## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2023

Bc. Patrik Potúček



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

### ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## OPTIMALIZACE VN VÝKONOVÉHO GENERÁTORU F=13.56 MHZ

OPTIMIZATION OF HV POWER GENERATOR F = 13.56 MHZ

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR Bc. Patrik Potúček

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR

prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

**BRNO 2023** 

VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní program Kybernetika, automatizace a měření

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Patrik Potúček Ročník: 2

*ID:* 211170 *Akademický rok:* 2022/23

#### NÁZEV TÉMATU:

#### Optimalizace VN výkonového generátoru f=13.56 MHz

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte problematiku návrhu vysokofrekvenčních systémů, zaměřte se na model generátoru pro dutinový rezonátor f=13.56MHz.

2. Navrhněte uspořádání pracoviště s generátorem s maximálním výstupním výkonem P=1000W, uspořádání napájení dutinového rezonátoru s minimalizací stojaté vlny na budicím elektrickém vedení.

3. Nastavte měřicí sondu pro vyhodnocení průběhů a hodnot složek elektromagnetického pole do mezní frekvence 400 MHz.

4. Navrhněte vhodné a optimální nastavení systému generátor-plazmová komora-vzorek materiálu pro známou geometrii a uspořádání komory s formováním vstupující argon a generování plazma.

5. Proveďte návrh dodatečných elektronických částí systému, navrhněte postup oživení systému navrhněte test funkčnosti a optima nastavení systému pro budicí frekvenci 13.56 MHz.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DĚDEK, L., DĚDKOVÁ, J. Elektromagnetismus. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 232 s. ISBN 80-214-1548-7.
[2] KEITHLEY, J, R. Low level measurement, Keithley, USA, 2005.

*Termín zadání:* 6.2.2023

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D. předseda rady studijního programu

Termín odevzdání: 17.5.2023

UPOZORNĚNÍ:

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

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

## Abstrakt

Práca sa zaoberá optimalizáciou vysokofrekvenčného výkonového elektronického generátora, pracujúceho ako zosilňovač v triede D, určeného pre výkonové budenie plazmovej komory, pracujúcej na frekvencii f = 13.56 MHz. Optimalizuje sa návrh nastavenia generátora pre zvolenú plazmovú komoru, ktorá je určená k ovplyvneniu povrchu materiálu: zlepšenie zmáčanlivosti povrchu, alebo úprav elektrotechnických vlastností povrchu: napríklad zvýšenie dielektrickej pevnosti povrchu izolantov. Pre monitorovanie výstupného výkonu a elektromagnetických parametrov sa používa súbor sond. Tieto sondy sú schopné opakovateľne merať veličiny do medznej frekvencie  $f_m = 400$  MHz. Bola zostrojená a otestovaná sonda pre vyhodnocovanie modulu intenzity elektrického poľa E v blízkom okolí plazmy dopadajúcej na povrch vzorky. Systém elektronický generátor – plazmová komora – sondy bol po oživení podrobený testom, ktorých výsledky sú zhrnuté v texte.

## Kľúčové slová

Elektronický vysokofrekvenčný výkonový generátor, zosilňovač v triede D, pol-most, spínací režim, pulzné budenie, vysokofrekvenčná plazma, Rogowského cievka, vyhodnotenie elektrickej intenzity, optimálny režim

### Abstract

This thesis deals with the optimization of a high-frequency class D power generator, designed for power excitation of a plasma chamber operating at frequency f = 13.56 MHz. The main goal is to optimize generator parameters to ensure best performance regarding the given plasma chamber, whose intended application is to affect the surface of the materials: improvement of the surface wettability, or modification of materials electrical properties: for example, an increasement of dielectric strength of insulators. For the purpose of the generator's output power monitoring and electromagnetic parameters measurement, a suitable set of sensors which are able to repeatedly measure up to frequency  $f_m = 400$  MHz were constructed. A probe for electrical field intensity E evaluation was constructed and tested. This probe is used in the vicinity of plasma incidence on the sample surface. Constructed device (power generator – plasma chamber – sensors) was subjected to tests and results are briefly discussed.

## Keywords

RF electronic power generator, D class amplifier, half-bridge, switching mode, pulse excitation, high-frequency plasma, Rogowski coil, evaluation of electrical intensity, optimal mode

### **Bibliografická citácia**

POTÚČEK, Patrik. *Optimalizace VN výkonového generátoru f=13.56 MHz*. Brno, 2023. Dostupné také z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150788. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Pavel Fiala.

### Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Bc. Patrik Potúček		
VUT ID studenta:	211170		
Typ práce:	Diplomová práce		
Akademický rok:	2022/23		
Téma závěrečné práce:	<i>Optimalizace VN výkonového generátoru</i> f = 13.56 MHz		

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

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 17. května 2023

podpis autora

\_\_\_\_\_

### **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu práce Prof. Ing. Pavlovi Fialovi, Ph.D. za metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc pri spracovaní tejto diplomovej práce. Rovnako tak patrí moja vďaka Ing. Zoltánovi Szabóvi za cenné rady pri praktickej realizácii optimalizácie DPS. Práca vznikla s podporou grantu GAČR (GA-20-14105S).

V Brně dne: 17. května 2023

podpis autora

\_\_\_\_\_

## Obsah

ZOZ	ZNAM C	DBRÁZKOV	9
ZOZ	ZNAM T	ABULIEK	12
ÚV	OD		13
1.	SÚČA	SNÝ STAV	15
1	.1 Vyt	IŽITIE PLAZMY	15
1	.2 Vys	OKOFREKVENČNÉ ELEKTRONICKÉ GENERÁTORY	18
	1.2.1	Generátory s použitím zosilňovača v triede AB	18
	1.2.2	Generátory s použitím zosilňovača v triede D	19
	1.2.3	Generátory s použitím zosilňovača v triede E	20
	1.2.4	Generátory s použitím zosilňovača v triede DE	21
	1.2.5	Generátory s použitím zosilňovača v triede E/F ( $\Phi$ )	22
	1.2.6	Zhrnutie poznatkov súčasného stavu obvodových riešení VF generátorov	22
2.	ROZB	OR ZADANIA	25
2	.1 NAV	RHNUTÁ PLAZMOVÁ KOMORA	25
2	.2 Орт	IMALIZOVANÝ GENERÁTOR	28
	2.2.1	Signálový modul	28
	2.2.2	Výkonový modul	29
2	.3 CIEI	ZOVÁ APLIKÁCIA PLAZMOVÉHO SYSTÉMU	30
3.	OPTIN	ALIZÁCIA NÁVRHU OBVODOVÉHO PREVEDENIA GENERÁTORA	31
3	.1 Орт	IMALIZÁCIA SIGNÁLOVÉHO MODULU	
3	.2 OPT	IMALIZÁCIA VÝKONOVÉHO MODULU GENERÁTORA	36
	3.2.1	Galvanické oddelenie budiacich signálov	36
	3.2.2	Galvanické oddelenie pre napájanie	42
3	.3 MIN	IMALIZÁCIA STOJATEJ VLNY NA BUDIACOM ELEKTRICKOM VEDENÍ	44
4.	NÁVR	H PRACOVISKA A PROCES OŽIVENIA	46
4	1 Syn	ΙΕΤΡΙΟΚΎ ΝΑΡΑΊΑΟΊ ΖΟΡΟΙ	46
	411	Kompenzácia účinníku (PFC)	47
4	.2 Ožr	VENIE VÝKONOVÉHO GENERÁTORA	48
5.	NÁVR	H MERACÍCH SOND	55
5	1 Doc		55
3	.1 KOC	Wyskeho Clevka	55
	512	Konstrukciu Kogowskeno cievky	55
	513	vysieuky uosiunnuie experimentuinym overenim Kogowskeno cievky	50 64
5	2 SON	DA INTENZITY EI EKTRICKÉHO POI'A	04
5	.2 SON	Konštrukcia senzora	05 66
	5.2.1		00
6.	FUNK	CNE TESTY SYSTEMU	70
6	.1 Pre	DRADNÝ ČLEN PLAZMOVÁ KOMORA – GENERÁTOR	70
6	.2 Príf	RAVA PRACOVISKA PRE FUNKČNÉ TESTY SYSTÉMU	73
6	.3 Prie	BEH FUNKČNÝCH TESTOV	74

7.	NÁVRH DPS PO OPTIMALIZÁCII GENERÁTORA	77	
7. 7.	<ol> <li>DPS pre signálový modul</li> <li>DPS pre výkonový modul</li> </ol>	77 77	
8.	ZHODNOTENIE RIEŠENIA PRÁCE	80	
9.	ZÁVER	82	
LITH	ERATÚRA	83	
ZOZ	NAM SYMBOLOV A SKRATIEK	92	
ZOZNAM PRÍLOH			

### ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Ukážka výsledkov práce [9]: sterilizácia endodontických pilníkov s využitím plazmy: a) pred			
	aplikovaním b) po aplikovaní	16		
1.2	Ukážka výsledkov práce [12]: emisie NOx pri rôznych spôsoboch katalýzy.	16		
1.3	Ukážka výsledkov práce [13]: odstránenie farbív z pitnej vody	17		
1.4	Ukážka výsledkov práce [15]: obsah stopových prvkov v olovených guľkách pred a po využití			
	plazmy	18		
1.5	Principiálna schéma zosilňovača v triede AB v podobe Hartleyho oscilátora [17]	19		
1.6	Principiálna schéma pol-mostového zosilňovača v triede D [17]	20		
1.7	Principiálna schéma zosilňovača v triede E [22]	21		
1.8	Principiálna schéma zosilňovača v triede DE [17]	22		
1.9	Principiálna schéma zosilňovača v triede E/F [35]	22		
2.1	Geometrický model predloženej plazmovej komory	25		
2.2	Kritické parametre geometrie predloženej plazmovej komory	26		
2.3	Skonštruovaná plazmová komora	26		
2.4	Závislosť impedancie predloženej plazmovej komory na frekvencii, a) lineárna os x, b)			
	logaritmická os x.	26		
2.5	Elektrické parametre plazmovej komory pre $f = 1$ kHz	27		
2.6	Ukážka výsledkov práce [38]: meranie EMG zložiek v okolí plazmového výboja: a) konfigurác	ia		
	pracoviska, b) výsledok merania.	27		
2.7	Predložený generátor: a) principiálna schéma [3], b) teoretické výstupné priebehy [3]	28		
2.8	DPS signálového modulu predloženého generátora	29		
2.9	DPS výkonového modulu predloženého generátora	29		
2.10	Plazmová komora s výstupom v tvare plošnej štrbiny, pre pokročilejšie testy [40]	30		
3.1	Podoba pracoviska prvotného merania, pred procesom optimalizácie	31		
3.2	Signál generovaný pomocou kryštálového oscilátora $f_l = 13.56$ MHz	32		
3.3	Signál po úprave preklápacím obvodom typu D: a) signál po modulácii, b) nastavená strieda 50	50.		
2 1	Spâcab postavania daad timay namagay trimray a) sabáma h) DDS [2]	32		
5.4 2.5	Nestavenia dead timov hudiocich signálov pro výkonová tranzistory, hoz prisnôschovacích			
5.5	obvodov pro optočlonu stav na prézdna	22		
26	Nastavania daad timay hydiasiah signálay ma výkonová tranzistam, sžesti riežená misnôsahon			
5.0	wastavenie dead-timov budiacien signalov pre vykonove tranzistory, seasti nesene prisposoben	24		
27	Znázomenie neměťového nedlimity (mi elitívnej úrovni) ne vetvne entečlenov, násladno			
5.7	znazornenie napat oveno podkimitu (pri aktivnej urovini) na vstupe optocienov, nasiedne	24		
28	Prispôsobovací obvod I MC1210 optočlen TI P2267	25		
5.0 2.0	Vnlyv kapacity diád na kmitania výstupného signély pozaťažaného abyody LMG1210			
3.9	V pryv kapacity ulou na klinitalne vystupneno signalu nezatazeneno obvodu Elvio 1210			
2 11	UCC22511 Ol zanajanja interlack [47]	50		
3.11	Prúdové posilnenie výstupu optočlena v podobe diskrétneho zapojenia s MMBT2222A	38		
3.12	Priebely simulácie zapojenie s MMPT2222 A	20		
3.13	Prídové posilnenie výstupu optočlene v podobe komplementárneho zanojenie tranzistovov			
3.14	Priebehy simulácie komplementárneho zapojenie tranzistorov	0+ 10		
3.15	Tenlotná kontrola invertorov SN7/I VC2G1/ O1 nomocou termokomeru a) ID analytním b) D	<del>4</del> 0 GP		
5.10	spektrum (referenčná snímka)	لال 11/		
3 17	Prídové posilnenie výstupu optočlenov v podobe invertorov SN74I VC2C14 O1	/11		
5.17		+1		

3.18	Priebeh budiaceho signálu na vstupe jedného z výkonových hybridných obvodov DRF1201:			
	s čiastočne realizovaným prúdovým posilnením, bez tvarovacích diód	.42		
3.19	Priebeh budiaceho signálu na vstupe jedného z výkonových hybridných obvodov DRF1201:			
	s optimálnym prúdovým posilnením a úpravou diódami	.42		
3.20	Problémy s galvanickým oddelením výkonového modulu, schéma [3].	.42		
3.21	Problémy s galvanickým oddelením výkonového modulu, DPS [3]	.43		
3.22	Osadená DPS výkonového modulu predloženého generátora po procese optimalizácie	.43		
4.1	Bloková schéma symetrického napájania generátora	.46		
4.2	Regulovateľný autotransformátor MCP M10-522-10.	.46		
4.3	Symetrický zdroj pre napájanie generátora.	.47		
4.4	Priebehy napätia a prúdu na záťaži: a) pre $PF = 1$ , b) pre $PF < 1$ [68]	.47		
4.5	PFC moduly TDK-Lambda PF1000A-360.	.48		
4.6	Záťaž BW-40N100W+ použitá pri oživovaní generátora	.49		
4.7	Priebehy budiacich signálov z preklápacieho obvodu typu D a výstupné signály z LMG1210 bez pripojených optočlenov.	.50		
4.8	Priebehy výstupných signálov LMG1210 po zaťažení optočlenmi	.51		
4.9	Priebehy budiacich signálov na výstupe optočlenov.	.51		
4.10	Priebehy budiacich signálov na signálovom vstupe výkonových hybridných obvodov DRF1201	.52		
4.11	Záznam z termokamery pri $U_{sym} = \pm 25$ V: a) IR spektrum, b) RGB spektrum (referenčná snímka)	).		
		.52		
4.12	Pracovisko pre proces oživenia generátora.	.52		
4.13	Výstupný signál pri $U_{sym}$ : a) ± 5 V, b) ± 10 V, c) ± 15 V, d) ± 20 V	.53		
4.14	Výstupný signál pri $U_{sym}$ : a) ± 25 V, b) ± 35 V	.53		
4.15	Prístrojová krabica pre generátor, pohľad zvrchu.	.54		
4.16	Prístrojová krabica pre generátor, pohľad zboku	.54		
5.1	Znázornenie Rogowského cievky s vinutím v tvare: a) spätnej slučky, b) spätného vinutia [3]	.56		
5.2	Vyhotovenie Rogowského cievok: a) senzory so spätnou slučkou, b) senzor so spätným vinutím.	.57		
5.3	Schéma obvodu pre detekciu signálu z Rogowského cievky.	.57		
5.4	Detail Rogowského cievky s vyhodnocovacím obvodom	.58		
5.5	Závislosť impedancie senzora na frekvencii.	.59		
5.6	Prípravok pre meranie prenosu Rogowského cievky: model.	.60		
5.7	Prípravok pre meranie prenosu Rogowského cievky: realizácia.	.60		
5.8	Meranie odrazu prípravku (parameter S <sub>11</sub> ).	.61		
5.9	Detail merania prenosu $(S_{12})$ Rogowského cievky č.1.	.61		
5.10	Prenos S <sub>12</sub> Rogowského cievok: a) nameraný, b) korigovaný	.62		
5.11	Prevodová charakteristika pre spracovanie meraní uskutočnených pomocou Rogowského cievok.	63		
5.12	Vyhodnocované senzory v podobe Rogowského cievok	.63		
5.13	Spôsob umiestnenia Rogowského cievky na koaxiálny vodič.	.64		
5.14	Rozmiestnenie Rogowského cievok v rámci systému	.64		
5.15	Simulácia rozloženia intenzity elektrického poľa E, pre plazmovú komoru v kapilárnom vyhotove	ení		
	[38]	.65		
5.16	Simulácia rozloženia intenzity elektrického poľa E, pre plazmovú komoru vo vyhotovení v tvare			
	plošnej štrbiny.	.65		
5.17	a) Neosadená DPS sondy intenzity el. poľa: merací modul, b) grafitový nástrek v rámci DPS	.66		
5.18	Osadená DPS sondy intenzity elektrického poľa: merací modul, a) NTC termistory, b) PT100, c)			
	konektor s feritovými toroidmi	.67		
5.19	Neosadená DPS sondy intenzity el. poľa: spracovací modul	.68		
5.20	Osadená DPS sondy intenzity el. poľa: spracovací modul	.68		

5.21	Neosadená DPS sondy intenzity el. poľa: výstupný modul	68			
5.22	Osadená DPS sondy intenzity el. poľa: výstupný modul	69			
5.23	Skompletizovaná sonda slúžiaca k snímaniu modulu intenzity elektrického poľa E	69			
6.1	Prúdové špičky <i>di/dt</i> pri budení plazmovej komory bez uvažovaného induktoru v rámci				
	predradného člena: priebeh na bočníku	70			
6.2	Simulačný obvod: generátor – predradný člen – komora	71			
6.3	Výsledky obvodovej simulácie: generátor – predradný člen – komora	72			
6.4	Predradný člen: realizácia.	72			
6.5	Predradný člen s plazmovou komorou.	72			
6.6	Generátor - predradný člen - plazmová komora	73			
6.7	Principiálne znázornenie pracoviska pre funkčné testy	73			
6.8	Principiálne znázornenie pracoviska: zaistenie bezpečnosti osôb	74			
6.9	Reálna podoba pracoviska pre funkčné testy zariadenia.	75			
6.10	Priebehy budenia plazmovej komory v rámci funkčných testov	75			
6.11	Plazmový výboj	76			
6.12	Detail plazmového výboja	76			
6.13	Záznam z termokamery, plazmový výboj: a) IR spektrum, b) RGB spektrum (referenčná sr	nímka).			
		76			

### **ZOZNAM TABULIEK**

1.1	Rekapitulácia rešerše existujúcich obvodových riešení generátorov.	23
5.1	Mechanické parametre realizovaných senzorov v podobe Rogowského cievok	57
5.2	Elektrické parametre senzorov v podobe Rogowského cievok	63

## Úvod

Výskumom v oblasti plazmových komôr pracujúcich za atmosférického tlaku, generátorov pre nich určených a samotnom potenciáli plazmy sa v súčasnej dobe venuje nespočetné množstvo výskumníkov po celom svete. Na pracoviskách FEKT VUT v Brne sa tejto problematike venuje niekoľko projektov a zverejnených je viacero prác zaoberajúcich sa problematikou návrhu plazmových systémov a aplikácii plazmy generovanej za atmosférického tlaku pre následné nasadenie v priemysle. Medzi takéto práce patrí napríklad príspevok [1], zaoberajúci sa možnosťou adhézneho spájania polypropylénu pomocou chladnej plazmy. V rámci projektu GA-20-14105S (grantová agentúra GAČR) bol v minulosti vytvorený výkonový vysokofrekvenčný generátor s výstupným signálom harmonického tvaru budiaci plazmovú komoru [2].

Náplňou predloženej diplomovej práce je navrhnúť a zostrojiť upravený/vylepšený výkonový generátor, ktorý bude nadväzovať na výsledky práce [3] a optimalizovať jeho chod so zvolenou/dodanou plazmovou komorou pri presnom vytýčení finálnej aplikácie plazmového systému s uvažovaním fyzikálno-chemického procesu plazmového výboja vzniknutého pri budení obdĺžnikovým budiacim signálom. Cielená aplikácia tohto plazmového systému je stanovená na úpravu povrchu nerezových profilov, kedy bude pomocou pôsobenia plazmy dosiahnutá zvýšená zmáčanlivosť s následkom zlepšenia adhézie povrchov týchto profilov pri ich ďalšom spracovaní podobne, ako tomu bolo v práci [1] pre polyméry. Ďalším z uvažovaných využití systému je napríklad úprava elektrických vlastností povrchov materiálov k dosiahnutiu zvýšenia povrchovej dielektrickej pevnosti izolátora. Práca prináša cenné skúsenosti z pohľadu predloženia postupov a metód návrhu, oživenia a merania parametrov elektronického výkonového generátora. Ten na rozdiel od generátora predstaveného v rámci práce [2] generuje na výstupe signál neharmonický (obdĺžnikový) a umožňuje tým vznik nových experimentov a projektov v oblasti generovania plazmy, spracovania prekurzorov a ich následného využitia. Pre možnosť sledovania okamžitého elektrického výkonu dodávaného do systému generátor – plazmová komora slúži sonda elektrického prúdu na princípe Rogowského cievky, ktorá je známa svojou odolnosťou voči rušeniu signálmi z jej okolia [4]. Sonda je umiestnená na elektrickom vedení medzi elektronickým generátorom a plazmovou komorou. Taktiež je možné umiestniť sondu do vnútra plazmovej komory (komora koncipovaná v tvare plošnej štrbiny). V rámci práce sú zhotovené, oživené a otestované ďalšie potrebné obvody a zariadenia, ako napríklad: oddeľovací výkonový symetrický zdroj napájajúci pol-mostové zapojenie predloženého a optimalizovaného generátora [3] a obvody zvyšujúce efektivitu a univerzálnosť finálneho systému: obvod pre kompenzáciu účinníku (PFC), sonda intenzity elektrického poľa E pre detekciu modulu intenzity vo vybranej oblasti pôsobenia plazmy.

Výsledná práca je rozdelená do tematicky súvisiacich celkov. Prvá oblasť sa venuje zhodnoteniu súčasného stavu na poli návrhu, výroby a použitia vysokofrekvenčných

generátorov určených pre budenie plazmových komôr a možných aplikáciách na poli využívania plazmy. V ďalšej časti je priblížená použitá konštrukcia elektronického výkonového generátora pre zvolenú/navrhnutú plazmovú komoru a cieľová aplikácia tohto systému. Následne sa text zaoberá problematikou optimalizácie elektrického návrhu výkonového generátora, návrhom modifikácie pracoviska a ďalších potrebných zariadení k činnosti systému generátora, postupmi a kritickými miestami v procese oživenia systému. Nasleduje oblasť venovaná výberu, zhotoveniu a nastaveniu vhodnej sondy určenej pre vyhodnocovanie elektrických parametrov: napätie, prúd, výkon na výstupe elektronického výkonového neharmonického generátora. Na túto časť nadväzuje návrh konštrukcie sondy určenej k vyhodnoteniu modulu intenzity elektrického poľa E v oblasti pôsobenia plazmy. Po výbere a zhotovení vhodných meracích sond sa skompletizované zariadenie: generátor – komora – meracie sondy, podrobilo funkčným testom s cieľom zapálenia plazmového oblúka na výstupe plazmovej komory (dýzy). V závere práce sú uvedené návrhy DPS optimalizovaného obvodového riešenia elektronického výkonového generátora a následne sú stručne zhrnuté v práci dosiahnuté výsledky.

### 1. SÚČASNÝ STAV

Výskum v oblasti plazmy a techniky slúžiacej na generovanie plazmatických výbojov za atmosférického tlaku je jedna z rozvíjajúcich sa vedných oblastí, ktorá každoročne zaznamenáva významný posuv vpred. V nasledujúcom texte sa zameriam na niektoré z vybraných prác a článkov zaoberajúcich sa generovaním a využitím plazmy, pre priblíženie danej problematiky. Nasleduje niekoľko prác týkajúcich sa návrhu vysokofrekvenčných elektronických generátorov určených pre napájanie plazmových komôr.

Spomínané texty prác, články a ďalšie práce budú s prihliadnutím na zadanie diplomovej práce vyberané najmä z tých, ktoré v realizácii používajú vysokofrekvenčný systém pracujúci v oblasti rádiových vĺn, prevažne na frekvencii f = 13.56 MHz, formujúci plazmu za atmosférického tlaku.

