



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

Disertační práce

**K získání akademického titulu doktor v oboru
Elektronika**

Ing. Pavel Valenta

Možnosti využití piezoelektrických transformátorů

Školitel: Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem prameny, které cituji a uvádím v seznamu literatury. V předložené vědecké práci jsou použity obvyklé vědecké postupy.

V Plzni dne 4.8.2021

.....
Ing. Pavel Valenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Doc. Ing. Jiřímu Hammerbauerovi, Ph.D. za vedení a rady při zpracování této práce. Poděkování patří rovněž Ing. Václavu Kouckému, CSc.

V neposlední řadě bych velmi rád poděkoval mé rodině, která mě podporovala během celé doby mého studia.

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá možnostmi využití piezoelektrických transformátorů. Piezoelektrické transformátory přenášejí výkon pomocí mechanických vibrací. Přesto, že je princip piezoelektrických transformátorů znám již dlouhou dobu, je jejich použití velmi málo rozšířeno. Masivnější použití piezoelektrických transformátorů nastalo pouze v případě měničů pro napájení CCFL výbojek.

Tato práce se zaměřuje na ucelený přehled o piezoelektrických transformátorech, zahrnující popis vlastností a chování piezoelektrických transformátorů, možnosti jejich buzení a řízení. V neposlední řadě se práce věnuje praktickým aplikacím piezoelektrických transformátorů a jejich uplatnění i v aplikacích, ve kterých nebyly dosud používány.

Klíčová slova

Piezoelektrický transformátor, piezoelektrický jev, piezo keramika, polarizace, rezonanční obvod, náhradní schéma, DC-DC měnič, budící obvody, galvanické oddělení, půl můstek, zesilovač ve třídě E, Geiger-Müllerova trubice, studená plazma.

Abstract

This thesis deals with the possibilities of using piezoelectric transformers. The piezoelectric transformers transfer energy from the primary side to the secondary side via mechanical vibrations. Although the principle of piezoelectric transformer has been known for a long time, piezoelectric transformers are not widespread. The piezoelectric transformers are mostly used only in CCFL invertors.

This thesis aims at a comprehensive overview of the piezoelectric transformers, including a description of the properties and the behavior of the piezoelectric transformers, the possibility of their driving and control. Last but not least the work deals with practical applications also in areas where the piezoelectric transformers have not been used before.

Key words

Piezoelectric transformer, piezoelectric effect, piezoceramic, polarization process, resonant circuit, equivalent circuit, DC-DC converter, driving circuit, galvanic isolation, half-bridge converter, E-class amplifier, Geiger-Müller tube, cold plasma.

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	3
SEZNAM OBRÁZKŮ	4
SEZNAM TABULEK	8
ÚVOD	9
1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV	11
1.1 PŘÍMÝ PIEZOELEKTRICKÝ JEV	11
1.2 INVERZNÍ PIEZOELEKTRICKÝ JEV.....	12
1.3 POPIS CHOVÁNÍ PIEZOELEKTRICKÉHO ELEMENTU.....	12
2 PIEZOELEKTRICKÁ KERAMIKA	14
2.1 VÝROBA PIEZOELEKTRICKÉ KERAMIKY	14
2.2 POLARIZACE.....	16
2.3 DYNAMICKÉ CHOVÁNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH MATERIÁLŮ	19
2.4 FYZIKÁLNÍ KONSTANTY POPISUJÍCÍ PIEZOKERAMICKÉ MATERIÁLY	21
3 PIEZOELEKTRICKÉ TRANSFORMÁTORY	24
3.1 MATERIÁLY PRO PIEZOELEKTRICKÉ TRANSFORMÁTORY	24
3.2 LIMITY PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ	25
3.3 TYPY PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ	25
3.3.1 <i>PT</i> Rosenova typu (<i>Longitudinal vibration mode PT</i>)	26
3.3.2 <i>PT</i> s radiálními vibracemi (<i>Radial vibration mode PT</i>)	27
3.3.3 <i>PT</i> s tloušťkovými vibracemi (<i>Thickness vibration mode PT</i>).....	27
3.3.4 <i>PT</i> pracující ve střížném módu (<i>Thickness-shear vibration mode PT</i>).....	28
3.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA PIEZOELEKTRICKÉHO TRANSFORMÁTORU	29
4 HISTORIE A SOUČASNÝ STAV V OBLASTI PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ	30
5 URČENÍ PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU PIEZOELEKTRICKÉHO TRANSFORMÁTORU	34
5.1 ÚPRAVA NÁHRADNÍHO SCHÉMATU <i>PT</i>	34
5.2 PIEZOELEKTRICKÝ TRANSFORMÁTOR VE STAVU NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO	35
5.3 FUNKČNÍ VZOREK PIEZOELEKTRICKÉHO TRANSFORMÁTORU.....	36
5.4 VÝPOČET PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU <i>PT</i>	37
5.5 SIMULACE NÁHRADNÍHO SCHÉMATU <i>PT</i>	38

6 VYUŽITÍ PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ PRO BUZENÍ MOSFET TRANZISTORŮ.....	43
6.1 NAPÁJENÍ BUDÍCÍHO OBVODU POMOCÍ PIEZOELEKTRICKÉHO TRANSFORMÁTORU	43
7 SOUČASNÝ PŘENOS VÝKONU A ŘÍDÍCÍHO SIGNÁLU PŘES PIEZOELEKTRICKÝ TRANSFORMÁTOR.....	50
7.1 VYUŽITÍ AMPLITUDOVÉ A FREKVENČNÍ MODULACE PRO PŘENOS SIGNÁLU	50
7.2 VYUŽITÍ PARAZITNÍCH REZONANČNÍCH FREKVENČÍ PRO PŘENOS SIGNÁLU	50
8 PIEZOELEKTRICKÉ TRANSFORMÁTORY JAKO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ S MALÝM VÝKONEM.....	54
8.1 TOPOLOGIE MĚNIČŮ VHDNÉ PRO BUZENÍ PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ	54
8.2 USMĚRŇOVAČE PRO PIEZOELEKTRICKÉ TRANSFORMÁTORY	60
8.2.1 <i>Problém usměrňování výstupního napětí PT</i>	<i>60</i>
8.2.2 <i>Usměrňovače pro piezoelektrické transformátory</i>	<i>62</i>
9 PIEZOELEKTRICKÉ TRANSFORMÁTORY JAKO ZDROJE NAPĚTÍ PRO DETEKTORY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	64
9.1 GEIGER-MÜLLEROVA TRUBICE	64
9.2 NAPÁJECÍ ZDROJ PRO GM TRUBICI	65
9.3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ	67
10 PIEZOELEKTRICKÝ TRANSFORMÁTOR JAKO ZDROJ NAPĚTÍ PRO GENEROVÁNÍ STUDENÉHO PLAZMATU	71
10.1 STUDENÉ PLAZMA A JEHO VYUŽITÍ	71
10.2 PLAZMOVÁ TRYSKA S PIEZOELEKTRICKÝM TRANSFORMÁTOREM	73
10.3 NAPÁJECÍ ZDROJ S PT PRO PLAZMOVOU TRYSKU	76
10.4 MĚŘENÍ NAPÁJECÍHO ZDROJE S PT PRO PLAZMOVOU TRYSKU.....	79
10.4.1 <i>Měření výkonu</i>	<i>79</i>
10.4.2 <i>Měření výstupního proudu.....</i>	<i>81</i>
10.4.3 <i>Měření EMC</i>	<i>82</i>
11 ZÁVĚR	88
12 LITERATURA.....	91
13 SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ.....	96
13.1 PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM PRÁCE:.....	96
13.2 PUBLIKACE NESOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM PRÁCE.....	97
PŘÍLOHA A – TYPY VIBRAČNÍCH MÓDŮ PIEZOELEKTRICKÉHO ELEMENTU	100
PŘÍLOHA B - POROVNÁNÍ SIMULACÍ A REÁLNÉHO FUNKČNÍHO VZORKU PT.....	101
PŘÍLOHA C - TESTOVACÍ MĚNIČ S TOPOLOGIÍ HALF-BRIDGE.....	104

PŘÍLOHA D - OSTATNÍ VÝSLEDKY Z MĚŘENÍ EMC V BEZODRAZOVÉ KOMOŘE.....105**Seznam symbolů a zkratk**

AC	Střídavý proud (Alternate Current)
CCFL	Zářivka se studenou katodou (Cold Cathode Fluorescent Lamp)
DC	Stejnosměrný proud (Direct Current)
EMC	Elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic Compatibility)
FED	Displej s polní emisí (Field Emission Display)
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)
LCD	Displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
LED	Elektroluminiscenční dioda (Light Emitting Diode)
MOSFET	Tranzistor řízený elektrickým polem (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
PT	Piezoelektrický transformátor (Piezoelectric Transformer)
PZT	Zirkoničitan titaničitanu olova (Lead Zirconate Titanate)
TTL	Tranzistorově-tranzistorová logika (Transistor-Transistor Logic)
D	Elektrická indukce (Electric displacement) [C/m ²]
d	Piezoelektrická nábojová konstanta (Piezoelectric charge constant) [C/N] nebo [m/V]
E	Intenzita elektrického pole (Electric field) [V/m]
ε	Permitivita (Permittivity) [F/m]
f _p	Paralelní rezonanční frekvence (Parallel resonant frequency) [Hz]
f _s	Sériová rezonanční frekvence (Serial resonant frequency) [Hz]
f _{kp}	Paralelní rezonanční frekvence nakrátko (Parallel resonant frequency – short circuit) [Hz]
f _{ks}	Sériová rezonanční frekvence nakrátko (Serial resonant frequency – short circuit) [Hz]
f _{os}	Sériová rezonanční frekvence naprázdno (Serial resonant frequency – open circuit) [Hz]
k	Coupling factor [-]
P	Elektrická polarizace (Electric polarization, polarization density) [C/m ²]
S	Mechanická deformace (Mechanical Strain) [-]
T	Mechanické napětí (Mechanical Stress) [N/m ²]

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Blokové schéma procesu výroby piezoelektrických keramických materiálů. [6]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2 Závislost polarizace piezoelektrického keramického materiálu na intenzitě elektrického pole [6].</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3 Změna rozměru piezoelektrického elementu v závislosti na intenzitě elektrického pole během procesu polarizace. [6].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4 Uspořádání domén uvnitř materiálu během různých fází polarizačního procesu.[7]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 5 Náhradní elektrické schéma piezoelektrického elementu.</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 6 Závislost impedance piezoelektrického elementu na frekvenci. [6]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 7 Číslování ortogonálních os.</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 8 Typy vibrací piezoelektrického elementu v závislosti na směru polarizace a směru působení elektrického pole (převzato a upraveno z [4]).</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 9 Konstrukce PT Rosenova typu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10 Konstrukce PT Rosenova typu s vícevrstvou strukturou.</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11 PT s radiálními vibracemi (Transoner).</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12 Konstrukce PT s tloušťkovými vibracemi.</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 13 konstrukce PT pracujících ve střižném módu.</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14 Zjednodušené náhradní schéma PT.</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 15 Náčrt prvního piezoelektrického transformátoru sestaveného Alexandrem McLean Nicolsonem. [13].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 16 Piezoelektrický transformátor představený Charlesem Abrahamem Rosenem v roce 1954.[14].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 17 Další návrhy piezoelektrických transformátorů prezentované Ch. A. Rosenem v roce 1954.[14].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 18 Počet vyrobených měničů pro CCFL a počet vyrobených PT. [15]</i>	<i>32</i>

Obr. 19 Upravené náhradní schéma PT.....	34
Obr. 20 Úprava náhradního schématu PT pro stav naprázdno a nakrátko.	35
Obr. 21 Simulované náhradní schéma PT v programu PSpice.....	38
Obr. 22 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav nakrátko – výstupní proud.	39
Obr. 23 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav nakrátko – vstupní proud.....	39
Obr. 24 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav nakrátko – fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem.	40
Obr. 25 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav naprázdno – výstupní napětí.	40
Obr. 26 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav naprázdno – vstupní proud.....	40
Obr. 27 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav naprázdno – fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem.	41
Obr. 28 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - zátěž 25 Ω - výstupní napětí.	41
Obr. 29 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - zátěž 25 Ω - vstupní proud.....	41
Obr. 30 Porovnání simulace a reálného vzorku PT – zátěž 25 Ω - fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem.	42
Obr. 31 Princip přímého buzení MOSFET tranzistoru pomocí PT.	43
Obr. 32 Napájení horního budiče pomocí PT v topologii polovičního můstku.....	44
Obr. 33 Pomocný zdroj s PT s galvanicky odděleným výstupním napětím.....	45
Obr. 34 Schéma zapojení testovacího měniče.....	45
Obr. 35 Průběhy napětí u_{gs} tranzistoru Q4 (modrý průběh) a Q3 (žlutý průběh) při střídě spínání 50 %.....	46
Obr. 36 Průběhy napětí u_{gs} tranzistoru Q4 (modrý průběh) a Q3 (žlutý průběh) při střídě spínání 85 %.....	46
Obr. 37 Výstupní napětí měniče (modrý průběh), napětí na rezistoru omezujícím proud do elektrody gate horního tranzistoru (žlutý průběh).	47
Obr. 38 Výstupní napětí měniče (modrý průběh) a výstupní napětí pomocného zdroje s PT (žlutý průběh).....	47

<i>Obr. 39 Závislost pomocného napětí na spínací frekvenci testovacího měniče (při střídě spínání 50 %)</i>	48
<i>Obr. 40 Závislost pomocného napětí na střídě spínání pro různé spínací frekvence testovacího měniče</i>	48
<i>Obr. 41 Fotografie testovacího měniče</i>	49
<i>Obr. 42 Princip přenosu signálu přes PT pomocí parazitní rezonanční frekvence</i>	51
<i>Obr. 43 Sekundární napětí PT a jeho frekvenční spektra: a) bez pomocné frekvence; b) s pomocnou frekvencí f_2</i>	52
<i>Obr. 44 Porovnání frekvenčního spektra: a) Před filtrací; b) Po filtraci pásmovou propustí</i>	52
<i>Obr. 45 Průběhy napětí na výstupní straně PT</i>	53
<i>Obr. 46 Poloviční můstek s přizpůsobovací indukčností pro dosažení měkkého spínání</i>	56
<i>Obr. 47 Poloviční můstek bez dodatečné přizpůsobovací indukčnosti a odpovídající průběhy napětí a proudu</i>	56
<i>Obr. 48 Schéma zapojení zesilovače ve třídě E</i>	57
<i>Obr. 49 Piezoelektrický transformátor napájený zesilovačem pracujícím ve třídě E</i>	57
<i>Obr. 50 Průběhy napětí a proudů zesilovače pracujícího ve třídě E</i>	58
<i>Obr. 51 Zesilovač pracující ve třídě v zapojení push-pull</i>	59
<i>Obr. 52 Vznik záporného stejnosměrného offsetu na výstupu PT při použití běžného jednocestného usměrňovače</i>	61
<i>Obr. 53 Zdvojovač proudu (current doubler)</i>	62
<i>Obr. 54 Jednocestný usměrňovač (half-way rectifier)</i>	62
<i>Obr. 55 Dvoucestný můstkový usměrňovač</i>	63
<i>Obr. 56 Zdvojovač napětí pro PT</i>	63
<i>Obr. 57 Použitý PT SMMTF85P1S50 v porovnání s tužkou</i>	67
<i>Obr. 58 Závislost výstupního napětí PT SMMTF85P1S50 na frekvenci</i>	67

<i>Obr. 59</i> Principiální zapojení PT při napájení GM trubic.....	67
<i>Obr. 60</i> Principiální zapojení GM trubic při experimentálním ověření.	68
<i>Obr. 61</i> Oscilogramy napětí zachycené při testování GM trubice STS-5.	69
<i>Obr. 62</i> Oscilogramy napětí zachycené při testování GM trubice SI-3BG.	69
<i>Obr. 63</i> Principy čištění povrchu pomocí plazmatu [47].	72
<i>Obr. 64</i> Uspořádání plazmové trysky s vestavěným PT.....	73
<i>Obr. 65</i> Piezoelektrický transformátor SMSTF68P10S9.....	74
<i>Obr. 66</i> Plazmová tryska generující studené plazma během experimentů. Rozdílné zbarvení při použití argonu (první a druhá fotografie) a helia (poslední fotografie).	75
<i>Obr. 67</i> Schéma zapojení zesilovače ve třídě E pro buzení PT.	76
<i>Obr. 68</i> Průběhy napětí na zesilovači ve třídě E – C_4 má malou kapacitu.	77
<i>Obr. 69</i> Průběhy napětí na zesilovači ve třídě E – C_4 má velkou kapacitu.	77
<i>Obr. 70</i> Průběhy napětí na zesilovači ve třídě E – C_4 má optimální kapacitu.	78
<i>Obr. 71</i> Blokové schéma měřícího uspořádání.	79
<i>Obr. 72</i> Oscilogram zachycený při měření bez průtoku helia.	80
<i>Obr. 73</i> Oscilogram zachycený při měření s heliem a hořícím plazmovým obloukem.	80
<i>Obr. 74</i> Měření výstupního proudu PT bez průtoku helia.	81
<i>Obr. 75</i> Měření výstupního proudu PT s hořícím plazmovým obloukem.	82
<i>Obr. 76</i> Spektrum intenzity vyzařovaného elektrického pole bez helia.	83
<i>Obr. 77</i> Spektrum vyzařovaného elektrického pole s hořícím plazmovým výbojem.	83
<i>Obr. 78</i> Spektrum symetrických rušivých napětí (common mode voltage) bez helia.....	84
<i>Obr. 79</i> Spektrum nesymetrických rušivých napětí (differential voltage) bez helia.	84
<i>Obr. 80</i> Spektrum symetrických rušivých napětí (common mode voltage) s hořícím plazmovým výbojem.	85
<i>Obr. 81</i> Spektrum symetrických rušivých napětí (differential voltage) s hořícím plazmovým výbojem.	85

<i>Obr. 82 Měření EMC v bezodrazové komoře.</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 83 Detail z měření EMC.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 84 Stopa po čištění mědi plazmovým plamenem.</i>	<i>87</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka I. Parametry sestaveného funkčního vzorku PT.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka II. Změřené parametry pro výpočet prvků náhradního schématu PT.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka III. Hodnoty prvků náhradního schématu funkčního vzorku PT.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka IV. Parametry transformátoru SMMTF85P1ST0.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka V. Parametry transformátoru SMSTF68P10S9.</i>	<i>66</i>

Úvod

Vývoj piezoelektrických keramických materiálů umožnil široké využití piezoelektrického jevu v různých aplikacích. Zejména je využíván v senzoricke nebo v aktuátorech. Piezoelektrické transformátory (PT) využívají kombinaci funkce aktuátoru a senzoru pro přenos energie. PT představují zajímavou alternativu ke klasickým elektromagnetickým transformátorům. Díky přenosu energie pomocí mechanické energie (vibrací) nedochází při funkci PT ke generování magnetického pole. PT také mohou dosahovat vysoké hustoty energie a vysoké účinnosti. Dalšími výhodami jsou například nehořlavost a malé rozměry a zejména pak nízký profil.

V současné době jsou piezoelektrické transformátory v komerčních aplikacích spíše opomíjeny. Výjimku částečně tvoří PT Rosenova typu (PT s podélným vibračním módem), které jsou občas využívány v měničích pro napájení CCFL (Cold Cathod Fluorescent Lamp) výbojek využívaných pro podsvětlení LCD displejů. Tyto aplikace se vyznačují především nízkým výkonem a vysokým napětím požadovaným pro napájení CCFL lamp. Tato práce se zabývá možnostmi využití piezoelektrických transformátorů i pro jiné aplikace.

Přestože jsou PT známy již více než 60 let, jejich praktické využití a povědomí o jejich vlastnostech a možnostech využití není příliš široké. V česky psané literatuře není mnoho publikací, které by se touto problematikou komplexně zabývaly. V cizojazyčné literatuře je publikací věnovaných PT více, nicméně ve většině případů se jedná o vědecké publikace zaměřené na konkrétní problém, nebo aplikaci PT. Najít v dostupné literatuře zdroj, který by popisoval komplexně tuto problematiku, je prakticky nemožné. Pro získání uceleného přehledu o PT je potřeba informace dohledávat v různých zdrojích.

Jedním z cílů této práce je seskupení dostupných informací o PT (princip fungování, materiály a jejich vlastnosti, náhradní schéma a simulace, typy PT a jejich vlastnosti, způsoby řízení a budící obvody) do jednoho celku. Dále si práce klade za cíl prostudovat a popsat vlastnosti PT, jejich chování možné využití i v aplikacích, ve kterých PT doposud využívány nebyly.

Práce se věnuje způsobu určení náhradního schématu reálného vzorku PT jen z výsledků měření, bez nutnosti hlubších znalostí použitých materiálů. Výsledky ze simulací náhradního schématu jsou poté porovnány s výsledky změřenými na reálném PT.

Práce se dále zabývá využitím PT v problematice galvanicky odděleného buzení MOSFET případně IGBT transistorů. Je nastíněna a prakticky ověřena možnost využití PT k současnému přenosu energie a řídicího signálu pro potřeby buzení tranzistorů.

Další část práce je věnována generování vysokého napětí (v řádu stovek voltů až jednotek kV) s využitím PT Rosenova typu. Využití těchto transformátorů pro potřeby napájení detektorů ionizujícího záření a generování studené plazmy je v práci popsáno a na funkčních vzorcích jsou provedena měření dosažených výsledků. Práce se taktéž věnuje možnostem zapojení budících obvodů pro PT včetně diskuze jejich vlastností.

1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev vykazují některé krystalické materiály. Tento jev způsobuje generování elektrického náboje úměrného působící síle, nebo naopak působením síly, která je přímo úměrná přiloženému elektrickému napětí, dochází ke generování náboje. Předpona „piezo“ je původem z řeckého slova „piezein“ znamenající tlačit nebo stisknout.

Piezoelektrický jev objevili experimentálně bratři Jacques a Pierr Cuire v roce 1880. Při svých pokusech využívali krystal turmalínu. Při stlačování krystalu podél určitých os symetrie pozorovali vznik elektrického náboje na povrchu. Náboj vznikal na plochách kolmých k polárním osám symetrie. Takto vzniklý náboj byl přímo úměrný mechanickému tlaku, který na krystal působil. Bratři Cuire také pozorovali, že velikost náboje není závislá na tloušťce krystalu, ale jen na velikosti ploch. Po objevu piezoelektrického jevu u turmalínu byla tato vlastnost objevena také u křemene (SiO_2) a dalších krystalů bez středu symetrie.

Jev, který objevili bratři Curie, je v současnosti označován jako přímý piezoelektrický jev. Roku 1881 předpověděl G. Lippman jev opačný, který je dnes označován za inverzní piezoelektrický jev. Podle G. Lippmanna mělo docházet k mechanické deformaci krystalu vloženému do elektrického pole. Mechanická deformace měla být přímo úměrná intenzitě použitého elektrického pole. Předpoklad G. Lippmanna experimentálně ověřili bratři Curie. Při svém experimentu bratři Curie mechanicky spojili zkoumaný krystal s dalším krystalem. Na první krystal aplikovali elektrické pole a pomocí druhého krystalu detekovali jeho mechanickou deformaci (díky již známému přímému piezoelektrickému jevu). Nevědomky tak v podstatě sestavili první piezoelektrický transformátor v historii.

[1]

1.1 Přímý piezoelektrický jev

Přímý piezoelektrický jev je využíván zejména v sensorice. Jak již bylo naznačeno výše, v případě přímého piezoelektrického jevu dochází k polarizaci krystalu při jeho mechanickém namáhání. Vzniklá polarizace je potom přímo úměrná působícímu tlaku. [1]

$$\Delta P = d \cdot \Delta T \quad (1.1.1)$$

kde ΔP je změna elektrické polarizace [C/m^2], d je piezoelektrická nábojová konstanta, mající rozměr [C/N] nebo [m/V] a ΔT je změna mechanického tlaku [N/m^2].

1.2 Inverzní piezoelektrický jev

Inverzní (nepřímý) piezoelektrický jev je naproti tomu využíván v aktuátorech. Při aplikování elektrického pole na krystal dochází k jeho mechanické deformaci. Tato deformace je přímo úměrná intenzitě elektrického pole. [1]

$$S = d \cdot E \quad (1.2.1)$$

Kde S je mechanická deformace [-], d je piezoelektrická konstanta (stejná jako v případě přímého piezoelektrického jevu) [m/V] nebo [C/N], E je intenzita elektrického pole [V/m].

1.3 Popis chování piezoelektrického elementu

Přímý a nepřímý piezoelektrický jev jsou navzájem inverzní. Chování piezoelektrického elementu lze popsat dvojicí lineárních rovnic. Rovnice (1.3.1) popisuje chování piezoelektrického elementu z pohledu přímého piezoelektrického jevu. Rovnice (1.3.2) popisuje chování piezoelektrického elementu z pohledu nepřímého piezoelektrického jevu. [2]

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad (1.3.1)$$

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad (1.3.2)$$

Kde:

D je elektrická indukce (Electric displacement) [C/m²]

d je piezoelektrická konstanta (Piezoelectric constant) [C/N] nebo [m/V]

T je mechanické napětí (Mechanical stress) [N/m²]

ε^T je permitivita při konstantním mechanickém napětí (Permittivity at constant stress) [F/m]

E je intenzita elektrického pole (Electric field) [V/m]

S je mechanická deformace (Mechanical strain) [-]

s^E je mechanická poddajnost při konstantním elektrickém poli (zkratované elektrody) (Elastic compliance at constant electric field) [m²/N]

Další parametr popisující chování piezoelektrického materiálu je označován jako coupling factor a označuje se písmenkem **k**. Coupling factor popisuje, jak dobře je schopen piezoelektrický materiál převést mechanickou energii na elektrickou a obráceně. V případě nepřímého piezoelektrického jevu lze coupling factor definovat jako odmocninu z poměru

akumulované mechanické energie a celkové absorbované energie, nebo naopak (pro přímý piezoelektrický jev).

$$k = \sqrt{\frac{\textit{Akumulovaná mechanická energie}}{\textit{Celková absorbovaná energie}}} \quad (1.3.3)$$

nebo

$$k = \sqrt{\frac{\textit{Akumulovaná elektrická energie}}{\textit{Celková absorbovaná energie}}} \quad (1.3.4)$$

Coupling factor neodráží dielektrické ani mechanické ztráty a nemůže být proto chápán jako celková účinnost piezoelektrického elementu při přeměně energie. [3][4][5]

2 Piezoelektrická keramika

Piezoelektrický jev je dobře znám u monokrystalických materiálů jako je křemen nebo turmalín. U těchto materiálů je ovšem piezoelektrický jev poměrně slabý. Naproti tomu piezoelektrické keramické materiály, jako je Bárium titanát (BaTiO) nebo Zirkoničitan titaničitanu olova (PZT), vykazují mnohem výraznější piezoelektrický jev (dosahují vyššího generovaného napětí nebo větší mechanické deformace). Pro výrobu PT se nejčastěji používá právě PZT keramika.

Během druhé světové války byla snaha o minimalizaci rozměrů kondenzátorů. Byly tak hledány materiály s vysokou permitivitou. Prvním takto objeveným materiálem byl titaničitan barnatý (BaTiO₃), jehož permitivita překračovala o více než dva řády dosud používanou slídu. Titaničitan barnatý byl nalezen nezávisle na sobě v USA, SSSR a Japonsku. Tento materiál bylo možné připravit jako monokrystal nebo keramiku.

Koncem druhé světové války nastal rozvoj aplikací těchto materiálů ve formě keramiky, tedy polykrystalů s drobnými zrnky materiálu (1 – 10 μm). Přesto že je polykrystal s malými zrny (náhodně orientovanými) téměř izotropní, lze u něj docílit makroskopickou anizotropii. Tu lze docílit silným elektrickým polem. Tento proces se označuje jako polarizace (poling process). Během polarizace dochází k natažení a srovnání směrů dipólových momentů v jednotlivých zrnech do stejného směru, který odpovídá směru elektrického pole. V materiálu tak vznikne jednotný směr a látka se stane piezoelektrickou. [1]

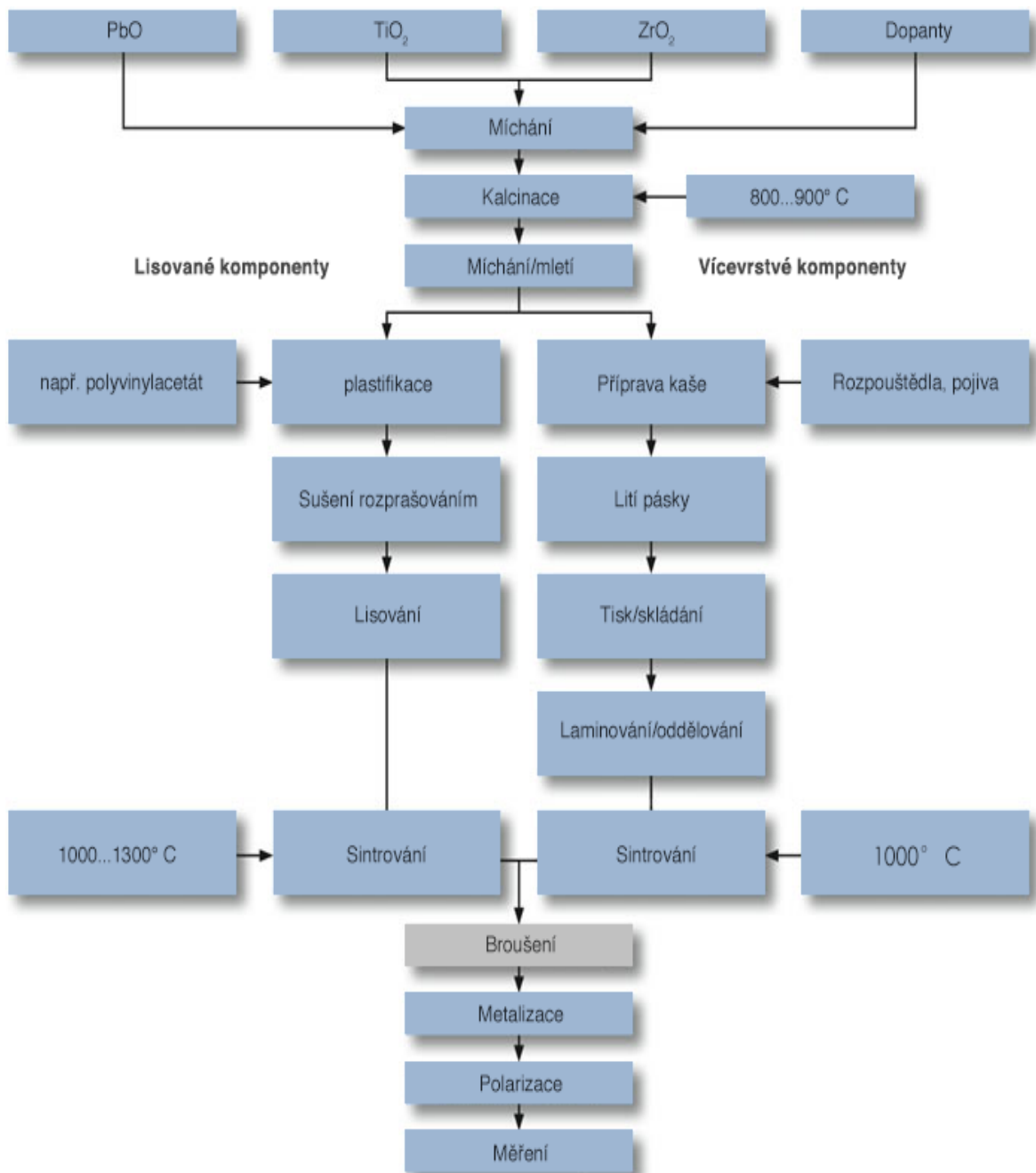
2.1 Výroba piezoelektrické keramiky

V první fázi výroby jsou nejprve namlety surové oxidové materiály a jsou smíchány s případnými dopanty do podoby základního prášku. Na jeho složení závisí výsledné piezoelektrické vlastnosti materiálu. Následuje tvarování a lisování do požadovaného tvaru. Potom je materiál sintrován (vypálen) při teplotách 1000 - 1300 °C. Během vypalování dochází k tvorbě polykrystalické keramické struktury. Poté je materiál upraven na finální rozměr povrchovou úpravou (řezání, broušení, lapování a leštění). Přesné geometrické rozměry výrobku jsou velmi důležité, neboť na nich závisí jeho elektrické vlastnosti (rezonanční frekvence a kapacita).

Dále je potřeba vytvořit elektrody. Ty jsou nejprve použity pro připojení polarizačního napětí a poté souží k elektrickému připojení piezoelektrického elementu. Elektrody jsou

často stříbrné a jsou nanášeny sítotiskem a potom sintrovány. Po vytvoření elektrod je možné přistoupit k polarizaci výrobku za zvýšené teploty.

Po polarizaci je možné přistoupit k finální kontrole rozměrů a měření elektrických parametru výrobku. Blokové schéma výroby elementu z piezokeramického materiálu je na obrázku 1. [6]

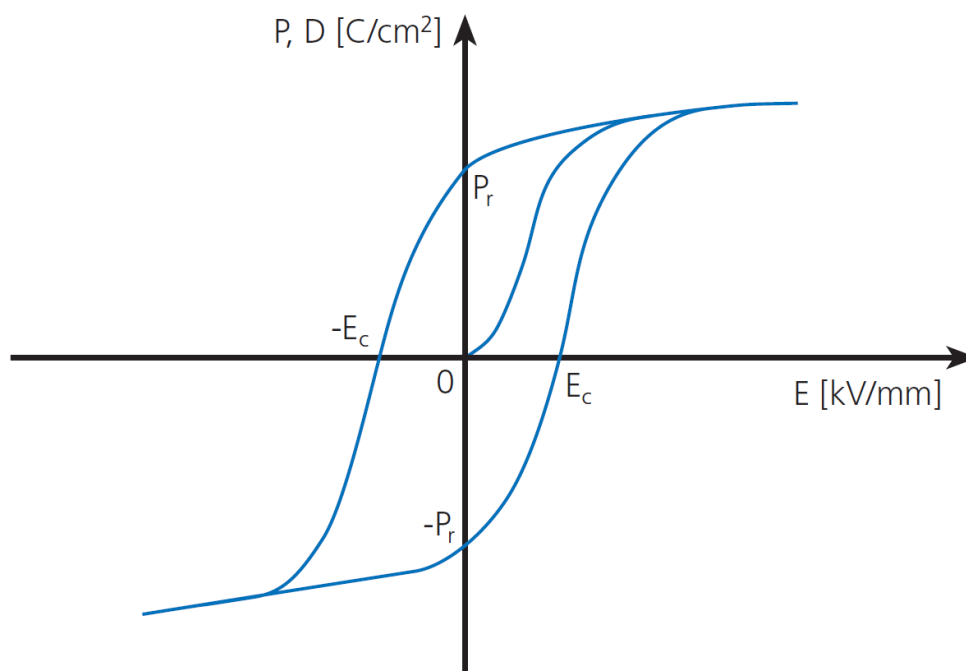


Obr. 1 Blokové schéma procesu výroby piezoelektrických keramických materiálů. [6]

2.2 Polarizace

Proces polarizace je velmi důležitým krokem při výrobě komponentů z piezoelektrické keramiky. Bez polarizace nemá materiál piezoelektrické vlastnosti. Po vypálení materiálu jsou domény keramického materiálu náhodně uspořádány. V materiálu jsou náhodně rozmístěny malé oblasti se stejnou orientací. Orientace těchto oblastí má však různé směry. Z hlediska celkového objemu výrobku je materiál izotropní a nevykazuje piezoelektrické vlastnosti. Pro získání piezoelektrických vlastností je potřeba výrobek polarizovat.

K polarizaci dojde po umístění výrobku do silného elektrického pole. Používané intenzity elektrického pole dosahují jednotek kV/mm. Při vystavení silnému elektrickému poli dochází k natáčení jednotlivých oblastí stejným směrem. Po odstranění elektrického pole nedochází k úplné ztrátě polarizace. To je způsobeno tím, že závislost polarizace na připojeném elektrickém poli vykazuje hysterezní závislost. Po odstranění elektrického pole materiál vykazuje zbytkovou (remanentní) polarizaci. Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole je naznačena na obrázku 2. [6][7]

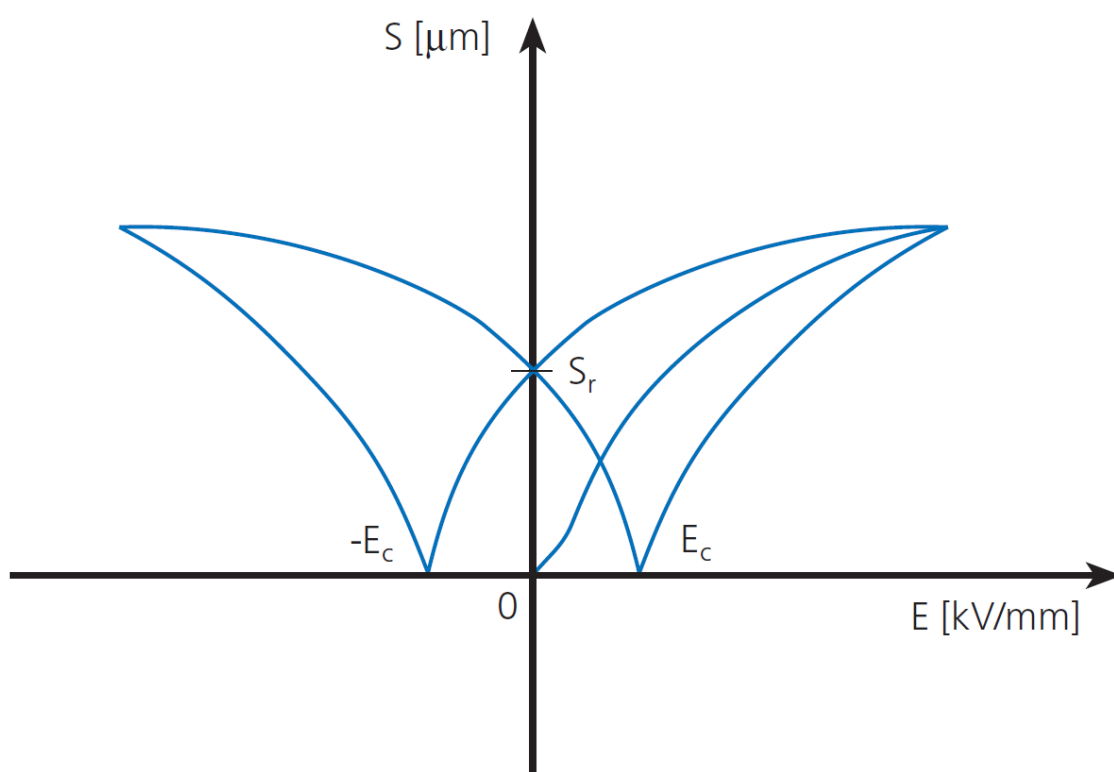


Obr. 2 Závislost polarizace piezoelektrického keramického materiálu na intenzitě elektrického pole [6].

Z obrázku 2 je patrné, že po prvotní polarizaci a následném snížení intenzity elektrického pole na nulovou hodnotu nedojde k úplnému zániku polarizace. Hodnoty P_r (příp. $-P_r$) jsou hodnoty remanentní polarizace. Hodnoty označené v grafu jako E_c (příp. $-E_c$) jsou koercitivní intenzity elektrického pole. Po překročení koercitivní intenzity elektrického pole dojde k depolarizaci materiálu a materiál ztratí svoje piezoelektrické vlastnosti. Koercitivní intenzita je jedním z limitujících faktorů při použití piezoelektrické keramických materiálů.

