1.1	Setrvačka	15
1.1.2	Doba kyvu setrvačky	16
1.1.3	Nerovnoměrnost kyvu setrvačky způsobená nestálostí teploty	17
1.1.4	Nerovnoměrnost kyvu setrvačky způsobená nestálostí amplitudy	18
1.2	Krok	18
1.2.1	Válečkový krok	19
1.2.2	Švýcarský krok	19
1.2.3	Kolíčkový krok	20
1.2.4	Chronometrický krok	21
1.3	Měření přesnosti hodinových strojů	22
1.3.1	Denní chod a stav stroje	22
1.3.2	Rychlá regulace stroje	22
1.3.3	Rychlá regulace vibrografem	23
1.3.4	Závady diagnostikovatelné vibrografem	23
1.3.5	Popis vzniku úderů kroku	24
1.3.6	COSC certifikace	25
1.4	Koncepce navrhovaného měřicího zařízení	26
2	ZPRACOVÁNÍ AKUSTICKÝCH SIGNÁLŮ	27
2.1	Rozdělení mikrofonů	27
2.1.1	Podle druhu akustického přijímače	27
2.1.2	Podle směrové charakteristiky	27
2.1.3	Podle druhu mechanického systému	27
2.1.4	Podle druhu elektromechanického měniče	28

2.2	Měření tichých signálů	29
3	ZÁZNAM HODINOVÉHO STROJE	31
3.1	Záznam akustického signálu mechanických hodinek	31
3.2	Rozbor zaznamenaného akustického signálu	32
3.2.1	Časová oblast	32
3.2.2	Frekvenční oblast	33
3.3	Předzpracování signálu pro detekci tiků	34
3.3.1	FIR filtrace nežádoucích složek signálu	34
3.3.2	Vytvoření obálky signálu	35
3.3.3	Umocnění obálky signálu	37
3.3.4	Filtrace umocněné obálky signálu	38
3.4	Detekce tiků	40
4	NÁVRH SNÍMAČE	41
4.1.1	Volba snímače	41
4.1.2	Návrh předzesilovače	41
4.1.3	DPS předzesilovače	43
4.1.4	Mechanická konstrukce	43
4.2	Ověření funkce	45
5	NÁVRH ŘÍDÍCÍ ČÁSTI	46
5.1	Řídící procesor	46
5.1.1	Procesor STM32F407VGT6	46
5.1.2	Vývojový kit STM32F4 Discovery	47
5.2	TFT display	48
5.2.1	SSD1963	48
5.2.2	MAX11802	49
5.3	Vstupní signálové obvody	50
5.3.1	Zesilovač	50

5.3.2	A/D převod	51
5.3.3	Celkové schéma zapojení vstupních obvodů	52
5.4	Napájecí část	52
5.5	Konstrukce řídicí části.....	54
5.5.1	Schéma zapojení digitální části.....	54
5.5.2	DPS	54
5.5.3	Osazení DPS	55
5.5.4	Sestavení řídicí části	55
6	PROGRAM MIKROKONTROLERU	56
6.1	Vývojové prostředí.....	56
6.2	Popis programu	56
6.3	Uživatelské rozhraní.....	60
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	64
7.1	Hodinový stroj PRIM.....	64
7.2	Hodinový stroj POBEDA.....	66
7.3	Hodinový stroj RAKETA	67
7.4	Hodinový stroj PRIM.....	68
7.5	Hodinový stroj POBEDA.....	69
8	ZÁVĚR	71
9	POUŽITÁ LITERATURA	73
10	PŘÍLOHY	76

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obr. 1. 1 Blokové schéma mechanických hodinek.....	14
Obr. 1. 2 Schéma mechanických hodinek [1]	15
Obr. 1. 3 Setrvačka s můstkem [1].....	16
Obr. 1. 4 Kompenzační setrvačnick [1]	17
Obr. 1. 5 Válečkový krok [1]	19
Obr. 1. 6 Švýcarský krok [1].....	20
Obr. 1. 7 Količkový krok [1]	21
Obr. 1. 8 Chronometrický krok [1]	22
Obr. 1. 9 Záznamy výsledných průběhů vibrografu	23
Obr. 1. 10 Záběr krokového kola[1]	24
Obr. 1. 11 Časový průběh tiků [6]	25
Obr. 1. 12 Blokové schéma měřicího přístroje	26
Obr. 2. 1 Snímání akustických signálů pomocí dvou mikrofonů [7].....	29
Obr. 3. 1 Časový průběh záznamu hodinek	32
Obr. 3. 2 Časový průběh jednoho tiků	33
Obr. 3. 3 Spektrum záznamu hodinek.....	34
Obr. 3. 4 Časový průběh záznamu hodinek po filtraci HP 1kHz.....	35
Obr. 3. 5 Zobrazení obálky tiků hodinek po Hilbertově transformaci.....	37
Obr. 3. 6 Zobrazení obálky tiků hodinek po mocninné transformaci	38
Obr. 3. 7 Zobrazení obálky tiků hodinek po filtraci DP 1kHz.....	39
Obr. 3. 8 Porovnání tvaru tiků hodinek před a po předzpracování	39
Obr. 4. 1 Použitý piezoelement.....	41
Obr. 4. 2 Schéma předzesilovače.....	42
Obr. 4. 3 Osazená DPS předzesilovače.....	43
Obr. 4. 4 Detail konstrukce snímače	43
Obr. 4. 5 Pohled na sestavený snímač hodinových tiků	44
Obr. 4. 6 Signál z hodinek snímáný navrženým snímačem.....	45
Obr. 5. 1 Blokové schéma řídicí části	46
Obr. 5. 2 Vývojový kit Obr. 5. 3 Blokové schéma vývojového kitu	48
Obr. 5. 4 Blokové schéma grafického řadiče SSD1963	49
Obr. 5. 5 Blokové schéma obvodu MAX11802	49
Obr. 5. 6 Zesilovač řídicí části	50

Obr. 5. 7 Komparátor řídicí části	52
Obr. 5. 8 Celkové schéma zapojení signálové části.....	52
Obr. 5. 9 Schéma zapojení napájecích obvodů	53
Obr. 5. 10 Neosazená DPS řídicí části.....	54
Obr. 5. 11 Osazená DPS řídicí části.....	55
Obr. 5. 12 Pohled shora na sestavenou řídicí část	55
Obr. 5. 13 Pohled z boku na sestavenou řídicí část	55
Obr. 6. 1 Hlavní plocha měřicího přístroje	60
Obr. 6. 2 Nastavení počtu tiků za hodinu	60
Obr. 6. 3 Nastavení doby počítání průměrných hodnot.....	61
Obr. 6. 4 Nastavení detekční úrovně threshold.....	61
Obr. 6. 5 Nastavení rozlišení měřených odchylek	62
Obr. 6. 6 Menu měření COSC	62
Obr. 6. 7 Výsledné hodnoty měření COSC	63
Tab. 1. 1 Počet kyvů [1].....	16
Tab. 1. 2 Průběh COSC certifikace [7].....	25
Tab. 7. 1 Naměřené hodnoty hodinek Prim	64
Tab. 7. 2 Naměřené hodnoty hodinek Pobeda	66
Tab. 7. 3 Naměřené hodnoty hodinek Raketa.....	67
Tab. 7. 4 Naměřené hodnoty hodinek Prim	68
Tab. 7. 5 Naměřené hodnoty hodinek Pobeda	69

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

ARM	Advancet RISC Maschine
A/D	Analogově-digitální
DC	Direct Current
DPS	Deska Plošných Spojů
DSP	Digital Signal Processor
ESD	ElectroStatic Discharge
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Responce
FPU	Floating Point Unit
HAL	Hardware Abstraction Layer
OZ	Operační Zesilovač
PWM	Pulse Width Modulation
SW	Software
TFT	Thin Film Transistor

0 ÚVOD

Mechanické hodinky spadají do odvětví jemné mechaniky. Výroba kompletních hodinových strojků je i v dnešní době velice náročná a vypovídá o vysoké technické vyspělosti firmy. Jelikož se jedná o mechanický stroj, podléhají jeho jednotlivá ústrojí opotřebení, a proto je v případě potřeby nutné provést servis. Nejvíce opotřebovávaná ústrojí hodin jsou oscilátor a krok, na jejichž spolupráci závisí kvalita chodu mechanického strojku. Po zásahu do těchto ústrojí je nutné mechanický stroj znovu kalibrovat, jelikož o jeho chodu rozhodují takové detaily jako například použité mazivo. Kalibraci mechanického stroje lze provádět na základě měření časových diferencí vůči referenčnímu stroji nebo akustickým odposlechem krokového ústrojí.

Cílem této práce je návrh a konstrukce neinvazního měřicího přípravku, sloužícího pro kontrolu přesnosti mechanických hodin. Tento měřicí přístroj zpracovává akustický signál vydávaný krokovým ústrojím mechanických hodinek a následně určuje jejich odchylku a rovnoměrnost chodu.

Část práce je věnována teoretickému rozboru problematiky mechanických hodinových strojů včetně postupů měření jejich přesnosti a možnostem snímání akustického signálu.

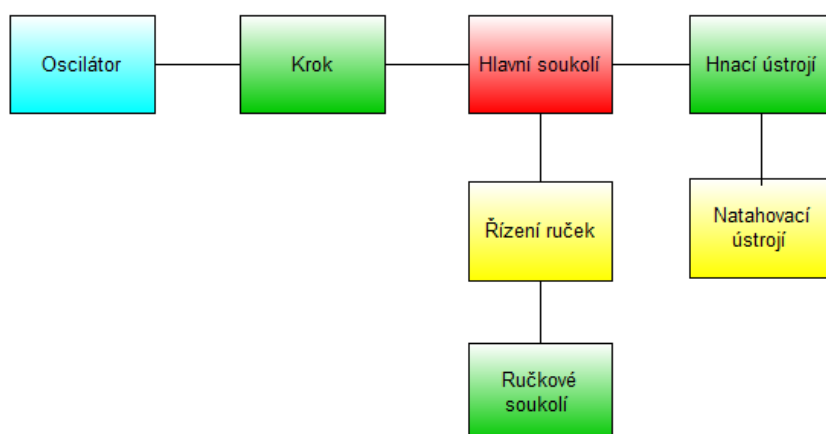
V následující části je nejprve probrán postup předzpracování signálu, které je založeno na filtraci a tvorbě obálky signálu, který je později použit pro detekci jednotlivých hodinových tiků.

Praktická část obsahuje návrh a realizaci snímače akustických signálů vydávaných ústrojím kroku hodin, který umožňuje měření mechanického hodinového strojku v pěti různých polohách. Následně je popsán návrh a konstrukce řídicí části měřicího přístroje včetně popisu základních funkcí naprogramovaného firmware.

Poslední část obsahuje naměřené výsledky včetně obrázků, na nich je zobrazen graf vykreslující přesnost a rovnoměrnost chodu mechanických hodinek.

1 ÚVOD DO HODINOVÝCH MECHANICKÝCH STROJŮ

Stroj mechanických hodin se skládá ze sedmi hlavních ústrojí, které jsou vyobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 1.1). Mechanické hodinové stroje dělíme na dva základní typy dle použitého typu oscilátoru. V prvním případě se jedná o oscilátor tvořený kyvadlem a ve druhém o oscilátor tvořený setrvačkou. Dále se v této práci budeme zabývat pouze typem oscilátorů se setrvačkou.



Obr. 1. 1 Blokové schéma mechanických hodin

Oscilátor - je nejdůležitějším ústrojím mechanických hodin, neboť jeho pravidelné kývání je využíváno k měření času. Oscilátoru v mechanických hodinách je potřeba dodávat neustále novou energii z hnacího ústrojí, jelikož by se vlivem tření zmenšovala amplituda jeho výchylky, až by se zastavil.

Krok - je ústrojí, které má za úkol přenášet energii z hnacího ústrojí skrze hodinové soukolí na oscilátor. Přenos se děje jemnými popudy oscilátoru v jeho předem dané pozici a to zpravidla při každém jeho kyvu. Druhá funkce kroku zahrnuje uvolňování a zastavování hodinového soukolí s frekvencí kyvu oscilátoru o danou část zubové rozteče. Tím získáme při každých dvou kyvech pootočení krokového kola o jeden zub.

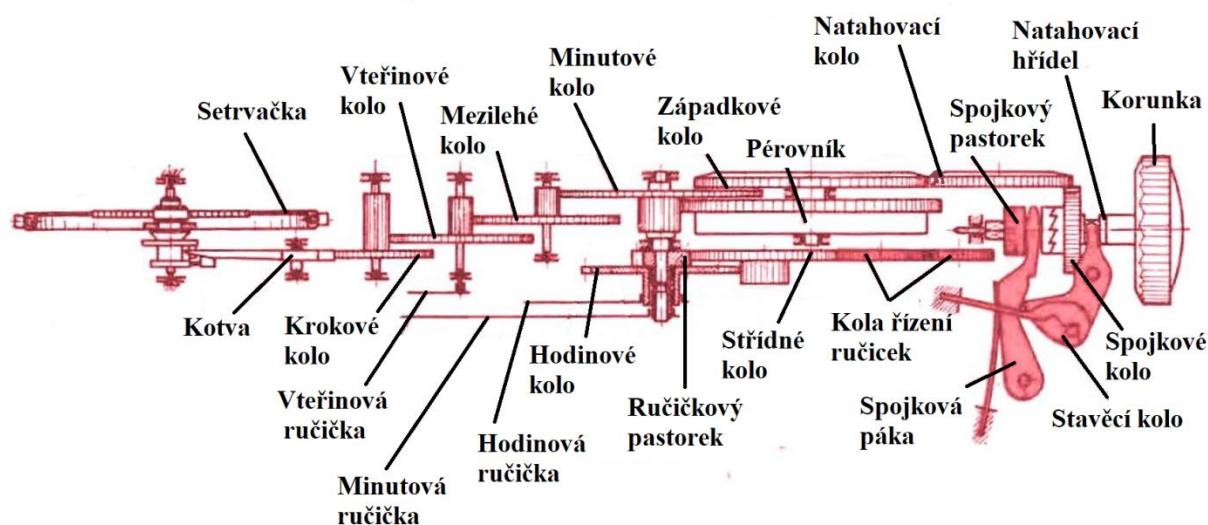
Hlavní soukolí - je soustava sériově poskládaných ozubených kol, která slouží pro přenos energie mezi hnacím ústrojím a krokem. Zároveň se soukolí přerušovaně otáčí dle rytmu kroku, který jej zastavuje a uvolňuje v závislosti na kyvu oscilátoru.

Ručičkové soukolí - s jeho pomocí je realizován převod mezi minutovou a hodinovou ručičkou hodinového stroje.

Hnací ústrojí - slouží jako zásobní energie pro oscilátor. U mechanických strojů se zpravidla využívá pera nebo závaží.

Natahovací ústrojí - slouží pro mechanické dodání energie hnacímu ústrojí.

Řízení ručiček - se používá k úpravě pozice ručiček pro úpravu času.



Obr. 1. 2 Schéma mechanických hodinek [1]

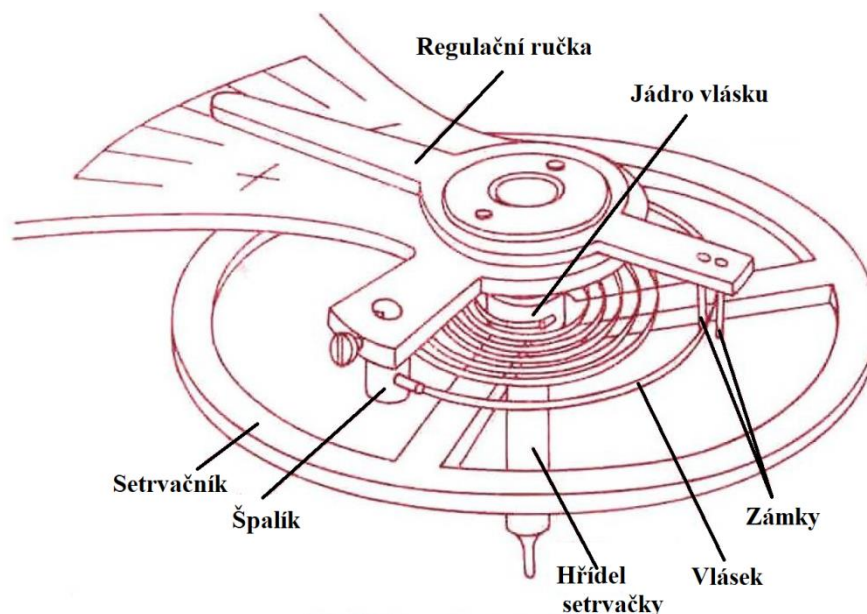
1.1 Oscilátor

Jak jsem již předeslal v úvodu kapitoly, budeme se zabývat pouze mechanickými hodinovými stroji se setrvačkou.

1.1.1 Setrvačka

Setrvačka je méně přesným oscilátorem oproti kyvadlu, avšak její výhoda spočívá v tom, že může pracovat v libovolné poloze. Samotná setrvačka ovšem nemůže funkci kyvadla v jakékoliv pozici vykonávat sama, proto musí být spojena s vláskem. Z tohoto důvodu je problematika rovnoměrnosti kyvů setrvačky složitější nežli u klasického kyvadla. Setrvačka se skládá ze setrvačníku, jehož střed je naražen na hřídeli setrvačky. Tento střed nazýváme jádro vlásku, jelikož je k němu vlásek na vnitřním konci uchycen. Vnější konec vlásku nejprve prochází zámky regulační ručky, která svým umístěním zkracuje nebo prodlužuje

činnou délku vlásku a tím mění dobu kyvu. Poté je uchycen ve špalíku, který je spojen s kostrou stroje [3].



Obr. 1. 3 Setrvačka s můstkem [1]

1.1.2 Doba kyvu setrvačky

Doba kyvu setrvačky je závislá na rozměrech, materiálu setrvačnicku a vlásku. Dobu kyvu je možné vypočítat, ale výpočet je složitý a nebývá přesný. Určuje-li hodinář například neznámý vlasek pro daný stroj, postupuje zpravidla zkusmo. K ověření, zda stroj pracuje správně, je nutné znát přesnou dobu kyvu setrvačky, pro kterou je daný stroj konstruován. Ta je vždy udávána výrobcem hodinového stroje. Na následující tabulce je uveden základní přehled počtu kyvů setrvačkových hodin [2].

Druhy hodinových strojů:	Počet kyvů za:		
	hodinu	minutu	sekundu
Velké budíky	12000	200	3 1/3
Námořní chronometry, budíky	14400	240	4
Kapesní a náramkové hodinky, malé budíky	18000	300	5
Náramkové hodinky rychloběžné	19800	330	5 1/2
Náramkové hodinky rychloběžné	21600	360	6
Stopky rychloběžné	36000	600	10
Speciální stopky	360000	6000	100

Tab. 1. 1 Počet kyvů [1]

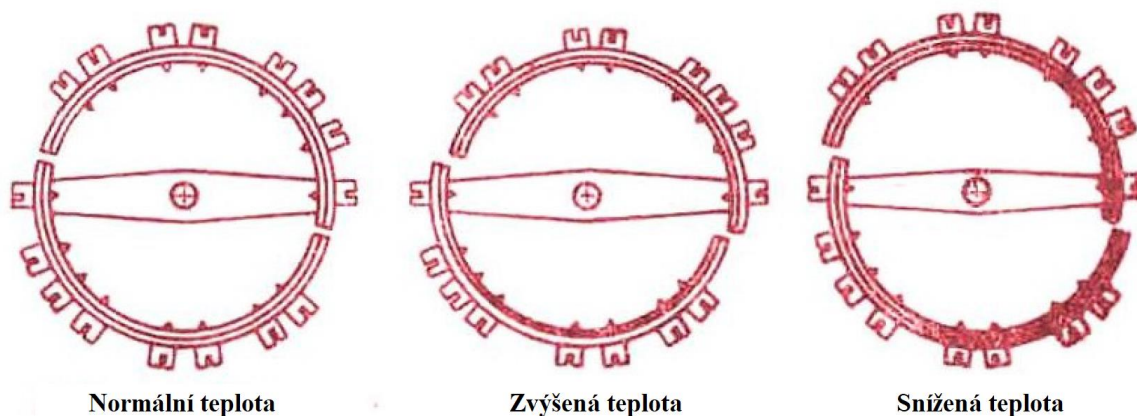
1.1.3 Nerovnoměrnost kyvu setrvačky způsobená nestálostí teploty

Jako na všechna reálná tělesa, tak i na setrvačku má vliv změna teploty. Změna teploty způsobí, že se se zvětšující teplotou zvětšuje její poloměr a tudíž se hmota setrvačnosti vzdaluje od jejího středu a naopak. Změna teploty působí i na vlásek, který se se zvětšující teplotou prodlužuje a snižuje se jeho pružnost. Podíl změny doby kyvu v závislosti na teplotě je asi z 75% způsoben změnou vlastností vlásku a z 25% změnou rozměrů setrvačky. Celková chyba je ovšem dána proměnlivostí vlásku, jelikož chyba změny rozměrů setrvačky se navzájem se změnou vlastností vlásku vykompenzuje [5].

