



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

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Jeřábek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Macháň

BRNO 2016

Semestrální 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 a navíc požadavek na současné ladění všech sedmi strun.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 19.9.2016

Termín odevzdání: 15.12.2016

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Macháň

Konzultant semestrální práce:

doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce popisuje možnosti realizace systému automatického ladění pro sedmistrunné kytary. Jsou zde porovnána 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. 32 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Ladislav Macháň

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma „**Systém automatického ladění pro sedmistrunné kytary**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 15. prosince 2016

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Ladislavovi Macháňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 15. prosince 2016

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	9
1 Dostupná řešení systémů automatického ladění.....	10
1.1 Projekt Automatická kytarová ladička	10
1.2 Robot Guitar	11
1.3 Tronical Tune	13
1.4 Shrnutí výhod a použitelných prvků	14
2 Návrh Systému s popisy požadavků na jednotlivé bloky	15
2.1 Senzor vibrací.....	15
2.2 Kmitočtový filtr.....	15
2.3 Zesilovač	16
2.4 Mikrokontrolér	16
2.5 Motory	16
3 Ladící mechanika RoboHead	17
3.1 Zpětná analýza Ladící mechaniky RoboHead.....	17
3.2 Krokový motor	18
4 Sensory vibrací	21
4.1 Elektrodynamický	21
4.2 Piezoelektrický	21
4.3 Mikro elektro mechanické systémy zvukových senzorů.....	22
5 Kmitočtová analýza.....	23
5.1 Požadavky na kmitočtovou analýzu	23
5.2 Analýza signálu kytary	24
5.3 Rychlá Fourierova transformace	27
Závěr	30
Seznam použitých citací.....	31
Seznam zkratek.....	32

Seznam obrázků

Obr. 1 Konečné řešení projektu Automatická Kytarová Ladička, pohled zepředu [1]	10
Obr. 2 Konečné řešení projektu Automatická Kytarová Ladička, pohled zezadu [1]	11
Obr. 3 Robot Guitar, pohled na ladící mechaniku zezadu [2]	12
Obr. 4 Robot Guitar, pohled na ovládací prvek [2]	12
Obr. 5 Tronical Tune na hlavě akustické kytary s ladící mechanikou na obou stranách [3]	13
Obr. 6 Tronical Tune samostatně s prostorem pro ladící mechanikou na jedné straně [3]	13
Obr. 7 Ladící mechanika RoboHead s integrovaným motorem a kontakty pro řízení [3]	14
Obr. 8 Zjednodušené blokové schéma systému	15
Obr. 9 Rozebraná ladící mechanika RoboHead	17
Obr. 10 Krokový motor z ladící mechaniky RoboHead	18
Obr. 11 Základní princip bipolárního krokového motoru s permanentním magnetem [6]	19
Obr. 12 H můstky pro řízení krokového motoru	20
Obr. 13 Vhodné průběhy napětí na cívkách krokového motoru	20
Obr. 14 Příklad piezoelektrického senzoru s připájenými vývody	22
Obr. 15 Senzor MP23AB02B, pohled na horní a spodní stranu. [7]	22
Obr. 16 Kmitočtová analýza struny H_1	24
Obr. 17 Kmitočtová analýza všech 7 strun současně.	26
Obr. 18 Základní diagram pro výpočet FFT posloupnosti 2 prvků. [12]	27
Obr. 19 Diagram pro výpočet FFT posloupnosti 8 prvků. [12]	28

Seznam tabulek

Tab. 1 Kmitočty jednotlivých strun se spodní a vrchní hranicí pro standartní ladění	23
Tab. 2 Počty operací násobení a sčítání potřebné pro provedení FFT. [12].....	29
Tab. 3 Počet taktů DSP od Texas Instruments pro výpočet FFT [12].....	29

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 ladičí 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]

