

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Mechanismy přeskočení a průrazu v izolačních materiálech pro
techniku vn**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Filip ZMEKO**
Osobní číslo: **E17B0063P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Mechanismy přeskočků a průrazů v izolačních materiálech pro techniku vn**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte a shrňte současný stav problematiky vzniku výboje v plynných izolantech.
2. Uveďte mechanismy, které vedou k přeskočků v kapalných izolantech a průrazů v pevných izolačních materiálech.
3. Analyzujte nejnovější poznatky v tomto oboru v kontextu k různým typům používaných materiálů.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Andreas Küchler, High-voltage Engineering: Fundamentals – Technology – Applications, Springer 2018.
2. <http://www.mv.helsinki.fi/tpaulin/Text/hveng.pdf>.
3. <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=94>.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Uvedená bakalářská práce se zabývá problematikou vzniku přeskočků a průrazů v izolačních materiálech a poskytuje stručný náhled do izolačních materiálů aktuálně využívaných či zkoumaných s cílem řešit náhradu materiálů ohrožujících životní prostředí. Ve třech hlavních kapitolách popisuje proces přeskočků či průrazů v plynném, kapalném a pevném izolačním médiu s uvedením příkladů nejvýznamnějších materiálů a charakteristikou jejich vlastností.

Klíčová slova

Průrazné napětí, elektronová lavina, polarita elektrod, Paschenova křivka, homogenita pole, Townsendovy koeficienty, Raetherův výboj, izolační plyn, elektrický průraz, intenzita elektrického pole, dielektrická pevnost, izolační olej, nárazová ionizace, fotoionizace, tepelná ionizace.

Abstract

This thesis goes over the issue of the breakdown mechanism in insulation materials, and provides a brief overview of the currently used insulation materials and materials that are subjected that is researched in order to solve the problem of the replacement of environmentally hazardous materials. This thesis is divided into three main chapters. It contains views into the breakdown mechanism of gaseous, liquid and solid insulating materials with an introduction to the most important materials, as well as their properties.

Keywords

Breakdown voltage, electron avalanche, electrode polarity, Paschen curve, field homogeneity, Townsend's coefficients, streamer discharge, insulating gas, electric breakdown, electric field strength, dielectric strength, insulating oil, collision ionization, photoionization, thermal ionization.

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 15.6.2020

Filip Zmeko

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
ÚVOD	14
1 ÚVOD DO VZNIKU PŘESKOKU V PLYNNÝCH IZOLANTECH	16
1.1 V-A CHARAKTERISTIKA VÝBOJE V PLYNU	17
1.2 DRUHY VÝBOJŮ V PLYNNÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLECH	19
1.2.1 Doutnavý výboj	20
1.2.2 Koróna	21
1.2.3 Obloukový výboj	21
1.2.4 Jiskrový výboj	22
1.2.5 Klouzavý výboj	22
1.2.6 Vnitřní částečný výboj	23
1.3 PROCES VZNIKU ELEKTRONOVÉ LAVINY V PLYNU	23
1.4 TOWNSENDovy KOEFICIENTY A PROCES IONIZACE	28
1.4.1 Odvození prvního Townsendova koeficientu α	28
1.4.2 Efektivní Townsendův koeficient α_{ef} a druhý Townsendův koeficient γ	30
1.5 PASCHENŮV ZÁKON A PASCHENOVA KŘIVKA	31
1.6 ROZVOJ RAETHEROVA MECHANISMU VÝBOJE	34
1.6.1 Rozvoj Raetherova výboje v uspořádání s vysokým faktorem homogenity η	35
1.6.2 Rozvoj Raetherova výboje v uspořádání s nízkým faktorem homogenity η	36
1.7 VLIV POLARITY ELEKTROD NA VZNIK VÝBOJE V PLYNECH	38
1.7.1 Kladná polarita hrotové elektrody v nehomogenním poli	38
1.7.2 Záporná polarita hrotové elektrody v nehomogenním poli	39
1.8 VLIV ČASOVĚ PROMĚNNÉHO NAPĚTÍ NA VZNIK VÝBOJE V PLYNECH	42
1.9 AKTUÁLNĚ VYUŽÍVANÉ IZOLAČNÍ PLYNY	43
1.9.1 Hexafluorid sírový (SF_6)	43
1.9.2 Kombinace hexafluoridu sírového (SF_6) a dusíku (N_2)	44
1.9.3 C5-Fluoroketon (Novec 5110) a C4-Fluornitril (Novec 4710)	45
1.9.4 Perfluorocarbonové plyny (PFC)	47
1.9.5 Zelený plyn pro rozvodnou síť g^3 (Green gas for grid)	48
1.9.6 Aplikace izolačních povrchů a drsnost elektrod	48

2 ÚVOD DO VZNIKU PŘESKOKU V KAPALINÁCH	50
2.1 PROCES VZNIKU PŘESKOKU V KAPALINÁCH	51
2.2 TEORIE PRVOTNÍHO PROCESU PROPAGACE PŘESKOKU	54
2.2.1 <i>Uspořádání molekulové struktury kapaliny vnějším elektrickým polem</i>	54
2.2.2 <i>Kolizní ionizace v objemu kapaliny</i>	55
2.2.3 <i>Snížené povrchové napětí na elektrodě</i>	55
2.2.4 <i>Výskyt cizích částic</i>	55
2.3 VLIV OBJEMU KAPALINY, PLOCHY ELEKTRODY A DÉLKY NAMÁHÁNÍ	56
2.4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ DIELEKTRICKOU PEVNOST KAPALIN	58
2.4.1 <i>Kontaminace</i>	58
2.4.2 <i>Frekvence napětí</i>	59
2.4.3 <i>Teplota</i>	59
2.4.4 <i>Tlak</i>	59
2.4.5 <i>Konfigurace elektrického pole</i>	60
2.5 IZOLAČNÍ OLEJE A JEJICH ROZDĚLENÍ	60
2.5.1 <i>Minerální oleje</i>	61
2.5.2 <i>Syntetické oleje</i>	62
2.5.3 <i>Přírodní (rostlinné) oleje</i>	64
3 ÚVOD DO VZNIKU PRŮRAZU V PEVNÝCH IZOLANTECH	65
3.1 ELEKTRICKÝ PRŮRAZ	66
3.2 TEPELNÝ PRŮRAZ	68
3.3 PROCES STÁRNUTÍ	71
3.4 ROZDĚLENÍ PEVNÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	73
3.4.1 <i>Anorganické izolační materiály</i>	74
3.4.2 <i>Organické izolační materiály</i>	76
4 PROGNOZA V OBLASTI IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	78
4.1 OBLAST IZOLAČNÍCH PLYNŮ	78
4.2 OBLAST IZOLAČNÍCH KAPALIN	83
4.3 OBLAST PEVNÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	86
5 ZÁVĚR	89
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	91
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	95

Seznam zkratk a symbolů

A	[m ²]	chladičí plocha
A	[V.s]	oblast rozvoje vodivého kanálu
A, a	[m ⁻¹ .bar ⁻¹]	konstanty zahrnující konkrétní vlastnosti plynu
a, b, c		body střetu křivky $P_O(T)$ a $P_G(T)$
α	[m ⁻¹]	první Townsendův koeficient
α_{ef}	[m ⁻¹]	efektivní Townsendův koeficient
B, b	[V.m ⁻¹ .bar ⁻¹]	konstanty zahrnující konkrétní vlastnosti plynu
β	[m ⁻¹]	třetí Townsendův koeficient
C	[F]	kapacita kondenzátoru
CR		chloroprenový kaučuk
ČV		částečný výboj
d	[mm]	vzdálenost mezi elektrodami
d		symbol derivace
∂		znak parciální derivace
dN	[-]	přírůstek elektronů
dx	[m]	element délky
ΔP_J	[W]	Jouleovy ztráty
δ	[°]	ztrátový úhel
E	[eV]	potenciální energie elektronu
$E, E(x)$	[V.m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
E_o	[V.m ⁻¹]	původní intenzita elektrického pole
E_c	[eV]	horní hranice zakázaného pásu
E_g	[eV]	šířka zakázaného pásu
EP		epoxidová pryskyřice
E_p	[kV.mm ⁻¹]	elektrická pevnost
EPR		ethylen-propylenový kaučuk
E_v	[eV]	horní hranice valenčního pásu
e	[-]	Eulerovo číslo ($e \doteq 2,718$)
e	[C]	elementární náboj elektronu ($e \doteq 1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

ϵ_0	[F.m ⁻¹]	permitivita vakua ($\epsilon_0 \doteq 8,854 \cdot 10^{-12}$ F.m ⁻¹)
ϵ_r	[-]	relativní permitivita materiálu
$F(\lambda)$	[-]	pravděpodobnost ionizace atomu volným elektronem po uražení střední volné dráhy λ
f	[Hz]	frekvence
f	[-]	činitel překročení hodnoty U_p
GIS		gas-insulated switchgear (zapouzdřená rozvodna)
GIL		gas-insulated transmission line (plynem izolované přenosové vedení)
GCB		gas circuit breaker (plynem plněný vypínač)
GWP		global warming potential (dopad na globální oteplování)
g^3		green gas for grid (zelený plyn pro rozvodnou síť)
γ	[m ⁻¹]	druhý Townsendův koeficient
h	[J.s]	Planckova konstanta ($h \doteq 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)
η	[m ⁻¹]	pokles volných elektronů za jednotku délky
η	[-]	Schwaigerův faktor homogenity
η	[-]	odchylka od Ohmova zákona
I	[A]	elektrický proud
I_C	[A]	kapacitní složka elektrického proudu
I_R	[A]	odporová složka elektrického proudu
i	[A]	okamžitá hodnota elektrického proudu
φ	[°]	úhel mezi napětím a proudem
k	[-]	konstanta charakterizující vlastnosti plynu a materiál katody
k	[J.K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta ($k \doteq 1,381 \cdot 10^{-23}$ J.K ⁻¹)
λ	[m]	střední volná dráha elektronu
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
λ_m	[m]	střední volná dráha elektronu mezi jednotlivými elastickými srážkami
MF		melamin-formaldehydová pryskyřice
m_o	[kg]	hmotnost elektronu ($m_o \doteq 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg)
N	[-]	počet elektronů
N'_n	[-]	celkový počet vygenerovaných elektronů v n -té elektronové lavině
N_l	[-]	počet primárních elektronů
N_c	[-]	celkový počet uvolněných elektronů z katody

N_{krit}	[-]	počet elektronů nutný pro rozvoj Raetherova výboje ($N_{krit} = e^{14}$ až e^{18})
N_n	[-]	počet uvolněných elektronů z katody vlivem n-té elektronové laviny
NR		přírodní kaučuk
n	[-]	aktuální počet volných elektronů v elektronové lavině
n	[-]	počet elastických srážek volných elektronů a neutrálních atomů za dráhu l/α
n	[-]	hlavní kvantové číslo
ODP		ozone depletion potential (dopad na ozonovou vrstvu)
ONAN		oil natural air natural (transformátor chlazený olejem v uzavřené nádobě ochlazované vzduchem)
PA		polyamid
PE		polyethylen
PET		polyethylentereftalát (polyester)
PF		fenolformaldehydová pryskyřice
PFC		perfluorinated compounds (perfluorované sloučeniny)
PS		polystyren
PTFE		polytetrafluorethylen (teflon)
PUR		polyuretanová pryskyřice
PVC		polyvinylchlorid
P_G	[W]	generovaný tepelný výkon
P_O	[W]	odvedený tepelný výkon
P_Z	[W]	ztrátový výkon
p	[Pa]	tlak
π	[-]	Ludolfovo číslo ($\pi \doteq 3,142$)
q	[C]	náboj elektronu ($q \doteq -1,602 \cdot 10^{-19}$ C)
θ	[°]	kontaktní úhel mezi podložkou a kapkou
R	[Ω]	elektrický odpor
R_0	[Ω]	izolační odpor měřený při nízkých hodnotách napětí
r	[m]	poloměr molekuly
ρ	[Ω.m]	měrný odpor materiálu
S	[mm ²]	průřez vodiče
SI		silikonová pryskyřice

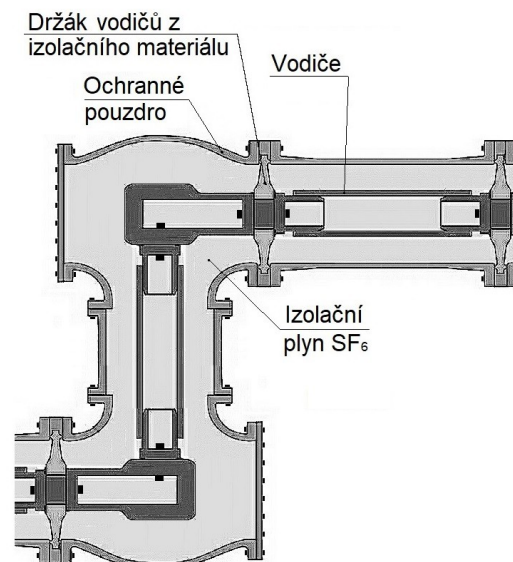
SIR		silikonový kaučuk
T	[K]	absolutní teplota
T_0	[K]	teplota okolního prostředí
t	[s]	čas
t_0	[s]	čas k dosažení přeskokového napětí
t_1, t_2, t_3	[s]	časová zpoždění
t_c	[s]	celkové časové zpoždění
$tg\delta$	[-]	ztrátový činitel
U	[V]	elektrické napětí
U_i	[V]	ionizační napětí
U_k	[V]	počáteční napětí koróny
U_{max}	[V]	vrcholová hodnota napětí
UP		nenasycené polyesterové pryskyřice
U_p	[V]	přeskokové, popř. průrazné napětí
$U_{p\ min}$	[V]	minimální hodnota přeskokového napětí
$U_{p\ vak}$	[V]	přeskokové napětí ve vakuu
u	[V]	okamžitá hodnota elektrického napětí
uvn		ultra vysoké napětí
vvv		velmi vysoké napětí
vn		vysoké napětí
W	[eV]	energie nashromážděná volným elektronem během dráhy λ
W_a	[eV]	energie potřebná k uvolnění volného elektronu z katody
W_i	[eV]	ionizační energie
W_k	[eV]	kinetická energie kladného iontu
W_m	[eV]	energie nashromážděná volným elektronem během dráhy λ_m
ω	[s ⁻¹]	úhlová frekvence
XLPE		síťovaný polyethylen
x	[m]	délka

Úvod

Významnou část oboru vysokonapěťové techniky tvoří problematika návrhu a výroby izolačního systému zařízení. S tím úzce souvisí znalosti o mechanismu přeskoku a průrazu v různých dnes využívaných izolačních materiálech. Důležitost této problematiky spočívá především v důsledcích vznikajících při narušení konkrétního izolačního systému. Zmíněné důsledky mohou být v některých případech až fatálního charakteru. Oblasti technologie výroby izolačního systému byla vždy věnována zvýšená pozornost, ale v poslední době je zmiňované odvětví nuceno reagovat na nové trendy v přenosu a rozvodu elektrické energie.

Důvodem je jednak navyšování napěťových hladin pro přenos a v souvislosti s tím také realizace stejnosměrných systémů na úrovni uvn, ale také snaha využívat ekologicky přijatelné materiály (biodegradabilní kapaliny, náhrada SF₆, ...). Hlavním cílem oboru je tedy dosažení požadované spolehlivosti izolačního systému v nových podmínkách, což zahrnuje procesy od jeho návržení pro konkrétní účely, až po metody jeho diagnostiky v provozu. Návrh funkčního izolačního systému zahrnuje především volbu vhodných materiálů a jejich konfiguraci. Vzhledem k tomu, že chování izolačních materiálů vystavených působení elektrického pole není závislé pouze na velikosti přiloženého napětí, ale zahrnuje celou řadu dalších vlivů, není vždy možné vyjít pouze z výpočtů a simulací. Řada informací používaných při návrhu a výrobě byla získána na základě provozních zkušeností a časově náročných testů. Dostatek informací pro predikci chování a životnosti materiálů tak musí vycházet z co možná nejširšího souboru zdrojů zahrnujících i podrobné znalosti o fyzikálních zákonitostech výstavby výboje vedoucího k selhání izolace.

Pro návrh izolačního systému je klíčová zejména vhodná kombinace jednotlivých materiálů a jejich vzájemná konfigurace, která rozhoduje o výsledné odolnosti celého uspořádání. To zahrnuje mimo jiné volbu skupenství, jelikož vlastnosti plynného, kapalného a pevného izolačního materiálu se před průrazem a při průrazu či přeskoku od sebe velice liší. Aspekty, které mohou rozhodnout o konkrétní podobě izolace, jsou jak technické a technologické, tak samozřejmě finanční, to znamená,



Obr. 1 - 1: Plynotěsný díl zapouzdřené rozvodny s plynem SF₆.