U kvalitnějších hodinových strojů se využívají dva druhy teplotních kompenzací:

- Kompenzační setrvačník
- Kompenzační vlásek

Kompenzační setrvačník je vyroben ze dvou kovů s rozdílnou teplotní roztažlivostí (většinou z ocele a mosazi) a na protilehlých místech je proříznut. Tím nám dochází při změně teploty k přiblížení či oddálení hmoty setrvačnosti a korekci doby kyvu. Viz obrázek (Obr. 1.4).



Obr. 1. 4 Kompenzační setrvačník [1]

Kompenzační vlásek je vyroben ze speciálních slitin, které téměř zachovávají svou pružnost, roztažlivost a současně kompenzují celkový teplotní vliv.

1.1.4 Nerovnoměrnost kyvu setrvačky způsobená nestálostí amplitudy

Amplituda setrvačníku je do velké míry ovlivněna následujícími třemi faktory:

- Proměnlivostí hnací síly přenášené na oscilátor
- Proměnlivostí tření čepů setrvačky při změně polohy strojku
- Proměnlivostí mazacích vlastností oleje

Pro lepší odolnost vůči rušivým silám, které působí na setrvačku, je vhodné volit co největší amplitudu setrvačníku, jelikož dosahuje vyšší rychlosti, a proto lépe odolává účinkům rušivých sil. V praxi se běžně amplituda setrvačníku volí $\pm 300^\circ$.

1.2 Krok

Jak již víme, krok je ústrojí, které pravidelně uvolňuje zuby krokového kola a přenáší energii z hnacího ústrojí na oscilátor.

Základní dělení kroků je určeno dle chování krokového kola při překyvů oscilátoru.

Kroky hodinek dělíme do tří základních supin:

- Kroky vratné
- Kroky klidové
- Kroky volné

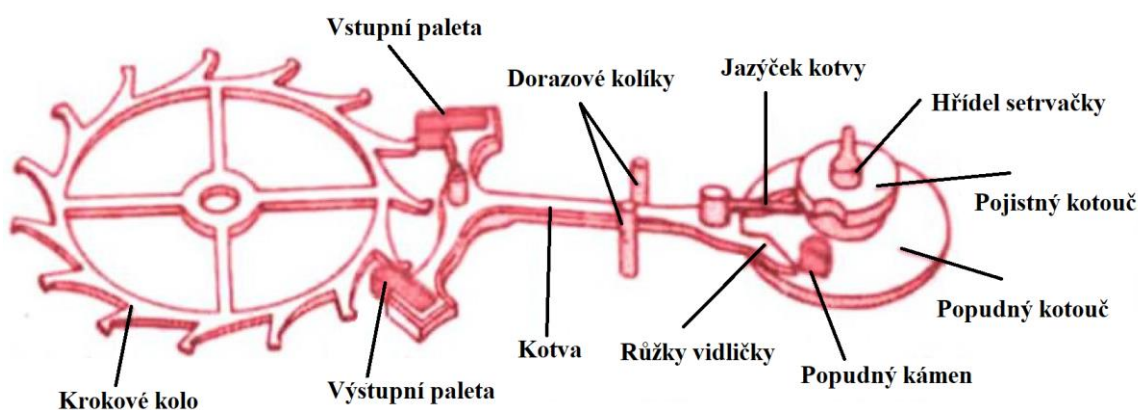
Vratný krok je takový, u něhož po dopadu zubu krokového kola na paletu, tlačí kotvička překyvem oscilátoru na krokové kolo a tím i celý jící stroj trochu zpět. Krokové kolo tedy postoupí poněkud zpět.

Klidový krok odstraňuje závalu předešlého kroku, tzn. zpáteční pohyb krokového kola. Kotvička při překyvů oscilátoru nevrací zub krokového kola zpět a kolo zůstává v klidu.

Volný krok je ten, při němž přichází oscilátor do styku s krokovým kolem prostřednictvím kotvy v okamžiku impulsu, jinak se kýve zcela volně.

Dále budou popsány nejpoužívanější typy kroků.

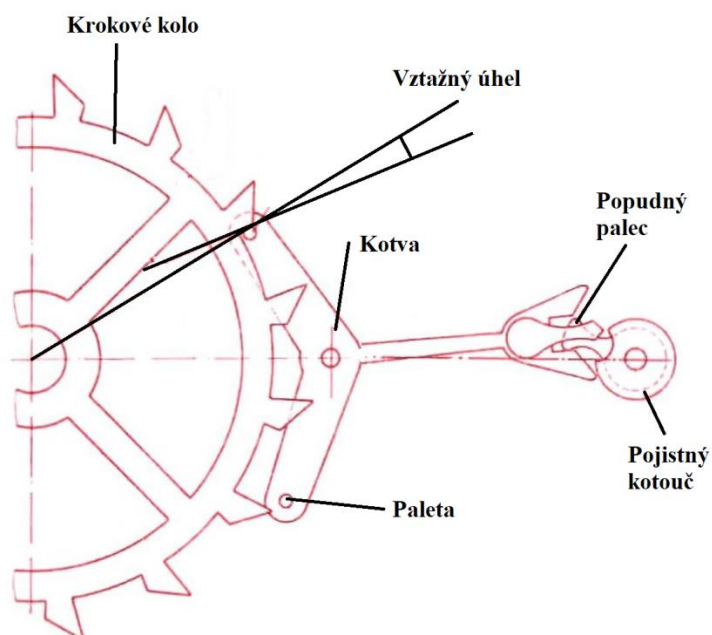
nalisované na hřídeli setrvačky. Na pojistném kotouči je vybrání, které umožňuje průchod jazýčku skrze střední polohu. Úkolem jazýčku kotvy spolupracujícího s pojistným obvodem a růžků vidličky spolupracujících s popudným kamenem je zajištění správné funkce v případě otřesu hodinového strojku. Jazýček kotvy spolu s pojistným kotoučem zabraňuje předčasnému vypuštění kroku a zajišťuje plochu kotvy pro vstup popudného kamene do zářezu vidličky.



Obr. 1. 6 Švýcarský krok [1]

1.2.3 Kolíčkový krok

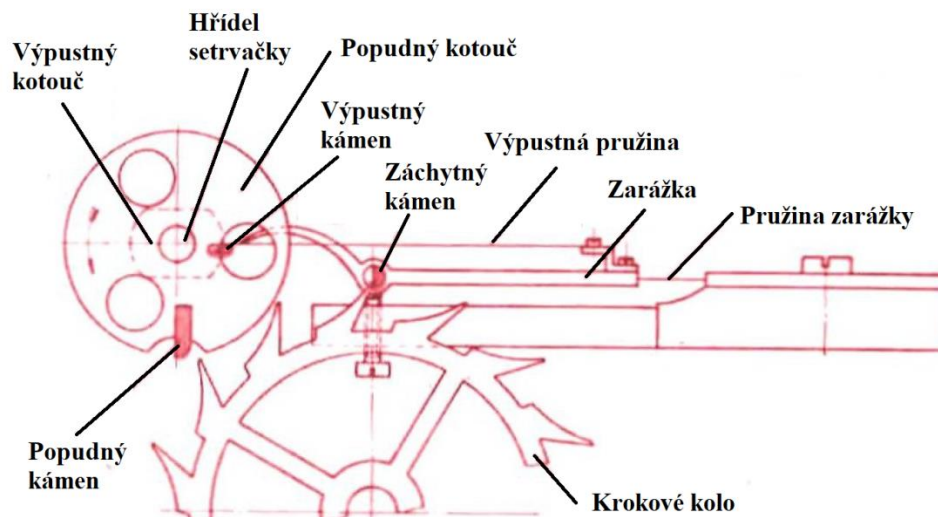
Je nejjednodušším volným krokem u setrvačkových hodin. Díky své jednoduché konstrukci je rozšířen především u levných hodinových strojů. Popudná plocha je rozdělena na dvě části. Její převážná část leží na zubu krokového kola a jen malá část je na náběžné hraně palety, která má tvar kolíčků. U kolíčkového kroku je záchytná plocha i vtažný úhel palety na zubu kola. Tento krok většinou nemá ohraničen pohyb kotvy dorazovými kolíky, jako je tomu například v případě Švýcarského kroku, protože tuto funkci zastává samotný věnec krokového kola.



Obr. 1. 7 Kolíčkový krok [1]

1.2.4 Chronometrický krok

Chronometrický krok patří do skupiny kroků volných. Skládá se z krokového kola, zářezky se záchytným kamenem, popudného kotouče s popudným kamenem a z výpustného kotouče s výpustným kamenem. Popudný i výpustný kotouč jsou nalisovány na hřídeli setrvačky. Pohyb krokového kola je omezen záchytným kamenem, který je umístěn na zářezce. Zářezka je ovládána vypouštěcím kotoučem přes výpustnou pružinu. Po vypuštění krokového kola dopadne jeho zub na popudný kámen, čímž setrvačka obdrží popud. Krokové kolo se při tom pootočí o jednu zubovou rozteč. Při zpětném kyvu setrvačky výpustný kámen vychýlí pouze výpustnou pružinu a setrvačka pokračuje v pohybu přesto, že neobdrží popud. U chronometrického kroku dostává setrvačka popud při každém druhém kyvu prostřednictvím krokového kola, z čehož vyplývá nepotřeba kotvy. Toto podstatně přispívá ke snížení ztrát způsobených třením.



Obr. 1. 8 Chronometrický krok [1]

1.3 Měření přesnosti hodinových strojů

1.3.1 Denní chod a stav stroje

Měřený hodinový stroj je po 24 hodinách chodu porovnáván s kalibrovaným strojem. Odchylka mezi měřeným hodinovým strojem a kalibrovaným strojem nám indikuje stav hodinového stroje, zdali se předchází, či zpožďuje. Dále určujeme i diferenci, která vzniká mezi dvěma měřeními po 24 hodinách. Tento rozdíl nám indikuje chod hodinového strojku. Pro správné seřízení hodinového stroje je třeba si tyto údaje zapisovat a současnou regulací stroje zmenšovat celkovou odchylku. Tento postup je nutný, neboť na hodinky působí každý den jiné vlivy vyvolané jak změnami teploty, tak kolísáním jednotlivých kyvů setrvačky. Toto měření se v praxi provádí po dobu 14 dní.

1.3.2 Rychlá regulace stroje

Metoda rychlé regulace hodinového stroje je založena na současném odposlouchávání tiků přesně kalibrovaného hodinového stroje spolu s regulovaným hodinovým strojem. Při odposlouchávání zjišťujeme časovou diferenci mezi splynutím tiků obou hodinových strojů. Z této difference pak na základě předem známého počtu tiků za hodinu vypočteme denní odchylku. Tato metoda byla vypracována německým hodinářem a autorem odborné literatury Hansem Jendritzkim.

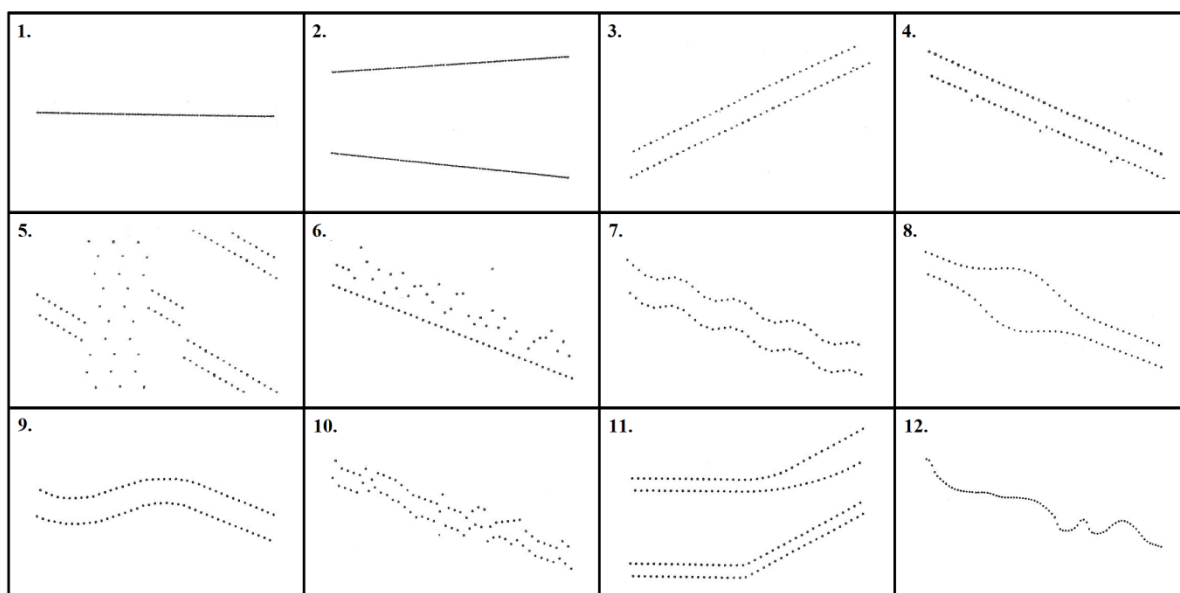
1.3.3 Rychlá regulace vibrografem

Vibrograf byl původně obchodní název švýcarské firmy Reno pro přístroj, který indikuje chod mechanických hodinek záznamem na papírový pásek.

Princip prvního vibrografu byl založen na krystalovém oscilátoru, který synchronizoval otáčky synchronního elektromotoru. Ten otáčel válečkem, na jehož obvodu je dokola spirálovitý výstupek. Údery kroku strojku mechanických hodinek byly snímány mikrofonom a zesíleny několika stupňovým elektronkovým zesilovačem. Následně ovládaly elektromagnet, který v případě úderu kroku strojku hodinek přitiskl válec se spirálovým výstupkem na barvící pásku, která pozici spirály otiskla na konstantně se odvíjející papírovou pásku. Pokud šel hodinový stroj správně, byl následující úder přesně synchronizován s krystalovým oscilátorem vibrografu a spirála byla otištěna ve stejné pozici. Tímto způsobem byla na odvíjející papírovou pásku zaznamenána v případě správného chodu hodinového strojku jakási rovná čára [4].

1.3.4 Závady diagnostikovatelné vibrografem

Protože vibrograf zaznamenává na odvíjející papírový pásek rozdíly jednotlivých úderů, které jsou tvořeny v ústrojí kroku strojku (viz. kapitola 1.3.3) vůči krystalovému oscilátoru, můžeme dle tvaru stopy záznamu posuzovat i jednotlivé vady. Tyto vady jsou znázorněny na následujícím obrázku. Maximální hodnota kulhání je u dobých hodinek 2 ms.



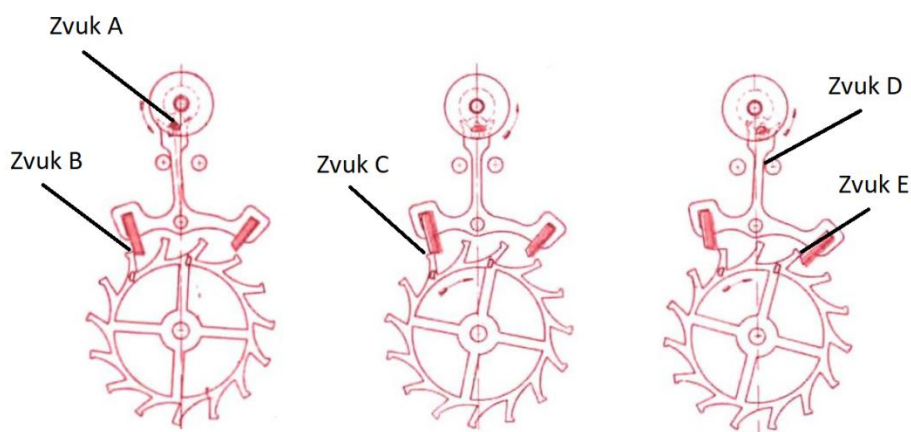
Obr. 1. 9 Záznamy výsledných průběhů vibrografu

Popis jednotlivých záznamů:

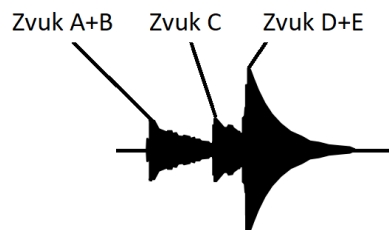
1. Přesný chod, 2. Předcházení, zpoždování, 3. Kulhání, 4. Poškozený zub krokového kola, 5. Setrvačka naráží, 6. Vadná paleta, 7. Radiální házení krokového kola, 8. Proměnná amplitudy setrvačky, 9. Nepravidelný pohyb setrvačky, špatný přenos hnací síly, 10. Nepravidelný přenos hnací síly nebo znečištěné díly kroku, 11. a) Kyvy nejsou isochronní, b) kyvy jsou isochronní, ale setrvačka je rozvážená. 12. Velká vůle v čepu kotvy, setrvačky nebo vadný záběr setrvačka - kotva

1.3.5 Popis vzniku úderů kroku

V okamžiku, kdy setrvačka prochází střední polohou, nastává náraz vodícího kamene na výřez ve vidličce a je generován zvuk A. Tento úder je první, co slyšíme. Je velmi přesný, protože jej vyvolává sama setrvačka. Vidlička je vodícím kaménkem posunuta, přičemž umožní uvolnění zubu kola na kameni kotvy (zvuk B). V okamžiku uvolňování zubu krokového kola se vrací kolo nepatrně zpět a poté teprve zub krokového kola sklouzává na plochu zdvihu. Tento okamžik zachycuje zvuk C. Tyto dva zvuky jsou slabé. Nyní nastává impuls, který je rovněž o něco slabší nežli zvuk A, a proto není obvykle vibrografem registrován. Při ukončení impulsu opouští zub krokového kola náhle paletu a krokové kolo je na okamžik mimo záběr. Zub, který opustil vycházející paletu, dopadá na plochu klidu vycházející palety. Skoro současně je i vidlička přitažena k ohraňujícímu kolíčku. Tím vznikají zvuky D a E, které vzájemně splývají. Úder při dopadu zubu na paletu je nejsilnější ze všech [2].



Obr. 1. 10 Záběr krokového kola[1]



Obr. 1. 11 Časový průběh tiků [6]

1.3.6 COSC certifikace

COSC (Controle Officiel Suisse des Chronometres) je certifikát švýcarské kvalitativní kontroly chronometrů prováděný neziskovou organizací již od roku 1973. COSC vydává certifikát pro chronometr po patnácti dnech měření, které jsou prováděny v pěti různých polohách hodinek dle předem daných kritérií. Jako referenční zdroj času jsou využívány dvojce nezávislé atomové hodiny. Na základě provedeného měření se stanoví, zdali chronograf splňuje sedm následujících kritérií:

- Průměrná denní odchylka $-4/+6$ sekund
- Průměrná změna odchylky 2
- Největší změna odchylky 5
- Rozdíl mezi odchylkami v horizontální a vertikální pozici $-6/+8$
- Největší změna odchylky 10
- Teplotní změna $-0.6/+0.6$
- Odchylka obnovení $-5/+5$

Pokud chronometr tyto kritéria splňuje, je zaručena přesnost chodu 99.99%.