### 1.1 Využitie plazmy

Pomerne silné zastúpenie vo výskume má v posledných rokoch dopad liečenia rán pomocou nízkoteplotnej plazmy za atmosférického tlaku. Práca [5] prezentuje uspokojujúce výsledky pri aplikácii systému na testovacie subjekty v podobe laboratórnych myší. Ďalej práce [6] a [7] potvrdzujú bezpečnosť použitia na ľudskom organizme, rýchlejšie hojenie ošetrovaných rán a deaktiváciu bakteriálnych buniek v organizme, vedúce k zníženiu množstva podávaných liekov a časovej náročnosti operácie. V oblasti medicíny má plazma taktiež zastúpenie pri sterilizácii nástrojov. V práci [8] sa autori zaoberajú návrhom a následne optimalizáciou zariadenia pre dekontamináciu a sterilizáciu endoskopu. V rámci práce [9] sa autori zamerali na sterilizáciu endodontických pilníkov použitých pri dentálnych zákrokoch a v závere práce naznačili vhodnosť rozšírenia metódy pre ostatné dentálne pomôcky. Výsledky dosiahnuté pri praktických testoch dokazujú účinnosť metódy, kedy množstvo organického materiálu na pilníku po aplikácii plazmy kleslo pod detekčnú úroveň meracieho prístroja [9]. Možnosť dekontaminácie povrchov sa okrem medicíny používa aj v ďalších odvetviach, napríklad v potravinárskom priemysle. Autori práce [10] skúmali možnosť použitia plazmy pri sterilizácii nožov. V rámci práce navrhli zariadenie, ktoré pomocou plazmy aktivuje sol'né roztoky, do ktorých sú následne tieto nože krátkodobo ponorené [10]. Výsledkom bola deaktivácia všetkých skúmaných bakteriálnych buniek za predídenia problémov, ktoré vznikajú pri bežne používaných metódach pre sterilizáciu nožov z nerezovej ocele v potravinárskom priemysle [10].



Obrázok 1.1 Ukážka výsledkov práce [9]: sterilizácia endodontických pilníkov s využitím plazmy: a) pred aplikovaním b) po aplikovaní.

Ďalším dlhodobo skúmaným využitím je likvidácia nebezpečných odpadov a plynov. Autori práce [11] sa bližšie zaoberajú možnosťou likvidácie ropných kalov, vznikajúcich pri spracovávaní ropy a ropných produktov, a to bez vzniku škodlivých a toxických vedľajších produktov. Výsledky tejto práce boli použité ako podklady pre stavbu zariadenia, slúžiaceho na likvidáciu ropných kalov v priemysle [11]. V texte práce [12] sa autori zaoberajú možnosťou zníženia NO<sub>x</sub> emisií naftových spaľovacích motorov pomocou červeného kalu aktivovaného plazmou, namiesto použitia bežných katalyzátorov. Autori v práci navrhli dve rôzne metódy a následne pomerne precízne opisujú testy a predložené funkčné prototypy použitých zariadení, dokazujúc účinnosť nimi predloženého riešenia, poukazujúc na ďalšie výhody, napríklad použitie samotného červeného kalu, ktorý je odpadná zložka pri výrobe hliníku [12].



Obrázok 1.2 Ukážka výsledkov práce [12]: emisie NO<sub>x</sub> pri rôznych spôsoboch katalýzy.

Použitím plazmy v oblasti úpravy pitnej a priemyselne znečistenej vody sa zaoberajú autori v prácach [13] a [14]. V práci [13] autori opisujú momentálny stav na poli úprav pitnej vody a dokazujú konkurencieschopnosť prístupu plazmového čistenia pri odstraňovaní pesticídov a sterilizácii vody oproti konvenčným riešeniam. Ďalej sa autori zaoberajú možnosťou úpravy vody znečistenou farbivami z textilného priemyslu a predkladajú dva nové prístupy plazmatickej úpravy vody: 1.) použitie podvodnej plazmovej dýzy a 2.) tvorbu plazmy vo vzduchových bublinách pomocou elektrického poľa, ktoré okrem iných v texte diskutovaných problémov rieši problém s eróziou elektród, medzi ktorými prebiehajú elektrické výboje formujúce plazmu vo vode [13]. Iný prístup využívajú autori práce [14], kde uvažujú umiestnenie zdroja plazmy nad vodnú hladinu s cieľom dezinfekcie, zníženia obsahu solí ťažkých kovov a odfarbenia. V rámci prezentovania výsledkov práce [14] potvrdzujú jej autori deaktiváciu vírusových buniek a baktérií, nachádzajúcich sa v ošetrovanej vode: Escherichia coli, a poukazujú na účinné zníženie kontaminácie vody ťažkými kovmi v prípade olova, chrómu a niklu s uvedenými pomerne nízkymi finančnými nákladmi oproti momentálne používaným riešeniam.



Obrázok 1.3 Ukážka výsledkov práce [13]: odstránenie farbív z pitnej vody.

Posledným príkladom diskutovaných odvetví bude úprava povrchov materiálov s využitím plazmy. Autorka textu [15] opisuje použitie plazmy pre odstránenie korózneho povrchu z olovených predmetov pre archeologické účely. Vystavením plazme za použitia argónu a vodíku so správne nastavenou teplotou reakcie takéto povrchy krehnú a ich odstránenie je teda jednoduchšie a pôvodný predmet ostáva nepoškodený za predpokladu, že bola sledovaná a regulovaná maximálna teplota, ktorej bol predmet vystavený [15]. V rámci práce sa výsledky prezentovali najprv na modeli s umelo vytvoreným koróznym povrchom a následne na skutočnom archeologickom náleze, v oboch prípadoch s pozitívnymi výsledkami [15]. Autor práce [16] pojednáva o systéme určenom pre čistenie kovových povrchov od zvyškov mazív, nastavujúc optimum tohto systému. To bolo dosiahnuté pomocou vhodného nastavenia parametrov elektronického generátora, nájdenia vhodného uhlu medzi plazmovou dýzou a ošetrovaným materiálom a určením vhodného zloženia a optimálnych pomerov zložiek použitej chémie plazmatického výboja [16]. Takáto úprava povrchov je žiaduca pri ďalšom spracovaní materiálov a môže výrazne zlepšiť vlastnosti daného povrchu, napríklad adhéziu, atď [16].



Obrázok 1.4 Ukážka výsledkov práce [15]: obsah stopových prvkov v olovených guľkách pred a po využití plazmy.

#### 1.2 Vysokofrekvenčné elektronické generátory

Zhodnotením princípov generovania plazmy pomocou elektrických výbojov v plynoch a modelmi niektorých komerčne dostupných riešení elektronických generátorov sa zaoberá práca [3].

V rámci vedeckých pokusov zameraných na generovanie plazmy sú kladené rôzne technické a fyzikálne nároky na spôsob generovania plazmy a teda aj na samotné elektronické generátory, medzi tieto kritéria patrí napríklad: cena, frekvencia výstupného signálu, výstupný výkon, rozmery, atď. Na základe týchto kritérií sa volí vhodná koncepcia navrhovaného generátora. V priemysle využívané konštrukcie a koncepcie budú rozobrané ďalej v texte.

#### 1.2.1 Generátory s použitím zosilňovača v triede AB

Zosilňovače pracujúce v tejto triede používajú lineárnu časť VA charakteristiky výkonových prvkov. To znamená, že po celú dobu operácie tečie výkonovým prvkom určitý, nezanedbateľný, kľudový prúd  $I_k$ , ktorý sa neskôr prejaví v podobe nižšej účinnosti celého zariadenia [17]. Jedná sa o triedu kombinujúcu základné vlastnosti tried A a B, kde je kladený dôraz na zvýšenie účinnosti oproti triede A a potlačenie skreslenia príznačného pre triedu B [17].

Generátor s takouto konštrukciou, pracujúci na frekvencii f = 13.56 MHz s výstupným výkonom P = 1 kW zostrojili a otestovali autori práce [18]. Ako výkonový prvok použili autori práce vzduchom chladenú triódu, s napájacím napätím  $U_0 = 4$  kV [18]. Výhodou generátora zostrojeného v práci [18] je pomerne jednoduchá konštrukcia a možnosť pomerne jednoducho meniť frekvenciu výstupného signálu v rozmedzí  $\Delta f = \pm 1$  MHz, nakoľko autori využili zapojenia v podobe Hartleyho oscilátora. V tomto zapojení je možné ladiť frekvenciu oscilácií signálu pomocou zmeny kapacity laditeľného kondenzátora, ktorý spolu s paralelne pripojeným induktorom tvorí rezonančný obvod

[18]. Nevýhodou diskutovanej práce [18] je nízka účinnosť, iba okolo  $\eta = 53$  %, toto je spôsobené hlavne z dôvodu operácie zosilňovača v triede AB [17].



Obrázok 1.5 Principiálna schéma zosilňovača v triede AB v podobe Hartleyho oscilátora [17].

#### 1.2.2 Generátory s použitím zosilňovača v triede D

Takto koncipované generátory majú veľmi vysokú účinnosť vďaka použitiu spínacieho výkonového prvku v režime spínača, na ktorom je v prípade jeho uzavretia veľký úbytok napätia U, avšak ním prechádza iba minimálny elektrický prúd I, a v prípade otvorenia je tento úbytok napätia U veľmi malý a prúd I spínacím prvkom veľký [17]. V tejto triede sa využíva mostového alebo pol-mostového usporiadania výkonových prvkov [19]. Teoreticky dosahuje takáto koncepcia účinnosť  $\eta = 100$  %, avšak kvôli nežiaducim parametrom a javom súčiastok, výkonovým stratám pri spínaní, atď. je táto účinnosť nižšia [17].

Práce, v ktorých sa autori zaoberajú návrhom a zostrojením takto koncipovaných generátorov sú napríklad [19] a [20]. Obe konštrukcie pracujú na frekvencii f = 13.56 MHz s výstupným signálom harmonického tvaru, s výkonom  $P \ge 1$  kW. Rovnako tak obe zariadenia sú v prevedení pol-mostovej konštrukcie, kde medzi sebou spínajú vždy 2 výkonové MOSFET tranzistory typu N s budiacimi signálmi v proti-fáze [19], [20]. Autori prác ďalej riešia impedančné prispôsobenie pre uvažovanú záťaž s impedanciou  $Z = 50 \ \Omega$  a napájanie pol-mostu. Dosiahnuté účinnosti prototypov pri dlhodobom chode boli  $\eta = 90 \%$  [20] a  $\eta = 94 \%$  [19]. V práci [19] bol v rámci výkonového prvku použitý hybridný obvod, obsahujúci oba výkonové tranzistory typu MOSFET spolu s ich výkonovými budičmi, ktoré dodávajú požadovaný budiaci prúd *I* do gate elektródy každého z týchto výkonových tranzistorov [19]. Touto voľbou autori dosiahli zvýšenie účinnosti pri znížení náročnosti obvodového riešenia riadenia konštrukcie [19].

Autori prác [19] a [20] iba okrajovo spomínajú nastavenie tzv. mŕtvych dôb (deadtime), tj: doby, v ktorých sú oba tranzistory uzavreté pomocou obvodu pre budenie pol-mostových konštrukcií (autori diskutovaných prác používajú menej sofistikované riešenie v podobe diskrétneho zapojenia pre zmenu striedy jednotlivých budiacich signálov). Toto ošetrenie sa používa v prípade, ak sa pol-mostová konštrukcia skladá z výkonových tranzistorov s rovnakým typom vodivosti, aby sa predišlo stavu, kedy sú oba tieto tranzistory otvorené, a teda vzniká možnosť deštrukcie zariadenia [21]. Diskutované ošetrenie zabezpečí, aby sa jeden výkonový tranzistor stihol úplne uzavrieť ešte pred tým, ako sa druhý začne otvárať [21].

Všeobecnou výhodou zosilňovačov pracujúcich v triede D je ich vysoká účinnosť, nevýhodou potom zložitejšie obvodové riešenie.



Obrázok 1.6 Principiálna schéma pol-mostového zosilňovača v triede D [17].

#### 1.2.3 Generátory s použitím zosilňovača v triede E

Jedná sa o rozšírený typ pre realizáciu generátorov, čo potvrdzuje aj pomerne veľký počet publikovaných vedeckých prác zaoberajúcich sa konštrukciou generátora tejto koncepcie [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]. Obľúbené sú hlavne pre ich jednoduchosť, nakoľko konštrukcia vyžaduje jediný výkonový tranzistor spínajúci voči referenčnému potenciálu [22]. Okrem spínacieho prvku je k operácii v tejto triede potrebná dvojica rezonančných obvodov: prvý rozkmitá výstupný signál a druhý filtruje vyššie frekvencie [23].

Generátor takejto konštrukcie bol použitý aj v rámci už spomínanej práce [5], a to v podobe komerčne dostupného riešenia PRF-1150 od firmy Littelfuse [30].

Autori práce [22] sa rozhodli použiť ako výkonový prvok SiC MOSFET tranzistor, kde ako budič gate elektródy zostrojili vlastné riešenie. Výhoda tohto typu tranzistora je vo väčšej šírke zakázaného pásma a vo väčšom prieraznom napätí [22], [31]. Bolo dosiahnutej účinnosti generátora na úrovni  $\eta = 93$  % pri výstupnom výkone P = 1 kW. Práce zaoberajúce sa výkonovými generátormi sú ďalej napríklad [23], kde sa využilo kaskádové zapojenie výkonových prvkov typu SiC MOSFET a GaN. Tranzistory z nitridu gália: GaN majú výhodu oproti bežným kremíkovým tranzistorom v podobe nižšieho odporu v otvorenom stave, to znamená nižšie výkonové straty pri spínaní a teda aj vyššiu účinnosť zariadenia [31]. Ďalšími výhodami tranzistorov tejto konštrukcie je veľká šírka zakázaného pásma umožňujúca operáciu vo vyšších teplotách a väčšie prierazné napätie, umožňujúce vysokonapäťové aplikácie [31]. Vo výsledkoch práce [24] je prezentovaná dosiahnutá účinnosť až  $\eta = 97 \%$  pri použití práve tranzistorov na báze GaN.

Práce [25], [26], [27], [28] a [29] sa zaoberajú návrhmi generátorov s malým výstupným výkonom v rozmedzí  $P = 2.5 \div 31$  W s dosiahnutými účinnosťami v rozmedzí  $\eta = 76 \div 94$  %.

Výhodou zosilňovačov v triede E je ich jednoduchá konštrukcia, nevýhodou je potom náročnosť zmeny frekvencie výstupného signálu: z tejto požiadavky vyplýva potreba zmeny obvodového zapojenia, kde pevne nastavený rezonančný obvod striktne určuje frekvenciu výstupného harmonického signálu [17], [22].



Obrázok 1.7 Principiálna schéma zosilňovača v triede E [22].

#### 1.2.4 Generátory s použitím zosilňovača v triede DE

Jedná sa o zosilňovače s hybridnou topológiou, kombinujúce vlastnosti zosilňovačov z tried D a E [17], podrobne popísanou v literatúre [32]. Nevýhodou zosilňovačov pracujúcich v triede D je potreba nabitia a vybitia (inherentnej) kapacity výkonových prvkov a teda vyššie výkonové straty pri spínaní. Naopak v triede E túto nevýhodu nevidno, nakoľko výkonový prvok v podobe tranzistora sa otvára vždy až po vybití kapacity pomocou obvodového riešenia typického pre danú triedu. Kombináciou týchto dvoch tried teda možno teoreticky zvýšiť účinnosť zariadenia [32].

V práci [33] je predstavený nízko výkonový generátor, pracujúci na frekvencii f = 13.56 MHz dodávajúci výkon  $P \approx 11$  W do záťaže  $Z = 50 \Omega$  pri dosiahnutí účinnosti na úrovni  $\eta = 87$  %. Tento generátor pracuje v triede DE [17] a ako výkonové prvky používa dva GaN tranzistory v pol-mostovom usporiadaní, budené obdĺžnikovými signálmi [33]. V práci [17] je poukázané na pomerne náročné riadenie tejto topológie na vyšších frekvenciách pomocou spomínaných obdĺžnikových signálov, a je naznačená možnosť riadenia pomocou harmonických signálov. Autori práce v závere diskutujú mierne nižšiu účinnosť predloženého generátora [33] a pripisujú ju zvolenému spôsobu budenia výkonových tranzistorov, kde miesto použitia izolovaných DC-DC meničov bola použitá bootstrap metóda.



Obrázok 1.8 Principiálna schéma zosilňovača v triede DE [17].

#### **1.2.5** Generátory s použitím zosilňovača v triede E/F ( $\Phi$ )

Rovnako ako v prípade triedy DE sa jedná o hybridnú topológiu zosilňovačov. Obdobne ako v triede E stačí jediný výkonový spínací prvok [34]. Táto topológia sa snaží odstrániť nevýhody triedy E a zjednodušiť návrh oproti triede DE [34]. Oproti triede E je tu pridaný rezonančný obvod pred výkonový prvok, ktorý zabezpečuje zníženie napäťového zaťaženia výkonového prvku [34].

Práca [35] predkladá zapojenie v podobe DC-DC meniča pracujúceho v pulznom režime určeného pre pasterizáciu mlieka, kde je pri frekvencii f = 13.56 MHz a výstupnom výkone P = 2 kW dosiahnutej účinnosti na úrovni  $\eta = 93$  %. Boli použité výkonové prvky v podobe GaN tranzistorov v push-pull usporiadaní pre dosiahnutie požadovaného výstupného výkonu [35]. Takmer rovnakými účinnosťami disponujú aj generátor určený pre plazmovú komoru [36] a zosilňovač určený pre výkonový bezdrôtový prenos signálu diskutovaný v práci [34], kde sú rovnako v oboch prácach použité GaN tranzistory v podobe výkonových spínacích prvkov.

V rámci práce [37] autori dosiahli podstatne menšej účinnosti, iba okolo  $\eta = 77$  %, čo je neskôr v rámci danej práce diskutované.



Nevýhodou topológie je náročnejšia obvodová realizácia oproti triede E [37].

Obrázok 1.9 Principiálna schéma zosilňovača v triede E/F [35].

#### 1.2.6 Zhrnutie poznatkov súčasného stavu obvodových riešení VF generátorov

Diskutované generátory a ich dôležité parametre sú pre prehľadnosť uvedené v tabuľke 1.1.

Práca	Trieda zosilň.	Pracovná frekvencia f [MHz]	Výstupný výkon P <sub>out</sub> [W]	Účinnosť η [%]	Použitý výkonový prvok	Použitie
[18]	AB	13.56	1000	53	trióda	plazma
[19]	D	13.56	1500	94	MOSFET hybrid	plazma
[20]	D	13.56	1800	90	MOSFET	plazma
[22]	E	13.56	1000	93	SiC	plazma
[23]	Е	13.56	700	91	SiC, GaN	neudané
[24]	Е	13.56	541	97	GaN	bezdrôtový prenos
[25-29]	E	13.56, 27.1	2.5 ÷ 31	76 ÷ 94	LDMOS, GaN	VF ohrev, bezdrôtový prenos
[32]	DE	13.56	10.6	87	GaN	VF ohrev, plazma
[34]	Φ	13.56	1300	94	GaN	bezdrôtový prenos
[35]	Φ	13.56	2000	93	GaN	pasterizácia
[36]	Φ	13.56	1100	92	eGaN	plazma
[37]	Φ	13.56	400	77	GaN	neudané

Tabul'ka 1.1 Rekapitulácia rešerše existujúcich obvodových riešení generátorov.

Poznatky získané z prác a literatúry [17 - 37] umožňujú formulovať zásady pre návrh VF generátorov ako:

- Generátor koncipovaný ako zosilňovač v triede AB nie je pre vysoko-výkonové aplikácie vhodný pre nízku účinnosť [18], jedná sa o pomerne zastaralý prístup pre VF výkonové zdroje,
- použitie GaN a SiC tranzistorov v podobe výkonových spínacích prvkov má v dnešnej dobe svoje opodstatnenie, prihliadnuc na ich teoretické vlastnosti popísané v [31] a výsledky dosiahnuté v prácach [24], [27], [35] a [34],
- výkonové prvky v podobe GaN tranzistorov je vhodné voliť pri aplikáciách s veľmi vysokou frekvenciou spínania, nakoľko ich pracovné frekvencie dosahujú pásma GHz [31],
- 4. výkonové prvky v podobe SiC tranzistorov je vhodné voliť pri aplikáciách, ktoré vyžadujú spínanie vyšších napätí U > 1 kV, svoje uplatnenie teda nájdu hlavne v zapojeniach zosilňovačov v triede E [22],[31],
- 5. pri návrhu vysoko-výkonových generátorov je dôležité voliť všetky komponenty s prihliadnutím na ich účinnosť a previesť celý návrh v čo najvyššej možnej kvalite. Kritickými komponentami sú: kvalita navinutia cievok a transformátorov, výber vhodného výkonového stupňa a jeho budiaceho obvodu a nežiaduce vlastnosti DPS [22],

- 6. čím vyššia je uvažovaná frekvencia spínania, tým je vyššia potreba kvalitného prevedenia zapojenia a návrhu DPS, nakoľko sa zvyšuje vplyv nežiaducich vlastností v rámci realizácie obvodového riešenia [31],
- pri použití výkonových prvkov, ktoré sú v jednom puzdre spolu s ich výkonovými budičmi možno zvýšiť účinnosť zariadenia a pomerne značne uľahčiť obvodový návrh generátora [19],
- 8. z pohľadu dosiahnutých výsledkov diskutovaných prác možno za ideálnu voľbu pre návrh a realizáciu výkonového vysoko-frekvenčného generátora voliť také riešenia, ktoré využívajú zapojenia zosilňovača v triede E a D a to z pohľadu ceny, časovej a realizačnej náročnosti a prezentovaných výsledkov v podobe účinnosti.

### **2. ROZBOR ZADANIA**

V nasledujúcom texte je diskutovaný popis predložených častí systému a ich vlastnosti. Je tu opísaná konštrukcia plazmovej komory, ktorá bola skonštruovaná za účelmi použitia pre proces oživenia elektronického generátora a prvotných testov s optimalizovaným riešením generátora. Rovnako je v texte popísaný samotný generátor, ktorý pozostáva z dvoch častí: signálového modulu a výkonového modulu [3]. V závere kapitoly je uvedené použitie ideálne zostavenej koncovej aplikácie celého systému a predložená druhá koncepcia plazmovej komory, ktorá bude použitá v neskoršej fáze testov a je vhodnejšia pre nasadenie do priemyslu.

#### 2.1 Navrhnutá plazmová komora

Jedná sa o plazmovú komoru, ktorá na výstupe formuje kapacitne viazanú, nízkoteplotnú plazmu. Táto komora bola skonštruovaná v rámci grantu GAČR na pracovisku UTEE FEKT VUT v Brne.

Navrhnutá plazmová komora je koncipovaná v kapilárnom vyhotovení (jet) a jej geometriu možno vidieť na obrázku 2.1. Pri danej geometrii je potrebné si uvedomiť, že doba, za ktorú elektromagnetická vlna budiaca komoru dopropaguje na miesto, kde dochádza k vstrekovaniu argónu a zapaľovaniu plazmy, nie je zanedbateľná. Zo vzdialenosti bodu, kde sa formuje plazma od výstupu generátora a znalosti rýchlosti šírenia povrchovej EMG vlny možno určiť čas propagácie,  $t_{delay} \approx 33$  ns. Toto je čas takmer odpovedajúci polovici periódy budiaceho signálu  $t_{bud} \approx 73.75$  ns. Pri sledovaní dejov (a ich meraní) pri vykonávaní pokusov si je potrebné uvedomiť, že zmena na výstupe generátora sa v procesoch v plazmovej komore prejaví s oneskorením, ktorého čas je takmer polovica periódy uvažovaného budiaceho signálu obdĺžnikového priebehu s prvou harmonickou  $f_l = 13.56$  MHz.



Obrázok 2.1 Geometrický model predloženej plazmovej komory.

Ako plyn pre zapálenie a šírenie oblúka plazmového výboja je uvažovaný argón, s vhodnými prímesami (prekurzormi), ktorých koncentrácia je určená aplikáciou daného zariadenia. Každá aplikácia plazmových výbojov vyžaduje mierne odlišné prímesi a ich koncentráciu, ako už bolo naznačené v textoch prác v kapitole 1.1. Optimalizácia voľby chemického zloženia plazmového výboja je iteratívny proces, kedy sa najprv na základe skúseností určí počiatočné zloženie a následne sa hľadá optimum pre dosiahnutie požadovaných výsledkov.

Pre správne rozloženie elektromagnetického poľa v rámci komory, vhodnú prúdovú hustotu v okolí dýzy a zabezpečenie, aby energia nepropagovala späť k argónovému vstrekovaniu boli vyhodnotené kritické konštrukčné parametre, ktoré sú zobrazené na obrázku 2.2. Finálna podoba skonštruovanej komory je zachytená v rámci obrázku 2.3.



Obrázok 2.2 Kritické parametre geometrie predloženej plazmovej komory.



Obrázok 2.3 Skonštruovaná plazmová komora.

