



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## SYSTÉM AUTOMATICKÉHO LADĚNÍ PRO SEDMISTRUNNÉ KYTARY

THE AUTOMATIC SELF TUNING SYSTEM FOR SEVEN-STRING GUITARS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Jeřábek

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek

BRNO 2017

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Vojtěch Jeřábek

**ID:** 155170

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

### Systém automatického ladění pro sedmistrunné kytary

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte elektronický systém pro automatické ladění kytary. Pro danou aplikaci zvolte vhodné mechanické i elektrické řešení. Zaměřte se na volbu vhodného snímání zvuku a metody jeho vyhodnocení. Při návrhu uvažujte použití pro sedmistrunné kytary. Součástí diplomové práce bude proveden přehled stávajících systémů, na jehož základě bude vyhledán nejvhodnější způsob řešení. V dalším kroku bude proveden návrh, realizace, oživení, zprovoznění a otestování systému. Veškerý zmíněný postup realizace systému bude přehledně popsán v diplomové práci.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 25.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Vladimír Levek

**Konzultant:**

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**  
předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Bmo

## ABSTRAKT

Práce popisuje možnosti realizace systému automatického ladění pro sedmistrunné kytary. Jsou zde porovnávána již hotová komerční i nekomerční řešení pro šestistrunné kytary. Je zde také zhodnocena použitelnost jejich částí i pro sedmistrunné kytary. Práce obsahuje detailnější popis takových částí včetně měření a vyhodnocení. Práce dále popisuje základní blokové schéma návrhu a vymezuje požadavky na řídicí program s ohledem na reálné vlastnosti kytary a použitelné výpočetní algoritmy.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Ladění, struna, sedmistrunná kytara, ladící mechanika, vibrace, senzor, kmitočtová analýza, krokový motor, signálový procesor, Fourierova transformace.

## ABSTRACT

The thesis describes some possibilities of a realization of the automatic self tuning system for seven-string guitars. There are comparisons of commercial and uncommercial solutions for six-string guitars. There is also evaluation of useful parts for seven-string guitars. Thesis contains a description of those parts including measurement and evaluation. The thesis also contains basic block schematic of a design and definition of a requirements for control program with respect on real guitar properties and used computing algorithm.

## KEYWORDS

Tuning, string, seven-string guitar, tuning mechanics, vibration, sensor, frequency analysis, step motor, signal processor, Fourier transform

JEŘÁBEK, V. Systém automatického ladění pro sedmistrunné kytary. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 39 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Levek.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Systém automatického ladění pro sedmistrunné kytary jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 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.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimírovi Levkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek.....	9
Úvod.....	10
<b>1 Dostupná řešení systémů automatického ladění .....</b>	<b>11</b>
1.1 Projekt Automatická kytarová ladička.....	11
1.2 Robot Guitar .....	13
1.3 Tronical Tune .....	14
1.4 Shrnutí výhod a použitelných prvků .....	16
<b>2 Návrh Systému s popisy požadavků na jednotlivé bloky .....</b>	<b>17</b>
2.1 Senzor vibrací .....	17
2.2 Kmitočtový filtr .....	17
2.3 Zesilovač .....	18
2.4 Mikrokontrolér.....	18
2.5 Motory .....	18
<b>3 Ladící mechanika RoboHead .....</b>	<b>20</b>
3.1 Zpětná analýza Ladící mechaniky RoboHead .....	20
3.2 Krokový motor.....	22
<b>4 Sensory vibrací .....</b>	<b>25</b>
4.1 Elektrodynamický.....	25
4.2 Piezoelektrický.....	25
4.3 Mikro elektro mechanické systémy zvukových senzorů .....	26
<b>5 Kmitočtová analýza .....</b>	<b>27</b>
5.1 Požadavky na kmitočtovou analýzu .....	27
5.2 Analýza signálu kytary .....	28
5.3 Rychlá Fourierova transformace.....	31
<b>6 Návrh zařízení.....</b>	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
<b>7 Závěr .....</b>	<b>40</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>41</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratek.....</b>	<b>43</b>
<b>A. Návrh zařízení.....</b>	<b>44</b>
A.1. Schéma.....	44
<b>B. kuk .....</b>	<b>47</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Konečné řešení projektu Automatická Kytarová Ladička, pohled zepředu [1] ..	12
Obr. 2 Konečné řešení projektu Automatická Kytarová Ladička, pohled zezadu [1] ....	12
Obr. 3 Robot Guitar, pohled na ladící mechaniku zezadu [2] .....	13
Obr. 4 Robot Guitar, pohled na ovládací prvek [2] .....	14
Obr. 5 Tronical Tune na hlavě kytary s ladící mechanikou na obou stranách [3] .....	15
Obr. 6 Tronical Tune s prostorem pro ladící mechaniku na jedné straně [3] .....	15
Obr. 7 RoboHead s integrovaným motorem a kontakty pro řízení [3] .....	16
Obr. 8 Zjednodušené blokové schéma systému .....	17
Obr. 9 Rozebraná ladící mechanika RoboHead .....	20
Obr. 10 Krokový motor z ladící mechaniky RoboHead .....	21
Obr. 11 Princip bipolárního krokového motoru s permanentním magnetem [6] .....	22
Obr. 12 H můstky pro řízení krokového motoru .....	23
Obr. 13 Vhodné průběhy napětí na cívkách krokového motoru .....	24
Obr. 14 Příklad piezoelektrického senzoru s připojenými vývody .....	26
Obr. 15 Senzor MP23AB02B, pohled na horní a spodní stranu. [7] .....	26
Obr. 16 Kmitočtová analýza struny $H_1$ .....	29
Obr. 17 Kmitočtová analýza všech 7 strun současně .....	30
Obr. 18 Základní diagram pro výpočet FFT posloupnosti 2 prvků. [12] .....	32
Obr. 19 Diagram pro výpočet FFT posloupnosti 8 prvků. [12] .....	33



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Kmitočty jednotlivých strun se spodní a vrchní hranicí pro standartní ladění ....	27
Tab. 2 Počty operací násobení a sčítání potřebné pro provedení FFT. [12] .....	34
Tab. 3 Počet taktů DSP od Texas Instruments pro výpočet FFT [12]. .....	34

## ÚVOD

Narůstající množství různých druhů ladění kytar a požadavku na rychlé přeladování mezi nimi, vedlo k sestrojení několika řešení systému automatického ladění pro kytary. Na trhu zatím však není takový systém pro sedmistrunné kytary. Práce je věnována analýze možností pro sestrojení takového systému se stanovenými konkrétními požadavky.

Ladící systém musí dle zadání být schopen ladit sedmistrunné kytary při ladění všech strun zároveň. Cílem je navrhnout systém, který minimálně naruší akustické a ergonomické vlastnosti kytary. Dalším cílem je, aby bylo zařízení co možná nejjednodušeji přenositelné na jiné kytary a podporovalo různé typy ladění. S tím souvisí i uživatelská možnost přidávání nových druhů ladění. Návrh systému musí počítat s napájením z akumulátoru, a tedy i s co možná nejnížší spotřebou. S tím souvisí také požadavek, aby bylo možné kytaru v rámci možností ladit i po vybití akumulátoru ručně.

# 1 DOSTUPNÁ ŘEŠENÍ SYSTÉMŮ AUTOMATICKÉHO LADĚNÍ

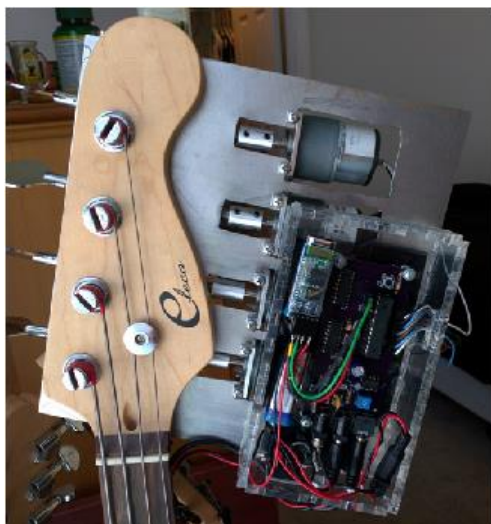
Na trhu s technikou pro ladění hudebních nástrojů neexistuje systém automatického ladění pro sedmistrunné kytary. Existuje však několik projektů, které se zabývaly systémy automatického ladění pro tradiční šestistrunné kytary či strunnými nástroji s méně než 6 strunami, jakými jsou například basové kytary.

Spolu s těmito projekty existují i komerčně dostupné systémy automatického ladění klasických šestistrunných kytar. Některé z těchto systémů jsou dostupné jako doplňující zařízení k běžné kytarě, jiné jsou dostupné i s kytarou jako celek.

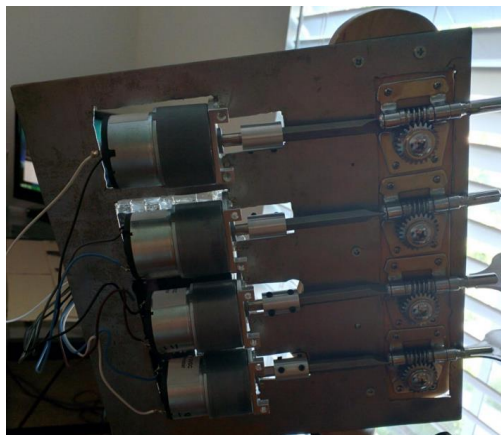
Tato kapitola porovnává jednotlivá řešení, jejich výhody a nevýhody. Zároveň popisuje konkrétní návrhová řešení z předchozích prací, které je možné použít i pro systém automatického ladění pro sedmistrunné kytary za splnění všech daných požadavků.

