

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 561*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Tomáš Havlíček*

Částečné výboje  
v elektronických zařízeních  
pracujících na vyšších kmitočtech

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

**Ing. TOMÁŠ HAVLÍČEK**

**ČÁSTEČNÉ VÝBOJE V ELEKTRONICKÝCH ZAŘÍZENÍCH  
PRACUJÍCÍCH NA VYŠŠÍCH KMITOČTECH**

**PARTIAL DISCHARGE IN HIGH FREQUENCY ELECTRONIC  
EQUIPMENT**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: MIKROELEKTRONIKA A TECHNOLOGIE  
Školitel: doc. Ing. JAROSLAV BOUŠEK, CSc., FEKT VUT  
Oponenti: doc. RNDr. Jiří Dřímál, CSc., Lifetech, s.r.o.  
doc. Ing. Jan Maschke, CSc., UO Brno  
Datum obhajoby: 19.11.2009

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

Částečné výboje (ČV), Určení místa vzniku ČV, senzory ČV, Amplitudová analýza pulzů ČV, Zpracování výsledků měření ČV na PC, planární transformátor, impulzní transformátor, optočlen, kalibrace, izolační systémy, návrh a konstrukce.

**KEYWORDS:**

Partial discharge (PD), sensor PD investigation, Amplitude analysis, PC processing, planar transformer, optocoupler, pulse transformer, calibration, insulation systems, design and construction.

**MÍSTO ULOŽENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE:**

Vědecké oddělení FEKT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v Brně.

## Obsah

1	ÚVOD .....	5
2	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	6
3	PROBLEMATIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	7
3.1	Vliv částečných výbojů na izolaci .....	7
3.2	Částečné výboje .....	8
4	DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	8
5	OBVOD PRO TESTOVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PROSTŘEDNICTVÍM AMPLITUDOVÉ ANALÝZY .....	9
5.1	Kalibrační procedura .....	10
6	MIKROSENZORY PRO DETEKCI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	11
6.1	Akustický senzor .....	11
6.2	Elektromagnetický senzor .....	12
7	ZAŘÍZENÍ PRO DETEKCI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	12
7.1	Zkušební aparatura .....	12
7.2	Zařízení pro měření částečných výbojů .....	13
8	TESTOVÁNÍ IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ .....	13
8.1	Měření na optočlenech, cívkách a transformátorech .....	14
8.2	Vinutí pro impulsní transformátory .....	16
8.3	Měření charakteristik vysokonapěťových transformátorů .....	17
8.4	Impulzní transformátory pro budiče .....	18
8.5	Planární izolační systémy .....	21
8.5.1	<i>Planární transformátory na deskách plošných spojů .....</i>	<i>21</i>
8.5.2	<i>Vícevrstvá struktura planárního transformátoru .....</i>	<i>22</i>
8.5.3	<i>Vícevrstvá struktura planárního transformátoru s rozdělením elektrického pole .....</i>	<i>23</i>
9	ZÁVĚR .....	25
10	LITERATURA .....	28
	CURRICULUM VITAE .....	29



# 1 ÚVOD

Částečné výboje jsou parazitní jevy vznikající v izolačních systémech. Jejich výskyt je náhodný. V elektronických zařízeních s velkou hustotou součástek a s malými vzdálenostmi izolačních mezer mohou částečné výboje nastat již od napětí přibližně 500 V. Miniaturizace elektronických komponent klade zvýšené nároky na kvalitu izolačních materiálů. Příkladem VN komponent mohou být například tranzistory VDMOS MOSFET (1,5 kV), tranzistory IGBT (až 6,5 kV) i speciální bipolární tranzistory (1,2 kV). Zvyšování pracovního napětí vede i ke zvýšeným požadavkům na konstrukční a izolační materiály, jejichž izolační schopnosti mohou za určitých okolností omezovat funkci celého zařízení. Pokud jsou izolační vzdálenosti kritické, může dojít k výbojům i mezi izolovanými elektrodami. Po rozvinutí výboje dojde k nabití dielektrika, napětí ve výbojovém kanálu se sníží a výboj se uhasí. K dalšímu pokračování výboje musí být zvýšeno napětí mezi elektrodami, nebo změněna jeho polarita. Tento mechanismus se označuje jako částečný výboj.

Je zřejmé, že k zatěžování izolace částečnými výboji může dojít především u zařízení pracujícím se střídavým napětím. Částečné výboje probíhají vždy v plynu - například v místech s nedokonalou impregnací, mohou ale nastat i na povrchu plošných spojů. U systémů s povrchovým výbojem lze za optimálních podmínek jednotlivé částečné výboje detekovat již při amplitudě napětí větší než přibližně 500 V. To znamená, že vlivem překmitů a poruch mohou částečné výboje nastat u řady zařízení i při provozním napětí. Příkladem takových obvodů jsou budiče pro tranzistory IGBT s pracovním napětím větším než 1 kV, miniaturní spínané zdroje pro velká napětí, nebo planární induktory s pracovním napětím nad 500 V. Pracovní kmitočet bývá obvykle od několika kHz do desítek kHz, což významně zvyšuje vliv částečných výbojů na funkci zařízení, protože částečné výboje se znovu zapalují v každé periodě pracovního napětí a to v obou polaritách.

V současné době je detekce částečných výbojů dobře zvládnutá především v silnoproudé elektrotechnice, kde měření částečných výbojů patří k velmi často používaným metodám. Měření výbojové činnosti lze provádět různými metodami, a to jak metodami neelektrickými (akustickými, optickými, chemickými, termoelektrickými, aj.), tak i metodami elektrickými (měřením ztrátového činitele  $tg \delta$ , metodami postupné vlny, měřením rušivých elektrických polí, metodami se snímací impedancí, kapacitními či induktivními sondami aj.). Každá z uvedených metod má svoje výhody i nevýhody. Do popředí se v současné době dostávají metody, které umožňují měřit bez odstávky nebo odpojení elektrického zařízení, to znamená přímo v provozu (on-line).

V silnoproudých VN zařízeních pracujících na síťovém kmitočtu jsou odlišné podmínky pro vznik i detekci částečných výbojů než je tomu u elektronických zařízení a jejich částí pracujících s vyššími kmitočty, jako jsou optočleny, desky plošných spojů, transformátory (planární, impulzní) a integrované VN obvody, které pracují s vyššími kmitočty. Pro taková elektronická zařízení není možné použít diagnostické metody a senzory aplikované v silnoproudé technice. Pro měření částečných výbojů na vyšších kmitočtech je tedy zapotřebí použít optimalizované metody a senzory podávající relevantní výsledky.

Měření částečných výbojů je standardní metoda u velkých generátorů, kde je pro náboj přenesený v jednotlivém mikrovýboji maximální přípustná hodnota přibližně 10 nC. U elektronických zařízení je přenesený náboj řádově menší, protože tato zařízení pracují na mnohem větším kmitočtu, může i při malém přeneseném náboji nastat za velmi krátkou dobu degradace izolace vzhledem k možnosti častějšího vzniku výbojů za jednotku času.

Pro budiče IGBT se obvykle udává napětí pro vyhasnutí částečných výbojů při kterém je náboj přenesený v jednotlivém mikrovýboji menší než 5 - 10 pC. Požaduje se, aby toto napětí bylo podstatně větší, než je pracovní napětí budiče.

## 2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Rozšíření poznatků z oblasti měření a vyhodnocování částečných výbojů při kmitočtech vyšších než 1 kHz může výrazně přispět ke zvýšení kvality nově navrhovaných elektronických zařízení a systémů pracujících s napětím větším než 500 V.

Pro zajištění splnění jednotlivých požadavků, byla práce rozdělena do následujících částí:

- 1) Sestavení pracoviště pro měření částečných výbojů v oblasti pracovních kmitočtů nad 1kHz. Musí být použity takové součástky, aby ve vlastních obvodech pracoviště nemohlo k částečným výbojům dojít ani při nejvyšším testovacím napětí. Pro potřeby ověřování vlastností a parametrů zkoumaných vzorků v závislosti na teplotě bylo třeba navrhnout teplotní komorou s ohřevem regulovatelným do 130°C. Komora musela být uzpůsobena pro přivádění zkušebního VN napětí na svorky uvnitř komory.
- 2) Výběr vhodné měřicí metody. Ze všech zvažovaných metod byla vybrána metoda amplitudové analýzy, protože se jeví jako nejprůkaznější metoda s největší vypovídající hodnotou. Je tedy zapotřebí vybavit pracoviště zařízením pro měření částečných výbojů pracujícím na principu amplitudové analýzy impulzů odpovídajících jednotlivým částečným výbojům, včetně potřebného programového vybavení.
- 3) Vypracování metodiky měření a kalibrace částečných výbojů na daném měřicím zařízení a při definovaných podmínkách měření. Při návrhu měřicího zařízení je zapotřebí ji v maximální možné míře respektovat.
- 4) Testování vybraných elektronických součástek a systémů, např. optočlenů, vysokonapěťových (VN) tranzistorů, izolačních systémů na plošných spojích a různých typů vinutí cívek a transformátorů. Ověření vlivu provozního zatížení (teploty, kmitočtu, pracovního napětí, atd.) na stárnutí izolace a změn jejich parametrů.
- 5) Ověření vlivu uspořádání izolace na velikost a chování částečných výbojů a možnosti jejich lokalizace. Důležitým cílem práce je upřesnění informace o podmínkách vzniku částečných výbojů, včetně fyzikální podstaty výbojové činnosti.
- 6) Návrh a použití vhodného miniaturního senzoru použitelného pro detekci částečných výbojů ve velmi malých elektronických systémech, včetně vývoje elektronických obvodů umožňujících vyhodnocení měření pomocí amplitudové analýzy signálu sondy.
- 7) Zpracování příkladu vývoje izolace impulzních transformátorů pro řídicí obvody VN spínačů odolné proti vzniku částečných výbojů. Pro zajištění správné funkce impulsního transformátoru musí být splněna podmínka velmi dobré magnetické vazby primárního a sekundárního vinutí. Umístění obou vinutí v těsné blízkosti je však v tomto případě v protikladu s požadavkem na bezpečné oddělení potenciálového rozdílu několika kV. Pokud se v transformátoru vyskytnou částečné výboje, dojde vzhledem k pracovnímu kmitočtu v oblasti desítek kHz k velmi rychlé degradaci izolace. Izolační pevnost mezi oběma vinutími, měřená běžným způsobem, může být přitom několikanásobně větší než napětí oddělované transformátorem. Testování částečných výbojů je v tomto případě jedinou možností pro zhodnocení vlastností navrženého izolačního systému.

V souladu s cíli práce přispívá výzkum provedený v rámci práce k získání nových poznatků a rozšíření znalostí především v těchto oblastech:

- vývoj zařízení pro diagnostiku částečných výbojů metodou amplitudové analýzy včetně vypracování metodiky kalibrace a metodiky měření.

- konstrukce miniaturních sond a optimalizovaných izolačních systémů.
- vývoj optimalizovaných izolačních systémů odolných proti částečným výbojům.

Práce přispěla k rozšíření znalostí a vybudování potřebného vybavení na úrovni pracoviště na ústavu mikroelektroniky.

### 3 PROBLEMATIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Částečný výboj (ČV) je jiskrový výboj s velmi malou energií, který se tvoří v plynu uvnitř dielektrické izolace nebo na povrchu zařízení za středního nebo vysokého tlaku mezi elektrodami s dostatečně velkým rozdílem potenciálu. Obvyklá doba trvání částečných výbojů je mnohem kratší než 1  $\mu$ s. Částečný výboj se objevuje v oslabeném místě izolace a vede k postupnému rozvoji defektů a následné destrukci izolace.

Podle normy ČSN EN 60270 je částečný výboj definován jako: „lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče“ [6].

ČSN EN 60270 - Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů je mezinárodní normou vztahující se k měření částečných výbojů, které se vyskytují v elektrických přístrojích, komponentech nebo systémech zkoušených střídavým napětím až do kmitočtu 400 Hz nebo stejnosměrným napětím [6]. Norma nahrazuje předchozí normu ČSN EN 34 5641 z 1983-12-27.

Z uvedené normy byla při řešení práce převzata terminologie, definice, základní zkušební obvody a postupy.

Protože byly prováděny zkoušky při vyšším kmitočtu, než pro který je norma určena, došlo k drobným úpravám postupů atp. V takovém případě jsou totiž vyžadovány zvláštní zkušební postupy a charakteristiky měřicích systémů, ale o těch uvedená norma nepojednává.

Postup měření částečných výbojů pro kmitočty nad 400 Hz, který norma nespécifikuje je náplní předložené práce.

#### 3.1 VLIV ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA IZOLACI

Částečné výboje mají z dlouhodobého hlediska destruktivní účinky na izolační systémy, čímž zkracují jejich životnost. Vnější částečné výboje se vyskytují na hranách a zakřiveních elektrod v plynném izolantu.