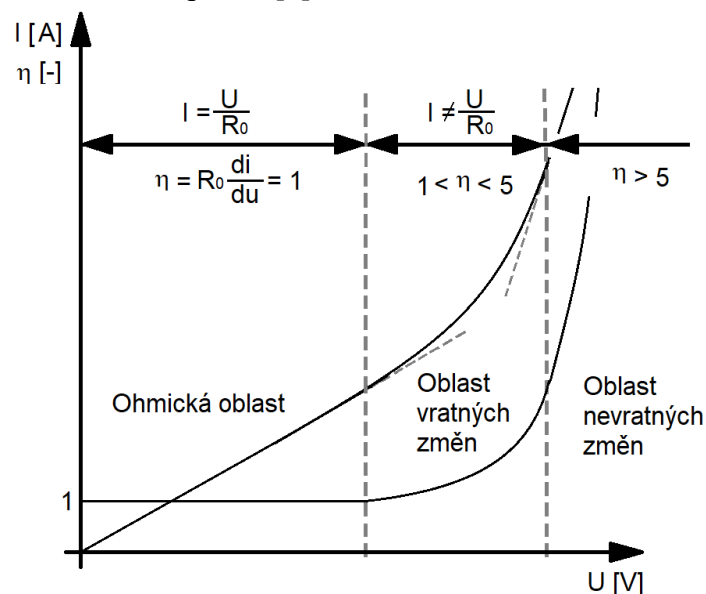
že není například možné využít kapalného média a je nezbytné využití plynné fáze z důvodu celkových nákladů na realizaci (zapouzdřené rozvodny s plynem SF₆, viz *obr. 1 - 1*). Zároveň obvykle platí, že čím komplikovanější a dražší je zařízení, tím jsou větší i požadavky na kvalitu jeho izolačního systému.

Navržený izolační systém je potom vystavený zkušebnímu procesu, který otestuje potřebnou odolnost budoucí izolace. Zmíněný proces se nazývá koordinace izolace a podle ČSN EN 60071-1 to je „*volba elektrické pevnosti zařízení ve vztahu k provozním napětím a přepětím, která se mohou vyskytovat v síti, pro kterou je zařízení určeno, s respektováním provozních podmínek okolí a charakteristik použitých ochranných zařízení*“ [45]. Jde o komplexní postup, který ve svých výpočtech zohledňuje velké množství vnějších vlivů v podobě korekčních koeficientů. Správnost určení všech zkušebních výdržných napětí je naprosto klíčová a vyžaduje dlouholeté zkušenosti.

1 Úvod do vzniku přeskoku v plynných izolantech

Použití plynu jako izolantu je velice častou volbou, jelikož plyny mají několik jedinečných vlastností. Patří mezi ně například zánik vodivého kanálu po uhašení výboje a téměř okamžitá obnova izolačního prostředí, ve kterém k výboji došlo, tzn. není nutná obměna plynu po každém přeskoku. Pravidelná obměna však stále může být nutná například z důvodu vzniku vodivých částic, které narušují kvalitu izolačního média, a tím plyn degraduje. Dále jsou zde dobré izolační vlastnosti a frekvenční nezávislost relativní permitivity ϵ_r . V porovnání s kapalnými a pevnými izolačními materiály mají však plyny nízkou dielektrickou pevnost, zejména pokud je izolační prostor tvořen okolním vzduchem. V případě nutnosti vyšších přeskokových napětí je potřeba plyny nahradit pevnými, či kapalnými izolanty [1]. Ovšem nejběžnějším řešením je kombinace více izolačních materiálů v jednom systému.

U plynů je relativně snadné definovat jednotlivé procesy celého přeskoku, což u zbylých dvou skupenství neplatí. Existují matematické modely popisující prvotní procesy šíření tzv. elektronové laviny v homogenním poli, viz kapitola 1.3, které je ovšem často nutné verifikovat empiricky zjištěnými závislostmi s využitím nástrojů statistiky. Je také možné vyjádřit přeskoková napětí s velmi vysokou přesností pro konkrétní systémy. Plyny dále mají nižší hmotnost, což značně ulehčuje jejich přepravu a další manipulaci [1].

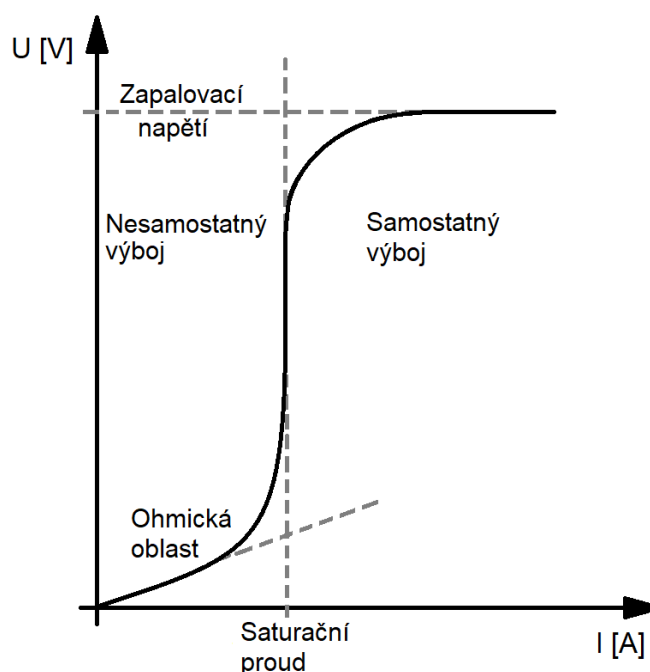


Obr. 1 - 2: Závislost proudu I a poměrné odchylky od Ohmova zákona η na napětí U , kde R_0 je izolační odpor měřený při nízkých hodnotách napětí [3].

V případě vzniku výboje v plynech, ale obecně i průrazu v dalších izolačních materiálech, je proces předcházen nelineární závislostí mezi proudem a napětím, tzn. neplatí Ohmův zákon [1], jelikož v namáhaném materiálu začíná docházet k atomárním změnám a k navyšování teploty v místě přeskoku, což má za následek různé hodnoty rezistivity, viz obr. 1 - 2.

1.1 V-A charakteristika výboje v plynu

Při pozvolném navyšování napětí na elektrodách ohraničujících izolační prostředí začne přes toto prostředí lineárně narůstat proud, který je tvořený volnými nosiči náboje, urychlovanými přiloženým elektrickým polem. Jedná se o tzv. ohmickou oblast V-A charakteristiky, viz obr. 1.1 - 1. Volné nosiče náboje, tj. volné elektrony, pozitivní či negativní ionty, nejsou ovšem vyprodukovány vnějším elektrickým polem, ale vyskytují se v plynu například v důsledku přirozeného radioaktivního pozadí nebo procesu fotoionizace [1]. Dochází také k nárazu již volného elektronu do neutrálního atomu a vytvoření nového elektronu. Konkrétně se jedná o tepelnou ionizaci vlivem nahodilého pohybu částic (uvažujeme teplotu vyšší než 0 K), tj. Brownův pohyb [6]. Elektrické pole v ohmické oblasti je příliš slabé a urychlované volné nosiče náboje nemají dostatek kinetické energie pro další nárazovou ionizaci, která by vedla k produkci velkého počtu dalších nosičů náboje. Proto je výboj v této oblasti charakteristiky nazýván nesamostatný (vznik pomocí vnějšího ionizačního činidla), viz levá část obr. 1.1 - 1 ohraničená saturačním proudem [1].

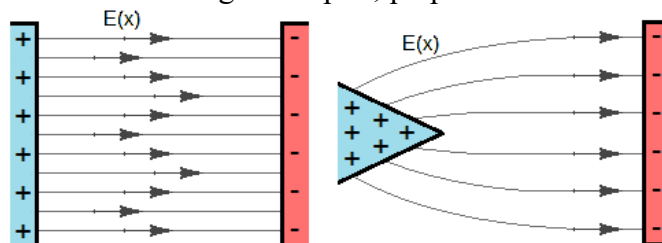


Obr. 1.1 - 1: Začátek V-A charakteristiky výboje v plynném izolačním médiu [1].

S dalším navýšením napětí se začnou volné nosiče náboje urychlovat a před srážkou s většími atomy plynu mohou tedy nashromáždit dostatečné množství kinetické energie, což má po nárazu za

následek vyražení elektronu z atomu plynu. Nově vytvořené elektrony a kladné ionty jsou poté urychlovány, aby později proces zopakovaly, tj. proces nárazové ionizace plynu vnějším elektrickým polem a část V-A charakteristiky vyhrazena tzv. samostatnému výboji. Dochází ke generování nových volných nosičů náboje, tzn. přestává platit aplikace Ohmova zákona, viz pravá část obr. 1.1 - 1. Zmiňovaný proces se začíná projevovat při dosažení tzv. saturační hodnoty proudu a jedná se o první předpoklady pro vznik vodivého kanálu [1].

S nárůstem počtu volných nosičů náboje roste i proud protékající izolačním prostředím a po dosažení zapalovacího napětí nastává samostatný výboj. Jedná se o tzv. Townsendův mechanismus výboje. Zmíněný proces je způsoben nárazovou ionizací plynu, tj. srážkami urychlených volných nosičů náboje s neutrálními atomy plynu. Uvažovaná část V-A charakteristiky nezpůsobuje žádné změny v přiloženém elektrickém poli. Nacházíme-li se v homogenním poli, po překročení této části se rapidně zvýší hodnota proudu a napětí poklesne. Dojde tedy k výboji, který není předcházen žádným částečným výbojem, tzn. dané zapalovací napětí je současně i napětí přeskokové [1]. Na obr. 1.1 - 2 je znázorněno homogenní a nehomogenní pole.

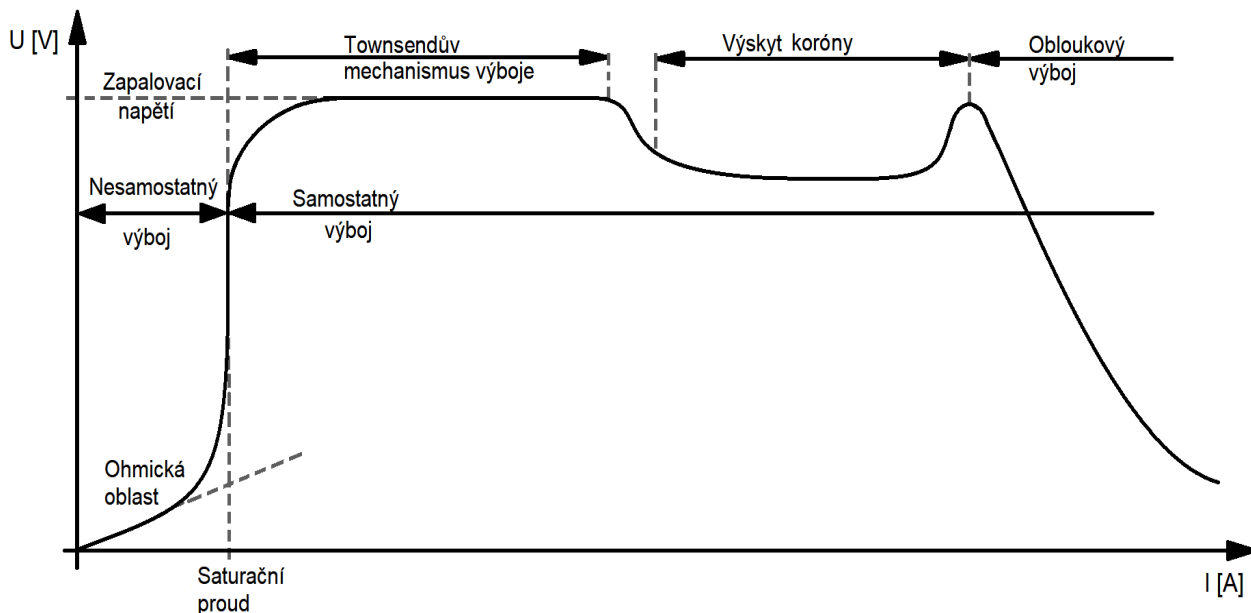


Obr. 1.1 - 2: Příklad uspořádání elektrod s homogenním polem (vlevo) a nehomogenním polem (vpravo).

Pokud se nacházíme v nehomogenním poli, např. hrot a desková elektroda s dostatečnou přeskokovou vzdáleností, viz obr. 1.1 - 2 vpravo, vznikne při dosažení zapalovacího napětí na hrotové elektrodě částečný výboj, tzn. nedochází ke vzniku vodivého kanálu, který by obě elektrody propojil [1]. Jedná se o konkrétní typ částečného výboje, známý jako koróna, viz obr. 1.1 - 3. V oblasti kolem hrotu se nachází velké množství volných nosičů náboje, které ovlivňují vnější elektrické pole, tzn. začíná se projevovat vliv předvýboje. Můžeme tedy říci, že počáteční napětí pro vznik koróny je rovno zapalovacímu napětí. Proud dále narůstá a navyšuje se tedy i počet volných nosičů náboje, které více ovlivňují přiložené elektrické pole [1].

Od určitého bodu začne napětí klesat, ale proud dále narůstat. V tomto okamžiku začíná vznikat obloukový výboj, který je doprovázen velmi rychlým nárůstem volných nosičů náboje. Vytváří se velmi vodivý kanál, který je tvořen převážně horkou plazmou. Není tedy zapotřebí vysokého napětí pro protlačení velmi vysokého proudu [1], viz obr. 1.1 - 3.

V obou těchto případech, tj. homogenního i nehomogenního pole, se nacházíme v části s nelineární závislostí mezi proudem a napětím, kde je průchozí proud větší, než je proud saturační.



Obr. 1.1 - 3: Kompletní V-A charakteristika výboje v plynném izolačním médiu [1].

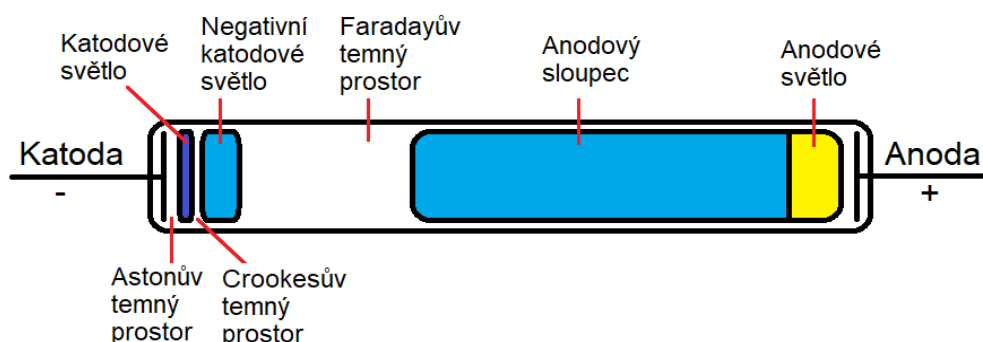
1.2 Druhy výbojů v plynných izolačních materiálech

V předešlé kapitole jsme se již nepřímo zmínili o dvou hlavních skupinách výbojů, tj. částečný výboj (koróna, klouzavý výboj a vnitřní částečný výboj) a úplný výboj s poklesem napětí a propojením obou elektrod vodivým kanálem (obloukový, či jiskrový výboj). To, jestli se vyvine výboj částečný, či úplný závisí na mnoha parametrech, ale mezi ty nejvýznamnější patří [1]:

- *homogenita pole (faktor homogenity η), tj. tvar, velikost, vzdálenost a polarita elektrod,*
- *materiál elektrod,*
- *průběh přiloženého napětí,*
- *druh plynu,*
- *výskyt nečistot v daném plynu,*
- *tlak, teplota a vlhkost daného plynu.*

1.2.1 Doutnavý výboj

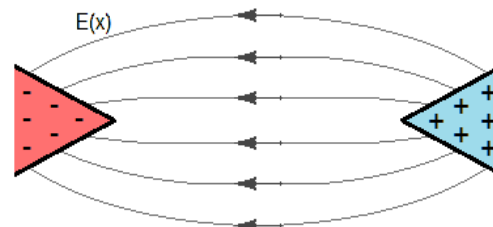
Na obr. 1.2.1 je znázorněna výbojová trubice, ve které za sníženého tlaku (cca 100 Pa) vzniká doutnavý výboj. Přimo na katodě se nachází **Astonův temný prostor**, kde elektrony uvolněné z katody nemají dostatek kinetické energie, a to jak pro excitaci, tak i ionizaci atomů plynu. Za Astonovým temným prostorem nalezneme **katodové světlo** způsobené elektrony, které již nashromáždily kinetickou energii potřebnou pro excitaci atomů. Dochází zde ovšem také ke zpětné rekombinaci kladných iontů, které se relativně pomalu vracejí ke katodě, a to z Crookesova temného prostoru. Následuje tzv. **Crookesův temný prostor**, ve kterém se pohybují elektrony, které se nezúčastnily rekombinace a nemají dostatek kinetické energie, aby odstartovaly ionizaci plynu. Poté, co elektrony získají po uražení určité vzdálenosti potřebnou kinetickou energii (rovné ionizační energii), začnou srážky s většími atomy plynu generovat nové volné elektrony, tj. proces nárazové ionizace. Nové elektrony jsou znovu urychlovány a začnou opět excitovat atomy plynu, tj. **negativní katodové světlo**. Elektrony jsou v oblasti negativního katodového světla vlivem excitací zpomalovány a přecházejí do tzv. **Faradayův temného prostoru**. Volné elektrony začnou opět shromažďovat kinetickou energii do doby, než začne docházet k další excitaci atomů, tj. **anodový sloupec**. Po určité době se také začne objevovat nárazová ionizace a zpětná rekombinace. Anodový sloupec je výrazně delší než předešlé oblasti a je zároveň nejdůležitější částí doutnavého výboje, a to pro výrobu zářivek plněných například neonem. Za touto oblastí se vyskytuje nepatrná tmavá oblast a kolem anody je tzv. **anodové světlo** [1], [12].



