



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

PŘESNÉ ŘÍZENÍ PIEZOAKTUÁTORŮ

ACCURATE CONTROL OF PIEZOACTUATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Hurdálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Urban, CSc.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Tomáš Hurdálek

ID: 211227

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Přesné řízení piezoaktuátorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Řešení proudového zdroje pro řízení piezo-aktuátorů k ovládní optického laditelného filtru s požadavkem skenování spektra vlnových délek s pilovým průběhem přeladění a frekvencemi skenování do 10 kHz.

Na základě studie možností řízení piezoaktuátorů z hlediska rychlosti, linearity a přesnosti sledování žádaného průběhu přeladění filtru navrhnete a sestavíte proudový zdroj pro skenovací buzení kapacitní zátěže piezoaktuátoru dimenzovaný pro rozsah výstupních napětí od 5V do 100 - 125V s nastavitelným konstantním proudem do 0,6A. Pro řízení piezoaktuátoru se předpokládá lineární průběh nárustu náboje na kapacitě piezoaktuátoru. Řešte vybíjení piezoaktuátoru. Frekvence skenování do 10kHz. Otestujte proudové řízení piezoaktuátoru z pohledu linearity řízení, šumu a hystereze. Připravte a proveďte experimenty k ověření kritických vlastností řešení s ohledem na použití ke skenování spektra v senzorce .

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Fiber Fabry-Perot Tunable Filter, Technical Reference. Firemní literatura MICRON OPTICS, INC..
- [2] Fiber Fabry-Perot Controller, OPERATING INSTRUCTIONS. Firemní literatura MICRON OPTICS, INC..
- [3] MOI Tunable Filter TF2 Actuation Circuitry Design Guidelines. Firemní literatura MICRON OPTICS, INC..

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 23.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. František Urban, CSc.

doc. Ing. Lukáš Fojcik, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá možností proudového a napětového řízení piezoaktuátorů z pohledu řízení optických filtrů pro přeladování optického spektra. Nejdříve je snaha objasnit základní fyzikální jevy, které úzce souvisí s touto problematikou. Práce se dále věnuje jednotlivým typům piezoaktuátorů a zdůvodňuje, který je pro aplikaci nejvhodnější. Pozornost je věnována také vysvětlení jednotlivých možností řízení. Bylo provedeno srovnání dostupných driverů. Byla provedena měření, simulace a testování různých zapojení kritických částí driveru. Na základě toho byl vyvinut proudový driver a proudový zdroj pro jeho napájení. Zařízení bylo zkonstruováno a otestováno.

Klíčová slova

Piezoaktuátor, proudový driver, napětový driver, řízení aktuátorů, optický filtr, piezoelektrický jev, proudový zdroj.

Abstract

This thesis deals with the possibility of current and voltage control of piezoactuators from the point of view of control of optical filters for retuning the optical spectrum. At first, there is an effort to clarify the basic physical principles that are closely related to this issue. The thesis also deals with different types of piezoactuators and determines which one is the most suitable for the application. Attention is also paid to the explanation of different control options. A comparison of available drivers was made. Measurements, circuit simulations and testing of various circuits of critical parts of the driver were made. Based on this, a current driver and a current source to power it were developed. The device has been constructed and tested.

Keywords

Piezoactuator, current driver, voltage driver, control of actuators, optical filter, piezoelectric effect, current source.

Bibliografická citace

HURDÁLEK, Tomáš. Přesné řízení piezoaktuátorů [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152468>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce František Urban.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Tomáš Hurdálek*

VUT ID studenta: *211227*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2022/23*

Téma závěrečné práce: *Přesné řízení piezoaktuátorů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího 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.

V Brně dne: 23. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Františku Urbanovi, CSc. a panu Ing. Milanu Holíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 23. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK.....	13
ÚVOD	14
1. ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ JEVY	15
1.1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV	15
1.1.1 Piezoelektrický jev obecně	15
1.1.2 Přímý piezoelektrický jev	15
1.1.3 Elektrostrikce	17
1.1.4 Piezoelektrická konstanta	18
1.1.5 Curieova teplota T_c	18
1.1.6 Frekvence a rezonance.....	18
1.1.7 Piezoelektrické materiály.....	18
1.1.8 Využití piezoelektrického jevu	18
2. PIEZOELEKTRICKÉ AKTUÁTORY.....	20
2.1 TYP UNIMORF	20
2.2 TYP BIMORF	20
2.3 SLOŽITĚJŠÍ STRUKTURY.....	21
2.4 TYP CYMBAL.....	22
2.5 AKTUÁTOR PK2FSF1	22
3. ŘÍZENÍ PIEZOELEKTRICKÝCH AKTUÁTORŮ	24
3.1 NAPĚŤOVÉ ŘÍZENÍ PIEZOAKTUÁTORU.....	24
3.1.1 Silnoprůdý zesilovač a piezoprvek	24
3.1.2 Silnoprůdý zesilovač s rezistorem	26
3.1.3 Vysokonapětový piezodriver	27
3.1.4 Driver PDu100B Miniature	28
3.2 PROUDOVÉ ŘÍZENÍ.....	29
3.2.1 Řízení piezoaktuátorů pomocí proudových impulzů.....	29
3.2.2 Řízení piezoaktuátoru pomocí kontinuálního proudu	31
4. MĚŘENÍ ROZTAŽNOSTI PIEZOAKTUÁTORU	33
4.1 MĚŘENÍ POMOCÍ MIKROMETRU	33
4.2 MĚŘENÍ POMOCÍ ÚCHYLKOMĚRU	33
4.3 MĚŘENÍ POMOCÍ SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU	34
5. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK	37
6. NÁVRH KONCEPTU ZÁKLADNÍ ČÁSTI DRIVERU.....	41
6.1 NÁVRH OBVODU.....	41
6.1.1 Popis funkce obvodu	41
6.1.2 Funkce rezonančního RLC obvodu	42
6.2 SIMULACE OBVODU.....	43

6.2.1	<i>Výpočty součástek</i>	43
6.2.2	<i>Výstupy ze simulace</i>	45
7.	NÁVRH PROUDOVÉHO DRIVERU	49
7.1	REALIZACE OBOUSMĚRNÝCH SPÍNAČŮ	49
7.1.1	<i>Kombinace diod a NMOS tranzistoru</i>	49
7.1.2	<i>Sériové zapojení NMOS tranzistorů</i>	50
7.1.3	<i>Paralelní zapojení PMOS a NMOS tranzistoru</i>	51
7.1.4	<i>Volba součástek a testování</i>	52
7.2	REALIZACE PROUDOVÉHO ZDROJE	53
7.2.1	<i>Proudový zdroj NUD4011</i>	54
7.2.2	<i>Proudový zdroj z LDO</i>	55
7.2.3	<i>Proudový zdroj s operačním zesilovačem a BG referencí</i>	57
7.3	REALIZACE OSTATNÍCH ČÁSTÍ DRIVERU	59
7.3.1	<i>Napěťový zdroj 125 V</i>	59
7.3.2	<i>Cívka</i>	60
7.3.3	<i>Rezistor</i>	64
7.3.4	<i>Napěťový zdroj 5 V</i>	64
7.4	REALIZACE ZDROJE OVLÁDACÍHO SIGNÁLU	65
7.5	NÁVRH CHLAZENÍ	66
7.5.1	<i>Chlazení proudového zdroje</i>	66
7.5.2	<i>Chlazení piezodriveru</i>	67
7.6	NAVRŽENÉ SCHÉMA PROUDOVÉHO DRIVERU	69
8.	KONSTRUKCE PROUDOVÉHO DRIVERU	71
8.1	DESKY S PLOŠNÝMI SPOJI	71
8.2	FINÁLNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DRIVERU A PROUDOVÉHO ZDROJE	71
8.3	SESTAVENÍ A OŽIVENÍ	72
8.3.1	<i>Oživení proudového zdroje</i>	72
8.3.2	<i>Oživení piezodriveru</i>	72
8.3.3	<i>Oživení celého obvodu</i>	73
9.	ZÁVĚR	77
10.	LITERATURA	78
	SEZNAM PŘÍLOH	81

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

DEA	Dielectric elastomer actuator
MPA	Multilayer piezoelectric actuators
DAC	Digital to analogue converter
vf	vysokofrekvenční
OZ	operační zesilovač

Symbols:

U	napětí	[V]
I	proud	[A]
P	výkon	[W]
C	kapacita	[F]
L	indukčnost	[H]
S	průřez vodiče	[mm ²]
d	průměr vodiče	[mm]
C_z	mezizávitová kapacita	[F]
C_p	parazitní kapacita	[F]
$C_{celk.}$	celková parazitní kapacita	[F]
N	počet závitů	[-]
J	proudová hustota	[Am ⁻¹]
ϵ_0	permitivita vakua	[Fm ⁻¹]
ϵ_r	relativní permitivita	[-]
t_i	tloušťka laku	[m]
S_z	plocha závitů	[m ²]
f_0	frekvence tlumených kmitů	[Hz]
δ	hloubky vniku proudu do vodiče	[m]
ρ	měrný odpor vodiče	[Ωm]
ω	úhlová frekvence	[rads ⁻¹]
μ	permeabilita vodiče	[NA ⁻²]
f	frekvence	[Hz]
I_{ef}	efektivní hodnota proudu	[A]
I_{max}	maximální proud	[A]
P_{ef}	efektivní výkon	[W]
E	energie	[J]
T	perioda	[s]
Z	impedance	[Ω]
R	odpor	[Ω]
λ	vlnová délka	[m]

R_{gJC}	vnitřní tepelný odpor součástky	[KW ⁻¹]
R_{gCS}	tepelný odpor styku součástky s chladičem	[KW ⁻¹]
R_{gH}	tepelný odpor chladiče	[KW ⁻¹]
ΔT	změna teploty	[°C]
P_{ztr}	ztrátový výkon	[W]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Buňka bez středu symetrie (a), buňka se středem symetrie (b) [6].....	16
Obrázek 1.2 Krystalická mřížka před (vlevo) a po (vpravo) deformaci [1].....	16
Obrázek 1.3 Krystalická mřížka pro krystal s iontovou vazbou a centrovanou mřížkou před (vlevo) a po (vpravo) deformaci [1]	17
Obrázek 1.4 Orientace dipólů před polarizací elektrickým polem (a), polarizace dipólů elektrickým polem (b), zbytková polarizace po odpojení elektrického pole (c) [7].....	17
Obrázek 2.1 Unimorfni piezoaktuátor, a) neaktivní, b) aktivní nepřipevněn k substrátu, c) aktivní připevněn k substrátu [12].....	20
Obrázek 2.2 Bimorfni piezoaktuátor, a) neaktivní, b) aktivní nepřipevněn k substrátu, c) aktivní připevněn k substrátu [12].....	20
Obrázek 2.3 D33 piezoelektrický efekt [14].....	21
Obrázek 2.4 a) vícevrstvá struktura piezoaktuátoru, b) jednoduchý pákový systém pro piezoaktuátor [13]	21
Obrázek 2.5 Princip funkce piezoaktuátoru typu cymbal [15].....	22
Obrázek 2.6 Aktuátor PK2FSF1 [16]	22
Obrázek 2.7 Graf závislosti roztažnosti aktuátoru PK2FSF1 na přiloženém napětí, bez zátěže, při 20 °C [17].....	23
Obrázek 3.1 Zapojení piezoelektrického prvku na zdroj signálu přes piezodriver [3].....	24
Obrázek 3.2 Sériové zapojení rezistoru [3].....	26
Obrázek 3.3 Zdroj stejnosměrného předpětí v kombinaci s piezoelektrickým zesilovačem tvořící vysoké výstupní napětí [3].....	28
Obrázek 3.4 Blokové schéma napěťového driveru PDU100B Miniature [18]	29
Obrázek 3.5 Princip řízení piezoaktuátoru pomocí proudových impulzů, a) schéma zapojení, b) závislost impulzů na roztažení [21].....	30
Obrázek 3.6 Nabíjení kondenzátoru konstantním proudem [22]	31
Obrázek 4.1 Schéma zapojení piezodriveru PDU100B [18]	33
Obrázek 4.2 Úchylkoměr ve zhotoveném stojanu při měření roztažnosti piezoaktuátoru	34
Obrázek 4.3 Princip činnosti vláknové mřížky (FBG) [19]	34
Obrázek 4.4 Princip přeladování vláknové mřížky (FBG) [20]	35
Obrázek 4.5 Lepení optického vlákna na piezoaktuátor	35
Obrázek 4.6 Měření na spektrálním analyzátoru	36
Obrázek 5.1 Online kalkulačka pro vykreslení závislosti napětí na frekvenci pro napětí 100 V	37
Obrázek 5.2 Online kalkulačka pro vykreslení závislosti napětí na frekvenci pro napětí 50 V	37
Obrázek 5.3 Závislost napětí U na frekvenci f, konfigurace driver PDU100B Miniature a piezo PA4FKH3W, pro 100 V modrá, pro 50 V oranžová	39
Obrázek 5.4 Závislost napětí U na frekvenci f, konfigurace driver PDU100B Miniature a kondenzátor 220 μ F, pro 100 V modrá, pro 50 V oranžová	40
Obrázek 6.1 Schéma základní části proudového driveru	41
Obrázek 6.2 Hysterezní křivka piezoelektrické keramiky [23].....	43
Obrázek 6.3 Schéma zapojení v simulačním prostředí OrCad.....	43
Obrázek 6.4 Průběh napětí na piezoaktuátoru.....	46
Obrázek 6.5 Průběh proudu na piezoaktuátoru	47
Obrázek 6.6 Průběh proudu přes R1 a L1	48
Obrázek 7.1 Obousměrné spínače [25].....	49
Obrázek 7.2 Kombinace diod a NMOS tranzistoru	50
Obrázek 7.3 Zapojení obousměrného spínače s tranzistory NMOS	51

Obrázek 7.4 Zapojení jednosměrného spínače s NMOS tranzistorem a diodou	51
Obrázek 7.5 Zapojení obousměrného spínače s NMOS a PMOS tranzistorem	52
Obrázek 7.6 Závislost odporu $R_{DS(on)}$ na vstupním napětí [26]	52
Obrázek 7.7 Zapojení jednoho spínače pro test funkčnosti	53
Obrázek 7.8 Naměřený průběh na obousměrném spínači (žlutá), vstup (modrá)	53
Obrázek 7.9 Proudový zdroj NUD4011 [24]	54
Obrázek 7.10 První zapojení NUD4011	55
Obrázek 7.11 Paralelní zapojení dvou NUD4011 se sejmutým chladičem.....	55
Obrázek 7.12 Proudový zdroj s LDO LR8	56
Obrázek 7.13 Proudový zdroj s LDO LR8, zkušební zapojení	57
Obrázek 7.14 Proudový zdroj s LTC6090 teoretické schéma.....	58
Obrázek 7.15 Proudový zdroj s LTC6090, zkušební zapojení.....	59
Obrázek 7.16 Spínaný zdroj pro napájení piezodriveru [27]	60
Obrázek 7.17 Vícevrstvá válcová cívka [31]	61
Obrázek 7.18 Jednovrstvá válcová cívka [31]	62
Obrázek 7.19 Znázornění skin efektu [32].....	64
Obrázek 7.20 Napěťový zdroj pro výrobu plovoucí země [28]	64
Obrázek 7.21 Generovaný signál pro spínače pomocí Arduino Uno	65
Obrázek 7.22 Detail nástupné hrany signálu, viditelné zpoždění 400 ns	66
Obrázek 7.23 Tepelné schéma jednoho tranzistoru na chladiči [34]	66
Obrázek 7.24 Tepelné schéma tří tranzistorů na chladiči	68
Obrázek 7.25 Finální teoretické schéma proudového driveru.....	70
Obrázek 8.1 Návrh plošného spoje modulu s piezodriverem.....	71
Obrázek 8.2 Návrh plošného spoje modulu s proudovým zdrojem	71
Obrázek 8.3 Sestavený proudový zdroj	72
Obrázek 8.4 Sestavený proudový driver	72
Obrázek 8.5 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), kurzory ukazují prodlení po odpojení aktuátoru.....	73
Obrázek 8.6 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), částečný pád OZ do saturace.....	74
Obrázek 8.7 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), OZ není v saturaci, nefunkční rezonanční obvod	74
Obrázek 8.8 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), výsledný průběh dle požadavků.....	75
Obrázek 8.9 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), výsledný průběh dle požadavků, zobrazení více period	76
Obrázek 8.10 Finální podoba zkonstruovaného prototypu proudového zdroje a driveru pro piezoaktuátory	76

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Aktuátor PK2FSF1 základní informace [17]	23
Tabulka 7.1 Naměřené hodnoty napětí a proudů při změně zátěže.....	56
Tabulka 7.2 Tabulka naměřených proudů u různých typů tranzistorů při 40 V.....	57
Tabulka 7.3 Proudový zdroj s LTC6090, naměřené hodnoty	58

ÚVOD

Práce vzniká na základě požadavků firmy NETWORK GROUP, s.r.o. Je potřeba vyvinout a zkonstruovat proudový zdroj pro řízení piezoaktuátorů k ovládní optického laditelného filtru s požadavkem skenování spektra vlnových délek s pilovým průběhem přeladění a frekvencemi skenování do 10 kHz a provést studii dostupných driverů.

Praktická část diplomové práce se zabývá základními fyzikálními vlastnostmi a pochody v piezomateriálech a piezoaktuátory. Následně je brán důraz na vysvětlení proudového a napěťového řízení piezoaktuátorů. V práci jsou popsány principy těchto způsobů řízení, zmíněny jejich výhody a nevýhody, zdůvodněn výběr proudového driveru.

V rámci praktické části práce, jsou nejdříve srovnány dostupné napěťové drivery pro piezoaktuátory. Dále je měřena prostorová roztažnost aktuátoru. Následuje měření, které dokáže, že dominantní vlastností je kapacita. Po úspěšném prokázání této vlastnosti je možné při prvotním testování a simulacích nahradit aktuátor kondenzátorem. Dále je nutné ověřit méně obvyklou metodu řízení piezoaktuátorů pomocí proudových impulzů.

Na základě tohoto výzkumu bude rozhodnuto o proudové metodě řízení piezoaktuátorů. Bude nutné sestavit a otestovat jednotlivé kritické části obvodu, na základě měření rozhodnout o jejich vhodnosti pro tuto aplikaci a popřípadě testovat další zapojení.

To povede k sestavení finálních schémat proudového driveru. Bude proveden návrh jednotlivých komponent a následně driver sestaven. Bude ověřena funkčnost a zjištěny některé parametry driveru.

1. ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ JEVY

V následující kapitole jsou stručně popsány základní fyzikální jevy, které jsou spojeny s piezomateriály a bude je třeba vzít v úvahu při porovnávání a realizaci piezodriveru.

1.1 Piezoelektrický jev

1.1.1 Piezoelektrický jev obecně

Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí jeho deformací. Opačný jev se nazývá nepřímý, obrácený piezoelektrický jev nebo elektrostriktce. Spočívá v deformaci krystalu působením vnějšího elektrického pole.

Nejběžnější látkou, u které piezoelektrický jev nastává je křemen a jeho fáze. Jako piezoelektrické látky se jeví řada přírodních krystalů jako např. křišťál, nebo uměle připravené keramické látky.

Jev byl objeven v roce 1880 bratry Curierovými, kteří za něj obdrželi Nobelovu cenu. O rok později byl objeven nepřímý piezoelektrický jev. V roce 1917 byl poprvé použit pro výrobu sonarů kvůli potřebám války. Později, od roku 1940, opět kvůli potřebám války, jev našel už širší uplatnění od krystalových rezonátorů, sonarů přes frekvenční filtry až po mikrofony, gramofonové přenosky a akcelerometry. V roce 1965 byla vyvinuta piezoelektrická keramika.

V současnosti má jev velice široké uplatnění v lékařství, diagnostické technice, dopravě, automobilovém průmyslu, pro senzory, mikro pohony, MEMS a mnoho dalšího.

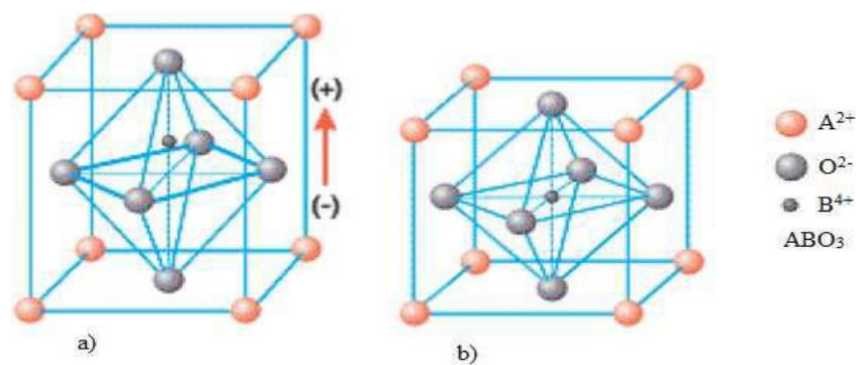
1.1.2 Přímý piezoelektrický jev

Každý krystal je složen z iontů, které jsou uspořádány v pravidelných buňkách. Periodicky se opakující buňky jsou seskupeny do krystalické mřížky. O piezoelektrických vlastnostech rozhoduje právě symetrie buňky. Piezoelektrický jev se může vyskytovat pouze u krystalů se středem symetrie.

V buňkách bez středu symetrie se ionty vlivem mechanického namáhání přesouvají a vzniká elektrický dipól. Ionty bez středu symetrie tento dipól tvořit nemohou. Napětí vytvořené deformací piezokrystalu dosahuje hodnot 10^{-7} V/Pa. Mechanickým namáháním rozumíme tlak, tah, ohyb nebo střih.

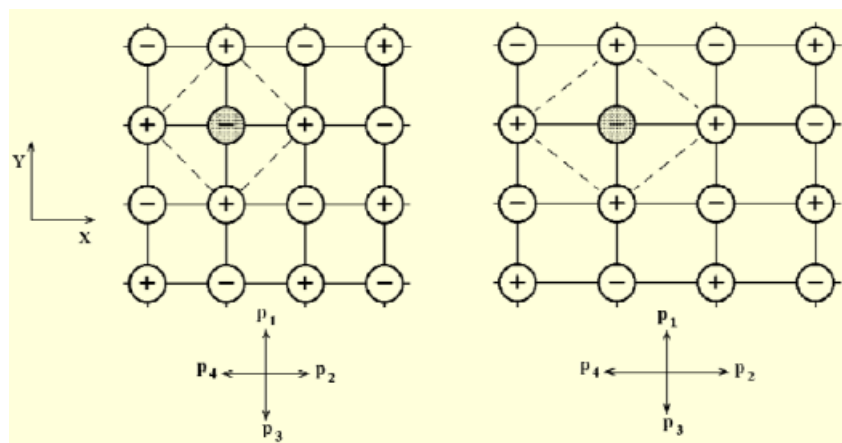
Při odstranění pole a vybití zbytkového náboje se látka vrátí do původní polohy. Jednotlivé náboje jsou prostorově uspořádány tak, že se kompenzují a látka se navenek jeví jako neutrální.

Se změnou rozměrů krystalu souvisí také piezorezistivní jev. Při mechanické deformaci dané látky dochází ke změně elektrického odporu.



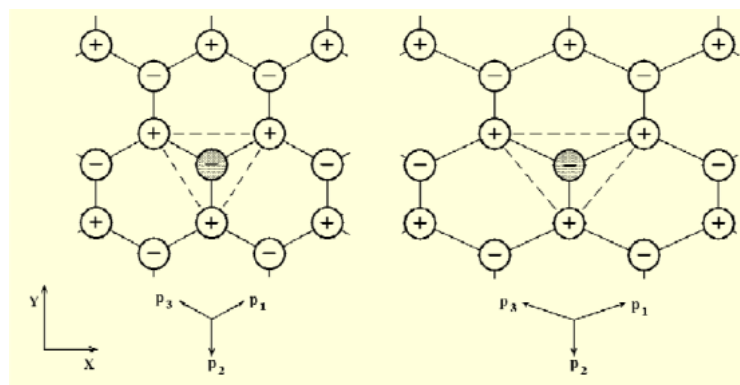
Obrázek 1.1 Buňka bez středu symetrie (a), buňka se středem symetrie (b) [6]

Piezoelektrický jev je možné vysvětlit na atomární úrovni, kde se deformací ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která se v nezdeformovaném krystalu nacházejí ve stejném bodě, se od sebe vzdálí. Na určitých plochách krystalu se objeví elektrický náboj. Pro lepší pochopení principu Obrázek 1.1.



Obrázek 1.2 Krystalická mřížka před (vlevo) a po (vpravo) deformaci [1]

Pokud popisujeme krystal s iontovou vazbou a centrovanou mřížkou, tak v nedeformovaném krystalu jsou náboje rozmístěny symetricky a celkový náboj na povrchu je nulový, viz Obrázek 1.2 (vlevo). Deformace vnější silou způsobí posuny nosičů náboje, ale symetrie v krystalu zůstává zachována a náboj na povrchu je opět nulový, viz Obrázek 1.2 (vpravo).



Obrázek 1.3 Krystalická mřížka pro krystal s iontovou vazbou a centrovanou mřížkou před (vlevo) a po (vpravo) deformaci [1]

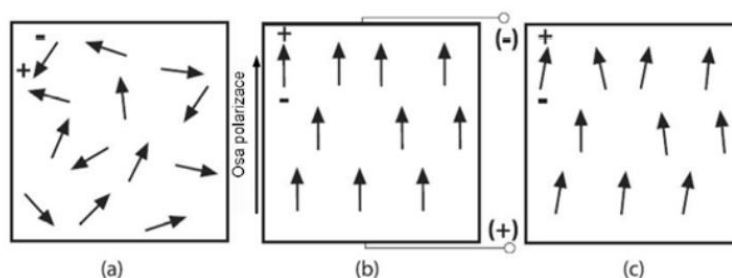
Jiné krystaly mají typ mřížky takový, že deformací se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, viz Obrázek 1.3 (vlevo) se od sebe vzdálí, viz Obrázek 1.3 (vpravo). Na určitých plochách krystalu se objeví elektrický náboj a vyvolá vnitřní elektrické pole v krystalu.

1.1.3 Elektrostrikce

Elektrostrikce, též nepřímý piezoelektrický jev, je jev opačný vůči jevu piezoelektrickému. Vlivem působení vnějšího elektrického pole jsou ionty dané látky posunuty, a to vede k mechanické deformaci krystalu. Deformace je tím větší, čím větší je vnější elektrické pole. Velikost deformace popisuje piezoelektrická konstanta.

Pokud se vnější elektrické pole mění periodicky v čase a frekvence odpovídá frekvenci vlastních elastických kmitů krystalu, vznikne mechanická rezonance. Při mechanické rezonanci vzniká také typický zvuk.

V elektrickém obvodu se piezoelektrika chovají jako kondenzátory. Mají i další parazitní vlastnosti, ale kapacita je dominantní. Kapacita piezomateriálu způsobuje, že po odpojení zdroje se látka nevrátí do původní polohy, ale až po zkratování vývodů. Stále se tu ale ještě může objevit paměťový efekt, viz Obrázek 1.4.



Obrázek 1.4 Orientace dipólů před polarizací elektrickým polem (a), polarizace dipólů elektrickým polem (b), zbytková polarizace po odpojení elektrického pole (c) [7]

1.1.4 Piezoelektrická konstanta

Piezoprvky mohou mít různé tvary, často se používají disky nebo pásky. Různé materiály se chovají různým způsobem. To popisují právě piezoelektrické konstanty. Prodloužení piezoprvku l se pak určuje dle vztahu (1.1)

$$l = \frac{L \times \Delta U}{t} \quad (1.1)$$

kde t je tloušťka pásku, d je piezoelektrická konstanta daného materiálu, U je přiložené napětí a L je délka pásku.

1.1.5 Curieova teplota T_c

Curieova teplota T_c (Curieův bod) je charakteristická vlastnost feromagnetických a piezoelektrických látek. Popsal ji francouzský fyzik Pierre Curie. Nad Curieovou teplotou ztrácí látka své feromagnetické či piezoelektrické vlastnosti. Ke změně dochází skokově při fázovém přechodu.

V piezoelektrických látkách se po dosažení Curieovy teploty narušuje vnitřní krystalická mřížka a uspořádání nábojů. Látka ztrácí spontánní polarizaci a tím pádem piezoelektrické vlastnosti.

1.1.6 Frekvence a rezonance

Účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou a naopak, je ovlivněna frekvencí. Pokud při určité frekvenci dosáhne prvek rezonance, znamená to, že mechanické kmitání je téměř totožné s kmitáním elektrického pole. Při rezonanční frekvenci má prvek nejnižší impedanci, často v řádu $k\Omega$.

Existuje také antirezonanční frekvence, která je opakem, a prvek má zde impedanci nejvyšší v řádu stovek $k\Omega$ až jednotky $M\Omega$.

1.1.7 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály je možné dělit na přírodní a umělé. V počátcích byly využívány přírodní, později byla kvůli vyšším nárokům potřeba lepších materiálů a ve vyšším měřítku. Při vývoji je snaha o co nejlepší piezoelektrické vlastnosti a to znamená vyšší účinnost, citlivost, teplotní stabilitu a další.

Přírodními látkami jsou křemen, sacharóza, dřevo, smalt nebo Rochellova sůl. Pro dosažení požadovaných vlastností se používají umělé krystaly, analogy křemene nebo ortofosforečnan galia ($GaPO_4$), olovnaté a bezolovnaté keramiky, titaničitan barnatý ($BaTiO_3$), titaničitan olovnatý ($PbTiO_3$), niobát sodný draselný ($NaKNb$) a další.

1.1.8 Využití piezoelektrického jevu

Využití piezoelektrického jevu je velice rozsáhlé. Je ho možné využít v různých oborech pro velké množství aplikací. Možnosti využití jsou od generátorů, přes pohony, až po senzory, tlumiče a zvuková zařízení.

V případě generátorů je produkována elektrická energie o nízkém napětí a výkonu. Může se jednat o využití vibrací např. seismické pohyby nebo nerovnosti silnice při jízdě na bicyklu. Dále tlakové piezoprvky, které generují elektrickou energii např. z chůze člověka. Ty mohou být umístěny jak v botě, tak v podlaze. Mohou to také být piezoelektrické zapalovače, nebo je možné generovat energii z dešťových kapek.

Senzory z piezomateriálu mohou snímat různé veličiny. Používají se jako snímače vibrací v dopravním průmyslu, při zabezpečení nemovitých i movitých objektů nebo v hudebních nástrojích. Pak se může jednat o snímače tlaku, síly, teploty, výchylky či zrychlení.

Piezoaktuátory jsou další možností. Pro jejich napájení se používá střídavé napětí s hodnotou vlastní frekvence piezomateriálu. Pokud se dá více piezoaktuátorů dohromady, tak je možné sestavit piezoelektrický motor.

Piezomateriály se uplatní také při detekci plynů v atmosféře, jako generátory ultrazvuku, při rozprašování kapalin nebo i měřiče tloušťky a tvrdosti.