Druhý způsob, jak může dojít ke ztrátě polarizace materiálu je jeho vystavení teplotám, které jsou vyšší než jeho Curieova teplota. Z hlediska dlouhodobé stability parametrů a omezení degradace vlastnosti materiálu, by pracovní teplota materiálu neměla překročit cca polovinu Curieovy teploty. Dalším limitujícím faktorem při použití piezoelektrických keramických materiálů v praxi je tedy teplotní namáhání.

Třetím způsobem, jak může dojít ke ztrátě polarizace je jeho mechanické přetížení. Pokud je piezoelement vystaven nadměrnému mechanickému zatížení, zejména ve stavu, kdy jsou elektrody spojeny nakrátko, může dojít rovněž ke ztrátě polarizace. [6]

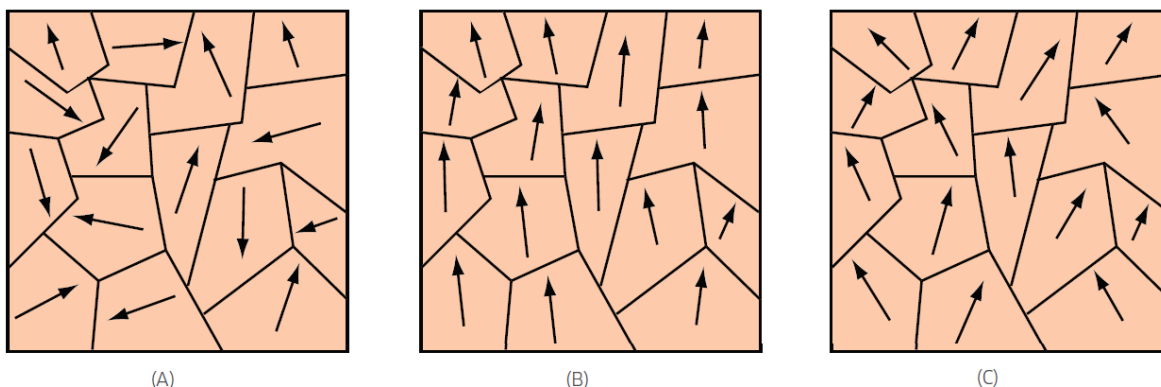


Obr. 3 Změna rozměru piezoelektrického elementu v závislosti na intenzitě elektrického pole během procesu polarizace. [6]

Bod S_r označuje velikost zbytkové deformace (změny rozměru) po odstranění elektrického pole. Bod S_r je tedy pracovním bodem piezoelementu v budoucí aplikaci. V oblasti tohoto pracovního bodu se bude deformace piezoelementu měnit proporcionálně k intenzitě elektrického pole. S ohledem na tvar křivky z obrázku 3, který připomíná vzhled motýlích křídel, je tato křivka někdy označována jako Butterfly curve.

Obrázek 4 ilustruje rozložení jednotlivých domén u piezoelektrického keramického materiálu. Příklad (A) ukazuje náhodné uspořádání před polarizací. Příklad (B) ukazuje stav během polarizace. Příklad (C) zobrazuje stav remanentního uspořádání po odstranění elektrického pole.

Na obrázku 3 je naznačena změna rozměrů piezoelementu v závislosti na intenzitě elektrického pole během procesu polarizace. Osa y zachycuje změnu rozměru – deformaci (Strain) elementu ve směru působení elektrického pole. Deformace ve směru elektrického pole je doprovázena rovněž deformací rozměru kolmého ke směru elektrického pole. Tato deformace je však menší a dosahuje přibližně 50 %. [8]

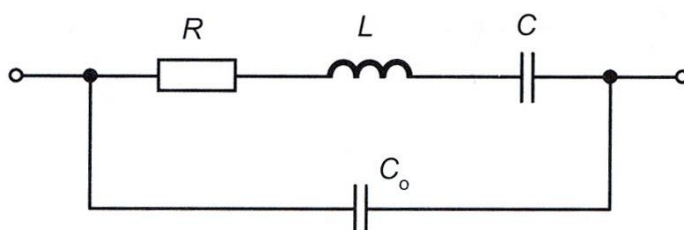


Obr. 4 Uspořádání domén uvnitř materiálu během různých fází polarizačního procesu.[7]

2.3 Dynamické chování piezoelektrických materiálů

V případě, že piezokeramický element bude připojen ke zdroji střídavého elektrického napětí, začne docházet k periodickým změnám rozměrů (deformacím) podle okamžité hodnoty připojeného elektrického napětí. Vzhledem k hmotnosti piezoelementu a jeho určité pružnosti, lze nalézt rezonanční frekvenci. Tato mechanická rezonanční frekvence je závislá na geometrických rozměrech piezoelementu.

Pro tuto rezonanci lze sestavit náhradní schéma piezoelektrického elementu, které popisuje jeho elektrické chování v blízkosti rezonanční frekvence. Na obrázku 5 je naznačeno náhradní elektrické schéma piezoelektrického elementu. Jednotlivé elektrické prvky jsou analogii k mechanickým veličinám piezoelektrického elementu.



Obr. 5 Náhradní elektrické schéma piezoelektrického elementu.

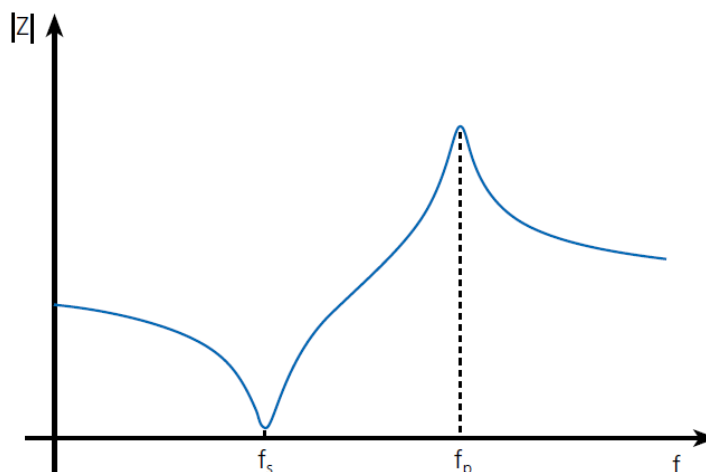
Význam prvků náhradního schématu:

- **R** představuje mechanické ztráty piezoelektrického elementu
- **L** představuje hmotnost piezoelektrického elementu
- **C** představuje pružnost piezoelektrického elementu
- **C₀** představuje kapacitu mezi elektrodami piezoelektrického elementu

Závislost impedance na frekvenci piezoelektrického elementu je naznačena na obrázku 6. Z impedanční charakteristiky je patrné, že v obvodu dochází jak k sériové, tak k paralelní rezonanci. Sériová rezonance nastává mezi prvky L a C. Paralelní rezonance nastává mezi prvky L, C a C₀. Sériovou rezonanční frekvenci lze vyjádřit pomocí rovnice (2.3.1). Paralelní rezonanční frekvenci ze vztahu (2.3.2).

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3.1)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} \quad (2.3.2)$$



Obr. 6 Závislost impedance piezoelektrického elementu na frekvenci. [6]

Je-li piezoelement připojen ke zdroji střídavého napětí, jehož frekvence odpovídá sériové rezonanční frekvenci piezoelementu, dojde ke zvýšení proudu (pokud je připojené napětí konstantní) a zvýšení amplitudy kmitů piezoelementu. Zvýšení amplitudy kmitů je úměrné mechanické jakosti piezoelementu, označované jako Q_m (Mechanical quality factor). Při znalosti velikosti prvků náhradního schématu piezoelektrického elementu, lze mechanickou jakost vyjádřit pomocí vztahu (2.3.3). Ze znalosti rezonanční křivky, lze vyjádřit mechanickou jakost podle vztahu (2.3.4).

$$Q_m = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad (2.3.3)$$

$$Q_m = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \quad (2.3.4)$$

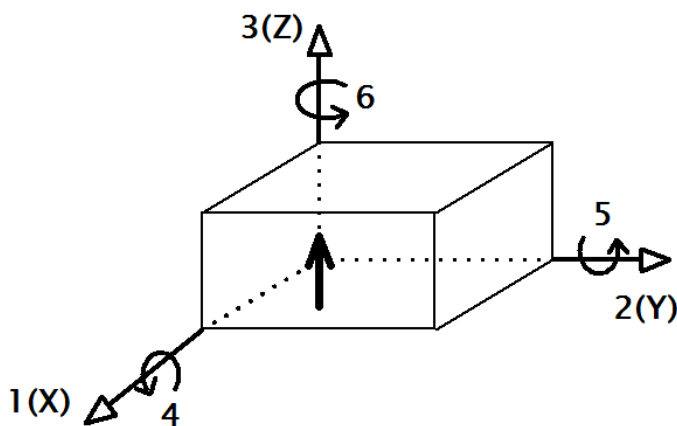
kde:

f_1 je frekvence nižší než f_s , na které poklesne amplituda kmitů oproti f_s o 3 dB.

f_2 je frekvence vyšší než f_s na které poklesne amplituda kmitů oproti f_s o 3 dB.

2.4 Fyzikální konstanty popisující piezokeramické materiály

Pro popis piezoelementu vyrobeného z piezokeramiky lze použít zmíněné rovnice (1.3.1) a (1.3.2). Protože piezokeramické materiály jsou anizotropní, nelze piezoelektrickou keramiku popsat pouze jedinou sadou fyzikálních konstant. V případě působení mechanické síly (nebo elektrického napětí) na piezoelement není rozhodující pouze její velikost, ale také směr působení. V případě, že mechanická síla (nebo elektrické napětí) působí v určitém směru na piezoelement, nedojde k odezvě piezoelementu pouze ve směru působící síly, ale rovněž ve směrech kolmých. Z toho důvodu je nutné, aby konstanty použité pro popis piezokeramických materiálů reflektovaly jak směr působící veličiny (mechanické síly nebo elektrického napětí), tak směr odezvy na působící veličinu. Pro tyto fyzikální konstanty se proto zavádí dva dolní číselné indexy. V případě přímého elektrického jevu (převod mechanického namáhání na elektrický náboj), označuje první z indexů směr reakce na působící veličinu. Druhý z indexů pak označuje směr působící veličiny. V případě nepřímého piezoelektrického jevu (mechanická deformace v reakci na přiložené elektrické napětí) je tomu obráceně. Vzájemně ortogonální osy případně smyčky kolem os jsou očíslovány podle obrázku 7.



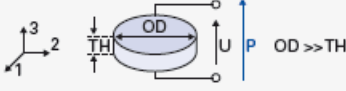


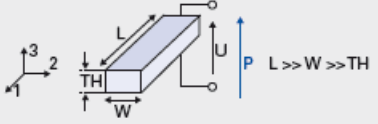
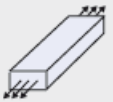
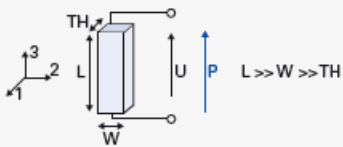

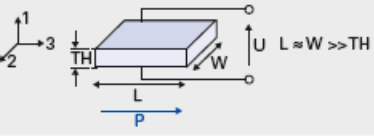
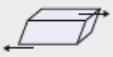
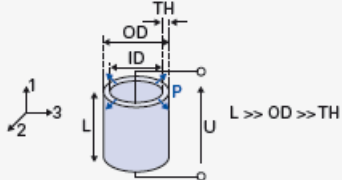


Obr. 7 Číslování ortogonálních os.

Kladný směr polarizace piezokeramického materiálu je podle zavedené konvence ve směru osy Z, tedy v ose číslo 3. Konstanty rovněž mohou mít horní index, který značí platnost konstanty za splnění určité podmínky. Například horní index **E** značí podmínku konstantního elektrického pole. Elektrody piezoelementu jsou tedy zkratovány. Naopak horní index **D** značí podmínku konstantní elektrické indukce. Elektrody piezoelementu jsou tedy rozpojeny. [3][7] Pro lepší představu lze uvést následující příklady:

- Parametr \mathbf{d}_{31} vyjadřuje velikost elektrické indukce vyvolané ve směru 3 (rovnoběžném se směrem polarizace materiálu) působením mechanického namáhání ve směru 1 (tedy směru kolmém na směr polarizace). Rovněž může tento parametr vyjadřovat závislost mechanické deformace ve směru osy 1, která je vyvolána elektrickým polem působícím ve směru osy 3.
- Parametr \mathbf{d}_{15} vyjadřuje velikost polarizace ve směru osy 1 vyvolané střížným namáháním kolem osy 2. Nebo může tento parametr vyjadřovat velikost střížné deformace kolem osy 2, která je vyvolána elektrickým polem působícím ve směru osy 1.
- Parametr \mathbf{S}_{11}^E vyjadřuje mechanickou poddajnost vůči namáhání působícímu ve směru osy 1 a jím vyvolané deformaci v témže směru. Horní index E značí podmínku konstantního elektrického pole. Elektrody piezoelementu jsou tedy zkratovány.
- Parametr \mathbf{S}_{33}^D vyjadřuje mechanickou poddajnost vůči namáhání působícímu ve směru osy 3 a jím vyvolané deformaci v témže směru za podmínky konstantní elektrické indukce (neuzavřený elektrický obvod).
- Parametr $\boldsymbol{\epsilon}_{33}^S$ vyjadřuje permitivitu (tedy závislost mezi elektrickou indukcí a elektrickým polem) ve směru osy 3, za podmínky konstantní mechanické deformace.
- Parametr \mathbf{k}_{31} je tzv. coupling factor (kapitola 1.3) vypočtený z elektrické energie dodané elektrickým polem působícím ve směru osy 3 a energií mechanické deformace, vyvolané ve směru osy 1. Jedná se o příčnou (transverzální) deformaci.
- Parametr \mathbf{k}_{33} je tzv. coupling factor (kapitola 1.3) vypočtený z elektrické energie dodané elektrickým polem, působícím ve směru osy 3 a energií mechanické deformace, vyvolané v tomtéž směru. V tomto případě se jedná o podélnou deformaci (longitudinal).

Cílem uvedených příkladů bylo pouze zlepšení představy o systému značení parametrů. Výše zmíněné příklady nejsou výčtem všech možných parametrů a kombinací indexů, popisujících piezokeramický element.

Tvar mechanické deformace (vibrační mód) piezoelektrického elementu závisí na směru přiloženého elektrického pole a na směru polarizace piezoelektrického elementu. Typy mechanických deformací (vibračních módů) piezoelektrického elementu jsou na obrázku 8. (Rozšířená verze obrázku 8 obsahující vztahy pro výpočty parametrů pro každý typ vibrací je v příloze A [4])

Shape	Oscillations	
	Type	Mechanical deformation
Thin disk 	radial	
	thickness	
Plate 	transverse	
Rod 	longitudinal	
Shear plate 	thickness shear	
Tube 	transversal	
	thickness	

Obr. 8 Typy vibrací piezoelektrického elementu v závislosti na směru polarizace a směru působení elektrického pole (převzato a upraveno z [4]).

3 Piezoelektrické transformátory

Piezoelektrické transformátory (PT) slouží k přeměně střídavého elektrického napětí. K této přeměně je využíván piezoelektrický jev. Podobně jako klasický transformátor, tak i PT má svoji primární (vstupní) a sekundární (výstupní) část. Primární část PT využívá nepřímý piezoelektrický jev k přeměně elektrické energie na energii mechanickou (mechanické vibrace). Na sekundární straně PT je mechanická energie přeměněna zpět na energii elektrickou pomocí přímého piezoelektrického jevu. Primární část PT se tedy chová jako aktuátor generující mechanické vibrace. Sekundární strana PT se potom chová jako senzor, který převádí mechanické vibrace zpět na elektrickou energii. Dobrá mechanická vazba mezi primární a sekundární částí PT je nezbytná pro dobrou účinnost přenosu energie přes PT. Mezi primární a sekundární částí PT může být vložena elektricky izolující vrstva. Tím lze dosáhnout galvanického oddělení primární a sekundární strany PT.

3.1 Materiály pro piezoelektrické transformátory

Rozvoj piezoelektrických keramických materiálů umožnil široké využití piezoelektrického jevu v senzorech a aktuátorech. Rozvoj těchto materiálů také umožnil rozvoj v oblasti PT.

Dopováním PZT keramiky lze docílit různých vlastností materiálu a lze tak ovlivňovat jeho piezoelektrické a dielektrické vlastnosti. Podle vlastností lze PZT keramiku dělit na takzvaně „tvrdou“ (hard ceramic) nebo „měkkou“ keramiku (soft ceramic). Rozdíl mezi těmito dvěma skupinami je v rychlosti šíření mechanické vlny materiálem a v jakosti mechanické rezonance. Tvrdá keramika (více dopovaná) dosahuje výrazně vyšší mechanické jakosti než keramika měkká, ale má menší rychlost šíření vlny materiálem. Z toho vyplývá, že při stejném rozměru bude mít materiál vyrobený z tvrdé keramiky nižší rezonanční frekvenci, ale jeho rozkmit (při buzení na rezonanční frekvenci) bude vyšší. [9]

Z výše uvedeného je zřejmé, že tvrdá keramika nalézá uplatnění zejména ve výkonových aplikacích, jako jsou aktuátory, ultrazvukové budiče, energy harvestory, zdroje pro ultrazvukové svařování a samozřejmě také PT. Naproti tomu měkká keramika nalézá uplatnění zejména v aplikacích pro sensoriku.

Na rozdíl od přírodních piezoelektrických materiálů (křemen, turmalín apod.) PZT keramika nemá piezoelektrické vlastnosti v základním stavu. Pro získání piezoelektrických vlastností je potřeba tyto materiály nejprve polarizovat (poling process). Závislost polarizace na přiloženém elektrickém poli vykazuje hysterezi. Po přiložení silného

elektrického pole dojde u těchto materiálů k polarizaci. Po odstranění tohoto pole však materiál zůstane polarizován (remanentní polarizace). Teprve po tomto „naformátování“ pomocí polarizace vnějším elektrickým polem získává materiál piezoelektrické vlastnosti. U některých materiálů je potřeba polarizaci provádět za zvýšené teploty. [7]

3.2 Limity piezoelektrických transformátorů

Limity PT jsou dány především omezeními použitých materiálů. Piezokeramické materiály vykazují piezoelektrické chování jen tehdy, pokud jsou polarizované. Pokud dojde ke ztrátě polarizace, přestává PT fungovat.

K depolarizaci může dojít, pokud je PT vystaven zvýšené teplotě. Pokud teplota dosáhne Curieovy teploty, ztrácí materiál polarizaci úplně. K jisté degradaci ovšem dochází už při teplotách nižších, než je Curieova teplota. Pro bezpečný provoz, při kterém je zaručena stálost parametrů, by maximální pracovní teplota neměla přesáhnout polovinu hodnoty Curieovy teploty. Pro tvrdou PZT keramiku bývá Curieova teplota cca 300 až 350 °C. Maximální pracovní teplota PT by tedy neměla překročit teplotu cca 150 °C.

Dalším způsobem, jak může dojít k depolarizaci, je vystavení příliš vysoké intenzitě elektrického pole. Pokud intenzita přiloženého elektrického pole dosáhne velikosti koercitivní intenzity, materiál opět ztrácí piezoelektrické vlastnosti a PT přestává fungovat. Pro tvrdou PZT keramiku dosahují koercitivní intenzity elektrického pole hodnot jednotek kV/mm.

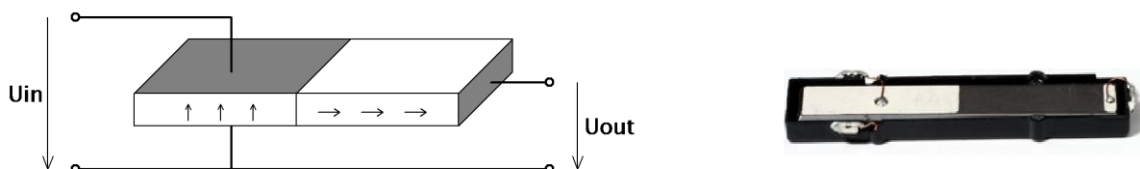
3.3 Typy piezoelektrických transformátorů

Piezoelektrický transformátor může být sestaven více způsoby. Podle způsobu sestavení a směru polarizace jednotlivých částí je lze rozdělit na čtyři typy. Přestože jsou všechny založeny na stejném principu, jsou jejich vlastnosti a parametry rozdílné. Každý z typů PT tak nalézá odlišné uplatnění. V následujícím textu budou jednotlivé typy PT popsány a bude uvedena jejich charakteristika a parametry.

3.3.1 PT Rosenova typu (Longitudinal vibration mode PT)

PT s podélnými vibracemi je často označován jako PT Rosenova typu (Rosen Type PT). Pojmenování nese po svém vynálezci Ch. A. Rosenu. Jedná se o historicky první PT, který se dočkal praktického využití.

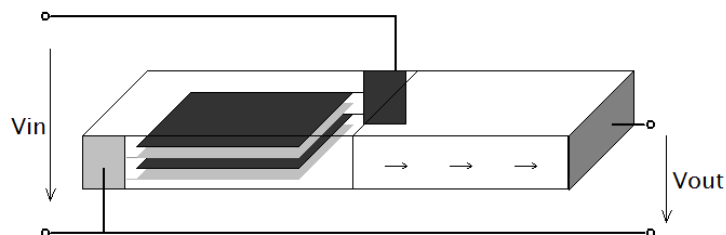
Na rozdíl od ostatních uvedených typů, skládá se tento PT z jednoho kusu piezokeramického materiálu s obdélníkovým tvarem. Rozdíl mezi vstupní částí a výstupní částí je ve směru jejich polarizace. Vstupní část PT je polarizována ve směru tloušťky, zatím co výstupní část je polarizována v podélném směru. Na obrázku 9 je naznačena konstrukce PT Rosenova typu a příklad reálného PT. Směr polarizace je na obrázku vyznačen šipkami. U tohoto typu PT je jedna elektroda společná pro vstupní i výstupní část.



Obr. 9 Konstrukce PT Rosenova typu.

Rezonanční frekvence u PT Rosenova typu bývá v rozsahu cca 50 - 150 kHz. Vzhledem ke své geometrii má tento typ malou výstupní kapacitu a velkou výstupní impedanci. Rovněž má velký napěťový převod. Díky těmto vlastnostem je vhodný pro aplikace, kde je potřeba vysoké výstupní napětí a malý proud. Používá se zejména v měničích pro CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp) výbojky pro podsvětlení LCD displejů, ionizátorech, a FED displejů (Field Emission Display). PT Rosenova typu dosahují výkonů kolem 10 W. Výkonová hustota je 5 – 10 W/cm³ [10].

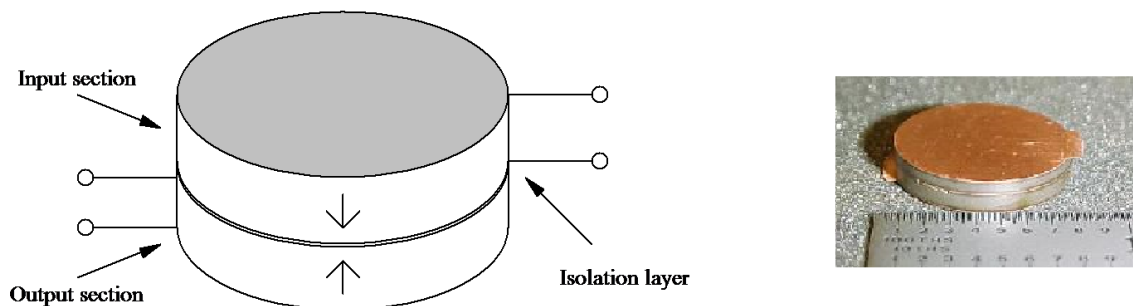
Struktura naznačená na obrázku 8 je jednovrstvá (single-layer). PT Rosenova typu se však vyrábějí i v provedení s vícevrstvou vstupní částí (multi-layer). Vícevrstvé PT dosahují vyššího převodního poměru. Napěťový převod bývá v řádu jednotek (jednovrstvé struktury) až desítek (vícevrstvé struktury). Výstupní napětí může dosahovat řádově kilovoltů. Jistou nevýhodou vícevrstvé struktury PT je zvýšení vstupní kapacity. Ta dosahuje velikosti řádově stovek nanofaradů. Jednovrstvé PT mají velikost vstupní kapacity v řádu stovek pikofaradů až jednotek nanofaradů. PT Rosenova typu s vícevrstvou strukturou je naznačen na obrázku 10.



Obr. 10 Konstrukce PT Rosenova typu s vícevrstvou strukturou.

3.3.2 PT s radiálními vibracemi (Radial vibration mode PT)

PT s radiálními vibracemi je firmou Face Electronics, jež jej vynalezla, označován jako „Transoner“. PT s radiálními vibracemi je sestaven z piezokeramických disků. Všechny elementy jsou polarizovány ve směru tloušťky. Jednotlivé disky jsou k sobě slepeny. Na obrázku 11 je naznačena konstrukce PT s radiálními vibracemi a příklad reálného PT.

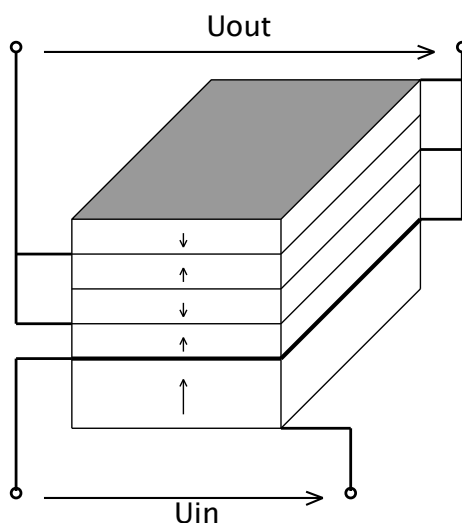


Obr. 11 PT s radiálními vibracemi (Transoner).

Vstupní i výstupní část PT mohou být opět vícevrstvé, pro dosažení požadovaného napěťového převodu. Rovněž může být jedna elektroda společná pro vstupní i výstupní část. Pokud je vyžadováno galvanické oddělení, lze mezi vstupní a výstupní část vložit izolační vrstvu. Rezonanční frekvence u tohoto typu bývá v rozsahu cca 50 – 250 kHz. Výkonová hustota dosahuje hodnoty až $40\text{W}/\text{cm}^3$ a výstupní výkon může přesahovat 100 W.[10][11]

3.3.3 PT s tloušťkovými vibracemi (Thickness vibration mode PT)

Podobně jako v předchozím případě, skládá se PT s tloušťkovými vibracemi z plochých piezokeramických elementů. Vstupní část PT je jednovrstvá a je polarizována ve směru tloušťky. Výstupní část je více vrstvá a každá vrstva je rovněž polarizována ve směru tloušťky. Výstupní vrstvy jsou však orientovány tak, aby je bylo možno zapojit paralelně. Na obrázku 12 je naznačena konstrukce PT s tloušťkovými vibracemi.



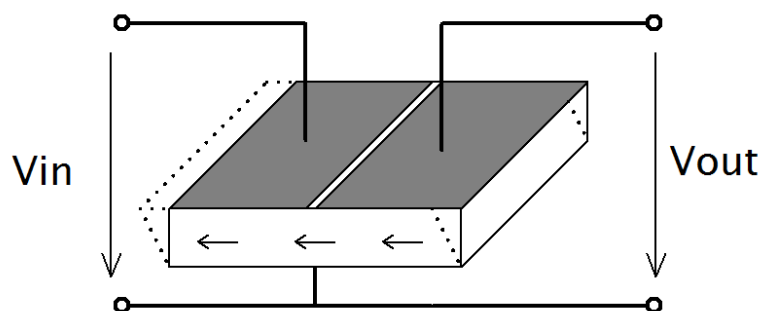
Obr. 12 Konstrukce PT s tloušťkovými vibracemi.

Podobně jako v případě PT s radiálními vibracemi je střídavé elektrické pole aplikováno na budící piezoelement paralelně se směrem polarizace. Frekvence budícího napětí je v případě tloušťkového vibračního módu vyšší, než u radiálních vibrací. Mezi vstupní a výstupní část PT může být opět vložena izolační vrstva.

Převodní napěťový poměr je v tomto případě úměrný poměru tloušťky jednovrstvé vstupní části a vícevrstvé výstupní části. Tyto PT snižují vstupní napětí. Díky tomu, že výstupní část je vícevrstvá (paralelní kombinace jednotlivých vrstev), je výstupní kapacita PT vysoká. To vede ke snížení výstupní impedance a PT je tak schopen dodat do zátěže velký proud při malém napětí. Rezonanční frekvence se u tohoto typu PT pohybuje v řádu stovek kilohertzů. Výkonová hustota dosahuje hodnoty $50\text{W}/\text{cm}^3$ a výstupní výkon může přesahovat 50 W. [10]

3.3.4 PT pracující ve střížném módu (Thickness-shear vibration mode PT)

Tyto PT využívají střížného vibračního módu piezoelektrického elementu. Na rozdíl od výše zmíněných typů je zde střídavé elektrické pole aplikováno kolmo ve směru polarizace piezoelektrického elementu. Tím jsou v piezoelektrickém elementu vybudeny střížné kmity (Thickness-shear vibration). Tyto kmity se přenáší do výstupní části PT. Princip konstrukce PT pracujícím se střížným módu je na obrázku 13. Výstupní část PT může mít několik sekcí pro získání různých sekundárních napětí.



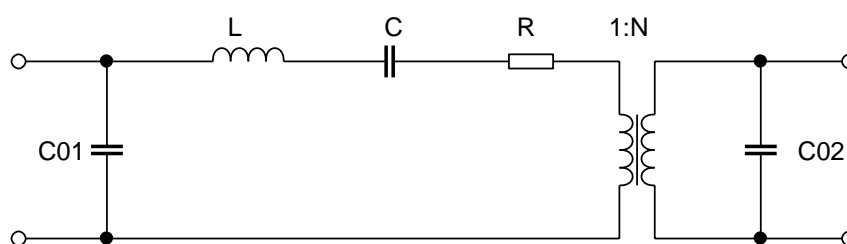
Obr. 13 konstrukce PT pracujících ve střížném módu.

Tento typ PT může dosahovat výkonu přes 100 W. Rezonanční frekvence střížných kmitů je v řádu stovek kilohertzů. Napět'ový převod je menší než jedna. [10]

Tento typ PT není v praxi příliš využíván. Možným důvodem může být složitější výroba. Pracovní elektrody PT umístěny paralelně se směrem polarizace pro dosažení střížných kmitů. Pro výrobu PT je tak potřeba další sady elektrod pro polarizaci piezoelementu. Tyto elektrody musí být kolmé ke směru polarizace. Experimentální sestava PT se střížnými kmity a více výstupy včetně popisu dosažených vlastností je popsána v [12].

3.4 Náhradní schéma piezoelektrického transformátoru

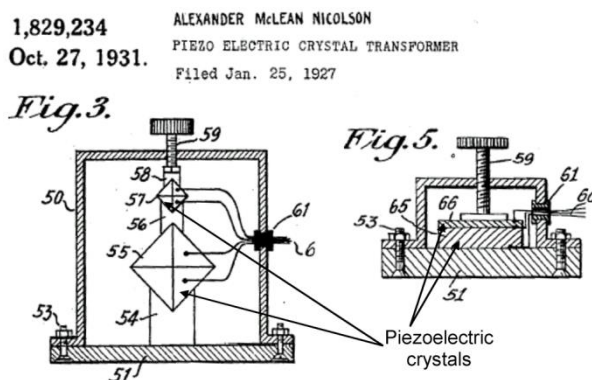
Podobně jako v případě samotného piezoelementu, lze piezoelektrický transformátor popsat pomocí náhradního schématu. Zjednodušené náhradní schéma PT je na obrázku 14.



Obr. 14 Zjednodušené náhradní schéma PT.

4 Historie a současný stav v oblasti piezoelektrických transformátorů

První pokusy o využití piezoelektrického jevu pro přenos energie se objevily pravděpodobně v polovině 30. let 20. Století. Prvním, kdo se zabýval výzkumem v této oblasti, byl Alexander McLean Nicolson. Ve svých pokusech používal jako piezoelektrický materiál krystaly Seignettovy soli. Dva krystaly byly umístěny do rámu, kde byly staženy proti sobě. Tím vlastně vznikl první sestrojený piezoelektrický transformátor. Tyto pokusy vyústily v podání tří patentů. Vzhledem ke špatným vlastnostem nezaznamenal tento objev žádné praktické využití a velký ohlas. Na obrázku 15 je náčrt reprezentující první piezoelektrický transformátor.

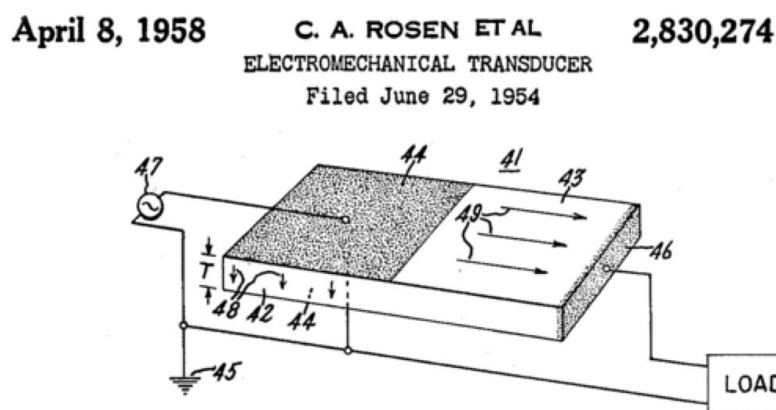


Obr. 15 Náčrt prvního piezoelektrického transformátoru sestaveného Alexandrem McLean Nicolsonem. [13]

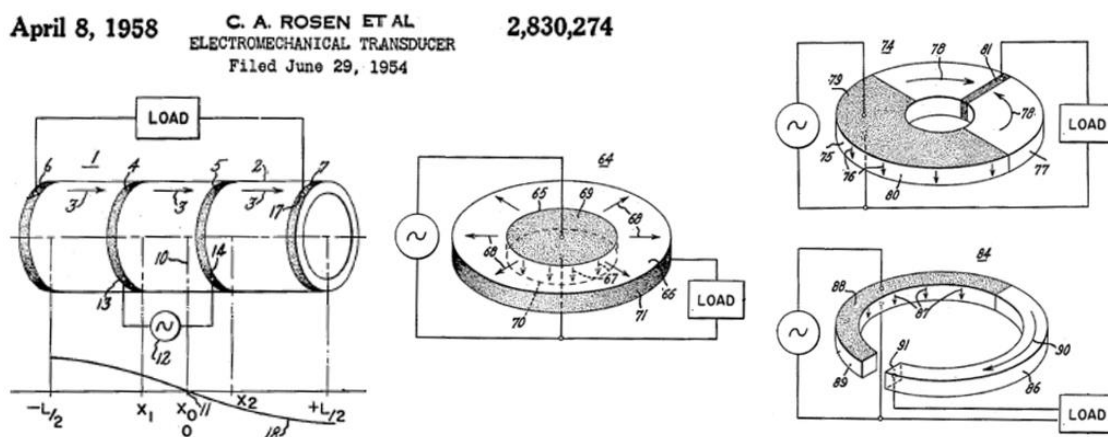
Během druhé světové války byl objeven Barium Titanát (BaTiO_3), který měl lepší piezoelektrické vlastnosti než přírodní krystaly. Tento materiál spolu s Nicolsonovými poznatky byly využity Charlesem Abrahamem Rosenem. Rosen spolu se svým týmem vyvinul PT, který se později dočkal patentu. Na rozdíl od předešlých pokusů byl Rosenův PT tvořen pouze jedním kusem materiálu obdélníkového tvaru. Rozdělení vstupní a výstupní části PT bylo zajištěno rozdílnou polarizací materiálu. Toto uspořádání PT se později dočkalo praktického využití a je to pravděpodobně nejrozšířenější typ PT. Náčrt PT prezentovaného Ch. A. Rosenem je na obrázku 16. Rosen patentoval i další PT s prstencovým či kruhovým tvarem. U všech byl předěl mezi částmi transformátoru tvořen rozdílnou polarizací.

Nevýhodou Rosenova PT je fakt, že vstupní a výstupní část PT jsou oblasti s různým směrem polarizace (vstupní část je polarizována ve směru tloušťky a výstupní část je polarizována podélně). V místě styku obou oblastí dochází k mechanickému namáhání

materiálu a může docházet k mechanickým poruchám. V této době se pro piezoelektrické transformátory používal BaTiO₃ jako jediný komerčně dostupný materiál. V 60. letech 20. století byla objevena PZT keramika. Zároveň byl odstraněn problém s rozhráním u PT Rosenova typu. Tento problém byl odstraněn patentem H. Jaffa a D. A. Berlincourta. Ti sestavili PT z disku z PZT keramiky, který byl v celé oblasti polarizován pouze ve směru tloušťky. Tento patent byl zaměřen na oblast keramických rezonátorů, ale tato sestava byla použitelná i pro PT. Tato topologie byla dále intenzivně zkoumána, avšak více s o hledem na použití pro piezoelektrické keramické filtry a rezonátory.



Obr. 16 Piezoelektrický transformátor představený Charlesem Abrahamem Rosenem v roce 1954.[14]

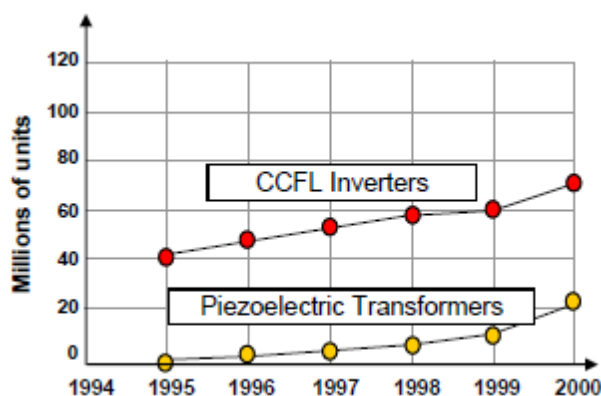


Obr. 17 Další návrhy piezoelektrických transformátorů prezentované Ch. A. Rosenem v roce 1954.[14]

V roce 1972 byla D. A. Berlincourtem patentována první specifická aplikace využívající PT „Starter and ballast for gaseous discharge lamps“. V tomto patentu Berlincour navrhl různé tvary a sestavy PT vyrobené z jednoho kusu materiálu a polarizované ve směru tloušťky.

Použití PT však stále nebylo výhodné z důvodů nedostatku materiálů, které by mohly pracovat s malými ztrátami a velkými amplitudami. Tato situace se zlepšila s příchodem tvrdých PZT materiálů. Tyto materiály mají velkou mechanickou jakost a snášejí velké amplitudy. S příchodem tvrdé PZT keramiky se začaly o tuto problematiku zajímat japonské a americké firmy. Objevily se snahy využít PT ke generování vysokého napětí. Vznikly tak návrhy na využití PT v zapalování malých spalovacích motorů, generování potřebného napětí pro černobílé obrazovky, spínání tyristorů a MOSFET tranzistorů apod. Vzhledem k stále ještě vysoké ceně PZT keramiky, křehkosti, problémům s montáží a objemností budících obvodů se žádná z těchto aplikací nedočkala úspěchu a komerčního využití.

V 90. letech 20. století převážně japonské společnosti, díky dalšímu vývoji v oblasti materiálů a technologií, začaly znovu zvažovat využití PT. Hlavní oblastí se stalo použití PT pro generování vysokého napětí pro CCFL výbojky používané pro podsvícení LCD displejů. Vzhledem ke snaze zmenšovat přístroje, dělat je lehčí a tenčí zaznamenaly PT velký rozvoj v této oblasti. Díky masovější výrobě došlo ke snížení cen materiálů a PT zaznamenaly boom ve výrobě. Podle odhadů byl v roce 2000 každý třetí až čtvrtý měnič pro CCFL lampy osazen PT. Tento nový trend dobře ilustruje obrázek 18. Zde je porovnání počtu PT a počtu vyrobených měničů pro CCFL výbojky.