Částečné výboje v izolantu mohou mít účinky:

**ELEKTROEROZIVNÍ** účinky vznikají v důsledku působení elektrického oblouku v dutince, který je-li zapálen, vytvoří si vodivou dráhu. To vede k rozšiřování vodivého kanálu v izolantu. Ionty a elektrony bombardující stěny dutinky způsobují erozi stěn dutinky, což vede k jejímu dalšímu rozšiřování. Uvedený proces vede k rozšiřování vodivé cesty/kanálu [6]. Tímto způsobem může dojít až k úplnému proražení izolantu.

**TEPELNÉ** účinky. Přímým důsledkem částečných výbojů může být tepelná nestabilita. Opakovaným působením částečných výbojů se izolant otepluje a tím klesá hodnota napětí tepelného průrazu [6].

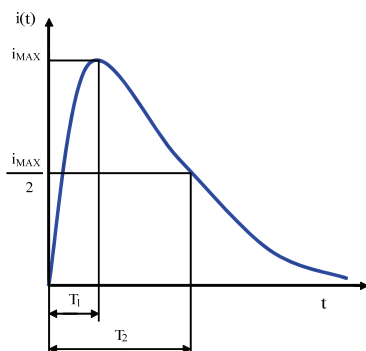
**CHEMICKÉ** účinky vznikají při déle trvajícím elektrickém namáhání. Dochází k chemické reakci odehrávající se v produktech odloučených ze vzduchu za působení vzdušné vlhkosti. Následně vzniklé produkty z předchozích reakcí difundují do blízkého pevného izolantu a vytvářejí tak vodivé oblasti, které mohou vést až k průrazu.

Důsledkem působení částečných výbojů je snížení spolehlivosti a životnosti takto ohrožovaného objektu. Další negativní jev je vznik rušení způsobený impulzy částečných výbojů s velice strmým čelem a vysokým opakovacím kmitočtem. Vyzařování těchto pulzů může následně rušit např. rozhlasové a televizní vysílání



### 3.2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Částečné výboje jsou lokalizované elektrické výboje (ČV nebo anglicky Partial Discharge, (PD)), které vznikají v plynu mezi elektrodami s dostatečně velkým rozdílem potenciálu, pokud je alespoň jedna z elektrod oddělena dielektrickým materiálem. Přitom se částečný výboj může nebo nemusí objevit v přímém okolí vodiče.



Obr. 3.1: Tvar proudového impulsu částečného výboje

Tvar proudového impulsu částečného výboje je znázorněn na obr. 3.1, kde  $i_{max}$  je maximální hodnota amplitudy proudového pulzu,  $T_1$  je doba čela neboli doba do maxima (u pevných izolantů obvykle jednotky ns) a  $T_2$  je doba do půltýlu (obvykle desítky ns) tj. doba poklesu na polovinu amplitudy. Náboj takového pulzu je pak plocha pod křivkou  $i(t)$ .

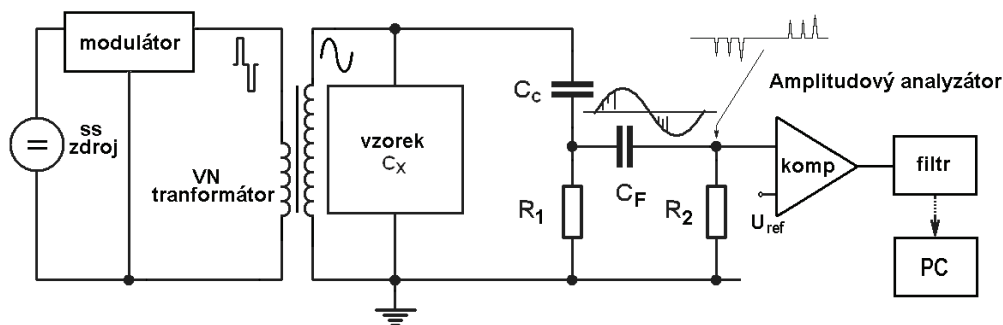
## 4 DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Částečný výboj je jiskřivý výboj s velmi malou energií, který se tvoří uvnitř dielektrické izolace nebo na povrchu v zařízení za středního nebo vysokého tlaku. Částečný výboj se objevuje v oslabeném místě izolace a vede k postupnému rozvoji defektů a následné destrukci izolace.

Za určitých podmínek je možné na povrchu zařízení pracujících s napětím amplitudy větším než 700 V detekovat částečné výboje. To znamená, že díky vlivu nedbalosti a vad ve výrobním procesu je možné detekovat částečné výboje nejen v zařízeních pracujících s vysokým napětím, ale také u zařízení pracujících v normální provozní síti s napětím nad 500 V, které mohou být ohroženy částečnými výboji při zákmitech při spínání či rozepínání. Jako příklad mohou být zmíněny budiče tranzistorů IGBT s pracovním napětím větším než 500 V, malé spínané zdroje na vysoké napětí nebo vysokonapěťové planární transformátory.

Pracovní kmitočet obvykle bývá od několika kHz do desítek kHz, což významně zvyšuje vliv částečných výbojů na funkci zařízení. Částečné výboje se při vyšších kmitočtech projevují více, než je tomu v případě zařízení pracujících na síťovém kmitočtu.

Překročí-li hodnota napětí na vzduchové mezeře (dutince) elektrickou pevnost plynu v dutince, dojde k zapálení výboje. Opakuje-li se zapalování výboje často, dojde k opalování stěn dutinky, a tím k jejímu zvětšování, což vede až k úplnému elektrickému průrazu.

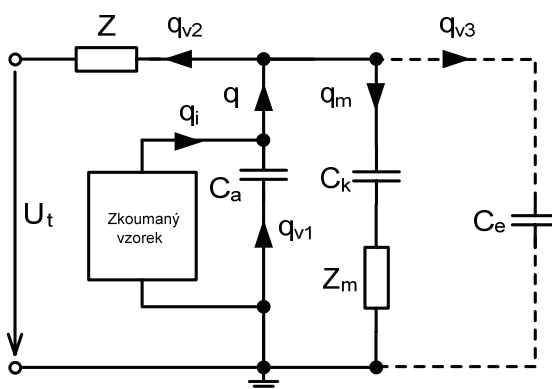


Obr. 4.1: Schematické znázornění zapojení pro měření částečných výbojů

Principiální zapojení systému pro detekci částečných výbojů využívající amplitudové analýzy částečných výbojů je schematicky znázorněn na obr. 4.1. Jak je zde patrné, zkoumaný objekt  $C_X$  je připojen na zdroj sinusového regulovatelného napětí - VN. Výboje vzniklé na zkoumaném objektu se snímají děličem  $C_C$  a  $R_I$ , za kterým následuje horní propust. Tím se odfiltruje nosná složka elektrického signálu. Takto získaný signál je veden na vstup velmi rychlého komparátoru, kde je porovnáván s úrovní referenčního napětí, pomocí kterého je možné regulovat úroveň detekce. Získaná data jsou následně odeslána do PC.

## 5 OBVOD PRO TESTOVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PROSTŘEDNICTVÍM AMPLITUDOVÉ ANALÝZY

Základní uspořádání obvodu pro testování částečných výbojů je na obr. 5.1. Zde označený vnitřní náboj  $q_i$  dosahuje tak malých hodnot, že je z praktického hlediska neměřitelný. Za účelem potlačení interferencí je vložen filtr  $Z$  mezi zdroj napětí pro testování  $U_t$  a testovaný objekt - zkoumaný vzorek. Běžně je testovaný vzorek charakterizován odpovídající kapacitou  $C_a$ . Ke zdroji částečných výbojů, tzn. ke zkoumanému objektu je paralelně připojena větev sloužící pro měření. Pak proud ČV teče vazebním kondenzátorem  $C_k$  a měřicí impedancí  $Z_m$ . Testovací napětí zdroje VN označené  $U_t$  je připojeno k obvodu paralelně.



**Obr. 5.1: Základní zapojení obvodu pro testování částečných výbojů**

Je velmi důležité, aby vazební kondenzátor  $C_k$  vykazoval malou impedanci na frekvencích odpovídajícím impulsům částečných výbojů a dále, že  $Z_m$  musí představovat přibližně zkrat pro frekvence testovacího napětí.

Pro porovnání amplitud impulsů částečných výbojů byla vytvořena metodika, kde se kontroluje jak velikost zápalného napětí, tak i napětí vyhasnutí. Za bezpečnou provozní úroveň je pak považován stav, kdy je úroveň pracovního napětí pod hodnotou napětí vyhasnutí částečných výbojů. Pro dosažení relevantních výsledků měření je tedy nutné dodržet následující body:

- 1) Měření musí být prováděno na měřicí aparatuře nevykazující vznik vlastních částečných výbojů v celém rozsahu testovacího napětí,
- 2) Měření musí být prováděno na zkalibrovaném měřicím zařízení a měřicím obvodu,
- 3) Měřicí zařízení včetně přívodních kabelů musí vykazovat malou hodnotu kapacity, aby nedocházelo k nežádoucímu zkreslení,
- 4) Musí být provedena opatření zamezující pronikání vnějšího rušení během měření.

Z praktického hlediska se tedy kontroluje velikost amplitudy impulsů částečných výbojů. Z dosažených hodnot napětí vyhasnutí mohou být následně určeny hodnoty bezpečného provozního napětí zkoumaného objektu.

## 5.1 KALIBRAČNÍ PROCEDURA

Kalibrační proces použitého systému spočívá v korelaci amplitudy adekvátního napěťového pulzu vůči úměrnému náboji zdánlivého částečného výboje. Hodnota zdánlivého náboje je dána měřením reálného děje způsobeného přenosem náboje uvnitř vady (defektu) na elektrody systému.

Kalibrace je velmi důležitá činnost při měření částečných výbojů, která se obvykle provádí před začátkem každého měření. Vlivem kapacit v měřicím obvodu, ale také vlivem parazitních kapacit dochází mezi zkoumaným objektem a měřicím zařízením ke zkreslení pulsů částečných výbojů. To se projevuje změnou tvaru pulsů částečných výbojů. Dále dochází vlivem impedančního nepřizpůsobení k zmenšení přeneseného náboje. Měřicí obvod je tedy nutné kalibrovat a vlastní měření pak korigovat podle kalibračních hodnot [6].

Ke kalibraci se používají kalibrátory neboli generátory kalibračních pulsů. Elektronické kalibrátory generují pulsy podobné pulsům částečných výbojů. K tomu obvykle využívají sériového zapojení známé kapacity  $C_0$  a generátoru obdélníkového průběhu definovaných parametrů, kde je amplituda napětí označována jako  $U_0$ . Tím vzniknou jehlové impulsy, které jsou svými parametry podobné částečných výbojům. Náboj kalibračního pulsu  $q_0$  je dán vztahem:

$$q_0 = C_0 \cdot U_0. \quad (5.1)$$

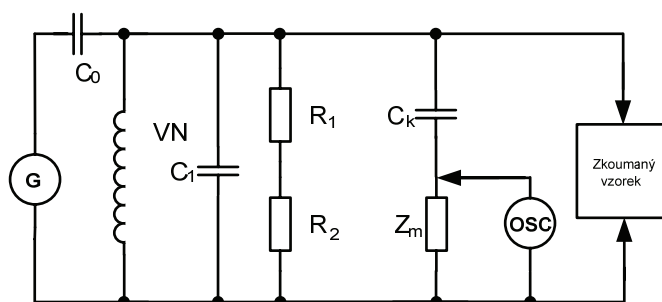
Při kalibraci musí být dodržovány tyto zásady:

- velikost hodnoty kalibračního náboje by měla dosahovat řádově stejných hodnot, jako jsou předpokládané hodnoty měřených částečných výbojů.
- kalibrační náboj z kalibrátoru by měl odpovídat normálům (standardům).
- velikost kalibračního náboje by měla být nezávislá na kapacitě zkoušeného objektu.

Kalibrační koeficient  $K_{q0}$  je definován jako poměr kalibračního pulsu  $q_0$  a údaje získaného měřicím přístrojem  $A_{q0}$  podle vztahu:

$$K_{q0} = \frac{q_0}{A_{q0}}. \quad (5.2)$$

Kalibrace měřicího systému je založena na korelaci napětí amplitudy pulzů částečného výboje a zdánlivého náboje pulzu částečného výboje. Zdánlivý náboj je mírou skutečného procesu způsobeného přenosem náboje uvnitř defektu v izolačním systému. Přiváděním pulzů, které mají definovanou hodnotu zdánlivého náboje a měřením odezvy amplitud pulzů získané v kalibračním obvodu, je kalibrována hodnota amplitud pulzů odezvy k přesné hodnotě zdánlivého náboje pulzů částečných výbojů.



Obr. 5.2: Kalibrační obvod

Měřením bylo zjištěno, že hodnota výstupního napětí je závislá na strmosti hrany zkušebního signálu, a hodnotě kalibrační kapacity.

Z kalibračního měření je možné vyvodit tyto závěry:

- 1) V odezvě celého systému na kalibrační impuls se uplatňují rezonanční jevy.
- 2) Délka hrany kalibračního impulsu je proto velmi důležitá, protože na ní závisí amplituda odezvy systému.