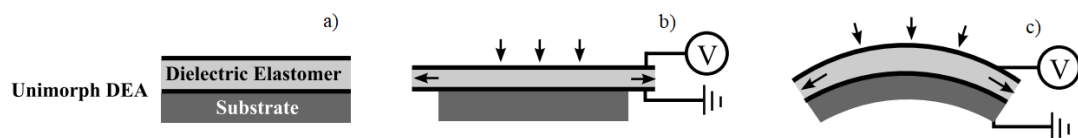
V oblasti audiotechniky se uplatňují jako reproduktory nebo mikrofony. Je možné vyrábět součástky jako krystalové rezonátory, krystalové filtry, piezoelektrické transformátory, piezoelektrická tlačítka a mnoho dalších věcí.

2. PIEZOELEKTRICKÉ AKTUÁTORY

Nejjednodušší piezoaktuátory obsahují pouze jeden piezokrystal. Pro zlepšení vlastností, jako například zvýšení piezoelektrické síly nebo dosažení většího roztažení prvku je často výhodné piezokrystaly uspořádat do různých struktur. V následující kapitole budou zmíněny některé z nich.

2.1 Typ unimorf

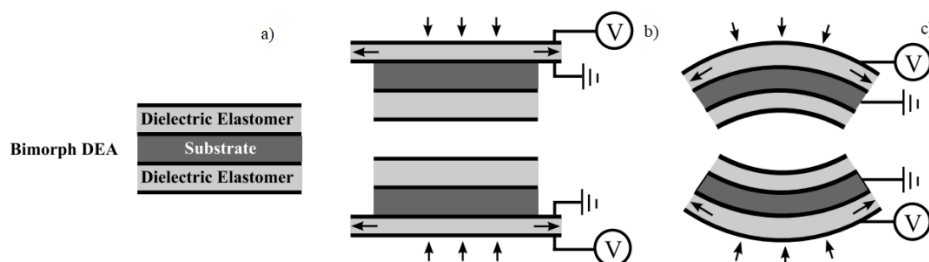
Jedná se o nejjednodušší typ piezoaktuátoru. Zde je piezoaktivní a neaktivní látka navrstvená na sobě. Při přivedení napětí na piezolátku dojde k její prodloužení a aktuátor se deformuje v požadovaném směru, viz Obrázek 2.1. Deformace je podobná jako u bimetalu, který reaguje na teplotu. Veličina δ označuje odklon od výchozí polohy. Tato veličina je závislá na přiloženém napětí a také na mechanických vlastnostech použitých materiálů [11].



Obrázek 2.1 Unimorfní piezoaktuátor, a) neaktivní, b) aktivní nepřipevněn k substrátu, c) aktivní připevněn k substrátu [12]

2.2 Typ bimorf

Typ bimorf je podobný předchozímu typu. Obsahuje navíc další aktivní vrstvu, viz Obrázek 2.2, která se zde dodává kvůli posílení efektu deformace. Zvyšuje se síla a rozsah pohybu. Tyto dvě aktivní vrstvy pak mohou být spojeny sériově nebo paralelně.



Obrázek 2.2 Bimorfní piezoaktuátor, a) neaktivní, b) aktivní nepřipevněn k substrátu, c) aktivní připevněn k substrátu [12]

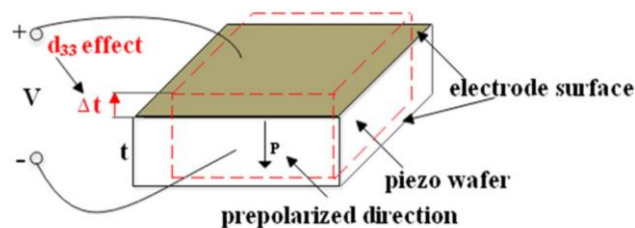
Uniformní i bifornní struktury se hodí pro rezonanční provoz a také pro provoz jako generátory [12].

2.3 Složitější struktury

Je možné přidávat další vrstvy a vytvářet složitější struktury. Následně lze pohyb jednotlivých vrstev počítat. Výhodou těchto vícevrstvých struktur je, že mají vysoké rozlišení, velkou rychlost odezvy a velkou blokovací sílu [13].

Nevýhodou takového systému je, že nemůže generovat velké výtlaky a generovat posun přímo. Jedná se o systémy pracující na principu posuvu d_{33} u piezoelektrik [13].

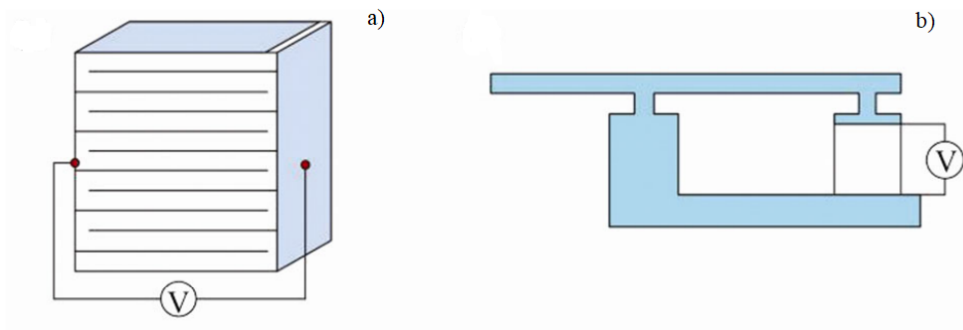
Piezoelektrický efekt d_{33} nastává, pokud je napětí přivedeno na piezodestičku ve směru její polarizace a je generován posuv ve směru této polarizace. Princip znázorněn, viz Obrázek 2.3 [14].



Obrázek 2.3 d_{33} piezoelektrický efekt [14]

Jednotlivé vrstvy jsou zapojeny mechanicky do série a elektricky jsou spojeny paralelně. Vrstvy musí být co možná nejtenčí a mohou jich být stovky. Mluvíme potom o multi-layer piezoelectric actuators (MPA) a dle článku lze pak tuto strukturu považovat za homogenní mechanickou pevnou látku s párem ekvivalentních sil působících na oba konce [14].

Posuv se následně u vícevrstvých struktur generuje pomocí jednoduchých mechanických systémů, založených na principu páky a podobně. Tímto způsobem je odstraněna nevýhoda nemožnosti generování posuvu přímo. Znázorněno, viz Obrázek 2.4.

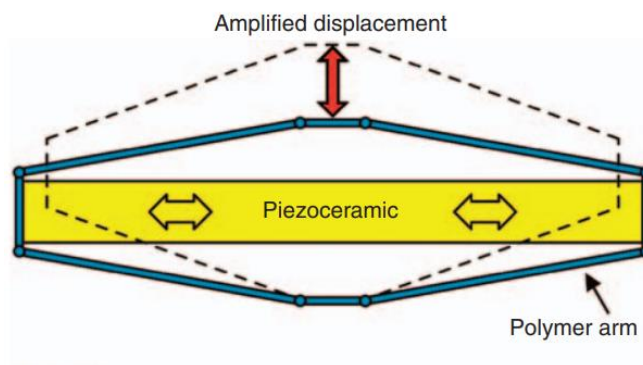


Obrázek 2.4 a) vícevrstvá struktura piezoaktuátoru, b) jednoduchý pákový systém pro piezoaktuátor [13]

2.4 Typ cymbal

Nejjednodušší strukturou cymbal aktuátoru jsou dva kovové plíšky a mezi nimi umístěný piezomateriál. Piezomateriál se orientován tak, aby plíšky neoddaloval, ale natahoval a smršťoval. Plíšky se ohýbají a mohou silově působit na další komponenty v zařízení. Směr pohybu je otočen proti původnímu o 90 °.

Na podobném principu je založen i aktuátor použitý v této práci. Pro jeho výrobu byla použita struktura několika plátů piezomateriálu a místo plíšků složitější pákový systém, jehož princip je patrný, viz Obrázek 2.5.



Obrázek 2.5 Princip funkce piezoaktuátoru typu cymbal [15]

2.5 Aktuátor PK2FSF1

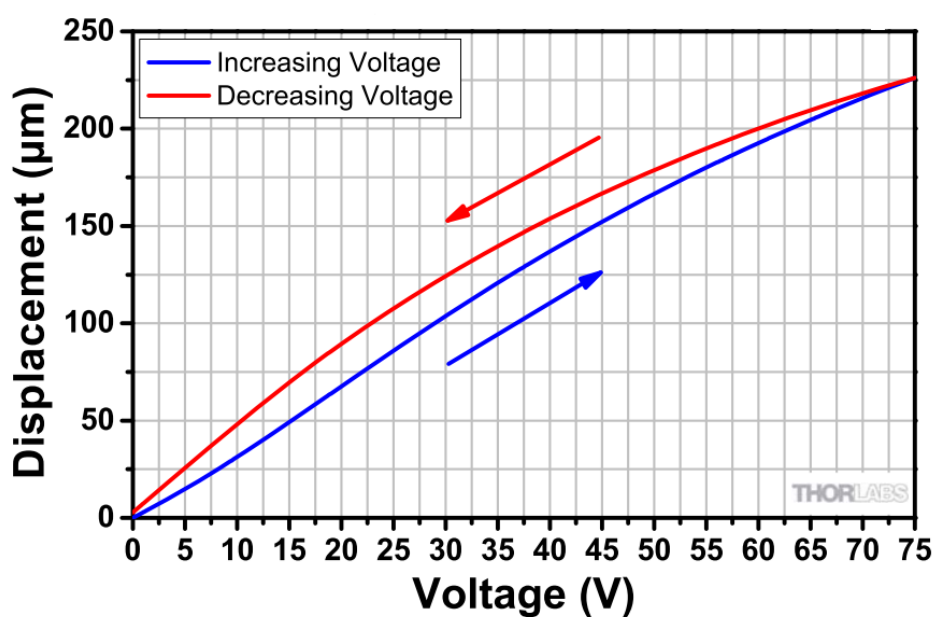
Aktuátor PK2FSF1 se skládá z devíti navrstvených členů piezomateriálu. Tyto články jsou uchyceny v ohebném držáku a ten má funkci výše zmíněného pákového systému, viz Obrázek 2.6. Aktuátor je uložen v obalu ve tvaru U, který není na obrázku kvůli viditelnosti konstrukce aktuátoru.



Obrázek 2.6 Aktuátor PK2FSF1 [16]

Tabulka 2.1 Aktuátor PK2FSF1 základní informace [17]

Rozsah napájecího napětí	0–75 V
Zdvih	při 75 V 220 μm \pm 15 %
Maximální přitlačná síla ve směru pohybu	100 N
Maximální tažná síla ve směru pohybu	5 N
Hystereze	<15 %
Rezonanční frekvence	1,0 kHz
Impedance při rezonanční frekvenci	2 Ω
Faktor rozptylu	<2,0 %
Kapacita	9,0 μF \pm 15 %
Provozní teplota	-25 až 130 °C
Curieova teplota	230 °C
Vnější rozměry	22,3 mm x 11,0 mm x 53,4 mm
Rozměrová tolerance piezoaktuátoru	\pm 0,1 mm



Obrázek 2.7 Graf závislosti roztažnosti aktuátoru PK2FSF1 na přiloženém napětí, bez zátěže, při 20 °C [17]

3. ŘÍZENÍ PIEZOELEKTRICKÝCH AKTUÁTORŮ

Piezelektrická zařízení obvykle vyžadují k provozu napětí od 10 V do 200 V. U AC zařízení je požadována frekvence až 1 MHz. Piezelektrická zařízení mají obecně kapacitní charakter. Kombinace požadavků na vysokou kapacitu, vysokou frekvenci a vysoké napětí znesnadňuje řízení těchto zařízení.

Výrobci piezelektrických zařízení obvykle specifikují kapacitu zařízení při dané frekvenci. Pro první řád aproximace lze většinu nerezonančních piezelektrických zařízení přibližně modelovat jako kondenzátor.

Impedance modelového kondenzátoru je dána vztahem (3.1)

$$Z = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi f C}. \quad (3.1)$$

kde f je frekvence a C kapacita modelového kondenzátoru.

Proud potřebný k buzení zařízení piezelektrických materiálů je určen z Ohmova zákona vztahem (3.2)

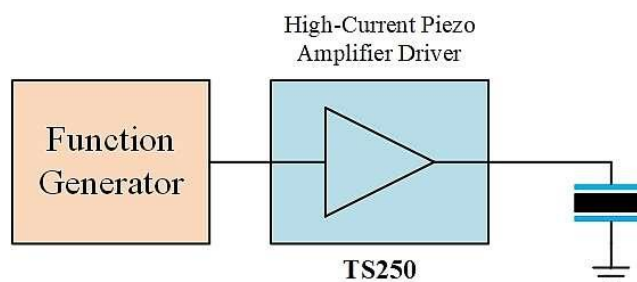
$$|I| = \left| \frac{U}{Z} \right| = U\omega C = 2\pi f C U. \quad (3.2)$$

kde U je napětí, f je frekvence a C kapacita modelového kondenzátoru.

3.1 Napět'ové řízení piezoaktuátoru

3.1.1 Silnoproudý zesilovač a piezoprvek

Silnoproudý zesilovač pro piezoaktuátory, též piezodriver, je nutný pro ovládání piezoprvků. Běžné zdroje signálu dosahují napětí 5 V a méně. Signál je nutné zesílit jak napět'ově, tak proudově. Vyšší napětí v řádu desítek až stovek voltů je nutné, aby piezelektrický jev nastal. Velké proudy souvisí se zkreslením signálu. Základní zapojení, viz Obrázek 3.1.



Obrázek 3.1 Zapojení piezelektrického prvku na zdroj signálu přes piezodriver [3]

Jak bylo popsáno výše, u piezoaktuátorů a jiných prvků je dominantní vlastnost kapacita. Tato kapacita je typická pro daný produkt a výrobce ji udává v datasheetu. Kapacita je po přiložení napětí nabitá. Při změně signálu na opačnou polaritu je nejdříve nutné vybit náboj uložený v piezoelektrickém prvku a následně prvek ovládat.

Vše musí probíhat rychle, frekvence u piezoprvků dosahují desítek až stovek kHz. Z vysoké frekvence, ve spojení s vysokým napětím a kapacitou piezoprvků v řádu jednotek μF , vyplývá také vysoký špičkový proud v řádu jednotek ampérů [3].

Tyto nutné parametry piezo driveru je možné pozorovat na základních fyzikálních vzorcích:

Energie kondenzátoru je dána vztahem (3.3)

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}. \quad (3.3)$$

kde C je kapacita nabitého piezoprvků, U je napětí nabitého piezoprvků, Q je náboj nabitého piezoprvků.

Ze vztahu (3.3) je patrné, že energie E uložená v kondenzátoru je přímo úměrná kapacitě C a druhé mocnině napětí U.

Po úpravě je energie E nepřímo úměrná kapacitě C a přímo úměrná druhé mocnině náboje Q. Náboj Q je pak dle vztahu (3.4) roven

$$Q = It. \quad (3.4)$$

kde I je proud vybíjení náboje a t je čas, za který bude náboj vybit.

Ze vztahu (3.4) je patrné, že náboj Q je součinem proudu I a času t a obě veličiny jsou náboji Q přímo úměrné. Pokud klademe nároky na vysoké frekvence, snižujeme tím čas vybíjení a je nutné použít vyšší proudy. Pokud vztah dosadíme do vztahu (3.3) a vztáhneme tyto veličiny k celkové energii E, je vidět přímá úměra a kvadratická závislost.

Základními požadavky na piezodriver jsou tedy napětí v řádu stovek V, špičkový proud v řádu jednotek A, frekvence v řádu stovek kHz. Aby piezoprvek pracoval správně, je nutné dbát také na teplotní stabilitu, časovou stabilitu, minimální offset a minimální šum.

Požadavky na napětí

Před výběrem ovladače je důležité porozumět požadavkům na napětí piezoelektrického zařízení. Některé piezoměniče vyžadují pouze amplitudu napětí mezi amplitudami, zatímco jiné napětí od 0 do amplitudy. Ultrazvukové měniče například vyžadují pouze

amplitudu mezi vrcholy signálu k vytvoření ultrazvuku. Jde zde pouze o změnu polarit. Například kolísání sinusového napětí od -30 V do +30 V, což je 60 V_{p-p}.

Akční člen potřebuje pro správnou funkci většinou napětí od 0 do amplitudy, například obdélkový signál od 0 V do +40 V, což je 40 V_{p-p}. Dalším parametrem je potřebný rozsah napětí [3].

Piezoelektrický výkon

Jak bylo uvedeno v předchozím textu, u piezoelektrických zařízení převažují kapacitní a částečně odporové vlastnosti při dané rezonanční frekvenci. Požadavky na napájení obou druhů zátěží se odlišují.

Pokud vezmeme v úvahu kapacitní zátěž, její reaktance je zdánlivý elektrický odpor. To znamená, pokud zanedbáme parazitní jevy, že takové zařízení energii nespotřebovává, ani nerozptyluje. Přivedený výkon je považován za jalový a je rozptýlen uvnitř piezodriveru. Piezodriver se ohřívá místo ovládaného piezopravku [3].

Při výběru piezodriveru je nutné zvážit, jestli vybraný piezodriver tento výkon snese. Jalový výkon je dán vztahem (3.5)

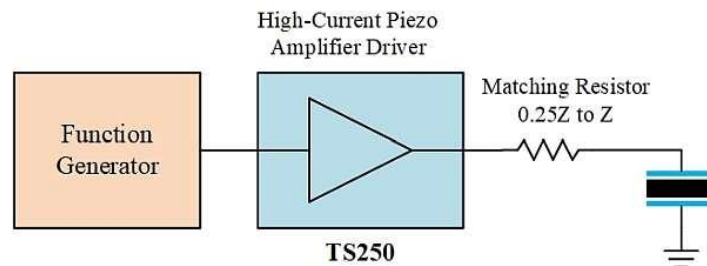
$$P_{ef} = I_{ef}^2 Z. \quad (3.5)$$

kde I_{ef} je efektivní hodnota proudu, Z je impedance.

3.1.2 Silnoproudý zesilovač s rezistorem

V kapacitních piezoelektrických prvcích se neztrácí energie, ale rozptyluje se uvnitř silnoproudého zesilovače. To může omezit jeho napětí a proud na výstupu. Piezoelektrické prvky jsou napájeny napětím, nikoli proudem nebo výkonem. K udržení napětí je ale potřeba vysoký proud, zejména při vysoké frekvenci, kde je nutné kapacitu prvku rychle vybíjet.

Aby se předešlo zahřívání zesilovače, používá se odporová zátěž pro lepší optimalizaci ztrátového výkonu zesilovače. To vede ke zvýšení výstupního napětí a proudu. Přidáním sériového rezistoru má impedance skutečnou složku a rozptyluje energii mimo piezozesilovač, jak je znázorněno, viz Obrázek 3.2. Část energie se rozptýlí na rezistoru.



Obrázek 3.2 Sériové zapojení rezistoru [3]

Doporučený rozsah odporu je od $0,25Z$ do Z . Piezoelektrická impedance Z je určena rovnicí (1.1).

Přizpůsobení impedance sériového odporu je výhodné pouze v případě, že piezoelektrický budič nemůže vydávat maximální napětí kvůli nadměrnému jalovému výkonu a zahřívání zesilovače. Zvýšení impedance rezistorem funguje pouze pro sinusový průběh. Některé zesilovače nemusí být stabilní. Sériový rezistor zlepšuje jejich stabilitu.

U kapacitní zátěže jsou napětí a proud fázově posunuty o 90° . Když je proud maximální, napětí je blízko nuly. Sériový odpor neovlivňuje napětí. Když je napětí maximální, proud je minimální. V tomto okamžiku je proud rezistorem malý, a proto dochází k minimálnímu snížení špičkového napětí. Výkon absorbovaný rezistorem je významný a snižuje zahřívání zesilovače. Rovnice (3.6) určuje ztrátový výkon sériového rezistoru.

$$P_{ef} = I_{ef}^2 R. \quad (3.6)$$

kde I_{ef} je efektivní hodnota proudu, R je odpor rezistoru.

Celková impedance obvodu je pak dána vztahem (3.7)

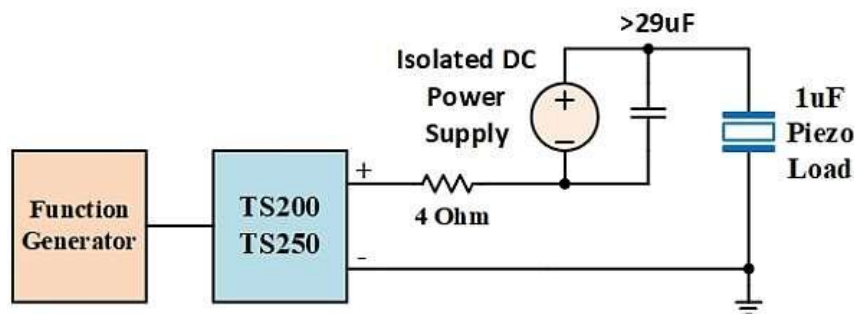
$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}. \quad (3.7)$$

kde f je frekvence a C kapacita piezoprvek, R je odpor rezistoru.

Je nutné volit rezistor pro příslušné výkonové zatížení. Pro vysokofrekvenční aplikace je také nutné dbát na minimální indukčnost rezistoru.

3.1.3 Vysokonapěťový piezodriver

Převod proudu bipolárního zesilovače na unipolární vysoké napětí pro piezoprvek, při vysoké frekvenci v řádu 10 kHz, vyžaduje špičkové napětí kolem 80 V. Výstupní napětí piezodriveru musí být od -40 V do +40 V. Protože napětí zesilovače nesplňuje požadovaných 80 V, použije se stejnosměrný napájecí zdroj, jak je znázorněno, viz Obrázek 3.3.



Obrázek 3.3 Zdroj stejnosměrného předpětí v kombinaci s piezoelektrickým zesilovačem tvořící vysoké výstupní napětí [3]

Piezozesilovač je zapojen do série s výkonovým rezistorem a do série s izolovaným 40 V DC napájením. Pro minimalizaci toku střídavého proudu napájecím zdrojem jsou vyžadovány externí bypassové kondenzátory. Přemost'ovaná kapacita by měla být dostatečně velká, aby její impedance byla malá ve srovnání s impedancí piezoprku.

3.1.4 Driver PDu100B Miniature

PDu100B Miniature je napěťový driver s lineárním operačním zesilovačem pro napájení piezoaktuátorů. Poskytuje variabilní zesílení a offset. Má přepínatelné rozsahy napětí, volbu mezi unipolárními a bipolárními vstupy a výstupy [18].

Napájení je 3 až 5,5 V. Napětí na výstupu je pak nastavitelné pro unipolární výstup 60, 90 a 100 V. Pro bipolární výstup to je +/- 60, +/- 90 a +/- 100 V. Na bipolárním výstupu je vždy maximální napětí 60, 90 a 100 V_{p-p}.

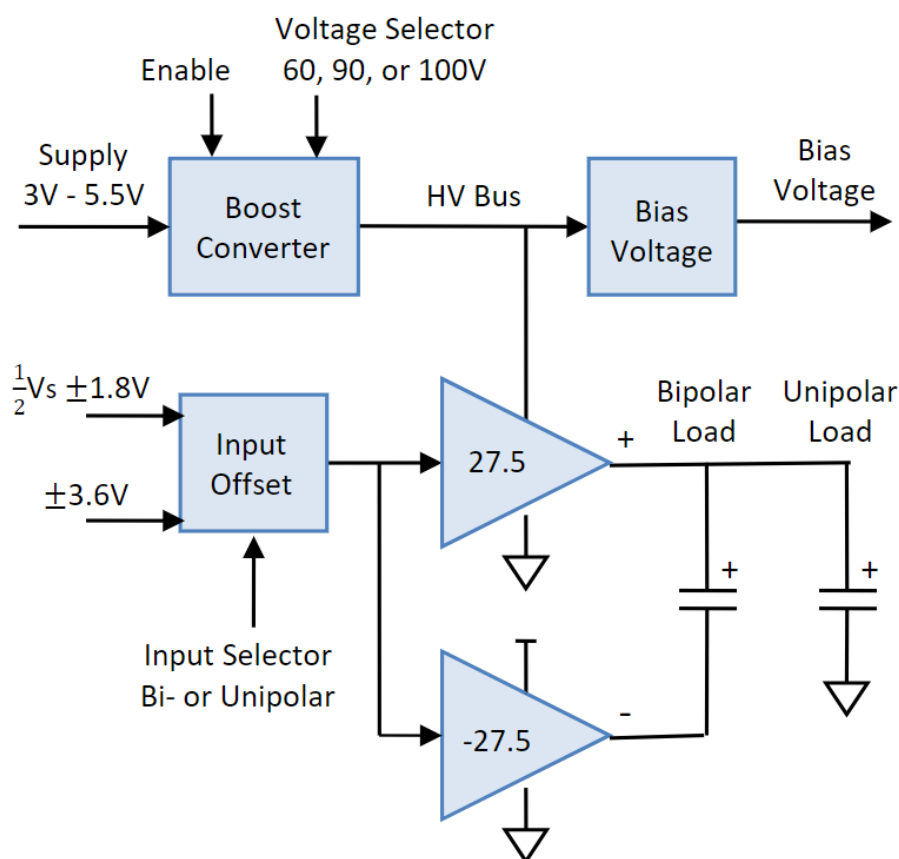
Funkce obvodu na blokovém schématu, viz Obrázek 3.4, je následující. Na vstupu je blok nazvaný Boost converter. Jedná se o zvyšující step up měnič, který má na základě vstupů (sepnutých spínačů) volitelná napětí 60, 90 a 100 V na výstupu. Je doplněn také vstupem Enable, pro vyřazení měniče z provozu. Výstupním napětím jsou napájeny operační zesilovače na výstupu.

Operační zesilovače na výstupu jsou řízeny pomocí bloku Input offset. Tento blok je nastaven pomocí vstupů (sepnutých spínačů) do bipolárního nebo unipolárního režimu.

V bipolárním režimu je driver řízen pomocí napětí na V_{bp} v rozsahu -3,6 – +3,6 V. Tento rozsah odpovídá výstupu od nuly po nastavenou maximální hodnotu.

V unipolárním režimu je driver řízen pomocí napětí s offsetem +2,5 V, ke které je přičítána hodnota +/-1,65 V. Tento rozsah odpovídá výstupu od nuly po nastavenou maximální hodnotu, následně prepólování a nabití piezoaktuátoru na opačnou hodnotu.

Pomocí driveru PDu100B Miniature byla provedena základní měření s piezoaktuátory.



Obrázek 3.4 Blokové schéma napěťového driveru PDu100B Miniature [18]

3.2 Proudové řízení

Vrstvené piezoaktuátory se běžně roztahují v řádu mikrometrů. Mají však potenciál pro přesnější řízení, a to v řádu nanometrů. Řízení pomocí napětí s sebou přináší řadu problémů.

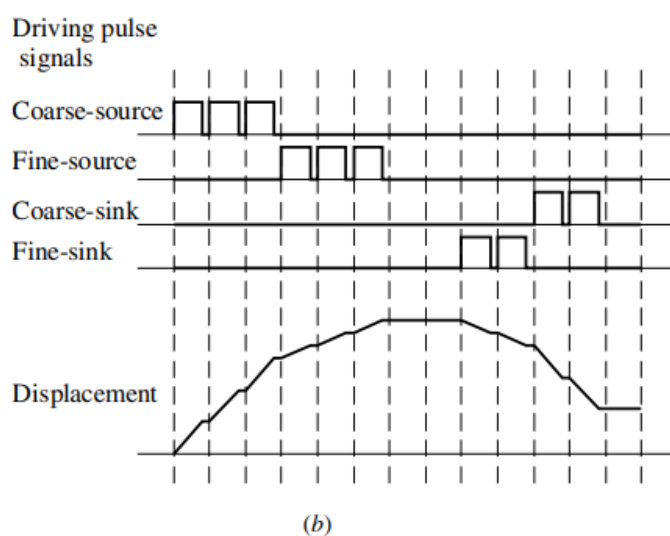
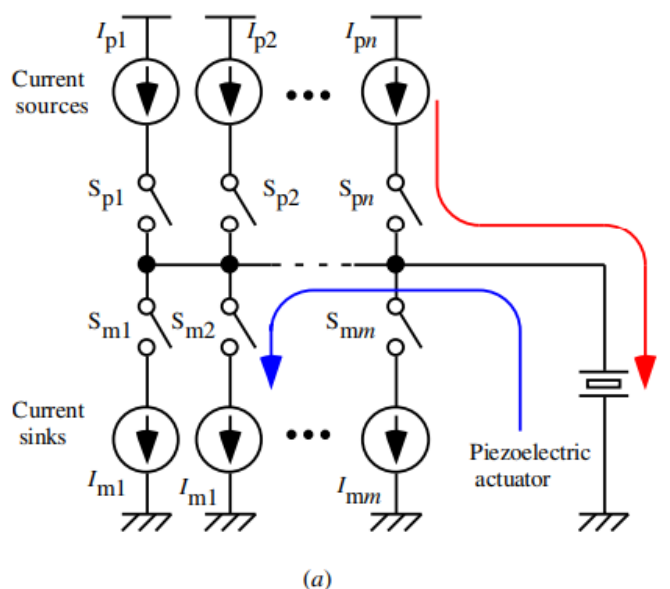
Prvním z problémů je přítomnost hystereze. Potlačení hystereze je pro tuto aplikaci klíčová. V měřicí soustavě je nutné mít piezoaktuátor vždy ve stejné výchozí poloze. Proudové řízení by mohlo tento problém vyřešit. Aktuátor je nutné napájet inverzně nebo střídat směry proudů pro dosažení výchozí polohy.

U napěťového řízení se pro přesné řízení používají DAC převodníky. Lineární převodník umožňuje široký rozsah měření roztažení a zpětnou vazbu. Rozlišení DAC však omezuje dynamický rozsah řídicího signálu. Je to kvůli napěťovému šumu, který vyvolává proud do aktuátoru a řízení posuvu je pak velice obtížné [21].

3.2.1 Řízení piezoaktuátorů pomocí proudových impulzů

Řízení pomocí proudových impulzů je jednou z možností přesného nastavení roztažení piezoaktuátoru. Princip řízení spočívá v postupném připojování proudových zdrojů typu source a sink.

Dominantní vlastností piezoaktuátoru je kapacita. Ve chvíli konstantního proudového impulzu je tedy aktuátor podobně jako kondenzátor nabíjen lineárně. S tím roste lineárně i jeho roztažení. Všechny impulzy mají svou definovanou délku, tím pádem je nabíjení ovlivněno jejich množstvím.



Obrázek 3.5 Princip řízení piezoaktuátoru pomocí proudových impulzů, a) schéma zapojení, b) závislost impulzů na roztažení [21]

Obrázek 3.5 a) ukazuje princip výše zmíněného proudového řízení. Proudové zdroje typu source jsou označeny jako I_p a platí $I_{p1} > I_{p2} > \dots > I_{pn}$, kde n je jejich počet. Proudové zdroje typu sink jsou označeny jako I_m a platí $I_{m1} > I_{m2} > \dots > I_{mm}$, kde m je jejich počet. Spínače S_{p1} , S_{p2} , ..., S_{pn} a S_{m1} , S_{m2} , ..., S_{mm} mají svou řídicí elektroniku a jsou řízeny podle potřeby [21].