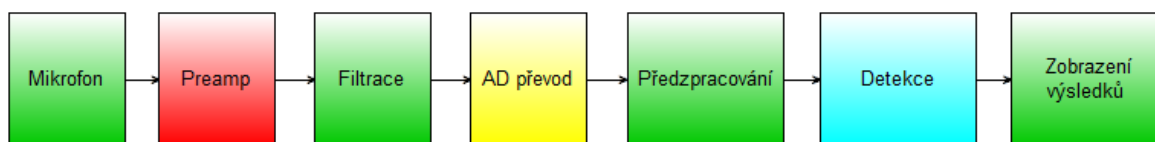
Na následujícím obrázku je vyobrazen průběh testování COSC.

Den	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pozice hodinek	Vertikálně, index 6 nahore			Vertikálně, index 3 nahore			Vertikálně, index 9 nahore			Horizontálně, ciferníkem dolů			Horizontálně, ciferníkem nahoru			Vertikálně, index 6 nahore
Teplota	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	8	23	38	23	23
Strojek v chodu																

Tab. 1. 2 Průběh COSC certifikace [7]

1.4 Koncepce navrhovaného měřicího zařízení

Koncepční řešení navrhovaného měřicího přístroje je zobrazeno na následujícím blokovém schématu.



Obr. 1. 12 Blokové schéma měřicího přístroje

Akustický signál z měřeného strojku mechanických hodinek je nutno nejprve zesílit na vhodnou úroveň pro následující zpracování A/D převodníkem. Před A/D převodem je však nutné ze signálu odstranit nežádoucí složky na obou koncích zaznamenávaného spektra akustického signálu včetně frekvenčního omezení na polovině vzorkovacího signálu zabraňujícího aliasingu. To je řešeno v bloku filtrace. Po navzorkování akustického signálu A/D převodníkem je vhodné vytvořit obálku signálu, jejíž amplituda se následně porovnává s nastaveným prahem detekce a po překročení prahové úrovně zaznamená pozice vzorků. Poté se výsledné pozice vzorků přepočítají dle vzorkovací frekvence na časové pozice, které se porovnají s předem známou referenční hodnotou. V poslední části jsou zobrazeny vypočtené odchylky.

2 ZPRACOVÁNÍ AKUSTICKÝCH SIGNÁLŮ

2.1 Rozdělení mikrofonů

Mikrofon se používá jako elektroakustický převodník přeměňující dopadající akustickou energii na energii elektrickou. Jeho vlastnosti jsou rozhodující pro kvalitu zaznamenávaného akustického signálu. Proto jeho volbě musí být věnována pozornost, neboť nesprávně zaznamenaný signál není možné nijak opravit. Úpravy signálu slouží pouze k jeho následné korekci. Znalost vlastností mikrofonu spolu se správnou aplikací je první podmínka úspěšného záznamu.

2.1.1 Podle druhu akustického přijímače

Tlakový mikrofon – akustická vlna dopadá pouze na jednu stranu membrány mikrofonu. Její amplituda není závislá na směru a vzdálenosti zdroje, ale pouze na akustickém tlaku. Tyto mikrofony mají všesměrovou kulovou charakteristiku.

Gradientní mikrofon – akustická vlna působí na obě strany membrány, proto je její amplituda závislá na rozdílu obou akustických tlaků. Čím je větší rozdíl akustických tlaků (gradient), tím je větší výchylka membrány.

- 0. řád – gradientní mikrofon 0. řádu označujeme jako tlakový mikrofon. Je velice citlivý na okolní hluk – všesměrová charakteristika.
- 1. řád – tento druh mikrofonu má velkou citlivost pro blízké zdroje – směrová charakteristika
- 2. řád – využívá se pro záznam signálu ve velmi zarušeném prostředí – úzce směrová charakteristika.
- 3. a vyšší řád – potlačuje rušivé signály mimo osu mikrofonu – velmi úzce směrová charakteristika.

Vlnový mikrofon – je tlakový mikrofon, který je umístěný v ohnisku exponenciálního zvukovodu. Jedná se o úzce směrový mikrofon [6].

2.1.2 Podle směrové charakteristiky

Všesměrové, směrové, úzce směrové, velmi úzce směrové [6].

2.1.3 Podle druhu mechanického systému

Membránové mikrofony – zde působí akustická vlna na pomocnou membránu, jejíž pohyb je přenášen na elektromechanický převodník. Například dynamický mikrofon.

Bezmembránové mikrofony – u bezmembránových mikrofonů působí akustická vlna přímo na činnou část elektromechanického převodníku. Například elektrodynamický páskový mikrofon [6].

2.1.4 Podle druhu elektromechanického měniče

Reciproké mikrofony – umožňují převod akustického signálu na elektrický a naopak.

Reciproké mikrofony můžeme dále dělit na [6]:

- Rychlostní – výstupní napětí je úměrné rychlosti pohybu membrány. Např. elektrodynamický.
- Výchylkové – výstupní napětí je úměrné výchylce membrány. Např. piezoelektrický.

Nereciproké mikrofony – fungují pouze jedním směrem.

Popis nepoužívanějších elektromechanických měničů:

Dynamický mikrofon – je nejběžnější mikrofon. Lze jej realizovat jako cívkový, u něhož je membrána pevně spojena s cívkou, která vlivem akustického signálu kmitá v magnetickém poli permanentního magnetu. Nebo jej lze realizovat jako páskový, který má místo membrány a cívky v permanentním magnetickém poli umístěný tenký hliníkový pásek zastávající obě činnosti.

Krystalový mikrofon – může být realizovaný jako membránový i bezmembránový. Jako piezoelektrický materiál se v současné době používají převážně materiály piezokeramické. Na výbrus piezokeramického materiálu, který je nalepen v případě membránového mikrofonu na membránu, je přenášeno chvění, které piezokeramickému materiálu generuje náboj. Impedance krystalového mikrofonu je řádově 100Mohm, a proto je nutné použít odpovídající předzesilovač. V dnešní době se tento mikrofon používá v různých modifikacích převážně jako snímač vibrací. Horní kmitočet mikrofonu odpovídá jeho rezonančnímu kmitočtu.

Elektretový mikrofon – je takový mikrofon, který má membránu zhotovenou z materiálů vykazujících elektretový efekt. Tyto materiály mají schopnost nést permanentní elektrický náboj, který zajišťuje polarizační napětí mikrofonu. Elektretové mikrofony většinou obsahují integrovaný FET tranzistor, který souží jako předzesilovač.

Kondenzátorový mikrofon – mikrofon obsahuje tenkou vodivou membránu umístěnou několik mikrometrů od pevné elektrody. Při dopadu akustického vlnění na membránu dochází k jejímu chvění a tím změně kapacity. Při změně kapacity dochází ke změně protékajícího

proudu a tím změně úbytku napětí mezi membránou a elektrodou. Toto napětí je pak vysoko impedančním předzesilovačem zesíleno na použitelnou úroveň.

2.2 Měření tichých signálů

Nedílnou součástí této práce je akustický odposlech úderů kotvy o krokové kolo. Tento akustický signál má však velmi malou úroveň, která je často až v pozadí okolních ruchů a to i v případě laboratorního měření. Vystává tedy problém, jakým způsobem zaznamenávaný signál měřit, aby byl jeho odstup vůči okolní šumové složce co největší.

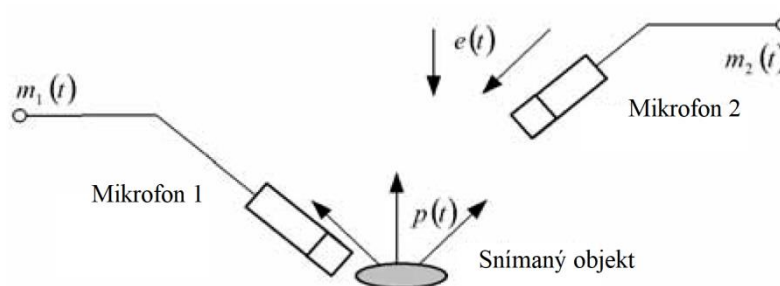
Při snímání akustického signálu hodinového strojku obdržíme na výstupu mikrofonu signál $m(t)$, který lze zapsat ve tvaru:

$$m(t) = p(t) + e(t) \quad (2.1)$$

kde $p(t)$ reprezentuje akustický signál hodinového strojku a $e(t)$ chybový signál. Chybový signál $e(t)$ můžeme následně rozdělit na složky $s(t)$ a $n(t)$, což jsou náhodné stacionární a nestacionární části signálu, které pocházejí z vnějšího okolí měřeného signálu.

$$e(t) = s(t) + n(t) \quad (2.2)$$

Chybové signály $s(t)$ a $n(t)$ mohou být jak akustického původu, tak mohou být způsobeny elektromagnetickým smogem, který proniká do signálové cesty. Pro omezení vlivu chybových signálů na užitečný signál je vhodná použít metodu využívající dvou mikrofónů, která je zobrazena na následujícím obrázku (Obr. 2.1) [7].



Obr. 2. 1 Snímání akustických signálů pomocí dvou mikrofónů [7]

První mikrofon je umístěn v bezprostřední blízkosti měřeného objektu, řádově ve vzdálenosti několika mm. Druhý mikrofon se nachází v takové vzdálenosti, kdy lze ještě předpokládat, že charakter náhodného chybového signálu je shodný s chybovým signálem v bezprostřední vzdálenosti měřeného objektu, zároveň však akustický signál vydávaný měřeným objektem a snímáný druhým mikrofonem má velmi nízkou úroveň [7]:

. Signál snímáný prvním mikrofonem můžeme pomocí rovnice zapsat:

$$m_1(t) = p(t) + e(t - t_0) = p(t) + s(t - t_0) + n(t - t_0) \quad (2.3)$$

Signál snímáný druhým mikrofonem pak můžeme zapsat ve tvaru:

$$m_2(t) = \alpha p(t) + s(t) + n(t) \quad (2.4)$$

kde α je činitel tlumení, přičemž platí $\alpha < 1$. Koeficient t_0 představuje časové zpoždění akustického signálu mezi oběma mikrofony. Vzdálenost mikrofونů l_0 je pak určena vztahem $l_0 = c \cdot t_0$, kde c je rychlost šíření akustického signálu. Šíření zvukového signálu $p(t)$ vydávaného sledovaným objektem předpokládáme směrem od prvního mikrofону ke druhému mikrofonu. Směr šíření chybových signálů $s(t)$ a $n(t)$ předpokládáme opačný, tj. směrem z okolního prostředí, kde nejprve dopadnou na druhý mikrofon a poté se dále šíří k měřenému objektu. Koeficient α představuje zatlumení signálu $p(t)$ na druhém mikrofonu. Předpokládáme-li, že druhý mikrofon je v dostatečné vzdálenosti od sledovaného objektu a signál $p(t)$ má sám o sobě nízkou úroveň, můžeme napsat [7]:

$$\alpha p(t - t_0) \cong 0 \quad (2.5)$$

Na základě předchozí úvahy můžeme rovnici napsat ve tvaru:

$$m_2(t) \cong e(t) = s(t) + n(t) \quad (2.6)$$

Signál $e(t)$ naměřený druhým mikrofonem použijeme při extrakci signálu $p(t)$ ze signálu $m_1(t)$ naměřeného prvním mikrofonem. Výsledný vztah je pak:

$$p(t) = m_1(t) - m_2(t) \quad (2.2)$$

3 ZÁZNAM HODINOVÉHO STROJE

3.1 Záznam akustického signálu mechanických hodinek

Pro prvotní analýzu akustického signálu mechanických hodinek byl pořízen záznam strojek s jedním měřicím mikrofonom Megaton M-1, který používám k měření charakteristik reprosoustav a mám změřenu jeho frekvenční charakteristiku vůči renomovanému kalibrovanému měřicímu mikrofону MBHO MBC550. Tento mikrofón je osazen elektretovou vložkou Panasonic WM-61A. Jako předzesilovač jsem použil vlastní jednoduchou konstrukci s OZ se ziskem 10dB, která má na vstupu i napájecí napětí pro integrovaný FET tranzistor v mikrofonní kapsli, jež zajišťuje impedanční přizpůsobení mezi elektrostatickým polem mikrofónu a vstupní impedancí předzesilovače. Signál z předzesilovače je zpracován linkovým vstupem notebooku Line In, kde jsem k jeho záznamu použil osvědčený freeware SW Audacity. Signál jsem zaznamenal po dobu 20 sekund s F_s 96kHz a exportoval do formátu WAV.

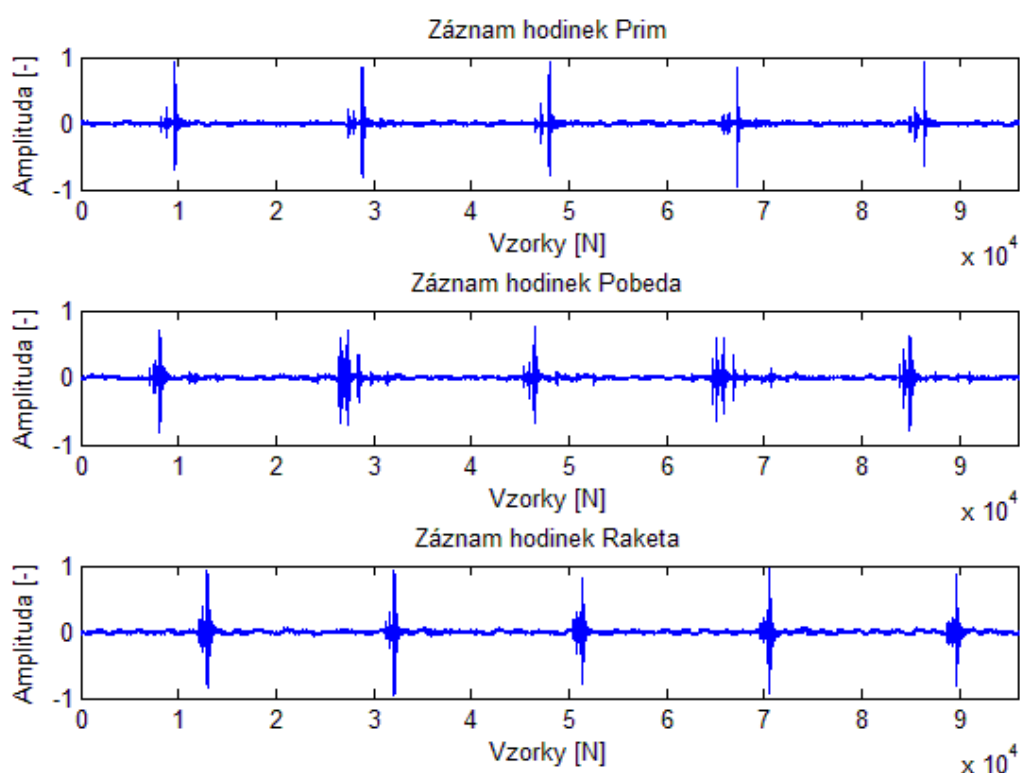


3.2 Rozbor zaznamenaného akustického signálu

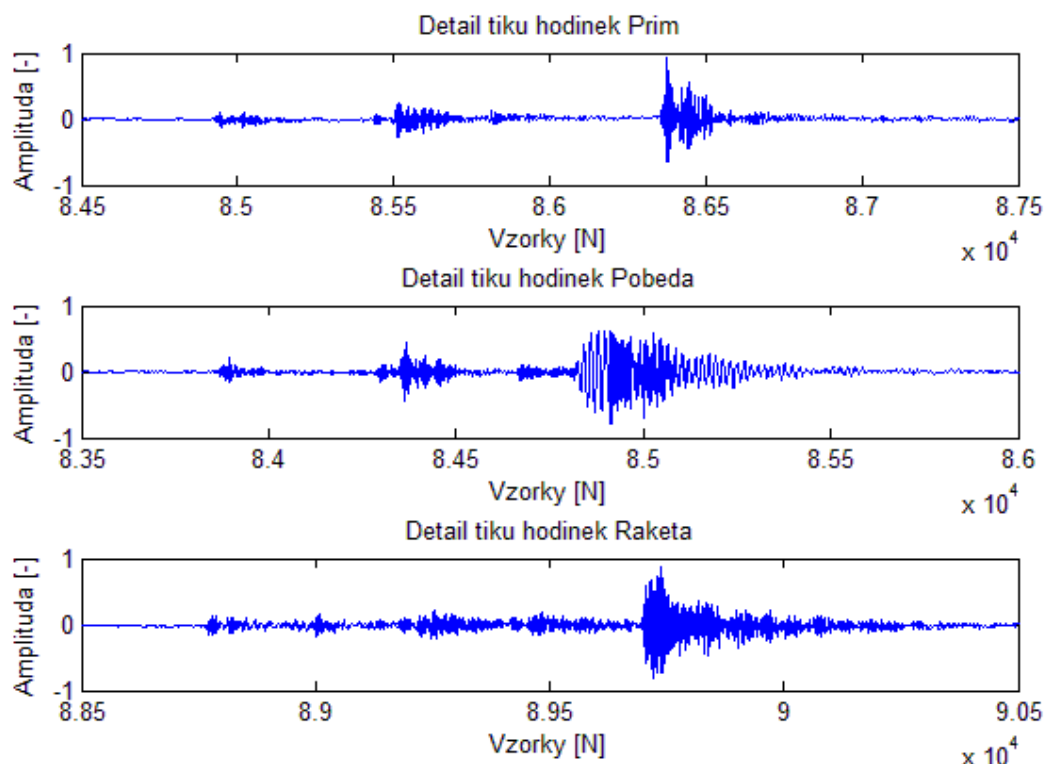
Pro následný rozbor zaznamenaného signálu jsem využil SW Matlab, ve kterém mohu signál analyzovat, vizualizovat a aplikovat na něj potřebné úpravy.

3.2.1 Časová oblast

Na obrázku je postupně zobrazen průběh zaznamenaných signálů ze tří hodinových strojů. Pro lepší vizualizaci je záznam zkrácen na délku 1 sekundy a následně je vyobrazen jeden samostatný tik. Můžeme zde pozorovat jednotlivé impulsy, které jsou generovány údery kotvy o krokové kolo, vidličkou a vodítkem.



Obr. 3.1 Časový průběh záznamu hodinek

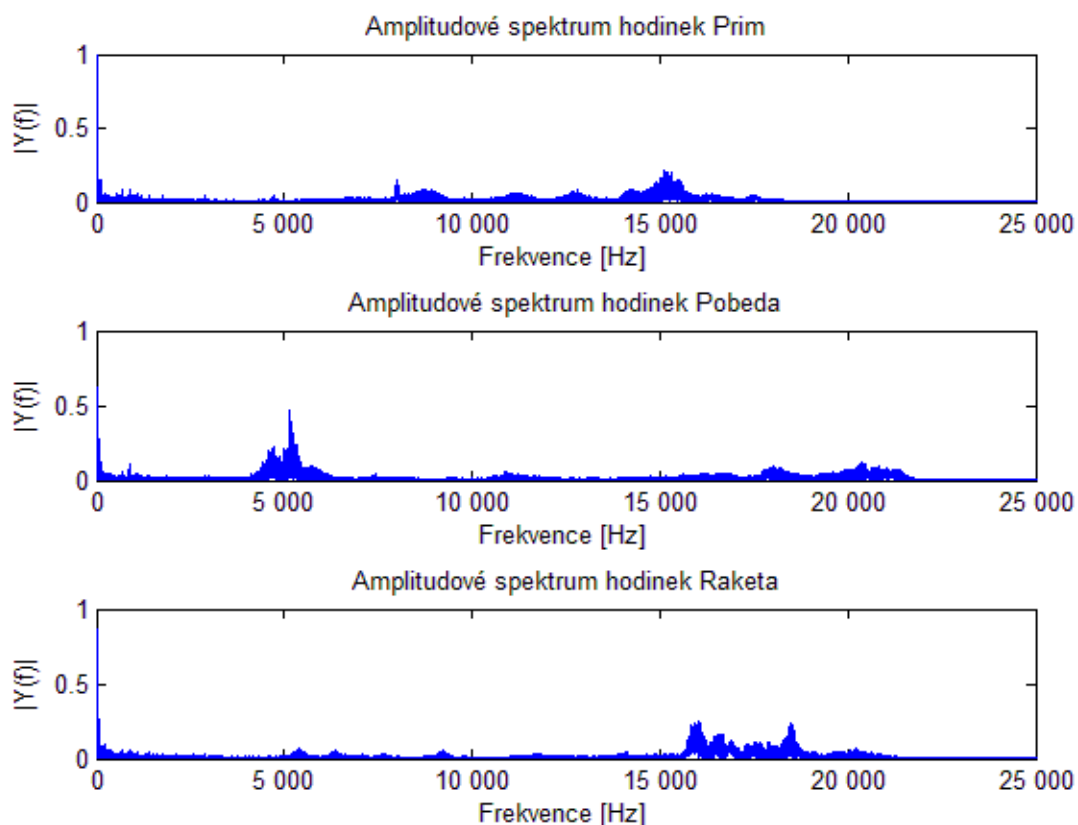


Obr. 3. 2 Časový průběh jednoho tiků

3.2.2 Frekvenční oblast

Spektrum zaznamenaného signálu je vypočteno pomocí FFT (Fast Fourier Transform). V Matlabu je výsledkem funkce “fft” pole komplexních hodnot. Jelikož je frekvenční spektrum symetrické a nenormalizované, je třeba jej nejprve normalizovat vynásobením $1/N$, kde N je počet vzorků vstupujících do FFT. Následně odstraníme levou stranu symetrického spektra, kterou ovšem musíme pro zachování energie signálu vynásobit dvěma.

