

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Fyzikální procesy v dielektriku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel VEISHEIPL**
Osobní číslo: **E10B0267P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Fyzikální procesy v dielektriku**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zpracujte přehled jevů, které jsou podstatné pro chování dielektrika v elektrickém poli.
2. Charakterizujte chování plyných dielektrik (ionizační procesy, závislost pevnosti na tlaku, nehomogenní pole) a typy výbojové činnosti.
3. Charakterizujte chování kapalných a pevných dielektrik (polarizace dielektrika, elektrická pevnost).
4. Formulujte závěry o vlivu těchto dějů na kvalitu izolačního systému u zařízení vysokého napětí.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. IEEE Xplore Digital Library - <http://ieeexplore.ieee.org>
2. Veverka, A.: Technika vysokých napětí. SNTL 1982.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Martínek, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zpracování problematiky výbojové činnosti v dielektriku, a to v případě plynného, pevného i kapalného dielektrika. Tato práce také uvádí základní používané dielektrické materiály.

Klíčová slova

výboj, průraz, přeskok, dielektrikum, izolant, elektrické pole.

Abstract

The aim of this Bachelor thesis is to formulate a discharge problematic in gaseous, solid and liquid dielectrics. This thesis also states some basic dielectric materials which are being used.

Key words

discharge, breakdown, electrical flashover, dielectric, insulant, electric field.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 3.6.2013

Karel Veisheipl

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Martínkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady během konzultací, odborné připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	3
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	4
ÚVOD	5
1 ZÁKLADNÍ POJMY	6
1.1 DIELEKTRIKUM	6
1.2 IZOLANT	6
1.3 IONIZÁTOR	6
1.4 ELEKTRICKÝ VÝBOJ	6
1.5 ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ	6
1.6 PRŮRAZ	6
1.7 PŘESKOK	7
1.8 ELEKTRICKÁ PEVNOST ZAŘÍZENÍ	7
1.9 ELEKTRICKÁ PEVNOST IZOLANTU	7
1.10 HOMOGENNÍ POLE	8
1.11 NEHOMOGENNÍ POLE	8
2 PLYNNÁ DIELEKTRIKA	8
2.1 VÝBOJE V PLYNECH	8
2.1.1 <i>Rozdělení výbojů</i>	8
2.1.2 <i>Townsendův samostatný výboj</i>	10
2.1.3 <i>Paschenův zákon</i>	15
2.1.4 <i>Doutnavý výboj</i>	19
2.1.5 <i>Obloukový výboj</i>	19
2.1.6 <i>Korónový výboj</i>	20
2.1.7 <i>Jiskrový výboj</i>	22
2.2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY PLYNNÝCH IZOLANTŮ	27
2.2.1 <i>Vzduch</i>	27
2.2.2 <i>Vakuum</i>	28
2.2.3 <i>Hexafluorid síry - SF₆</i>	28
2.2.4 <i>Syntetický vzduch</i>	29
3 PEVNÁ DIELEKTRIKA	29
3.1 PRŮRAZY PEVNÝCH DIELEKTRIK	29
3.1.1 <i>Čistě elektrický průraz</i>	29
3.1.2 <i>Průraz vlivem výbojů v dutinách</i>	30
3.1.3 <i>Tepelný průraz</i>	31
3.2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY PEVNÝCH IZOLANTŮ	32
3.2.1 <i>Termoplasty</i>	32
3.2.2 <i>Reaktoplasty</i>	33
3.2.3 <i>Keramika</i>	33
3.3 BARIÉRY V NEHOMOGENNÍM POLI	33
3.3.1 <i>Kladný hrot a záporná deska</i>	34

3.3.2	<i>Záporný hrot a kladná deska</i>	34
3.3.3	<i>Vliv bariéry</i>	35
4	KAPALNÁ DIELEKTRIKA	36
4.1	ELEKTRICKÁ VODIVOST KAPALIN	36
4.1.1	<i>Iontová vodivost</i>	36
4.1.2	<i>Elektroferitická vodivost</i>	37
4.2	ELEKTRICKÁ PEVNOST KAPALNÝCH IZOLANTŮ	37
4.3	POUŽÍVANÉ MATERIÁLY KAPALNÝCH IZOLANTŮ	38
4.3.1	<i>Přírodní kapalné izolanty</i>	38
4.3.2	<i>Syntetické kapalné izolanty</i>	38
	ZÁVĚR	39
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40
	PŘÍLOHY	42
	PŘÍLOHA A - TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT PASCHENOVY KŘIVKY	42

Seznam obrázků, tabulek a grafů

OBRÁZEK 1 DRUHY ELEKTRICKÝCH VÝBOJŮ	9
OBRÁZEK 2 ÚPLNÁ V-A CHARAKTERISTIKA PLYNNÉHO IZOLANTU	10
OBRÁZEK 3 DESKOVÉ USPOŘÁDÁNÍ KONDENZÁTORU K TOWNSENDOVĚ TEORII.....	11
OBRÁZEK 4 USPOŘÁDÁNÍ PRO ODVOZENÍ PODMÍNKY SAMOSTATNÉHO VÝBOJE.....	13
OBRÁZEK 5 LAVINA A JEJÍ ELEKTRICKÉ POLE	23
OBRÁZEK 6 ŠÍŘENÍ STRIMERU	24
OBRÁZEK 7 ZNÁZORNĚNÍ LIDERU	25
OBRÁZEK 8 ZNÁZORNĚNÍ ZPĚTNÉ VLNY	26
OBRÁZEK 9 ŽLÁBKOVÁ NESTABILITA	26
OBRÁZEK 10 HADÍ NESTABILITA	26
OBRÁZEK 11 MAGNETOHDRODYNAMICKÁ NESTABILITA	27
TABULKA 1 PASCHENOVA KŘIVKA	17
GRAF 1 PASCHENOVA KŘIVKA	17

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	konstanta pro výpočet Paschenovy křivky
B	konstanta pro výpočet Paschenovy křivky
CO_2	Oxid uhličitý
d	vzdálenost elektrod
dn	přírůstek elektronů
dx	tloušťka vrstvy
E_p	elektrická pevnost izolantu
$e^{a \cdot d}$	tzv. činitel zesílení laviny
$J(0)$	proudová hustota na katodě
$J(d)$	proudová hustota na anodě
n	koncentrace elektronů v určité vzdálenosti od katody
$n(0)$	počet elektronů uvolněných vlivem ionizačního činitele
$n(d)$	počet elektronů, které se dostaly až k anodě
n_1	celkový počet elektronů emitovaných z katody
p	tlak plynu
SF_6	Hexafluorid sírový
U_p	přeskokové napětí
U_z	zápalné napětí
x	vzdálenost
α	Townsendův ionizační činitel
β	druhý Townsendův ionizační činitel
γ	třetí Townsendův ionizační činitel

Úvod

Cílem této bakalářské práce je zaměřit se na problematiku výbojové činnosti, která vzniká v prostředí dielektrika, a to v plynném, pevném i kapalném dielektriku. Výbojová činnost je ovlivňována typem prostředí a je tedy rozdílné, zda probíhá v plynu, kapalině či pevném materiálu. V případě kapalin a plynů totiž hovoříme o přeskoku, který je pro tato prostředí nedestruktivní a díky jejich schopnosti regenerace se izolační vlastnosti plynu či kapaliny za určitou dobu opět obnoví. Oproti tomu u pevných dielektrik hovoříme o průrazu, který je pro pevný materiál destruktivní a izolant po něm ztrácí izolační vlastnosti.

V plynném dielektriku, jehož nejrozšířenějším zástupcem je vzduch, dochází k ionizaci, což vede také k výbojové činnosti, kam spadají Townsendovy výboje, doutnavý, jiskrový, kanálový a korónový výboj. Všechny tyto druhy výbojové činnosti jsou v této práci popsány.

U pevných dielektrik dochází nejčastěji k průrazu především čistě elektrickému, či tepelnému, ale průraz zde může být způsoben také dutinkami v materiálu, ve kterých vznikají výboje. Pevná dielektrika jsou velmi důležitá z hlediska tzv. bariér, které se vkládají do prostředí nehomogenního plynného dielektrika, kde ovlivňují velikost přeskokového napětí.

V kapalných izolantech dochází k přeskokům především vlivem nečistot, nebo plynných bublin, které mohou vytvořit most a tím napomoci rozvoji přeskoku. Tato dielektrika mají svá uplatnění především jako výplň složitých zařízení díky svému skupenství („rozlévání“), či jako ochrana pevných izolantů proti působení vlhkosti a vzduchu.

Zmíněné jevy, především průrazy a přeskoky, jsou v praxi téměř vždy nežádoucí, a proto se jim snažíme efektivně zabránit použitím vhodných materiálů, odpovídajícím návrhem konstrukcí a posouzením dalších parametrů.

V této práci tedy popisuji mechanismus vzniku elektrických výbojů v různých prostředích a uvádím používané materiály každého skupenství.

1 Základní pojmy

1.1 Dielektrikum

Dielektrikem lze rozumět látku, u které je možná existence vlastního elektrického pole. Obecně lze říci, že každý izolant je dielektrikem [16].

1.2 Izolant

Elektrický izolant je látka neobsahující volné nosiče elektrického náboje, případně obsahující je pouze v malém množství. Při vložení mezi vodiče s různým potenciálem nevede izolantem elektrický proud [1].

1.3 Ionizátor

Ionizátorem se rozumí např. plamen nebo světlo dodávající elektronům látky potřebnou energii k jejich odtržení [2].

1.4 Elektrický výboj

Elektrický výboj se dělí na dva základní typy: samostatný a nesamostatný. Nesamostatný výboj je charakteristický tím, že po odebrání ionizátoru sám zaniká. Naopak samostatný výboj je schopen se udržet i po odebrání ionizátoru [3].

1.5 Elektrostatický výboj

Elektrostatickým výbojem se rozumí proud protékající mezi dvěma objekty s různým potenciálem. Je náhlý a krátkodobý. Jedná se např. o blesk vyvolaný atmosférickými vlivy [4].

1.6 Průraz

Průraz nastává u pevných izolantů při úplném výboji. Je charakteristický ohnivou stopou mezi elektrodami, mechanickým namáháním (může dojít k roztržení pevných izolantů) a tepelným namáháním. Průraz se na pevných izolantech projevuje poškozením izolantu, a to ať už otvorem, roztržením či roztavením. Rozsah tohoto poškození je dán množstvím energie, kterou je schopen zdroj dodat během průrazu.

Pevné izolanty průrazem většinou ztrácejí svou izolační schopnost (na rozdíl od kapalných a plyných izolantů, které mají zpravidla schopnost se regenerovat) [5].

1.7 Přeskok

Stejně jako u pevných izolantů mluvíme o průrazu, mluvíme u plyných a kapalných izolantů o přeskoku. Ten vzhledem k regenerativním vlastnostem plynu a kapalných látek nemá tak destruktivní účinky na izolant [5].

1.8 Elektrická pevnost zařízení

Posuzuje se podle velikosti napětí, které způsobí na zařízení průraz nebo přeskok (U_p) za určitých podmínek (tlak, vlhkost, teplota, znečištění) a záleží na rozměrech, izolačním materiálu předmětu, na tvaru elektrického pole, tudíž i na tvaru elektrod a také všeobecně na časovém průběhu elektrického namáhání. Elektrickou pevnost zařízení dále ovlivňuje mechanické namáhání předmětu [5].

1.9 Elektrická pevnost izolantu

Jedná se o poměr napětí, při kterém dojde k průrazu nebo přeskoku, k tloušťce dielektrika právě v místě průrazu, případně přeskoku, nebo k nejmenší tloušťce mezi elektrodami. Tímto je určena jednotka elektrické pevnosti izolantu volt na metr, obvykle se však udává v kilovoltech na centimetr, případně v kilovoltech na milimetr.