Obr. 1.2.1: Schématické znázornění doutnavého výboje ve výbojové trubici za sníženého tlaku.

1.2.2 Koróna

V silně nehomogenních polích, viz obr. 1.2.2, vzniká vždy před propojením elektrod a skokovým poklesem napětí částečný výboj zvaný koróna. Objevuje se okolo ostrých hran a vodičů s nízkým poloměrem, které jsou pod vysokým napětím (vedení vvn). Koróna může být také atmosférického původu (Eliášův oheň). V případě dosažení počátečního napětí pro vznik koróny



Obr. 1.2.2: Elektrické pole v uspořádání dvou jehlových elektrod.

není jev zcela rozvinut, a to vlivem statického rozptylu generovaných primárních elektronů [1]. Po překročení zmiňovaného napětí je koróna patrná trvale bez přerušení a začínají se objevovat prostorové náboje ovlivňující celý proces, viz kapitola 1.6. Při navyšování napětí se částečné výboje začnou prodlužovat a zesilovat, až po překročení určité hodnoty napětí dojde k vyplnění celé mezery a objeví se obloukový výboj. Rozvoj koróny je závislý především na průběhu přiloženého napětí, polaritě elektrod, přeskokové vzdálenosti d a materiálu elektrod [1].

1.2.3 Obloukový výboj

Obloukový výboj je typický rychlým nárůstem proudu a zároveň rychlým spádem napětí, viz obr. 1.1 - 3. Aby však obloukový výboj mohl nastat, je nutné poskytnout konstantní zdroj napětí. V opačném případě se jedná o tzv. jiskrový výboj. U krátkých přeskokových vzdáleností před prudkým nárůstem proudu probíhá v plynném izolačním médiu ionizace způsobená převážně **nárazy** elektronů s atomy plynu, tj. Townsendův mechanismus výboje. Navýšíme-li vzdálenost mezi elektrodami, přidává se proces **fotoionizace**, a vzniká tak Raetherův výboj, tj. mechanismus streameru. Od určitých přeskokových vzdáleností je vodivý kanál tvořen extrémně vodivou, okem pozorovatelnou horkou plazmou v podobě vysokých proudů. Tento jev je běžný u rozpojování živých kontaktů. Při neuhašení hořícího oblouku proces **tepelné ionizace** udržuje za velmi vysokých teplot stabilní vodivý kanál. V takovém případě se jedná o tzv. mechanismus leaderu, jehož průběh je znatelně ovlivněn teplotou vodivého kanálu (od 4000 K až po 50 000 K [1]). Dalším faktorem je okolní tlak, který při svém zvyšování zabraňuje hoření oblouku. Uvažujeme-li

vodivý kanál se střídavým proudem, dochází při průchodu proudem nulou periodicky k zániku (deionizaci) a znovuoobnovení vodivého kanálu. Okamžik průchodu proudem nulou hraje podstatnou roli v procesu trvalého vypínání hořícího oblouku [1].

1.2.4 Jiskrový výboj

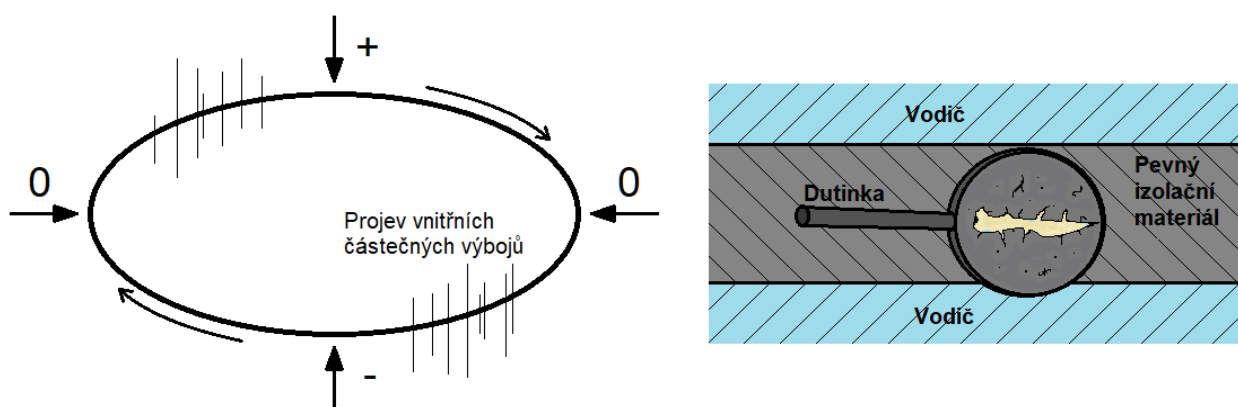
Probíhá zcela stejně jako obloukový výboj, avšak délka trvání je znatelně kratší. Krátká doba trvání je způsobena neschopností trvale dodávat zdroj napětí pro udržení dostatečné intenzity elektrického pole, která zprostředkovává vhodné podmínky pro vznik lavinové ionizace. Opět se s jiskrovým výbojem můžeme setkat v přírodě, a to v podobě blesku. Dochází při něm totiž k navyšování elektrického potenciálu v mraku do té míry, než je dosažena hodnota pro narušení elektrické pevnosti mezi mrakem a místem s nižším potenciálem, tj. zemí. Vznikne vodivý kanál s velmi nízkou rezistivitou, který umožní cestu pro jednorázový výboj, při němž je uvolněno obrovské množství energie. Poté, co se energie naakumulovaná v mraku uvolní, se rezistivita vodivého kanálu začne opět navyšovat a kanál v určitý okamžik zanikne [1], [7].

1.2.5 Klouzavý výboj

Jde o částečný výboj na rozhraní pevného a plynného izolantu, kde pevná část slouží jako izolace vodiče a plynná představuje okolní prostředí. Na této izolaci se mohou objevovat částečné klouzavé výboje [1]. V případě špatného dimenzování izolace mezi vodiči, či při nahodilém narušení izolace může dojít k výboji, který se v tomto případě nazývá zkratem. Místem častého výskytu těchto poruch jsou kabelové koncovky, průchodky nebo místa výstupu vinutí z drážky u točivých strojů.

1.2.6 Vnitřní částečný výboj

Výboj v plynu je potřeba zvažovat také při studování dielektrické pevnosti pevných či kapalných izolačních materiálů, jelikož obvyklou součástí těchto materiálů jsou také nedokonalosti v jejich struktuře (trhlinky, bublinky). Strukturální nedokonalosti, tj. trhlinky či bublinky, vedou k vnitřním částečným výbojům, které mohou znatelně oslabit celkovou dielektrickou pevnost v daném izolačním materiálu. Ve výsledku pak může skrze zmiňované trhlinky dojít k vytvoření vodivého kanálu přes celé prostředí. Plynné složky obsažené v konkrétním materiálu mají totiž znatelně nižší dielektrickou pevnost než pevné či kapalně izolanty. Zmíněný fakt se proto musí brát v úvahu a je nutné veškeré nedokonalosti minimalizovat. Celkový výboj, byť způsobený částečnými výboji v nedokonalé struktuře daného izolačního materiálu, nelze ovšem označovat za výboj v plynu [1].



Obr. 1.2.6: Projev vnitřních částečných výbojů typu A na zkušební napětí v zobrazení Lissajousova obrazce [3].

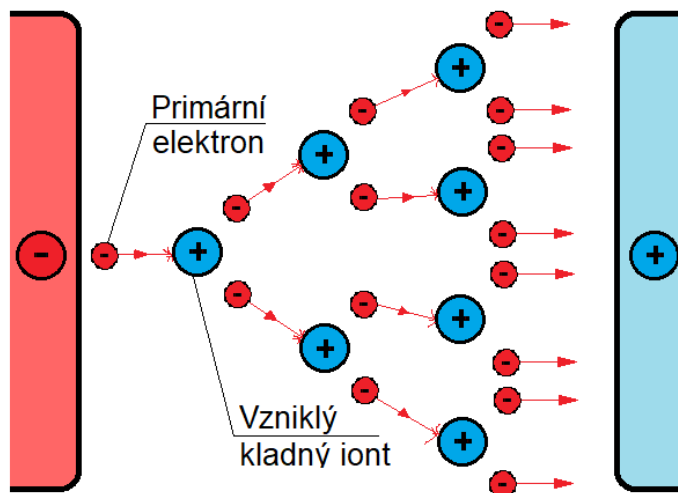
1.3 Proces vzniku elektronové laviny v plynu

Uvedený proces je popsán pro homogenní pole a definuje Townsendův mechanismus výboje [1].

Pro odstartování elektronové laviny je v plynném médiu nutná přítomnost primárního elektronu. Volný elektron se v plynu může vyskytovat díky náhodné fotoionizaci či náhodnému pohybu částic (Brownův pohyb), tj. tepelná ionizace. Dále je možné elektron uvolnit přímo z katody, a to opět dodáním určitého množství energie (cca 4 eV [1]). Může se jednat o energii

dodanou nárazem kladného iontu na katodu, či opět o nějaký druh záření, např. při rekombinaci kladného iontu a volného elektronu [1].

Jelikož je volný elektron vlivem vnějšího elektrického pole urychlován proti směru tohoto pole a je zároveň nesrovnatelně lehčí než molekuly plynu, začne mezi jednotlivými elastickými srážkami s těmito molekulami zvyšovat svou kinetickou energii, tj. nedochází ke ztrátě kinetické energie, pouze ke změně směru do té doby, než nashromáždí energii rovnou ionizační. Takto urychlený elektron



Obr. 1.3 - 1: Lavinový proces ionizace plynu.

při další srážce s těžší molekulou plynu předá svou kinetickou energii a z molekuly plynu se tentokrát uvolní další elektron, který je dále urychlován a pokračuje v lavinovém procesu, viz obr. 1.3 - 1. Dochází tedy k postupné ionizaci plynu. Po srážce elektronu s molekulou plynu na místě zůstává pozitivní iont, který se pomalu začne pohybovat ve směru elektrického pole zpátky k záporně nabitě katodě, kde je nedílnou součástí při dodání energie potřebné k uvolnění dalších (sekundárních) elektronů. Konkrétně jde o energii uvolněnou při dopadu kladného iontu na katodu, ale také po rekombinaci s volnými elektrony v podobě záření. Sekundární elektron poté vytváří další elektronovou lavinu, která je později následována dalšími. Pokud je tedy z katody uvolněno dostatečné množství sekundárních elektronů k vyvolání nových elektronových lavin, po určité době vznikne vodivý kanál, který je doprovázen spádem napětí [1].

Pro matematické vyjádření procesu vzniku elektronové laviny je třeba zavést několik základních parametrů [1]. Prvním důležitým parametrem je Townsendův koeficient α , který udává počet elektronů vytvořených za jednotku délky jedním volným elektronem. Koeficient α je důležitý při popisu nárůstu elektronů v lavině za element délky, který je popsán jako

$$dN = N \cdot \alpha \cdot dx, \quad (1.3 - 1)$$

kde dN je nárůst elektronů N za element délky dx . Po převedení počtu elektronů N na levou stranu rovnice a následné integraci dostaneme vztah

$$\int_{N_1}^N \frac{1}{N} dN = \int_0^x \alpha dx, \quad (1.3 - 2)$$

$$\ln(N/N_1) = \alpha \cdot x, \quad (1.3 - 3)$$

kde N_1 je počet primárních elektronů. Tuto operaci lze provést, uvažujeme-li, že $\alpha =$ konstanta, tj. nacházíme-li se v homogenním poli. Dále po odlogaritmování a další úpravě dostaneme exponenciální závislost pro lavinový nárůst elektronů jako

$$N = N_1 \cdot e^{\alpha \cdot x}. \quad (1.3 - 4)$$

Je ovšem také nutné uvažovat snížení počtu elektronů, jež je důsledkem jejich připojení k neutrálním atomům plynu. Po tomto snížení tedy dostaneme, že

$$\alpha_{ef} = \alpha - \eta, \quad (1.3 - 5)$$

kde η je právě onen pokles elektronů za jednotku délky.

Druhý Townsendův koeficient γ popisuje počet nových primárních elektronů uvolněných při dopadu kladného iontu na katodu a následné rekombinaci. Existuje také třetí Townsendův koeficient β , který popisuje počet elektronů vzniklých srážkami kladných iontů s neutrálními atomy plynu. Koeficient β je však podstatně nižší než koeficient α , jelikož kladné ionty jsou těžší a větší než elektrony, a tedy i vzdálenosti mezi jednotlivými srážkami budou kratší. Krátká dráha je příčinou toho, že ionty nedokážou nashromáždit dostatek kinetické energie, proto se pravděpodobnost uvolnění nových elektronů při kolizi iontu s atomem plynu snižuje. Koeficient β se často zanedbává [1].

Nyní již můžeme matematicky popsat celý děj elektronové laviny [1]. V plynu se nachází N_1 primárních elektronů. Primární elektrony zapříčiní první elektronovou lavinu, která za celou svou dráhu d (od katody k anodě) nashromáždí

$$N_1 e^{\alpha \cdot d} \quad (1.3 - 6)$$

elektronů. Během této laviny je ovšem dále vytvořeno

$$N_1 e^{\alpha \cdot d} - N_1 = N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1) \quad (1.3 - 7)$$

kladných iontů. Kladné ionty následně reagují s povrchem katody, a uvolní tak

$$N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1) \gamma \quad (1.3 - 8)$$

sekundárních elektronů pro druhou elektronovou lavinu. Druhá lavina za dráhu d tentokrát nashromáždí

$$N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1) \gamma e^{\alpha \cdot d} \quad (1.3 - 9)$$

elektronů a

$$N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1) \gamma e^{\alpha \cdot d} - N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1) \gamma = N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1)^2 \gamma \quad (1.3 - 10)$$

kladných iontů, které analogicky uvolní další elektrony z katody pro třetí lavinu. Z toho vyplývá obecný vztah pro počet uvolněných elektronů z n -té laviny jako

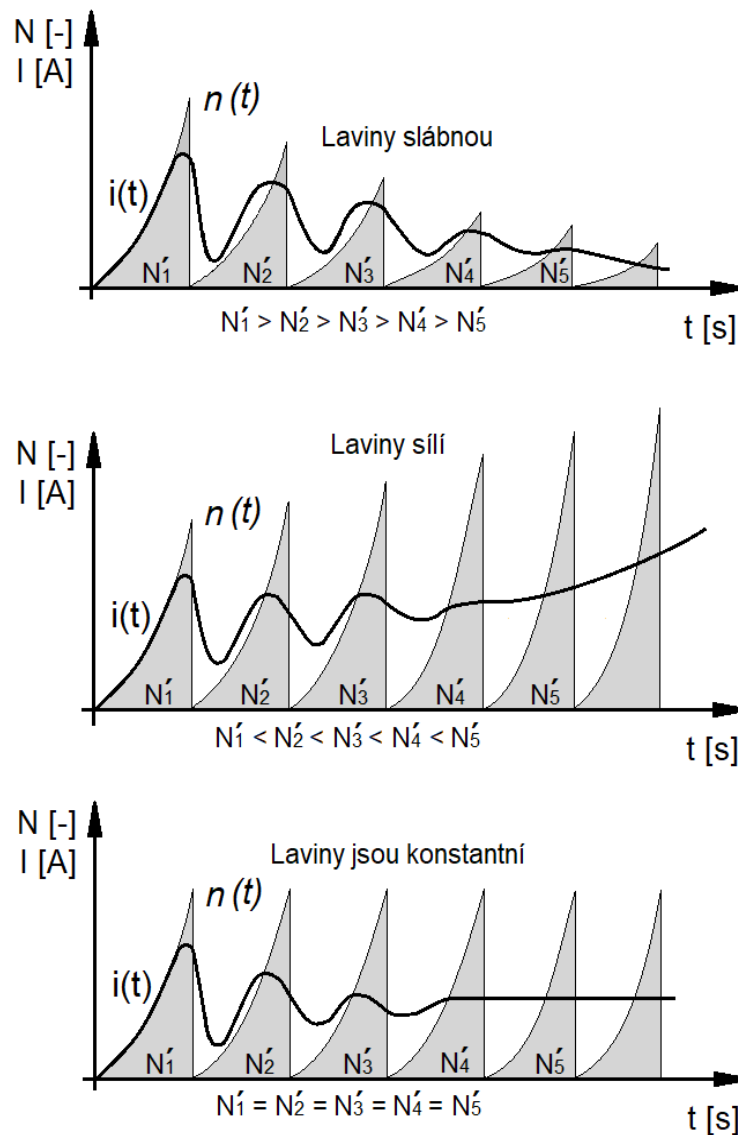
$$N_n = N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1)^{n-1} \gamma^{n-1}. \quad (1.3 - 11)$$

Jelikož nárůst uvolněných elektronů v každé následující lavině je geometrickou posloupností, můžeme psát, že celkový počet uvolněných elektronů N_c z katody je

$$N_c = \sum_{n=1}^{\infty} [N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1)^{n-1} \gamma^{n-1}] = \frac{N_1}{(1 - (e^{\alpha \cdot d} - 1) \gamma)}. \quad (1.3 - 12)$$

Výše uvedený vzorec ovšem platí v případě, že se jedná o konvergentní geometrickou posloupnost, tedy platí-li podmínka, že

$$N_1 (e^{\alpha \cdot d} - 1) \gamma < 1. \quad (1.3 - 13)$$



Obr. 1.3 - 2: Tři možné rozvoje elektronových laviny, kde $n(t)$ je aktuální počet volných elektronů v konkrétní lavině, $i(t)$ je vyvolaný proud a N'_n jsou celková množství vygenerovaných elektronů v konkrétní lavině [1].