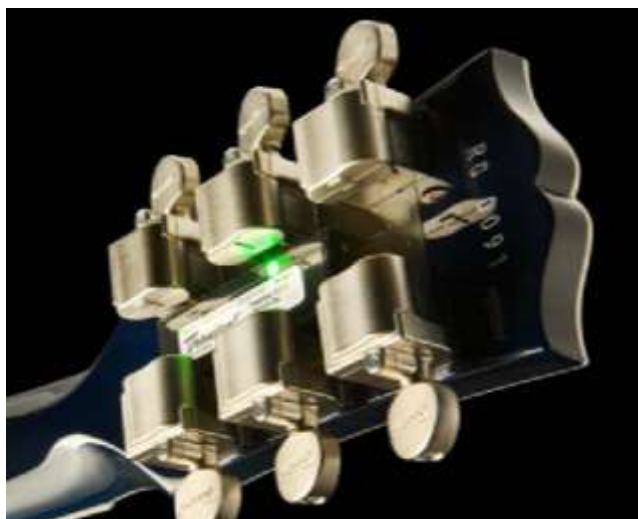
Konstrukční řešení nijak nenarušuje konstrukci kytary. Výjimkou je uchycení systému k hlavě kytary, které bylo realizováno šrouby přímo do dřeva, viz obr. 2. Systém tedy lze kdykoliv demontovat a využívat kytaru opět běžným způsobem. Zároveň je možné po drobných mechanických úpravách systém přenést na 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 akustické kytary s ladící mechanikou na obou stranách [3]



Obr. 6 Tronical Tune samostatně 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 Ladící mechanika 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 vybije 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].

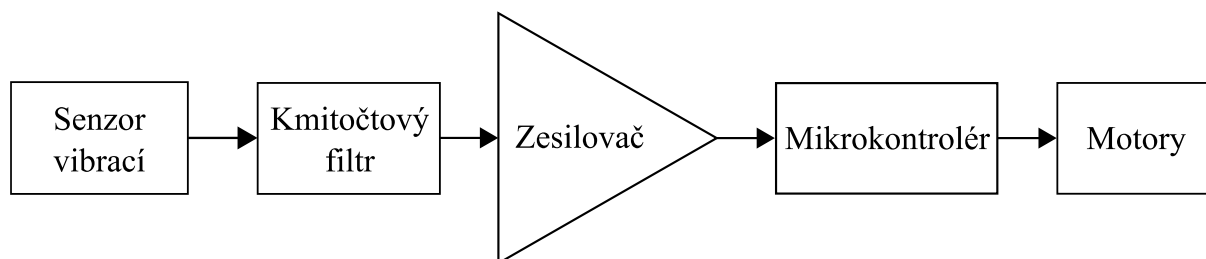
1.4 Shrnutí výhod a použitelných prvků

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 navrhnutá 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 napěťovým 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 elektromagnetismus. 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 zesilovač a převodník předřazen analogový kmitočtový filtr typu dolní propust. Ten zabraňuje 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, popsáno 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

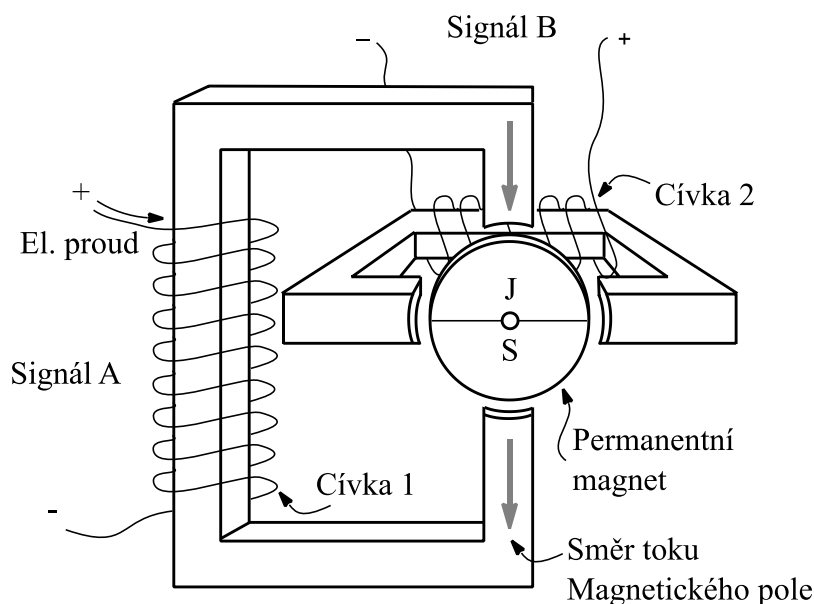


Obr. 10 Krokový motor z ladící mechaniky RoboHead

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 lze 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 a řízení krokového motoru je popsán v kapitole 3.2. Otestováním bylo dále zjištěno, že pro otočení ladícího kolíku o 360° je třeba přibližně 3800 kroků. Tím je zajištěna dostatečná přesnost ladění.

