

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Návrh zařízení pro simulaci akustických projevů výbojové
činnosti**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek KOJAN**
Osobní číslo: **E10B0049P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh zařízení pro simulaci akustických projevů výbojové činnosti**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište princip vzniku elektrického výboje v izolantech z fyzikálního hlediska
2. Popište projevy výbojové činnosti u těchto izolantů
3. Uveďte a popište metody detekce částečných výbojů
4. Navrhněte zařízení pro simulaci akustických projevů výbojové činnosti

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík V., Dielektrické prvky a systémy, BEN, Praha 2006, ISBN: 80-7300-189-6, 240 str.
2. Mentlík V. a kol, Diagnostika elektrických zařízení, BEN, Praha 2008, ISBN: 978-80-7300-232-9, 440 str.
3. Internetové zdroje
4. Odborné články zahraničních autorů

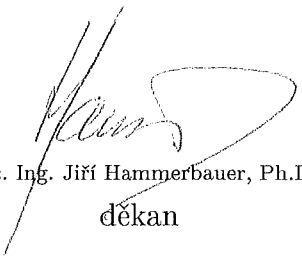
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jakub Souček

Katedra technologií a měření


Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan

L.S.


Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předložená práce pojednává o elektrickém výboji, o projevech těchto výbojů a o detekci částečných výbojů. Popisuje fyzikální základy vzniku elektrického výboje v izolantech, polarizace dielektrika a ionizace atomů a molekul. Vysvětluje pojmy jako izolant, dielektrikum, elektrická vodivost či elektrická pevnost. Obsahuje rozdělení výbojů podle různých kritérií, rozdělení částečných výbojů, metody detekce částečných výbojů. Jsou zde uvedeny projevy výbojové činnosti vedoucí k degradaci izolace. V závěru práce je popsán návrh zařízení pro simulaci akustických projevů výbojové činnosti. Navrhované zařízení je plazmový reproduktor neboli „zpívající výboj“.

Klíčová slova

Částečné výboje, vznik elektrického výboje, izolanty, dielektrika, polarizace dielektrika, elektrická vodivost, elektrická pevnost, metody detekce částečných výbojů, ionizace atomů a molekul, projevy výbojové činnosti, návrh zařízení, akustické projevy výbojové činnosti, plazmový reproduktor, zpívající výboj,

Abstract

The presented work deals with the electrical charges on the effects of these discharges and on the detection of partial discharges. It describes the physical fundamentals of electrical discharges in insulators, dielectric polarization and ionization of atoms and molecules. It explains concepts such as insulator, dielectric, electrical conductivity and dielectric strength. It includes a division of discharges according to various criteria, classification of partial discharge, partial discharge detection methods. There are given signs of discharge activity leading to insulation degradation. In conclusion, the work describes the design of devices for simulating acoustic manifestations of discharge activity. The proposed device is a plasma speaker, or “singing discharge”.

Key words

Partial discharges, the emergence of electric shock, insulators, dielectrics, dielectric polarization, electrical conductivity, dielectric strength, methods of detection of partial discharges, ionization of atoms and molecules, speeches discharge activity, system design, acoustic manifestations discharge activity, plasma speaker, singing discharge,

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 16. 6. 2013

Radek Kojan

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubu Součkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.11
2 ELEKTRICKÝ VÝBOJ.....	12
1.1 ROZDĚLENÍ VÝBOJŮ	12
1.2 ZÁKLADNÍ DRUHY VÝBOJŮ	12
1.3 VÝBOJE A JEJICH AKUSTICKÉ PROJEVY V PŘÍRODĚ	14
<i>1.3.1 Blesk.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.2 Vznik blesku.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.3 Druhy blesků</i>	<i>14</i>
<i>1.3.4 Hrom</i>	<i>15</i>
3 PRINCIP VZNIKU ELEKTRICKÉHO VÝBOJE V IZOLANTECH	16
3.1 ROZDĚLENÍ LÁTEK PODLE KONCENTRACE VOLNÝCH NOSIČŮ NÁBOJE.....	16
3.2 DIELEKTRIKA A IZOLANTY	16
3.3 POLARIZACE DIELEKTRIKA	17
3.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST DIELEKTRIK	19
<i>3.4.1 Elektrická vodivost v plynných izolantech.....</i>	<i>20</i>
<i>3.4.2 Elektrická vodivost v kapalných a pevných izolantech</i>	<i>21</i>
3.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST	22
<i>3.5.1 Paschenův zákon</i>	<i>23</i>
<i>3.5.2 Závislost elektrické pevnosti plynů na frekvenci</i>	<i>24</i>
<i>3.5.3 Kanálová neboli streamerová teorie přeskočů.....</i>	<i>25</i>
4 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	27
4.1 ROZDĚLENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	27
4.2 DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	27
4.3 METODY DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	28
<i>4.3.1 Neelektrické metody detekce částečných výbojů</i>	<i>28</i>
<i>4.3.1.1 Akustická metoda detekce.....</i>	<i>28</i>

4.3.1.2 Optická metoda detekce	29
4.3.1.3 Chemická metoda detekce	29
4.3.1 Elektrické metody detekce částečných výbojů.....	29
4.3.1.1 Galvanické metody měření částečných výbojů	30
4.3.1.2 Elektromagnetické sondy.....	31
4.3.1.3 UHF senzory pro měření částečných výbojů	32
5 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....	33
5.1 PŮSOBENÍ VNITŘNÍCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	33
5.1.1 Chemické účinky	34
5.1.2 Elektrické účinky	34
5.1.3 Tepelné účinky.....	34
5.2 ELEKTRICKÝ STROMEČEK.....	34
6 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO SIMULACI AKUSTICKÝCH PROJEVŮ VÝBOJOVÉ ČINNOSTI	36
6.1 OBVOD 555	36
6.2 POPIS ZAPOJENÍ.....	37
7 ZÁVĚR	39
8 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40

Seznam symbolů a zkratk

γ	měrná elektrická vodivost
ρ	měrný elektrický odpor
R	izolační odpor [Ω]
h	tloušťka vzorku [m]
S	plocha elektrod [m^2]
E_p	elektrická pevnost [$V \cdot m^{-1}$]
U_p	průrazné napětí [V]
d	tloušťka izolantu v místě průrazu [m]
p	tlak plynu [Pa]
U_{Pmin}	minimální hodnota průrazného napětí na Paschenově křivce [V]
$(pd)_{min}$	minimální hodnota součinu tlaku plynu a tloušťky izolace v místě průrazu na Paschenově křivce
C_1, C_2	kapacity kapacitního snímače [F]
ϵ_0	permitivita vakua
ϵ_r	relativní permitivita
l	délka kapacitní sondy [m]
r_v	poloměr vodiče [m]
r_b	poloměr snímače [m]
r_p	poloměr vnějšího pláště kabelu [m]
H	intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
B	magnetická indukce [T]
PET	Polyethyltereftalát

U_t amplituda napětí zkušebního napěťového zdroje [V]

C_v kapacita kompletního měřicího obvodu [F]

Z_m měřicí impedance [Ω]

1 Úvod

Cílem této práce je seznámení s problematikou částečných výbojů vznikajících v izolantech a projevů těchto výbojů, obecně popsat princip vzniku elektrického výboje z fyzikálního hlediska a navrhnout zařízení pro simulaci akustických projevů výbojové činnosti. V poslední řadě dojde k sestavení a odzkoušení navrženého zařízení.

Obsah práce je rozdělen do pěti hlavních částí. První čtyři části jsou věnovány rešerši, ve které jsou obsaženy první tři body ze zásad pro vypracování této práce. Poslední část se zabývá samotnému návrhu zařízení.

Elektrické výboje jsou součástí našeho každodenního života. Můžeme je spatřit na rozvodu vysokého napětí pro hromadnou dopravu, jako jsou tramvaje či vlaky. Vznikají pomocí statické elektřiny při nošení oděvů ze syntetických materiálů a v neposlední řadě můžeme pozorovat obdivuhodné přírodní výboje ve formě blesků. Ovšem částečné výboje, které jsou skryty v izolacích přístrojů, nejsou příliš chtěné. Způsobují totiž degradaci dielektrik a následně mohou vést k celkovému průrazu dielektrika.

Pro detekci těchto částečných výbojů jsou známy elektrické i neelektrické metody, díky nimž můžeme zjistit, zda v zařízení dochází ke vzniku částečných výbojů, a následně předejít poškození izolace zařízení. Některé z metod jsou lokalizační, dokážeme tak díky nim přímo lokalizovat vznik částečných výbojů v zařízení.