Je-li podmínka (1.3 - 13) splněna, můžeme získat absolutní počet elektronů, které překonaly dráhu d od katody až k anodě jako

$$e^{\alpha \cdot d} \frac{N_1}{(1 - (e^{\alpha \cdot d} - 1)\gamma)}. \quad (1.3 - 14)$$

To, že je nárůst elektronů popsán konvergentní geometrickou posloupností, znamená, že existuje konečný součet těchto elektronů, viz vzorec (1.3 - 14), a také že nedojde k výboji. Celý proces vypadá tak, že všechny následující elektronové laviny se pomalu zeslabují, tzn. počet nových elektronů uvolněných z katody se s každou lavinou postupně **sníží**, což znamená, že na počátku tohoto děje musela být splněna podmínka divergence, která postupně degradovala na podmínku konvergence, tj. úplného zastavení procesů elektronových lavin [1]. To se projevuje jako slábnoucí proudové impulsy, které přejdou k hladké **klesající** křivce proudu, viz *obr. 1.3 - 2* nahoře.

V případě divergentní posloupnosti, tj. při splnění podmínky

$$N_1(e^{\alpha \cdot d} - 1)\gamma \geq 1, \quad (1.3 - 15)$$

se bude součet vzniklých elektronů blížit k nekonečnu a dojde k přeskoku. To tedy znamená, že aby došlo k druhé elektronové lavině, musí platit výše uvedená podmínka, totiž že počet uvolněných elektronů z katody musí být větší nebo roven jedné. Během procesu vzniku elektronových lavin počet nových elektronů tentokrát postupně **narůstá**, tzn. v procesu nedojde ke splnění podmínky konvergence a laviny se postupně zesilují. To se projevuje opět jako slábnoucí proudové impulsy vedoucí ovšem tentokrát k hladké **rostoucí** křivce proudu, která vyústí až k přeskoku [1], viz *obr. 1.3 - 2* uprostřed. Výše uvedená podmínka je ovšem často představována v podobě

$$\alpha d \geq \ln\left(1 + \frac{1}{N_1 \gamma}\right) = k, \quad (1.3 - 16)$$

kde výraz αd je nahrazován integrací přes vzdálenost mezi elektrodami. Potom má tedy podmínka tvar

$$\int_0^d \alpha dx \geq \ln\left(1 + \frac{1}{N_1 \gamma}\right) = k, \quad (1.3 - 17)$$

kde proměnná k je dána vlastnostmi plynu a materiálem katody. Výše uvedená podmínka je platná i v nehomogenním poli, ve kterém již neplatí, že $\alpha =$ konstanta, ale jde o určitou funkci závislou na elektrické intenzitě a vzdálenosti [1].

Z matematického hlediska může nastat případ, kdy

$$N_1(e^{\alpha \cdot d} - 1)\gamma = 1. \quad (1.3 - 18)$$

Tento stav by se projevil konstantními elektronovými lavinami a slábnoucími proudovými impulsy, které postupně vedou k ustálení proudu na určité nenulové hodnotě [1], viz *obr. 1.3 - 2* dole.

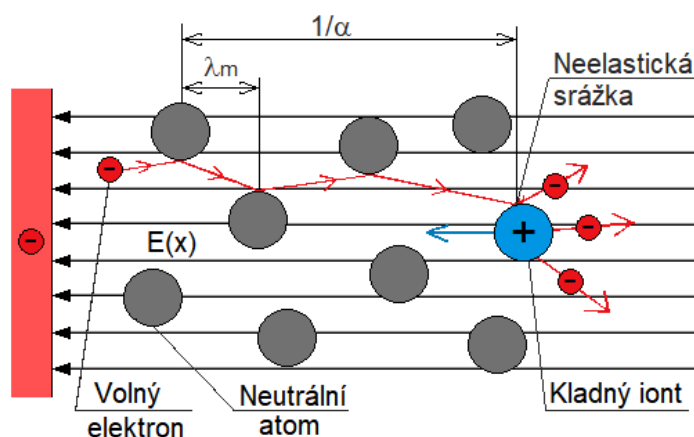
Časové intervaly mezi jednotlivými elektronovými lavinami jsou dány dobou, za kterou se kladné ionty dostanou zpět ke katodě, kde odstartují následující lavinu. Dále celkový proud je dán součtem proudu elektronů k anodě a proudu kladných iontů ke katodě. Oba zmíněné proudy mají stejný směr, ovšem jejich amplitudy se značně liší [1].

Všechny uvedené případy platí pouze pro Townsendův mechanismus výboje, tedy platí-li, že vytvořené elektrony neovlivňují přiložené elektrické pole.

1.4 Townsendovy koeficienty a proces ionizace

1.4.1 Odvození prvního Townsendova koeficientu α

Již víme, že první Townsendův koeficient α udává počet elektronů vytvořených za jednotku délky jedním elektronem. Potom tedy výraz $1/\alpha$ bude představovat vzdálenost, během které elektron vlivem vnějšího elektrického pole nashromáždí dostatečné množství kinetické energie k uvolnění dalšího elektronu, a to při nárazu do atomu plynu,



Obr. 1.4.1: Proces nárazové ionizace.

viz *obr. 1.4.1*. Během této vzdálenosti však elektron podstoupí n srážek, které elektronu energii nepatrně odebírají. Ve většině případů jsou ale vznikající srážky považovány za elastické, tedy bez předání kinetické energie větším a těžším atomům plynu.

Zde tedy zavádíme střední volnou dráhu elektronu λ_m , pro kterou platí, že

$$1/\alpha = n \cdot \lambda_m. \quad (1.4 - 1)$$

Jde tedy o dráhu mezi jednotlivými elastickými srážkami, která je závislá na konkrétním plynu a také na tlaku daného plynu. Dále platí, že čím větší je energie

$$W_m = e \cdot E \cdot \lambda_m, \quad (1.4 - 2)$$

nashromážděná během jedné střední volné dráhy λ_m , kde e je elementární náboj a E je intenzita přiloženého elektrického pole, tím nižší je číslo n (počet elastických srážek za dráhu $1/\alpha$). Proto zavádíme funkční vztah

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_m} f(E/p), \quad (1.4 - 3)$$

kde vzdálenost λ_m je nepřímo úměrná tlaku. Je tedy možné také psát, že

$$\alpha/p = f(E/p). \quad (1.4 - 4)$$

Dále pro usnadnění výpočtu se předpokládá, že elektron dosáhne požadované ionizační energie během jedné střední volné dráhy λ , tedy že

$$W = e \cdot E \cdot \lambda \geq eU_i, \quad (1.4 - 5)$$

kde eU_i je ionizační energie molekul daného plynu. Ze vztahu (1.4 - 5) získáme podmínku

$$\lambda \geq U_i/E. \quad (1.4 - 6)$$

Pravděpodobnost, že se elektron po uražení této vzdálenosti srazí s molekulou a uvolní tak další elektron, je popsána jako

$$F(\lambda) = e^{-\frac{\lambda}{\lambda_m}}. \quad (1.4 - 7)$$

Abychom mohli získat náš hledaný koeficient, musíme dále specifikovat střední volnou dráhu elektronu λ_m jako

$$1/\lambda_m = \frac{\pi r^2 p}{kT}, \quad (1.4 - 8)$$

kde r je poloměr molekul konkrétního plynu, p je tlak plynu, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota [33]. Jelikož se uvažuje, že teplota je konstantní, je možné psát

$$1/\lambda_m = A \cdot p. \quad (1.4 - 9)$$

Když nyní dosadíme (1.4 - 9) do pravděpodobnosti (1.4 - 7), získáme náš hledaný funkční vztah $f(E/p)$ jako

$$F(\lambda) = e^{-\frac{U_i \cdot A \cdot p}{E}}, \quad (1.4 - 10)$$

kde je možné psát, že

$$B = U_i \cdot A. \quad (1.4 - 11)$$

Jelikož je ionizační napětí U_i konkrétní pro každý plyn zvlášť, a je tedy také konstantou [33], ve výsledku získáme vztah

$$F(\lambda) = e^{-\frac{B}{(E/p)}}. \quad (1.4 - 12)$$

Nyní již můžeme dosadit do vztahu (1.4 - 3) pro koeficient α , čímž dostaneme vztah

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-\frac{B}{(E/p)}}. \quad (1.4 - 13)$$

Výše uvedený vztah popisuje první Townsendův koeficient vyjádřený jako funkci přiloženého elektrického pole a tlaku. Konstanty A a B jsou dány tabulkově pro různé plyny při teplotě 20 °C. Vztah (1.4 - 13) byl odvozen za pomoci literatury [1], [33] a vyplynul z mnoha zjednodušení, tzn. platí tedy s určitou chybou.

1.4.2 Efektivní Townsendův koeficient α_{ef} a druhý Townsendův koeficient γ

Způsob jak znatelně snížit chybu prvního Townsendova koeficientu α je uvažování tzv. elektronové afinity, o které jsme se zmínili v předešlých kapitolách jako o koeficientu η . Koeficient η popisuje totiž úbytek volných elektronů v elektronové lavině díky jejich připojení k neutrálním atomům plynu. Má především velký význam u plynů, které se vyznačují vysokou elektronovou afinitou (plyn SF₆, CBrClF₂, C₂Cl₃F₃), tj. se schopností snadno k sobě připojovat elektrony [1].

Proces začíná volně pohybujícím se elektronem, který má nízkou kinetickou energii. Volný elektron se následně srazí s neutrálním atomem plynu (např. plyn SF₆), avšak namísto odrazu, či vyražení dalšího elektronu z atomu dojde vlivem nízké kinetické energie kolizního elektronu k připojení tohoto elektronu k atomu plynu a vzniku záporně nabitého iontu. Energie uvolněná při tomto procesu se nazývá elektronová afinita a je typická pro každý plyn zvlášť, jelikož je dána prvky, ze kterých je plyn složen [1]. Plyny složené z prvků jako je chlór či flór se vyznačují vysokou elektronovou afinitou [33].

Když tedy nyní známe proces připojení elektronu k atomu, mohli bychom podobným způsobem, jako jsme získali první Townsendův koeficient, odvodit i koeficient η jako

$$\eta = a \cdot p \cdot (1 - e^{-\frac{b}{E/p}}), \quad (1.4 - 14)$$

kde konstanty a a b jsou dané tabulkově pro konkrétní plyn. Nyní je možné získat efektivní hodnotu Townsendova koeficientu jako

$$\alpha_{ef} = \alpha - \eta. \quad (1.4 - 15)$$

Koeficient α_{ef} určuje, zda dojde k rozvoji elektronové laviny ($\alpha_{ef} > 0$), či nikoli ($\alpha_{ef} < 0$). Je významný především pro ty plyny, které mají vysokou hodnotu elektronové afinity. Potom tedy i koeficient η bude značně vyšší než například u vzduchu. U těchto plynů se tedy hodnota α bude podstatně lišit od hodnoty α_{ef} [1].

O druhém Townsendově koeficientu γ jsme se zmiňovali jako o veličině popisující počet nových uvolněných primárních elektronů převážně při dopadu kladného iontu na katodu a následné rekombinaci. Koeficient γ je závislý na mnoha faktorech a mezi ty nejdůležitější patří materiál elektrody, použitý plyn, průběh přiloženého napětí a tlak daného plynu. Aby byl proces uvolnění elektronu z katody úspěšný, musí být splněna podmínka, kde

$$2W_a < W_i + W_k. \quad (1.4 - 16)$$

Vztah (1.4 - 16) říká, že součet kinetické energie kladného iontu W_k a energie uvolněné při rekombinaci elektronu s kladným iontem W_i , která je rovná energii ionizační, musí stačit k uvolnění dalších dvou elektronů z katody [1].

1.5 Paschenův zákon a Paschenova křivka

Hodnotu napětí, při které dojde k přeskoku, získáme z podmínky pro nárůst nosičů náboje v elektronové lavině

$$\alpha \cdot d \geq \ln\left(1 + \frac{1}{N_1 \gamma}\right) = k. \quad (1.5 - 1)$$

Při dosazení odvozeného prvního Townsendova koeficientu, vztah (1.4 - 13), do této rovnice a při uvažování, že $N_1 = 1$, získáme, že

$$\alpha \cdot d = A \cdot d \cdot p \cdot e^{-\frac{B}{(E_p/p)}} = \ln(1 + 1/\gamma). \quad (1.5 - 2)$$

Po úpravách dostaneme rovnici

$$e^{-\frac{B}{(E_p/p)}} = \frac{\ln(1 + 1/\gamma)}{A \cdot pd}. \quad (1.5 - 3)$$

Protože platí vztah

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (1.5 - 4)$$

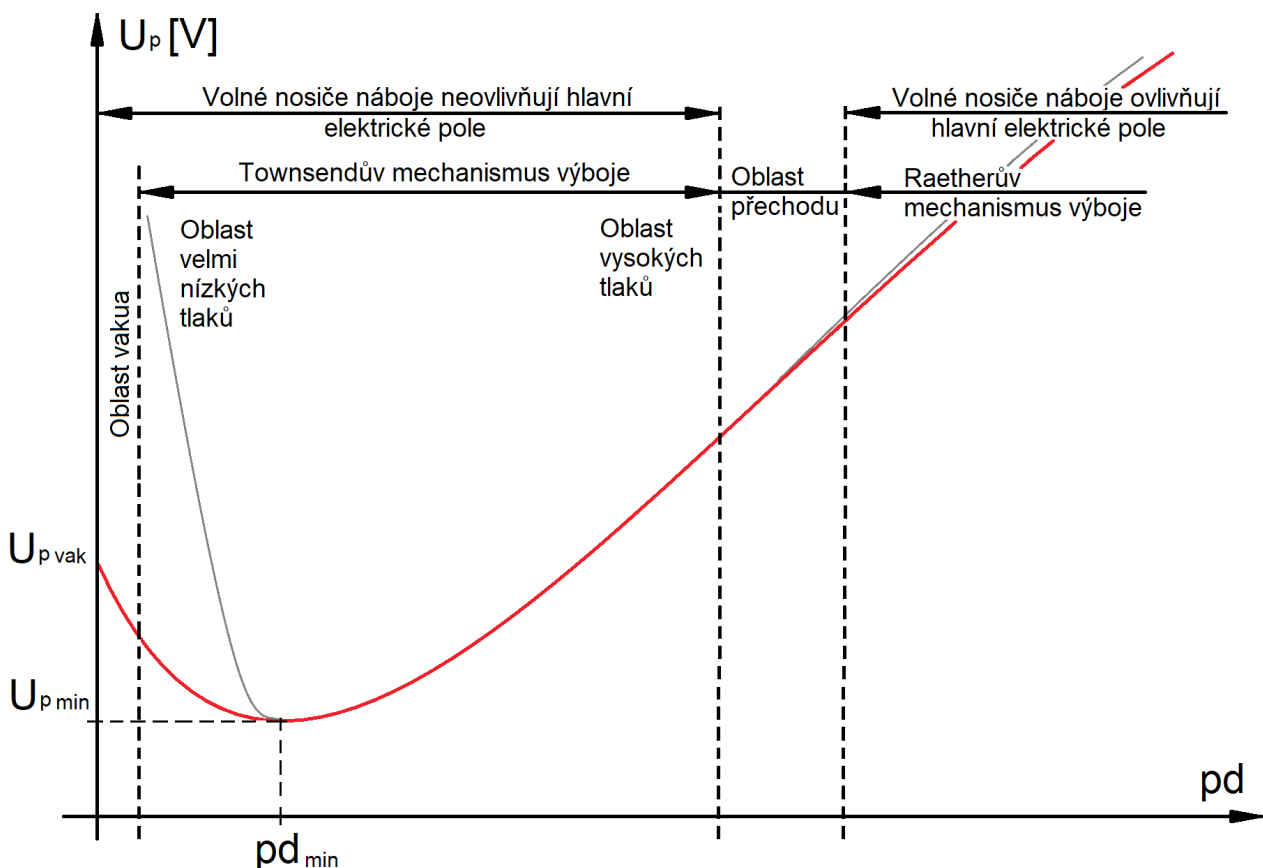
kde E_p je elektrická pevnost a U_p je hledané přeskokové napětí, po dosazení (1.5 - 4) do (1.5 - 3) dostaneme, že

$$e^{-\frac{B \cdot pd}{U_p}} = \frac{\ln(1 + 1/\gamma)}{A \cdot pd}. \quad (1.5 - 5)$$

Po logaritmování celé rovnice dostaneme konečný vztah pro hledané napětí jako

$$U_p = \frac{B \cdot pd}{\ln \frac{A \cdot pd}{\ln(1 + 1/\gamma)}}. \quad (1.5 - 6)$$

Výše uvedený vztah je Paschenův zákon platný pro Townsendův mechanismus výboje [1], který je možné předpokládat pro nižší hodnoty pd , viz obr. 1.5. Po zvolení konkrétních konstant A a B je možné získat Paschenovu křivku:



Obr. 1.5: Paschenova křivka [1].