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.

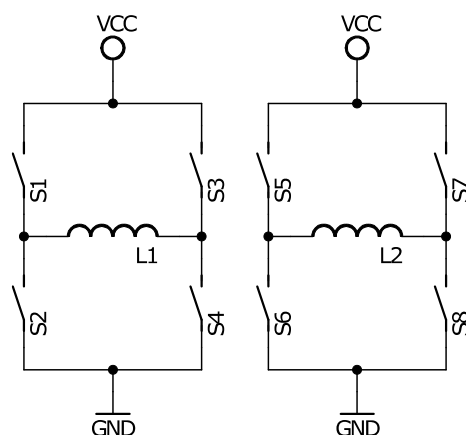


Obr. 11 Základní princip bipolárního krokového motoru s permanentním magnetem [6]

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° 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.

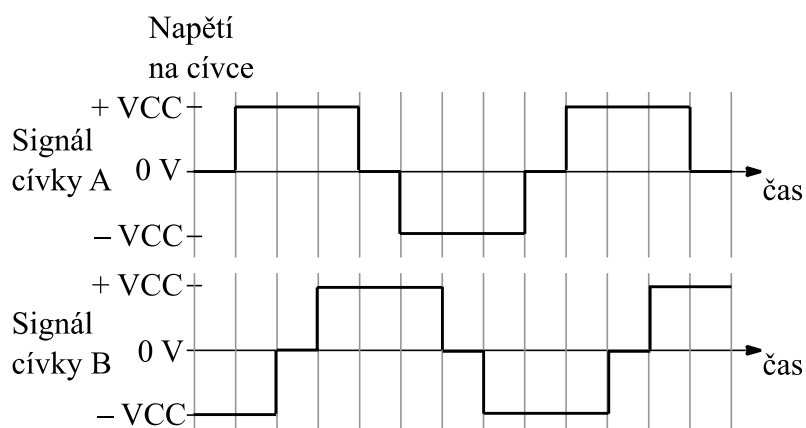
V případě, že daná aplikace vyžaduje přesnější úhel natočení krokového motoru než 90° , je nutné zajistit možnost průtoku elektrického proudu oběma cívkami samostatně i naráz. Zde je nutné dodržet směry průtoků elektrických proudů v závislosti na aktuální poloze permanentního magnetu. Cívky budou dohromady vytvářet magnetické pole otočené od magnetického pole permanentního magnetu o 45° . 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 cívku L_1 je nutné sepnout dvojici spínačů S_1 a S_4 . Pro změnu směru průtoku elektrického proudu cívku 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° , 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

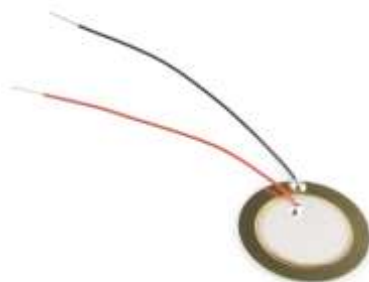
Elektrodynamický senzor je založen na vzájemném pohybu magnetu a cívky, na které je tímto pohybem indukováno napětí. Dvě základní provedení senzoru jsou s pohyblivou cívkou a s pohyblivým magnetem. Výhodou takových senzorů je vysoká úroveň výstupního napětí. Snímač lze navíc používat bez zdroje napájecího 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 [31][8]. Po uchycení piezoelektrického senzoru k materiálu kytary lze tedy na jeho vývodech naměřit střídavé signály odpovídající vibracím šířícím se materiálem kytary.

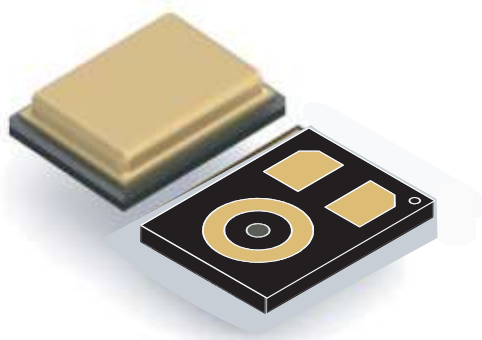
Vzhledem k vysokému výstupnímu napětí ovému rozsahu lze předpokládat, že nedojde ke ztrátě informací obsažených v užitečných vyšších harmonických signálech při manipulaci s nástrojem či jinými nežádoucími vnějšími vlivy. Běžné provedení piezoelektrického senzoru lze vidět na obr. 14. Kmitočtový rozsah 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 (1). 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 (2). Informace a vzorce byly převzaty z [10].

$$f_i = f_{a1} * 2^{i/12} \text{ [Hz]} \quad (1)$$

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

Pomocí výše zmíněných vzorců byly vypočítány kmitočty jednotlivých strun sedmistrunné kytary při standartním 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 nejnižší 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 (2).