Elektrická pevnost izolantu (E_p) není konstantou, neboť je ovlivňována např. vlhkostí, která ji pokaždé snižuje, mechanickým tlakem, který elektrickou pevnost výrazně zvětšuje, ale záleží např. i na druhu napětí - při stejnosměrném je větší než při střídavém a je obvykle menší u tlustšího izolantu oproti tenčímu.

Na elektrickou pevnost pevných a kapalných izolantů má největší vliv doba namáhání izolantu. V praxi se tak elektrická pevnost nejvíce rozlišuje podle této doby na pevnost rázovou (zjistí se pomocí rázového napětí určitého tvaru vlny), pevnost krátkodobou (zjistí se rychle zvyšovaným napětím až do průrazu), pevnost minutovou a pevnost při trvalém namáhání [5].

1.10 Homogenní pole

Obecně se za homogenní pole považuje takové pole, které má v každém bodě stejnou hodnotu veličiny, kterou se pole popisuje.

Homogenní pole je například mezi dvěma deskovými elektrodami [8].

1.11 Nehomogenní pole

Obecně se za nehomogenní pole považuje takové pole, které nemá v celém svém objemu stejnou hodnotu veličiny, kterou se pole popisuje.

Nehomogenní pole vzniká například při uspořádání elektrod hrot - deska.

2 Plynná dielektrika

2.1 Výboje v plynech

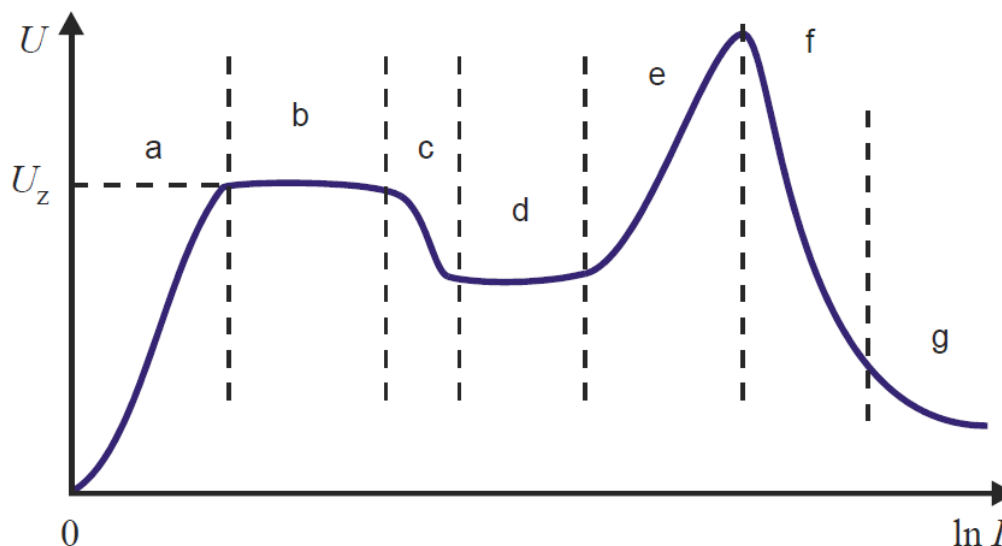
Protože plyn je za normálních okolností (teplotě a tlaku) velmi dobrým izolantem, tvořeným neutrálními molekulami či atomy, je pro umožnění průchodu elektrického proudu zapotřebí ionizační činidlo, čímž může být například vysoká teplota, záření, nebo částice s vysokou energií [6].

2.1.1 Rozdělení výbojů

Výboje uskutečněné za pomoci vnějšího ionizačního činidla ve slabém elektrickém poli nazýváme jako nesamostatné. Oproti tomu výboje uskutečněné v silných elektrických polích a například ještě v kombinaci s nízkým tlakem, což znamená, že se vytváří dostatečný počet iontů a elektronů pro udržení proudu, nazýváme jako samostatné [6].

Z obrázku 1 je patrné rozdělení V-A charakteristiky na 7 základních částí, které znázorňují základní typy elektrických výbojů. Část „a“ se vyznačuje malým proudem a poměrně prudkým nárůstem napětí. Tento nárůst je způsobem vnějším ionizačním činidlem a tudíž je zřejmé, že se jedná o nesamostatný výboj. Při dosažení hodnoty napětí označené jako U_z , což je hodnota tzv. zápalného napětí, se stává elektrické pole mezi elektrodami dostatečně silným na to, aby urychlilo elektrony, které následně

narážejí na ionty, mohou uvolňovat další elektrony a urychlené ionty dopadající na katodu z ní zase uvolňují elektrony v dostatečném počtu pro vytvoření dalších elektronů a pro udržení samostatného výboje.



Obrázek 1 Druhy elektrických výbojů [6]

Nosičem proudu v elektrických polích jsou elektrony, neboť oproti iontům mají menší hmotnost a zároveň větší pohyblivost v elektrickém poli. Při malých proudech zhruba 10^{-10} až 10^{-5} A mají elektrony malou kinetickou energii a srážky se neprojevují viditelným zářením, ale jsou doprovázeny sršením, praskáním a nazýváme je „temné Townsendovy výboje“. Na obrázku 1 jsou reprezentovány úsekem „b“.

Následující část „c“ je charakteristická pro tzv. korónu. Jedná se o neúplný samostatný výboj, doprovázený slyšitelným praskáním, sršením a tentokrát i slabým modrofialovým zářením v přímém okolí elektrody.

V oblasti „d“ je znázorněný výboj, který se nazývá normální doutnavý výboj. Je pro něj charakteristická nízká hustota a energie proudu, kdy katoda i plyn zůstávají chladné.

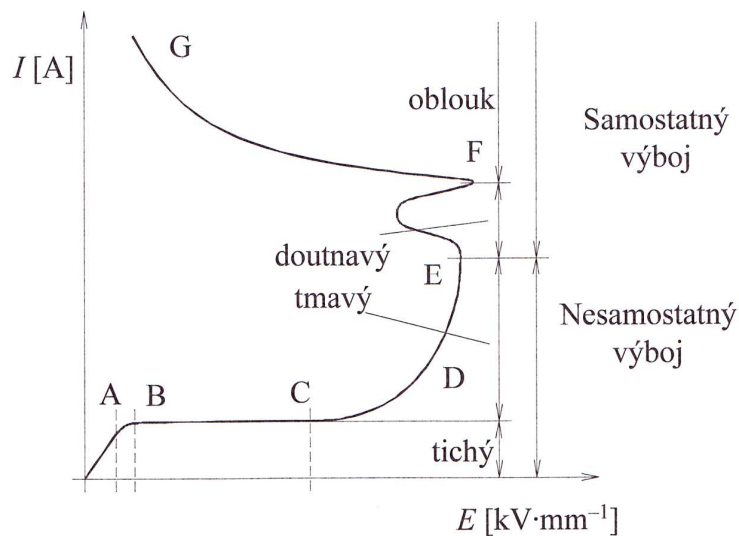
Část křivky „e“ poté náleží tzv. anomálnímu elektrickému výboji, pro který už jsou charakteristické vyšší teploty katody i vyšší proudová hustota.

Při vysokých proudech ($\approx kA$) se v oblasti „f“ projevuje jiskrový výboj, pro nějž je charakteristická vysoká vodivost kanálu a po propojení obou elektrod se snižuje

napětí mezi nimi na 10 až 100 V. Pokud je zdroj proudu dostatečně silný, odpovídá výboj části „g“. Takovýto výboj se nazývá obloukový [6].

2.1.2 Townsendův samostatný výboj

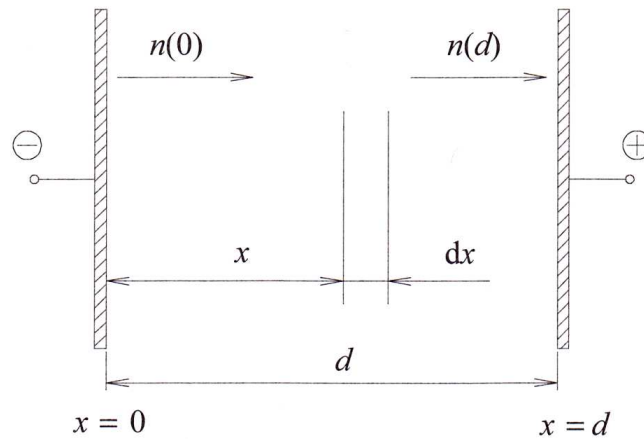
S. Townsend se zabýval nesamostatnými výboji a vypracoval jejich teorii. Z tohoto důvodu jsou někdy označovány jeho jménem. Na obrázku 2 je oblast nesamostatných výbojů reprezentována úseky „C“ až „E“.



Obrázek 2 Úplná V-A charakteristika plynného izolantu [7]

Vychází se z deskového uspořádání kondenzátoru znázorněného na obrázku 3, mezi jehož deskami se nachází plynné dielektrikum, které je vystaveno působení časově neproměnného homogenního elektrického pole.

Působením vnějšího ionizačního činidla opustí elektron povrch katody a pohybuje se tímto polem směrem k anodě. Tento elektron získává svou kinetickou energii pouze působením vnějšího elektrického pole mezi srážkami s neutrálními molekulami. Pokud dojde k pružné srážce, nedojde k nárazové ionizaci, ale pouze ke změně směru dráhy elektronu, aniž by došlo k velkému poklesu jeho kinetické energie. Naopak při nepružné srážce elektronu s neutrální molekulou dochází k nárazové ionizaci, případně přechodu molekuly do excitovaného stavu.



Obrázek 3 Deskové uspořádání kondenzátoru k Townsendově teorii [7]

Rychlost elektronu se ustálí na konstantní střední hodnotě, což je způsobeno vysokým celkovým počtem srážek, tudíž lze předpokládat, že na jednotkové dráze pak bude vznikat vlivem tohoto elektronu stejný počet ionizačních srážek. Zmíněný počet je nazýván Townsendovým ionizačním činitelem vyjadřujícím pravděpodobnost ionizace neutrální molekuly. Townsendův ionizační činitel je určen počtem párů volných nosičů, což jsou ionty a elektrony, které vytvoří právě jeden elektron nárazovou ionizací na jednotkové dráze ve směru působení pole, a označuje se α .

Jestliže elektron projde ve vzdálenosti x od katody vrstvou o tloušťce dx a jednotkovém průřezu, vytvoří pak nárazovou ionizací $\alpha \cdot dx$ párů nosičů elektrického náboje. Pokud však v této vzdálenosti od katody předpokládáme určitou koncentraci elektronů n , pak bude přírůstek elektronů dn na dráze dx dán následujícím vztahem:

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx \quad (1)$$

Pokud uvažujeme celou dráhu mezi elektrodami, lze vyjádřit přírůstek nových elektronů následujícím vztahem:

$$\int_{n(0)}^{n(d)} \frac{dn}{n} = \int_0^d \alpha \cdot dx \quad (2)$$

Integrací a určením integrační konstanty získáváme:

$$n(d) = n(0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (3)$$

kde d vzdálenost elektrod,
 $n(0)$ počet elektronů uvolněných vlivem ionizačního činitele,
 $n(d)$ počet elektronů, které se dostaly až k anodě.

Z tohoto vztahu je zřejmé, že během nárazové ionizace roste počet volných elektronů exponenciálně se vzdáleností od katody. Každý elektron vytvoří cestou k anodě lavinu o počtu elektronů $e^{\alpha \cdot d}$. Celkové vzniklé lavině odpovídá elektrický proud s hustotou:

$$J(d) = J(0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (4)$$

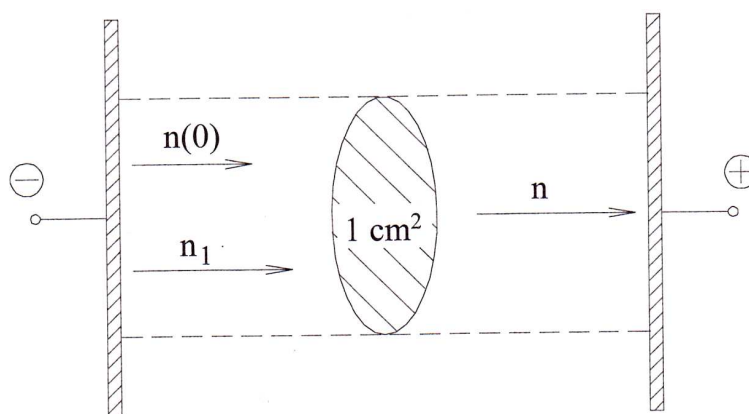
kde $J(0)$ proudová hustota na katodě,
 $J(d)$ proudová hustota na anodě,
 $e^{\alpha \cdot d}$ tzv. činitel zesílení laviny.