Z obr. 1.5 vyplývá, že pro hodnoty nižší než pd_{min} je v ideálním případě nemožné dosáhnout přeskokového napětí, avšak v reálném případě dochází k uvolňování částic z elektrod, které nakonec přeskok umožní. Hodnota přeskokového napětí je daná především vzdáleností elektrod a materiálem samotných elektrod [1].

Charakteristický tvar Paschenovy křivky v rámci Townsendova výboje je dán třemi oblastmi. První oblast, tj. pro hodnoty nižší než pd_{min} , se vyznačuje vyšším přeskokovým napětím, a to z toho důvodu, že přeskok probíhá za velice nízkého tlaku. Potom je tedy počet atomů, které jsou potřebné pro rozvoj elektronové laviny, rapidně sniženy.

Druhou oblastí (bodem) je minimum celé křivky s body:

$$pd_{min} = e \cdot [\ln(1 + 1/\gamma)] / A, \quad (1.5 - 7)$$

$$U_{pmin} = e \cdot [\ln(1 + 1/\gamma)] \cdot B / A. \quad (1.5 - 8)$$

Z těchto vzorců je patrné, že Paschenova křivka je rozdílná pro každý plyn zvláště díky konstantám A a B , které jsou určeny pro konkrétní plyn [1].

Třetí oblastí podle obr. 1.5 jsou hodnoty přeskokového napětí pro $pd > pd_{min}$, tj. při vysoké hodnotě tlaku p , který snižuje volnou dráhu mezi srážkami elektronů s atomy plynu. a znesnadní tak rozvoj elektronových lavin způsobených nárazovou ionizací.

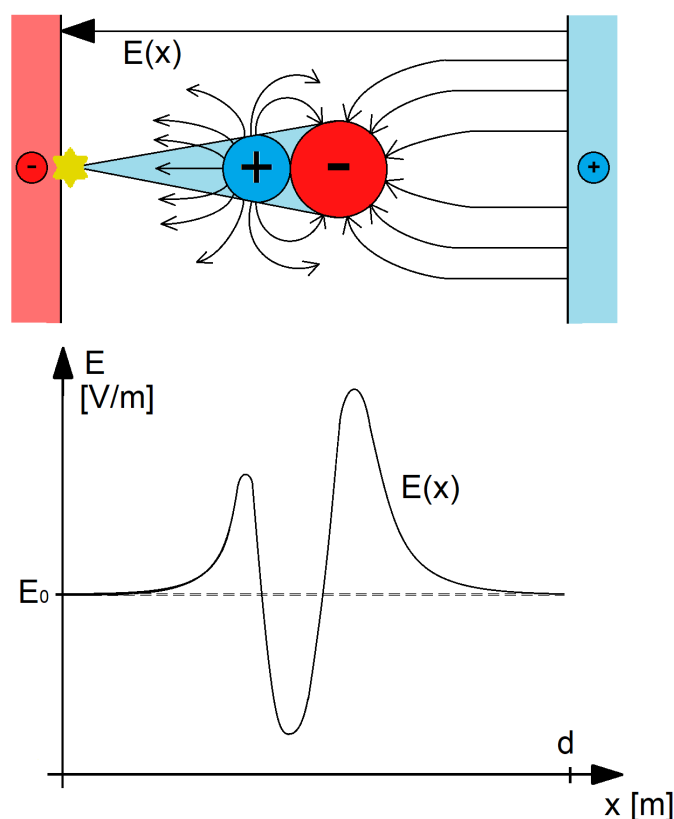
Významný faktor, který ovlivňuje intenzitu elektrického pole rozloženého přes vzdálenost d , je povrch elektrody, tj. výskyt různých nerovností, záhybů a výstupků. Nedokonalosti totiž zapříčiní mírné zesílení elektrického pole oproti očekávané hodnotě v blízkosti elektrody a způsobí, že již neplatí podmínka $\alpha = \text{konstanta}$. Ve výsledku poté získáme koeficient α s určitou chybou, která je úměrná drsnosti elektrody [1].

Následující oblast je popsána jako přechod mezi Townsendovým výbojem a Raetherovým výbojem. V této oblasti již začíná docházet, vlivem velkého množství volných nosičů náboje, k ovlivňování přiloženého elektrického pole přes danou vzdálenost d mezi elektrodami. Obvyklý počet nosičů v lavině typický pro přechodnou oblast je e^{14} až e^{18} volných elektronů [1].

1.6 Rozvoj Raetherova mechanismu výboje

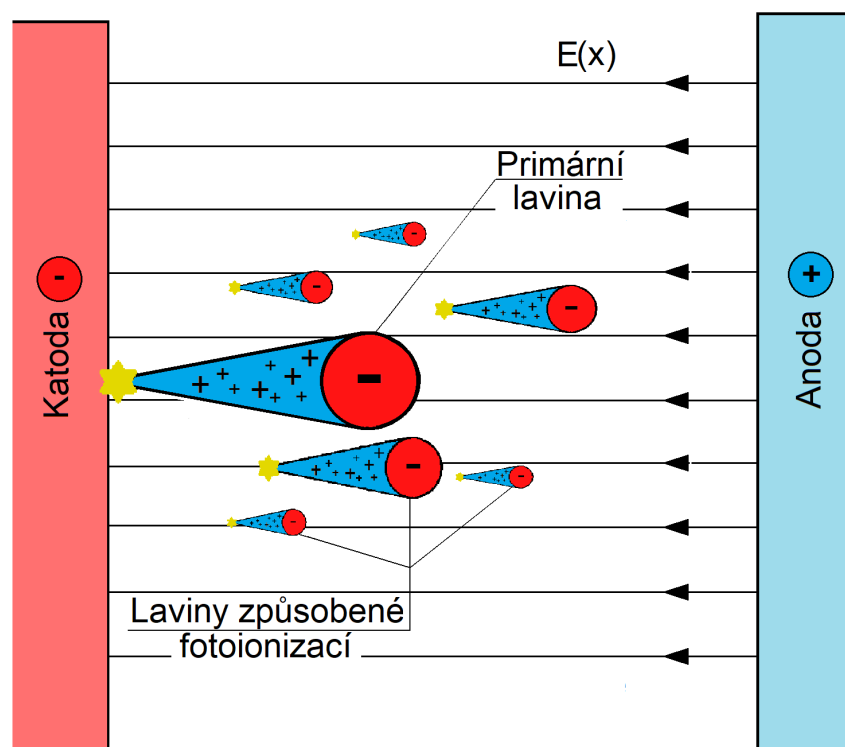
Za oblastí tzv. přechodu, viz *obr. 1.5*, není již možné uvažovat Townsendův mechanismus výboje, jelikož přiložené elektrické pole je nyní ovlivňováno značným počtem volných nosičů náboje. Děj je opět vyvolán prvním kolizním elektronem, který způsobí první elektronovou lavinu. Elektronová lavina se ovšem tentokrát musí rozvinout alespoň do e^{14} až e^{18} volných elektronů [1], tzn. Raetherův mechanismus výboje je doprovázen nárazovou ionizací. Mimo to vznikají také procesy fotoionizace, které jsou způsobeny značným počtem zpětných rekombinací kladných iontů a volných elektronů, ale také zesíleným elektrickým polem v oblasti vysoké koncentrace prostorového náboje. Lavina potom může vzniknout těsně u katody, ale také ve větší vzdálenosti od ní. Skládá se ze dvou částí, a to z čela a týlu. Zadní část je méně mobilní oproti části přední, jelikož je tvořena převážně zbylými kladnými ionty, které jsou méně mobilní oproti lehkým elektronům.

Tvar této části je dán postupným nárůstem elektronů, tj. od několika primárních elektronů (volně se vyskytujících v izolačním materiálu, či uvolněných z katody) až přes zmiňovanou hranici e^{14} až e^{18} volných elektronů. Nárůst volných elektronů za sebou tak postupně zanechává více pozitivních iontů, které vytváří kladně nabitou oblast, viz *obr. 1.6 - 1*. Přední část laviny je tvořena převážně volnými elektrony, které se pohybují rychle vpřed a generují další elektrony. Proto tedy přední část laviny nese znaménko záporné. Čelo elektronové laviny se s uraženou vzdáleností zvětšuje a více ovlivňuje přiložené elektrické pole [1], viz *obr. 1.6 - 1*.



Obr. 1.6 - 1: Elektronová lavina s vlastním elektrickým polem a výsledný průběh intenzity elektrického pole $E(x)$ v porovnání s původní intenzitou E_0 .

Důvodem pro označení Raetherova výboje jako streamer je vznik nových elektronových lavin v objemu plynu. Je to způsobeno právě velkým množstvím elektronů v přední části laviny. Dochází zde totiž častěji k rekombinacím, při kterých se uvolňují fotony. Fotony poté vyvolávají další elektronové laviny, tj. proces fotoionizace, viz obr. 1.6 - 2, které postupně zapříčiní vznik vodivého kanálu přes vzdálenost d [1].



Obr. 1.6 - 2: Vznik nových elektronových lavin v objemu izolačního plynu vlivem fotoionizací.

1.6.1 Rozvoj Raetherova výboje v uspořádání s vysokým faktorem homogenity η

Jak již bylo zmíněno výše, aby mohlo dojít ke vzniku Raetherova výboje, je nutné, aby v přední části elektronové laviny bylo dostatečné množství elektronů, tedy alespoň e^{14} až e^{18} volných elektronů. V opačném případě se stále jedná pouze o výboj Townsendův. Zmíněná hodnota se obvykle označuje jako N_{krit} a je hlavní podmínkou vzniku Raetherova výboje. Ovšem aby došlo k rozvoji alespoň Townsendova výboje, je dále nutné, aby $\alpha_{ef} > 0$, tzn. aby nárůst elektronů v lavině byl kladné číslo. To samé lze vyjádřit za pomoci $E(x) > E_p$, kde E_p je přeskoková hodnota intenzity elektrického pole [1].

Když tedy obě podmínky vezmeme v úvahu, dostaneme vztah

$$e^{\int_0^d \alpha_{ef} dx} \geq N_{krit}. \quad (1.6 - 1)$$

Tento vztah je možné upravit do podoby

$$\int_0^d \alpha_{ef} dx \geq \ln(N_{krit}). \quad (1.6 - 2)$$

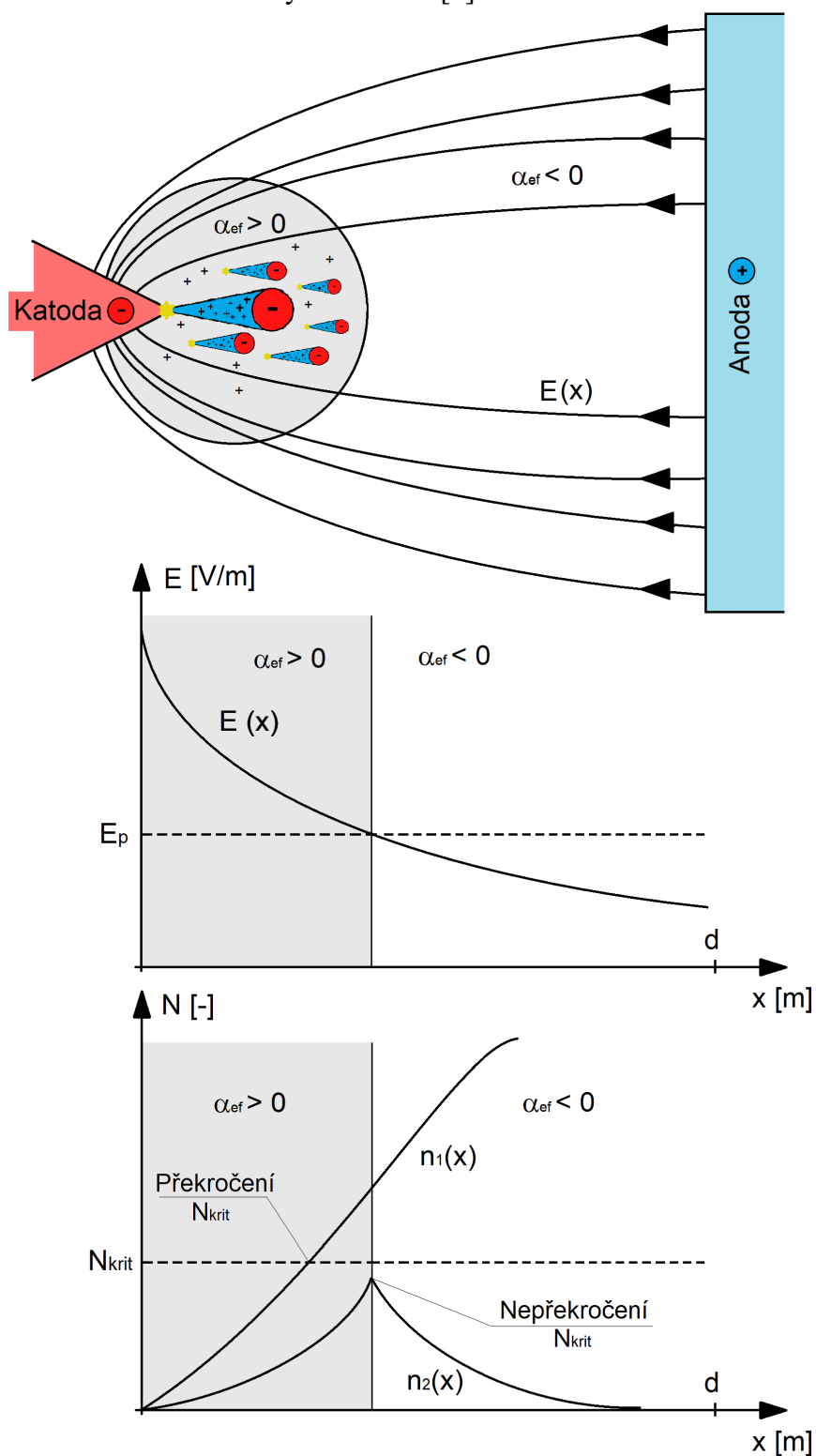
Podmínka (1.6 - 2) je definována pro případ dvou deskových elektrod oddělených vzdáleností d , tj. uspořádání s vysokým faktorem homogenity η , viz *obr. 1.6 - 1* a *obr. 1.6 - 2*. V takovémto případě je vnější elektrické pole ovlivňováno pouze výbojem samotným (pole není homogenní), tzn. přes vzdálenost d neplatí podmínka $\alpha_{ef} = \text{konstanta}$. Vysoký faktor homogenity η , při splnění $E(x) > E_p$, umožní přes celou vzdálenost mezi elektrodami, že $\alpha_{ef} > 0$. To tedy znamená, že může dojít k rozvoji Townsendova výboje, který při překročení N_{krit} přejde do výboje Raetherova, a následně dojde k okamžitému přeskoku, který není předcházen částečnými výboji [1].