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

Tón struny	Spodní hranice [Hz]	Kmitočet struny [Hz]	Horní hranice [Hz]
e₁	320,24	329,63	339,29
h	246,94	246,94	254,18
g	190,42	196,00	201,74
d	142,65	146,83	151,13
A	106,87	110,00	113,22
E	80,06	82,41	84,82
H₁	59,98	61,74	63,54
G#₁	50,44	51,91	53,43

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

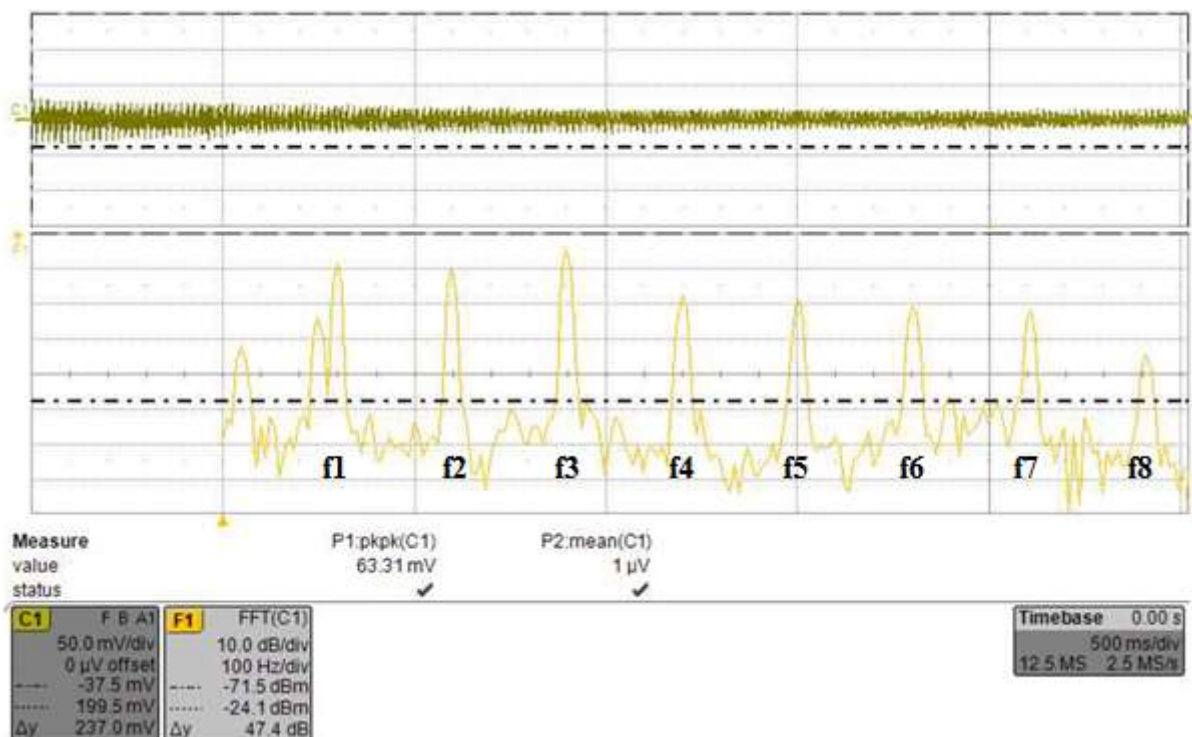
$$\Delta f_{G\#1} = \Delta f_{G\#1\text{hor}} - f_{G\#1\text{spod}} = 53,43 - 50,44 = 2,99 \text{ Hz} \doteq 3 \text{ Hz} \quad (3)$$

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. Nejmenější rozlišovací schopnost je vyžadována pro tón s nejužším rozmezím G#₁. Požadovanou rozlišovací schopnost kmitočtové analýzy lze vypočítat z podílu šířky rozmezí a počtu kroků.