2 Elektrický výboj

Elektrický výboj je fyzikální jev, který vzniká při průchodu elektrického proudu dielektrikem. [1]

2.1 Rozdělení výbojů

Na základě různých kritérií lze výboje dělit podle délky jejich trvání, tlaku, typu buzení, přítomnosti ionizačního činidla neboli ionizátoru. Ionizátor vyvolává ionizaci atomů a molekul. [1] Ionizace je děj, při kterém se z elektricky neutrálního atomu či molekuly stává iont. Pokud atomy odevzdaly jeden či více elektronů, vzniklý iont je nabitý kladně a říkáme mu kationt, pokud atomy přijaly jeden či více elektronů, vzniklý iont je nabitý záporně a říkáme mu aniont. [15] Obvyklým ionizátorem bývá proud elektronů, rentgenové, kosmické či gama záření. Ionizátor předává atomu tzv. ionizační energii (energie potřebná k ionizaci). Plyny je možno ionizovat pouhým zahřátím na vysokou teplotu, tím atomy molekuly získávají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby se mohly ionizovat při vzájemných srážkách. S ionizačním činidlem souvisí rozdělení výbojů na samostatné a nesamostatné. [1] Samostatný výboj je výboj, který se, na rozdíl od výboje nesamostatného, udrží vlastní ionizací. Nesamostatný výboj potřebuje pro své působení ionizátor. Pokud ionizátor není přítomen, výboj zanikne. Oblast samostatného i nesamostatného výboje je zobrazena na *obr. 2.2.1*. [1], [11]

2.2 Základní druhy výbojů

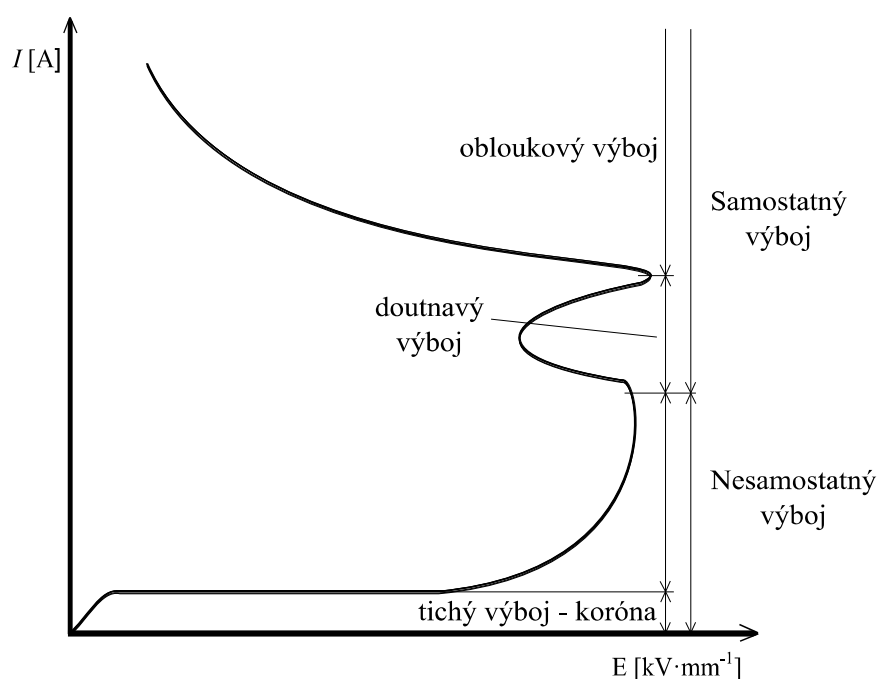
- **Obloukový výboj** je samostatný výboj mezi dvěma elektrodami. Tento výboj je charakteristický vysokými proudy a velmi vysokými teplotami (tisíce kelvinů). Tento druh výboje se používá hlavně při tavení a obloukovém sváření kovů. Vzniká nejčastěji při atmosférickém tlaku. [1]

- **Jiskrový výboj** je také výboj samostatný. [1] Výboj tohoto typu nastává za normálního atmosférického tlaku při překročení dielektrické pevnosti daného plynu. Překročení dielektrické pevnosti neboli maximální hodnoty intenzity elektrického pole

způsobí ionizaci atomů. Suchý vzduch má dielektrickou pevnost přibližně $3 \cdot 10^6$ V/m. [2] Jiskrový výboj bývá doprovázen zvukovými a světelnými efekty. Při vytvoření jiskrového výboje lze spatřit jasně svítící rozvětřující se kanálky, ve kterých dochází k ionizaci při vysoké teplotě. Ta dosahuje až 30 000 K. [1]

- **Koróna** je trsovitý výboj, vzniká také za atmosférického tlaku v blízkosti hrotů a hran vodičů s vysokým napětím vůči okolí. [1], [3] Na elektrických vedeních vysokého napětí způsobuje vznik koróny energetické ztráty, korozi vodičů a rušení rozhlasu. [1]

- **Doutnavý výboj** lze pozorovat v plynu za nízkého tlaku (do 1000 Pa). Plyn, ve kterém vzniká doutnavý výboj, obsahuje díky malému tlaku také malý počet molekul, ty se tedy méně často navzájem srážejí. Proto když plyn obsahuje nějaký elektron či iont, je relativně malé napětí dostačující k tomu, aby elektron či iont získal dostatečné množství energie pro ionizaci molekuly, do které narazí. Napětí 30 kV postačí i na 20 cm dlouhý výboj. Při srovnání s jiskrovým či obloukovým výbojem je proud u doutnavého výboje velice malý (řádově desítky miliampérů). [4] Tento výboj je velmi úsporný zdroj světla, při stejném příkonu vyzařuje tento výboj až 5krát intenzivnější světlo než je světlo z klasických žárovek. Při doutnavém výboji dosahuje teplota výbojky i elektrod velice nízkých hodnot. [1]



Obr. 2.2.1 Úplná voltampérová charakteristika plynného izolantu [11]

2.3 Výboje a jejich akustické projevy v přírodě

Nejčastějšími výboji v přírodě jsou blesky, jejichž akustickými projevy jsou hromy.

2.3.1 Blesk

Blesk je mohutný jiskrový výboj atmosférické elektřiny. [5] Tento výboj je vždy doprovázen emisí světla. [9] Díky blesku se vyrovnává napětí mezi dvěma mraky nebo mezi mrakem a zemí. Během tisíce sekund se uvolní napětí řádově 100 milionů voltů. [8] Z fyzikálního hlediska je blesk tokem elektrického proudu. Stejně jako elektrický proud ve vodičích, i elektrický proud obsažený v blesku teče z místa přebytku elektronů do místa jejich nedostatku. Poté, co se vše dostane do rovnováhy, děj ustává. [9]

Blesk dokáže vyvinout rychlost dosahující hodnot 160 až 1600 km/s a jeho teplota může popřípadě sahat až k 30 000 °C. Tato hodnota je šestkrát větší než hodnota teploty na povrchu Slunce. [9]

2.3.2 Vznik blesku

Před vytvořením samotného blesku se tvoří tzv. vůdčí výboj neboli leader. [7] Tento neviditelný či pouze slabě viditelný výboj postupuje z mraku směrem k zemi jako kaskáda kličkujících 50 až 200 metrů dlouhých skoků. [8] Předběžný slabý výboj (leader) vytvoří kanál ionizovaného, zahřátého vzduchu, skrz který protéká elektrický proud. Odhaduje se, že v těchto kanálech dosahují při výboji teploty k hodnotám kolem 25000 - 30000 K. [7] Jakmile se tento negativní výboj dostává do vzdálenosti 50 metrů od kladného náboje (země), vyrazí mu vstříc tzv. vstřícný náboj, který postupuje směrem od země, tedy nahoru. V místě spojení obou výbojů se spolu se silným rachotem vytvoří silně ionizovaný kanál s průměrem 5 až 10 cm, který dokáže vést proudy o hodnotách 20 až 200 000 ampérů prostředím nazývaným plazma. [9]

2.3.3 Druhy blesků

a) **Čárový blesk** je nejčastější forma blesku. Je to dlouhý elektrický výboj vznikající buďto mezi mrakem a zemí nebo mezi dvěma mraky. Jak je již výše popsáno, tento druh

blesku začíná tzv. vůdčím výbojem, který se v určité výšce střetává se vstřícným výbojem, vznikajícím a postupujícím ze země. Poté takto vzniklým kanálem projde hlavní výboj. Ve většině případů je doprovázen hromem. [6]

b) **Plošný blesk** je elektrický výboj, který vzniká výhradně mezi dvěma mraky. Po vytvoření plošného blesku nevzniká hrom, jelikož náboj mezi mraky není dostatečný k vytvoření čárového blesku, tudíž vzniká pouze doutnavý výboj. [6] Při doutnavém výboji se okolní vzduch neohřeje na takovou teplotu, aby mohl vzniknout hrom.

c) **Růžencový blesk** lze na obloze spatřit jen ojediněle. Kanál tohoto druhu blesku se rozděluje na jednotlivé světelné úseky, které svým tvarem připomínají kuličky na šňůrce růžence. Každá z těchto kuliček vybuchuje jednotlivě. Zvukový efekt je proto silnější než u běžného čárového blesku. [6]

d) **Kulový blesk** je velice vzácná forma elektrického výboje. Jeho princip vědci dodnes přesně nevysvětlili. Tento blesk se naprosto liší od ostatních druhů blesku. Jako většina blesků vzniká většinou při bouřce, může se však objevit i za slunného počasí. [6]

2.3.4 Hrom

Hrom je přírodní úkaz stejně jako blesk. Hromem nazýváme akustický třesk, který doprovází výboj blesku.