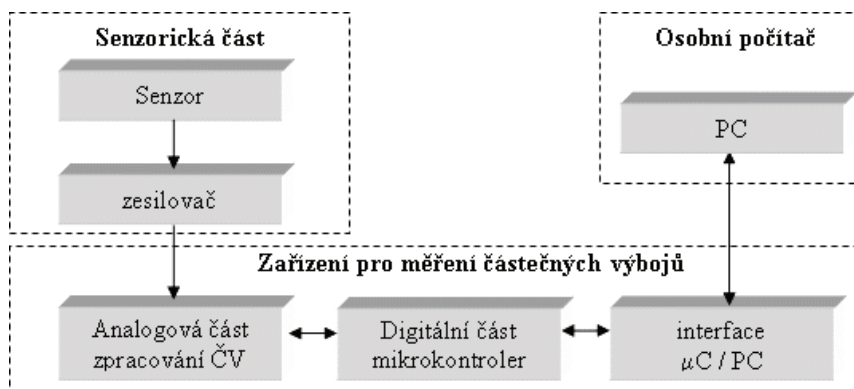
- 3) Protože ČV je velmi rychlý děj, musí být hrana kalibračního impulsu co nejkratší, aby kalibrace odpovídala reálné situaci.
- 4) Délku náběžné hrany je vždy nutné při návrhu kalibračního generátoru respektovat.
- 5) Hrana kalibračního impulsu se prodlužuje při zvětšování kalibračního kondenzátoru.

Z uvedeného vyplývá, že optimální pro měření by bylo použít co nejmenší hodnotu kalibračního kondenzátoru. Při velmi malých kalibračních kondenzátorech se však uplatňují parazitní kapacity.

## 6 MIKROSENZORY PRO DETEKCI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Pro důkladnější diagnostiku zkoumaného objektu je vhodné použít co nejmenší senzor, který díky svým miniaturním rozměrům umožní proměření i velmi špatně přístupných míst ve zkoumaném objektu, kam by se senzory standardních rozměrů nedostaly.

Z možných technologií byla vybrána elektromagnetická a akustická technologie pro svou snadnou použitelnost a dobrou vypovídací schopnost.



**Obr. 6.1: Blokový diagram měřicího systému včetně senzoru**

Hlavní výhodou miniaturního senzoru je možnost testování on-line bez nutnosti elektrického napojení (tedy krátkodobé odstávky) a nežádoucího ovlivnění zkoumaného objektu.

Celý systém je možné rozdělit na tři základní části: na část senzorickou, dále na část samotného zařízení pro měření částečných výbojů a jako poslední je řídicí a paměťová jednotka neboli PC, viz obr. 6.1.

Jak elektromagnetické, tak i akustické senzory slouží převážně k orientační detekci výbojové činnosti při měření on-line, protože výstupní signál je značně závislý jak na úhlu přiložení senzoru, tak i vzdálenosti od místa zdroje částečných výbojů.

### 6.1 AKUSTICKÝ SENZOR

Pro měření výskytu částečných výbojů byl navržen senzor využívající akustické složky doprovázející vznik částečných výbojů. Model akustického senzoru realizovaný v programu Solid Works je na obr. 6.2 a) a na obr. 6.2 b) je realizovaný akustický senzor vybavený předzesilovačem signálu.



**Obr. 6.2: Akustický senzor: a) model; b) realizovaný prototyp**

Jedná se o miniaturní mikrofon s předzesilovačem zesilujícím získaný signál v pásmu slyšitelného zvuku i nad touto hranicí. Realizovaný audio zesilovač byl použit jako mezistupeň mezi snímacím mikrofonem a vyhodnocovací elektronikou.

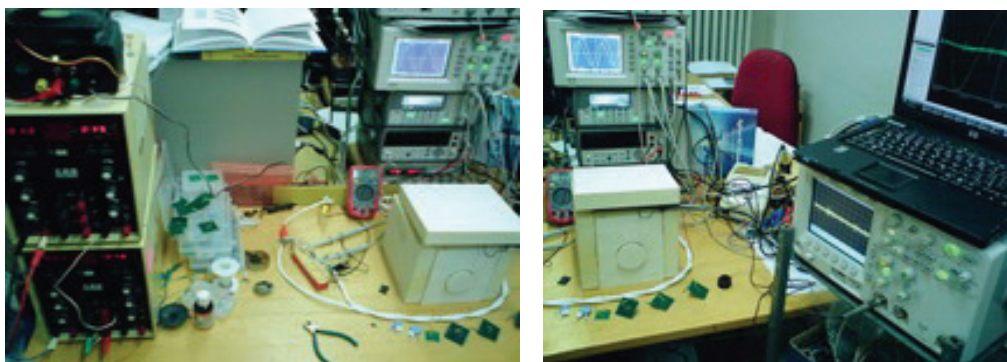
## 6.2 ELEKTROMAGNETICKÝ SENZOR

Pro detekci částečných výbojů je využita změna intenzity elektromagnetického pole vznikajícího při výboji. Toto proměnné elektromagnetické pole je detekováno měřicí cívkou, následně zesíleno a zpracováno vyhodnocovací elektronikou. V případě použitého typu sondy se jedná o lineární induktivní sondu.

Malé hodnoty amplitud impulzů částečných výbojů s velikostí v jednotkách mV byl problém odlišit od přítomného vnějšího rušení. Proto byly, ve snaze zmenšit vliv vnějšího rušení, na výstup sondy aplikovány pásmové propusti.

# 7 ZAŘÍZENÍ PRO DETEKCI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Během řešení práce bylo navrženo a realizováno více typů dílčích součástí celé zkušební aparatury, podle zvyšujících se požadavků, které na ně byly kladeny. Jednalo se jak o několik verzí zařízení pro měření částečných výbojů na HW i SW úrovni, tak i konstrukce budiče pro VN transformátor zkušební aparatury a v neposlední řadě i zkušební teplotní komory. Na základě výsledků měření byla optimalizovaná jak měřicí, tak i softwarová část, tak aby co nejvíce vyhovovala danému účelu.

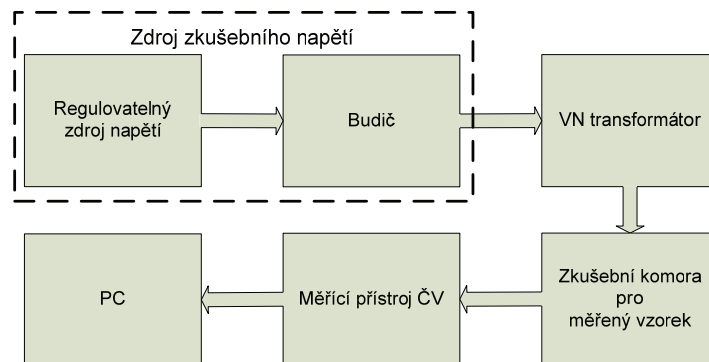


**Obr. 7.1: Pracoviště pro měření částečných výbojů**

Pro měření částečných výbojů tedy muselo být zřízeno pracoviště vybavené všemi potřebnými součástmi k měření. Toto pracoviště je znázorněno na obr. 7.1.

## 7.1 ZKUŠEBNÍ APARATURA

Na obrázku obr. 7.2 je znázorněno blokové schéma měřicí zkušební aparatury. Regulovatelný stejnosměrný zdroj dodává napětí do budiče, který zajišťuje obdélkový frekvenčně proměnný signál. Tímto signálem se budí primární vinutí VN transformátoru. Protože je sekundární vinutí transformátoru v rezonanci, je takto získán sinusový průběh zkušebního napětí.

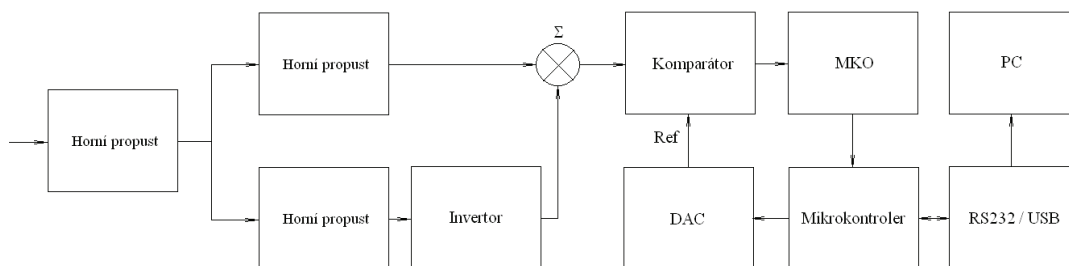


**Obr. 7.2: Blokové schéma měřicí aparatury**

Přivedením takto generovaného VN napětí na zkoumaný objekt, dochází v měřeném vzorku k vzniku částečných výbojů v závislosti na velikosti přivedeného napětí. Takto vzniklé výboje je možné dále snímat jak kontaktními metodami, tak i bezkontaktními sondami (elektromagnetickými, akustickými, atp.).

## 7.2 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Pro detekci částečných výbojů bylo navrženo zařízení pracující na principu amplitudové analýzy impulsů odpovídajících jednotlivým částečným výbojům. Celý systém je rozdělen do několika částí - části analogové, digitální a části napájecí, zajišťující napájení jednotlivých částí systému. Blokové schéma zařízení je na obr. 7.3.



**Obr. 7.3: Blokové schéma zařízení pro měření částečných výbojů**

Analogová část navrženého systému slouží ke zpracování zachycených pulzů částečných výbojů z části snímače a to jak kontaktního tak i bezkontaktního. Tato část pracuje na principu amplitudové analýzy impulsů odpovídajících jednotlivým částečným výbojům.

Základem řešení digitální části je obvod programovatelného hradlového pole FPGA. Na vstupy obvodu FPGA jsou přiváděny výstupy analogové části, kterými jsou logické úrovně komparátorů. Vzhledem k velikosti datového toku bylo zapotřebí zavést vhodnou kompresi. Součástí digitální části systému je rovněž DA převodník sloužící k nastavení referenčních úrovní pro analogovou část.

## 8 TESTOVÁNÍ IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ

Pro zkoumání výskytu a vlastností částečných výbojů bylo navrženo několik verzí experimentálních vzorků planárních transformátorů s různým geometrickým uspořádáním realizovaných na různých nosných materiálech. Příkladem je použití nízkoteplotní keramiky (LTCC) pro vícevrstvé předlohy vyráběné tlustouvrstvou technologií. Tyto struktury jsou vyráběné za běžných atmosférických podmínek, při kterých při výrobě vznikají vzduchové mikrobubliny, které mají negativní vliv na elektrické vlastnosti popsané struktury. Jako lepší a dostupnější řešení je použití technologie výroby vícevrstevných desek plošných spojů pro výrobu experimentálních vzorků také proto, že vícevrstvé desky plošných spojů se laminují ve vakuu,

čímž se minimalizuje možnost vzniku mikrobublinek, ve kterých pak mohou vznikat nežádoucí částečné výboje.

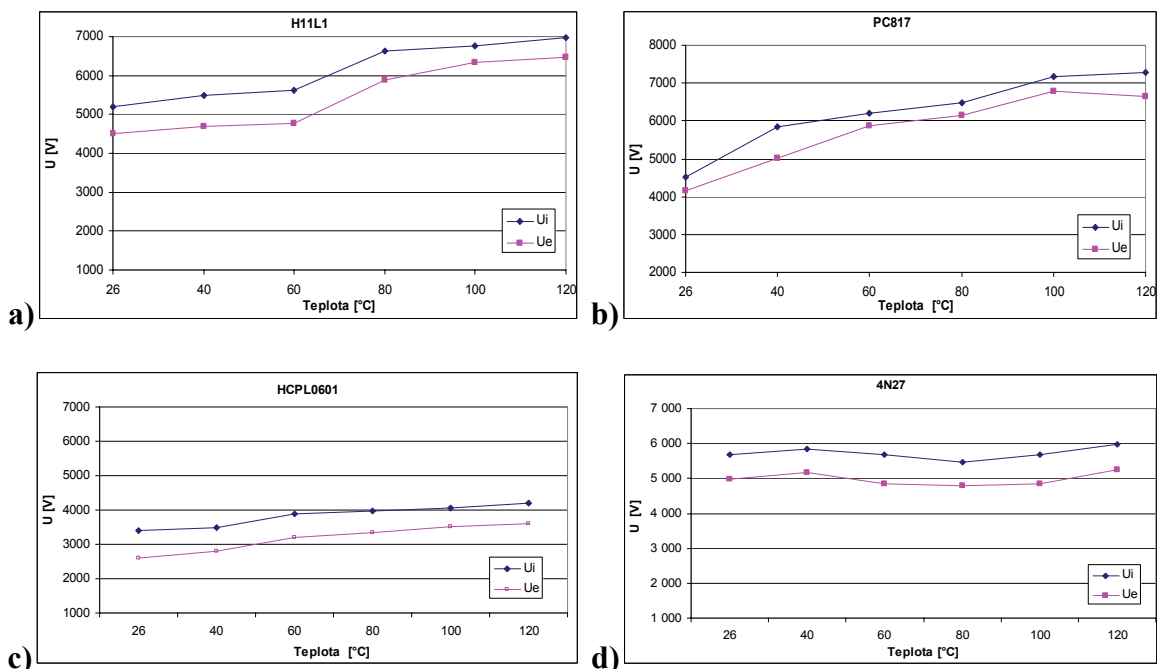
Kromě výše popsáných typů experimentálních vzorků byly dále zkoumány i další objekty jako jsou např. optočleny, cívky, VN transformátory a impulzní transformátory.