Obr. 18 Počet vyrobených měničů pro CCFL a počet vyrobených PT. [15]

Spolu s rozšířením PT a zvládnutím know-how se začaly projevovat snahy o využití PT i v jiných oblastech, než jen měniče pro CCFL. Snahou bylo uplatnit PT také v oblasti AC-DC měničů pro nabíječky mobilních přístrojů a napájecí adaptéry, případně také v DC-DC měničích. U těchto typů aplikací je však požadován větší výkon a výstupní napětí nižší než vstupní napětí (step-down PT). Po roce 2000 dochází k rozšíření LED technologie pro podsvětlení displejů a CCFL jsou na ústupu. Spolu s tím ustupuje poptávka po PT

Rosenova typu, které byly svými vlastnostmi vhodné pro CCFL měniče. Jejich typickou vlastností je vyšší výstupní napětí než vstupní (step-up PT) a malý výkon (cca 5 až 10 W). Vzhledem k nevhodnosti PT Rosenova typu pro použití v AC-DC a DC-DC měničích dochází k dalšímu výzkumu v této oblasti. Hlavními představiteli v tomto směru vývoje jsou japonská společnost NEC a americká společnost Face Electronic.

Společnost NEC přichází s konceptem PT pracujícím v tloušťkově vibračním módu (Thickness vibration mode), který má vrstvenou konstrukci. Mezi vstupní a výstupní částí PT je vložena izolační vrstva. Výstupní část PT je vícevrstvá. Tyto PT pracují s velmi vysokou rezonanční frekvencí (1 MHz a více). Nevýhodou těchto PT je velké množství nechtěných parazitních vibračních módů v blízkosti rezonanční frekvence. Důsledkem jsou horší vlastnosti PT.

Společnost Face Electronics přichází s PT pracujícím s radiálním vibračním módem, který má vrstvenou konstrukci. Tento typ PT nese označení Transoner® (Transoner je označení registrované firmou Face Electronics, jedná se o zkratku Transducer - transformer). Vstupní i výstupní část těchto PT může být jedno nebo vícevrstvá. Mezi vstupní a výstupní část lze vložit izolační vrstvu. Rezonanční frekvence těchto PT je v rozsahu cca 50 až 200 kHz. Dosahují vysoké účinnosti a výstupní výkony dosahují desítek wattů. [15]

5 Určení prvků náhradního schématu piezoelektrického transformátoru

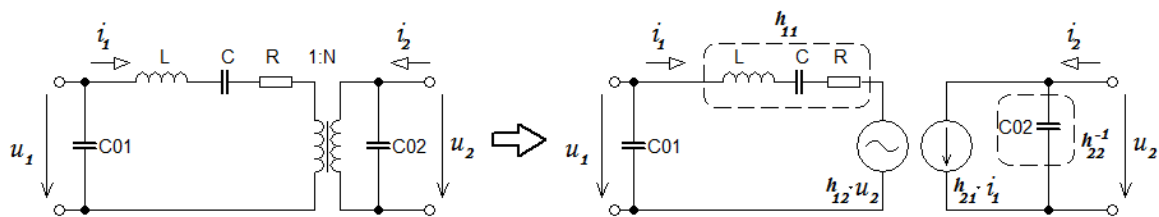
V této části práce bude popsána metoda určení prvků náhradního schématu PT z měření PT ve stavu naprázdno a nakrátko. Budou zde odvozeny vztahy pro výpočet jednotlivých prvků náhradního schématu. Rovněž zde budou porovnány výsledky simulací získaného náhradního schématu a jejich porovnání s naměřenými hodnotami na reálném vzorku PT.

Jak bylo popsáno v kapitole 3.4, je PT možno popsat náhradním schématem zobrazeným na obrázku 14. Alespoň přibližná znalost náhradního schématu konkrétního PT je nutná pro získání alespoň základní představy o daném PT (rezonanční frekvence, parazitní kapacity, převod) a pro následný návrh budících obvodů PT. Znalost jednotlivých prvků náhradního schématu je rovněž nutná pro simulace chování PT v obvodu.

Jednotlivé prvky náhradního schématu mají vazbu na konkrétní parametry použitého piezoelektrického materiálu. U sériově vyráběných PT lze ve většině případů informace o náhradním schématu dohledat u výrobce. Jiná situace nastává v okamžiku, kdy byl PT vyroben jako pokusný vzorek nebo prototyp. Z hlediska uživatele, se v tomto okamžiku stává nutností určit prvky náhradního schématu pokud možno bez hluboké znalosti použitých materiálů či jejich parametrů.

5.1 Úprava náhradního schématu PT

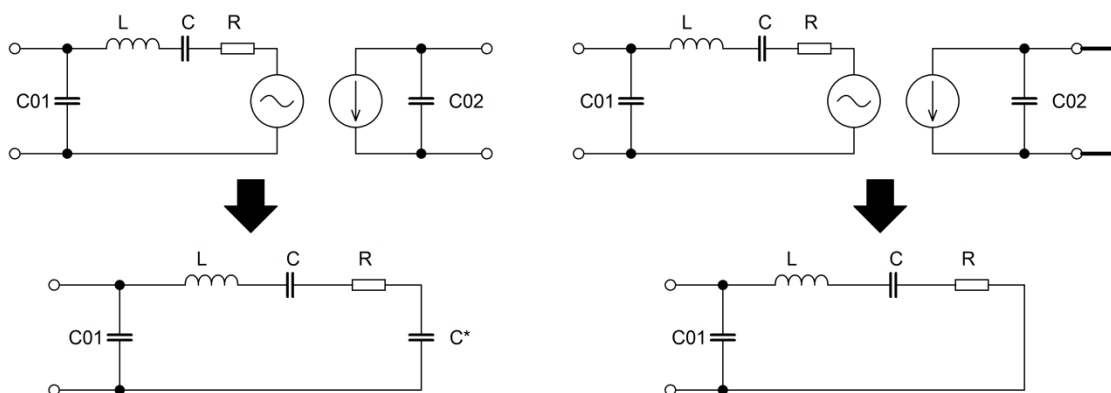
Ve zjednodušeném náhradním schématu popsaném v kapitole 3.4 (obr. 14) je přenos energie mezi primární a sekundární stranou realizován pomocí ideálního transformátoru s převodem N . takovýto model není příliš vhodný pro simulaci. Náhradní schéma PT lze rovněž realizovat jako dvojbran popsaný pomocí H-matice. Takto upravené náhradní schéma je na obrázku 19.



Obr. 19 Upravené náhradní schéma PT.

5.2 Piezoelektrický transformátor ve stavu naprázdno a nakrátko

Pokud budeme PT provozovat ve stavu nakrátko nebo naprázdno, lze upravit náhradní schéma PT podle obrázku 20.



Obr. 20 Úprava náhradního schématu PT pro stav naprázdno a nakrátko.

V případě stavu naprázdno je kapacita C^* přepočtená kapacita C_{02} . Tuto kapacitu lze určit ze vztahu (5.2.1).

$$C^* = \frac{C_{02}}{h_{12} \cdot h_{21}} \quad (5.2.1)$$

Pro upravené náhradní schéma PT pro stav nakrátko (podle obrázku 20) lze odvodit vztah (5.2.2) pro sériovou rezonanci nakrátko f_{ks}

$$f_{ks} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.2.2)$$

a vztah (5.2.3) pro paralelní rezonanci nakrátko f_{kp}

$$f_{kp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 + \frac{C}{C_{01}}} \quad (5.2.3)$$

Rovněž pro upravené náhradní schéma PT pro stav naprázdno (podle obrázku 20) lze odvodit vztah (5.2.4) pro sériovou rezonanci naprázdno f_{0s}

$$f_{0s} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 + \frac{C}{C^*}} \quad (5.2.4)$$

Z výše uvedených vztahů a ze znalosti rezonančních frekvencí nakrátko f_{ks} a f_{kp} a sériové rezonanční frekvence naprázdno f_{0s} lze určit prvky náhradního schématu L , C a C^* .

5.3 Funkční vzorek piezoelektrického transformátoru

Pro první experimenty s PT bylo potřeba sestavit funkční vzorek piezoelektrického transformátoru. Pro tento účel byly použity, komerčně velmi dobře dostupné, piezokustické měniče s mosaznou membránou. Vlastnosti těchto piezokeramických elementů nejsou sice příliš dobré, ale pro prvotní experimenty byly dostatečné. Mosazná membrána u těchto piezokeramických elementů slouží jako jedna z elektrod. Její tloušťka a tuhost však měly neblahý vliv na účinnost prvních sestavených PT. Z toho důvodu byla tloušťka mosazné membrány snížena (částečným odleptáním). Funkční vzorky PT sestavené z takto upravených piezokeramických elementů už dosahovaly příznivějších výsledků.

Funkční vzorek PT, použitý při experimentu s určováním prvků náhradního schématu, vznikl slepením dvou upravených piezokeramických elementů, mezi které byla vložena izolační vrstva. Parametry vzniklého funkčního vzorku PT jsou uvedeny v tabulce I.

Tabulka I. Parametry sestaveného funkčního vzorku PT

Tloušťka vstupní/výstupní vrstvy	0,25 mm
Celková tloušťka PT	0,68 mm
Průměr	25 mm
Rezonanční frekvence	92 kHz
Maximální účinnost	72 %
Napěťový převod (zisk) naprázdno	3,5

Na funkčním vzorku PT byly ve stavu naprázdno a nakrátko změřeny parametry, které jsou nezbytné pro výpočet prvků náhradního schématu PT. Tyto parametry a jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce II. Velikost odporu R byla určena z velikosti vstupního proudu (při známém vstupním napětí) při sériové rezonanci. Velikost kapacity byla určena ze závislosti vstupního proudu na frekvenci, mimo oblast rezonance.

Tabulka II. Změřené parametry pro výpočet prvků náhradního schématu PT

f_{0s}	Sériová rezonance naprázdno	87 kHz
f_{ks}	Sériová rezonance nakrátko	81,5 kHz
f_{kp}	Paralelní rezonance nakrátko	88,3 kHz
C_{01}	Vstupní kapacita	31,49 nF
R	Odpor v rezonančním obvodu	12 Ω

5.4 Výpočet prvků náhradního schématu PT

Ze vztahu (5.2.2) lze vyjádřit rovnici:

$$LC = \frac{1}{(2\pi f_{ks})^2} \quad (5.4.1)$$

Dosazením rovnice (5.4.1) do vztahu (5.2.3) vyplývá vztah (5.4.2), z něhož lze spočítat velikost kapacity C v rezonančním obvodu:

$$C = C_{01} \left[\left(\frac{f_{kp}}{f_{ks}} \right)^2 - 1 \right] \quad (5.4.2)$$

Při znalosti kapacity C lze úpravou rovnice (5.4.1) odvodit vztah (5.4.3) pro výpočet indukčnosti L v sériovém rezonančním obvodu:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_{ks})^2 C} \quad (5.4.3)$$

Nyní při znalosti hodnot L a C lze úpravou vztahu (5.2.4) získat rovnici (5.4.4) pro výpočet přepočtené kapacity C*:

$$C^* = \frac{1}{(2\pi f_{0s})^2 LC - 1} \quad (5.4.4)$$

Při znalosti prvků L, C, R, C₀₁ a C* lze simulovat upravené náhradní schéma podle obrázku 17. Dále je potřeba přepočítat kapacitu C* na kapacitu C₀₂. K tomu je potřeba znát parametry h₁₂ a h₂₁. Parametr h₁₂ udává poměr mezi napětím na kapacitě C* a napětím na kapacitě C₀₂:

$$h_{12} = \frac{u_{C^*}}{u_{C_{02}}} \quad (5.4.5)$$

Parametr h₂₁ udává (ve stavu nakrátko) poměr mezi proudem tekoucím sériovým rezonančním obvodem (tvořeným prvky R, L a C) i_{RLC} a výstupním zkratovým proudem i_{2k}:

$$h_{21} = \frac{i_{RLC}}{i_{2k}} \quad (5.4.6)$$

Hodnoty napětí u_{C*} a proudu i_{RLC} lze získat simulací upraveného náhradního schématu PT podle obrázku 20. Poté je již možno ze vztahu (5.2.1) vyjádřit kapacitu C₀₂:

$$C_{02} = C^* \cdot h_{12} \cdot h_{21} \quad (5.4.7)$$

Dosažením hodnot z tabulky II, naměřených na funkčním vzorku PT, do předcházejících vztahů (5.4.1) až (5.4.7) byly vypočteny všechny prvky náhradního schématu. Hodnoty prvků náhradního schématu funkčního vzorku PT zobrazuje tabulka III.

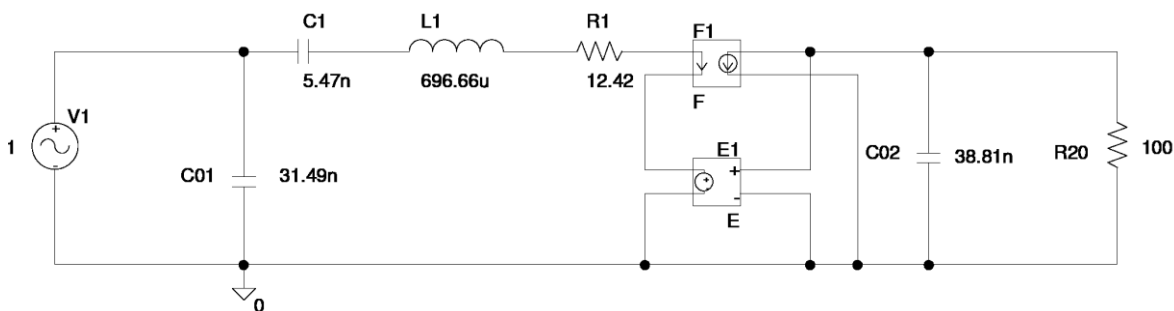
Tabulka III. Hodnoty prvků náhradního schématu funkčního vzorku PT.

Prvek:	Poznámka:	Hodnota:
C_{01}	Změřeno	31,49 nF
C_{02}	Vypočteno (5.4.7)	38,81 nF
R	Změřeno	12,42 Ω
L	Vypočteno (5.4.3)	696,66 μH
C	Vypočteno (5.4.2)	5,47 nF
h_{12}	Vypočteno (5.4.5)	1,037
h_{21}	Vypočteno (5.4.6)	0,954

5.5 Simulace náhradního schématu PT

Na funkčním vzorku PT bylo provedeno měření ve stavu naprázdno a nakrátko. Pro každý tento stav byla změřena frekvenční závislost vstupního proudu, fázového posuvu mezi vstupním napětím a proudem. Pro stav nakrátko byla změřena frekvenční závislost výstupního proudu. Pro stav naprázdno byla změřena frekvenční závislost výstupního napětí. Z těchto měření byly získány potřebné hodnoty pro výpočet jednotlivých prvků náhradního schématu PT. Rovněž byly změřeny frekvenční charakteristiky PT při zatížení.

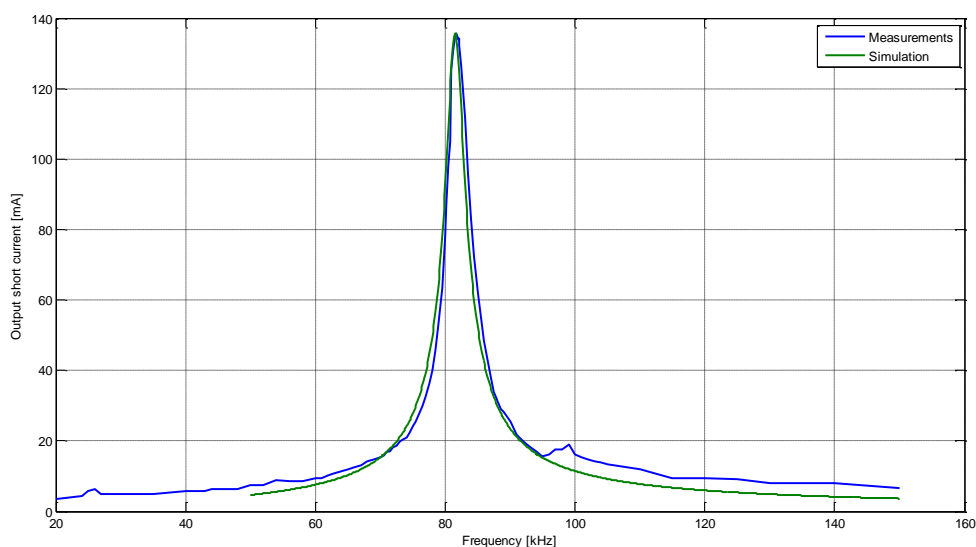
Tyto naměřené průběhy pak byly porovnány s výsledky simulací náhradního schématu PT. Simulace byly provedené pomocí programu PSpice. Napětím řízený zdroj napětí, popsáný parametrem h_{12} , byl realizován blokem ENOM (E1 ve schématu). Proudem řízený zdroj proudu, popsáný parametrem h_{21} , byl realizován pomocí bloku FNOM (F1 ve schématu). Výsledné simulované schéma z programu PSpice je na obrázku 21.



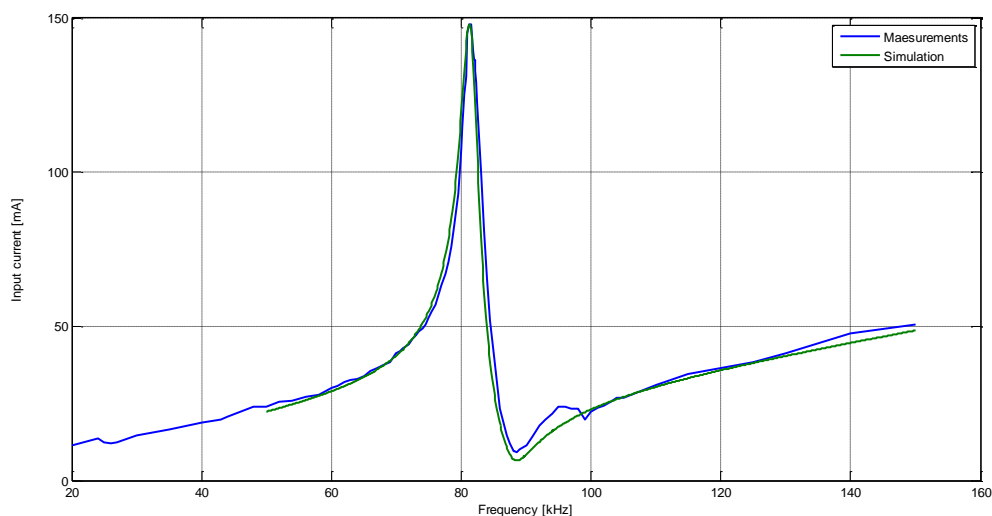
Obr. 21 Simulované náhradní schéma PT v programu PSpice.

V programu PSpice bylo simulováno sestavené schéma podle obrázku 21. Simulace byly provedeny pro různou zátěž a pro stav naprázdno a nakrátko. Při simulacích byla měřena amplitudová a frekvenční charakteristika pro frekvence v rozsahu od 50 kHz do 150 kHz. Výsledné frekvenční charakteristiky byly porovnány s charakteristikami naměřenými na funkčním vzorku PT.

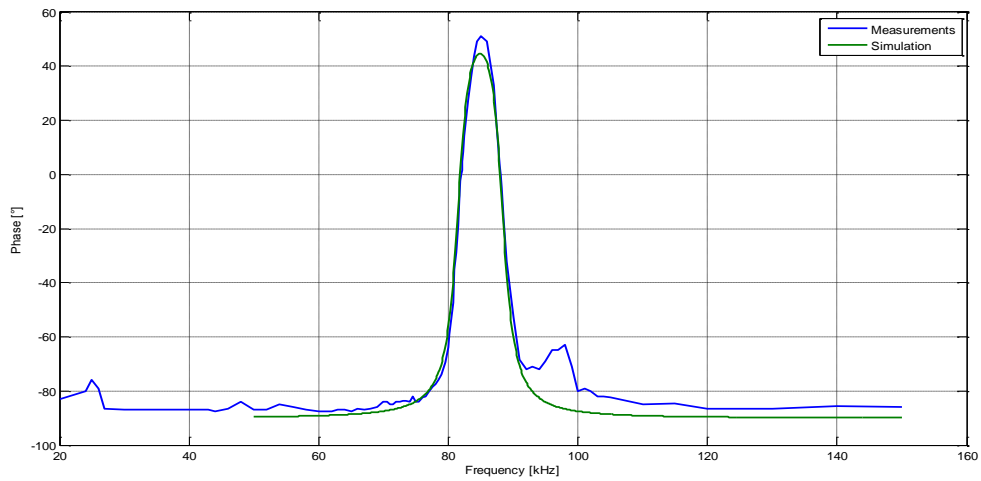
Porovnání simulací a chování reálného vzorku PT pro stav nakrátko je na obrázcích 22 až 24. Porovnání pro stav naprázdno je na obrázcích 25 až 27. Rovněž byly provedeny simulace pro různé zátěže PT. Na obrázcích 28 až 30 jsou výsledky pro zátěž 25 Ω . Výsledky pro další hodnoty zátěží (50 Ω , 75 Ω , 100 Ω) jsou obsaženy v příloze B.



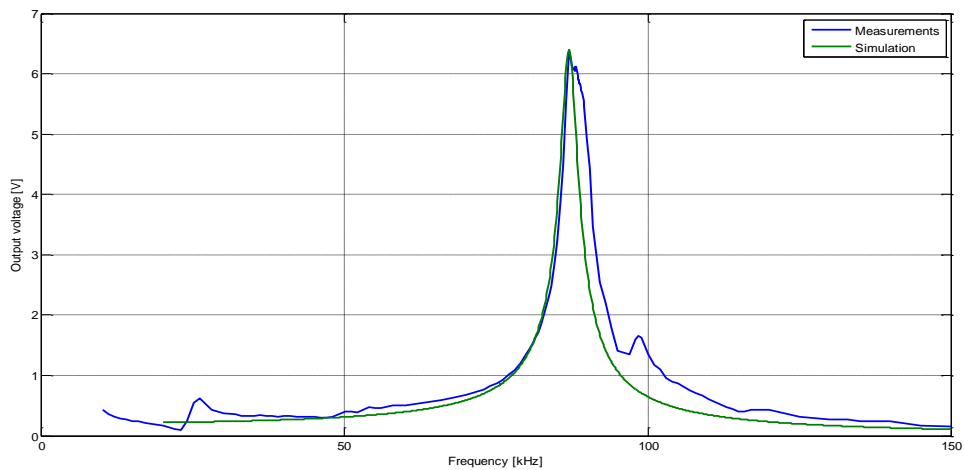
Obr. 22 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav nakrátko – výstupní proud.



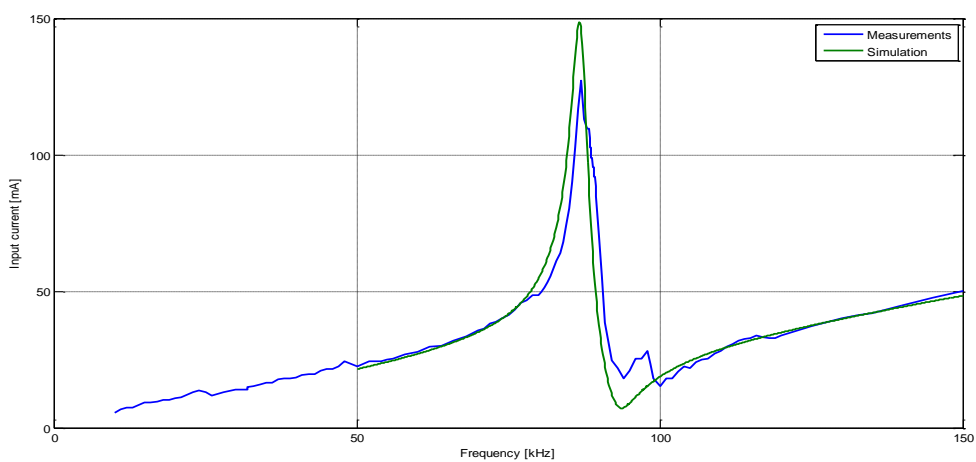
Obr. 23 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav nakrátko – vstupní proud.



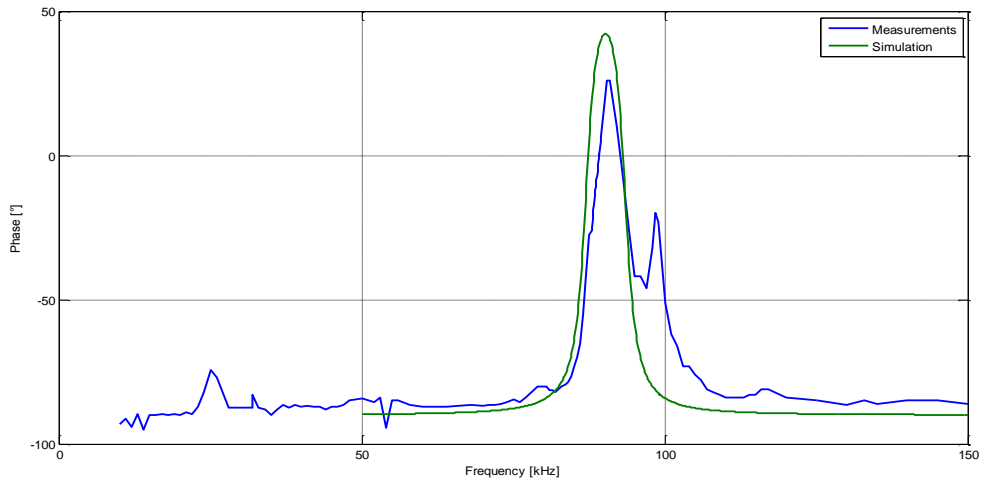
Obr. 24 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav nakrátko – fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem.



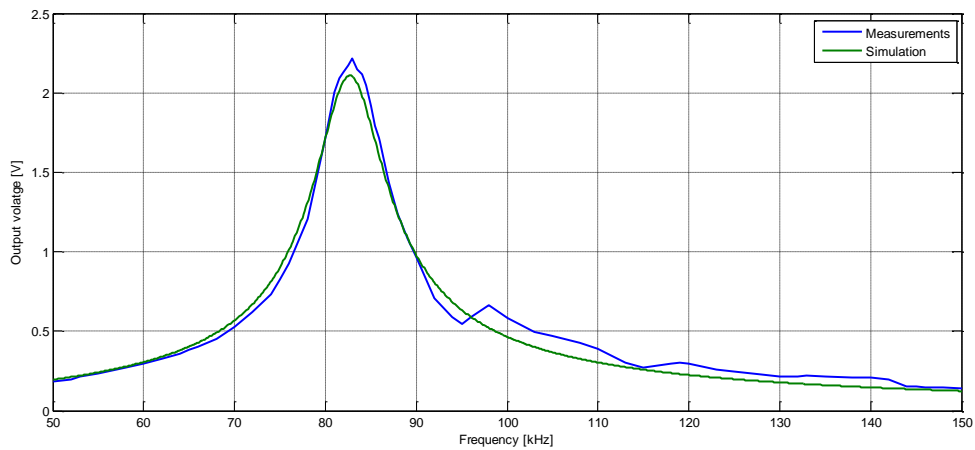
Obr. 25 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav naprázdno – výstupní napětí.



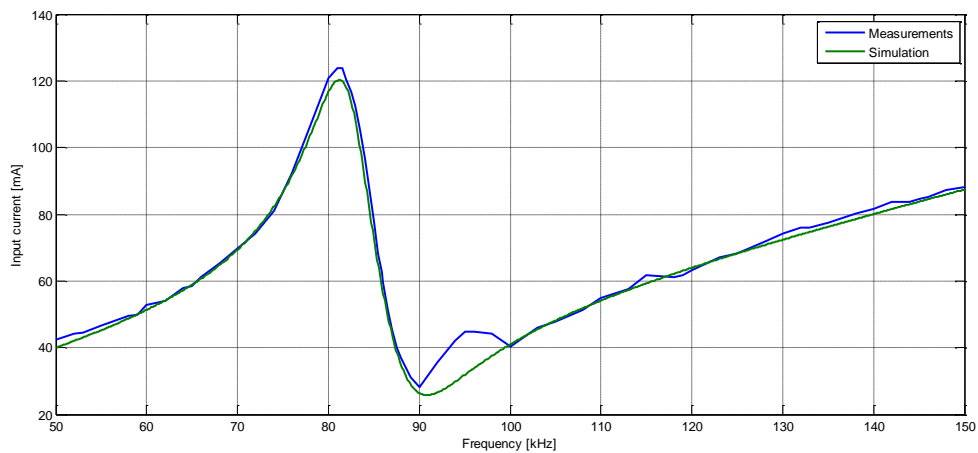
Obr. 26 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav naprázdno – vstupní proud.



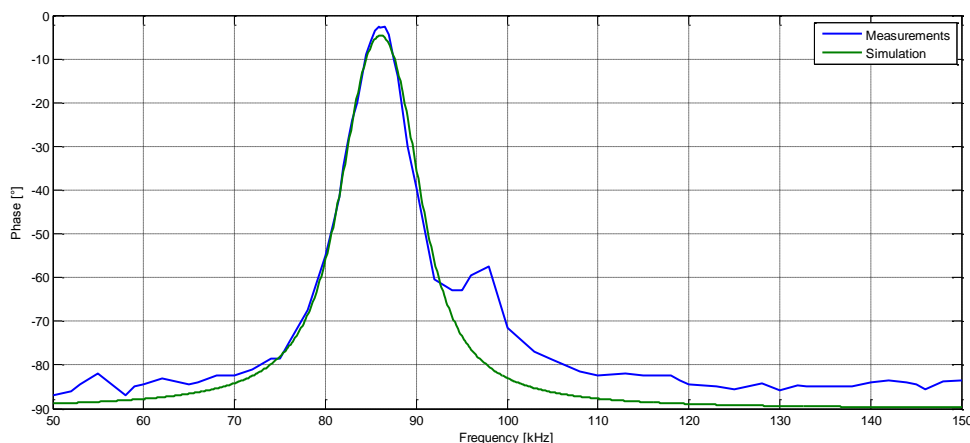
Obr. 27 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - stav naprázdno – fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem.



Obr. 28 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - zátěž 25 Ω - výstupní napětí.



Obr. 29 Porovnání simulace a reálného vzorku PT - zátěž 25 Ω - vstupní proud.



Obr. 30 Porovnání simulace a reálného vzorku PT – zátěž 25Ω - fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem.

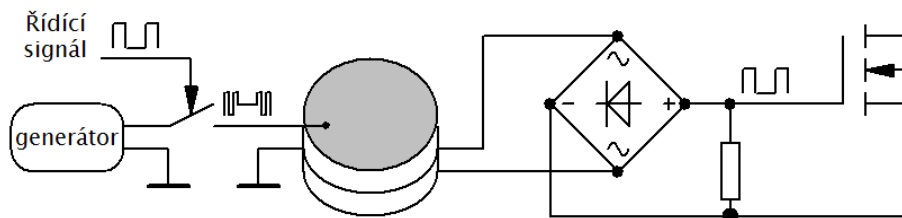
Jak je patrné z předešlých obrázků, popisuje náhradní schéma vcelku dobře chování reálného PT ve všech stavech. Nejlepší shody simulovaného schématu a reálného vzorku PT je vždy dosaženo v okolí rezonanční frekvence. Na této frekvenci je PT typicky provozován. Z naměřených průběhů je rovněž patrné, že reálný vzorek PT vykazoval jistou parazitní rezonanci na frekvenci cca 95 kHz. Tato parazitní rezonance je spíše vadou reálného vzorku PT a náhradní schéma ji nezahrnuje.

Metodou popsanou na začátku této kapitoly lze z naměřených hodnot při rezonanci naprázdno a nakrátko vcelku jednoduše stanovit náhradní schéma konkrétního PT. Takto sestavené náhradní schéma je dostatečné pro získání základní představy o chování daného PT a pro jeho simulaci.

6 Využití piezoelektrických transformátorů pro buzení MOSFET tranzistorů

Další oblast, ve které mohou piezoelektrické transformátory nalézt uplatnění, jsou budící obvody MOSFET (případně IGBT) tranzistorů. V případě, že elektroda source tranzistoru není spojena se zemí (High-Side Switch), je potřeba budit MOSFET tranzistor ze zdroje s galvanicky odděleným výstupním napětím. Takovým zdrojem může být piezoelektrický transformátor s izolovanou výstupní částí.

Myšlenka použití PT pro spínání tranzistorů příp. tyristorů se v minulosti už objevila vícekrát. S drobnými obměnami ji lze nalézt například v [16][17][18]. Ve všech případech se jedná o buzení MOSFET tranzistoru přímo z PT. Princip takového řešení je naznačen na obrázku 31.



Obr. 31 Princip přímého buzení MOSFET tranzistoru pomocí PT.

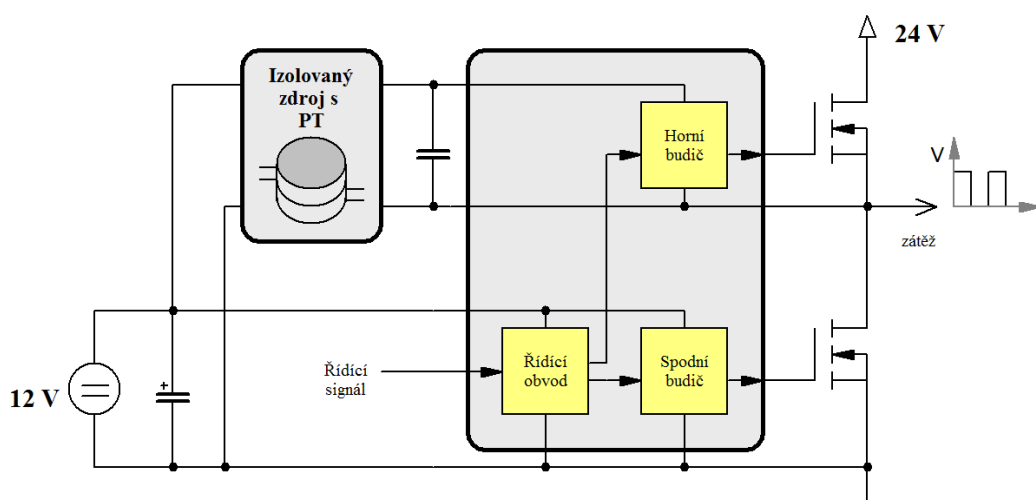
Výstupní napětí je usměrněno a připojeno k řídicí elektrodě tranzistoru. Je-li potřeba tranzistor sepnout, je ke vstupní straně PT připojen zdroj střídavého napětí (jehož frekvence musí být shodná s rezonanční frekvencí PT). Pro buzení PT je použita ON-OFF modulace budícího napětí PT. Největší nevýhodou řešení, naznačeného na obrázku 29, jsou dlouhé zapínací a vypínací doby v řádu stovek mikrosekund (v závislosti na rezonanční frekvenci PT) [17]. Toto řešení není vhodné pro rychlé spínání, pouze pro trvalé spínání zátěže. Určitého zrychlení zapínání tranzistoru lze dosáhnout použitím PT s vyšší rezonanční frekvencí. V dalším textu budou popsány navržené způsoby využití PT pro potřeby buzení MOSFET tranzistorů

6.1 Napájení budícího obvodu pomocí piezoelektrického transformátoru

Běžný způsob buzení horního tranzistoru je použití integrovaného budiče, který je napájen z nábojové pumpy, nebo z pomocného zdroje s galvanicky odděleným výstupním napětím. V případě použití nábojové pumpy (bootstrap capacitor) je napájení budiče hrazeno pouze z předem nabitého kondenzátoru. Kondenzátor se dobíjí v době, kdy je

tranzistor vypnutý. Velkou nevýhodou tohoto řešení, je omezená doba sepnutí tranzistoru. Po určité době musí dojít k vypnutí tranzistoru, aby mohl být kondenzátor znovu dobit. S takovým řešením tedy nelze dosáhnout střídavy spínání 100 %. Tento nedostatek lze odstranit použitím pomocného zdroje s galvanicky odděleným výstupním napětím. V dalším textu je popsán možný způsob takového provedení s využitím PT a výsledky, které byly během testování dosaženy.

V tomto případě slouží PT jako pomocný zdroj s galvanicky odděleným výstupním napětím. PT v tomto případě nezajišťuje přenos řídicího signálu. Řídicí signál lze přenášet pomocí optoelektrické vazby, nebo pomocí tzv. level schifteru. Blokové schéma takového řešení využitého v topologii polovičního můstku (half-bridge convertor) je na obrázku 32.

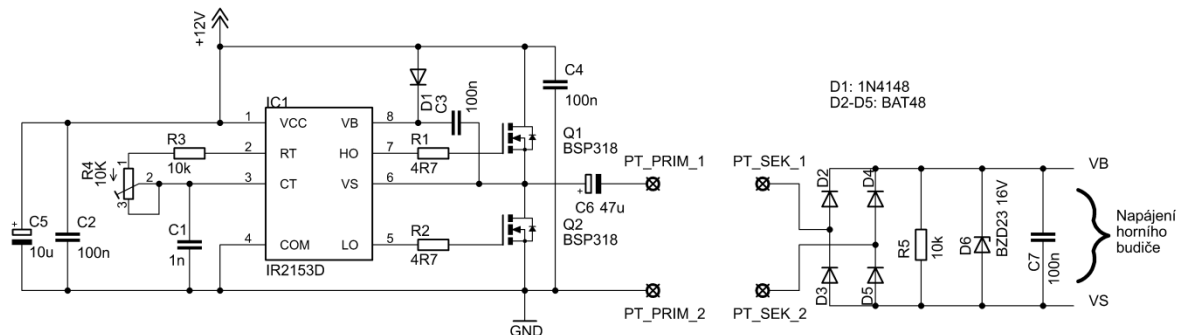


Obr. 32 Napájení horního budiče pomocí PT v topologii polovičního můstku.

Podle obrázku 32 byl sestaven funkční vzorek testovacího měniče pro ověření vlastností navrženého řešení. Jedná se o topologii polovičního můstku se dvěma MOSFET tranzistory s kanálem typu N (IRF540N) [19]. Pro jejich buzení byl využit integrovaný budicí obvod IRS21844 [20]. Vybraný obvod obsahuje budič horního i spodního tranzistoru.

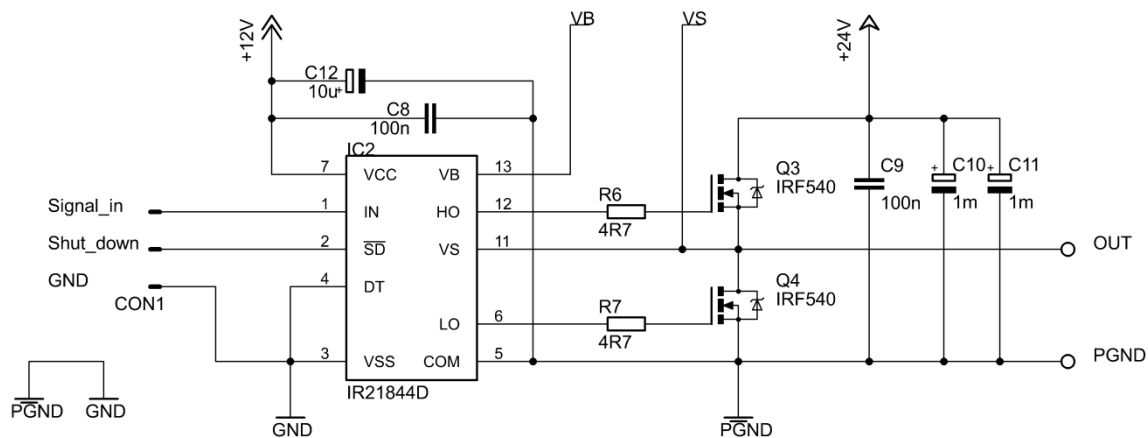
Pro napájení horního budiče MOSFET tranzistoru byl sestaven pomocný zdroj s PT s galvanicky oddělenou výstupní částí. Byl využit vzorek PT popsáný v kapitole 5.3 (parametry viz str. 28). Schéma zapojení pomocného zdroje je na obrázku 33. Primární část PT je připojena mezi svorky PT_PRIM_1 a PT_PRIM_2. Sekundární část PT je připojena mezi svorky PT_SEK_1 a PT_SEK_2. Pro jednoduchost je PT buzen napětím s obdélníkovým průběhem. Toto napětí je k PT připojeno přes vazební kondenzátor C6. Trimrem R4 lze nastavit frekvenci primárního napětí PT. Tuto frekvenci je potřeba nastavit

do blízkosti rezonanční frekvence PT. Sekundární napětí PT je dvojcestně usměrněno. Vzhledem k frekvenci výstupního napětí z PT (cca 90 kHz) a nízkým úbytkům napětí je využit usměrňovač ze Schottkyho diod. Usměrněné výstupní napětí (ve schématu svorky VB a VS) je použito k napájení horního budiče obvodu IRS21884.