Pre účely zapálenia plazmového oblúka v rámci predloženej plazmovej komory je potrebný prúd rádovo  $I_{bud} = 100$  mA, ktorý vďaka geometrickej konštrukcii komory vytvorí požadovanú intenzitu elektrického poľa  $E_{zap}$  potrebnú pre zapálenie plazmového oblúka. Oproti pôvodnej plazmovej komore uvažovanej v práci [3] sa jedná o výraznú zmenu v prúdovom budení a samotnom princípe zapálenia plazmového oblúka.



Obrázok 2.4 Závislosť impedancie predloženej plazmovej komory na frekvencii, a) lineárna os x, b) logaritmická os x.

Pre účely zosúladenia elektrických parametrov na rozhraní výkonový generátor – plazmová komora, je kritické meranie závislosti impedancie Z danej plazmovej komory v závislosti na frekvencii f. Výsledky tohto merania sú znázornené v rámci obrázku 2.4 a budú použité pre návrh predradného člena, v rámci kapitoly 6. Verifikácia parametrov plazmovej komory pre frekvenciu f = 1kHz je znázornená v rámci obrázku 2.5.



Obrázok 2.5 Elektrické parametre plazmovej komory pre f = 1kHz.

V rámci pracoviska UTEE FEKT VUT v Brne bolo v minulosti publikovaných viacero prác, kedy plazmová komora bola konštruovaná s touto (kapilárnou) geometriou, napríklad práce [38] a [39]. Z týchto prác sú dôležité simulácie a následné merania vykonané v spojení s kapilárnou komorou pomocou dipólovej antény (RF metóda), kedy boli v blízkosti plazmy (generovanej pomocou elektronického generátora s harmonickým výstupným signálom, pracujúcom na frekvencii *f* = 13.56 MHz) vyhodnocované zložky elektromagnetického (EMG) poľa [38]. Z výsledkov práce [38] zobrazenej na obrázku 2.6 vyplýva značný pomer vyšších harmonických plazmou budeného signálu v spektre signálu vyžiareného (snímaného) v okolí plazmy. Tieto signály značne obmedzujú možnosť použitia digitálnej techniky (kamery, PC, meracia technika) ale aj analógových meracích prístrojov/sond v blízkom okolí plazmového výboja (potvrdzujú aj skúsenosti v rámci pracoviska UTEE FEKT VUT v Brne). Pre uvažované budenie obdĺžnikovým signálom predpokladám ešte väčšie zastúpenie (rozsah) zložiek EMG spektra.



Obrázok 2.6 Ukážka výsledkov práce [38]: meranie EMG zložiek v okolí plazmového výboja: a) konfigurácia pracoviska, b) výsledok merania.

#### 2.2 Optimalizovaný generátor

Jedná sa o elektronický, vysokofrekvenčný, výkonový generátor, využívajúci koncepciu zosilňovača pracujúceho v triede D, ktorého principiálna schéma zapojenia je znázornená na obrázku 2.7 a). Obvodové riešenie tohto generátora bolo navrhnuté v rámci práce [3]. Tento generátor sa skladá z dvoch samostatných modulov: signálového a výkonového, ktoré bude možné do seba osadiť pre zabezpečenie čo najmenších možných rozmerov [3]. Podrobný popis činnosti možno vidieť v práci [3], v rámci kapitoly 9. Rovnako sú v danej práci uvedené všetky schémy zapojenia a návrhy DPS.

Daný generátor pracuje v pulznom režime, s výstupným signálom obdĺžnikového tvaru s veľmi krátkymi dobami spínania. Očakávané priebehy na výstupe generátora s prihliadnutím na tvary budení výkonových spínacích prvkov možno vidieť na obrázku 2.7 b). Pripojenie výkonového generátora k plazmovej komore je uvažované priamo, pomocou koaxiálnej spojky [3].



Obrázok 2.7 Predložený generátor: a) principiálna schéma [3], b) teoretické výstupné priebehy [3].

#### 2.2.1 Signálový modul

Signálový modul generátora umožňuje generovanie budiaceho signálu f = 13.56 MHz obdĺžnikového tvaru s možnosťou zmeny jeho striedy [3]. V rámci tohto modulu je zabezpečená tvorba vzájomne invertovaných signálov s ošetrenými hazardnými stavmi pre riadenie výkonových koncových stupňov v pol-mostovom zapojení, umiestnených na výkonovom module [3]. Toto ošetrenie je zabezpečené pomocou budiča pol-mostových konštrukcií v podobe integrovaného obvodu [3]. Základný budiaci signál je taktiež možné generovať pomocou externého zdroja vysokofrekvenčného signálu, ktorý je možné

priviesť na dosku pomocou BNC konektora [3]. Frekvencia externe pripojeného signálu nemôže prekročiť f = 30 MHz a veľkosť tohto signálu musí odpovedať hodnotám  $U_{Low} = 0$  V pre nízku logickú úroveň (low) a  $U_{High} = 5$  V pre vysokú logickú úroveň (high) [3]. Modul je potrebné napájať pomocou externého napájacieho zdroja U@I = 15 V/4 A [3]. Neosadený signálový modul možno vidieť na obrázku 2.8.



Obrázok 2.8 DPS signálového modulu predloženého generátora.

#### 2.2.2 Výkonový modul

Výkonový modul daného generátora obsahuje impedančné oddelenia pre budiace signály a pre napájanie oboch hradlových budičov pre výkonové MOSFET tranzistory [3]. Výkonové prvky sú v hybridnom prevedení, rovnako ako tomu bolo pri práci [19], kde je v rámci jedného puzdra umiestnený výkonový MOSFET aj jeho budič gate hradla [3]. Následne doska obsahuje obvodové riešenie napájania pol-mostu v podobe tlmiviek pre filtráciu vyšších frekvencií a kondenzátorov pre premosťovanie striedavého signálu do referenčného uzlu (zeme) a pre dodanie adekvátnych prúdových špičiek do výkonových hybridných prvkov tvoriacich koncové stupne [3]. Pre napájanie pol-mostu je potrebné pripojiť zdroj symetrického napätia  $U = \pm 300$ V. Neosadený výkonový modul možno vidieť na obrázku 2.9.



Obrázok 2.9 DPS výkonového modulu predloženého generátora.

### 2.3 Cieľová aplikácia plazmového systému

Skonštruované, oživené a otestované zariadenie (ktoré bolo popísané vyššie) slúži ako technologický nástroj pre viacero možných účelov, medzi ktoré patrí napríklad: zlepšenie výsledkov procesu lepenia profilov z nerezovej ocele, úpravy elektrotechnických vlastností povrchu: zvýšenie dielektrickej povrchovej pevnosti u izolantov a ďalšie. Pomocou aplikácie plazmy na povrch exponovaného nerezového profilu by sa malo dosiahnuť vyššej zmáčanlivosti povrchu a teda aj zlepšenie adhéznych vlastností. Nadväzuje sa tak už na predom spomínanú prácu [1], kde bol podobný proces realizovaný na polyméroch. K tejto aplikácii bude potrebné nájsť optimálne nastavenie generátora a optimálne zloženie chémie plazmového výboja. Po úspešných výsledkoch testovania optimálneho nastavenia generátora, dodanej plazmovej trysky a nastavenia požadovaných parametrov generátor – plazmová komora – vzorka materiálu sa predpokladá umiestnenie systému na rameno šesť-osého priemyselného robota, za účelom automatizácie procesu lepenia týchto profilov. Je preto kladený dôraz na čo najmenšie rozmery zariadenia a jeho mechanickú kompaktnosť. V rámci neskorších testov sa rovnako tak uvažuje výmena plazmovej komory v kapilárnom vyhotovení za plazmovú komoru s výstupom v tvare plošnej štrbiny, ktorá je znázornená na obrázku 2.10. Táto plazmová komora bola skonštruovaná v rámci pracoviska UTEE FEKT VUT v Brne s podporou grantu GAČR a použitá v predchádzajúcich prácach [40] a [41]. Rovnako tak sa jedná o plazmovú komoru, pre ktorú bol pôvodne generátor [3] určený.





Obrázok 2.10 Plazmová komora s výstupom v tvare plošnej štrbiny, pre pokročilejšie testy [40].

## **3. OPTIMALIZÁCIA NÁVRHU OBVODOVÉHO PREVEDENIA GENERÁTORA**

Pred samotnou optimalizáciou prebehlo osadenie DPS výkonového generátora a prvotné meranie. Tento stav je zobrazený na obrázku 3.1. Z výsledkov prvotných (a ďalších kontrolných) meraní bolo v návrhu výkonového generátora podľa práce [3] odhalených niekoľko problémov, ktoré je pred procesom oživenia nutné vyriešiť. Rovnako tak existuje niekoľko možných zmien pre zlepšenie nastavenia a chodu generátora, ktoré nebolo možné zistiť/neboli realizované v čase návrhu DPS. V texte sa ďalej zameriam na návrh vhodných a potrebných zmien v obvodovom zapojení, nastavenie kritických parametrov a celkovú optimalizáciu generátora. Kritické body úprav a konečnej optimalizácie možno ďalej popísať v bodoch ako:

- 1. Nastavenie optimálnych priebehov budiacich signálov pre výkonové prvky generátora (mŕtve doby, dead-time),
- 2. voľba dostatočného galvanického oddelenia a prúdového posilnenia budiacich signálov hybridného výkonového (spínacieho) prvku,
- 3. úprava galvanického oddelenia napájania častí generátora.

Pre proces optimalizácie boli pri meraní parametrov zariadenia použité meracie prístroje uvedené v prílohe A.

V závere kapitoly sú naznačené možnosti minimalizácie odrazu EMG vlnenia na elektrickom vedení medzi daným výkonovým generátorom a záťažou v podobe plazmovej komory.



Obrázok 3.1 Podoba pracoviska prvotného merania, pred procesom optimalizácie.

#### 3.1 Optimalizácia signálového modulu

Hlavná časť optimalizácie signálového modulu spočíva v správnom nastavení mŕtvych dôb (dead-timov) pre signály budiace výkonové MOSFET tranzistory (v skutočnosti zložitejšie obvody zložené z viacerých tranzistorov) v pol-mostovom usporiadaní (zastúpenie dead-timov sa bude meniť v závislosti na veľkosti napájacieho napätia generátora, ako je poukázané neskôr v rámci kapitoly 4.2). Dead-timy sú časové úseky, počas ktorých sú úmyselne oba výkonové tranzistory v pol-moste uzatvorené [21].

Nedodržanie týchto časových intervalov by mohlo viesť k deštrukcii výkonových prvkov, nakoľko by mohol nastať stav, kedy by oba tranzistory boli naraz zopnuté [21] a to napríklad pôsobením šumu na vstupe daného budiaceho obvodu. Zopnutie oboch tranzistorov v tejto topológii spôsobí prekročenie prúdových maxím  $I_{max}$  daných výkonových prvkov. Potreba nastavenia týchto časových úsekov vyplýva z použitia výkonových prvkov z jedným typom vodivosti (N kanál) [3]. Na predloženom generátore je toto ošetrenie realizované pomocou integrovaného obvodu LMG1210 [42]. Ten je zapojený v režime riadenia pomocou PWM (PWM mode), kedy po privedení riadiaceho PWM signálu obvod generuje signály pre budenie ako vrchného, tak spodného výkonového tranzistora pol-mostu [42]. Vstupný signál pre tento obvod je generovaný pomocou kryštálového oscilátora s následnou možnosťou upravenia striedy pomocou preklápacieho obvodu typu D [3]. Priebehy signálu generovaného pomocou kryštálového oscilátora s následnou možno vidieť na obrázku 3.2 a 3.3. Pre účely oživenia bola nastavená strieda 50:50, tento stav možno vidieť na obrázku 3.3 b).



Obrázok 3.2 Signál generovaný pomocou kryštálového oscilátora  $f_l = 13.56$  MHz.



Obrázok 3.3 Signál po úprave preklápacím obvodom typu D: a) signál po modulácii, b) nastavená strieda 50:50.

Po správnom nastavení striedy možno prejsť k nastaveniu dead-timov, tie sa v PWM móde obvodu LMG1210 [42] dajú nastaviť jednotlivo pre oba výkonové tranzistory pomocou trimrov  $R_{10}$  a  $R_{15}$  [3], ktoré sú vyznačené spolu s obvodom LMG1210 [42] na schéme uvedenej na obrázku 3.4 a) a na DPS uvedenej na obrázku 3.4 b).



Obrázok 3.4 Spôsob nastavenia dead-timov pomocou trimrov, a) schéma b) DPS [3].

Teoreticky je obvod [42] schopný generovať dead-timy s maximálnou dobou  $t_{dead\_max} = 20$  ns. Takéto nastavenie je žiaduce aj z hľadiska dosiahnutia rezervy v časovaniach, ktoré sa môžu líšiť pri ďalšom spracovaní budiaceho signálu, až na vstup výkonového hybridu. Avšak pri takomto nastavení nie sú dosiahnuté požadované tvary budení, hlavne z dôvodu dĺžok časových úsekov, kedy sú tranzistory zopnuté. Výsledné priebehy výstupných signálov z pol-mostového budiča LMG1210 [42], po nastavení spomínaného ošetrenia (dead-timy) v stave naprázdno, bez prispôsobovacích obvodov sú zachytené na obrázku 3.5.



Obrázok 3.5 Nastavenie dead-timov budiacich signálov pre výkonové tranzistory, bez prispôsobovacích obvodov pre optočleny: stav na prázdno.

Následne bolo potrebné vytvoriť obvodové riešenie zabezpečujúce vhodné parametre výstupných budiacich signálov obvodu LMG1210 [42], a to na základe požiadaviek prvku použitého pre galvanické oddelenie signálov pre dosku výkonového modulu. Jedná sa o optočlen TLP2367 [43], ktorý bude diskutovaný ďalej v texte. Tento optočlen

obsahuje na vysielacej časti diódu, ktorej optimálny prúd je podľa daného produktového listu [43] definovaný ako I = 10 mA. Výstupné budiace signály z obvodu LMG1210 [42] sú teda upravené pomocou rezistora o veľkosti  $R = 390 \Omega$ , ktorým je zabezpečený prúd diódou I = 8.72 mA pri uvedenom typickom úbytku napätia na dióde vysielacej časti  $U_f = 1.6$  V [43]. Pre zlepšenie napäťovej strmosti budiacich signálov (zobrazených na obrázku 3.5) je paralelne s rezistorom R osadený kondenzátor C, ktorý bol experimentálne zvolený s kapacitou C = 50 pF. Pre zabezpečenie odstránenia napäťových podkmitov pri vypínaní LED diódy (ktoré vznikali pri použití predom spomínaného kondenzátora C) vysielacej časti optočlena boli oproti pôvodnému riešeniu [3] výstupy obvodu LMG1210 [42] ošetrené diódami  $D_I$  a  $D_2$  (zobrazené na obrázku 3.8). Použité boli Schottkyho diódy MSS1P5 [44]. Výsledky dosiahnuté takouto úpravou zapojenia s následne nastavenou dobou dead-timov na úrovni  $t_{dead} = 12$  ns možno vidieť na obrázku 3.6.



Obrázok 3.6 Nastavenie dead-timov budiacich signálov pre výkonové tranzistory, sčasti riešené prispôsobenie pre optočleny: stav na prázdno.

Pri takto riešenom zapojení následne vznikal problém s podkmitom signálu na vstupe optočlenov v okamihu, kedy mal byť signál v aktívnej úrovni (zopnutý). Tento podkmit spôsobil prechod optočlena z aktívnej úrovne do nízkej úrovne a teda spôsoboval chybné budenie nasledujúcich prvkov. Tento chybný signál je znázornený na obrázku 3.7.



Obrázok 3.7 Znázornenie napäťového podkmitu (pri aktívnej úrovni) na vstupe optočlenov, následne spôsobujúceho chybné budenie.

Riešenie spočíva v použití zapojenia s diódami MSS1P6 [44] v podobe  $D_4 - D_6$ zobrazeného na obrázku 3.8. Zapojenie týchto diód rieši odstránenie napäťových špičiek ako pri vysokej úrovni signálu (5 V), tak pri nízkej úrovni (0 V) a zároveň zabraňuje predošle diskutovanému problému. Pri realizácii zapojenia je vhodné voliť diódy s nízkou kapacitou  $C_D$ , nakoľko pre vyššie hodnoty kapacít môže dôjsť k rozkmitaniu signálu, čo bolo pozorované pri použití diód B320A-13-F [45] v podobe  $D_3$  ( $D_5$ ) na obrázku 3.8.

Zjednodušená (principiálna) schéma zapojenia prispôsobovacieho obvodu medzi obvodom LMG1210 [42] a optočlenmi TLP2367 [43] je uvedená na obrázku 3.8, finálna podoba osadeného signálového modulu je potom zobrazená na obrázku 3.10.



Obrázok 3.8 Prispôsobovací obvod LMG1210 – optočlen TLP2367.



Obrázok 3.9 Vplyv kapacity diód na kmitanie výstupného signálu nezaťaženého obvodu LMG1210.

Na obrázku 3.9 b) možno vidieť výrazné kmitanie signálu po úprave spomínanej vyššie pomocou diód B320A-13-F [45]. Toto je spôsobené voľbou diód [45] s vyššou kapacitou, až  $C_D = 200$  pF. Zlepšenie priebehu je možné pomocou zapojenia ďalšej diódy
do série, poprípade výmenou za vhodnejšiu diódu s nižšou kapacitou. Priebeh pri použití diódy s nižšou hodnotou kapacity, MSS1P6 [44] s kapacitou  $C_D = 40$  pF možno vidieť na obrázku 3.9 a).

Po spomínaných úpravách boli pre účely oživenia nastavené dead-timy v úrovni  $t_{dead} = 17$  ns.



Obrázok 3.10 Osadená DPS signálového modulu predloženého generátora po procese optimalizácie.

# 3.2 Optimalizácia výkonového modulu generátora

Optimalizácia výkonového modulu tkvie v úprave a voľbe dostačujúceho galvanického oddelenia pre výkonovú aj signálovú časť oproti pôvodnému riešeniu predstavenému v texte práce [3] a v nastavení vhodných parametrov budiacich signálov. Po prvotnom pripojení signálového modulu k výkonovému modulu pri budiacich signáloch pre riadenie pol-mostu, generovaných s frekvenciou f = 13.56 MHz neboli na vstupoch hybridných výkonových prvkoch DRF1201 [46] namerané žiadne relevantné budiace signály.

## 3.2.1 Galvanické oddelenie budiacich signálov

V rámci parametrického nastavenia medzi výstupnými budiacimi signálmi obvodu LMG1210 [42] a výkonovými hybridnými obvodmi DRF1201 [46] bolo preskúmaných a realizovaných viacero riešení, ktoré budú ďalej popísané:

#### TLP2367

Použité digitálne optočleny Toshiba TLP2367 [43] z návrhu [3] majú dostatočnú napäťovú strmosť dv/dt a izolačné vlastnosti, vstupný signál však na výstupe invertujú. Taktiež poskytujú maximálny výstupný prúd udaný výrobcom iba  $I_{TLP2369_out} = 10$  mA. Bolo zistené, že tento výstupný prúd pri požadovanej frekvencii budiaceho signálu  $f_I = 13.56$  MHz nie je dostatočný pre budenie signálového vstupu budiča gate elektródy výkonového modulu tranzistorov DRF1201 [46], ktorý vyžaduje minimálnu veľkosť vstupného prúdu okolo  $I_{bud} = 200$  (až 500) mA (v danom produktovom liste [46] táto skutočnosť nebola uvedená, preto návrh [3] s takýmto dimenzovaním prúdu I vôbec nerátal). Experimentálne však bola overená funkčnosť tohto návrhu s TLP2367 [43] pre

budiace frekvencie  $f \le 10$  MHz, pri nameranom výstupnom prúde až  $I_{TLP2369\_expout} = 50$  mA.

## UCC23511-Q1

Pre nedostatky vyššie zmieneného oddeľovacieho člena bolo nutné výsledné riešenie pozmeniť. Ako vhodná voľba sa javil optočlen UCC23511-Q1 [47], ktorý výstupný signál neinvertuje a je schopný dodávať výstupný prúd až  $I_{out\_UCC23511Q1} = 2$  A. Táto zmena vyžaduje rozsiahlu úpravu napájania, kedy je potrebné zvýšiť výstupné napätie výkonového zdroja TRACO THM-20W [48] zapojením nastavovacieho rezistora podľa aplikačnej poznámky [49]. Ďalej výmenu použitého lineárneho stabilizátoru za regulovateľný výstupný stabilizátor LM2941 [50] a nastavenie jeho výstupného napätia na hodnotu vhodnú pre optočlen UCC23511-Q1 [47]. Veľkosť výstupného signálu optočlena sa potom odvíja od veľkosti napájacieho napätia pre optočlen, preto je potrebné upraviť napäťovú úroveň výstupného signálu pomocou napäťového deliča, ktorý zabezpečí vhodnú veľkosť budiaceho napätia na vstupe hybridného obvodu výkonového tranzistora (DRF1201 [46]) U = 5 V.

Výrobca v produktovom liste [47] udáva možnosť zapojenia tzv. interlock-u [47], ktorý zabezpečuje predídeniu časových konfliktov pri spínaní, teda aby bol aktívny vždy iba jeden optočlen a teda iba jeden výkonový prvok v pol-moste [21]. Aj napriek nastaveniu dead-timov pomocou obvodu LMG1210 [42] je takto navrhnuté zapojenie vhodné použiť pre možný vplyv nežiaducej indukčnosti a tvorbe napäťových špičiek pri spínaní [21].



Obrázok 3.11 UCC23511-Q1, zapojenie interlock [47].

Toto riešenie spoľahlivo pracovalo pre frekvencie budiaceho signálu  $f \le 13$  MHz a pre niektoré z frekvencií  $f \ge 14$  MHz. Po následnom zvyšovaní frekvencie prestal optočlen spracúvajúci signál pre spodný výkonový hybrid generovať výstupný signál. Optočlen budiaci vrchný výkonový hybrid pracoval až do frekvencie  $f_{medz} = 15$  MHz. Pôvod problému je v krátkej dobe aktívneho stavu (high) signálu budiaceho spodný hybrid, daný optočlen už nie je schopný reagovať na takýto signál. Rovnako tak v medziach frekvencií  $f = 13 \div 14$  MHz vznikal veľmi pravdepodobne problém so zhodou frekvencie budiaceho signálu s násobkom frekvencie modulačného signálu optočlena. Možnosť predĺžiť aktívnu dobu zopnutia tohto výkonového tranzistora na úkor skrátenia dead-timov budiacich signálov však nepripadá do úvahy z hľadiska ošetrenia hazardných stavov.

#### TLP2367 + výkonový budič

Ďalší smer riešenia a výber optočlena, ktorý by pracoval do vysokých frekvencií s vhodným časovaním a dostatočným výstupným prúdom, je pri súčasnom stave trhu podstatne obmedzený. Ako vhodné riešenie sa ponúka použitie prvotnej voľby optočlena s nízkym výstupným prúdom Toshiba TLP2367 [43] (50 Mb/s), poprípade ešte rýchlejším optočlenom ISO7710 [51] (100 Mb/s), doplneným o prúdové posilnenie na výstupe, ktoré dodáva dostatočný výkon do signálového vstupu výkonového hybridu. Optočlen ISO7710 [51] by potreboval dodatočnú úpravu v podobe privedenia napájacieho napätia na stranu vysielača signálu, ktoré predchádzajúce diskutované riešenia [43] a [47] nevyžadovali. Spomínané prúdové posilnenie za optočlenom môže byť realizované buď v diskrétnom prevedení v podobe zapojenia s tranzistorom, alebo pomocou integrovaných obvodov určených pre budenie hradiel výkonových tranzistorov.

Prvým pokusom o riešenie bolo zapojenie z diskrétnych súčiastok. Ako vhodný tranzistor by sa pre danú realizáciu mohol javiť bipolárny tranzistor typu NPN pre vysokofrekvenčné aplikácie, MMBT2222A [52]. Takéto riešenie by malo výhodu, že by vstupný signál invertovalo, a teda v spojení so spomínaným optočlenom TLP2367 [43] by bol výkonový hybrid (DRF1201 [46]) riadený signálom s rovnakou fázou, s akou je generovaný pomocou obvodu LMG1210 [42]. Principiálne zapojenie je znázornené na obrázku 3.12.



Obrázok 3.12 Prúdové posilnenie výstupu optočlena v podobe diskrétneho zapojenia s MMBT2222A.