1.6.2 Rozvoj Raetherova výboje v uspořádání s nízkým faktorem homogenity η

Při uvažování konfigurace elektrod s nízkým faktorem homogenity, viz *obr. 1.6.2*, je platnost podmínky (1.6 - 2) omezena na oblast s $\alpha_{ef} > 0$, tj. v oblasti se zakřivenou elektrodou, kde je přiložené elektrické pole zesíleno a zároveň $E(x) > E_p$. Integrační meze budou poté zredukovány touto oblastí. Velikost zmíněné oblasti je dána tvarem elektrod, použitým plynem, velikostí přiloženého napětí a dalšími faktory. Po jejím překročení již nedochází k nárůstu volných elektronů, ale k jejich poklesu, jelikož $\alpha_{ef} < 0$. V případě, který je uveden na *obr. 1.6.2*, je blíže ke katodě $\alpha_{ef} > 0$. Avšak v oblasti anody je $\alpha_{ef} < 0$. To znamená, že v oblasti katody začne docházet k rozvoji Townsendova výboje. V případě nedosažení N_{krit} jde pouze o částečné Townsendovy výboje. Ovšem při překročení N_{krit} dojde dále k rozvoji částečného Raetherova výboje, který není doprovázen rychlým poklesem napětí. Zmíněný částečný výboj je často označován jako streamerová koróna [33]. Z toho plyne, že aby došlo k rozvoji Raetherova částečného výboje, musí dojít ke generaci N_{krit} volných elektronů již v oblasti, kde $\alpha_{ef} > 0$. V opačném případě výboj degraduje na Townsendův částečný výboj [1], viz *obr. 1.6.2*.

Závěrem je třeba zmínit, že pro přeskokové vzdálenosti delší jak 1 m je Raetherův mechanismus výboje posílen tepelnou ionizací. Dále se již nejedná o streamer, ale o leader, který je

charakteristický právě tepelnou ionizací. Mechanismus leaderu je doprovázen vysokými proudy a dlouhými paprskovými výboji, tj. leaderová koróna, která může nakonec vyústit až k vytvoření konečného spojení obou elektrod vodivým kanálem [1].



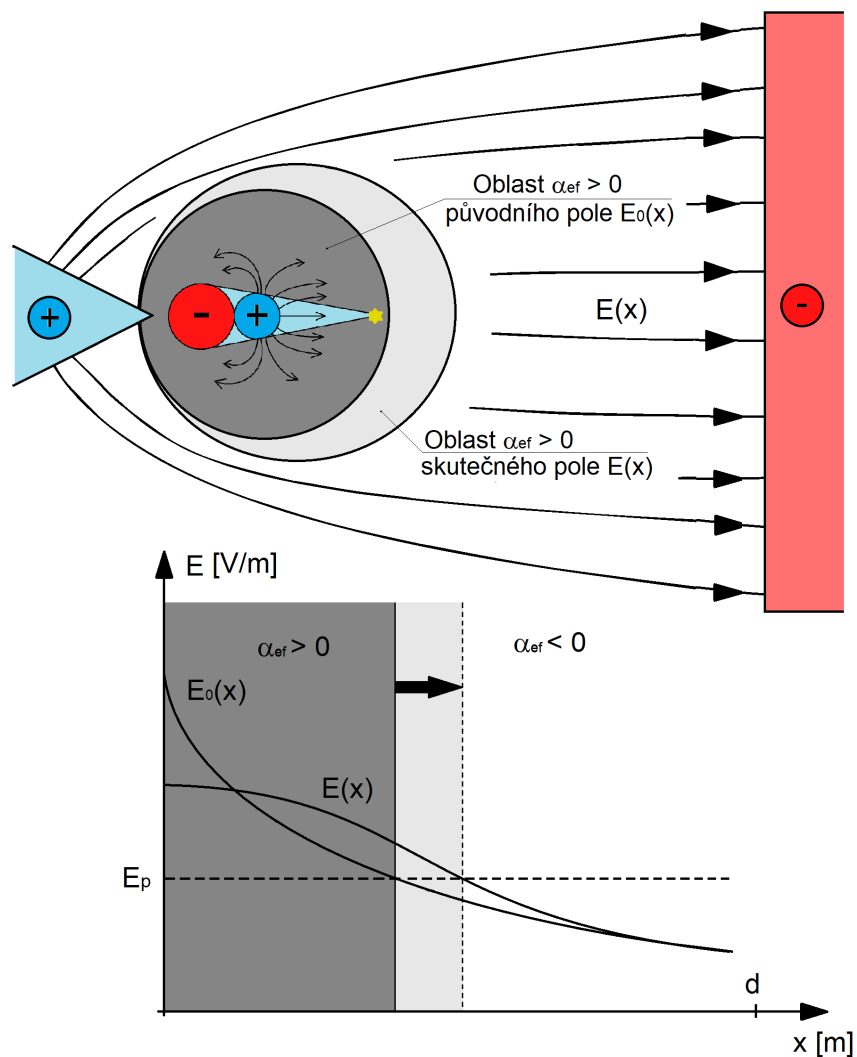
Obr. 1.6.2: Rozvoj Raetherova výboje v silně nehomogenním poli, tj. uspořádání jehla a desková elektroda.

1.7 Vliv polarity elektrod na vznik výboje v plynech

Do této doby bylo uvažováno, že použité elektrody neovlivňují svou polaritou rozvoj elektronové laviny v plynu. Když však tento fakt zahrneme do případu, kde je znatelně nehomogenní pole (viz kapitola 1.6.2) zjistíme, že mohou nastat dva jevy, které se od sebe liší počátečním napětím částečného výboje a přeskokovým napětím výboje úplného.

1.7.1 Kladná polarita hrotové elektrody v nehomogenním poli

Je-li přivedena kladná polarita napětí na hrot a záporná na deskovou elektrodu, je nutné, aby se primární elektron vyskytoval v určité vzdálenosti od katody, a to v oblasti, kde platí, že $\alpha_{ef} > 0$, viz *obr. 1.7.1*. Vzniklá první elektronová lavina bude dále postupovat směrem k hrotové anodě, tzn. čelo této laviny (tvořené převážně elektrony) bude v blízkosti anody vytvářet záporně nabitou oblast, která ovšem rychle zaniká vlivem kladné polarity elektrody. Po lavině zde také zůstávají pomalé kladné ionty, které vytvářejí kladně nabitou oblast. Přiložené elektrické pole je v blízkosti anody zeslabeno a postupným přibližováním ke katodě je zesilováno, viz *obr. 1.7.1*. To způsobí posun hranice mezi $\alpha_{ef} > 0$ a $\alpha_{ef} < 0$ směrem ke katodě. Ve výsledku lze říci, že takovéto uspořádání způsobí vyšší počáteční napětí pro vznik částečného výboje (anodová koróna [33]) a nižší přeskokové napětí oproti uvažování původního elektrického pole [1].

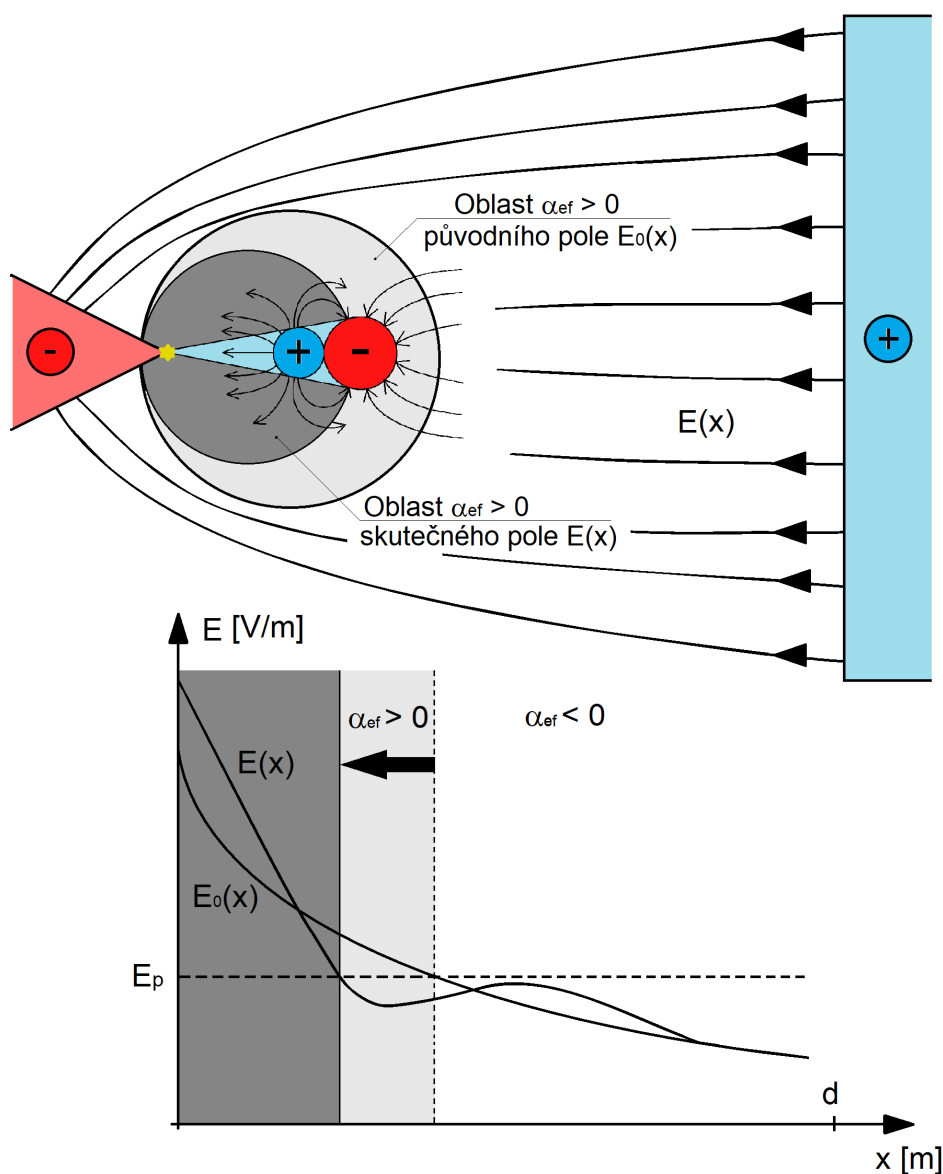


Obr. 1.7.1: Vliv prostorového náboje na výsledné elektrické pole $E(x)$ při uvažování kladně polarizované hrotové elektrody.

1.7.2 Záporná polarita hrotové elektrody v nehomogenním poli

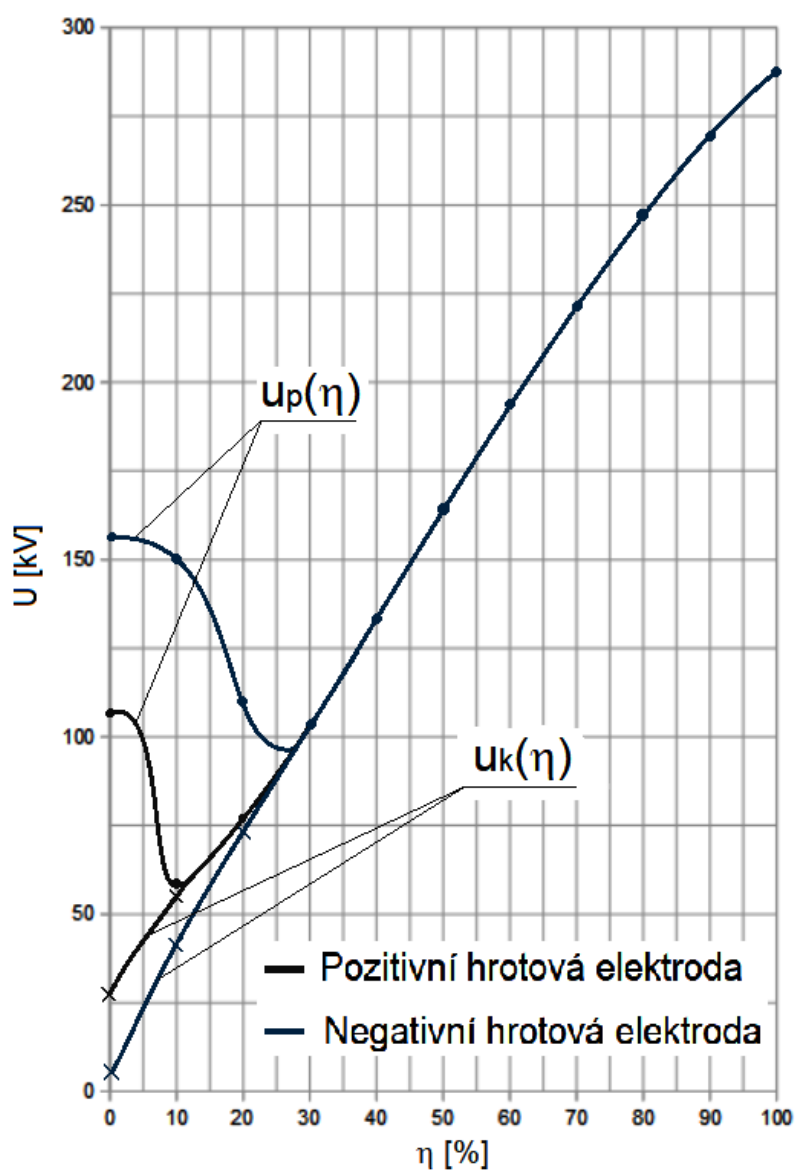
V případě opačné polarity, tedy je-li záporná polarita umístěna na hrotové elektrodě a kladná polarita na elektrodě deskové, viz obr. 1.7.2 - 1, je primární elektron uvolněn přímo z katody. Lavina nyní postupuje vpřed ke kladně polarizované elektrodě. V těsné blízkosti katody je vytvořena oblast kladných iontů, která směrem ke katodě vnější pole zesiluje a směrem k anodě se podílí na jeho oslabení. Postupující čelo elektronové laviny (tvořené volnými elektrony) pomalu ztrácí kinetickou energii vlivem oslabování vnějšího elektrického pole kladně nabitou oblastí, ale především konfigurací elektrod. Začínají vznikat záporné ionty, tj. $\alpha_{ef} < 0$, které vytváří záporně

nabitou oblast podílející se svou stranou ke katodě na dalším oslabování vnějšího elektrického pole a stranou k anodě na jeho zesílení. Oslabování vnějšího pole zabraňuje vzniku dalších elektronových lavin. Možnost vzniku další elektronové laviny je možná po odsunutí relativně pomalých záporných iontů směrem k anodě. Výsledné elektrické pole je vlivem kladných iontů v těsné blízkosti katody zesíleno, což má za následek snížení počátečního napětí částečného výboje, tj. katodové koróny [33]. Dále následuje oblast kladných a záporných iontů, která pole opět zeslabuje, tzn. dochází k navyšování přeskovového napětí. Ve výsledku je hranice mezi $\alpha_{ef} > 0$ a $\alpha_{ef} < 0$ posunuta směrem k záporné elektrodě [1], viz obr. 1.7.2 - 1.



Obr. 1.7.2 - 1: Vliv prostorového náboje na výsledné elektrické pole $E(x)$ při uvažování záporně polarizované hrotové elektrody.

Obr. 1.7.2 - 2 ukazuje vliv polarity elektrod a faktoru homogenity η na počáteční napětí koróny U_k a přeskokové napětí U_p (změna hodnoty η se provádí změnou geometrie pouze jedné z elektrod). Při záporně polarizované hrotové elektrodě výboj, respektive prostorový náboj vytvořený částečným výbojem, ovlivní vnější elektrické pole tak, že ve výsledku se zvedne hodnota přeskokového napětí, tj. docílíme zvýšení dielektrické pevnosti izolačního systému. Avšak za cenu snížení počátečního napětí koróny. Naopak při pozitivní hrotové elektrodě dojde vlivem kladného prostorového náboje ke snížení přeskokového napětí, tj. dojde ke snížení dielektrické pevnosti. Mírně se nám však zvedne počáteční napětí koróny.



Obr. 1.7.2 - 2: Závislost přeskokového napětí U_p a počátečního napětí koróny U_k na faktoru homogenity η a polaritě hrotové elektrody.