Počet nově vzniklých elektronů roste lavinově, což je způsobeno tím, že každý nově vzniklý elektron se podílí na další nárazové ionizaci. V celkovém počtu laviny elektronů $e^{\alpha \cdot d}$ je však zahrnut první elektron, díky kterému byl celý tento proces vyvolán. Proto je nutné od celkového počtu laviny elektronů odečíst tento jeden elektron. To znamená, že nárazovou ionizací plynu mezi elektrodami vznikne $e^{\alpha \cdot d} - 1$ elektronů. Tato lavina elektronů za sebou také zanechává shodný počet kladných iontů. Zmiňovaný lavinový nárůst však stále nezpůsobí nestabilitu v plynu, a tudíž nedojde ani k přeskoku mezi elektrodami.

Předchozí teoretické poznatky o Townsendových výbojích platí v úseku charakteristiky „C“ až „D“, který odpovídá nesamostatným výbojům a je znázorněn na obrázku 2. Navazující část nelze popsat pouze doposud vysvětleným mechanismem. Liší se zde totiž teoretické a experimentálně získané výsledky. První teorií, která měla vysvětlit tyto odchylky, bylo jejich přisouzení kladným iontům a jejich nárazové ionizaci. Pro tento jev byl dokonce i zaveden odpovídající a v pořadí druhý ionizační činitel β . Pozdějším výzkumem se však prokázalo, že kladné ionty jsou schopny získat energii potřebnou pro nárazovou ionizaci pouze s velmi malou pravděpodobností, což je způsobeno jejich příliš malou pohyblivostí. Z uvedeného vyplývá, že nárazovou ionizaci

způsobenou kladnými ionty je možné oproti nárazové ionizaci způsobené elektrony zanedbat.

Prudký nárůst proudu v oblasti „D“ až „E“ na obrázku 2 je i přes výše uvedené zapříčiněn kladnými ionty. Ty vlivem působení elektrického pole putují ke katodě, do které naráží, čímž způsobují povrchovou emisi elektronů. Zmíněný nárůst již není zanedbatelný a je charakterizován v pořadí již třetím ionizačním součinitelem γ . Z tohoto důvodu je nutné dále upravit vztah (4).



Obrázek 4 Uspořádání pro odvození podmínky samostatného výboje [7]

Vychází se z uspořádání znázorněného na obrázku 4, kde $n(0)$ reprezentuje počet elektronů, které jsou vlivem vnějšího ionizačního činidla emitovány za jednotku času v ustáleném stavu. Celkový počet elektronů, který za jednotku času dopadne na anodu, je označen n . Z výše uvedeného vyplývá, že z katody jsou elektrony emitovány také vlivem dopadajících kladných iontů. Jejich počet společně s elektrony, které jsou emitovány vlivem vnějšího ionizačního činidla, pak znázorňuje n_1 a jedná se tedy o celkový počet elektronů emitovaných z katody. V trubici mezi elektrodami o průřezu 1 cm^2 vznikají v ustáleném stavu za jednotku času kladné ionty, jejichž celkový počet je dán jako $n - n_1$. Pro elektrony, které vystupují z katody, tedy platí následující vztah:

$$n_1 = n(0) + \gamma \cdot (n - n_1) \quad (5)$$

Vyjádřením n_1 z výrazu (5) získáme:

$$n_1 = \frac{n(0) + \gamma \cdot n}{1 + \gamma} \quad (6)$$

Jestliže tuto vypočtenou hodnotu n_1 dosadíme do vztahu (5) za $n(0)$, získáme následující vztah vyjadřující počet elektronů, které dopadají na anodu:

$$n = \frac{n(0) + \gamma \cdot n}{1 + \gamma} \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (7)$$

Po úpravě tohoto vztahu vyjde následující rovnice:

$$n = \frac{n(0) \cdot e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (8)$$

Vynásobí-li se nyní obě strany rovnice nábojem e , vznikne následující vztah:

$$J(d) = \frac{J(0) \cdot e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (9)$$

kde $J(d)$... proudová hustota na anodě,

$J(0)$... proudová hustota vyvolaná pomocí vnějších ionizačních činidel.

Pro platnost uvedeného vztahu je nutné, aby pravá strana jmenovatele byla větší než nula. Tato proudová hustota už je větší než proudová hustota podle vztahu (4), avšak stále se nejedná o samostatný výboj, protože přestanou-li působit vnější ionizační činidla, bude $J(0) = 0$ a proud, který procházel mezi elektrodami skrz plyn, zanikne. Nesamostatný výboj přejde do oblasti samostatného výboje pouze jestliže intenzita vnějšího elektrického pole překročí určitou mez. V tom okamžiku nastane zvrát popsateľný následující podmínkou:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1 \quad (10)$$

Je-li splněna tato podmínka samostatné existence výboje, je výboj schopen udržet se i bez vnějších ionizačních činidel a stává se samostatným. V případě plynného izolantu nyní dochází k přeskoku. Nyní už přestává platit vztah (9), neboť byl odvozen na základě nesamostatného výboje.

Fyzikální význam podmínky (9) lze vyložit následovně:

$(e^{\alpha \cdot d} - 1)$...počet kladných iontů, který vytvoří jeden elektron emitovaný z katody,

$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)$...počet elektronů uvolněných kladnými ionty z povrchu katody.

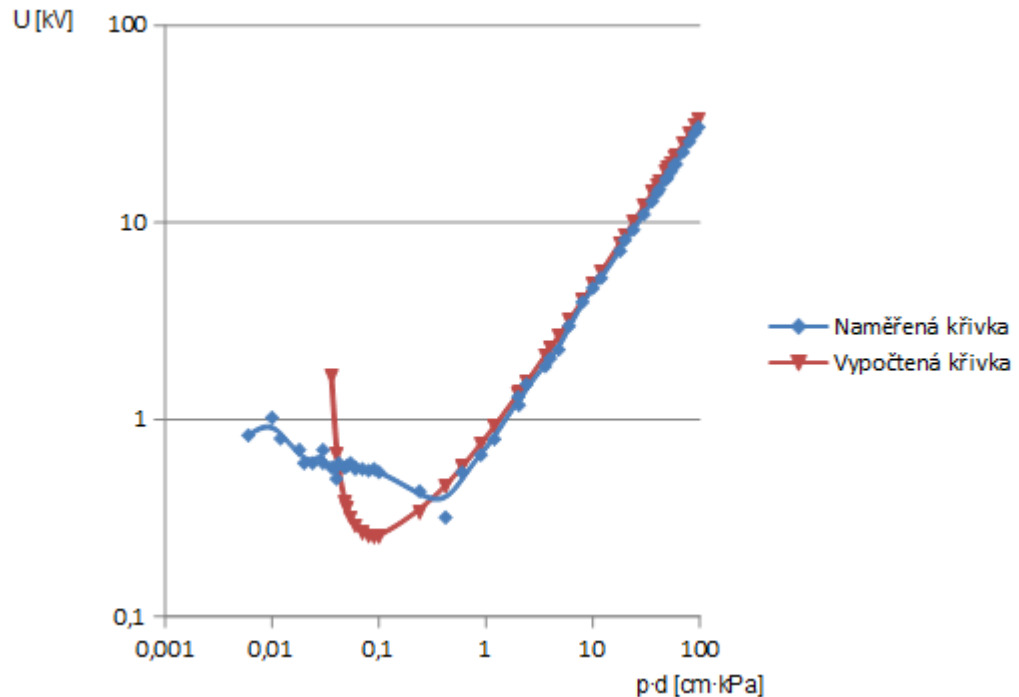
Z toho vyplývá, že jeden emitovaný elektron vytvoří kladné ionty, které také z katody uvolní jeden elektron. Tudíž samostatný výboj vzniká, pokud podmínky jako intenzita elektrického pole, tlak plynu a vzdálenost elektrod umožní, že každý elektron vytvoří kladné ionty, které pak vyrazí z katody další elektron. Tento samostatný výboj vzniká při tzv. počátečním napětí výboje závislém na elektrickém poli. V homogenním, případně mírně nehomogenním elektrickém poli, je toto napětí totožné jako přeskokové napětí, avšak v silně nehomogenním elektrickém poli je počáteční napětí výboje shodné s napětím, při kterém se objeví koróna.

Uvedené teoretické závěry zvažovaly pouze přítomnost elektronů a kladných iontů, avšak v plynech se běžně mohou vyskytovat i záporné ionty, které vznikají zachytáváním elektronů neutrálními molekulami (tato schopnost závisí na druhu plynu). Elektrony zachycené neutrálními molekulami jsou pro další ionizaci nepoužitelné a nově vznikající záporné ionty jsou příliš málo pohyblivé na to, aby k ionizaci přispěly. Z toho plyne, že tímto zachytáváním se snižuje celkový počet elektronů pro ionizaci neutrálních molekul plynu a ke vzniku samostatného výboje je tak zapotřebí vyššího napětí, než pokud by v plynu k zachytávání elektronů neutrálními molekulami nedocházelo. Například inertní plyny a dusík nevytvářejí záporné ionty vůbec, ve vzduchu a kyslíku dochází k jejich vytváření jen málo a nejvíce záporných iontů se vytváří v elektronegativních plynech, což je například SF₆ [7].

2.1.3 Paschenův zákon

Paschenův zákon byl empiricky objeven Friedrichem Paschenem v roce 1889. Zabýval se závislostí přeskokového napětí v plynu na jeho tlaku. Objevil, že při stálé teplotě plynu a homogenním poli se hodnota přeskokového napětí zachovává i pokud

nkrát zvýšíme či zmenšíme tlak plynu a zároveň nkrát snížíme či zvětšíme vzdálenost elektrod. Tuto závislost, která vyjadřuje Paschenův zákon, lze matematicky zapsat jako funkci $U_p=f(p \cdot d)$, jejímž grafickým vyobrazením je tzv. Paschenova křivka, znázorněná v grafu 1.



Graf 1 Paschenova křivka

Tato Paschenova křivka byla zjištěna experimentálním měřením a vychází z hodnot tabulky 1, která je výtahem tabulky v příloze A.

Vypočtená křivka byla z grafu 1 byla zjištěna pomocí rovnice (11).

$$U_p = \frac{B \cdot p \cdot d}{\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (11)$$

kde A a B jsou konstanty závislé na teplotě a tlaku plynu.