Zdroj  $V_1$  predstavuje signál generovaný optočlenom a rezistor  $R_3$  upravuje model na reálny zdroj napätia. Zdroj  $V_2$  predstavuje lineárny stabilizátor napätia. Prúd tranzistorom je zvolený ako  $I_C = 250$  mA a nastavený pomocou rezistora  $R_2 = 20$   $\Omega$ . Následne je zvolený rezistor na báze tranzistora ako  $R_1 = 330$   $\Omega$ . Kondenzátor  $C_8$  slúži pre rýchlejšie otvorenie tranzistora a rýchla Schottkyho dióda s nízkou kapacitou  $D_3$  zase slúži k rýchlejšiemu odčerpaniu náboja a teda k rýchlejšiemu uzavretiu tranzistora. Induktor  $L_1$ modeluje nežiaduci prejav indukčnosti vedenia. Dióda  $D_4$  zabezpečuje odstránenie záporných prekmitov napätia na výstupe zapojenia. Priebehy z modelu takto realizovaného zapojenia sú zobrazené na obrázku 3.13.



Obrázok 3.13 Priebehy simulácie zapojenia s MMBT2222A.

Z priebehov obvodovej (numerickej) simulácie (obrázok 3.13) možno vidieť pomalý nárast výstupného napätia. Toto je dané pomalým zatváraním tranzistora. Časové oneskorenie však netvorí ani polovicu času vyhradenú pomocou dead-timov, stále sa teda jedná o možné riešenie problému.

Nevýhodu v podobe pomalého uzatvárania tranzistora rieši komplementárne zapojenie tranzistorov. Jedná sa o dva bipolárne tranzistory, z čoho jeden je typu PNP, druhý NPN, pričom ich charakteristiky sú takmer identické. Schematické zapojenie takto realizovaného prúdového posilnenia možno vidieť na obrázku 3.14.

Priebehy zo simulácií modelu takto realizovaného zapojenia sú zobrazené na obrázku 3.15. Na rozdiel od obvodovej simulácie predchádzajúceho modelu je zobrazený iba tvar výstupného signálu s prihliadnutím na budiaci signál. Z daných priebehov možno vidieť zvýšenú rýchlosť nárastu a poklesu hrán výstupného napätia. Je to dané princípom komplementárneho zapojenia, kedy sa o odčerpanie náboja stará vždy tranzistor s opačným typom vodivosti ako aktuálne otvorený tranzistor. Riešenie však neinvertuje tvar výstupného napätia oproti vstupnému budiacemu signálu. Implementácia takéhoto zapojenia by teda neobracala fázu riadiaceho signálu. Riešenie by bolo najlepšie realizovať pomocou budiča s komplementárnym zapojením realizovaným v jednom

puzdre. Takto je zabezpečená čo najväčšia podobnosť tranzistorov. Takýmto budičom je napríklad ZXGD3004E6 [53].



Obrázok 3.14 Prúdové posilnenie výstupu optočlena v podobe komplementárneho zapojenia tranzistorov.



Obrázok 3.15 Priebehy simulácie komplementárneho zapojenia tranzistorov.

**Finálne vyriešenie** problému diskutovaného vyššie predstavuje posilnenie výstupu optočlenov TLP2367 [43] vo forme logických invertorov v podobe SN74LVC2G14-Q1 [54]. Tieto invertory je možné spojiť paralelne pre dosiahnutie požadovaného výstupného prúdu. Z hľadiska časovaní sa jedná o najrýchlejšie dostupné riešenie. Pre zabezpečenie požadovaného výstupného prúdu je potrebné zapojiť viacero týchto obvodov paralelne. Experimentálne (pomocou termokamery: znázornené na obrázku 3.16 a tvaru priebehov: znázornené na obrázku 3.18) bola zistená potreba zapojiť paralelne až 12 invertorov [54], zabezpečujúcich nominálne zaručený elektrický prúd približne až *I*<sub>out</sub> = 384 mA pre dosiahnutie optimálnych tvarov budení. Pri použití v kombinácii s invertujúcimi optočlenmi TLP2367 [43] sú teda na výstupe tohto prúdového posilnenia znova dosiahnuté budiace signály s rovnakou fázou, s akou boli generované pomocou pol-mostového budiča LMG1210 [42] s minimálnym časovým oneskorením. Pre správnu

činnosť invertorov je potrebné voliť napájanie v podobe lineárnych stabilizátorov schopných dodať požadovaný výkon. Boli zvolené stabilizátory MIC29510-5.0WT [55], ktoré sú schopné pri výstupnom napätí U = 5 V dodať prúd až I = 5 A. Uvažované principiálne zapojenie (12 invertorov) je uvedené na obrázku 3.17.



Obrázok 3.16 Teplotná kontrola invertorov SN74LVC2G14-Q1 pomocou termokamery: a) IR spektrum, b) RGB spektrum (referenčná snímka).



Obrázok 3.17 Prúdové posilnenie výstupu optočlenov v podobe invertorov SN74LVC2G14-Q1.

Na obrázku 3.18 je zachytený tvar budiaceho signálu po čiastočnom obvodovom riešení prúdového posilnenia (8 invertorov) s výraznými prekmitmi a podkmitmi. Pre ošetrenie kmitavého priebehu budenia je znovu použité obvodové riešenie

s Schottkyho diódami, ktoré bolo diskutované už v rámci kapitoly 3.1. Následne boli tesne pred vývody pre riadiace signály hybridných obvodov DRF1201 [46] pridané TVS diódy pre upnutie napätia na únosnú hladinu. Takáto úprava vedie na tvar budenia znázorneného na obrázku 3.19.



Obrázok 3.18 Priebeh budiaceho signálu na vstupe jedného z výkonových hybridných obvodov DRF1201: s čiastočne realizovaným prúdovým posilnením, bez tvarovacích diód.



Obrázok 3.19 Priebeh budiaceho signálu na vstupe jedného z výkonových hybridných obvodov DRF1201: s optimálnym prúdovým posilnením a úpravou diódami.

## 3.2.2 Galvanické oddelenie pre napájanie

V návrhu práce [3] boli použité bezpečnostné kondenzátory  $CY_1 - CY_4$  zobrazené v rámci schémy na obrázku 3.20, tvoriace ochranu výkonových meničov TRACO THM-20 [48], ktoré slúžia na oddelenie referenčných potenciálov výkonových častí napájania hybridných obvodov DRF1201 [46] a optočlenov TLP2367 [43] umiestnených na výkonovom module. Tieto kondenzátory je potrebné odstrániť, nakoľko pre vysokofrekvenčné signály predstavujú skrat. Takto sa následne elektrické prúdy i(t) dostávajú z oddelených častí späť do východiskovej, spoločnej časti a galvanické oddelenie tým pádom neexistuje. Prevádzka generátora bez odstránenia týchto kondenzátorov by viedla k deštrukcii obvodu LMG1210 [42].



Obrázok 3.20 Problémy s galvanickým oddelením výkonového modulu, schéma [3].

Následne bol pri overovaní správnosti návrhu DPS (neosadený modul) objavený problém s kapacitnou väzbou medzi spoločným a oddelenými referenčnými potenciálmi. Medzi týmito oddelenými potenciálmi bola nameraná kapacita  $C \approx 3$  pF. Táto kapacita sa pri frekvencii signálov f = 13.56 MHz prejaví v podobe kapacitnej reaktancie o veľkosti  $X_c \approx 4$  k $\Omega$ , čo nemožno považovať za galvanické oddelenie. Tento problém spôsobovali prekrytia a súbeh vodivých ciest zmieňovaných potenciálov v kombinácii so samotným materiálom substrátu DPS. Riešením bolo odstránenie týchto vodivých ciest, ktoré nepredstavovalo problém s následnou úpravou DPS, nakoľko sa jednalo o vodivé spoje vedúce ku kondenzátorom  $CY_1 - CY_4$ , ktoré boli kvôli problému diskutovanému vyššie už odstránené. Problematické časti DPS (odstránené vodivé spoje a kondenzátory) sú zvýraznené v rámci návrhového prostredia EAGLE na obrázku 3.21. Po úpravách a osadení DPS boli výkonové hybridy umiestnené na hliníkový chladič. Finálna podoba modulu je zachytená na obrázku 3.22.



Obrázok 3.21 Problémy s galvanickým oddelením výkonového modulu, DPS [3].



Obrázok 3.22 Osadená DPS výkonového modulu predloženého generátora po procese optimalizácie.

# 3.3 Minimalizácia stojatej vlny na budiacom elektrickom vedení

Väčšina generátorov uvedených v texte kapitoly 1.2 obsahuje na výstupe výkonových prvkov rezonančný obvod, ktorý výstupný signál upravuje na harmonický tvar. V tomto prípade spočíva úloha minimalizácie stojatej vlny na elektrickom vedení vo vytvorení obvodu impedančného prispôsobenia, ktorý upravuje výstupnú impedanciu generátora  $Z_{VystGen}$  na hodnotu impedancie uvažovanej záťaže Z a prenosovej cesty [22]. Najpoužívanejšie je prispôsobenie  $Z_{VystGen}$  na  $Z = 50 \Omega$ , ktoré sa v dnešnej dobe stalo v priemysle štandardom [56]. Pri použití s plazmovými komorami je situácia mierne odlišná v tom, že sa impedancia plazmovej komory môže v čase meniť v závislosti na aktuálnom stave plazmového výboja, čo bolo zistené už pri predchádzajúcich pokusoch v rámci pracoviska UTEE FEKT VUT v Brne [57]. V rámci realizácie je teda často použitý generátor s  $Z_{VistGen} = 50 \Omega$  a medzi generátor a plazmovú komoru sa vkladá ladiaci člen, ktorý upravuje vstupnú impedanciu komory [56]. Bližšie sa návrhom impedančných prispôsobení pre generátory s výstupným harmonickým signálom venujú autori už spomínaných prác (napríklad [22] alebo [34]), rovnako tak autori práce [56], kde sú porovnané bežné prístupy prispôsobovania medzi plazmovými komorami a elektronickými generátormi pomocou: a) transformátorov alebo b) pasívnych sietí.

V rámci zadania tejto práce je požiadavka na budenie plazmovej komory pomocou signálu obdĺžnikového priebehu. Pri takomto (pulznom) budení je korektnejšie miesto uvažovania podmienok definujúcich stojaté vlnenie uvažovať podmienky definujúce odraz EMG vlny na elektrickom vedení. Pre neharmonický signál rovnako tak nemožno hovoriť o impedančnom prispôsobení, nakoľko impedancia je parameter definovaný jedine pre signál harmonického tvaru. Teoreticky je však možné nahradiť akýkoľvek periodický signál pomocou harmonických priebehov [58]. Pri obdĺžnikových priebehoch sú v spektre tohto signálu zastúpené vždy nepárne harmonické zložky [58]. Teoreticky sa dá z času nástupnej hrany obdĺžnikového signálu stanoviť, koľko harmonických zložiek je v takomto signáli zastúpených [58]. Z tejto skutočnosti vyplýva možné riešenie minimalizácie odrazu EMG vlny v podobe návrhu širokopásmového prispôsobenia, diskutovaného napríklad v prácach [59] a [60]. Takéto prispôsobenia sú často konštrukčne zložité, vykazujú výkonové straty na použitých pasívnych prvkoch a sú ekonomicky nákladné [60].

Z hľadiska skutočností zmienených vyššie v texte bol zvolený odlišný prístup k minimalizácii odrazu EMG vlny na budení, uvažovaný už pri pôvodnom návrhu optimalizovaného generátora [3]. Tento prístup je založený na čase propagácie signálu k dĺžke použitého vedenia a je diskutovaný v literatúre [61] a [62]. Ak signál prejde elektrickým vedením tam a naspäť za kratšiu dobu, ako je doba nábežnej alebo zostupnej hrany (vyberá sa rýchlejší dej [61]), je takéto vedenie definované ako elektrický krátke [62]. Pri elektricky krátkom vedení odrazený signál stihne doznieť najneskôr spolu so

skončením kratšej zo signálových hrán, teda nedochádza ku skresleniu prenášaného signálu a tvarovací obvod upravujúci parametre takéhoto vedenia teda nie je potrebný [62]. Autor práce [61] volí kritérium pre splnenie podmienky na elektricky krátke vedenie ako:

$$l < \frac{\tau_{(r/f)} * \nu}{10},\tag{3.1}$$

kde *l* je dĺžka vedenia pre splnenie kritéria krátkeho vedenia podľa [61], *v* je rýchlosť šírenia vlny po prenosovej ceste a  $\tau_{(r/f)}$  je doba trvania nástupnej alebo zostupnej hrany signálu v závislosti na tom ktorá z nich je kratšia.

Podľa [62] je obvyklá rýchlosť signálu vodičom v = 0.22 m/ns. Doba zostupnej hrany budiaceho signálu je na základe neskorších optimalizačných prác na generátore volená ako  $\tau = 6 \div 8$  ns. Po dosadení do relácie 3.1 je vyhodnotené obmedzenie na maximálnu dĺžku vedenia medzi generátorom a plazmovou komorou v podobe  $l_{max} = 17.6$  cm. Toto obmedzenie je podstatne prísnejšie ako kritérium v literatúre [62], a bude volené ako kritérium, z ktorého budem pri procese optimalizácie vychádzať pre dodržanie minimalizácie nežiaducich javov na elektrickom vedení budenia plazmovej komory.

# 4. NÁVRH PRACOVISKA A PROCES OŽIVENIA

V nasledujúcom texte je uvedený popis použitých prístrojov a zariadení potrebných pre proces oživenia a testovania zariadenia. V rámci textu je popísaný zvolený postup oživenia elektronického výkonového generátora a následne sú uvedené výsledky oživenia generátora s časovými priebehmi budiacich signálov a výstupného signálu generátora.

# 4.1 Symetrický napájací zdroj

Za účelom napájania pol-mostu je potrebné skonštruovať symetrický výkonový napájací zdroj ( $P_{out} = 1.2 \text{ kW}$ ), schopný dodať dostatočný výstupný prúd *I*. Blokovú schému zdroja navrhnutého za týmto účelom možno vidieť na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1 Bloková schéma symetrického napájania generátora.

Hlavnou časťou diskutovaného zdroja je regulovateľný autotransformátor MCP M10-522-10 [63], schopný regulovať výstupné striedavé napätie  $u_{výst}$  v rozsahu  $0 \div 250$  V, s maximálnym výstupným prúdom  $I_{výst} = 4$  A. Zmenou výstupného napätia zvoleného autotransformátora možno regulovať výstupný výkon *P* celého symetrického napájacieho zdroja. Použitý autotransformátor [63] možno vidieť na obrázku 4.2.



Obrázok 4.2 Regulovateľný autotransformátor MCP M10-522-10.

Autotransformátor napája oddeľovacie (toroidné) transformátory [64] s transformačným pomerom 1:1, slúžiace k vytvoreniu galvanicky oddelených vetví pre napájanie koncových stupňov pol-mostovej konštrukcie výkonového generátora. Takto oddelené vetvy sú potom usmernené dvojcestnými diódovými usmerňovačmi s adekvátnymi chladičmi osadené na DPS a vyhladené pomocou elektrolytických kondenzátorov [65]. Pre obmedzenie prúdových špičiek pri zapnutí [66] boli pred oddeľovacie transformátory (v sérii s primárnym vinutím) osadené NTC termistory [67].

Prúdové špičky vznikajú pri zapínaní oddeľovacích transformátorov s toroidným jadrom bez vzduchovej medzery. Takisto sa NTC termistory používajú pri obmedzení prúdu následkom použitia vyhladzovacích kondenzátorov s nízkou impedanciou a induktorov, ktoré sa pri nábehu zariadenia chovajú ako skrat [66]. NTC termistor v prípade zopnutia predstavuje vysoký odpor a teda obmedzuje špičkový prúd [66]. Následným zahriatím vplyvom prúdu *I*, ktorý NTC termistorom preteká, odpor tohto termistora prudko klesá [66]. Výstupné symetrické napätie zdroja *U*<sub>sym</sub> je merané a signalizované pomocou panelového voltmetra osadeného v rámci prístrojovej krabice tohto zdroja. Diskutovaná časť konštruovaného napájacieho symetrického zdroja je uvedená na obrázku 4.3.



Obrázok 4.3 Symetrický zdroj pre napájanie generátora.

## 4.1.1 Kompenzácia účinníku (PFC)

Zostavovaný generátor, rovnako tak ako väčšina zariadení napájaných sieťovým napätím predstavuje komplexnú záťaž, kedy pri odbere energie nemusí byť odoberaný prúd *i* vo fáze s napätím *u*. PFC (power factor correction), alebo kompenzácia účinníku je dej, pri ktorom dochádza k fázovému zosúladeniu prúdu a napätia a teda k minimalizácii jalového výkonu [68]. Niektoré zariadenia pri tomto deji môžu generovať vyššie harmonické späť do siete [68].



Obrázok 4.4 Priebehy napätia a prúdu na záťaži: a) pre PF = 1, b) pre PF < 1 [68].

Samotná korekcia je realizovaná rovnomennými zariadeniami (PFC), ktoré existujú v troch vyhotoveniach: 1) aktívne PFC (switching), 2) pasívne PFC a 3) sčasti aktívne (semi switching) [68].

Pasívne PFC pridáva pred mostíkový usmerňovač induktor, ktorým kompenzuje kapacitný charakter záťaže. Táto technika je jednoduchá a lacná, avšak možnosť jej použitia je často obmedzená na základe parametrov záťaže [68].

Aktívne PFC využívajú zapojenia s MOSFET tranzistorom [68]. Často sa používajú v spínaných zdrojoch vyžadujúcich vysokú účinnosť [68]. Vyrábané sú často pre širokú škálu vstupných napätí a frekvencií tohto napätia, čo následne umožňuje použitie jedného modelu zariadenia vo všetkých oblastiach sveta [68].

Okrem zvýšenia účinnosti daného zariadenia vyplýva povinnosť použitia PFC v rámci Európskej únie z platných vyhlášok a nariadení, hlavne pre zabezpečenie elektromagnetickej kompatibility EMC. V rámci zariadenia generátora uvažujem po vykonaní procesu oživenia a prvotných funkčných testoch zariadenia umiestnenie aktívnych PFC modulov v rámci symetrického zdroja. Zvolené boli moduly PFC od firmy TDK Lambda [69]. Podľa produktového listu pracujú od úrovne vstupného napätia cca  $u_{in} = 85V$  [69], táto skutočnosť bola overená meraním. Podoba PFC modulov je zachytená na obrázku 4.5. V rámci korekcie účinníku dosahuje typicky hodnoty PF = 0.95 [69].



Obrázok 4.5 PFC moduly TDK-Lambda PF1000A-360.

# 4.2 Oživenie výkonového generátora

Pre účely oživenia výkonového generátora nie je vhodné hneď pripojiť koncovú plazmovú komoru. Toto je vhodné až po overení funkčnosti generátora a vykonaní parametrického nastavenia. Aby generátor nepracoval naprázdno, bude pri procese oživovania použitá umelá záťaž v podobe atenuátoru. Jedná sa o záťaž BW-40N100W+ [70], ktorá je určená pre signály do  $f_{max} = 4$  GHz, s garantovaným útlmom 40 dB a impedanciou  $Z = 50 \Omega$ , s maximálnym stratovým výkonom P = 100 W. Záťaž je zobrazená na obrázku 4.6.



Obrázok 4.6 Záťaž BW-40N100W+ použitá pri oživovaní generátora.

Nakoľko v rámci procesu optimalizácie popísaného v kapitole 3 už bol otestovaný beh oboch modulov generátora, je možné pre proces oživenia s umelou záťažou porovnávať výsledky s touto časťou práce. Postup pri procese oživenia generátora je nasledovný:

- Pripojenie zdroja napätia U@I = 15V / 4 A k signálovému modulu. Po tomto pripojení je potrebné overiť zhodu všetkých budiacich signálov s budiacimi signálmi uvedenými v kapitole 3: konkrétne výstupný signál z kryštálového oscilátoru, výstupný priebeh po zmene striedy pomocou preklápacieho obvodu typu D a výstupné priebehy pre budenie pol-mostu generované pomocou obvodu LMG1210 [42]. Niektoré z týchto priebehov možno vidieť na obrázku 4.7.
- odpojenie napájania signálového modulu a pripojenie výkonového modulu (DPS obsahujúca hybridné obvody DRF1201 [46]) k signálovému modulu (DPS obsahujúca riadiaci obvod LMG1210 [42]). Následne je možné znovu pripojiť napájanie signálového modulu,
- overenie výstupného napätia izolovaných DC-DC meničov Traco THM-20W [48]. Zmeranie tvaru budenia výstupných signálov obvodu LMG1210 [42] po zaťažení optočlenmi TLP2367 [43]. Výsledný tvar budení je zobrazený na obrázku 4.8,
- 4. zmeranie tvaru budenia výstupných signálov za galvanickým oddelením v podobe optočlenov TLP2367 [43]. Tieto signály sú znázornené na obrázku 4.9,
- zmeranie tvaru budenia na výstupe prúdového posilnenia realizovaného obvodmi SN74LVC2G14-Q1 [54], slúžiacich pre budenie signálových vstupov hybridných výkonových stupňov DRF1201 [46]. Tvary budení sú zobrazené na obrázku 4.10,
- 6. kontrola teplotných parametrov oboch DPS. Overenie pomocou termokamery, že sa žiadna súčiastka alebo vodivá cesta nadmerne nezahrieva,
- 7. po overení správneho tvaru budení hybridných koncových stupňov a teplotných parametrov možno pripojiť symetrické napájanie. Ideálne je voliť zdroj, ktorý umožňuje obmedzenie výstupného prúdu a k použitiu zdroja popísaného v kapitole 4.1 pristúpiť až po prvom overení chodu generátora. Vodiče spojujúce tento symetrický zdroj a generátor musia byť ošetrené proti elektromagnetickému rušeniu pomocou feritových jadier,

- 8. následne je možné zvyšovať napätie symetrického zdroja, ideálne v malých inkrementoch napätia, napríklad  $U_{inkr} = 5$  V, vždy s časom  $t_{inkr} = 1$  minúta, pričom je potrebné sledovať teplotné parametre, priebehy budení ale hlavne priebeh na výstupe generátora. So zvyšujúcim napätím sa totiž bude meniť zastúpenie deadtimov. V rámci procesu oživenia treba dodržať maximálny stratový výkon použitého atenuátoru [70] P = 100 W.
- 9. v prípade bezproblémového behu je potrebné uskutočniť dlhodobý test zariadenia, s trvaním behu cca  $t_{o\bar{z}iv} = 1$  hodina. Pri tomto teste sa overí teplotná stabilita riešenia a je možné odhaliť možné nedostatky v realizácii.

Podoba pracoviska pre proces oživenia je zachytená na obrázku 4.12.



Obrázok 4.7 Priebehy budiacich signálov z preklápacieho obvodu typu D a výstupné signály z LMG1210 bez pripojených optočlenov.

Na obrázku 4.7 možno vidieť priebehy budiacich signálov na signálovom module. Žltý priebeh znázorňuje tvar signálu vystupujúceho z preklápacieho obvodu typu D. Tento signál je ďalej spracovaný obvodom LMG1210 [42], pomocou ktorého boli nastavené oba dead-timy približne na hodnotu  $t_{dead} = 17$  ns. Zelený signál reprezentuje budenie pre vrchný výkonový hybrid pol-mostu a fialový priebeh je signál pre spodný výkonový hybrid pol-mostu.



Obrázok 4.8 Priebehy výstupných signálov LMG1210 po zaťažení optočlenmi.

Na obrázku 4.8 možno vidieť, že priebehy na výstupe obvodu LMG1210 [42] po zaťažení optočlenmi nevyzerajú ideálne a vykazujú značne kmitavé chovanie. Dané priebehy na vstupe optočlenov vedú na výstupné priebehy zobrazené na obrázku 4.9. Tieto priebehy možno považovať za optimálne z hľadiska časovaní, požadovaných napäťových strmostí, požadovaných napäťových úrovní aj zvlnenia.



Obrázok 4.9 Priebehy budiacich signálov na výstupe optočlenov.

Po overení správnosti výstupných tvarov budení z optočlenov možno prejsť k vyhodnoteniu signálov meraných za realizovaným prúdovým posilnením. To je ideálne realizovať čo najbližšie k výkonovým hybridom (DRF1201 [46]). Namerané priebehy po správnom dimenzovaní prúdového posilnenia možno vidieť na obrázku 4.10.



Obrázok 4.10 Priebehy budiacich signálov na signálovom vstupe výkonových hybridných obvodov DRF1201.

Overenie teplotnej stability prebiehalo v intervaloch pomocou termokamery Flir e4, ukážka snímky je zobrazená na obrázku 4.11.



Obrázok 4.11 Záznam z termokamery pri  $U_{sym} = \pm 25$ V: a) IR spektrum, b) RGB spektrum (referenčná snímka).