Na obrázku jsou zobrazena amplitudová spektra záznamů tří hodinových strojů o délce 2 sekundy. Jak je již na první pohled patrné, spektra jednotlivých mechanických strojů se výrazně liší, což bude pravděpodobně dáno různou konstrukcí strojů a samozřejmě také opotřebením jednotlivých součástí. Hlavní spektrum signálu tiků je tedy soustředěno převážně v oblasti 5kHz – 20kHz. Na druhém grafu pozorujeme nárůst amplitudy v oblasti 5kHz. To je pravděpodobně způsobeno závadou stroje, který má při prozkoumání signálu v časové oblasti nesynchronizované jednotlivé děje kroku (viz. kapitola 1.3.4). To indikuje velké vůle v ústrojí setrvačky.



Obr. 3. 3 Spektrum záznamu hodinek

3.3 Předzpracování signálu pro detekci tiků

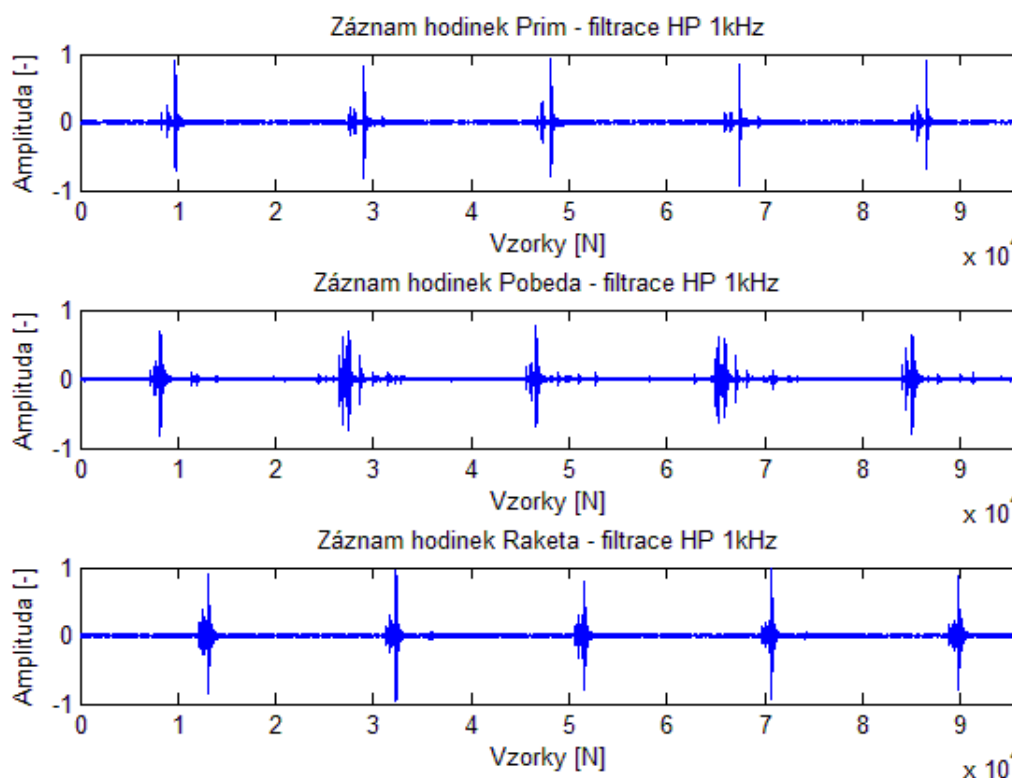
3.3.1 FIR filtrace nežádoucích složek signálu

K odstranění nežádoucích složek signálu slouží filtrace. Při pohledu na zaznamenaný signál je v oblasti mezi jednotlivými tiky viditelné zvlnění, které značí, že signál obsahuje rušivé složky o nižší frekvenci. Tyto složky nemohou být z důvodu fyzických rozměrů součástí hodinového stroje generovány jím samotným. Prozkoumáním signálu ve spektrální oblasti zjistíme, že rušivý signál má největší energii přibližně v oblasti 0 – 1kHz. Signál samozřejmě obsahuje i šum vznikající převážně v mikrofonním předzesilovači. Tento šum lze ale velice obtížně odstranit, jelikož je jeho energie převážně soustředěna ve stejné spektrální oblasti jako energie signálu z měřeného hodinového stroje (přibližně 10kHz – 20kHz). Jeho velikost je v praxi redukována použitím jakostního předzesilovače. Signál tedy budeme filtrovat horní propustí na mezním kmitočtu 1kHz realizovanou FIR filtrem řádu 150.

Popis FIR filtru pomocí impulsní odezvy:

$$y[n] = h[n] * x[n] = \sum_{k=0}^N h[k]x[n - k] \quad (3.1)$$

kde je $y[n]$ výstupní signal, $h[n]$ impulsní odezva, $x[n]$ vstupní signal, N řád filtru.



Obr. 3. 4 Časový průběh záznamu hodinek po filtraci HP 1kHz

3.3.2 Vytvoření obálky signálu

Následujícím krokem předzpracování je vytvoření obálky signálu. Pro vytvoření obálky signálu je třeba znát analytický signál. Analytický signál se skládá z reálné složky měřeného signálu, ke které je připojena pro nás zatím neznámá imaginární část. K vytvoření imaginární části signálu je užita Hilbertova transformace.

Dále bude nastíněno nepřímé odvození Hilbertovy transformace s využitím diskrétní Fourierovy transformace.

Nejprve si definujeme analytický signál. Viz. následující rovnice.

$$z[n] = x[n] + jy[n] \quad (3.2)$$

kde $z[n]$ je analytický signál skládající se z reálné složky $x[n]$ měřeného signálu, ke které je doplněna imaginární část $jy[n]$ vytvořená pomocí Hilbertovy transformace.

Imaginární a reálná část analytického signálu musí splňovat podmínku ortogonalitu.

$$T \sum_{n=0}^{N-1} x[n] + jy[n] = 0 \quad (3.3)$$

kde $x[n]$ je reálná složka signálu, $jy[n]$ imaginární složka signálu, T perioda vzorkování a N počet vzorků měřeného signálu.

Hilbertova transformace je realizována následujícími třemi kroky. Nejprve je nutné převést náš měřený diskretní signál do spektrální oblasti pomocí diskretní Fourierovy transformace.

$$X[n] = T \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{(-j2\pi f n T)} \quad (3.4)$$

kde $X[n]$ je Fourierův obraz měřeného signálu $x[n]$, T perioda vzorkování a N počet vzorků měřeného signálu a f je frekvence.

Následně odstraníme pravou část symetrického spektra, které odpovídá záporným frekvencím. Levou část vynásobíme dvěma z důvodu zachování energie signálu.

$$Y[n] = \begin{cases} X[n] \text{ pro } n = 0, n = \frac{N}{2} \\ 2X[n] \text{ pro } 1 \leq n \leq \frac{N}{2} - 1 \\ 0 \text{ pro } \frac{N}{2} + 1 \leq n \leq N - 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

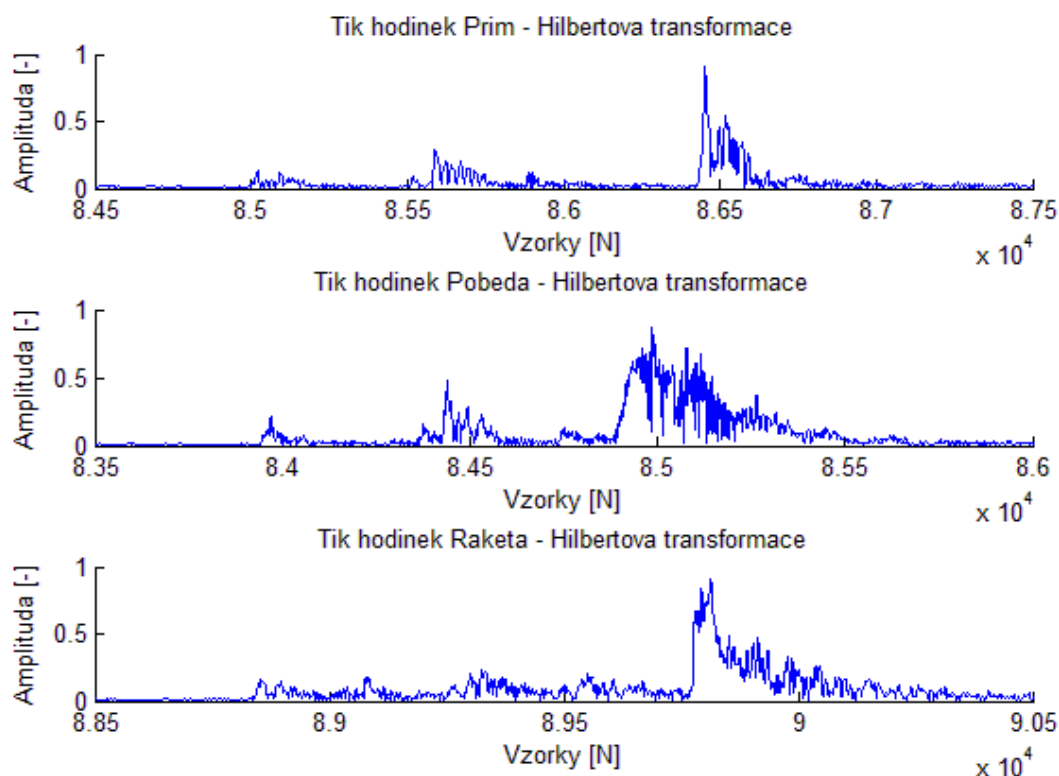
kde $Y[n]$ je obraz Hilbertovy transformace měřeného signálu $x[n]$ a N počet vzorků měřeného signálu.

Následně převedeme obraz Hilbertovy transformace pomocí diskretní Fourierovy transformace zpět do časové oblasti a získáme Hilbertovu transformaci měřeného signálu $x[n]$.

Posledním krokem k vytvoření obálky signálu je výpočet absolutní hodnoty analytického signálu.

$$x_e[n] = \sqrt{x[n]^2 + jy[n]^2} \quad (3.6)$$

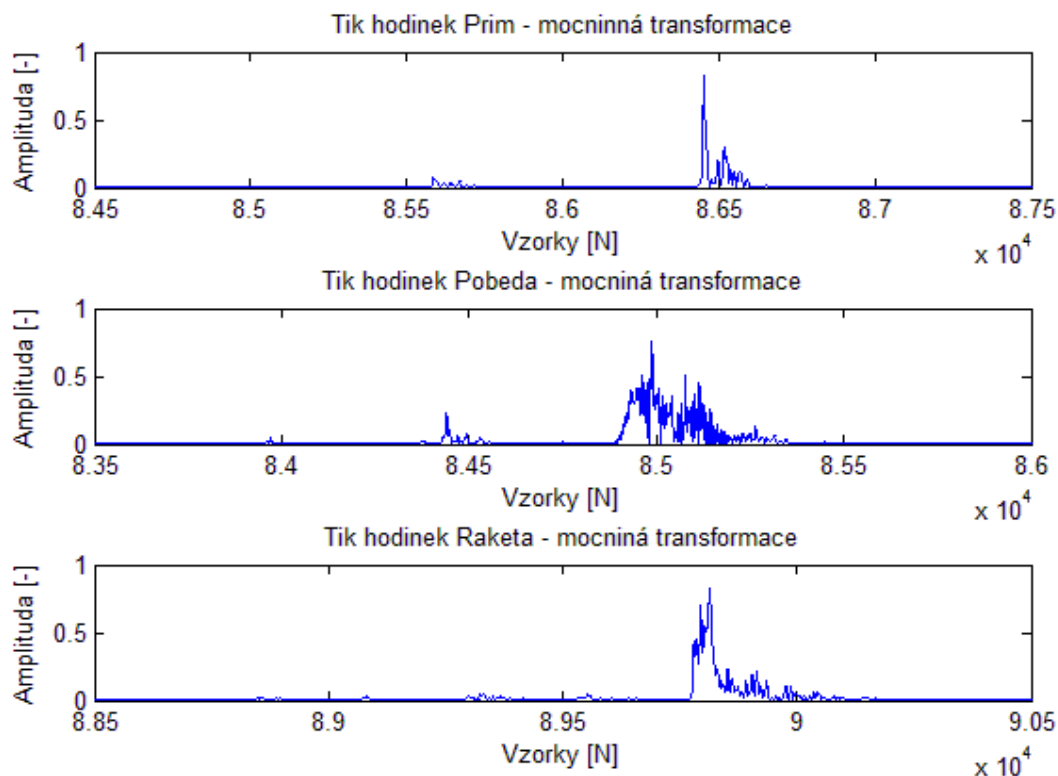
kde $x_e[n]$ je obálka měřeného signálu, $x[n]$ reálná složka signálu a $jy[n]$ imaginární část signálu vytvořená pomocí Hilbertovy transformace.



Obr. 3. 5 Zobrazení obálky tiků hodinek po Hilbertově transformaci

3.3.3 Umocnění obálky signálu

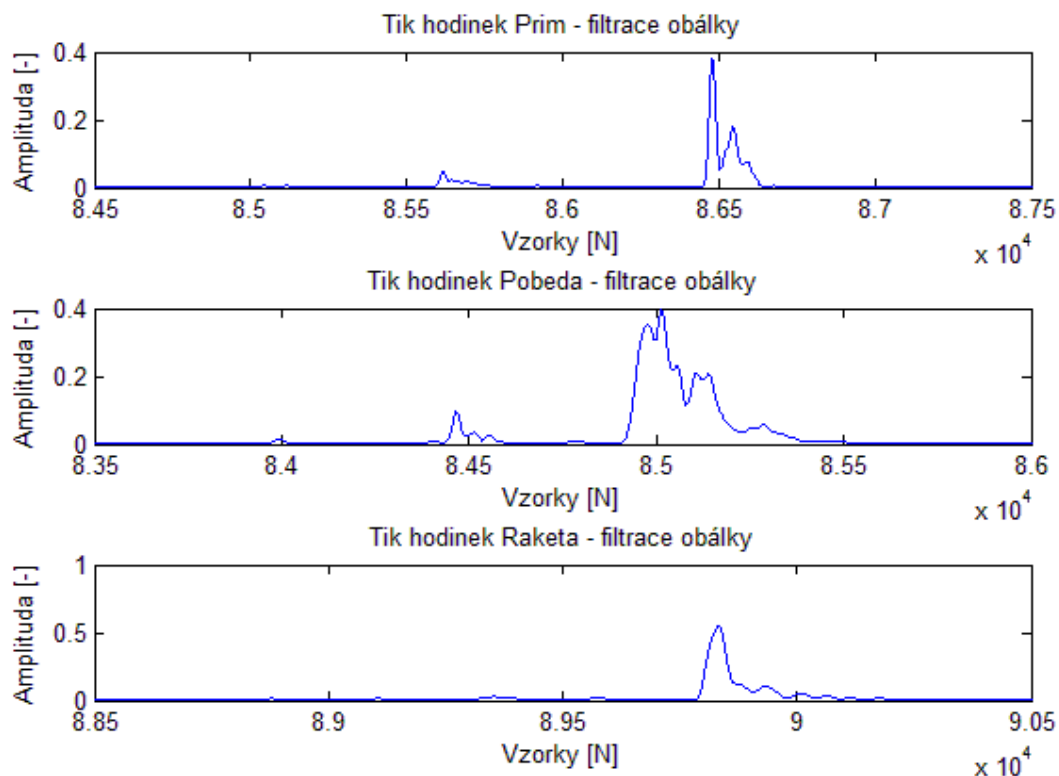
Měřené amplitudy jednotlivých částí hodinového tiků jsou časově nestabilní, protože jsou z velké míry závislé na technickém stavu ústrojí kroku. Na jeho přesnosti závisí splnutí jednotlivých zvuků popsaných v kapitole 1.3.4. Tím může dojít ke zmenšení rozdílu amplitud jednotlivých částí hodinového tiků a následně k nesprávné detekci. Proto je vhodné signál umocnit. Tím dojde ke zvýraznění nejsilnější části tiků, kterou již můžeme bezpečně detekovat.



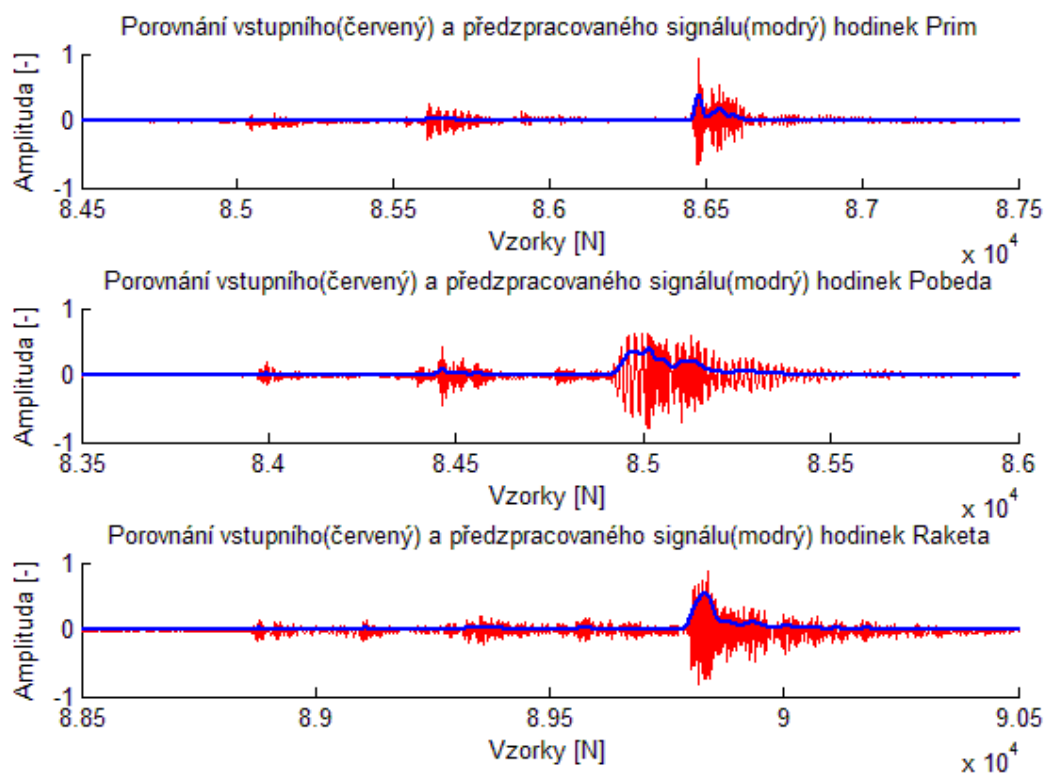
Obr. 3. 6 Zobrazení obálky tiků hodinek po mocninné transformaci

3.3.4 Filtrace umocněné obálky signálu

Pokud se jedná o nový hodinový stroj nebo o stroj po generální opravě, nebyla by filtrace obálky třeba. Nový stroj nemá vůle na ústrojí kroku, čímž je zajištěno přesné splnutí jím vydávaných zvuků uvedených v kapitole 1.3.4. U staršího stroje, který má v ústrojí kroku vůle, se stává, že nedochází ke správnému splnutí jednotlivých zvuků a maximum amplitudy může být posunuto více doprava. Tento děj je ovšem nepravidelný a my tím ztrácíme možnost přesné detekce. Řešení tohoto problému bylo vyřešeno filtrací obálky měřeného signálu. Použita je dolní propust realizovaná FIR filtrem na mezní frekvenci 1kHz řádu 50. Návrh filtru byl proveden v Matlabu pomocí nástroje FDATool, který je určen pro návrh filtrů.