Jednotlivé zdroje jsou schopny dodávat různé hodnoty proudů a při řízení je možné generovat pulzy pro hrubé či jemné řízení piezoaktuátoru. Množstvím proudových zdrojů lze pak doladit přesnost systému, jeho rozlišení. Závislost impulzů na roztažení ukazuje Obrázek 3.5 b).

Důležitý fakt je, že deformace piezoaktuátoru je přímo úměrná stavu vnitřního nabití piezomateriálu. Z toho vyplývá, že piezoaktuátory lze řídit dodáním elektrického náboje místo upravení napětí na aktuátoru [21].

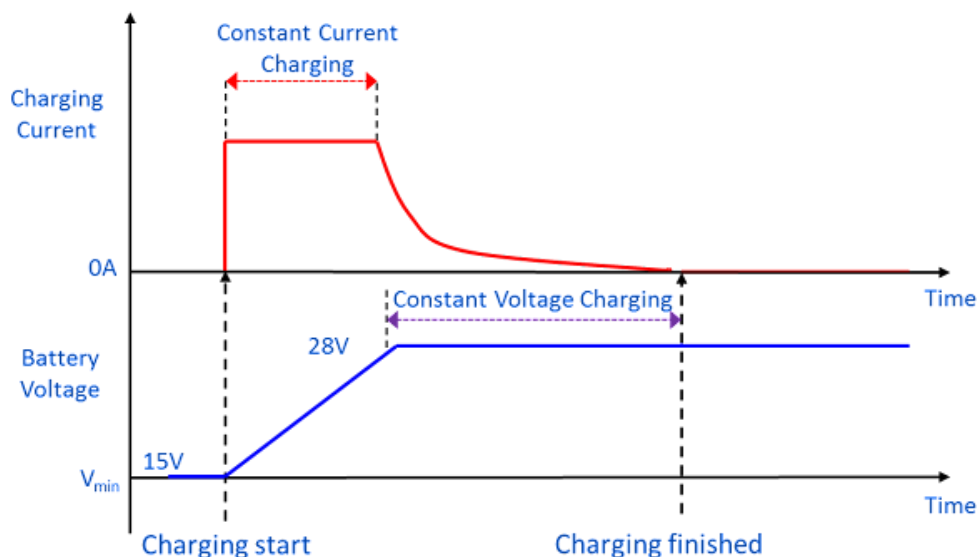
Úpravou hodnoty proudu a délky trvání impulzu je náboj přesně řízen, protože je dán jejich součinem. Díky tomu je zde minimální hystereze v celém rozsahu napětí. Posunutí lze spočítat množstvím impulzů a není nutná zpětná vazba. I zde se nachází šum, ale proudový. Ten je v impulzu integrován a jeho vliv bude mnohem menší než u napěťového. Tato metoda slibuje větší rozlišení než použití DAC převodníků [21].

3.2.2 Řízení piezoaktuátoru pomocí kontinuálního proudu

Na základě prostudování článků a pochopení řízení pomocí proudových impulzů byla započata práce na řízení pomocí kontinuálního proudu.

Piezoaktuátor bude napájen z proudového zdroje. Roztažení nebude aproximace částí sinusoidy jako v předchozím případě, ale má mít lineární celou naběžnou hranu. Následuje vybití a návrat aktuátoru do výchozí polohy. Proces se opakuje. Průběh bude mít podobu jednoho proudového impulzu, viz Obrázek 3.5 b).

Systém by se měl chovat jako nabíjení kondenzátoru konstantním proudem viditelné, viz Obrázek 3.6. Napětí roste lineárně.



Obrázek 3.6 Nabíjení kondenzátoru konstantním proudem [22]

Celý proces se řídí dle základních vztahů pro výpočet náboje Q . Platí vztahy

$$Q = C\Delta U, \quad (3.8)$$

kde Q je náboj, C je kapacita piezoaktuátoru, ΔU je změna napětí na aktuátoru.

$$Q = I\Delta t, \quad (3.9)$$

kde I je proud tekoucí do piezoaktuátoru, Δt je změna času. Tedy čas, po který proud do aktuátoru tekl.

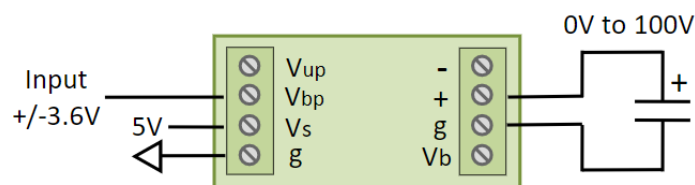
Na základě rovností vztahů (3.8) a (3.9) se dá výsledný obvod nastavit.

4. MĚŘENÍ ROZTAŽNOSTI PIEZOAKTUÁTORU

Pro objektivní srovnání dostupných piezodriverů a ověření funkčnosti zkonstruovaného piezodriveru bude stěžejní měřicí soustava pro měření roztažnosti piezoaktuátoru. Je nutné zvolit takový způsob měření, který bude minimálně ovlivňovat měřený aktuátor. Tuto měřicí metodu bylo nutné nejdříve nalézt. Byly otestovány některé kontaktní a bezkontaktní metody.

Prvním krokem bylo nastavení měřicí aparatury a snaha naměření charakteristiky uvedené v datasheetu aktuátoru, viz Obrázek 2.7. Piezoaktuátor byl připojen k driveru PDu100B, který ovládá piezoaktuátor změnou napětí.

K napájení driveru byl použit laboratorní napájecí zdroj Gwinstek GPD-4303S, který byl nastaven na napětí 5 V. Napětí na výstupu driveru bylo měřeno multimetrem Fluke 117. K ovládání byl použit generátor Agilent 33500B ve statickém režimu od - 3 V do 3 V s krokem 0,2 V. Zapojeno dle schématu, viz Obrázek 4.1.



Obrázek 4.1 Schéma zapojení piezodriveru PDu100B [18]

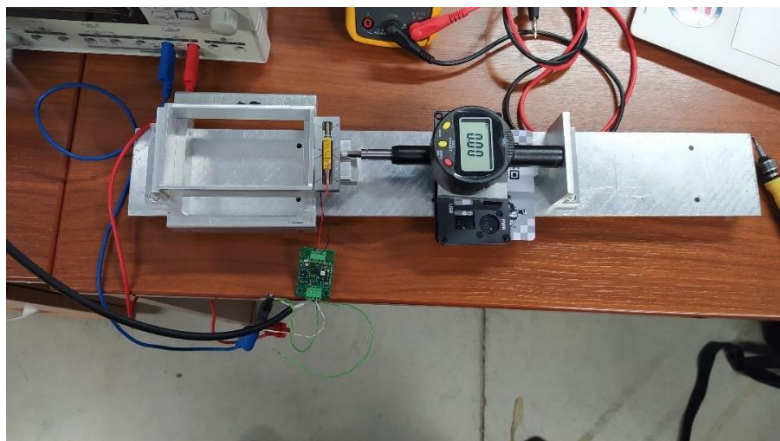
4.1 Měření pomocí mikrometru

K měření roztažení aktuátoru byl použit mikrometr. Charakteristika byla naměřena. Je z ní patrná velká nepřesnost měření. Tato nepřesnost byla patrná pouhým okem. Mikrometr prohýbal piezoaktuátor, protože síla, kterou mikrometr působil, byla příliš velká. Pro měření byl tak mikrometr nepoužitelný. Ručně nebylo možné nastavit pokaždé stejnou přítlačnou sílu a dojít ke korektnímu výsledku.

4.2 Měření pomocí úchylkoměru

K druhému měření byl použit úchylkoměr. Charakteristika byla naměřena a je z ní patrná také velká nepřesnost měření. Zde už byly odbourány problémy z minulého měření.

Úchylkoměr působil na piezo menší silou a měření tolik neovlivňoval. Dále byl zhotoven jednoduchý držák a konfigurace při měření byla stále stejná. Problém byl ale v nedostatečném rozsahu měřidla. I když ovlivnění nebylo už tak veliké jako v předešlém případě, tak tu stále bylo.

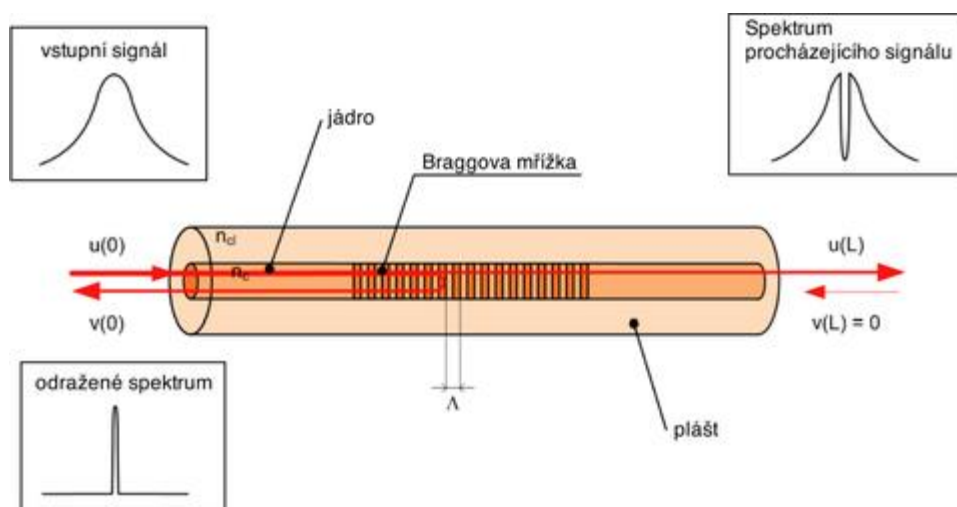


Obrázek 4.2 Úchylkoměr ve zhotoveném stojanu při měření roztažnosti piezoaktuátoru

4.3 Měření pomocí spektrálního analyzátoru

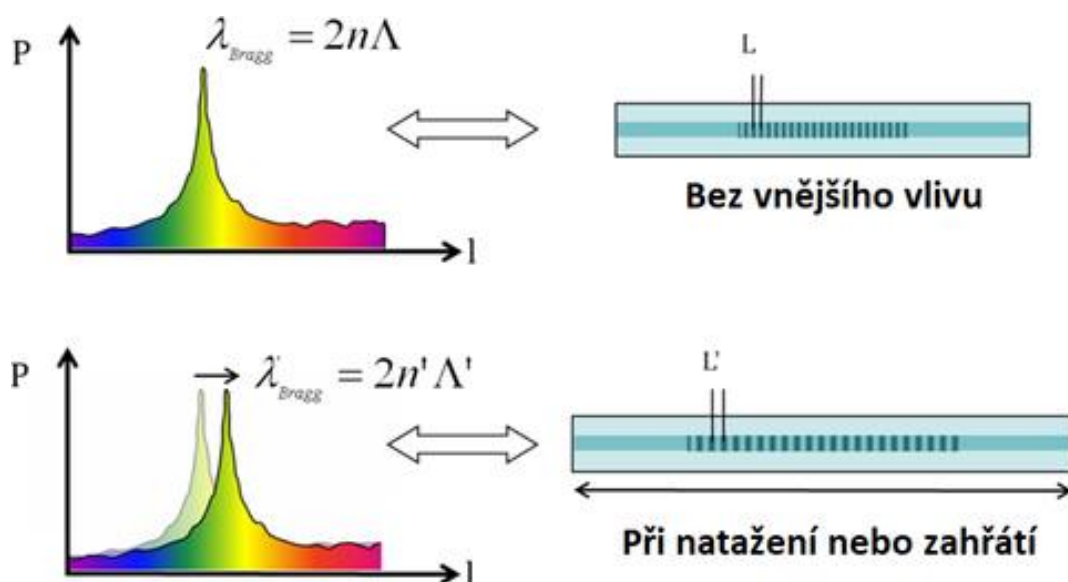
Další pokus o změření byl pomocí Braggovy vláknové mřížky (FBG) a spektrálního analyzátoru. Vláknó bylo lepeno epoxidovým lepidlem na vyhříváné podložce o teplotě 63 °C. Speciální epoxidové lepidlo tvrdne 7 hod při této teplotě. Mřížka 1550 nm, je předepnuta minimálně silou 1 N, viz Obrázek 4.5. Mřížka má fyzickou délku cca 3 mm a na vláknó je vytvořena expozicí. Tento druh spoje byl testován dlouhodobě na 3 N při zvýšené teplotě, krátkodobě 9 N.

Vláknové mřížky fungují jako optické pásmové filtry, odráží optické záření o vlnové délce blízké Braggově rezonanční vlnové délce. Záření ostatních vlnových délek propouští. Přenos mřížky je ale ve skutečnosti ovlivněn mnoha vstupními parametry a jejich vhodnou změnou lze dosáhnout požadované odezvy [20]. Princip je patrný, viz Obrázek 4.3.

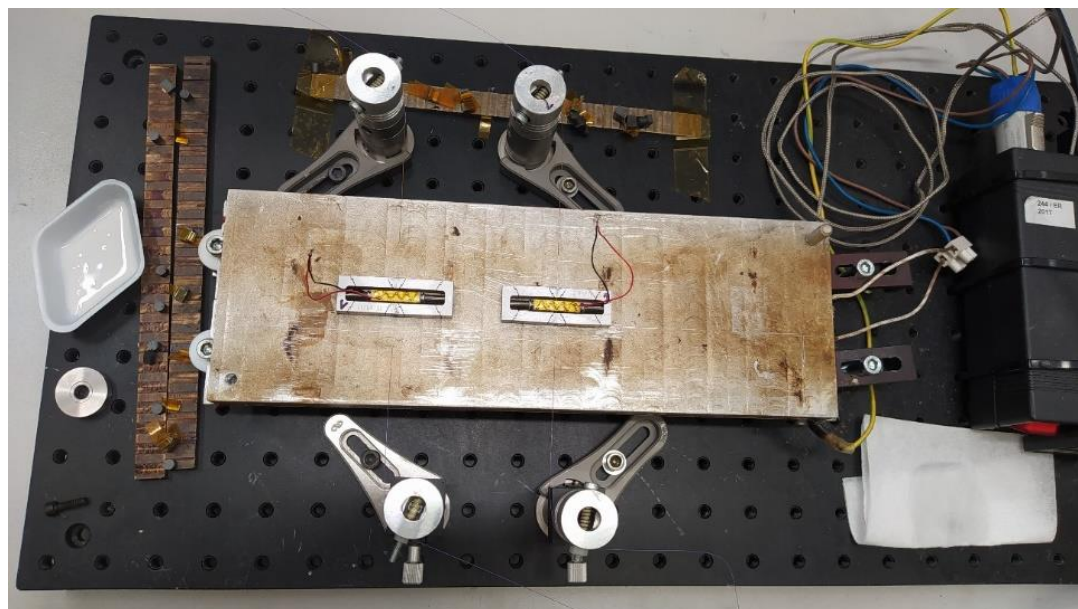


Obrázek 4.3 Princip činnosti vláknové mřížky (FBG) [19]

V měření byla snaha o využití změny periody mřížky v důsledku mechanického působení na optické vlákno s Braggovou mřížkou. Na spektrálním analyzátoru se toto silové působení projeví jako posun maxim ve spektru signálu, viz Obrázek 4.4. Spektrální citlivost vláknové mřížky FBG na teplotu je $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, citlivost na tah je $1,3 \text{ pm}/\mu\epsilon$ (mikro strain) [20].

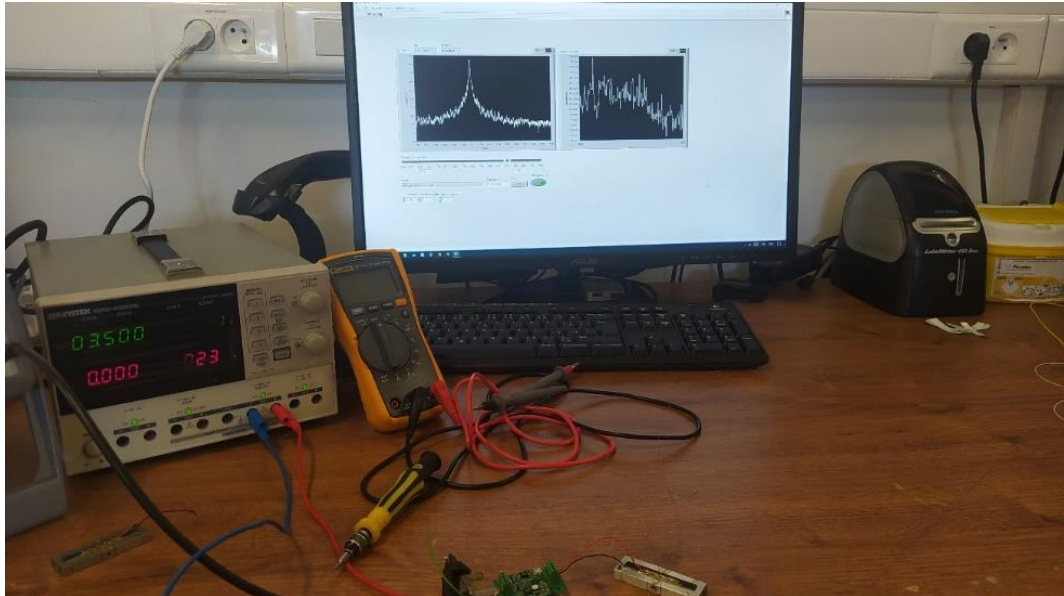


Obrázek 4.4 Princip přeladování vláknové mřížky (FBG) [20]



Obrázek 4.5 Lepení optického vlákna na piezoaktuátor

Po vykreslení naměřených dat do grafu bylo jasné, že měření tímto způsobem také provést nepůjde. Nalepené vlákno příliš ovlivnilo měření. Délka zhruba 1 cm je příliš krátká a vlákno omezuje roztažení piezoaktuátoru.



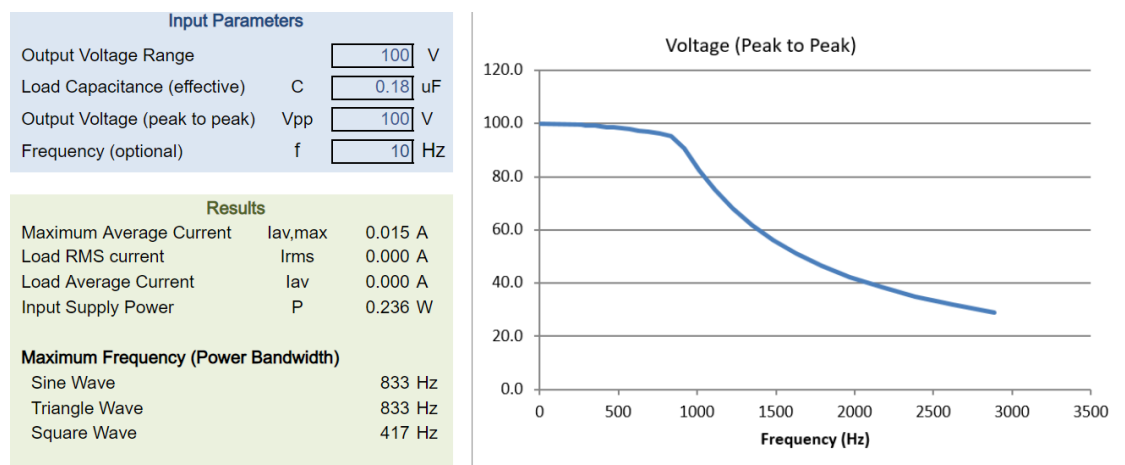
Obrázek 4.6 Měření na spektrálním analyzátoru

Řešení tohoto problému se nabízí dvě. První možnost je vymyslet jinou měřicí sestavu s vláknem. Sestava by měla vypadat tak, že roztahované vlákno bude delší např. 50 cm a prodloužení vlákna se rozdělí do této délky. Ovlivnění aktuátoru bude mnohonásobně menší. Druhá možnost je použití bezkontaktní metody.

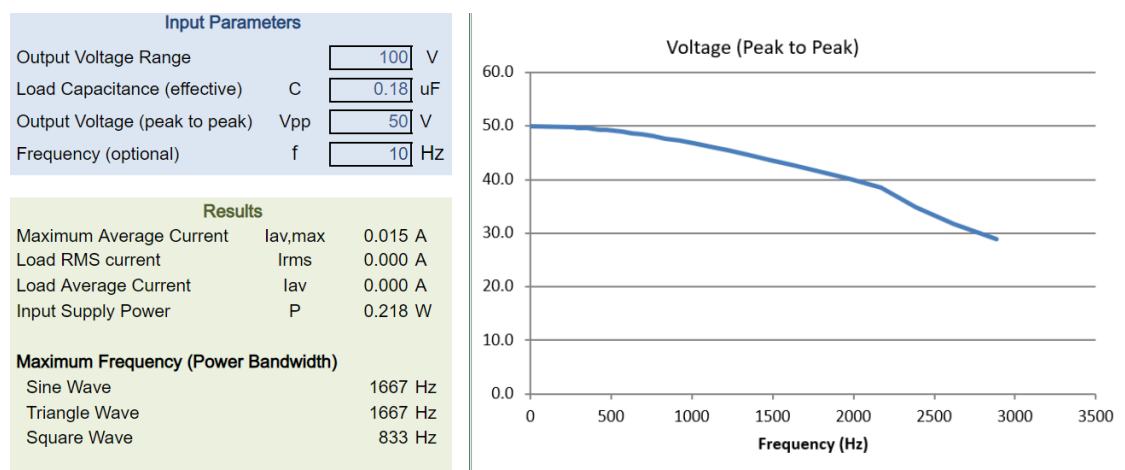
5. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK

Pro měření byla použita stejná konfigurace, co se týká přístrojů a zapojení driveru, jako v kapitole 4. Navíc byl použit osciloskop Agilent MSO-X 2012A. Na něm pak byla měřena napětí při různých frekvencích a sledováno zkreslení signálu. Zaznamenané průběhy jsou uvedeny v příloze C.

Cílem měření bylo srovnat reálné podmínky s teoretickými, co udává výrobce. Dále byla snaha ověřit, že dominantní vlastností piezoaktuátoru je kapacita a jestli je možné následně použít při simulaci a testování místo piezoaktuátoru kondenzátor.



Obrázek 5.1 Online kalkulačka pro vykreslení závislosti napětí na frekvenci pro napětí 100 V



Obrázek 5.2 Online kalkulačka pro vykreslení závislosti napětí na frekvenci pro napětí 50 V

Pro první měření byl použit driver PDu100B Miniature a piezo PA4FKH3W. Piezoaktuátor má kapacitu 180 nF a jedná se o jeden blok aktuátoru od firmy Thorlabs, zmíněném v kapitole 2.5.

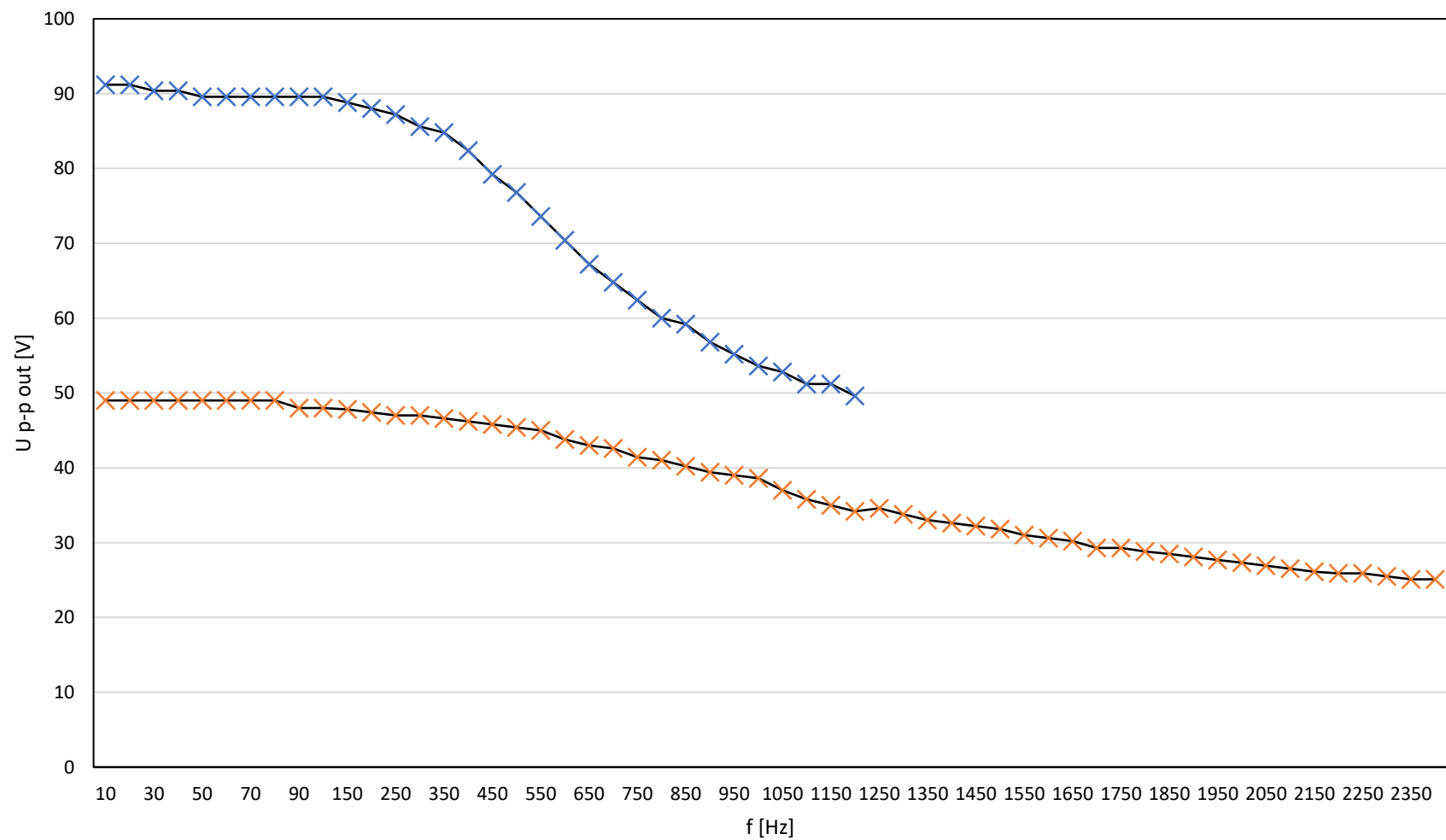
Měření vždy probíhalo od frekvence 10 Hz až po dobu, než se začal driver příliš zahřívat. Při kapacitě 180 nF se při 100 V, tedy při napětí 6,5 V_{p-p} na unipolárním vstupu, se podařilo dosáhnout frekvence 1,2 kHz. Při napětí 50 V, tedy při napětí 3,5 V_{p-p} na unipolárním vstupu, se podařilo dosáhnout frekvence 2,4 kHz.

Naměřené charakteristiky, viz Obrázek 5.3 odpovídá charakteristikám z kalkulátoru výrobce, viz Obrázek 5.1 a Obrázek 5.2. Naměřená data jsou v příloze A.

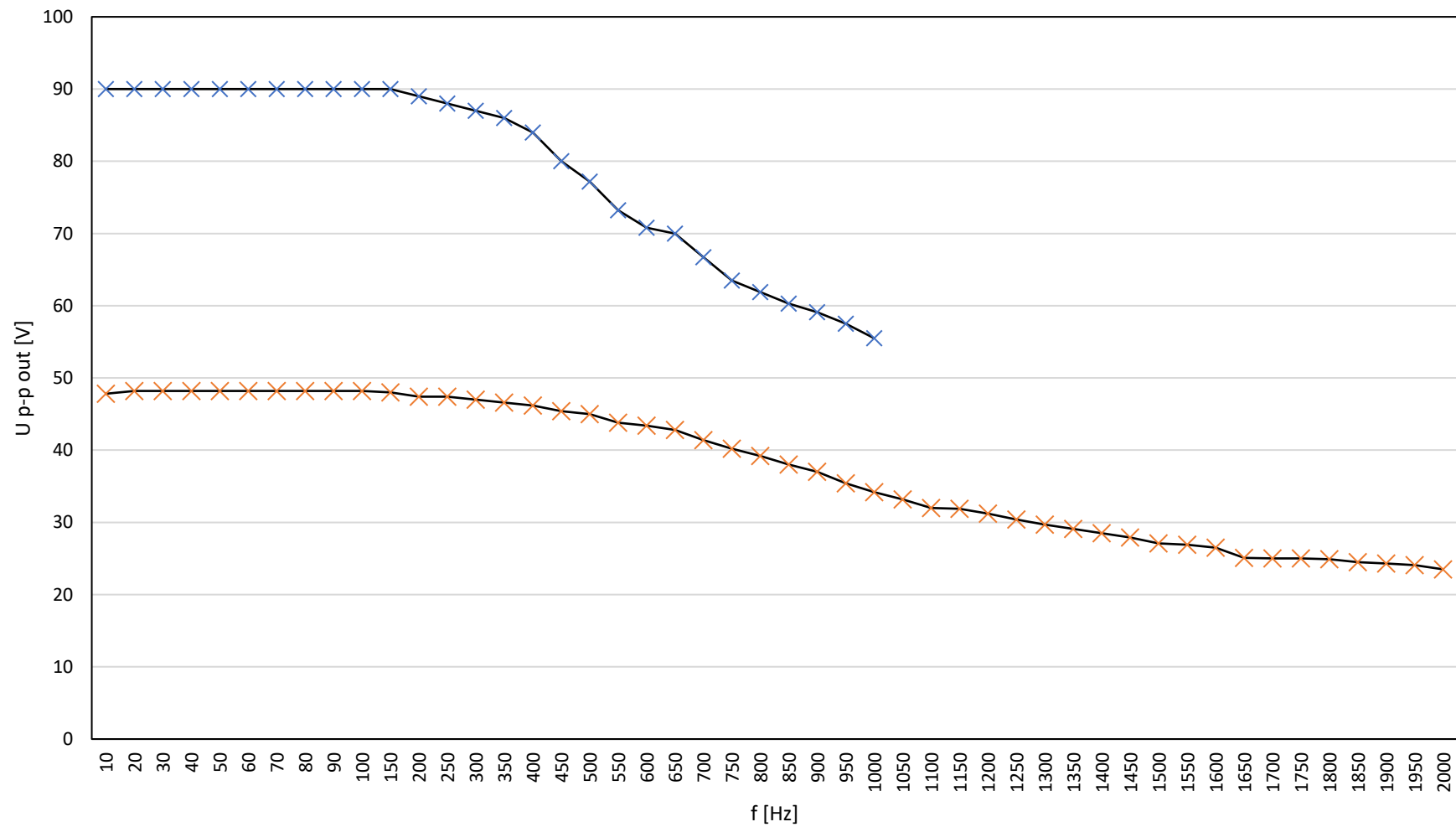
Obdobné měření bylo provedeno i pro paralelní dvojici piezo bloků PK4FA2H3P2 o kapacitě 560 nF. Charakteristika byla také shodná s tím, co udává výrobce. Naměřená data jsou v příloze A a charakteristika je uvedena v příloze B.