1.8 Vliv časově proměnného napětí na vznik výboje v plynech

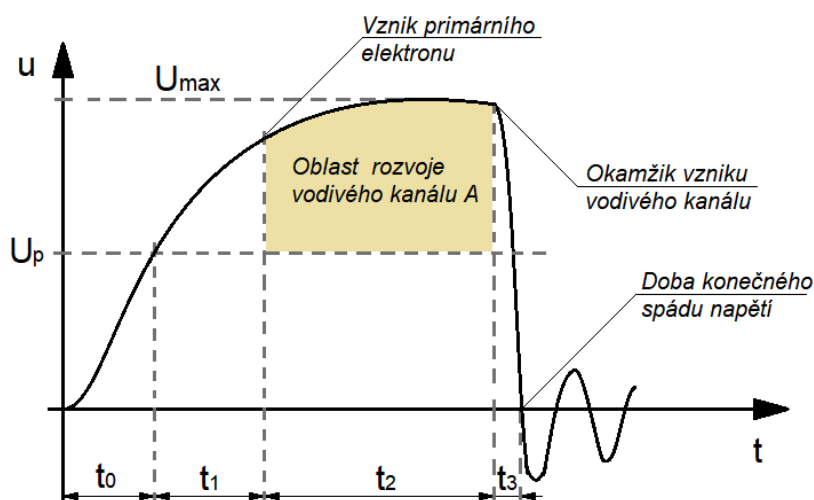
V předchozích případech, tedy při uvažování stejnosměrných napětí, došlo k narušení struktury plynného izolantu při překročení určité hodnoty napětí, která je na *obr. 1.8* označena jako U_p . Nyní uvažujme časově proměnné napětí, tedy s nenulovou frekvencí, přiložené k uspořádání, které je například na *obr. 1.7.2 - 1*. Proměnné napětí má za následek zpoždění vzniku přeskoku. Na *obr. 1.8* je vidět proces vzniku přeskoku při navyšování časově proměnného napětí. První zpoždění je časový interval od překročení hodnoty U_p , na *obr. 1.8* označen jako t_1 . Zmíněné zpoždění udává zpoždění vzniku primárního elektronu při překročení hodnoty U_p . Zpoždění t_1 je proměnné a závisí na použitém plynu či na materiálu a povrchu elektrody. Vytvořený primární elektron vyvolá lavinový efekt, který po uplynutí druhého zpoždění t_2 způsobí pokles napětí a nárůst proudu, tj. třetí časové zpoždění t_3 . Zpoždění t_2 je tentokrát závislé především na plynu a jeho konkrétních hodnotách, tj. tlak, teplota aj. Podobně to platí i pro časové zpoždění t_3 . Z průběhu na *obr. 1.8* je vidět, že předtím než dojde ke spádu napětí, je značně překročena hodnota stejnosměrného přeskokového napětí U_p . Udává se činitel f , který je popsán vztahem

$$f = U_{max} / U_p. \quad (1.8 - 1)$$

Když nyní známe jednotlivá zpoždění a procesy, jež během nich probíhají můžeme stanovit celkové zpoždění vzniku přeskoku, tedy že

$$t_c = t_1 + t_2 + t_3, \quad (1.8 - 2)$$

kde t_3 se díky své délce v porovnání ke zbylým časovým intervalům může zanedbat. V uvažovaném průběhu je také vyznačena oblast A , které je nutné dosáhnout, aby mohl vodivý kanál vzniknout. Jinými slovy, v případě, že byla překročena hodnota U_p , ale nebyla dosažena oblast A , nedojde k vytvoření vodivého kanálu. Hodnota oblasti A je přímo závislá na délce zpoždění t_2 , tedy na konkrétním použitém plynu. Jelikož je oblast A definována integrálem přes křivku napětí s mezemi od $t_0 + t_1$ do $t_0 + t_1 + t_2$ bez oblasti pod hodnotou U_p , můžeme získat čas, který je typický pro dané



Obr. 1.8: Průběh časově proměnného napětí při přeskoku.

uspořádání jako

$$A/U_p. \quad (1.8 - 3)$$

Dále je z výše uvedeného průběhu patrné, že aby byla v případě zkrácení zpoždění t_2 dosažena oblast A , musí dojít k navýšení činitele f . To ve výsledku způsobí, že maximální napětí U_{max} překročí stejnosměrné přeskokové napětí U_p mnohem znatelněji. Pro podrobnější náhled je literatura [1].

Při navyšování frekvence přiloženého napětí zhruba do hodnoty 1 MHz dochází ke snižování elektrické pevnosti vzduchu, avšak při dalším navyšování začne elektrická pevnost opět narůstat. Efekt je způsoben rozdílem mezi rychlostí pohybu elektronů v dielektriku a rychlostí změn přiloženého elektrického pole [1].

1.9 Aktuálně využívané izolační plyny

1.9.1 Hexafluorid sírový (SF₆)

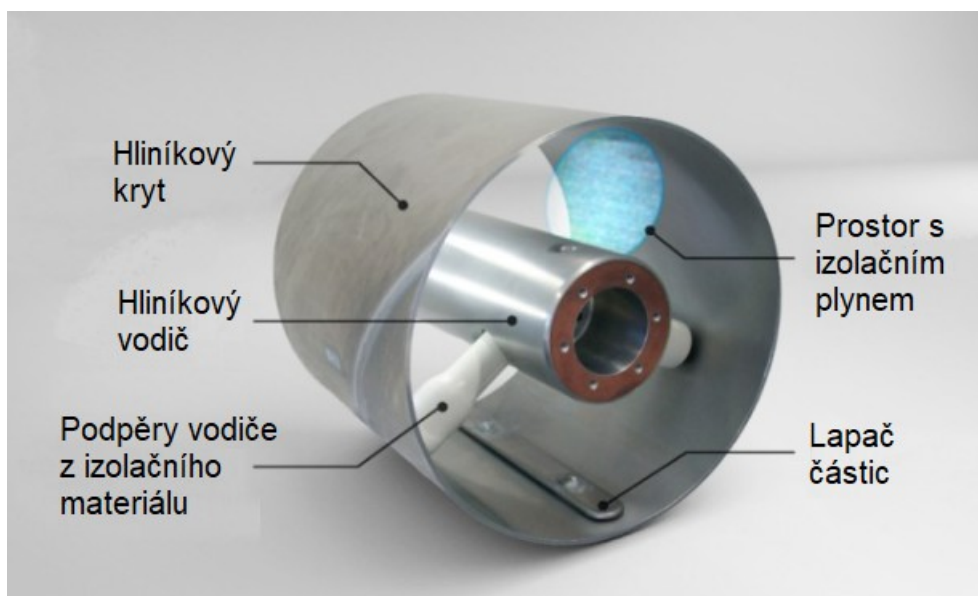
Plyn SF₆ je v současné době nejčastější variantou plynného izolačního média pro vysoké a velmi vysoké napěťové hladiny v zapouzdřených rozvodnách (Gas-insulated switchgear, GIS), plynem izolovaných přenosových vedení (Gas-insulated transmission line, GIL) a plynem plněných vypínačích (Gas circuit breaker, GCB). Důvodem je vysoká dielektrická pevnost a dobré vlastnosti v zhášení oblouku a v neposlední řadě i nízký bod varu (-63,8 °C) [13], [14]. Dále je plyn SF₆ za běžných okolností netoxický, bezbarvý, bez zápachu, nehořlavý a přibližně 5x těžší než vzduch [32]. Pro užívání SF₆ již existuje mnoho let zkušeností a je znám pro svou velmi dobrou materiálovou kompatibilitu a stabilitu [30]. Má však velmi vysoký dopad na globální oteplování (Global warming potential, GWP), který je přibližně 22 800 - 23 500x vyšší než u CO₂ [13], avšak neohrožuje existenci ozonové vrstvy (Ozone depletion potential, ODP) [26]. Z důvodu vysokého GWP je plyn zařazen podle Kjótského protokolu na seznam plynů, jejichž použití je zakázáno v mnoha odvětvích kromě elektroenergetiky, kde aktuálně probíhá studie s cílem nahradit plyn ekologičtější variantou [32], [26].

Možné využití čistého hexafluoridu sírového je například ve vypínači se stlačeným plynem SF₆, kde je vzniklý oblouk roztažen, rozdělen na menší části a stlačeným plynem SF₆ uhašen. Pro

zabránění vzniku dalšího oblouku plní plyn SF₆ funkci silně izolační, ale mimo jiné také funkci chladicí, která podporuje deionizaci oblouku [1].

1.9.2 Kombinace hexafluoridu sírového (SF₆) a dusíku (N₂)

Pokud upřednostníme ekologické hledisko, má lepší parametry dusík N₂, který je také netoxický, ale zároveň má nízké GWP [8]. Problémem je výrazně nižší dielektrická pevnost. Z tohoto důvodu se hojně využívá kombinace obou plynů, a to například u již zmiňovaných plynem izolovaných přenosových vedení, viz *obr. 1.9.2*. Ve zkratce, zmíněná vedení tvoří alternativní náhradu za venkovní vedení. Mezi výhody patří menší zastavěné plochy při stejné přenášené energii jako u venkovních vedení, zvýšená bezpečnost aj. Provedení GIL je patrné na *obr. 1.9.2*, kde se celá konstrukce skládá ze dvou soustředných hliníkových trubek. Vodič je podpírán izolátory z lité pryskyřice. Hliníkový kryt poskytuje ochranu proti mechanickému a elektrickému namáhání a je odolný vůči korozi. Každý svařovaný šev trubice je ultrazvukem testován, aby byla zajištěna 100% plynotěsnost. Vnitřek vnější trubice je naplněn směsí dusíku N₂ a menšího podílu hexafluoridu sírového SF₆ [30], [39].



Obr. 1.9.2: Průřez plynem izolovaného přenosového vedení (GIL) [39].

Pro oba plyny jsou charakteristické výborné izolační vlastnosti, snadnost kombinování a dlouhodobá stabilita. Velice důležitý je poměr obsahu těchto dvou plynů s vhodným tlakem. Při kombinaci nízkého podílu SF₆ s vyšším podílem N₂ docílíme znatelného navýšení izolačních

vlastností, oproti využití čistého N_2 . Pro GIL se využívá 20% obsah SF_6 a 80% obsah N_2 . Používaná kombinace představuje necelých 70 % izolačních schopností čistého SF_6 , ovšem při stejném tlaku [30]. Pro dorovnání nižší dielektrické pevnosti ve srovnání s čistým SF_6 postačí navýšit tlak směsi zhruba o 45 %. Uvedená procentní kombinace obou plynů s navýšeným tlakem na 0,7 MPa se využívá u hladiny 420 kV pro GIL vedení, a sníží tak obsah SF_6 zhruba o 80 % při stejných dielektrických schopnostech jako u čistého SF_6 [30]. Více o této problematice poskytuje literatura [30].

Množství použitého izolačního plynu v GIL je obrovské, a je tedy nutné splňovat určitá kritéria, mezi která patří především nulový dopad na oslabování ozonové vrstvy (Ozone depletion potential, ODP) a nízký GWP. To je zajištěno nízkým procentním obsahem škodlivého plynu SF_6 . Dalšími hledisky jsou vlivy na zdraví člověka, tzn. jestli je plyn karcinogenní, mutagenní, toxický či hořlavý. V neposlední řadě se testuje, zda plyn splňuje požadované dielektrické schopnosti při dané provozní teplotě [30].

Plyn SF_6 je možné kombinovat i s dalšími plyny s nízkým GWP, jako například CF_4 , CO_2 , He aj. [26].

1.9.3 C5-Fluoroketon (Novec 5110) a C4-Fluornitril (Novec 4710)

Jako náhradu za plyn SF_6 je v poslední době velkým trendem využívat nové směsi obsahující alternativní fluoroorganické plyny. Aktuálním tématem je testování směsí C5-Fluoroketon (C5-FK) či C4-Fluornitril (C4-FN) s nosným plynem přírodního původu, tj. CO_2 a N_2 . Při analýze kompatibility různých materiálů s těmito směsmi vykazuje C4-FN nižší rozklad a vyšší stabilitu než C5-FK. Velkým problémem je vysoký bod varu C4-FN a C5-FK, viz *tab. 1.9.3 - 1*, který se dá částečně snížit snížením tlaku, což má ovšem svá omezení, jelikož dochází zároveň ke snižování dielektrické pevnosti. Kvůli požadavku na nízké provozní teploty u GIL (nejméně okolo $-10\text{ }^\circ\text{C}$) se tedy jako jediné řešení jeví snížení procentního obsahu těchto plynů v kombinaci s CO_2 , či N_2 , viz *tab. 1.9.3 - 2* [30], [26].

Tab. 1.9.3 - 1: Porovnání vlastností plynu Novec 5110 a Novec 4710 s plynem SF₆ [26].

	Novec 5110	Novec 4710	SF ₆
Dielektrická pevnost v porovnání s plynem SF ₆	1,4 - 1,7	2	1
Bod varu [°C]	27	-4,7	-63,8
GWP v porovnání s plynem SF ₆ [%]	0 (<1)	8,9 (2100)	100 (23500)

Při testování směsí v *tabulce 1.9.3 - 2* na střídavé napětí se dospělo k tomu, že navýšováním obsahu fluorované složky ve směsi výrazně navyšujeme dielektrické schopnosti. Avšak při dodržení minimální přípustné provozní teploty -10 °C je výsledkem, že u směsí plynů s C5-FK nelze dosáhnout stejného výdržného napětí jako u směsi s plynem SF₆. Naproti tomu použití C4-FN v kombinaci s N₂, či CO₂ prokázalo stejné, nebo dokonce i vyšší dielektrické vlastnosti než u směsi s SF₆, a to při stejném tlaku [30].

Tab. 1.9.3 - 2: Možnosti procentního obsahu testovaného plynu při teplotě -10 °C bez zkapalnění [30].

Testovaný plyn	Příměs	Tlak [MPa]	Procentní obsah testovaného plynu [%]	Provozní teplota [°C]
C4-FN	N ₂	0,6	15,0	-10
	CO ₂		12,4	
C5-FK	N ₂		3,8	
	CO ₂		3,0	
SF ₆	N ₂		20,0	-40

Při testech zaměřujících se na následky vzniku výboje ve směsi C4-FN a N₂ se ovšem v plynové mezeře na blízkých izolátorech našly viditelné vrstvy sazí, což poukazuje na vyšší degradaci této směsi [30].

1.9.4 Perfluorocarbonové plyny (PFC)

Podobně jako C5-Fluoroketon a C4-Fluornitril mají PFC plyny výborné dielektrické vlastnosti, relativně nízký GWP (přibližně poloviční oproti SF₆), nulový ODP, avšak za cenu vysokého bodu varu, tj. -37 °C až -6 °C, bez C₂F₆ [13]. Proto je opět v aktuální době prováděno testování směsí PFC s dalšími plyny s nižším bodem varu a nízkým GWP, tj. například N₂, CO₂, ale také fluoridové plyny, jako například CF₄. Mezi PFC je velký zájem o c-C₄F₈, 1-C₃F₆, C₃F₈ a C₂F₆. Účel směsi je stále stejný, tj. nalézt náhradu za plyn SF₆ se stejnými, či vyššími dielektrickými schopnostmi, s nižším GWP a žádným ODP, možnost využít dané směsi v podmínkách s nízkými teplotami bez změny skupenství aj. Způsobem, jak tohoto lze docílit, je nalézt ideální kombinaci plynů za účelem propojení jejich přednostních vlastností. V *tab. 1.9.4* je přehled plynů, ze kterých se vytváří testované směsi, včetně plynu SF₆ k porovnání [13].

Tab. 1.9.4: Porovnání vlastností plynů PFC a možných příměsí s plynem SF₆ [13].

	c-C ₄ F ₈	1-C ₃ F ₆	C ₃ F ₈	C ₂ F ₆	N ₂	CO ₂	CF ₄	SF ₆
Dielektrická pevnost v porovnání s plynem SF ₆	1,27	0,92 - 1,00	0,40 - 1,12	0,67 - 0,90	0,34 - 0,43	0,32 - 0,37	0,39 - 0,60	1,00
Bod varu [°C]	-5,99	-29,60	-36,70	-78,10	-195,80	-78,50	-128,00	-63,80
GWP v porovnání s plynem SF ₆ [%]	45 (10575)	0,44 (103)	39 (9165)	54 (12690)	0 (0)	0,0044 (1)	29 (6815)	100 (23500)

Během testů se došlo k závěru, že při teplotě -20 °C (též provozní teplota GIS) je možné snížit GWP na 30 % při udržení přibližně 70 % dielektrické schopnosti čistého SF₆ [13]. U teplot 0 °C a vyšších je GWP možné snížit dokonce na necelých 10 % při udržení až 80 % dielektrické schopnosti čistého SF₆ [13]. V některých případech je přijatelné využití směsi, která by vyžadovala dodatečné opatření pro udržení teploty nad bodem varu, aby se zabránilo zkapalnění, a to vše za účelem dosažení vyšší dielektrické schopnosti a nižšího GWP [13].