### 8.1 MĚŘENÍ NA OPTOČLENECH, CÍVKÁCH A TRANSFORMÁTORECH

Uvedená měření odráží fakt značné odlišnosti parametrů vzniku částečných výbojů u jednotlivých typů proměřovaných vzorků optočlenů. Je zřejmé, že vysoké hodnoty zápalného napětí částečných výbojů jsou známkou kvalitního izolačního systému optočlenů.

Během měření byla zjišťována závislost aktivity částečných výbojů provozních parametrech. Nejvýznamnější z těchto parametrů je teplota. Příklad závislosti aktivity částečných výbojů na teplotě pro různé druhy optočlenů je na obr. 8.1. Rozsah použitých teplot byl od 26°C do 120°C. Po každé změně teploty bylo provedeno temperování. Při testování byla měřena hodnota zápalného a zhášecího napětí.

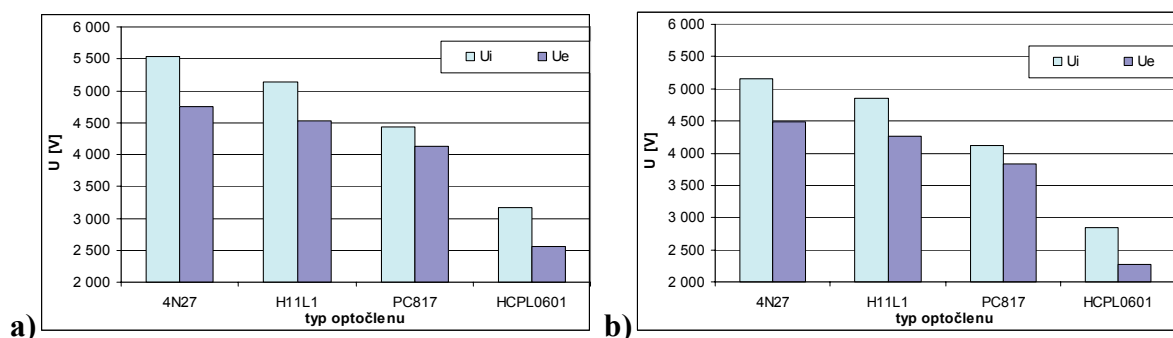
U optočlenů na obr. 8.1 hodnota amplitudy částečných výbojů pro zápalné i zhášecí napětí roste přímo úměrně s teplotou. To je dáno vlastnostmi použité izolace. Tlak plynu v dutinkách v pevné izolaci nebo v dutinkách s plynem mezi pevnou izolací a elektrodou roste s teplotou a to má za následek rostoucí hodnotu elektrické pevnosti v plynu.



**Obr. 8.1: Závislost zápalného a zhášecího napětí na změně teploty pro optočleny:**  
a) H11L1    b) PC 817    c) HCPL0601    d) 4N27

Velmi důležitým faktorem je i frekvence zkušebního napětí. Nárůst frekvence nad oblast síťové frekvence 50 Hz má za následek změnu hodnot zápalného i zhášecího napětí v závislosti na použitých materiálech dielektrika. Měřením vybraných vzorků bylo zjištěno, že s růstem frekvence docházelo k poklesu zápalného i zhášecího napětí.

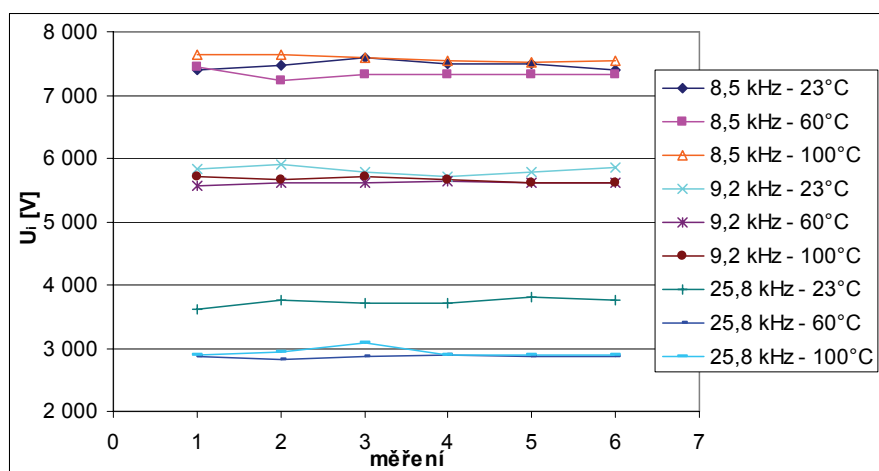
V následující části práce byla zkoumána závislost zápalného a zhášecího napětí na teplotním namáhání pro různé typy optočlenů. Několik vybraných vzorků bylo vloženo do teplotní komory a 6 měsíců teplotně namáháno. Výsledky porovnání před a po teplotním namáhání jsou vyneseny v grafech na obr. 8.2.



**Obr. 8.2: Závislost zápalného a zhášecího napětí: a) před a b) po teplotním namáhání**

Při měření závislosti vlivu teplotního namáhání na hodnoty zápalného a zhášecího napětí bylo zjištěno, že po zkoušce teplotním namáháním některé typy optočlenu vykazují výbojovou činnost již během povoleného rozsahu pracovních napětí, např. typ PC817, u kterého byly hodnoty zápalného a zhášecího napětí výrazně pod hodnotou izolačního napětí udávaného výrobcem.

Bylo zjištěno, že největší pokles hodnot u teplotně namáhaných optočlenu, jak zápalného tak i zhášecího napětí, byl u optočlenu HCPL0601. Pohyboval se okolo 11%, ale až na hodnotu zhášecího napětí naměřenou po teplotním namáhání byly všechny ostatní nad hodnotou izolačního napětí. Vzhledem k faktu, že velikost zhášecího napětí určuje rozsah použitelnosti testovaného objektu, lze konstatovat, že žádný z proměřovaných optočlenu po teplotním namáhání nevyhovuje z hlediska hodnoty izolačního napětí udávaného výrobcem.

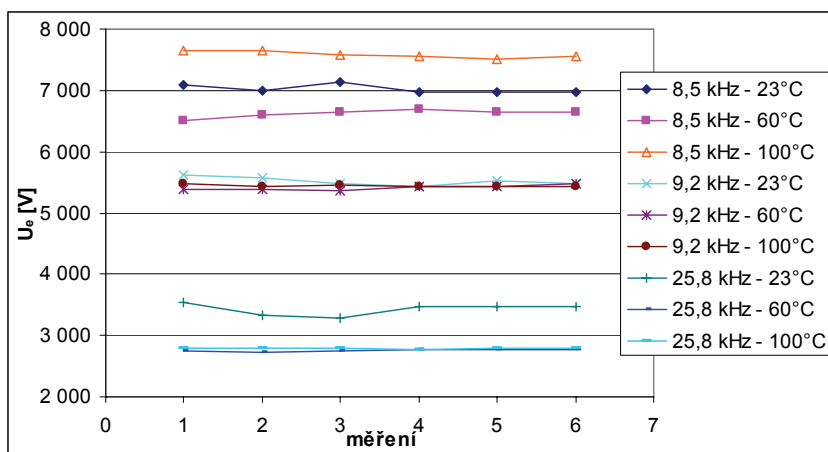


**Obr. 8.3: Závislost zápalného napětí čv na frekvenci a teplotě optočlenu 4N27**

Kombinovaná závislost zápalného i zhášecího napětí částečných výbojů v závislosti na frekvenci a v závislosti na teplotě je na obr. 8.3 a obr. 8.4.

Z obr. 8.3 a obr. 8.4 je patrné, že hodnoty jak zápalného tak i zhášecího napětí částečných výbojů značně klesají s rostoucí frekvencí. Jako možné vysvětlení tohoto stavu se jeví vliv kratší periody zkušební napětí, kdy je menší prodleva od uhasnutí do zapálení výboje.





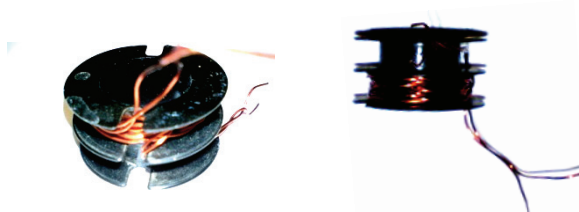
**Obr. 8.4: Závislost zhášecího napětí čv na frekvenci a teplotě optočlenu 4N27**

Závěrem lze říci, že měření částečných výbojů u optočlenů prokázalo existenci významných rozdílů v izolačních charakteristikách mezi každým z vybraných modelů měřených optočlenů.

Kritériem, zvláště pro opakovatelnost výrobního procesu, je měřený rozsah zápalného a zhášecího napětí. Velikost hodnoty napětí částečných výbojů pro určitou vzdálenost izolace jsou známkou kvality návrhu izolačního systému.

## 8.2 VINUTÍ PRO IMPULSNÍ TRANSFORMÁTORY

Použití kroucené dvojlinky zaručí minimální rozptyl, velkou vzájemnou indukčnost a širokopásmovost vyžadovanou pro správnou funkci impulzních transformátorů. Jeho negativním důsledkem je zvýšení celkové kapacity vinutí a také dochází k poklesu elektrické izolační pevnosti vinutí.



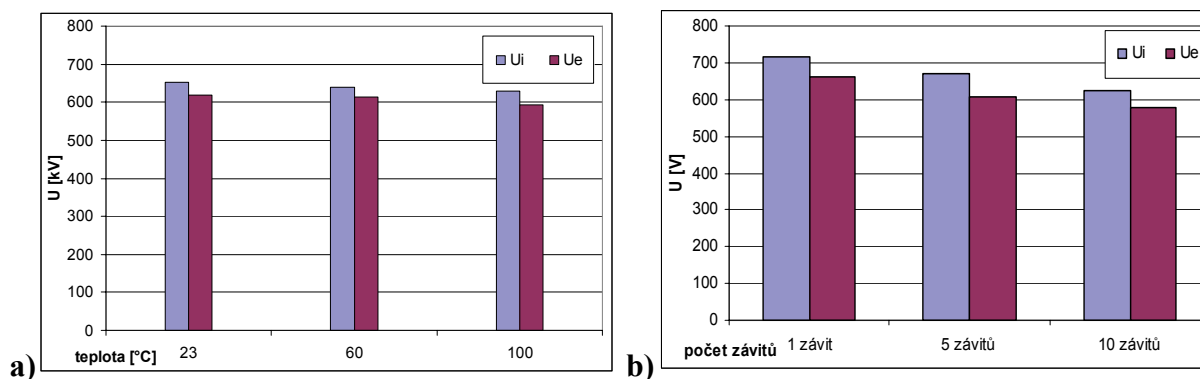
**Obr. 8.5: Vinutí pro impulsní transformátory - měřená cívka vinutá kroucenou dvojlínkou**

Pro srovnávací účely byla měřena cívka s vzduchovým jádrem, vinutá kroucenou dvojlínkou ze smaltovaného drátu.

Měření demonstruje možné nebezpečí vzniku částečných napětí i při relativně malých hodnotách pracovního napětí. Při působení částečných výbojů u pracovního napětí se síťovým kmitočtem, izolace ve zkoumaném objektu obvykle degraduje pomalu oproti stavu, kdy má zkoumaný objekt pracovat na řádově větším kmitočtu.

Na obr. 8.6 a) jsou znázorněny hodnoty zápalného i zhášecího napětí pro vzduchovou cívku měřenou při 23°C. V dalším měření byla zkoumána závislost zápalného a zhášecího napětí na změně počtu závitů na kostříčce.

V další části experimentů byla měřena závislost velikosti hodnoty zápalného a zhášecího napětí na počtu závitů, viz obr. 8.6 b). Je patrné, že s rostoucím počtem závitů klesá jak hodnota zápalného, tak i zhášecího napětí. To je dáno větší společnou styčnou plochou, kde po celé délce vodiče dochází k namáhání a tím i vzniku částečných výbojů.