Poslední měření probíhalo s fóliovým kondenzátorem o kapacitě 220 nF na 250 V AC. Byl zvolen fóliový, protože má dobré vf vlastnosti. Naměřená charakteristika, viz Obrázek 5.4 ukazuje, že kondenzátor se při obou napětích 100 V i 50 V chová stejným způsobem. Naměřená data jsou také uvedena v příloze A.

Z tohoto měření vyplynulo následující. Teorie uváděná výrobcem se poměrně přesně shoduje s naměřenými daty. Hlavním cílem ale bylo ověřit, že dominantní vlastností piezoaktuátoru je kapacita a při návrhu obvodu, simulaci a testování bude možné k němu přistupovat jako ke kondenzátoru. Toto tvrzení se potvrdilo.



Obrázek 5.3 Závislost napětí U na frekvenci f , konfigurace driver PDu100B Miniature a piezo PA4FKH3W, pro 100 V modrá, pro 50 V oranžová



Obrázek 5.4 Závislost napětí U na frekvenci f , konfigurace driver PDu100B Miniature a kondenzátor $220\ \mu\text{F}$, pro 100 V modrá, pro 50 V oranžová

6. NÁVRH KONCEPTU ZÁKLADNÍ ČÁSTI DRIVERU

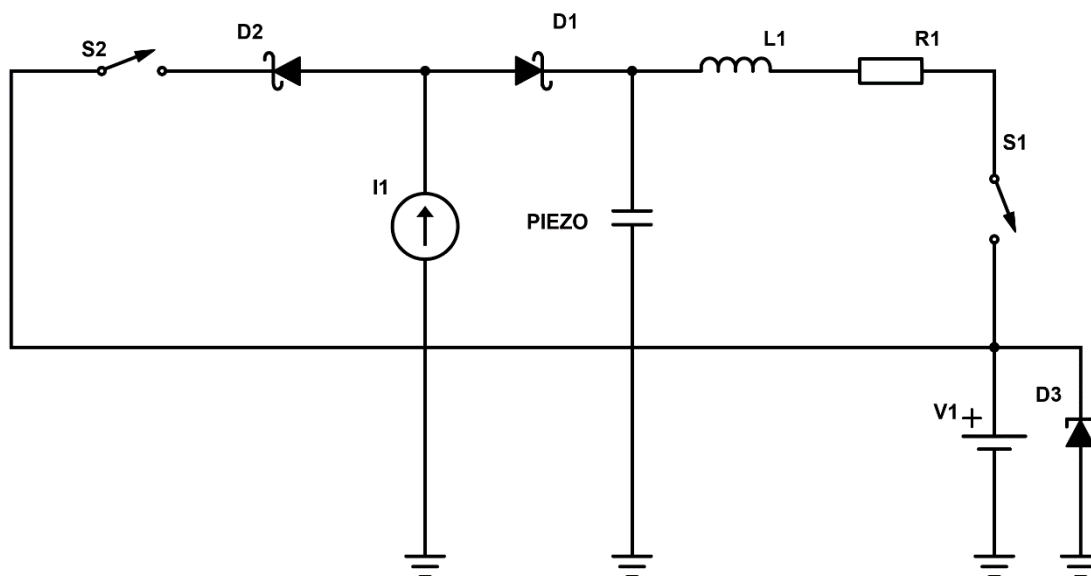
Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.2.2, tak navržený systém bude pracovat s kontinuálním proudem po celý čas impulzu. Následující kapitoly se budou věnovat konceptu základní části proudového driveru.

Požadavky na impulz, tedy roztažení piezoaktuátoru ve vyvíjené měřicí soustavě, jsou následující. Signál musí být typu trojúhelník, tak aby byla lineární a vždy stejná nástupná hrana signálu. Ta bude využita při měření. Jinak řečeno, piezoaktuátor musí vychýlit optické vlákno vždy do stejné polohy.

Zbytek tvaru signálu už není pro měřicí systém stěžejní. Následovat by mělo vybití náboje v aktuátoru a navrácení aktuátoru do výchozí polohy. Je nutné myslet také na paměťový efekt materiálu, tedy hysterezi.

6.1 Návrh obvodu

Na základě dostupných informací a měření bylo sestaveno schéma základní části obvodu, viz Obrázek 6.1.



Obrázek 6.1 Schéma základní části proudového driveru

6.1.1 Popis funkce obvodu

Obvod funguje následujícím způsobem. Přes schottkyho diodu D1 teče proud z proudového zdroje I1 do piezoaktuátoru a ten je nabíjen. Protože je v čase proud konstantní, roste náboj v aktuátoru lineárně. Spolu s nábojem roste lineárně také napětí. Obvod se chová dle vztahů pro výpočet náboje (3.8) a (3.9).

Spínače jsou v obvodu umístěny tak, aby byly na stejném potenciálu a co nejbližší zemi.

Po nastaveném času sepne spínač S2 a s malým zpožděním i spínač S1. Po sepnutí S1 začíná téct proud z aktuátoru přes S1, cívku L1, rezistor R1 a zdroj V1 na zem. Aktuátor se začíná vybíjet. Kapacita aktuátoru tvoří s cívkou L1 a rezistorem R1 sériový RLC obvod.

Tento rezonanční obvod se rozkmitá. Cívka L1 obrací směr proudu a nabíjí aktuátor na opačnou polaritu. Proces se opakuje, díky parazitním vlastnostem součástek a ztrátám se proud tekoucí obvodem stále zmenšuje, tím klesá i napětí vznikající na aktuátoru. Po určité době nastává ustálení. Tento jev nazýváme tlumené kmity.

Rezistor R1 omezuje proud tekoucí obvodem.

Zdroj V1 má v obvodu funkci, že na něm v obvodu vznikne virtuální zem a piezoaktuátor není vybíjen do nulové hodnoty napětí, zůstává zde zbytkový náboj. Bude mít napětí 3–5 V a musí zvládat proudy v řádu desítek ampérů.

Spínač S2 připojuje proudový zdroj na zem. To zatěžuje zdroj v čase, kdy je aktuátor vybíjen. Kdyby nebyl proudový zdroj stále zatížen, mohlo by na něm vzrůst napětí, nabíjely by se vnitřní kapacity zdroje a následně by zanášely chybu do nabíjení aktuátoru.

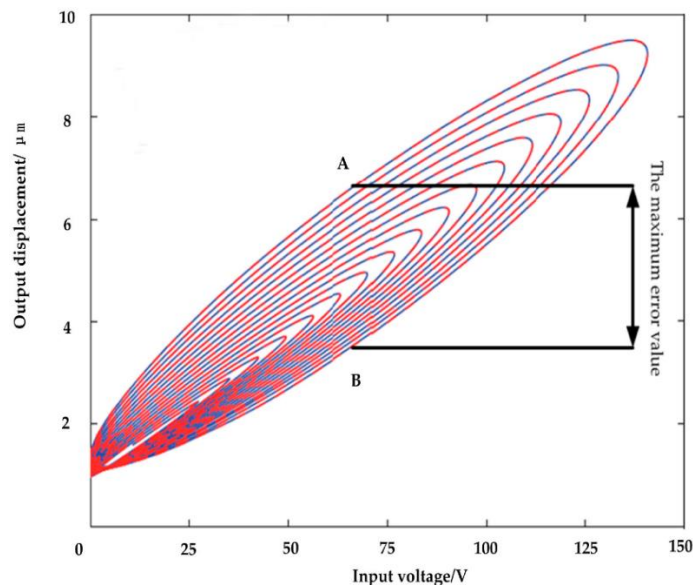
Schottkyho dioda D2 má funkci blokující. Ve chvíli, kdy jsou spínače S1 a S2 sepnuty, proud v cívce obrací směr. Bez diody by mohl zpětný proud protékat přes diodu D1 na zem. Tento jev je nežádoucí.

6.1.2 Funkce rezonančního RLC obvodu

Jak bylo zmíněno výše, cívka L1 tvoří v spolu s rezistorem R1 a kapacitou aktuátoru sériový rezonanční obvod. Tento rezonanční obvod je pro správnou funkci proudového driveru klíčový. Pomáhá co možná nejvíce snížit hodnotu hystereze a uvést piezoaktuátor do výchozí polohy.

První možností, jak anulovat paměťový efekt materiálu je zahřátí na Curieovu teplotu, viz kapitola 1.1.5. To ale není pro tento případ možné nijak využít.

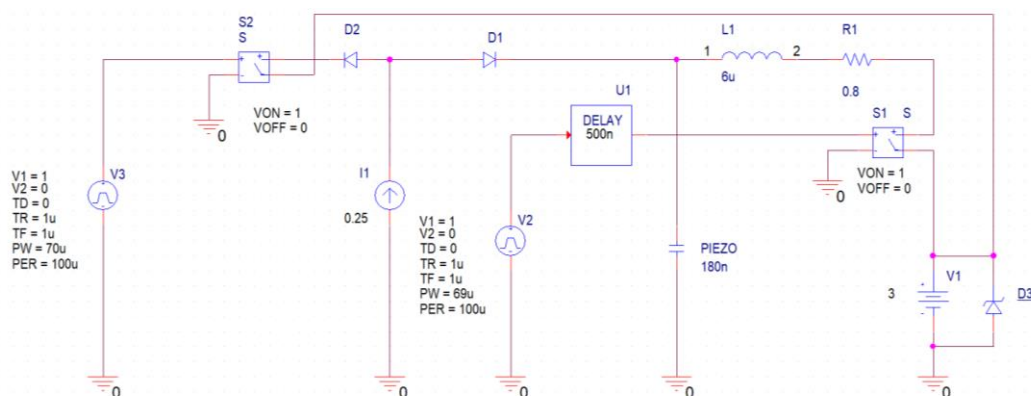
Druhou možností, jak anulovat paměťový efekt piezoelektrického materiálu, je znázorněno, viz Obrázek 6.2. Princip spočívá v postupném zmenšování hysterezní křivky a tím je paměťový efekt piezoelektrického materiálu nulován. Tuto funkci plní výše zmíněný RLC obvod, který se ustaluje pomocí tlumených kmitů. Tlumené kmity dostávají do aktuátoru stále menší náboj a polarity náboje se střídají.



Obrázek 6.2 Hysterezní křivka piezoelektrické keramiky [23]

6.2 Simulace obvodu

Pro ověření funkce obvodu bylo použito prostředí OrCad ver. 17.2. Zde byl obvod sestaven. Jako spínač byl použit ideální spínací prvek řízený napětím. Na napěťových zdrojích byly následně nastaveny parametry pro spínání pulzu, perioda a střída. Spínač S1 je sepnut se zpožděním 500 ns. Zenerova dioda D3 slouží ke svedení proudu, který by tekl do zdroje a zatěžoval tento zdroj.



Obrázek 6.3 Schéma zapojení v simulačním prostředí OrCad

6.2.1 Výpočty součástek

Kapacita piezoaktuátoru je daná 180 nF. Požadavky na pulz jsou následující. Perioda pulzu je 100 μ s a amplituda 100 V. V periodě je nutná lineární nástupná hrana a ve zbytku pulzu vybití, ustálení a návrat do původní polohy.

Parametry jednotlivých součástek byly získány následujícím způsobem. Nejdříve byla využita rovnost náboje, tedy rovnost vztahů (3.8) a (3.9). Bylo rozhodnuto, že nabíjení bude probíhat po dobu 70 μs a 30 μs bude na vybití a návrat aktuátoru do výchozí polohy. Platí vztah

$$I = \frac{C\Delta U}{\Delta t} = \frac{180 \times 10^{-9} \times 100}{70 \times 10^{-6}} = 0,2571 \text{ A}, \quad (6.1)$$

kde I je proud tekoucí z proudového zdroje, C je kapacita piezoaktuátoru, ΔU je změna napětí na aktuátoru, Δt je čas nabíjení aktuátoru.

Požadavky na proudový zdroj budou 100 V a konstantní proud cca 250 mA. Při změnách parametrů součástek by mohly vyhovovat proudové zdroje v rozmezí 200 až 300 mA zvládající napětí 100 V.

Energie náboje E uloženého v aktuátoru je dána vztahem

$$E = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \times 180 \times 10^{-9} \times 100^2 = 0,9 \text{ mJ}, \quad (6.2)$$

kde C je kapacita piezoaktuátoru, U je napětí na aktuátoru.

Ze vztahu pro výpočet energie uložené v cívce lze odvodit indukčnost cívky L . Aby bylo dosaženo vybití, tlumených kmitů a zároveň nebyly překročeny maximální hodnoty proudů běžně dostupné součástky, měl by proud dosahovat hodnot 10 až 20 A. Platí vztah

$$L = \frac{2E}{I^2} = \frac{2 \times 9 \times 10^{-4}}{17^2} = 6,228 \text{ } \mu\text{H}, \quad (6.3)$$

kde E je energie náboje v piezoaktuátoru, I je zvolený proud tekoucí cívkou $L1$.

Dále je také možné jednoduše určit frekvenci f a periodu tlumených kmitů T . Frekvence byla určena z Thomsonova upraveného vztahu. Platí vztah

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{2}{2\pi\sqrt{6,228 \times 10^{-6} \times 180 \times 10^{-9}}} = 150,3 \text{ kHz}, \quad (6.4)$$

kde L je indukčnost cívky $L1$, C je kapacita piezoaktuátoru.

Frekvenci 150 kHz odpovídá perioda kmitů 6,65 μs . Během času vybití proběhne 4,5 těchto 6,65 μs period. Tlumených kmitů by tedy mělo být 9. Při použití rezistoru $R1$ dochází k rychlejšímu útlumu.

6.2.2 Výstupy ze simulace

Obrázek 6.4 znázorňuje průběh napětí na piezoaktuátoru. Je zde lineární nástupná hrana pulzu způsobená konstantním zdrojem proudu. Napětí vystoupá až k hodnotě 100 V. Následuje prodleva, kdy je napětí konstantní. To je dáno opožděným sepnutím spínače S1, v tuto chvíli není do aktuátoru přidáván, ani z něj odebírán náboj.

Následuje prudká sestupná hrana, přebití aktuátoru na opačnou polaritu napětí a ustálení děje po sedmi tlumených kmitěch. V prvních kmitěch dosahuje inverzní napětí větší poloviny původního.

Zvětšením indukčnosti cívky L1 se kmitý roztahují a zvyšuje se jejich amplituda, snížením se zhušťují a amplituda klesá, při zachování hodnoty rezistoru R1. Zvětšením odporu rezistoru R1 se zkracuje doba ustálení kmitů. Kombinací těchto dvou součástek jsou nastaveny parametry tlumených kmitů. To znamená amplituda kmitů, jejich počet a doba ustálení. Po ustálení by mohl být aktuátor ve výchozí poloze a proces se opakuje.

Průběh proudu piezoaktuátorem, viz Obrázek 6.5, odpovídá průběhu napětí, viz Obrázek 6.4. Nejdříve je patrný konstantní proud 250 mA, pak proudové tlumené kmitý, které v nejvyšší amplitudě dosahují hodnoty kolem 14 A.

Průběh, viz Obrázek 6.6, zobrazuje proud větví s cívkou L1 a rezistorem R1. Proud zde teče pouze při vybíjení aktuátoru v podobě tlumených kmitů. Ty jsou inverzní vůči průběhu proudu aktuátorem.

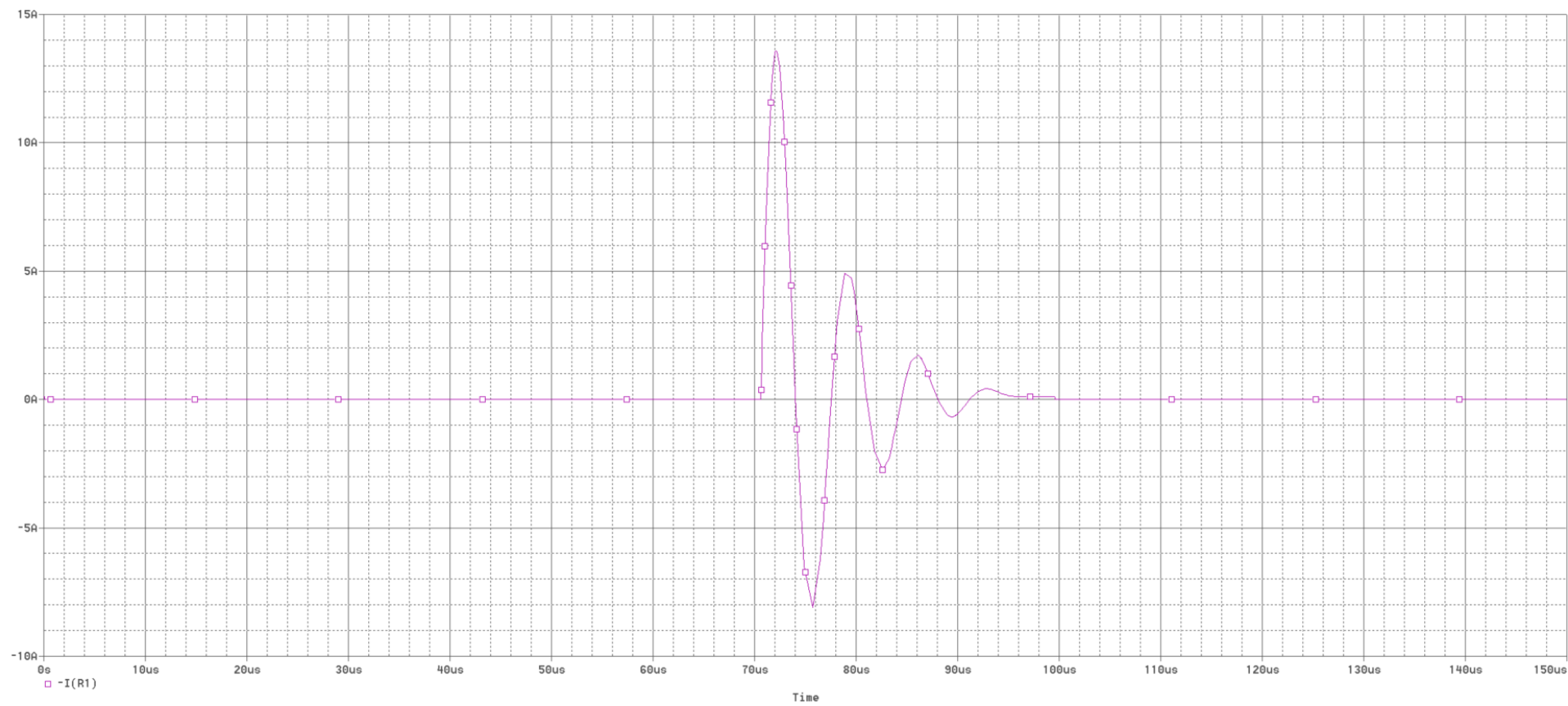
Výsledné hodnoty součástek budou upravovány na základě měření. Parametry pulzu se ještě mohou lišit, ale princip zůstává stejný. Lineární nástupná hrana, tlumené kmitý a ustálení.



Obrázek 6.4 Průběh napětí na piezoaktuátoru



Obrázek 6.5 Průběh proudu na piezoaktuátoru



Obrázek 6.6 Průběh proudu přes R1 a L1

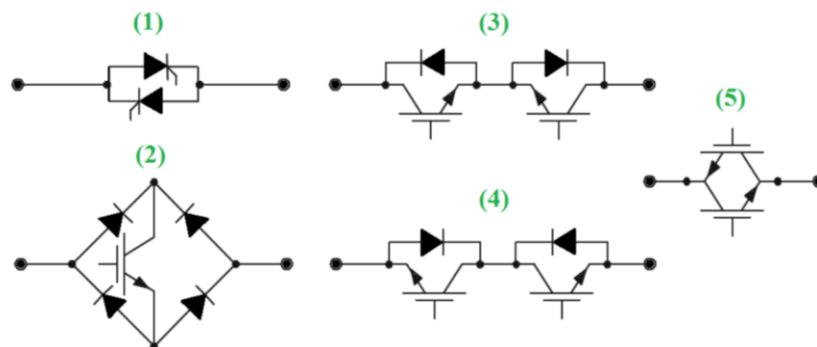
7. NÁVRH PROUDOVÉHO DRIVERU

V následující kapitole bude rozebrán návrh jednotlivých částí driveru. Hlavní zřetel bude brán na realizaci spínačů a proudového zdroje, protože se jedná o stěžejní části, na které budou největší nároky.

7.1 Realizace obousměrných spínačů

Spínače musí odolat napětí v řádu stovek voltů, desítek ampérů a dokázat sepnout ve velice krátkém čase kolem 1 μ s. Ideálním řešením by bylo relé, a to mechanické nebo elektrické řešené pomocí hotových bloků. Bloky jsou nejčastěji řešeny pomocí tyristorů a triaků. Problém je ale v dlouhých spínacích časech, u mechanického relé i v opotřebování kontaktů v důsledku vysokých proudů. Tyto relé jsou převážně určeny pro distribuční síť s kmitočtem 50 Hz. Použití tyristorů je problematické ve spojitosti s tlumenými kmity. Tranzistory zase nemohou vést proud oběma směry.

Bylo potřeba sestavit elektrické relé, a to na základě výše popsanych požadavků. Bylo nalezeno několik možností provedení, viz Obrázek 7.1, která bylo nutné prověřit.

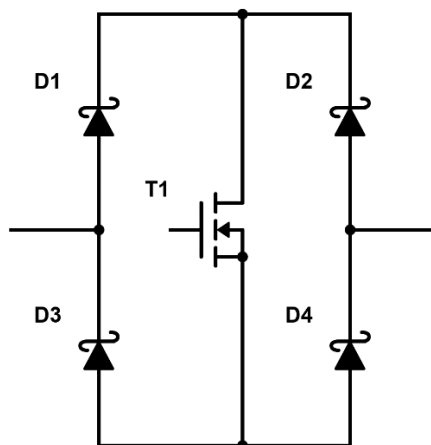


Obrázek 7.1 Obousměrné spínače [25]

První možností realizace obousměrného spínače je pomocí dvou tyristorů. Tato možnost byla ihned zamítnuta kvůli složitému řízení spojeným s tlumenými kmity. Zároveň většina tyristorů je konstruována pro distribuční síť s kmitočtem 50 Hz a spínací časy by byly příliš vysoké. Dalším zapojením byla věnována větší pozornost.

7.1.1 Kombinace diod a NMOS tranzistoru

Jedná se o obvod podobný zkratovanému Graetzovu můstku pomocí NMOSFET tranzistoru. V místech, kde je běžně přiváděno střídavé napětí, jsou vstupy a výstupy spínače. Tranzistor spojuje kladný a záporný pól. Schéma je, viz Obrázek 7.2.



Obrázek 7.2 Kombinace diod a NMOS tranzistoru

Obvod funguje následujícím způsobem. Při kladné polaritě na levé straně může proud téct přes diodu D1, ale nemůže přes D2, ani D3. Při změně polaritě na zápornou může téct přes diodu D3, ale nemůže přes D1, ani D4. Pokud bychom stejný princip aplikovali na pravé straně, došli bychom ke stejnému výsledku. Spínač nepropouští.

Pokud chceme spínač sepnout, je nutné sepnout tranzistor T1. Pokud je po sepnutí T1 na levé straně kladná polarita, začne téct proud do kříže přes D1, T1 a D4. Při polaritě opačné přes D3, T1 a D2.

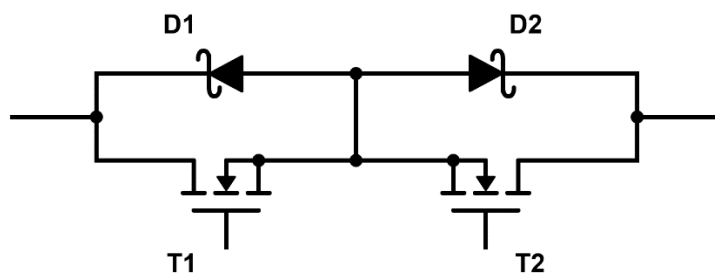
Výhodou tohoto spínače je rychlost, jednoduchost, možnost spínat velké proudy a nízká cena. Naopak nevýhodou je, že není možné řídit směr tekoucích proudů. Po sepnutí mohou téct oběma směry. U tohoto spínače je nutné omezit zkratový proud rezistorem nebo cívkou [25].

7.1.2 Sériové zapojení NMOS tranzistorů

Aplikace obousměrného spínače je aktuální zejména v posledních letech v souvislosti s bateriovými systémy a energetikou z obnovitelných zdrojů. U bateriových systémů je používán u baterií, které se musí dobíjet a vybíjet. U solární energetiky jsou zase využity u on grid systémů, kde je energie dodávána i odebírána ze sítě.

Další možností realizace je zapojení, Obrázek 7.3. Pokud je na levé straně kladná polarita (na straně tranzistoru T1 a diody D1) a na pravé straně záporná (tranzistor T2 a dioda D2), pak proud teče zleva doprava přes tranzistor T1 a diodu D2. Při obrácení polaritě teče proud zprava doleva přes tranzistor T2 a diodu D1.

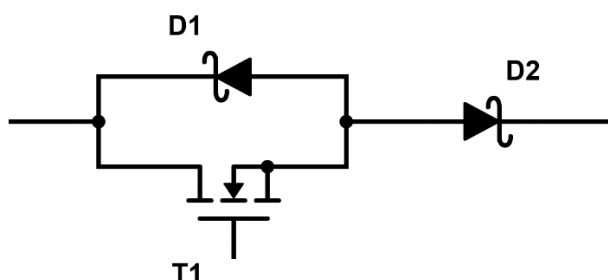
Tento typ obousměrného spínače se hodí pro realizaci spínače S1, jak je vidět ve schématu, viz Obrázek 6.1. Budou přes spínač téct proudy ve formě tlumených kmitů oběma směry.



Obrázek 7.3 Zapojení obousměrného spínače s tranzistory NMOS

Toto zapojení nepotřebuje rezistory ani induktory pro omezení zkratového proudu. Zároveň je rychlé, spolehlivé a cenově dostupné. Doporučuje se zapojení se dvěma emitory [25].

Spínač S2 ve stejném schématu může být řešen jednodušeji, protože přes něj poteče proud pouze jedním směrem, z proudového zdroje na plovoucí zem. Pro jeho realizaci dostačuje jednosměrný spínač proudu. Ten je znázorněn, viz Obrázek 7.4. Proud může téct pouze zprava doleva. Směr toku proudu určuje dioda D2.

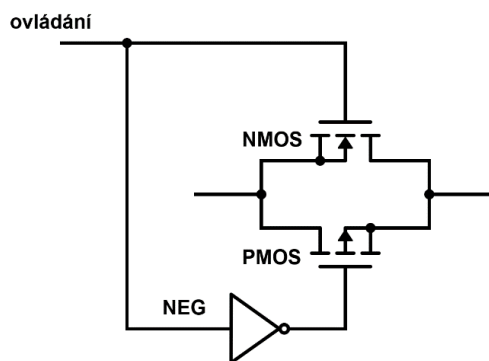


Obrázek 7.4 Zapojení jednosměrného spínače s NMOS tranzistorem a diodou

Bylo rozhodnuto, že dioda ve struktuře spínače bude posílena externí diodou. Při konstrukci bude snaha o využití tohoto principu. Oproti následujícímu zapojení má některé výhody. NMOSFET tranzistory mají nižší odpor $R_{DS(on)}$ a cena bude také nižší.

7.1.3 Paralelní zapojení PMOS a NMOS tranzistoru

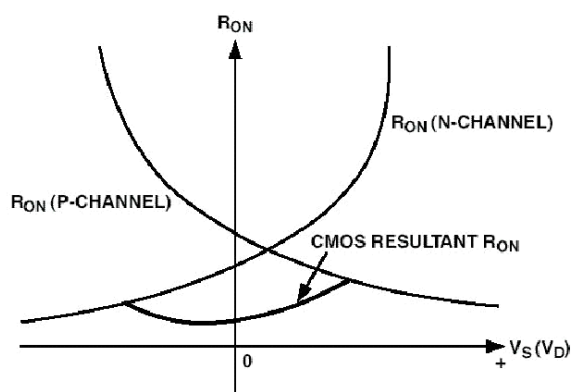
Další možností, jak realizovat obousměrný spínač, je použití NMOS a PMOS tranzistoru. Zapojení se nazývá přenosová brána Transmission gate. Oba tranzistory jsou zapojeny paralelně tak, aby po sepnutí mohl proud téct zprava doleva i zleva doprava, viz Obrázek 7.5. Pro ovládání obou tranzistorů současně je nutné signál podle jeho povahy negovat pro jeden z tranzistorů. Zároveň je nutné, aby byly tranzistory párovány.



Obrázek 7.5 Zapojení obousměrného spínače s NMOS a PMOS tranzistorem

Zapojení se často využívá v logických obvodech, kde je při vysoké úrovni ovládacího signálu spínač otevřen a při nízké úrovni uzavřen. Je ho možné využít také pro výkonnější aplikace jako např. připojování baterií. Nevýhody byly zmíněny v předchozí kapitole a souvisí především s vysokým $R_{DS(on)}$.

Závislost odporu $R_{DS(on)}$ na vstupním napětí tohoto spínače je znázorněna, viz Obrázek 7.6. Charakteristika má vanovitý tvar a tento spínač se vyznačuje přibližně stejným odporem v celém rozsahu vstupních napětí.