Jak je již popsáno výše, onen předběžný slabý výboj (leader) vytvoří kanál ionizovaného, zahřátého vzduchu, skrz který protéká elektrický proud. Takto zahřáté plazma se prudce rozpíná, tím tlačí na okolní chladnější vzduch, což vyvolá silnou rázovou vlnu, které říkáme hrom. [10]

3 Princip vzniku elektrického výboje v izolantech

Základní obecné podmínky pro vznik elektrického výboje:

- Jsou přítomny volné nosiče náboje (elektrony a ionty).
- Do dielektrika je dodávána elektrická energie. [1]

3.1 Rozdělení látek podle koncentrace volných nosičů náboje

Koncentrace neboli množství volných nosičů náboje se také nazývá měrná elektrická vodivost či konduktivita γ . Právě podle hodnoty konduktivity γ můžeme rozdělit látky na:

- vodiče $\gamma > 10^5$ [S.m⁻¹],
- polovodiče $10^{-8} < \gamma < 10^5$ [S.m⁻¹],
- izolanty $\gamma < 10^{-9}$ [S.m⁻¹]. [11]

Konduktivita není nikdy nulová ani u izolantů. Bavíme se tedy o reálných izolantech, které vždy obsahují určité množství volných nosičů elektrického náboje. Počet těchto nábojů je ovšem velice nízký. [11]

Při samotném zařazování dané látky do příslušné skupiny si musíme dávat pozor také na okolní vlivy. Těmi jsou například teplota, tlak vzduchu, frekvence přiloženého napětí či intenzita elektrického pole, které na látku působí. Největší vliv má ovšem teplota. Například takové sklo je v normálních podmínkách (tedy v pevném skupenství) izolant. Když ale sklo zahřejeme nad teplotu 1600 °C (roztavený stav), počet volných nosičů náboje se zvýší a sklo se stává vodičem. [11]

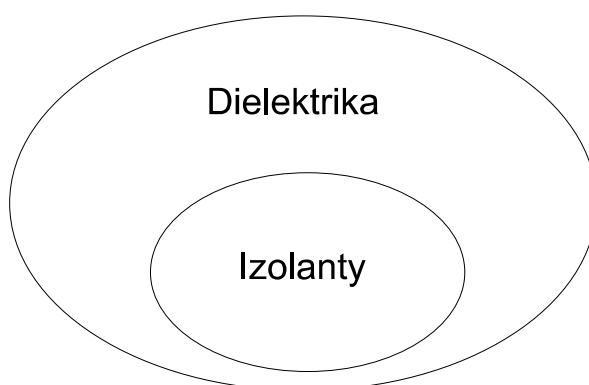
3.2 Dielektrika a izolanty

Je samozřejmě chybou myslet si, že dielektrikum je to samé jako izolant. Popíšeme si tedy, jaké jsou rozdíly mezi dielektriky a izolanty.

Dielektrikum je aktivní prvek. Pokud vložíme dielektrikum do elektrického pole, dokáže se v tomto vnějším elektrickém poli polarizovat a vytvoří si vlastní vnitřní elektrické pole. Takto vytvořené vnitřní pole je opačné polarity než pole vnější a zároveň i intenzita vnitřního pole je menší než intenzita vnějšího pole. Základním rozdělením dielektrik je dělení podle skupenství. Dělíme tak dielektrika na plynná, kapalná a pevná. [11], [12]

Izolant je naproti tomu látka, která má za úkol znemožnit průchodu proudu mezi dvěma místy, které mají odlišný elektrický potenciál. Jedná se tedy o pasivní prvek. [11]

Dielektrika a izolanty se v lecčem liší, přesto mají obě skupiny látek mnohé společné. Jak je vidět na *obr. 3.2.1*, izolanty jsou podmnožina dielektrik. Proto můžeme říci, že každý izolant je také dielektrikem. Opak však již pravdivý není, dielektrikum totiž není vždy izolantem. [11]



Obr. 3.2.1 Dielektrika – izolanty [11]

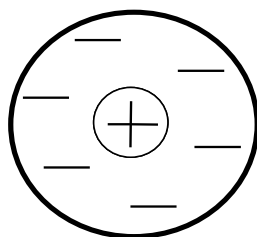
3.3 Polarizace dielektrika

Polarizace dielektrika je jev, který nastává tehdy, je-li dielektrikum vloženo do elektrického pole. V této práci se nebudu zabývat nestandardními případy, proto nebudu rozvádět fakt, že mohou nastat situace, kdy se dielektrikum zpolarizuje i bez vložení do vnějšího elektrického pole (např. mechanickým namáháním u piezoelektrik). [11], [13]

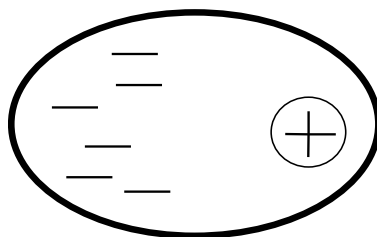
Polarizace se liší u dielektrik polárních a nepolárních. Hlavním rozdílem polárních a nepolárních dielektrik souvisí s dipólem. U nepolárních dielektrik se z jednotlivých atomů stává dipól právě až po vložení do elektrického pole. Polární dielektrika obsahují dipóly již

před vložením do tohoto pole. Příkladem polární látky je molekula vody. Tato molekula obsahuje jeden atom kyslíku a dva atomy vodíku. Na obou dvou vodíkových atomech je parciální neboli částečný kladný náboj a na atomu kyslíku je parciální záporný náboj. Tím pádem na konci molekuly, kde se vyskytují atomy vodíku, je kladný náboj a na opačné straně, kde je atom kyslíku, je náboj záporný. Tudíž má tato molekula záporný náboj a kladný náboj na opačných koncích již před vložením do vnějšího elektrického pole. [13], [14]

U nepolárních dielektrik probíhá tzv. atomová polarizace. Při této polarizaci dochází k mírnému přeskupení elektrických nábojů úrovní atomu. Atom, který není vložen do vnějšího elektrického pole (viz. *obr. 3.3.1*), obsahuje jádro (umístěno uprostřed atomu) a kolem jádra je elektronový obal, ve kterém se vyskytují záporně nabitě elektrony. Vložíme-li takovýto atom do vnějšího elektrického pole, dojde k deformaci elektronového obalu (viz. *obr. 3.3.2*). Záporně nabitě elektrony, které jsou v atomu, se přesunou na jednu stranu a kladně nabitě jádro se tlačí na stranu druhou. Výsledkem je soustava elektrických nábojů označována jako elektrický dipól, což je soustava, která má na jednom svém konci záporný náboj a na druhém kladný náboj. [13], [14]

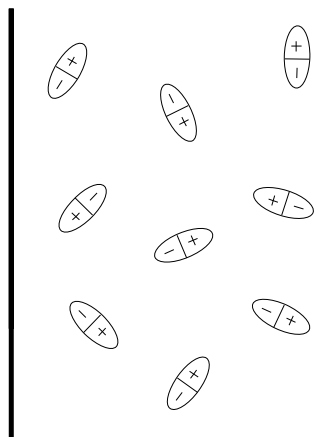


Obr. 3.3.1 Atom bez vnějšího elektrického pole [14]

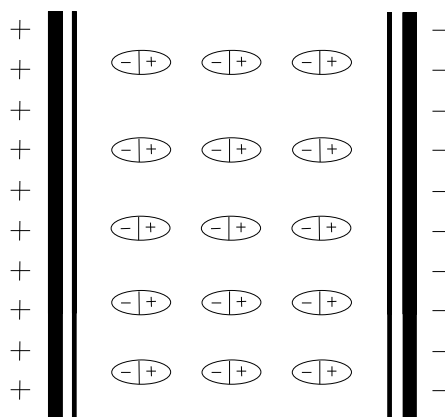


Obr. 3.3.2 Zpolarizovaný atom ve vnějším elektrickém poli [14]

U polárních dielektrik nastává tzv. orientační polarizace. Před vložením do elektrického pole se dipóly uvnitř dielektrika pohybují nahodile a také jejich směr je různorodý (*obr. 3.3.3*). Poté, co bylo dielektrikum vloženo do vnějšího elektrického pole (v našem případě mezi dvě opačně nabitě elektrody), se jeho molekuly stáčí jedním směrem a dochází tak k vyrovnání dipólů, jak můžeme vidět na *obr. 3.3.4*. [13], [14]



Obr. 3.3.3 Nahodilý směr dipólů v dielektriku [13]



Obr. 3.3.4 Zpolarizované dipóly v polárním dielektriku [13]

3.4 Elektrická vodivost dielektrik

Budeme-li používat izolanty na odizolování elektricky vodivých částí, bude potřeba materiál, který neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje, což je ovšem nemožné. Každý izolant má vždy určitou elektrickou vodivost. [11]

Z hlediska elektrické vodivosti porovnáváme materiály pomocí 2 veličin. První veličinou je samozřejmě měrná elektrická vodivost, neboli konduktivita γ [$S \cdot m^{-1}$]. Druhá veličina se nazývá měrný elektrický odpor, neboli rezistivita ρ [$\Omega \cdot m$]. Díky těmto veličinám můžeme jednotlivé materiály mezi sebou porovnávat. [11] Vzájemný vztah mezi těmito veličinami je:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad [S \cdot m^{-1}, \Omega \cdot m] \quad (2.4.1) [11]$$

„Číselně je hodnota rezistivity ρ rovna odporu krychle o hraně 1 m, protéká-li proud mezi dvěma jejími protilehlými stěnami.“ [11]

Základní jednotka rezistivity je $\Omega \cdot m$. Častěji se však používá jednotka $\Omega \cdot cm$. Podobné je to u konduktivity. Základní jednotka je $S \cdot m^{-1}$, často se však používá jednotka $S \cdot cm^{-1}$. [11]

Další vztah pro vyjádření rezistivity je:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \quad [\Omega \cdot m, \Omega, m^2, m] \quad (2.4.2) [11]$$

kde h je tloušťka vzorku v metrech,

R je izolační odpor v ohmech,

S je plocha elektrod v metrech čtverečních.

Porovnáváme-li látky z hlediska vodivosti, nemůžeme opomenout rozdělení látek podle skupenství. Jednotlivá skupenství látek se totiž v tomto ohledu výrazně liší. Je to způsobeno především různou vzdáleností částic v jednotlivých skupenstvích. [11] Proto si nyní v krátkosti popíšeme elektrickou vodivost v plynných, kapalných i pevných látkách.