**Obr. 8.6: Vinutí pro impulsní transformátory: a) zápalné a zhášecí napětí cívký s 10 závitů v závislosti na teplotě; b) Závislost velikosti zápalného a zhášecího napětí na počtu závitů**

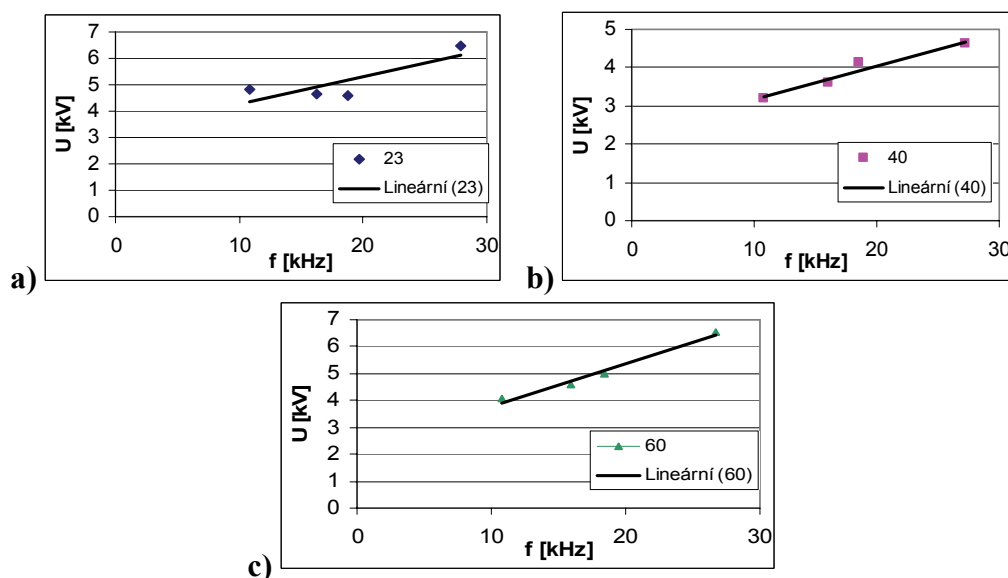
### 8.3 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK VYSOKONAPĚŤOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

V této kapitole jsou shrnuty výsledky měření prováděných na rozptylovém VN transformátoru. Protože částečné výboje jsou pro spolehlivý chod VN zařízení nežádoucí, je zapotřebí znát závislosti zápalného napětí částečných výbojů jak na frekvenci, tak i na teplotě.

Změřená závislost zápalného napětí  $U_i$  na frekvenci  $f$  při teplotách: a) 23°C; b) 40°C; c) 60°C je na obr. 8.7.

Ze změřené závislosti na obr. 8.7 je zřejmé, že s rostoucí frekvencí zkušebního napětí dochází u měřeného VN transformátoru k nárůstu hodnoty zápalného napětí při všech měřených teplotách. Nejstrmější nárůst je při nejvyšším měřené teplotě, tj. 60°C.

Při srovnání závislosti zápalného i zhášecího napětí na frekvenci u měřených optočlenů, kde jejich hodnota s rostoucí frekvencí klesala - u měřeného VN transformátoru Lifetech docházelo s rostoucí frekvencí k růstu hodnot zápalného i zhášecího napětí. Možné vysvětlení tohoto jevu je pokles permitivity a vzrůst  $\text{tg } \delta$  použitého izolačního systému.



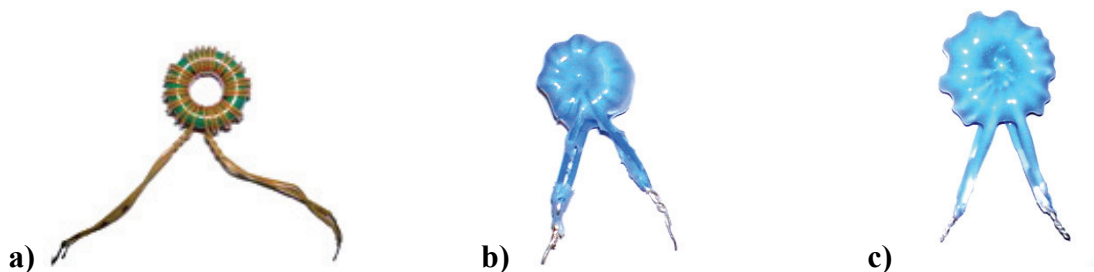
**Obr. 8.7: Změřená závislost  $U_i$  na  $f$  při: a) 23°C; b) 40°C; c) 60°C**

Pro zaručení spolehlivosti a bezpečnosti testované součástky je důležité znát úroveň zhášecího napětí zejména pro nejnejpříznivější, tedy nejnížší hodnotu zápalného napětí. Tento stav nastal při 40°C.

Jak je z obr. 8.7 patrné, měřený transformátor je možné použít při této teplotě max. do 3,2 kV. Amplituda pracovního napětí pro měřený transformátor musí tedy být pod touto hodnotou.

## 8.4 IMPULZNÍ TRANSFORMÁTORY PRO BUDIČE

Následující část práce se věnuje impulzním transformátorům a jejich optimalizaci. Zkoumané impulzní transformátory byly určeny jako VN spínače pro výrobu ozónu pracující na principu řízeného výboje, viz [4]. U zmíněných impulzních transformátorů bylo požadováno, aby splňovaly tyto parametry: pracovní napětí 15 V, izolační napětí nejméně 3,2 kV, délka impulsu nejméně 2  $\mu$ s.



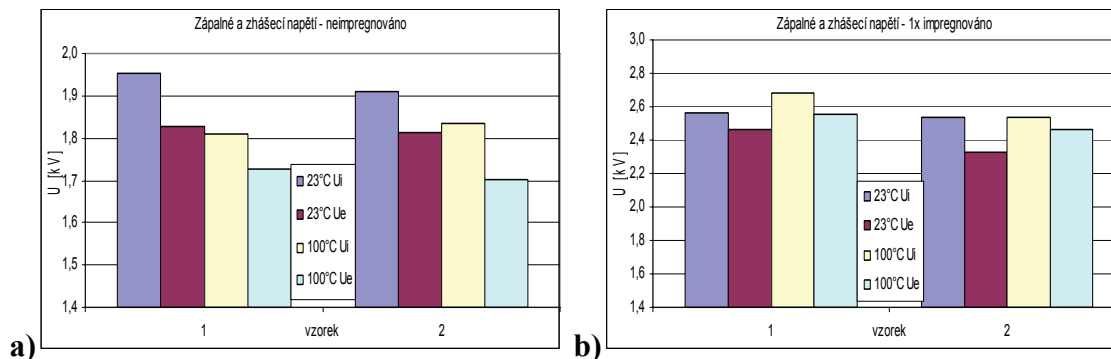
Obr. 8.8: Impulzní transformátor: a) typ A; b) typ B; typ C

První varianta transformátoru, typ A, byla realizována na toroidním jádře. Izolovaným bifilárně vinutým vodičem bylo navinuto primární a sekundární vinutí.

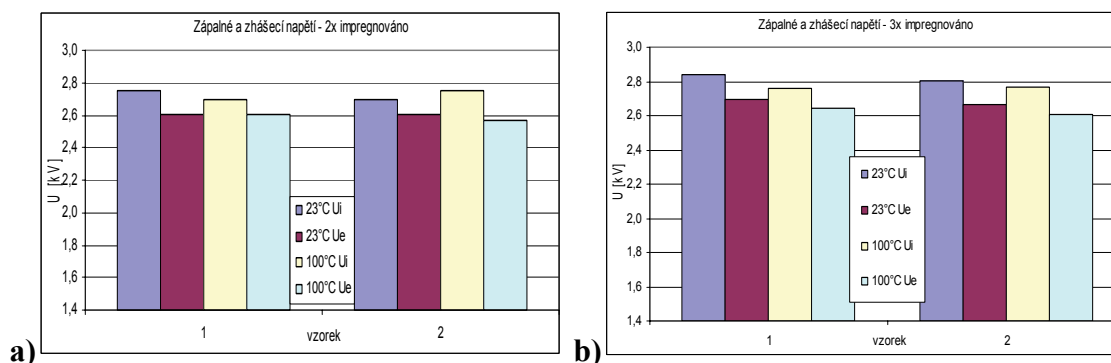
Měření probíhalo opakovaně, vynášené hodnoty jsou průměrem počtu měřených hodnot, které byly získány za pokojové teploty 23°C a za zvýšené teploty 100°C simulující provozní zatížení testovaných toroidních transformátorů.

Bylo provedeno měření vlivu vícenásobného počtu impregnací na velikost hodnoty zápalného i zhašecího napětí.

Na obr. 8.9 až obr. 8.10 je závislost zápalného a zhašecího napětí neimpregnovaných i vícekrát impregnovaných miniaturních toroidních transformátorů, určených jako součást budiče pro vysokonapěťové spínače v dvojčinném měniči.

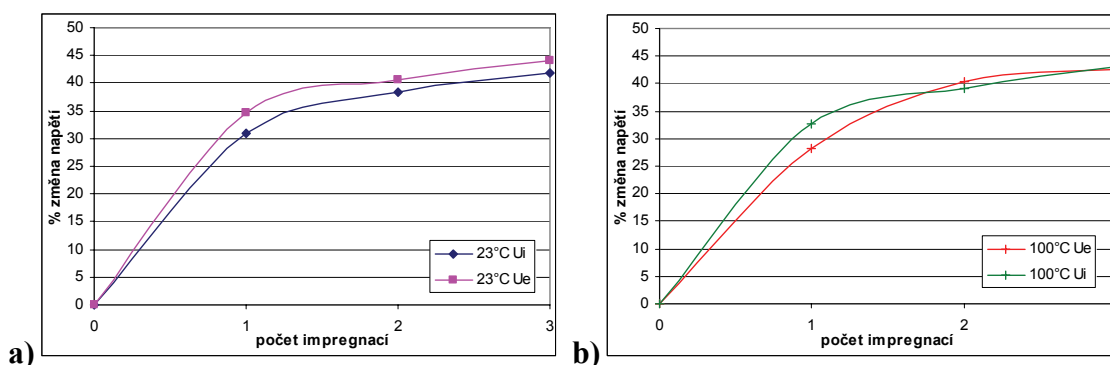


Obr. 8.9: Zápalné a zhašecí napětí transformátorů typu A: a) neimpregnovaných; b) 1x impregnovaných



Obr. 8.10: Zápalné a zhašecí napětí transformátorů typu A: a) 2x impregnovaných; b) 3x impregnovaných

Procentuální hodnoty nárůstu zápalného i zhášecího napětí byly vyneseny do kumulativního grafu v závislosti na počtu provedených impregnací, viz obr. 8.11 pro 23°C a pro 100°C.

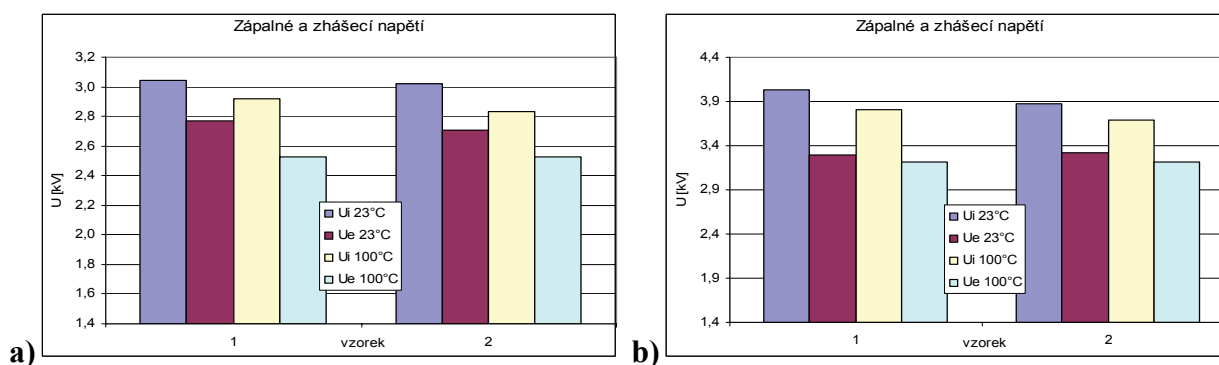


**Obr. 8.11: Vliv závislosti  $U_i$  a  $U_e$  na počtu impregnací pro typ A, ve srovnání s hodnotami v neimpregnovaném stavu: a) typ A při 23°C; b) typ A při 100°C**

Měřením byla zjištěna závislost hodnoty zápalného i zhášecího napětí na počtu impregnací. Z grafu obr. 8.11 je jasně patrné, že největší vliv má první impregnace, díky níž se hodnota zápalného napětí zvýšila o 31%, a 34% byl nárůst pro hodnotu zhášecího napětí. Při druhé impregnaci se hodnota zvýšila o 7,4% u zápalného a 5,9% u zhášecího. Hodnoty po třetí impregnaci se změnily jen o 3,3% u zápalného a o 3,5% u zhášecího napětí.

Z uvedených výsledků je patrné, že na závislost mezi počtem impregnací a velikostí zápalného a zhášecího napětí má z hlediska výskytu částečných výbojů největší vliv první nanášená impregnační vrstva, u ostatních vrstev je nárůst hodnot zápalného napětí částečných výbojů ve srovnání s první impregnací velmi malý. Ostatní testované vzorky tedy byly impregnovány pouze 1x.