Podoba pracoviska pri priebehoch oživenia je zachytená v podobe obrázku 4.12.





Obrázok 4.12 Pracovisko pre proces oživenia generátora.

Po overení riadiacich signálov bolo pristúpené k pripojeniu symetrického zdroja napájania, s postupným zvyšovaním napájacieho symetrického napätia  $U_{sym}$ . Pre nízke hodnoty napájacieho napätia do hodnoty približne  $U_{sym} = \pm 20$  V možno sledovať značne deformované priebehy (od ideálneho obdĺžnikového priebehu). Toto je spôsobené tým,

že diskrétne sa hybridný obvod neskladá z jediného výkonového tranzistora, ale z celej siete tranzistorov, pričom pri nízkych hodnotách vstupného napätia nepracujú v daný okamih všetky. Tento jav je zachytený v rámci obrázku 4.13 a je sprevádzaný značne väčšími hodnotami dead-time, než ako boli nastavené v rámci budiaceho signálu riadenia hybridného obvodu DRF1201 [46]. Pre vyššie hodnoty napájania  $U_{sym} \ge \pm 25$  V už bolo pozorované, že tvary výstupného signálu ostávajú nemenné, a teda možno usudzovať že spínajú správne všetky tranzistory v danej štruktúre. Táto situácia je znázornená na obrázku 4.14.



Obrázok 4.13 Výstupný signál pri  $U_{sym}$ : a)  $\pm 5$  V, b)  $\pm 10$  V, c)  $\pm 15$  V, d)  $\pm 20$  V.



Obrázok 4.14 Výstupný signál pri  $U_{sym}$ : a)  $\pm$  25 V, b)  $\pm$  35 V

Po procese oživenia bol generátor umiestnený do prístrojovej krabice zobrazenej na obrázkoch 4.15 a 4.16. Krabica umožňuje pripojenie všetkých potrebných konektorov a vodičov a zabezpečuje vhodný prietok vzduchu. Z nameraných teplotných parametrov (obrázok 4.11) bolo vyhodnotené za vhodné umiestniť izolované DC-DC meniče Traco THM-20W [48] na pasívne hliníkové chladiče a rovnako tak aktívne chladiť celé zariadenie pomocou dvoch ventilátorov (nútené chladenie), ktoré sú napájané zo spomínaných izolovaných meničov. Vstupy napájania pre symetrický zdroj boli doplnené o filtračné a bezpečnostné prvky proti prepólovaniu a k obmedzeniu napäťových prekmitov (viac popísané v kapitole 7). Prístrojová krabica generátora bola opatrená nezámennými konektormi pre pripojenie vodičov symetrického napájania (takto je zabránené prehodeniu polarít napájania). Rovnako tak boli nezámenné konektory osadené aj v rámci prístrojovej krabice symetrického zdroja. Ochranné a pracovné uzemnenie výstupu generátora (referenčný potenciál symetrického zdroja) bolo vyvedené za účelom pripojenia referenčnej elektródy plazmovej komory. Takto zostavený generátor je pripravený na ďalšie merania v podobe funkčných testov.



Obrázok 4.15 Prístrojová krabica pre generátor, pohľad zvrchu.



Obrázok 4.16 Prístrojová krabica pre generátor, pohľad zboku.

# 5. NÁVRH MERACÍCH SOND

Existuje mnoho parametrov, ktoré možno v rámci práce s plazmovými komorami a zdrojmi pre nich určenými diagnostikovať. Rovnako tak existuje veľké množstvo metód diagnostiky, či už sa jedná o merania priamo vo vnútri plazmovej komory, kde sú podmienky kvôli prítomnosti plazmy značne sťažené a merania teda prebiehajú hlavne pomocou sond, alebo merania mimo plazmovú komoru: sem patria napríklad optické metódy [71]. Pre účely práce s generátorom a plazmovou komorou bola navrhnutá a zostrojená sonda v podobe Rogowského cievky, a to vo viacerých vyhotoveniach. V rámci zvýšenia univerzálnosti zariadenia bola ďalej zostrojená sonda pre vyhodnocovanie intenzity elektrického poľa E v okolí plazmového výboja.

# 5.1 Rogowského cievka

Jedná sa o meraciu cievku prstencového tvaru, ktorá sníma okamžitú hodnotu striedavého elektrického prúdu *i(t)* prechádzajúceho jej vnútrom [71]. Na tejto cievke sa potom v závislosti od premenlivého magnetického poľa vyvolaného pôsobením striedavého elektrického prúdu *i(t)* prechádzajúceho jej vnútrom indukuje napätie *U*, priamo úmerné takémuto pôsobiacemu prúdu [4], [71]. Výsledné napätie indukované na Rogowského cievke možno vyjadriť podľa [71], ako:

$$V = \dot{\Phi} = n * A * \mu * \dot{I}, \qquad (5.1)$$

kde V je napätie indukované na cievke,  $\Phi$  je magnetický tok, n je počet závitov cievky, A je aktívna plocha prierezu cievky,  $\mu$  je permeabilita prostredia a I je maximálna hodnota striedavého elektrického prúdu prechádzajúceho aktívnou plochou senzora.

Rogowského cievka je najčastejšie realizovaná ako vzduchová cievka [4], a to za účelom predídenia nasýteniu (presýteniu) feromagnetického jadra. Výsledná sonda potom pracuje ako lineárny prevodník pre veľmi široký merací rozsah [4]. Dnes existujú okrem tradičných konštrukcií Rogowského cievky senzory v PCB vyhotovení [72], poprípade v hybridnom vyhotovení [73] a v ďalších možných variantoch. Takto konštruované sondy majú výhodu v jednoduchšej realizácii, nakoľko geometrická precíznosť vinutia je daná návrhom PCB a v lepšom dynamickom rozsahu pri zachovaní pomerne dobrej citlivosti [72], [73]. Ďalšími výhodami je menšia teplotná závislosť [4].

Podrobne sa zmenou konštrukčných parametrov Rogowského cievky a ich vplyvu na výsledný senzor zaoberajú napríklad autori práce [74].

#### 5.1.1 Konštrukcia Rogowského cievky

Ako bolo poukázané napríklad v prácach [73] a [74], existuje viacero konštrukcií Rogowského cievky. Líšia sa napríklad v materiáli, ktorý bol použitý na jadro cievky, vo vlastnostiach použitého vodiča vinutia a v type (tvare) vinutia – spätná slučka (return loop [74]) a spätné vinutie (return winding [74]), oboje diskutované v rámci práce [74]. Tvary

týchto vinutí sú znázornené na obrázku 5.1.



Obrázok 5.1 Znázornenie Rogowského cievky s vinutím v tvare: a) spätnej slučky, b) spätného vinutia [3].

Zásady pri konštruovaní senzora v podobe Rogowského cievky:

- 1. Je žiaduce, aby bol priemer cievky v každom jej bode rovnaký a aby rozmiestnenie závitov vinutia bolo rovnomerné [71]. Tým sa zabezpečí necitlivosť na pôsobenie polí mimo aktívnu časť senzora [4],
- 2. pre obe konštrukcie je potrebné na konci senzora spliesť vodiče,
- pre účely zafixovania vinutia cievky o jadro počas procesu navíjania je vhodné použiť vosk,
- 4. pri konštruovaní senzora vo vyhotovení: b) so spätným vinutím je potrebné dodržať poradie, v ktorom sa vodiče prekrížia.

Boli zostrojené štyri sondy rôznej konštrukcie so vzduchovým jadrom, aby sa predišlo saturácii jadra. Prvá sonda bola realizovaná pomocou toroidného prstenca z teflónu a vinutie bolo realizované v podobe spätnej slučky. Druhý a tretí variant bol realizovaný na teflónové pásiky, ktoré je možné dodatočne pripevniť na už realizované elektrické vedenie. Boli použité teflónové pásiky v dvoch rôznych šírkach, s použitím oboch možných typov vinutia: spätná slučka aj spätné vinutie. Cieľom bolo overenie vlastností senzora využívajúceho spätného vinutia (return winding), ktoré bolo použité v [74] a rovnako tak je základom pre PCB vyhotovenie [72]. Takto konštruovaný senzor by podľa [74] mal vykazovať lepšiu odolnosť voči vonkajšiemu elektromagnetickému poľu, čo je v prípade umiestnenia senzora vo vnútri alebo v bezprostrednej blízkosti plazmovej komory požadované. Teflón bol zvolený z dôvodov vlastností magnetickej a elektrickej vodivosti, permeability a susceptibility a vysokej tepelnej stabilite. Štvrtý variant bol realizovaný na jadro v podobe elektricky a magneticky nevodivej trubičky vo vyhotovení so spätnou slučkou.

Mechanické parametre realizovaných senzorov možno vidieť v tabuľke 5.1. Podobu navinutých cievok možno vidieť na obrázku 5.2.

	Materiál a tvar jadra	Rozmer jadra [mm]	Spôsob vinutia	Počet závitov vinutia [-]			
Senzor č.1	Teflón - prstenec	7x15x1.5	spätná slučka	14			
Senzor č.2	Teflón - pásik	5.6x1.5x50	spätná slučka	15			
Senzor č.3	Teflón - pásik	9.6x1.5x50	spätné vinutie	18			
Senzor č.4	PVC - trubička	21x¢1.8	spätná slučka	19			
Priemer a materiál vodiča vinutia pre všetky senzory: 0.1 mm, meď							

Tabuľka5.1Mechanické parametre realizovaných senzorov v podobe<br/>Rogowského cievok



Obrázok 5.2 Vyhotovenie Rogowského cievok: a) senzory so spätnou slučkou, b) senzor so spätným vinutím.

Po navinutí cievky je potrebné zamerať sa na spôsob vyhodnotenia meranej veličiny. Spracovávanie signálu z Rogowského cievok je možné viacerými spôsobmi. Nakoľko napätie indukované na cievke je priamo úmerné integrálu snímaného elektrického prúdu  $i_m$ , je najčastejšie využívaným riešením použitie analógového integračného obvodu, diskutovaného napríklad v literatúre [71]. Predložené riešenie používa spracovanie v podobe tzv. samo-integrácie, ktorého využili aj autori práce [73]. Namiesto použitia integrátoru v podobe operačného zosilňovača bol požitý rezistor R s malou hodnotou elektrického odporu, na ktorom proces samo-integrácie prebieha. Týmto je dosiahnutá väčšia šírka meracieho pásma senzora [73] a čiastočne aj jeho linearita. Náhradná schéma takto navrhnutého senzora sa nachádza na obrázku 5.3.



Obrázok 5.3 Schéma obvodu pre detekciu signálu z Rogowského cievky.

Prvky  $R_z$ , L a  $C_p$  predstavujú náhradný model reálneho induktoru: v tomto prípade Rogowského cievky.  $R_z$  modeluje odpor vinutia,  $C_p$  kapacitu medzi závitmi cievky a Lvlastnú indukčnosť cievky [75]. Proces samo-integrácie je dosiahnutý pomocou rezistora  $R_2 = 0.1 \Omega$ . Rezistor  $R_3 = 47 \Omega$  slúži ako impedančné prispôsobenie. Signál bude ďalej privedený do SMA konektoru s impedanciou  $Z = 50 \Omega$ .

Umiestnenie detekčného obvodu sa uvažuje priamo na telo cievky, aby spracovanie prebiehalo čo najbližšie meranému signálu. Výsledok tejto realizácie možno vidieť na obrázku 5.4.



Obrázok 5.4 Detail Rogowského cievky s vyhodnocovacím obvodom.

Pre vyhodnocovanie výsledkov môže byť zaujímavé porovnanie pre voľbu rezistora  $R_2$  odlišnej hodnoty. Riešenia sú teda upravené aj na použitie rezistora o veľkosti  $R_2 = 0.05 \ \Omega$ . Táto zmena by mala teoreticky zmeniť tvar (šírku pásma) charakteristiky senzora. Chovanie senzora pritom vychádza z uvedenej náhradnej schémy zobrazenej na obrázku 5.3. V oblasti za medznou frekvenciou  $f_{m1}$  bude pásmo, v ktorom senzor funguje ako lineárny prevodník prúdu  $i_m$  na napätie  $u_r$ . Je vhodné, aby toto pásmo bolo čo najširšie (vychádza z požiadaviek zadania,  $f_m = 400$  MHz). Na úseky, kde prenosová charakteristika nie je v lineárnom pásme, je možné zabezpečiť správny prevod pomocou: 1) rovnice (aproximácia napríklad pomocou MNČ) a následné spracovanie napríklad mikrokontrolérom alebo 2) vytvorenie look-up tabuľky z nameraných dát a následné spracovanie hodnôt v rámci mikrokontroléru.

## 5.1.2 Výsledky dosiahnuté experimentálnym overením Rogowského cievky

Výsledné parametre a detekčné obmedzenia Rogowského cievky vychádzajú z jej elektromagnetických vlastností. Pre určenie medznej frekvencie  $f_{m2}$  senzora bolo použité meranie frekvenčnej charakteristiky, kde sa stanoví impedancia Rogowského cievky v závislosti na frekvencii f. Následne je zmeraná prenosová charakteristika senzora. Meranie je realizované pomocou vektorového analyzátora Rohde&Schwarz ZVL.

Výsledky dosiahnuté pri meraní impedancie Rogowského cievky sú zobrazené v obrázku 5.5 a výsledky z merania prenosu senzora možno vidieť na obrázku 5.10.



Obrázok 5.5 Závislosť impedancie senzora na frekvencii.

Z priebehu modulu impedancie senzora (obrázok 5.5) možno vidieť približne konštantnú a následne pozvoľna rastúcu hodnotu impedancie Z pre nízke kmitočty charakteristiky: tu sa prejavuje rezistivita modelu vinutia Rogowského cievky a rezistora R, ktorý je zobrazený v schéme na obrázku 5.3 ako  $R_3 = 47 \ \Omega$ . Z priebehu možno usudzovať, že odpor vinutia cievky je v porovnaní s týmto sériovo radeným rezistorom zanedbateľný. S ďalším nárastom frekvencie, približne od f = 20 MHz modul impedancie narastá dôsledkom prejavovania sa indukčnej reaktancie cievky  $X_L$ . Stav rezonancie nastáva v tom okamihu, v ktorom fáza (imaginárna zložka) impedancie prechádza nulou. Z priebehu možno identifikovať frekvenciu, pri ktorej tento stav nastáva ako  $f_{m2} = f_{rez} = 838$  MHz.

Ďalšie merania vychádzajú z použitia S parametrov [76] (prenosové parametre, scattering parameters). Tieto parametre definujú správanie sa viac-portových sietí, väčšinou dvojbranov (sieť s dvoma portami) [76]. Aj v nasledujúcich meraniach boli využité práve dva porty. Prvý port slúži na pripojenie vytvoreného meracieho prípravku a druhý port k pripojeniu výstupu Rogowského cievky. Merací prípravok je tvorený koaxiálnym N-konektorom pre priame pripojenie do vektorového analyzátora, obsahuje impedančné prispôsobenie vhodné pre analyzátor,  $Z = 50 \Omega$  a umožňuje umiestniť Rogowského senzor tak, aby obopínal stredný vodič N-konektoru, do ktorého je následne vysielaný merací signál. Prípravok okrem iného zabezpečuje rovnomerné rozloženie elektromagnetického poľa. Podklady pre výrobu prípravku boli vytvorené v programe Autodesk Fusion 360, v module pre tvorbu modelov z ohýbaných plechov. Podklady pre výrobu prípravku sú uvedené v prílohe B. Ako materiál pre výrobu bola zvolená medená pásovina so šírkou 38 mm a hrúbkou 0.5 mm. Model možno vidieť na obrázku 5.6 a finálnu realizáciu na obrázku 5.7. Rozdiel medzi realizovaným a modelovaným riešením tkvie v úprave konštrukcie na rozoberateľný variant. Toto umožňuje meranie viacerých senzorov bez potreby deštrukcie prípravku.

Pred meraním prenosu senzora bolo potrebné určiť, pre aký frekvenčný rozsah ( $f_{min}$ ,  $f_{max}$ ) vstupného signálu je meranie zaťažené únosnou chybou merania a teda do akých frekvencií má zmysel prenos vyhodnocovať. Toto možno určiť pomocou parametra  $S_{11}$ ,

ten udáva, aká časť signálu vyslaného do portu 1 (merací prípravok) sa odrazí vplyvom neadekvátneho impedančného prispôsobenia [76]. Ako únosná chyba bol stanovený odraz výkonu na úrovni  $|S_{II}| = 15$  %. Tomu pri použitom meracom výkone  $P_{dBm} = 0 \text{ dBm}/P = 1 \text{ mW}$  odpovedá hodnota útlmu S<sub>11</sub> = -8.2 dB. Prípravok vykazoval tento útlm pri frekvencii približne  $f_{15\%} = 420$  MHz. Pre vyššie frekvencie dochádzalo k väčším odrazom a meranie v rámci vyhodnocovania parametrov práce nad túto úroveň frekvencie  $f_{15\%}$  je teda zaťažené veľkou chybou merania. Odrazy sú spôsobené geometriou prípravku: priemer stredného vodiča vzhľadom k priemeru tienenia tvoreného prípravkom, indukčnosť spôsobená dĺžkou pinov pre spojenie dvoch častí prípravku, precíznosťou spájkovania (rozliatie cínu na celej ploche prípravku oproti spojeniu v pár bodoch), atď. Pre dosiahnutie lepších výsledkov by bolo potrebné vytvoriť prípravok s odlišnou geometriou, ideálne takou, kde sa pomer priemeru stredového vodiča a tienenia zachováva s použitými meracími vodičmi. Takáto geometria však v rámci práce nebola vytvorená, nakoľko podľa výsledkov merania zobrazených na obrázku 5.8 je daný merací prípravok dostačujúci pre overenie splnenia kritických parametrov zadania práce.



Obrázok 5.6 Prípravok pre meranie prenosu Rogowského cievky: model.



Obrázok 5.7 Prípravok pre meranie prenosu Rogowského cievky: realizácia.



Obrázok 5.8 Meranie odrazu prípravku (parameter  $S_{II}$ ).

Po určení meracieho rozsahu vhodného pre vyhodnotenie Rogowského senzorov bolo možné prejsť k určeniu prenosu jednotlivých senzorov v závislosti na frekvencii meraného signálu. Tu sa využije parameter  $S_{12}$  ktorý udáva pomer signálu ktorý vystupuje z portu 2 (výstup Rogowského senzora) k signálu budiacemu port 1 (merací prípravok) [76]. Zo znalosti parametra  $S_{12}$  je následne možné určiť prenosovú charakteristiku senzora. Detail meracieho prístroja pri meraní parametrov senzora č.1 s hodnotou  $R_2 = 0.05 \Omega$  (podľa tabuľky 5.2, meranie č.2) je zobrazený na obrázku 5.9 (parameter S<sub>11</sub> je znázornený tyrkysovou stopou a parameter  $S_{12}$  je znázornený zelenou stopou).



Obrázok 5.9 Detail merania prenosu  $(S_{12})$  Rogowského cievky č.1.

Na základe priebehu S<sub>11</sub> je následne možné parameter  $S_{12}$  korigovať. Takto korigované prenosy pre všetky vyhodnocované senzory sú znázornené na obrázku 5.10 b). Na obrázku 5.10 a) sú znázornené namerané priebehy parametrov S<sub>12</sub> jednotlivých senzorov bez korekcie.



Obrázok 5.10 Prenos  $S_{12}$  Rogowského cievok: a) nameraný, b) korigovaný.

V rámci merania parametra  $S_{12}$  je možno vidieť pásmo signálu, kde sa úroveň útlmu javí konštantná. Toto je zabezpečené pomocou predom spomínaného riešenia v podobe samo-integračného zapojenia. Frekvenciu, kedy sa toto pásmo začína, by malo byť možné ovplyvniť pomocou výberu vhodnej veľkosti rezistora ( $R_2$ ), na ktorom proces samo-integrácie prebieha. Tým možno zabezpečiť linearitu senzora v širšom rozsahu. V rámci experimentálneho overenia sa výsledky meraní dosiahnuté pri voľbe rezistorov v podobe  $R_2 = 0.1 \Omega$  a  $R_2 = 0.05 \Omega$  veľmi nelíšili.

Z nameraných dát v podobe parametrov  $S_{12}$  je následne potrebné zostrojiť prevodové charakteristiky. Z týchto charakteristík je následne možné určiť skutočnú veľkosť vyhodnocovaného signálu na určitej frekvencii. Pre určenie týchto charakteristík je potrebné použiť nasledovných vzťahov:

$$i_{mer} = \sqrt{\frac{P_{mer}}{Z}}, \qquad (5.2)$$

kde  $i_{mer}$  je veľkosť elektrického prúdu generovaného vektorovým analyzátorom,  $P_{mer}$  je úroveň meracieho výkonu na ktorú je analyzátor nastavený a Z je impedancia záťaže,

$$u_{rog} = \sqrt{P_{Rog} * Z} , \qquad (5.3)$$

kde  $u_{Rog}$  je veľkosť elektrického napätia indukovaného na Rogowského cievke vplyvom vyhodnocovacieho prúdu  $i_{mer}$ ,  $P_{Rog}$  je úroveň výkonu vystupujúceho z portu 2 a Z je impedancia záťaže,

$$A = \frac{i_{mer}}{u_{rog}},\tag{5.4}$$

kde *A* je výsledný prevodový pomer senzora,  $i_{mer}$  je veľkosť elektrického prúdu generovaného vektorovým analyzátorom a  $u_{Rog}$  je veľkosť elektrického napätia indukovaného na Rogowského cievke vplyvom vyhodnocovacieho prúdu  $i_{mer}$ .

Výsledné prevodové charakteristiky pre korigované prenosy  $S_{12}$  možno vidieť na obrázku 5.11.





V rámci nameraných priebehov vidno, že najlepší tvar charakteristiky vykazuje Rogowského cievka navinutá na toroidnom jadre. Toto môže byť spôsobené práve precíznejšou geometriou jadra a samotného vinutia. Merania s danými senzormi je následne možno vyhodnocovať pomocou spektrálneho analyzátora, kedy sa pre jednotlivé frekvenčné zložky aplikujú dáta z prevodovej charakteristiky. Takto je pomocou senzora možné vyhodnotiť veľkosti prúdov rôznych frekvencií, čo môže byť vhodné napríklad pri vyhodnocovaní zastúpenia prúdov vyšších harmonických v meranom signáli obdĺžnikového priebehu.

Tabuľka	5.2	Elektrické parametre	senzorov v po	odobe R	Rogowského	cievok
---------	-----	----------------------	---------------	---------	------------	--------

Meranie č.	Senzor č. (tab. 5.1)	Spôsob vinutia	<i>R</i> <sub>2</sub> [Ω]	f <sub>rez</sub> [MHz]
1	Senzor 1	spätná slučka	0.1	960
2	Senzor 1	spätná slučka	0.05	930
3	Senzor 2	spätná slučka	0.05	>1000
4	Senzor 3	spätné vinutie	0.1	838
5	Senzor 3	spätné vinutie	0.05	920



Obrázok 5.12 Vyhodnocované senzory v podobe Rogowského cievok.

#### 5.1.3 Použitie Rogowského cievky

Sonda môže byť v rámci procesu generovania plazmy umiestnená na viacerých miestach predloženého systému. Pomerne často aplikovaným riešením je umiestnenie sondy na koaxiálny vodič spájajúci elektronický generátor a záťaž v podobe plazmovej komory. Pri tomto riešení sa naruší izolácia koaxiálneho káblu (tienenie), sonda sa umiestni na stredový vodič a následne sa tienenie znovu obnoví. Tento spôsob je znázornený na obrázku 5.13. V rámci zadania práce a uvažovaného riešenia je toto prevedenie neaplikovateľné, nakoľko spojenie generátora a plazmovej komory bude realizované pevnou koaxiálnou spojkou a nie koaxiálnym káblom. Toto je z dôvodu zachovania čo najkratšej vzdialenosti medzi generátorom a záťažou. Prvý senzor bude teda umiestnený vo vnútri koaxiálnej spojky spájajúcej elektronický generátor a plazmovú komoru. Touto sondou je možné merať výkon dodávaný do plazmovej komory. Druhá sonda by mohla byť umiestnená k referenčnej elektróde plazmovej komory. V prípade použitia oboch senzorov je možné vyhodnocovať stratový výkon v plazme. Ďalšia sonda môže byť umiestnená priamo v plazmovej komore. Umiestnenia senzorov v uvažovanom systéme možno vidieť na obrázku 5.14.



Obrázok 5.13 Spôsob umiestnenia Rogowského cievky na koaxiálny vodič.



Obrázok 5.14 Rozmiestnenie Rogowského cievok v rámci systému.

