

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Konstrukce generátoru a budiče výkonových sonotrod

Stanislav Štarman

Vedoucí: prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štarman** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **474254**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Konstrukce generátoru a budiče výkonových sonotrod

Název bakalářské práce anglicky:

Construction of a Generator and Driver of power Sonotrodes

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte generátor a budič výkonových sonotrod. Uvažujte rozsah kmitočtů 15kHz-60kHz a výkon do 100W. Pro realizaci výkonového stupně zvažte použití SiC tranzistorů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Rozenberg, L.D.: Sources of High-Intensity Ultrasound (Ultrasonic Technology), Springer 1969. 267 p. ISBN: 978-1-4899-6181-5.
[2] Rozenberg, L.D.: Physical Principles of Ultrasonic Technology, Springer 2013. 515 p. ISBN: 978-1-46848-217-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc., katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: 21. 05. 2021

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26. 01. 2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce za jeho čas a ochotu při komunikaci, i konzultování a opravování této práce. Veliké díky patří mé rodině, zvláště manželce, kteří mě při psaní práce podporovali a museli mnoho obětovat, abych měl možnost se této práci věnovat. Další velké díky patří mému otci, za rady a poskytnutí potřebných přístrojů a součástek pro realizaci práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 21. května 2021

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem ultrazvukových měničů a generátorů, které se používají pro jejich buzení. V první části je popsán princip funkce ultrazvukových měničů, závislost jejich parametrů na rozměrech a ideální frekvenční charakteristika. Dále jsou popsány ultrazvukové generátory s pevnými parametry, zpětnou vazbou a s automatickou detekcí zátěže. Je vysvětlen jejich princip a možné využití. Dále jsou ukázána zapojení dvouúrovňového a tříúrovňového výkonového stupně generátoru. Ve druhé části je ukázán návrh dvouúrovňového generátoru s možností automatické detekce zátěže a nastavením pracovní frekvence, díky čemuž má široké možnosti uplatnění.

Klíčová slova: generátor, ultrazvuk, sonotroda

Vedoucí: prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.

Abstract

This thesis focuses on the description of ultrasonic transducers and generators that are used for their excitation. The first part describes the principle operation of ultrasonic transducers, their parameters dependent on the dimensions and ideal frequency characteristic. In addition, ultrasonic generators with fixed parameters, generators with feedback loops, and generators with automatic load detection are described. After that, their principle and possible use are explained. The principal function of the two-level and three-level power stages are described with the usage of their schematic connection. The second part shows the design of a two-level generator with the possibility of automatic load detection and setting the operating frequency, which has a wide range of applications.

Keywords: generator, ultrasonic, sonotrode

Title translation: Construction of a Generator and Driver of power Sonotrodes

Obsah

Seznam symbolů	xi	3.2 Řídicí jednotka	22
1 Úvod	1	3.3 Budič	23
2 Teoretická Část	3	3.4 Použité tranzistory	25
2.1 Elektromechanický ultrazvukový měnič	3	3.5 Měření veličin	25
2.2 Piezoelektrický měnič	3	3.6 Výstupní průběhy	26
2.3 Ultrazvukový generátor	8	3.7 Použité piezoelektrické měniče ..	28
2.3.1 Generátory s pevnými parametry	9	3.8 Pracovní frekvence měniče	32
2.3.2 Generátory se zpětnou vazbou	10	3.9 Přizpůsobení zátěže	35
2.3.3 Generátory s automatickou identifikací zátěže	11	3.10 Měření při různých typech zátěže	37
2.4 Koncové stupně generátorů	12	4 Závěr	43
2.4.1 Dvouúrovňové generátory ...	13	A Literatura	45
2.4.2 Tříúrovňové generátory	14		
2.4.3 Volba tranzistorů	16		
3 Praktická část	19		
3.1 Zapojení generátoru	19		

Obrázky

2.1 Náhradní obvodové schéma piezokeramiky [3]	4	2.14 Zapojení dvouúrovňového generátoru (polomůstek)	13
2.2 Frekvenční charakteristika piezokeramiky [3]	4	2.15 Zapojení dvouúrovňového generátoru (můstek)	14
2.3 Kruhová keramika	5	2.16 Zapojení tříúrovňového generátoru s přemostěním diodami	15
2.4 Čtvercová keramika	6	2.17 Zapojení tříúrovňového generátoru	15
2.5 Prstencová keramika	7	2.18 Zapojení tříúrovňového generátoru typ T	16
2.6 Postup výroby kompozitního piezoelektrického měniče [2]	8	2.19 Zapojení snubberu pro pohlcení spínacích špiček [10]	17
2.7 Blokové schéma ultrazvukového generátoru	8	2.20 Srovnání Si a SiC tranzistorů [7]	17
2.8 Domácí čistička Jeken 6200A, frekvence 42 kHz. [4]	9	3.1 Generátor	20
2.9 Průmyslová čistička DCz-300H, frekvence 40 kHz. [4]	10	3.2 Hlavní části generátoru	20
2.10 Blokové schéma generátoru s pomocným snímačem	10	3.3 Schéma zapojení generátoru	21
2.11 Ultrazvuková svářečka [6]	11	3.4 Nucleo F303K8	22
2.12 Blokové schéma generátoru s automatickým nastavením frekvence	11	3.5 Zapojení pinů procesoru	23
2.13 Typy výkonových stupňů: a) Dvouúrovňový, b) Tříúrovňový, c) Víceúrovňový [8]	12	3.6 Budič SCALE-2 2SC0650P2A0-17 [11]	24
		3.7 Blokové schéma budiče	24
		3.8 SiC MOSFET C2M0045170P ...	25

3.9 Výstupní průběh na prázdno na frekvenci 20 kHz	26	3.23 Průběh napětí na pracovní frekvenci sondy 2	36
3.10 Výstupní průběh na prázdno na frekvenci 40 kHz	27	3.24 Průběh napětí na pracovní frekvenci sondy 3	36
3.11 Výstupní průběh na prázdno na frekvenci 60 kHz	27	3.25 Sonda 3 uchycená ve vzduchu .	37
3.12 Analyzátor Bode 100	28	3.26 Frekvenční charakteristika sondy 3 ve vzduchu	38
3.13 Sonda 1	29	3.27 Sonda 3 s hrotem ve vodě	38
3.14 Frekvenční charakteristika sondy 1	29	3.28 Frekvenční charakteristika sondy 3 ve vodě	39
3.15 Sonda 2	30	3.29 Sonda 3 v ultrazvukovém gelu .	39
3.16 Frekvenční charakteristika sondy 2	30	3.30 Frekvenční charakteristika sondy 3 v gelu	40
3.17 Sonda 3	31	3.31 Sonda 3 přitlačená na 1 mm tlustý hliníkový plech	40
3.18 Frekvenční charakteristika sondy 3	32	3.32 Frekvenční charakteristika sondy 3 na hliníkovém plechu	41
3.19 Měření podélných kmitů sondy 2	33	3.33 Sonda 3 přitlačená na 35 mm tlustý hliník	41
3.20 Závislost napětí a podélných kmitů sondy 2 na frekvenci	33	3.34 Frekvenční charakteristika sondy 3 na hliníkovém kvádru	42
3.21 Měření podélných kmitů sondy 3	34		
3.22 Závislost napětí a podélných kmitů sondy 3 na frekvenci	34		

■ Seznam symbolů

f_s	sériová rezonanční frekvence
f_p	paralelní rezonanční frekvence
f_r	rezonanční frekvence
N_p	frekvenční konstanta pro planární oscilace
N_l	frekvenční konstanta pro podélné oscilace
d	průměr kruhové keramiky
t	tloušťka keramiky
C	kapacita keramiky
ϵ_{33}^T	permitivita keramiky
N_c	frekvenční konstanta
L, W	délka/šířka čtvercové keramiky
d_o	vnější průměr prstencové keramiky
d_i	vnitřní průměr prstencové keramiky
Q_m	mechanický činitel jakosti
Z_s	impedance v rezonanci
f_{rs2}	rezonanční frekvence sondy 2
f_{rs3}	rezonanční frekvence sondy 3
f_{PWM}	frekvence PWM signálu
f_{CLK}	frekvence čítače
ARR	maximální hodnota registru čítače
PSC	hodnota předděličky čítače
D_{PWM}	střída PWM signálu



Kapitola 1

Úvod

Ultrazvukové generátory jsou v dnešní době hojně využívány a mají velmi široké možnosti uplatnění. S jejich pomocí lze vytvořit ultrazvukové páječky, svářečky, řezačky, myčky a mnoho dalších zařízení, které mají díky přidanému ultrazvuku lepší, nebo upravené vlastnosti. První část se zabývá popisem ultrazvukových měničů a principem jejich funkce. Dále byly přiblíženy základní typy ultrazvukových generátorů, jejich konstrukce a zapojení. Druhá část je zaměřena na návrh a realizaci konkrétního generátoru s možností automatické identifikace zátěže a nastavení pracovní frekvence.

Kapitola 2

Teoretická Část

2.1 Elektromechanický ultrazvukový měnič

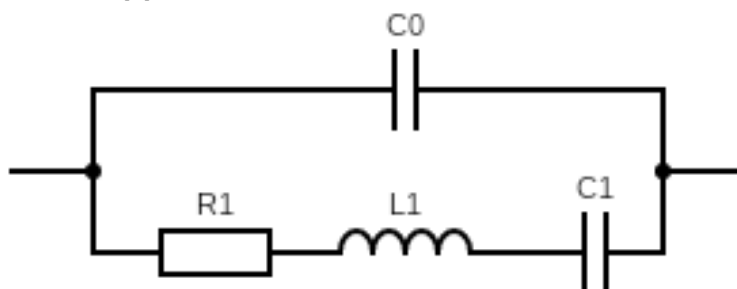
Elektromechanický ultrazvukový měnič je převodník elektrického vstupního signálu o ultrazvukové frekvenci na mechanické kmity. Skládá se z měniče a obecné mechanické soustavy, které jsou na sebe navázány. Existují dva základní principy funkce měničů. Piezoelektrický a magnetostrikční. Používají se jako zátěž pro ultrazvukové generátory. V této práci bude popsán pouze piezoelektrický měnič. Účel mechanické soustavy je převádět a případně koncentrovat mechanickou energii do místa využití. Mechanické soustavy jsou navrhované pro dané využití měniče, například hrot páječky nebo svářečky.

2.2 Piezoelektrický měnič

Piezoelektrický měnič bývá vyroben z piezokeramiky a funguje na principu nepřímého piezoelektrického jevu. Pokud je na keramiku přivedeno elektrické napětí, mechanicky se deformuje v celém svém objemu. [1] Díky tomu je možné transformovat elektrický signál na mechanické kmity, které se dále šíří mechanickou soustavou. Podle typu aplikace se využívá příčných nebo podélných kmitů, které není možné navzájem oddělit. Měníče mohou být složeny i z více keramik, zapojených sériově, paralelně, či kombinací obojího. Toho využívají například kompozitní keramiky složené z většího počtu měničů,

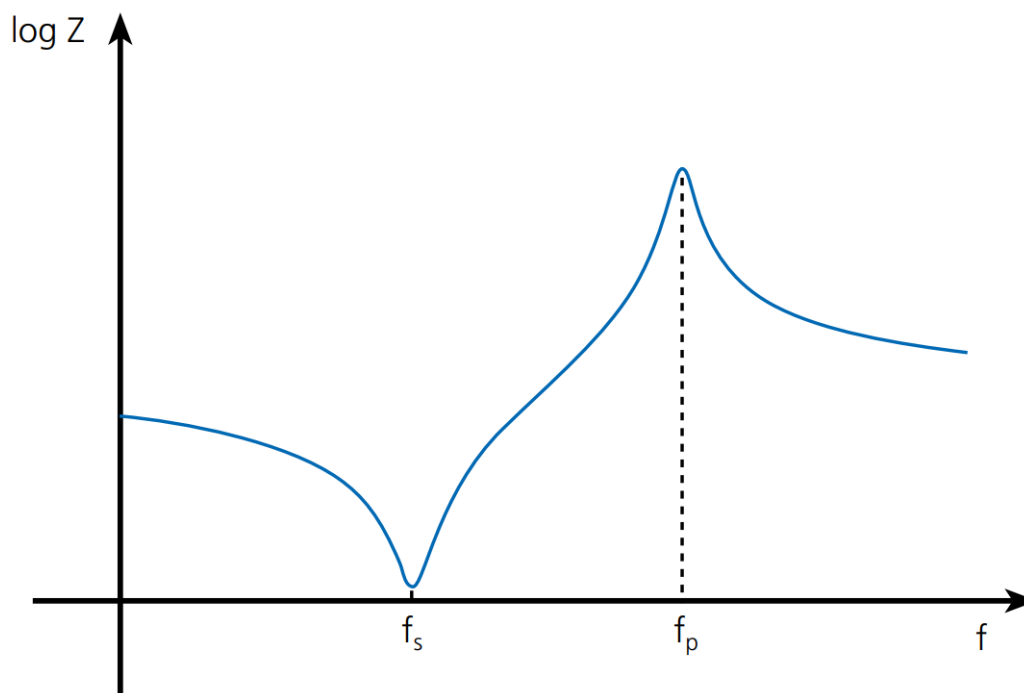
mezi kterými je vzájemné akustické tlumení. [2] Díky tomu se částečně potlačí příčné nebo podélné kmity podle konstrukce. Příklad takové keramiky můžeme vidět na obrázku 2.6.

Při práci s piezokeramikou se používá zjednodušené náhradní obvodové schéma, které vidíme na obrázku 2.1. Parametry $C1$, $L1$ a $R1$ popisují vlastnosti rezonátoru. [3]



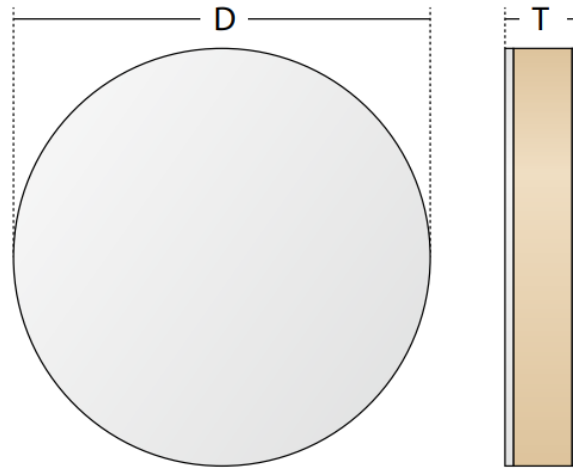
Obrázek 2.1: Náhradní obvodové schéma piezokeramiky [3]

Piezokeramika bývá vyrobena v konkrétních tvarech, z těch nejjednodušších například čtvercová deska, disk, nebo prstenec. Rezonanční frekvence keramiky je závislá na jejich fyzikálních rozměrech. Na obrázku 2.2 vidíme ideální frekvenční charakteristiku piezokeramiky, kde f_s a f_p představují sériovou a paralelní rezonanční frekvenci. Na vodorovné ose je frekvence a na svislé logaritmus impedance.



Obrázek 2.2: Frekvenční charakteristika piezokeramiky [3]

Z rozměrů keramiky je možné přibližně spočítat její parametry, jako rezonanční frekvence a kapacita. Dále budou uvedeny vzorce pro přibližný výpočet parametrů podle tvaru keramiky. Následující obrázky a rovnice jsou převzaty ze stránek výrobce piezokeramik Ceram Tech [3].