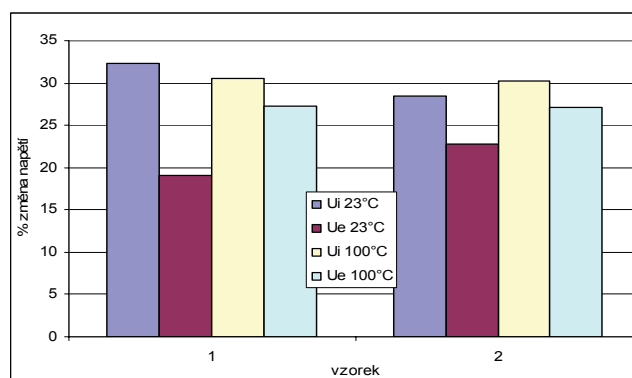
Jak je z předchozího měření patrné, takto konstruovaný impulzní transformátor nespĺňoval v úvodu definované požadavky pro jeho aplikaci. Nejnepríznivější stav, co se týče zhášecího napětí, nastal při 100°C, kdy jeho hodnota dosahovala pouze 1,7 kV v neimpregnovaném stavu a po trojitě impregnaci dosahovala hodnota 2,6 kV při 100°C. Bylo tedy nutné provést konstrukční úpravy, aby bylo s dostatečnou rezervou dosaženo vytýčených požadavků.



**Obr. 8.12: Závislost  $U_i$  a  $U_e$  transformátorů typu B z TAV 0,20 SM na teplotě: a) neimpregnovaných; b) impregnovaných**

Vylepšený vzorek impulzního transformátoru, typ B, byl realizován na toroidním jádře. Zde byl použit zkroucený vodič s teflonovou izolací s označením TAV 0,20 SM, viz obr. 8.2.

Měřením vzorků bylo ověřeno, že nárůst hodnoty zápalného napětí po impregnaci vrostle o cca 30%. Hodnota nárůstu zhášecího napětí po impregnaci se pohybovala v rozsahu 19 až 27%, jak je patrné z grafu obr. 8.13.



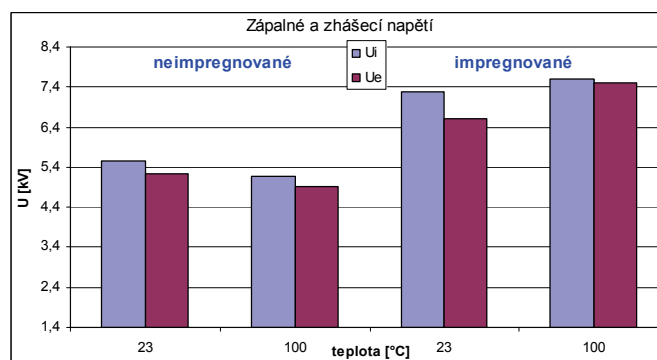
**Obr. 8.13: Rozdíl v nárůstu  $U_i$  a  $U_e$  neimpregnovaných a impregnovaných transformátorů typu B z TAV 0,20 SM**

Dosahované hodnoty neimpregnovaných transformátorů typu B, viz obr. 8.12, nedosahovaly vytyčených požadavků a po impregnaci se hodnoty pohybovaly těsně nad požadovanými hodnotami, viz obr. 8.13. Aby byla hranice požadovaných hodnot izolačního napětí bezpečně překonána, byl vyroben třetí typ, typ C, impulzního transformátoru s přídatnou izolací.

Poslední měřený vzorek, typ C, byl realizován na toroidním jádře s vnějším průměrem 15 mm, vnitřním průměrem 7 mm. Byl použit zkroucený vodič s teflonovou izolací s označením TAV 0,20 SM, viz obr. 8.2. Na uvedený vodič byla dodatečně nanesena přídatná izolace.

Hodnoty zápalných a zhášecích napětí v závislosti na teplotě jsou na obr. 8.14 až obr. 8.15.

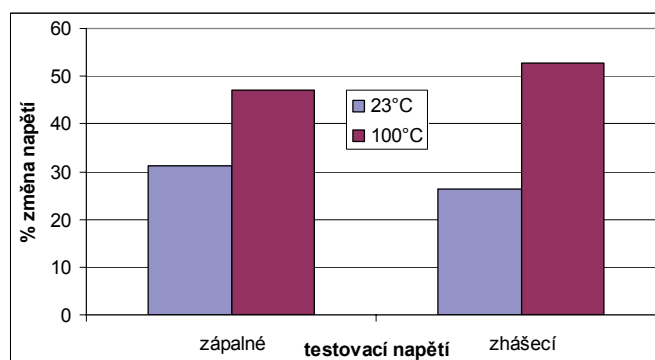
Měření u realizovaných transformátorů typu C ověřilo dosažení podstatně lepších parametrů zápalného a zhášecího napětí oproti předchozím verzím (typu A a typu B). Z obr. 8.14 je zřejmé, že je i při zvýšené teplotě 100°C dosaženo přibližně dvojnásobné zápalné i zhášecí napětí oproti požadované hodnotě zhášecího napětí. Při teplotě 23°C bylo dosaženo nárůstu zápalného napětí přes 31% a zhášecího napětí přes 26% oproti neimpregnovanému stavu.



**Obr. 8.14: Závislost  $U_i$  a  $U_e$  neimpregnovaných a impregnovaných transformátorů typu C z TAV 0,20 SM s přídatnou izolací na teplotě**

Jak vyplývá z obr. 8.15 aplikace dodatečné izolace má význam, jak při teplotě 23°C, kde byl nárůst hodnot zápalného i zhášecího napětí okolo 30%, tak i při zvýšené teplotě 100°C, kde se hodnoty zvýšily o cca 50% původního zápalného i zhášecího napětí.

Postupnými úpravami jednotlivých typů impulzních transformátorů realizovaných na toroidních jádrech se podařilo splnit v úvodu vytyčené cíle a značně tak překonat hranici zhášecího napětí 3,2 kV požadovanou pro správnou funkci budiče pro výrobu ozónu.



**Obr. 8.15: Rozdíl v nárůstu zápalného a zhášecího napětí neimpregnovaných a impregnovaných transformátorů typu C z TAV 0,20 SM s přídavnou izolací**

U prvního měřeného typu, typu A, dosahovalo zhášecího napětí po první impregnaci hodnoty 2,4 kV a po třetí impregnaci se hodnota zvýšila na 2,6 kV, což ani tak nesplňovalo vytýčené požadavky. V případě typu B se zhášecí napětí dostalo na hranici 3,2 kV. To pro bezpečnou a spolehlivou funkci zařízení nestačilo. Typ C překonal vytýčenou hranici zhášecího napětí víc než dvojnásobně v celém měřeném rozsahu teplot. Zhášecí napětí se zde pohybovalo nad hodnotou 6,6 kV. S rostoucí teplotou docházelo u všech měřených transformátorů k poklesu zápalného i zhášecího napětí.

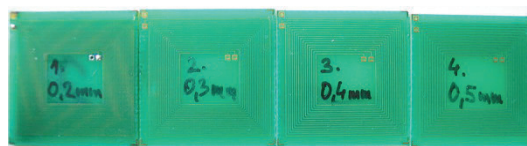
## 8.5 PLANÁRNÍ IZOLAČNÍ SYSTÉMY

Hlavní zájem v této části práce je kladen na technologické hledisko zvýšení odolnosti proti vzniku částečných výbojů v izolačním systému planárních transformátorů.

Planární transformátory pro experimentální účely byly vyrobeny různými technologiemi na různé nosné materiály. V následující části byly měřeny změny geometrických rozměrů vodivých cest a izolačních mezer. U vícevrstevných struktur byla pro srovnávací účely měřena i závislost hodnoty zápalného a zhášecího napětí na tloušťce jader nosných DPS.

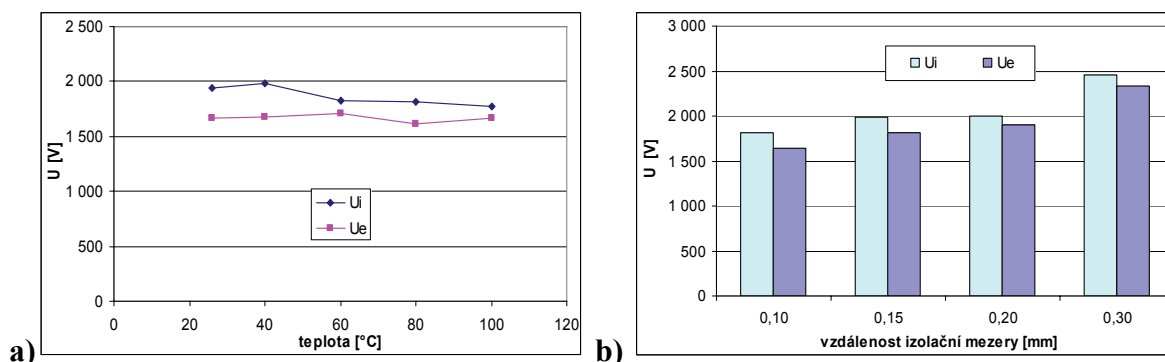
### 8.5.1 Planární transformátory na deskách plošných spojů

Pro výzkum vlastností ČV, vzniku zápalného a zhášecího napětí byly navrženy a vyrobeny jednostranné DPS s nepájivou maskou s různými motivy. Zde byly měřeny částečné výboje na povrchu zkoumaných planárních transformátorů, kde průraz je blokován nepájivou maskou. V tomto případě se testuje kvalita materiálu a hlavně jeho provedení, tzn. homogenita a poróznost nepájivé masky. Hlavní odlišností zkoumaných motivů byla šířka vodivých cest a šířka izolačních mezer.



**Obr. 8.16: Experimentální vzorky jednostranných planárních transformátorů s nepájivou maskou**

Šířka cest se pohybovala od 0,1 mm do 0,2 mm, šířka izolačních mezer byla volena od 0,1 mm do 0,5 mm. Nosným materiálem je 1,5 mm silný skloepoxidový laminát FR4 plátovaný měděnou fólií o tloušťce 18  $\mu\text{m}$ .

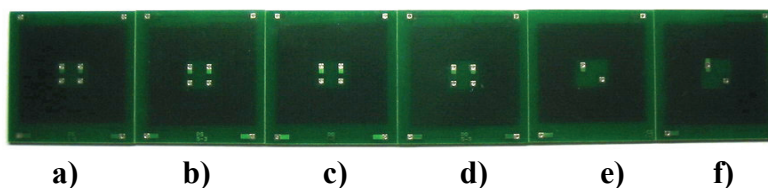


**Obr. 8.17: Měření závislosti zápalného a zhašecího napětí planárního transformátoru: a) 1vv-1 na teplotě; b) na izolační mezeře jednostranných planárních transformátorů**

Porovnání naměřených hodnot zápalného a zhašecího napětí planárních transformátorů různých geometrických rozměrů bylo ověřeno, že jak hodnota zápalného, tak i zhašecího napětí v tomto případě rostla přímo úměrně s rostoucí izolační mezerou. Nejnižší hodnota bezpečného provozního napětí, která je pod hodnotou zhašecího napětí, dosahovala u vzorku s izolační mezerou 0,1 mm hodnot kolem 1,6 kV.

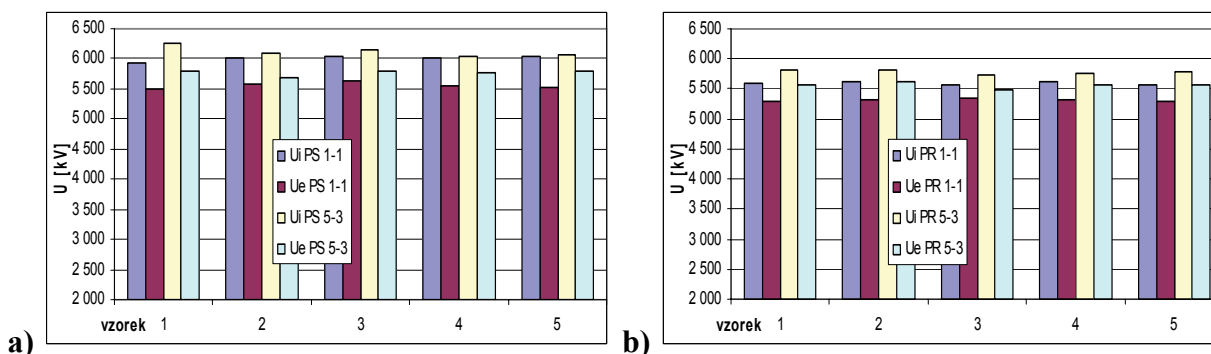
### 8.5.2 Vícevrstvá struktura planárního transformátoru

Pro ověření možnosti ovlivnění zápalného a zhašecího napětí byla navržena vícevrstvá experimentální DPS se čtyřmi vodivými vrstvami. Obě dvě vnější slouží pro kontaktování měřeného vzorku, obě vnitřní jsou funkčními vrstvami tvořícími primární a sekundární vinutí planárního transformátoru.