Tabulka 1 Paschenova křivka

d[cm]	p[kPa]	p·d[cm·kPa]	U _M [kV]	U _P [kV]
1	0,01	0,01	1,02	-0,02242
1	0,02	0,02	0,6	-0,10369
1	0,03	0,03	0,7	-0,66983
1	0,04	0,04	0,5	0,663538
1	0,05	0,05	0,58	0,352655
1	0,06	0,06	0,57	0,287948
1	0,07	0,07	0,56	0,264479
1	0,08	0,08	0,55	0,255231
1	0,09	0,09	0,56	0,252483
1	0,1	0,1	0,54	0,253203
1	2	2	1,3	1,343119
1	4	4	2,04	2,295909
1	6	6	2,98	3,17407
1	8	8	3,94	4,009246
1	10	10	4,64	4,814899
1	20	20	8,14	8,583526
1	30	30	11	12,10589
1	40	40	14,1	15,48465
1	50	50	16,86	18,76383
1	60	60	19,78	21,96763
1	70	70	22,76	25,11128
1	80	80	25,74	28,20515
1	90	90	28,54	31,25674
1	97,4	97,4	30,5	33,49107
0,6	0,01	0,006	0,83	-0,00948
0,6	0,02	0,012	0,8	-0,03163
0,6	0,03	0,018	0,7	-0,0778
0,6	0,04	0,024	0,6	-0,19004
0,6	0,05	0,03	0,6	-0,66983
0,6	0,06	0,036	0,57	1,651222
0,6	0,07	0,042	0,6	0,537755
0,6	0,08	0,048	0,57	0,378334
0,6	0,09	0,054	0,6	0,317853
0,6	0,1	0,06	0,56	0,287948
0,6	0,4	0,24	0,432	0,335811
0,6	0,7	0,42	0,318	0,456981
0,6	1	0,6	0,538	0,571786
0,6	1,5	0,9	0,66	0,751608
0,6	2	1,2	0,794	0,921303
0,6	3,4	2,04	1,182	1,363359
0,6	4	2,4	1,508	1,542753
0,6	6	3,6	1,86	2,112988
0,6	8	4,8	2,26	2,653665
0,6	10	6	2,96	3,17407
0,6	20	12	5,22	5,598383
0,6	30	18	7,18	7,854898
0,6	40	24	9,18	10,01404
0,6	50	30	10,92	12,10589
0,6	60	36	12,8	14,14693
0,6	70	42	14,72	16,1475
0,6	80	48	16,48	18,11463
0,6	90	54	18,16	20,0534
0,6	97,4	58,44	19,72	21,47212

Z výsledků měření jsou patrné komplikace během proměřování nízkých tlaků. Jak je vidět z hodnot tabulky přílohy A, nebylo možné pro nízké tlaky proměřit po vypnutí vývěvy 5 hodnot. To bylo způsobeno rychlým nárůstem tlaku a dále výboji, které generují částice, jejichž vlivem dochází také ke zvýšení tlaku. Rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou křivkou je dán mimo nepřesnosti měření také ionizačním činitelem γ , který je popsán v předchozí kapitole a který se pro vzduch při teplotě 20 °C udává jako konstantní, což ovšem ve skutečnosti není. Jak je z grafu 1 patrné, má křivka celkem tři výrazné části, a to sice levou, která je ostře klesající, pravou méně strmě stoupající a také minimum. Poloha minima křivky je pro každý plyn charakteristická.

Průběh Paschenovy křivky je možné vysvětlit tím, že nejprve se předpokládá konstantní vzdálenost elektrod a sleduje se pouze vliv změny tlaku plynu. Pro malé tlaky plynu, jež vyobrazuje levá klesající část křivky, jsou volné dráhy částic velké a převážná část elektronů uvolněných z katody během své cesty k anodě nenarazí na žádnou molekulu plynu, což znamená, že nemůžou přispět k vytvoření dalších nosičů elektrického náboje. Aby bylo možné vytvořit elektronovou lavinu, muselo by být přítomné dostatečně vysoké urychlující napětí, které by elektrony urychlilo. Ionizace probíhá v této části křivky energeticky nevýhodně. Naopak v pravé části křivky, která odpovídá vysokým tlakům, jsou volné dráhy malé a elektrony se tak s neutrálními molekulami plynu sráží příliš brzo, aniž by ještě stihly vlivem urychlujícího elektrického pole získat dostatečnou kinetickou energii pro ionizaci molekul. Pro vytvoření a udržení vysokonapěťového výboje je i v této oblasti zapotřebí vysokého napětí a tudíž i v této části křivky probíhá ionizace nevýhodně. Je tedy patrné, že energeticky optimální podmínky pro vytvoření a udržení výboje jsou v minimu Paschenovy křivky.

V praxi, kdy je běžnější nehomogenní pole, jsou již poměry složitější a Paschenův zákon přestává platit a zůstává zde platný tzv. zákon podobnosti (Paschenův zákon je jeho zvláštním případem), který říká, že závislost proudu procházejícího plyným izolantem na napětí na elektrodách se nezmění při lineární změně rozměrů systému elektrod, pokud se zároveň v opačném poměru změní tlak plynu [7].

2.1.4 Doutnavý výboj

Tento druh výboje probíhá při nízkých tlacích zhruba v okolí 10 Pa a zároveň při nízkém zápalném napětí, které se pohybuje na hodnotě několika stovek voltů. Tento druh výboje má dvě možnosti, jak může proběhnout. Rozlišujeme tedy normální a anomální výboj. Během normálního výboje je proudová hustota nezávislá na proudu a je malá, zároveň se při nárůstu proudu zvětšuje plocha využití katody. Oproti tomu při anomálním výboji je proudová hustota závislá na proudu, a to tak, že s rostoucím proudem roste i proudová hustota a tím dochází k zahřívání katody.

Pro větší atmosférické tlaky platí, že probíhající samostatné výboje se realizují při vyšších energiích a hovoří se už o oblouku, koróně a jiskře [5].

2.1.5 Obloukový výboj

Během obloukového výboje dochází k termoemisi elektronů z rozžhavené katody a probíhá na rozdíl od doutnavého výboje za vyšší proudové hustoty a nižšího napětí. Celkově probíhají všechny procesy během výboje intenzivněji a při vyšších energiích než u výboje doutnavého [6].

Oblouk udržuje vysokou teplotu katody vytvářením tenké vrstvy výboje, nazývané katodový prostor, přímo před katodou. Tato vrstva se vyznačuje vysokou intenzitou elektrického pole, jejímž vlivem získávají kladné ionty vysokou kinetickou energii, kterou při dopadu na katodu odevzdají, což způsobuje její ohřev. Ohřívání katody v kombinaci spolu s vysokou intenzitou elektrického pole v jejím okolí (katodovém prostoru) způsobuje termoemisi elektronů z katody. Následný přechod elektrického náboje od katody k anodě vytváří pozitivní sloupec, tzv. trup oblouku. Před anodou vzniká analogicky tzv. anodový prostor, kde se shromažďují elektrony putující k anodě, což způsobí rozžhavení anody, která proto začne vysílat kladné ionty.

Obloukový výboj se rozlišuje podle tlaku, při kterém probíhá, na nízkotlaký a vysokotlaký. Během nízkotlakého jsou neutrální částice v pozitivním sloupci - trupu oblouku - ionizovány nárazem elektronů, které energii potřebnou k ionizaci získaly z elektrického pole.

V praxi se však ve vysokonapětových zařízeních vyskytuje právě vysokotlaký obloukový výboj, který vzniká mezi kovovými elektrodami za atmosférického či vyššího tlaku [5].

2.1.6 Korónový výboj

Koróna vzniká v oblasti zakřivených elektrod, které se nacházejí ve vzduchu či jiném plynu vyššího tlaku. Pokud se zvyšuje napětí mezi těmito poměrně vzdálenými elektrodami, dosáhne hodnota intenzity elektrického pole mezi těmito elektrodami hodnoty postačující pro vznik neúplného samostatného výboje, který se omezuje právě na blízké okolí těchto elektrod, jež se obalí slabě svítící vrstvou, která je ve skutečnosti přibližně 1,9krát větší než je její průměr viditelný okem (pro nás neviditelné oblasti vysílají jen ultrafialové záření).

Počáteční napětí koróny je velmi obtížně určitelné, neboť v počátečních stádiích koróny má rozhodující vliv povrch elektrod. Jeho nerovnosti a drobné nečistoty se totiž nejprve stávají ohnisky malých předběžně nestabilních výbojů, jejichž proudy jsou velmi malé a přerušované. Za těchto podmínek je pak velmi obtížné určit, za jakého napětí koróna začíná. Konkrétně o počátečním napětí vzniku koróny je možné hovořit pouze za daných podmínek (vlhkost, druh a tlak plynu, tvar elektrického pole) u elektrod velmi čistých a bez nerovností. Potom při postupném zvyšování napětí náhle vzroste proud jdoucí k elektrodám na takovou hodnotu, která je měřitelná měřicími přístroji. Zároveň se na elektrodách objeví svítící vrstva je doprovázená zvukovými efekty jako je sršení a praskání.

Koróna vzniká jak na záporné, tak kladné elektrodě, a to za stejných podmínek, ačkoliv její mechanismus je pak rozdílný. V případě záporné elektrody vystupují ze svítící vrstvy do vnější oblasti elektrony a tvoří záporné ionty, kladné ionty vrstvy se pohybují směrem k elektrodě a zde se neutralizují. Oproti tomu u kladné elektrody přecházejí do vnější oblasti kladné ionty vrstvy a elektrony vstupují do vodiče. Na povrchu elektrody, a to ať kladné či záporné, se po vzniku koróny udržuje při zvyšování napětí téměř stálá intenzita pole nutná pro udržení ionizace. Oproti tomu ve vnější oblasti se zvětšuje prostorový náboj stejného znaménka, jako je polarita dané elektrody [5].

- ***Aplikace koróny***

Co se týče použití koróny v praxi, je velmi důležitá její aplikace v elektrických odlučovačích, které slouží k oddělení tuhých a kapalných částic ze vzduchu a jiných plynů tam, kde se má zabránit znečištění atmosféry. Jsou tedy používány především v průmyslových podnicích, kde mohou být součástí celého výrobního zařízení. Toto elektrické odlučování se dělí podle dvou způsobů použití na primární a sekundární, kde u primárního se nečistoty odlučují těsně za zdrojem nečistot a u sekundárního se nečistoty odlučují až před spotřebiči plynu.

V elektrických odlučovačích se nachází dva druhy elektrod, elektrody vysokého napětí a sběrací. Oproti elektrodám vysokého napětí, které jsou většinou vyrobené z drátu, nemá na sběracích elektrodách docházet k výboji. Vezměme nyní případ, kdy je drát záporný a je umístěný v ose trubky, která je záporná, což bývá u případu primárního odlučování. Pokud se nyní přivede mezi elektrody tzv. počáteční kritické napětí, vznikne v okolí drátu koróna. Jestliže se dále bude hodnota napětí zvyšovat nad úroveň tohoto počátečního kritického napětí, utvoří se v okolí drátu tři zóny. V první zóně, která je v přímé blízkosti drátu, kde je silné elektrické pole, provádějí nárazovou ionizaci elektrony a kladné ionty, v následující druhé zóně pak ionizují jen elektrony a ve třetí zóně, kde je slabá intenzita elektrického pole, pak z tohoto důvodu nedochází k nárazové ionizaci vůbec. Do této třetí zóny, která se také nazývá dopravní, pak přicházejí elektrony uvolněné v předešlých dvou zónách během své cesty ke sběrací elektrodě, která je orientována kladně. Tyto elektrony se pak v dopravní zóně spojují s molekulami plynu na záporné ionty, pohybují se dále směrem ke sběrací elektrodě a v dopravní zóně vytváří prostorový náboj, ze kterého čerpají tuhé nebo kapalné částice svůj náboj. Tyto částice pak mají větší poměrnou permitivitu než plyn proudící dopravní zónou a ten částice, které jsou elektrickým polem polarizovány, unáší. Do každé částice se stahují indukční čáry, čímž se na ně přivádějí ionty z jejich okolí. Ionty se na částice přivádějí také vlastní difúzí.

Elektrické pole působí silou na elektricky nabitě částice, které pak uvádí do pohybu. Rychlost jejich pohybu závisí na velikosti částic a intenzitě elektrického pole. Částice se usazují na sběrací elektrodě, odkud po nanesení určité vrstvy buď samovolně spadávají, nebo se odvádí například oklepáním. Prach se pak dostává do sběračů provedených jako výsycky nebo do jinak upraveného prostoru, odkud se pak

prach odvádí plynule nebo přerušovaně [5].