## 1.1 Projekt Automatická kytarová ladička

Tento projekt byl realizován na Univerzitě ve Střední Floridě. Realizuje Kompletní systém automatického ladění basové kytary. V projektu je pro snímání zvuku použit vlastní snímač kytary, který je připojen do řídicí jednotky umístěné u ladící mechaniky. Systém lze řídit bezdrátově pomocí rozhraní Bluetooth. Kompletní realizace projektu je zobrazena na obr. 1 a jeho mechanické uchycení k hlavě kytary na obr. 2.



Obr. 1 Konečné řešení projektu Automatická Kytarová Ladička, pohled zepředu [1]



Obr. 2 Konečné řešení projektu Automatická Kytarová Ladička, pohled zezadu [1]

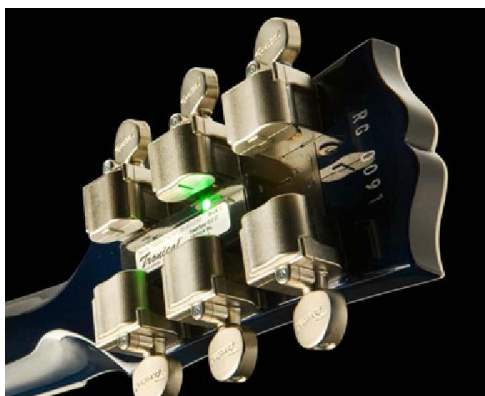
Konstrukční řešení nijak nenarušuje konstrukci kytary. Výjimkou je uchycení systému k hlavě kytary, které bylo realizováno šrouby přímo do dřeva, viz obr. 2. Systém tedy lze kdykoliv demontovat a využívat kytaru opět běžným způsobem. Zároveň je možné po drobných mechanických úpravách systém přenést na libovolnou jinou basovou kytaru.

Projekt je připraven pro ladění všech strun zároveň, finální popis softwaru však umožňuje pouze ladění jednotlivých strun zvlášť. Konstrukční řešení vyžaduje propojení systému se zvukovým výstupem z kytary a následné přepojování po dokončení ladění. To zároveň znemožňuje přenositelnost systému na akustické kytary. Celková konstrukce je poměrně velká a může narušit ergonomii nástroje.

Všechny použité informace, údaje a fotografie projektu Automatická kytarová ladička pocházejí z dokumentace k projektu, viz [1].

## 1.2 Robot Guitar

Jedná se o systém dostupný i s kytarou jako celek. Vyrábí jej firma Gibson a je možné koupit kytary několika různých tvarů. Celý ladící systém je umístěn na zadní části včetně ladící mechaniky s integrovaným motorem, viz obr. 3. Dle dostupných informací se jedná o první řešení systému automatického ladění kytary, které se dostalo na trh.



Obr. 3 Robot Guitar, pohled na ladící mechaniku zezadu [2]

Nastavení a řízení systému je prováděno pomocí multifunkčního enkodéru s tlačítkem a signalizačními prvky. Tento enkodér je umístěn v oblasti potenciometrů pro ovládání hlasitosti a tónové clony, viz obr. 4.



Obr. 4 Robot Guitar, pohled na ovládací prvek [2]

Konstrukce je na první pohled nerozpoznatelná od běžné kytary. Ergonomie nástroje zůstává tedy zachována. Nabíjení akumulátoru pro napájení celého systému je realizováno přes konektor určený pro výstupní zvukový signál. Systém navíc podporuje ladění všech šesti strun zároveň a nevyžaduje žádné další propojení pro snímání zvuku.

Nevýhodou systému je jeho nepřenositelnost na jiné kytary. Tato úprava by vyžadovala zásadní úpravu konstrukce nástroje.

Všechny použité informace, údaje a fotografie kytary Robot Guitar pocházejí z webových stránek výrobce kytary Gibson, viz [2].

### 1.3 Tronical Tune

Jedná se o doplňující zařízení k běžné kytarě od firmy Tronical. Systém se vyrábí v různých tvarech, aby byla zajištěna použitelnost na co možná nejvíce tvarů hlav kytar. Řídicí jednotka zůstává beze změny, mění se pouze tvar desky plošných spojů (zkráceně DPS), viz obr. 5 a obr. 6. Nastavení a řízení systému je možné pomocí několika tlačítek a signalizačních prvků umístěných na řídicí jednotce.



Obr. 5 Tronical Tune na hlavě kytary s ladící mechanikou na obou stranách [3]



Obr. 6 Tronical Tune s prostorem pro ladící mechanikou na jedné straně [3]

Instalovaná konstrukce je na první pohled nerozpoznatelná od běžné kytary a využívá ladící mechaniky s integrovanými motory. Podobně jako v případě systému Robot Guitar, viz. kapitola 1.2. Ladící mechanika s integrovaným motorem je zobrazena na obr. 7.



Obr. 7 RoboHead s integrovaným motorem a kontakty pro řízení [3]

Systém není třeba žádným elektrickým způsobem propojovat se stávající elektronikou kytary. Snímání zvuku je prováděno prostřednictvím vibrací šířících se v materiálu, ze kterého je kytara vyrobena. viz obr. 7. Mechanické uchycení je realizováno pouze tlakem, který vytváří ladící mechanika s integrovaným motorem na DPS s řídicí jednotkou. Tato DPS je celou plochou v kontaktu se zadní částí hlavy kytary. Celý systém je upevněn maticemi na ladící mechanice z přední strany hlavy kytary. Není tedy nutný žádný zásah do vlastní konstrukce kytary, což by mohlo ohrozit její akustické vlastnosti. Konstrukce ladící mechaniky s integrovanými motory navíc umožňuje i přímé ruční ladění bez použití elektroniky. To lze s výhodou použít například v případě, že dojde k poruše systému nebo se vybití akumulátor. Ten se nabíjí adaptérem mimo zařízení.

Jediná nevýhoda systému spočívá v pohlcování vibrací šířících se v materiálu kytary, což může zkracovat dobu znění strun. Tento problém lze zanedbat zejména u elektrických kytar.

Všechny použité informace, údaje a fotografie systému automatického ladění kytary Tronical Tune pocházejí z webových stránek výrobce systému Tronical, viz [3].

## 1.4 Shrnutí výhod a použitelných prvků

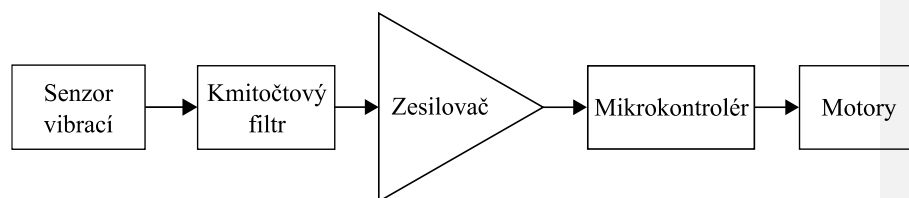
Zadané požadavky nejlépe splňuje systém popsáný v kapitole 1.3, Tronical Tune. Je schopen ladit všechny struny zároveň, je jednoduše přenositelný a nijak nezasahuje do konstrukce kytary. Použitá ladící mechanika navíc umožňuje ladit struny ručně i při stavu, kdy je akumulátor vybitý a elektronický systém tedy nelze používat.

Firma Tronical nabízí ladící mechaniky s integrovanými motory jako náhradní díly k jejich systému. Mohou být tedy volně použity i pro návrh systému automatického ladění pro sedmistrunné kytary. Je však nutné, aby byla znovu navržnuta řídicí jednotka a byla rozšířena DPS. Stejně tak lze použít i metodu snímání zvuku pomocí senzoru vibrací šířících se v materiálu kytary.



## 2 NÁVRH SYSTÉMU S POPISY POŽADAVKŮ NA JEDNOTLIVÉ BLOKY

Tato kapitola obsahuje základní popis systému automatického ladění pro sedmistrunné kytary umožňující splnit všechny zadané požadavky. Zjednodušené blokové schéma takového systému je zobrazeno na obr. 8.



Obr. 8 Zjednodušené blokové schéma systému

V konečné realizaci musí být systém doplněn o napájecí obvody a ovládací prvky pro nastavení systému. Návrh počítá s napájením z lithiového akumulátoru s nominálním napětím 3,7 V. Výstupní napětí takového akumulátoru je při úplném nabití 4,2 V a 3,0 V při úplném vybití [5]. Při volbě všech součástek a komponent musí být s tímto napětovým rozsahem počítáno.

### 2.1 Senzor vibrací

Pro senzor je důležité, aby byl schopen převádět signály obsažené ve vibracích na vhodný elektrický signál. S tím souvisí i šířka pásma senzoru, která by měla být minimálně v rozsahu slyšitelného pásma pro člověka. Dále je požadováno, aby funkce senzoru nebyla ovlivněna dalšími vlivy, jako jsou například pohyb kytarou při používání, hluk okolí a elektromagnetizmus. Jednotlivé senzory jsou podrobně popsány v kapitole 4.