$$\delta f = \frac{\Delta f_{G\#1}}{\text{počet kroků}} = \frac{3}{100} = 0,03 \text{ Hz} \quad (4)$$

5.2 Analýza signálu kytary

Pro jasnější představu o signálu kytary bylo provedeno několik měření pomocí osciloskopu včetně kmitočtové analýzy. Průběh signálu struny H₁ (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 H₁

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

Základní kmitočet tónu struny H_1 je 61,74 Hz, viz tab. 1. Na tomto kmitočtu lze vidět první vrchol křivky. Pro lepší přehlednost byl na obrázku označen jako f_1 . 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_1 se nacházejí na násobcích základního kmitočtu a mají označení f_2 až f_8 . Zde si lze všimnout, že velikost úrovně napětí vrcholu f_3 dosahuje nejvyšší hodnoty. Při několikanásobném opakování měření nebyl dominantní vždy vrchol f_3 . I při měření ostatních strun nebyla dominantní úroveň napětí vždy u jednoho konkrétního vrcholu.

U struny H_1 byly vrcholy snadno rozeznatelné od šumu až po vrchol s označením f_8 . 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.

$$f_i = i * f_1 \quad (5)$$

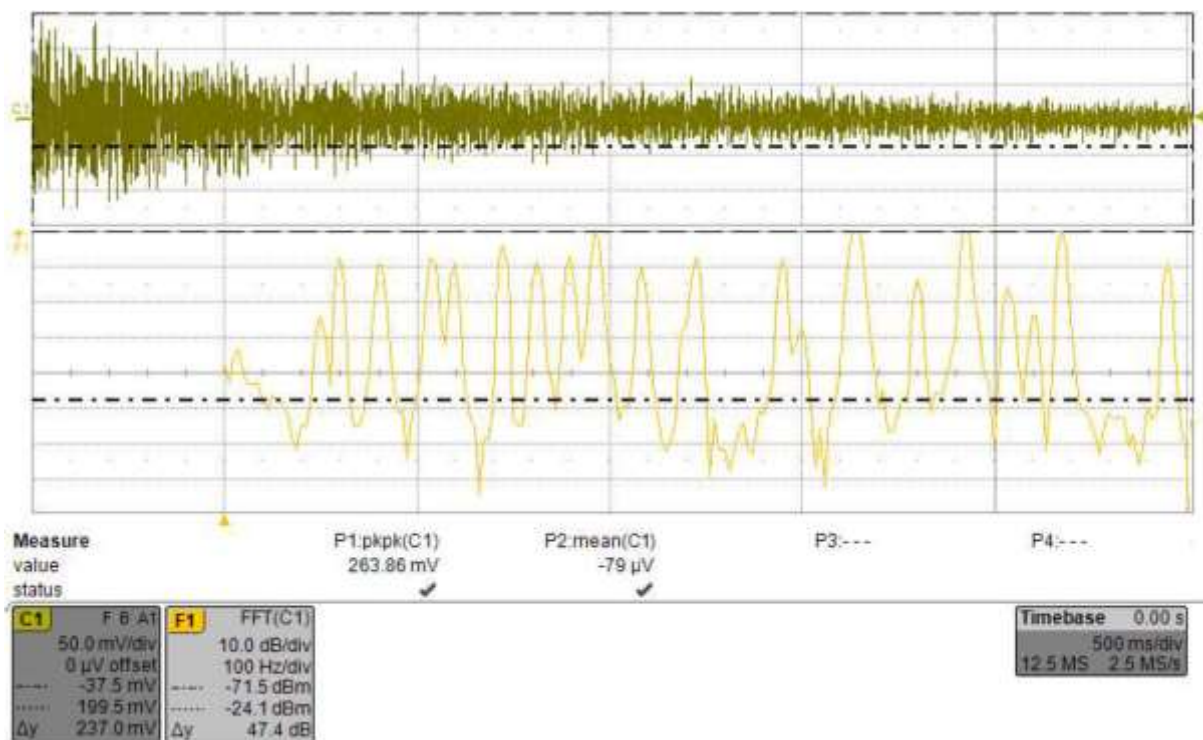
$$f_8 = f_1 * 8 = 61,735 * 8 = 493,88 \text{ Hz} \quad (6)$$

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 (7).

$$\Delta f_i = i * \Delta f_1 \quad (7)$$

V případě, že by bylo z nějakého důvodu pro analýzu rozladěnosti struny použít 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 μ V 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.