3.4.1 Elektrická vodivost v plynných izolantech

Při nízké teplotě a ve slabém elektrickém poli je plyn výborným izolantem. Je tomu tak,

jelikož se v plynech vyskytuje velice málo volných nosičů náboje. Tyto nosiče náboje vznikají především díky ionizačním činitelům, jako jsou například radioaktivní či kosmické záření. Vlivem těchto ionizačních činitelů dochází k ionizaci plynu (ionizaci jsme si popisovali v první kapitole). Molekuly plynu na sebe působí jen minimálně, což je dáno velkou vzdáleností mezi nimi. [11]

K ionizaci atomu v plynech dochází poté, co atom nashromáždí dostatečné množství ionizační energie. Dochází zde nejčastěji k:

- nárazové ionizaci – elektricky neutrální atom se ionizuje srážkou s elektronem či iontem, který měl v době srážky dostatečnou kinetickou energii. Pokud byla tato kinetická energie dodána pomocí vysoké teploty, jedná se o tzv. tepelnou ionizaci.
 - fotoionizaci – fotoionizace vzniká při působení gama, Rentgenovo a kosmického záření. Elektricky neutrální atom je ionizován pohlcením fotonu.
 - povrchové ionizaci – zde se elektrony uvolňují přímo z povrchu elektrod. A ionizační energií je buďto energie tepelná, nebo energie pocházející z různých druhů krátkovlnných záření (např. vnější fotoefekt nebo tepelná emise elektronů).
- [11]

Jak je psáno výše, výboje se dělí na samostatné a nesamostatné. Tak je to i se samotnou vodivostí. Taktéž můžeme pozorovat vodivost samostatnou a nesamostatnou. Pokud se volné nosiče elektrického náboje vytváří pouze pomocí vnějších ionizačních činidel, což se děje ve slabých elektrických polích, nazýváme takovouto vodivost nesamostatnou. Naopak v silných elektrických polích vzniká elektrická vodivost samostatná. Zde dochází k nárazové ionizaci. Tato vodivost úzce souvisí s elektrickou pevností, kterou budeme popisovat až později. [11]

3.4.2 Elektrická vodivost v kapalných a pevných izolantech

Elektrickou vodivost v kapalných a pevných izolantech nebudu v této práci dopodrobna rozebírat. Tato problematika je totiž značně komplikovaná a dodnes skrývá nezjištěná fakta. Komplikovanost je dána zejména rozmanitostí a složitostí struktury těchto izolantů.

Kapaliny se od plynů v mnohém liší. V kapalinách jsou molekuly mnohem blíže u sebe než v plynech, což má za následek značné omezení hybnosti jednotlivých molekul. Proto v kapalinách vznikají pevnější spojení (tzv. klastry). Jelikož se klastry a samozřejmě i jednotlivé atomy mohou posunovat, dochází k tomu, že kapaliny mohou téci a kopírovat tudíž nádobu, ve které jsou uzavřené. Elektrickou vodivost kapalin ovlivňuje hlavně její složení a struktura či příměsi obsažené v ní. [11]

U pevných izolantů je konduktivita neboli měrná elektrická vodivost velice nízká hlavně při splnění těchto podmínek:

- na pevný izolant působí pouze slabé elektrické pole.
- izolant se nenachází v místě s příliš vysokou teplotou. [11]

3.5 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je velice významnou veličinou právě pro elektroizolační materiál, jelikož tento materiál zcela jasně charakterizuje.

Pokud přikládané elektrického napětí překročí kritickou mez danou pro určitý materiál, dojde k rychlému zvýšení četnosti volných nosičů elektrického náboje a zároveň se zvýší jejich pohyblivost. Rezistivita daného materiálu následkem toho prudce klesá, což způsobí také rychlý pokles izolační schopnosti. A pokud klesne izolační schopnost, respektive rezistivita, zvýší se (podle rovnice 2.4.1) konduktivita. Následkem tohoto procesu je výboj, což znamená, že původně zcela odizolovaná místa s odlišným potenciálem jsou nyní spojena vodivou cestou. Nastává průchod elektrického proudu mezi těmito dvěma místy. [11]

Z hlediska času si můžeme tento proces vzniku elektrického výboje rozdělit do dvou časových úseků. V prvním časovém úseku dochází (jak je již popsáno výše) k rychlému nárůstu konduktivity, což končí samotným výbojem. Mechanismy jevů v prvním časovém úseku se liší podle skupenství prostředí, ve kterém vznikají. Druhý úsek nastává po odeznění vlastního výboje a projevují se zde procesy, které mohou mít velké degradační účinky. Na rozsah těchto degradačních účinků má velký vliv samotná struktura daného materiálu a výkon

zdroje elektrické energie. Značná degradace nastává po vzniku elektrického oblouku, který vzniká v místě výboje. Tyto procesy značně degradují nejen samotný izolant, ale i materiály, které přijdou do styku s tímto elektrickým obloukem. [11]

Další věc, kterou musíme rozlišovat a která se týká skupenství látek, je průraz a přeskok. Pokud nastane elektrický výboj v pevném izolantu, hovoříme o průrazu. Pevnému dielektriku se průrazem trvale zhorší jeho izolační vlastnosti. Pokud však elektrický výboj nastane v plynném či kapalném dielektriku, hovoříme o tzv. přeskoku. Největším rozdílem mezi přeskokem a průrazem je fakt, že zhoršení izolačních vlastností při přeskoku je pouze dočasné. Je to způsobeno společnou vlastností plynů a kapalin, kterou je možnost regenerace. [11], [16]

Při vzniku výboje, ať už se jedná o přeskok či průraz, se vždy překročí určité kritické elektrické napětí. Toto napětí se nazývá průrazné napětí a označuje se U_p . Průrazné napětí je silně ovlivněno okolní teplotou, vlhkostí, tlakem či znečištěním samotného dielektrika. [11], [16]

Průrazné napětí úzce souvisí právě s popisovanou elektrickou pevností. Vzájemný vztah mezi elektrickou pevností E_p , tloušťkou izolantu v místě průrazu d a průrazným napětím U_p je následující:

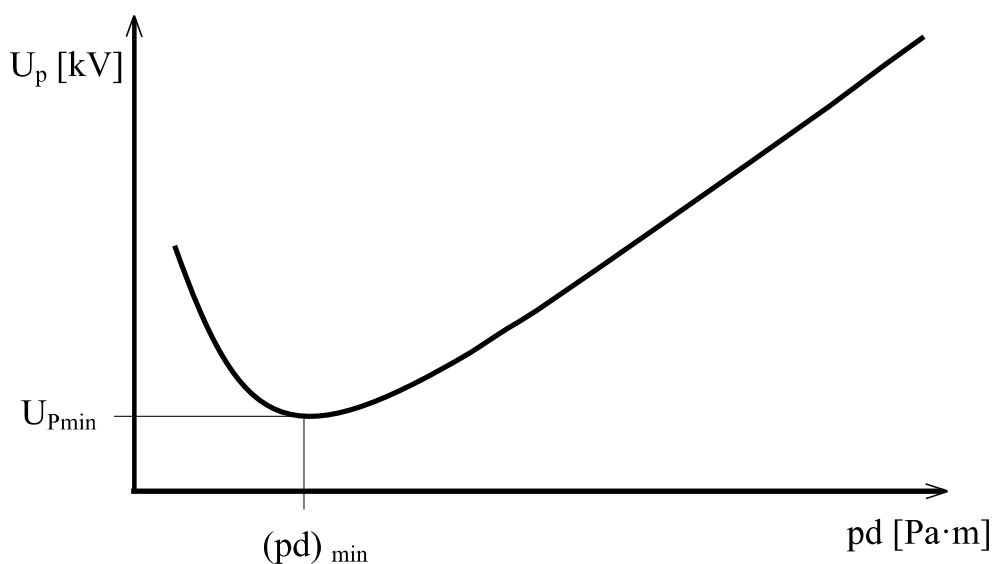
$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad [V \cdot m^{-1}, V, m]. \quad (2.5.1) \quad [11], [16]$$

3.5.1 Paschenův zákon

Mluvíme-li o elektrické pevnosti plynů, nesmíme zapomenout na Paschenův zákon.

Paschenův zákon definuje funkce $U_p = f(p \cdot d)$ [kV, Pa, m], kde U_p je průrazné (zde spíše přeskokové) napětí, p je tlak plynu a d je vzdálenost elektrod. Tento zákon charakterizuje podmínky přeskoku a to hlavně díky poloze minima na Paschenově křivce (obr. 3.5.1). Hodnoty $U_{p\min}$ a $(pd)_{\min}$ jsou charakteristické a různé pro každý plyn. V levé

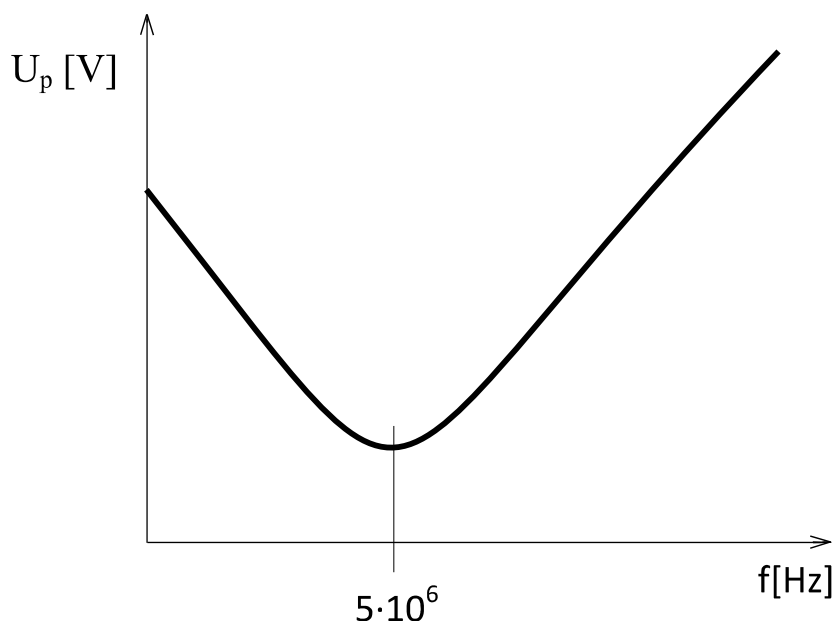
sestupné části křivky (tzv. oblast malých tlaků) jsou volné dráhy částic příliš velké, proto některé elektrony nenarazí na žádnou molekulu plynu, nemohou tak přispět k vytvoření dalších nosičů elektrického náboje, což má za následek nutnost použití vyššího napětí. V pravé vzestupné části křivky (tzv. oblast vysokých tlaků) jsou naopak volné dráhy příliš malé, proto se elektrony sráží s neutrálními molekulami plynu příliš brzy a nestačí tak získat potřebnou kinetickou energii pro ionizaci molekul. Jak v oblasti malých tlaku, tak v oblasti velkých tlaků probíhá ionizace energeticky nevýhodně. Naopak v minimu Paschenovy křivky jsou energeticky optimální podmínky pro vznik a udržení výboje v plynném izolantu. [11], [19]