### 2.2 Kmitočtový filtr

Kmitočtový filtr slouží k odstranění nežádoucích signálů s kmitočty, které by mohly způsobovat chyby vzorkování. Chyba vzorkování může například nastat, pokud se ve vzorkovaném signálu vyskytují signály o vyšších kmitočtech, než jaké lze navzorkovat. Proto je nutné, aby byl zesilovači a převodníku předřazen analogový kmitočtový filtr typu dolní propust. Ten zabráňuje vyšším kmitočtům, aby byly přeneseny do převodníku A/D. Tento filtr je nazýván také antialiasingový filtr. [4]

Další chyba vzorkování může nastat, při pohybu nahodilém pohybu nástrojem. Tím přibývají signály s nízkými kmitočty (řádově jednotky až desítky Hz). Tyto nežádoucí signály lze odstranit analogovým kmitočtovým filtrem typu horní propust. Mezní kmitočet tohoto filtru typu horní propust bude nižší než výše zmíněného filtru typu dolní propust. Celkový kmitočtový filtr bude tedy typu pásmová propust.

## 2.3 Zesilovač

Výstupní signál senzoru vibrací je třeba zesílit tak, aby byl maximálně využit vstupní rozsah integrovaného převodníku A/D. Tím bude zajištěno, že kvantování signálu bude co nejefektivnější. Pokud by byl využíván senzor vibrací s větší úrovní výstupního napětí, než je maximální vstupní hodnota převodníku A/D, musel by mít zesilovač záporné zesílení. [4]

## 2.4 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér (z anglického Microcontroller, zkráceně MCU) bude v systému vykonávat několik funkcí. Hlavní a výpočetně nejnáročnější funkcí MCU je zpracovávání a vyhodnocování signálů ze senzoru vibrací. Pro analýzu hlavních kmitočtů všech strun je třeba provést kmitočtovou analýzu. Rozsah analýzy určený v kapitole 5 je hlavní rozhodující parametr u volby MCU. Vzhledem k povaze této výpočetní operace je vhodné použít MCU, jehož výpočetní jádro je doplněno o jednotku pro zpracování digitálně reprezentovaných signálů. V praxi se takový druh mikrokontroléru označuje jako digitální signálový procesor nebo také digitální signálový kontrolér. Zkráceně DSP popřípadě DSC.

Další funkcí je řízení motorů pro ladění jednotlivých strun. Zde je třeba zvolit MCU s dostatečným množstvím výstupních pinů, v závislosti na zvoleném typu motoru a v metodě jeho řízení. S tím souvisí i možný požadavek na plynulou regulaci motorů, který lze realizovat pulzně šířkovou modulací na výstupu z MCU.

MCU musí také v neposlední řadě obsluhovat uživatelské ovládací prvky, a signalizační prvky. S tím souvisí i snímání napětí akumulátoru a případné uvědomění uživatele o stavu napětí baterie. Opět je tedy nutné zvolit MCU s dostatečným množstvím vstupních a výstupních pinů.

## 2.5 Motory

Hlavní požadavek na motory je, aby byly dostatečně výkonné i při sníženém napětí na akumulátoru při jeho mírném vybití. Dále musí umožňovat manuální otáčení pro případ, že by byl akumulátor zcela vybit nebo došlo k poruše. Všechny tyto parametry splňuje ladící mechanika s integrovaným motorem RoboHead použitá v systému Tronical Tune,

popsaného v kapitolách 1.3. tato ladící mechanika byla analyzována a popsána v kapitole  
3

### 3 LADÍCÍ MECHANIKA ROBOHEAD

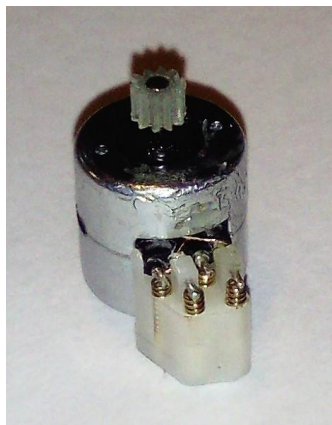
Ladící mechaniku RoboHead lze od firmy Tronical koupit jako náhradní díl. Výrobce však nedodává žádnou technickou dokumentaci či specifikaci. Dokumentaci firma neposkytla ani po přímé žádosti u technické podpory. K použití bylo tedy nutné ladící mechaniku zakoupit a provést zpětnou analýzu včetně rozebrání, měření a otestování.

#### 3.1 Zpětná analýza Ladící mechaniky RoboHead

Po demontáži krytu ladící mechaniky lze vidět motor s převodovkou, viz obr. 9. Kontakty vyvedené na konstrukci jsou připojené k motoru s připevněným ozubeným kolečkem. Jeho detail je zobrazen na obr. 10.



Obr. 9 Rozebraná ladící mechanika RoboHead



Obr. 10 Krokový motor z ladící mechaniky RoboHead

Měřením bylo zjištěno, že se v motoru nachází dvojice oddělených cívek s indukčností 2,1 mH a sériovým elektrickým odporem 16 Ω. Tyto cívky jsou připojeny na výstupní kontakty ladící mechaniky. Na základě této informace bylo možné odhadnout, že se jedná o bipolární krokový motor.

Tato hypotéza byla ověřena otestováním mechaniky na jednoduchém přípravku složeného ze dvou H můstků a MCU. Detailní popis zapojení potřebného pro řízení krokového motoru je popsáno v kapitole 3.2. Otestováním bylo dále zjištěno, že pro otočení ladícího kolíku o 360° je třeba přibližně 3800 kroků. Tím lze zajišťit dostatečnou přesnost ladění strun i bez použití plynulé regulace průtoku elektrického proudu oběma cívkami, viz kapitola 3.2.

Mechanika byla navíc experimentálně otestována na minimální výkon potřebný pro navíjení struny. Bylo zjištěno, že pro spolehlivé navíjení struny libovolné tloušťky je nutné použít napájecí napětí H můstků alespoň 9 V. Pro výsledný návrh bylo zvoleno napětí 10 V z důvodu rezervy. Není tedy možné nabíjecí obvody napájet přímo z baterie a je nutné použít jiný druh baterie nebo zvyšující měnič. Při předpokladu průtoku elektrického proudu oběma cívkami zároveň lze (při napájení napětí 10 V) vypočítat maximální proudový odběr ladící mechaniky a také její maximální požadovaný příkon.

$$I_{Lmax} = \frac{U}{R_L} = \frac{10}{16} = 0,625 \text{ A} \quad (1)$$

$$I_{max} = 2 * I_{Lmax} = 2 * 0,625 = 1,25 \text{ A} \quad (2)$$

$$P = I_{max} * U = 1,25 * 10 = 12,5 \text{ W} \quad (3)$$

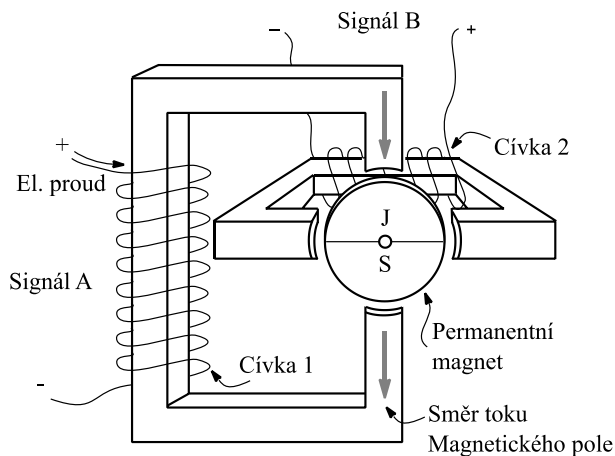
Okomentoval(a): [r1]: Doplnit, kolik to je cca výkonu

Jelikož při běžném provozu neprotéká proud trvale oběma cívkami zároveň je výsledná spotřeba při ladění nižší. Vypočítané hodnoty proudu a výkonu mohou být platné v případě chyby zařízení. Například při selhání programu mikrokontroléru v momentě, kdy oběma cívkami protéká elektrický proud. S vypočítanými hodnotami je tedy nutné počítat při návrhu zdrojů a výběru řadičů pro krokové motory.

Mechanika byla testována i při ladění jednotlivých strun na frekvence odpovídající frekvencím strun až o 5 půltónů vyšších. V těchto náročnějších podmínkách je požadavek na výkon mechaniky vyšší než při běžných podmínkách. Pro testování byly použity H můstky s reálnými vlastnostmi polovodičových součástek včetně úbytku napětí na spínacích prvcích. Při určování hodnoty napětí pro napájení H můstků bylo s těmito vlastnostmi počítáno.

### 3.2 Krokový motor

Jedná se o synchronní točivý stroj s nespojitým pohybem. Dle konstrukce může být otočen do konečného počtu definovaných poloh. Jeho hlavní výhodou je jednoduché nastavení do přesné polohy a vysoká opakovatelnost této polohy. Nevýhodou je složitější řízení, které se ve většině případů neobejde bez ovladače. Principiální příklad dvoufázového bipolárního krokového motoru s permanentním magnetem je zobrazen na obr. 11.