Obr. 3. 7 Zobrazení obálky tiků hodinek po filtraci DP 1kHz



Obr. 3. 8 Porovnání tvaru tiků hodinek před a po předzpracování

3.4 Detekce tiků

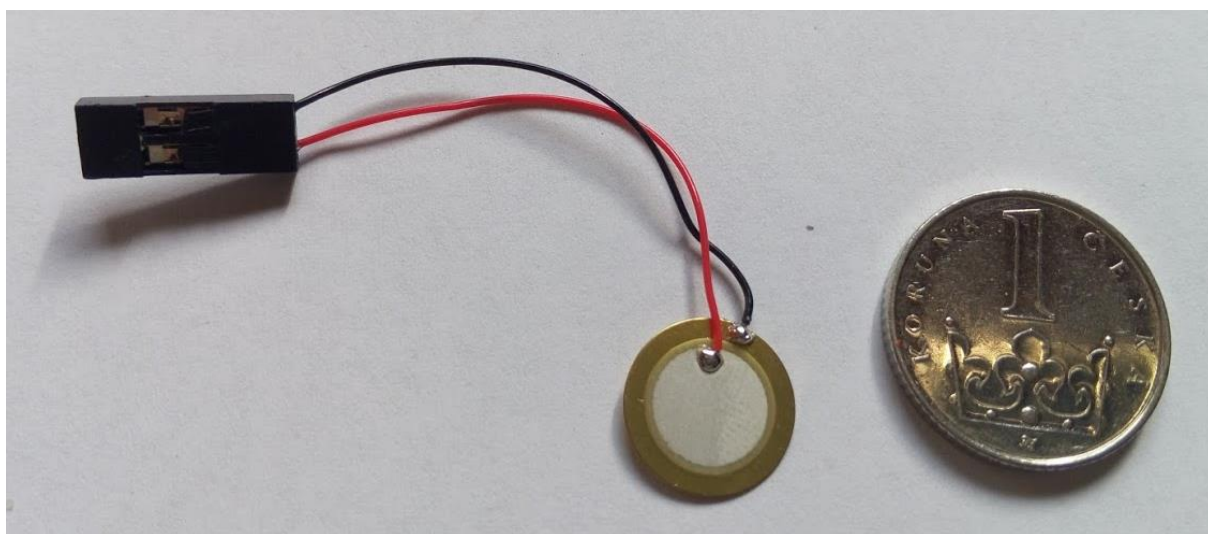
Po takto předzpracovaném měřeném signálu může být tik detekován porovnáním velikosti amplitudy s nastavitelnou prahovou úrovní (threshold). Tato problematika již není součástí analýzy měřeného signálu a je probrána v kapitole 6.2.

4 NÁVRH SNÍMAČE

Pro praktické použití v reálných podmínkách je bezkontaktní snímání tichých signálů mikrofonem naprosto nevhodné, jelikož úroveň okolního hluku převyšuje úroveň měřeného hodinového mechanického stroje a naprosto znehodnotí naměřený signál. Rozhodl jsem se tedy jít cestou snímání chvění hodinového mechanického stroje. Tento princip snímání má nespornou výhodu v relativně snadném odizolování snímacího systému chvění od okolního rušení.

4.1.1 Volba snímače

Volba snímače na první pokusy ověření funkce snímání mechanického chvění byla snadná. Vlastnil jsem několik piezokeramických elementů, které se používají například ve bzučácích jako akustické měniče. Pro finální výrobek jsem zvolil piezokeramický element LD-EDPE-1209 výrobce Loudity, jenž má rezonanční frekvenci na 22kHz při kapacitě 5.3nF.



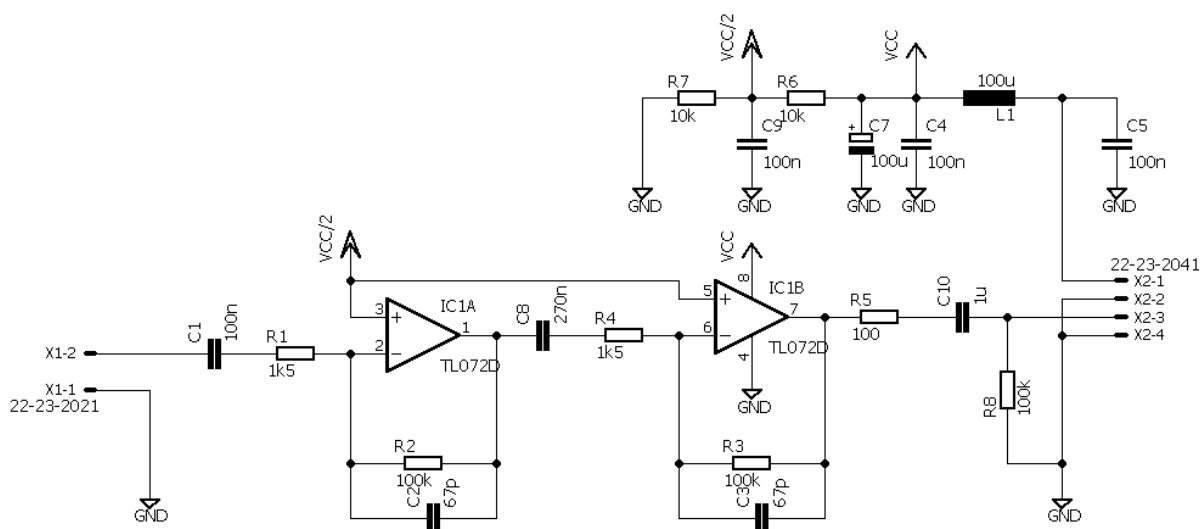
Obr. 4. 1 Použitý piezoelement

4.1.2 Návrh předzesilovače

Mechanické napětí na piezokeramickém elementu vyvolá piezoelektrický jev, který odpovídá elektrickému náboji. Nyní je potřeba elektrický náboj transformovat na elektrické napětí. K tomu není možné použít běžné zapojení, protože piezokeramický element má vysoký výstupní odpor přibližně 100Mohm. K zesílení výstupního signálu takového snímače se používá nábojový zesilovač. Jedná se o zpětnovazební zesilovač, který má ve zpětné vazbě kapacitu.

Zesílení nábojového zesilovače je potom dáno poměrem elektrického náboje generovaného piezoelektrickým elementem a kapacitou ve zpětné vazbě zesilovače.

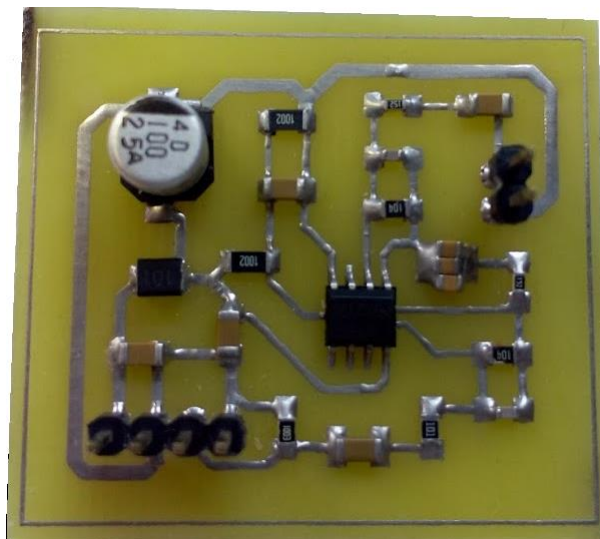
Předzesilovač se skládá ze dvou stupňů zesílení. Ačkoliv vypadají na první pohled totožně, jedná se o dva různě pracující zesilovače. První zesilovač je, jak už jsem uvedl výše, nábojový zesilovač, jehož zesílení závisí na poměru generovaného náboje piezokeramického elementu a zpětnovazební kapacity. Do zpětnovazebního obvodu jsem přidal rezistor, který spolu se zpětnovazební kapacitou vytvoří dolní propust, jež omezí horní přenášený kmitočet od cca 24kHz. Následuje horní propust 1. řádu, složená z rezistoru R4 a kondenzátoru C8 s mezním kmitočtem cca 390Hz. Druhý zesilovač již zesiluje nízkoimpedanční signál a jedná se tedy o klasické invertující zapojení se zesílením přibližně 36dB. Jak můžeme vidět ve zpětné vazbě je opět RC člen omezující spektrum signálu od cca 24kHz. Toto omezení má své důvody: 1. omezuje nepotřebné spektrum signálu, 2. zlepšuje stabilitu celého zesilovače. Protože jsou zesilovače napájeny z nesymetrického zdroje, je pro zesilování střídavého signálu třeba vytvořit virtuální zem, neboli posunout stejnosměrnou složku na $\frac{1}{2} VCC$. Toto napětí je vytvořeno na děliči složeného z rezistorů R7 a R6 a posléze přivedeno na neinvertující vstupy operačních zesilovačů. Kondenzátor C1 slouží k odstranění stejnosměrné složky, R1 slouží pouze jako preventivní ochrana proti ESD (Electro Static Discharge). Rezistor R5 je preventivní ochrana výstupu OZ, pokud by došlo např. ke zkratu na vedení, a kondenzátor C10 odděluje stejnosměrnou složku signálu.



Obr. 4. 2 Schéma předzesilovače

4.1.3 DPS předzesilovače

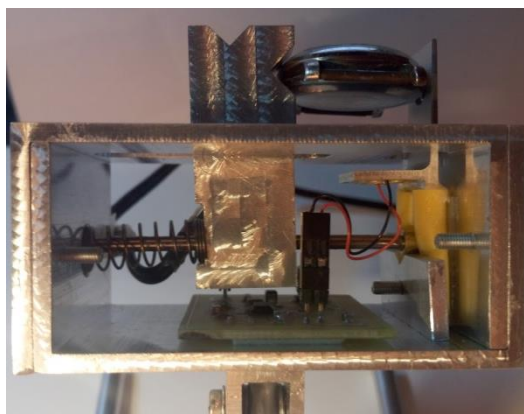
DPS byla vyrobena v domácích podmínkách fotocestou. Zvolena byla technologie SMT (Surface Mount Technology) z důvodu omezeného prostoru v konstrukci snímače a nižší časové náročnosti na výrobu a osazení.



Obr. 4. 3 Osazená DPS předzesilovače

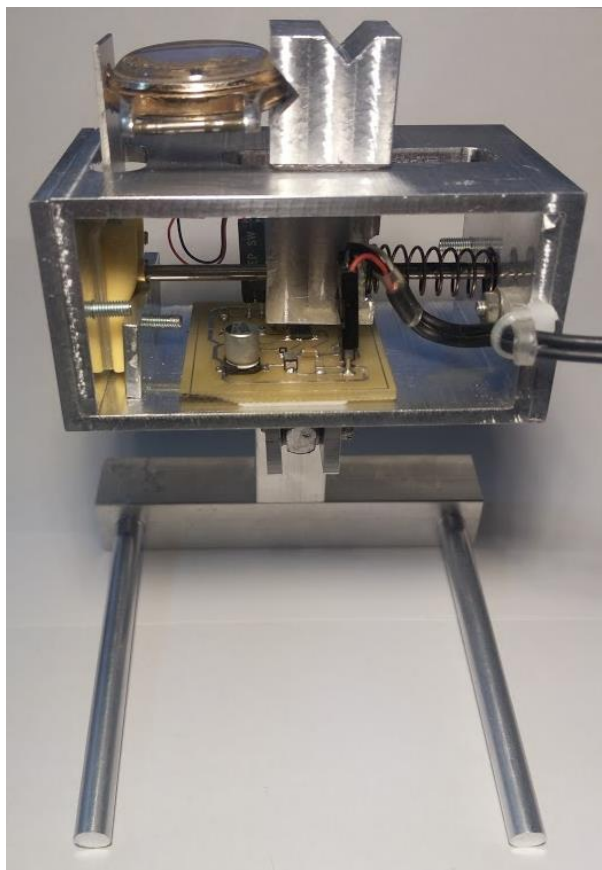
4.1.4 Mechanická konstrukce

Celá mechanická konstrukce je zhotovena z běžně dostupných hliníkových profilů. Výroba probíhala v domácí dílně pouze za pomoci pásové pily a stojanové vrtačky, kterou jsem úspěšně využil i jako horní frézku.



Obr. 4. 4 Detail konstrukce snímače

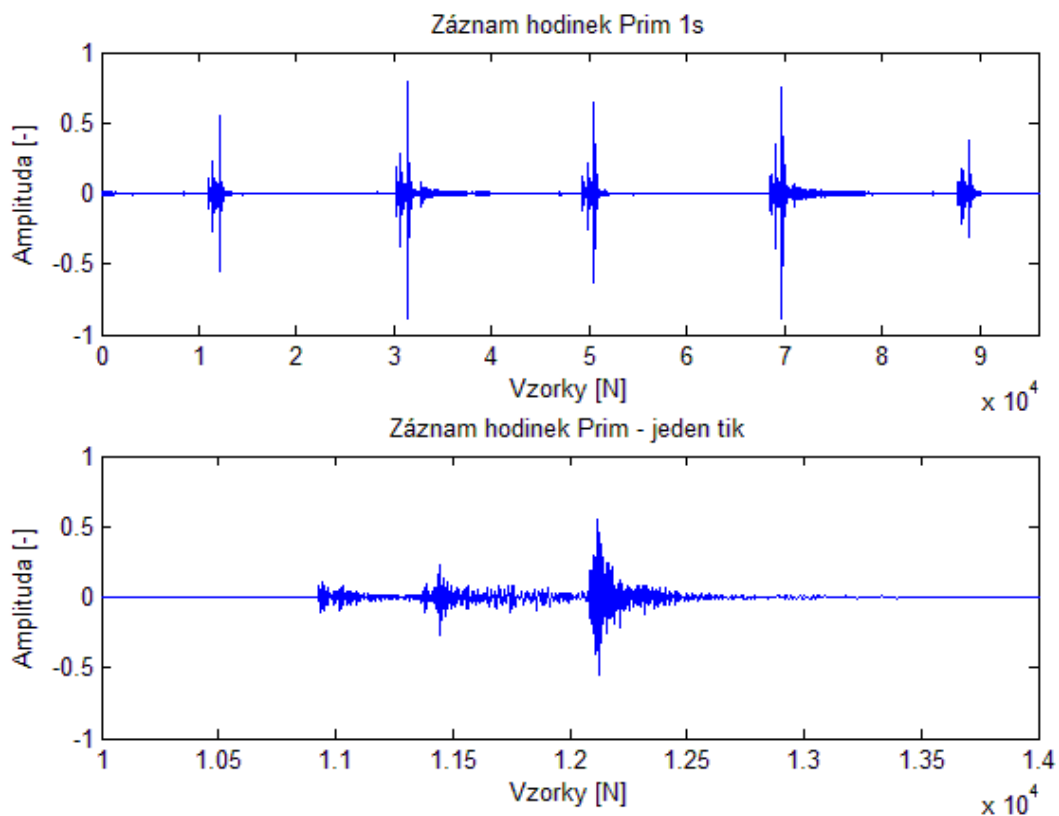
Na obrázku (Obr. 4.4) si můžeme prohlédnout připevnění piezokeramického elementu na hliníkový T profil, který souží pro přenos chvění z hodinového strojku na piezokeramický element. Spodní část T profilu je vložena do silikonové hadičky, která plní funkci filtru okolních vibrací. Tato silikonová hadička je připevněna k šasi měřicího přípravku, čímž je zajištěno upevnění měřicího systému.



Obr. 4. 5 Pohled na sestavený snímač hodinových tiků

4.2 Ověření funkce

Jak můžeme vidět na následujícím obrázku, signál není viditelně zatížen okolními ruchy a šumem, takže mohu konstatovat, že snímač pracuje velmi dobře.

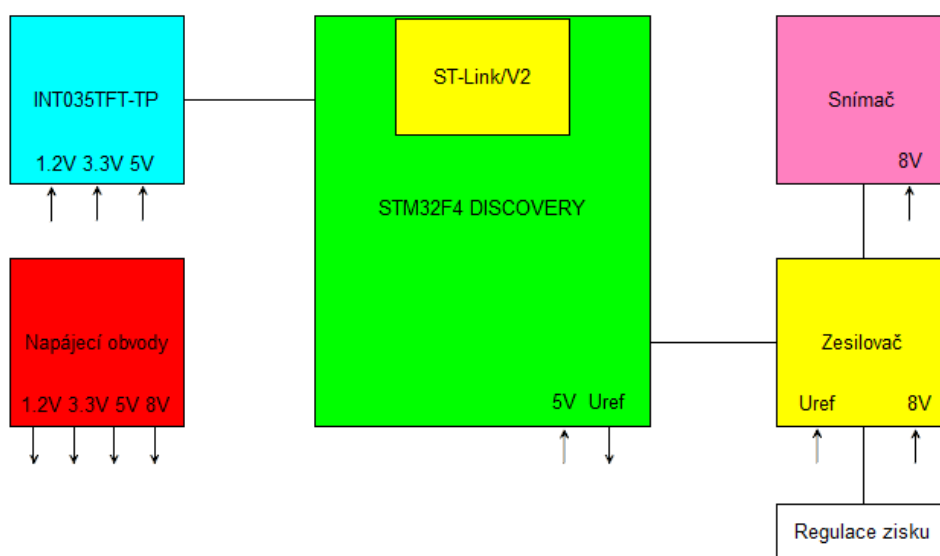


Obr. 4. 6 Signál z hodinek snímáný navrženým snímačem

5 NÁVRH ŘÍDÍCÍ ČÁSTI

V následujících částech této kapitoly je diskutován návrh řídicí části měřicího zařízení a volba jednotlivých komponent. Řídicí jednotka je základní částí celého zařízení. Mezi její úkoly patří zpracovat analogový audio signál, který musí být před zpracováním A/D převodníku nejprve zesílen na vhodnou úroveň a filtrován anti-aliasingovým filtrem, aby navzorkovaný číslicový signál odpovídal analogovému a nebyl degradován (ve smyslu překryvu spekter a limitace signálu). Následně jsou v procesoru s číslicovým signálem prováděny operace, které budou popsány v následující kapitole 6. Pro ovládání zařízení a interpretaci jeho výsledků je použit 3.5“ TFT display s integrovaným digitizérem.

Pro napájení řídicí části zařízení je použit externí zdroj o napětí cca 10 – 12V DC. Toto napětí je následně pomocí integrovaných stabilizátorů sníženo na potřebné úrovně.



Obr. 5. 1 Blokové schéma řídicí části

5.1 Řídicí procesor

5.1.1 Procesor STM32F407VGT6

Zvolený procesor byl představen firmou ST Microelectronic v druhé polovině roku 2011. Jedná se o ARM (Advancet RISC Maschine) procesor 32b architektury obsahující jádro Cortex M4F s jednotkou FPU (Floating Point Unit), která umožňuje výpočty s plovoucí desetinnou čárkou. Jeho výkon je 210DMIPS při maximálním taktu jádra 168MHz. Procesor

podporuje instrukční sadu Thumb-2 a také DSP (Digital Signal Processor), které budeme v práci využívat.

Některé základní vlastnosti procesorů STM32F4:

- 1MB Flash paměti
- 192(+4)kB SRAM
- FSM controller
- 3x 12b A/D převodník
- 2x 12b D/A převodník
- 12x 16b časovač
- 2x 32b časovač
- 2x PWM generátor
- 3x SPI, 3x I2C rozhraní
- 4x USART, 2x UART, 2x CAN rozhraní
- SWD a JTAG rozhraní
- USB 2.0 rozhraní
- 10/100 Ethernet
- 2x 8 kanálové DMA
- Generátor náh. čísel
- Jednotka pro výpočet CRC
- až 140 univerzálních pinů

5.1.2 Vývojový kit STM32F4 Discovery

Kompletní návrh včetně realizace měřicího zařízení byl proveden na vývojém kitu STM32f4 Discovery. Tento vývojový kit obsahuje výše zmíněný procesor, několik základních periférií a programátor ST-LINK/V2, který je připojený ke konektoru mini USB. Výhoda tohoto vývojového kitu spočívá v univerzálnosti, jelikož má všechny I/O piny vyvedeny na dvě dvouřadé konektorové lišty.