# 5.2 Sonda intenzity elektrického poľa

V rámci práce bola zostrojená sonda určená pre meranie veľkosti intenzity elektrického poľa E. Táto sonda slúži k diagnostike vlastností plazmy, konkrétne k stanoveniu elektrickej zložky intenzity E v blízkosti referenčnej elektródy plazmovej komory. Princíp činnosti senzora je založený na prevode teploty na veľkosť intenzity elektrického poľa. Intenzita elektrického poľa E sa na rezistívnej vrstve prevedie na prúdovú hustotu J (vychádza z ohmového zákona), ktorá vzápätí vytvorí odpovedajúce teplo. Teplota je následne snímaná kalorimetrickým prvkom. Požiadavka na vytvorenie podobnej sondy vychádza z poznatkov predchádzajúcich prác (a riešení grantu GAČR) realizovaných v rámci pracoviska UTEE FEKT VUT v Brne [38 - 41], kedy bolo v rámci simulácií odhalené problematické rozloženie intenzity elektrického poľa E na referenčnej elektróde plazmovej komory. Zatial' čo pre plazmovú komoru v kapilárnom vyhotovení je situácia pomerne jednoduchá (zobrazené v rámci obrázku 5.15) [38], pre komoru s výstupom v tvare plošnej štrbiny je situácia podstatne zložitejšia. Na obrázku 5.16 je zobrazené rozloženie elektrického poľa E na referenčnej elektróde, kde je možné vidieť pásmo s prudkým poklesom modulu (intenzity) tohto poľa. Práve k identifikácii tohto javu slúži konštruovaná sonda.



Obrázok 5.15 Simulácia rozloženia intenzity elektrického poľa *E*, pre plazmovú komoru v kapilárnom vyhotovení [38].



Obrázok 5.16 Simulácia rozloženia intenzity elektrického poľa *E*, pre plazmovú komoru vo vyhotovení v tvare plošnej štrbiny.

#### 5.2.1 Konštrukcia senzora

Senzor je principiálne konštruovaný ako napäťový delič, realizovaný prvkami určenými pre meranie teploty T. V tomto prípade sú zostrojené dve riešenia, prvé uvažuje použitie NTC termistorov [77] a druhé platinových snímačov PT100 [78] v SMD prevedení. Ako referenčný rezistor pre delič je potom volený rezistor s hodnotou odporu R rovnakou, ako je referenčný odpor zvoleného snímača teploty. Pri zmene teploty  $T_{Ep}$  a teda aj intenzity elektrického poľa E sa zmení elektrický odpor R termistora (alebo platinového snímača) a tento jav je zaznamenaný pomocou merania napätia na výstupe tohto deliča. Senzor je realizovaný na DPS a obsahuje 28 rovnomerne rozložených napäťových deličov, ktoré vytyčujú plochu záujmu merania. Napájacie napätie deliča je potrebné voliť s ohľadom na maximálny merací prúd Imer snímačov teploty T, v tomto prípade je volené ako  $U_{cc} = 5 \text{ V}$  (a 3.3 V). Za účelmi ďalšieho spracovania signálu je na DPS osadený výstupný konektor pre pripojenie PATA káblu. Tento konektor bol osadený feritovými toroidmi pre potlačenie vysokofrekvenčného rušenia. Pre konštrukciu boli použité dva typy termistorov, a to v prevedení  $R = 10 \text{ k}\Omega$  a  $R = 2.2 \text{ k}\Omega$  [77], pre účely porovnania výsledkov je taktiež zostrojený variant s platinovými snímačmi PT100 [78]. V rámci praktickej realizácie sa uvažuje použitie grafitového nástreku ako rezistívnej vrstvy kalorimetra na plochu pod termistormi (alebo snímačmi PT100). Tento nástrek zabezpečí premenu elektrickej intenzity E na prúdové pole a teplo v mieste tohto nástreku. Citlivá časť senzora PT100 je potom priložená práve na tento nástrek. Rovnako tak bola vytvorená verzia s upravenými (zbrúsenými) termistormi, ktoré sú následne priložené kontaktnou (zbrúsenou) hranou na daný nástrek. Pri návrhu DPS je potrebné, aby v miestach nástreku neboli vedené žiadne vodivé cesty. Schéma zapojenia a návrh DPS daného senzora možno vidieť v prílohách C a D.

Finálna podoba DPS je zobrazená na obrázku 5.17 a 5.18. Pre zachovanie grafitového nástreku je potrebné dbať na precíznu prácu pri osádzaní DPS, nakoľko použitie väčšieho množstva taviva pri spájkovaní tento nástrek naruší.



Obrázok 5.17 a) Neosadená DPS sondy intenzity el. poľa: merací modul, b) grafitový nástrek v rámci DPS.



Obrázok 5.18 Osadená DPS sondy intenzity elektrického poľa: merací modul, a) NTC termistory, b) PT100, c) konektor s feritovými toroidmi.

Vyhodnocovanie je v danom prostredí pomerne náročné nakoľko elektromagnetické rušenie (diskutované v kapitole 2) tvorené pôsobením plazmy je pre väčšinu elektrických obvodov neúnosné.

Prepínanie kanálov meracích senzorov na jeden kanál pomocou multiplexoru sa javí ako nevhodné riešenie, nakoľko riadenie multiplexoru pomocou komparátorov by bolo veľmi náchylné na rušenie. Rovnako tak ovládanie pomocou mikrokontroléru by vyžadovalo precízne tienenie. Finálne riešenie teda uvažuje spracovávanie všetkých kanálov naraz. Obvod pre spracovanie je tvorený filtračným RC článkom a prevodníkom napätia na prúd. Pomocou prevedenia signálu na prúdový je zabezpečená čo najnižšia interakcia meraného signálu a rušivého signálu. Toto je možné pomocou integrovaného obvodu XTR116 [79]. Týmto je rovnako tak zabezpečené nízke zaťaženie senzorov pri meraní a odpadá tak potreba využitia operačného zosilňovača v zapojení ako napäťový sledovač. Následne sú merané signály vyvedené na konektory pre vzdialené pripojenie meracieho prístroja. Tu sa uvažuje DPS s rezistormi pre uzavretie prúdových slučiek a polohovateľným mechanickým prepínačom, ktorý by umožňoval vybrať požadovaný merací kanál. Napätie na danom rezistore je potom možné vyhodnocovať napríklad pomocou multimetra alebo osciloskopu, ktoré ale musia byť umiestnené vo vhodnej vzdialenosti od rušivého poľa spôsobeného plazmovými výbojmi. Pre pripojenie meracieho prístroja je výstupný modul osadený svorkovnicou do DPS a BNC konektorom. Dané riešenie bolo vyhotovené v podobe dvoch samostatných modulov DPS. Schematicky je riešenie zobrazené v rámci príloh E (spracovací modul) a G (výstupný modul), obrazy DPS sú potom uvedené v rámci príloh F (spracovací modul) a H (výstupný modul). Podoba modulov pred a po osadení je zachytená v rámci obrázkov

5.19 až 5.22. Finálna podoba skonštruovaného senzora je zobrazená v rámci obrázku 5.23.



Obrázok 5.19 Neosadená DPS sondy intenzity el. poľa: spracovací modul.



Obrázok 5.20 Osadená DPS sondy intenzity el. poľa: spracovací modul.



Obrázok 5.21 Neosadená DPS sondy intenzity el. poľa: výstupný modul.



Obrázok 5.22 Osadená DPS sondy intenzity el. poľa: výstupný modul.



Obrázok 5.23 Skompletizovaná sonda slúžiaca k snímaniu modulu intenzity elektrického poľa *E*.

# 6. FUNKČNÉ TESTY SYSTÉMU

V tomto texte sa ďalej zameriam na popis a vyhodnotenie funkčných testov oživeného generátora, kde miesto atenuátoru  $Z = 50 \ \Omega$  bola použitá záťaž v podobe plazmovej komory v kapilárnom vyhotovení. V tomto prípade je potrebné vziať do úvahy dáta namerané v rámci kapitoly 2.1 (závislosť impedancie Z plazmovej komory na frekvencii f). Tento priebeh poukazuje na kapacitný charakter záťaže pre frekvencie f v rámci oblasti záujmu ( $f_1$  a vyššie harmonické budiaceho signálu). Nakoľko pre takto definovanú záťaž je prakticky nemožné priame prúdové budenie, bol navrhnutý predradný člen, ktorý upravuje charakter tejto záťaže (plazmovej komory).

## 6.1 Predradný člen plazmová komora – generátor

Predradný člen vychádza zo zjednodušeného modelu plazmovej komory a obsahuje vhodné parametrické nastavenie pre dosiahnutie správneho tvaru budenia k zapáleniu plazmového oblúka a meracie prvky overujúce tvary budiacich signálov. Prvá uvažovaná úprava spočívala v zaradení rezistora  $R_3$  pred plazmovú komoru o veľkosti  $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$  s vhodným stratovým výkonom. Za rezistor (výstup predradného člena) bola umiestnená Rogowského cievka určená pre stanovenie tvarov budenia. Pred tento rezistor (vstup predradného člena) bol zaradený bočník  $R_2 = 1 \Omega$ , slúžiaci ako kontrolné meranie.

Pri tejto konfigurácii prípravku nastával problém v podobe veľkých prúdových špičiek di/dt až 8 A/0.1 ns (zachytené na obrázku 6.1), a to pri priložení symetrického napájania nízkej hodnoty  $U_{sym} = \pm 15$ V. Tieto výsledky boli potvrdené aj pomocou následnej obvodovej (numerickej) simulácie.



Obrázok 6.1 Prúdové špičky *di/dt* pri budení plazmovej komory bez uvažovaného induktoru v rámci predradného člena: priebeh na bočníku.

Príčina týchto prúdových špičiek tkvie v rozloženej kapacite v rámci prípravku  $(C_1, C_2, C_3)$ . Pre potlačenie tohto nežiaduceho javu je potrebné zaradiť sériovo členy  $R_1$  a  $L_1$ , ktorých hodnoty boli v tomto prípade určené podľa:

$$L = \frac{u_i}{d_i} * d_t , \qquad (6.1)$$

kde L je hodnota indukčnosti konštruovanej cievky,  $u_i$  je priložené elektrické napätie (15 V),  $d_i$  je maximálna amplitúda prúdovej špičky a  $d_t$  doba trvania prúdovej špičky. Rovnako tak je pre výpočet indukčnosti  $L_1$  možné použiť vzorec:

$$L = \frac{\mu_0 * \mu_r}{4\pi} * \int \vec{B} * d\vec{S} = \frac{\mu_0}{2} * \pi * r_z,$$
(6.2)

kde *L* je hodnota indukčnosti konštruovanej cievky,  $\mu_0$  je permeabilita vákua,  $\mu_r$  je relatívna permeabilita (pre vzduch = 1), *B* je modul magnetickej indukcie , *S* je obsah plochy cievky a r<sub>z</sub> je polomer závitu cievky (s jedným závitom). Pre určenie  $R_1$  potom platí:

$$R = 2 * \sqrt{\frac{L}{c}},\tag{6.3}$$

kde *R* je hodnota odporu neznámeho rezistora, *C* je nežiaduci prejav kapacity v rámci predradného člena (C = 30 pF) a *L* je hodnota sériovo radenej indukčnosti (L = 2 nH).

Podľa týchto vzťahov bola určená požadovaná hodnota  $L_1 = 2$  nH (jeden závit s priemerom  $\phi = 5$ mm) a  $R_1 = 20 \ \Omega$ . V rámci prípravku boli použité súčiastky s nasledujúcimi parametrami  $L_1 = 2$  nH (jeden závit) a  $R_1 = 27 \ \Omega$ . Nakoľko spomínaná rozložená (nežiaduca) kapacita je rozprestretá v rámci celého prípravku je potrebné umiestniť rezistor  $R_1$  čo najbližšie k vstupu predradného člena a indukčnosť  $L_1$ v samonosnom vyhotovení do bezprostrednej blízkosti tohto rezistora. Principiálna schéma: elektronický generátor – predradný člen – plazmová komora je zobrazená na obrázku 6.2. V rámci modelu bola vykonaná numerická simulácia pre identifikáciu budenia plazmovej komory po uvažovaní predradného člena. Výsledky tejto simulácie možno vidieť na obrázku 6.3.



Obrázok 6.2 Simulačný obvod: generátor – predradný člen – komora.


Obrázok 6.3 Výsledky obvodovej simulácie: generátor – predradný člen – komora.

Prispôsobovací člen je zostrojený v kompaktnom vyhotovení a umožňuje priame pripojenie medzi generátor a plazmovú komoru pomocou dvojice N-konektorov. Finálnu podobu predradného člena možno vidieť na obrázku 6.4. Tento člen zabezpečuje vhodné tvary budení pre plazmovú komoru s minimalizáciou prúdových špičiek.



Obrázok 6.4 Predradný člen: realizácia.



Obrázok 6.5 Predradný člen s plazmovou komorou.



Obrázok 6.6 Generátor - predradný člen - plazmová komora.

#### 6.2 Príprava pracoviska pre funkčné testy systému

Funkčné testy zariadenia prebiehali 4.5.2023 v rámci pracoviska vo výskumnom centre CEITEC VUT v Brne. Pre správnu činnosť generátora je potrebné všetky vodiče opatrit' feritovými prstencami (CMC) pre potlačenie napájania šírenia elektromagnetického rušenia pozdĺž vedenia, rovnako ako v práci [30]. V rámci pracoviska je potrebné zabezpečiť umiestnenie systému mimo uzemnené kovové objekty (napríklad kovový rám stola), tieto by mohli kapacitnou väzbou ovplyvniť merané priebehy signálov vytvorením veľkej prúdovej VF slučky. Principiálne znázornenie pracoviska pre test generátora s plazmovou komorou s prihliadnutím na riešenie spôsobu merania je znázornené na obrázku 6.7.



Obrázok 6.7 Principiálne znázornenie pracoviska pre funkčné testy.

Ďalším dôležitým aspektom pri realizácii funkčných testov je zabezpečenie ochrany osôb. Návrh ochrany vychádza z aktuálne platných vyhlášok, noriem a nariadení ČSN, ČSN EN a ČSN EN ISO. Ochrana pred dotykom živých častí (základná ochrana) zariadenia v rámci testov je dosiahnutá spôsobom zobrazeným na obrázku 6.8 a popísaná ďalej v texte. Symetrický napájací zdroj je zabezpečený ochranou krytím: uzavretý v prístrojovej krabici s certifikáciou IP56. Výkonový generátor v tesnej blízkosti spolu s plazmovou komorou sú zabezpečené pomocou ochrany polohou: v rámci uzatvárateľnej pracovnej bunky s rádiusom r = 1.5 m. Pre spínaný zdroj jednosmerného napätia 15V@13A je ochrana zabezpečená krytím, s využitím krytu s certifikáciou IP20. Všetky použité vodiče v rámci pracoviska majú minimálne základnú izoláciu. Ochrana výkonovej časti pri poruche je zabezpečená pomocou samočinného odpojenia od zdroja (istič v rámci symetrického zdroja). Pre následné využitie v priemysle by bolo vhodné uzavrieť spínaný zdroj a zdroj symetrického napätia v rámci jedného krytu, s certifikáciou ideálne IP6X.



Obrázok 6.8 Principiálne znázornenie pracoviska: zaistenie bezpečnosti osôb.

#### 6.3 Priebeh funkčných testov

Reálnu podobu pracoviska pri procesoch testovania zariadenia ako celku (výkonový generátor – predradný člen – plazmová komora – vzorka materiálu) s cieľom zapáliť plazmový oblúk možno vidieť na obrázku 6.9. Vzorku materiálu v tomto prípade tvorí povrch referenčnej elektródy plazmovej komory. Jedná sa o kovovú platničku z nerezovej ocele o rozmeroch približne 80 x 80 milimetrov.



Obrázok 6.9 Reálna podoba pracoviska pre funkčné testy zariadenia.

Počas testov boli sledované a vyhodnocované priebehy elektrického budenia plazmovej komory pomocou predom diskutovaných možností v rámci predradného člena (meranie prúdu na bočníku / Rogowského cievkou). Tieto priebehy možno vidieť v rámci obrázka 6.10. Sledovaný prúd v pomere 1:1 je zobrazený ako žltá stopa (meranie na bočníku) a približne súhlasí s priebehmi vykonaných obvodových (numerických) simulácií (model zobrazený na obrázku 6.2) pri uvažovaní daných vstupných podmienok. Napäťový priebeh je zobrazený v podobe zelenej stopy.



Obrázok 6.10 Priebehy budenia plazmovej komory v rámci funkčných testov.

Nakoľko použitá plazmová komora (kapilárne vyhotovenie) nebola predom testovaná s iným VF generátorom, nebolo možné včas určiť problémy spojené s jej chodom a zapálením plazmového oblúka (spôsobené konštrukciou). Tieto sa prejavili pri prvotnom priebehu funkčných testov a neviedli k dosiahnutiu požadovanej kritickej intenzity elektrického poľa *E*, a teda nedošlo k zapáleniu plazmového oblúka. Pre dosiahnutie vytýčeného cieľa (zápalu oblúka) bola experimentálne zvýšená intenzita elektromagnetického poľa pomocou tenkého, elektricky vodivého prstenca (viditeľného

v rámci obrázku 6.11 a 6.12). Po takejto úprave komora splňovala fyzikálne požiadavky pre zapálenie plazmového oblúka.

Podoba plazmového oblúka formovaného za pomoci argónu v rámci plazmovej komory v kapilárnom vyhotovení je zaznamenaná na obrázku 6.11. Detail tohto oblúka je potom zachytený v rámci obrázku 6.12. Plazmový výboj bol rovnako tak zachytený termokamerou a to v rámci obrázku 6.13.



Obrázok 6.11 Plazmový výboj.



Obrázok 6.12 Detail plazmového výboja.



Obrázok 6.13 Záznam z termokamery, plazmový výboj: a) IR spektrum, b) RGB spektrum (referenčná snímka).

#### 7. NÁVRH DPS PO OPTIMALIZÁCII GENERÁTORA

Po úspešnom ukončení procesov optimalizácie, oživenia a testovania sú známe všetky potrebné zmeny v návrhu pre zabezpečenie správnych tvarov budení a odstránenie známych problémov. V nasledujúcom texte sú zhrnuté požiadavky na proces tvorby nových DPS pre daný výkonový vysokofrekvenčný generátor.

#### 7.1 DPS pre signálový modul

Úprava dosky spočíva v pridaní obvodového riešenia na výstup pol-mostového budiča LMG1210 [42], popísaného v kapitole 3.1 a zobrazeného na obrázku 3.8.

Následne sa jednalo o úpravy konektorov pre dosiahnutie lepšej ergonómie práce:

- Konektor slúžiaci na prepínanie vstupného signálu v podobe interného kryštálového oscilátora a externého signálu má zmenené zapojenie: umožňuje voľbu oboch kombinácií obyčajnou prepojkou pre konektory s rozstupom 2.54 mm,
- 2. výstupné konektory modulu pre napájanie a prenos budiacich signálov do výkonového modulu boli nahradené jedným konektorom: pre jednoduchšie prepojenie DPS oboch modulov. Pre vhodné rozloženie elektromagnetického poľa boli na konektor privedené striedavo aktívny signál a referenčný potenciál (zem): takto bolo dosiahnuté rovnomerného rozloženia kapacít,
- zvýšenie hodnoty odporu trimra prislúchajúcemu k preklápacieho obvodu typu D pre možnosť upravenia striedy v širšom rozsahu, až do pomeru aktívnej a neaktívnej úrovne 50:50,
- 4. experimentálne bola zistená väčšia spotreba obvodov pracujúcich na vysokých frekvenciách. Nakoľko modul umožňuje použitie aj vyšších frekvencií ako  $f_1 = 13.56$  MHz, boli vymenené lineárne stabilizátory slúžiace pre napájanie obvodov za výkonnejšie MIC29510 [55] v kombinácii s keramickými a tantalovými kondenzátormi pre zabezpečenie správneho napájania impulzných priebehov.

Takto upravená schéma zapojenia signálového modulu sa nachádza v prílohe I a obraz DPS je uvedený v rámci prílohy J.

#### 7.2 DPS pre výkonový modul

DPS výkonového modulu musela prejsť viacerými úpravami, ktoré zapríčinili potrebu vytvorenia dosky mierne väčších rozmerov. Hlavné časti úprav boli:

1. Implementovanie prúdového posilnenia pomocou paralelne zapojených invertorov SN74LVC2G14-Q1 [54]. DPS umožňuje zapojiť až 8 integrovaných obvodov, čomu prislúcha 16 použitých hradiel, schopných dodať spolu výstupný prúd až do úrovne I = 512 mA. Toto je vhodné pri použití budiacich signálov

vyšších frekvencií. Vhodné napájanie týchto invertorov je zabezpečené pomocou keramických (rýchle) a tantalových (pomalé, ale schopné dodať veľký výkon) kondenzátorov pre dodanie potrebného výkonu a zabezpečenie správnej činnosti daných obvodov,

- pridanie obvodových riešení s Schottkyho (MSS1P6 [44]) a TVS (ESD9L [80]) diódami, diskutovanými v predchádzajúcom texte (na výstup prúdového posilnenia a tesne pred signálový vstup výkonového hybridu DRF1201 [46]),
- 3. rovnako ako v prípade dosky signálového modulu, osadenie výkonnejších lineárnych stabilizátorov MIC29510 [55]. V tomto prípade sa predpokladá horizontálne umiestnenie na dosku. Chladiaca plocha stabilizátoru tak bude v kontakte s vyliatym polygónom predstavujúcim referenčný potenciál a takto bude dosiahnuté efektívne chladenie pomocou celej plochy vodivých ciest tohto potenciálu,
- 4. možnosť merať výstupný signál z optočlenov pomocou meracích pinov už nie je kvôli stiesneným podmienkam na doske možná. Meranie teda bude realizované pomocou prekovov.
- 5. zosilnenie vodivých ciest v okolí tlmiviek a výstupného N-konektoru, pridanie konektorov pre ľahšie uchytenie tlmiviek na DPS,
- 6. odstránenie kondenzátorov a vodivých ciest, ktoré spôsobovali prerušenie impedančného oddelenia, diskutovaných v kapitole 3.2,
- pridaná možnosť upraviť výstupné napätie izolovaného DC-DC meniča Traco [48] pomocou nastavovacích rezistorov pre zvýšenie aj zníženie výstupného napätia podľa postupu popísaného v aplikačnej poznámke [49],
- 8. pri testoch zariadenia bol nameraný približný prúdový odber na kanál pol-mostovej konštrukcie  $I_k = 1.52$  A pri značnom zahrievaní oddeľovacích DC-DC meničov na teplotu cca  $t_{TRACO20W} = 65$  °C (zachytené v rámci obrázku 4.11). Použité napájacie DC-DC meniče Traco THM-20W [48] sú schopné dodať výstupný prúd  $I_{TRAC20W} = 1.67$  A. Väčší prúdový odber je spôsobený implementovaným prúdovým posilnením pre signálové vstupy výkonových hybridných prvkov DRF1201 [46] v podobe invertorov SN74LVC2G14-Q1 [54]. V rámci optimalizácie DPS budú spomínané DC-DC meniče nahradené výkonnejšími modelmi Traco THM-30, ktoré sú schopné dodať prúd až  $I_{TRAC030} = 2.5$  A [81],
- pridaná ochrana výkonového napájania generátora (za vstupné svorky pre pripojenie symetrického napätia) proti napäťovým špičkám v podobe varistora JVR-14N391K [82], ochrana proti prepólovaniu v podobe diódy APT30D120BG [83] a odrušovacie kondenzátory. Takisto bola pridaná možnosť pripojiť elektrolytické vyhladzovacie kondenzátory pomocou faston konektorov,
- 10. dosku je požadované vyrobiť na DPS s hrúbkou vodivej vrstvy približne  $h = 70 \ \mu m$ .

Takto upravená schéma zapojenia výkonového modulu sa nachádza v prílohách K a L a obraz DPS je uvedený v rámci príloh M a N.

Po vykonaní optimalizácie sa výkonový modul mierne zväčšil kvôli potrebe osadiť väčšie DC-DC meniče Traco THM-30 [81]. Toto ale umožnilo realizovať celý generátor na jedinú dosku, kedy bolo obvodové riešenie signálového modulu implementované v rámci DPS výkonového modulu bez potreby zväčšenia jeho rozmerov. Dosiahlo sa tak 5-násobného zmenšenia riadiaceho obvodu a zároveň menšej cenovej náročnosti, nakoľko je celé zariadenie implementované v rámci jednej DPS. Nakoľko modulárne aj jedno-doskové riešenie má svoje výhody, v rámci príloh predkladám obe riešenia. Obraz DPS pre riešenie popísané vyššie (celé obvodové riešenie výkonového generátora v rámci jednej DPS) je uvedený v rámci príloh O a P.