Obrázek 2.3: Kruhová keramika

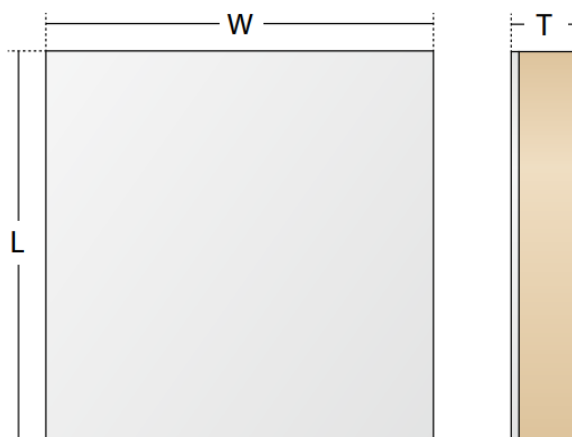
Vzorce pro kruhovou keramiku:

$$f_r = \frac{N_p}{d} \quad (2.1)$$

$$f_r = \frac{N_t}{t} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{\epsilon_{33}^T \pi d^2}{4 \cdot t} \quad (2.3)$$

Proměnné: d - průměr, t - tloušťka f_r - rezonanční frekvence ve směru d nebo t , N_p - frekvenční konstantanta pro planární oscilace, N_t - frekvenční konstantanta pro tloušťkové oscilace.

**Obrázek 2.4:** Čtvercová keramika

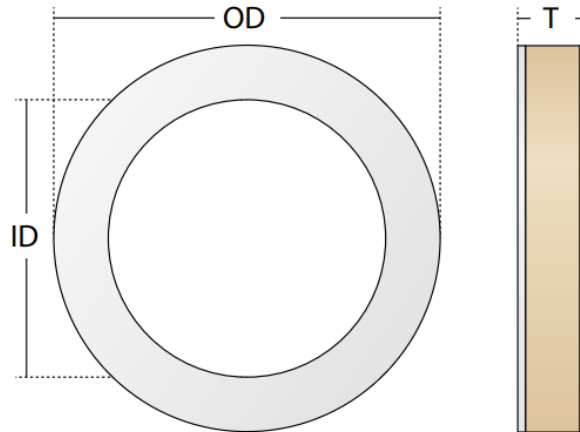
Vzorce pro čtvercovou keramiku:

$$f_r = \frac{N_l}{L} = \frac{N_l}{W} \quad (2.4)$$

$$f_r = \frac{N_t}{t} \quad (2.5)$$

$$C = \frac{\epsilon_{33}^T LW}{t} \quad (2.6)$$

Proměnné: L, W - délka strany, t - tloušťka f_r - rezonanční frekvence ve směru L nebo t , N_l - frekvenční konstanta pro podélné oscilace, N_t - frekvenční konstanta pro tloušťkové oscilace.



Obrázek 2.5: Prstencová keramika

Vzorce pro prstencovou keramiku:

$$f_r = \frac{2 \cdot N_c}{d_o + d_i} \quad (2.7)$$

$$f_r = \frac{N_t}{t} \quad (2.8)$$

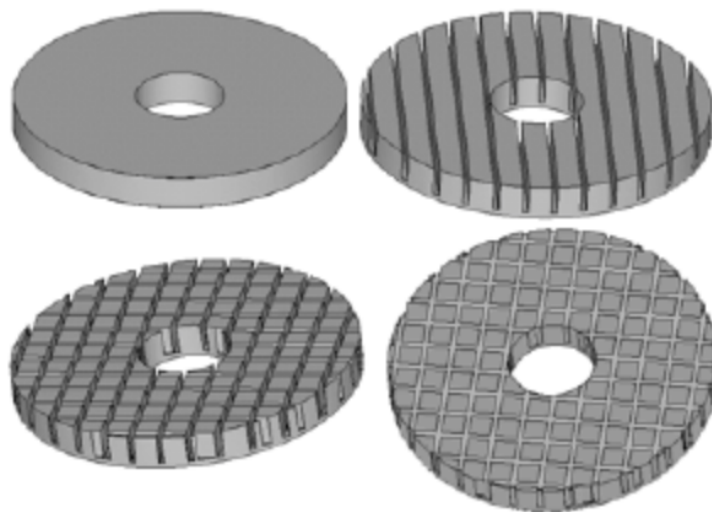
$$C = \frac{\epsilon_{33}^T \pi (d_o^2 - d_i^2)}{4 \cdot t} \quad (2.9)$$

Proměnné: d_o - vnější průměr, d_i - vnitřní průměr, f_r - rezonanční frekvence ve směru c nebo t , N_c - frekvenční konstanta pro kruhovou keramiku, N_t - frekvenční konstanta pro tloušťkové oscilace.

Podle vzorce 2.10 lze vypočítat mechanický činitel jakosti rezonátoru.

$$Q_m = \frac{f_p^2}{2 \cdot \pi f_s Z_s C (f_p^2 - f_s^2)} \quad (2.10)$$

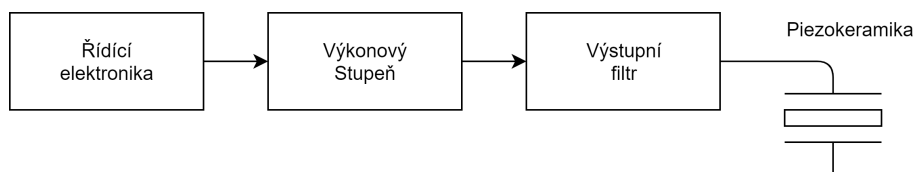
Proměnné: f_p , f_s paralelní a sériová rezonanční frekvence, Z_s - impedance v rezonanci, C - kapacita.



Obrázek 2.6: Postup výroby kompozitního piezoelektrického měniče [2]

2.3 Ultrazvukový generátor

Ultrazvukový generátor je zařízení, které na svém výstupu generuje signál o frekvenci vyšší než přibližně 20 kHz. Skládá se z řídicí elektroniky, koncového (výkonového) stupně a výstupního filtru. Na výstup bývá připojena zátěž v podobě ultrazvukového měniče, který byl popsán výše. Výstupní signál je obvykle generován symetricky kolem nulové hodnoty napětí a může dosahovat určitého počtu napěťových úrovní, který je dán konstrukcí výkonového stupně. Toho se dosahuje přepínáním zdrojů o různých napěťových úrovních na výstup generátoru pomocí výkonových tranzistorů, často doplněné využitím pulzní šířkové modulace. Na obrázku 2.7 vidíme obecné blokové schéma generátoru.



Obrázek 2.7: Blokové schéma ultrazvukového generátoru

Řídicí elektronika zajišťuje celkovou funkci generátoru a vytváření řídicích signálů pro budiče tranzistorů v koncovém stupni. V případě generátorů se zpětnou vazbou je schopná díky pomocným snímačům měřit a nastavovat

parametry jako frekvence, fáze, výkon, akustická výchylka a další. Koncový stupeň je tvořen výkonovými tranzistory. Jejich volbou je určeno jaké bude mít generátor nejvyšší možné výstupní napětí. Pro zvýšení napětí na výstupu je také možné využít transformátor. Filtr slouží pro vyhlazení výstupního signálu.

■ 2.3.1 Generátory s pevnými parametry

Tento typ generátorů bývá nejlevnější. Většinou je navržen pro konkrétní aplikaci. Frekvence, amplituda i výkon jsou analogově či digitálně nastaveny na určité hodnoty a generátor je za chodu neumí sám upravit. Kvůli tomu mají mírně omezené využití a používají se pouze pro předem určené aplikace, pro které byly navrženy. Využívají se například v ultrazvukových myčkách, kde není potřeba za chodu upravovat žádné parametry. Na obrázcích 2.8 a 2.9 vidíme příklad ultrazvukových čističek.



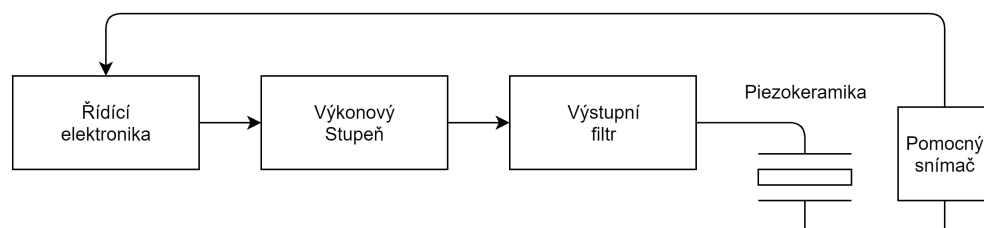
Obrázek 2.8: Domácí čistička Jeken 6200A, frekvence 42 kHz. [4]



Obrázek 2.9: Průmyslová čistička DCz-300H, frekvence 40 kHz. [4]

2.3.2 Generátory se zpětnou vazbou

Jedná se o generátory používající zpětnou vazbu pro stabilizaci frekvence, amplitudy či výkonu výstupního signálu. Ta může mít různé provedení, například pomocný snímač výchylky na výstupu, nebo fázový závěs. Používají se, když je za běhu možná nechtěná změna parametrů, například po přiložení nástroje se mění jeho akustická výchylka. Jsou již složitější a nákladnější než předchozí typ. Na obrázku 2.10 vidíme blokové schéma zapojení.



Obrázek 2.10: Blokové schéma generátoru s pomocným snímačem

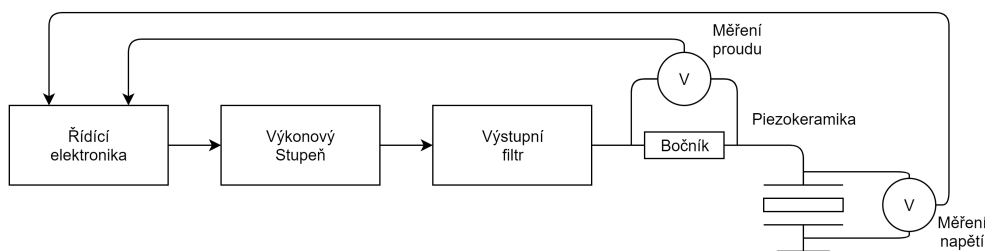
Tento druh generátorů se využívá například v ultrazvukových svářečkách, které se hojně využívají ke sváření plastů. Zde se využívá frekvencí v rozsahu cca 10 až 20 kHz. [5] Na obrázku 2.11 je zobrazena ultrazvuková svářečka.



Obrázek 2.11: Ultrazvuková svářečka [6]

2.3.3 Generátory s automatickou identifikací zátěže

Tyto generátory mají možnost automatického změření frekvenční charakteristiky zátěže a následného, či kontinuálního nastavování rezonanční frekvence. To je realizováno tak, že generátor po krocích mění frekvenci v celém svém rozsahu, nebo v určitém okolí pracovní frekvence a pro každou frekvenci změří danou veličinu, podle které provádí regulaci. Pro konkrétní zátěž generátor nastaví optimální frekvenci. Také je možné za chodu měřit aktuální velikost napětí, proudu a výkonu zátěže. Tyto generátory mají tedy širší využití, nejsou vázané na jednu konkrétní aplikaci.

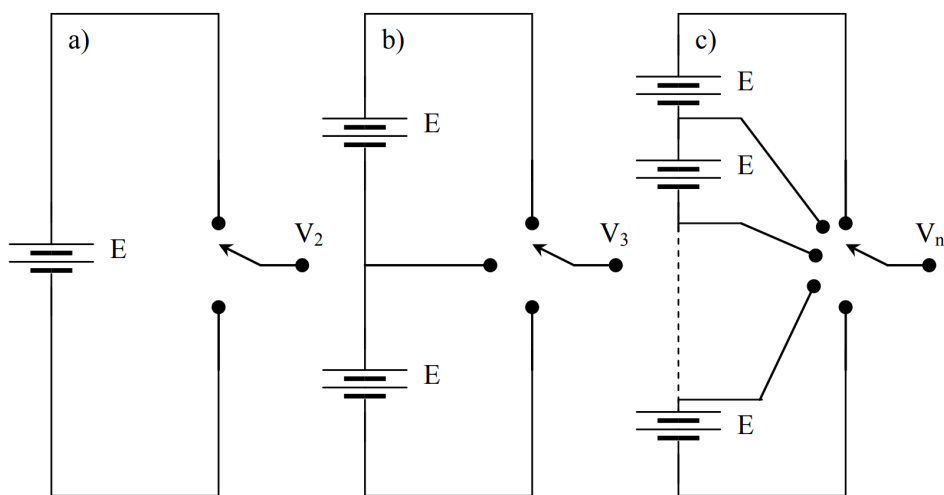


Obrázek 2.12: Blokové schéma generátoru s automatickým nastavením frekvence

2.4 Koncové stupně generátorů

Koncový stupeň představují výkonové tranzistory, pomocí nichž se dostává na výstup napětí napájecích zdrojů. Pro spínání a rozpínání výkonových tranzistorů je nutné využití budičů, které jsou schopné dodat dostatečně velký proud. To je potřeba kvůli vnitřní kapacitě tranzistorů, která se musí za velmi malý čas vybit nebo nabít. Čím rychlejší je přechod mezi plně sepnutým a rozepnutým stavem, tím je tranzistor méně namáhaný a jsou na něm nižší spínací ztráty. [7]

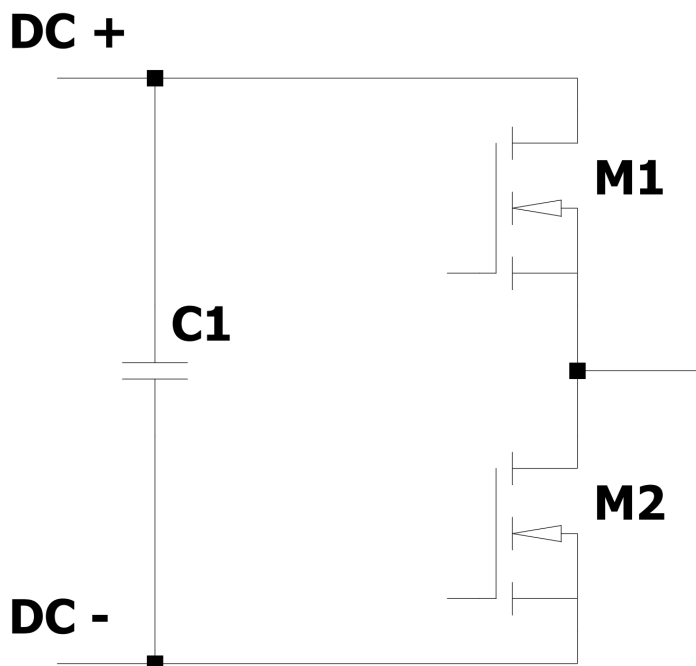
Existuje spousta různých zapojení pro koncové stupně ultrazvukových generátorů. Hlavní dělení je podle toho, kolik má daný generátor takzvaných úrovní. Ta udává, kolik má generátor na výstupu možných napěťových stavů. Čím více úrovní má generátor, tím může mít jemnější a přesnější řízení výstupního signálu. Například dvouúrovňový generátor má pouze dva možné napěťové stavy na výstupu. S počtem úrovní ale také rostou náklady na výrobu a složitost zapojení. [8] Na obrázku 2.13 je zobrazen princip funkce koncových stupňů.