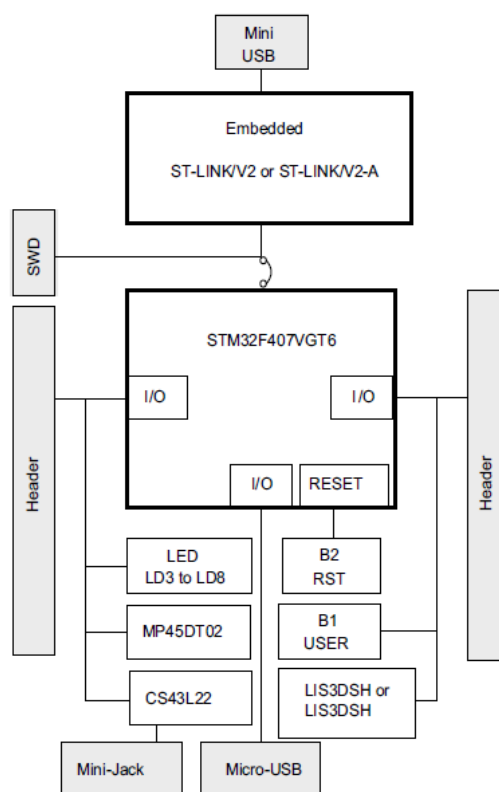
Základní periferie vývojového kitu STM32F4 Discovery:

- MP45DDT02 – mikrofon s digitálním výstupem
- CS43L22 – audio DAC s integrovaných zesilovačem v třídě D
- LIS302DL – tříosý akcelerometr s digitálním výstupem
- Čtyři LED diody připojené k GPIO
- Dva mikropsínače připojené k GPIO

- USB OTG rozhraní



Obr. 5. 2 Vývojový kit



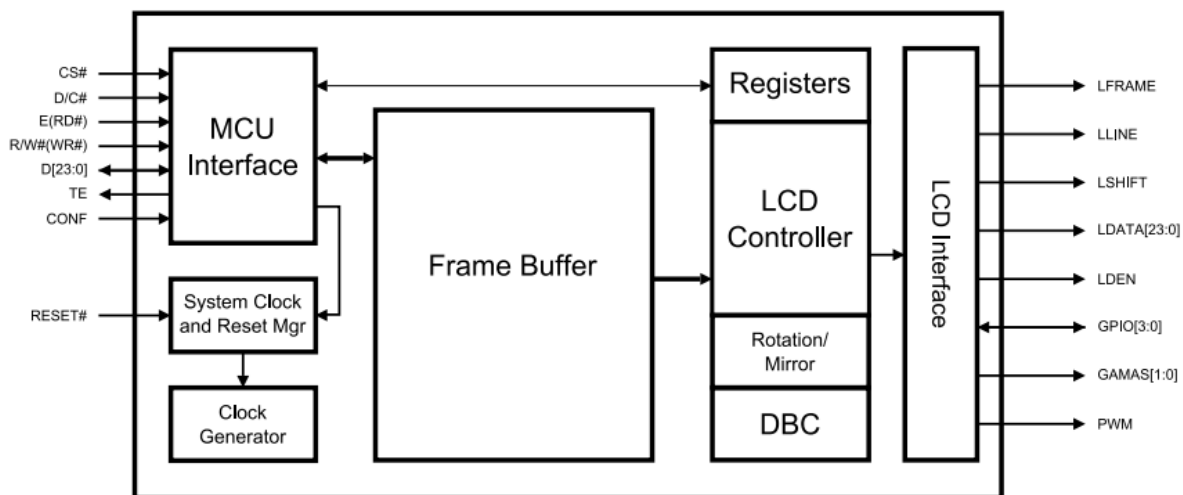
Obr. 5. 3 Blokové schéma vývojového kitu

5.2 TFT display

Pro vizualizaci naměřených hodnot je v měřicím zařízení použit barevný 3.5“ TFT display výrobce Displaytech s rozlišením 240x320 pixelů. Konkrétně se jedná o model INT035TFT-TP. Tento model byl vybrán, protože obsahuje řadič SSD1963 s integrovanou pamětí, ze které vyčítá obrazová data bez nutnosti externí obsluhy. Dále obsahuje rezistivní dotykovou plochu, kterou obsluhuje integrovaný obvod MAX11802. Display je schopen pracovat až se 24 bitovou barevnou hloubkou. Osobně jsem zvolil 16 bitovou hloubku – režim 565RGB a to proto, abych na datové vodiče TFT display vystačil s jedním portem procesoru.

5.2.1 SSD1963

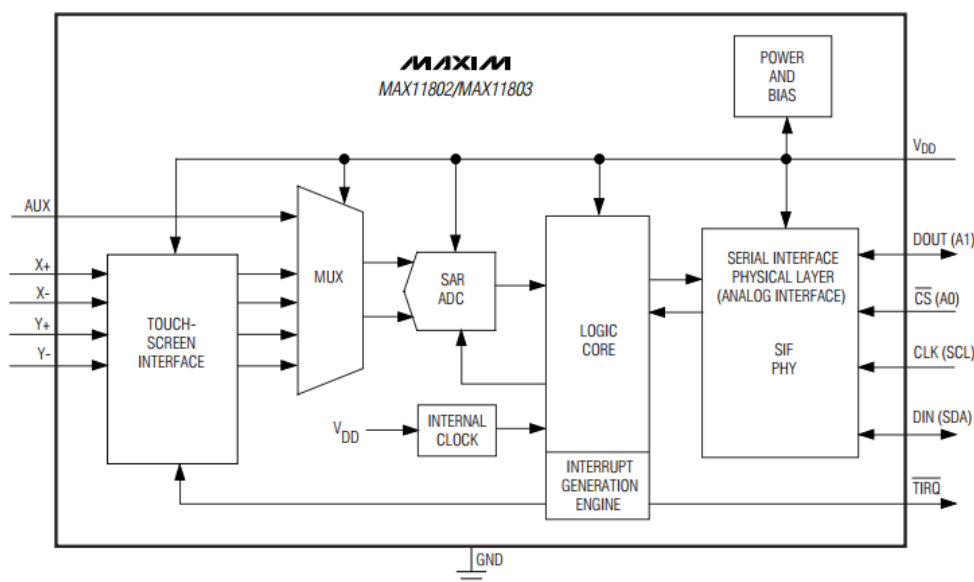
Integrovaný obvod SSD1963 je řadič TFT panelu, obsahující paměť o velikosti 1215 kB. Pro datovou komunikaci je využita paralelní sběrnice, která může být široká (8, 9, 12, 16, 18 nebo 24 bitů). Pro komunikaci mezi řadičem a procesorem je možno využít rozhraní Intel 8080, tak i 6800 od Motoroly. Řadič umožňuje velké množství uživatelsky nastavitelných funkcí.



Obr. 5. 4 Blokové schéma grafického řadiče SSD1963

5.2.2 MAX11802

Display je vybaven rezistivní dotykovou plochou. Pro odečtení polohy dotyku je na DPS TFT displeje integrován obvod MAX11802. Tento integrovaný obvod odečítá polohu dotyku ve dvou osách, kterou zpracovává 12b A/D převodníkem. Zpracovaná data následně odesílá do řídicího procesoru pomocí SPI rozhraní. Obvod také obsahuje výstup pro generování externího přerušení, který reaguje na dotyk plochy sestupnou hranou.



Obr. 5. 5 Blokové schéma obvodu MAX11802

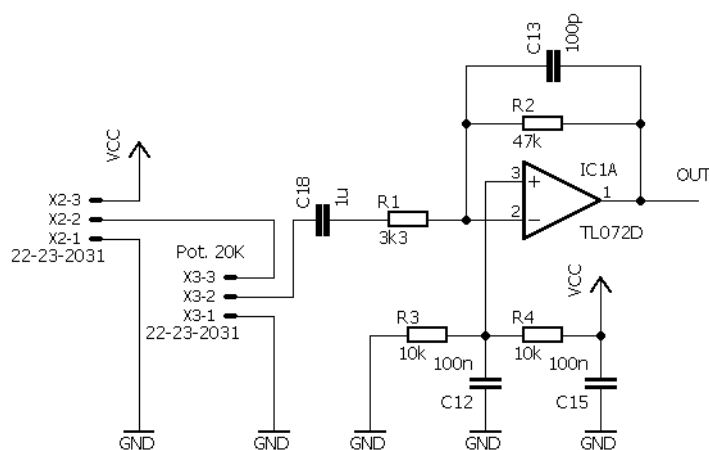
5.3 Vstupní signálové obvody

V této části práce budou popsány obvody upravující samotný signál před A/D převodem. Tyto obvody se skládají ze zesilovače, aniti-aliasingového filtru a ochrany vstupu A/D převodníku.

5.3.1 Zesilovač

Příchozí signál z předzesilovače snímače je nutné před A/D převodem upravit na úroveň, která bude vhodná pro vstup A/D převodníku. Tato úroveň je v našem případě 0 – 3V (V_{ref}), jelikož je pro převod použit integrovaný A/D převodník v procesoru.

Zesilovač je realizován jako invertující zapojení za použití běžného unipolárního operačního zesilovače TL072. Maximální zesílení zesilovače při vytočeném potenciometru na maximum je dáno poměrem zpětnovazebního rezistoru R2 a rezistoru R1. To jest přibližně 23dB. Kondenzátor C18 odděluje stejnosměrnou složku od vstupu zařízení, která je dána děličem napětí složeného z rezistorů R3 a R4. Toto napětí ($\frac{1}{2}V_{CC}$) je přiváděno na neinvertující vstup proto, aby vytvořilo virtuální zem (posun DC složky na $\frac{1}{2} V_{CC}$), jelikož OZ napájíme nesymetrickým napětím VCC. Kondenzátor C13 spolu s rezistorem vytváří dolní propust na cca 34kHz. Tím zesilovač částečně vykompenzujeme proti rozkmitání a zároveň omezíme šířku pásma signálu.



Obr. 5. 6 Zesilovač řídicí části

5.3.2 A/D převod

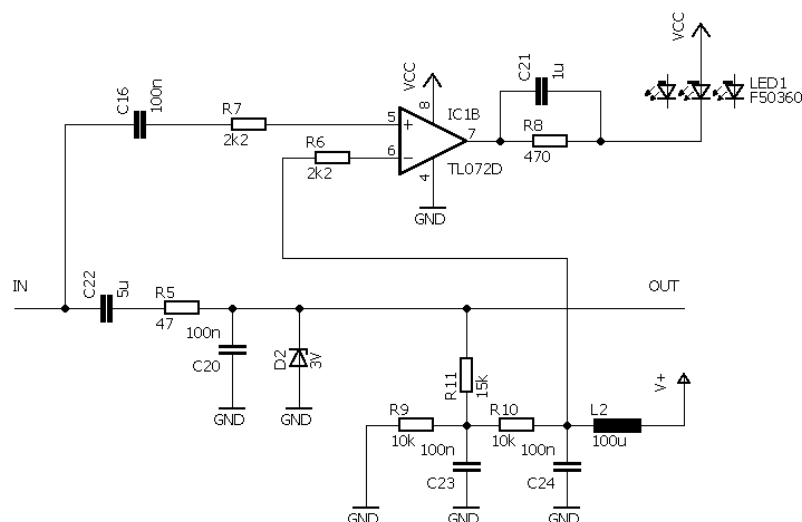
Procesor STM32F407 obsahuje tři 12b A/D převodníky s postupnou aproximací. Každý převodník má k dispozici až 12 kanálů. V měřicím zařízení používám ADC1 na 1. kanálu. Vzorkovací kmitočet jsem zvolil 100kHz, jelikož jej budu využívat i jako časovou základu pro přesnou detekci pulzů z mechanických hodinových strojů. Následující schéma obsahuje čtyři dílčí části nutné k zajištění správného A/D převodu a ochraně vstupu A/D převodníku.

Vstupní signál má posunutou stejnosměrnou složku na velikost $\frac{1}{2}V_{CC}$. Nejprve je třeba tuto stejnosměrnou složku oddělit kondenzátorem C22. Následně je signál přiveden na RC článek, který tvoří DP (Dolní Propust) prvního řádu, jejíž mezní frekvence je cca 33kHz. Tato propust tvoří anti-aliasingový filtr. Jelikož je šířka signálu omezena DP i v zesilovači na cca 33kHz a $F_s/2 = 50\text{kHz}$, považuji filtraci možného aliasingu za dostačující.

Rozkmit zesíleného signálu může být teoreticky až -8V dle napájecího napětí V_{CC} OZ. Je tedy nutné ochránit A/D převodník před poškozením napěťovými špičkami. Tuto ochranu obstarává zenerova dioda s průrazným napětím 3V.

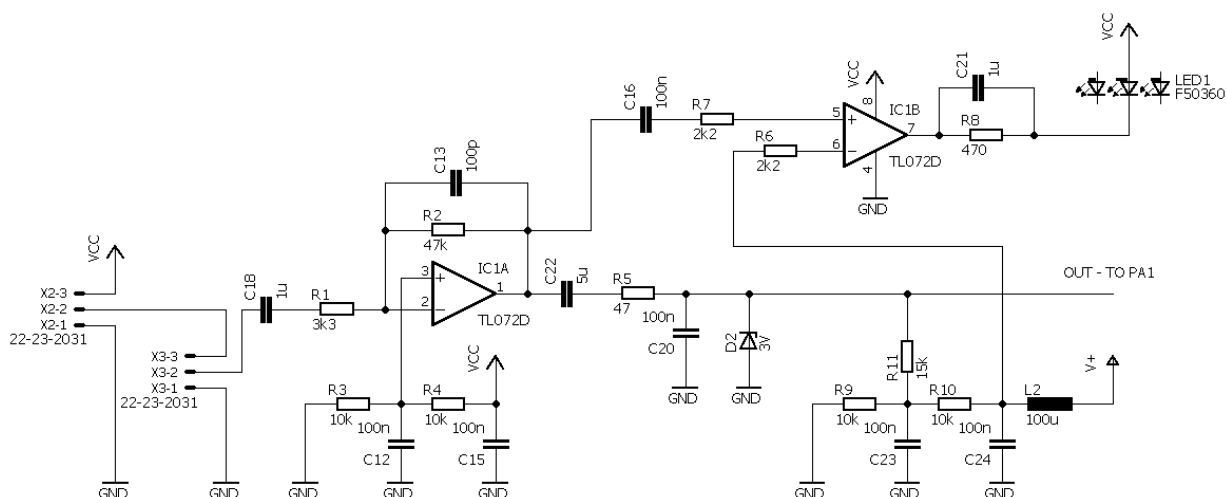
Ted' nám již zbývá signál navzorkovat, ovšem je tu malá komplikace, jelikož A/D převodník dokáže zpracovávat pouze nesymetrický signál v rozmezí 0 – U_{ref} (3V). Toto jsem vyřešil tak, že jsem opět vytvořil virtuální zem signálu tzn. posunul stejnosměrnou složku signálu na úroveň $\frac{1}{2} U_{ref}$ pomocí děliče složeného z rezistorů R9 a R10. Rozkmit amplitudy je tedy maximálně $\pm U_{ref}$. Referenční napětí A/D převodníku je získáno z vývojového kytu STM32F4 Discovery a je pouze filtrováno přes DP složenou z LC filtru, který odstraní rušivé napětí a zajistí tak lepší stabilitu A/D převodu.

Jako poslední část tohoto řetězce je jednoduchý komparátor tvořený druhou polovinou OZ TL072. Ten má za úkol porovnávat velikost amplitudy výstupního signálu s referenčním napětím. Pokud tedy velikost amplitudy střídavého signálu překročí hodnotu U_{ref} , komparátor překloupí výstupní napětí a rozsvítí LED diodu. Jelikož jsou pulzy velice krátké, je překlenut rezistor R8, který omezuje proud LED diodou kondenzátorem C21, který zajistí, že LED diodou proteče špičkově několika násobný proud a tím se zvětší její jas.



Obr. 5. 7 Komparátor řídící části

5.3.3 Celkové schéma zapojení vstupních obvodů



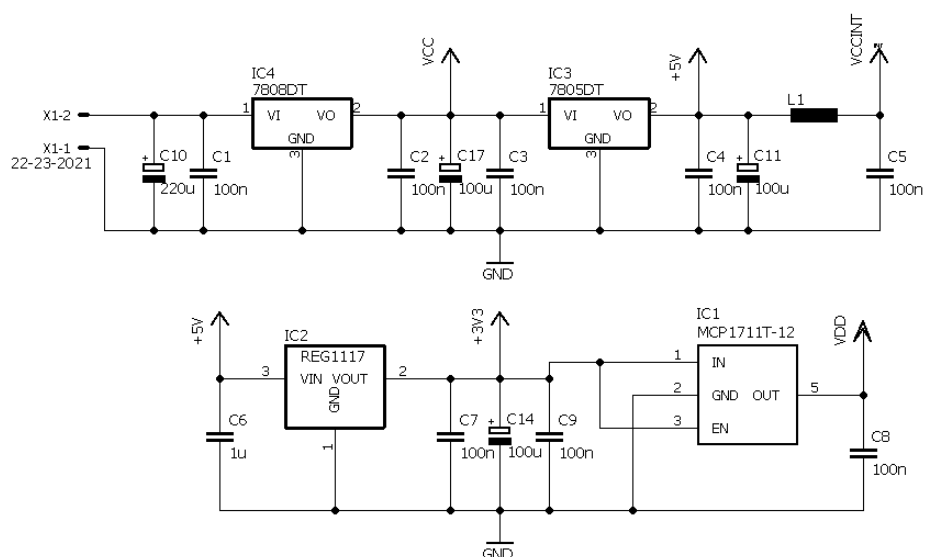
Obr. 5. 8 Celkové schéma zapojení signálové části

5.4 Napájecí část

K napájení elektroniky měřícího zařízení je třeba několik úrovní napájecího napětí. Tato napětí jsou získána pomocí monolitických integrovaných stabilizátorů. Celé zařízení je napájeno ze stejnosměrného externího adaptéru o výstupním napětí v rozmezí 10 – 12V. Následuje první monolitický stabilizátor, který vytváří první úroveň napájecího napětí VCC 8V, která je použita pro napájení operačních zesilovačů v předzesilovači snímače a v zesilovači řídící jednotky. Toto napětí je dále pomocí druhého monolitického stabilizátoru

použito k vytvoření druhé napájecí úrovně 5V. Tato napájecí úroveň slouží k napájení vývojového kytu STM32F4 Discovery a podsvícení TFT displeje. Při prvotních pokusech jsem zjistil, že PWM regulace intenzity podsvícení není dostatečně odrušena a ruší 5V napájecí větev. Rozhodl jsem se tedy pro dodatečnou filtraci pomocí LC filtru (L1 a C4). Následující úrovně 3.3V a 1.2V slouží k napájení TFT displeje. Monolitické stabilizátory jsou blokovány keramickými kondenzátory 100n.