Obr. 33 Pomocný zdroj s PT s galvanicky odděleným výstupním napětím.

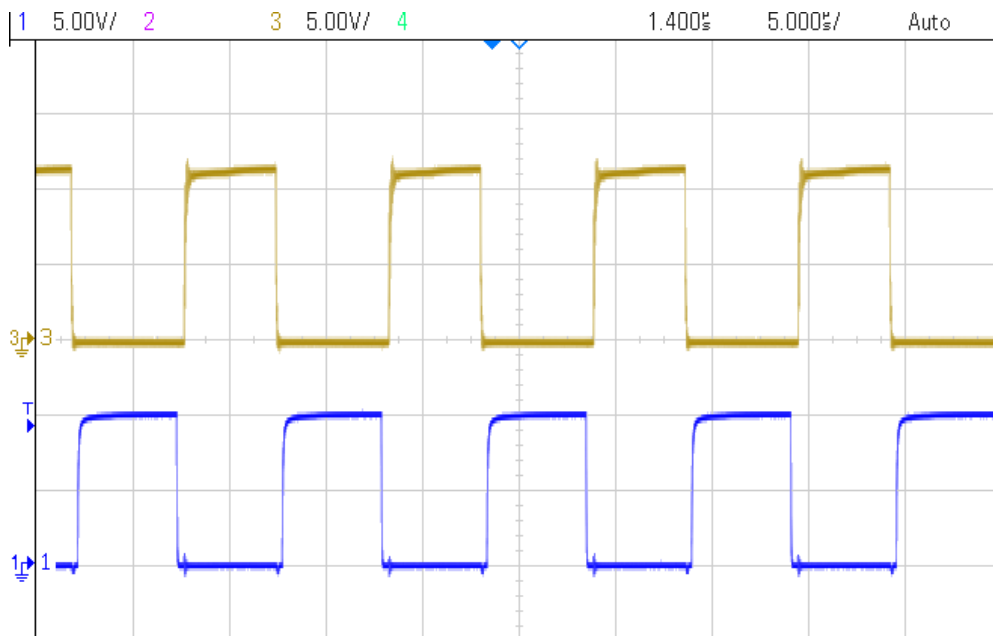
Na obrázku 34 je schéma zapojení testovacího měniče. Napájení horního budiče je přivedeno na svorky VB a VS. Na konektor CON 1 jsou přivedeny řídicí signály. Potřebný dead - time mezi spínáním tranzistorů zajišťuje sám obvod IRS21884.



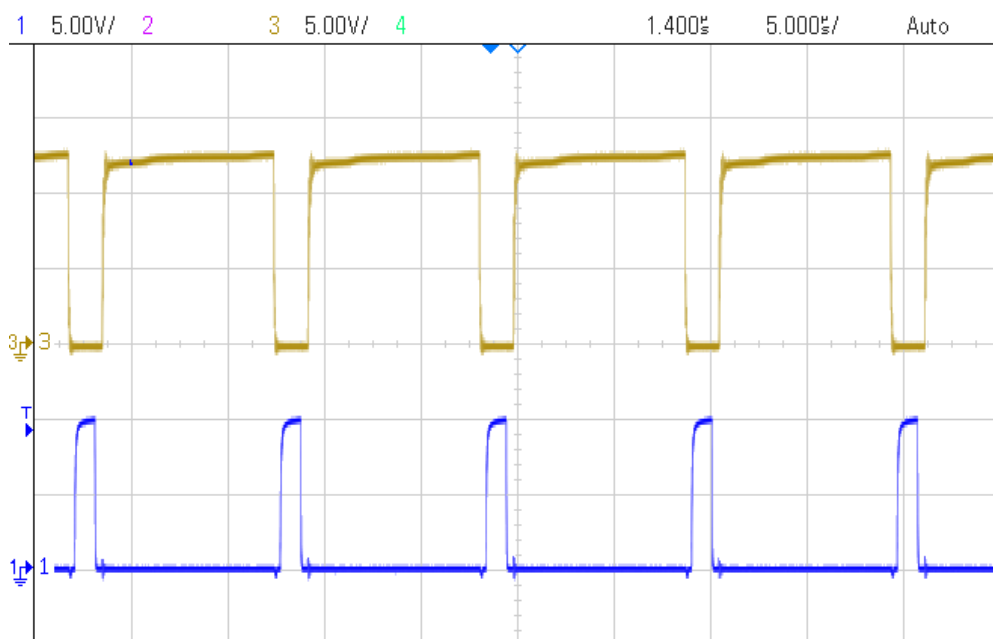
Obr. 34 Schéma zapojení testovacího měniče.

Po oživení pomocného zdroje s PT (nastavení pracovní frekvence PT) byl celý měnič otestován. Během testování byla výkonová část měniče napájena napětím 24 V. Byly ověřeny vlastnosti budiče napájeného z pomocného zdroje s PT. Rychlosti otevírání a zavírání výkonových MOSFET tranzistorů IRF540N. Rovněž bylo ověřeno chování pomocného zdroje s PT v závislosti na spínací frekvenci a střídě spínání testovacího měniče.

Na obrázcích 35 a 36 jsou zachyceny průběhy řídicích napětí u_{gs} (gate-source) výkonových tranzistorů testovacího měniče, při střídě spínání 50 a 25 %. Spodní průběh (modrý) je u_{gs} dolního tranzistoru (Q4 na obrázku 34) a horní průběh (žlutý) je u_{gs} horního tranzistoru (Q3 na obrázku 34).

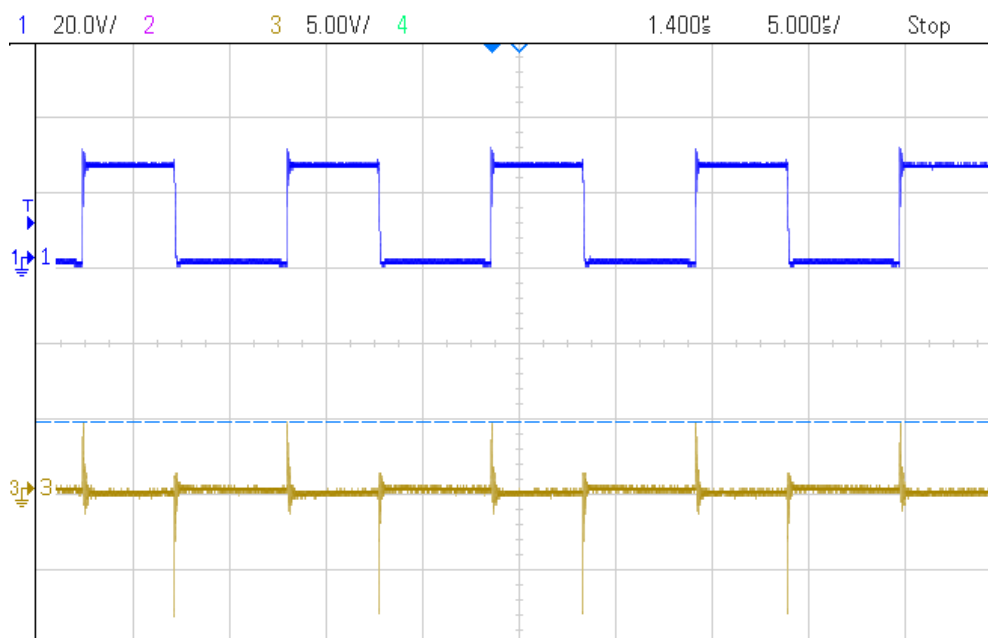


Obr. 35 Průběhy napětí u_{gs} tranzistoru Q4 (modrý průběh) a Q3 (žlutý průběh) při střídě spínání 50 %.

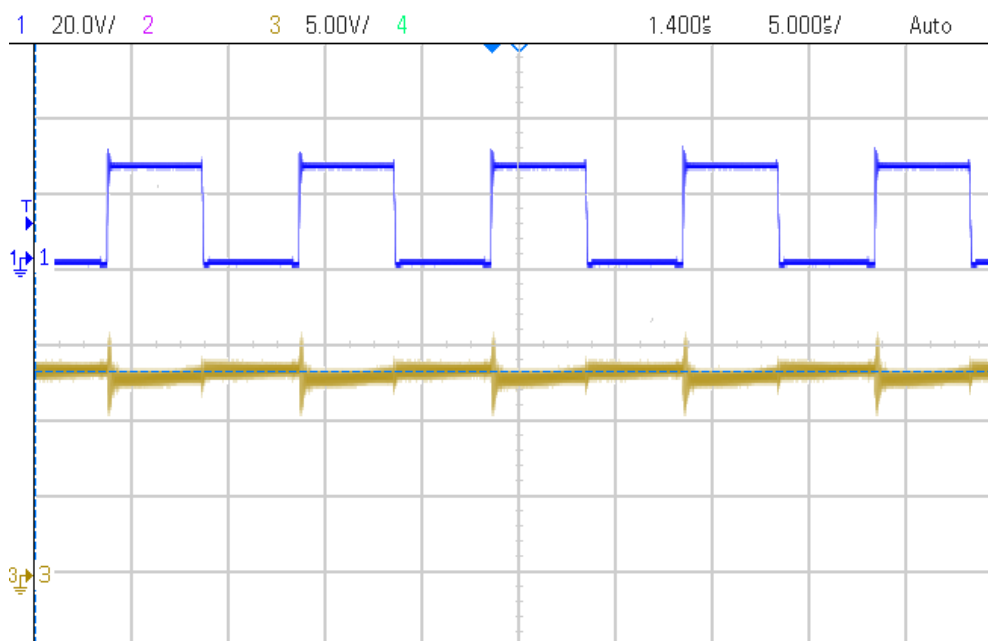


Obr. 36 Průběhy napětí u_{gs} tranzistoru Q4 (modrý průběh) a Q3 (žlutý průběh) při střídě spínání 85 %.

Obrázek 37. zachycuje průběh výstupního napětí měniče (modrý průběh) a napětí změřené na rezistoru R6 (rezistor omezující proud do elektrody gate horního tranzistoru Q3. Viz obr. 34). Obrázek 38 ukazuje průběh výstupního napětí pomocného zdroje s PT.



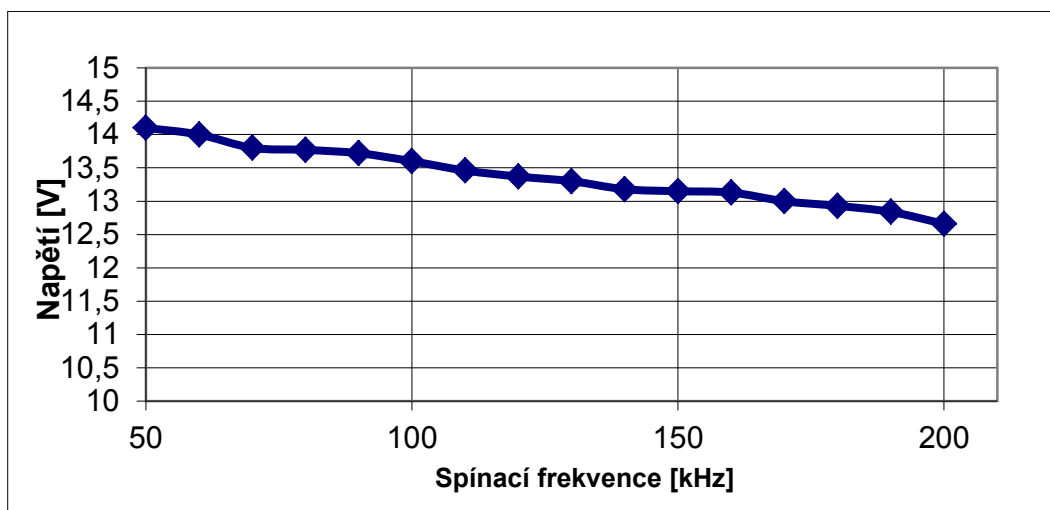
Obr. 37 Výstupní napětí měniče (modrý průběh), napětí na rezistoru omezujícím proud do elektrody gate horního tranzistoru (žlutý průběh).



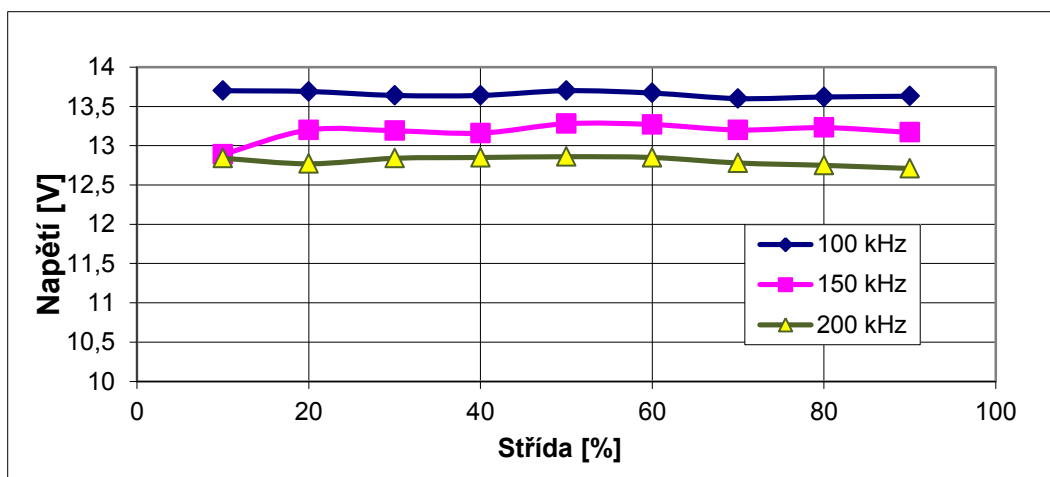
Obr. 38 Výstupní napětí měniče (modrý průběh) a výstupní napětí pomocného zdroje s PT (žlutý průběh).

Dále byla změřena závislost výstupního napětí pomocného zdroje s PT v závislosti na frekvenci a střídě spínání. Závislost pomocného napětí na spínací frekvenci testovacího měniče je na obrázku 39. Měření probíhalo při střídě spínání 50 %.

Závislost pomocného napětí na střídě spínání testovacího měniče byla změřena pro spínací frekvence 100, 150 a 200 kHz. Změřená závislost je na obrázku 40.



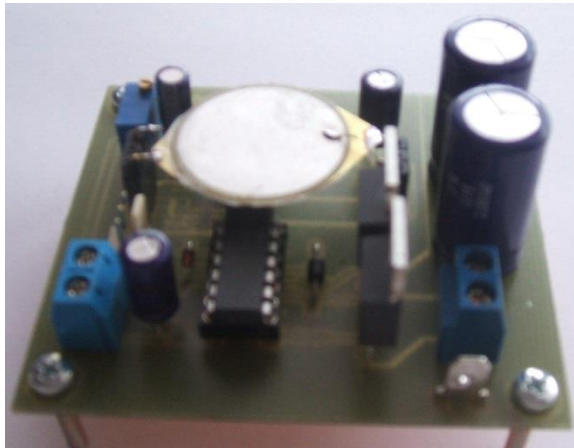
Obr. 39 Závislost pomocného napětí na spínací frekvenci testovacího měniče (při střídě spínání 50 %).



Obr. 40 Závislost pomocného napětí na střídě spínání pro různé spínací frekvence testovacího měniče.

Přesto, že výstupní napětí pomocného zdroje s PT není regulováno, a je závislé na spínací frekvenci, je dostatečné pro spolehlivou funkci budiče horního MOSFET tranzistoru. Použitý budič vyžaduje napětí v rozsahu 10 až 20 V [20]. Výstupní napětí

mocného zdroje s PT pohybuje v tomto rozsahu. Z naměřených výsledků je patrné, že PT lze použít pro napájení budiče MOSFET tranzistoru. Hodnota špičkového proudu, který dodal budič do hradla při otevírání tranzistoru, byla 0.91 A. Tato hodnota je však dostatečná pro rychlé sepnutí zvoleného tranzistoru IRF540N, jehož celková vstupní kapacita $C_{iss} = 1960 \text{ pF}$ [19]. Špičková hodnota proudu je mimo jiné omezena i rezistorem R6. Při snížení jeho velikosti by se mohl špičkový proud ještě zvýšit. Doba náběžné hrany výstupního napětí testovacího měniče byla 10 ns a doba sestupné hrany byla 70 ns. Při použití pomocného zdroje s PT je budič schopen pracovat se střídou spínání v rozsahu 0 až 100 %. Přesto, že použitý PT byl sestaven z komponent, které nejsou pro tento účel zcela vhodné, jsou dosažené výsledky vcelku dobré. Fotografie testovacího měniče je na obrázku 41. Kompletní schéma je v příloze C.



Obr. 41 Fotografie testovacího měniče.

7 Současný přenos výkonu a řídicího signálu přes piezoelektrický transformátor

V předešlém textu byl PT zatím využíván pouze k přenosu výkonu. PT lze však využít i k přenosu informace. Příklad takového využití PT lze nalézt v [21], kde je PT využit ke galvanickému oddělení zpětnovazebního signálu.

V předešlé kapitole byl PT využit k napájení budiče MOSFET tranzistoru, ale řídicí signál pro jeho ovládání bylo potřeba přenášet jiným způsobem. V dalším textu bude nastíněna možnost současného přenosu výkonu a informace přes PT. Toho lze využít k ovládání napájeného zařízení. PT přenáší výkon potřebný k napájení určitého zařízení a rovněž je schopen přenášet řídicí signál pro jeho ovládání.

7.1 Využití amplitudové a frekvenční modulace pro přenos signálu

Amplitudovou nebo frekvenční modulaci lze využít pro přenos informace přes PT [21]. Pokud je ovšem požadován současný přenos informace a výkonu nejsou tyto způsoby příliš vhodné, neboť dochází k ovlivňování přeneseného výkonu.

Pokud je použita amplitudová modulace, mění se amplituda budícího napětí PT (při konstantní frekvenci). Tím je ovlivněna i velikost výstupního napětí PT. To je vhodné pouze v případě, že napájenému zařízení takovéto změny napájecího napětí nevadí.

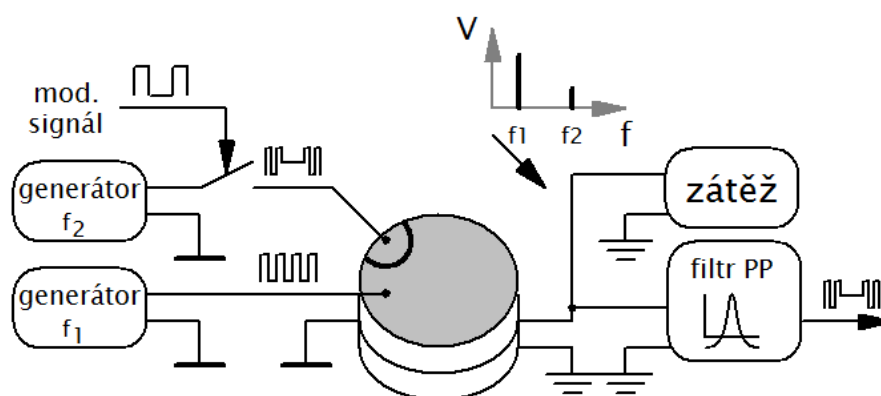
V případě frekvenční modulace je situace obdobná. PT je sice buzen napětím s konstantní amplitudou, ale mění se frekvencí. Protože se PT chová jako rezonanční obvod a má charakter pásmové propusti, projeví se změna frekvence budícího napětí poklesem amplitudy výstupního napětí PT. Výsledkem tedy opět bude kolísající napětí napájeného zařízení.

7.2 Využití parazitních rezonančních frekvencí pro přenos signálu

V dalším textu bude popsán možný způsob využití parazitní rezonanční frekvence PT pro přenos informace přes PT. PT má obvykle jednu dominantní rezonanční frekvenci, na které dosahuje přenos energie nejvyšší účinnosti. PT má ovšem i další parazitní rezonanční frekvence. Na těchto rezonančních frekvencích je účinnost přenosu energie nízká, ale může sloužit k přenosu informace.

Na obrázku 42 je naznačen navržený princip přenosu signálu přes PT pomocí parazitní rezonanční frekvence. Použitý PT má pomocnou elektrodu na primární části. K hlavní elektrodě je připojeno budící napětí s frekvencí rovnající se dominantní rezonanční

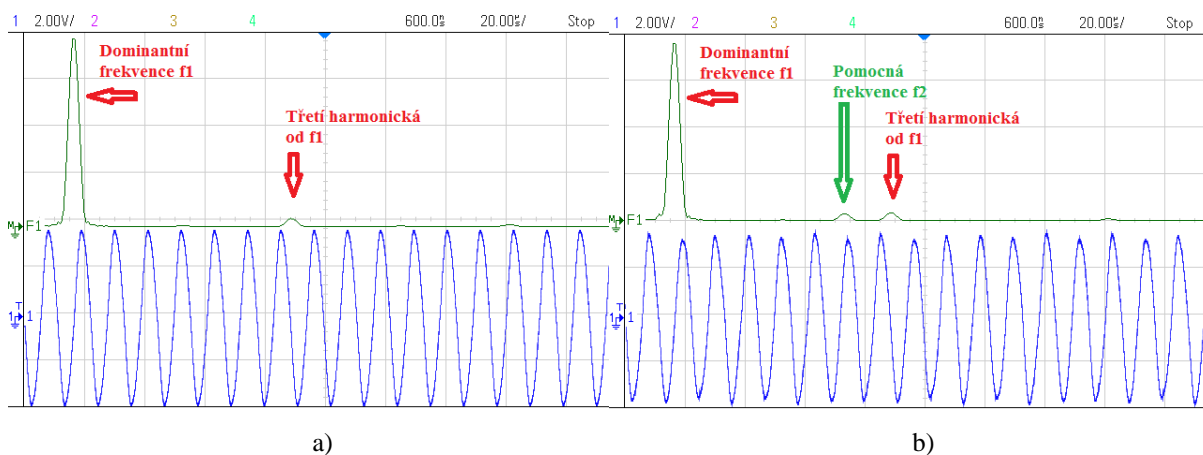
frekvenci f_1 . Tímto způsobem je přenášena většina energie na sekundární stranu PT. K pomocné elektrodě je připojen zdroj střídavého napětí s frekvencí rovnající se jiné (parazitní) rezonanční frekvenci f_2 . Spektrum sekundárního napětí PT bude obsahovat dvě spektrální složky. První spektrální složka bude odpovídat dominantní rezonanční frekvenci f_1 . Druhá složka ve spektru bude odpovídat parazitní rezonanční frekvenci f_2 . Dojde-li ke změně amplitudy střídavého napětí připojeného k pomocné elektrodě PT, projeví se tato změna na sekundární straně PT. Pro přenos logického signálu (0 nebo 1) lze využít dvoustavovou amplitudovou modulaci pomocného napětí (ON-OFF modulace). Přenášená logická hodnota bude reprezentována přítomností spektrální složky f_2 ve spektru sekundárního napětí PT. Následnou filtrací sekundárního napětí PT filtrem typu pásmová propust, lze získat informaci o logické hodnotě přenášeného signálu.



Obr. 42 Princip přenosu signálu přes PT pomocí parazitní rezonanční frekvence.

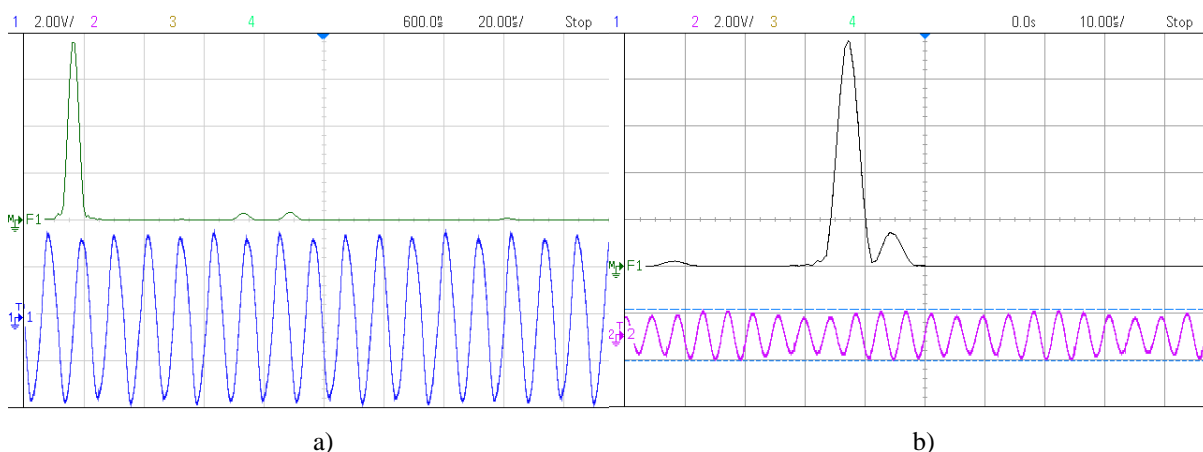
Pro ověření navržené metody přenosu signálu, byl využitý vzorek PT, sestavený způsobem popsaným kapitole 5.3. Pro primární část PT byl použit Piezokeramický disk s pomocnou elektrodou. Pro sestavený vzorek PT byly změřeny rezonanční frekvence při využití hlavní a pomocné elektrody. Pro přenos energie byla zvolena dominantní rezonanční frekvence (pro hlavní primární elektrodu) $f_1 = 90,6$ kHz. Pro přenos signálu byla zvolena méně významná rezonanční frekvence (pro pomocnou primární elektrodu) $f_2 = 235,5$ kHz.

Pro ověření schopnosti PT přenést na sekundární stranu dvoustavovou informaci (v podobě přítomnosti / nepřítomnosti frekvence f_2 ve spektru výstupního napětí) bylo změřeno spektrum výstupního napětí PT. Obrázek 43 zachycuje průběh sekundárního napětí PT a jeho spektrum.



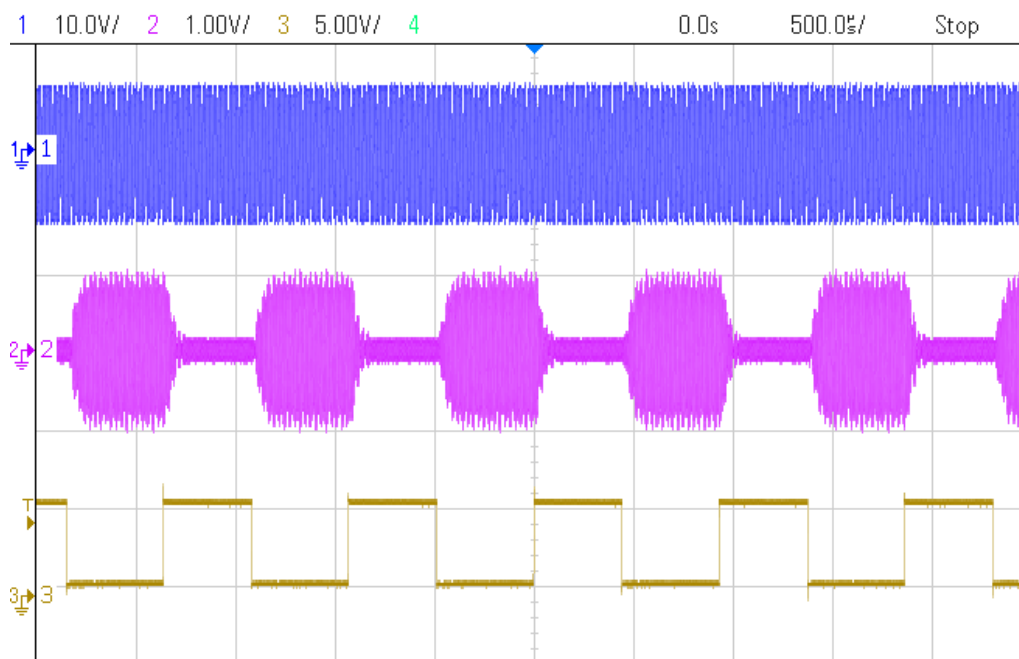
Obr. 43 Sekundární napětí PT a jeho frekvenční spektra: a) bez pomocné frekvence; b) s pomocnou frekvencí f_2 .

V naměřeném frekvenčním spektru je dobře rozpoznatelná přítomnost spektrální složky pomocné frekvence f_2 . Tak lze na sekundární straně detekovat logickou hodnotu přenášeného signálu. Pro další zpracování přenášeného signálu je tedy nutno sekundární napětí PT filtrovat pomocí pásmové propusti. Pásmová propust by měla být naladěna na pomocnou frekvenci f_2 tak, aby potlačila ostatní složky spektra. Jak je patrné z obrázku 43, je frekvenční spektrum ovlivněno třetí harmonickou frekvence f_1 . To zvyšuje nároky na selektivitu pásmové propusti. Byla zvolena LC pásmová propust. Porovnání frekvenčního spektra před a po filtraci pásmovou propustí je na obrázku 44. Přestože je frekvenční spektrum i nadále ovlivněno třetí harmonickou frekvence f_1 , je pomocná frekvence f_2 dostatečně zdůrazněna.



Obr. 44 Porovnání frekvenčního spektra: a) Před filtrací; b) Po filtraci pásmovou propustí.

Při ověření navržené metody byla testovací sestava sestavena podle obrázku 42. Sekundární strana PT byla zatížena rezistorem 100 Ω . Generátor pomocného napětí (s frekvencí f_2) byl řízen pomocí TTL signálu. Průběhy napětí naměřené během testování jsou na obrázku 45. Horní (modrý) průběh je napětí na zatěžovacím rezistoru. Dolní (žlutý) průběh je průběh řídicího TTL signálu. Prostřední průběh (růžový) je podoba přeneseného signálu na výstupní stranu PT (po filtraci).



Obr. 45 Průběhy napětí na výstupní straně PT.

Výsledky provedeného pokusu naznačují, že PT je schopen napájet zátěž a současně přenášet signál. Z průběhů na obrázku 45 je patrné, že napětí na zátěži není téměř ovlivněno přenášeným signálem. Přenesený signál vyžaduje další zpracování. I bez něj, je ale dobře rozpoznatelná vysoká a nízká úroveň logického signálu. PT je v tomto případě schopen přes galvanickou bariéru přenášet jak energii pro napájení zařízení, tak i signál. Tento signál může být použit například k řízení napájeného zařízení nebo k přenosu dat pro napájené zařízení.

8 Piezoelektrické transformátory jako zdroje vysokého napětí s malým výkonem.

Další oblastí, ve které mohou najít uplatnění piezoelektrické transformátory, jsou zdroje vysokého napětí (v řádu stovek voltů až jednotek kilovoltů) malých výkonů do cca 10 W. Pro tyto aplikace jsou velice vhodné piezoelektrické transformátory Rosenova typu ať už s jednovrstvou či více vrstvou strukturou.

V této souvislosti byly dosud tyto PT masověji využívány jen v oblasti měničů pro CCFL výbojky pro podsvětlení LCD displejů [15]. V této oblasti však PT mohou nalézt uplatnění i v jiných aplikacích. Jako jedna z oblastí uplatnění se jeví zdroje pro napájení detektorů ionizujícího záření, jako jsou např. Geiger-Müllerova trubice [22], nebo scintilační detektory s fotonásobičem [23]. Podobná zařízení nacházejí uplatnění při experimentech v částicové fyzice. Další oblast využití mohou být zdroje napětí pro ionizaci plynů při tvorbě plazmy. Na principu generování vysokého napětí jsou rovněž založeny různé ionizátory a čističky vzduchu. Tyto prostředky pro čištění a desinfekci prostředí jsou, zejména v současné době celosvětové pandemie viru COVID-19, velmi vyhledávané. Další oblastí využití pro zdroje vysokého napětí s malým výkonem jsou různé oblasti výzkumu a experimentů při zkoumání různých fyzikálních jevů jako jsou „Water bridge phenomena“ [24] nebo „Ionic wind“ [25]. Ať už pro zkoumání těchto jevů, nebo pro jejich případné praktické využití, bude potřeba vyvíjet napájecí zdroje schopné dodat napětí v řádu jednotek kilovoltů avšak s malým výkonem. I pro tyto případné aplikace se jeví jako velmi vhodné zabývat se využitím PT ve zdrojích vysokého napětí.

Vzhledem ke specifickým potřebám PT je rovněž nezbytné zabývat se i vhodnými topologiemi měničů pro buzení PT a jejich vlivem na výsledné vlastnosti navržených zdrojů.

8.1 Topologie měničů vhodné pro buzení piezoelektrických transformátorů

V případě piezoelektrického transformátoru je výkon z primární strany na sekundární stranu přenášen pomocí mechanických vibrací. Pro fungování PT je tedy potřeba, aby byl napájen zdrojem střídavého napětí. Mechanické vibrace generované primární stranou PT by měly mít frekvenci blízkou mechanické rezonanci PT, aby bylo dosaženo co největší účinnosti. Z tohoto pohledu se jeví jako nejvhodnější napájet PT harmonickým napětím s frekvencí odpovídající rezonanční frekvenci PT. Rezonanční frekvence se u běžných PT

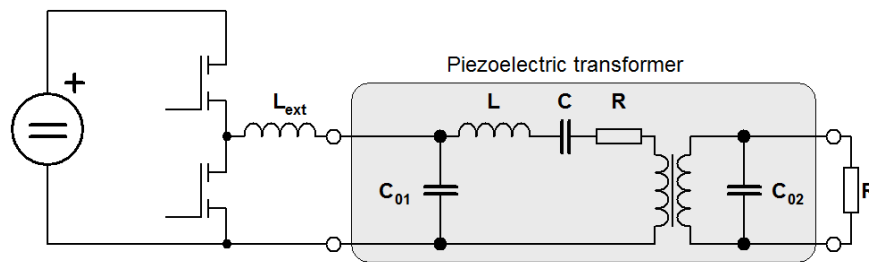
pohybují v rozsahu od desítek do stovek kilohertzů (v některých případech až jednotek MHz). Zdroje energie na primární straně PT však v drtivé většině případů takovými parametry nedisponují. Nejčastěji je zdrojem energie stejnosměrné napětí, ať už získané z baterie, nebo jako stejnosměrný meziobvod vzniklý usměrněním a filtrováním síťového napětí. Z toho důvodu je pro napájení PT využíváno měničů napětí.

Vzhledem k charakteru PT (rezonanční obvod) je výhodné použití měničů pracujících v rezonančním nebo kvazirezonančním módu. Výhodnou těchto měničů je, že v určitém rozsahu umožňují dosažení měkkého spínání (spínání v nule napětí ZVS – Zero Voltage Switching). To umožňuje minimalizovat ztráty na spínacích prvcích měniče a má rovněž pozitivní dopad na elektromagnetické rušení generované měničem. Jednou z možností, jak dosáhnout měkkého spínání v nule, je do obvodu PT vložit přizpůsobovací obvod (matching circuit). Nejčastěji se jedná o externě vloženou indukčnost, nebo obvod složený z kapacity a indukčnosti. Tento přístup sice umožňuje dosažení spínání v nule, nicméně nejsou tak plně využity specifické vlastnosti PT. Výhodami PT v některých aplikacích ve srovnání s klasickými transformátory jsou menší rozměry a absence elektromagnetického pole. Řešení s externě přidanou indukčností zvětšuje výsledné rozměry měniče a přidává do obvodu prvky generující magnetické pole. Tím jsou výhodné vlastnosti PT výrazně potlačeny.

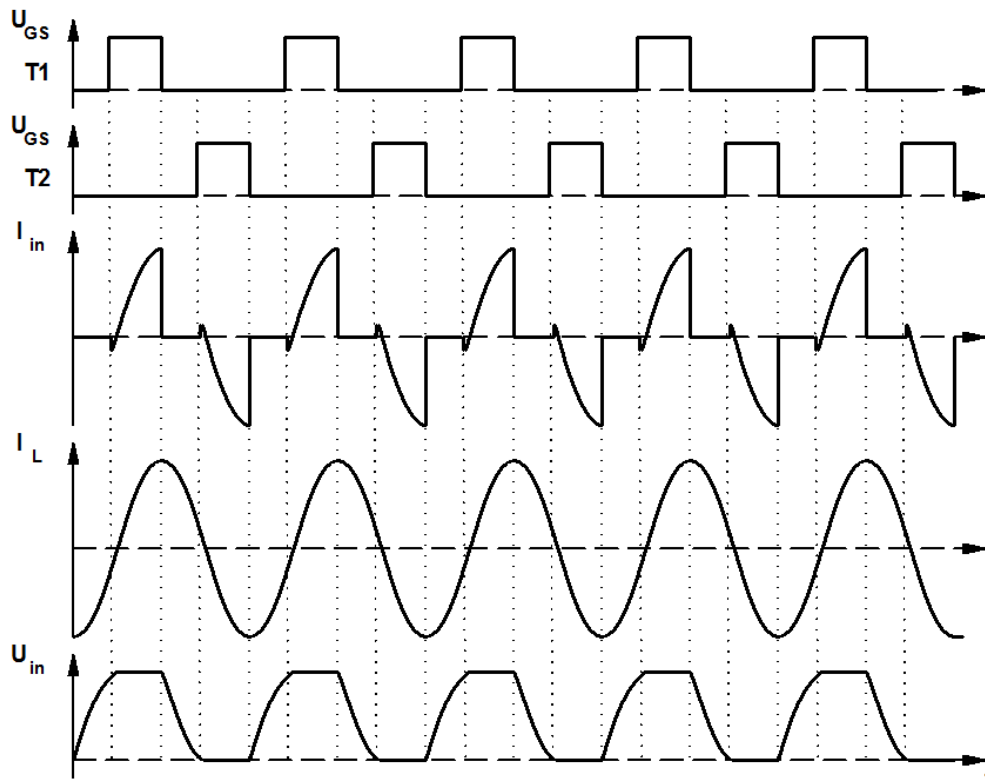
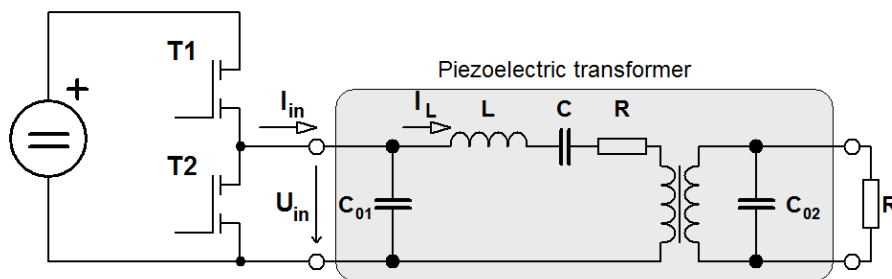
Jednou z topologií měniče vhodnou pro napájení PT je poloviční můstek (Half-bridge converter). Měnič s topologií polovičního můstku s připojeným PT je zobrazen na obrázku 46. Jedná se o řešení, které bylo pro tyto účely zejména dříve hojně využíváno [15][26][27][28][29]. Nevýhodou tohoto řešení je, že výstupní napětí polovičního můstku má obdélného průběh. PT se chová jako rezonanční obvod s relativně velkou jakostí. I přesto, že vstupní napětí má obdélníkový průběh, je výstupní napětí harmonické. Vyšší harmonické složky obsažené v obdélníkovém průběhu napětí jsou ovšem potlačeny (PT se chová jako pásmová propust). Další nevýhodou jsou strmé hrany, které způsobují elektromagnetické rušení.