- ***Ultrakoróna***

Pro uspořádání elektrod drát a koule bylo zjištěno, že pokud je drát natažený vedle koule, je pak v některých případech přeskokové napětí mnohem větší, než když je drát umístěn jako hrot proti kouli, a to při stejném doskoku. Tento jev nastává, jestliže průměr drátu nepřekročí několik milimetrů. Pro větší průměry drátu se přeskok vyvíjí z trsů za nízkého přeskokového napětí. Tento jev je způsoben tím, že při malém průměru drátu se elektrické pole homogenizuje prostorovým nábojem předběžného neúplného výboje, čímž se zvyšuje přeskokové napětí. Tento výboj je zvláštním druhem koróny a vytváří se pouze pokud je drát s průměrem do několika milimetrů pod kladným a konstantním, případně pomalu se měnícím potenciálem. K tomu je zapotřebí, aby měla protielektroda malou křivost a tím pádem neovlivňovala přeskokové napětí. Tento výboj se pak nazývá ultrakoróna. Využívá se jí v oboru zvláště vysokého napětí u střídavých zařízení, kde se pomocí ní zvyšuje přeskokové napětí. Aplikace v praxi vypadá tak, že se kolem vývodu vysokého napětí napnou tenké drátky, případně se z nich uspořádají spirály, a na nich se vyvíjí ultrakoróna. Ta se vyvíjí při střídavém napětí v půlčlenně, kdy má drát kladnou polaritu. Přeskok se uskutečňuje v záporné půlčlenně při vysoké elektrické pevnosti. U drátů, které nesplňují požadovaný průměr, takže ultrakoróna nevznikne, pak přeskok nastává při kladné polaritě drátu, vytváří se z výrazných trsů a elektrická pevnost je v tomto případě nižší. Ultrakoróna tedy při střídavém napětí zabraňuje přeskoku při kladné polaritě drátu, protože potlačuje vznik trsů a přeskok pak nastává při záporné polaritě, kdy se vyvíjí z normální koróny [5].

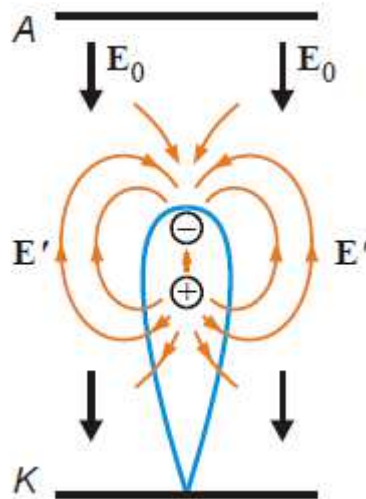
2.1.7 Jiskrový výboj

Jiskrový výboj probíhá většinou při atmosférických a vyšších tlacích, ale lze se s ním setkat i ve vakuu. Oproti oblouku je jiskra charakteristická krátkým časovým intervalem svého trvání - zhruba 10^{-7} až 10^{-3} s, a zároveň při porovnání s doutnavým výbojem se vyznačuje přenosem velkého proudu - řádově kA až MA menším průřezem - zhruba v řádech milimetrů. Pro jiskrový výboj jsou typické akustické a světelné projevy. Formy jiskrového výboje mohou být umělé (při manipulaci s umělými tkaninami), silné zdroje rentgenového záření, či přirozené formy (koróna, blesk, sluneční erupce).

Jiskrový výboj má několik vývojových stupňů. Jedná se o lavinu, strimer, lider, zpětnou vlnu, jiskrový kanál a rozpad [6].

- **Lavina**

Utváření jiskrového výboje je příčinou lavinovitého nárůstu volných elektronů a vytvořením elektronových, či foton-elektronových lavin.



Obrázek 5 Lavina a její elektrické pole [5]

Na obrázku 5 znázorněné vnější elektrické pole E_0 je dostatečně silné, aby dokázalo urychlit elektrony na ionizační energii. Tyto elektrony během svého urychlování vytvářejí větší počet iontů, čímž se splní podmínky pro vytvoření laviny pohyblivých elektronů, která směřuje k anodě. Zvětšování této laviny je díky tomu, že se na zádi a v čele laviny vzhledem k jejímu dipólovému charakteru formuje elektrické pole s dvojnásobně větší intenzitou, než byla původní hodnota, snadnější [6].

Lavina se skládá z nepohyblivých iontů, které tvoří její zadní část a nesou kladný náboj, a z pohyblivých elektronů nesoucích záporný náboj tvořících čelo laviny.

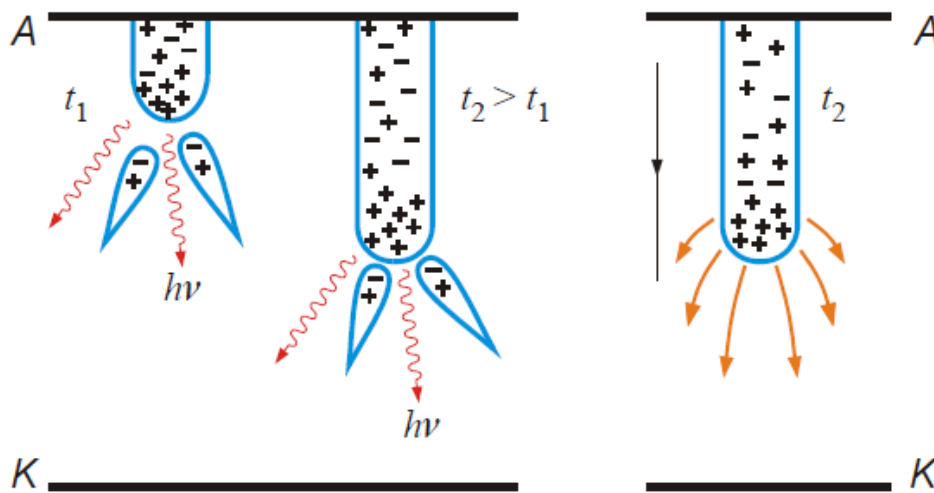
- **Strimer**

Zformovaná elektronová lavina má následně několik možností, jak se rozvíjet dál. Jednou z možností je, že vlivem Coulombova odpuzování se čelo laviny rozšíří, čímž dojde k poklesu energie a lavina zhasne, případně se spojí s jinou lavinou v jednu, nebo se existující lavina začne natahovat a tím dojde ke spojení s jinými lavinami

na jejím čele a zádi. Tímto spojováním s dalšími lavinami dojde k vytvoření dlouhého kanálku, který se nazývá strimer. Strimery se rozvíjí především v blízkosti elektrod, a to s větší pravděpodobností u anody, ale mohou se vyskytnout i v prostoru mezi elektrodami.

Při krátkých vzdálenostech mezi elektrodami (menších než je 50 m), dojde k propojení elektrod strimerem. Co se týče průbojového napětí mezi těmito elektrodami, není, jak by se mohlo zdát logické, pouhým součinem vzdálenosti elektrod a intenzity pole (10^6 V/m). Je to z důvodu nehomogenosti pole, jež může být způsobena jednak hrotovou elektrodou, ale také vlastním polem striméru, které se na jeho čele může zesílit. Z důvodu těchto nehomogenit je pro vzdálenost elektrod 1 m nutná intenzita pole 10^6 V/m, pro vzdálenost 10 m intenzita pole 10^5 V/m a pro vzdálenost 30 m intenzita pole již jen 10^3 V/m.

Pokud bychom uvažovali vzdálenost větší než 50 m při atmosférickém tlaku, docházelo by již na průbojové dráze k formování lideru [6].



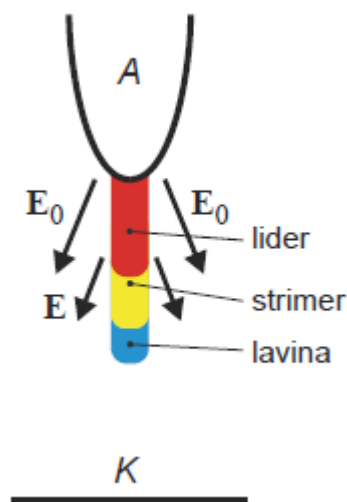
Obrázek 6 Šíření strimeru [5]

- **Lider**

Lider, jehož schéma je na obrázku 7, vzniká při větších vzdálenostech elektrod (více než 50 m), což znamená větší průbojové dráhy. Vzniká ze strimeru, jež je poměrně úzký, chladný a málo vodivý. Strimer pak právě při těchto větších průbojových drahách

přerůstá v lider, který už je více vodivý, je stále chladný a jeho návaznost na elektrodu je bez přechodového odporu. Při této fázi lideru se do kanálu přivádí náboj příslušné elektrody.

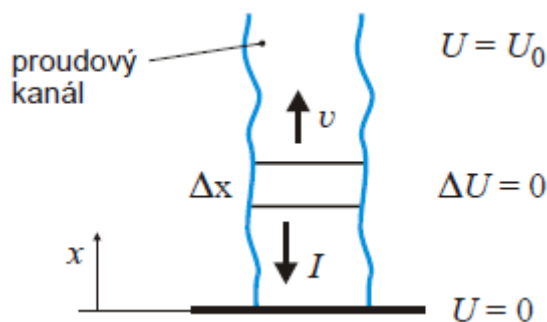
Na postupující lider se také napojují ostatní boční strimery a laviny. Poté co lider dosáhne elektrody, vznikne v tomto bodě značný potenciálový rozdíl, což má za následek prudký nárůst proudu a uvolnění velkého množství Jouleova tepla. To způsobuje vysokou ionizaci plazmatu v kanálu a jeho okolí. Zároveň s tím rychle narůstá vodivost. Velký potenciálový rozdíl spolu s uvolněním velkého množství energie nezůstává na stejném místě, ale přesune se rychle k druhé elektrodě formou vlny [6].



Obrázek 7 Znázornění lideru [5]

- **Zpětná vlna**

Zpětnou vlnou se nazývá fáze lideru, kdy dojde k přesunu potenciálu ve formě vlny z jedné elektrody ke druhé. Tato zpětná vlna se šíří podél lideru od místa, kde lider dosáhl elektrody, až k elektrodě opačné. Zůstává po ní vodivý kanál, kterým se převádí náboj z liderového kanálu k příslušné elektrodě. Zpětnou vlnou vzniká i napěťový skok, který je způsoben prudkým nárůstem proudu a uvolněním velkého množství Jouleova tepla v jeho důsledku, a který se pohybuje společně se zpětnou vlnou. Dojde k vytvoření vodivého kanálu, ve kterém se přenáší náboj ve formě paketů elektronů. Dochází k rozšiřování proudového kanálu, což se děje nadzvukovou rychlostí a generuje se při něm rázová vlna, která vytváří zvukový efekt [6].



Obrázek 8 Znáornění zpětné vlny [5]

- **Nestability jiskrového kanálu**

Vytvořený jiskrový kanál již přenáší velké proudy (řádově kA až MA) a vykazuje značnou teplotu (20 000 až 30 000 K). Vlivem tepelného tlaku se kanál rozšiřuje, ale zároveň je smršťován vlivem magnetického pole vytvořeného procházejícím proudem. Toto magnetické pole vytváří magnetický tlak, který je nazýván magnetickým pinčem.

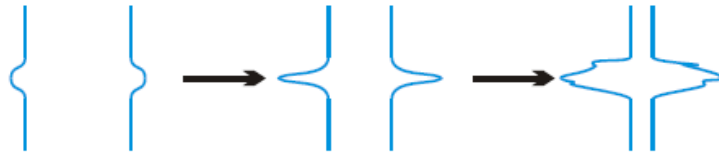
Jiskrový kanál se rozpadá vlivem nestabilit způsobujících rozpad kanálu především v místě napojení na elektrody, což způsobí, že přenos náboje mezi jiskrovým kanálem a elektrodou je pak zajištěn řadou nestabilních vláken, která v elektrodě zanechávají mikrokrátery. Na obrázcích 9. až 11. jsou pak vyobrazeny základní typy nestabilit jiskrového kanálu [6].