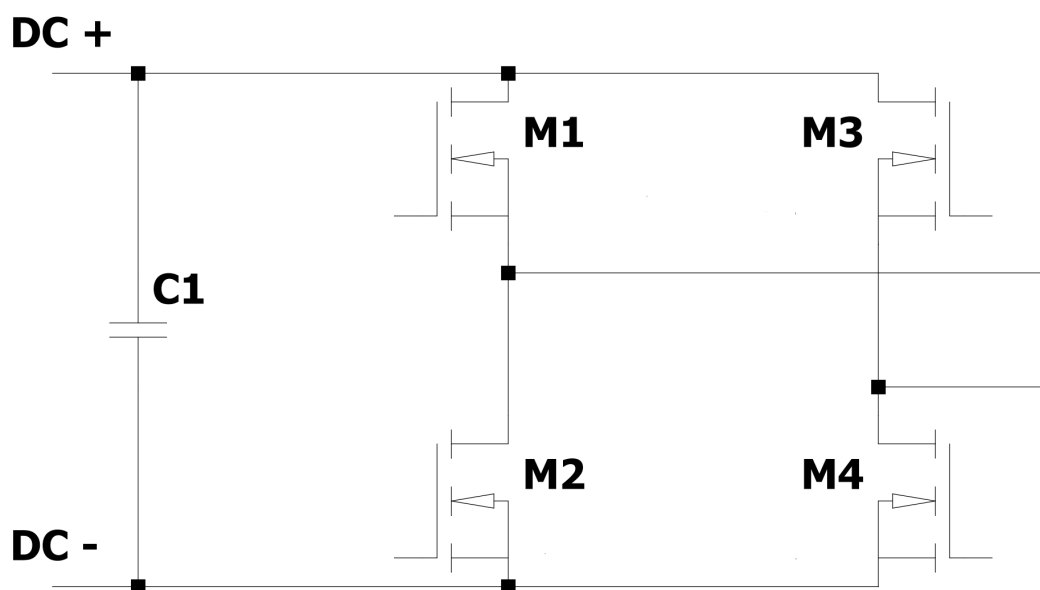
Obrázek 2.13: Typy výkonových stupňů: a) Dvouúrovňový, b) Tříúrovňový, c) Víceúrovňový [8]

2.4.1 Dvouúrovňové generátory

Tyto generátory mají na výstupu možné pouze dva napěťové stavy. Mají jednodušší zapojení a jsou levnější. Jejich nevýhodou je nižší účinnost kvůli malému počtu stavů. [8] Princip je možný popsat podle obrázku 2.14. Pokud sepneme tranzistor M1, na výstup se dostane kladné napětí zdroje DC+. Naopak když sepneme tranzistor M2, bude na výstupu záporné napětí zdroje DC-. Nesmí nastat stav, kdy by byly sepnuty oba tranzistory současně. Generátor by se dostal do zkratu a hrozí jeho poškození. Proto se využívá takzvaného mrtvého času, který určuje po jaké době od rozepnutí jednoho tranzistoru smí sepnout ten druhý.



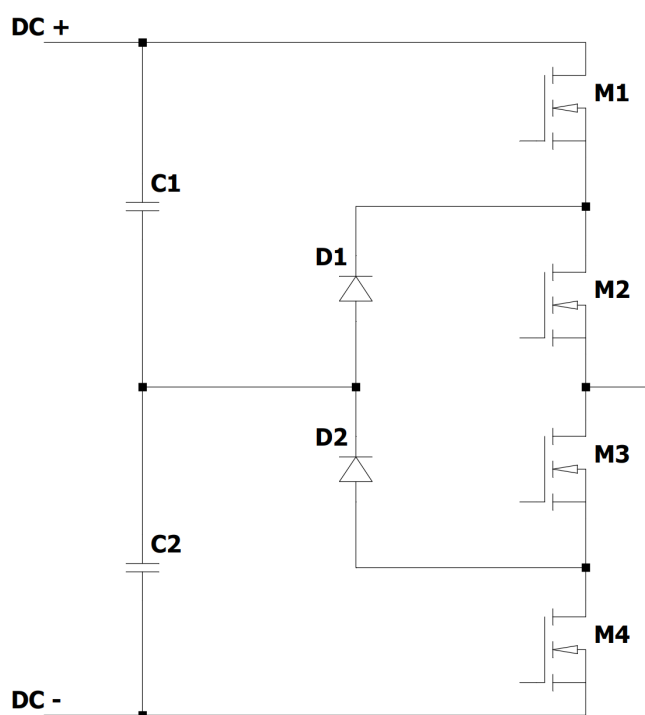
Obrázek 2.14: Zapojení dvouúrovňového generátoru (polomůstek)



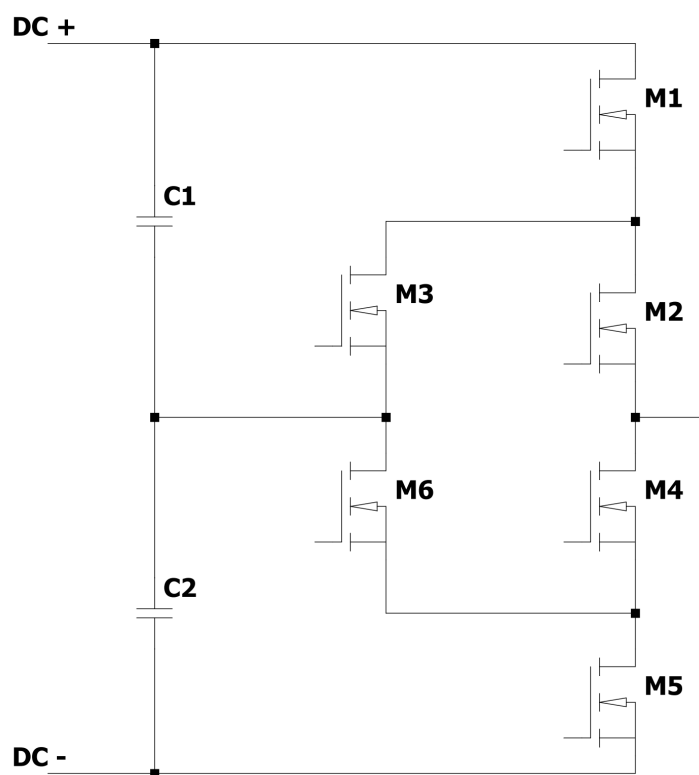
Obrázek 2.15: Zapojení dvouúrovňového generátoru (můstek)

2.4.2 Tříúrovňové generátory

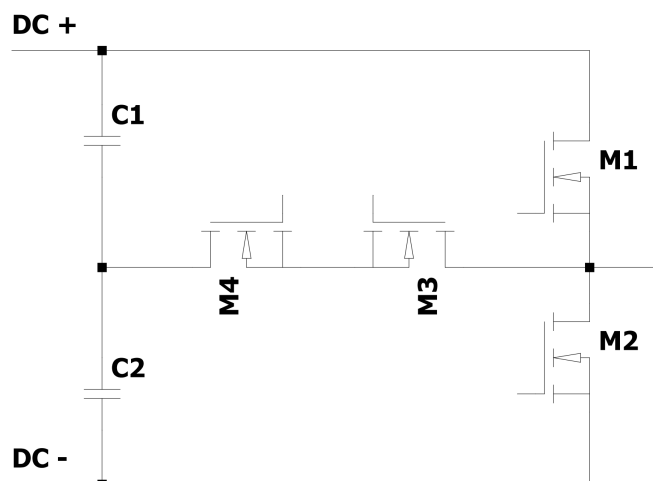
Narozdíl od dvouúrovňových mají tyto generátory kromě kladného a záporného napětí napájecích zdrojů na výstupu navíc možnost nulového napětí. Tím se zvyšuje jejich účinnost a schopnost generovat přesnější signály. Zvyšuje se tím ale cena a složitost zapojení. [9] Princip lze popsat například na obrázku 2.16. Sepnutím tranzistorů M1 a M2 se dostane na výstup napětí DC+. DC- na výstupu získáme sepnutím tranzistorů M3 a M4. Nulové napětí bude na výstupu po sepnutím tranzistorů M2 a M3. Zapojení na obrázku 2.17 má místo diod D1 a D2 tranzistory. Díky tomu má toto zapojení vyšší účinnost, protože na sepnutých tranzistorech jsou menší úbytky než na diodách. Nevýhodou je ale složitější řízení. Na obrázku 2.18 je zapojení typu T. Jeho výhodou je jednoduchost a malý počet prvků. Je ale použitelné pouze na poloviční napětí než předchozí zapojení, protože má napětí DC+ a DC- pouze na jednom tranzistoru. Pro spínání nulového napětí jsou zde dva tranzistory zapojené antisériově. To je kvůli tomu, že kdyby zde tranzistor M3 nebyl, na M4 by bylo v případě kdy je na výstupu DC+ napětí v opačném směru, než na jaký je stavěný.



Obrázek 2.16: Zapojení tříúrovňového generátoru s přemostěním diodami



Obrázek 2.17: Zapojení tříúrovňového generátoru

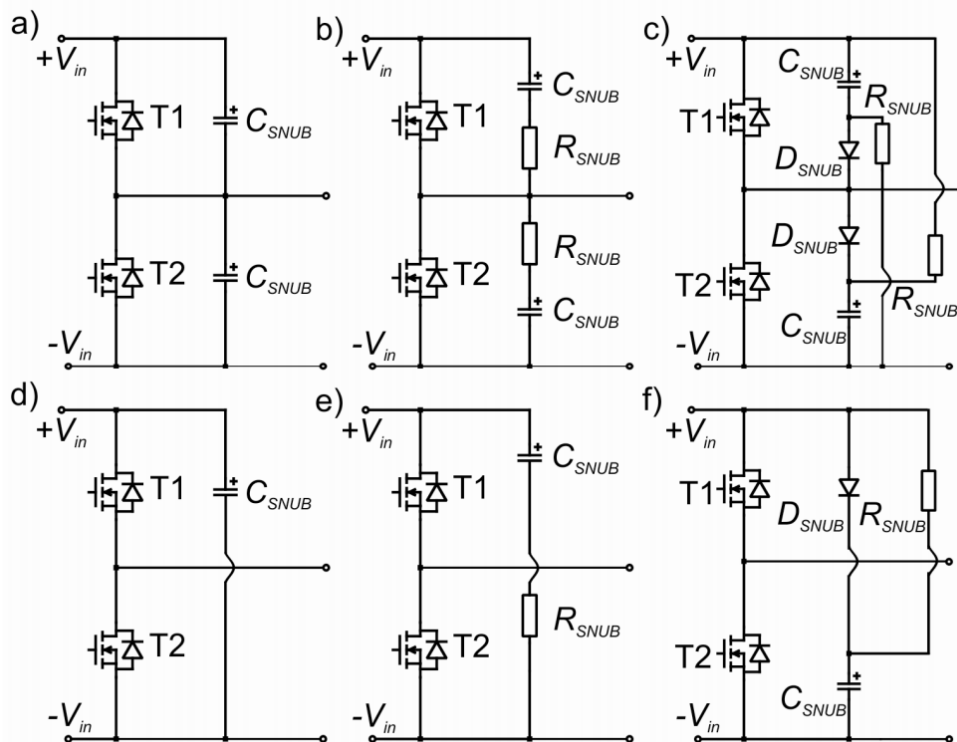


Obrázek 2.18: Zapojení tříúrovňového generátoru typ T

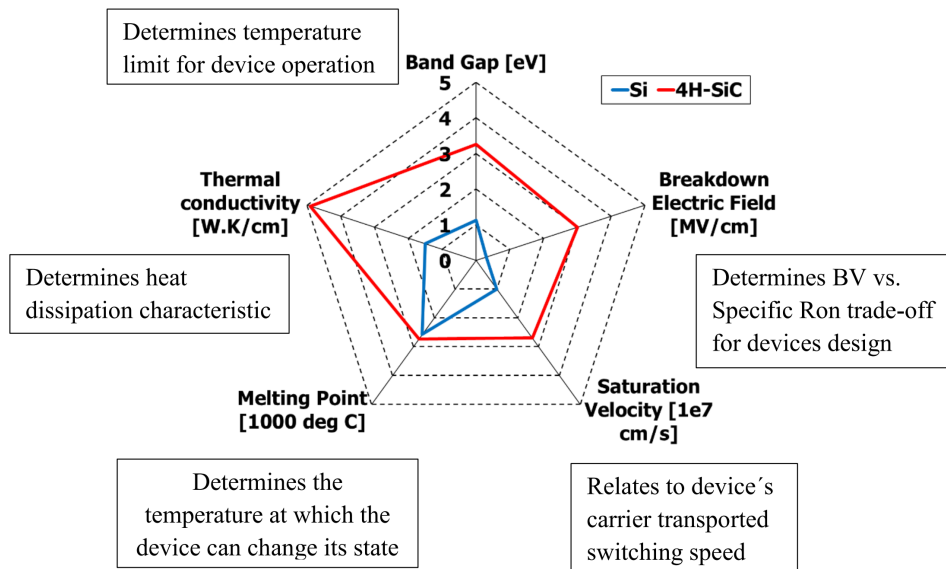
2.4.3 Volba tranzistorů

Pro koncový stupeň se nejčastěji používají výkonové Si, nebo SiC mosfety. Výběr tranzistorů je zásadní pro minimalizaci ztrát a je závislý na výstupním napětí, proudu, pracovní frekvenci a dalších parametrech. Jedním ze zásadních rozdílů jsou generované spínací špičky. Si výkonové mosfety generují špičky s nezanedbatelnou energií, které je potřeba vyfiltrovat pomocnými obvody. Jedna z možností je například využití snubberů. Ty jsou tvořeny RC, nebo RDC prvky a paralelně připojeny k tranzistoru. Příklady zapojení snubberu jsou zobrazeny na obrázku 2.19. Výsledkem jsou vyšší provozní ztráty a tedy nižší účinnost. [10]

Zásadní výhodou SiC tranzistorů je vyšší rychlost přepínání s menšími ztrátami. To má za následek generování špiček na vyšší frekvenci, ale s výrazně nižší energií. To zvyšuje nároky na elektromagnetickou kompatibilitu, ale špičky jdou už na rozdíl od Si tranzistorů jednodušeji vyfiltrovat pomocí výstupních filtrů navržených na vyšší frekvence. Tyto výhody SiC tranzistorů se začínají projevovat na vyšším napětí, přibližně od 600 V. [7] Na obrázku 2.20 jsou porovnány základní parametry Si a SiC tranzistorů.