Jak bylo uvedeno výše, je právě z těchto důvodů do obvodu často vřazena externí přizpůsobovací indukčnost L_{ext} . Specifické vlastnosti PT však umožňují dosažení spínání v nule i bez použití externích přizpůsobovacích obvodů [29][30]. V případě polovičního můstku je možné dosáhnout měkkého spínání bez dodatečných reaktančních prvků vložením dostatečně velkého mrtvého času (dead-time) mezi spínání tranzistorů. Spínací frekvence musí být vyšší, než je rezonanční frekvence PT. Tím je rezonanční obvod (představovaný PT) provozován v induktivní oblasti. Energie akumulovaná v obvodu musí

být dostatečná pro přebití paralelní kapacity během mrtvého času. [31]. Toto řešení spolu s naznačenými průběhy napětí a proudu jsou na obrázku 47.

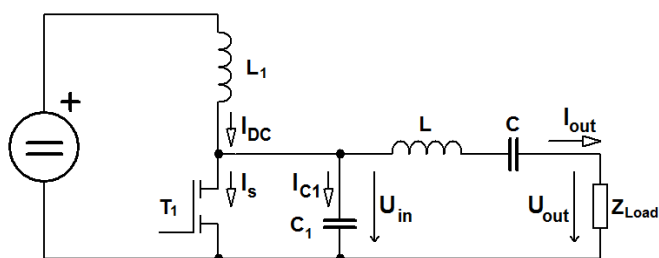


Obr. 46 Poloviční můstek s přizpůsobovací indukčností pro dosažení měkkého spínání.

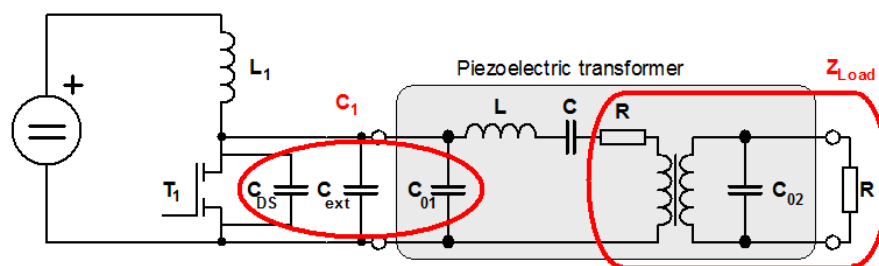


Obr. 47 Poloviční můstek bez dodatečné přizpůsobovací indukčnosti a odpovídající průběhy napětí a proudu.

Zapojení na obrázku 48 je označováno jako zesilovač pracující ve třídě E (E-class amplifier). Jedná se o impulzně regulovaný zesilovač pracující ve spojení se sériovým rezonančním obvodem. Využívá se zejména ve vysokofrekvenčních obvodech. Kapacita C_1 na obrázku 48 představuje nejen kapacitu samotného externího kondenzátoru, ale rovněž je v ní obsažena i parazitní kapacita spínacího tranzistoru C_{DS} . V případě využití tohoto zesilovače pro napájení PT je do této kapacity zahrnuta i vstupní kapacita C_{01} připojeného PT, jak ukazuje obrázek 49.



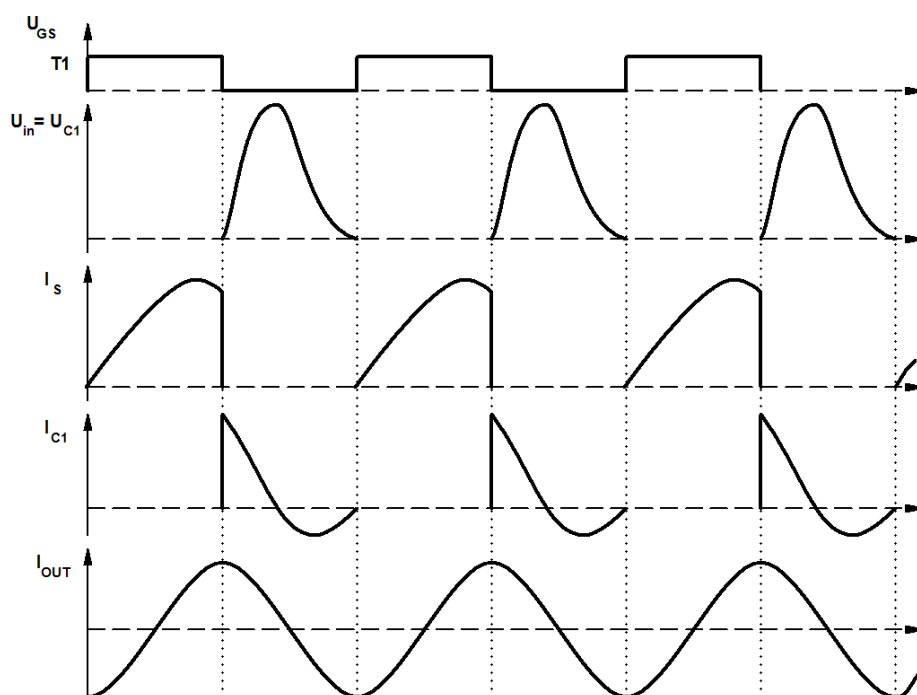
Obr. 48 Schéma zapojení zesilovače ve třídě E.



Obr. 49 Piezoelektrický transformátor napájený zesilovačem pracujícím ve třídě E.

Oproti výše zmíněné topologii polovičního můstku obsahuje toto zapojení pouze jeden spínací prvek. Ten je navíc spojen se zemním potenciálem (low-side switch) a pro jeho řízení není potřeba plovoucí budič. Horní spínací prvek je v tomto případě nahrazen indukčností L_1 . Indukčnost L_1 by měla být dostatečně velká, tak aby se chovala téměř jako zdroj stejnosměrného proudu [32]. Spínací tranzistor je spínán se střídou 50 %. V době sepnutí tranzistoru se akumuluje energie v magnetickém obvodu indukčnosti L . Po rozepnutí tranzistoru se energie akumulovaná v magnetickém obvodu “přelévá“ do kapacity C_1 a do výstupního rezonančního obvodu. Tím dojde ke zvýšení napětí na kapacitě C_1 . Při dalším sepnutí by došlo k vybití kapacity C_1 a zmaření energie, kterou do něj dodala indukčnost L_1 . Pokud je však velikost kapacity vhodně zvolena, dojde k poklesu napětí k nule právě v okamžiku dalšího sepnutí tranzistoru. Tím je dosaženo měkkého

spínání. I v případě PT je potřeba do obvodu přidat externí kapacitu C_{ext} , protože samotná vstupní kapacita PT není dostatečná pro splnění podmínky spínání v nule napětí. Napětí na kapacitě C_1 (vstupní napětí rezonančního obvodu U_{in}), v době vypnutého tranzistoru, nemá čistě harmonický průběh. Tvar napětí přibližně odpovídá polovině periody harmonického průběhu. Předpokladem je, že výstupní rezonanční obvod má dostatečnou jakost pro potlačení ostatních harmonických složek mimo rezonanční frekvence. Spínací frekvence tranzistoru by měla být mezi sériovou rezonanční frekvencí (tvořenou prvky L a C) a paralelní rezonanční frekvencí (tvořenou prvky L , C a C_1) [32]. Průběhy napětí a proudů jsou naznačeny na obrázku 50.



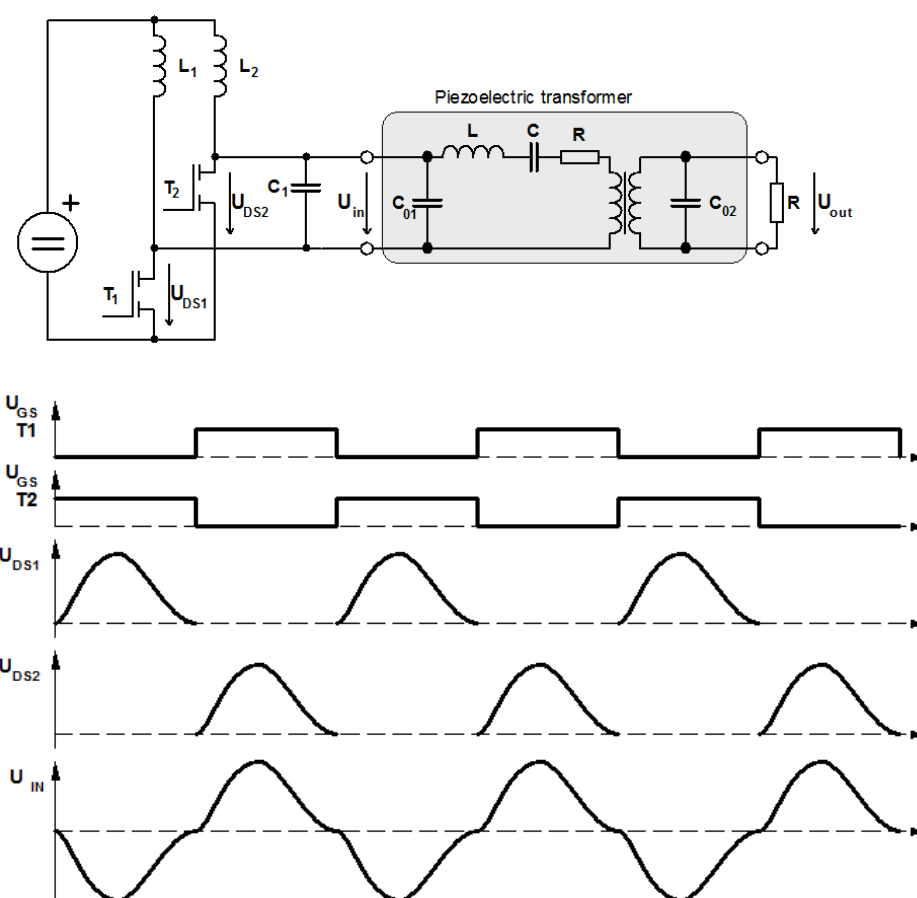
Obr. 50 Průběhy napětí a proudů zesilovače pracujícího ve třídě E.

Z popisu je patrné, že optimální funkce obvodu závisí na vhodném naladění obvodu. Tento postup může být poněkud složitý a většinou se neobejde bez experimentálního ladění obvodu. Popis jak postupovat při ladění obvodu je uveden například v [32]. V případě použití PT jako výstupního rezonančního obvodu, nelze prvky sériového rezonančního obvodu ovlivnit. Nastavení obvodu se tak redukuje na vhodnou volbu kapacity C_{ext} a indukčnosti L_1 . Volba indukčnosti L_1 není kritická. Měla by být dostatečně velká, aby poskytovala přibližně konstantní proud. Efektivní hodnota tohoto proudu potom odpovídá velikosti proudu odebíraného ze stejnosměrného meziobvodu. Spínací tranzistor

T_1 musí být dimenzovaný na vyšší napětí, než je stejnosměrné napájecí napětí zesilovače. Pokud je obvod vhodně naladěný a pracuje s optimální spínací frekvencí a optimální zátěží, dosahuje napětí U_{C1} velikosti přibližně 3,56 krát větší, než je stejnosměrné napájecí napětí. Pokud nejsou splněny podmínky pro optimální funkci obvodu, může napětí dosahovat až sedmi násobku napájecího napětí [32].

Zesilovače ve třídě E popsány v předchozím textu je označován jako single-ended.

Výstupní rezonanční obvod (v tomto případě PT) je připojen mezi výstup zesilovače a společnou zem. V případě výše zmíněného zapojení je energie do PT dodávána pouze v jedné polovině periody (během rozepnutí tranzistoru). V případě dvou zesilovačů pracujících ve třídě E lze tento nedostatek vyřešit. Zapojení na obrázku 51 je označováno jako push-pull E-class amplifier. Jedná se o dva totožné zesilovače popsané výše. Oba spínací tranzistory pracují se stejnou spínací frekvencí a se střídou spínání 50 %. Jejich řídicí signály jsou však vzájemně fázově posunuty o 180° . Vstupní část PT je připojena diferenciálně mezi výstupy zesilovačů.



Obr. 51 Zesilovač pracující ve třídě v zapojení push-pull.

V případě dvojčinného zapojení zesilovače ve třídě E má vstupní napětí PT (U_{in}) přibližně harmonický průběh. Vstupní napětí PT má navíc dvojnásobný rozkmit při stejném napětí v meziobvodu. Díky tomu lze dodat do PT větší výkon.

8.2 Usměrňovače pro piezoelektrické transformátory

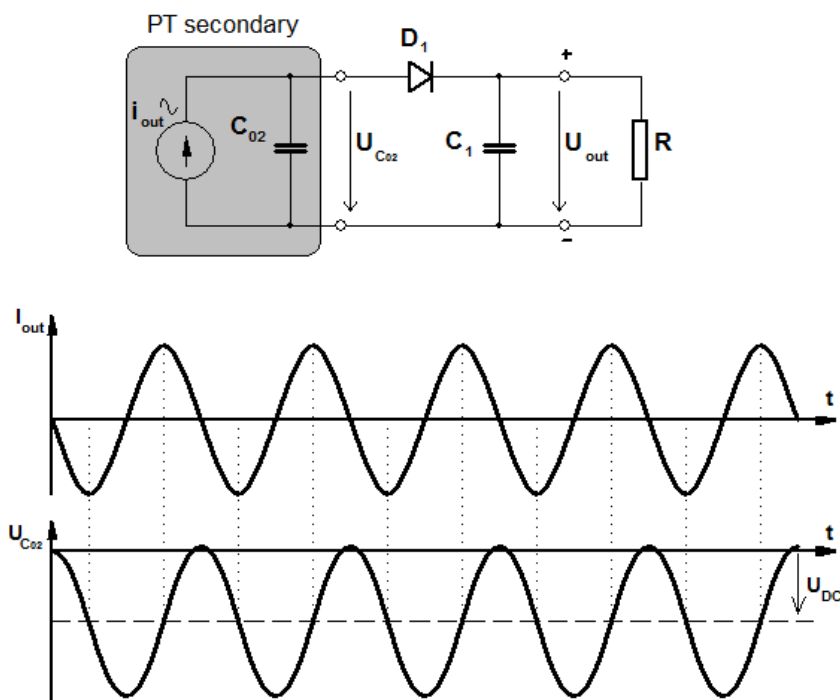
Z náhradního schématu PT je patrné, že zátěž připojená k sekundární straně PT (včetně usměrňovače, filtračních kapacit a případných dalších součástí) má vliv na celý rezonanční obvod. Bez ohledu na zvolenou topologii měniče použitého k napájení PT, je chování PT závislé na připojené zátěži. Změnou zátěže, nebo připojením dalších externích kapacit k sekundární straně PT dochází k přeladění rezonančního obvodu, který PT představuje. To má vliv na rezonanční frekvenci a na podmínky potřebné k dosažení měkkého spínání na primární straně PT.

Nezávisle na způsobu napájení primární strany PT, je sekundární napětí vždy střídavé s harmonickým průběhem. Pro některé aplikace je potřebné napětí stejnosměrné. Z toho důvodu je nutné se zabývat i usměrňovacími obvody výstupního napětí PT. Oproti klasickým transformátorům s elektromagnetickou vazbou je zde jistá odlišnost. Sekundární část PT převádí mechanickou energii (vibrace) na energii elektrickou (elektrický náboj). Měřitelné výstupní napětí PT (ve stavu naprázdno) vzniká v důsledku generování náboje na výstupní kapacitě C_{02} . Sekundární stranu PT lze tedy charakterizovat jako zdroj harmonického proudu, pracující do výstupní kapacity C_{02} . Výstupní napětí pak vzniká jako úbytek napětí na reaktanci kapacity C_{02} . To vyplývá i z náhradního schématu na obrázku 19 (kapitola 5.1).

8.2.1 Problém usměrňování výstupního napětí PT

Protože výstupní část PT se chová jako zdroj proudu s paralelní kapacitou, je tento fakt potřeba zohlednit i při návrhu výstupního usměrňovače a filtračního obvodu. Tyto usměrňovací obvody nalézají uplatnění nejen v případě PT, ale i v případě využití piezoelektrických elementů pro získávání energie z mechanických vibrací (piezoelectric energy harvesting). Vzhledem k proudovému výstupu PT v kombinaci s paralelní kapacitou C_{02} nastává problém zejména při použití klasického jednocestného usměrňovače. Během záporné půlvlny proudu i_{out} dochází k přebíjení výstupní kapacity C_{02} na záporné napětí. V době změny směru proudu i_{out} na kladný (přechod proudu nulou) je kapacita nabíjena ze záporné hodnoty napětí. V ustáleném stavu tak maximální napětí na C_{02} (po skončení kladné půlvlny proudu i_{out}) jen nepatrně překoná nulovou hodnotu. Tato hodnota

prakticky nestačí k překonání prahového napětí diody D_1 . Výstupní napětí PT má potom záporný stejnosměrný napěťový offset U_{DC} , jak ukazuje obrázek 52. Výstupní napětí usměrňovače U_{out} je proto nulové. V případě použití jednocestných usměrňovačů proto musí být zajištěno odstranění stejnosměrného napěťového posuvu.

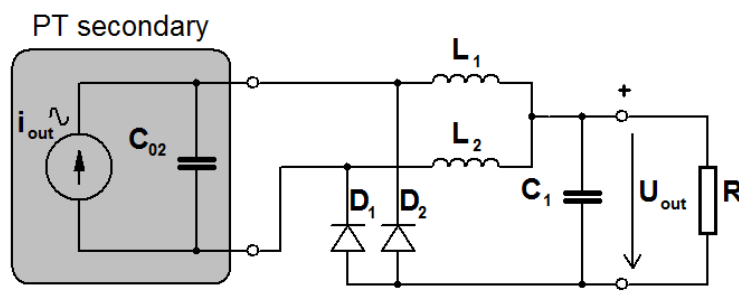


Obr. 52 Vznik záporného stejnosměrného offsetu na výstupu PT při použití běžného jednocestného usměrňovače.

Problém s přebíjením kapacity C_{02} nastává i u dvoucestných usměrňovačů v době, kdy je okamžitá hodnota výstupního napětí PT menší než napětí na filtrační kapacitě. Zdroj proudu i_{out} pouze přebíjí kapacitu C_{02} na opačnou polaritu napětí. Při otočení polarity proudu i_{out} , pak musí být tato kapacita přebíjena z opačné polarity. V případě dvoucestných usměrňovačů však tento fakt nezabraňuje funkci obvodu. Má pouze dopad do množství energie, která je získána z výstupní části piezoelementu. V různých publikacích, především z oblasti piezo energy harvesting, lze dohledat různé úpravy dvoucestného usměrňovače. Tyto úpravy se snaží odstranit výše zmíněný problém. Jako příklad lze uvést řešení popsaná v [33][34]. Vždy se však jedná o řešení vyžadující přídavné reaktanční prvky či řízené spínače. Pro PT lze rovněž použít i násobiče napětí viz např. [15]. Vždy je však potřeba respektovat skutečnosti zmíněné výše.

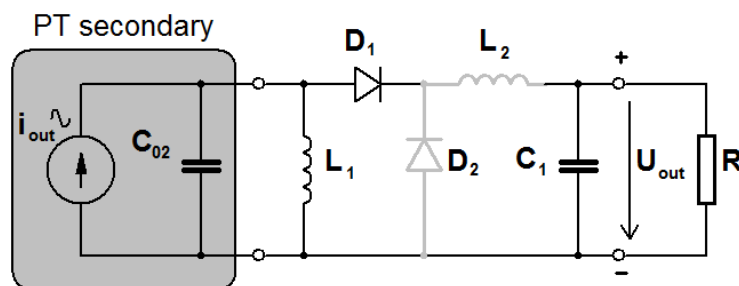
8.2.2 Usměrňovače pro piezoelektrické transformátory

Jednou z možností jsou obvody využívající usměrňovač s induktivně kapacitním filtrem. Nejčastěji se jedná o zapojení označované jako zdvojovač proudu (current doubler). Toto zapojení je naznačeno na obrázku 53.



Obr. 53 Zdvojovač proudu (current doubler).

Další zapojení je jednocestný usměrňovač (half-way rectifier) na obrázku 54. Ten může být případně doplněn další externí indukčností L_2 a diodou D_2 . Vzhledem k proudovému výstupu PT je použití indukčnosti L_1 , připojené paralelně k výstupu PT, nezbytné. Tato indukčnost zde působí jako cesta pro záporný stejnosměrný napěťový offset, který by na výstupu PT vznikl [36][37].



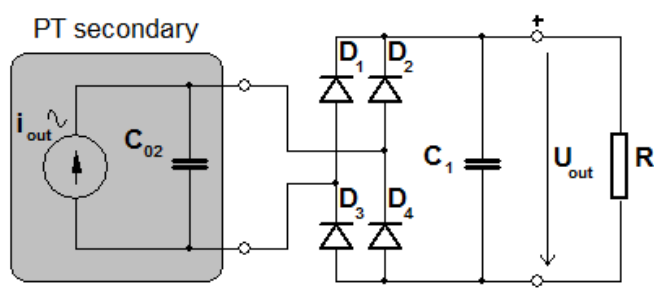
Obr. 54 Jednocestný usměrňovač (half-way rectifier).

Tyto obvody mají svůj původ v oblasti výkonových rezonančních měničů s transformátory pracujícími s vysokou spínací frekvencí. Někdy jsou označovány jako usměrňovače pracující ve třídě E (E-class rectifier) [35]. V této oblasti mají své opodstatnění. Ve snaze dosáhnout měkkého spínání i na straně usměrňovače (otevírání a zavírání diod při nulovém proudu nebo napětí) mohou být dále doplňovány dalšími reaktančními prvky [37][38]. Tyto obvody lze využít i v případě PT [31][36], nicméně vzhledem k potřebě použití externích indukčností se tím poněkud vytrácí některé výhody

PT (absence indukčnosti, provoz bez generování elektromagnetického pole a malé rozměry a hmotnost). Tyto usměrňovače ve spojení s PT jsou vhodné spíše pro aplikace s malým výstupním napětím a většími výstupními proudy (PT pracující v radiálním vibračním módu, nebo tloušťkově vibračním módu) [31].

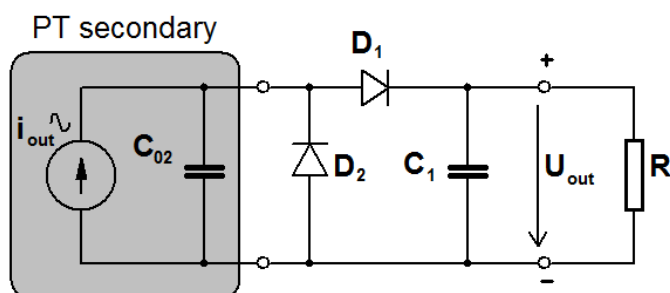
Další možností usměrňování sekundárního napětí PT jsou usměrňovače s kapacitním filtrem. Tyto obvody jsou častěji využívány u PT s vysokým výstupním napětím a malými proudy (typicky PT Rosenova typu).

Usměrňovač s kapacitním filtrem lze realizovat jako dvoucestný můstkový usměrňovač na obrázku 55. Jedná se v podstatě o klasické zapojení můstkového usměrňovače.



Obr. 55 Dvoucestný můstkový usměrňovač.

Další možností je zapojení na obrázku 56, které je označováno jako zdvojovač napětí (voltage doubler rectifier). Při použití tohoto usměrňovače dosahuje velikost stejnosměrného napětí až dvojnásobné hodnoty, než je amplituda sekundárního napětí PT naprázdno bez usměrňovače.



Obr. 56 Zdvojovač napětí pro PT.

9 Piezoelektrické transformátory jako zdroje napětí pro detektory ionizujícího záření

Ionizující záření je záření, které má dostatečnou energii k ionizaci molekul, nebo atomů látky, která je tomuto záření vystavena. Ionizující záření vzniká při například při radioaktivním rozpadu. Toto záření nachází uplatnění ve výzkumu, nebo v medicíně. Je však velmi nebezpečné pro živou tkáň [39]. Detektory ionizujícího záření jsou zařízení sloužící k detekci tohoto záření. Umožňují zkoumání jeho vlastností, nebo poskytují kvantitativní informace o jeho intenzitě, nebo energii. Tato zařízení jsou využívána v řadě různých vědeckých, průmyslových nebo medicínských aplikací.

Jako příklady detektorů lze uvést např. Geiger-Müllerovy trubice, nebo scintilační detektory s fotonásobičem. Tyto detektory pro svoji funkci vyžadují stejnosměrné napětí v řádu stovek voltů až jednotek kilovoltů. Zejména v případech tzv. osobních dozimetrů, které slouží k měření absorbované dávky záření například v jaderné energetice, se jedná o malé ruční a kapesní přístroje napájené z baterie. Konvenčním řešením je použití DC/DC měniče s transformátorem. PT Rosenova typu (zejména ve vícevrstevném provedení) dosahují vysokého napěťového zisku a malých rozměrů. Pro tento účel se tak jeví jako velmi vhodné.

9.1 Geiger-Müllerova trubice

Jako detektory ionizujícího záření při experimentech byly použity Geiger-Müllerovy (GM) trubice. Tyto detektory jsou známy desítky let. GM trubice nacházejí uplatnění v medicíně, vojenských aplikacích, monitorování prostředí, jaderném průmyslu apod. GM trubice jsou schopny detekovat a měřit alfa, beta a gama záření [40].

GM trubice se skládají nejčastěji ze skleněné trubičky naplněné inertním plynem s velmi nízkým tlakem (okolo 100 mBar) a dvou elektrod. Elektrody jsou připojeny ke stejnosměrnému napětí v řádu několika set voltů. Pokud je GM trubice vystavena ionizujícímu záření, dochází k ionizaci plynu. To způsobí snížení elektrického odporu mezi elektrodami a dojde k proudovému impulzu. Tyto proudové pulzy jsou následně zaznamenávány a počítány. Počet pulzů za jednotku času poté představuje intenzitu ionizujícího záření. Běžně používané jednotky jsou cpm (counts per minute), milirentgeny za hodinu (mR/hr) případně mikrosieverty za hodinu ($\mu\text{S/hr}$).

9.2 Napájecí zdroj pro GM trubici

Pro experiment s napájením GM trubice pomocí PT byl zvolen PT Rosenova typu od firmy Steiner & Martins, inc. Konkrétně typ SMMTF85P1S50. Jedná se o PT s vícevrstvou strukturou. Velkou výhodou tohoto typu jsou velmi malé rozměry. Přesto je schopen dosáhnout výstupního napětí až 500 V rms. Parametry použitého PT jsou v tabulce IV. Fotografie použitého PT je na obrázku 57.

PT musí být buzen zdrojem střídavého napětí. Při tomto experimentu byl PT napájen harmonickým signálem přímo z funkčního generátoru. GM trubice vyžadují pro svoji funkci stejnosměrné napětí, proto je sekundární napětí PT usměrněno a filtrováno. V tomto případě je potřeba usměrňovač se závěrným napětím několika set voltů. Z toho důvodu nelze použít k usměrnění schottky diody. Vzhledem k požadavku na vysoké závěrné napětí a zároveň na relativně vysokou frekvenci (rezonanční frekvence použitého PT se pohybuje kolem 80 kHz) byly zvoleny ultra rychlé usměrňovací diody s malou dobou zotavení. Usměrněné sekundární napětí je následně filtrováno. Vzhledem k malým očekávaným proudovým odběrům byla zvolena filtrační kapacita o velikosti 200 nF.

Tabulka IV. Parametry transformátoru SMMTF85P1S50. [41]

Napěťový převod	50
Rezonanční frekvence	85 kHz
Max. vstupní napětí (RMS)	10 V
Max. výstupní napětí (RMS)	500 V
Max. výstupní výkon	100 mW
Vstupní kapacita (C_{01})	30 nF
Výstupní kapacita (C_{02})	45 pF
Délka	20 mm
Šířka	4 mm
Tloušťka	1 mm

Napěťový přenos PT uvedený v tabulce IV platí pro optimálně zatížený PT. V případě nezatíženého (nebo málo zatíženého) PT je napěťový zisk mnohem vyšší. Výstupní napětí PT je proto potřeba regulovat. Pro regulaci výstupního napětí, lze zvolit tři principy regulace:

- Změna vstupního napětí PT při konstantní frekvenci

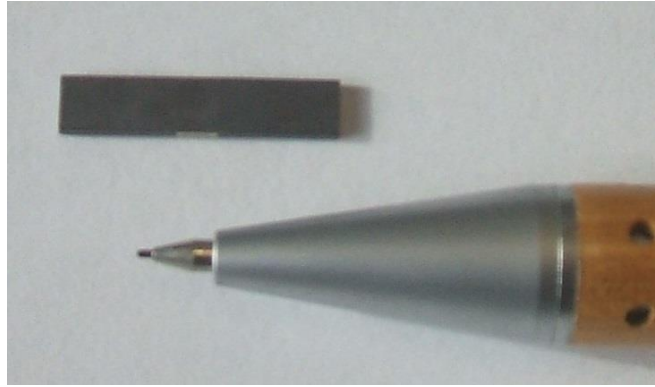
První z možností je změna velikosti primárního napětí PT. PT je přitom stále buzen na své rezonanční frekvenci. Pokud je primární část PT napájena například výstupem púl-mústku, lze dosáhnout regulace změnou napětí stejnosměrného meziobvodu. Výhodou tohoto způsobu je to, že PT je stále buzen na své rezonanční frekvenci, na které má nejvyšší účinnost. Nicméně velkou nevýhodou je potřeba dalšího regulátoru, který upravuje velikost vstupního napětí pro PT. Tento regulátor může být spojitě regulovaný, nebo impulsně regulovaný. V každém případě toto řešení komplikuje celé zapojení.

- Vynechávání period vstupního napětí PT při konstantní frekvenci

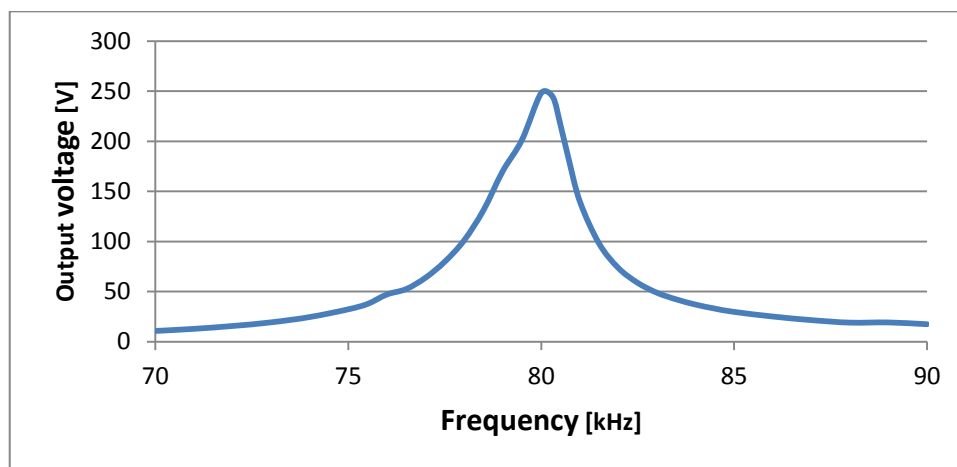
Tento způsob je pouze modifikací předchozího způsobu. V tomto případě je PT rovněž napájen napětím s frekvencí odpovídající jeho rezonanční frekvenci. Změna velikosti amplitudy sekundárního napětí PT není spojitá, ale pouze dvou stavová. Regulace spočívá ve vynechávání period primárního napětí. Je-li výstup měniče málo zatížený, je výstupní napětí udržováno filtrační kapacitou a PT nedodává do zátěže energii. Pokud dojde k poklesu výstupního napětí je k PT opět připojeno primární napětí a PT začne dodávat energii do zátěže. Pokud je zátěž měniče velká, je PT neustále připojen k primárnímu napětí a neustále dodává energii do zátěže.

- Změna frekvence vstupního napětí PT

Třetí způsob regulace spočívá ve změně frekvence primárního napětí PT při konstantní velikosti primárního napětí. Změřená závislost výstupního napětí PT (SMMTF85P1S50) při konstantním vstupním napětí 1 V je na obrázku 58. Při měření byl transformátor napájen harmonickým napětím s konstantní amplitudou a proměnou frekvencí. Výstupní část PT byla při měření zatížena rezistorem 1 M Ω . Z grafu je patrný rezonanční charakter PT. Při tomto způsobu regulace je potřeba, aby zpětnovazební regulátor měnil budící frekvenci jen v určitém rozsahu. Pro zajištění stability je potřeba, aby se frekvence primárního napětí PT pohybovala jen v rozmezí od rezonanční frekvence k nižším frekvencím (levá část charakteristiky), případně od rezonanční frekvence k frekvencím vyšším (pravá část charakteristiky). Pokud by regulátor překročil tento rozsah, došlo by ke změně charakteru zpětné vazby a ta by se změnila ze záporné na kladnou.



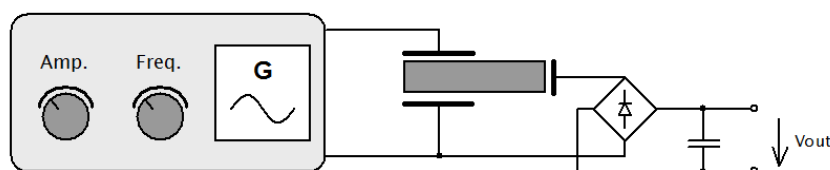
Obr. 57 Použitý PT SMMTF85P1S50 v porovnání s tužkou.



Obr. 58 Závislost výstupního napětí PT SMMTF85P1S50 na frekvenci.

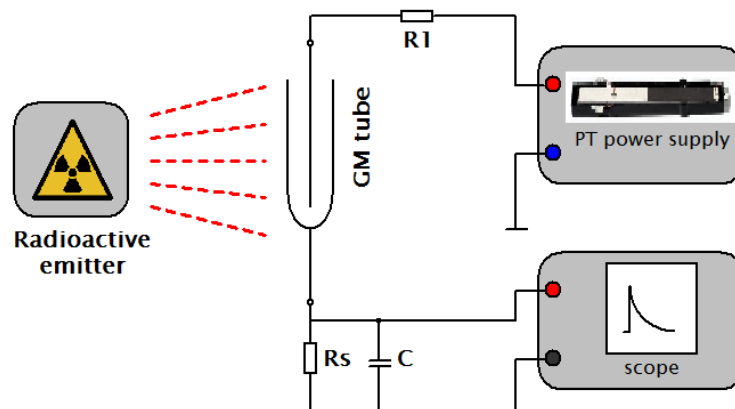
9.3 Experimentální ověření

Při experimentálním napájení GM trubice byl zvolen způsob regulace se změnou budící frekvence. PT byl při experimentu napájen z generátoru harmonického napětí s regulovatelnou frekvencí. Změnou frekvence bylo dosaženo požadovaného výstupního napětí pro použité GM trubice. Principiální zapojení použité při experimentu je naznačeno na obrázku 59.



Obr. 59 Principiální zapojení PT při napájení GM trubice.

Při experimentu byly použity dva typy GM trubic s rozdílnými vlastnostmi a rozdílnou citlivostí na ionizující záření. Oba typy trubic pocházejí z provenience bývalého Sovětského svazu. Obě trubice byly při experimentu zapojeny způsobem naznačeným na obrázku 60. Jako zdroj ionizujícího záření byl použit testovací zářič.



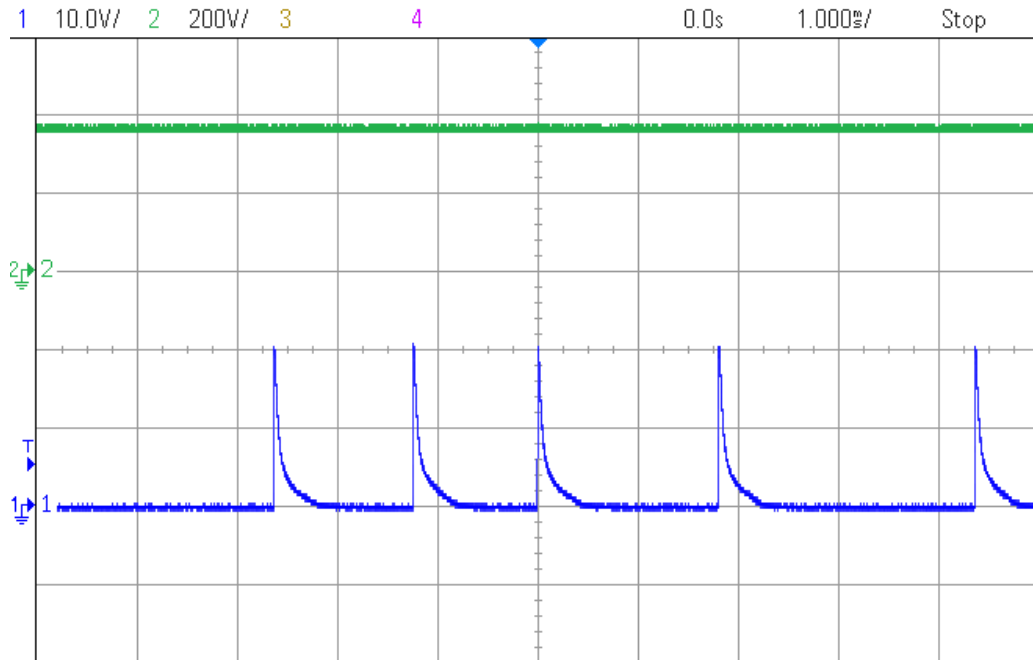
Obr. 60 Principiální zapojení GM trubic při experimentálním ověření.

Jako první byla použita trubice STS-5. Jedná se o GM trubici určenou pro detekci gama a beta záření. Pracovní napětí je v rozsahu 360 – 440 V [42]. Při experimentu byla nejvyšší citlivost dosažena při napětí napájecím napětí 380 V. Průběhy napětí zachycené na snímacím rezistoru (R_s viz obrázek 60) jsou na obrázku 61. Modrý průběh je napětí na snímacím rezistoru. Zelený průběh je napájecí napětí trubice.

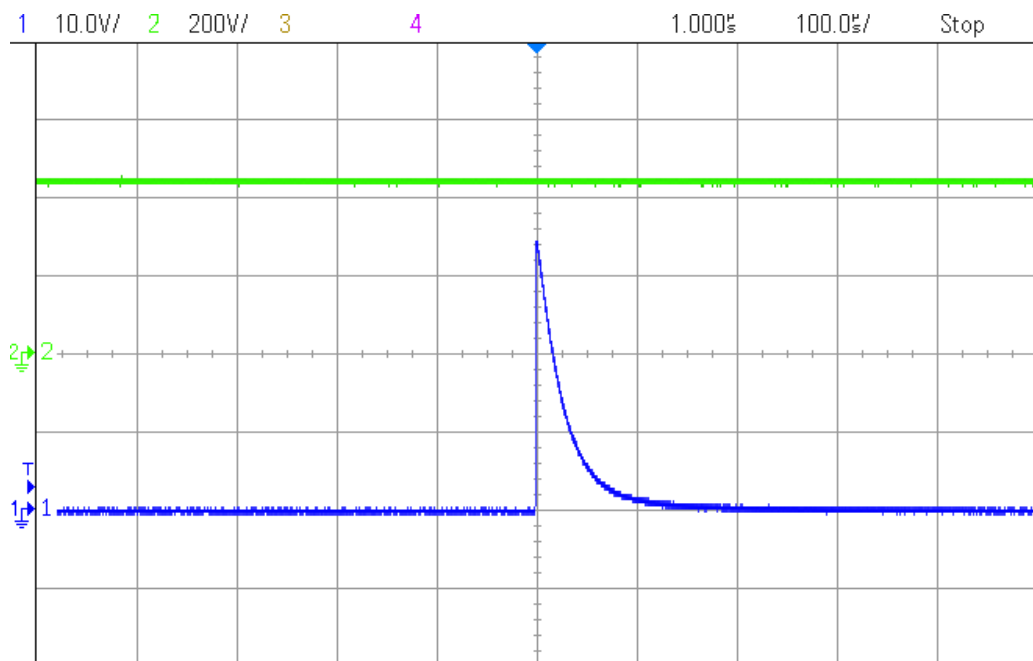
Druhá testovací GM trubice byla SI-3BG. Jedná se o GM trubici pro detekci beta a gama záření. Tato trubice byla určena pro armádní využití a je vhodná k detekci silných zdrojů záření. Pracovní napětí je v rozsahu 380 – 460 V [43]. Při experimentu dosahovala nejvyšší citlivosti při napájecím napětí 440 V. Oscilogram napětí na snímacím rezistoru je na obrázku 62.