Obrázek 9 Žlábková nestabilita [5]



Obrázek 10 Hadí nestabilita [5]



Obrázek 11 Magnetohydrodynamická nestabilita [5]

2.2 Používané materiály plynných izolantů

Za nejvýznamnější plynné izolanty se považuje vzduch a hexafluorid síry, neboli SF₆. Lze se však setkat například i s vakuem a v poslední době se do popředí dostává také syntetický vzduch.

2.2.1 Vzduch

Vzduch je tvořen směsí plynů, především dusíku (zhruba 78 %) a kyslíku (zhruba 21 %), obsahuje však i další plyny jako například argon, neon, xenon, oxid uhličitý, helium, vodík a další.

Má vlastnosti nepolárních izolantů. Nepolární látkou se rozumí látka s nepolární kovalentní vazbou, což znamená, že rozdíl elektronegativit prvků, které tvoří vazbu, je menší než 0,4. Elektronegativita pak udává vlastnost prvku přitahovat vazební elektrony.

V běžných podmínkách při žádné úpravě vzduchu se v něm ve většině případů vyskytují vodní páry, které zvyšují jeho vlhkost a jejichž množství vyjadřujeme pomocí relativní či absolutní vlhkosti vzduchu. Platí, že s rostoucí vlhkostí vzduchu se zároveň zhoršují jeho elektroizolační vlastnosti (poměrně dobrých vlastností se dosáhne u vzduchu s relativní vlhkostí zhruba do 50 %).

Nevýhodou vzduchu je jeho relativně vysoký obsah kyslíku (21 %), který zvláště při vyšších teplotách způsobuje oxidaci, a proto je ve vysokonapěťových zařízeních důležité zohledňovat tento faktor [9] [11] [12].

2.2.2 Vakuum

Vakuum je prázdný prostor, ve kterém se dosahuje mnohem nižšího tlaku plynu než je normální atmosférický tlak (1013,25 hPa).

V praxi lze dosáhnout pouze zředěného vzduchu a vakuum ve své ideální formě, což znamená prostor zbavený veškerých částic, neexistuje.

Čím menšího tlaku se dosáhne ve vyčerpaném prostoru, tím je vakuum dokonalejší. Tudíž se stupeň kvality vakua posuzuje právě dle dosaženého tlaku.

Vakuum má ze všech plynných izolantů největší elektrickou pevnost a využívá se k izolaci například ve vakuových vypínačích či jiných přístrojích [9] [13].

2.2.3 Hexafluorid síry - SF₆

SF₆ se řadí do skupiny elektronegativních plynů vyznačujících se tím, že jejich molekuly jsou schopny zachytávat elektrony. Tyto plyny mají velkou elektrickou pevnost, jsou nehořlavé, chemicky netečné a také jsou tepelně stálé.

Plyn SF₆ se běžně používá jako výplň transformátorů nebo vysokonapěťových vypínačů, a zároveň umožnil zmenšit hmotnost a rozměry nejen těchto, ale i dalších vysokonapěťových zařízení. Je proto považován za nejvýznamnější z elektronegativních plynů [9].

Přestože má SF₆ výborné dielektrické vlastnosti, které jsou nezpochybnitelné, jsou jeho ekologické dopady poměrně diskutabilní. Vlivem stárnutí zařízení obsahujících SF₆, ale také například skrze nedokonalé ventily, příruby a porcelánová pouzdra, případně během instalací a údržeb zařízení, uniká hexafluorid sírový do atmosféry, kde se podílí na skleníkovém efektu. Americká agentura EPA, která se zabývá ochranou životního prostředí, uvedla, že v roce 2000 bylo v atmosféře vypuštěno 604 metrických tun plynu SF₆, což podle této agentury odpovídá 14,4 metrickým tunám oxidu uhličitého (CO₂). Udává se také, že SF₆ je až 22 500krát efektivnější v zachytávání infračerveného záření než ekvivalentní množství oxidu uhličitého. Tento nepříznivý vliv SF₆ je pravděpodobně důvodem, proč se v současnosti vyskytují firmy, které se ho snaží nahradit (případně alespoň snížit jeho emise), což je z důvodu jeho výborných dielektrických vlastností velmi složité. Jednou z variant

by mohlo být použití syntetického vzduchu [14] [15].

2.2.4 Syntetický vzduch

V současné době se jako dielektrikum ve vysokonapěťových zařízeních testuje syntetický vzduch. Ten je oproti standardnímu vzduchu zbaven látek, jako je argon, neon, xenon, helium, vodík a dalších a je složen pouze z dusíku a kyslíku. Možností na kombinování těchto prvků je více, avšak pro tyto účely je prozatím nejpoužívanější kombinací 80 % dusíku a zbylých 20 % kyslíku. Jeho největší předností je, že například oproti SF₆ se nepodílí na skleníkovém efektu.

3 Pevná dielektrika

3.1 Průrazy pevných dielektrik

Průrazy pevných izolantů dělíme do třech základních skupin na čistě elektrické průrazy, průrazy vlivem výbojů v dutinách dielektrika a na tepelné průrazy.

3.1.1 Čistě elektrický průraz

V případě čistě elektrického průrazu je potřeba zanedbat všechny okolní vlivy působící na dielektrikum a zároveň všechny okolnosti, které pro dielektrikum nejsou specifické. Je tedy třeba vyloučit vlivy tvaru a materiálu elektrod, nehomogenity (póry a dutiny) v izolantu, přechodové jevy u elektrod, ale také vlastní ohřátí izolantu, ke kterému dochází vlivem vnitřních elektrických dějů dielektrika. Jeho zkoumání se pak provádí v homogenním poli a zjišťuje se pomocí strmých rázů, během jejichž krátkého trvání se nestihnou rozvinout okrajové jevy.

V praxi nedosáhneme ideálního dielektrika, což znamená, že se v dielektriku nacházejí elektrony, které se vyskytují v energetických hladinách vodivostního pásu a chovají se zhruba tak, jako kdyby byly volné. Z předchozí věty je zřejmé, že čím více bude dielektrikum nedokonalé, tím více elektronů může do tohoto vyššího energetického pásu přestoupit, a to pomocí teploty, velké intenzity elektrického pole či například absorpcí záření. Elektrony uvolněné těmito způsoby se rozptýlí po dielektriku a dostanou se do interakce s mřížkou, případně se sebou, je-li jich hodně. Nyní je důležité rozlišit, zda je elektrické pole, ve kterém se dielektrikum nachází, slabší či silnější. Ve slabším elektrickém poli se elektrony uvedou do pohybu konstantní

rychlostí ve směru pole, ze kterého získají jen malou energii a dojde tudíž jen k malému ohřevu dielektrika. Oproti tomu v silnějším elektrickém poli získají elektrony na své dráze díky síle pole větší množství energie a mohou vyrazit elektrony z obsazeného dielektrického pásu. Tyto vyražené elektrony opět získají od elektrického pole dostatek energie na to, aby vyrazily další elektrony, provádějí tak ionizaci a může dojít až k průrazu. U uvedeného jevu lze nalézt analogii s Townsendovou teorií nárazové ionizace v plynech. Je však nutné vzít v potaz, že i když pevné těleso svou hustotou odpovídá stlačenému plynu, je ionizace v pevných tělesech uskutečnitelná s menším vynaložením energie.

Čistě elektrický průraz se u pevných izolantů vyvíjí ve velmi krátkých časech - řádově 10^{-8} s, což je způsobeno tím, že k němu dochází především při rázovém namáhání [5].

3.1.2 Průraz vlivem výbojů v dutinách

V izolacích se mohou nacházet dutiny vyplněné plynem či vzduchem. Dutiny mohou v izolaci vznikat například vlivem vysokého elektrického namáhání a mohou být různého tvaru a velikosti. Pokud na elektrodách roste střídavé napětí, začnou se při určité hodnotě v těchto dutinách vytvářet výboje jiskrového a lavinového charakteru nazývané se částečné výboje, které pak mohou poškozovat dielektrikum. To je způsobeno tím, že dutiny mohou obsahovat kyslík, jenž během výbojů vytváří ozón s vysokými oxidačními účinky, případně jiné izolanty, které mohou při výbojích přispět k chemickému zničení dielektrika. Dalším faktorem jsou ionty a elektrony dopadající na stěny dutiny. Uvedené jevy mohou postupem času vést až k průrazu dielektrika.

Pokud by byl osciloskopem sledován kapacitní proud, který prochází daným dielektrikem s dutinami, byly by probíhající výboje v dutinách znázorněny krátkými a nepravidelnými impulsy v okolí amplitudy proudu, přičemž každý takovýto impuls odpovídá právě jednomu výboji v dielektriku.

Obecně lze říci, že tyto dutiny v dielektriku napomáhají jeho průrazu. Výboje v nich vznikající totiž mohou mít elektrické, chemické, erozivní a tepelné účinky.

Tepelné účinky snižují napětí tepelného průrazu a je to způsobeno tím, že výboje vznikající v dutinách mají za následek oteplení dielektrika.

Eroze vznikají opět vlivem výbojů v dutinách, které způsobují erozi jejich stěn a při pokročilé erozi může dojít k elektrickému, případně dokonce mechanickému průrazu dielektrika.

Elektrické účinky způsobuje oblouk, který se v dutině může vyvinout. Ten pak s největší pravděpodobností vytvoří vodivou dráhu, na jejímž konci dostatečně vysoké napětí může způsobit elektrický průraz a vodivá dráha se může postupně šířit celým dielektrikem.

Chemické účinky jsou způsobovány obecně produkty výbojů v dutinách, kterými jsou ozón, kysličníky, dusíky a jiné. Izolant se pak v okolí dutin rozkládá. Tyto účinky jsou způsobeny především dlouhodobým elektrickým namáháním [5].

3.1.3 Tepelný průraz

Během tepelného průrazu se uplatní Jouleovy ztráty, které dielektrikum ohřívají, a také ohřev způsobený dielektrickými ztrátami. Vzhledem k tomu, že tento ohřev neprobíhá rovnoměrně, vznikají pak místa s vyšší teplotou, kde dochází k dalšímu nárůstu elektrické vodivosti a dielektrických ztrát, čímž dojde k ještě většímu ohřevu těchto míst.

Existují tři příčiny vzniku tepelného průrazu. Nejčastější příčinou je, že napětí přiložené na dielektrikum překročí určitou mez a nepovolí tak, aby došlo k ustanovení dynamické rovnováhy, která se ustaví pouze při dostatečně nízkém napětí (rovnováha mezi množstvím tepla vzniklého vlivem elektrického pole a množstvím tepla, které odvádí povrch dielektrika do okolí). Další příčinou je, že tato dynamická rovnováha se nestihne ustavit a dojde ke zničení dielektrika. Zmíněný případ nastává především u izolantů s malou tepelnou vodivostí a nízkým bodem tavení. Poslední příčinou je dehomogenizace pole způsobená nerovnoměrným ohřevem izolantu. To z původně homogenního pole vytváří pole nehomogenní, což může způsobit průraz izolantu.

Na tepelný průraz je třeba dbát především u zařízení s dlouhodobým zatížením [7].

3.2 Používané materiály pevných izolantů

Mezi používaná pevná dielektrika se řadí syntetické makromolekulární látky a anorganické látky. Plastické hmoty jsou právě zmíněné syntetické makromolekulární látky, které se někdy získávají i z přírodních materiálů. Lze je rozdělit z několika různých hledisek:

- podle vzniku - rozlišujeme látky vzniklé polymerací, polykondenzací, či polyadící.
- podle výchozích látek - plastické hmoty jsou vyráběny buď z monomerů (nízkomolekulární sloučeniny), nebo zušlechtěním přírodních látek.
- podle elektrického hlediska - rozlišujeme plastické hmoty nepolární (neutrální s nízkou permitivitou) a polární (s pohyblivými polárními skupinami za normální teploty).
- podle tepelných vlastností - rozlišujeme termoplasty (vlivem působení tepla měknou a vlivem ochlazení tuhnou) a reaktoplasty (vlivem působení se vytvrzují, tzn., že se nevratně mění jejich struktura).