Obr. 3.5.1 Paschenova křivka [11], [19]

3.5.2 Závislost elektrické pevnosti plynů na frekvenci

Přeskokové napětí je u nízkých frekvencí stejné, jako když je namáháno stejnosměrným elektrickým proudem. Do určité meze přeskokové napětí plynu klesá s rostoucí frekvencí elektrického pole. Je to způsobeno kmitáním elektronů mezi elektrodami, čímž se vytvářejí dobré podmínky pro nárazovou ionizaci molekul plynu. Od určité frekvence ovšem roste elektrická pevnost z důvodu zkráceného času, po který je elektron urychlován vnějším elektrickým polem. Elektron, který je urychlován pouze krátkou dobu, není schopen dosáhnout tak velké kinetické energie a proto klesá pravděpodobnost nárazové ionizace neutrální molekuly plynu. Z toho vyplývá opětovné zvyšování přeskokového napětí, což je vidět v obr. 3.5.2. [11]

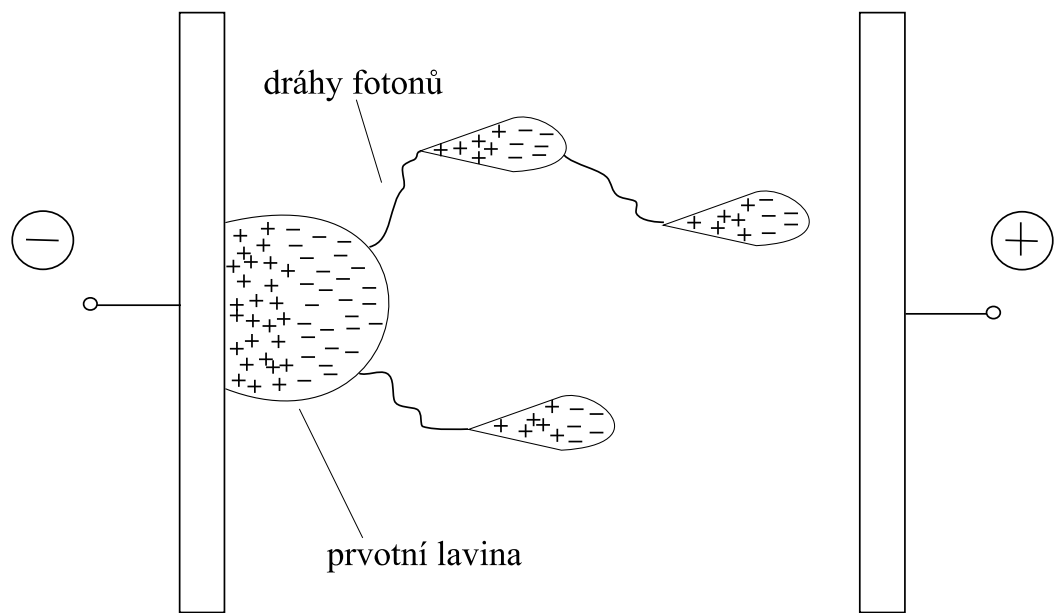


Obr. 3.5.2 Závislost přeskovového napětí na frekvenci při atmosférickém tlaku [11]

3.5.3 Kanálová neboli streamerová teorie přeskoku

Vznik jiskry v homogenním elektrickém poli při větších vzdálenostech (řádově 10^{-2} m) trvá 10^{-6} až 10^{-7} sekund (experimentálně zjištěné časy). Z předchozí věty je jasné, že rychlost vzniku jiskry je přibližně 10^5 m·s⁻¹. Volné elektrony se při přeskokách v plynech pohybují rychlostí 10^7 m·s⁻¹, ionty se však v této situaci pohybují pomaleji (10^3 m·s⁻¹). Proto je logické, že kladné ionty nemají šanci projít celou vzdálenost mezi elektrodami, dopadnout na katodu a uvolnit tak potřebné množství elektronů. Po podrobném výzkumu byla proto zpracována kanálová neboli streamerová teorie přeskoku. [11]

V počátečním stádiu výboje se tvoří elektronová lavina, která je vyvolána nárazovou ionizací. Za lavinou zůstávají kladné ionty, které jsou v porovnání s rychlostí elektronů v elektronové lavině výrazně pomalejší (jak bylo uvedeno v předchozím odstavci). Pro zkrácení času, který ionty potřebují k cestě mezi elektrodami, pomáhá fotoionizace (popsaná v odstavci 2.4.1). Díky fotoionizaci vzniká záření, vycházející z prvotní laviny, díky němuž vznikne před čelem prvotní laviny nový elektron, který se začne pohybovat k anodě a vlivem nárazové ionizace vytvářet další lavinu. Stálým opakováním tohoto procesu vznikají nové laviny na místech, kam předchozí lavina ještě neměla možnost dospět. Takto vzniká streamer – sekundární laviny spojené do úzkého kanálu. Když se takto vytvoří kanál vodivé plazmy, který spojí obě elektrody, nastává přeskok. Streamer je vidět na obr. 3.5.3. [11]



Obr. 3.5.3 Vznik kanálového výboje [11]

4 Částečné výboje

Částečný výboj je elektrický jiskrový výboj s velmi malou energií, při jehož vzniku nedojde k přímému přemostění elektrod s různým potenciálem. Tento lokální výboj vzniká v plynu uvnitř dielektrické izolace nebo na povrchu zařízení a je často také důkazem o zvýšené koncentraci elektrického namáhání ať přímo v izolaci, či na povrchu této izolace v blízkém okolí vodičů. Většinou se částečný výboj objevuje v oslabeném místě izolace a vede k postupné destrukci izolace. [16], [17] Takovéto částečné výboje se většinou objevují jako impulzy s velice krátkou dobou trvání. Doba trvání u takového impulzu nebývá větší než 1 μ s. [18]

4.1 Rozdělení částečných výbojů

Podle místa výskytu částečných výbojů je dělíme na:

- vnitřní neboli interní částečné výboje,
- povrchové částečné výboje,
- vnější neboli externí částečné výboje.

Vnitřní částečné výboje vznikají v plynech. Tyto výboje jsou obklopené kapalným či pevným dielektrikem (např. výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku). Povrchové částečné výboje jsou výboje vznikající v blízkém okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Vnější částečné výboje vznikají v plynech poblíž elektrod, které mají malý poloměr nebo velké zakřivení (příkladem jsou korónové či doutnavé výboje). [16], [17]

4.2 Detekce částečných výbojů

Detekovat částečné výboje je za určitých podmínek možné na povrchu zařízení, které pracuje s napětím amplitudy větším než 700 V. Můžeme tedy detekovat částečné výboje i v zařízeních pracujících v normální provozní síti s napětím nad 500 V. [17]

4.3 Metody detekce částečných výbojů

Metod, kterými lze měřit výbojové činnosti, je mnoho. Jsou to jak metody elektrické, tak také metody neelektrické. V současné době se čím dál častěji používají metody, při kterých lze měřit bez nutnosti odstávky zařízení. Používají se tedy přímo při provozu. Jde o tzv. on-line měření. Při off-line měření se naopak používají metody, kdy je nutné zařízení odpojit a odstavit. [17]

4.3.1 Neelektrické metody detekce částečných výbojů

Mezi neelektrické metody patří metody dělené podle zkoumaných projevů:

- akustické,
- optické,
- chemické. [17]

Neelektrické metody detekce částečných výbojů jsou založeny na principu snímání neelektrických projevů částečných výbojů, jako je vznik zvukových vln ve slyšitelném a ultrazvukovém pásmu, světelného záření viditelného a ultrazvukového pásma, chemických zplodin výbojové činnosti nebo tepelného ohřevu okolí. Pro snímání těchto neelektrických projevů se používají speciální měřicí zařízení (např. směrové mikrofony, kamery pro noční vidění, termovize atd.). [16]

4.3.1.1 Akustická metoda detekce

V této metodě jsou detekovány mechanické (akustické) kmity šířící se od místa vzniku akustické emise, která je způsobena částečnými výboji. [16], [17] Pro měření akustických signálů jsou používány vhodné mikrofony snímající ve slyšitelném nebo v ultrazvukovém pásmu, případně jiná čidla (např. piezoelektrická). [22] Jsou dvě možnosti lokalizace místa vzniku částečných výbojů. První možností je použití pouze jednoho mikrofону, se kterým se postupně hledá místo nejsilnějšího signálu. [16], [17] Druhá možnost je použití několika

pevně připevněných mikrofonů a následné softwarové zpracování naměřených dat. [23]

Chceme-li detekovat částečné výboje v prostředí s velkým okolním hlukem, je vhodné použít mikrofony snímající v ultrazvukovém pásmu. Ultrazvukové vlny jsou totiž krátké, vykazují větší směrovost a jsou velmi charakteristické pro částečné. Velká výhoda této metody spočívá v tom, že lze měřit on-line. [16], [17]