Obrázek 2.19: Zapojení snubberu pro pohlcení spínacích špiček [10]



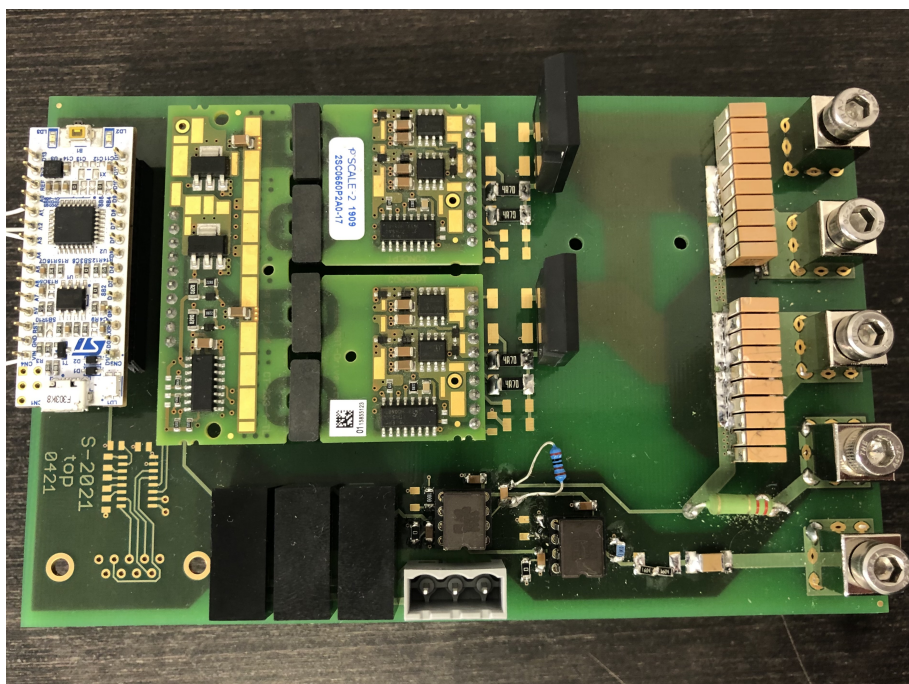
Obrázek 2.20: Srovnání Si a SiC tranzistorů [7]

Kapitola 3

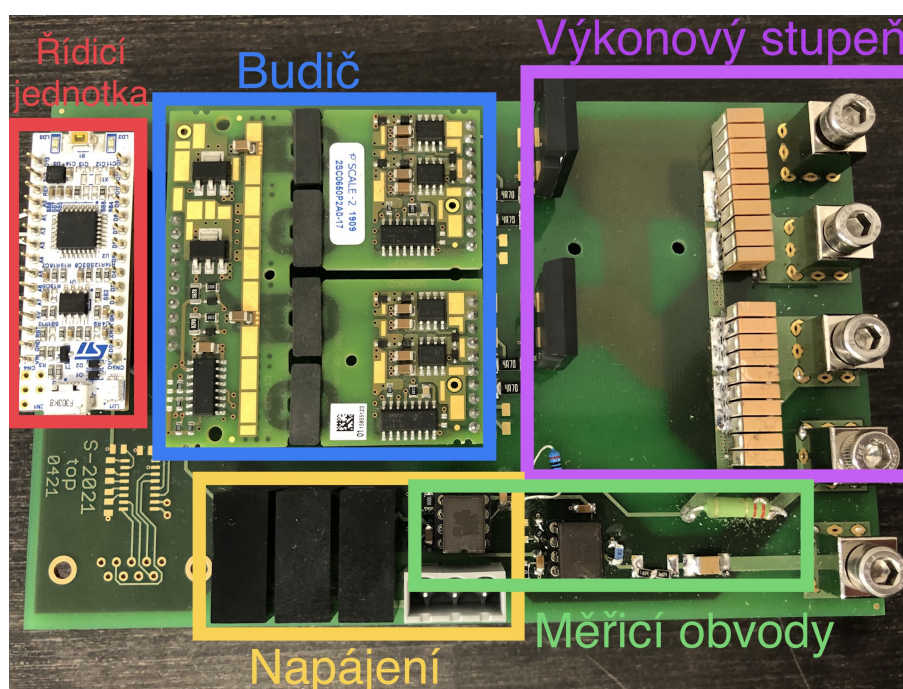
Praktická část

3.1 Zapojení generátoru

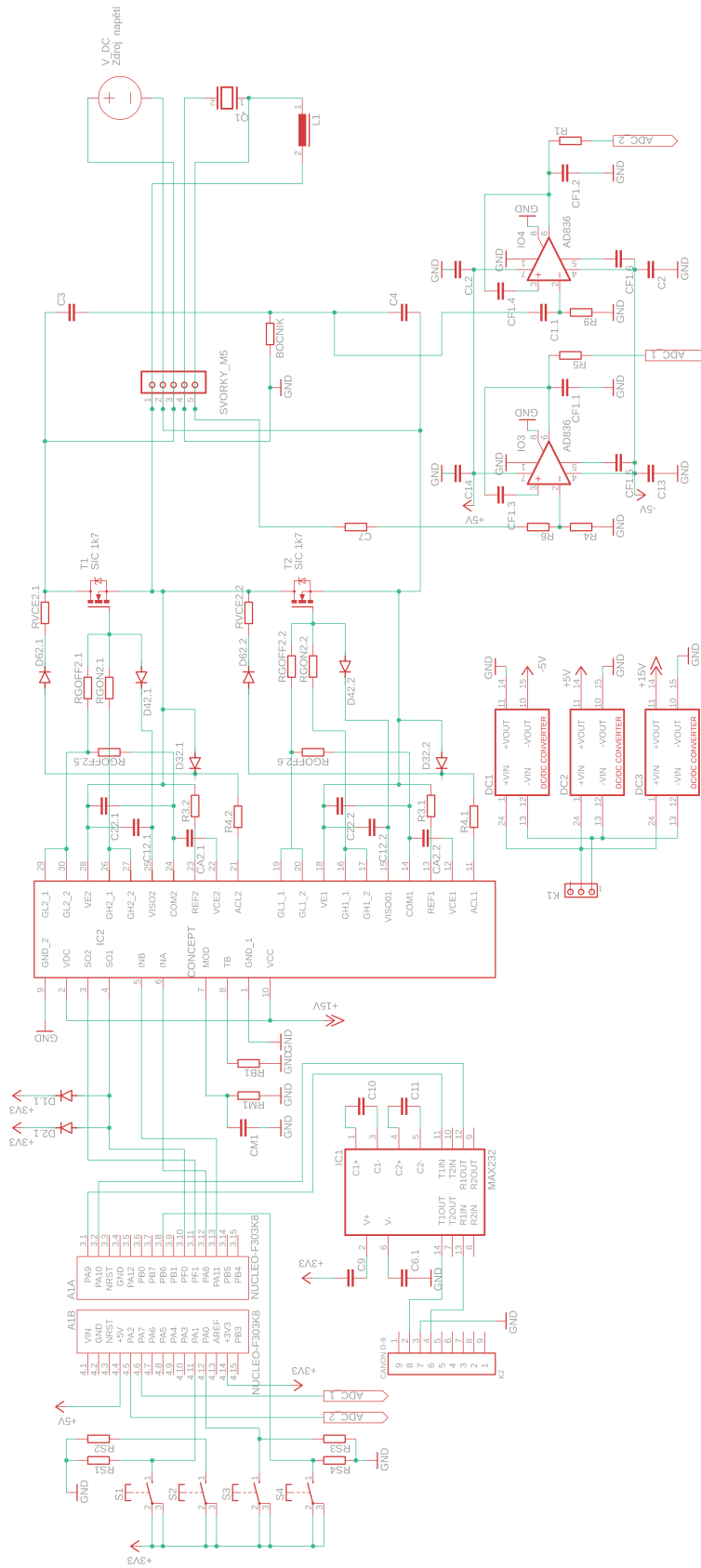
Pro tuto práci byl vybrán dvouúrovňový koncový stupeň zobrazený na obrázku 2.14 s mírně pozměněným zapojením. Mezi svorky výstupního zdroje jsou připojeny dva kondenzátory, jejichž střed je spojen se společnou zemí generátoru. Díky tomu můžeme na výstup spínat kladné a záporné napětí se stejnou amplitudou, která je rovna polovině napětí výstupního zdroje. Generátor se skládá z několika základních bloků. Napájení, řídicí jednotka, budič, výkonový stupeň a měřicí obvody. Je napájen napětím 24 V, které se běžně používá v průmyslu. Toto napětí je dále pomocí tří DC-DC měničů převedeno na 15 V pro napájení budiče a ± 5 V pro řídicí jednotku a převodníky. Generátor je zobrazen na obrázku 3.1 a jeho části zvýrazněny na obrázku 3.2. Na obrázku 3.3 je kompletní schéma zapojení generátoru.



Obrázek 3.1: Generátor



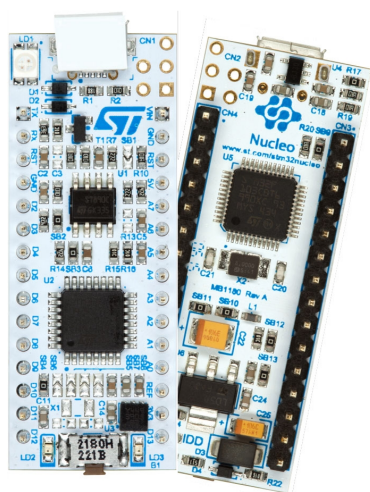
Obrázek 3.2: Hlavní části generátoru



Obrázek 3.3: Schéma zapojení generátoru

3.2 Řídicí jednotka

Pro řízení generátoru byl vybrán mikrokontrolér STM32 Nucleo F303K8, zobrazen na obrázku 3.4. Hlavní využití periférie jsou časovač pro generaci řídicího PWM signálu, vstupní piny s možností vyvolání přerušení pro připojení ovládacích tlačítek, dva AD převodníky pro měření napětí a proudu na zátěži a sériová linka pro komunikaci s počítačem.



Obrázek 3.4: Nucleo F303K8

Frekvence časovače je nastavena na nejvyšší možnou hodnotu 128 MHz, aby bylo co největší rozlišení řídicího PWM signálu. Výstupní frekvence lze vypočítat podle vzorce

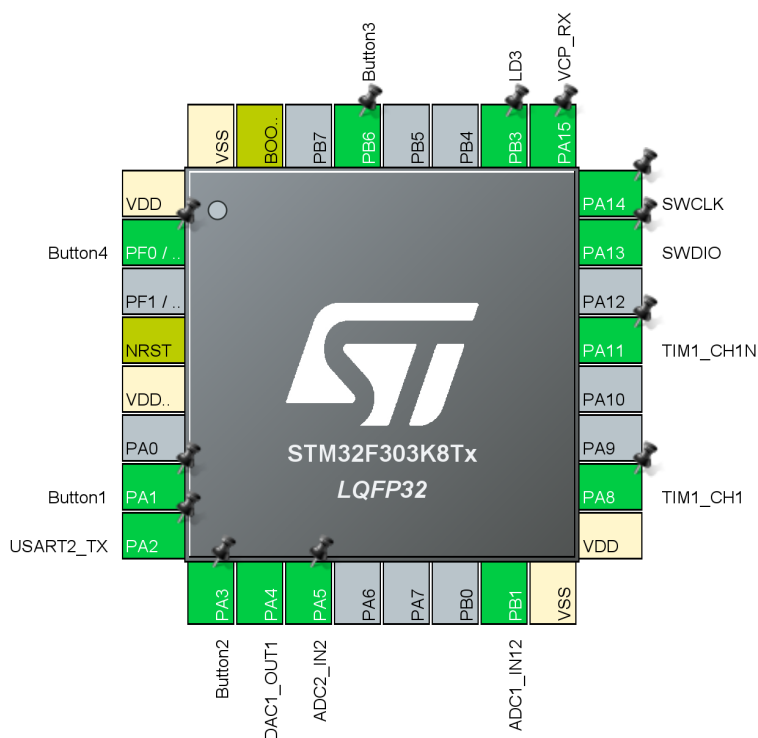
$$f_{PWM} = \frac{f_{CLK}}{(ARR + 1) \cdot (PSC + 1)} \quad (3.1)$$

kde f_{PWM} je frekvence generovaného PWM signálu, f_{CLK} frekvence časovače, ARR hodnota do které se čítá a PSC hodnota předděličky. Střída signálu je u všech frekvencí nastavena na 50 % podle vzorce

$$D_{PWM} = \frac{CCR}{ARR} \quad (3.2)$$

kde CCR je hodnota registru pro nastavení střídy.

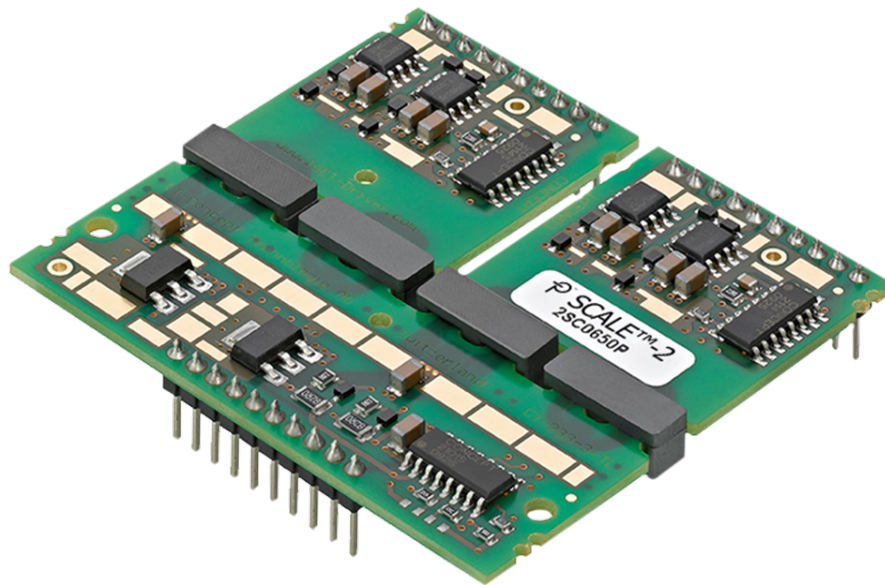
Nastavení výstupů procesoru a tvorba programu proběhli v prostředí STM32 Cube IDE.



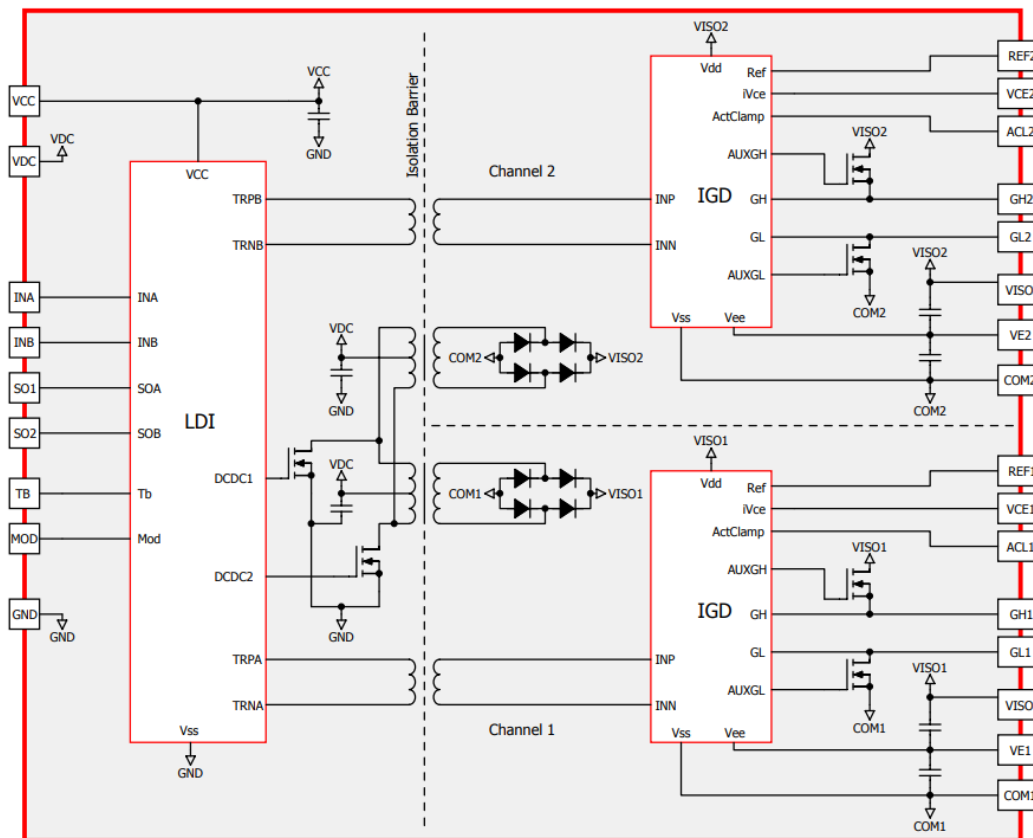
Obrázek 3.5: Zapojení pinů procesoru

3.3 Budič

Jako budič tranzistorů byl vybrán SCALE-2 2SC0650P2A0-17 společnosti Power Integrations [11], který můžeme vidět na obrázku 3.6. Je vhodný pro spínání výkonových IGBT i MOSFET tranzistorů s blokovacím napětím až 1700 V. Je schopný dodat bazové proudy ± 50 A a spínat s frekvencí do 150 kHz. Má dva oddělené výstupy se spínacím napětím +15 V, rozpínacím -10 V a výkonem 6 W. Dále lze využít zabudované ochrany proti zkratu a desaturaci. Externě přidanými součástkami lze nastavovat parametry jako doba sepnutí, doba rozepnutí, čas odpojení při desaturaci, dead time, mód pro IGBT nebo MOSFET, či režim řízení polomůstku. Pro jednodušší návrh jsou v této práci ochrany nezapojené. Na obrázku 3.7 vidíme blokové schéma zapojení budiče.