Anorganické látky tvoří další velmi důležitou skupinu izolantů a dielektrik. Mezi jejich výhody patří mimo jiné i možnost přizpůsobování vlastností změnou složení a struktury. Jejich největší předností je však velmi vysoká tepelná odolnost. Většina anorganických látek také nepodléhá stárnutí a vyznačují se i odolností proti záření. Řadí se sem materiály jako slída, azbest, keramiky a skla [9].

3.2.1 Termoplasty

Jak již bylo zmíněno u rozdělení syntetických makromolekulárních látek, termoplasty vlivem zvyšující se teploty měknou a po následném ochlazení opět tuhnou. Z toho lze usoudit dvě veličiny, které jsou pro termoplasty charakteristické a jsou jimi teplota tuhnutí, během které hmota tvrdne, a teplota měknutí, během níž dochází ke ztrátě určité ohebnosti. Dalším důležitým parametrem je také teplota tečení, po jejímž překročení dochází k rozkladu termoplastické hmoty.

Během jejich použití v elektrotechnice je zapotřebí sledovat jejich závislost

na měnícím se kmitočtu a změnách teploty a vlhkosti, protože tyto podmínky ovlivňují jejich dielektrické vlastnosti. Co se týče elektroizolačních a dielektrických vlastností, jsou proto nejpoužívanější nepolární, či slabě polární látky. Mezi nejznámější používané termoplasty se řadí polyetylén, polystyren, polytetrafluoretylen (teflon), polyformaldehyd, polyamidy a polykarbonáty [9].

3.2.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou látky, které se vytvrzují díky prostorovému zesílení molekul, ke kterému dochází buď vlivem působení tepla, nebo také působením chemických přísad (tvrdidel).

Mezi nejvýznamnější zástupce této skupiny v praxi patří aminoplasty, epoxidové pryskyřice a fenolformaldehydové pryskyřice. Řadí se sem také silikony [9].

3.2.3 Keramika

Tyto materiály dělíme do dvou skupin:

- keramika křemičitá - řadí se sem např. porcelán, kamenina, steatit a stealit,
- keramika kysličníková - do této skupiny patří např. korundová a berylnatá keramika, feroelektrika a rutilová keramika.

Pro součásti výkonové elektrotechniky s teplotami do 70 °C se používají např. porcelán, kamenina a steatit. Pro součásti pracující za teplot vyšších než 70 °C se pak používají kordierit, horečnatá keramika, korundová a berylnatá keramika. U kondenzátorů se pak používají např. stealit, rutilit a stabilit (pro kondenzátory s lineárním průběhem) a permitit (pro kondenzátory s nelineárním průběhem) [9].

3.3 Bariéry v nehomogenním poli

Rozdíl mezi homogenním a nehomogenním polem je takový, že oproti homogennímu poli není v nehomogenním poli konstantní intenzita elektrického pole na celé vzdálenosti mezi elektrodami. Například pro uspořádání elektrod hrot - deska platí, že elektrické pole vykazuje vyšší intenzitu v okolí hrotové elektrody a klesá směrem k deskové elektrodě. Z tohoto důvodu pak při zvyšování napětí dosáhne intenzita při zvyšování napětí kritické hodnoty nutné pro vznik ionizace ve vzduchu nejdříve v okolí

hrotové elektrody, kde dojde k samostatnému výboji (koróně) s omezeným proudem. To je způsobeno tím, že zbylý prostor má malou vodivost, protože intenzita elektrického pole zde stále nedosáhla kritické hodnoty. K přeskoku mezi elektrodami by došlo teprve vlivem dalšího zvyšování napětí. Z uvedeného lze také usoudit, že v homogenním poli se koróna nevyskytuje, neboť intenzita elektrického pole je zde konstantní po celé vzdálenosti elektrod a zvyšováním napětí se tedy dosáhne kritické intenzity po celé délce a dojde rovnou k přeskoku mezi elektrodami.

3.3.1 Kladný hrot a záporná deska

Pro uspořádání elektrod hrot a deska, kdy hrot je připojený ke kladné polaritě a deska je připojena k záporné polaritě, platí, že po připojení tak velkého napětí, kdy je intenzita pole poblíž hrotu dostatečně velká, aby vznikla nárazová ionizace, se po objevení volných elektronů vytvoří několik elektronových lavin směřujících k hrotu. Oproti tomu se směrem k desce pohybují kladné ionty. Málo hmotné elektrony jsou na rozdíl od hmotnějších a pomalejších iontů rychlé, a proto dospějí elektrony k hrotu dříve, zatímco pomalé ionty kolem něj vytvářejí kladný objemový náboj. Tento náboj v blízkosti hrotu pak snižuje intenzitu pole v jeho blízkosti a zvyšuje intenzitu pole ve zbylém prostoru. Snížení intenzity pole v blízkosti hrotu pak brání vznikání dalších lavin a výboj tím pádem uhasíná. Podmínky pro vznik dalšího výboje se mohou obnovit až poté, kdy objemový kladný náboj opustí okolí hrotu. Z tohoto důvodu má korónový výboj a tedy i proud koróny pulzní charakter pro uspořádání s kladným hrotem.

3.3.2 Záporný hrot a kladná deska

Při uspořádání elektrod, kdy je hrotová elektroda připojena k záporné polaritě a desková elektroda ke kladné polaritě, jsou některé základní principy stále stejné jako při předchozím uspořádání. Při stejném napětí opět vznikají laviny elektronů v okolí hrotové elektrody. Tyto lehké elektrony se opět rychle pohybují směrem k deskové elektrodě a vzniká za nimi kladný prostorový náboj z iontů, které se vlivem svojí hmotnosti oproti elektronům pomalu pohybují směrem k hrotové elektrodě. Rozdíl však nastává, když elektrony opustí oblast velké intenzity pole. Tyto elektrony pak začnou postupně ztrácet svou rychlost a jejich velkou část zachytí neutrální molekuly. Tímto vznikají těžké záporné ionty, jež utvářejí druhý prostorový náboj (v tomto

případě záporný), který se nachází dále od hrotu, čili blíže k desce. Tyto dva vzniklé prostorové náboje pak vytvářejí celkový objemový náboj složitější struktury. Kladný prostorový náboj v blízkosti záporného hrotu opět zvyšuje intenzitu elektrického pole v jeho okolí a opět vzniká koróna. Záporný prostorový náboj však narůstá, čímž klesá intenzita elektrického pole v okolí hrotu a koróna ustává. Podmínky pro vznik ionizace se obnoví teprve až po vzdálení se prostorového záporného náboje od hrotové elektrody. Korónový výboj má opět pulzní charakter.

Prostorové náboje v okolí hrotu v tomto případě snižují intenzitu elektrického pole směrem k desce, což brání tomu, aby se výboj rozvinul v jiskru, a zvyšují tím průrazné napětí tohoto uspořádání oproti uspořádání předchozímu.

3.3.3 Vliv bariéry

Bariéry z tenkého dielektrika (například z lepenky, papíru a dalších pevných dielektrik) mohou podstatně zvyšovat elektrickou pevnost v silně nehomogenních polích, pokud se vloží mezi elektrody kolmo k siločárám pole. Toto zvýšení elektrické pevnosti je způsobeno vytvářením elektrického náboje na bariéře, čímž se ovlivňuje rozložení elektrického pole, nikoliv však tím, že by se elektrická pevnost bariéry sčítala s elektrickou pevností vzduchu (toto je zanedbatelné).

Při uspořádání elektrod hrot - deska a vložení bariéry mezi ně se při zvyšování napětí opět objeví na hrotu koróna. Elektrony či ionty, které vznikají ionizací, jsou elektrickým polem urychlovány směrem k desce. Pro rychlé elektrony není tenká dielektrická bariéra překážkou, avšak pomalé ionty se na ní zachytávají. Pro kladnou polaritu hrotu platí, že k desce putují kladné ionty, a pro zápornou polaritu hrotu platí, že k desce putují záporné ionty vzniklé spojením elektronů s neutrálními částicemi. Na bariéře mezi elektrodami se tedy zachytávají ionty stejné polarity, jakou má hrotová elektroda. Tyto zachycené ionty bariéru postupně nabíjejí, čímž se elektrické pole mezi bariérou a deskou stává homogenním. Mezi hrotem a bariérou je pak malá intenzita elektrického pole a teče zde malý proud vyrovnávající úbytek nábojů na bariéře vlivem difúze, rekombinací a dalších jevů.

Pokud je napětí na elektrodách dále zvyšováno, zvětšuje se náboj bariéry, a to vede ke zvýšení intenzity elektrického pole mezi bariérou a deskou, až nakonec dojde k přeskoku. Dochází k němu tedy v podstatě v homogenním poli mezi deskou a bariérou

a velikost průrazného napětí tím pádem nezávisí na polaritě hrotu.

Polohou bariéry mezi elektrodami se dá ovlivnit velikost přeskokového napětí. Pokud je však bariéra moc blízko hrotu či desce, snižuje se její vliv. Dalším faktorem ovlivňujícím účinnost bariéry je také její velikost. Zpravidla dosáhneme vyšších hodnot přeskokového napětí pomocí větších bariér. Rozměry bariéry také ovlivňují snížení jejího vlivu při umístění blízko elektrody [17].

4 Kapalná dielektrika

4.1 Elektrická vodivost kapalin

Kapalné látky vznikají buď kondenzací plynů, či tavením pevných materiálů. Během kondenzace plynu dojde k přiblížení molekul látky. Tímto dojde k podstatnému omezení pohybu molekul oproti plynům a nahuštění molekul může vést až ke vzniku klastrů, což jsou pevnější, nestabilní a stále se měnící uspořádání. Klastry či jednotlivé částice se mohou posouvat, což kapalinám umožňuje téci a vyplnit nádobu určitého tvaru, ve které jsou uzavřeny. Elektrická vodivost kapalin je velmi závislá na faktorech, zejména na složení a struktuře, množství příměsí v kapalině a také množství nečistot, které jsou v ní obsaženy. Z tohoto důvodu se z hlediska zkoumání vodivosti dělí kapaliny na extrémně čisté kapalně izolanty a technicky čisté kapalně izolanty.

Extrémně čisté kapalně izolanty obsahují volné nosiče elektrického náboje, které vznikají ionizací, disociací, tepelnou excitací a emisí elektronů a které způsobují velmi nízkou konduktivitu.

Technicky čisté kapalně izolanty mají vlivem větší koncentrace volných nosičů náboje vyšší konduktivitu oproti extrémně čistým kapalným izolantům. U kapalných izolantů se rozlišují dva druhy vodivosti, a sice iontová a elektroferitická. Různý charakter kapalných izolantů ovlivňují například druhy příměsí. [7].

4.1.1 Iontová vodivost

U iontové elektrické vodivosti se rozlišuje vlastní a nevlastní vodivost. Vlastní vodivost způsobují pohybující se ionty, které jsou důsledkem disociace kapaliny, jejíž stupeň závisí na relativní permitivitě kapaliny.

Oproti tomu nevlastní vodivost způsobují disociované příměsi a vyskytuje se u všech technicky čistých kapalin. Stupeň disociace molekul příměsí tentokrát záleží hlavně na jejich struktuře, koncentraci a na relativní permitivitě rozpouštědla [7].

4.1.2 Elektroferitická vodivost

Je přítomná v tzv. koloidních systémech, což jsou systémy složené ze dvou fází - jedna je tvořena jemnými částicemi (nazývá se disperzní fáze) a je rozptýlena v druhé fázi (nazývá se disperzní prostředí). V kapalinách se pak vyskytují emulze a suspenze, mezi nimiž je takový rozdíl, že u emulze jsou obě fáze kapalinou, zatímco u suspenze je disperzním prostředím kapalina a disperzní fází je pevná látka. Stabilitu těchto látek zajišťují elektrické náboje na povrchu disperzní fáze, díky jejichž silovým účinkům se fáze neoddělí. Částice mají také vůči disperznímu prostředí určitý potenciál nazývaný jako elektrokinetický potenciál dosahující hodnot zhruba 0,05 až 0,07 V [7].