Použití PT pro generování vysokého napětí bylo prakticky ověřeno na příkladu napájení detektorů záření, konkrétně GM trubic. Při experimentu bylo napětí v řádu stovek voltů, generované PT Rosenova typu, usměrněno a použito k napájení dvou typů GM trubic s rozdílnými vlastnostmi. Při experimentu byla jako způsob řízení PT využita změna frekvence primárního napětí PT. Na experimentální sestavě byla ověřena funkčnost celého zapojení. Při testech byly využity dva typy G trubic. Jako první byla použita STS-5. V tomto případě bylo pracovní napětí nastaveno na 380 V. Při přiblížení testovacího zářiče byly zaznamenány oscilogramy napětí na snímacím rezistoru a napájecího napětí trubice.

Druhá testovací trubice byla SI-3BG. Její pracovní napětí bylo nastaveno na 440 V. Tato trubice je určena pro velké intenzity záření a vykazovala na přiblížení zářiče menší citlivost. I tak byla schopna detekovat přítomnost testovacího zářiče.



Obr. 61 Oscilogramy napětí zachycené při testování GM trubice STS-5.



Obr. 62 Oscilogramy napětí zachycené při testování GM trubice SI-3BG.

Cílem provedených experimentů bylo ověření možnosti využití PT jako zdrojů napětí pro napájení detektorů ionizujícího záření. Jako zdroje napětí v řádu stovek voltů až jednotek kilovoltů s malým výkonem jsou velmi vhodné PT Rosenova typu s jedno či vícevrstvou strukturou. Provedené experimenty naznačují vhodnost PT pro tento typ aplikací. Velmi výhodné jsou v těchto typech aplikací malé rozměry PT. Zejména v oblasti malých přenosných detektorů ionizujícího záření napájených z baterie se jedná o velmi zajímavou alternativu ke klasickým měničům s transformátory.

10 Piezoelektrický transformátor jako zdroj napětí pro generování studeného plazmatu

Další oblast, ve které lze uplatnit PT (jako zdroj vysokého napětí s malým výkonem) je generování studeného plazmatu. Jedná se o ionizaci inertního plynu (nejčastěji argonu či helia) za běžného atmosférického tlaku. Průtok ionizovaného plynu vytváří tzv. studený plamen (cold fire). Pro ionizaci plynu je potřeba napětí v řádu stovek kV. Pro tyto aplikace lze s výhodou použít PT Rosenova typu s jedno či vícevrstvou strukturou (podle velikosti požadovaného napětí). V následujícím textu budou popsány možnosti využití PT pro tyto účely a jejich praktické ověření při experimentech.

Využití PT pro tuto aplikaci vzešlo ze zájmu externího partnera, který chtěl takové zařízení zrealizovat v rámci společného projektu s katedrou KEI elektrotechnické fakulty západočeské univerzity v Plzni. Externí partner pro zamýšlené aplikace požadoval využití argonu jako pracovního plynu. Za tímto účelem byla partnerskou firmou zapůjčena tlaková lahev s argonem pro ověření realizovatelnosti zařízení. Úplně první experimenty v tomto směru tak byly provedeny s argonem. Vzhledem ke zhoršení epidemiologické situace, v důsledku celosvětové pandemie viru COVID-19, zaměřila partnerská firma dočasně svoji pozornost jiným směrem a další jednání byla dočasně pozastavena. Podle svého vyjádření partnerská firma neztratila zájem o tento projekt a v současné době se plánuje navázání na přerušovaná jednání. Nicméně z těchto důvodů byly další experimenty a měření prováděna s heliem jako pracovním plynem, který byl na katedře dostupný.

10.1 Studené plazma a jeho využití

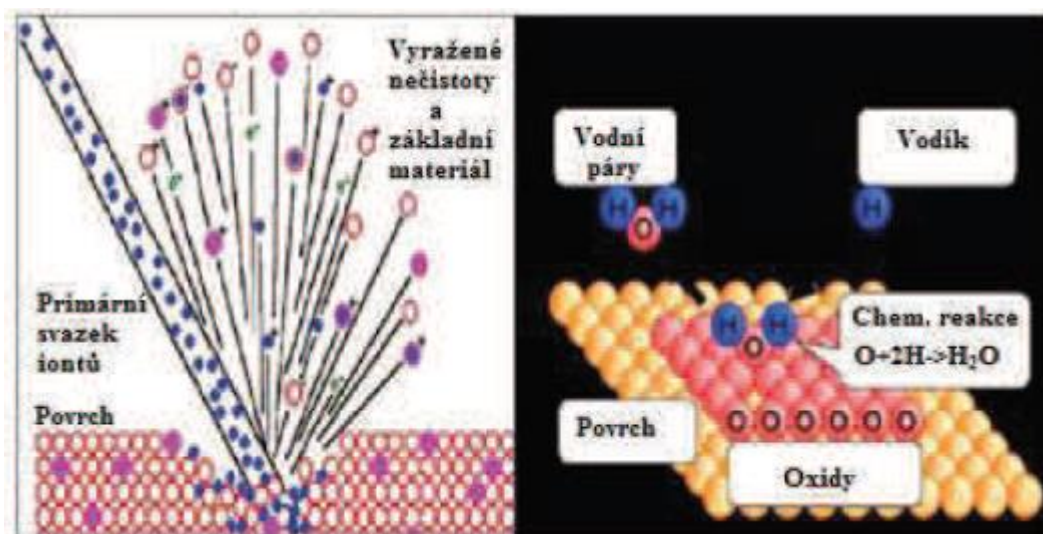
Plazma, někdy označované jako čtvrté skupenství látky, je možné vytvořit například zahříváním plynu na velmi vysoké teploty. Plazma je definováno jako „kvazineutrální soubor částic s volnými nosiči náboje, který vykazuje kolektivní chování“. Vodivost plazmatu je způsobena volnými nosiči náboje (ionty a elektrony), ale zároveň se navenek jeví jako nenabitá tekutina [44]. Plazma, se kterým se lze v přírodě běžně setkat za atmosférického tlaku (např. blesk) má velmi vysokou teplotu dosahující až několika tisíc stupňů Celsia. Z toho důvodu jej nelze využít pro běžné aplikace.

Jako studené je označované plazma s teplotou do 50 °C, které je generováno za atmosférického tlaku. Studené plazma má malý obsah ionizovaných částic (přibližně kolem 1 %). Ionty mají teplotu velmi blízkou okolní teplotě. Rychlost pohybujících se elektronů ovšem odpovídá teplotám tisíců stupňů Celsia. Mají ovšem malou hmotnost,

tudíž jejich vliv na celkovou teplotu plazmatu je malý [45]. Možnost vytvářet plazma za atmosférického tlaku zase výrazně snižuje technologickou i finanční náročnost generování plazmatu a zvyšuje mobilitu zařízení. Díky tomu lze využít technologii studeného plazmatu i v případech, kde by to vzhledem k technické i finanční náročnosti bylo nevýhodné.

Studené plazma nachází v poslední době široké spektrum uplatnění v různých oborech od průmyslu až po medicínské aplikace. V medicínských aplikacích lze využití plazmatu rozdělit na přímé a nepřímé. Nepřímé využívá sterilizačních účinků studeného plazmatu. Lze jej využít k čištění a dezinfekci nástrojů a pomůcek. Přímé využití spočívá v přímé aplikaci plazmatu během zákroku u pacienta. Jako vhodné se jeví například při léčbě různých ran, kdy pomáhá urychlovat hojení. Velmi významné je využití plazmatu při léčbě chronických ran, jako jsou bércové vředy. Další přímé využití studeného plazmatu lze nalézt například ve stomatologii nebo v kosmetické medicíně [46].

Uplatnění studeného plazmatu v průmyslu spočívá v jeho čistících schopnostech. Během různých technologických procesů, jako je lepení, pájení, nanášení různých vrstev a podobně je povrch materiálů ošetřen pomocí plazmatu. Čištění pomocí studeného plazmatu má dva principy. Fyzikální princip je založen na ostřelování povrchu ionty s vysokou rychlostí. Tyto ionty vyrážejí atomy nečistot z ošetřovaného povrchu. Druhým způsobem je princip chemický. Ionizovaný plyn chemicky reaguje s nečistotami na ošetřovaném povrchu [47]. Oba zmíněné principy čištění pomocí plazmatu jsou naznačeny na obrázku 63.

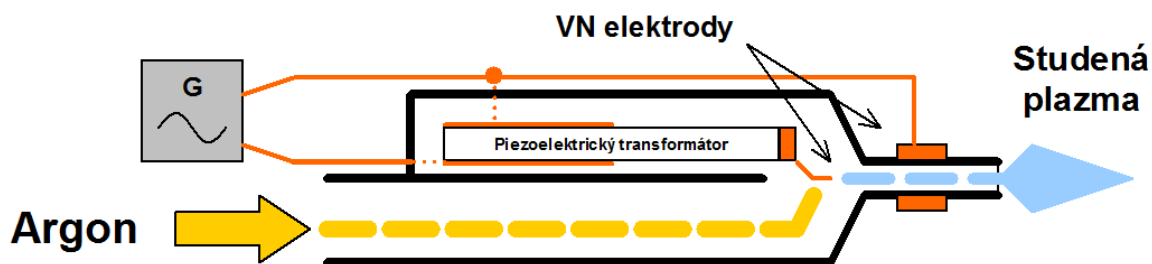


Obr. 63 Principy čištění povrchu pomocí plazmatu [47].

10.2 Plazmová tryska s piezoelektrickým transformátorem

Tato aplikace vznikla na základě připravované spolupráce s partnerskou firmou, která měla zájem o vývoj plazmové trysky pro ruční manipulaci. V důsledku celosvětové pandemie viru COVID-19 partnerská firma spolupráci na přípravě projektu dočasně pozastavila. Nicméně, dle posledních informací, její zájem o tuto problematiku přetrvává a ráda by v připravovaném projektu dále pokračovala. Cílem projektu mělo být ze strany ZČU zejména vývoj elektroniky pro řízení zařízení a vývoj měniče pro generování vysokého napětí pro ionizaci plynu.

Pro ionizaci pracovního plynu je potřeba napětí v řádu jednotek kV s frekvencí několik desítek kHz. Pro běžné každodenní aplikace je potřeba, aby plazmová tryska byla rozměrově malá (vhodná pro držení v ruce) a flexibilní. PT Rosenova typu jsou svými malými rozměry, hmotností a nízkým profilem velmi vhodné pro tento typ aplikace. Lze je snadno zastavět přímo do plazmové trysky. Vysoké napětí vzniká přímo v plazmové trysce na sekundární straně PT. To přináší i další výhody. Elektrické přívody do trysky (k primární straně PT) mohou být pouze nízkonapěťové s bezpečným napětím a nepříliš vysokými nároky na izolační pevnost přívodních vodičů. Principiální uspořádání plazmové trysky s PT je na obrázku 64.



Obr. 64 Uspořádání plazmové trysky s vestavěným PT.

První praktické ověřovací pokusy s plazmovou tryskou byly realizovány pomocí plastové injekční stříkačky, do které byl umístěný piezoelektrický transformátor. Vnitřní vysokonapěťová elektroda byla vyvedena přímo z PT. Druhá elektroda byla prstencová a byla nasunuta na vyústění zkušební trysky.

Z tlakové láhve byl do zkušební trysky přiváděn pracovní plyn. Plyn byl přiváděn přes redukční ventil kvůli omezení tlaku a průtoku plynu. Jako pracovní plyn byl při prvních pokusech použit argon. Při pozdějších experimentech bylo využíváno helium.

Vysoké napětí generované PT způsobuje mezi elektrodami velkou intenzitu elektrického pole. Pokud je intenzita pole dostatečně vysoká, dochází k ionizaci přiváděného pracovního plynu a tím ke vzniku plazmatu. Při optimálním průtoku plynu je vzniklé plazma vyfukováno ven z trysky v podobě “studeného plamene“. Takto vzniklé plazma má nízkou teplotu (do 50 °C).

Jako zdroj vysokého napětí při těchto experimentech byl použitý PT od firmy Steiner & Martins, inc. SMSTF68P10S9. Jedná se o jednovrstvý transformátor Rosenova typu. Na obrázku 65 je fotografie použitého PT a v tabulce V jsou uvedeny základní parametry [48].

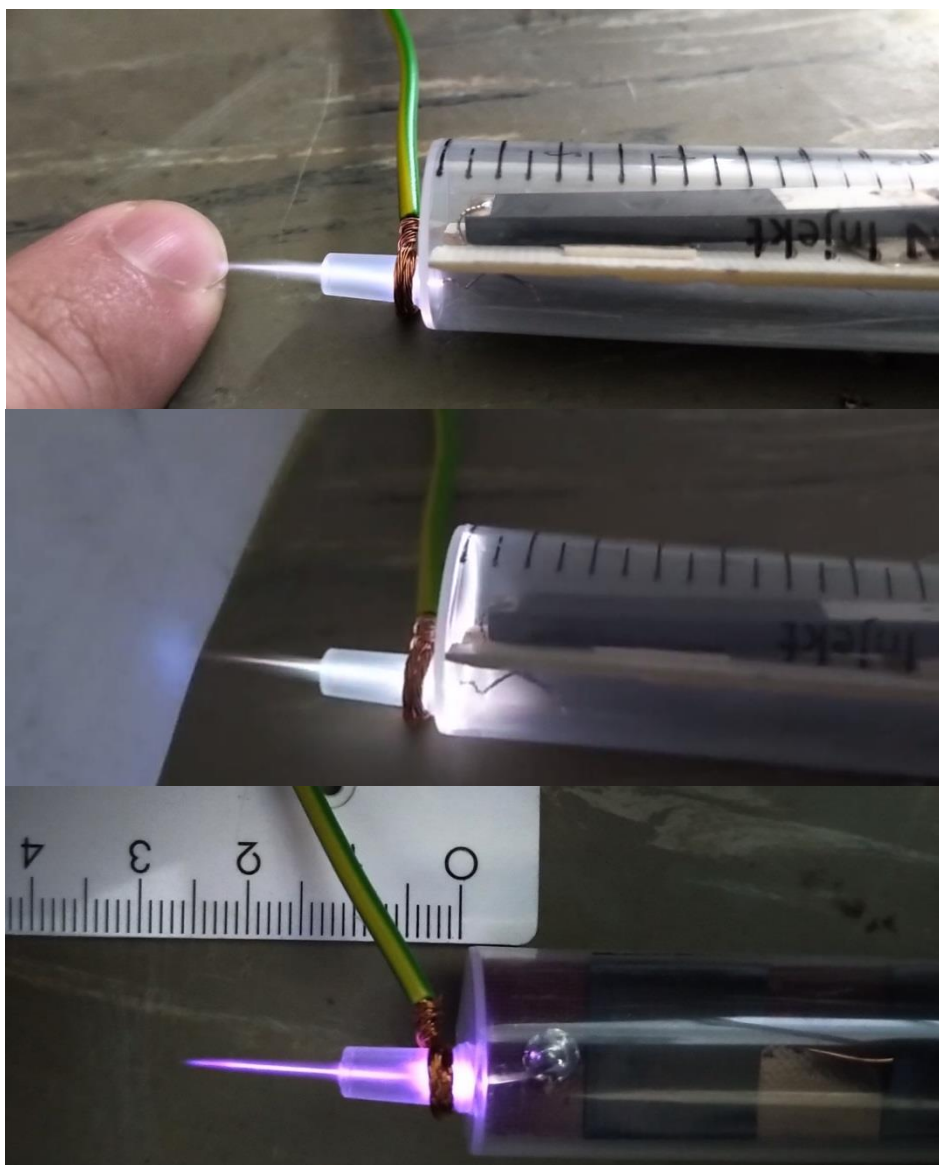


Obr. 65 Piezoelektrický transformátor SMSTF68P10S9.

Tabulka V. Parametry transformátoru SMSTF68P10S9 [48].

Napětíový převod	9
Maximální výkon	10 W
Rezonanční frekvence	68 kHz
Max. vstupní napětí (RMS)	130 V
Max. výstupní napětí (p-p)	7000 V
Max. výstupní výkon	100 mW
Vstupní kapacita (C_{01})	940 pF
Výstupní kapacita (C_{02})	8 pF
Délka	20 mm
Šířka	4 mm
Tloušťka	1 mm

Na obrázku 66 je zobrazena zkušební plazmová tryska generující studenou plazmu během prvních experimentů. Na prvních dvou snímcích je jako pracovní plyn použitý argon. Na spodním snímku je použito helium. I když jsou barvy plazmového plamene na obrázku mírně zkresleny použitým fotoaparátem, je z obrázků patrné rozdílné zbarvení plamene v závislosti na použitém pracovním plynu.



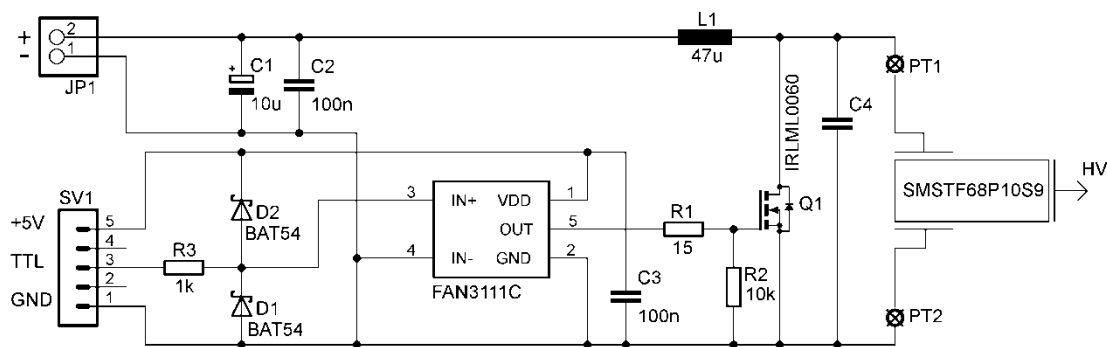
Obr. 66 Plazmová tryska generující studené plazma během experimentů. Rozdílné zbarvení při použití argonu (první a druhá fotografie) a helia (poslední fotografie).

10.3 Napájecí zdroj s PT pro plazmovou trysku

Vzhledem k požadavkům externí partnerské firmy byl jako pracovní plyn uvažován argon. První ověřovací experimenty tak byly provedeny s argonem, který byl zapůjčen od partnerské firmy. Tyto první experimenty trvaly jen krátkou dobu a bohužel během nich nebyly získány téměř žádné informace. Po navrácení zapůjčené tlakové láhve s argonem, tak byly další experimenty prováděné s héliem, které bylo na naší katedře k dispozici.

Při experimentech s plazmovou tryskou byl PT (SMSTF68P10S9) napájen z generátoru harmonickým napětím. Při tom bylo změřeno napětí potřebné pro ionizaci plynu při daném uspořádání plazmové trysky. Pro sestavu trysky, zachycenou na obrázku 66, byla potřebná amplituda napětí v rozmezí cca od 1 do 1,2 kV (při frekvenci 62 kHz) při použití helia. Při prvních experimentech s argonem nebyla tato hodnota bohužel přesně změřena. Amplituda napětí pro argon se pohybovala okolo 3,5 kV. Tyto první experimenty posloužily jako ověření, zda je vytipovaný PT pro tuto aplikaci vhodný.

Pro buzení PT byla zvolena topologie zesilovače pracujícího ve třídě E (kapitola 8.1). Za výhodné vlastnosti této topologie lze považovat přítomnost pouze jednoho spínacího prvku (nevyžadující horní budič) a možnost dosáhnout spínání v nule napětí. Schéma zapojení je na obrázku 67.

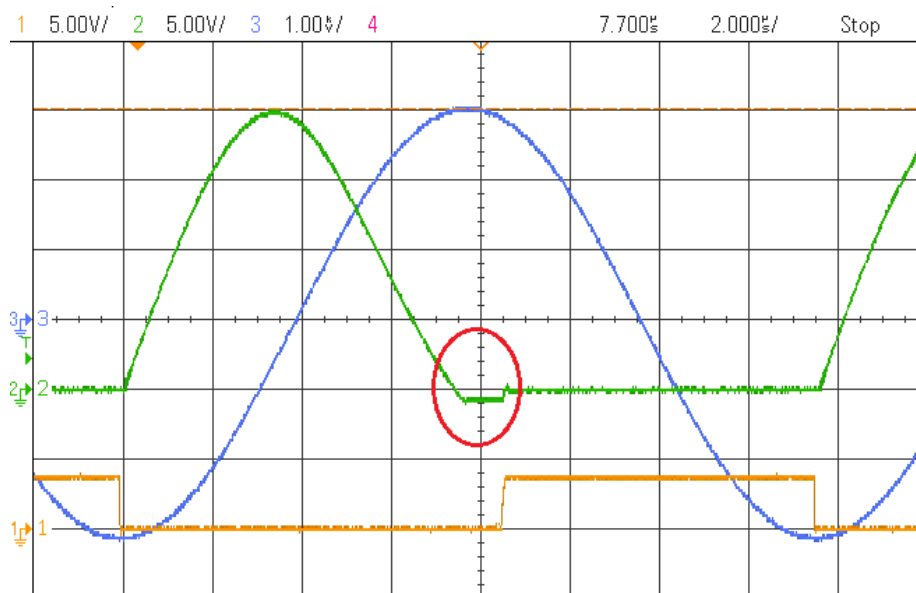


Obr. 67 Schéma zapojení zesilovače ve třídě E pro buzení PT.

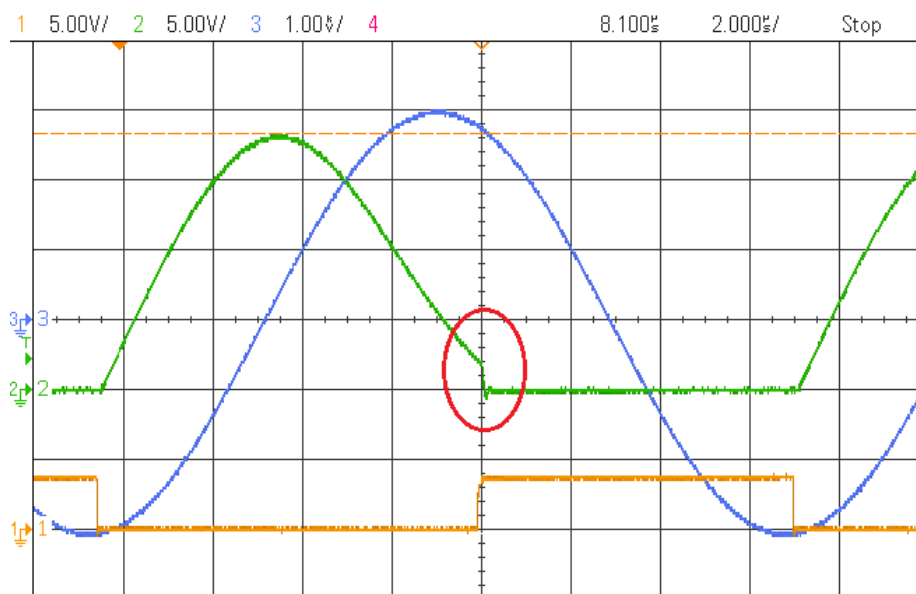
Pro větší variabilitu bylo napájecí napětí pro budič tranzistoru a pro samotný zesilovač odděleno. Budič je napájen 5 V a řízen TTL signálem. Samotný zesilovač lze napájet i vyšším napětím než budič. Nicméně při této konkrétní aplikaci je uvažováno napájecí napětí 5 V a budič i samotný zesilovač lze napájet z jednoho zdroje.

Podmínky spínání tranzistoru (na rezonanční frekvenci PT) jsou závislé na velikosti kapacity C_4 . Jeho vhodnou volbou lze dosáhnout spínání v nule napětí. Vhodná velikost C_4

byla nalezena experimentálně. Na obrázcích 68 a 69 jsou zachyceny průběhy napětí pro různé hodnoty kapacity C_4 . Zelený průběh je napětí u_{DS} tranzistoru Q_1 (viz schéma na obr. 67). Modrý průběh je výstupní napětí PT. Žlutý průběh je řídicí TTL signál.



Obr. 68 Průběhy napětí na zesilovači ve třídě E – C_4 má malou kapacitu.

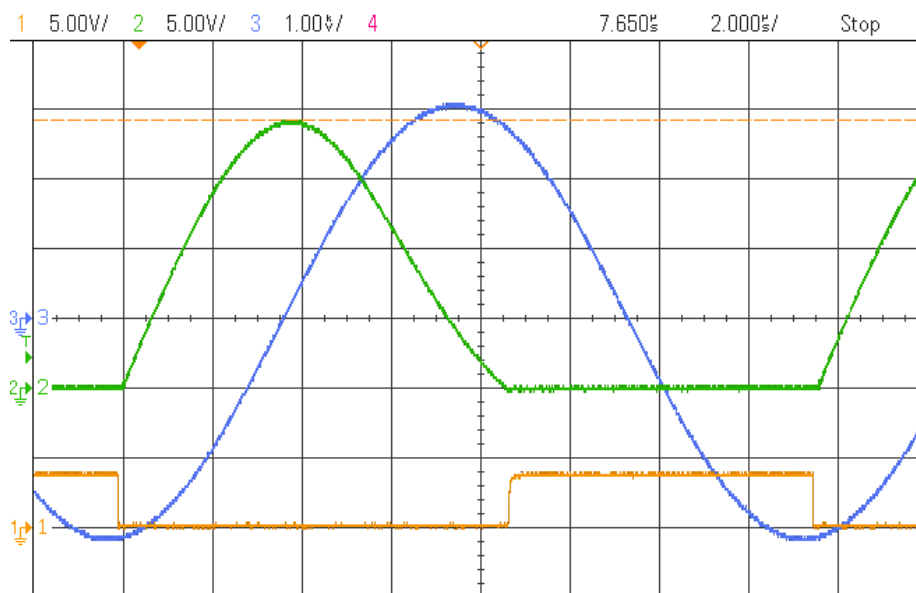


Obr. 69 Průběhy napětí na zesilovači ve třídě E – C_4 má velkou kapacitu.

Při malé kapacitě C_4 (obrázek 68) klesne napětí k nule dříve, než dojde k jeho sepnutí. Při změně polaroty napětí na Q_1 dojde k otevření substrátové diody. Po tuto dobu přes Q_1 protéká záporný proud.

Při velké kapacitě C_4 (Obrázek 69) je tranzistor Q_1 sepnut dříve, než napětí poklesne k nule. Při sepnutí tranzistoru dojde k vybití C_4 a zmaření části energie, která je v obvodu akumulována.

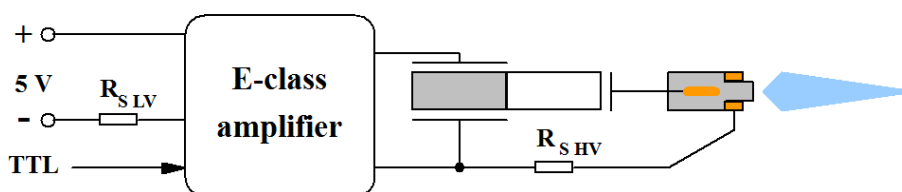
Na obrázku 70 jsou průběhy napětí při optimálně zvolené kapacitě. Napětí poklesne na nulu přibližně v okamžiku, kdy je tranzistor Q_1 opět sepnut. Výsledná kapacita C_4 se skládá z paralelní kombinace kondenzátorů 47 nF a 22 nF. Celková kapacita je ovlivněna vstupní kapacitou PT C_{01} (940 pF). Rovněž je započítána kapacita C_{DS} tranzistoru Q_1 , nicméně vzhledem k její velikosti (37 pF) ji lze zanedbat.



Obr. 70 Průběhy napětí na zesilovači ve třídě E – C_4 má optimální kapacitu.

10.4 Měření napájecího zdroje s PT pro plazmovou trysku

Po nastavení vhodné kapacity C4, bylo na realizovaném měniči provedeno několik měření. Na realizovaném měniči byl změřen vstupní napájecí proud ve stavu bez průtoku helia a s průtokem helia. Rovněž byl v obou případech měřen proud na vysoko napěťové straně PT a zároveň výstupní napětí PT. Blokové schéma měřicího uspořádání je naznačeno na obrázku 71. Pro účely tohoto měření byl PT umístěn mimo improvizovanou trysku (z důvodu měření jeho výstupního napětí). Do trysky bylo výstupní napětí připojeno izolovaným vodičem.



Obr. 71 Blokové schéma měřicího uspořádání.

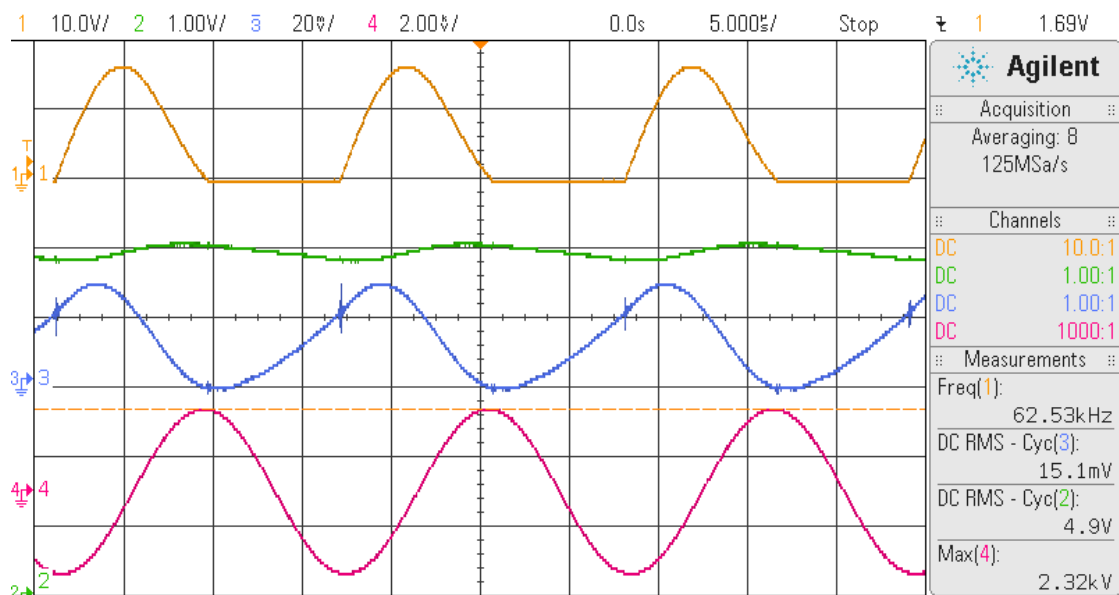
Na snímacím rezistoru R_{SHV} (100 Ω) byl měřen výstupní proud na vysokonapěťové straně. Na rezistoru R_{SLV} (100 m Ω) byl měřen celkový napájecí proud zesilovače ze zdroje.

Při napájecím napětí 5 V byla maximální amplituda výstupního napětí cca 2,3 kV bez průtoku helia. Při ionizaci helia se amplituda napětí na hořícím plazmovém oblouku snížila na cca 950 V. Tato hodnota napětí je dostatečná pro udržení zapáleného plazmového oblouku. Při experimentech se rozsah amplitudy napětí na zapáleném oblouku pohyboval v rozmezí cca 800 V až 1,2 kV. Při snížení napětí oblouk pohasl, nebo docházelo k ionizaci plynu jen v blízkosti elektrody a ionizovaný plamen se nepodařilo vyfouknout z trysky ven. Při zvyšování napájecího napětí zesilovače se napětí na ionizovaném plamenu povedlo zvýšit na cca 1,2 kV. Další zvyšování napájecího napětí už nevedlo ke zvýšení napětí na ionizovaném oblouku.

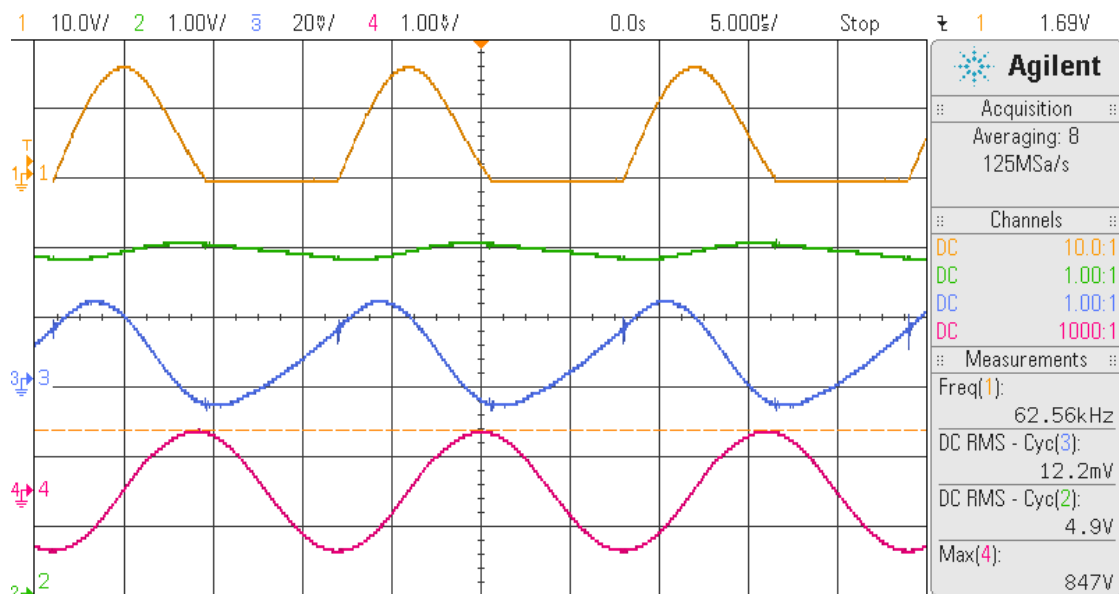
10.4.1 Měření výkonu

Na následujících obrázcích jsou oscilogramy zachycené během měření na zesilovači nejprve bez průtoku helia (obrázek 72) a poté s heliem a hořícím plazmovým obloukem (obrázek 73). Na obou obrázcích představuje první kanál (žlutý průběh) vstupní napětí PT (rovněž odpovídá napětí u_{DS} tranzistoru Q_1 viz schéma na obrázku 67). Druhý kanál (zelený průběh) je napájecí napětí zesilovače. Kanál tři (modrý průběh) představuje

napájecí proud zesilovače, změřený jako úbytek napětí na snímacím rezistoru R_{SLV} (viz obrázek 71). Čtvrtý kanál (červený průběh) odpovídá výstupnímu napětí PT.



Obr. 72 Oscilogram zachycený při měření bez průtoku helia.



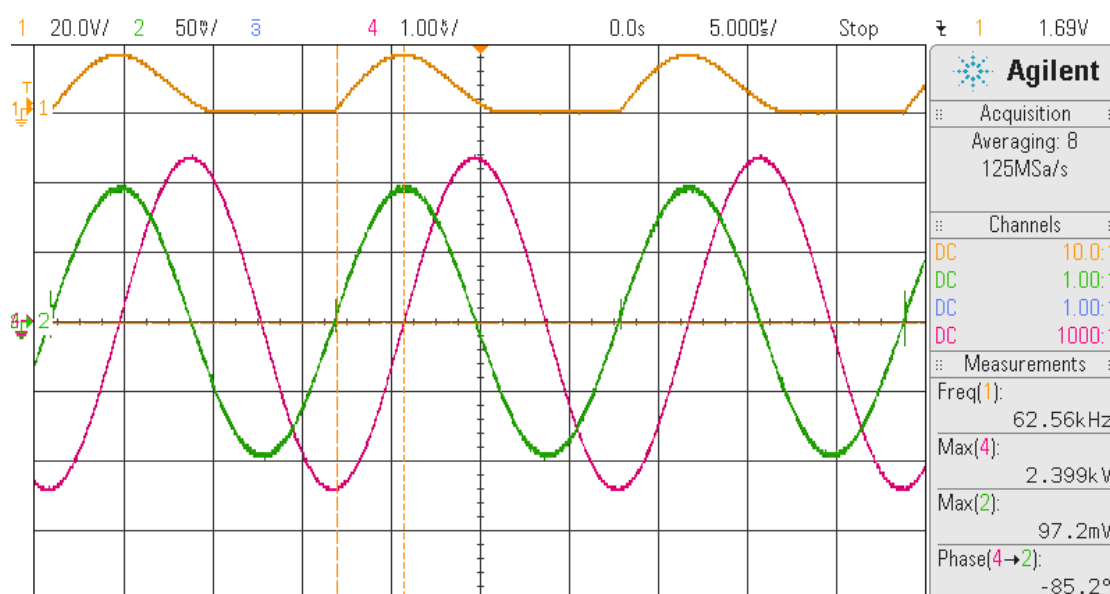
Obr. 73 Oscilogram zachycený při měření s heliem a hořícím plazmovým obloukem.

Při stavu bez helia je efektivní hodnota napájecího proudu zesilovače 151 mA ($R_{SLV} = 100 \text{ m}\Omega$). Při napájecím napětí s efektivní hodnotou 4,9 V je příkon odebraný ze zdroje 0,739 W.

Při puštění průtoku helia dojde k jeho ionizaci, zapálení oblouku a vyfouknutí ionizovaného plamene ven z trysky. V tomto stavu (obrázek 73) je efektivní hodnota napájecího proudu 122 mA a příkon odebíraný ze zdroje 0,598 W. Po zapálení oblouku se amplituda výstupního napětí PT sníží na cca 850 V. V obou případech byl výstup PT zatížen vysokonapěťovou sondou Tektronix P6015A s impedancí 100 M Ω .

10.4.2 Měření výstupního proudu

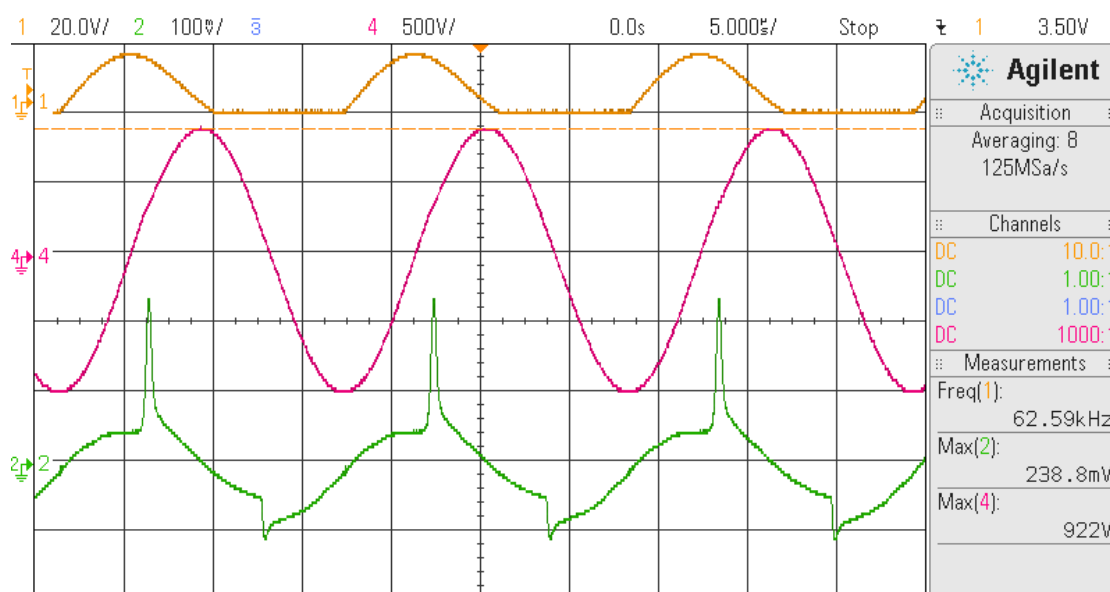
Na obrázcích 74 a 75 jsou zaznamenány oscilogramy z měření výstupního proudu PT. Měření probíhalo opět bez průtoku plynu a poté s plynem a hořícím plazmovým obloukem. Výstupní proud PT byl změřen jako úbytek napětí na snímacím rezistoru R_{SHV} (viz obrázek 71). Tento úbytek odpovídá zelenému průběhu napětí (druhý kanál). Červený průběh na čtvrtém kanálu představuje výstupní napětí PT. Žlutý průběh opět odpovídá vstupnímu napětí PT.