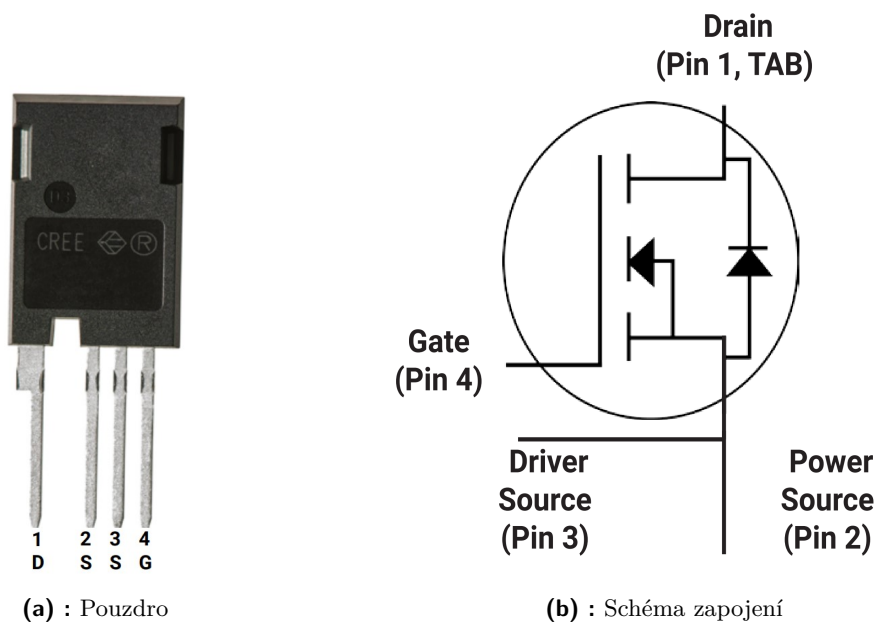
Obrázek 3.6: Budič SCALE-2 2SC0650P2A0-17 [11]



Obrázek 3.7: Blokové schéma budiče

3.4 Použité tranzistory

Pro zapojení koncového stupně byly použity výkonové tranzistory typu SiC MOSFET C2M0045170P společnosti CREE. Jsou vhodné pro napětí až 1700 V s maximálním proudem 72 A a odporem v sepnutém stavu 45 m Ω . Vyznačují se nízkou kapacitou, díky čemuž mohou spínat na vysokých frekvencích. Dále mají oddělenou budicí a výkonovou část, konkrétně piny 1, 2 od pinů 3, 4. To lze vidět i na obrázku 3.8. Toto je velký přínos oproti tří pinovým pouzdrům, protože eliminuje vliv indukčnosti přívodů na spínací obvod. Tento model byl vybrán pro jeho vysokou odolnost, rychlost spínání a nízké ztráty.



Obrázek 3.8: SiC MOSFET C2M0045170P

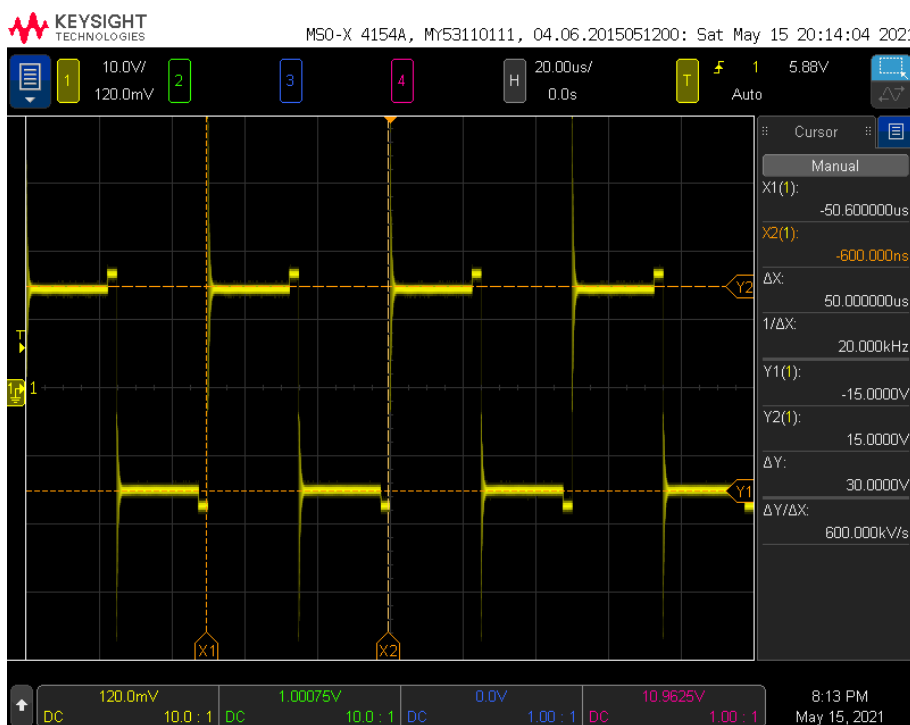
3.5 Měření veličin

Generátor je schopný za chodu měřit napětí a proud zátěže. Napětí je měřeno tak, že je přivedeno přes odporový dělič na vstup převodníku AD736, který ho převádí na efektivní hodnotu. Ta je dále přivedena na AD převodník mikrokontroléru a vyhodnocena. Díky převodu na efektivní hodnotu jsou vyfiltrovány nežádoucí spínací špičky a napětí je možné dobře změřit. Vzorování signálu bez převodu na efektivní hodnotu by nebylo možné, protože by docházelo k velkým chybám při odebrání vzorku na místě špičky. Proud je měřen stejným způsobem na bočníku s pomocí druhého AD převodníku.

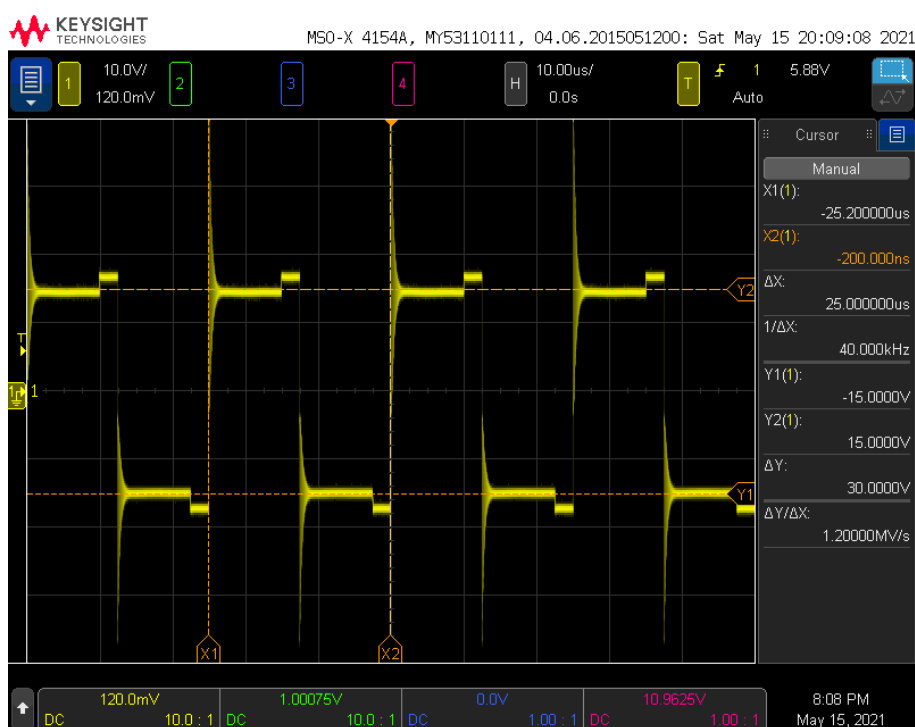
Změřené veličiny jsou dále spolu s aktuální frekvencí poslány přes sériovou linku do počítače, kde je z nich možné sestavit graf a vykreslit frekvenční charakteristiku měniče, na které lze vidět rezonanční frekvence.

3.6 Výstupní průběhy

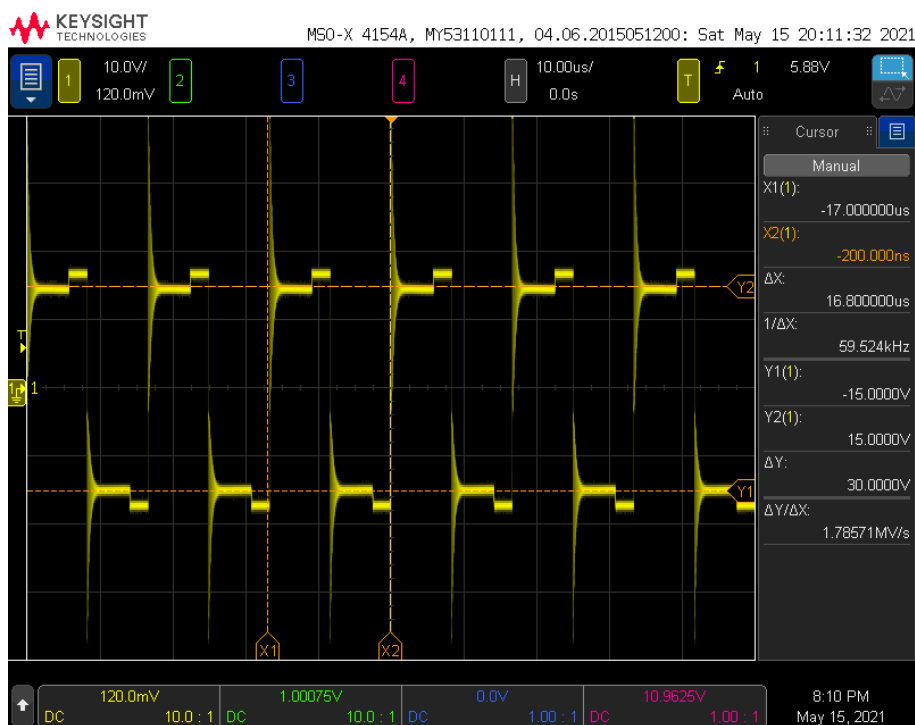
Na obrázcích 3.9, 3.10 a 3.11 jsou vidět výstupní průběhy napětí koncového stupně měřené na prázdko. Všechna měření proběhla při výstupním napětí 30 V. Na průbězích je vidět, že generátor zvládá bez potíží generovat signály o širokém rozpětí frekvencí. Průběhy byly měřeny bez výstupní tlumivky, takže jsou na nich vidět výrazné spínací špičky. Ty jsou po připojení tlumivky a zátěže potlačeny.



Obrázek 3.9: Výstupní průběh na prázdko na frekvenci 20 kHz



Obrázek 3.10: Výstupní průběh na prázdko na frekvenci 40 kHz



Obrázek 3.11: Výstupní průběh na prázdko na frekvenci 60 kHz

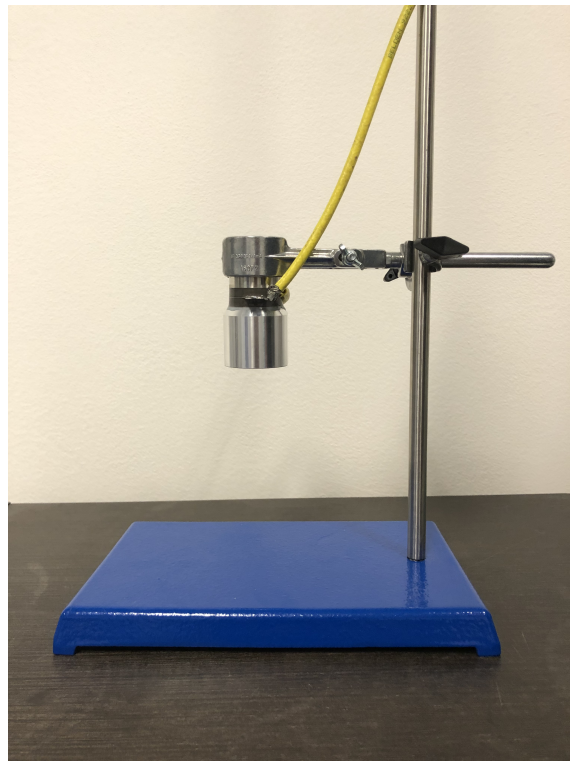
3.7 Použité piezoelektrické měniče

Pro testování generátoru byly použity tři sondy zobrazené na obrázcích 3.13, 3.15 a 3.17. U všech byla změřena jejich kapacita a pomocí analyzátoru Bode 100 firmy Omicron Lab, zobrazeného na obrázku 3.12, také frekvenční charakteristika.

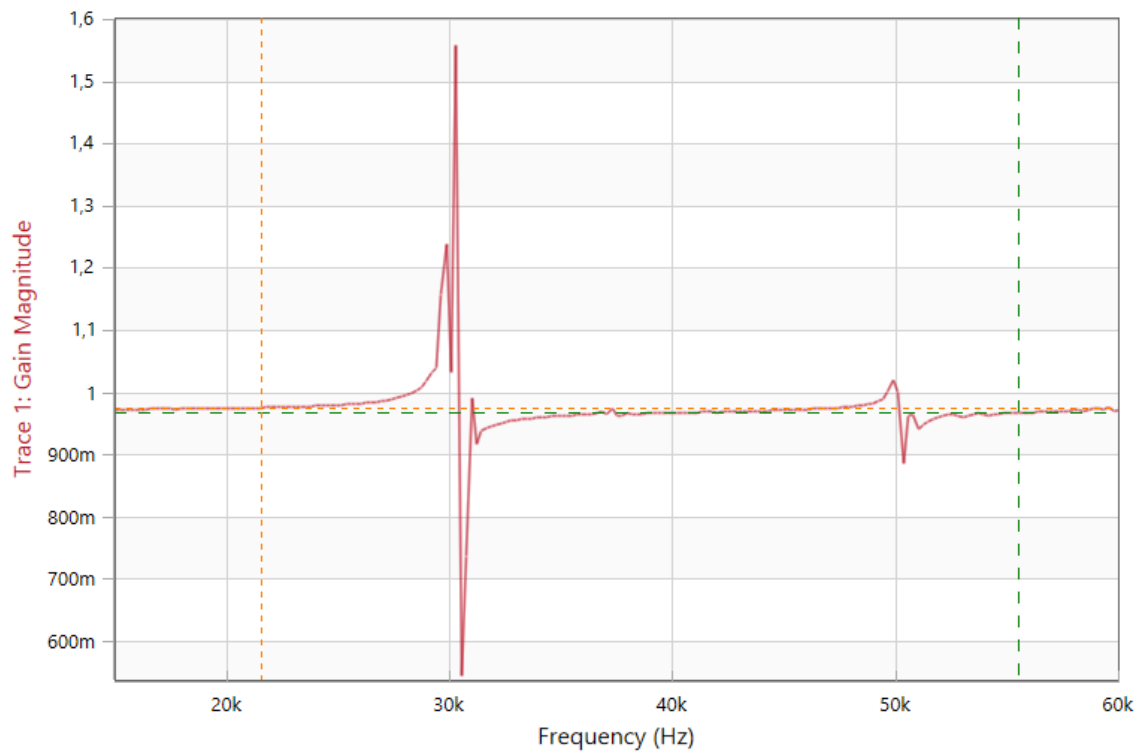


Obrázek 3.12: Analyzátor Bode 100

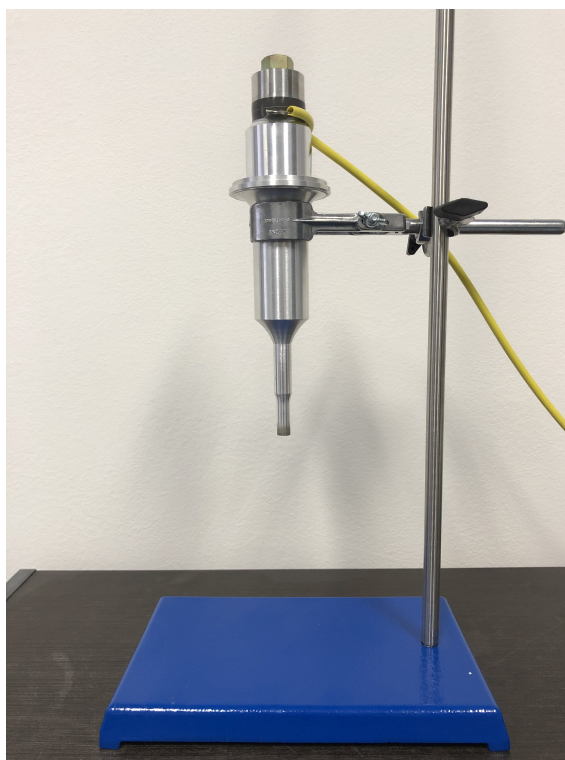
Sondu 1 a 2 tvoří identické měniče určené pro ultrazvukové myčky. [12] Kapacita těchto měničů je 4 nF. Sonda 2 se liší tím, že je k ní připevněna mechanická soustava pro koncentraci mechanických kmitů. Využití má například v sonochemii.