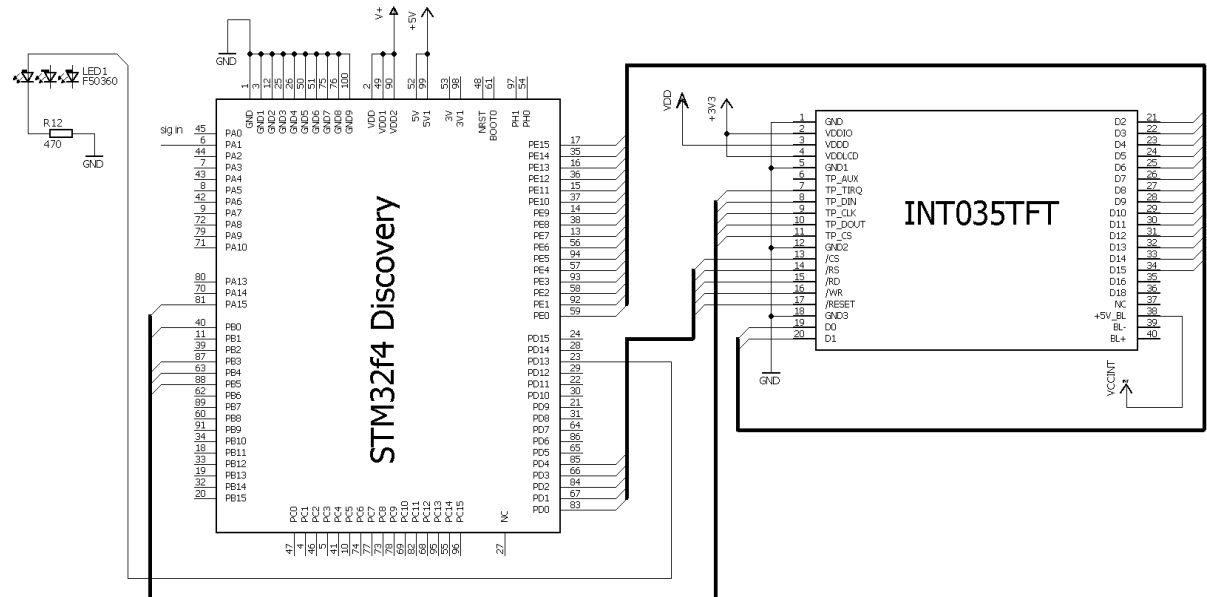
Minimální napájecí napětí z externího adaptéru 10V DC je nutno dodržet, jelikož první stabilizátor je běžný typ XX7808 a úbytek napětí na jeho výkonových tranzistorech (Dropout) činí cca 1.5V. Maximální napětí je v našem případě (na rozdíl od maximálního povoleného 35V) dáno maximálním ztrátovým výkonem na tomto stabilizátoru, který je schopen vyzářit do prostoru. Celé zařízení má odběr cca 230mA, ze kterých ovšem spotřebovává 150mA podsvícení TFT displeje.



Obr. 5. 9 Schéma zapojení napájecích obvodů

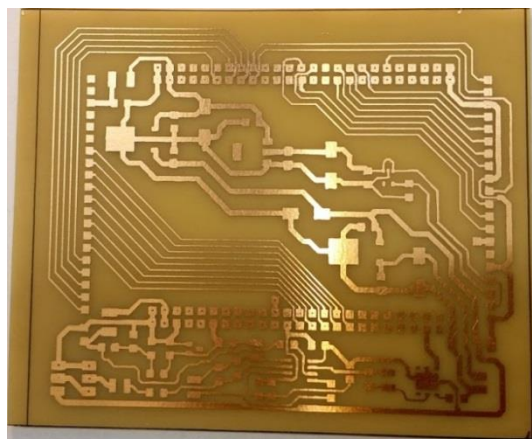
5.5 Konstrukce řídicí části

5.5.1 Schéma zapojení digitální části



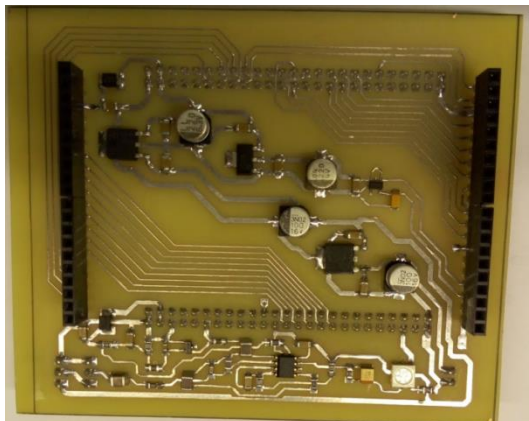
5.5.2 DPS

Při návrhu DPS jsem si stanovil podmínku navrhnout jednostrannou DPS.



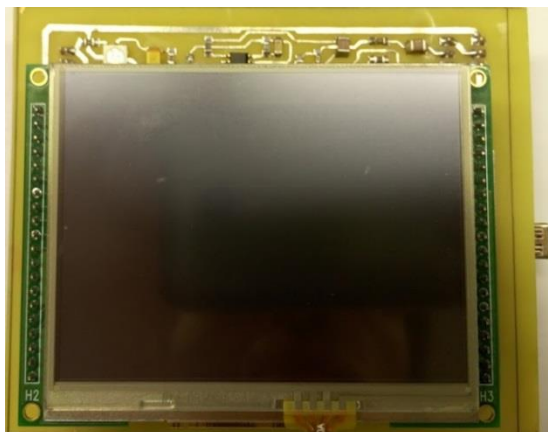
Obr. 5. 10 Neosazená DPS řídicí části

5.5.3 Osazení DPS



Obr. 5. 11 Osazená DPS řídicí části

5.5.4 Sestavení řídicí části



Obr. 5. 12 Pohled shora na sestavenou řídicí část



Obr. 5. 13 Pohled z boku na sestavenou řídicí část

6 PROGRAM MIKROKONTROLERU

6.1 Vývojové prostředí

O celkový chod měřicího zařízení se stará 32b ARM procesor STM32F407VGT6. Ten je naprogramován skrze programátor ST-LINK/V2, který je integrován přímo na DPS vývojového kytu STM32F4 Discovery. Pro psaní zdrojového kódu v jazyce C bylo použito vývojové prostředí AC6 Systém Workbench, které je postaveno na známém vývojovém prostředí Eclipse, je dostupné zdarma a nemá žádná omezení.

STM32F407VGT6 obsahuje velké množství periférií, které je nutno pečlivě nastavit, aby nedošlo například ke kolizi při nastavení více periférií na jeden GPIO pin. Tuto práci usnadňuje program CubeMX, který umožňuje manuální nastavení periférií včetně systémových hodin, jejich vizualizaci a sledování spotřeby. Pomocí tohoto programu je také možné přímo vygenerovat projekt, který ovšem k nastavení periférií využívá abstraktní vrstvu HAL vyvinutou výrobcem procesoru ST Microelectronic. Tato vrstva má za úkol sjednotit nastavování periférií pro různé rodiny procesorů od ST Microelectronic.

6.2 Popis programu

V rámci této práce bylo nejprve nutné vytvořit knihovny obsluhující použité periferie. V následující části budou popsány pouze funkce z knihoven, které demonstrují funkci měřicího zařízení.

mian.c

Souboru main.c obsahuje hlavní funkci main, ve které jsou volány počáteční inicializace jednotlivých periférií včetně konfigurace systémových hodin. Následně je spuštěn TIMER2, který se stará o taktování AD převodníku o frekvenci 100kHz. Poté je spuštěn DMA přenos, který obsluhuje AD převodník v režimu kruhového bufferu o velikosti 2048b. Jako poslední je spuštěna SPI sběrnice určená pro komunikaci s dotykovou plochou. V hlavní smyčce funkce main je volána funkce Vibrograf_Start() z následujícího souboru vibrograf.c

vibrograf.c

Tato knihovna obsahuje funkce řídící celý chod měřicího zařízení.

```
void HAL_ADC_ConvHalfCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc);
```

Funkce je volána, pokud dojde k naplnění první poloviny kruhového bufferu a nastavuje flag pro naplnění 1. bufferu.


```
void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc);
```

Funkce je volána, pokud dojde k naplnění druhé poloviny kruhového bufferu a nastavuje flag pro naplnění 2. bufferu.

```
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim);
```

Opět se jedná o funkci vyvolanou přerušením. Tentokrát přerušením od timeru2. Tato funkce slouží pouze k počítání reálného času určeného pro interval výpočtu průměrných hodnot.

```
void EXTI0_IRQHandler(void);
```

Externí přerušeni vyvolané sestupnou hranou při stisku dotykové plochy. Nastavuje flag pro zastavení měření a detekci dotyku.

```
void Vibrograf_Start(void);
```

V této funkci se rozhoduje, zdali se spustí měření nebo vstoupí do menu. Pokud je flag „stav = STAV_RUN“, načtou se data z aktuálně naplněného bufferu a vstoupí se do následující funkce Vypocet_Obalka() s parametrem první pozice v bufferu. Pokud není flag „stav = STAV_RUN“, čeká se na detekci dotyku, popř. se rovnou volá funkce Volba_Menu() s parametrem aktuální pozice dotyku.

```
void Vypocet_Obalka(uint16_t n_buff)
```

Jak již ukazuje název funkce, jedná se o funkci, ve které se provádí výpočet obálky signálu. K těmto výpočtům jsou použity funkce z CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard) knihovny, které využívají DSP instrukční sadu procesoru STM32F407VGT6. Matematický postup operací v této části je popsán v kapitole 3.3. Nastíním tedy pouze, jak tato funkce pracuje. Nejprve je vybrán naplněný buffer, ke kterému jsou vhodně doplněny nuly pro následný výpočet komplexní rychlé Fourierovy transformace. Pro výpočet CFFT je použita funkce z knihovny CMSIS `arm_cfft_f32(&arm_cfft_sR_f32_len1024, Input, FFT, 1);`

Následně je vynulována pravá strana spektra a upravený Fourierův obraz převeden zpět do diskretní oblasti pomocí IFFT (inverzní rychlé Fourierovy transformace). K tomuto kroku je použita stejná funkce z knihovny CMSIS ale s nastaveným flagem pro IFFT.

Dalším krokem je vytvoření obálky signálu, která je definována jako absolutní hodnota reálné a imaginární části. Jelikož po vytvoření obálky signálu ještě provádím mocninou transformaci, spojil jsem tyto dva kroky dohromady. Nedělám tedy absolutní hodnotu reálného a imaginárního signálu, kterou bych následně umocňoval, ale pouze součet umocněné reálné a umocněné imaginární části signálu (součet čtverců). K tomu využívám funkci opět z knihovny CMSIS `arm_cmplx_mag_squared_f32(Input, Output, FFT_SIZE);`

Poslední úprava signálu v této funkci spočívá ve filtraci obálky signálu. Využita je funkce FIR filtru z knihovny CMSIS. Koeficienty FIR filtru byly exportovány z Matlabu, kde byl v FDATool navržen filtr DP (dolní propust) s mezním kmitočtem 1kHz o řádu 50.

```
arm_fir_f32(&S, inputF32+(i*blockSize),outputF32+(i*blockSize), blockSize);
```

```
void Detekce_Tik(uint32_t tres)
```

Funkce sloužící k detekci tiků. V této funkci procházím pole hodnot výše předzpracovaného signálu a inkrementuji globální proměnnou `n_vzorek`. Je-li překročena úroveň proměnné TH (threshold), zaznamenám hodnotu `n_vzorek` a následně ji vynuluji pro inkrementaci, která se bude provádět s každým novým vzorkem, nežli bude detekován další tik. Ale nebudeme předbíhat, jelikož další tik se objeví například pro hodiny s 5 tiky za sekundu až po cca dvaceti naplněných bufferech ($F_s/1024/5$). Nyní musíme určit počet kyvů stroje za hodinu (resp. celý výpočet provádím s počtem vzorků mezi jednotlivými tiky a na kyvy převádím při výpisu na TFT). To můžeme provést manuálně skrze TFT a jeho dotykovou plochu nebo automaticky. Automatické určení probíhá na základě průměrování počtu vzorků mezi jednotlivými tiky po dobu deseti tiků s tím, že největší a nejmenší vylučuji. Poté je průměr porovnán ve funkci `Porovnej_Vzorek()` a podle toho, do které tolerance zapadne, je mu přiřazena tabulková hodnota. Funkce detekce ještě obsahuje část, která po detekci znemožní po dobu 20% délky mezi jednotlivými tiky detekci. Tím zajistím, že nebude detekován stejný tik vícekrát.

```
void Vypocet_vibrograf()
```

V následující funkci je předně prováděn výpočet zpoždění nebo zrychlení stroje a výpočet velikosti kulhání. Primární funkcí měřicího přístroje je schopnost vypočtení aktuální odchylky v počtu vzorků od předem daného počtu vzorků jednoho kyvu, na něž je daný stroj konstruován. Jelikož oscilátor (setrvačka) hodinového stroje vyvolá tik v každém směru pohybu a ty nejsou rovnoměrné (viz. kulhání), je celková odchylka dána pohybem oscilátoru tam a zpět. Sčítám tedy zaznamenaný počet vzorků dvou po sobě jdoucích tiků a odečtu jej od dvojnásobku předem stanoveného počtu vzorků, odpovídajícího pro danou konstrukci hodinového stroje. Tím získám rozdíl vzorků odpovídající odchylce stroje, který již stačí přepočítat na čas.

Pro zjištění kulhání stroje od sebe odečítám minulý počet vzorků mezi tiky a aktuální počet vzorků mezi tiky. Tím získám diferenci mezi dobou otočení oscilátoru stroje na jednu a druhou stranu. V ideálním případě pokud hodinový stroj nekulhá, je difference rovna nule.

Pro vytvoření grafu na TFT sčítám jednotlivé odchylky, čímž získám směrnici odchylky, ke které přičítám aktuální hodnotu kulhání a výsledek zapisuji jako bod na TFT display. Hodnotu odchylky a kulhání násobím zvlášť konstantou, kterou nastavuji rozlišení odchylky a kulhání na TFT display. Při dosažení horní nebo spodní hranice okna grafu pokračuje průběh od opačného konce.

```
void Prumer_hodnoty()
```

Výpočet průměrné odchylky je nutný, jelikož nám zajišťuje stabilitu výsledných hodnot, které jsou mezi jednotlivými tiky často velmi proměnlivé. Funkce je velice primitivní. Po dobu, kterou si předem zvolíme, provádí sčítání jednotlivých odchylek a kulhání, které po uplynutí stanovené doby podělí jejich počtem. Tyto hodnoty následně aktualizuje na TFT display. Tato funkce ještě umožňuje v režimu COSC zaznamenávat maximální, minimální a průměrné hodnoty odchylky a kulhání pro měření pěti poloh hodinového stroje.

```
void Reset_Vibrograf(void)
```

Funkce, která po zadání nového parametru smaže vše z TFT, zavolá funkci Null_Promenne() a Vibrograf_Start().

```
void Null_Promenne(void)
```

Funkce nulující proměnné.

```
int Read_Promenne(set_par_name param)
```

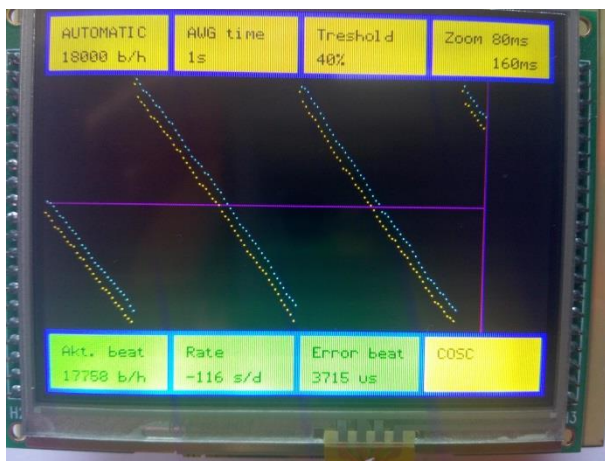
```
void Set_Promenne(set_par_name param, uint32_t value)
```

```
int Read_Cosc(uint8_t poradi, uint8_t typ, uint8_t hodnota)
```

Tyto tři funkce slouží pro přenos hodnot proměnných mezi knihovnami vibrograf.c a menu.c.

6.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské prostředí obsahuje na ploše TFT displeje pět žlutých dotykových tlačítek, která slouží pro vstup do jednotlivých listů menu. Zbývá tři tlačítka jsou zelená a slouží pro zobrazení měřených parametrů.



Obr. 6. 1 Hlavní plocha měřicího přístroje

MODE Beat

Pro možnost měření odchylky hodinek je třeba znát referenční hodnotu, se kterou jednotlivé hodnoty porovnáváme. Ta je zadávána právě v tomto menu. Na volbu máme režim „AUTOMATIC“, který je schopen tuto referenční hodnotu pomocí vyhledávání nejbližší hodnoty určit sám. Když je hodinový stroj hodně rozladěn, použijeme manuální režim, kde si hodnotu zvolíme dle daného typu hodinového stroje.



Obr. 6. 2 Nastavení počtu tiků za hodinu

AVG Time

Jelikož mají měřené hodnoty mezi jednotlivými tiky velký rozptyl, je třeba tyto hodnoty průměrovat. V tomto menu máme možnost volby času, po který chceme průměrovat výsledné hodnoty jednotlivých měření.



Obr. 6. 3 Nastavení doby počítání průměrných hodnot

Threshold

Jak již název napovídá, jedná se o nastavení úrovně detekce prahu tiků. Její rozsah je 0 – 100%. Maximální hodnota amplitudy signálu je po jeho zpracování přepočtena na %.



Obr. 6. 4 Nastavení detekční úrovně threshold

Zoom

Toto je velice užitečná funkce, jelikož provádíme měření hodinových strojů různé jakosti a různého stavu. Pro precizní nastavení jakostního hodinového stroje nastavíme vhodný menší

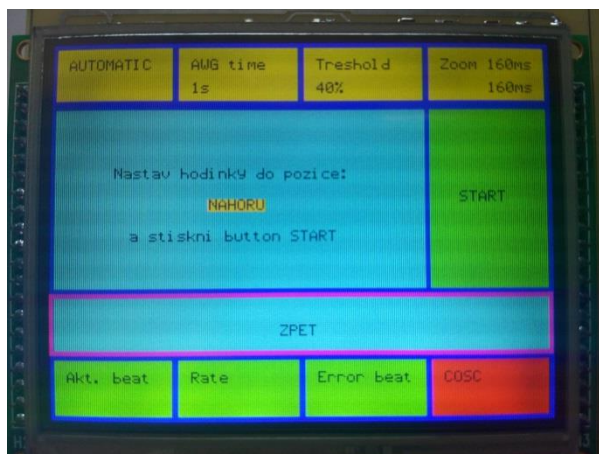
Y zoom, díky kterému můžeme v grafické podobě pozorovat i velmi malé odchylky setrvačky. Další možností je samostatná regulace zoomu kulhání stroje. To nám umožní detailní odhalení i drobných závad na setrvačce hodinového stroje.



Obr. 6. 5 Nastavení rozlišení měřených odchylek

COSC

Poslední volbou menu je položka COSC. Pomocí této položky provádíme měření stroje v pěti polohách s nastavitelnou dobou měření dle nastavené hodnoty v AWG Time. Jedná se pouze o demonstraci funkce, jelikož certifikace COSC popsaná v kapitole 1.3.5 vyžaduje splnění daných kritérií.



Obr. 6. 6 Menu měření COSC

Po dokončení měření hodinek v pěti polohách jsou zobrazeny výsledné hodnoty. Ty zahrnují minimální, maximální a průměrné hodnoty denní odchylky a kulhání.

AUTOMATIC 18000 b/h	AUG time 4s	Threshold 40%	Zoom 160ms 160ms
Výsledky COSC měření:			
Pozice:	Rate [s/d] min - max - avg		
	Error beat [us] min - max - avg		
NAHORU	-212 -93 -151	3070 4710 3926	
VLEVO	-205 -77 -147	3200 4410 3908	
VPRAVO	-195 -74 -142	2870 4440 3405	
DOLU	-193 -69 -134	3390 4390 3788	
CELNE	-210 -76 -148	2890 4580 3770	
Prumer:	-144	3759	
Akt. beat 17805 b/h	Rate -148 s/d	Error beat 3770 us	COSC

Obr. 6. 7 Výsledné hodnoty měření COSC

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V následující části jsou vyobrazena jednotlivá měření pěti mechanických hodinek různého stavu. Měření probíhalo v pěti různých polohách, přičemž byla pro každou polohu zaznamenána plocha TFT displeje, která vyobrazuje graf chodu hodinového stroje, automaticky detekovaný počet úderu za hodinu, aktuální počet úderů za hodinu, průměrnou denní odchylku a průměrnou velikost kulhání. Průměrné hodnoty byly z intervalů o délce 10s.