#### 8. Zhodnotenie riešenia práce

V rámci tejto práce boli predložené niektoré z možných aplikácií plazmy v rôznych odvetviach, spolu s odkazmi na práce, v ktorých je daná problematika diskutovaná, s prípadným popisom použitých metód a vykonaných testov a následným prezentovaním dosiahnutých výsledkov.

Následne bol spracovaný prehľad viacerých konštrukcií generátorov zostrojených v rámci výskumných projektov, s diskutovaním ich účinnosti a prípadných úskaliach danej implementácie. Boli citované práce zaoberajúce sa výkonovými elektronickými generátormi pracujúcimi na frekvencii f = 13.56 MHz, s cieleným použitím v oblasti generovania plazmy. Zámerne boli vynechané komerčne dostupné riešenia v podobe hotových a na trhu dostupných modulov, ktoré by boli iba obtiažne modifikovateľné pre navrhnuté požiadavky. Poznatky získané z prác diskutujúcich dané generátory a ďalšej vhodnej literatúry boli použité pre vytýčenie základných pravidiel návrhu elektronických generátorov s vysokým výstupným výkonom, pracujúcich na frekvenciách o veľkosti rádovo desiatok MHz.

Bola zostrojená prúdová sonda pre diagnostiku v blízkom okolí plazmy v podobe Rogowského cievky. Parametre tejto sondy boli overené pomocou zostrojeného prípravku, ktorý je podľa vykonaného kontrolného merania (obrázok 5.8) vhodný pre merania prenosu Rogowského cievok až do frekvencie na úrovni  $f_m = 420$  MHz. V texte boli bližšie diskutované príčiny frekvenčného obmedzenia prípravku a naznačené možnosti pre zlepšenie. Boli zostrojené viaceré varianty senzorov využívajúce samointegračného princípu [73] s rôznymi parametrami: typ vinutia, počet závitov meracej cievky, veľkosť samo-integračného rezistora, rozmer jadra. Pre všetky tieto senzory bola stanovená frekvencia na ktorej vykazujú rezonanciu (tabuľka 5.2) a následne bola z merania (a následnej korekcie) prenosu stanovená prevodová charakteristika pre frekvencie do f = 420 MHz (obrázok 5.11). Senzory vykazujú požadovaný (vhodný) tvar charakteristiky aj pre frekvencie do  $f_m \approx 600$  MHz, avšak pre vierohodné určenie prevodových charakteristík by tu bolo potrebné použiť kvalitnejšie konštruovaný prípravok vykazujúci malú chybu pri frekvenciách f > 420 MHz. Pre všetky zostrojené senzory boli priebehy korigovaných výstupných charakteristík veľmi podobné. Ideálny priebeh vykazoval senzor realizovaný na teflónové toroidné jadro, čo môže byť spôsobené precíznejšou geometriou vinutia než ako v prípade senzorov realizovaných na ohybné teflónové pásiky. Po pripojení senzora na spektrálny analyzátor v spojení so znalosťou prevodovej charakteristiky je následne možné vyhodnotiť veľkosti prúdov jednotlivých frekvencií v meranom signáli. Takto je možné vyhodnocovať príspevky prúdov vyšších harmonických pre generátor s obdĺžnikovým výstupným priebehom.

Pre možnosť diagnostiky plazmy v okolí referenčnej elektródy bola vytvorená sonda určená pre meranie veľkosti intenzity elektrického poľa *E*. Potreba takejto diagnostiky vyplýva z predchádzajúcich experimentov v rámci pracoviska UTEE FEKT VUT v Brne

a bola bližšie diskutovaná v rámci kapitoly 5.2. Konštrukcia sondy vychádza z predchádzajúcich skúseností v rámci pracoviska UTEE FEKT VUT v Brne, kedy je na základe vyhodnocovania teploty pod referenčnou elektródou plazmovej komory radom teplotných snímačov určená intenzita elektrického poľa *E* v danom mieste. K správnemu vyhodnoteniu bolo potrebné určiť prevodovú charakteristiku senzora, ktorá však v rámci veľkého rozsahu zadania práce nestihla byť stanovená. Boli zostrojené snímacie obvody a obvody pre spracovanie signálu s ohľadom na potlačenie výrazného rušenia v okolí plazmových výbojov. To bolo zabezpečené pomocou feritových krúžkov, RC filtrov a prevodu napäťového meracieho signálu na prúdový. Táto sonda bude využitá pri neskorších testoch s plazmovou komorou vo vyhotovení v tvare plošnej štrbiny, pre verifikáciu diskutovaných numerických simulácií.

Bolo navrhnuté vhodné usporiadanie pracoviska pre proces oživenia elektronických častí generátora, optimalizácia zariadenia: z hľadiska efektivity systému a minimalizácie stojatej vlny na rozhraní generátor – komora. V rámci procesu návrhu a optimalizácie elektronických častí generátora boli preskúmané a overené viaceré možné riešenia, ich úskalia a výhody. Jednalo sa o iteratívny proces (popísaný v rámci kapitoly 3), ktorý bol značne časovo náročný a často krát neviedol k uspokojivému výsledku. Boli uvedené vhodné teoretické priebehy jednotlivých signálov a následne ich zobrazenie v podobe nameraných priebehov po procese optimalizácie. Rovnako tak boli uvedené niektoré chybné tvary budení a spôsob optimalizácie týchto priebehov.

Bol zostavený postup a metodika oživenia daného elektronického výkonového generátora, ktorý bol následne realizovaný a zdokumentovaný vo forme fotografií a nameraných priebehov uvedených v kapitole 4. V rámci tejto kapitoly boli taktiež popísané konštruované a využívané zariadenia pre proces oživenia. Po oživení realizovanom na umelej záťaži [70] bol generátor podrobený funkčnému testu v rámci pracoviska na výskumnom ústave CEITEC VUT v Brne, v spojení s predloženou plazmovou komorou v kapilárnom vyhotovení, ktorá za použitia argónu formuje na výstupe kapacitne viazanú nízkoteplotnú plazmu za atmosférického tlaku. Pre zabezpečenie optimálneho budenia bol zostrojený predradný člen, ktorý upravuje elektrické parametre plazmovej komory.

Po procese optimalizácie, oživenia a funkčných testoch boli zo znalostí nazbieraných pri týchto procesoch vytvorené nové dosky plošných spojov pre oba moduly generátora. Nové verzie DPS riešia všetky doteraz známe technické problémy s generátorom a zlepšujú ergonómiu práce s generátorom. Rovnako tak bolo predložené riešenie, ktoré v rámci jednej dosky obsahuje obvodové riešenie oboch modulov.

Výsledkom experimentálnej časti tejto práce je oživené a otestované zariadenie v podobe funkčnej vzorky.

#### 9. ZÁVER

V predloženej diplomovej práci bola preštudovaná a stručne popísaná problematika návrhu vysokofrekvenčných systémov so zameraním na modely elektronických generátorov určených pre plazmové komory, pracujúcich na frekvencii f = 13.56 MHz.

Bola realizovaná optimalizácia elektronického generátora a plazmovej komory pre dosiahnutie optimálneho nastavenia systému a požadovaných výsledkov v rámci testov so zvolenou vzorkou materiálu, kedy bola za atmosférického tlaku za použitia argónu na výstupe plazmovej komory formovaná kapacitne viazaná plazma.

Navrhnuté obvodové riešenie pre optimalizáciu elektronického výkonového generátora pracujúceho na frekvencii f = 13.56 MHz bolo realizované na DPS pôvodného riešenia generátora a tvary dôležitých signálov boli zaznamenané formou fotodokumentácie a nameraných priebehov.

Pre proces oživenia bola navrhnutá modifikovaná podoba pracoviska, ktorá okrem iného rieši minimalizáciu odrazu EMG vlny na budiacom elektrickom vedení medzi elektronickým generátorom a plazmovou komorou.

Pre sledovanie parametrov budiacich signálov bola zostrojená a nastavená meracia sonda pracujúca na vhodnom princípe.

V rámci práce boli úspešne riešené všetky body zadania. Práca taktiež uvádza konštrukciu oddeľovacieho výkonového symetrického zdroja a sondy pre vyhodnocovanie modulu intenzity elektrického poľa *E* vo vybranej oblasti pôsobenia plazmy. Tieto zariadenia boli vyhotovené nad rámec zadania práce, pre zabezpečenie vhodného chodu plazmového systému.

#### LITERATÚRA

- [1] POLÁŠKOVÁ, Kateřina, Miloš KLÍMA, Zdeňka JENÍKOVÁ, Lucie BLAHOVÁ a Lenka ZAJÍČKOVÁ. Effect of Low Molecular Weight Oxidized Materials and Nitrogen Groups on Adhesive Joints of Polypropylene Treated by a Cold Atmospheric Plasma Jet. *Polymers* [online]. MDPI, 2021, 13(24), 4396-1-4396-18
   [cit. 2022-09-24]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13244396
- [2] DREXLER, Petr, Zoltán SZABÓ, David HLADKÝ a Miloslav STEINBAUER. Výzkumná zpráva IV/16: Návrh elektroniky pro napájení plazmové trysky, RF generátor pro plazmové trysky. Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [3] POTÚČEK, Patrik. Návrh a realizace VN výkonového generátoru f=13.56 MHz. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021.
- [4] WEBSTER, John G. a Halit EREN. Measurement, instrumentation, and sensors handbook: electromagnetic, optical, radiation, chemical, and biomedical measurement. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2014, 1 svazek (různé stránkování) : ilustrace : ; 26 cm. ISBN 978-1-4398-4891-3.
- [5] PENA-EGUILUZ, Rosendo, Jorge H. SERMENT-GUERRERO, Erika P. AZORIN-VEGA, et al. Development and Characterization of a Non-Thermal Plasma Source for Therapeutic Treatments. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* [online]. 2021, 68(5), 1467-1476 [cit. 2022-09-26]. ISSN 0018-9294. Dostupné z: doi:10.1109/TBME.2020.3041195
- [6] MANCERA, Norma Guadalupe Ibanez, Regulo LOPEZ-CALLEJAS, Rosendo PENA-EGUILUZ, Benjamin Gonzalo RODRIGUEZ-MENDEZ, Antonio MERCADO-CABRERA, Victor Hugo Toral RIZO, Edith Lara CARRILLO a Raul VALENCIA-ALVARADO. Wound healing after biopsy in the mobile oral mucosa using a non-thermal atmospheric pressure plasma. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences* [online]. 1-1 [cit. 2022-09-26]. ISSN 2469-7311. Dostupné z: doi:10.1109/TRPMS.2022.3161188
- PENA-EGUILUZ, Rosendo, Regulo LOPEZ-CALLEJAS, Berenice GONZALEZ-MENDOZA, Antonio MERCADO-CABRERA, Benjamin G. RODRIGUEZ-MENDEZ a Raul VALENCIA-ALVARADO. Acute Neck Radiodermatitis Treated by Nonthermal Plasma Therapy: Case Report. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences* [online]. 2022, 6(4), 503-506 [cit. 2022-09-26]. ISSN 2469-7311. Dostupné z: doi:10.1109/TRPMS.2021.3070784
- [8] WANG, Xiaohua, Sui WANG, Dingxin LIU, Dong LI, Ce LI a Michael G. KONG. Optimization Design of Atmospheric Pressure Plasma Generator for Sterilization of Endoscope. *IEEE Transactions on Plasma Science* [online]. 2014, 42(10), 2754-2755 [cit. 2022-10-08]. ISSN 0093-3813. Dostupné z: doi:10.1109/TPS.2014.2311904

- [9] WHITTAKER, A.G, E.M GRAHAM, R.L BAXTER, et al. Plasma cleaning of dental instruments. *Journal of Hospital Infection* [online]. 2004, 56(1), 37-41 [cit. 2022-10-08]. ISSN 01956701. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhin.2003.09.019
- [10] BELOV, Sergey V., Yury K. DANILEIKO, Alexey B. EGOROV, et al. Sterilizer of Knives in the Meat Industry, Working by Activating Aqueous Solutions with Glow Discharge Plasma. *Processes* [online]. 2022, 10(8) [cit. 2022-10-08]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr10081536
- KARENGIN, Alexander, Aleksey KARENGIN, Andrey POBEREZHNIKOV a Aleksey VLASOV. Plasma disposal of oil wastes. In: 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST) [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 1-4 [cit. 2022-10-07]. ISBN 978-1-4673-1773-3. Dostupné z: doi:10.1109/IFOST.2012.6357784
- [12] NISHANTH, Katam a B. S. RAJANIKANTH. Plasma Catalysis of Diesel Exhaust for NO X Abatement: A Feasibility Study With Red Mud Industrial Waste. *IEEE Transactions on Plasma Science* [online]. 2021, 49(8), 2340-2349
   [cit. 2022-10-07]. ISSN 0093-3813. Dostupné z: doi:10.1109/TPS.2021.3092338
- FOSTER, John, Bradley S. SOMMERS, Sarah Nowak GUCKER, Isaiah M.
  BLANKSON a Grigory ADAMOVSKY. Perspectives on the Interaction of Plasmas With Liquid Water for Water Purification. *IEEE Transactions on Plasma Science* [online]. 2012, 40(5), 1311-1323 [cit. 2022-10-08]. ISSN 0093-3813.
   Dostupné z: doi:10.1109/TPS.2011.2180028
- [14] PERVEZ, Nayab, Abdur RASHID a Adil Habib ALAM. Analysis of HV Plasma Corona Reactor Treatment System for Industrial Waste Water. In: 2016 *International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 269-273 [cit. 2022-10-08]. ISBN 978-1-5090-5300-1. Dostupné z: doi:10.1109/FIT.2016.056
- [15] BUBNOVÁ, Kateřina. Využití nízkotlakého plazmatu pro čistění olověných archeologických nálezů. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, 2021.
- [16] JIN, Ying, Chun-Sheng REN, Liang YANG a Dezhen WANG. Comparative Study of the Surface Cleaning for Ar-/He-Based Plasma Jets at Atmospheric Pressure. *IEEE Transactions on Plasma Science* [online]. 2015, 43(9), 3193-3199
   [cit. 2022-10-08]. ISSN 0093-3813. Dostupné z: doi:10.1109/TPS.2015.2459080
- [17] GREBNIKOV, Andrei a Nathan O. SOKAL. *Switchmode RF Power Amplifiers* [online]. Elsevier, 2007 [cit. 2022-09-28]. ISBN 9780750679626. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-7506-7962-6.X5028-X
- [18] KUMAR, Sunil, Bhavesh KADIA, Raj SINGH, Atul VARIA, Y S S SRINIVAS, S V KULKARNI a Icrh-Rf GROUP. Design aspects of 13.56MHz, 1kW, CW-RF oscillator for plasma production. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2010, 208 [cit. 2022-10-08]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/208/1/012012
- [19] GUPTA, Anita, Yogesh ARONDEKAR, S. V. G. RAVINDRANATH, H. KRISHNASWAMY a B. N. JAGATAP. A 13.56 MHz high power and high

efficiency RF source. In: 2013 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 1-4 [cit. 2022-10-08]. ISBN 978-1-4673-6176-7. Dostupné z: doi:10.1109/MWSYM.2013.6697329

- [20] ZHANG, Zihui, Xuan Anh NGHIEM, Renato NEGRA a Georg BOECK. 1 kW
  13.56 MHz Class-D –1 Power Stage with 90 % Drain Efficiency. In: 2019 12th German Microwave Conference (GeMiC) [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 252-255
   [cit. 2022-10-08]. ISBN 978-3-9812668-9-4. Dostupné z: doi:10.23919/GEMIC.2019.8698146
- [21] HERRING, Richard. How to achieve higher system robustness in DC drives, part
  2: interlock and deadtime. In: *Texas Instrument* [online]. 2018 [cit. 2022-11-05].
  Dostupné z: https://e2e.ti.com/blogs\_/b/powerhouse/posts/how-to-achieve-higher-system-robustness-in-dc-drives-part-2-interlock-and-deadtime
- [22] XU, Jiale, Zikang TONG a Juan RIVAS-DAVILA. 1 kW MHz Wideband Class E Power Amplifier. *IEEE Open Journal of Power Electronics* [online]. 2022, 3, 84-92 [cit. 2022-09-28]. ISSN 2644-1314. Dostupné z: doi:10.1109/OJPEL.2022.3146835
- [23] XU, Jiale, Lei GU, Zhechi YE, Saleh KARGARRAZI a Juan RIVAS-DAVILA. Cascode GaN/SiC Power Device for MHz Switching. In: 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [online]. IEEE, 2019, 2019, s. 2780-2785 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-5386-8330-9. Dostupné z: doi:10.1109/APEC.2019.8721931
- [24] KIM, Minki a Jungwon CHOI. High-Frequency Self-Driven Push-Pull Class E Rectifier using Capacitive Voltage Divider. In: 2021 IEEE 22nd Workshop on Control and Modelling of Power Electronics (COMPEL) [online]. IEEE, 2021, 2021-11-2, s. 1-6 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-6654-3635-9. Dostupné z: doi:10.1109/COMPEL52922.2021.9646061
- [25] SRIMUANG, Pattrawut, Nutdechatorn PUANGNGERNMAK a Suramate CHALERMWISUTKUL. 13.56 MHz class E power amplifier with 94.6% efficiency and 31 watts output power for RF heating applications. In: 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 1-5 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-4799-2993-1. Dostupné z: doi:10.1109/ECTICon.2014.6839809
- [26] OKAMOTO, Masayuki, Toshihiko TANAKA, Koyo MATUZAKI, Tamotsu HASHIZUME a Hiroaki YAMADA. 13.56-MHz Class-E RF power amplifier using normally-on GaN HEMT. In: *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 982-987 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-4799-4032-5. Dostupné z: doi:10.1109/IECON.2014.7048621
- [27] CHEN, W., R. A. CHINGA, S. YOSHIDA, J. LIN, C. CHEN a W. LO. A 25.6 W 13.56 MHz wireless power transfer system with a 94% efficiency GaN Class-E power amplifier. In: 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium

*Digest* [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 1-3 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-4673-1088-8. Dostupné z: doi:10.1109/MWSYM.2012.6258349

- [28] UCHIYAMA, H, R YAMAMOTO, Y ISHIKAWA a T SUETSUGU.
  Consideration of impact of GaN HEMT for class E amplifier. In: *TENCON 2010 2010 IEEE Region 10 Conference* [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 1780-1783 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-4244-6889-8. Dostupné z: doi:10.1109/TENCON.2010.5686052
- [29] SAITO, Wataru, Ichiro OMURA, Tomokazu DOMON a Kunio TSUDA. High Voltage and High Switching Frequency Power-Supplies using a GaN-HEMT. In: 2006 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium [online]. IEEE, 2006, 2006, s. 253-256 [cit. 2022-10-09]. ISBN 1-4244-0126-7. Dostupné z: doi:10.1109/CSICS.2006.319947
- [30] LITTELFUSE. PRF-1150 1KW 13.56 MHz CLASS E RF GENERATOR EVALUATION MODULE. Technical note [online]. [cit. 2022-09-28]. Dostupné z: https://www.ixys.com/Documents/AppNotes/CO1.pdf
- [31] LIDOW, Alex, Michael DE ROOIJ, Johan STRYDOM, David REUSCH a John GLASER. GaN Transistors for Efficient Power Conversion. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated, 2019. ISBN 9781119594147.
- [32] HAMILL, D.C. Class DE inverters and rectifiers for DC-DC conversion.
  In: PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference [online]. IEEE, 1996, s. 854-860 [cit. 2022-11-18]. ISBN 0-7803-3500-7. Dostupné z: doi:10.1109/PESC.1996.548681
- [33] TONG, Zikang, Zhechi YE a Juan RIVAS-DAVILA. Class DE Switch-Mode Power Amplifier Using GaN Power HEMTs: High-Efficiency Power Amplifier for 13.56 MHz. *IEEE Microwave Magazine* [online]. 2022, 23(3), 72-79 [cit. 2022-09-28]. ISSN 1527-3342. Dostupné z: doi:10.1109/MMM.2021.3132111
- [34] JUNGWON CHOI, Daisuke TSUKIYAMA, Yoshinori TSURUDA a Juan RIVAS. 13.56 MHz 1.3 kW resonant converter with GaN FET for wireless power transfer. In: 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC) [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 1-4 [cit. 2022-10-11]. ISBN 978-1-4673-7447-7. Dostupné z: doi:10.1109/WPT.2015.7140167
- [35] RAYMOND, Luke, Wei LIANG, Lei GU a Juan Rivas DAVILA. 13.56 MHz high voltage multi-level resonant DC-DC converter. In: 2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) [online]. IEEE, 2015, 2015, s. 1-8 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-4673-6847-6. Dostupné z: doi:10.1109/COMPEL.2015.7236446
- [36] ZHOU, Yu a Jungwon CHOI. Design of High-frequency, Paralleled Resonant Inverter to Control Output Power for Plasma Generation. In: 2022 IEEE 23rd Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) [online]. IEEE, 2022, 2022-6-20, s. 1-7 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-6654-1081-6. Dostupné z: doi:10.1109/COMPEL53829.2022.9830012

- [37] LIANG, Wei, John GLASER a Juan RIVAS. 13.56 MHz high density dc-dc converter with PCB inductors. In: 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 633-640 [cit. 2022-10-09]. ISBN 978-1-4673-4355-8. Dostupné z: doi:10.1109/APEC.2013.6520277
- [38] DREXLER, Petr, Zoltán SZABÓ, Roman PERNICA, Jiri ZUKAL, Radim KADLEC, Miloš KLÍMA a Pavel FIALA. Modeling and Experimental Verification of Plasma Jet Electromagnetic Signals. *Modelling* [online]. 2022, 3(1), 70-91 [cit. 2023-04-27]. ISSN 2673-3951. Dostupné z: doi:10.3390/modelling3010005
- [39] PERNICA, R., P. FIALA, M. KLIMA, P. LONDAK a R. KADLEC. A Plasma and Surface Properties of Materials. In: 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) [online]. IEEE, 2021, 2021-11-21, s. 577-582 [cit. 2023-04-27]. ISBN 978-1-7281-7247-7. Dostupné z: doi:10.1109/PIERS53385.2021.9695006
- [40] POLÁŠKOVÁ, K, D NEČAS, L DOSTÁL, M KLÍMA, P FIALA a L ZAJÍČKOVÁ. Self-organization phenomena in cold atmospheric pressure plasma slit jet. *Plasma Sources Science and Technology* [online]. 2023, 31(12) [cit. 2023-04-27]. ISSN 0963-0252. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6595/acab82
- [41] DREXLER, P., P. FIALA, M. KLIMA, Z. SZABO, L. DOSTAL, R. KADLEC a R. PERNICA. Electromagnetic Modeling of a Plasma Chamber: Theory and Experiments. In: 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) [online]. IEEE, 2021, 2021-11-21, s. 609-613 [cit. 2023-04-27]. ISBN 978-1-7281-7247-7. Dostupné z: doi:10.1109/PIERS53385.2021.9694874
- [42] TEXAS INSTRUMENTS. LMG1210 200-V, 1.5-A, 3-A half-bridge MOSFET and GaN FET driver with adjustable dead time for applications up to 50 MHz. Datasheet [online]. 2019, [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg1210.pdf?ts=1667589294952&ref\_url=http s%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [43] TOSHIBA. TLP2367. Datasheet [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/TLP2367\_datasheet\_en\_20171025-1075458.pdf
- [44] VISHAY. MSS1P5, MSS1P6. Datasheet [online]. 2018, [cit. 2022-12-20].
  Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/f42e04170b00122876b2f9f5672663b0/mss1p6.pdf
- [45] DIODES INCORPORATED. B320A B360A. Datasheet [online]. 2021, [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds30891.pdf
- [46] MICROSEMI, DRF1201. Datasheet [online]. neuvedený, [cit. 2022-12-04].
  Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/DRF1201 H.pdf
- [47] TEXAS INSTRUMENTS. UCC23511-Q1 1.5-A Source, 2-A Sink, 5.7-kVRMS Opto-Compatible Single-Channel Isolated Gate Driver. Datasheet [online]. 2021,

[cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc23511q1.pdf?ts=1667562149286&ref\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252 Fsitesearch%252Fenus%252Fdocs%252Funiversalsearch.tsp%253FlangPref%253Den-US%2526searchTerm%253DUCC23511-Q1%2526nr%253D17

- [48] TRACO POWER. DC/DC medical converter: THM 20WI series, 20 watt. Datasheet [online]. [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/thm20wi\_data sheet.pdf
- [49] TRACO POWER. THM15(WI), THM20(WI) & THM30(WI) Series: Output voltage adjustment. Datasheet [online]. 2019, [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://www.tracopower.com/int/media/1282/download?attachment
- [50] TEXAS INSTRUMENTS. LM2941x 1-A Low Dropout Adjustable Regulator. Datasheet [online]. 2015, [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2941.pdf?ts=1667543434961&ref\_url=https %253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [51] TEXAS INSTRUMENTS. ISO7710 High Speed, Robust EMC Reinforced Single-Channel Digital Isolator. Datasheet [online]. 2020, [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7710.pdf?ts=1667563998366&ref\_url=https %253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [52] DIODES INCORPORATED. MMBT2222A. Datasheet [online]. 2021, [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds30041.pdf
- [53] DIODES INCORPORATED. ZXGD3004E6. Datasheet [online]. 2021, [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ZXGD3004E6.pdf
- [54] TEXAS INSTRUMENTS. Dual Shmitt-Trigger Inverter: SN74LVC2G14-Q1. Datasheet [online]. 2008, [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc2g14q1.pdf?ts=1669226286542&ref\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com %252F
- [55] MICROCHIP. 5A Fast-Response LDO Regulators: MIC2951012. Datasheet [online]. 2020, [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: https://eu.mouser.com/datasheet/2/268/MIC29510\_12\_5A\_Fast\_Response\_LDO\_ Regulators\_DS2000-1923598.pdf
- [56] ADVANCED ENERGY. Impedance matching [online]. In: 2020, s. 14 [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: https://www.advancedenergy.com/globalassets/resourcesroot/white-papers/en-ppg-impedance-matching-white-paper.pdf
- [57] FIALA, Pavel. Výzkumná zpráva IV/16: I dílčí. Vysoké učení technické v Brně, 2016
- [58] JURA, Pavel. Signály a systémy: část 1: spojité signály. Brno, 2017, 81 s., skriptá
- [59] GERDING, M. a B. SCHIEK. Realization of Broadband Matched Filter Structures for the Use in Electrical Pulse Generators. In: 2006 European

*Microwave Conference* [online]. IEEE, 2006, 2006, s. 1260-1263 [cit. 2023-03-07]. ISBN 2-9600551-6-0. Dostupné z: doi:10.1109/EUMC.2006.