4.2 Elektrická pevnost kapalných izolantů

V kapalinách jsou výbojové děje závislé na mnoha parametrech - příměsi (může je tvořit například i voda či rozpuštěný plyn), tvar a znečištění elektrod, rozložení elektrického pole, tlak, teplota a další. Díky těmto rozmanitostem je velmi obtížné popsat mechanismus přeskočků v kapalinách a dosud získané poznatky se buď liší, nebo si dokonce odporují. I přesto je však možné stanovit několik základních rysů pro elektrické výboje probíhající v kapalinách.

Oproti elektrické pevnosti plyných izolantů je elektrická pevnost izolantů kapalných vyšší. Hodnotu přeskokového napětí může ovlivnit i materiál a povrchová úprava elektrod. Mechanismus přeskočků může být různého charakteru - například elektrického či tepelného.

Výboje se začínají vyvíjet především v místech se zvýšenou koncentrací nečistot, a to především v místech s plynovými bublinkami či pevnými nečistotami. Z tohoto důvodu je pro omezení nepředvídatelné výbojové činnosti důležité odstranit z kapalného izolantu pokud možno všechny nečistoty. Toho se dosahuje za pomoci mnohonásobné destilace, odplynění, filtrace a někdy se provádí i elektrolytické čištění [7].

4.3 Používané materiály kapalných izolantů

4.3.1 Přírodní kapalně izolanty

Mezi přírodní kapalně izolanty patří minerální oleje. Ty se získávají z ropy za pomoci čištění a frakční destilace, kdy jsou z ropy postupně oddělovány prvky jako benzín, lehké a těžké oleje, asfalt a další, čištěním lehkých olejů, neutralizací, následnou stabilizací a přidáním inhibitorů. Minerální oleje jsou nepolární, hořlavé a hyroskopické, což znamená, že přijímají vlhkost a tím pádem závisí jejich elektrická pevnost také na teplotě. Ošetřují se pomocí práškování, čímž se doplňují přísady, odplyňováním ve vakuu, filtrací a sušením. Do této skupiny minerálních olejů patří například transformátorový olej, na který jsou ve spínací technice kladeny požadavky jako malý ztrátový činitel, vysoká elektrická pevnost, odolnost proti stárnutí a také pokud možno co nejmenší obsah nečistot. Zároveň do této skupiny spadají kabelové oleje, do kterých se přidávají látky pro snížení stékavosti z důvodu teplotní závislosti viskozity, a také kondenzátorové oleje.

Další skupinou přírodních kapalných izolantů jsou rostlinné oleje, které jsou ekologicky nezávadné. Dělí se na nevysychavé, což je například ricinový olej používaný k impregnaci papírů, a na vysychavé (vysychají oxidací a jedná se o nevratný proces), které se používají například jako elektroizolační laky a spadají sem lněný a dřevní olej, které jsou ale postupně nahrazovány syntetickými pryskyřicemi [9].

4.3.2 Syntetické kapalně izolanty

Syntetické kapalně izolanty začaly v posledních několika letech nahrazovat minerální oleje, které byly hořlavé. Oproti nim mají lepší vlastnosti a jsou také výhodnější z ekologického hlediska. Mají dobré elektrické vlastnosti, jsou odolné proti záření a jsou stabilní i za vyšších teplot.

Do této skupiny spadají například polybuteny, chlorované uhlovodíky, fluorované uhlovodíky, které nejsou agresivní vůči kovům (pouze pokud nejsou vlhké) a používají se v transformátorech a výkonových spínačích, dále organické estery sloužící jako dielektrikum vysokofrekvenčních kondenzátorů a silikonové oleje, které jsou vhodné pro použití za vysokých teplot, nicméně jsou drahé [9].

Závěr

Děje probíhající v plynných, pevných a kapalných izolantech mohou vést až k destrukci zařízení, ve kterém jsou tyto izolanty použity. Z tohoto důvodu se v zařízeních, kde očekáváme výbojovou činnost, snažíme zvýšit elektrickou pevnost použitého izolantu, abychom této předpokládané výbojové činnosti zamezili. Ta by jinak vedla k průrazu či přeskoku v závislosti na použitém materiálu.

V případě kapalných materiálů ovlivňují elektrickou pevnost faktory jako nečistoty a plynové bubliny v kapalině, ale také tlak, či tvar elektrod. Stejně tak může být ovlivněna elektrická pevnost pevných materiálů vlivem dutinek, v nichž mohou vznikat výboje. U pevných izolantů navíc dochází k přeskoku, který vede k destrukci. Proto je důležité zvolit vhodný izolační materiál a konstrukci zařízení, aby nedošlo k jeho zničení.

Všechny jevy, které ovlivňují elektrickou pevnost plynných, kapalných a pevných izolantů, které jsou používány ve vysokonapěťových zařízeních, se snažíme eliminovat, protože v praxi mohou vést ke snížení elektrické pevnosti, či dokonce k destrukci izolantu. Tato snaha eliminovat jevy, které mohou přispět ke snížení elektrické pevnosti, se projevuje již během výroby izolantu.

Tato práce shrnuje základní poznatky ohledně teorie výbojové činnosti a používaných materiálů a může být použita jako základ pro další rozvíjející práci v dané problematice.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Elektrický izolant. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_izolant
- [2] Ionizovaný plyn. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ionizovan%C3%BD_plyn
- [3] Elektrický výboj. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_v%C3%BDboj
- [4] Elektrostatický výboj. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrostatick%C3%BD_v%C3%BDboj
- [5] VEVERKA, A. *Technika vysokých napětí*. Praha: SNTL, 1978.
- [6] KUBEŠ, P. *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika*. Praha: ČVUT FEL, 2004.
- [7] MENDLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006.
- [8] Homogenní pole. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Fyzik%C3%A1ln%C3%AD_pole#Homogenn.C3.AD_pole
- [9] Elektroizolační materiály: Přednáška 04_b. *Janoud.cz* [online]. [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://janoud.cz/sub/jcueltech/>
- [10] Elektronegativita. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronegativita>
- [11] Vzduch. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vzduch>
- [12] Kovalentní vazba. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Kovalentn%C3%AD_vazba
- [13] Vakuum. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vakuum>
- [14] LAUZON, D. a H. KOCH. Sulfur hexafluoride SF6. *IEEE* [online]. 2007 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4275510&query=Text%3DSulfur+hexafluoride+SF6>

- [15] OKUBO, H. a A. BEROUAL. Recent trend and future perspectives in electrical insulation techniques in relation to sulfur hexafluoride (SF₆) substitutes for high voltage electric power equipment. *IEEE* [online]. 2011 [cit. 2013-05-17].
Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5739421&query=Text%3DRecent+trend+and+future+perspectives+in+electrical+%09insulation+techniques+in+relation+to+sulfur+hexafluoride+%28SF6%29+substitutes+for+high+%09voltage+electric+power+equipment>
- [16] Dielektrikum. *Wikipedie* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>
- [17] JØRSTAD, J. *Effect of Barriers in Air Insulated Rod-Plane Gaps*. Trondheim: NTNU, 2012.

Přílohy

Příloha A - tabulka naměřených hodnot Paschenovy křivky

d[cm]	p[kPa]	p·d[cm·kPa]	U _{M1} [kV]	U _{M2} [kV]	U _{M3} [kV]	U _{M4} [kV]	U _{M5} [kV]	U _M [kV]	U _P [kV]
0,6	0,01	0,006	0,9	0,63	0,62	0,9	1,1	0,83	-0,00948
1	0,01	0,01	0,9	0,9	1,1	1,1	1,1	1,02	-0,02242
0,6	0,02	0,012	0,8	-	-	-	-	0,8	-0,03163
0,6	0,03	0,018	0,7	-	-	-	-	0,7	-0,0778
1	0,02	0,02	0,6	-	-	-	-	0,6	-0,10369
0,6	0,04	0,024	0,6	-	-	-	-	0,6	-0,19004
1	0,03	0,03	0,7	-	-	-	-	0,7	-0,66983
0,6	0,05	0,03	0,6	-	-	-	-	0,6	-0,66983
0,6	0,06	0,036	0,57	-	-	-	-	0,57	1,651222
1	0,04	0,04	0,5	-	-	-	-	0,5	0,663538
0,6	0,07	0,042	0,6	-	-	-	-	0,6	0,537755
0,6	0,08	0,048	0,57	-	-	-	-	0,57	0,378334
1	0,05	0,05	0,58	-	-	-	-	0,58	0,352655
0,6	0,09	0,054	0,6	-	-	-	-	0,6	0,317853
1	0,06	0,06	0,57	-	-	-	-	0,57	0,287948
0,6	0,1	0,06	0,56	-	-	-	-	0,56	0,287948
1	0,07	0,07	0,56	-	-	-	-	0,56	0,264479
1	0,08	0,08	0,55	-	-	-	-	0,55	0,255231
1	0,09	0,09	0,56	-	-	-	-	0,56	0,252483
1	0,1	0,1	0,54	-	-	-	-	0,54	0,253203
0,6	0,4	0,24	0,4	0,43	0,4	0,47	0,46	0,432	0,335811
0,6	0,7	0,42	0,27	0,29	0,3	0,33	0,4	0,318	0,456981
0,6	1	0,6	0,6	0,58	0,55	0,51	0,45	0,538	0,571786
0,6	1,5	0,9	0,65	0,7	0,61	0,64	0,7	0,66	0,751608
0,6	2	1,2	0,78	0,81	0,79	0,82	0,77	0,794	0,921303
1	2	2	1,3	1,2	1,3	1,3	1,4	1,3	1,343119
0,6	3,4	2,04	1,2	1,3	1,21	1,1	1,1	1,182	1,363359
0,6	4	2,4	1,47	1,5	1,5	1,58	1,49	1,508	1,542753
0,6	6	3,6	1,9	1,8	1,7	1,9	2	1,86	2,112988
1	4	4	2	2	2,1	2	2,1	2,04	2,295909
0,6	8	4,8	2,2	2,1	2,3	2,3	2,4	2,26	2,653665
1	6	6	3	3,1	2,8	3,1	2,9	2,98	3,17407
0,6	10	6	2,9	2,7	3	3	3,2	2,96	3,17407
1	8	8	3,9	4,1	3,8	3,9	4	3,94	4,009246
1	10	10	4,7	4,5	4,6	4,7	4,7	4,64	4,814899
0,6	20	12	5,3	5,4	5,2	5	5,2	5,22	5,598383
0,6	30	18	7	7,1	7,4	7,2	7,2	7,18	7,854898
1	20	20	8	8,5	8	8,3	7,9	8,14	8,583526
0,6	40	24	9,1	9	9,4	9,4	9	9,18	10,01404
1	30	30	11	10,8	11,1	11,1	11	11	12,10589
0,6	50	30	10,8	10,7	10,9	11	11,2	10,92	12,10589
0,6	60	36	12,9	12,8	12,6	12,9	12,8	12,8	14,14693
1	40	40	13,8	14,3	14,2	14,1	14,1	14,1	15,48465
0,6	70	42	14,7	14,5	14,8	14,9	14,7	14,72	16,1475
0,6	80	48	16,4	16,3	16,5	16,6	16,6	16,48	18,11463
1	50	50	16,8	17	16,4	17,1	17	16,86	18,76383
0,6	90	54	18,3	18,1	18,4	18,2	17,8	18,16	20,0534
0,6	97,4	58,44	19,7	19,7	19,8	19,6	19,8	19,72	21,47212
1	60	60	19,7	19,9	19,7	19,9	19,7	19,78	21,96763
1	70	70	22,6	22,8	22,6	22,9	22,9	22,76	25,11128
1	80	80	25,7	25,8	25,8	25,8	25,6	25,74	28,20515
1	90	90	28,8	28,4	28,4	28,6	28,5	28,54	31,25674
1	97,4	97,4	30,6	30,6	30,4	30,3	30,6	30,5	33,49107