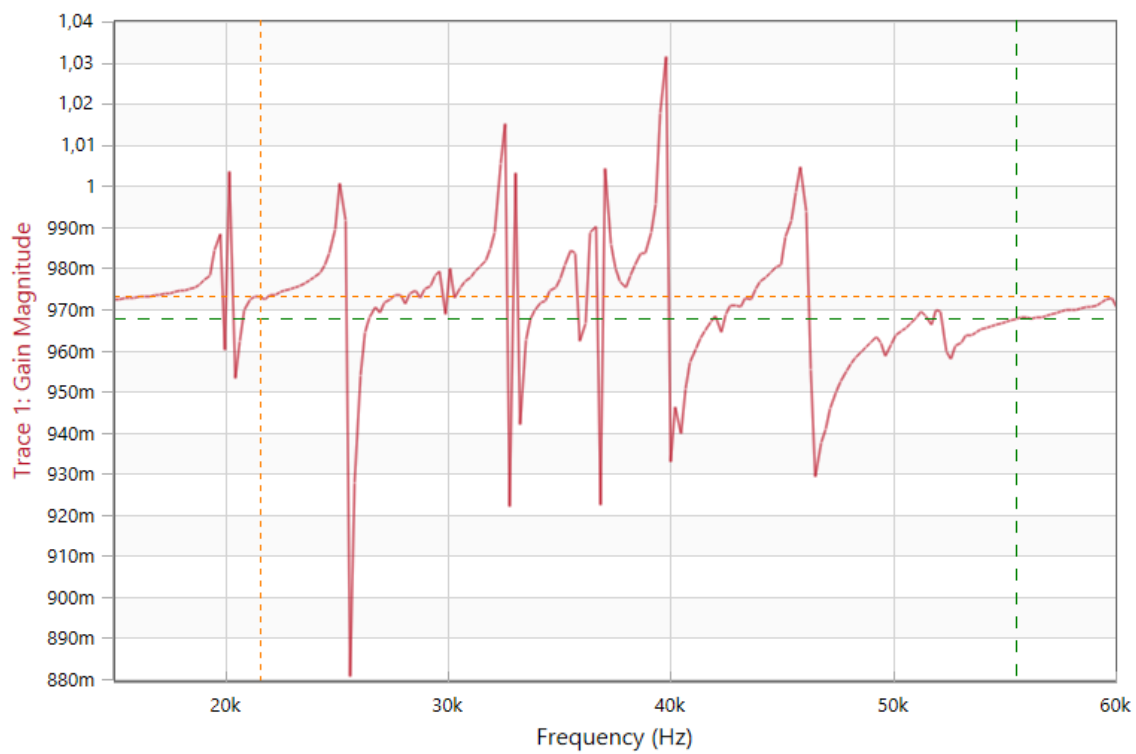
Obrázek 3.13: Sonda 1



Obrázek 3.14: Frekvenční charakteristika sondy 1



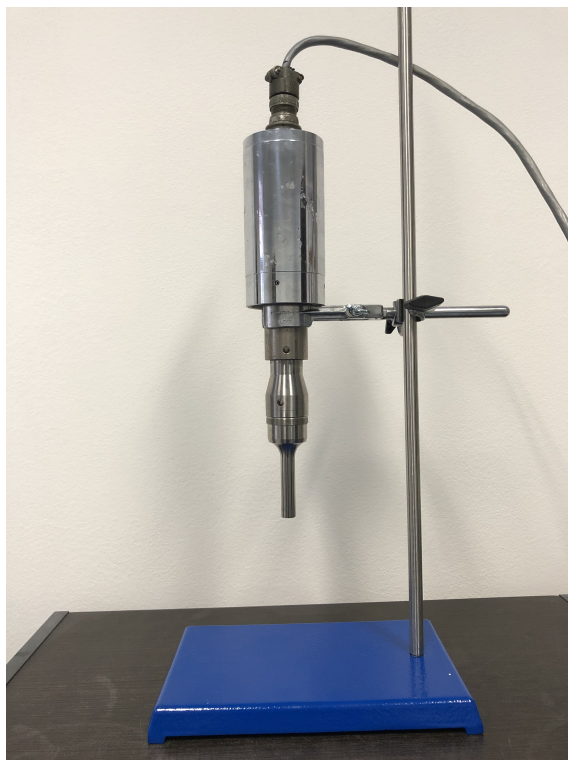
Obrázek 3.15: Sonda 2



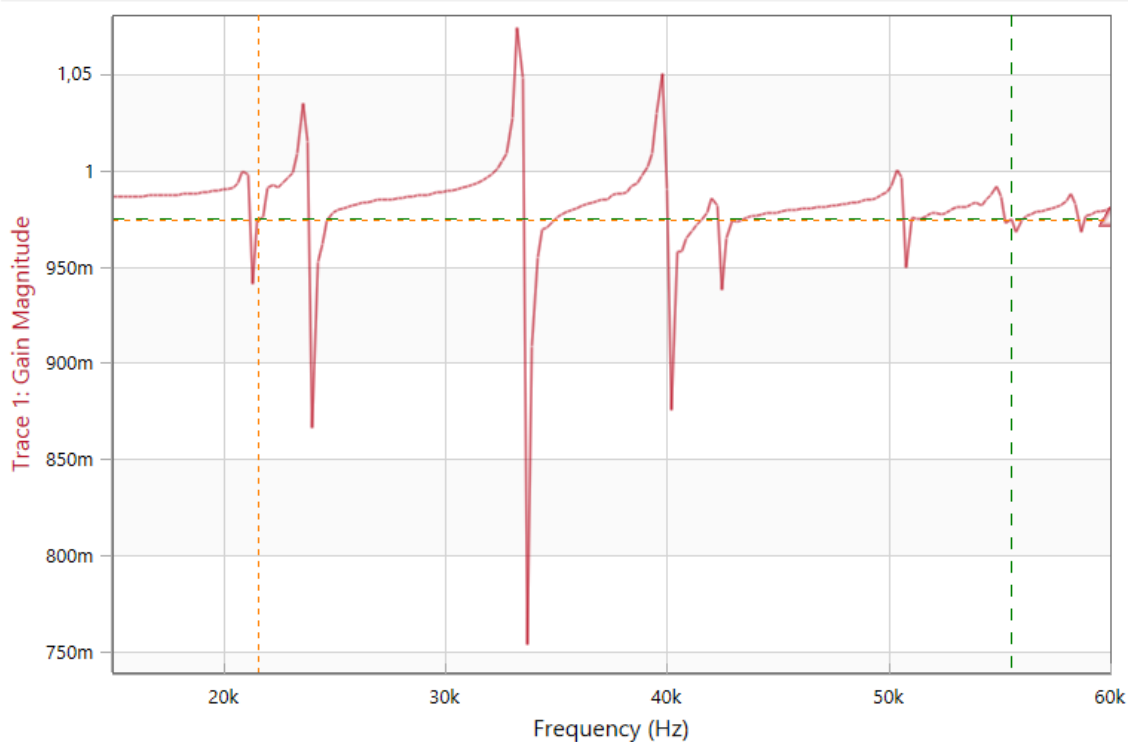
Obrázek 3.16: Frekvenční charakteristika sondy 2

Na frekvenčních charakteristikách je vidět, že připojením mechanické soustavy ji silně ovlivníme. Vzniknou nové rezonanční frekvence dané rozměry soustavy a sníží se jejich amplitudy.

Sondu 3 představuje měnič od firmy Branson Ultrasonics s mechanickým nástavcem, která je vhodná například pro svařování. Kapacita měniče je 8 nF.



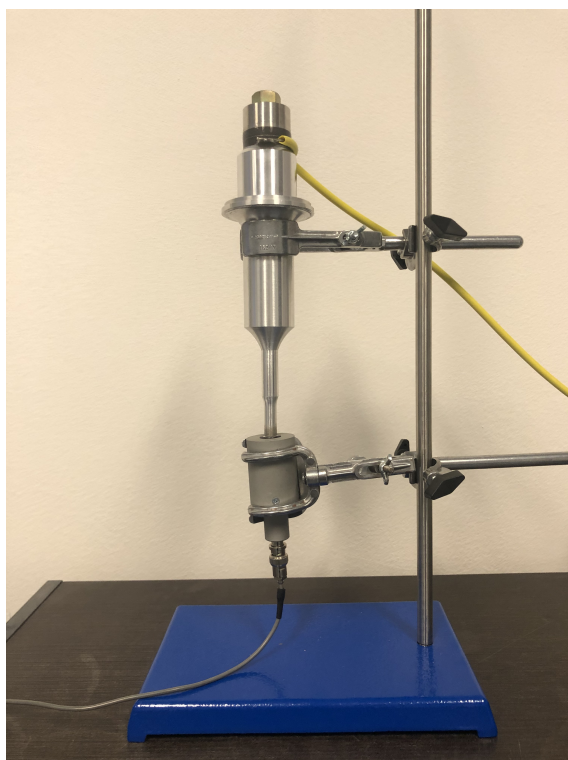
Obrázek 3.17: Sonda 3



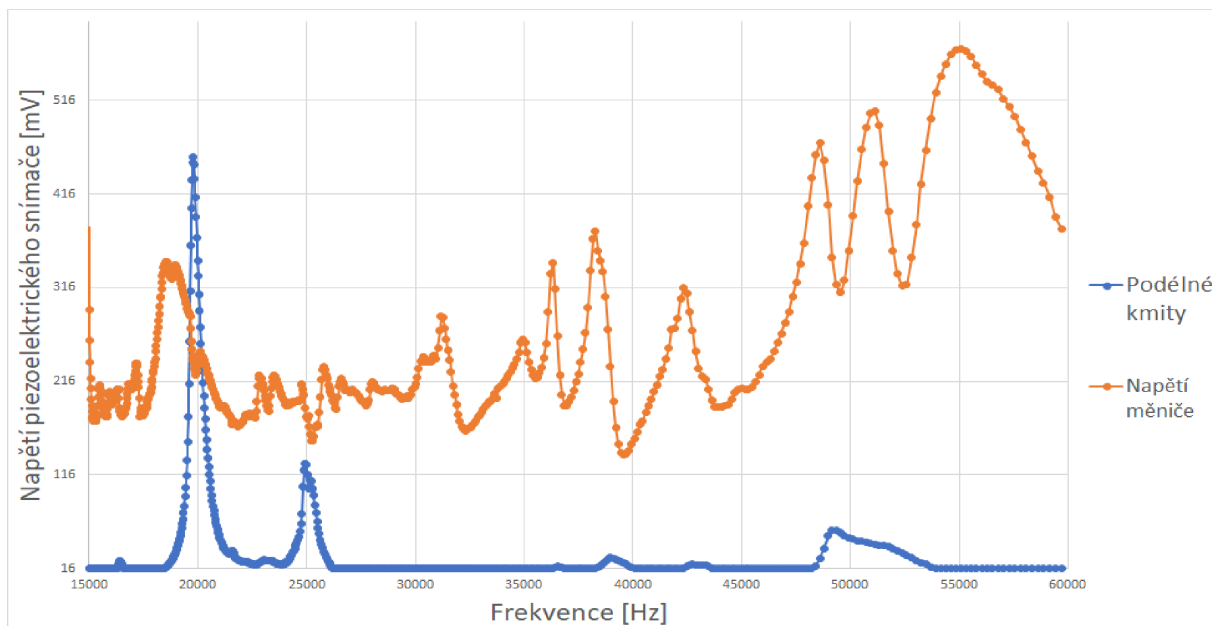
Obrázek 3.18: Frekvenční charakteristika sondy 3

3.8 Pracovní frekvence měniče

Většina aplikací vyžaduje využití podélných kmitů sond. Z frekvenčních charakteristik měničů ale nelze poznat, jaký typ kmitů je dominantní pro danou rezonanční frekvenci. Proto bylo provedeno měření sestaveným generátorem pro sondy 2 a 3 s použitím piezoelektrického snímače, který převádí mechanické kmity na elektrický signál. Ten byl upevněn tak, aby snímal podélné mechanické kmity měničů. Signál generovaný snímačem byl přiveden do převodníku AD736 generátoru a změřen mikrokontrolérem. Měření proběhlo při proladování frekvence v rozmezí 15 až 60 kHz s napětím zdroje 30 V. Sestava měření a výsledné průběhy jsou zobrazeny na obrázcích 3.19, 3.20, 3.21 a 3.22.



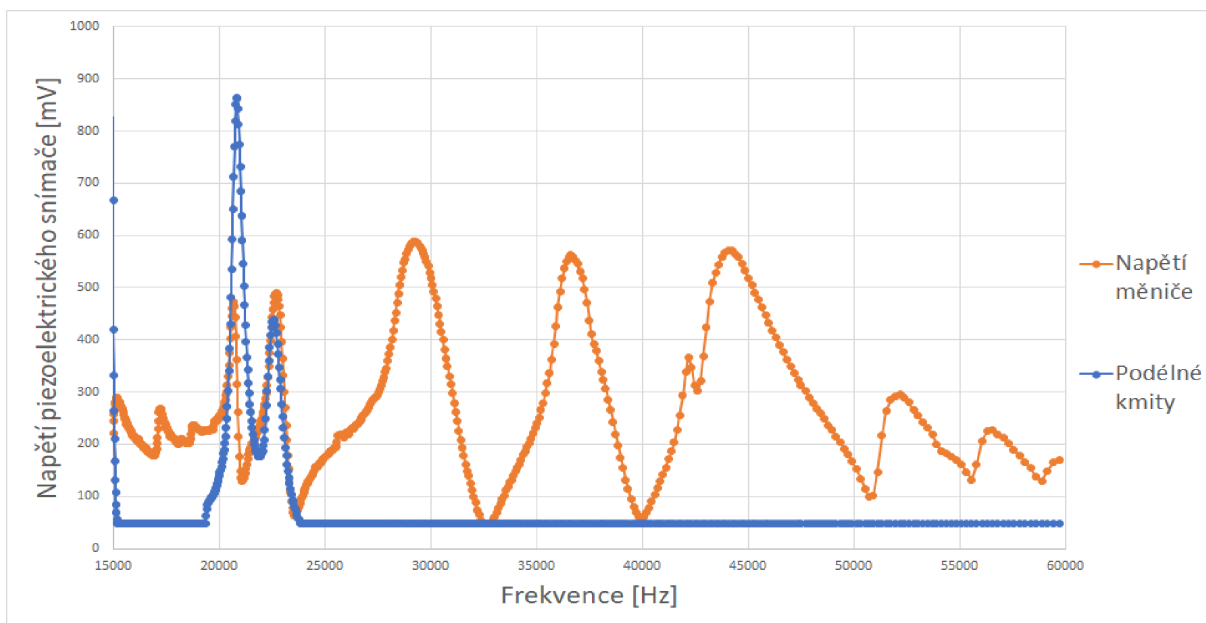
Obrázek 3.19: Měření podélných kmitů sondy 2



Obrázek 3.20: Závislost napětí a podélných kmitů sondy 2 na frekvenci



Obrázek 3.21: Měření podélných kmitů sondy 3



Obrázek 3.22: Závislost napětí a podélných kmitů sondy 3 na frekvenci

Z průběhů je patrné, že podélné kmity jsou dominantní na rezonanční frekvenci s nejnižším kmitočtem. To je 19,8 kHz pro sondu 2 a 20,7 kHz pro sondu 3. Tyto frekvence budou dále voleny jako pracovní.