- [60] WANG, Bingting a Ziping CAO. A review of impedance matching techniques in power line communications. *Electronics (Basel)* [online]. BASEL: Mdpi, 2019, 8(9), 1022 [cit. 2023-03-07]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: doi:10.3390/electronics8091022
- [61] IV, Haiping. Overcome Mismatched Load Impedance in Arbitrary Function Generators. *Microwaves & RF* [online]. Nashville: Endeavor Business Media, 2019 [cit. 2023-03-07]. ISSN 0745-2993.
- [62] HANÁK, Pavel, Kamil VRBA a Pavel HANÁK. Konstrukce elektronických zařízení. Brno: VUTIUM, 2021. ISBN 978-80-214-5957-1. Dostupné z: doi:10.13164/book.construction.electronic.devices
- [63] MCP. Power Supply. Datasheet [online]. neuvedený, [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: https://insdac.jp/wp-content/uploads/2021/03/%E9%9B%BB%E6%BA%90%EF%BC%88%E3%83% 86%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%B3%E3%82%B0%E5%9 0%91%E3%81%91%EF%BC%89%E8%8B%B1%E8%AA%9E%E7%89%88.pd f
- [64] BREVE TUFVASSONS. Toroidal transformers. Datasheet [online]. [cit. 2022-09-27]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/e6926af030c8ad46ec31ae152e8abbcb/TTS-EN.pdf
- [65] KEMET. Screw terminal aluminium electrolytix capacitors. Datasheet [online].
  2016, [cit. 2022-09-27]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/a18f5f03633c9a972eb41798bba13b1e/KEM\_A40
   31 ALS30 31.pdf
- [66] TDK. NTC thermistors for inrush current limiting: EPCOS application note 2013. Application note [online]. 2013, [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://www.tdkelectronics.tdk.com/download/2982800/f5be4fca9d1f66204de9cf37891e5265/ntcthermistors-icl-an.pdf
- [67] TDK. NTC thermistor for inrush current limiting: leaded and coated disks. Datasheet [online]. 2015, [cit. 2022-09-27]. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.118-030.1.pdf
- [68] TOSHIBA. Power factor correction (PFC) circuits. Application note [online].
  2019, [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: https://toshiba.semiconstorage.com/info/application note en 20191106 AKX00080.pdf?did=68570
- [69] TDK-LAMBDA. PF Series. Datasheet [online]. [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/power/switching-power/acdc-converter/catalog/pf-a\_e.pdf
- [70] MINI-CIRCUITS. N-Type fixed attenuator. Datasheet [online]. [cit. 2022-09-28]. Dostupné z: https://www.minicircuits.com/pdfs/BW-40N100W+.pdf

- [71] HUTCHINSON, I.H. *Principles of Plasma Diagnostics*. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, 440 s. ISBN 0-521-80389-6.
- [72] KOJOVIC, L. PCB Rogowski coils benefit relay protection. *IEEE Computer Applications in Power* [online]. 2002, 15(3), 50-53 [cit. 2022-10-23]. ISSN 0895-0156. Dostupné z: doi:10.1109/MCAP.2002.1018823
- [73] HAN, Ruo-Yu, Jia-Wei WU, Wei-Dong DING, Yan JING, Hai-Bin ZHOU, Qiao-Jue LIU a Ai-Ci QIU. Hybrid PCB Rogowski Coil for Measurement of Nanosecond-Risetime Pulsed Current. *IEEE Transactions on Plasma Science* [online]. 2015, 43(10), 3555-3561 [cit. 2022-10-23]. ISSN 0093-3813. Dostupné z: doi:10.1109/TPS.2015.2415517
- [74] SHAFIQ, Muhammad, G. Amjad HUSSAIN, Lauri KÜTT a Matti LEHTONEN. Effect of geometrical parameters on high frequency performance of Rogowski coil for partial discharge measurements. *Measurement* [online]. 2014, 49, 126-137
   [cit. 2022-10-23]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2013.11.048
- [75] BRANČÍK, Lubomír. *Elektrotechnika 1*. Brno: VUTIUM, 2004, 135 s. ISBN 80-214-2607-1.
- [76] CASPERS, F. *RF engineering basic concepts: S-parameters*. [online]. 2012, [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: doi:10.48550/arxiv.1201.2346
- [77] TDK. Chip NTC thermistor: NTCG series. Datasheet [online]. 2019, [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/catalog/tpd automotive ntc-thermistor ntcg en.pdf
- [78] VISHAY. Temperature Dependant platinum thin film chip resistor (RTD). Datasheet [online]. 2019, [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/427/ptsserie-1762313.pdf
- [79] TEXAS INSTRUMENTS. XTR116. Datasheet [online]. 2003, [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/xtr115.pdf?ts=1679744698960&ref\_url=https% 253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [80] ONSEMI. ESD9L, SESD9L series: Transiet voltage suppressors. Datasheet [online]. 2012, [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ON%20Semiconductor%20PDFs/ ESD9L\_SESD9L\_Series\_Rev5\_Oct2012.pdf
- [81] TRACO POWER. DC/DC medical converter: THM 30 series, 30 watt. Datasheet [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/thm30\_datash eet.pdf
- [82] RFE INTERNATIONAL. Metal oxide varistor 14mm disc. Datasheet [online]. 2003, [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://datasheetspdf.com/pdffile/829831/RFE/JVR-14N391K/1

[83] MICROSEMI. APT30D120BG: Ultrafast soft recovery rectifier diode. Datasheet [online]. 2018, [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/Microsemi\_APT30D120BG\_Datasheet\_D-2634957.pdf

#### ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

#### Skratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
UTEE	Ústav teoretickej a experimentálnej elektrotechniky
CEITEC	Stredoeurópsky technologický inštitút (central european
	institute of technology)
VA	Volt-ampérová (charakteristika)
DPS	Doska plošných spojov
EMG	Elektromagnetické/ý/á
PWM	Impulzová šírková modulácia (pulse width modulation)
GaN	Tranzistor z nitridu gália
MOSFET	Poľom riadený tranzistor s hradlom s vrstvou oxidu
SMD	Súčiastka pre povrchovú montáž (surface mount device)
PATA	Rozhranie pre pripojenie úložných zariadení (Parallel
	advanced technology attachment)
S parametre	Prenosové parametre (scattering parameters)
PFC	Kompenzácia účinníku (power factor correction)
CMC	Tlmivka pre filtráciu rušenia (common mode choke)
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
IR	Infračervené (žiarenie)
RGB	Aditívny model miešania farieb: červená, zelená, modrá

#### Symboly:

U	elektrické napätie	(V)
Ι	elektrický prúd	(A)
Р	výkon	(W)
R	elektrický odpor	$(\Omega)$
С	kapacita	(F)
L	indukčnosť	(H)
η	účinnosť	(%)
Ζ	impedancia	$(\Omega)$
f	frekvencia	(Hz)
n	počet závitov cievky	(-)
μ	permeabilita	$(H^*m^{-1})$
$\Phi$	magnetický tok	(Wb)
A	plocha prierezu cievky	(m <sup>2</sup> )
$X_L$	indukčná reaktancia	$(\Omega)$

$X_c$	kapacitná reaktancia	$(\Omega)$
$S_{11}$	útlm	(dB)
$S_{12}$	prenos	(dB)
l	dĺžka	(m)
v	rýchlosť	$(m*s^{-1})$
t	čas	(s)
J	prúdová hustota	$(A^*m^{-2})$
Т	teplota	(°C)
$\phi$	priemer	(m)
r	polomer	(m)
В	magnetická indukcia	(T)

## ZOZNAM PRÍLOH

PŘÍLOHA A - ZOZNAM POUŽITÝCH PRÍSTROJOV	95
PŘÍLOHA B - PRÍPRAVOK PRE MERANIE PRENOSU ROGOWSKÉHO CIEVKY	96
PŘÍLOHA C - SCHÉMA ZAPOJENIA, MERACÍ MODUL - SONDA INTENZITY ELEKTRICKÉHO POĽA	97
PŘÍLOHA D - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, MERACÍ MODUL - SONDA INTENZITY ELEKTRICKÉHO POĽA	98
PŘÍLOHA E - SCHÉMA ZAPOJENIA, SPRACOVACÍ MODUL - SONDA INTENZITY ELEKTRICKÉHO POĽA	99
PŘÍLOHA F - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, SPRACOVACÍ MODUL - SONDA INTENZITY ELEKTRICKÉHO POĽA	100
PŘÍLOHA G - SCHÉMA ZAPOJENIA, VÝSTUPNÝ MODUL – SONDA INTENZITY ELEKTRICKÉHO POĽA	101
PŘÍLOHA H - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, VÝSTUPNÝ MODUL – SONDA INTENZITY ELEKTRICKÉHO POĽA	102
PŘÍLOHA I - SCHÉMA ZAPOJENIA, OPTIMALIZOVANÝ SIGNÁLOVÝ MODUL PŘÍLOHA J - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, OPTIMALIZOVANÝ SIGNÁLOVÝ MODUL	103
PŘÍLOHA K - SCHÉMA ZAPOJENIA, OPTIMALIZOVANÝ VÝKONOVÝ MODUL ČASŤ PŘÍLOHA L - SCHÉMA ZAPOJENIA, OPTIMALIZOVANÝ VÝKONOVÝ MODUL ČASŤ PŘÍLOHA M - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, OPTIMALIZOVANÝ VÝKONOV MODUL 1	1105 2106 Ý 107
PŘÍLOHA N - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, OPTIMALIZOVANÝ VÝKONOVÝ MODUL	ž 108
PŘÍLOHA O - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, GENERÁTOR - JEDNODOSKOV RIEŠENIE 1	É 109
PŘÍLOHA P - SPOJE A OSADENIE SÚČIASTOK DPS, GENERÁTOR - JEDNODOSKOVÉ RIEŠENIE 2	2 110
PŘÍLOHA Q - SÚPIS SÚČIASTOK- SONDA INTENZITY EL. POĽA, GENERÁTOR	111

## Příloha A - Zoznam použitých prístrojov

Prístroj	Výrobca	Model	Použité	Sériové číslo	Poznámka
			v kapitole		
Osciloskop	Agilent Technologies	MSO7104B	3, 4	MY49520151	
Osciloskop	Agilent Technologies	DSO-X 3014A	6	MY51290284	
Diferenciálna osciloskopická sonda	Rohde&Schwarz	RT-ZD08	3, 4, 6	168046	
Funkčný generátor	Agilent	33521A	3	MY5000292533521A	
Lineárny stabilizovaný zdroj	Statron	2228.1	3, 4	1406005	
Multimeter	Keysight	34465A	3, 6	MY5751017934465A	
Vektorový analyzátor	Rohde&Schwarz	ZVL	2,5	1303.6509K06- 102195-YY	
Prípravok pre meranie prenosu Rogowského cievky			5		Vytvorený v rámci práce
Symetrický zdroj			4, 6		Vytvorený v rámci práce
Umelá záťaž	Mini-Circuits	BW- 40N100W+	4	VaN091801436	
Spínaný zdroj	Wei Hao	S-200-15	4 ,6	neuvedené	15 V@13.3 A
Termokamera	FLIR	E4	3, 4,6	63970530	Kalib. 2015
Oddeľovací transformátor	Diametral	OT230.012	3, 4	neuvedené	UTEE- 00034*
LCR meter	Rohde&Schwarz	HM8118	2	100051228666	
Regulovaný autotransformátor	МСР	M10-522- 10	4, 6	5907478915988	Pre symetrický zdroj

## Příloha B - Prípravok pre meranie prenosu Rogowského Cievky



## Příloha C - Schéma zapojenia, merací modul sonda intenzity elektrického poľa







## Příloha D - Spoje a osadenie súčiastok DPS, merací modul - sonda intenzity elektrického poľa



## Příloha E - Schéma zapojenia, spracovací modul sonda intenzity elektrického poľa



## Příloha F - Spoje a osadenie súčiastok DPS, spracovací modul - sonda intenzity elektrického poľa



# Příloha G - Schéma zapojenia, výstupný modul – sonda intenzity elektrického poľa



#### Příloha H - Spoje a osadenie súčiastok DPS, výstupný modul – sonda intenzity elektrického poľa





## Příloha I - Schéma zapojenia, optimalizovaný signálový modul

## Příloha J - Spoje a osadenie súčiastok DPS, optimalizovaný signálový modul





## Příloha K - Schéma zapojenia, optimalizovaný



Příloha L - Schéma zapojenia, optimalizovaný výkonový modul časť 2

## Příloha M - Spoje a osadenie súčiastok DPS, optimalizovaný výkonový modul 1




## Příloha N - Spoje a osadenie súčiastok DPS, optimalizovaný výkonový modul



Příloha O - Spoje a osadenie súčiastok DPS, Generátor - jednodoskové riešenie 1



## Příloha P - Spoje a osadenie súčiastok DPS, Generátor - jednodoskové riešenie 2





## Příloha Q - Súpis súčiastok- sonda intenzity el. poľa, generátor

Počet [ks]	Zariadenie	Hodnota	Púzdro	Označenie (DPS)	Modul
1	PATA konektor		2X20/90	JP1	
				R2, R4, R8, R9, R10, R12, R16, R17, R18, R20, R24, R25, R26, R28, R32, R33,	
28	termistor / PT	(10kR / 2.2kR / PT100)	R0603	R34, R37, R38, R40, R42, R44, R46, R48, R50, R52, R54, R56	merací modul
		(,,,,		P1 P3 P7 P11 P10 P77 P5 P13 P21 P20 P6 P14 P22 P30 P35 P15 P23	
20			DT 00000	N1, N3, N7, N11, N13, N27, N3, N13, N21, N25, N0, N14, N22, N30, N33, N13, N23,	
28	rezistor	podľa ref. termistoru /	PT R0603	R31, R36, R39, R41, R43, R45, R47, R49, R51, R53, R55	
				C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18,	
28	kondenzátor (keramický)	220nF/50V	C0603	C19, C20, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28	
3	PATA konektor		2X20	JP1, JP2, JP3	
				R1, R3, R5, R7, R9, R11, R13, R15, R17, R19, R21, R23, R25, R27, R29, R31, R33,	
20		25LD 1/4M	00000		
28	rezistor	25KR 1/4W	RUOUS	R55, R57, R59, R41, R45, R45, R47, R49, R51, R55, R55	
1	svorkovnica do DPS		W237-102	X1	
1	kondenzátor (keramický)	0.1uF/100V	C0805	C30	
				R2, R4, R6, R8, R10, R12, R14, R16, R18, R20, R22, R24, R26, R28, R30, R32,	
28	prepoika	OR 1/4W	R0603	R34 R36 R38 R40 R42 R44 R46 R48 R50 R52 R54 R56	spracúvací modul
1	kondonzátor (koramický)	1.1E/1001/	C0905	(30) (130) (130) (140) (140) (140) (130) (130) (130)	
1	Kondenzator (Kerannicky)	107/1000	0805	225	
1	rezistor	270R 1/4W	R0805	R85	
1	rezistor	820R 1/4W	R0805	R86	
1	rugul. lineárny stabilizátor	LM338	TO220H	IC29	
				01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 010, 011, 012, 013, 014, 015, 016	
28	NPN tranzistor	RCP56-16	BCR56-10TX 0		
20		BCF JU-10	BCF30-101X_0		
				1C1, 1C2, 1C3, 1C4, 1C5, 1C6, 1C7, 1C8, 1C9, 1C10, 1C11, 1C12, 1C13, 1C14, 1C15,	
28	XTR116UA	XTR116UA	SOIC127P600X175-8	8N IC16, IC17, IC18, IC19, IC20, IC21, IC22, IC23, IC24, IC25, IC26, IC27, IC28	
6	PATA konektor		2X20	JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP6	
1	svorkovnica do DPS		W237-102	X1	
				P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P0 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16 P17 P18	výstupný modul
20		40.00	00000	D10 D20 D21 D22 D22 D24 D25 D26 D27 D20	vystapny modal
20	10215101	45.5K	KUOUS	n17, n20, R21, R22, R23, R24, R25, K20, K20, K27, K28	
1	BNC konektor	K141426	R141426	X4	
Súpis súčiastok - sonda intenzity elektrického poľa					
Počet [ks] Zarjađenje Hodnota Púzdro Označenje (DPS) Modul					
1	konoktor 2 Edmar (0)	comos		CV/1	mouui
1	KUTEKLUT 2.54MM (9X)	sdiffec	IVIAU9-1VV	3V1	
6	konektor 2.54mm (2x)	samec	1X02	JP1, JP3, JP6, JP9, JP11, JP12	
1	konektor 2.54mm (3x)	samec	1X03	JP10	
1	svorkovnica do DPS		W237-102	X2	
2	kondenzátor (kearamickú)	0.1uF/100V	C0805	C34, C38	
3	kondenzátor (kezramický)	0.1uE/50V	C0805	C39, C41, C66	
2	kondenzátor (kepromický)	0.201/J00V	C0805	C32 C37	
2	Kondenzator (Kearannicky)	0.22uF/100V	0803	C32, C37	
2	kondenzátor (kearamický)	0.3uF/630V	C1812	C36, C43	
4	prepojka	OR	R0805	R9, R11, R14, R16	
2	kondenzátor (kearamický)	10uF/100V	C1210	C3, C4	
1	rezistor	1K21R 1/4W	R0805	R8	
3	rezistor	1KR 1/4W	R0805	R20 R21 R22	
2	trimor	1140	PTPI//2200//	P10 P15	
2	unner	TINIK	KTKIN3235W	N10, N13	
1	usmernovacia dioda	1N4148W	SOD323	D2	
1	trimer	1kR	RTRIM3296Y	R23	signálový modul
2	kondenzátor (kearamický)	1uF/100V	C0805	C1, C2	Signalovy modul
2	rezistor	20kR 1/4W	R0805	R12, R17	
1	kondenzátor (kearamický)	27nE/100V	C0805	C67	
2	register	240P 1/4W	POPOE	DE D12	
2	rezistor	540R 1/4W	RUBUS	K5, K15	
2	kondenzátor (kearamický)	50pF/100V	C0805	C8, C33	
1	rezistor	51.1R 1/4W	R0805	R29	
1	rezistor	511R 1/4W	R0805	R24	
1	preklapací obvod typu D	74ACT74D	SO14	1C8	
1	transil 15V	8 0SMD126A	DIOM70502262N	D1	
-		COSTNUSZOR	55572021	51 1594	
1	LED dioda	GREEN	LEDSIMINI	LEDI	
1	budič pol-mostu	LMG1210RVRR	LMG1210RVRR	IC6	
2	lineárny stabilizátor	MIC29500-5.0WT	TO254P483X987X2222-3P	IC1, IC2	
6	Schottkyho dióda	MSS1P6	MICROSMP	D3, D4, D5, D6, D7, D8	
1	kryštálový oscilátor 13 56 MH	T OSC-OF-CEPS-72	7 2X5 2-4-PAD	051	
1	BNC konektor	R141426	P1/11/26	YA	
	bive konektor	1141420	5500	04 014	
1	Konektor 2.54mm (9x)	samica	FE09	SVI	
10	konektor 2.54mm (2x)	samec	1X02	JP1, JP2, JP3, JP5, JP6, JP8, JP9, JP10, JP11, JP13	
2	faston konektor	samec	ST4,8	X3, X6	
8	kondenzátor (kearamický)	0.01uF/2kV	C2225K	C3, C4, C5, C6, C68, C69, C70, C71	
4	kondenzátor (kearamický)	0.1uF/100V	C0805	C7, C11, C35, C40	
		1		C14. C15. C16. C17. C18. C19. C20. C21. C22. C23. C24. C25. C26. C27. C28. C29. C30.	
1	1			C31 C48 C49 C50 C51 C52 C54 C55 C56 C57 C59 C50 C60 C61 C52 C53	
20	handraster 0	0.1	C2225K	CC4 CC5	
50	kondenzator (kearamický)	U.1UF/2KV	C2225K	04,000	
2	копdenzator (kearamický)	0.22uF/100V	LU805	L2, L4Z	
2	kondenzátor (kearamický)	0.47uF/1kV	С2220К	C41, C43	
8	rezistor	0.5R 1W	R2512	R1, R2, R3, R4, R25, R26, R27, R28	
4	rezistor	100R 1/4W	R0805	R6, R7, R18, R19	
2	kondenzátor (kearamický)	10uE/100V	C1210	C38, C39	
4	kondenzátor (koaramický)	10uE/50V	C0805	C9 C10 C46 C47	
	konuenzator (KedramicKy)	10ur/ 50V	C0000	C1 C70	
4	kondenzator (kearamický)	100F/50V	C1210	UI, U/2	
2	varistor	14N391K	S10K11	K15, K16	
1	N-konektor	172363	172363	16	
2	svorkovnica do DPS	1756993	1756993	X1, X5	a
4	kondenzátor (kearamickú)	1uF/100V	C0805	C8, C33, C34, C37	vykonový modul
4	kondenzátor (koaramický)	1uE/25V	C0805	C12 C13 C44 C45	
-	konuenzator (KedramicKy)	1	C0000		
2	kundenzator (kearamický)	10F/030V	VC10R2		
2	kondenzátor (tantalový)	20uF/35V	C3216	C32, C36	
2	usmerňovacia dióda	APT30D120BG	TO3P	DU1, DU2	
2	schottkyho dióda	B320A-13-F	DIOM5226X230N	D1, D2	
2	výkonový hybrid	DRF1201	DRF1201	01.02	
2	lineárny stabilizótor	MIC 20500 E 014/7	TO22001		
-	meanly stabilizator	WILC29500-5.0W1			
2	scnottkyho dióda	M551P6	MICROSMP	U4, U5	
2	TVS dióda	SESD9L5.0ST5G	SODFL1006X40N	D3, D6	
16	invertory	SN74LVC2G14DBVT	SOT95P280X145-6N	IC3, IC5, IC6, IC8, IC9, IC10, IC11, IC12, IC13, IC14, IC15, IC16, IC17, IC18, IC19, IC20	
2	tlmivka	21 otáčok. 16 AWG	T130-2 feritové iadro	12, 13	
2	tlmivka TRACO	TCK-051	TCK051	11.14	
-		TUM 20 241214	TUM201212	DC1 DC2	
4	DC-DC menic	1HM_20-2412WI	1 FIIVI201212	r51, r52	
2	optočlen	fLP2367_E	SUIC127P700X220-6N	IC2, IC4	
4	rezistor	voliteľný	R0805	R5, R10, R11, R14	
4	rezistor	voliteľný	R0805	R8, R9, R12, R13	
2	faston konektor	1 Ó	ST4,8	X2, X4	
			Cúrsia aúžiantali	Million and an antiker 6 - 42 CC Mills	