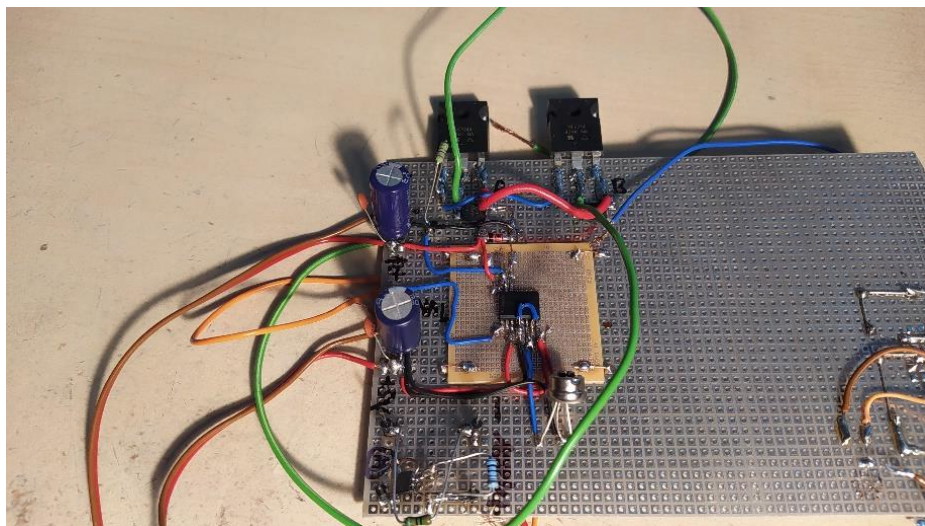
Obrázek 7.6 Závislost odporu $R_{DS(on)}$ na vstupním napětí [26]

7.1.4 Volba součástek a testování

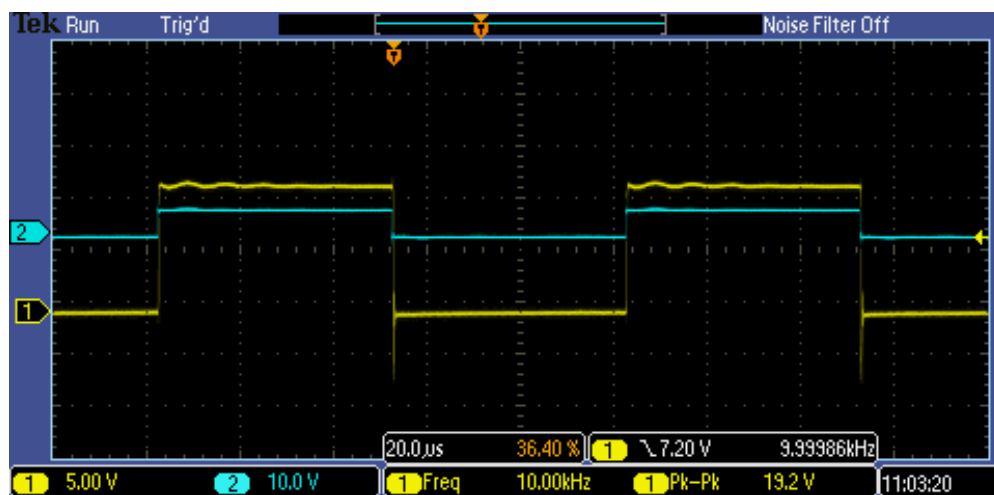
Pro realizaci byly zvoleny N MOSFET tranzistory IRFP244 s parametry 250 V, až 15 A a $R_{DS(on)}$ 0,28 Ω . Jejich pouzdro TO-247AC zajistí dobrý odvod tepla do chladiče. Budou doplněny shottkyho diodami V35PW22 s parametry 200 V a až 35 A.

Pro ovládání tranzistorů byl použit MOSFET driver NCV57253. Ten je možné provozovat na plovoucí hladině a má 2 kanály, které je možné provozovat na sobě závisle či nezávisle. Doplnili ho dva izolované DC/DC měniče, které generují napětí pro otevírání MOSFET tranzistorů.

Kvůli ověření funkčnosti byl poskládán obvod složitějšího obousměrného spínače S1, viz Obrázek 7.7. Následovně byl obvod oživen a testován pro frekvenci 10 kHz. Jak je patrné z průběhu na Obrázek 7.8, tak zkreslení signálu není příliš veliké a spínač funguje.



Obrázek 7.7 Zapojení jednoho spínače pro test funkčnosti



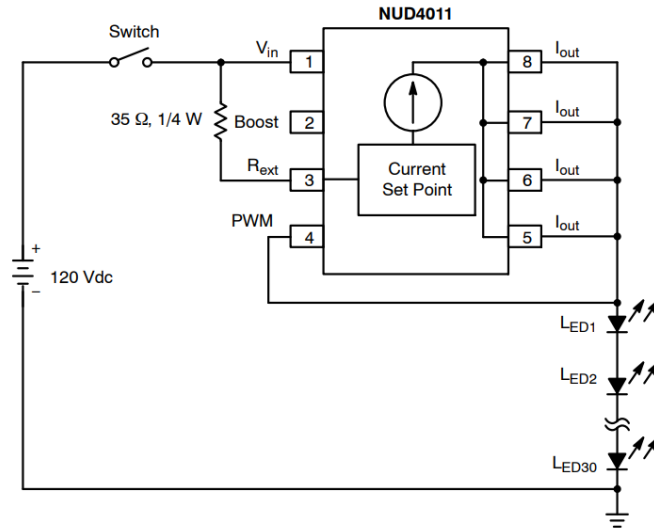
Obrázek 7.8 Naměřený průběh na obousměrném spínači (žlutá), vstup (modrá)

7.2 Realizace proudového zdroje

Proudový zdroj musí dodávat proud v řádu stovek miliampérů a zvládat napětí minimálně 120 V. Zároveň nesmí být ovlivněn teplotou a jinými vnějšími vlivy. Pro dosažení požadovaných parametrů bylo nalezeno několik možných způsobů, které bylo nutné prověřit.

7.2.1 Proudový zdroj NUD4011

Nejdříve byla snaha o využití integrovaného obvodu NUD4011. Tento obvod je vytvořen primárně pro napájení LED diod v různých svítidlech nebo pro jednoduché dobíjení nikl kadmiových baterií. Vyznačuje se nastavitelným proudem pomocí externího rezistoru až do 70 mA a může fungovat až do napětí 200 V.



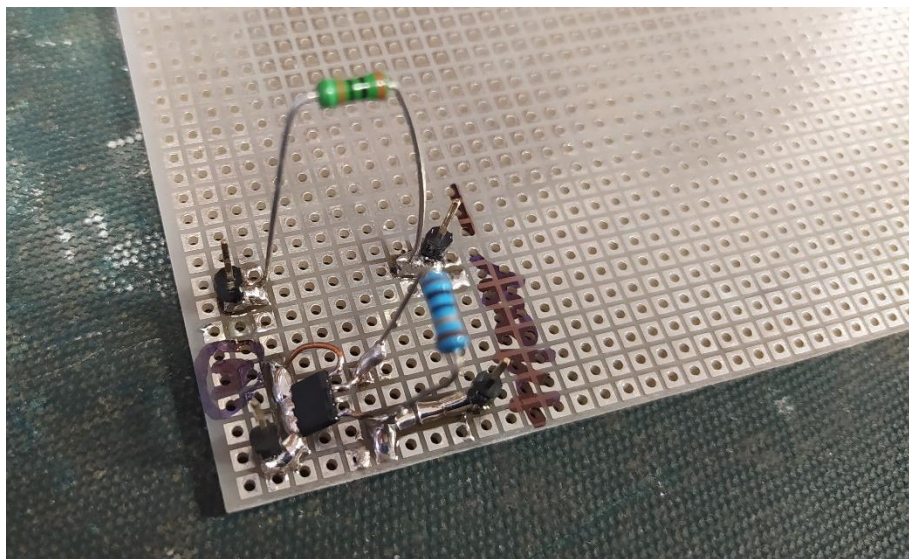
Obrázek 7.9 Proudový zdroj NUD4011 [24]

Obrázek 7.9 zobrazuje základní zapojení tohoto proudového zdroje. Proud na výstupu je nastaven rezistorem R_{ext} , který je dán vztahem

$$R_{ext} = \frac{V_{sense}}{I_{out}} = \frac{0,7}{0,07} = 10 \Omega, \quad (7.1)$$

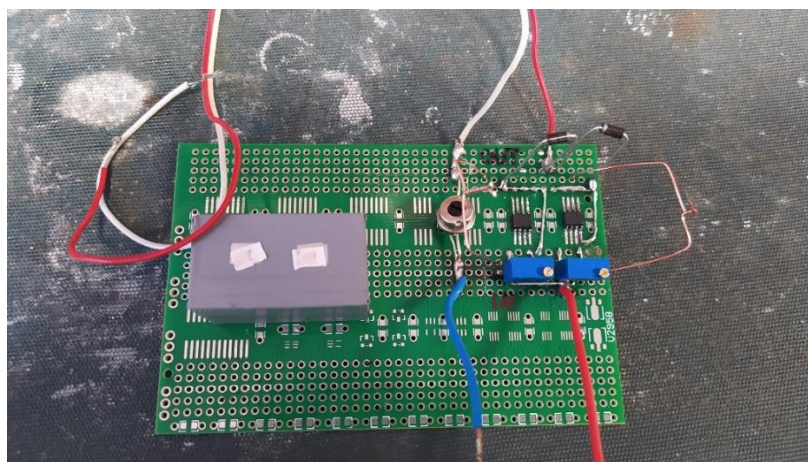
kde R_{ext} je externí rezistor pro nastavení výstupního proudu, V_{sense} je hodnota napětí odečtená z grafu v datasheetu, odpovídající teplotě 25 °C a I_{out} je výstupní proud.

Při návrhu bylo uvažováno o paralelním spojení těchto proudových zdrojů pro dosažení požadovaného výstupního proudu. Byly sestaveny 2 zkušební obvody. První obvod pouze pro oživení NUD4011. Hned po zapojení se ale ukázala obrovská tepelná závislost výstupního proudu. Byly pozorovány změny o desítky miliampérů.



Obrázek 7.10 První zapojení NUD4011

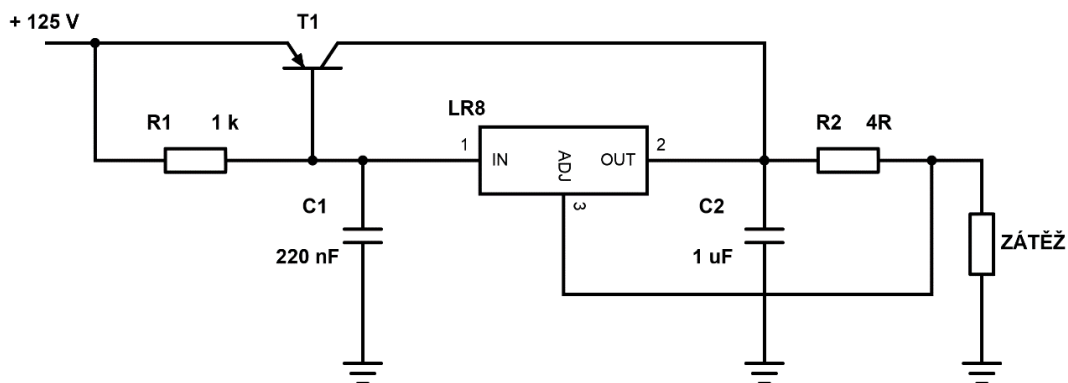
Proto bylo rozhodnuto sestavit druhý obvod. Tentokrát už byly dva proudové zdroje spojeny paralelně a umístěny na společný chladič. Paralelní zapojení bylo doplněné o diody, které bránily nechtěnému toku proudů z jednoho zdroje do druhého. Bohužel i zde se projevila obrovská teplotní závislost obvodu. Obvod NUD4011 se ukázal jako nevhodný pro tuto aplikaci.



Obrázek 7.11 Paralelní zapojení dvou NUD4011 se sejmutým chladičem

7.2.2 Proudový zdroj z LDO

Proudový zdroj byl sestaven ze stabilizátoru LR8, fungujícím v proudovém režimu. Tento regulátor se vyznačuje vstupním napětím až 450 V a výstupním proudem až 30 mA. Kvůli nízkému proudu bylo nutné LDO posílit bipolárním PNP tranzistorem T1. Zapojení je patrné, viz Obrázek 7.12.



Obrázek 7.12 Proudový zdroj s LDO LR8

Nastavení konstantního proudu na výstupu probíhá změnou hodnoty snímacího rezistoru R2 dle vztahu

$$I_{OUT} = \frac{1,2 V}{R_2} = \frac{1,2}{4} = 0,3 A, \quad (7.2)$$

kde I_{OUT} je výstupní proud a R_2 hodnota odporu snímacího rezistoru.

Obvod byl zkonstruován a proměřen. Byla měněna zátěž na výstupu a hodnoty napětí a proudů zapisovány do přehledné tabulky, viz Tabulka 7.1.

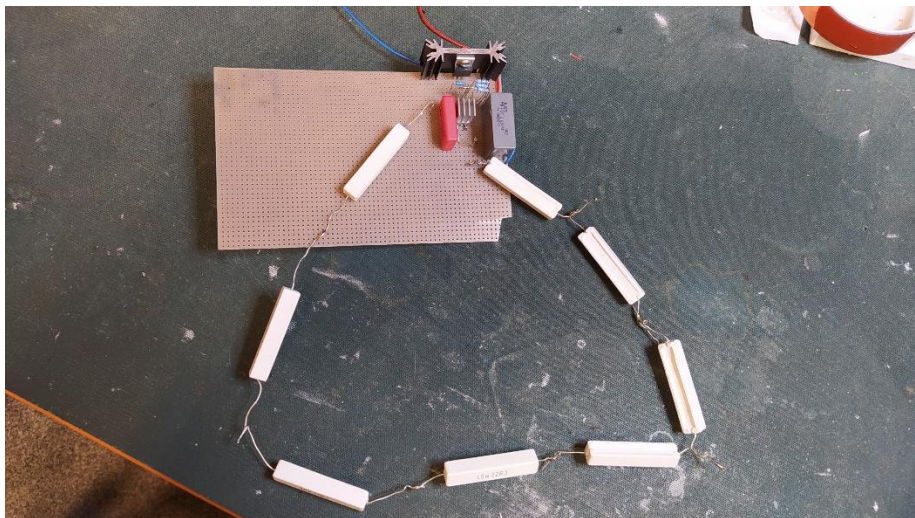
Tabulka 7.1 Naměřené hodnoty napětí a proudů při změně zátěže

TIP30C			MJE15033G		
odpor	napětí	proud	odpor	napětí	proud
[Ω]	[V]	[A]	[Ω]	[V]	[A]
200,8	52,350	0,260	200,8	52,830	0,262
173,4	46,830	0,270	173,4	47,990	0,276
146,4	40,130	0,274	146,4	43,830	0,299
119,6	33,330	0,279	119,6	39,580	0,330
97,6	27,770	0,285	97,6	35,850	0,366
70,5	20,750	0,295	70,5	28,250	0,400
43,7	13,680	0,315	43,7	19,730	0,454
22,1	7,570	0,345	22,1	11,380	0,514

Při testování obvodu byly použity dva tranzistory. Ukázalo se, že volba tranzistoru podstatně ovlivní funkčnost obvodu. Byla vyslovena hypotéza, že by funkčnost mohlo ovlivňovat zesílení, parametr h_{FE} . Proto byl obvod měřen s různými PNP tranzistory a zaznamenávány mezní hodnoty, viz Tabulka 7.2.

Tabulka 7.2 Tabulka naměřených proudů u různých typů tranzistorů při 40 V

Tranzistor	I_{\min} (při 200,8 Ω)	I_{\max} (při 22,1 Ω)	ΔI	h_{FE}
[-]	[A]	[A]	[A]	[-]
TIP30C	0,180	0,290	0,110	15 – 40
B1375	0,181	0,340	0,159	15 – 100
B595	0,179	0,345	0,166	20 – 40
MJE15033G	0,180	0,353	0,173	50 – 70
A1205	0,180	0,360	0,180	40
A1535	0,177	1,500	1,323	50 – 90

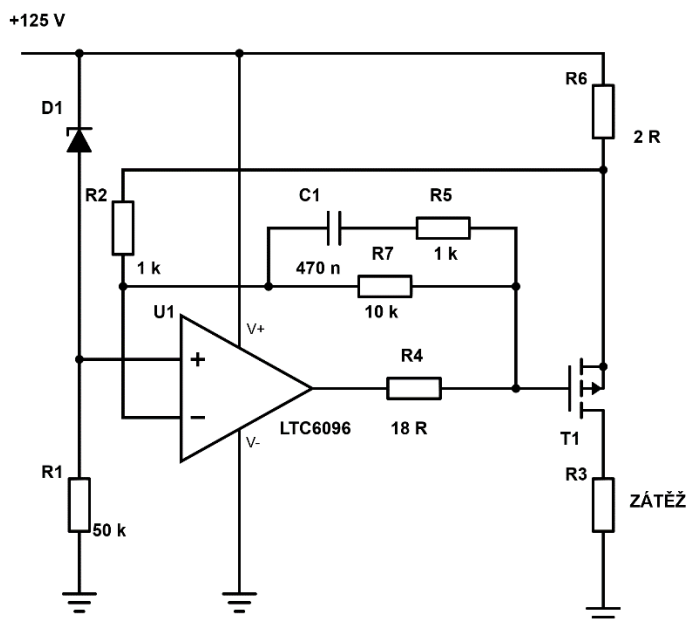


Obrázek 7.13 Proudový zdroj s LDO LR8, zkušební zapojení

Ukázalo se, že tranzistory s nižším parametrem h_{FE} mají lepší výsledky. Měření ukázalo, že bude nutné najít tranzistor s co nejnižším zesílením. Zároveň je u tohoto řešení příliš velká závislost na zátěži. Pro aplikaci piezodriveru je nutné, aby byl proud konstantní pro různé zátěže.

7.2.3 Proudový zdroj s operačním zesilovačem a BG referencí

Další možností realizace proudového zdroje je pomocí vysokonapěťového operačního zesilovače LTC6090, který je posílen P MOSFET tranzistorem. Napětíovou referenci v obvodu zajišťuje referenční dioda D1 LT1389. Schéma zapojení je patrné, viz Obrázek 7.14.



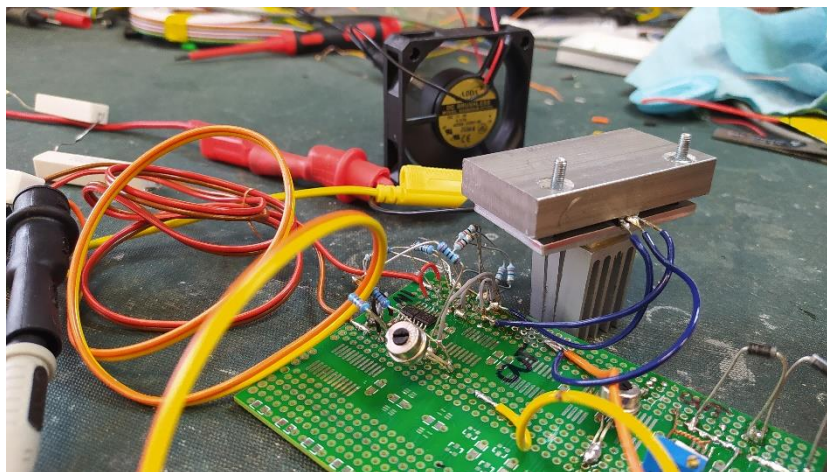
Obrázek 7.14 Proudový zdroj s LTC6090 teoretické schéma

Tabulka 7.3 Proudový zdroj s LTC6090, naměřené hodnoty

odpor [Ω]	napětí [V]	proud [A]
200,8	52,570	0,2614
173,4	48,490	0,2796
146,4	40,960	0,2798
119,6	33,480	0,2801
97,6	27,340	0,2803
70,5	19,740	0,2804
43,7	12,220	0,2806
22,1	6,170	0,2807

Bylo zkonstruováno zkušební zapojení, viz Obrázek 7.15. Nejdříve byl pro test při 60 V použit tranzistor IRF9024 s parametry 60 V, 8,8 A a R_{DSon} 0,28 Ω . Bylo zjištěno přílišné zahřívání tohoto tranzistoru. Když se k němu přidal větší chladič s peltierovým článkem a ještě ventilátor, tak proudový zdroj začal fungovat. Podařilo se naměřit data, viz Tabulka 7.3.

V případě zátěže 200 Ω je proud omezen zátěží. Od následujícího kroku 173,4 Ω až po 22,1 Ω se proud mění pouze o 1,1 mA. To jsou uspokojivé výsledky a mnohonásobně lepší než v předchozích případech. Proudový zdroj s LTC6090 bude použit pro finální konstrukci proudového driveru.



Obrázek 7.15 Proudový zdroj s LTC6090, zkušební zapojení

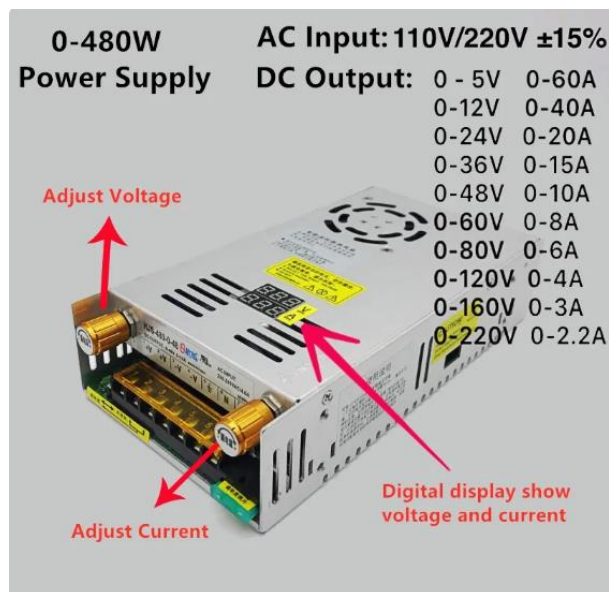
7.3 Realizace ostatních částí driveru

Následující podkapitoly jsou věnovány zbylým částem proudového driveru. Bylo rozhodnuto soustředit se především na hlavní část driveru, kterou je nutné vymyslet a otestovat. Proto byly některé komponenty koupené již hotové. V této fázi vývoje je nutné ověřit funkci právě stěžejní části a prioritou není zabývat se již běžně dostupnými komponenty. V případě uspokojivých výsledků by některé z těchto komponent bylo dobré znovu navrhnout či přepracovat. To má ale smysl až v případě, že se rozhodne proudový driver zavést do výroby.

7.3.1 Napěťový zdroj 125 V

Jako napěťový zdroj byl zvolen nastavitelný AC/DC měnič 0 až 200 V s možností proudové regulace až do proudu 2,2 A, viz Obrázek 7.16. Proudová regulace je výhodná pro testování kvůli ochraně tohoto napěťového zdroje proti zkratu. Napěťová regulace a vyšší rozsah napětí budou přínosem při testování a vyvíjení driveru.

Výsledný proudový driver by měl být napájen napětím 12 V DC dostupným v měřicím zařízení. Nicméně se ukázalo, že DC/DC měniče požadovaného napětí a proudu nejsou na trhu běžně dostupné. Proto bylo rozhodnuto o koupi výše zmíněného měniče. DC/DC by pak stačilo dodělat při zavádění na trh.



Obrázek 7.16 Spínaný zdroj pro napájení piezodriveru [27]

7.3.2 Cívka

Parametry navrhované cívky jsou 6 μH , frekvence 10 kHz. Cívka musí zvládnout proudy tekoucí v obvodu. Při návrhu vinutí se bere v úvahu efektivní hodnota proudu I_{ef} , což je hodnota stejnosměrného proudu, která by vodičem tekla při přenesení stejného výkonu. Vzhledem k tomu, že vodičem potečou vysoké špičkové proudy, podle simulace přes 13 A, tak bude třeba udělat větší návrhovou rezervu.

V rámci návrhové rezervy bude brána v úvahu pouze oblast tlumených kmitů 30 μs . Po 70 μs v periodě 100 μs , cívkou proud neteče. Z průběhu proudu cívkou, viz Obrázek 6.6 lze odhadnout, že proud v maximální špičce bude přes 13 A. Efektivní hodnota je dána dle vztahu

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{max} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 13,5 = 9,55 \text{ A}, \quad (7.3)$$

kde I_{ef} je efektivní hodnota proudu a I_{max} je maximální hodnota proudu.

Hodnota 9,55 A je minimální hodnota pro návrh cívky. Parametry se ale mohou mírně lišit, a proto bude nutné v rámci návrhové rezervy počítat alespoň s proudem 12 A.

Dalším důležitým parametrem potřebným k výpočtu je proudová hustota J . Tu je nutné volit dle českého zdroje 2 až 2,5 A/mm^2 pro vinutí vnitřní a u vinutí vnějších se dá jít až na hodnotu 5 A/mm^2 [29]. Zahraniční literatura uvádí pro vf aplikace horní mez 5 A/mm^2 [30]. Bylo rozhodnuto držet se spíše nižších hodnot tedy 2,5 A/mm^2 .

Plocha průřezu vodiče S je dána vztahem

$$S = \frac{I}{J} = \frac{12}{2,5} = 4,8 \text{ mm}^2, \quad (7.4)$$

kde I je proud tekoucí vodičem a J je zvolená proudová hustota, která určuje zatížení vodiče.

Pro výrobu bude použit vodič kruhového průřezu, je tedy nutné z obsahu S určit jeho poloměr d . Ten je dán vztahem

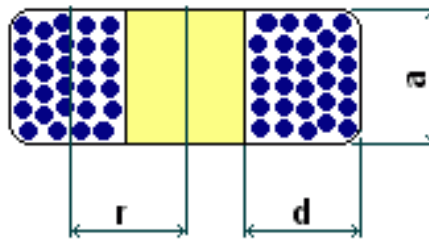
$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 4,8}{3,14}} = 2,47 \text{ mm}, \quad (7.5)$$

kde S je průřez a d je průměr.

Z výpočtu vyplývá, že je nutné použít vodič o průměru 2,5 mm. Cívka bude pracovat na vysokých frekvencích, bude tedy snaha o konstrukci cívky bez jádra. Pokud bude nutné cívku zmenšit, mohlo by být také použito vf feritové jádro.

Vícevrstvá válcová cívka bez jádra

Nejdříve je nutné určit rozměry cívky. Cívka bude motána na kostru o průměru 10 mm, šířce 15 mm. Šířka vinutí a bude 15 mm. Bude se jednat o vícevrstvou vzduchovou cívku, která se hodí pro vysoké frekvence. Rozložení závitů bude křížové, viz Obrázek 7.17.



Obrázek 7.17 Vícevrstvá válcová cívka [31]

Při motání cívky bude v první vrstvě 6 závitů, v další 5, v další 6 atd. První řada navyšuje cívku o průměr vodiče a při skládání vodičů do mezer bude každý další závit navyšovat cívku o polovinu průměru vodiče. Předpokládaný počet vrstev je 5, to znamená tři průměry vinutí a 7,5 mm bude výška vynutí d . Poloměr vinutí r odpovídá poloměru kostry a polovina šířky vinutí d , tedy 8,75 mm. Nyní je možné použít vztah pro výpočet počtu závitů N

$$N = \sqrt{\frac{L \times (6r + 9a + 10b)}{0,315r^2}} = \sqrt{\frac{6 \times (6 \times 0,875 + 9 \times 1,5 + 10 \times 0,75)}{0,315 \times 0,875^2}} = 25,56 \text{ z\u00e1v.}, \quad (7.6)$$

kde L je induk\u00e7nost c\u00edvky v μH , r je polom\u00e9r vinut\u00ed v cm, d je tlou\u0161\u0165ka vinut\u00ed v cm, a je d\u00e9lka vinut\u00ed v cm.

Nev\u00fdhodou tohoto \u0159e\u0161en\u00ed je, \u017e nejn\u00ed mo\u017en\u00e9 jednodu\u0161e ur\u00e7it její parazitn\u00ed kapacitu. K meziz\u00e1vitov\u00e9 kapacit\u011b se p\u0159id\u00e1v\u00e1 kapacita mezi jednotliv\u00fdmi vrstvami vodi\u010d\u016f v c\u00edvce. T\u00edm p\u00e1dem lze velmi \u0161patn\u011b odhadnout vlastní rezonanci c\u00edvky a frekvenci tlumen\u00fdch kmit\u016f. Proto bude nutn\u00e9 p\u0159em\u00fd\u0161let o jednovrstv\u00e9 c\u00edvce, která v\u0161ak bude m\u00edt v\u011bt\u0161\u00ed rozm\u011bry. U n\u00ed se uplat\u0148uje pouze meziz\u00e1vitov\u00e1 kapacita.

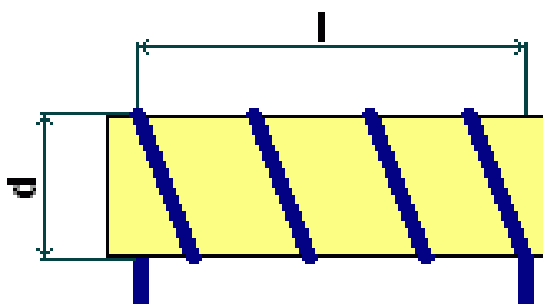
V\u00e1lcov\u00e1 c\u00edvka

P\u0159i n\u00e1vrhu v\u00e1lcov\u00e9 c\u00edvky plat\u00ed, \u017e největ\u0161\u00ed induk\u00e7nosti dos\u00e1hneme, kdy\u017e p\u0159\u00edm\u011br c\u00edvky je k její d\u00e9lce v pom\u011bru 2,5:1. Tento parametr sleduje \u010dinitel k , co\u017e je upraven\u00fd Nagaok\u016fv \u010dinitel. Jeho hodnoty lze vy\u010d\u00edst z p\u0159\u00edslu\u0161n\u00fdch tabulek.

P\u0159edpokl\u00e1dan\u00e9 rozm\u011bry c\u00edvky vypl\u016fvaj\u00ed z po\u017eadovan\u00e9ho p\u0159\u00edezu vodi\u010de a po\u017eadovan\u00e9 induk\u00e7nosti. C\u00edvka by m\u011bla m\u00edt p\u0159\u00edm\u011br 35 mm a d\u00e9lku vinut\u00ed kolem 45 mm. Pokud budou vodi\u010de ulo\u017eeny t\u011bsn\u011b vedle sebe, tak t\u00e9to d\u00e9lce odpov\u00edd\u00e1 18 z\u00e1vit\u016f vodi\u010dem o p\u0159\u00edm\u011bru 2,5 mm. Pom\u011br p\u0159\u00edm\u011bru c\u00edvky k její d\u00e9lce vych\u00e1z\u00ed nejbli\u017ee hodnoty 0,8. T\u00e9to hodnot\u011b odpov\u00edd\u00e1 hodnota koeficientu k je 0,00582.[31] Hodnoty je mo\u017en\u00e9 dosadit do vztahu

$$L = N^2 \times d \times k = 18^2 \times 3,5 \times 0,00582 = 6,6 \mu\text{H}, \quad (7.7)$$

kde N je po\u010det z\u00e1vit\u016f, d je p\u0159\u00edm\u011br c\u00edvky v cm, k je koeficient pom\u011bru p\u0159\u00edm\u011bru ku d\u00e9lce.



Obr\u00e1zek 7.18 Jednovrstv\u00e1 v\u00e1lcov\u00e1 c\u00edvka [31]

V\u00fdsledn\u00e1 c\u00edvka bude p\u0159i zhotovov\u00e1n\u00ed m\u011b\u0159ena a nastavena co nejbli\u017ee hodnoty 6 μH . Bude to znamenat p\u0159i zachov\u00e1n\u00ed rozm\u011br\u016f c\u00edvky 17 nebo 18 z\u00e1vit\u016f.

Nyní je možné určit mezizávitovou parazitní kapacitu C_z . K jejímu určení je nutné znát obsah závitů S_z , pro průměr závitů $d = 35 \text{ mm}$ je to 962 mm^2 . Dále je nutné znát parametry izolace. Tloušťka lakové izolace je běžně v rozmezí 3 až 15 μm , pro běžné vodiče lze počítat spíše s hodnotou 15 μm [33]. Dalším důležitým parametrem je materiál izolace. Laky bývají často imidopolyesterové s relativní permitivitou ϵ_r kolem hodnoty 3. Mezizávitová kapacita C_z je dána vztahem

$$C_z = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S_z}{t_i} = 8,8542 \times 10^{-12} \times 3 \times \frac{962 \times 10^{-3}}{15 \times 10^{-6}} = 1,7 \mu\text{F}, \quad (7.8)$$

kde $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ je permitivita vakua, ϵ_r je relativní permitivita laku, t_i je tloušťka laku a S_z je plocha závitů.