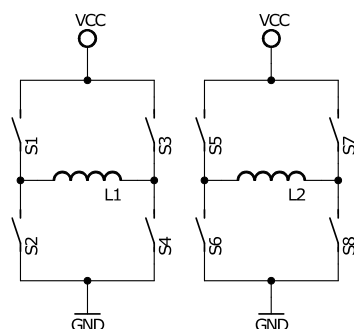
Obr. 11 Princip bipolárního krokového motoru s permanentním magnetem [6]

Z tohoto obrázku lze vidět, že elektrický proud protékající cívkou 1 vytváří magnetické pole ovlivňující polohu permanentního magnetu, který je na obrázku již otočen do cílové polohy. Pro otočení severního pólu permanentního magnetu o  $90^\circ$  je třeba zamezit průtoku elektrického proudu cívkou 1 a zároveň zajistit průtok elektrického

proudu cívkou 2. Směr otočení permanentního magnetu bude po nebo proti směru hodinových ručiček. Je to závislé na polaritě magnetického pole, kterou lze ovlivnit směrem průtoku elektrického proudu.

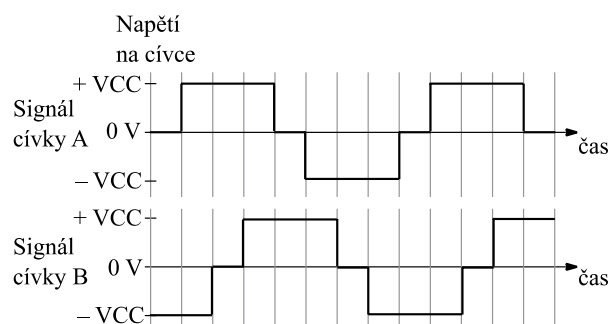
V případě, že daná aplikace vyžaduje přesnější úhel natočení krokového motoru než  $90^\circ$ , je nutné zajistit možnost průtoku elektrického proudu oběma cívkami samostatně i naráz. Zde je nutné dodržet směry průtoků elektrických proudů v závislosti na aktuální poloze permanentního magnetu. Cívky budou dohromady vytvářet magnetické pole otočené od magnetického pole permanentního magnetu o  $45^\circ$ . O tento úhel lze permanentní magnet otočit.

Jelikož jsou v tomto případě obě cívky řízeny stejnou velikostí elektrického proudu, lze je při jejich konstantní sériové rezistivitě řídit změnou napětí na vstupních svorkách. To lze realizovat dvojicí obvodů označovaných jako H můstky. Základní zapojení takových obvodů je zobrazeno na obr. 12.



Obr. 12 H můstky pro řízení krokového motoru

Spínací prvky v tomto zapojení jsou zastoupeny ideálními spínači. V praxi lze použít bipolární tranzistory, unipolární tranzistory a další spínací prvky. Výběr spínacích prvků závisí na požadované rychlosti spínání, maximálním elektrickém proudu a dalších parametrech. Pro zajištění průtoku elektrického proudu cívkou  $L_1$  je nutné sepnout dvojici spínačů  $S_1$  a  $S_4$ . Pro změnu směru průtoku elektrického proudu cívkou  $L_1$  je třeba rozepnout dvojici spínačů  $S_1$  a  $S_4$  a následně sepnout dvojici spínačů  $S_2$  a  $S_3$ . U většiny reálných spínacích prvků je nutné definovaně dlouhé zpoždění mezi těmito kroky. Je to z toho důvodu, že doba rozepnutí reálného spínacího prvku má nenulovou délku. V případě, že by byl spínač  $S_1$  stále sepnut a došlo by k sepnutí spínače  $S_2$ , byl by v obvodu zkrat mezi zemí a napájením. Tato chyba může porušit funkci spínacích prvků a musí být ošetřena řídicím systémem. Vhodné časování je zobrazeno na obr. 13.



Obr. 13 Vhodné průběhy napětí na cívkách krokového motoru

V případě, že daná aplikace vyžaduje přesnější úhel natočení krokového motoru než  $45^\circ$ , je nutné zajistit možnost plynulé regulace průtoku elektrického proudu oběma cívkami. Přesnost bude dána rozlišením regulátorů proudů.



## 4 SENZORY VIBRACÍ

Metoda snímání zvuku prostřednictvím vibrací šířících se materiálem kytary byla z převzata ze systému Tronical Tune, viz kapitola 1.3. Výrobce tohoto systému nezveřejňuje informaci o typu použitého senzoru. V rámci této práce je tedy nutné vhodný typ senzoru zvolit z několika nabízejících se možností.

### 4.1 Elektrodynamický

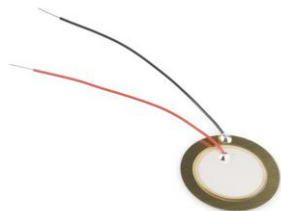
Elektrodynamický senzor je založen na vzájemném pohybu magnetu a cívky, na které je tímto pohybem indukováno napětí. Dvě základní provedení senzoru jsou s pohyblivou cívkou a s pohyblivým magnetem. Výhodou takových senzorů je vysoká úroveň výstupního napětí. Snímač lze navíc používat bez zdroje napájecího napájení.

Nevýhodou je relativně nízký maximální snímaný kmitočet (obvykle jednotky kHz). Elektrodynamické senzory s vyšším maximálním kmitočtem obvykle nedosahují požadované linearity. Další nevýhodou je citlivost na nežádoucí magnetická pole prostředí. Vzhledem k omezenému prostoru pro pohyb magnetu, popřípadě cívky v konstrukci senzoru lze očekávat zkreslení signálu při maximální jeho výchylce. Takový případ může nastat například při nechtěném pohybu kytarou.

### 4.2 Piezoelektrický

Piezoelektrické senzory pracují na principu takzvaného přímého piezoelektrického jevu. Jedná se o schopnost krystalu bez středu symetrie generovat elektrické napětí při jeho deformování [8]. Po uchycení piezoelektrického senzoru k materiálu kytary lze tedy na jeho vývodech naměřit střídavé signály odpovídající vibracím šířícím se materiálem kytary.

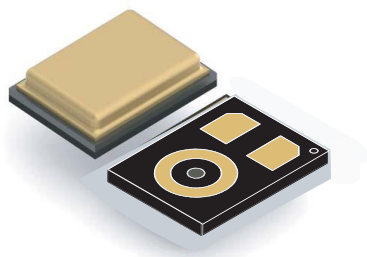
Vzhledem k vysokému výstupnímu napětíovému rozsahu lze předpokládat, že nedojde ke ztrátě informací obsažených v užitečných vyšších harmonických signálech při manipulaci s nástrojem či jinými nežádoucími vnějšími vlivy. Běžné provedení piezoelektrického senzoru lze vidět na obr. 14. Kmitočtový rozsah piezoelektrických senzorů je různý dle výrobce. V praxi lze i u méně kvalitních piezoelektrických senzorů očekávat desítky kHz, což je pro danou aplikaci dostačující. S tím souvisí i výhoda nízké ceny těchto senzorů.



Obr. 14 Příklad piezoelektrického senzoru s připájenými vývody.

### 4.3 Mikro elektro mechanické systémy zvukových senzorů

Technologie mikro elektro mechanických systémů, zkráceně MEMS, umožňuje vytvoření zvukových senzorů prostřednictvím specializovaných křemíkových mikromechanických procesů. MEMS zvukové senzory jsou v rámci této práce popsány na konkrétním příkladu takového senzoru od firmy STMicroelectronics s označením MP23AB02B. Všechny informace o tomto senzoru a obecně o technologii MEMS pochází z technické dokumentace dané výrobcem senzoru, viz. [7].



Obr. 15 Senzor MP23AB02B, pohled na horní a spodní stranu. [7]

Vstup pro zvukový signál se nachází na spodní straně senzoru spolu s vývody součástky. Okolo tohoto vstupu se nachází zemnicí vývod senzoru, viz obr. 15. Tím jsou, při správném zapájení, vlivy okolního hluku minimalizovány. Snímání zvuku je všesměrové, což maximalizuje velikost napětí výstupního signálu. Kmitočtový rozsah senzoru se nachází ve slyšitelném pásmu pro člověka a lze je tedy pro snímání zvuku plnohodnotně využít. Jejich nevýhodou oproti piezoelektrickým sensorům je vyšší cena.

## 5 KMITOČTOVÁ ANALÝZA

Jak bylo již zmíněno v kapitole 2.4, výpočetně nejnáročnějším a zároveň nejdůležitějším algoritmem MCU bude kmitočtová analýza. Pro výběr vhodného MCU je tedy předem nutné znát metodu pro kmitočtovou analýzu a její přesnost. S tím souvisí i požadavek na rychlost MCU a operační paměť pro danou metodu kmitočtové analýzy.

### 5.1 Požadavky na kmitočtovou analýzu

Pro analýzu požadavků na kmitočtovou analýzu kytary je nejprve nutné znát tóny jednotlivých strun a jejich kmitočty. Při výpočtu kmitočtů jednotlivých tónů lze pracovat s předpokladem jednoho základního pevného tónu o daném kmitočtu, s tím, že kmitočty dalších tónů jsou dopočítány. Jako základní tón se obvykle volí tón  $a_1$ . Tento tón je v některých publikacích označován také jako komorní  $a$  a jeho kmitočet je 440 Hz. Libovolný další tón kytary lze vypočítat ze vztahu daného rovnicí (4). V této rovnici je  $f_{a1}$  kmitočet základního tónu, a  $i$  je velikost intervalu mezi požadovaným tónem a základní tónem. Tato velikost je v půltónech. Pokud je třeba počítat kmitočet s přesností na čtvrttóny lze použít rovnici (5). Informace a vzorce byly převzaty z [10].

$$f_i = f_{a1} * 2^{i/12} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

$$f_i = f_{a1} * 2^{i/24} \text{ [Hz]} \quad (5)$$

Pomocí výše zmíněných vzorců byly vypočítány kmitočty jednotlivých strun sedmistrunné kytary při standardním ladění. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1. V rámci návrhu systému je nutné uvažovat i požadavek na vlastní nestandardní ladění, které si uživatel zvolí. Jako nejnížší laditelný tón byl pro systém zvolen G# a proto je v tab. 1 zmíněn navíc. Kromě kmitočtu tónu struny je vhodné znát i rozmezí v jakém se kmitočet struny může nacházet v případě, že struna není perfektně naladěna. Horní a spodní hranice byly počítány jako intervaly o velikosti jednoho čtvrttónu oproti základní frekvenci jednotlivých tónů. K tomuto výpočtu byla použita rovnice (5).