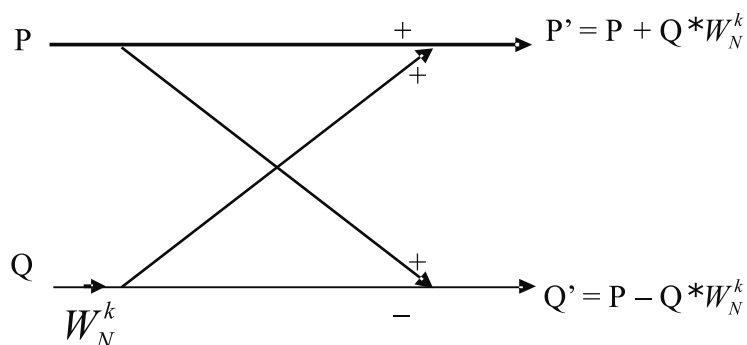
Pro lepší přehlednost obrázku jsou zobrazeny pouze kmitočty do 500 Hz. Stejně jako při předchozím měření lze na obrázku vidět vrcholy týkající se signálů struny H_1 a rušení způsobené rozvodnou sítí, viz obr. 16. V obrázku jsou dále vidět základní kmitočty dalších strun a jejich vyšší harmonické kmitočty. Pomocí tab. 1 a rovnic (1), (2), (5) a (7) 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 umístěný na vrchní části hlavy kytary zezadu. Vstupní impedance uvedená na osciloskopu byla 1 M Ω . 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 aplikovaný 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 diskretní 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 a 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]

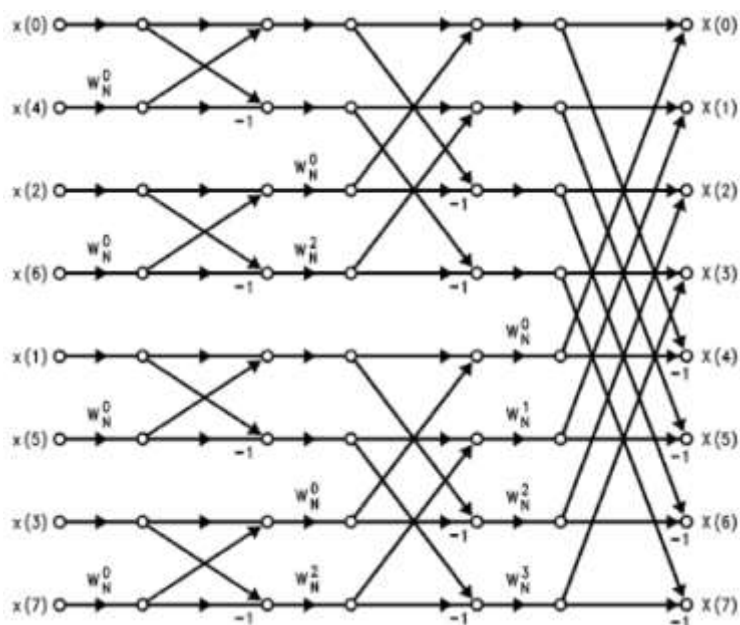
Vzhledem k tomu, že se jedná o posloupnost 2 prvků, jsou výsledkem kmitočtové analýzy pouze 2 body. Lze si všimnout, že pro výpočet jsou třeba pouze operace sčítání, odečítání a násobení. Tedy operace nenáročné i pro běžný MCU. Výpočet dále obsahuje koeficient W_N^k , který lze vypočítat z rovnice (8).

$$W_N^k = e^{-j2\pi k/N} \quad [11] \quad (8)$$

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.

$$W_2^0 = e^{-j2\pi 0/2} = e^0 = 1 \quad (9)$$

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
128	448	896
256	1,024	2,048
512	2,304	4,608
1024	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
128	633	279	912
256	1133	535	1668
512	2693	1047	3740
1024	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 (11).

$$\text{min. paměť} = \text{Počet prvků posloupnosti} * \text{rozlišení} * 2 \quad [12] \quad (10)$$

$$\text{min. paměť}_{1024}^{16} = 1024 * 16 * 2 = 32768 \text{ bitů} = 4096 \text{ bajtů} \quad (11)$$

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.

Seznam použitých citací

- [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. 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
- [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>

Seznam 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