Celková parazitní kapacita C_p cívky je dána sériovým zapojením jednotlivých mezizávitových kapacit, tedy vztahem

$$C_p = \frac{C_z}{N} = \frac{1,7 \times 10^{-6}}{18} = 94,44 \text{ nF}, \quad (7.9)$$

kde C_z je mezizávitová kapacita, N je počet závitů.

V obvodu se po sepnutí spínačů k parazitní kapacitě C_p cívky paralelně přidává kapacita piezoaktuátoru 180 nF. Dohromady se jedná o kapacitu 274,44 nF. S touto kapacitou lze odhadnout frekvenci f_0 tlumených kmitů dle Thomsonova vztahu

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\text{celk.}}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6 \times 10^{-6} \times 274 \times 10^{-9}}} = 124 \text{ kHz}, \quad (7.10)$$

kde L je indukčnost cívky, $C_{\text{celk.}}$ je celková kapacita.

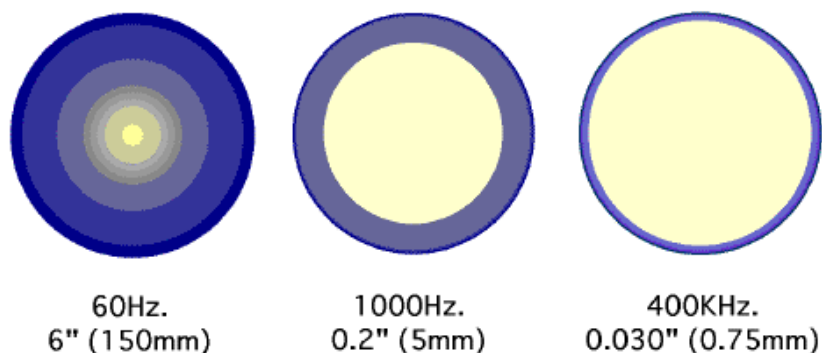
Hodnota periody je orientačně vyčtena ze simulace, kde se nachází navíc rezistor a zdroj odpovídá asi 143 kHz. Výsledky jsou podobné. Minimální odchylka může být způsobena např. jinou parazitní kapacitou cívky v simulaci.

Tlumené kmity

Tlumené kmity mají ze simulace periodu 7 μs , to odpovídá frekvenci 143 kHz. Ve vodiči se bude uplatňovat skin efekt. Skin efekt je závislý na frekvenci a projevuje se tím, že při vyšších frekvencích tečou proudy po povrchu vodiče. Bude tedy nutné použít vodič z vysokofrekvenčního lanka. Efekt je zřetelný, viz Obrázek 7.19. Pro výpočet hloubky vniku proudu do vodiče δ u skin efektu je možné použít vztah

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}, \quad (7.11)$$

kde ρ je měrný odpor vodiče, ω je úhlová frekvence, μ je permeabilita vodiče.



Obrázek 7.19 Znárodnění skin efektu [32]

7.3.3 Rezistor

Rezistor má mít hodnotu $0,8 \Omega$. Kvůli vyššímu výkonu je předpokládán drátový rezistor. Rezistor bude stejně jako cívka dimenzován na efektivní hodnotu proudu s rezervou. U cívky bylo zvoleno 12 A. Výkon rezistoru vychází na 115,2 W, ale vzhledem k době zatížení bude tento výkon dělen deseti a rezistor bude dimenzován na hodnotu 11,52 W.

7.3.4 Napěťový zdroj 5 V

Pro vytvoření plovoucí země na hladině 5 V je zapotřebí zdroje, který zvládne odolat tekoucímu proudu v obvodu při tlumených kmitech. Byl vybrán DC/DC měnič z 12 V na 5 V 30 A sloužící primárně pro napájení led podsvícení u aut. Komponent, viz Obrázek 7.20.



Obrázek 7.20 Napěťový zdroj pro výrobu plovoucí země [28]

7.4 Realizace zdroje ovládacího signálu

Pro realizaci zdroje signálu bylo použito Arduino Uno. Frekvence generovaného signálu je 10 kHz, 70 μs trvá nabíjení a 30 μs vybíjení pomocí tlumených kmitů. Po dobu 70 μs musí být oba spínače S1 a S2 sepnuté. Po uplynutí této doby musí rozepnout spínač S2 a se zpožděním 500 ns spínač S1. Dále po 29 μs budou oba rozepnuty. Poté sepne spínač S1 a se zpožděním 500 ns spínač S2.

Při programování bylo zjištěno, že pro realizaci zpoždění pod 1 μs nelze použít funkci delay ani funkci digitalWrite. Program pro Arduino Uno vypadá následovně.

```
int i;

void setup() {
  pinMode(12, OUTPUT); //S1
  pinMode(11, OUTPUT); //S2

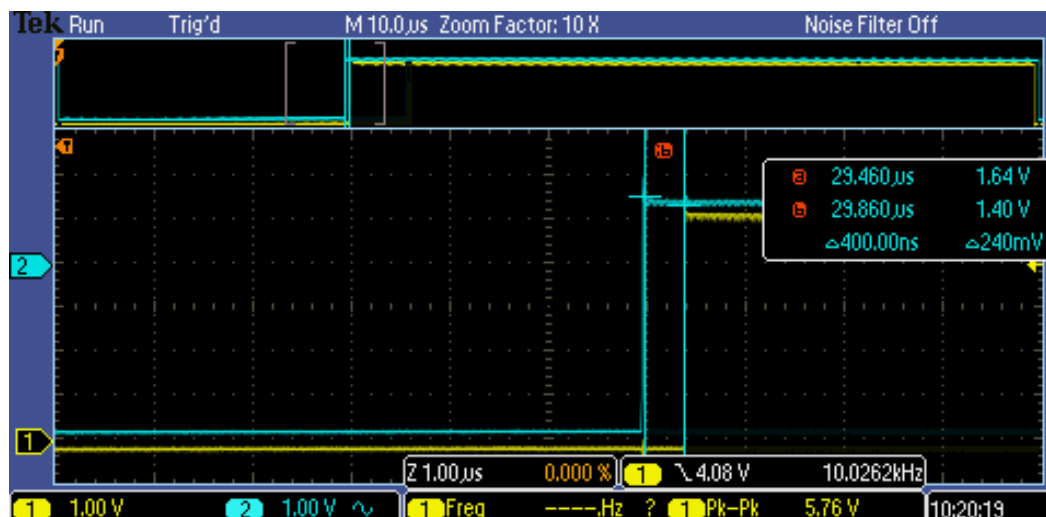
  digitalWrite(12, HIGH); //S1
  digitalWrite(11, HIGH); //S2

  DDRB = B11111111; //set all the pins to output in port D
}

void loop() {
  delayMicroseconds(70);
  PORTB = PINB & B11110111; //S1 LOW
  for (i=0;i<2;i++); //delay 400 ns
  PORTB = PINB & B11101111; //S2 LOW
  delayMicroseconds(30);
  PORTB = PINB | B00010000; //S2 HIGH
  for (i=0;i<2;i++); //delay 400 ns
  PORTB = PINB | B00001000; //S1 HIGH
}
```



Obrázek 7.21 Generovaný signál pro spínače pomocí Arduino Uno



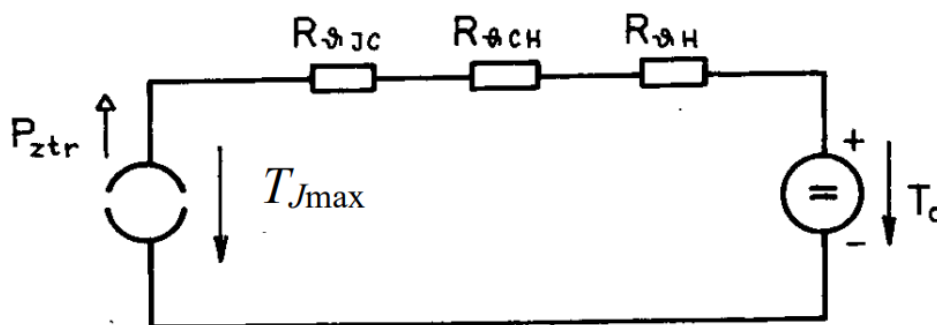
Obrázek 7.22 Detail nástupné hrany signálu, viditelné zpoždění 400 ns

7.5 Návrh chlazení

V rámci kapitoly bude navrženo chlazení pro proudový zdroj a piezodriver.

7.5.1 Chlazení proudového zdroje

Pro návrh chladiče je nutné nejdříve sestavit tepelné schéma chlazení. To je zobrazeno, viz Obrázek 7.23.



Obrázek 7.23 Tepelné schéma jednoho tranzistoru na chladiči [34]

Dalším krokem je vyčtení parametrů z datasheetu P MOSFET tranzistoru IRFU9214. Prvním parametrem je vnitřní tepelný odpor součástky $R_{\theta JC}$ $2,5 \text{ KW}^{-1}$. Tepelný odpor styku součástky s chladičem je $R_{\theta CH}$ $0,5 \text{ KW}^{-1}$ a parazitní $R_{DS(on)}$ je $3 \text{ } \Omega$. Následuje výpočet ztrátového výkonu, který bude zjednodušen. Přesné hodnoty by musely být zjištěny měřením a ztrátový výkon by byl dán součtem ztrát přepínacích a vodivostních [34]. Zjednodušený vztah je

$$P_{ztr} = R_{DS(on)} \times I^2 = 3 \times 0,6^2 = 1,08 \text{ W}, \quad (7.12)$$

kde $R_{DS(on)}$ je odpor kanálu v sepnutém stavu, I je proud tekoucí tranzistorem.

V rámci návrhové rezervy bude dále počítáno s hodnotou ztrátového výkonu 2 W. Z datasheetu vyplývá, že maximální teplota čipu T_{Jmax} je 150 °C, ale v rámci rezervy je počítáno s hodnotou 120 °C. Teplota okolí T_0 bude volena 40 °C, což je také dáno průmyslovou normou [34]. Tepelný odpor chladiče bude určen vztahem

$$R_{\theta H} = \frac{T_{Jmax} - T_0}{P_{ztr}} - R_{\theta JC} - R_{\theta CH} = \frac{120 - 40}{2} - 2,5 - 0,5 = 37 \text{ KW}^{-1}, \quad (7.13)$$

kde $R_{\theta JC}$ je vnitřní tepelný odpor součástky, $R_{\theta CH}$ je tepelný odpor styku součástky s chladičem, P_{ztr} je ztrátový výkon, T_{Jmax} je maximální teplota čipu, T_0 je maximální teplota prostředí.

Na jednotlivých tepelných odporech je nyní možné určit tepelné spády Fourierovým vztahem

$$\Delta T_{JC} = R_{\theta JC} P_{ztr} = 2,5 \times 2 = 5 \text{ K}, \quad (7.14)$$

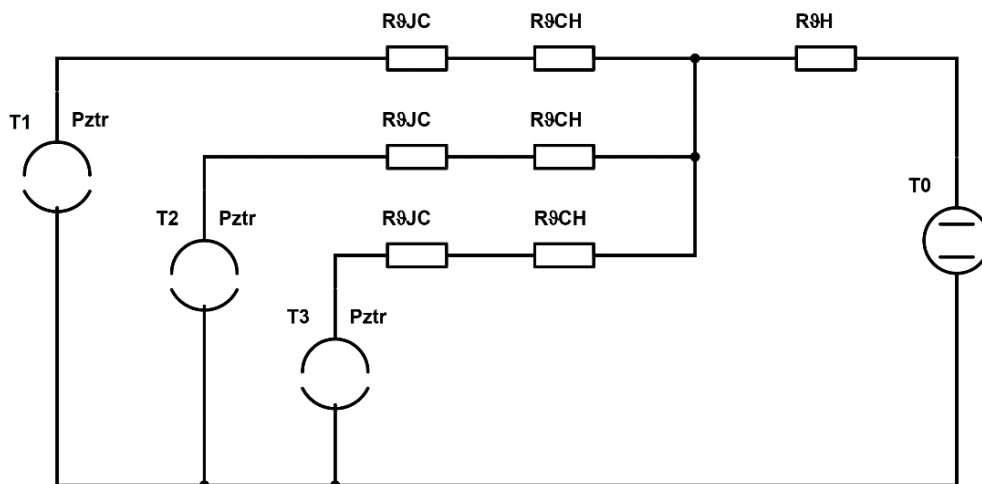
kde $R_{\theta JC}$ je vnitřní tepelný odpor součástky, P_{ztr} je ztrátový výkon.

Tepelný spád na součástce ΔT_{JC} je 5 K. Obdobným způsobem lze zjistit tepelný spád na přechodu ΔT_{CH} 1 K a na chladiči ΔT_H 74 K. Při teplotě okolí 40 °C bude mít chladič teplotu 114 °C. Je možné použít aktivní chlazení, nebo větší chladič pro snížení teploty chladiče.

7.5.2 Chlazení piezodriveru

Výpočet bude podobný jako v předchozím případě, bude zde však složitější tepelné schéma, viz Obrázek 7.24.

Na chladiči budou tři N MOSFET tranzistory IRFR244. Prvním parametrem je vnitřní tepelný odpor součástky $R_{\theta JC}$ 0,83 KW^{-1} . Tepelný odpor styku součástky s chladičem je $R_{\theta CH}$ 0,24 KW^{-1} a $R_{DS(on)}$ je 0,28 Ω . Následuje výpočet ztrátového výkonu, který je zjednodušen, a jako v předchozím případě.



Obrázek 7.24 Tepelné schéma tří tranzistorů na chladiči

Tranzistorem T1, viz Obrázek 7.25, teče po dobu sepnutí 30 μ s proud 0,6 A. Při použití vztahu (7.12) vychází ztrátový výkon 0,1 W. Proud ale proudí tranzistorem cca 30 % času, po přepočtení vychází ztrátový výkon 0,03 W.

Tranzistory T2, T3, viz Obrázek 7.25, teče po dobu sepnutí 30 μ s proud ve formě tlumených kmitů s efektivní hodnotou až 12 A. Při použití vztahu (7.12) vychází ztrátový výkon 40,32 W. Proud ale proudí vždy jedním tranzistorem, a proto každý z nich vede proud pouze 15 μ s cca 15 % času. Po přepočtení vychází ztrátový výkon 6,048 W pro každý z tranzistorů. Protože se proud stále zmenšuje, je v této hodnotě zahrnuta poměrně vysoká návrhová rezerva.

Výpočet bude proveden úpravou vztahu (7.13) tedy

$$R_{\theta H} = \frac{T_{Jmax} - T_0}{P_{ztr1} + P_{ztr2} + P_{ztr3}} - \frac{R_{\theta JC}}{3} - \frac{R_{\theta CH}}{3} =, \quad (7.15)$$

$$\frac{120 - 40}{0,03 + 6,048 + 6,048} - \frac{0,83}{3} - \frac{0,24}{3} = 6,24 \text{ KW}^{-1},$$

kde $R_{\theta JC}$ je vnitřní tepelný odpor součástky, $R_{\theta CH}$ je tepelný odpor styku součástky s chladičem, P_{ztr1} je ztrátový výkon T1, P_{ztr2} je ztrátový výkon T2, P_{ztr3} je ztrátový výkon T3, T_{Jmax} je maximální teplota čipu, T_0 je maximální teplota prostředí.

Na jednotlivých tepelných odporech je nyní možné určit tepelné spády Fourierovým vztahem

$$\Delta T_{JC} = \frac{R_{\theta JC}}{3} (P_{ztr1} + P_{ztr2} + P_{ztr3}) = \quad (7.16)$$

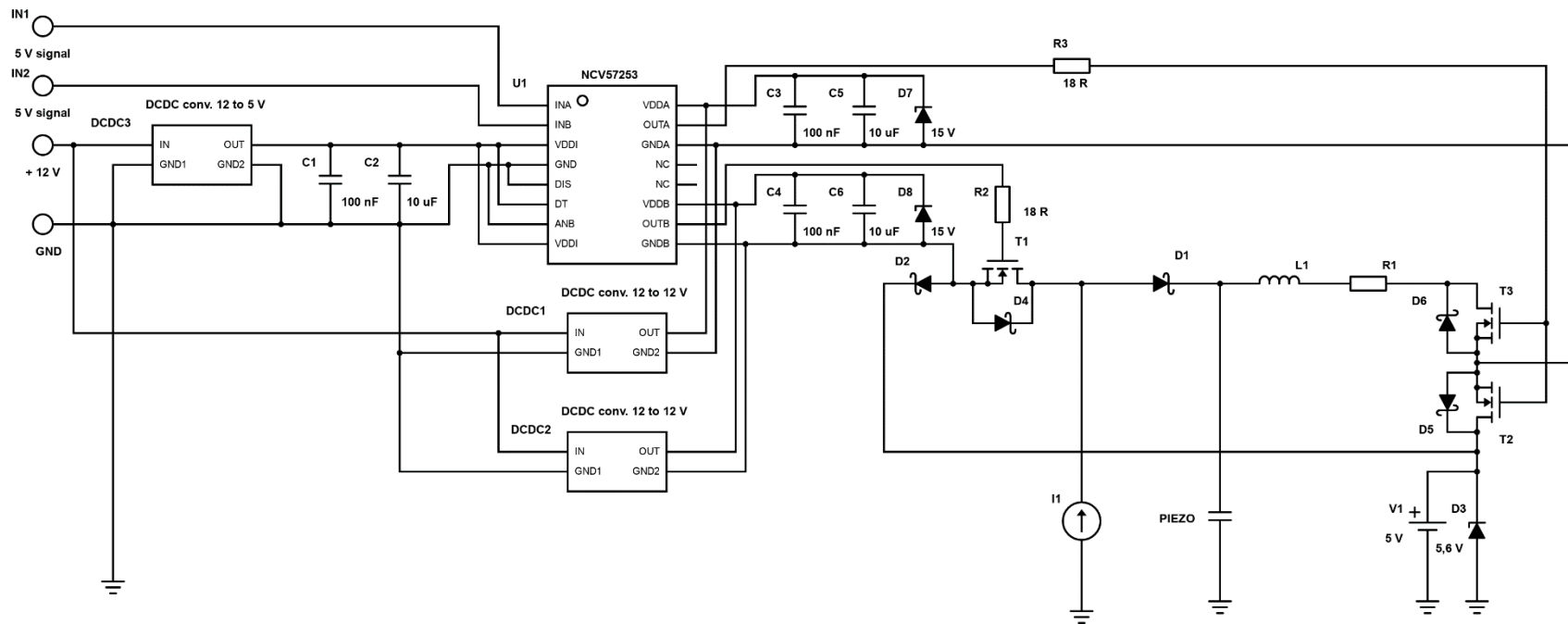
$$\frac{0,83}{3} \times (0,03 + 6,048 + 6,048) = 3,35 \text{ K},$$

kde $R_{\theta JC}$ je vnitřní tepelný odpor součástky, P_{ztr1} je ztrátový výkon T1, P_{ztr2} je ztrátový výkon T2, P_{ztr3} je ztrátový výkon T3.

Tepelný spád na součástce ΔT_{JC} je 3,35 K. Obdobným způsobem lze zjistit tepelný spád na přechodu ΔT_{CH} 0,97 K a na chladiči ΔT_H 75,68 K. Při teplotě okolí 40 °C bude mít chladič teplotu 115,68 °C. Je možné použít aktivní chlazení, nebo větší chladič pro snížení teploty chladiče.

7.6 Navržené schéma proudového driveru

Schéma obvodu proudového driveru bez schématu proudového zdroje, viz Obrázek 7.25. Schéma proudového zdroje je uvedeno v Kapitole 7.2.3, viz Obrázek 7.14.

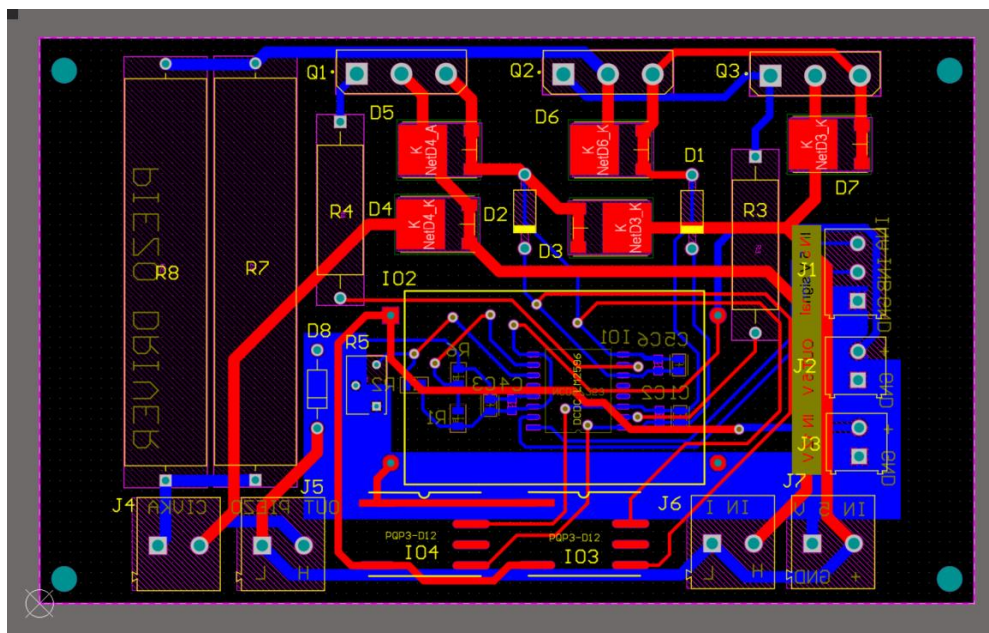


Obrázek 7.25 Finální teoretické schéma proudového driveru

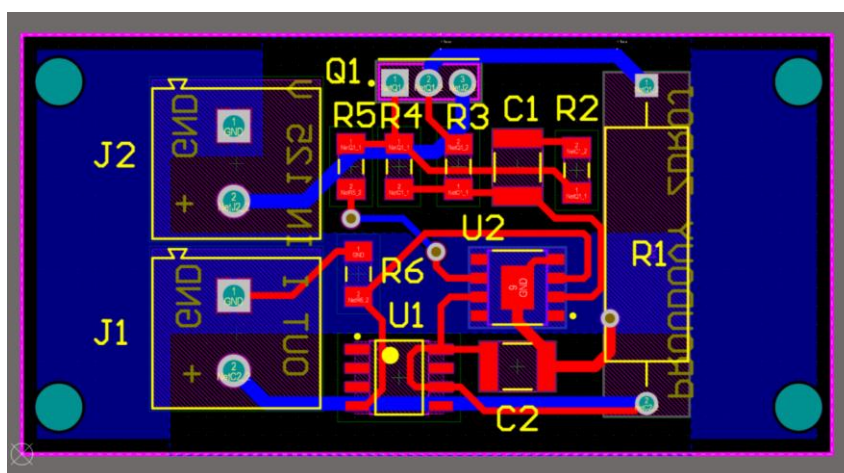
8. KONSTRUKCE PROUDOVÉHO DRIVERU

Pro navržená schémata byly v návrhovém prostředí Altium zhotoveny desky s plošnými spoji. Jeden modul je proudový zdroj a druhý je samotný driver.

8.1 Desky s plošnými spoji

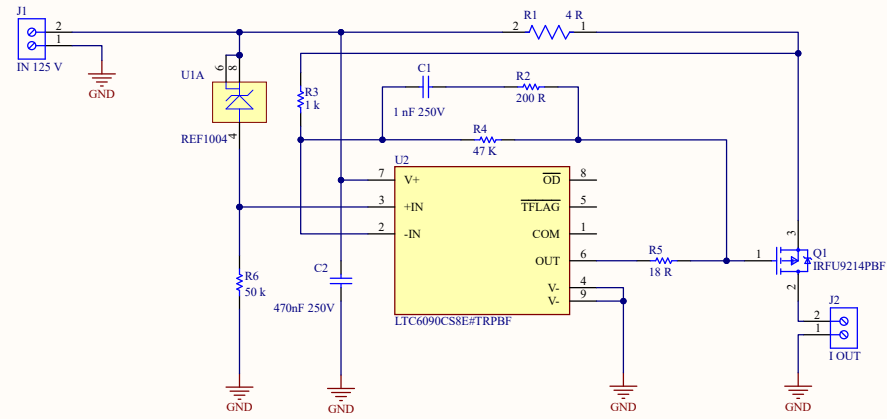


Obrázek 8.1 Návrh plošného spoje modulu s piezodriverem

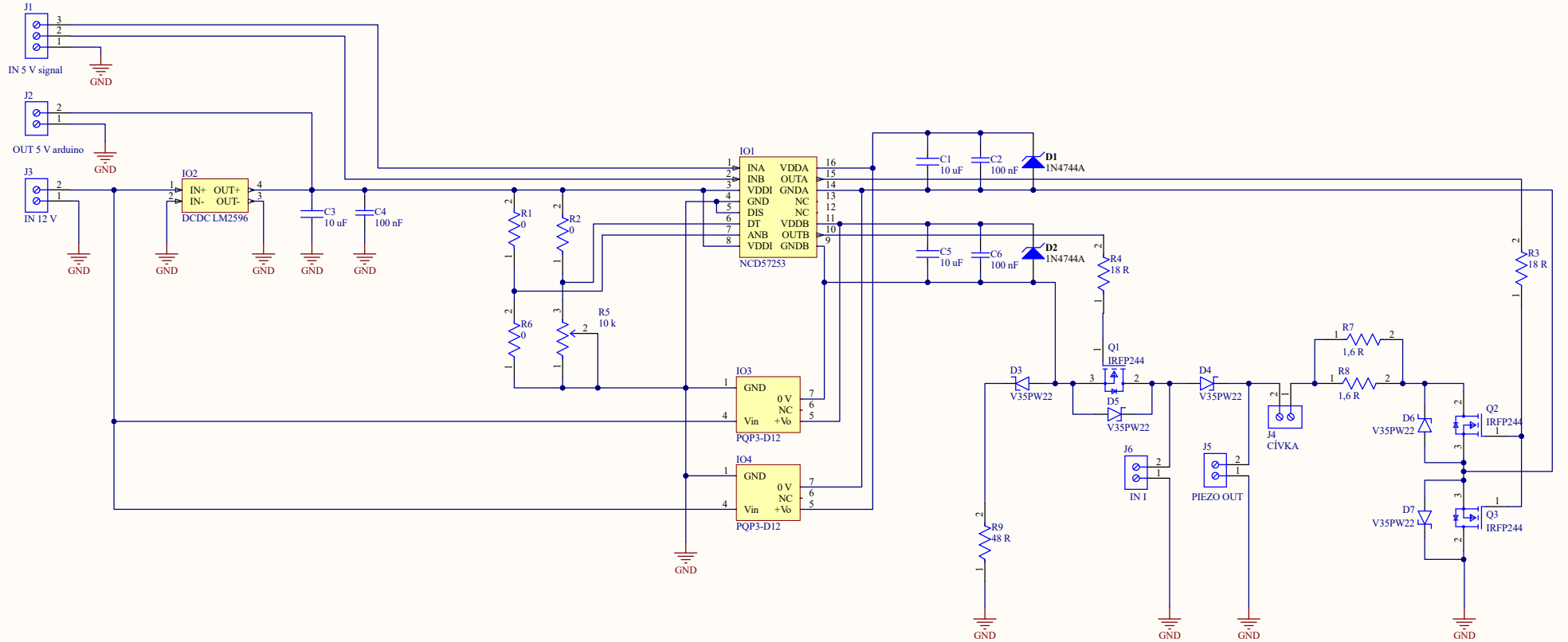


Obrázek 8.2 Návrh plošného spoje modulu s proudovým zdrojem

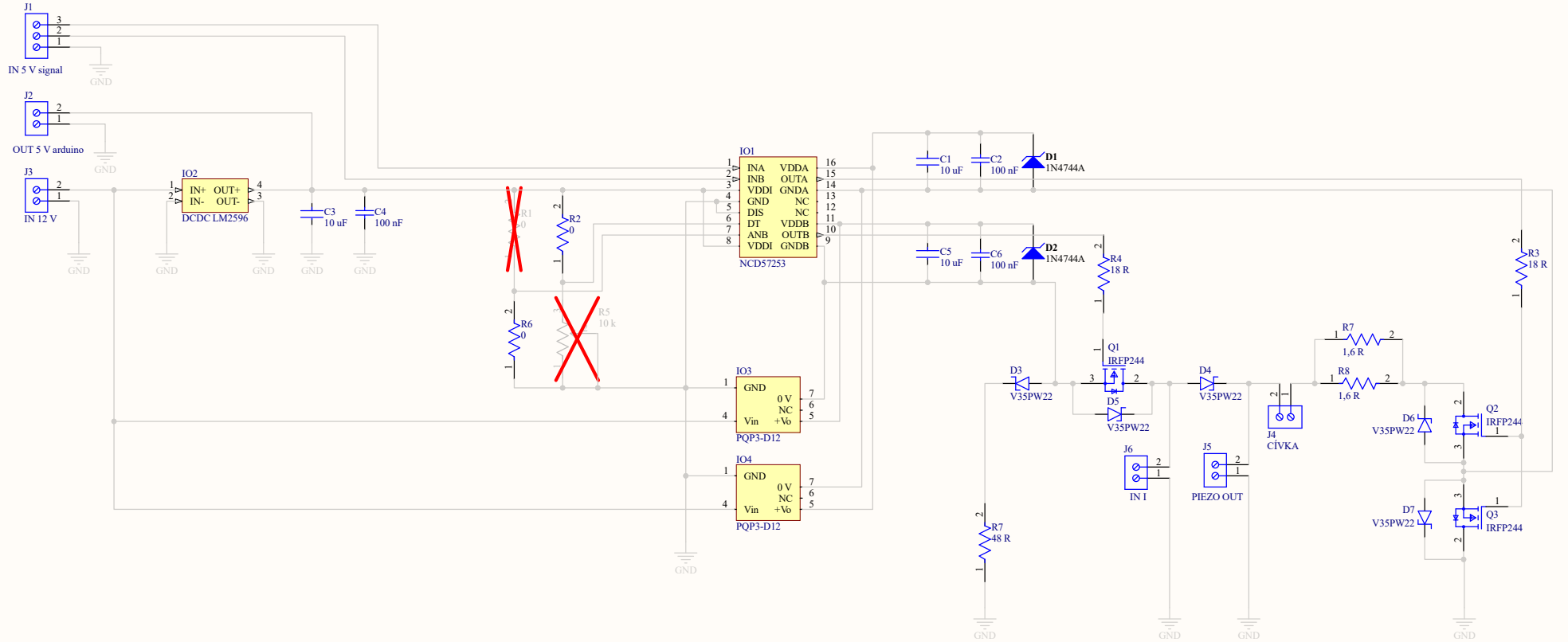
8.2 Finální schéma zapojení driveru a proudového zdroje



Title		
Proudový zdroj		
Size	Number	Revision
A3		3.10.2023
Date:	5.14.2023	Sheet of 1/1
File:	D:\notas\...\Proudový zdroj.SchDoc	Drawn By: Tomáš Hurdálek



Title		
Piezo driver		
Size	Number	Revision
A3		3.10.2023
Date:	5.14.2023	Sheet of 1z1
File:	D:\notas_\Driver.SchDoe	Drawn By: Tomáš Hurdálek

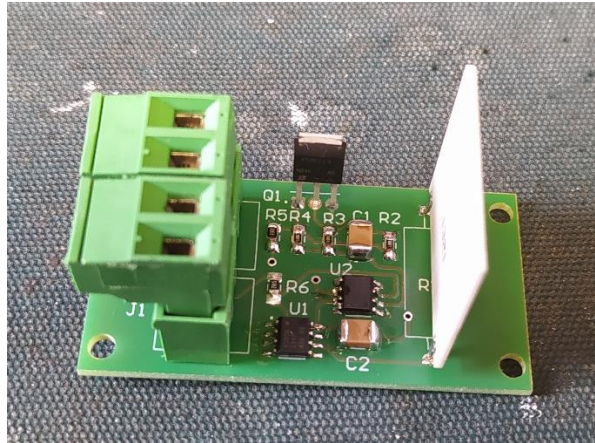


Title		
Piezo driver		
Size	Number	Revision
A3		3.10.2023
Date:	5.13.2023	Sheet of 1/1
File:	D:\notas\Driver.SchDoc	Drawn By: Tomáš Hrudský

8.3 Sestavení a oživení

8.3.1 Oživení proudového zdroje

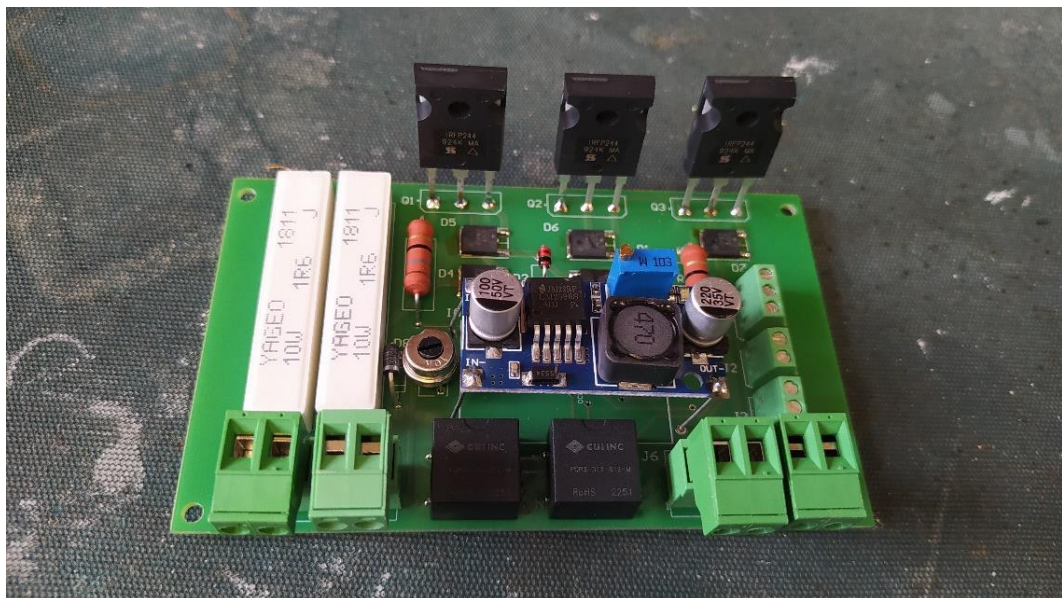
Proudový zdroj byl sestaven a oživen. Následně staticky otestován pro různé zátěže. Bylo dosaženo podobných výsledků jako u prototypu.