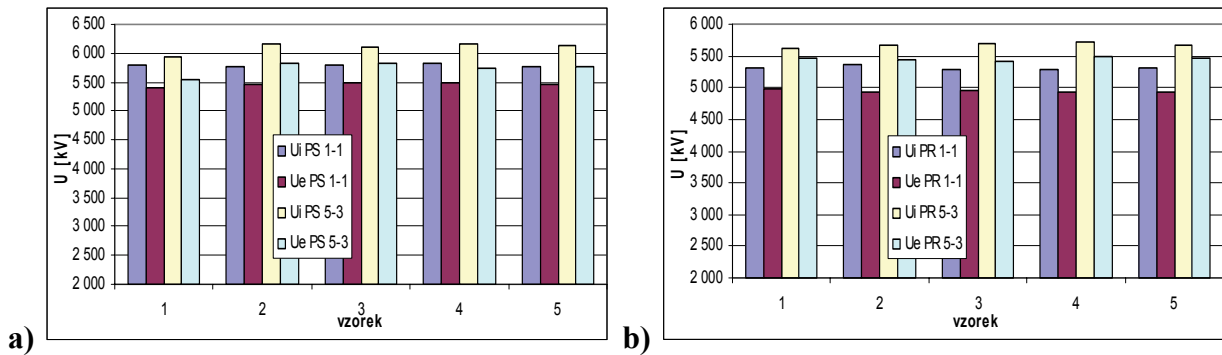


**Obr. 8.18: Experimentální vzorky vícevrstevých planárních transformátorů s nepájivou maskou: a) PS 1-1; b) PS 5-3; c) PR 1-1; d) PR 5-3; e) CS 1-1; f) CS 5-3;**

Pro výrobu experimentálních vzorků, dle níže uvedených návrhů byl použit vícevrstvý materiál od firmy Isola DE 104 ML. Vzdálenost mezi jednotlivým vinutím uvnitř struktury je  $526\ \mu\text{m}$ . Předlohy pro výrobu vícevrstevých desek plošných spojů se vzájemně lišily šířkou vodivých cest, šířkou izolačních mezer a z toho plynoucím počtem závitů dílčích vinutí.



**Obr. 8.19: Zápalné a zhašecí napětí mezi vinutím v jedné hladině DPS vícevrstvého planárního transformátoru: a) PS 1-1 a PS 5-3; b) PR 1-1 a PR 5-3**



**Obr. 8.20: Zápalné a zhášecí napětí mezi vinutími proti jádru DPS planárního transformátoru: a) PS 1-1 a PS 5-3; b) PR 1-1 a PR 5-3**

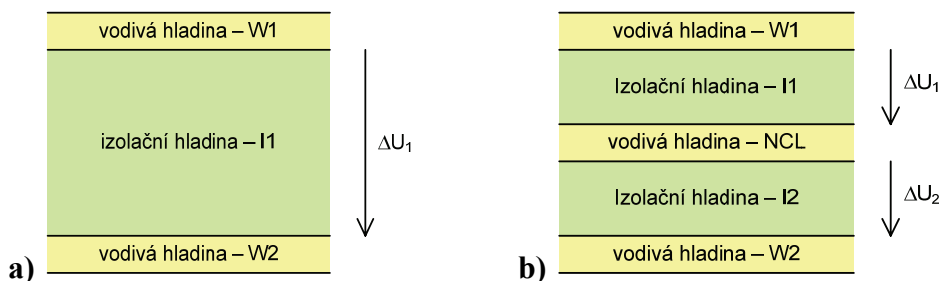
Měřením bylo zjištěno, že s rostoucí vzdáleností vodivých cest u vzorků PS 1-1, PS 5-3 a PR 1-1, PR 5-3, rostly hodnoty zápalného a zhášecího napětí, viz obr. 8.19 a obr. 8.10.

Jak je patrné z obr. 8.19, navržené struktury vícevrstevných planárních transformátorů dosahují oproti předchozím zkoumaným vzorkům impulzních transformátorů na toroidním jádře běžné konstrukce podstatně vyšších hodnot zápalného i zhášecího napětí.

Běžně dosahované hodnoty zápalného i zhášecího napětí jsou zde v rozmezí 5 až 6,5 kV. Proto se jeví jako velmi perspektivní prvky např. pro návrh budičů atp.

### 8.5.3 Vícevrstvá struktura planárního transformátoru s rozdělením elektrického pole

Při snaze zvýšit hodnotu zápalného a tím i pracovního napětí byl klasický planární transformátor doplněn dvěma vodivými vrstvami shodného geometrického tvaru jako je motiv cívek. Vrstva slouží k rovnoměrnému rozdělení potenciálu v izolaci mezi primární a sekundární stranou vinutí. Vznikl tak planární transformátor s vnitřní vodivou vrstvou. Šířka cest se pohybovala od 0,1 mm do 0,3 mm a šířka izolačních mezer byla volena vždy 0,1 mm. Nosným materiálem je skloepoxidový laminát FR4 DURAVER-E-Cu řady 104 se dvěma tloušťkami jader a to 312  $\mu\text{m}$  a 526  $\mu\text{m}$ .



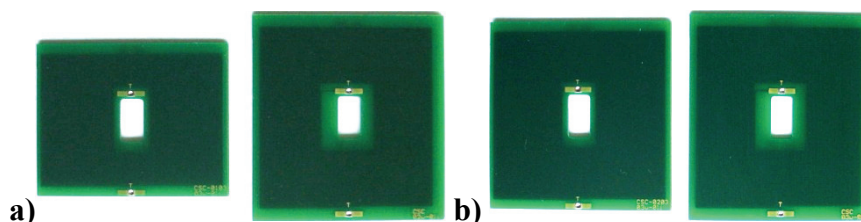
**Obr. 8.21: Princip rozdělení napětí: a) v klasické struktuře DPS se dvěma vodivými hladinami; b) na upravené struktuře více vrstevé DPS**

Princip rovnoměrného rozdělení potenciálu pomocí vnitřních slepých vinutí je na obr. 8.21. Ve srovnání s klasickou strukturou na obr. 8.21 a), kde je potenciál mezi primárním a sekundárním vinutím ovlivňován nehomogenitami, dochází při vložení více izolačních vrstev a jednoho nebo více elektricky nezapojených vinutí, k rovnoměrnějšímu rozložení elektrického pole, viz obr. 8.21 b).

Jak je patrné z obr. 8.21 b) takto upravená struktura vhodná pro vysokonapěťové aplikace se skládá z izolačních vrstev  $I1$  a  $I2$ , vodivé vrstvy primárního vinutí  $W1$ , sekundárního vinutí  $W2$  a vodivé hladiny s elektricky nezapojenými vrstvami  $NCL$  sloužících k rovnoměrnějšímu rozložení přiloženého napětí.



Tento jev vede k nárůstu zápalného i zhášecího napětí a tím i ke zvýšení životnosti a spolehlivosti takto konstruovaného planárního transformátoru. Rovnoměrné rozložení potenciálu způsobí, že se izolační materiál namáhá menším napětím v rámci jedné izolační vrstvy.

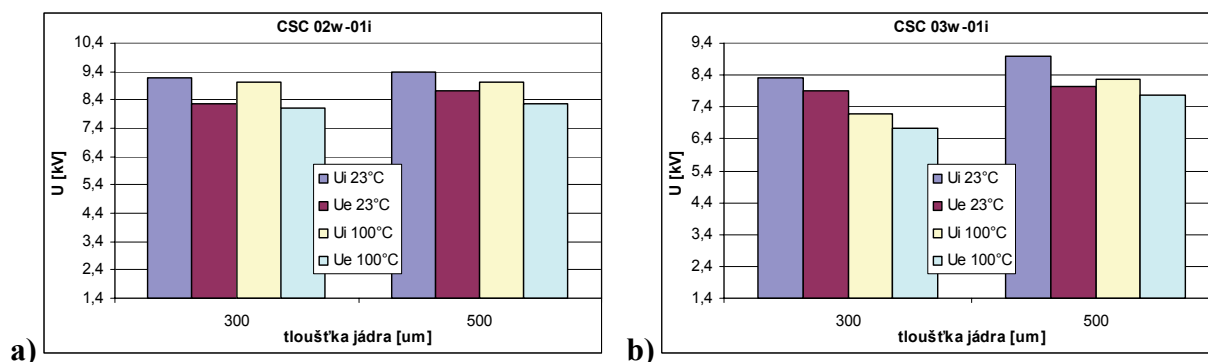


**Obr. 8.22: Experimentální vzorky vícevrstvých DPS planárních transformátorů s vrstvou pro rozdělení potenciálu: a) typ 1 a 2; b) typ 3 a 4**

Obě sady byly měřeny při pokojové teplotě 23°C a dále při 100°C simulujících pracovní podmínky. Vybrané hodnoty zjištěných zápalných a zhášecích napětí jsou na obr. 8.23 a obr. 8.24.

Jak je z grafů patrné, hodnoty zápalného i zhášecího napětí se u takto konstruovaných typů planárních transformátorů značně zvýšily a blížily se hranici 10 kV

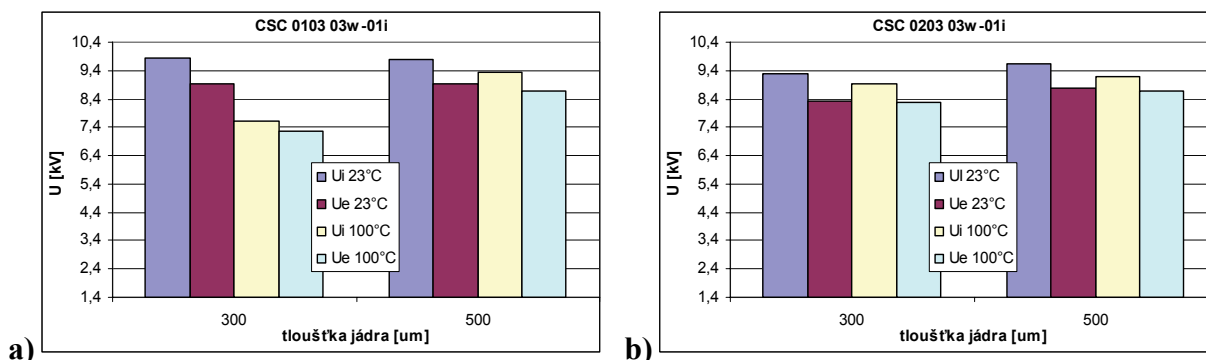
V porovnání s planárním transformátorem se čtyřmi vodivými vrstvami, kde je vzdálenost vinutí (jádra) 510  $\mu\text{m}$ , minimální vzdálenost vinutí v šestivrstvém planárním transformátoru je kvůli technologickým možnostem jen 208  $\mu\text{m}$ . I přes tento nepoměr je uvedená struktura podstatně odolnější proti vzniku částečných výbojů, než-li čtyřvrstvá struktura.



**Obr. 8.23: Závislost  $U_i$  a  $U_e$  planárních transformátorů s vrstvou pro rozdělení potenciálu na teplotě, typ: a) CSC 02w-01i, jádro 300 $\mu\text{m}$  a 500 $\mu\text{m}$ ; b) CSC 03w-01i, jádro 300 $\mu\text{m}$  a 500 $\mu\text{m}$**

Měření ukázalo, že největší nárůst hodnot zápalného a zhášecího napětí byl při zvýšené teplotě 100°C, u vzorků s klasickým návrhem (stejná šířka vodiče) tj. 02w-01i a 03w-01i se pohyboval v rozmezí 15 až 22%. Nárůst hodnot zápalného a zhášecího napětí je pravděpodobně způsoben nárůstem tlaku uvnitř bublinek a následným zvýšením hodnoty zápalného napětí, jak uvádí Paschenova křivka.

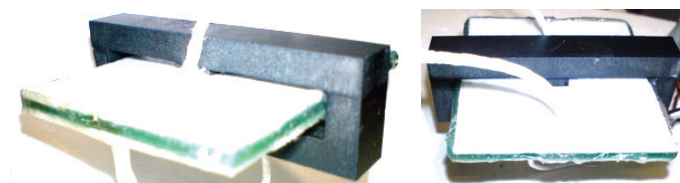
Aby se u realizovaného planárního transformátoru s jádrem DPS 500  $\mu\text{m}$ , typu 03w-01i s feritovým jádrem zabránilo vzniku výbojů proti feritovému jádru, bylo nezbytné doplnit je přidavnou izolací ISONOM NMN, viz obr. 8.25. Ta zajišťuje důkladné oddělení DPS od feritového jádra. Hrany transformátoru musely být ošetřeny nanesením laku, protože zde docházelo ke koncentraci elektrického pole. Po těchto úpravách planárního transformátoru hodnoty zhášecího napětí neklesly pod hodnotu 6,6 kV při 23°C.



**Obr. 8.24: Závislost  $U_i$  a  $U_e$  planárních transformátorů s vrstvou pro rozdělení potenciálu na teplotě, typ: a) CSC 0103 pro jádro 300µm a 500µm; b) CSC 0203 pro jádro 300µm a 500µm**

Aby bylo možné porovnat rozsah pracovních kmitočtů pro měřené impulzní transformátory na toroidním jádře typu A, B a C s impulzním transformátorem realizovaným na vícevrstvé DPS, byl měřen a porovnáván tvar vstupního, budícího signálu oproti výstupnímu signálu. Ve všech případech pracovalo sekundární vinutí do definované zátěže.