Tab. 1 Kmitočty jednotlivých strun se spodní a vrchní hranicí pro standardní ladění.

Tón struny	Spodní hranice [Hz]	Kmitočet struny [Hz]	Horní hranice [Hz]
<b>e<sub>1</sub></b>	320,24	329,63	339,29
<b>h</b>	246,94	246,94	254,18
<b>g</b>	190,42	196,00	201,74
<b>d</b>	142,65	146,83	151,13
<b>A</b>	106,87	110,00	113,22
<b>E</b>	80,06	82,41	84,82

<b>H<sub>1</sub></b>	59,98	61,74	63,54
<b>G#<sub>1</sub></b>	50,44	51,91	53,43

Tón s nejnižším kmitočtem je zároveň i tónem s nejužším rozmezím, v tomto případě jde o tón G#<sub>1</sub>, viz. tab. 1. Šířku tohoto rozmezí lze poté vypočítat z rozdílu horní a spodní hranice pro daný tón.

$$\Delta f_{G\#1} = \Delta f_{G\#1\text{hor}} - f_{G\#1\text{spod}} = 53,43 - 50,44 = 2,99 \text{ Hz} \doteq 3 \text{ Hz} \quad (6)$$

Je nutné, aby systém byl schopen ladit kytaru s alespoň takovou přesností, s jakou ladí uživatel ručně. Pro návrh byla zvolena přesnost 100 kroků mezi jednotlivými půltóny. Tento požadavek musí splňovat nejen přesnost motorů, která je popsána v kapitole 3.1, ale i rozlišovací schopnost kmitočtové analýzy. Nejjemnější rozlišovací schopnost je vyžadována pro tón s nejužším rozmezím G#<sub>1</sub>. Požadovanou rozlišovací schopnost kmitočtové analýzy lze vypočítat z podílu šířky rozmezí a počtu kroků.

$$\delta f = \frac{\Delta f_{G\#1}}{\text{počet kroků}} = \frac{3}{100} = 0,03 \text{ Hz} \quad (7)$$

## 5.2 Analýza signálu kytary

Pro jasnější představu o signálu kytary bylo provedeno několik měření pomocí osciloskopu včetně kmitočtové analýzy. Průběh signálu struny H<sub>1</sub> (nejhlubší struna) a jeho kmitočtová analýza jsou zobrazeny na obr. 16, kde průběh napětí tohoto signálu v závislosti na čase je zobrazen v horní části obrázku a kmitočtová analýza signálu je zobrazena ve spodní části.



Obr. 16 Kmitočtová analýza struny H<sub>1</sub>

Signál byl snímán několik sekund po rozeznění struny trsátkem. Maximální rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou jeho amplitudy je 63,31 mV. Stejnosečná hodnota napětí je téměř nulová, což dle principu piezoelektrického senzoru odpovídá očekávání.

Základní kmitočet tónu struny H<sub>1</sub> je 61,74 Hz, viz tab. 1. Na tomto kmitočtu lze vidět první vrchol křivky. Pro lepší přehlednost byl na obrázku označen jako f<sub>1</sub>. Nalevo od tohoto vrcholu křivky lze vidět další vrchol, nacházející se na kmitočtu 50 Hz. Jedná se o rušení způsobené rozvodnou sítí. Se signálem kytary nemá souvislost a je nutné jej při vyhodnocení zanedbat. Další vrcholy křivky napravo od vrcholu f<sub>1</sub> se nacházejí na násobcích základního kmitočtu a mají označení f<sub>2</sub> až f<sub>8</sub>. Zde si lze všimnout, že velikost úrovně napětí vrcholu f<sub>3</sub> dosahuje nejvyšší hodnoty. Při několikanásobném opakování měření nebyl dominantní vždy vrchol f<sub>3</sub>. I při měření ostatních strun nebyla dominantní úroveň napětí vždy u jednoho konkrétního vrcholu.

U struny H<sub>1</sub> byly vrcholy snadno rozeznatelné od šumu až po vrchol s označením f<sub>8</sub>. Kmitočet tohoto vrcholu lze vypočítat jako osminásobek základního kmitočtu. Pro tento výpočet byla použita přesnější hodnota základního kmitočtu, než je uvedeno v tab. 1, 61,735 Hz.

$$f_i = i * f_1 \quad (8)$$

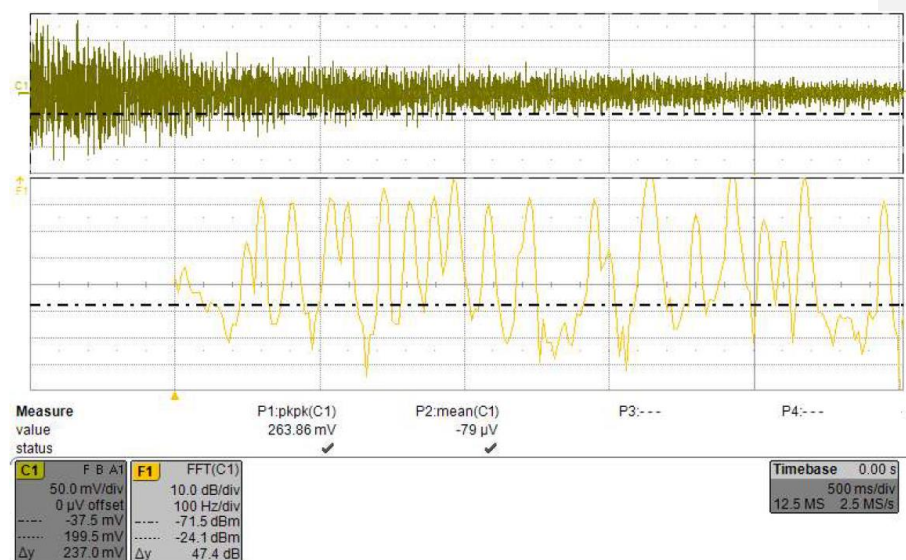
$$f_8 = f_1 * 8 = 61,735 * 8 = 493,88 \text{ Hz} \quad (9)$$

Při změně základního kmitočtu struny, například při jejím ladění, dojde ke změně i u kmitočtů vyšších harmonických kmitočtů. Velikost změny kmitočtu u vyšších harmonických kmitočtů nebude mít stejnou hodnotu jako velikost změny kmitočtu u základního harmonického kmitočtu, ale bude dána jeho násobkem. Tuto velikost změny pro libovolnou harmonickou lze vypočítat pomocí rovnice (10).

$$\Delta f_i = i * \Delta f_1 \quad (10)$$

V případě, že by bylo z nějakého důvodu pro analýzu rozladěnosti struny použit kmitočty vyšších harmonických. Je nutné s touto rozdílnou velikostí změny počítat. Tuto větší velikost změny kmitočtu i vyšších harmonických kmitočtů lze s výhodou využít. Je to z toho důvodu, že se stejnou rozlišovací schopností kmitočtové analýzy lze takto dosáhnout přesnějšího naladění.

Průběh signálu při znění všech sedmi strun zároveň a jeho kmitočtová analýza jsou zobrazeny na obr. 17.



Obr. 17 Kmitočtová analýza všech 7 strun současně.

Signál byl snímán ihned po rozeznění struny trsátkem a maximální rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou jeho amplitudy je 263,86 mV. Stejnosměrná hodnota napětí je o 78 μV vyšší než v případě prvního měření, viz obr. 16. Přesto se jedná oproti stejnosměrné složce o zanedbatelnou hodnotu, pravděpodobně způsobenou přechodovým jevem ustálení systému a možným pohybem kytary během měření.

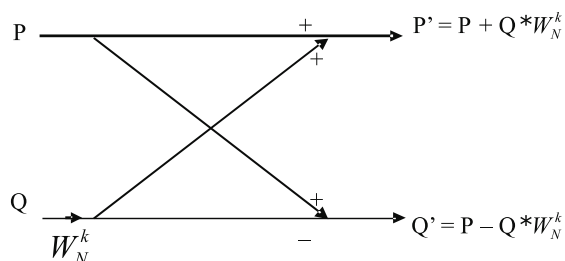
Pro lepší přehlednost obrázku jsou zobrazeny pouze kmitočty do 500 Hz. Stejně jako při předchozím měření lze na obrázku vidět vrcholy týkající se signálů struny  $H_1$  a rušení způsobené rozvodnou sítí, viz obr. 16. V obrázku jsou dále vidět základní kmitočty dalších strun a jejich vyšší harmonické kmitočty. Pomocí tab. 1 a rovnic (4), (5), (8) a (10) lze všechny vrcholy analyzovat a určit, které struny se týkají a jak moc je třeba strunu doladit.