4.3.1.2 Optická metoda detekce

Opticky se výbojová činnost projevuje jak ve viditelném spektru, tak v dalších spektrech jako je ultrazvukové nebo infračervené. Výbojová činnost zanechává v zařízení také viditelné stopy poškození. Takovéto poškození nám také poskytuje informace, které lze využít na lokalizaci a určení rozsahu působení částečných výbojů. [16] Přítomnost částečných výbojů můžeme detekovat také pomocí vhodné termovizní kamery s velkou citlivostí. Částečné výboje se totiž projevují i lokálním ohřevem v místě vzniku. [22]

4.3.1.3 Chemická metoda detekce

Měření částečných výbojů chemickou metodou spočívá v analýze produktů vzniklých při činnosti těchto výbojů. Chemická detekce je převážně využívána na přístrojích, které jsou izolovány plynem nebo olejem. Následná analýza vzniklých chemických produktů slouží ke zjištění míry degradace přístroje. Částečné výboje mají jen velmi malou energii, proto se chemické metody detekce používají spíše u izolačních systémů, které jsou těmto výbojům vystaveny dlouhodobě (např. olejové náplně transformátorů). [16]

4.3.2 Elektrické metody detekce částečných výbojů

Používanější metody detekce částečných výbojů jsou metody elektrické. Jejich výhodou oproti neelektrickým metodám je hlavně jejich lepší citlivost. Elektrické metody detekce jsou založeny na měření proudových impulzů, které vznikají společně s částečnými výboji. Proudové impulzy jsou snímány vhodným obvodem a naměřené hodnoty těchto impulzů jsou následně přesnou odezvou sledovaných částečných výbojů. [16], [17]

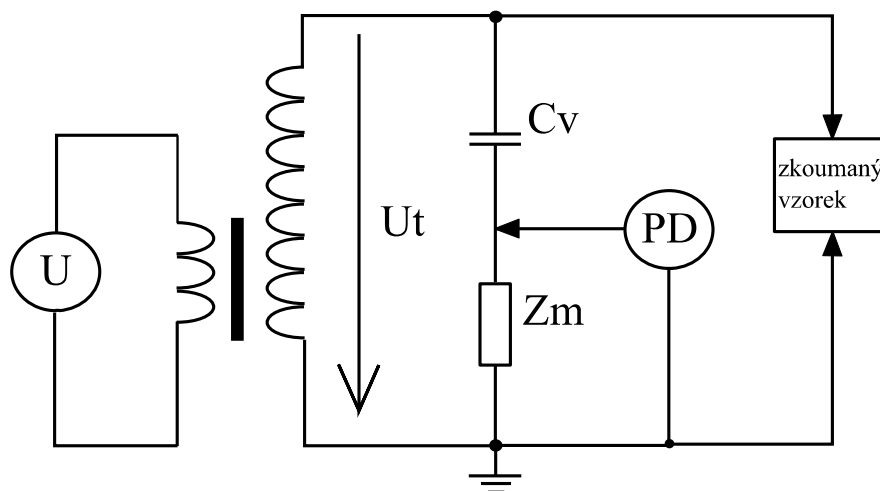
Mezi elektrické metody detekce patří například:

- Galvanické metody měření částečných výbojů,
- Elektromagnetické sondy – kapacitní a induktivní sondy,
- UHF senzory pro měření částečných výbojů.

Tyto metody se ještě rozdělují podle toho, zda se částečné výboje měří v celém zkoumaném objektu (metody globální), nebo zda je úkolem měření najít místo výskytu částečných výbojů ve zkoumaném objektu (metody lokalizační). [17]

4.3.2.1 Galvanické metody měření částečných výbojů

Tato metoda je jednou z nejpoužívanějších globálních metod pro detekci částečných výbojů. Sleduje impulzy částečných výbojů pomocí měřící impedance, která je ve většině případů realizována jako RLC obvod s ochranou proti přepětí. Přímé měření částečných výbojů specifikuje norma ČSN EN 60270 [23]. Příklad často používaného zapojení měřícího obvodu složeného z tlumivky a rezistoru je na *obr. 4.3.1*. [16], [17]



Obr. 4.3.1 Základní zapojení galvanické metody pro měření částečných výbojů [17]

Velkou výhodou galvanického měření je vysoká citlivost a také možnost použít tuto metodu při chodu zařízení, řadí se tedy mezi tzv. on-line měření. Nevýhody této metody jsou

v citlivosti na rušivé vlivy (např. rušení rádiovými vlnami nebo dokonce rušení způsobované samotnými prvky v měřícím obvodu). [16], [17]

4.3.2.2 Elektromagnetické sondy

Metody detekce, kde využíváme elektromagnetických sond, můžeme také použít on-line, tedy za provozu zkoumaného objektu. Nevýhodou je obtížné filtrování rušivých signálů (např. rádiové frekvence). Měření pomocí kapacitních a induktivních sond patří k nepřímým metodám měření částečných výbojů. Princip těchto metod je založen na snímání vyzářené vysokofrekvenční energie v místě vzniku částečného výboje do okolí. [17]

KAPACITNÍ SNÍMAČE – nejčastěji používaným typem kapacitní sondy je snímač koaxiálního tvaru. Kapacity tohoto snímače jsou definovány takto:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_b}{r_v}}, \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_p}{r_B}}, \quad (2.5.1) [16]$$

kde l je délka sondy, r_v je poloměr vodiče, r_b je poloměr snímače, r_p je poloměr vnějšího pláště kabelu. [17]

Koaxiální kapacitní sondy jsou využívány hlavně pro měření na kabelových koncovkách. [16]

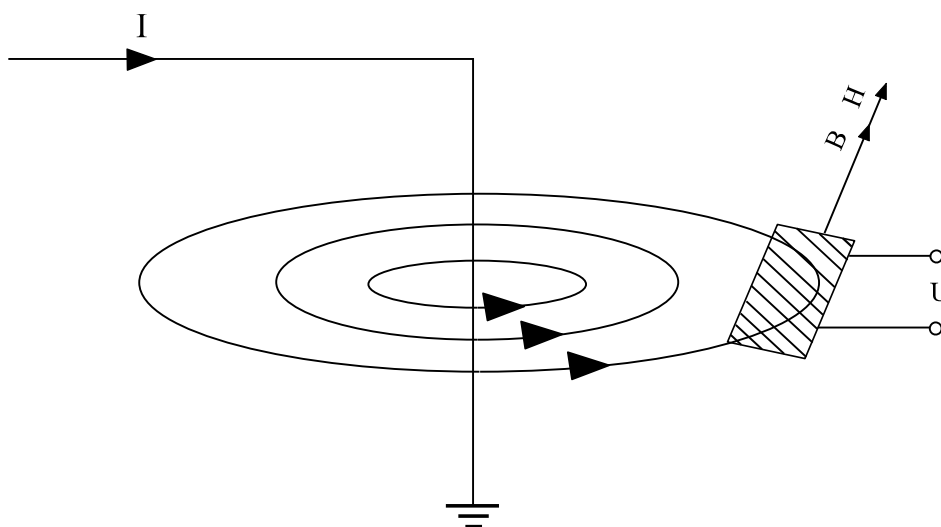
INDUKTIVNÍ SNÍMAČE – snímají magnetické pole vyzářované zdrojem částečných výbojů. Existují dva typy induktivních snímačů:

- toroidní sondy,
- lineární induktivní sondy.

U toroidní sondy je vodič zemnicího spojení veden středem toroidu a tvoří tak primární vinutí. Vinutí navinuté na toroidu tvoří vinutí sekundární. Takto popsaný případ (snímač

umístěn okolo zmíněného zemnicího přívodu) je nejpoužívanějším pro detekci částečných výbojů detekovanou těmito snímači. [16], [17]

Lineární induktivní sondy se na rozdíl od sond toroidních umísťují do elektromagnetického pole tím způsobem, aby podélná osa snímače byla orientována souhlasně s vektory intenzity magnetického pole H a magnetické indukce B (obr. 4.3.4). [16], [17]



Obr. 4.3.4 Schéma zapojení lineární induktivní sondy [25]

Velkou výhodou použití lineární sondy je, že, na rozdíl od té toroidní, není při jejím použití nutné přerušovat elektrický obvod zkoumaného přístroje. [25]

4.3.2.3 UHF senzory pro měření částečných výbojů

Metoda využívající UHF (Ultra High Frequency) senzory pro měření částečných výbojů souvisí s elektromagnetickými impulzy. Při výboji jsou totiž elektrony odtrženy od atomu nebo molekuly, z klidové polohy jsou urychlovány elektrickým polem, což zapříčiní nárůst proudu, a za krátký časový úsek jsou opět uvedeny do klidové polohy, což zapříčiní pokles proudu. Při těchto procesech dochází ke změnám rychlosti pohybu elektrického náboje a to má za následek vznik elektromagnetického pole. Takto vzniklé elektromagnetické impulzy se následně šíří rychlostí světla od místa výbojové činnosti všemi směry a jsou detekovány senzory pro detekci těchto impulzů v pásmu UHF. [26]

5 Projevy výbojové činnosti

Společně s výbojovou činností probíhají v izolantech i jiné fyzikální jevy elektrického i neelektrického charakteru, které jsou nedílnou součástí tohoto procesu. Při výbojové činnosti nevznikají v izolantu pouze proudové impulzy. Vznikají také chemické zplodiny, světelné záření viditelného i ultrafialového spektra, jsou generována vysokofrekvenční elektromagnetická pole a vzniká také tepelný ohřev a zvukové vlny ve slyšitelném i ultrazvukovém pásmu. [16]

5.1 Působení vnitřních částečných výbojů

Výbojová činnost způsobuje dlouhodobým namáháním selhávání izolací. Toto selhání vede ke zhoršení především elektrických vlastností daného materiálu. Tyto fyzikální i chemické změny v pevném izolantu jsou navíc nevratné. Způsobují to především částečné výboje v nehomogenitách dielektrika (např. ve vzduchové bublince u pevného dielektrika). [16]

Dva základní děje, které způsobují degradaci dielektrik, jsou:

- chemická degradace dielektrika,
- bombardování stěn dutiny částicemi, které dopadají na povrch izolantu (např. ionty).