Obrázek 8.3 Sestavený proudový zdroj

8.3.2 Oživení piezodriveru

Obvod byl sestaven a následně se testovaly oba spínače S1 a S2. Spínače se testovaly jednotlivě staticky pomocí napěťového zdroje při napětí 60 V. Byly vyhodnoceny jako funkční.



Obrázek 8.4 Sestavený proudový driver

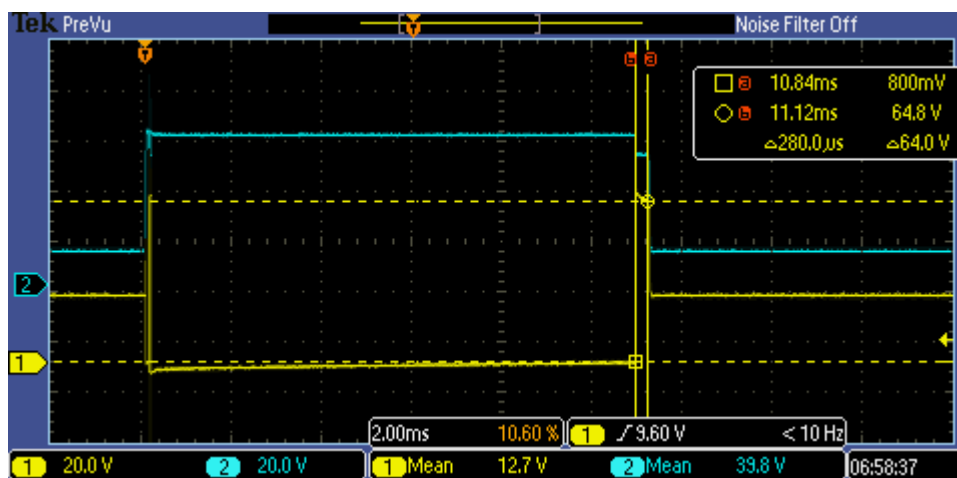
Nebyl připojen zdroj V1 pro tvorbu virtuální země na potenciálu 5 V. Zenerova dioda D8 sloužící pro tvorbu virtuální země vždy po sepnutí spínače nevydržela a zároveň vzniklý zákmit zničil i paralelně zapojenou diodu D5 u MOSFET tranzistoru Q1. Dioda byla zničena i když byla zapojena v závěrném směru. Substrátová dioda v tranzistoru Q1 tyto špičky dokázala vydržet. Proto bylo rozhodnuto o nahrazení Zenerovy diody D5 rezistorem o hodnotě 48 Ω . Po jejím nahrazení byl obvod ve statickém i dynamickém režimu funkční.

8.3.3 Oživení celého obvodu

Oživení celého obvodu bylo složitější. I když obě části odděleně fungovaly, tak ke společné funkci muselo být provedeno ještě několik úprav.

Prvním problémem bylo, že po připojení vstupního signálu 10 kHz proudový zdroj nefungoval. Na laboratorním zdroji bylo dosaženo nastaveného proudového maxima a z toho důvodu napětí pokleslo.

Program pro Arduino byl upraven, aby se dala frekvence přepínat. Frekvence začínala na 10 Hz a vždy se zvýšila 10x. Bylo objeveno velké prodlení po odepnutí aktuátoru 280 μ s, což bylo téměř 3x více, než perioda požadovaného signálu 100 μ s viz Obrázek 8.5.

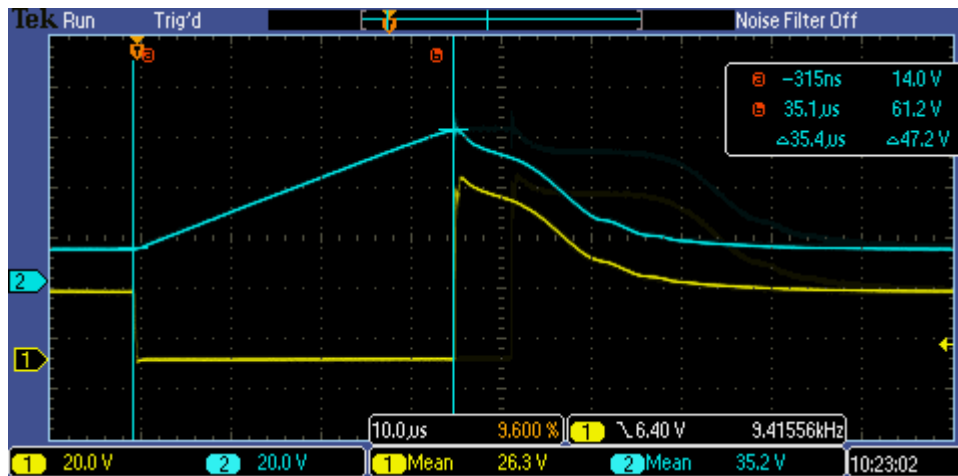


Obrázek 8.5 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), kurzory ukazují prodlení po odpojení aktuátoru

V proudovém zdroji měl setrvačnost pouze kondenzátor o velikosti 470 nF ve zpětné vazbě OZ. Jeho postupnou úpravou až na 1 nF bylo dosaženo mnohonásobně nižší prodlevy cca 44 μ s. Po odstranění docházelo k rozkmitání operačního zesilovače, proto nebylo možné kondenzátor odstranit.

Dále byla vyslovena hypotéza, že operační zesilovač padá do saturace, ze které se špatně dostává, a tím je prodlení způsobeno. Proto byly upraveny časy nabíjení

a změnou snímacího rezistoru R1 ze 2 na 4 Ω v proudovém zdroji snížen výstupní proud. Úvaha to byla správná a podařilo se dosáhnout lepšího průběhu viz Obrázek 8.6.



Obrázek 8.6 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), částečný pád OZ do saturace

Po dalších úpravách přestal padat OZ do saturace a prodlení bylo odstraněno. Bylo dosaženo požadované frekvence kolem 10 kHz. Následoval další problém. Rezonanční obvod nekmital a chyběly tedy tlumené kmity viz Obrázek 8.7.



Obrázek 8.7 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), OZ není v saturaci, nefunkční rezonanční obvod

Rezonanční obvod nekmital, protože aktuátor nebyl dostatečně rychle vybit, sestupná hrana pulzu má příliš malou strmost. Kvůli tomu nedokázal rezonanční obvod zakmitat. Náboj nemohl být tak rychle odstraněn přes rezistor nahrazující Zenerovu diodu.

Bylo rozhodnuto o odchýlení od původního teoretického zapojení. Obvod byl upraven a spínač S2 připojen přímo na zem. Tím se urychlilo vybíjení a bylo dosaženo požadovaného výsledku viz Obrázek 8.8.

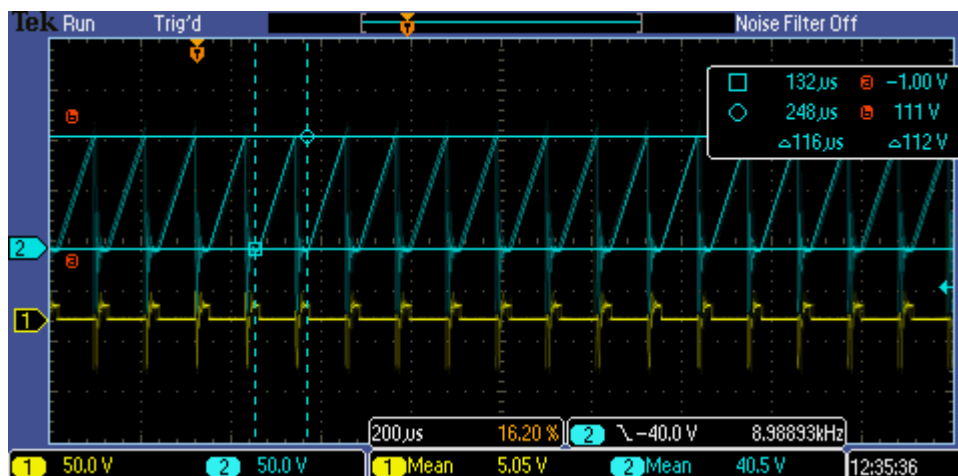


Obrázek 8.8 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), výsledný průběh dle požadavků

Obrázek 8.8 znázorňuje finální průběh na aktuátoru. Požadovaná lineární nástupná hrana trvá $81,6 \mu\text{s}$. Vybíjení pak $28,8 \mu\text{s}$. Tyto časy byly vůči simulaci mírně upraveny včetně proudu z proudového zdroje. Amplituda trojúhelníku dosahuje 116 V , první zákmit 64 V .

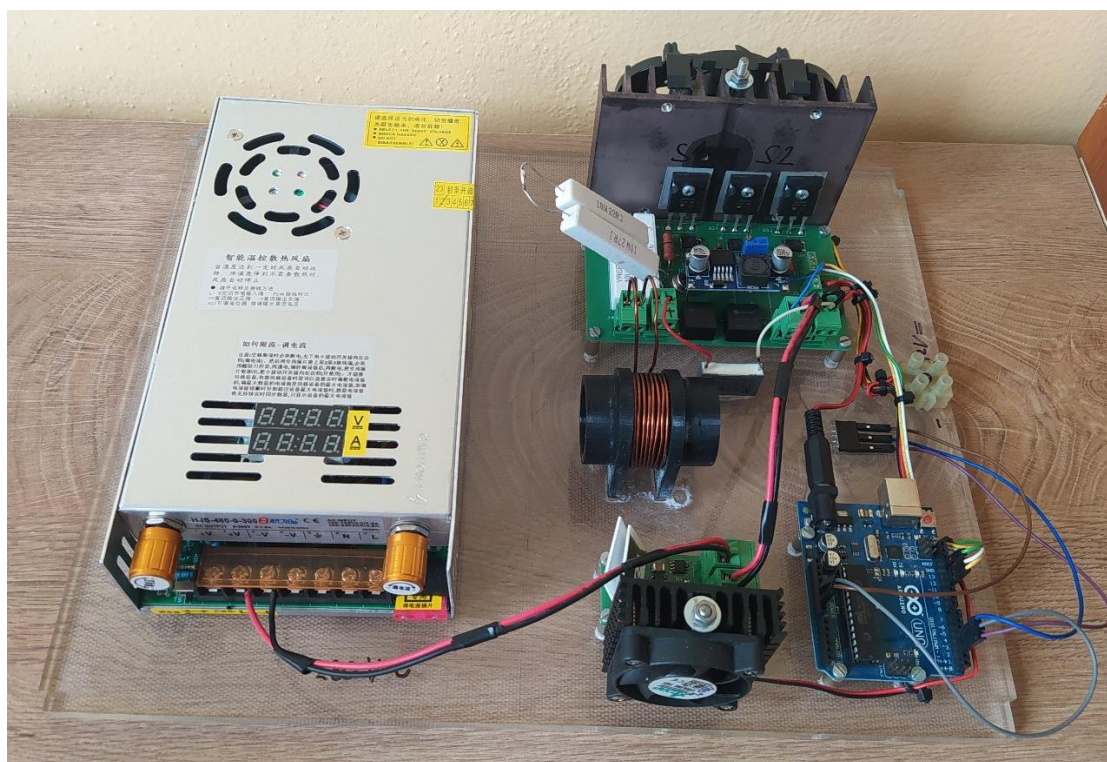
Tvar průběhu je totožný se simulací. Amplituda prvního tlumeného kmitu dosahuje více než poloviny amplitudy trojúhelníkového signálu, to je také shoda se simulací. Z toho plyne, že i proudy budou téměř totožné, jako u simulovaného obvodu. V naměřeném průběhu je patrná ještě jedna perioda tlumených kmitů navíc. To souvisí s větší rezonanční frekvencí.

Perioda tlumených kmitů je $5,22 \mu\text{s}$, tomu odpovídá frekvence $191,6 \text{ kHz}$. Ta je vyšší o cca 40 kHz než u simulace. Toto zvýšení frekvence je žádoucí, protože s větším množstvím tlumených kmitů dojde k lepší prostorové stabilizaci aktuátoru, tedy odstranění hystereze.



Obrázek 8.9 Průběh na aktuátoru (modrá), vstupní řídicí signál na gate tranzistoru Q1 (žlutá), výsledný průběh dle požadavků, zobrazení více period

Při pohledu na Obrázek 8.9 je patrné, že signál je v čase stabilní a tvar ani amplitudy impulzů se nemění.



Obrázek 8.10 Finální podoba zkonstruovaného prototypu proudového zdroje a driveru pro piezoaktuátory

9. ZÁVĚR

Tato práce vzniká ve spolupráci s firmou NETWORK GROUP, s.r.o., která je na trhu už od roku 1995. Jedná se o českou firmou působící v oboru distribuce datových kabeláží, osazování desek plošných spojů, vývoje a výroby optovláknových sensorů.

V první části diplomové práce byla nastudována a popsána problematika piezoelektrického jevu. Pozornost byla věnována také fyzikálním jevům úzce souvisejícím s tímto piezoelektrickým jevem a jednotlivým druhům piezoaktuátorů.

V práci byla provedena studie možností proudového a napětového řízení piezoaktuátorů z pohledu řízení optických filtrů pro přeladování optického spektra. Byly vysvětleny výhody a nevýhody těchto dvou principů řízení. Bylo provedeno měření roztažení piezoaktuátorů, měření frekvenčních charakteristik piezoaktuátorů a kondenzátoru.

Následoval návrh obvodu. V rámci návrhu bylo nejdříve nutné převést teoretický princip v koncept základní části obvodu. Tento koncept byl následně simulován v prostředí OrCad a doladěn do funkčního stavu. Poté bylo nutné koncept přepracovat v reálný obvod.

Reálný obvod byl propočten, dimenzovány součástky, kritické části obvodu sestaveny a otestovány. První kritickou částí byl obousměrný spínač pomocí tranzistorů N MOS, který fungoval správným způsobem. Následovalo testování a hledání vhodného proudového zdroje, který zvládá napětí 125 V a dokáže generovat proud do 0,6 A. Hotový proudový zdroj takových parametrů není na trhu dostupný.

První pokus o sestavení proudového zdroje byla paralelní kombinace integrovaných proudových zdrojů, ta se ale neosvědčila. Následně byl pro konstrukci použit vysokonapětový stabilizátor napětí, který se také neosvědčil. Konečným řešením bylo až použití vysokonapětového operačního zesilovače. Zde se podařilo dosáhnout uspokojivých parametrů, co se týká především teplotní nezávislosti a odezvy na proměnlivou zátěž.

Následovalo vytvoření dvou desek plošných spojů v prostředí Altium, jedna pro driver a druhá pro proudový zdroj. Desky byly osazeny, byla namotána cívka, přidány další komponenty, zařízení sestaveno dohromady, oživeno a odladěno.

Podařilo se dosáhnout totožných výsledků se simulací. Obvod je funkční a dosahuje lepších parametrů než běžně dostupné napětové drivery. Ve firmě NETWORK GROUP může obvod najít uplatnění v komerčně vyráběném měřicím zařízení pro monitoring pohybu staveb a konstrukcí. Uplatnění může však proudový driver najít i v jiných aplikacích a oborech.

10. LITERATURA

- [1] fyzika.fs.cvut.cz: Piezoelektrické jevy [online], aktualizováno 2020-04-06 [cit. 2022-06-09]. Dostupné na URL: <http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf>
- [2] cs.wikipedia.org: Piezoelektrický jev [online], aktualizováno 2021-04-10 [cit. 2022-06-09]. Dostupné na URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev>
- [3] edn.com: High-frequency piezo amplifier driver [online], aktualizováno 2018-11-14 [cit. 2022-06-16]. Dostupné na URL: <<https://www.edn.com/high-frequency-piezo-amplifier-driver/>>
- [4] blog.piezo.com: How to Drive Piezoelectric Actuators [online], aktualizováno 2019-06-28 [cit. 2022-06-17]. Dostupné na URL: <<https://blog.piezo.com/how-to-drive-piezoelectric-actuators>>
- [5] matsusada.com: About Piezo Drivers [online], aktualizováno 2021-11-01 [cit. 2022-06-17]. Dostupné na URL: <https://www.matsusada.com/column/words-piezo_driver.html>
- [6] HENDERSON, I.: Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications, USA: APC Int., 2011.
- [7] MOHEIMANI, S. O. R. a FLEMING, A. J.: Piezoelectric transducers for vibration control and damping: Advances in industrial control. 1. vydání Germany: Springer, 2006.
- [8] cs.wikipedia.org: Curieova teplota [online], aktualizováno 2022-02-20 [cit. 2022-06-28]. Dostupné na URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Curieova_teplota>
- [9] atmilab.upol.cz: Piezoelektrické látky [online], aktualizováno 2017-04-28 [cit. 2022-06-28]. Dostupné na URL: <<http://atmilab.upol.cz/vys/piezo.html>>
- [10] geektech.me: Co jsou piezoelektrické materiály a proč jsou budoucností [online], aktualizováno 2019-08-18 [cit. 2022-06-28]. Dostupné na URL: <<https://geektech.me/cs/what-are-piezoelectric-materials-and-why-they-are-the-future/>>
- [11] KHADRAOUI, S.: Combining H_∞ approach and interval tools to design a low order and robust controller for systems with parametric uncertainties: Application to piezoelectric actuators, International Journal of Control, květen 2012.
- [12] OLUWASEUM, A. a BURGESS, S.: A finite element approach for modelling multilayer unimorph dielectric elastomer actuators with inhomogeneous layer geometry, Smart Materials and Structures, leden 2012.
- [13] DAPENG, Z. a YINGWEI, L.: Tensile Piezoelectric Actuator: Fabrication, Characterization and Application, Wuhan University Journal of Natural Sciences, leden 2019.
- [14] YANGKUN, Z. a TIEN-FU, L.: Smart Materials and Structures, leden 2012. On an equivalent model of multi-layer piezoelectric actuators for facilitating finite element simulations, Springer-Verlag GmbH Germany, 8. května 2019

- [15] GOLDIN, N. a PELTZER, I.: Piezo-Polymer-Composite Unimorph Actuators for Active Cancellation of Flow Instabilities Across Airfoils, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, květen 2011
- [16] thorlabs.com: Amplified Piezoelectric Actuators, 220 μm to 2500 μm Travel [online], aktualizováno 2022-09-27 [cit. 2022-09-27]. Dostupné na URL: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8700&pn=PK2FSF1>
- [17] thorlabs.com: Amplified Piezoelectric Actuator, 75 V, 220 μm [online], aktualizováno 2022-09-27 [cit. 2022-09-27]. Dostupné na URL: <<https://www.thorlabs.com/drawings/8172746e71594806-F33E88B0-D256-0494-6B21C682B7E5E29E/PK2FSF1-SpecSheet.pdf>>
- [18] piezodrive.com: PDU100B Miniature Piezo Driver [online], aktualizováno 2022-09-28 [cit. 2022-09-28]. Dostupné na URL: <<https://www.piezodrive.com/modules/pdu100b-miniature-piezo-driver/>>
- [19] networkgroup.cz: Vlákenné mřížky a rezonátory [online], aktualizováno 2022-09-28 [cit. 2022-09-28]. Dostupné na URL: <<https://sfo.networkgroup.cz/cs/vlaknove-mrizky-a-rezonatory/>>
- [20] networkgroup.cz: Praktické využití a princip činnosti optovlákenných FBG senzorů [online], aktualizováno 2021-01-25 [cit. 2022-09-28]. Dostupné na URL: <<https://elektro.tzb-info.cz/elektromaterialy/21770-prakticke-vyuziti-a-princip-cinnosti-optovlaknovych-fbg-senzoru>>
- [21] FURUTANI, K. a LIDA, K.: A driving method of piezoelectric actuator by using current pulses, May 2006 [cit. 2023-1-2].
- [22] us.lambda.tdk.com: Constant Voltage, Constant Current Battery Charging [online], aktualizováno 2016-05-16 [cit. 2022-10-28]. Dostupné na URL: <<https://www.us.lambda.tdk.com/resources/blogs/201605.html>>
- [23] mdpi.com: Compensation of Hysteresis on Piezoelectric Actuators Based on Tripartite PI Model [online], aktualizováno 2018-01-26 [cit. 2022-10-28]. Dostupné na URL: <<https://www.mdpi.com/2072-666X/9/2/44>>
- [24] onsemi.com: Low Current LED Driver NUD4011 [online], aktualizováno 2019-01-01 [cit. 2023-02-20]. Dostupné na URL: <<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nud4011-d.pdf>>
- [25] RAM CHANDRA MOULI, G.: Design of a power electronic assisted series compensator for grid voltage regulation, leden 2013. [cit. 2023 02 20]. Dostupné na URL: <https://www.researchgate.net/figure/Bidirectional-electronic-switch-for-use-in-LV-OLTC_fig30_282642854>
- [26] eetimes.com: Low on-resistance, one key for the perfect switch [online], aktualizováno 2003-02-10 [cit. 2023-03-10]. Dostupné na URL: <<https://www.eetimes.com/low-on-resistance-one-key-for-the-perfect-switch/>>
- [27] aliexpress.com: Low on-resistance, one key for the perfect switch [online], aktualizováno 2023-03-10 [cit. 2023-03-10]. Dostupné na URL: <<https://www.aliexpress.com/item/1005004284444790.html?spm=a2g0o.detail.0>>

- 0.f4f96b58eTQcsW&gps-
id=pcDetailTopMoreOtherSeller&scm=1007.40000.327270.0&scm_id=1007.400
00.327270.0&scm-url=1007.40000.327270.0&pvid=6f4625cd-84ae-4e20-8184-
923e345a09fd&_t=gps-id:pcDetailTopMoreOtherSeller,scm-
url:1007.40000.327270.0,pvid:6f4625cd-84ae-4e20-8184-
923e345a09fd,tpp_buckets:668%232846%238111%231996&pdp_ext_f=%7B%2
2sku_id%22%3A%2212000028625956836%22%2C%22sceneId%22%3A%2223
416%22%7D&pdp_npi=3%40dis%21CZK%212400.23%211680.16%21%21%21
%21%21%402101d1af16765406678334036e7846%2112000028625956836%21r
ec%21CZ%21&ad_pvid=202302160144278614304752869754972610_2>
- [28] aliexpress.com: Step Down DC DC Converter Regulator Reliable Quality 5V Car
LED Power Supply CE [online], aktualizováno 2023-03-10 [cit. 2023-03-10].
Dostupné na URL:
<https://www.aliexpress.com/item/4000302403286.html?spm=a2g0o.productlist.main.41.35bd6eb4114tcL&algo_pvid=0b38fec3-d79c-4348-8618-736baa66a0c9&algo_exp_id=0b38fec3-d79c-4348-8618-736baa66a0c9-20&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2210000001251590025%22%7D&pdp_npi=3%40dis%21CZK%21111.61%21111.61%21%21%21%21%40214528be16759468883254922d06b6%2110000001251590025%21sea%21CZ%210&currPageLogUid=F9WCjs3E8xae>
- [29] eluc.ikap.cz: Zjednodušený, částečně obecný, návrh malého síťového
transformátoru [online], aktualizováno 2003-02-10 [cit. 2023-03-11]. Dostupné
na URL: <<https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/566>>
- [30] schmidt-walter-schaltnetzteile.de: High Frequency Transformer Design [online],
aktualizováno 2006-04-12 [cit. 2023-03-11]. Dostupné na URL: <http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smps_e/trafo_hilfe_e.html>
- [31] panda.p8k.net: Výpočet cívky [online], aktualizováno 2010-05-22 [cit.
2023-03-11]. Dostupné na URL: <<https://panda.p8k.net/elektronika/civka.htm>>
- [32] quora.com: What is skin effect in electrical? [online], aktualizováno 2012-06-05
[cit. 2023-03-11]. Dostupné na URL: <<https://www.quora.com/What-is-skin-effect-in-electrical>>
- [33] itwm.fraunhofer.de: Coating Thickness of Enameled Wire [online], aktualizováno
2023-03-11 [cit. 2023-03-11]. Dostupné na URL:
<<https://www.itwm.fraunhofer.de/en/departments/mc/optical-metrology/winding-wire-oct-layer-thickness.html>>
- [34] PATOČKA, M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek I, Brno: VUT,
2005.