3.9 Přizpůsobení zátěže

Pro optimální práci generátoru s různými měniči je třeba ho přizpůsobit. Kvůli možnosti použití různých měničů je nutné přizpůsobení pro široké pásmo pracovních kmitočtů. V případě využití sondy 2 a 3 v rozmezí přibližně 15 až 30 kHz. To bylo provedeno pomocí připojení tlumivky s indukčností 1,8 mH na výstup generátoru do série s měničem. Tlumivka a měnič spolu tvoří LC člen a je nutné, aby jeho rezonanční frekvence byla mimo pracovní rozsah frekvencí měničů, protože by je ovlivňovala. V případě využití generátoru pouze pro jeden daný měnič by bylo výhodné naladit rezonanční frekvenci LC členu na pracovní kmitočet měniče. Rezonanční frekvenci je možné vypočítat pomocí Thompsonova vztahu:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.3)$$

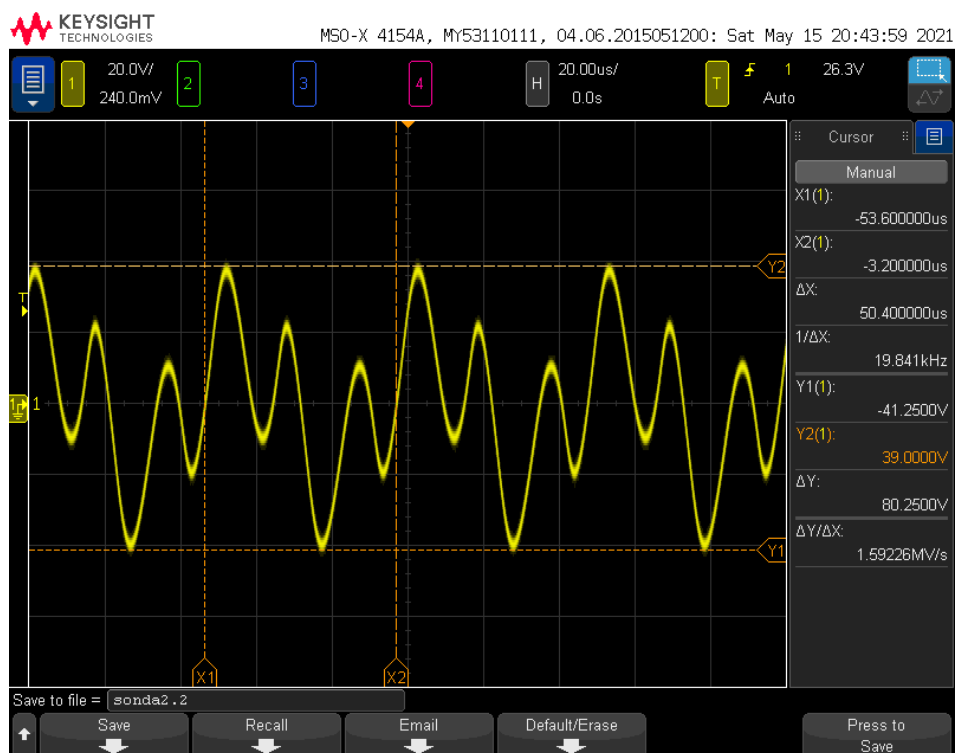
$$f_{rs2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-9}}} = 59,314 \text{ kHz} \quad (3.4)$$

$$f_{rs3} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}} = 41,941 \text{ kHz} \quad (3.5)$$

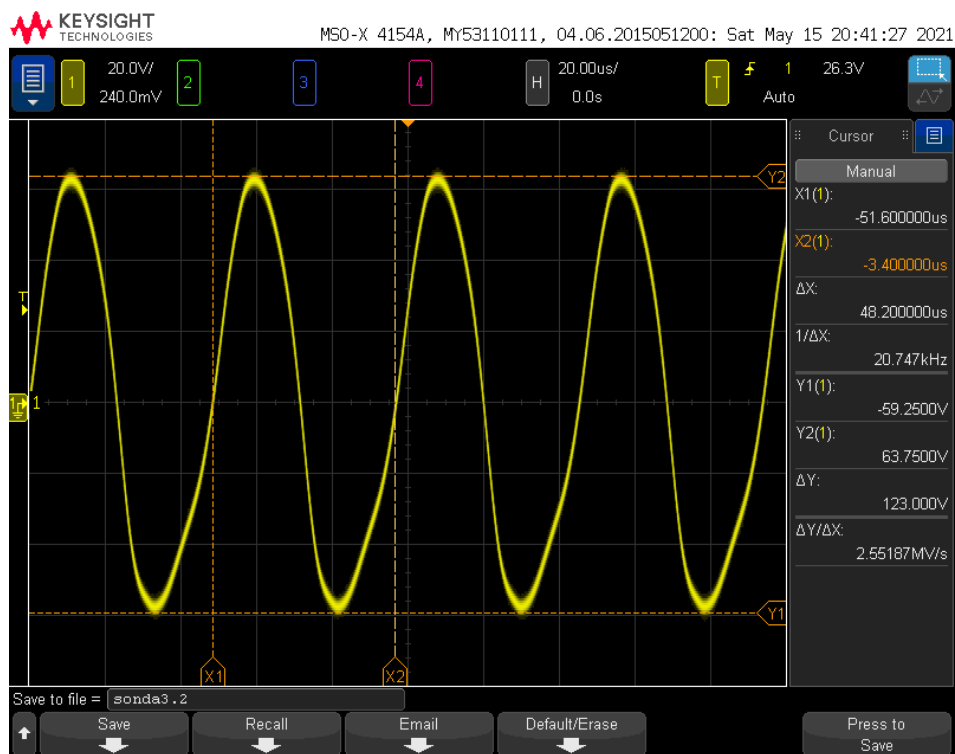
Z výsledků je vidět, že pro oba použité měniče je rezonance LC členu nad pracovním kmitočtem, a tudíž nebude tlumivkou tolik ovlivněn. Pokud by byl použit měnič s frekvencí blízké rezonanci LC členu, bylo by potřeba upravit hodnotu tlumivky, aby se rezonanční frekvence posunula mimo rezonanci měniče.

Pro obě sondy byly zobrazeny průběhy napětí na pracovních frekvencích, které lze vidět na obrázcích 3.23 a 3.24.

3. Praktická část



Obrázek 3.23: Průběh napětí na pracovní frekvenci sondy 2



Obrázek 3.24: Průběh napětí na pracovní frekvenci sondy 3

3.10 Měření při různých typech zátěže

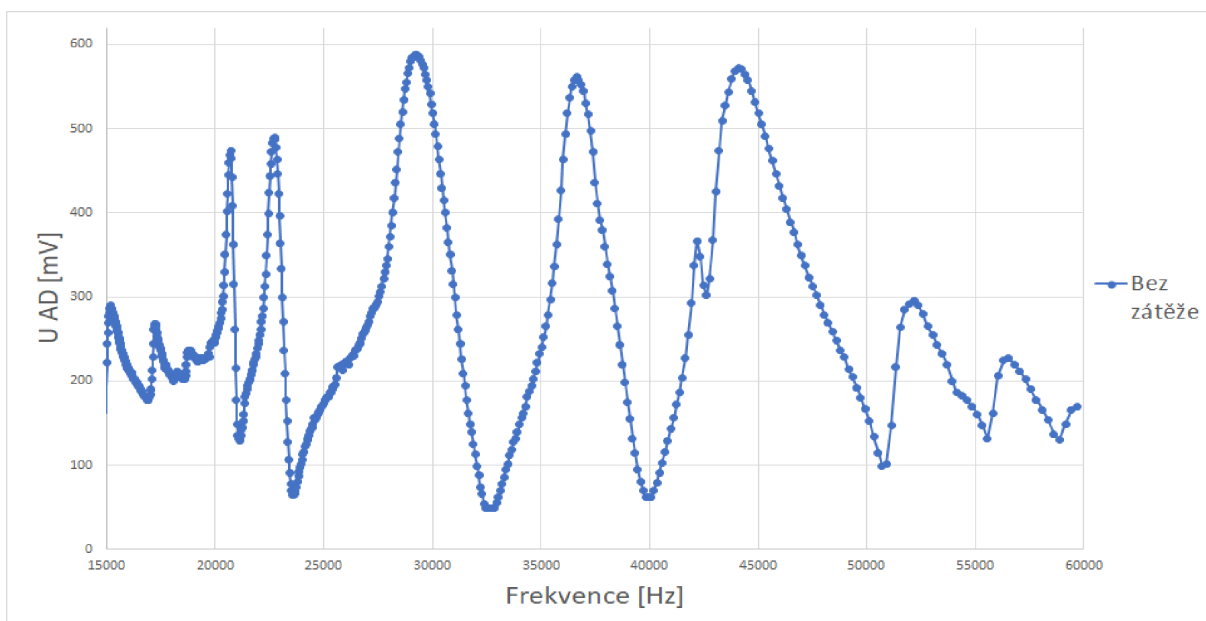
Sonda 3 byla použita pro měření frekvenčních charakteristik pomocí generátoru při různých typech zátěže. Provedena byla následující měření, která simulují možné stavy při provozu v průmyslu. Všechna měření proběhla za stejných podmínek s napájecím napětím 30 V.

- 1) Bez zátěže
- 2) Hrot ponořený ve vodě
- 3) Hrot ponořený v ultrazvukovém gelu
- 4) Hrot přitlačen na 1 mm tlustý hliníkový plech
- 5) Hrot přitlačen na 35 mm tlustý hliníkový kvádr

1) Při měření bez zátěže byla sonda proměřena v držáku ve vzduchu. Tato charakteristika je použita jako referenční pro posouzení změn v dalších bodech.

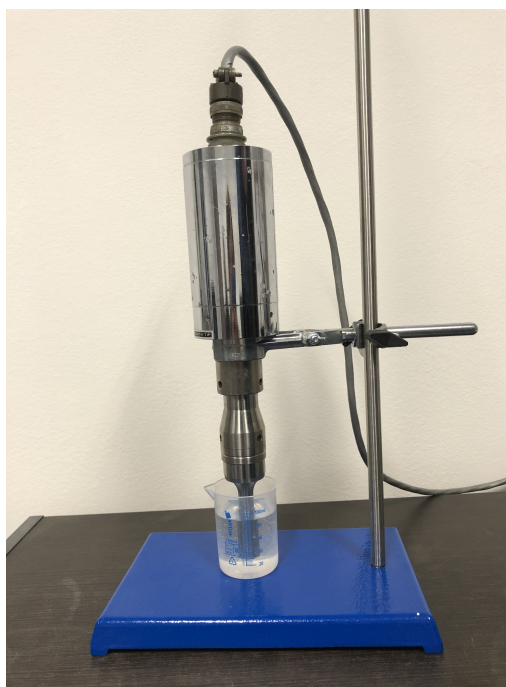


Obrázek 3.25: Sonda 3 uchycená ve vzduchu

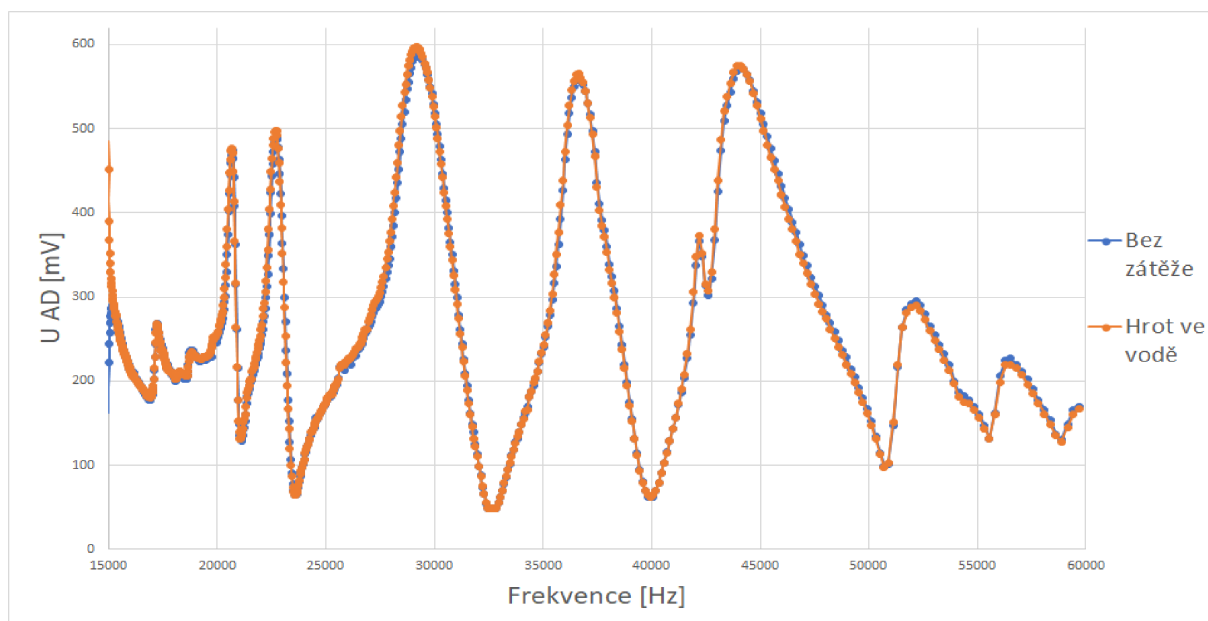


Obrázek 3.26: Frekvenční charakteristika sondy 3 ve vzduchu

2) V tomto případě byl hrot ponořen do vody. V grafu je vidět, že se charakteristika prakticky nezměnila. To je ověření toho, že například pro ultrazvukové myčky není problém používat generátory s pevně nastavenou frekvencí, protože nepotřebují hlídat pracovní frekvenci či amplitudu.