Obr. 74 Měření výstupního proudu PT bez průtoku helia.

Z obrázku 74 je patrné, že i v případě bez hořícího plazmového oblouku je výstup PT zatížen kapacitním proudem. Tento proud vzniká patrně v důsledku vysoké intenzity elektrického pole mezi elektrodami trysky. Velikost snímacího odporu R_{SHV} byla 100 Ω . Amplituda výstupního proudu (podle obrázku 74) tedy odpovídá hodnotě 972 μA . Velikost

tohoto proudu je rovněž citlivá například na přiblížení ruky apod. Z fázového posuvu vůči výstupnímu napětí PT je rovněž patrné, že se jedná o kapacitní proud.



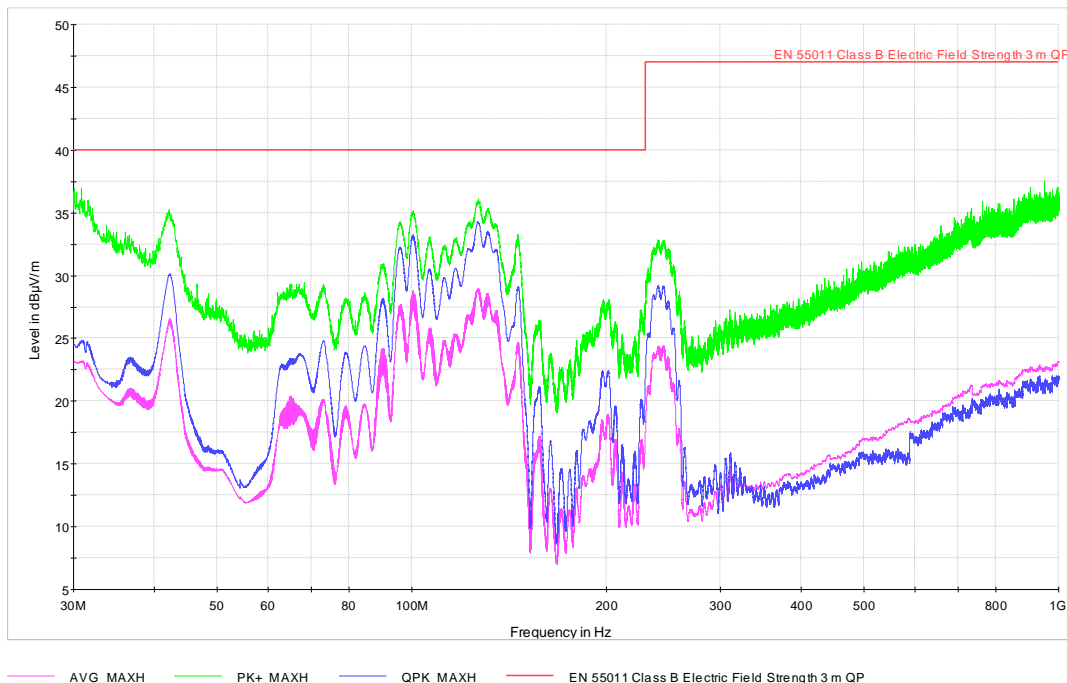
Obr. 75 Měření výstupního proudu PT s hořícím plazmovým obloukem.

Obrázek 75 je oscilogram z měření výstupního proudu PT s hořícím plazmovým obloukem. V porovnání se stavem bez hořícího oblouku jsou zde patrné výrazné deformace původně harmonického průběhu. Ty jsou způsobeny patrně nárůstem proudu při zapálení oblouku. Rovněž vrcholová hodnota výstupního proudu PT dosahuje mnohem vyšší hodnoty 2,38 mA, přesto že amplituda výstupního napětí je nižší.

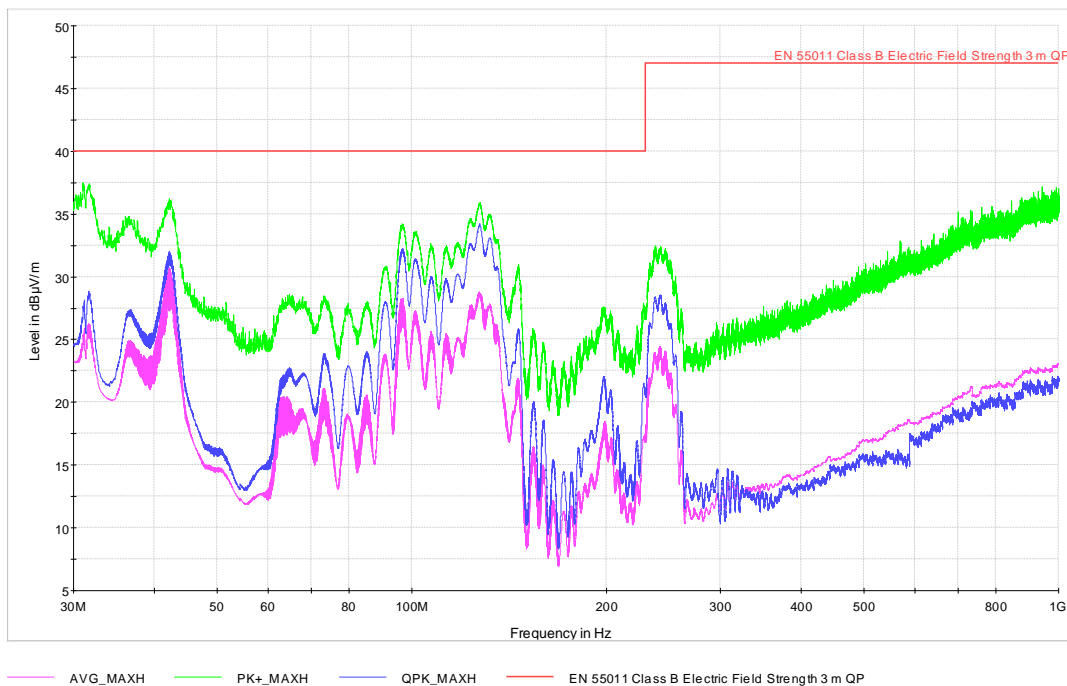
10.4.3 Měření EMC

Na zesilovači s PT bylo dále provedeno měření elektromagnetické kompatibility (EMC) v bezodrazové komoře. V komoře bylo provedeno měření vyzařovaného elektrického pole ze vzdálenosti 3 m. Pomocí umělé sítě bylo rovněž provedeno měření rušení šířícího se po napájecím vedení zesilovače. Rovněž jako v předchozích případech byla provedena měření nejprve pro stav bez helia a poté s heliem a hořícím plazmovým výbojem. Provedená měření byla porovnána s dovolenými limity podle normy EN55011 [49]. Obrázky 76 a 77 zobrazují naměřené hodnoty vyzařovaného elektromagnetického pole pro horizontální polohu antény. Výsledky měření pro vertikální polohu antény se nikterak výrazně neliší. Tyto grafy jsou součástí přílohy D. Růžová křivka představuje střední hodnotu intenzity el. pole. Modrá křivka kvazi-špičkovou

hodnotu a zelená křivka odpovídá špičkové hodnotě intenzity el. pole. Červeně je v obrázku vyznačen limit daný normou EN 55011.

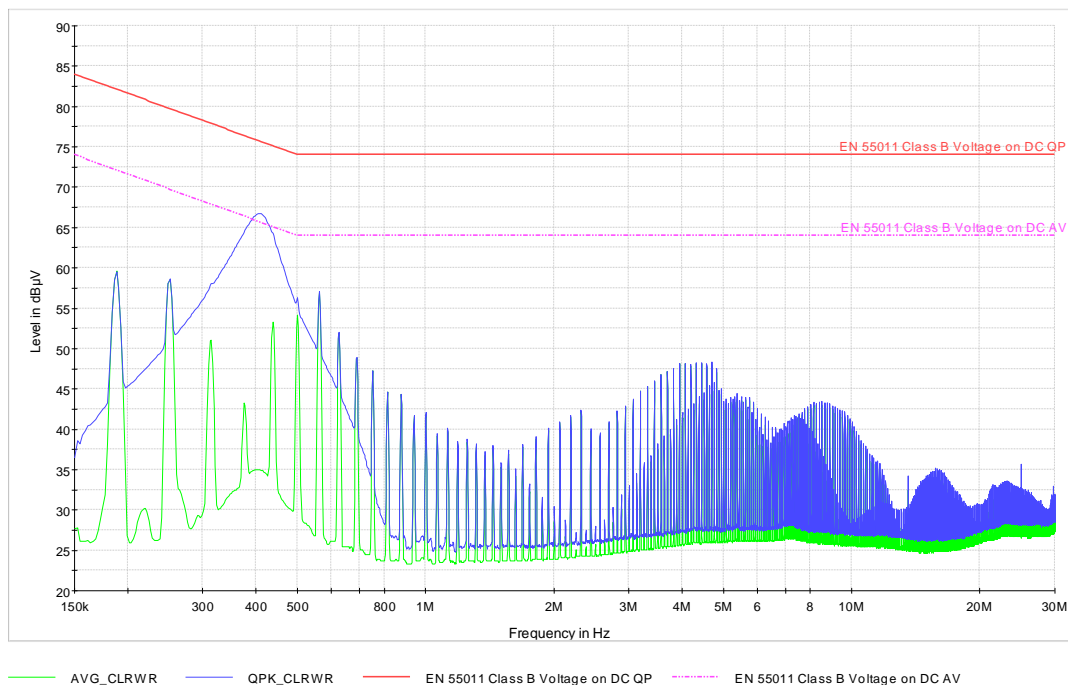


Obr. 76 Spektrum intenzity vyzařovaného elektrického pole bez helia.



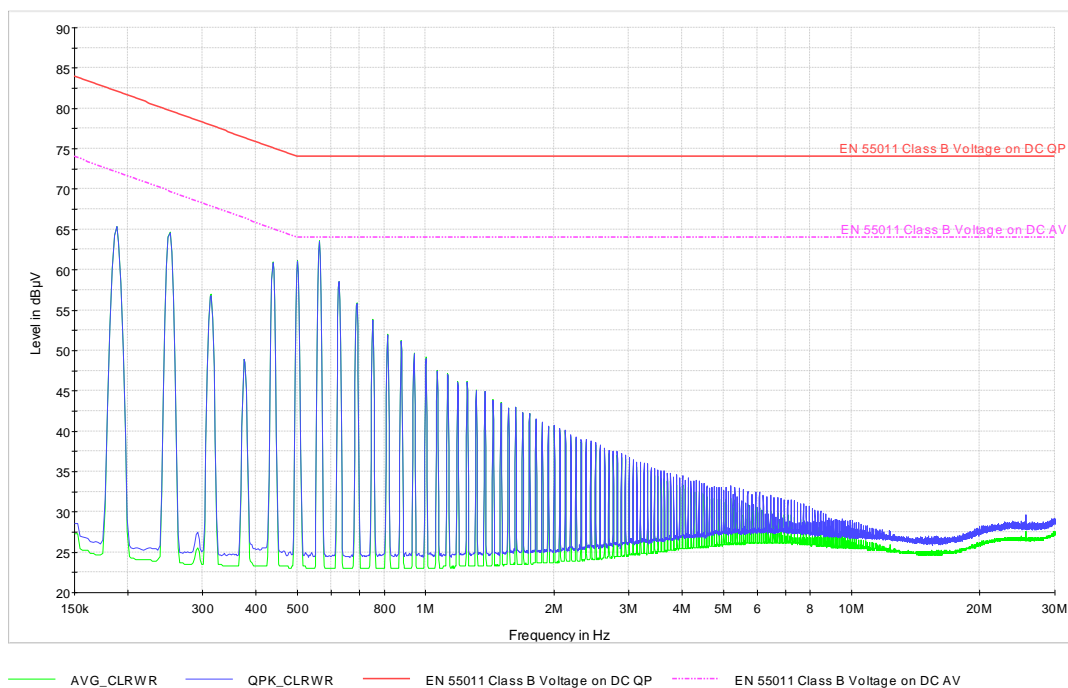
Obr. 77 Spektrum vyzařovaného elektrického pole s hořícím plazmovým výbojem.

Dále bylo měřeno rušení šířící se po napájecích vodičích s pomocí umělé sítě. Opět nejprve ve stavu bez helia jen se spuštěným měničem a poté s heliem a hořícím plazmovým obloukem. Na obrázcích 78 a 79 jsou výsledky měření bez helia jen se spuštěným měničem generujícím VN napětí.



— AVG_CLRWR — QPK_CLRWR — EN 55011 Class B Voltage on DC QP — EN 55011 Class B Voltage on DC AV

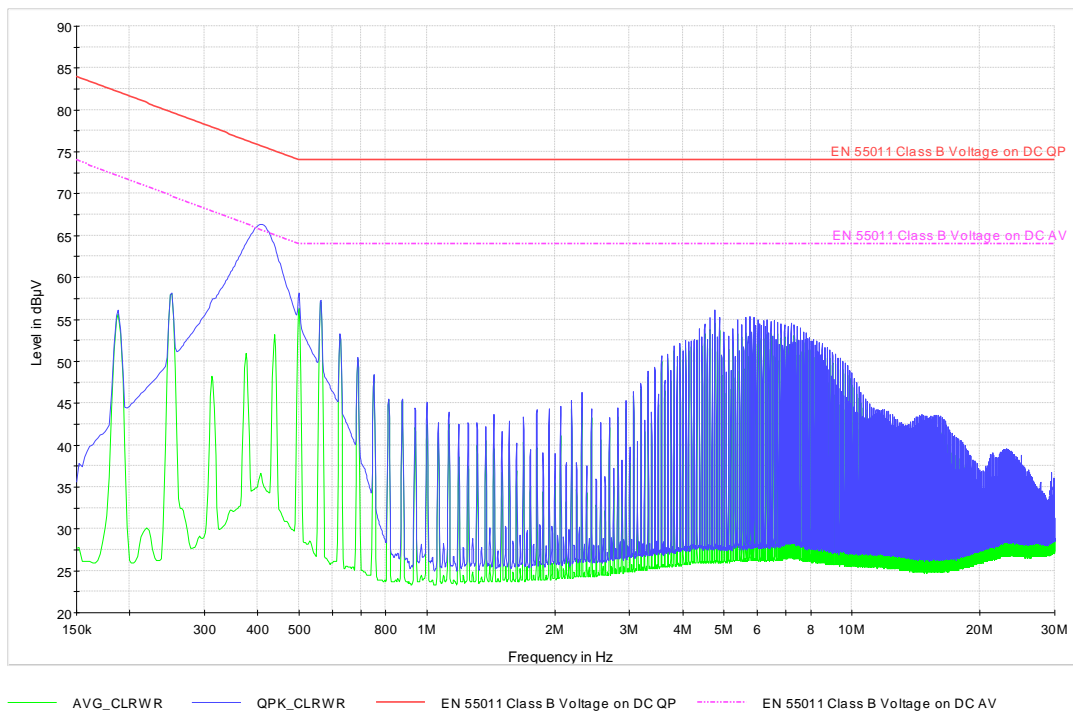
Obr. 78 Spektrum symetrických rušivých napětí (common mode voltage) bez helia.



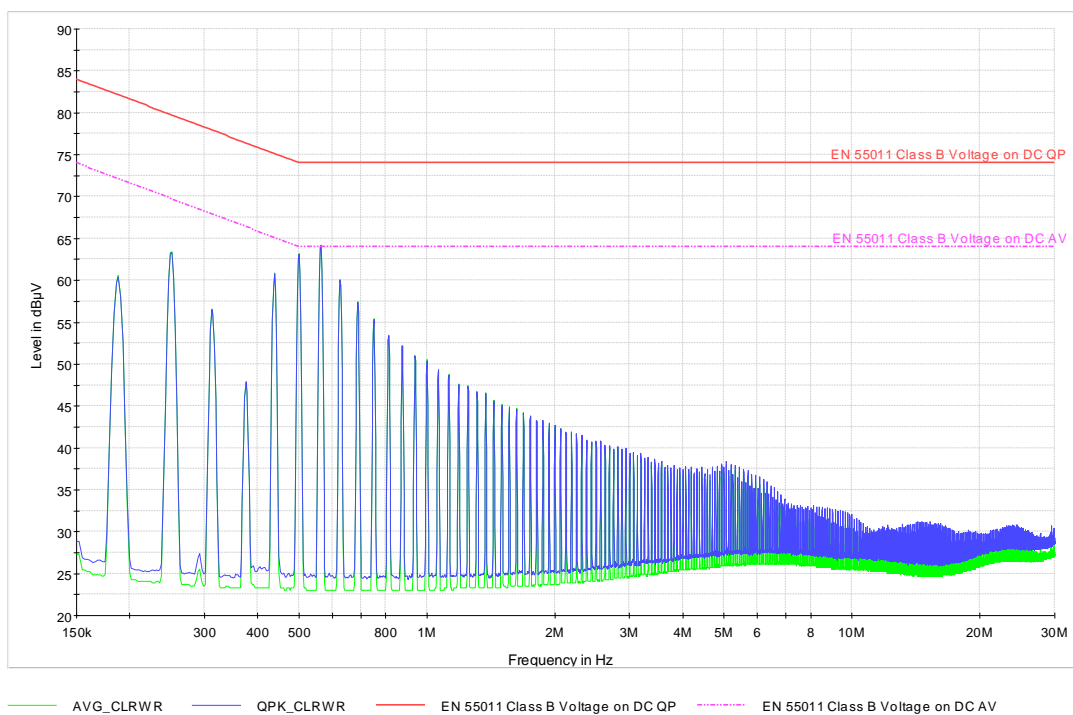
— AVG_CLRWR — QPK_CLRWR — EN 55011 Class B Voltage on DC QP — EN 55011 Class B Voltage on DC AV

Obr. 79 Spektrum nesymetrických rušivých napětí (differential voltage) bez helia.

Obrázky 80 a 81 reprezentují naměřené rušení s heliem a zapáleným plazmovým výbojem.



Obr. 80 Spektrum symetrických rušivých napětí (common mode voltage) s hořícím plazmovým výbojem.

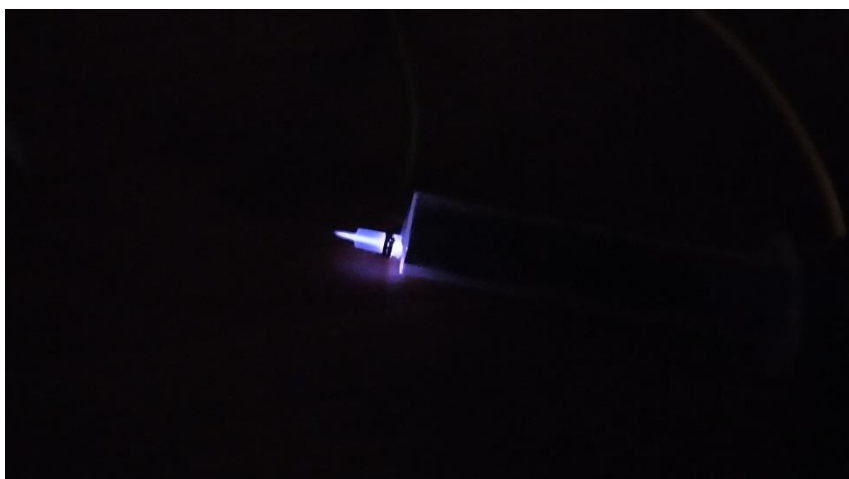


Obr. 81 Spektrum symetrických rušivých napětí (differential voltage) s hořícím plazmovým výbojem.

Další změřené výsledky z testování EMC jsou součástí přílohy D. Z výsledků měření v bezodrazové komoře je patrné, že vyzařované rušení ve stavu bez helia a s hořícím plazmovým výbojem se nikterak zásadně neliší. V obou případech jsou s rezervou dodrženy limity požadované normou. Ve výsledných spektrech rušení po vodičích, změřených s umělou sítí, jsou patrné špičky. Tyto špičky odpovídají vyšším harmonickým od spínací frekvence (cca 62,5 kHz). Ani i zde nejsou překročeny limity požadované normou. Hlavní přínos tohoto měření je ověření vlivu hořícího plazmového výboje na vyzařované spektrum. Z výsledků je patrné, že hořící plazmový výboj nepředstavuje z hlediska rušení závažnou komplikaci. Na obrázcích 82 a 83 jsou fotografie z testování měniče v bezodrazové komoře.



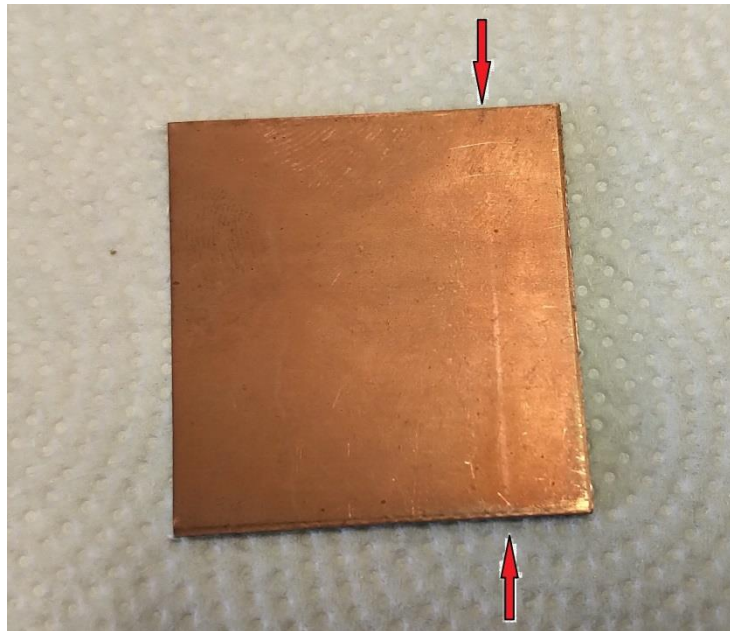
Obr. 82 Měření EMC v bezodrazové komoře.



Obr. 83 Detail z měření EMC.

Cílem experimentů s využitím PT pro generování studené plazmy bylo ověření realizovatelnosti a získání konkrétních výsledků s popsáním řešením vysokonapětového zdroje. Myšlenka využití PT již byla v minulosti publikována například v [50]. Nicméně zde není diskutováno konkrétní zapojení celého měniče, využívajícího PT a PT je napájen z laboratorního generátoru se zesilovačem. Tato práce byla zaměřena na návrh celého VN zdroje včetně měniče pro buzení PT. Cílem bylo ověřit navrženou topologii měniče z hlediska funkčnosti použitelnosti podle požadavků externího partnera. Rovněž, díky realizaci funkčního vzorku, byla získána představa o výkonové náročnosti takového řešení a jeho vlastnostech i z hlediska elektromagnetické kompatibility. Obecně lze říci, že problematika PT z hlediska EMC není v dostupných publikacích příliš často řešena.

Další vývoj v této oblasti by měl být zaměřen především na mechanické řešení plazmové trysky a celého systému. Z hlediska elektroniky by měl být dále vyvinut systém pro řízení celého zařízení (spínání průtoku pracovního plynu případně regulace průtoku, uživatelské rozhraní, řízení měniče s PT apod.) To je však úkol pro případnou budoucí spolupráci s externí firmou, na jejíž popud byla tato problematika řešena a přesahuje rámec a zaměření této práce.



Obr. 84 Stopa po čištění mědi plazmovým plamenem.

11 Závěr

Piezoelektrické transformátory představují zajímavou alternativu k transformátorům s elektromagnetickou vazbou. Ač jsou piezoelektrické transformátory známy a zdokonalovány již více než 60 let, jejich praktické uplatnění je velmi ojedinělé. Ve většině případů se jedná pouze o specifické aplikace. V případě běžné spotřební elektroniky tvořily částečně výjimku měniče pro CCFL výbojky využívající PT Rosenova typu. V současné době však s nástupem LED technologií pro podsvětlení displejů je i tato oblast působnosti PT omezena. V jiných oblastech elektroniky je lze nalézt jen stěží. Rovněž povědomí o piezoelektrických transformátorech, jejich vlastnostech a možnostech využití není příliš velké. V některých aplikacích však mohou být jejich specifické vlastnosti s výhodou využity. Rovněž dohledání některých informací o PT je poněkud obtížnější, či spíše nemožné. Publikace v českém jazyce, které by se komplexně věnovaly PT prakticky neexistují. V anglicky psané literatuře je k dohledání informací více, ale i zde se mi nepodařilo najít příliš mnoho zdrojů, které by byly věnovány PT a popisovaly je nejen v rovině teoretické, ale i aplikační. Ve většině případů se navíc jedná o vědecké publikace zaměřené na konkrétní experiment.

Jedním z cílů této práce bylo prostudovat vlastnosti PT, možné typy, jejich chování a také možnosti využití či způsoby řízení. Dalším z cílů práce bylo navrhnout a prakticky realizovat různá řešení s PT. Práce se věnuje PT jak v teoretické rovině (náhradní schéma PT a jejich simulace), tak praktické využitelnosti PT. Z hlediska aplikačního je důležité se věnovat i obvodům pro buzení PT případně usměrňovacím obvodům. Z toho důvodu je i této problematice v práci věnován prostor. Práce se taktéž věnuje praktickým využitím PT. Na sestavených a změřených funkčních vzorcích byly ověřeny možnosti PT a naznačen způsob jejich možného využití.

Prvním z výsledků této práce je postup určení prvků náhradního schématu PT na základě měření. Při použití hotového PT lze ve většině případů informace o náhradním schématu získat od výrobce. Ovšem v případě, kdy byl PT sestaven jako pokusný vzorek, je situace odlišná. Tento postup, navržený a popsáný v kapitole 5, umožňuje vcelku rychlé určení jednotlivých prvků náhradního schématu PT bez znalosti použitých materiálů a jejich parametrů. Rovněž není potřeba využití analyzátorů impedance či podobných měřících zařízení. Provedené experimenty a ověření výsledků pomocí simulací naznačují, že náhradní schéma odvozené popsanou metodou vcelku dobře popisuje chování PT. Zejména v okolí rezonance je shoda s reálným chováním PT velmi dobrá.

Dalším z praktických výsledků popsaných v práci je ověření možností využití PT pro napájení budících obvodů MOSFET příp. IGBT tranzistorů. Přesto že myšlenka využití PT pro buzení MOSFET tranzistorů (příp. tyristorů) není nová a v literatuře již byla několikrát zmíněna, vždy se jednalo o přímé buzení tranzistoru z PT. V kapitole 6 je popsán způsob využívající PT k napájení budících obvodů MOSFET tranzistorů. PT v tomto případě slouží jako pomocný zdroj s galvanicky odděleným výstupním napětím. I přesto, že v experimentech byly využity vzorky PT sestavené z nevhodných materiálů, jsou výsledky dobré. Provedené experimenty naznačují, že takovýto způsob využití PT je možný. Využití PT v malých pomocných zdrojích nemusí být záležitostí pouze napájení budičů tranzistorů, ale může najít uplatnění i jinde.

Rovněž byla zkoumána možnost využít PT nejen pro galvanicky oddělené napájení, ale zároveň pro přenos řídicích signálů, nebo přenosu dat. V kapitole 7 je popsán možný způsob využití parazitních rezonančních frekvencí PT pro přenos signálu. Dosud provedené experimenty naznačují, že je tímto způsobem možné přes PT přenášet současně jak energii pro napájení zařízení, tak i signál pro jeho řízení.

Další oblast, která se jeví jako vhodná pro uplatnění PT, a nebyla v literatuře doposud publikována, je generování napětí pro detektory ionizujícího záření. Tyto detektory (např. Geiger-Müllerovy trubice) pro svoji činnost vyžadují napájecí napětí v rozsahu od cca 100 V do 1 kV. Odebíraný proud je však velmi malý (jednotky až desítky μA). Tyto požadavky jsou schopny splnit vícevrstvé PT Rosenova typu. Provedené experimenty ukazují, že PT jsou v této oblasti dobře použitelné. Díky velkému napěťovému zisku, nízkému profilu, malým rozměrům a nízké hmotnosti se jeví jejich využití jako vhodné zejména v přenosných přístrojích napájených z baterie. Na dvou typech Geiger-Müllerových trubice napájených z PT byla prakticky ověřena realizovatelnost této myšlenky.

Další v práci zmíněná aplikace, využívající vysoké napětí z PT, je generování studeného plazmatu. Studené plazma má široký potenciál využití. Možnost vznik plazmatu za atmosférického tlaku a běžných teplot umožňuje využití této technologie v mnohem širším měřítku. Studená plazma nachází uplatnění v medicíně, ať už pasivně (sterilizace nástrojů), tak aktivně (dentální hygiena, sterilizace ran apod.). Rovněž v průmyslu během technologických procesů jako jsou lepení, či pájení. Řešení měniče s PT pro generování studeného plazmatu, popsaného v práci, bylo zaměřeno na sestavení plazmové trysky vhodné k ruční manipulaci s vestavěným PT. Toto řešení vzniklo z požadavků externí partnerské firmy. V práci je kompletně popsáno řešení měniče s PT. Na funkčním vzorku byla ověřena funkčnost navrženého řešení a provedeno měření. Navržené řešení bylo

podrobno i testování z pohledu elektromagnetické kompatibility. Získané výsledky dokazují že PT lze v této aplikaci úspěšně použít. Další vývoj v tomto směru by se měl zaměřit především na řešení mechanické konstrukce trysky a úpravu jejího tvaru. To by mělo být součástí budoucího vývoje.

Zejména v oblasti generování vysokého napětí (v řádu jednotek až desítek kV) mohou PT najít i další budoucí uplatnění. Může se jednat o ionizaci plynů pro účely desinfekce nebo čištění. Případně při různých fyzikálních experimentech či zkoumání různých fyzikálních jevů, jako například Water Bridge Fenomen nebo Ionic wind. Taktéž v případě budoucího praktického využití těchto jevů mohou být PT zajímavou alternativou ke klasickým řešením.

Piezoelektrické transformátory díky svým specifickým vlastnostem a omezením, nebudou zřejmě nikdy schopny nahradit klasické transformátory s magnetickou vazbou. Jak ale naznačují dosud provedené experimenty, mohou PT nalézt uplatnění i v aplikacích, ve kterých se doposud nevyužívaly.

12 Literatura

- [1] Erhart J., Pustka M., Půlpán P. *Aplikace piezoelektrických prvků v mechanických a akustických soustavách*. Liberec VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-57-8.
- [2] Lin R. L. *Piezoelectric Transducer Characterization and Application of Electronic Ballast*. Disertační práce. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.
- [3] Piezoelectric Constants [online]. APC International. Ltd., Mackeyville USA, [cit. 2018-5-6]. Dostupné z:
<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>
- [4] Fundamentals of Piezo Technology [online]. PI Ceramic Thuringia, Germany, [cit. 2018-5-6]. Dostupné z:
<https://www.piceramic.com/en/piezo-technology/fundamentals/>
- [5] Piezoelectric dictionary [online], Noliac, [cit. 2018-5-6]. Dostupné z:
<http://www.noliac.com/dictionary/>
- [6] Advanced Ceramics in Piezo Applications [online]. CeramTec, [cit. 2018-5-6]. Dostupné z:
<https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>
- [7] Electro-Ceramic Products and Material Specification [online], Exelis, Herndon, Virginia, USA. [cit. 2018-5-6]. Dostupné z:
<https://www.harris.com/what-we-do/piezoelectric-ceramics>
- [8] Piezoelectricity [online], APC International. Ltd., Mackeyville USA, [cit.2018-5-6] Dostupné z:
www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html
- [9] Soft vs. Hard Ceramics [online], APC International. Ltd., Mackeyville USA, [cit. 2018-5-6]. Dostupné z:
<https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/ceramics.html>
- [10] Horsley E. L., Foster M. P., Stone D. A. *State-of-the-art piezoelectric transformer technology*, 2007 European Conference on Power electronics and Applications, Aalborg, 2007. Doi:10.1109/EPE.2007.4417637
- [11] FAQ about Power Transducer [online], Face Electronics, LC, Norfolk, [cit. 2018-5-6]. Dostupné z: <http://www.transducer.com/performance-faq/>

- [12] Jinlong Du, Junhui Hu and King-Jet Tseng, "High-power, multioutput piezoelectric transformers operating at the thickness-shear vibration mode," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 51, no. 5, pp. 502-509, May 2004, doi: 10.1109/TUFFC.2004.1320823.
- [13] Nicolson A.M. Piezo-Electric Crystal Transformer. U.S. Patent No. 1,829,234, 25 January 1927.
- [14] Rosen C.A., Fish K.A., Rothenberg H.C. Electromechanical Transducer. U.S. Patent No. 2,830,274, 29 January 1954
- [15] Vazquez Carazo, A. Piezoelectric transformers: An Historical Review. Actuators. 5. 12. 10.3390/act5020012
- [16] Leskovec R.A., Davenport J.M., Burman O.B. Autoresonant Piezoelectric transformer signal Coupler. U.S. Patent No. 4,584,499, 12 April 1985.
- [17] Stengl J. P., Tihanyi, *Výkonové tranzistory MOSFET*. Praha BEN – Technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-54-6.
- [18] Vasic D., Costa F., Sarraute E., *A new MOSFET & IGBT gate drive insulated by a piezoelectric transformer*, 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, BC, 2001, pp1479-1484 vol. 3.
- [19] IRF540N HEXFET® Power MOSFET, Datasheet [online], [cit. 2018-5-6]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/91021/91021.pdf>
- [20] IRS21844 Half-Bridge Driver, Datasheet [online], [cit. 2018-5-6]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/57932.pdf>
- [21] Lineykin S., Ben-Yaakov S., *Feedback isolation by piezoelectric transformers: comparison of amplitude to frequency modulation 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2004, pp. 1834-1840 Vol.3. doi: 10.1109/PESC.2004.1355395
- [22] H. Geiger and W. Müller. (1928) "Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten" (Electron counting tube for the measurement of the weakest radioactivities), *Die Naturwissenschaften* (The Sciences), vol. 16, no. 31, pp. 617–618.
- [23] Photomultiplier Tubes Basics and Applications, third Edition [online], HAMAMATSU, [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

- [24] C. Fuchs, J. Woisetschläger, K. Gatterer, "The floating water bridge", Graz University of Technology, Institute of Physical and Theoretical Chemistry, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (2007) 6112-6114
- [25] J. Wilson, H. D. Perkins, W. K. Thompson, "An investigation of ionic wind propulsion", NASA/TM-2009-215822, 2009
- [26] Yu-Hao Su. Power Enhancement of Piezoelectric Technology based Power Devices by Using Heat Transfer Technology. Electronics. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2014. English
- [27] J. Navas, T. Bove, J. A. Cobos, F. Nuno and K. Brebol, "Miniaturised battery charger using piezoelectric transformers," APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.01CH37181), 2001, pp. 492-496 vol.1, doi: 10.1109/APEC.2001.911692.
- [28] Myounghwan Ryu, Sungjin Choi, Sangmin Lee and B. H. Cho, "A new piezoelectric transformer driving topology for universal input AC/DC adapter using a constant frequency PWM control," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., 2006, pp. 4 pp.-, doi: 10.1109/APEC.2006.1620709.
- [29] M. P. Foster, J. N. Davidson, E. L. Horsley and D. A. Stone, "Critical Design Criterion for Achieving Zero Voltage Switching in Inductorless Half-Bridge-Driven Piezoelectric-Transformer-Based Power Supplies," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 5057-5066, July 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2481706.
- [30] R. L. Lin, F. C. Lee, E. M. Baker and D. Y. Chen, "Inductor-less piezoelectric transformer electronic ballast for linear fluorescent lamp," APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.01CH37181), 2001, pp. 664-669 vol.2, doi: 10.1109/APEC.2001.912440.
- [31] Bronshtein, Svetlana. Piezoelectric transformers in power electronics: Principle, modeling and measurement techniques. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. 110 stran v různém číslování. ISBN 978-3-639-14224-2.
- [32] P. B. Green, Class-E power amplifier design for wireless power transfer [online], AN_1803_PL16_1803_210431 Infineon, [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: https://www.infineon.com/cms/en/search.html#!term=An_1803_pl16_1803_210431&view=all

- [33] H. Li, C. Tian, Z.D. Deng, Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials, *Appl. Phys. Rev.*, 1 (4) (2014), p. 041301, 10.1063/1.4900845
- [34] Din A.U., Chandrathna S.C., Lee J.-W. Resonant Rectifier ICs for Piezoelectric Energy Harvesting Using Low-Voltage Drop Diode Equivalents. *Sensors*. 2017;17:901. doi: 10.3390/s17040901.
- [35] KAZIMIERCZUK, Marian K. a CZARKOWSKI, Dariusz. *Resonant power converters*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011. 600 s. ISBN 978-0-470-90538-8.
- [36] S. Ben-Yaakov, G. Invensky, Drivers for piezoelectric elements, PESC'05 [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ITIVaxaFcTk&t=7729s>
- [37] Xu D., Guan Y., Wang Y., Zhang X. (2021) Resonant Rectifier in Multi-MHz DC–DC Converter. In: Multi-MHz High Frequency Resonant DC-DC Power Converter. CPSS Power Electronics Series. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7424-5_3
- [38] X. Wei, H. Sekiya and T. Suetsugu, "New class-E rectifier with low voltage stress," 2016 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), 2016, pp. 305-308, doi: 10.1109/APCCAS.2016.7803960.
- [39] Vliv ionizujícího záření na živé organismy-rizika a využití v medicíně [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/RadiacniOchrana.htm>
- [40] P. Siegel, Introduction to Geiger Counters [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z : <https://www.cpp.edu/~pbsiegel/bio431/texnotes/chapter4.pdf>
- [41] SMMTF85P1S50, STEMiNC [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: <https://www.steminc.com/PZT/en/mini-piezo-transformer-step-up-ratio-50>
- [42] STS-5 Parameters and charakteristice [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: <http://www.gstube.com/data/4540/>
- [43] Si-3BG Parameters and characteristics [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: <http://gstube.com/data/2486/>
- [44] Plazmový vesmír | Co je to plazma?, Aldebaran [online], [cit: 2021-28-7]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.php>
- [45] Kučera, Plazmová sterilizace STERRAD: Jaký je její princip a jaké jsou její výhody, *zdravi.euro.cz*, 2006 [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z:

- <https://zdravi.euro.cz/clanek/sestra/plazmova-sterilizace-sterrad-jaky-je-jeji-princip-a-jake-jsou-je-274868>
- [46] SMEJKALOVÁ, Kateřina. *Charakterizace mikrovlnné plazmové trysky ve směsi argonu s kyslíkem* [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/82219>.
- [47] NESTROJIL, Michal. *Vliv inertní atmosféry na smáčení povrchu u bezolovnatého pájení* [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32578>.
- [48] SMSTF68P10S9, STEMiNC [online], [cit. 2021-28-7]. Dostupné z: <https://www.steminc.com/PZT/en/single-layer-piezo-electric-transformer-68-khz>
- [49] ČSN EN 55011. Průmyslová, vědecká a lékařská (ISM) vysokofrekvenční zařízení - Charakteristiky rádiového rušení - Meze a metody měření. Česká technická norma, 2020, Třídící znak. 334225.
- [50] Thomas Martin. Contribution à l'étude des générateurs piézoélectriques pour la génération des décharges plasmas. Plasmas. Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2015. Français. NNT: 2015TOU30117.