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT	82
PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ GRAFY	86
PŘÍLOHA C - 3D MODELY VYRÁBĚNÝCH MODULŮ A SEZNAMY SOUČÁSTEK	88

Příloha A - Tabulky naměřených hodnot

A.1 Driver PDU100B Miniature a piezo PA4FKH3W

Driver PDU100B Miniature a piezo PA4FKH3W											
výstupní napětí 100 V, vstup sin 6,5 V p-p						výstupní napětí 50 V, vstup sin 3,5 V p-p					
f	U p-p out	Δ U max	Δ U min	Δ U	I	f	U p-p out	Δ U max	Δ U min	Δ U	I
[Hz]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[Hz]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]
10	91,2	1,62	-0,82	2,44	0,009037	10	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
20	91,2	1,62	-0,82	2,44	0,009037	20	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
30	90,4	1,62	-0,84	2,46	0,009111	30	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
40	90,4	1,62	-0,84	2,46	0,009111	40	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
50	89,6	2,4	-0,84	3,24	0,012000	50	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
60	89,6	2,44	-0,84	3,28	0,012148	60	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
70	89,6	2,44	-0,84	3,28	0,012148	70	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
80	89,6	2,44	-0,84	3,28	0,012148	80	49	1,61	-1,61	3,22	0,011926
90	89,6	2,44	-1,64	4,08	0,015111	90	48	2,41	-1,61	4,02	0,014889
100	89,6	2,44	-1,64	4,08	0,015111	100	48	2,41	-2,41	4,82	0,017852
150	88,8	3,24	-1,64	4,88	0,018074	150	47,8	2,41	-2,41	4,82	0,017852
200	88	4,04	-2,44	6,48	0,024000	200	47,4	2,41	-2,41	4,82	0,017852
250	87,2	4,88	-3,28	8,16	0,030222	250	47	3,21	-3,21	6,42	0,023778
300	85,6	4,88	-4,08	8,96	0,033185	300	47	3,21	-3,21	6,42	0,023778
350	84,8	5,68	-4,88	10,56	0,039111	350	46,6	3,61	-3,21	6,82	0,025259
400	82,4	5,68	-4,88	10,56	0,039111	400	46,2	3,62	-3,22	6,84	0,025333
450	79,2	6,48	-5,68	12,16	0,045037	450	45,8	4,02	-3,62	7,64	0,028296
500	76,8	6,48	-5,68	12,16	0,045037	500	45,4	4,02	-4,02	8,04	0,029778
550	73,6	6,48	-6,48	12,96	0,048000	550	45	4,02	-4,02	8,04	0,029778
600	70,4	7,28	-6,6	13,88	0,051407	600	43,8	4,42	-4,02	8,44	0,031259
650	67,2	7,4	-7,4	14,8	0,054815	650	43	4,82	-4,42	9,24	0,034222
700	64,8	7,4	-8,2	15,6	0,057778	700	42,6	4,82	-4,42	9,24	0,034222
750	62,4	8,2	-8,2	16,4	0,060741	750	41,4	5,22	-4,82	10,04	0,037185
800	60	8,2	-8,2	16,4	0,060741	800	41	5,22	-4,82	10,04	0,037185
850	59,2	8,2	-9	17,2	0,063704	850	40,2	5,62	-4,82	10,44	0,038667
900	56,8	8,8	-9	17,8	0,065926	900	39,4	5,62	-4,82	10,44	0,038667
950	55,2	9	-9	18	0,066667	950	39	5,62	-5,22	10,84	0,040148
1000	53,6	9	-9,6	18,6	0,068889	1000	38,6	6,03	-5,22	11,25	0,041667
1050	52,8	9	-9,8	18,8	0,069630	1050	37	6,03	-5,22	11,25	0,041667
1100	51,2	9,8	-9,8	19,6	0,072593	1100	35,8	6,43	-5,22	11,65	0,043148
1150	51,2	9,8	-9,8	19,6	0,072593	1150	35	6,43	-5,22	11,65	0,043148
1200	49,6	9,8	-10,6	20,4	0,075556	1200	34,2	6,43	-5,63	12,06	0,044667
-	-	-	-	-	-	1250	34,6	6,63	-5,63	12,26	0,045407
-	-	-	-	-	-	1300	33,8	6,63	-5,63	12,26	0,045407
-	-	-	-	-	-	1350	33	6,63	-6,03	12,66	0,046889
-	-	-	-	-	-	1400	32,6	6,63	-6,03	12,66	0,046889
-	-	-	-	-	-	1450	32,2	6,83	-6,03	12,86	0,04763
-	-	-	-	-	-	1500	31,8	7,23	-6,03	13,26	0,049111

-	-	-	-	-	-	1550	31	7,23	-6,03	13,26	0,049111
-	-	-	-	-	-	1600	30,6	7,23	-6,23	13,46	0,049852
-	-	-	-	-	-	1650	30,2	7,23	-6,43	13,66	0,050593
-	-	-	-	-	-	1700	29,3	7,23	-6,43	13,66	0,050593
-	-	-	-	-	-	1750	29,3	7,23	-6,43	13,66	0,050593
-	-	-	-	-	-	1800	28,8	7,63	-6,43	14,06	0,052074
-	-	-	-	-	-	1850	28,5	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	1900	28,1	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	1950	27,7	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	2000	27,3	7,63	-6,34	13,97	0,051741
-	-	-	-	-	-	2050	26,9	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	2100	26,5	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	2150	26,1	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	2200	25,9	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	2250	25,9	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	2300	25,5	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	2350	25,1	7,63	-7,2	14,83	0,054926
-	-	-	-	-	-	2400	25,1	8	-7,2	15,2	0,056296

A.2 Driver PDu100B Miniature a piezo PK4FA2H3P2

Driver PDu100B Miniature a piezo PK4FA2H3P2											
výstupní napětí 100 V, vstup sín 6,5 V p-p						výstupní napětí 50 V, vstup sín 3,5 V p-p					
f	U p-p out	ΔU max	ΔU min	ΔU	I	f	U p-p out	ΔU max	ΔU min	ΔU	I
[Hz]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[Hz]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]
10	90,0	1,62	-1,62	3,24	0,01200	10	48,2	1,20	-1,22	2,42	0,008963
20	90,0	2,41	-1,63	4,04	0,01496	20	47,4	1,20	-1,22	2,42	0,008963
30	89,0	2,40	-2,40	4,80	0,01778	30	47,4	1,62	-1,62	3,24	0,012000
40	88,0	3,22	-2,40	5,62	0,02081	40	47,0	1,62	-1,62	3,24	0,012000
50	88,0	3,22	-3,19	6,41	0,02374	50	47,0	2,00	-2,03	4,03	0,014926
60	88,0	4,06	-3,25	7,31	0,02707	60	46,6	2,03	-2,03	4,06	0,015037
70	88,0	4,06	-4,06	8,12	0,03007	70	46,6	2,41	-2,41	4,82	0,017852
80	87,0	4,82	-4,82	9,64	0,03570	80	46,2	2,41	-2,82	5,23	0,019370
90	87,0	4,88	-4,88	9,76	0,03615	90	46,2	2,82	-2,82	5,64	0,020889
100	86,0	4,88	-4,88	9,76	0,03615	100	45,8	2,81	-3,22	6,03	0,022333
120	85,0	5,69	-5,69	11,38	0,04215	120	45,4	3,21	-3,22	6,43	0,023815
140	83,0	5,69	-6,50	12,19	0,04515	140	45,0	3,62	-3,62	7,24	0,026815
160	80,0	6,44	-7,31	13,75	0,05093	160	44,6	3,61	-4,02	7,63	0,028259
180	76,0	6,44	-7,31	13,75	0,05093	180	43,2	3,62	-4,02	7,64	0,028296
200	74,0	7,25	-8,11	15,36	0,05689	200	43,0	4,02	-4,42	8,44	0,031259
220	71,0	7,33	-9,05	16,38	0,06067	220	42,6	4,02	-4,82	8,84	0,032741
240	68,0	7,33	-9,04	16,37	0,06063	240	41,8	4,02	-5,23	9,25	0,034259
260	65,0	7,33	-9,67	17,00	0,06296	260	41,0	4,42	-5,23	9,65	0,035741
280	63,0	8,11	-9,67	17,78	0,06585	280	39,8	4,42	-5,63	10,05	0,037222
300	60,0	8,11	-10,60	18,71	0,06930	300	39,0	4,42	-5,63	10,05	0,037222
320	58,0	8,11	-10,60	18,71	0,06930	320	38,2	4,42	-6,03	10,45	0,038704

340	56,0	8,11	-10,60	18,71	0,06930	340	37,0	4,82	-6,03	10,85	0,040185
360	55,0	8,11	-11,39	19,50	0,07222	360	36,2	4,82	-6,43	11,25	0,041667
380	52,0	8,89	-11,39	20,28	0,07511	380	35,4	4,82	-6,43	11,25	0,041667
400	51,0	8,89	-11,39	20,28	0,07511	400	34,2	4,82	-6,83	11,65	0,043148
420	50,3	8,89	-11,39	20,28	0,07511	420	33,4	4,82	-6,83	11,65	0,043148
440	48,2	8,89	-11,39	20,28	0,07511	440	32,6	5,22	-6,83	12,05	0,044630
460	46,2	8,89	-11,39	20,28	0,07511	460	31,8	5,22	-7,23	12,45	0,046111
-	-	-	-	-	-	480	31,0	5,22	-7,23	12,45	0,046111
-	-	-	-	-	-	500	30,2	5,22	-7,23	12,45	0,046111
-	-	-	-	-	-	520	29,3	5,22	-7,23	12,45	0,046111
-	-	-	-	-	-	540	28,5	5,22	-7,23	12,45	0,046111
-	-	-	-	-	-	560	28,1	5,22	-7,64	12,86	0,047630
-	-	-	-	-	-	580	27,7	5,22	-7,64	12,86	0,047630
-	-	-	-	-	-	600	26,9	5,22	-7,64	12,86	0,047630
-	-	-	-	-	-	620	26,5	5,22	-7,64	12,86	0,047630
-	-	-	-	-	-	640	25,7	5,22	-7,64	12,86	0,047630
-	-	-	-	-	-	660	25,3	5,22	-7,64	12,86	0,047630
-	-	-	-	-	-	680	24,9	5,22	-7,64	12,86	0,047630

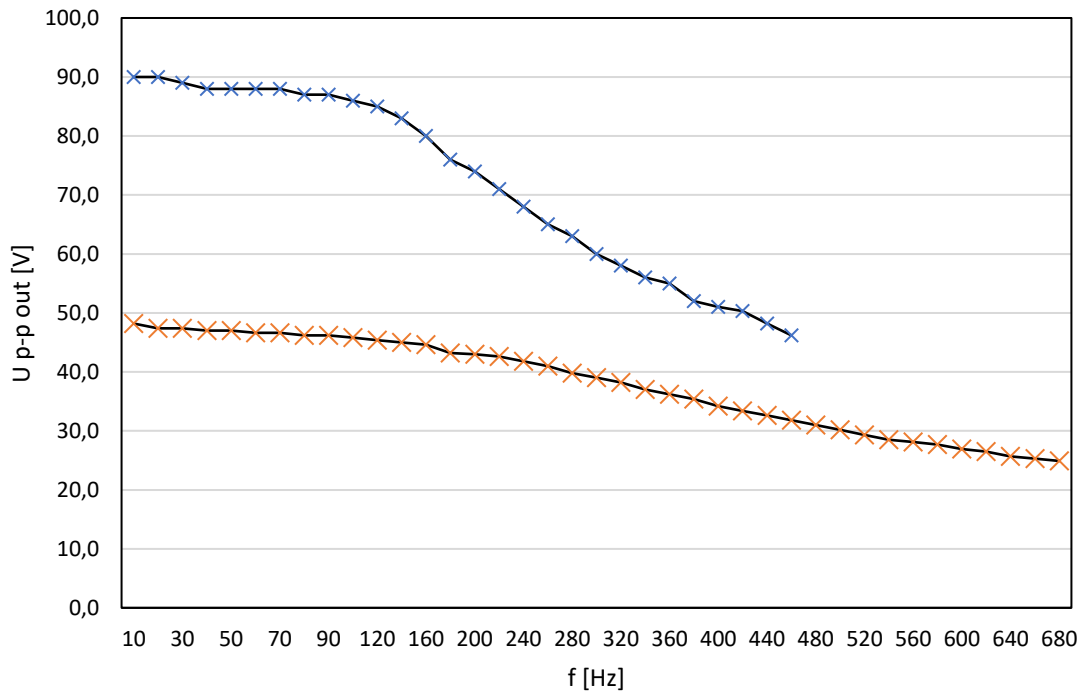
A.3 Driver PDU100B Miniature a kondenzátor 220 nF

Driver PDU100B Miniature a kondenzátor 220 nF											
výstupní napětí 100 V, vstup sin 6,5 V p-p						výstupní napětí 50 V, vstup sin 3,5 V p-p					
f	U p-p out	Δ U max	Δ U min	Δ U	I	f	U p-p out	Δ U max	Δ U min	Δ U	I
[Hz]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[Hz]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]
10	90	1,61	-1,61	3,22	0,011926	10	47,8	0,8	-1,21	2,01	0,007444
20	90	1,61	-1,61	3,22	0,011926	20	48,2	0,8	-1,21	2,01	0,007444
30	90	1,61	-1,61	3,22	0,011926	30	48,2	0,8	-1,21	2,01	0,007444
40	90	1,61	-1,61	3,22	0,011926	40	48,2	1,21	-1,61	2,82	0,010444
50	90	2,41	-2,41	4,82	0,017852	50	48,2	1,21	-1,61	2,82	0,010444
60	90	2,41	-2,41	4,82	0,017852	60	48,2	1,21	-1,61	2,82	0,010444
70	90	2,41	-2,41	4,82	0,017852	70	48,2	1,61	-2,01	3,62	0,013407
80	90	2,41	-2,41	4,82	0,017852	80	48,2	1,61	-2,01	3,62	0,013407
90	90	3,21	-3,21	6,42	0,023778	90	48,2	1,61	-2,01	3,62	0,013407
100	90	3,21	-3,21	6,42	0,023778	100	48,2	1,61	-2,01	3,62	0,013407
150	90	4,02	-4,02	8,04	0,029778	150	48	2,01	-2,41	4,42	0,01637
200	89	4,82	-4,02	8,84	0,032741	200	47,4	2,41	-2,81	5,22	0,019333
250	88	5,63	-4,82	10,45	0,038704	250	47,4	2,81	-3,22	6,03	0,022333
300	87	5,63	-4,82	10,45	0,038704	300	47	3,21	-3,62	6,83	0,025296
350	86	6,43	-5,63	12,06	0,044667	350	46,6	3,62	-3,62	7,24	0,026815
400	84	7,23	-6,43	13,66	0,050593	400	46,2	4,02	-4,02	8,04	0,029778
450	80	7,64	-6,83	14,47	0,053593	450	45,4	4,42	-4,02	8,44	0,031259
500	77,2	8	-6,8	14,8	0,054815	500	45	4,42	-4,02	8,44	0,031259
550	73,2	8,4	-7,2	15,6	0,057778	550	43,8	4,82	-4,42	9,24	0,034222
600	70,8	9,2	-7,6	16,8	0,062222	600	43,4	5,22	-4,42	9,64	0,035704
650	70	9,6	-8	17,6	0,065185	650	42,8	5,63	-4,82	10,45	0,038704

700	66,7	10	-8,4	18,4	0,068148	700	41,4	5,63	-4,82	10,45	0,038704
750	63,5	10,4	-8,4	18,8	0,069630	750	40,2	5,63	-5,23	10,86	0,040222
800	61,9	10,8	-8,4	19,2	0,071111	800	39,2	5,82	-5,43	11,25	0,041667
850	60,3	11,8	-8,8	20,6	0,076296	850	38	6,03	-5,43	11,46	0,042444
900	59,1	11,2	-9,2	20,4	0,075556	900	37	6,23	-5,63	11,86	0,043926
950	57,5	11,2	-9,2	20,4	0,075556	950	35,4	6,43	-5,63	12,06	0,044667
1000	55,5	11,6	-9,2	20,8	0,077037	1000	34,2	6,63	-5,83	12,46	0,046148
-	-	-	-	-	-	1050	33,2	6,63	-6,03	12,66	0,046889
-	-	-	-	-	-	1100	32	6,83	-6,03	12,86	0,04763
-	-	-	-	-	-	1150	31,9	6,83	-6,03	12,86	0,04763
-	-	-	-	-	-	1200	31,2	7,03	-6,23	13,26	0,049111
-	-	-	-	-	-	1250	30,4	7,23	-6,23	13,46	0,049852
-	-	-	-	-	-	1300	29,7	7,23	-6,43	13,66	0,050593
-	-	-	-	-	-	1350	29,1	7,23	-6,43	13,66	0,050593
-	-	-	-	-	-	1400	28,5	7,23	-6,63	13,86	0,051333
-	-	-	-	-	-	1450	27,9	7,43	-6,63	14,06	0,052074
-	-	-	-	-	-	1500	27,1	7,43	-6,83	14,26	0,052815
-	-	-	-	-	-	1550	26,9	7,43	-6,83	14,26	0,052815
-	-	-	-	-	-	1600	26,5	7,63	-6,83	14,46	0,053556
-	-	-	-	-	-	1650	25,1	7,63	-7,04	14,67	0,054333
-	-	-	-	-	-	1700	25	7,63	-7,04	14,67	0,054333
-	-	-	-	-	-	1750	25	7,63	-7,04	14,67	0,054333
-	-	-	-	-	-	1800	24,9	7,63	-7,23	14,86	0,055037
-	-	-	-	-	-	1850	24,5	7,63	-7,23	14,86	0,055037
-	-	-	-	-	-	1900	24,3	7,84	-7,44	15,28	0,056593
-	-	-	-	-	-	1950	24,1	7,84	-7,44	15,28	0,056593
-	-	-	-	-	-	2000	23,5	7,84	-7,44	15,28	0,056593

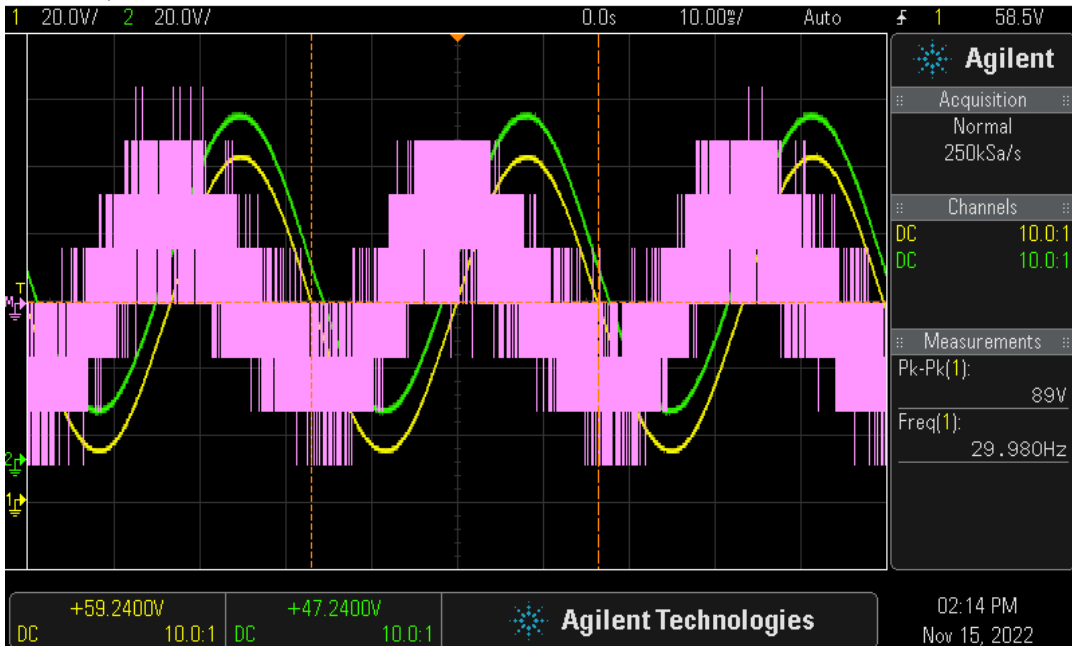
Příloha B - Naměřené grafy

B.1 Závislost napětí U na frekvenci f pro PK4FA2H3P2



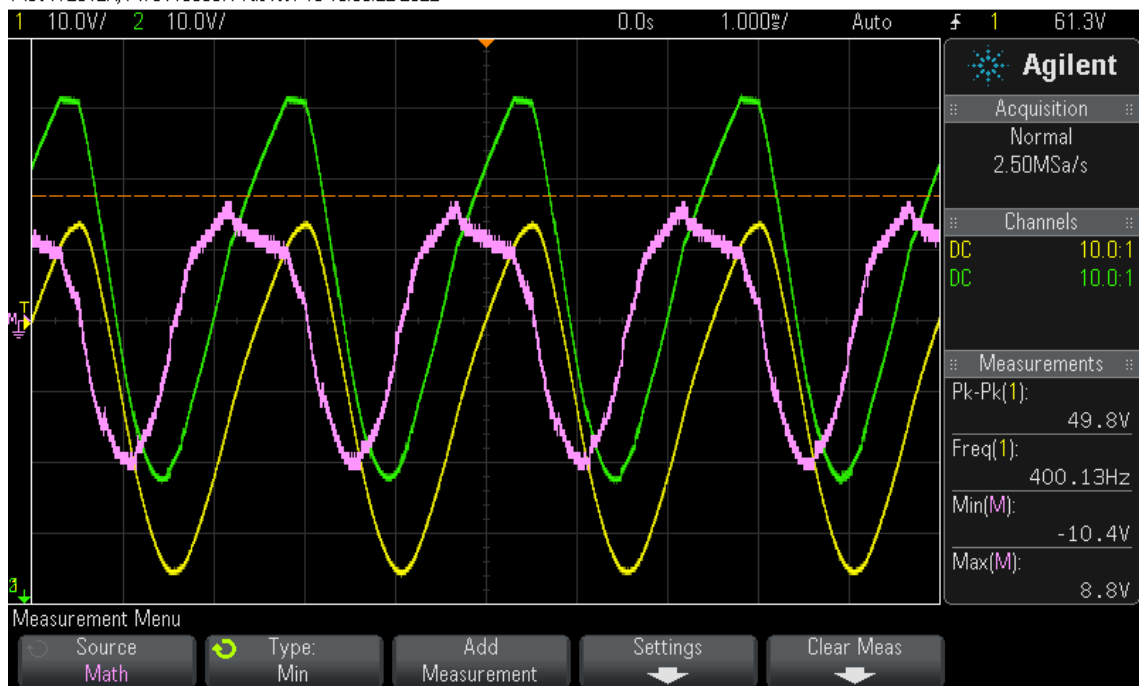
B.2 Průběh při měření s piezoaktuátorem PA4FKH3W, bez zkreslení na nízké frekvenci

M50-X 2012A, MY51138387: Tue Nov 15 14:15:21 2022



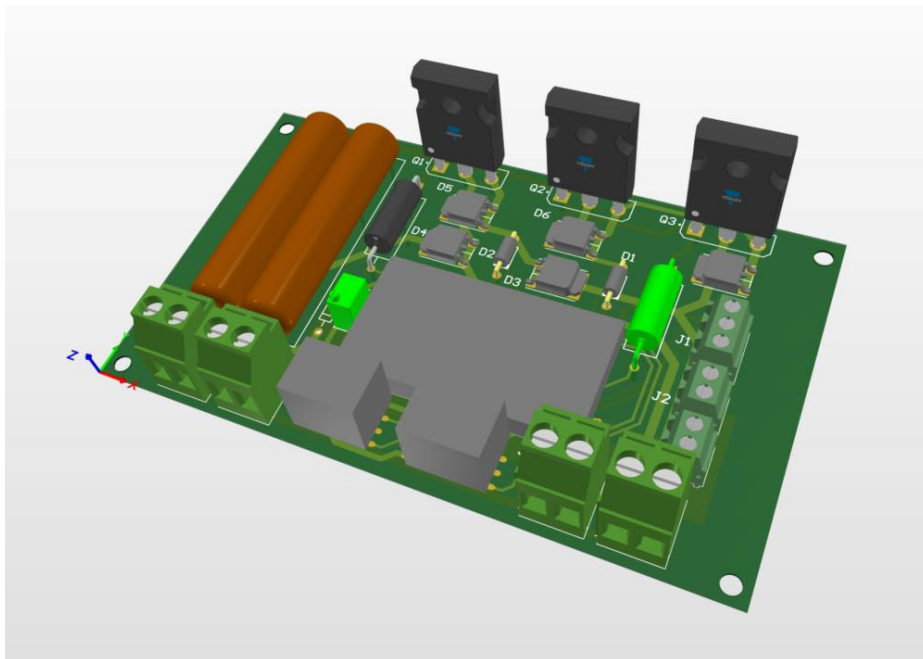
B.3 Průběh při měření s piezoaktuátorem PA4FKH3W, se zkrácením na vysoké frekvenci

MSO-X 2012A, MY51138387: Tue Nov 15 15:00:22 2022

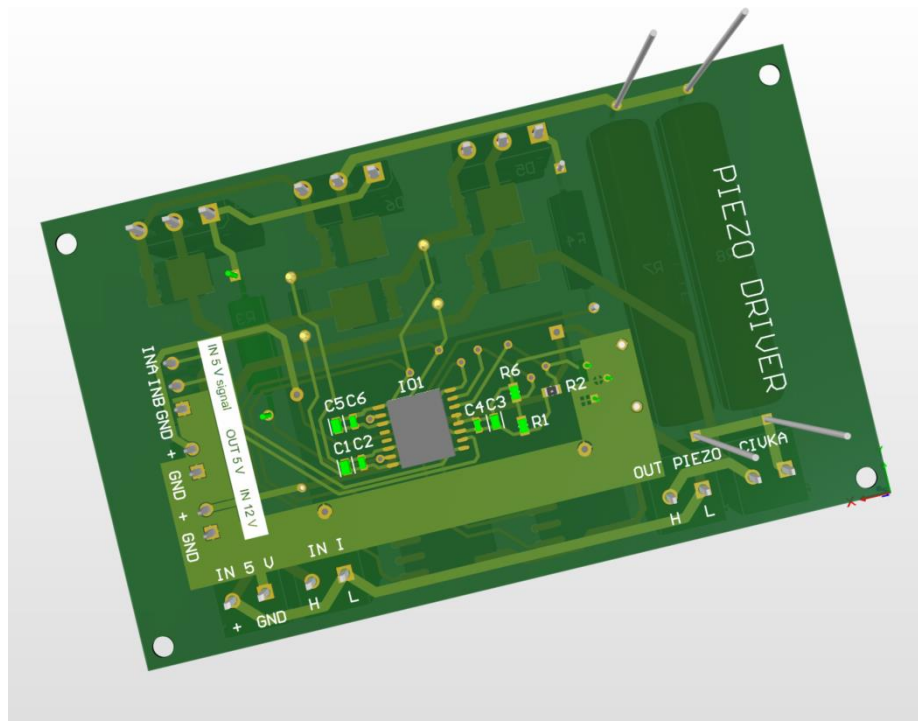


Příloha C - 3D modely vyráběných modulů a seznamy součástek

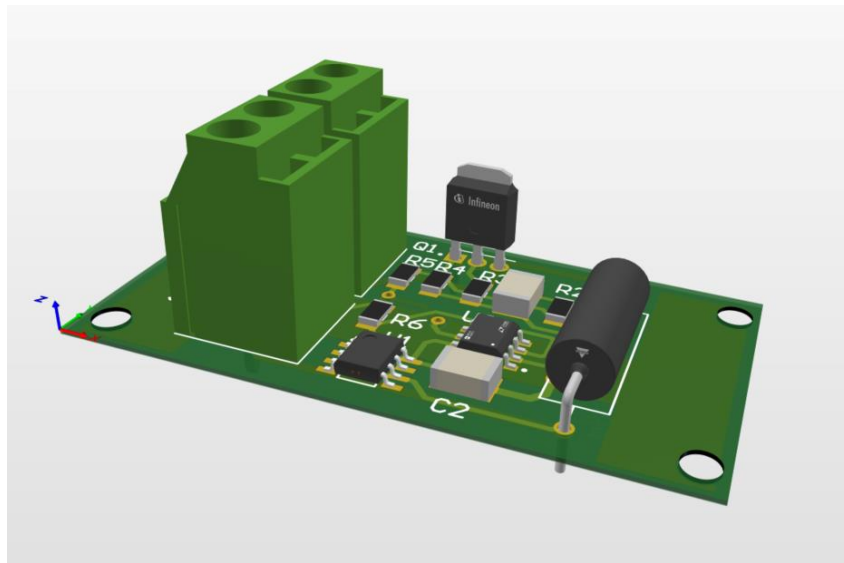
C.1 3D model piezodriveru, vrchní strana



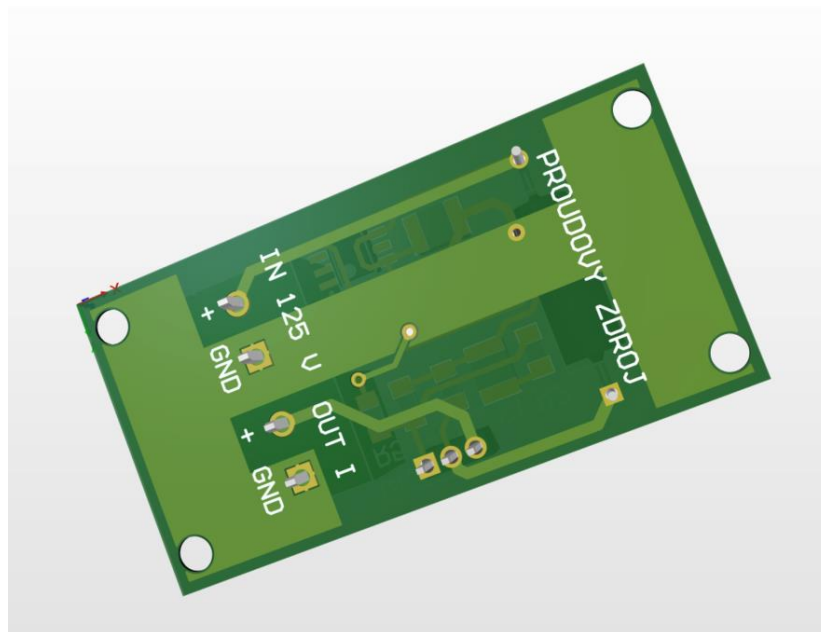
C.2 3D model piezo driveru, spodní strana



C.3 3D model proudového zdroje, vrchní strana



C.4 3D model proudového zdroje, spodní strana



C.5 Seznam součástek pro piezodriver

Comment	Description	Designator	Quantity
10 uF	Chip Multilayer Ceramic Capacitors for General Purpose, 0805, 10uF, X5R, 15%, 10%, 25V	C1, C3, C5	3
100 nF	Chip Capacitor, 0.1 uF, +/- 10%, 50 V, -55 to 125 degC, 0603 (1608 Metric)	C2, C4, C6	3
1N4744A	Zener Diode, 15V, 1W, 5%, -65 to 200 degC, 2-Pin DO-41, Body 2.72 x 5.2 mm	D1, D2	2
V35PW22	Trench MOS Barrier Schottky	D3, D4, D5, D6, D7	5
NCD57253	Isolated Dual Channel IGBT/MOSFET Gate Driver	IO1	1
DCDC LM2596	Step down DC/DC converter 12 to 5 V	IO2	1
PQP3-D12	Isolated DC/DC converter 12 to 12 V	IO3, IO4	2
IN 5 V signal	Serie 2141 - 3.50 mm Horizontal Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 3 pin	J1	1
OUT 5 V arduino	Serie 2141 - 3.50 mm Horizontal Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	J2	1
IN 12 V	Serie 2141 - 3.50 mm Horizontal Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	J3	1
CÍVKA	Serie 2365 - 5.08 mm Horizontal Cable Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	J4	1
PIEZO OUT	Serie 2365 - 5.08 mm Horizontal Cable Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	J5	1
IN I	Serie 2365 - 5.08 mm Horizontal Cable Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	J6	1
IRFP244	MOSFET N-CH 200V 20A TO-247AC	Q1, Q2, Q3	3
0	RES Thick Film, 0Ω, 0.125W, 0805	R2, R6	2
18 R	RES 8.2K OHM 3.75W 5% AXIAL	R3, R4	2
48 R	RES 8.2K OHM 3.75W 5% AXIAL	R7	1
1,6 R	RES 1,6 OHM 10W 5% AXIAL	R7, R8	2

C.6 Seznam součástek pro proudový zdroj

Comment	Description	Designator	Quantity
1 nF 250V	CAP 470nF 250V ±20% 1812 (4532 Metric) Thickness 1.9mm SMD	C1	1
470nF 250V	CAP 470nF 250V ±20% 1812 (4532 Metric) Thickness 1.9mm SMD	C2	1
IN 125 V	Serie 2365 - 5.08 mm Horizontal Cable Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	J1	1
I OUT	Serie 2365 - 5.08 mm Horizontal Cable Entry Modular with Rising Cage Clamp WR-TBL, 2 pin	J2	1
IRFU9214PBF	MOSFET P-CH 250V 2,7A IPAK	Q1	1
4 R	RES 2 OHM 3.75W 5% AXIAL	R1	1
200 R	Chip Resistor, 1 KOhm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 1206 (3216 Metric)	R2	1
1 k	Chip Resistor, 1 KOhm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 1206 (3216 Metric)	R3	1
47 K	Chip Resistor, 1 KOhm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 1206 (3216 Metric)	R4	1
18 R	Chip Resistor, 1 KOhm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 1206 (3216 Metric)	R5	1
50 k	Chip Resistor, 1 KOhm, +/- 1%, 0.25 W, -55 to 155 degC, 1206 (3216 Metric)	R6	1
REF1004	Micropower Voltage Reference, 1.235 V, 20 ppm / degC, 20 mA, 0 to 70 degC, 8-pin SOIC (D)	U1	1
LTC6090CS8E	IC OPAMP GP 1 CIRCUIT 8SOIC	U2	1