Dalším faktorem, který napomáhá zvyšovat vodivost, je například vlhkost. [16]

Přítomnost částečných výbojů vyvolává vznik lokálních pevných produktů na nehomogenitě. Těmito pevnými produkty jsou krystaly, které byly určeny jako hydrát kyseliny šřavelové. Prostor zvětšený o konečky krystalů vede k dalšímu zintenzivnění nehomogenního elektrického pole na koncích krystalů, což vede ke zvýšení počtu lokálních částečných výbojů a k tvorbě prohlubní v dielektriku. V takto vytvořených prohlubních začíná růst elektrického stromečku, což může vést i k celkovému průrazu dielektrika. [16]

Na odlišné skupiny izolačních materiálů působí výbojová činnost různými způsoby. Velký rozdíl je mezi organickými a anorganickými materiály. Zatím co anorganické skupiny materiálů (např. porcelán, slída atd.) jsou i při dlouhodobém namáhání vůči účinkům částečných výbojů poměrně odolné, organické materiály (např. PET) jsou náchylné i při krátkodobém namáhání. [16]

5.1.1 Chemické účinky

Při dlouhodobém elektrickém namáhání mohou v materiálu vznikat chemické účinky výbojů. Prvotní chemická reakce se odehrává vlivem částečných výbojů ve vlhkosti a v produktech odloučených ze vzduchu. Produkty vzniklé chemickou reakcí (mohou být plynné, kapalné i pevné) dále pronikají do okolního pevného dielektrika a vytvářejí tam vodivé oblasti. [16]

5.1.2 Elektrické účinky

Vznikne-li v dutince dielektrika elektrický oblouk, je pravděpodobnost vzniku vodivé dráhy velice vysoká. Následný ničivý účinek je vyvolán ionty a elektrony, které bombardují stěny dutinky. Při vysoké intenzitě působícího elektrického pole může dojít i k postupnému šíření vodivé dráhy dielektrikem a následně k čistému elektrickému průrazu dielektrika. [16]

5.1.3 Tepelné účinky

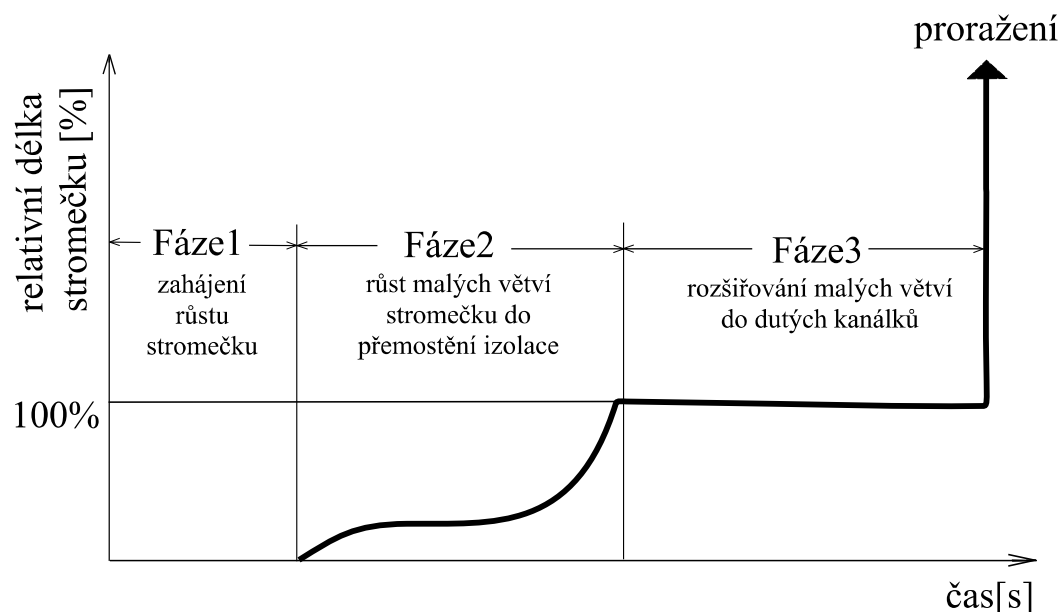
Aktivita částečných výbojů v dielektriku může zapříčinit zvýšení teploty, která může vést k tepelné nestabilitě dielektrika a následnému tepelnému průrazu. [20]

Avšak dodnes nebylo prokázáno, že by stárnutí dielektrika ovlivňovala teplota vyvolaná částečnými výboji. Nicméně zvýšená teplota při existenci elektrického stromečku urychluje jeho růst v dielektriku, čímž se zmenšuje doba potřebná na průraz dielektrika. [21]

5.2 Elektrický stromeček

Růst elektrického stromečku znamená šíření vodivé cesty dielektrikem vlivem působení vnitřních částečných výbojů. Můžeme růst stromečku rozdělit do několika časových fází,

které můžeme vidět na obr. 5.2.1. [16]



Obr. 5.2.1 Fáze růstu elektrického stroměčku v dielektriku [18]

Jen velice citlivou technikou lze detekovat první fáze růstu elektrického stroměčku (Fáze1). [16]

Druhá časová fáze (Fáze2) nastává po vytvoření první větve elektrického stroměčku. V této fázi se větve stroměčku rozrůstají o další malé větve rostoucí k uzemněné elektrodě. Druhá fáze končí v okamžiku, kdy stroměček dosáhne na uzemněnou elektrodu. Malé větve v této fázi mají velice nízkou vodivost, protéká jimi tedy malý proud a nedochází tak zatím k průrazu. [16] Tyto malé větve mívají v nejsilnějších místech průměr menší než $10\ \mu\text{m}$ a v tenkých špičkách nedosahuje jejich průměr ani $1\ \mu\text{m}$. Bylo také zjištěno, že čas, kdy dochází k prvnímu spojení elektrod, tedy čas od počátku růstu stroměčku do konce druhé časové fáze, je přibližně jen 24 % z celkového času potřebného k totálnímu průrazu dielektrika. [18]

Třetí fáze (Fáze3) nastává v okamžiku, kdy dojde k prvnímu spojení elektrod, a končí totálním průrazem dielektrika. V této fázi se již větve stroměčku rozšiřují na velikost mezi $60\ \mu\text{m}$ až $150\ \mu\text{m}$. [18] Tyto již silné větve jsou duté a jakmile takto silná dutá větev dosáhne uzemněné elektrody, nastává totální průraz dielektrika. [16]

6 Návrh zařízení pro simulaci akustických projevů výbojové činnosti

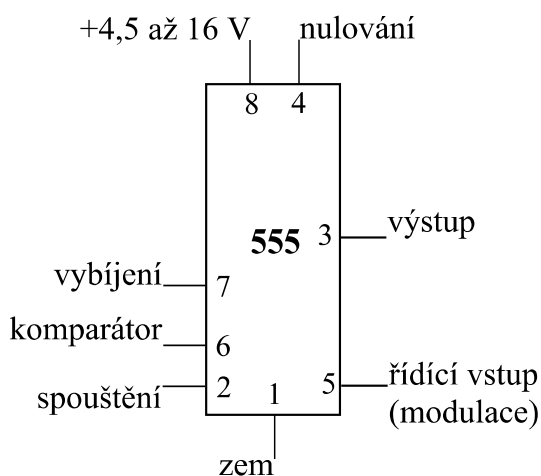
Po konzultaci s vedoucím práce jsme se domluvili na zpracování návrhu pro zařízení s názvem PLAZMOVÝ REPRODUKTOR. Toto zařízení se dá najít i pod názvy jako zpívající výboj či hrající plazma výboj.

Plazmový reproduktor je založen na principech, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách této práce (vznik výboje → zvýšení teploty vzduchu v místě vzniku → vzduch kolem vzniku výboje se rychle rozpíná a následně opět smršťuje → vznik zvukové vlny). [27]

Pro konkrétní návrh jsem použil budič s obvodem 555.

6.1 Obvod 555

Obvod 555 ve svém čipu ukrývá jen něco málo přes 20 tranzistorů a 10 rezistorů. Přesto, že se nejedná o nejnovější integrovaný obvod (vyroben již v roce 1972), je neustále vyráběn a používán i dnes v řadě moderních přístrojů. Tento integrovaný obvod byl vyvinut jako časovač a na jeho čipu nalezneme kombinaci analogových a číslicových obvodů. [28] Na obr. 6.1.1 je znázorněno rozložení pinů v tomto obvodu.