Obě měření byla prováděna na sedmistrunné elektrické kytare značky Schecter Guitar Research s modelovým označením Omen Extreme-7. Snímání vibrací šířících se materiálem kytary bylo prováděno piezoelektrickým senzorem o průměru 10 cm podobným senzoru z obr. 14. Senzor byl umístěn na vrchní části hlavy kytary zezadu. Vstupní impedance uvedená na osciloskopu byla 1 M $\Omega$ . Při měření byla kytara umístěna ve standardní pozici při běžném používání v sedě na klíně. Drobné pohyby při manipulaci s nástrojem tedy mohly způsobit zkreslení signálu, a tedy i zhoršit vyhodnocovací schopnost při kmitočtové analýze. Stejně nebo i větší rušení však bude uživatelem generováno i při používání finálního výrobku. S těchto důvodů nebyl při měření aplikován žádný mechanismus pro eliminaci zmíněného rušení.

### 5.3 Rychlá Fourierova transformace

Rychlá Fourierova transformace je algoritmus pro výpočet kmitočtové analýzy (z anglického Fast Fourier transform, zkráceně FFT). Jedná se o algoritmus založený na diskrétní Fourierově transformaci. FFT lze vypočítat na základě posloupnosti digitálně reprezentovaných signálů, například data z převodníku AD. Počet prvků posloupnosti se rovná výslednému počtu bodů kmitočtové analýzy. Lze tedy říci, že čím více prvků z převodníku AD bude k dispozici, tím bude mít FFT lepší rozlišovací schopnost.

Navíc se jedná o speciálně upravený algoritmus pro rychlý a nenáročný výpočet [11]. Lze jej tedy s výhodou využít v aplikacích s MCU s omezeným výpočetním výkonem a pamětí. Z těchto důvodů poskytuje většina výrobců DSP nejen hardwarovou podporu v jednotce pro zpracování digitálně reprezentovaných signálů, ale i optimalizované knihovny pro jednoduchou implementaci FFT do programu. Základní diagram pro výpočet FFT posloupnosti dvou prvků je zobrazen na obr. 18.



Obr. 18 Základní diagram pro výpočet FFT posloupnosti 2 prvků. [12]

Vzhledem k tomu, že se jedná o posloupnost 2 prvků, jsou výsledkem kmitočtové analýzy pouze 2 body. Lze si všimnout, že pro výpočet jsou třeba pouze operace sčítání, odečítání a násobení. Tedy operace nenáročné i pro běžný MCU. Výpočet dále obsahuje koeficient  $W_N^k$ , který lze vypočítat z rovnice (11).

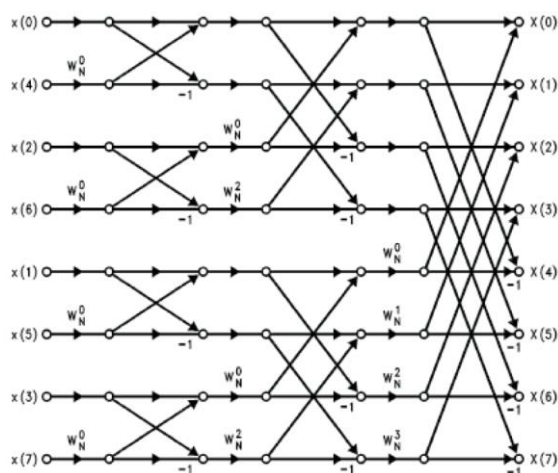
$$W_N^k = e^{-j2\pi k/N} \quad [11] \quad (11)$$

Pro rozsáhlejší diagramy FFT nabývají proměnné  $k$  a  $N$  různých hodnot. V tomto případě je  $N$  rovno 2 a  $k$  je rovno 0. Po dosazení lze tedy vypočítat koeficient.

$$W_2^0 = e^{-j2\pi 0/2} = e^0 = 1 \quad (12)$$

Hodnota koeficientu je rovna 1 a výsledné prvky kmitočtové analýzy lze tedy vypočítat pouze pomocí operací sčítání a odčítání. Příklad výpočtu FFT posloupnosti 8 prvků, kde si lze všimnout různých proměnných  $k$  a  $N$  je zobrazen na obr. 19.





Obr. 19 Diagram pro výpočet FFT posloupnosti 8 prvků. [12]

Pro dané místo v diagramu zůstává koeficient  $W$  neměnný i pro různá vstupní data. Lze jej tedy označit za konstantu. Všechny tyto konstanty lze předem vypočítat a uložit do paměti MCU. Konstanty už nebude nutné počítat v programu MCU a bude výrazně zkrácena výpočetní doba.

Vstupních hodnoty 0 až 7 jsou číslovány s obráceným pořadím bitů. Pořadí binárně je tedy: 000, 100, 010, 110, 001, 101, 011, 111. Dekadicky: 0, 4, 2, 6, 1, 5, 3, 7. Z charakteru metody FFT vyplývá, že počet vstupních prvků musí být celočíselnou mocninou čísla 2, tedy: 2, 4, 8, 16 atd.

Nejvyšší struna  $e_1$  má kmitočet 329,63 Hz, viz tab. 1 a vyšší kmitočty není teoreticky nutné analyzovat. Vzorkovací kmitočet převodníku AD musí být minimálně dvojnásobkem maximálního vzorkovaného kmitočtu [4]. Při vzorkovacím kmitočtu 900 kHz (navrženo s rezervou) a při použití FFT o posloupnosti 1024 ( $2^{10}$ ) prvků lze získat kmitočtovou analýzu s rozlišením, které je dáno podílem těchto dvou čísel, 0,879 Hz. Dle požadavku vypočítaného v kapitole 5.1 musí mít kmitočtová analýza rozlišovací schopnost alespoň 0,03 Hz. Přesnějšího rozlišení lze dosáhnout z delší posloupnosti vstupních prvků FFT. Při použití posloupnosti o délce 32768 ( $2^{15}$ ) lze získat kmitočtovou analýzu s rozlišením 0,028 Hz. Problémem je, že posloupnost 32768 prvků snímanou rychlostí 900 vzorků za sekundu bude snímána 36,4 sekund ( $32768 / 900$ ). Je pravděpodobné, že za tak dlouhou dobu budou již struny zcela utlumeny.

Dobu snímání lze zkrátit několika způsoby. První způsob je zaměření analýzy na vyšší harmonickou dané struny. Tím dojde ke snížení požadavku na přesnost systému, viz kapitola 5.1. Druhý způsob je opakování několikrát po sobě posloupnosti, která je systému k dispozici. Tím dojde k mírnému zkreslení analýzy, ale bude možné použít FFT s posloupností více prvků. Výsledný návrh musí být kompromisem mezi těmito dvěma zmíněnými způsoby, dobou snímání zvuku a požadavkem na přesnost systému.

Dle použitého vzorkovacího kmitočtu a počtu vstupních prvků FFT lze předběžně stanovit nároky na výpočetní výkon MCU a také požadavky na paměť. Dle počtu vstupních prvků FFT lze stanovit nutný počet operací násobení a sčítání potřebných pro provedení FFT. Počty těchto operací jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Počty operací násobení a sčítání potřebné pro provedení FFT. [12]

Počet prvků posloupnosti	Počet operací násobení	Počet operací sčítání
<b>128</b>	448	896
<b>256</b>	1,024	2,048
<b>512</b>	2,304	4,608
<b>1024</b>	5,120	10,240

Pro stanovení celkového počtu výpočetních operací potřebných pro výpočet FFT, je nutné zohlednit i čas úpravy posloupnosti vzhledem k číslování s obráceným pořadím bitů. Každý výrobce MCU může využívat jiné metody pro výpočet FFT, a proto nelze stanovit obecný počet operací pro libovolný MCU. Firma Texas Instruments doplnila svůj návod na používání knihovny pro FFT o tabulku potřebných operací pro jednotlivé počty posloupností prvků, viz. tab. 3. Tato tabulka platí pro DSP rodiny TMS320C55x.

Tab. 3 Počet taktů DSP od Texas Instruments pro výpočet FFT [12].

Počet prvků posloupnosti	Výpočet FFT	Bitové obrácení	Celkem
<b>128</b>	633	279	912
<b>256</b>	1133	535	1668
<b>512</b>	2693	1047	3740
<b>1024</b>	5244	2071	7315

Minimální požadavek na paměť jsou dány počtem posloupností vstupních prvků FFT a počtem bitů obsažených v jednotlivých vstupních hodnotách. Minimální požadovanou paměť pro posloupnost 1024 prvků s rozlišením 16 bitů lze vypočítat z následujícího vzorce (14).

$$\text{min. paměť} = \text{Počet prvků posloupnosti} * \text{rozlišení} * 2 \quad (13)$$

[12]

$$\begin{aligned} \text{min. paměť}_{1024}^{16} &= 1024 * 16 * 2 = \\ &= 32768 \text{ bitů} = 4096 \text{ bajtů} \end{aligned} \quad (14)$$

## 6 NÁVRH JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ

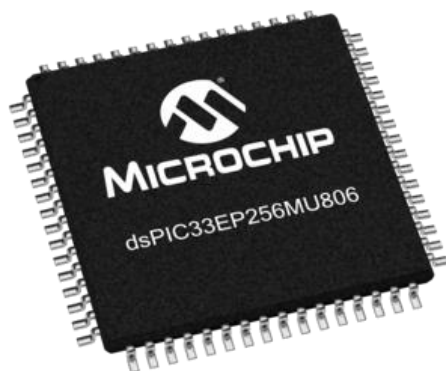
V kapitole je popsán konkrétní návrh jednotlivých bloků zařízení včetně popisu zvolených součástek a výčtu jejich základních parametrů.