Byl také měřen přenos napětí vícevrstvého planárního transformátoru s vrstvou pro rovnoměrné rozložení elektrického pole v závislosti na kmitočtu. Rozsah měřených kmitočtů planárních transformátorů, jak s feritovým jádrem, tak i bez feritového jádra byl od 1 kHz do 20 MHz. V případě měření impulzních transformátorů na toroidním jádře byl rozsah kmitočtu od 1 kHz do 1 MHz. Pro srovnání je měřítka kanálu A i B vždy stejná. Odezva na obdélníkový impuls bez jádra je přibližně 1 µs, s jádrem je odezva přibližně 50 µs. To odpovídá i poměru indukčnosti primárního vinutí transformátoru bez jádra  $L_V = 21 \mu\text{H}$  a s jádrem  $L_M = 1370 \mu\text{H}$ .



**Obr. 8.25: Realizace planárního transformátoru typu 03w-01i s feritovým jádrem a jádrem DPS 500 µm**

U transformátoru s jádrem je na výstupu nezkraslený obdélníkový signál přibližně od 100 kHz. Pokud bude doba sepnutí kratší, než 5 µs lze tento transformátor s jádrem použít pro řízení hradel tranzistoru FET nebo IGBT, bez jakýchkoliv úprav. V uvažované aplikaci byla požadovaná doba sepnutí kratší než 2 µs.

Při požadavku na dobu sepnutí výrazně delší než přibližně 10 µs je nutné uvážit, že pro řízení hradel je nutná změna náboje pouze na začátku a konci sepnutí. Při použití pomocných obvodů tento transformátor vyhoví i pro doby sepnutí až několik ms.

Pracovní kmitočet u planárního transformátoru s feritovým jádrem je možné uvažovat již od desítek kHz (50 kHz) do řádu desítek MHz (20 MHz). V případě planárního transformátoru bez feritového jádra je rozsah pracovních frekvencí až od stovek kHz (500 kHz) až do řádu desítek MHz (20MHz).

## 9 ZÁVĚR

Náplní předložené práce bylo rozšíření poznatků z oblasti měření a vyhodnocování částečných výbojů při kmitočtech vyšších než 1 kHz, s cílem přispět ke zvýšení kvality, spolehlivosti a bezpečnosti nově navrhovaných elektronických zařízení a systémů pracujících se střídavým napětím větším než 500 V.

Pro řešení práce bylo zapotřebí navrhnout a vybudovat pracoviště pro měření částečných výbojů v oblasti pracovních kmitočtů nad 1 kHz. Pracoviště se skládá ze zdroje pracovního napětí, vysokonapěťového (VN) transformátoru, přístroje pro detekci částečných výbojů a teplotní komory uzpůsobené k přivádění zkušebního VN napětí s ohřevem regulovatelným do 130°C.

Pro detekci částečných výbojů byla ze všech zvažovaných metod vybrána metoda amplitudové analýzy impulzů částečných výbojů. K tomuto účelu byl také vyvinut amplitudový analyzátor umožňující zachycení velmi krátkých impulsů odpovídajících částečným výbojům. Pro analyzátor bylo sestaveno programové vybavení pro operační systémy typu MS Windows a bylo realizováno několik verzí měřicích zařízení. Navržený systém umožňuje analýzu částečných výbojů až do frekvence pracovního napětí 100 kHz. V další části je popsán vývoj miniaturních sond pro diagnostiku částečných výbojů, vhodných pro diagnostiku rozměrově menších elektronických celků pracujících s vysokým napětím

V návaznosti na předcházející práce byla vypracována metodika měření a kalibrace částečných výbojů na realizovaném měřicím zařízení, při definovaných podmínkách měření, kterými jsou teplota, frekvence a zapojení měřicího obvodu. Pro testování elektronických součástek a vývoj izolačních systémů impulsních transformátorů byla použita zjednodušená metodika měření založená na napětí vyhasínání částečných výbojů. Vypracování metodiky měření a kalibrace umožnilo nejen dosažení reprodukovatelných výsledků, ale přispělo také k získání nových poznatků v oblasti výzkumu částečných výbojů na pracovišti v ústavu mikroelektroniky.

Důležitou částí práce bylo testování vybraných součástek při dodržení vypracované metodiky měření a kalibrace, s ohledem na parazitní jevy a s uvažováním reálných vlastností kalibračního generátoru. Při testování byl zkoumán vliv provozního zatížení, kmitočtu, pracovního napětí, teploty a teplotního cyklování na chování izolace a její stárnutí. Jsou zde shrnuty výsledky měření optočlenů, transformátorů, vinutí pro impulsní transformátory a různých typů geometrického uspořádání jedno i vícevrstevných desek plošných spojů.

Využití diagnostiky částečných výbojů pro návrh optimalizovaných izolačních systémů pro elektronické a mikroelektronické obvody bylo demonstrováno na vývoji izolačního systému impulsních transformátorů pro řízení VN spínačů. Jednalo se o konstrukce toroidních transformátorů vinutých kroucenou dvojlinkou, aby bylo dosaženo minimálního rozptylu těsné magnetické vazby a širokopásmovosti vyžadované pro správnou funkci impulsních transformátorů. Důslednou aplikací fyzikálních poznatků o vzniku a chování částečných výbojů bylo u poslední verze, transformátoru typu C dosaženo zvýšení hodnot napětí pro vyhasínání částečných výbojů na úroveň 6,6 kV. Tato hodnota překračuje téměř dvojnásobně pracovní napětí izolace navrhovaného impulsního transformátoru. Z provedených testů bylo zjištěno, že primární vliv na potlačení výskytu částečných výbojů v transformátorech s toroidními jádry má hlavně první impregnace. Další zvyšování počtu impregnačních vrstev už nemá na odolnost vůči výbojové činnosti výrazný vliv.

Při testování částečných výbojů u planárních transformátorů byla nejprve testována nepájivá maska na povrchu planárních cívek. Přesto, že tloušťka nepájivé masky je pouze 30 μm, bylo v tomto případě, v závislosti na vzdálenosti vodičů v cívce, naměřeno poměrně velké zápalné napětí částečných výbojů. Měření částečných výbojů v objemu izolačního systému na vícevrstevných deskách plošných spojů bylo prováděno na vzorcích s různými geometrickými rozměry a tloušťkou jader desek plošných spojů. Ve snaze navrhnout odolnější izolační systém proti vzniku částečných výbojů jsou navrženy a realizovány vícevrstvé planární transformátory s vodivou vrstvou pro rovnoměrné rozdělení potenciálu.

Na základě výše uvedeného přehledu výsledků lze dle mého názoru shrnout přínos práce k rozvoji vědního oboru:

- Sestavení unikátního pracoviště pro diagnostiku částečných výbojů metodou amplitudové analýzy včetně vypracování metodiky kalibrace a metodiky měření.

- Návrh a ověření funkce detekčního zařízení a amplitudového analyzátoru řízeného počítačem, včetně vypracování komunikace s PC a řídicího programu.
- Ověření metodiky kalibrace a stanovení vlivu jednotlivých parametrů kalibračního zařízení, především vlivu rezonančních jevů a vlivu strmosti hran kalibračního signálu.
- Návrh a ověření indukční sondy a akustické sondy. Obě sondy jsou vhodné pro operativní testování částečných výbojů s větší intenzitou.
- Provedení několika set experimentálních měření, při kterých byly nejen zkoumány vlastnosti testovaných objektů, ale byla také ověřena správná činnost navržených zařízení a přístrojů. Část výsledků těchto měření již byla publikována.
- Demonstrace využití diagnostiky částečných výbojů při vývoji izolace pro impulzní transformátory pro použití ve VN spínačích.
- Charakterizace výskytu částečných výbojů v izolačních systémech planárních transformátorů. Pro tato měření jsem navrhl několik typů planárních transformátorů na jedno i vícevrstevných deskách plošných spojů. V rámci této charakterizace byly testovány i vlastnosti nepájivé masky na povrchu planárních cívek.
- Zavedení pomocné vodivé vrstvy do izolačního systému planárního transformátoru. Tato vrstva zajistí rovnoměrné rozložení elektrického pole a umožní dosáhnout stejné izolační pevnosti při menší vzdálenosti primární a sekundární cívky. Tenká vrstva izolace umožní těsnější magnetickou vazbu při zachování stejné izolační pevnosti.
- Ověření možností použití nízkoteplotní keramiky LTCC pro planární izolační systémy.

Experimenty provedené v rámci předložené dizertační práce ukazují, že díky důkladné analýze výbojové činnosti je možné odhalit chyby v konstrukci zařízení a posoudit kvalitu technologických operací sloužících k zajištění izolační pevnosti požadované pro spolehlivou funkci těchto obvodů.

Na úrovni pracoviště na ústavu mikroelektroniky práce významně přispěla nejen k rozšíření znalostí o vzniku částečných výbojů v elektronických zařízeních a jejich vlivu na provozuschopnost a spolehlivost těchto zařízení ale také k vybudování pracoviště pro jejich testování.

## 10 LITERATURA

- [1] BOUŠEK, J., „*The Partial Discharge Monitor for Large Generators*“, CSS 96, Proc. of Int. AMSE Conference , Sept. 10-12, Brno 1996, pp 509-512, ISBN 80-214-0783-2.
- [2] BOUŠEK, J., MAMMADOV, A., „*Partial Discharge in Planar Transformer*“, In Socrates Workshop. Intensive Training Programme in Electronic System Design 2005. Technological Institute of Chania (Crete, Greece), Sept. 21-23, 2005. Brno: Nakl. Novotný, s. 169-174, ISBN 80-214-3042-7.
- [3] BOUŠEK, J., „*Variable Frequency/Amplitude Sine Wave Resonant Power Source for High Voltage and Electric Discharge Devices*“, In Proceedings of the Socrates Workshop 2003, Chania, Greece, Technological Institute of Crete, 2003, pp 186-191.
- [4] ZEMÁNEK M., „*Užití výkonových měničů ve zdrojích vysokého napětí*“, disertační práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009, s. 105.
- [5] MENTLÍK V., PIHERA J., POLANSKÝ R., PROSR P., TRNKA P., „*Diagnostika elektrických zařízení*“, Brno: Nakladatelství BEN technická literatura, Praha 2008, ISBN 978-80-7300-232-9, s. 440.
- [6] ČSN EN 60270 „*Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*“, Český normalizační institut, červenec 2007, Praha.
- [7] ZÁLIŠ, K., „*Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*“. Academica, 2005, s. 10-131. ISBN 80-200-1358-X.
- [8] HAVLÍČEK, T., BOUŠEK J., „*Pracoviště pro zkoumání částečných výbojů na DPS*“, výzkumná zpráva 2007, Brno 2007.
- [9] HAVLÍČEK, T., BOUŠEK J., PAVLÍK M., „*PD Measurement with Microsensors*“, Electronic Devices and Systems EDS08, Brno: Nakl. Z. Novotný 2008, pp. 161-165, ISBN 978-80-214-3717-3.
- [10] HAVLÍČEK, T., BOUŠEK J., „*Partial Discharge Investigation*“, First Forum of Young Researches, Publishing House of Izhevsk State Technical University, Izhevsk 2008, pp. 310-314, ISBN 978-5-7526-0355-6.

# CURRICULUM VITAE

Jméno: Tomáš Havlíček  
Narozen: 6.12.1980 v Brně  
Kontakt: [Havlicek.Tomas@phd.feec.vutbr.cz](mailto:Havlicek.Tomas@phd.feec.vutbr.cz)

## Vzdělání:

- 1999 – 2005 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**  
Inženýrské studium, obor Elektrotechnická výroba a management,  
Státní zkouška vykonána v červnu 2005, Diplomová práce: Konstrukce  
potenciostatu
- 2005 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**  
Postgraduální doktorské studium, obor Mikroelektronika a technologie,  
Státní zkouška vykonána v červnu 2007, téma studia: Částečné výboje  
v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech

## Praxe:

- 2006 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**  
Technicko-hospodářský pracovník

## Jazyky:

Angličtina

## Účast na řešení projektů:

- 2003 – 2005 Spoluřešitel grantového projektu ANTOPE - Analýza toxicity pesticidů MPO  
FD K2/53,
- 2006 – 2008 Spoluřešitel grantového projektu MIKROSYN - Nové trendy  
v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích
- 2006 – 2007 Řešitel grantového projektu FRVŠ G1 1939/2007, Pracoviště pro zkoumání  
částečných výbojů na DPS,
- 2007 – 2008 Spoluřešitel grantového projektu FRVŠ G1 2022/2008, Pracoviště pro optickou  
kontrolu kvality pájených spojů.

## **ABSTRACT**

The presented thesis is focused on knowledge extension in the area of partial discharge measurements and evaluation at frequencies higher than 1 kHz. The thesis includes the design and set up of the measuring workplace equipped for measuring partial discharges, including the methodology of the measuring and calibration procedures necessary for the achievement of reproducible results. Another part of the thesis deals with the technology of acoustical and electromagnetic sensors convenient for the diagnostics and localization of partial discharges in devices, that work at voltages above 500 V. Electrical circuits that enable data evaluation by using the signal from a sensor working on amplitude analysis principle were developed. For PD detection a PC controlled measuring device working on amplitude analysis principle had to be designed and realized. The possibilities of the workplace have been demonstrated in the process of development of the insulating systems for pulse transformers. Thesis results can significantly contribute to a higher quality of newly designed electronic devices and systems working at voltages above 500 V.