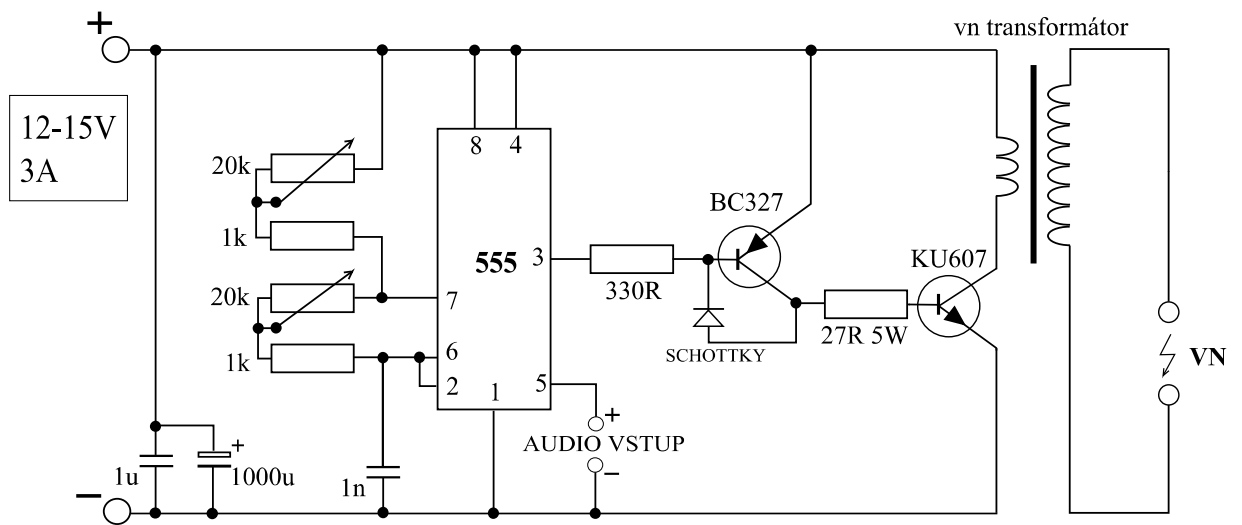
Obr. 6.1.1 Rozmístění pinů obvodu 555 [28]

Tento časovač lze použít s různými pracovními frekvencemi (i více než 500 kHz). My se zaměříme na frekvence slyšitelné lidským uchem, tudíž frekvence 20 Hz až 20 kHz. Takovéto frekvence mohou být použity ke generování zvuku. [29]

6.2 Popis zapojení

Jak je již psáno výše, pro můj návrh jsem použil budič s obvodem 555. Inspiroval jsem se na internetové stránce [30], kde jsem našel schéma pro sestavení zdroje vysokého napětí. Schéma, které je na *obr. 6.2.1*, jsem upravil přidáním audio vstupu na 5. pin u časovače 555 a odebráním vysokonapětových diod a vysokonapětového kondenzátoru. Díky přidání audio vstupu na řídicí vstup časovače 555 docílíme kýženého efektu „zpívajícího výboje“ a odebrání části obvodu s vysokonapětovými součástkami bude mít za následek neusměrnění a neznásobení výsledného vysokého napětí. V původním schématu dosahovalo výsledné napětí 40 000 V, v mém návrhu bychom měli dosahovat hodnot kolem 13-16 kV (podle typu použitého vysokonapětového transformátoru).

V zapojení je použit stejnosměrný zdroj (12V, 3A). Oscilátor s obvodem 555 dokáže pracovat na frekvenci od 17 kHz do 21 kHz, tuto frekvenci lze jemně doladit pomocí potenciometrů a docílit tak maximálního výstupního napětí. Výstupem je řízen první tranzistor typu PNP (BC327). Druhý tranzistor typu NPN (KU607) zde slouží jako výkonový zesilovač. Schottkyho dioda v obvodu brání saturaci (nasycení) prvního tranzistoru a tím urychluje spínání, není zde však nezbytně nutná. Druhý tranzistor je náchylný na přehřátí a je proto potřeba ho alespoň pasivně chladit. Napětí se transformuje ve vysokonapětovém transformátoru (nesmí být usměrněn), který lze získat ze starého černobílého televizoru. [30]



Obr. 6.1.1 Schéma plazmového reproduktoru

7 Závěr

V první části této práce jsem se seznámil se základními druhy elektrických výbojů a s výboji v přírodě. Následně jsem se dozvěděl něco více o principech vzniku elektrického výboje v izolantech a o rozdělení izolantů a dielektrik. Získal a použil jsem v práci také informace týkající se polarizace dielektrika, ionizace atomů a molekul, elektrické vodivosti dielektrik a elektrické pevnosti. Poté jsem se zabýval částečnými výboji, rozdělením částečných výbojů a hlavně jejich detekcí. Popsané metody detekce částečných výbojů jsem rozdělil na elektrické a neelektrické. Dalším tématem, kterým se zabývá tato práce, jsou projevy výbojové činnosti. Pod toto téma jsem zařadil působení vnitřních částečných výbojů a růst elektrického stromečku.

Po této teoretické rešerši jsem se zabýval návrhem zařízení pro simulaci akustických projevů výbojové činnosti. Po konzultaci s vedoucím práce jsem se rozhodl navrhnout zařízení, které nejenom že ukáže akustické projevy výbojové činnosti, dokáže navíc tyto akustické projevy řídit. Návrhem je tedy plazmový reproduktor neboli zpívající výboj. V mnoha informačních zdrojích jsem našel spoustu článků, schémat a nápadů na realizaci takového zařízení. Nakonec jsem se rozhodl pro obvod s časovačem 555 a neusměrněným vysokonapěťovým transformátorem.

Tento návrh zařízení jsem se rozhodl také zrealizovat. Na vývoji zařízení ovšem stále pracuji a jeho konečná podoba může být trochu odlišná od mého návrhu v této práci.

8 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Plazma: Elektrický proud v plynech. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA, UK. [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://atrey.karlin.mff.cuni.cz/~marble/d/?p=3>
- [2] Svítíme: Jiskrový výboj. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA, UK. [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/svitime/jiskrovy_vyb.html
- [3] Svítíme: Koróna. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA, UK. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/svitime/korona.html>
- [4] Svítíme: Doutnavý výboj. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA, UK [online]. [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/svitime/dout_vyb.html
- [5] Elektřina: Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE. KUSALA, Jaroslav. ČEZ. *Vedení elektrického proudu v plynech a vakuu* [online]. 2003 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/2-3.htm>
- [6] Amateur stormchasing society: Projekt občanského sdružení Amatérská meteorologická společnost. [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.bourky.com/projekt-cg-blesky>
- [7] SYNAKOVÁ, Linda. *Optické jevy v přírodě*. Brno, 2006. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/53965/lf_b/BAKALARKAtext.doc.pdf Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta. Vedoucí práce Doc.MUDr.Svatopluk Synek, CSc.
- [8] Bouře a blesky. FALTUS, Václav. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA, UK. [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://utf.mff.cuni.cz/vyuka/OFY016/F2000/Faltus.html>
- [9] TRÁVNÍČEK, Tomáš. *INDIKÁTOR BOUŘKY (INDIKÁTOR BLESKŮ)*. Brno, 2011. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/774/INDIKÁTOR%20BOUŘKY.pdf?sequence=1> . Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.
- [10] Elektřina: Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE. KUSALA, Jaroslav. ČEZ. *Blesky a hromy* [online]. 2003 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/zaj2.htm>
- [11] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [12] Elektrostatika: Vodič a izolant v el. poli. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA, UK. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/el_pole/elstat.html#vodic

- [13] HOFMANN, Jaroslav a Marie URBANOVÁ. *Fyzika I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011, 259 s. ISBN 978-80-7080-777-4.
- [14] Fyzika Jam: Elektřina a magnetismus. JANOVSKEÝ, Michal. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.fyzika-jam.wz.cz/index.php?page=lekce/elemag>
- [15] VÁVRA, Václav a Zdeněk LOSOS. ÚSTAV GEOLOGICKÝCH VĚD, Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita, Brno. *Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium* [online]. [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_3_3_ionty/kap_3_3_ionty.htm
- [16] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [17] HAVLÍČEK, Tomáš. Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech: Partial Discharge in High Frequency Electronic Equipment. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. Dizertační práce.
- [18] VOGELSANG R. – FRUTH B. et. al.: Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements. *European Transactions on Electrical Power*. Volume 15, Issue 3, s. 271–284.
- [19] KUBEŠ, Pavel. FEL ČVUT. *Impulzní silnoproudé výboje a jejich diagnostika: studijní text pro doktorské studium*. Praha, 2004. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/studium/vyboje.pdf>
- [20] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1982, 301 s.
- [21] MORSHUIS, P.: Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some Thoughts on Progress Made and Where to Go Now, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, Number 5, strana 905-913
- [22] ONDREJKA, V. *Metody pro záznam výbojové činnosti*. Plzeň, 2004. Diplomová práce. ZČU.
- [23] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím: měření částečných výbojů*. Praha: ČSNl, Prosinec 2001.
- [24] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 2005, 135 s. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-X.
- [25] BALOGH, J. *Lineárne toroidálne induktívni sondy ich aplikácie v elektrotechnike*. Košice, 2001. Disertační práce.
- [26] TRNKA, Pavel a Magdalena BUJALOBOKOVA. DETEKCE PORUCH VN STROJŮ ANALÝZOU VÝBOJOVÉ ČINNOSTI SE ZAMĚŘENÍM NA TRANSFORMÁTORY. *Fail Detection of HV Machines Through Discharge Analysis – Focused on Transformers*. s. 112-116. Dostupné z: <http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/169>
- [27] High voltage labs: Plazmový reproduktor - hrající výboj ("singing arc") s TV trafem. [online]. [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: <http://hv-labs.xf.cz/singarc.html>

- [28] Pandatron - Elektrotechnický magazín: 555 a 556 - Popis obvodu. [online]. 2008 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?489&555_a_556_-_popis_obvodu
- [29] Pandatron - Elektrotechnický magazín: 555 a 556 - Základní zapojení. [online]. 2008 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?490&555_a_556_-_zakladni_zapojeni
- [30] ELEKTRO - SCHÉMATA A KONSTRUKČNÍ NÁVODY: Zdroj vysokého napětí 40 000 V. [online]. [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://danyk.cz/zdrojvn.html>