Všechny součástky bylo nutné vybírat s ohledem na napájení z lithiového akumulátoru. Bylo tedy nutné, aby byly schopny pracovat s napětíovým rozsahem 3,0 - 4,2 V, viz kapitola 2. Jedinou výjimkou jsou obvody pro řízení krokových motorů. Ty jsou z důvodu dostatečného výkonu motorů napájeny napětím 10 V, viz kapitola 3.1. Toto napájecí napětí je zajištěno zvyšujícím měničem, viz kapitola **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Výsledné mechanické řešení systému vycházelo ze systému TronicalTune, který byl popsán v kapitole 1.3. Toto řešení je navrženo tak aby spodní strana výsledné DPS byla v přímém kontaktu se zadní stranou hlavy kytary a je tedy nutné minimalizovat nerovnosti na zadní straně DPS. Z tohoto důvodu nebylo možné pro návrh použít součástky s drátovými vývody označované také jako THT součástky (z anglického Through-hole technology). Pro Návrh bylo nutné použít výhradně součástky určené pro povrchovou montáž označované také jako SMD (z anglického surface mount device). V rámci možností byly vybírány součástky nenáročné na výrobu DPS a jejich zapájení.

### 6.1 Mikrokontrolér

Pro danou aplikaci bylo vhodné využít DSP mikrokontrolér. Důvody jsou podrobně popsány v kapitole 2.4. V systému je použit mikrokontrolér od firmy Microchip z rodiny digitálních signálových kontrolérů dsPIC33E. Celý název použitého procesoru je dsPIC33EP256MU806 veškeré informace o mikrokontroléru jsou převzaty přímo z technické dokumentace [13]. Mikrokontrolér lze vidět na obr. 20.



Obr. 20 DSP mikrokontrolér dsPIC33EP256MU806 [13]

Jedná se o 16 bitový mikrokontrolér s pamětí pro program o velikosti 256 kB a operační pamětí o velikosti 28,672 bajtů. Mikrokontrolér navíc dokáže pracovat rychlostí až 70 MIPS, což při použití integrovaného DSP zaručuje dostatek výpočetního výkonu pro kmitočtovou analýzu. Mikrokontrolér potřebuje pro správnou funkci napájecí napětí v rozsahu 3,0 V - 3,6 V.

Mikrokontrolér obsahuje 2 nezávislé převodníky AD schopné převádět vstupní signál s rozlišením 10 bitů při vzorkovacím kmitočtu až 1,1 MHz, přičemž jeden z převodníků je schopen dosáhnout rozlišení až na 12 bitů při vzorkovacím kmitočtu 500 kHz. Pro měření a analýzu zvukového signálu jsou tyto parametry převodníků dostatečné s rezervou. Jako vstup pro převodník AD lze libovolně zvolit jeden ze 32 vstupních pinů mikrokontroléru, což umožňuje velkou variabilitu při návrhu DPS. Jelikož v mikrokontroléru není integrována natěťová reference, je nutné pro převodníky použít jako napěťovou referenci napájecí napětí mikrokontroléru popřípadě externí napěťovou referenci. Návrh zapojení je nutné této skutečnosti přizpůsobit.

Mikrokontrolér disponuje až 51 vstupně výstupními piny což je dostatečný počet pro řízení všech krokových motorů, uživatelského rozhraní a dalších prvků nezbytných pro funkci zařízení. Mikrokontrolér má navíc integrovaný modul pro obsluhu USB, což lze použít při komunikaci s počítačem při nahrávání programu do mikrokontroléru a upravování parametrů pro ladění strun.

## 6.2 Senzor vibrací

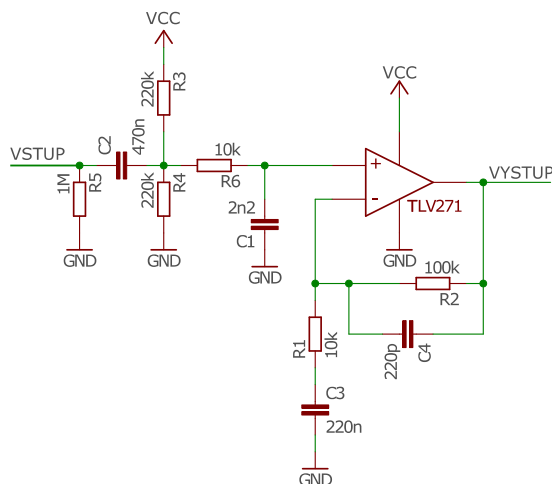
Pro snímání vibrací byl na základě informací z kapitoly 4 vybrán piezoelektrický senzor. Mezi jeho hlavní přednosti patřily nízká cena a obecná odolnost vůči nežádoucím rušení okoního prostředí.

V rámci úspory místa na DPS byl pro aplikaci vybrán senzor KBI-1541 s průměrem 15 mm a tloušťkou 0,14 mm. Senzor je velice podobný senzoru, který lze vidět na obr.

14. Senzor je dostupný bez připájených vývodů a jeho vrchní kontakt bylo nutné připojit k DPS pomocí prokojovacího vodiče.

### 6.3 Zesilovač a vstupní kmitočtové filtry

Z důvodu co nejefektivnějšího návrhu byly zesilovač a vstupní kmitočtové filtry zmíněné v kapitolách 2.2 a 2.3 sloučeny do jednoho bloku. Díky tomu bylo možné použít aktivní kmitočtové filtry. Pro funkci byl vybrán operační zesilovač od firmy Texas Instruments. Veškeré informace o tomto obvodu pocházejí přímo z dokumentace výrobce [13]. Jedná se o rail to rail operační zesilovač schopný pracovat už od napětí 2,7 V. Kompletní zapojení zesilovače včetně filtrů lze vidět na obr. 21. Schéma se součástí kompletního zapojení systému.



Obr. 21 Schéma zapojení zesilovače a vstupních kmitočtových filtrů

Na vstup tohoto obvodu byl připojen piezoelektrický senzor. Pro impedanční přizpůsobení byl k piezoelektrickému senzoru připojen paralelně rezistor  $R_5$ . Signál je zesílen pomocí neinvertujícího zapojení operačního zesilovače realizovaného pomocí obvodu TLV271 a rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ . Zapojení bylo doplněno o kondenzátory  $C_{15}$  a  $C_{17}$ . Tyto kondenzátory tvoří spolu se zesilovačem kmitočtový filtr typu pásmová propust. Zesílení je dáno poměrem rezistorů a rovní.

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{1M}{10k} = 101 \quad (15)$$

Z důvodu nesymetrického napájení operačního zesilovače TLV271 bylo nutné doplnit vstupní signál o stejnosměrnou složku. Bylo žádoucí, aby úroveň napětí této složky byla právě polovinou napájecího napětí. Stejnosměrnou složku generují rezistory  $R_3$  a  $R_4$ . Kondenzátor  $C_2$  odděluje stejnosměrnou složku od vstupního signálu. Aby bylo zabráněno zesilování stejnosměrné složky, je zapojení doplněno o kondenzátor  $C_{17}$ . Kondenzátor se pro stejnosměrné složky chová jako rozpojení a v tomto případě funguje zapojení jako napěťový sledovač. Stejnosměrná úroveň napětí tedy stále polovinou napájecího napětí. Tím je zajištěno i maximální možné využití vstupního rozsahu převodníku AD. Rezistor  $R_{11}$  a kondenzátor  $C_{16}$  tvoří kmitočtový filtr typu dolní propust. Spolu s kondenzátorem  $C_{15}$  a zesilovačem tvoří antialiasingový kmitočtový filtr druhého řádu.

Pro potvrzení funkce bylo schéma simulováno pomocí programu OrCAD Capture verze 17.2-2016. Výsledek AC analýzy lze vidět na Obr. 22 Graf výstupní závislosti obr. 22.



Obr. 22 Graf výstupní závislosti zesilovače a vstupních kmitočtových filtrů na frekvenci

## 6.4 Řadiče krokový motorů

Požadavky na řadiče krokový motorů byly: Co nejmenší možné rozměry pouzdra součástky a schopnost dodávat do zátěže proud alespoň 0,625 při napájecím napětí 10 V. Požadavky jsou popsány a odůvodněny kapitole 3.

Pro realizaci řadičů krokový motorů byl vybrán integrovaný dvojitý H můstek od firmy Texas Instruments. Jedná se o obvod DRV8835 a je přímo navržený pro řízení krokových motorů. Veškeré informace o tomto obvodu pochází přímo z dokumentace výrobce [15]. Obvod je dostupný v pouzdře DFN o rozměrech 2 x 3 mm (z anglického

Dual Flat No-leads package, jedná se o pouzdro bez vývodů s kontakty na dvou stranách). Ilustrativní vyobrazení obvodu lze vidět na obr. 23.