13 Seznam autorových publikací

13.1 Publikace související s tématem práce:

Statě ve sbornících:

- [1] VALENTA, P. Určení prvků náhradního schématu piezoelektrického transformátoru. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 79-82. ISBN: 978-80-261-0516-9.
- [2] VALENTA, P., KOUCKÝ, V., HAMMERBAUER, J. Simultaneous power transfer and information transfer via piezoelectric transformer. In *2017 25th Telecommunications Forum (TELFOR) : Proceedings of Papers*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 577-580. ISBN: 978-1-5386-3073-0
- [3] VALENTA, P., KOUCKÝ, V., HAMMERBAUER, J. Piezoelectric transformer for high-side MOSFET driver supplying. In *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 688-691. ISBN: 978-1-5090-6405-2
- [4] VALENTA, P. Možnosti využití piezoelektrických transformátorů pro napájení budičů MOSFET a IGBT tranzistorů. In *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 153-156. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [5] VALENTA, P., KOUCKÝ, V., HAMMERBAUER, J. Piezoelectric transformer as a power supply for GM radiation detector. In *Proceedings of the 2019 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 542-545. ISBN: 978-1-5386-4612-0
- [6] VALENTA, P. Piezoelektrický transformátor jako zdroj napětí pro Geiger-Müllerův detektor. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 145-148. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [7] VALENTA, P. Generování studené plazmy s využitím piezoelektrického transformátoru. In *Elektrotechnika a informatika 2020. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2020. s. 153-156. ISBN: 978-80-261-0949-5

V recenzním řízení:

- [8] VALENTA, P., KOUCKÝ, V., HAMMERBAUER, J. Determination of the Piezoelectric Transformer equivalent Circuit, *Elektronika ir elektrotechnika* ISSN: 2029-5731

Funkční vzorky:

- [9] VALENTA, P., KOUCKÝ, V. *Modul s piezoelektrickým transformátorem*. 2016. Funkční vzorek. Číslo technické dokumentace: 22110-FV006-2016. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [10] VALENTA, P., KOUCKÝ, V. *Budič s piezoelektrickým transformátorem*. 2017. Funkční vzorek. Číslo technické dokumentace: 22110-FV002-2017. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017.

13.2 Publikace nesouvisející s tématem práce**Statě ve sbornících:**

- [11] HOLOTA, R. KOUCKÝ, V. KRIST, P. VALENTA, P. MAŠEK, B. Electronic system for controlled modification of temperature field in sheet metal blanks. In *International Conference on Applied Electronics (AE 2019) : /proceedings/*. Pilsen: University of West Bohemia, 2019. s. 67-70. ISBN: 978-80-261-0813-9 , ISSN: 1803-7232
- [12] VALENTA, P. ŽAHOUR, J. KŘIVKA, J. KOSTURIK, K. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. Energy harvesting and communication systems for power lines inspection robot. In *Proceedings of the 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE 2020)*. Piscaway: IEEE, 2020. s. 1-4. ISBN: 978-1-72819-479-0
- [13] VALENTA, P. Impulsně řízený čtyřkvadrantový zdroj. In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 77-80. ISBN: 978-80-261-0366-0
- [14] VALENTA, P. Simulace a porovnání pulsně šířkových modulačních technik RPWM. In *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 211-214. ISBN: 978-80-261-0514-5








- [15] VALENTA, P. KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. Energy harvesting na vedení VVN 110 kV. In *Elektrotechnika a informatika 2019. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2019. s. 133-136. ISBN: 978-80-261-0871-9

Výzkumné zprávy a funkční vzorky:

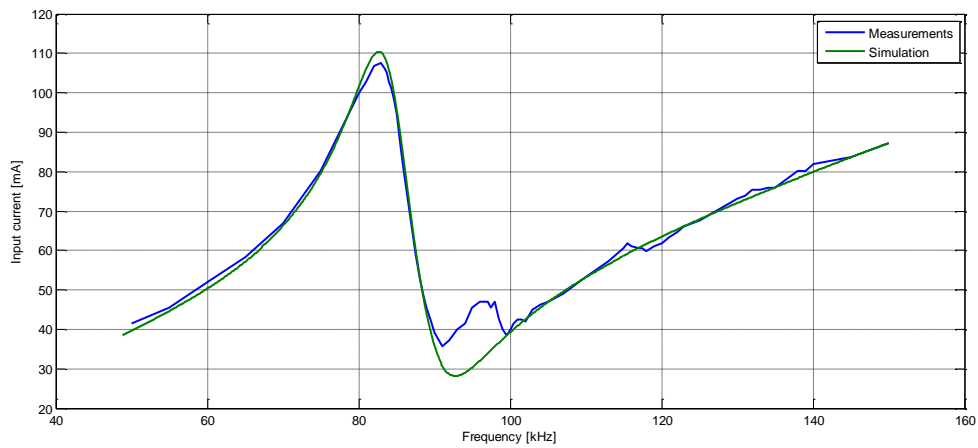
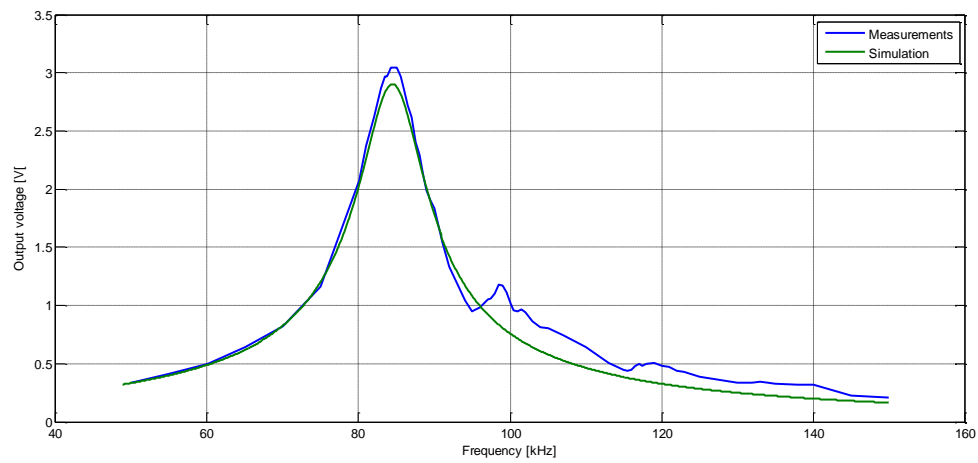
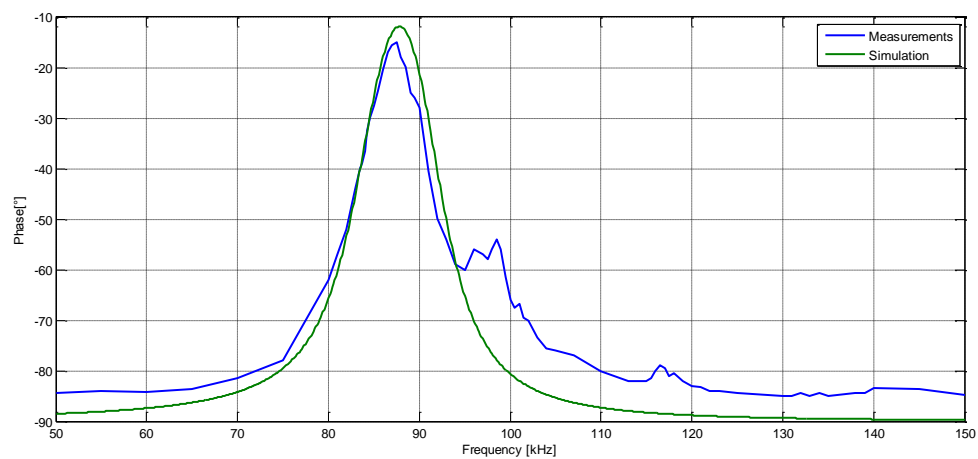
- [16] SKÁLA, J. HAMMERBAUER, J. KUBÍK, GEORGIEV, V. KOSTURIK, K. KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. VALENTA, P. *Vývoj elektroniky*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [17] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. HAMMERBAUER, J. KUBÍK, *Výzkumná zpráva o bezdrátové komunikaci s robotem v okolí přenosových sítí pod napětím*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [18] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. HAMMERBAUER, J. KUBÍK, Z. *Výzkumná zpráva o napájecím zdroji s induktivní vazbou*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [19] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. HAMMERBAUER, J. KUBÍK, Z. *Výzkumná zpráva o prototypu napájecího zdroje s induktivní vazbou*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [20] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. HAMMERBAUER, J. KUBÍK, Z. *Výzkumná zpráva o precizaci modulu pro bezdrátovou komunikaci s robotem v okolí přenosových sítí pod napětím*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [21] KOSTURIK, K. VALENTA, P. *Vývoj řídicího systému pro kontrolované pěstování rostlin*. FlyingLeaf s.r.o., 2020.
- [22] VALENTA, P. KOUCKÝ, V. *Výkonový modul měniče s topologií full bridge*. 2016.
- [23] VALENTA, P. *DC/DC měnič s širokým rozsahem vstupního napětí*. 2017.
- [24] VALENTA, P. *Synchronní usměrňovač pro síťový kmitočet*. 2017.
- [25] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. *Funkční vzorek napájecího zdroje s induktivní vazbou*. 2018.
- [26] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. *Prototyp napájecího zdroje s induktivní vazbou*. 2019.

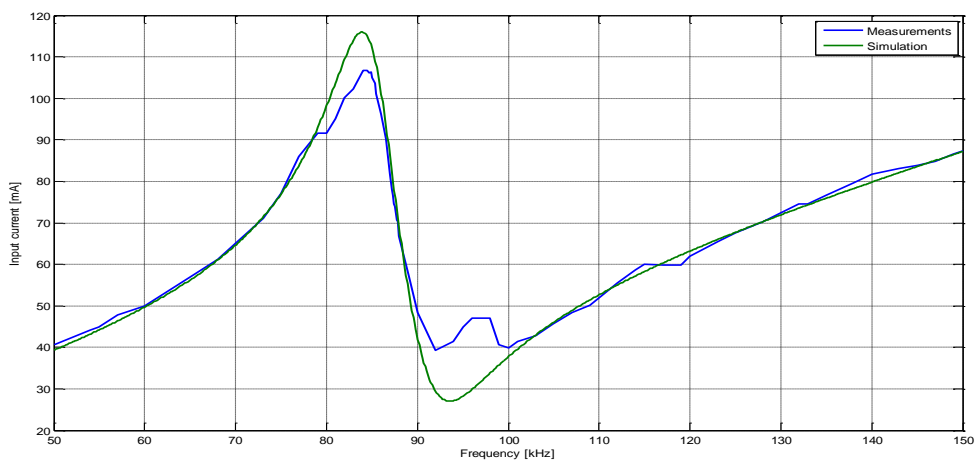
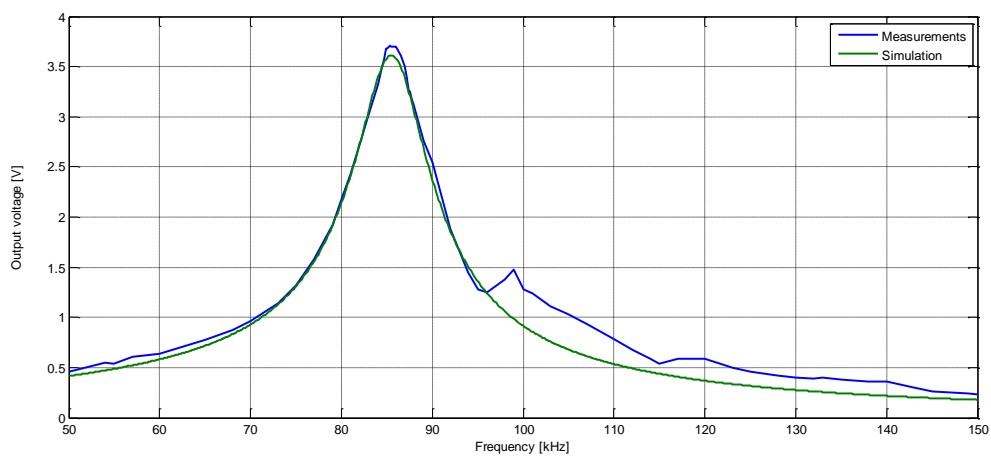
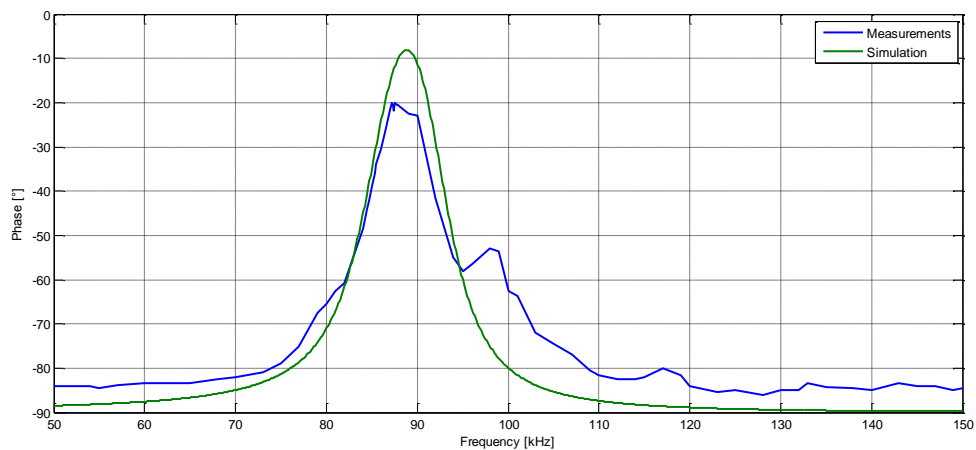
- [27] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. *Modul pro bezdrátovou komunikaci s robotem v okolí přenosových sítí pod napětím*. 2018.
- [28] KOSTURIK, K. ŽAHOUR, J. VALENTA, P. KŘIVKA, J. *Prototyp záložního napájecího systému*. 2018.
- [29] KŘIVKA, J. ŽAHOUR, J. KOSTURIK, K. VALENTA, P. SKÁLA, J. GEORGIEV, V. *Precizní modul pro bezdrátovou komunikaci s robotem v okolí přenosových sítí pod napětím*. 2019.
- [30] VALENTA, P. *Indukční ohřev napájený z akumulátoru*. 2019.

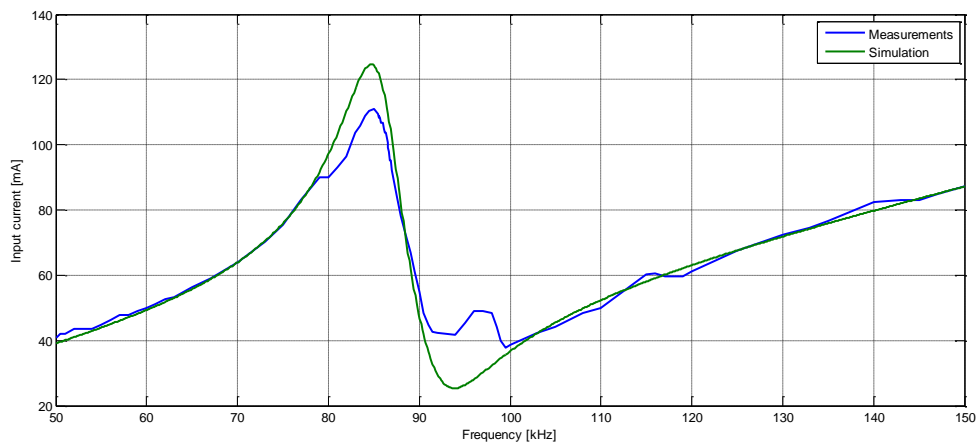
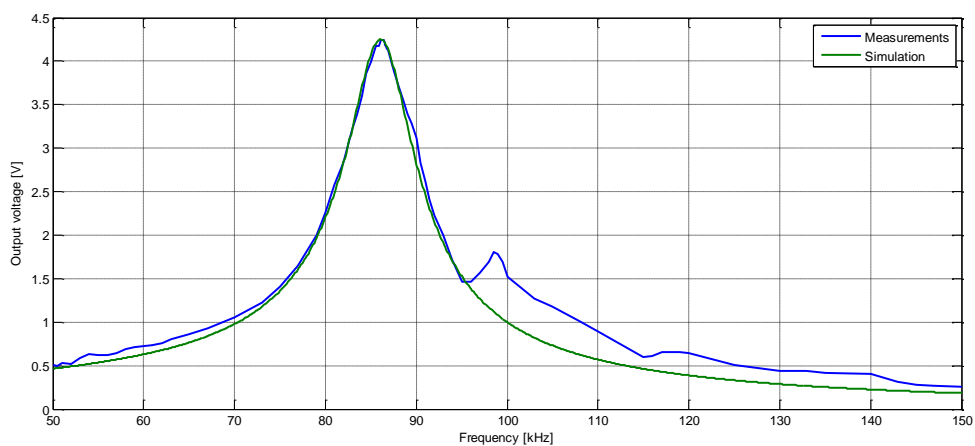
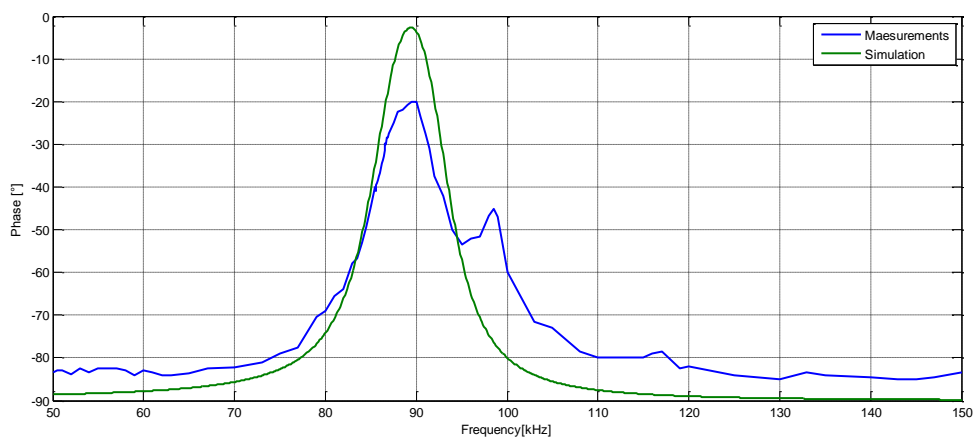
Příloha A – typy vibračních módů piezoelektrického elementu

Shape	Oscillations		Series resonance frequency	Electrically induced displacement (small signal)	Mechanically induced voltage (small signal)
	Type	Mechanical deformation			
Thin disk	radial		$f_s = \frac{N_p}{OD}$	$\Delta OD = -\frac{d_{31} OD}{TH} U$	$U = -\frac{4g_{33} TH}{\pi OD^2} F_3$
	thickness		$f_s = \frac{N_t}{TH}$	$\Delta TH = d_{33} U$	$U = -\frac{g_{33} TH}{W} F_1$
Plate	transverse		$f_s = \frac{N_t}{L}$	$\Delta L = -\frac{d_{31} L}{TH} U$	$U = -\frac{g_{31} L}{W} F_1$
Rod	longitudinal		$f_s = \frac{N_L}{L}$	$\Delta L = d_{33} U$	$U = -\frac{g_{31} L}{W TH} F_3$
Shear plate	thickness shear		$f_s = \frac{N_s}{TH}$	$\Delta L = d_{15} U$	$U = -\frac{g_{15} TH}{L W} F_3$
Tube	transversal		$f_s = \frac{N_t}{L}$	$\Delta L = \frac{d_{31} L}{TH} U$	
	thickness		$f_s = \frac{N_t}{TH}$	$\Delta TH = d_{33} U$	

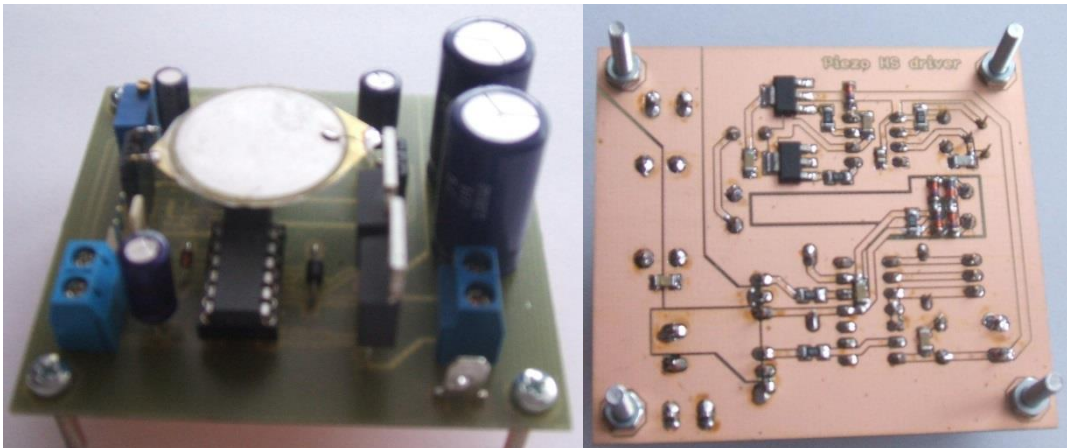
Typy vibrací piezoelektrického elementu v závislosti na směru polarizace a směru působení elektrického pole [4].

Příloha B - Porovnání simulací a reálného funkčního vzorku PT.*Zátěž 50 Ω - vstupní proud PT**Zátěž 50 Ω - výstupní napětí PT**Zátěž 50 Ω - fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem PT*

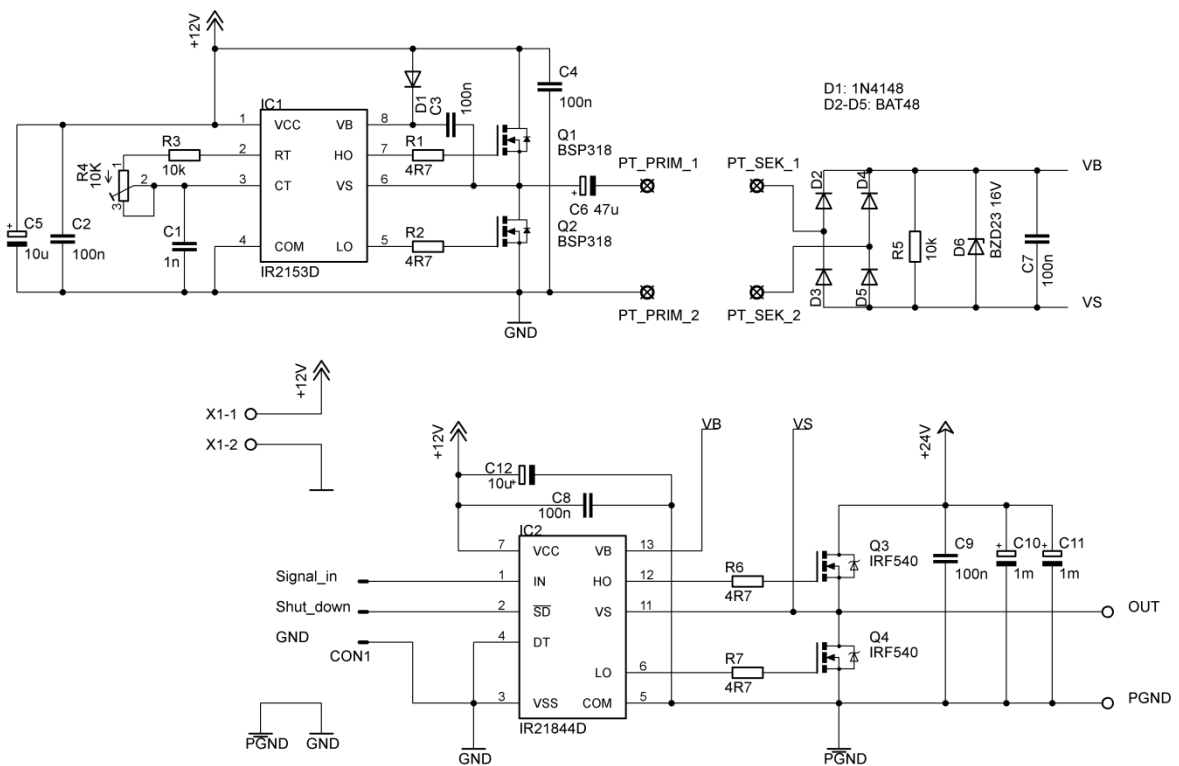
*Zátěž 75 Ω - vstupní proud PT**Zátěž 75 Ω - výstupní napětí PT**Zátěž 75 Ω - fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem PT*

*Zátěž 100 Ω - vstupní proud PT**Zátěž 100 Ω - výstupní napětí PT**Zátěž 100 Ω -fázový posuv mezi vstupním napětím a proudem PT*

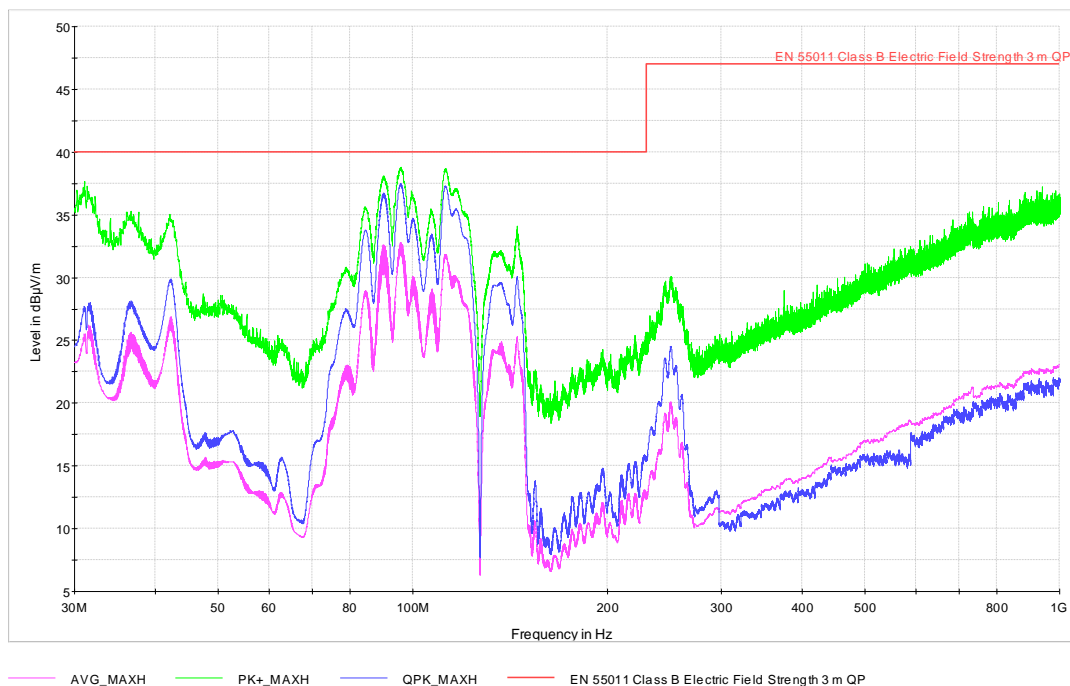
Příloha C - Testovací měnič s topologií half-bridge.



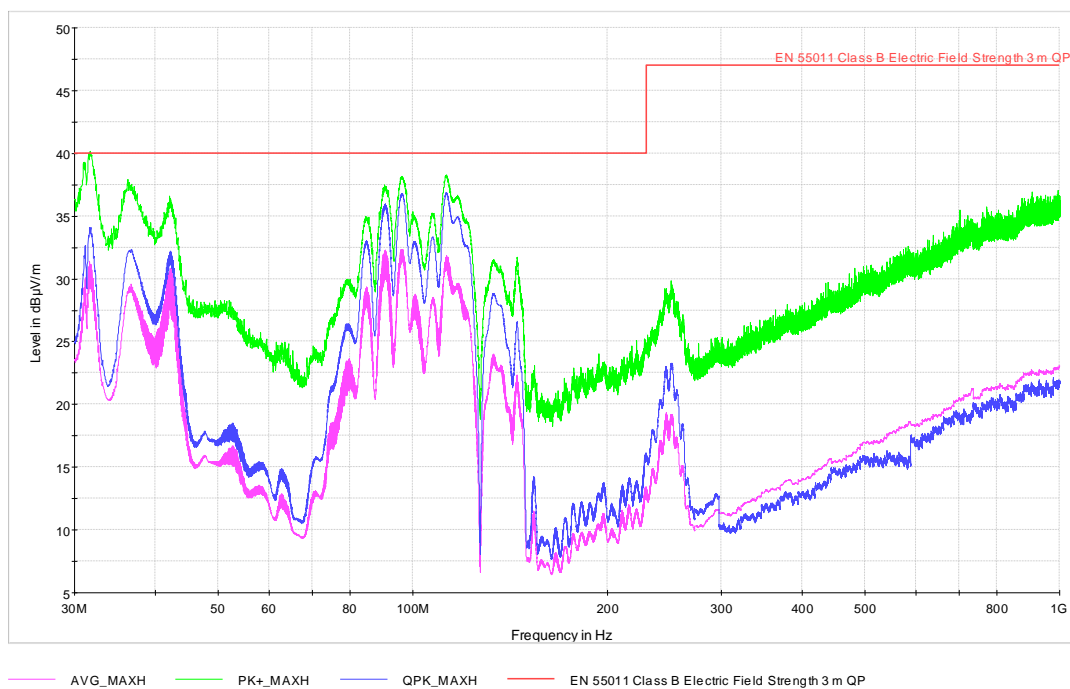
Fotografie testovacího měniče



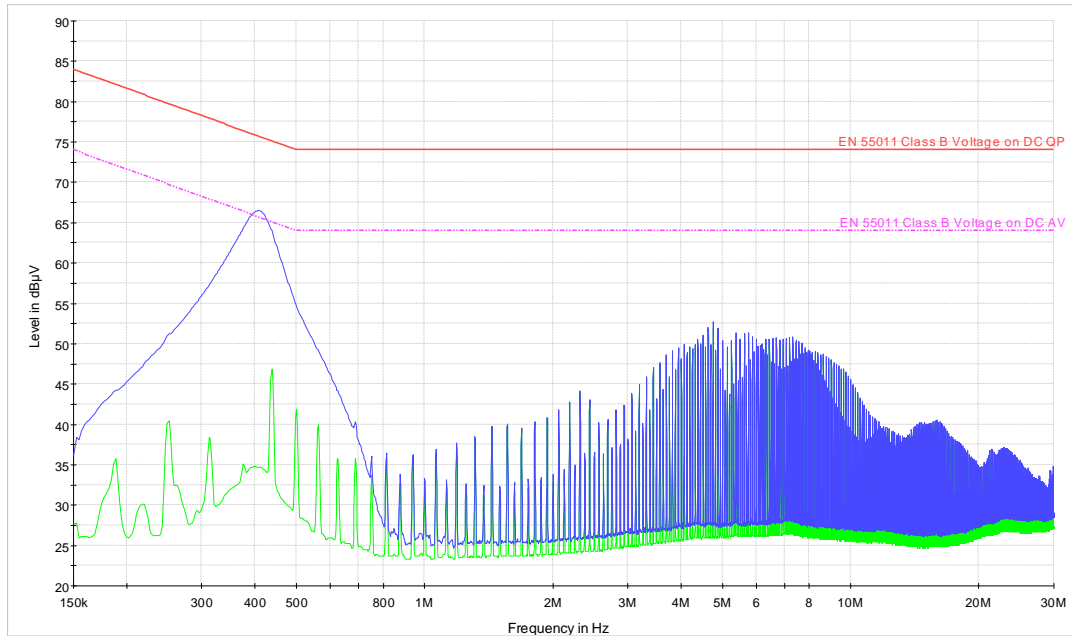
Kompletní schéma zapojení testovacího měniče

Příloha D - Ostatní výsledky z měření EMC v bezodrazové komoře.

Vyzařované elektromagnetické pole s vertikální polohou měřicí antény - bez hélia.

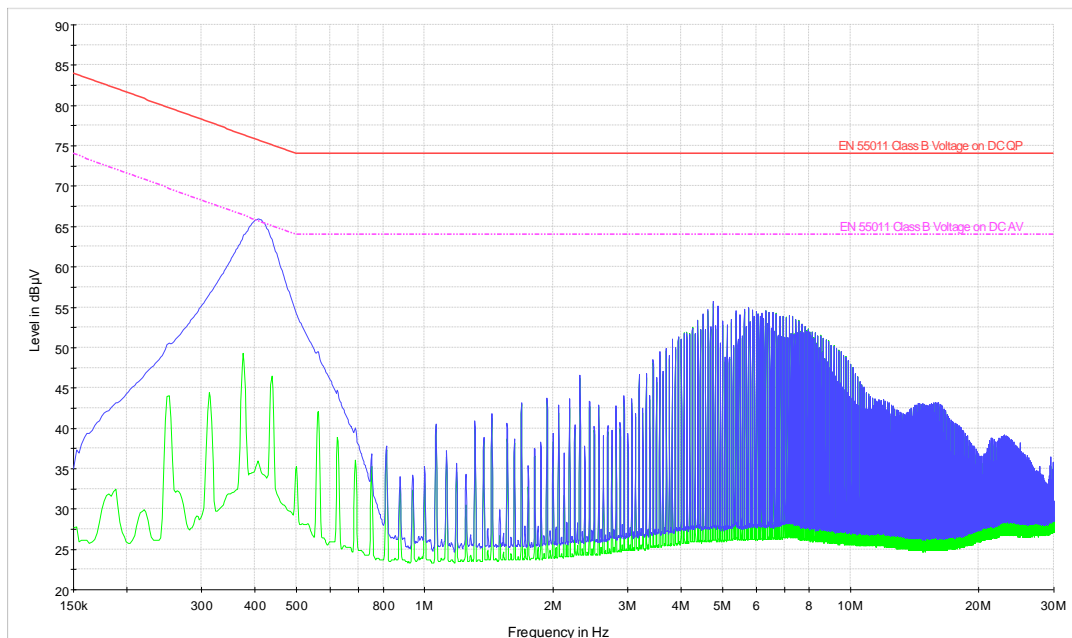


Vyzařované elektromagnetické pole s vertikální polohou antény - s hořícím plazmovým obloukem.



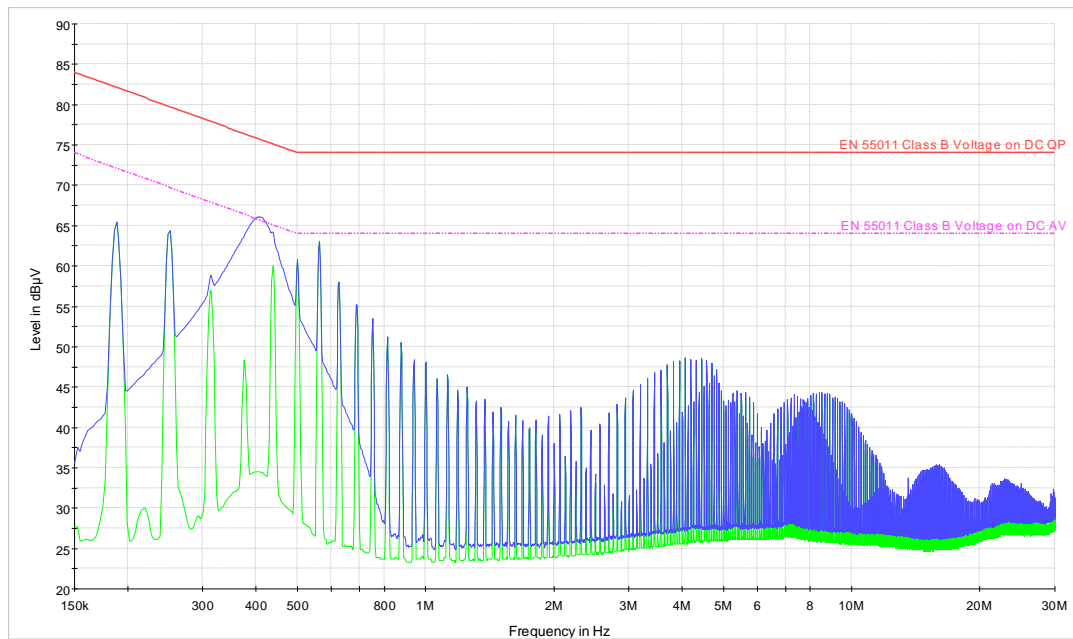
AVG_CLRWR QPK_CLRWR EN 55011 Class B Voltage on DC QP EN 55011 Class B Voltage on DC AV

Spektrum nesymetrických rušivých napětí na záporném vodiči - bez helia.



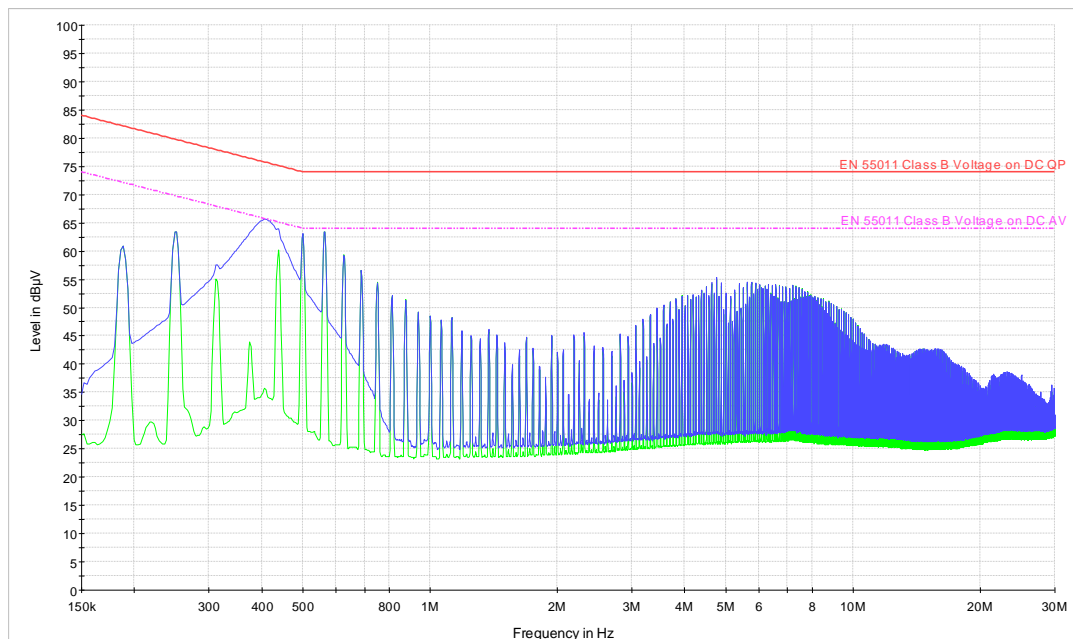
AVG_CLRWR QPK_CLRWR EN 55011 Class B Voltage on DC QP EN 55011 Class B Voltage on DC AV

Spektrum nesymetrických rušivých napětí na záporném vodiči - s hořícím plazmovým obloukem.



AVG_CLRW QPK_CLRW EN 55011 Class B Voltage on DC QP EN 55011 Class B Voltage on DC AV

Spektrum nesymetrických rušivých napětí na kladném vodiči - bez helia.



AVG_CLRW QPK_CLRW EN 55011 Class B Voltage on DC QP EN 55011 Class B Voltage on DC AV

Spektrum nesymetrických rušivých napětí na kladném vodiči – S hořícím plazmovým obloukem.