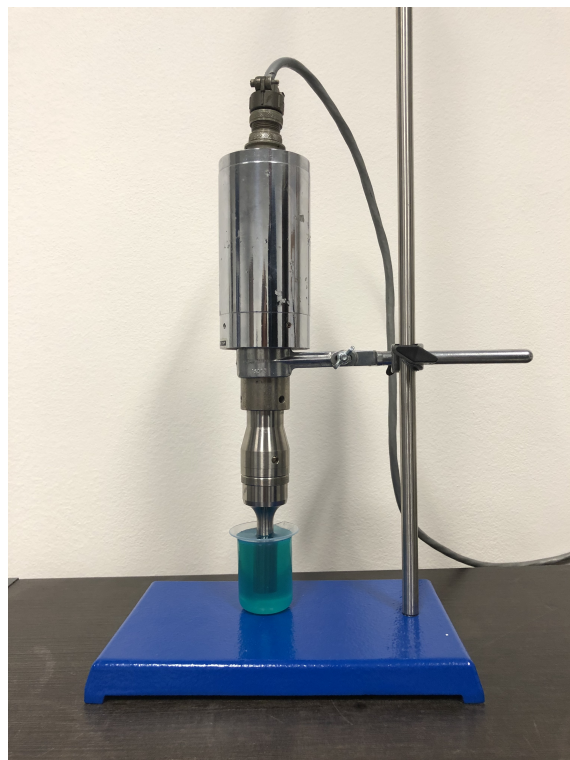


Obrázek 3.27: Sonda 3 s hrotem ve vodě

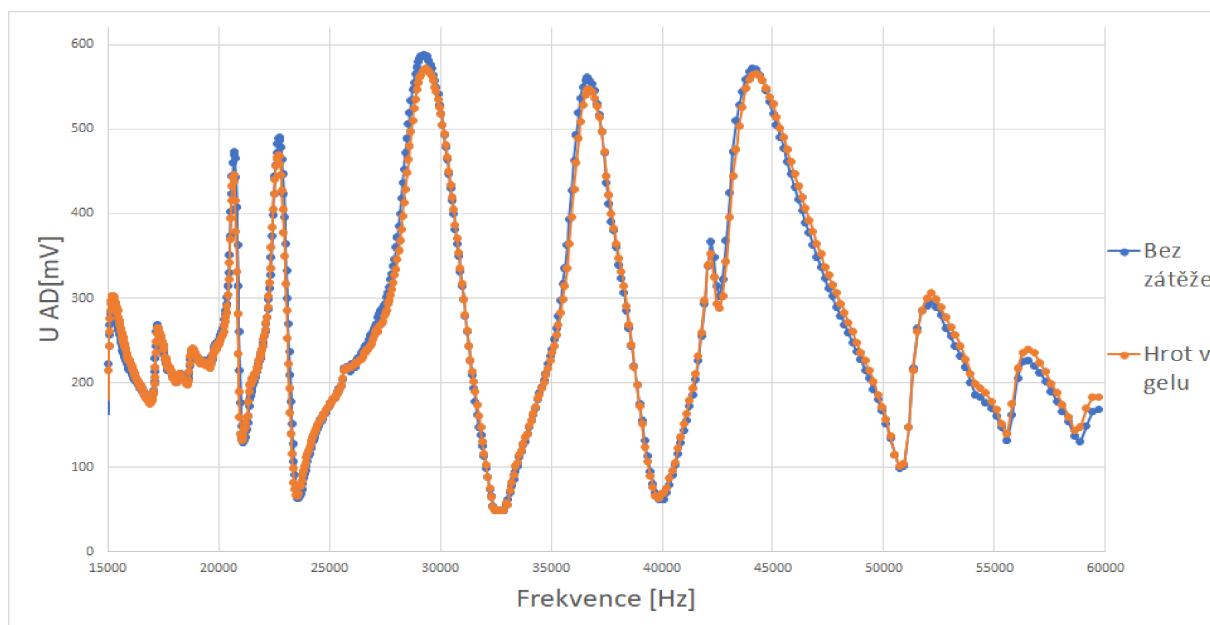


Obrázek 3.28: Frekvenční charakteristika sondy 3 ve vodě

3) Při měření v hustém gelu je vidět, že už má nějaký vliv na amplitudu. Oproti vodě více utlumuje průběh. Na pracovní frekvenci ale nemá žádný vliv.

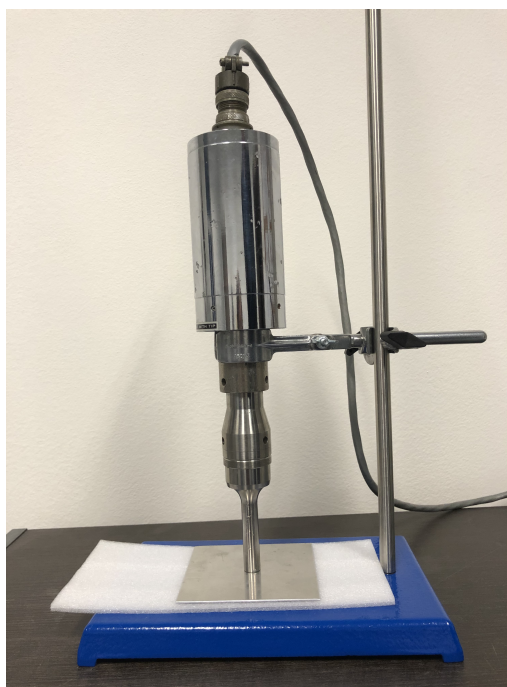


Obrázek 3.29: Sonda 3 v ultrazvukovém gelu

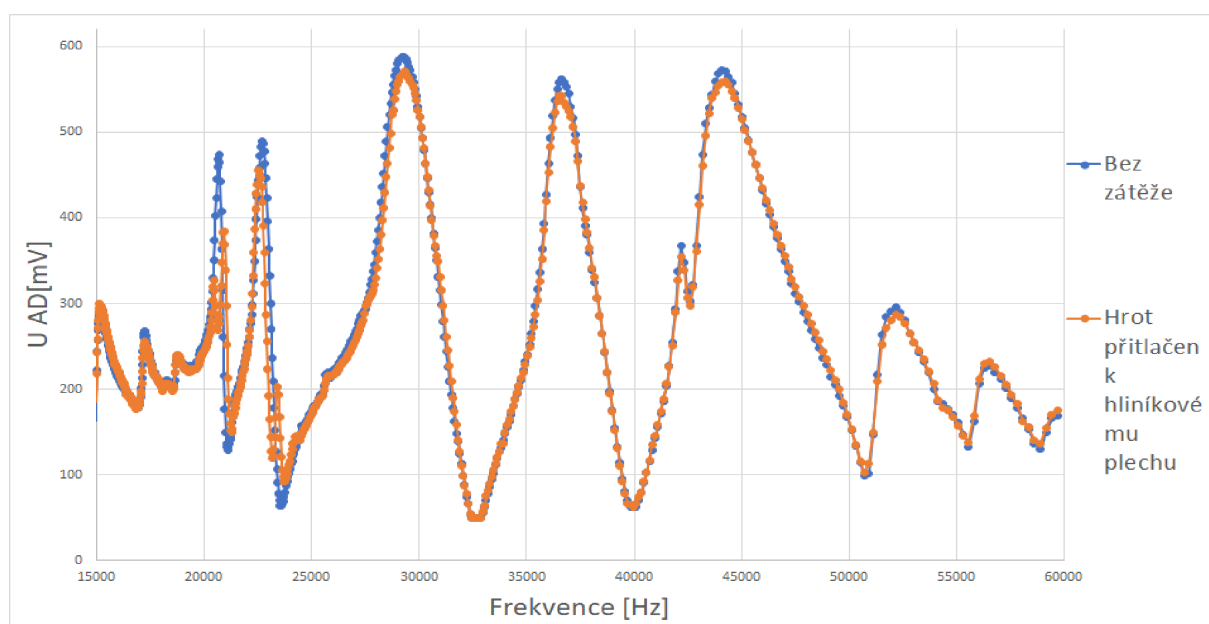


Obrázek 3.30: Frekvenční charakteristika sondy 3 v gelu

4) Po přitlačení hrotu k 1 mm tlustému plechu je v průběhu patrný drobný posun pracovní frekvence, který je stále dobře měřitelný, přibližně o Hz. Dále je vidět výrazný útlum na pracovní frekvenci cca 20 %. Toto měření může simulovat sváření tenkých plechů, ke kterému se ultrazvukové svářečky využívají.



Obrázek 3.31: Sonda 3 přitlačená na 1 mm tlustý hliníkový plech

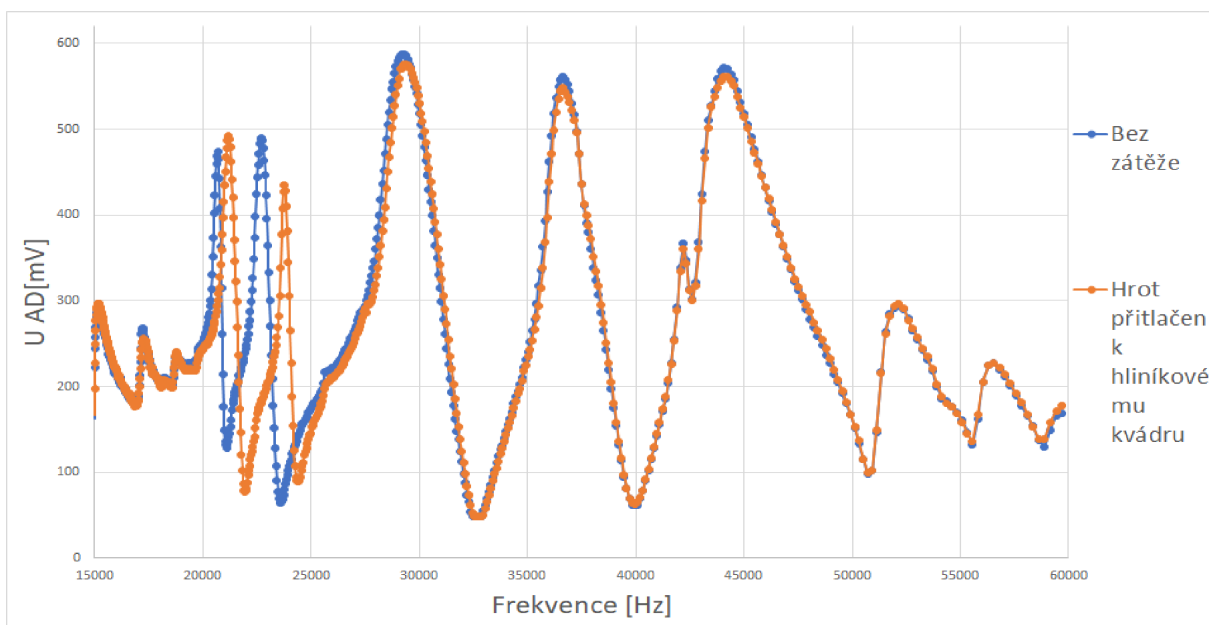


Obrázek 3.32: Frekvenční charakteristika sondy 3 na hliníkovém plechu

5) Po výměně tenkého plechu za 35 mm tlustý hliníkový blok je již vidět výrazný posun pracovní frekvence. Konkrétně u první rezonance přibližně o 580 Hz. To může mít za následek snížení výkonu, případně až znemožnění funkce přístroje.



Obrázek 3.33: Sonda 3 přitlačená na 35 mm tlustý hliník



Obrázek 3.34: Frekvenční charakteristika sondy 3 na hliníkovém kvádru

Kapitola 4

Závěr

V této práci byly popsány základní principy funkce ultrazvukových měničů a generátorů. V první části byl popsán piezoelektrický jev, na kterém fungují piezoelektrické ultrazvukové měniče, a jaký na ně mají vliv parametry použité keramiky. Dále byly popsány ultrazvukové generátory, části z nichž jsou složeny a jejich využití v průmyslu. Funkce byla popsána pomocí schémat dvou a tříúrovňového výkonového stupně. Druhá část práce ukazuje návrh dvouúrovňového generátoru s možností automatické identifikace zátěže a nastavením pracovní frekvence v rozmezí 15 až 60 kHz. Při použití měniče s pracovní frekvencí nad 40 kHz je zapotřebí vyměnit tlumivku na výstupu, která byla navržena pro konkrétní použité měniče. Díky provedeným měřením bylo ukázáno, že pracovní frekvence s dominantními podélnými mechanickými kmity se nachází na nejnižší rezonanční frekvenci měniče. Provedená měření simulující využití v praxi znázornila, jaké mohou nastávat komplikace a v jakých případech je potřeba využití generátorů s možností úpravy parametrů za chodu. Sestavený generátor má velmi široké možnosti uplatnění. Je schopný se přizpůsobit různým měničům o různých pracovních frekvencích, nebo také konkrétnímu připojenému měniči v pracovní zátěži, díky schopnosti identifikace za chodu. Další výhodou je schopnost zobrazit frekvenční charakteristiky a při její případné změně detekovat možnou elektrickou či mechanickou vadu měniče. To je možné pomocí vyhodnocení změn ve frekvenčních charakteristikách. Aplikované měření napětí a proudu také umožňuje sledovat výkon měniče za chodu.

Sestavený generátor bude i nadále vylepšován. V plánu je přidání COM portu pro připojení k počítači s vyšší odolností proti zarušení. Dále je v plánu vytvoření aplikace pro jednoduché ovládání funkcí generátoru. Bude v ní možné spouštět diagnostická měření, měnit módy buzení, či sledovat aktuální

napětí, proud a výkon měniče, nebo je také libovolně nastavit. Následovat bude přestavba výkonového stupně na tříúrovňový pro dosažení vyšší účinnosti a kontroly nad výstupním signálem. Pro větší bezpečnost budou zapojeny ochrany budiče a jejich chybové výstupy ošetřeny v programu.

Příloha A

Literatura

- [1] CERAM TEC. *Základy piezokeramické technologie [online]*. Germany, [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezoceramics/basics/>
- [2] ANDRADE, Marco Aurélio B. *Analysis of 1-3 piezocomposite and homogeneous piezoelectric rings for power ultrasonic transducers [online]*. Brazil 2009, [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782009000400005
- [3] CERAM TEC. *Advanced Ceramics in Piezo Applications [online]*. Germany, [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/downloads/tag/piezo/>
- [4] ACESIO. *Ultrasound [online]*. Praha [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://ultrasound.cz>
- [5] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Využití ultrazvuku při svařování plastů [online]*. Praha c2001-2021, 12. 06. 2002 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-ultrazvuku-pri-svarovani-plastu>
- [6] Zhejiang Zhenbo Precision Machinery. *15K 4000W Ultrasonic Welder [online]*. China, [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.ibortech.com/products/show/id/443.shtml>

- [7] MORDI, Kenneth. *Comparative Study of Power Semiconductor Devices in a Multilevel Cascaded H-Bridge Inverter*. Theses and Dissertations. Dostupné z: <https://scholarworks.uark.edu/etd/3118/>
- [8] LEGA, Alberto. *Multilevel Converters: Dual Two-Level Inverter Scheme*. Bologna, 2007. Ph.D. thesis. University of Bologna. Vedoucí práce Prof. Domenico Casadei.
- [9] SHAIK MD, Moin. *Multilevel Inverter(3-level) topologies(Diode and capacitor clamped) and controlscheme [online]*. Dostupné z: https://www.academia.edu/6742849/Multilevel_Inverter_3_level_topologies_Diode_and_capacitor_clamped_and_controlscheme_spwm_
- [10] GRZESIAK, Lech M. *Experimental study of snubber circuit design for SiC power MOSFET devices [online]* Warsaw, [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-346eb24c-dc33-4549-b8e8-ca06369afe2e?q=85eba224-355c-4315-90e5-b553db1a3541&qt=IN_PAGE
- [11] POWER INTEGRATIONS. *Power Integrations [online]*. California [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.power.com/products/scale-2-driver-cores/2sc0650p>
- [12] Small Ultrasonic Transducer. *Jiayuanda Technology [online]*. China [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.jydultrasonic.com/ultrasonic-transducer/ultrasonic-cleaning-transducer/small-ultrasonic-transducer.html>