Obr. 23 Ilustrativní vyobrazení řadiče pro krokové DRV8835 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Obvod potřebuje pro správnou funkci napájecím napětí v rozmezí 2 V a 11 V, a je schopen do každé ze dvou zátěží dodávat proud až 1,5 A. Tím obvod splňuje všechny požadavky. Lze jej flexibilně řídit diskrétními hodnotami na vstupech nebo pomocí pulzně šířkové modulace. Obvod navíc dokáže přejít do režimu spánku kdy výrobce udává maximální proudový odběr 95 nA. To lze s výhodou využít pro snížení spotřeby systému v nečinnosti a maximalizaci výdrže baterie.

## 6.5 Napájení systému

Pro napájení systému bylo uvažováno použití lithiového akumulátoru. Pro návrh je tedy nutné

## 7 ZÁVĚR

Úkolem práce bylo navrhnout elektronický systém pro automatické ladění kytary. Mělo být navrženo vhodné mechanické i elektrické řešení. Podmínkou byla možnost aplikace na sedmistrunné kytary, při požadavku na možnost ladění všech sedmi strun zároveň.

V rámci práce byla porovnána již existující řešení systémů automatického ladění kytar (převážně klasických šestistrunných kytar). Jako nejvhodnější systém pro inspiraci na návrh systému automatického ladění sedmistrunné kytary byl vybrán systém Tronical Tune, který splňuje všechny zadané požadavky. Mechanické řešení ladících mechanik tohoto systému, RoboHead, lze navíc zakoupit jako náhradní díl, a lze jej tedy použít i při rozšíření pro sedmistrunné kytary.

Práce se dále zabývá návrhem celého systému včetně možnostmi řízení motorů RoboHead a snímání zvuku. Jako vhodná metoda snímání zvuku byla zvolena metoda snímání vibrací šířících se v materiálu kytary pomocí senzoru vibrací. V práci jsou popsány jednotlivé druhy takových senzorů. Práce dále popisuje možnosti implementace kmitočtové analýzy. Požadavky na tuto analýzu souvisejí především s výběrem vhodného MCU.



## LITERATURA

- [1] AHRENS, Trenton, Alex CAPO a Ernesto WONG. Automatic Guitar Tuner [online]. Florida, 2015 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: [http://www.eecs.ucf.edu/seniordesign/fa2014sp2015/g01/Final\\_SD2\\_Proj.pdf](http://www.eecs.ucf.edu/seniordesign/fa2014sp2015/g01/Final_SD2_Proj.pdf). University of Central Florida.
- [2] Gibson Guitar: The Robot Guitar With Automatic Electric Guitar Tuning, Limited Edition Guitar Info and Pictures [online]. USA: Gibson USA, 2007 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://archive.gibson.com/RobotGuitar/>
- [3] TronicalTune revolutionary guitar auto-tuning system unique the world. TronicalTune - self-tuning Guitar in seconds! [online]. Hamburg, Germany: Tronical GmbH, 2014 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://www.tronical.com/>
- [4] JEŘÁBEK, V. Bezdrátový přenos zvuku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2015. 41 s., 2 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Pavlík, Ph.D.
- [5] VARTA Product Info Sheet 56437201012. Nördlingen, Bavaria, Germany, 2014. Dostupné také z: [https://www.varta-storage.com/fileadmin/media/files/downloads/material-cellpac-lite/design-library/VARTA\\_Design\\_Library\\_56437\\_201\\_012.zip](https://www.varta-storage.com/fileadmin/media/files/downloads/material-cellpac-lite/design-library/VARTA_Design_Library_56437_201_012.zip)
- [6] AN2974, Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor - Application Notes. Freescale Semiconductor, Inc. Chandler, Arizona, 2005. Dostupné také z: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/application-notes/AN2974.pdf>
- [7] MEMS audio sensor high-performance analog bottom-port microphone. STMicroelectronics. Geneva, Switzerland, 2014. Dostupné také z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/08/26/0f/ff/5c/36/44/36/DM00111230.pdf/files/DM00111230.pdf/jcr:content/translations/en.DM00111230.pdf>
- [8] KUČERA, D. Koncepce tlačítkového piezo-generátoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [9] VACEK, Vladimír. Přehled senzorů pro měření vibrací. Plzeň, 2012. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Ing. Zuzana Kabešová.
- [10] KLÁPOVÁ, Martina. Matematický pohled na různá hudební ladění a jejich vývoj. Olomouc, 2010, 67 s. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Tomáš Fürst.
- [11] KLEJCHOVÁ, Martina. Rychlá Fourierova transformace. Praha, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce Doc. RNDr. Najzar Karel, CSc.

- [12] FFT Implementation on the TMS320VC5505, TMS320C5505, and TMS320C5515 DSPs. Texas Instruments Incorporated. Texas, USA, 2013. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/an/sprabb6b/sprabb6b.pdf>
- [13] DsPIC33EPXXX(GP/MC/MU)806/810/814 and PIC24EPXXX(GP/GU)810/814 Data Sheet. Chandler, Arizona, USA, 2009. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70616g.pdf>
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. Family of 550-uA/Ch 3-MHz Rail-to-Rail Output Operational Amplifiers (Rev. D). Dallas, Texas, 2015. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv271.pdf>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. DRV8835 Dual Low-Voltage H-Bridge IC (Rev. H). Dallas, Texas, 2016. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8835.pdf>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Převodník A/D	Převodník Analog/Digitál
Převodník D/A	Převodník Digitál/Analog
MCU	Microcontroller, Mikrokontrolér
DSP	Digital signal processor, Digitální signálový procesor
MEMS	Mikro elektro mechanické systémy
DPS	Deska plošných spojů
Bit	binary digit, dvojková číslice
Bajt	Osm bitů

## **A. NÁVRH ZAŘÍZENÍ**

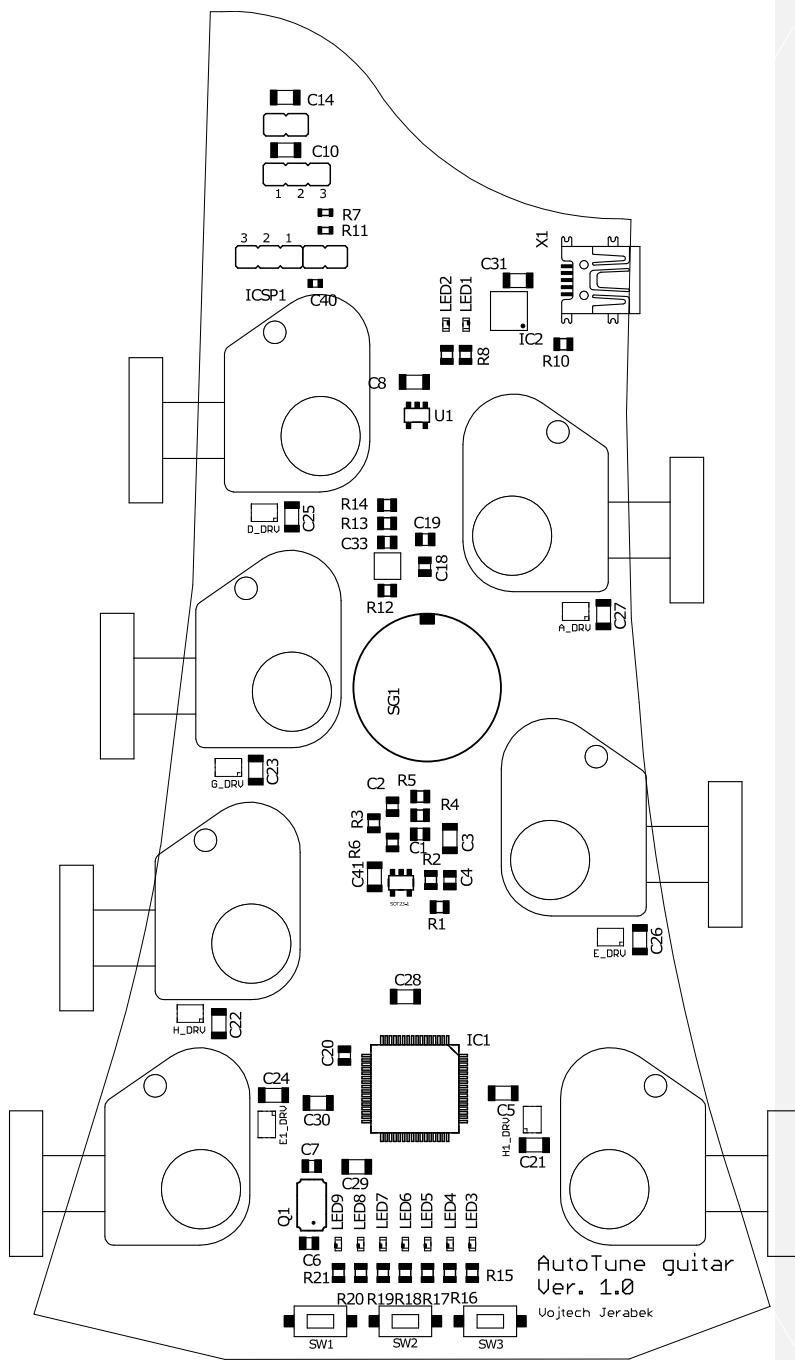
### **A.1. Schéma 1. část**

### **A.2. Schéma 2. část**

### **A.3. Plošné spoje vrchní strana**

### **A.4. Plošné spoje spodní strana**

### **A.5. Rozmístění součástek**





## **B. KUK**