Obr. 7. 1 Fotografie analyzovaných mechanických hodinek

7.1 Hodinový stroj PRIM

Pozice	Denní odchylka [s/d]	Kulhání [us]
NAHORU	-10	336
VLEVO	-58	1143
VPRAVO	-101	300
DOLU	+24	348
ČELEM	-66	891

Tab. 7. 1 Naměřené hodnoty hodinek Prim



Obr. 7. 2 Průběh chodu hodinek Prim v poloze: nahoru, vlevo, vpravo, dolů, čelem

Hodinky ve všech polohách kromě polohy „DOLU“ vykazují zrychlený chod a je nutné je kalibrovat. Kulhání je pod běžnou tolerancí 2 ms, což značí dobrý stav setrvačky a kroku. Proměnlivou amplitudu setrvačky způsobuje nejspíše závada hnacího ústrojí.

7.2 Hodinový stroj POBEDA

Pozice	Denní odchylka [s/d]	Kulhání [us]
NAHORU	-146	3921
VLEVO	-151	4115
VPRAVO	-218	4623
DOLU	-130	1255
ČELEM	-249	3956

Tab. 7. 2 Naměřené hodnoty hodinek Pobeda



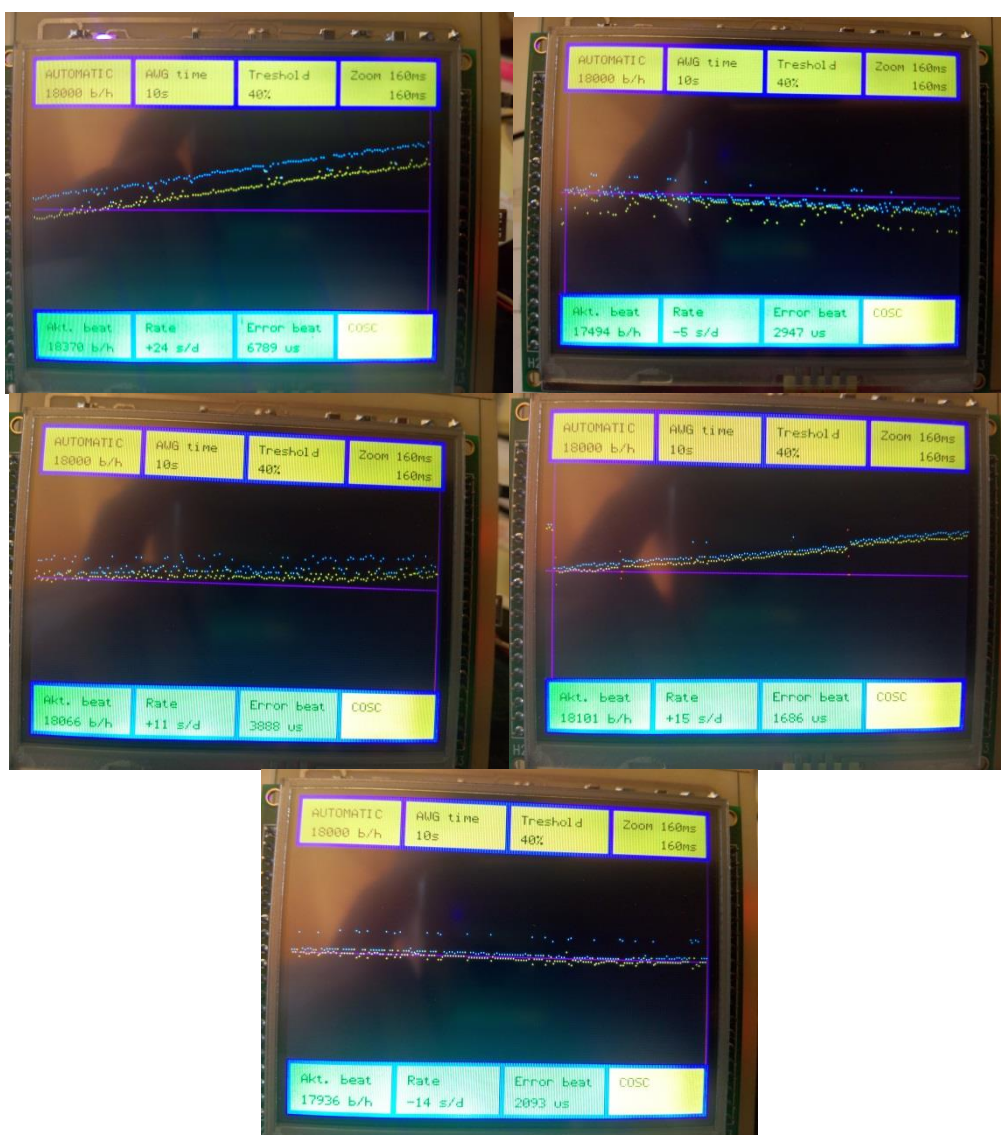
Obr. 7. 3 Průběh chodu hodinek Pobeda v poloze: nahoru, vlevo, vpravo, dolu, čelem

Hodinky vykazují ve všech polohách zrychlený chod a je nutné je kalibrovat. Kulhání je nad běžnou tolerancí 2 ms, avšak nevykazuje nerovnoměrný chod.

7.3 Hodinový stroj RAKETA

Pozice	Denní odchylka [s/d]	Kulhání [us]
NAHORU	+24	6789
VLEVO	-5	2947
VPRAVO	+11	3888
DOLU	+15	1686
ČELEM	-14	2093

Tab. 7. 3 Naměřené hodnoty hodinek Raketa



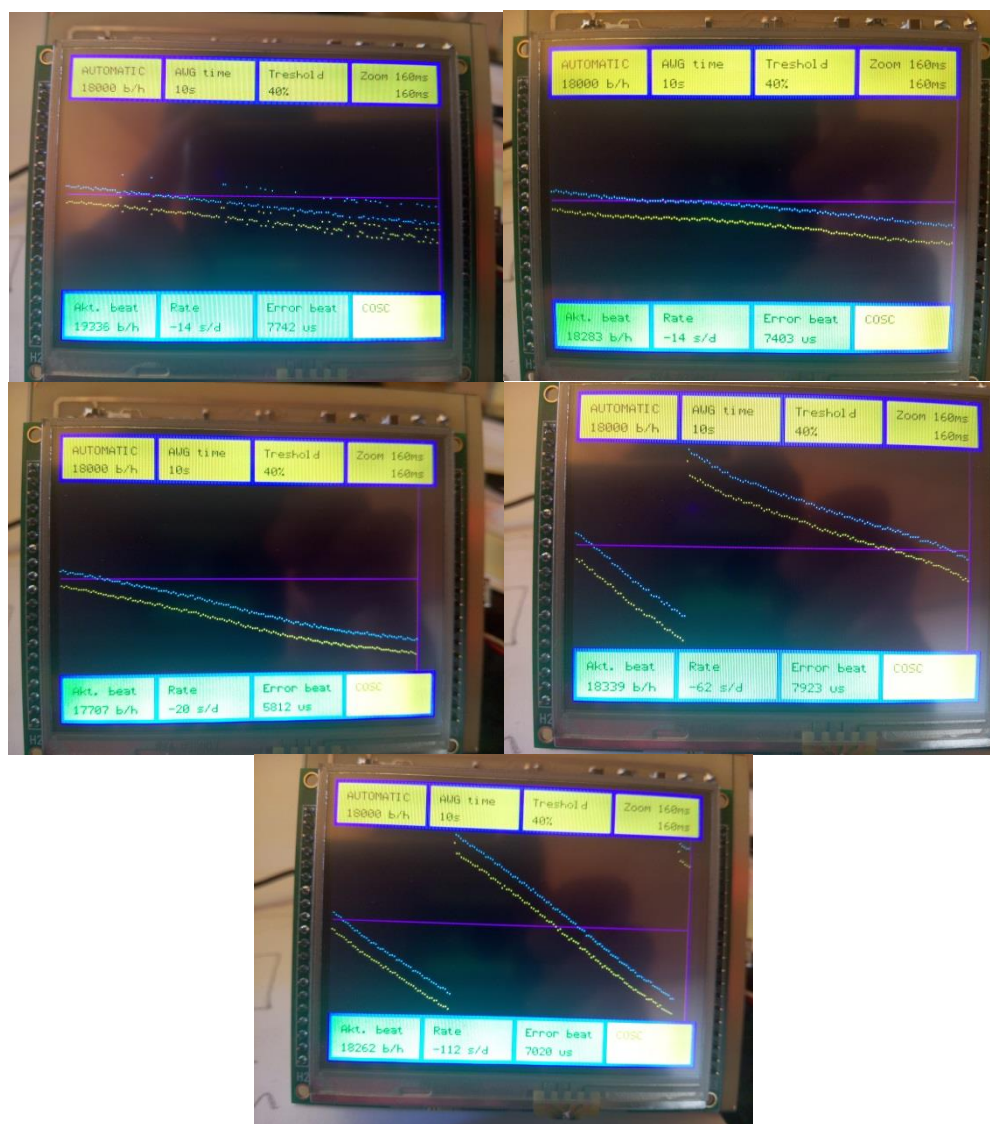
Obr. 7. 4 Průběh chodu hodinek Raketa v poloze: nahoru, vlevo, vpravo, dolu, čelem

Hodinky vykazují ve všech polohách přijatelnou odchylku, Ovšem z grafů je patrné, že hodinový stroj má nejspíše nečisté díly a je třeba vyčistit.

7.4 Hodinový stroj PRIM

Pozice	Denní odchylka [s/d]	Kulhání [us]
NAHORU	-14	7742
VLEVO	-14	7403
VPRAVO	-20	5812
DOLU	-62	7923
ČELEM	-112	7020

Tab. 7. 4 Naměřené hodnoty hodinek Prim



Obr. 7. 5 Průběh chodu hodinek Prim v poloze: nahoru, vlevo, vpravo, dolu, čelem

Hodinky vykazují ve všech polohách zrychlený chod. Z grafu je patrné, že hodinovému stroji kolísá amplituda setrvačky To je zapříčiněno špatným přenosem hnací síly.

7.5 Hodinový stroj POBEDA

Pozice	Denní odchylka [s/d]	Kulhání [us]
NAHORU	+16	3014
VLEVO	+3	3611
VPRAVO	-25	2933
DOLU	+2	2915
ČELEM	-16	3608

Tab. 7. 5 Naměřené hodnoty hodinek Pobeda



Obr. 7. 6 Průběh chodu hodinek Prim v poloze: nahoru, vlevo, vpravo, dolu, čelem

Hodinky vykazují ve všech polohách přijatelnou odchylku. Z grafů je ovšem patrné, že hodinový stroj trpí špatným přenosem hnací síly na setrvačku, jelikož vykazuje kolísání amplitudy.

8 ZÁVĚR

V teoretické části práce je rozebrána problematika chodu mechanických hodinových strojků, která zahrnuje popis základních principů funkcí mechanických hodin, nastínění vlivů ovlivňujících jejich chod včetně následné kompenzace a popis jednotlivých ústrojí, ze kterých se stroj mechanických hodin skládá. Dále teoretická část popisuje možnosti a metody snímání akustických signálů.

Ve třetí části je pak teoreticky popsáno vhodné předzpracování zaznamenaného akustického signálu pro následnou detekci jednotlivých tiků hodinových strojů. Toto předzpracování je následně pro ověření správnosti realizováno v programu Matlab, přičemž jsou popsány důvody použití jednotlivých úkonů předzpracování zaznamenaného signálu.

Stěžejní částí je návrh vhodného snímače, který je schopen snímat akustický signál z hodinového strojku v běžných podmínkách. Z těchto důvodů byl ke snímání akustického signálu zvolen keramický piezoelement, který je umístěn na části přípravku, k němuž je hodinový stroj přitlačen přídržným systémem. Piezoelement tedy snímá chvění hodinového strojku, což se ukázalo jako výhodné. Celá aktivní snímací část přípravku je zafixována v silikonové hadičce, čímž se dokonale odizoluje od okolních vibrací.

Pro návrh řídicí jednotky jsem se rozhodl využít vývojový kit STM32F4 Discovery, jelikož jsem je vlastnil a splňoval moje požadavky. Při návrhu jsem se rozhodl pro použití barevného dotykového TFT displeje o velikosti 3.5“. Při návrhu jsem se snažil dodržet všechny základní zásady a využíval jsem především vlastních zkušeností, které jsem nabyl za dobu, po kterou se věnuji elektronice. DPS byla vyrobena v domácích podmínkách pomocí fotocesty.

Vývoj firmware pro mne byla nejnáročnější část tohoto projektu. Pro správnou činnost zařízení bylo třeba nastavit využívané periferie procesoru. Dále byla vytvořena knihovna, která obsahuje jak kompletní předzpracovávání signálu využívající DSP instrukce procesoru, tak i funkční část měřicího přístroje. Pro činnost TFT displeje a jeho dotykové plochy byly vytvořeny knihovny, které tyto periferie obsluhují. Nakonec byla naprogramována knihovna obsahující uživatelské prostředí měřicího přístroje, které je zobrazeno na TFT display.

Oživení měřicího přístroje proběhlo na první pokus. Veškeré dílčí části měřicího přístroje fungovaly správně, jak jsem od nich očekával. Spotřeba celého měřicího přístroje činí 230mA, z čehož je 150mA spotřebováváno podsvícením TFT panelu. Výsledná měření jsou uvedena v předposlední kapitole.

Cíl práce se tedy podařilo naplnit. Byl navržen jeden plně funkční prototyp měřícího přístroje, díky kterému jsme schopni analyzovat stav strojku mechanických hodinek.

9 POUŽITÁ LITERATURA

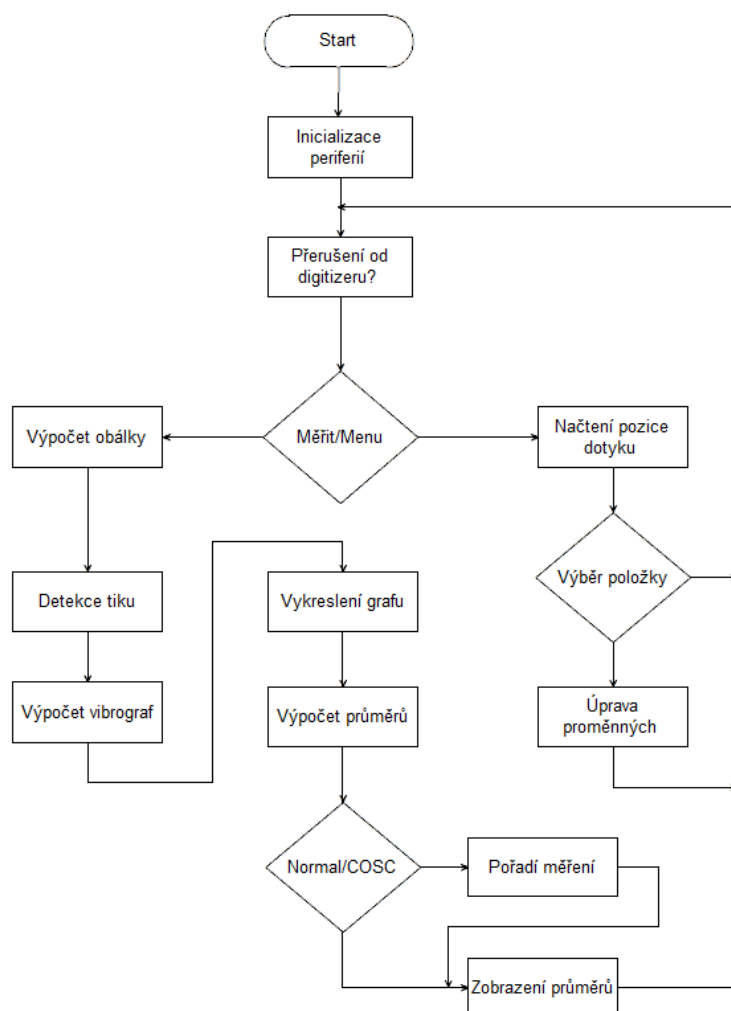
- [1] MARTÍNEK, Zdeněk a Jaroslav ŘEHOŘ. *Základy hodinářství: úvod do hodinářského oboru vhodný k samostatnému studiu, pro školení i pro informaci*. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL, 1968.
- [2] BOUKAL, Jaromír. *Opravy hodinek: určeno pro hodináře a absolventy hodinářských škol*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. Řada strojnické literatury.
- [3] BUREŠ, Josef. *Hodinové stroje pro 1. ročník odborných učilišť a učňovských škol: učební obor hodinář, hodinářka*. 3. vyd. Praha: SPN, 1975.
- [4] BUREŠ, Josef. *Hodinové stroje pro 2. ročník odborných učilišť a učňovských škol: učební obor hodinář, hodinářka*. 3. vyd. Praha: SPN, 1975.
- [5] BUREŠ, Josef. *Hodinové stroje pro 3. ročník odborných učilišť a učňovských škol: učební obor hodinář, hodinářka*. 2. vyd. Praha: SPN, 1967.
- [6] Greiner Vibrograf. *B600M*. [online]. 2017 [cit. 2-3-2017]. Dostupné z: <http://www.greinervibrograf.com/appl/file.php?id=231>
- [7] Zajímavosti. *Svycary.cz: Certifikát COSC*. [online]. © Švýcarsky.cz [cit. 15-3-2017]. Dostupné z: <http://www.svycary.cz/certifikat-cosch><http://www.greinervibrograf.com/appl/file.php?id=231>
- [8] SMETANA, Ctirad a KOLEKTIV. *Praktická elektro-akustika*. Praha: SNTL, 1981.
- [9] KADLEC, F. Zpracování slabých akustických signálů malých živočichů zaznamenaných v neoptimálních podmínkách. In: *Proceedings of Matlab 2004*. Praha: Humusoft, 2004. s. 208-213.
- [10] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [11] Loudity. *LD-EDPE-1209*. [online]. 2016 [cit. 17-6-2017]. http://static.mercateo.com/91/dd54f40de3b44ff08312421153e2f53c/pdf/LD-EDPE-1209_DTE.pdf?v=143

- [12] STMicroelectronics. *UM1472*. [online]. 2016 [cit. 14-8-2014]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/70/fe/4a/3f/e7/e1/4f/7d/DM00039084.pdf/files/DM00039084.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039084.pdf
- [13] STMicroelectronics. *STM32F407xx*. [online]. 2016 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf>
- [14] STMicroelectronics. *RM0090*. [online]. 2017 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/3d/6d/5a/66/b4/99/40/d4/DM00031020.pdf/files/DM00031020.pdf/jcr:content/translations/en.DM00031020.pdf
- [15] STMicroelectronics. *AN4841*. [online]. 2016 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/c1/ee/18/7a/f9/45/45/3b/DM00273990/files/DM00273990.pdf/jcr:content/translations/en.DM00273990.pdf
- [16] STMicroelectronics. *AN4031*. [online]. 2016 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/27/46/7c/ea/2d/91/40/a9/DM00046011.pdf/files/DM00046011.pdf/jcr:content/translations/en.DM00046011.pdf
- [17] Texas Instruments. *TL072*. [online]. 2017 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072a.pdf>
- [18] Displaytech Ltd. *INT035TFT-TS*. [online]. 2013 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: http://cdn.displaytech-us.com/sites/default/files/display-data-sheet/int035tft-v21_0.pdf
- [19] Solomon Systech. *SSD1963*. [online]. 2008 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: http://www.allshore.com/pdf/solomon_systech_ssd1963.pdf
- [20] Maxim Integrated. *TL072*. [online]. 2010 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX11800-MAX11803.pdf>
- [21] STMicroelectronics. *L78x*. [online]. 2016 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/41/4f/b3/b0/12/d4/47/8/CD00000444.pdf/files/CD00000444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000444.pdf>

- [22] STMicroelectronics. *LD1117*. [online]. 2015 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/a5/c3/3f/c9/2b/15/40/49/CD00002116.pdf/files/CD00002116.pdf/jcr:content/translations/en.CD00002116.pdf>
- [23] Microchip. *MCP1711*. [online]. 2015 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005415D.pdf>
- [24] STMicroelectronics. *UM1725*. [online]. 2017 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z:
http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/2f/71/ba/b8/75/54/47/cf/DM00105879.pdf/files/DM00105879.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105879.pdf
- [25] STMicroelectronics. *UM1718*. [online]. 2017 [cit. 14-8-2017]. Dostupné z:
http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/10/c5/1a/43/3a/70/43/7d/DM00104712.pdf/files/DM00104712.pdf/jcr:content/translations/en.DM00104712.pdf

10 PŘÍLOHY

Příloha A – Vývojový diagram SW



Příloha B – Celkové schéma řídicí části