1.9.5 Zelený plyn pro rozvodnou síť g³ (Green gas for grid)

Další aktuální možnou náhradou plynu SF₆ je g³, vyvinutý společností General Electric Company (GE). Jde o směs přírodních plynů CO₂ a O₂ s plynem Novec 4710. Směs může být aplikována v provozních teplotách pod -30 °C a má nízký GWP, ovšem za cenu nižší dielektrické pevnosti, kterou je možné navýšit zvýšením tlaku. Plyn již našel své využití v GIL a GIS [26].

V tabulce 1.9.5 je také kromě g³ uveden plyn CF₃I, který má vyšší dielektrické schopnosti než SF₆, je však mutagenní a má horší schopnost zhašení oblouku. Zmiňované vlastnosti se opět potlačují kombinováním s plyny přírodního původu (N₂, CO₂ či suchý vzduch) [26].

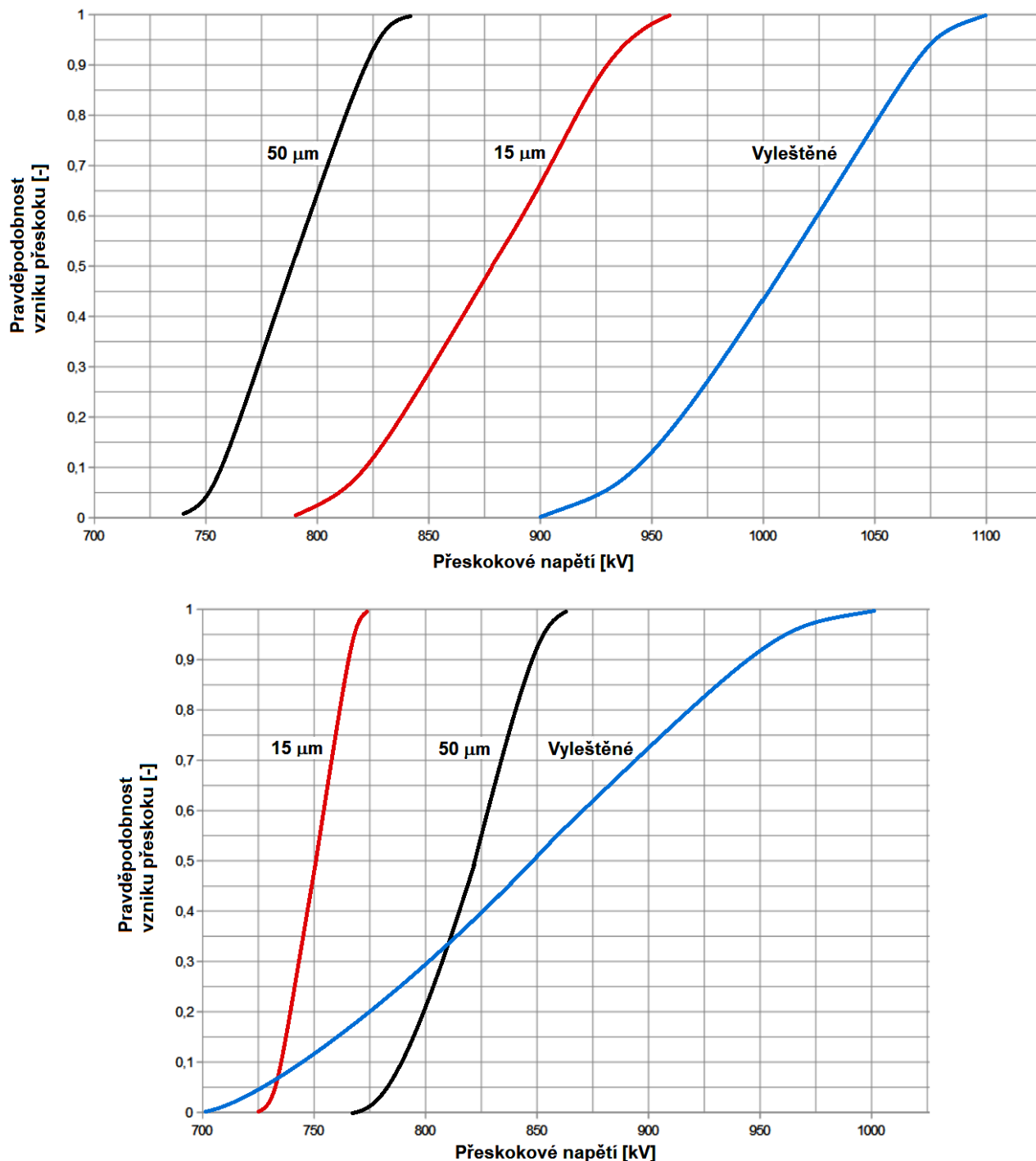
Tab. 1.9.5: Porovnání vlastností plynu CF₃I a g³ s plynem SF₆ [26].

	CF ₃ I	g ³	SF ₆
Dielektrická pevnost v porovnání s plynem SF ₆	1,2	0,8 - 1,0	1,0
Bod varu [°C]	-22,5	> -30	-63,8
GWP v porovnání s plynem SF ₆ [%]	0 (<1)	1,5 (360)	100 (23500)

1.9.6 Aplikace izolačních povrchů a drsnost elektrod

Mezi další způsoby jak snížit koncentraci plynu SF₆ v zařízeních je snížení drsnosti povrchu elektrod a potažení elektrod vrstvou pevného izolačního materiálu. Vliv obou metod na přeskokové napětí je závislý především na stupni drsnosti, materiálu a tloušťce přídavné izolace, ale také na okolním tlaku, polaritě a vzdálenosti mezi elektrodami. Z tohoto důvodu neexistuje univerzální způsob, jak pomocí obou metod navýšit dielektrickou pevnost, a proto jsou nutné testy. Vezmeme-li nejprve v úvahu drsnost obou elektrod (vysokonapěťové a zemní), je prokázáno, že při snižování drsnosti značně narůstá přeskokové napětí, obr. 1.9.6 nahoře. Avšak dalším důležitým aspektem je polarita, která také viditelně ovlivňuje hodnotu přeskokového napětí, obr. 1.9.6 dole. Při potažení elektrod pevným izolantem se blokují procesy vedoucí k přeskoku napětí. Jako nejběžnější

materiály se používají například epoxidová pryskyřice (EP), teflon (PTFE), polyester (PET) či oxid hlinitý (Al_2O_3). Po vícenásobném přeskoku ovšem dochází u izolačního povlaku ke značnému poškození [26].



Obr. 1.9.6: Závislost přeskokového napětí na drsnosti a polaritě elektrod (nahore kladná polarita, dole záporná polarita) [26].

2 Úvod do vzniku přeskoku v kapalinách

Kapaliny jako izolační média stále vykazují určité shody s vlastnostmi plynů, a to například v urychlování volných elektronů přiloženým elektrickým polem, ionizaci prostředí vlivem kolizí a následné elektronové laviny. Ovšem uvedené procesy nejsou důsledkem vzniku přeskoku v kapalině, ale jeho konečnou fází [1].

Mezi významné výhody kapalných izolantů lze zahrnout dobré impregnační vlastnosti, dielektrickou pevnost, která je vyšší než u plynů, výbornou tepelnou vodivost aj. Na druhou stranu mají vysokou hmotnost, podléhají vyšší kontaminaci a rychlejšímu stárnutí než plyny [1], dále se u nich projevuje objemová roztažnost, což vše vede k vyšším provozním nákladům (složitější nádoby).

Hlavním účelem kapalných izolantů je ochrana pevné izolace, která je díky své regenerativní schopnosti velice účinná, tj. dochází k zhášení oblouku. Zmíněná výborná tepelná vodivost podporuje kapalně izolanty také ve funkci chladičů [34].

Vzhledem k obtížnému fyzikálnímu popisu chování kapalného média během elektrického namáhání neexistuje univerzální fyzikální zákon, který by proces přeskoku v kapalině popisoval. Existence mnoha druhů kapalných izolantů, které se od sebe odlišují v různých fyzikálních a chemických vlastnostech, způsobuje velký rozsah možných přeskokových napětí. Dalším důvodem obtížnosti definice univerzálního zákona je nemožnost zahrnutí matematického popisu pohybu oleje v celém objemu, výskytu vody a cizích částic, uspořádání, tvaru a hrubosti povrchu elektrod a výsledné dielektrické pevnosti kapaliny. Tyto a další parametry ovlivňující dielektrickou pevnost jsou obvykle zmiňovány pro konkrétní kapaliny. Dále pro navýšení dielektrické pevnosti je velká pozornost věnována materiálovému složení, procesům výroby, zdrojům kontaminace a stárnutí [1].

Obecným faktorem ovlivňujícím dielektrickou pevnost materiálů je kontaminace, což je v podstatě jeden z následků procesu stárnutí. Je zřejmé, že vyšší podíl nežádoucích látek či vlhkost mají za následek zhoršení dielektrické pevnosti, a proto je jim věnována velká pozornost. Dosažení vysoce čistého kapalného prostředí a jeho udržení v provozních podmínkách je ovšem velice nákladným úkolem (náročnějším než u plynů), vyžaduje totiž mimo jiné speciální měřicí přístroje

kontrolující obsah nežádoucích látek a nevyhnutelnou pravidelnou obměnu kapaliny.

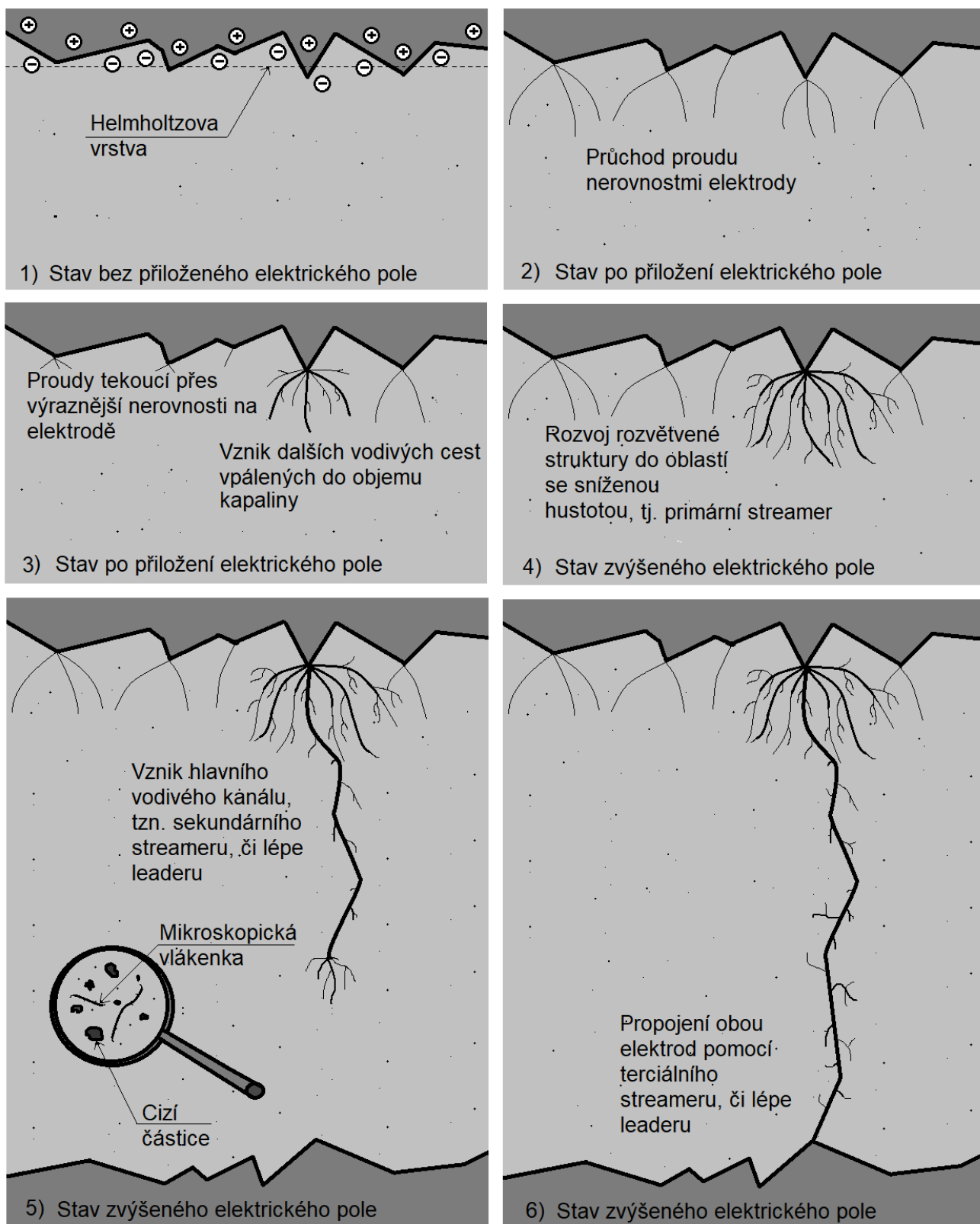
Dalším obecným faktorem ovlivňujícím dielektrickou pevnost materiálu je jeho hustota, která určuje střední volnou vzdálenost mezi srážkami elektronů s molekulami a atomy (nárazová ionizace). V případě kapalin je zmíněná vzdálenost velice krátká, což vyvolalo řadu otázek ohledně **prvotního procesu propagace přeskoku v kapalinách** a vzniku primárního streameru [1].

Při prvních výzkumech se předpokládal výskyt oblastí se sníženou hustotou, ve kterých vznikají mikrobublínky s plynem. V těchto mikrobublínkách mohou procesy lavinového rozvoje probíhat stejně jako v plynu, tedy skrze nárazovou ionizaci. Zmíněná teorie vzniku přeskoku v kapalných izolantech se však ukázala jako ne zcela odpovídající. Výskyt oblastí se sníženou hustotou je ovšem fakt a hraje podstatnou roli v konečném procesu rozvoje výboje v izolačním oleji. Existují různé teorie o původu těchto oblastí. Mezi hlavní patří Brownův pohyb částic (náhodný termální pohyb částic), elektro-hydrodynamický pohyb částic a elektrostatické odpuzování volných nosičů náboje. To znamená, že jsou zmíněné oblasti buď vytvořené ještě před rozvojem přeskoku, nebo jsou následkem tohoto procesu. Aktuálně je v řešení několik teorií popisujících **prvotní proces propagace přeskoku v kapalinách** [1], viz kapitola 2.2.

2.1 Proces vzniku přeskoku v kapalinách

Nejčastěji využívaným kapalným izolačním médiem je olej, a proto bude celý proces přeskoku popsán právě v tomto prostředí. Níže uvedený popis, viz *obr. 2.1*, byl získán na základě měření proudů, optického zaznamenávání celého procesu [1] a je vhodné podotknout, že neposkytuje vysvětlení **prvotního procesu propagace přeskoku**.

Bez přiloženého elektrického pole jsou molekuly kapaliny v neuspořádaném stavu a nejsou schopné přijímat žádné elektrony. Na rozhraní mezi elektrodami a kapalinou se vytváří tzv. Helmholtzova vrstva [1]. Jde o oblast existující na hranici dvou fází nabitých opačnými náboji (obvykle mezi pevnou a kapalnou látkou) [9]. Jedná se o vrstvu, která má za následek snížení energie potřebné k uvolnění elektronu od atomu a je závislá na drsnosti povrchu elektrody. Její tloušťka se pohybuje okolo 100 nm [1], *obr. 2.1, 1*).



Obr. 2.1: Proces vzniku přeskočků v izolačním oleji.

Přiložením vnějšího napětí začne docházet k zesilování intenzity elektrického pole na mikroskopických výběžcích v nedokonalostech povrchu katody (hodnoty od 250 kV/mm až 1000 kV/mm [1]), což má za následek značné navyšování vodivosti a teploty kapaliny. Vzniká **prvotní proces propagace přeskoku**, tj. přesun elektronů ze záporně polarizované katody do kapaliny a jejich další šíření. Energie potřebná k uvolnění elektronu z katody do kapaliny je silně ovlivněna jednak strukturálními nedokonalostmi, cizími částicemi na katodě, ale také oxidační vrstvou, která uvolněné elektrony zachycuje. Na viditelnějších výběžcích katody, kde je zesílená intenzita elektrického pole, k přesunu elektronů dochází mnohem intenzivněji, a tečou zde proto vysoké proudy o intenzitách řádově jednotek kA/mm² [1], obr. 2.1, 2).

Směrem od katody se začnou formovat vodivé cestičky. Průchodem proudu dochází k dalšímu navyšování vodivosti a teploty. Po určité době se začnou vytvářet rozvětvené struktury, které jsou do objemu kapaliny trvale vpáleny [1], obr. 2.1, 3).

Elektrony uvolněné do kapaliny ovšem vytvářejí v blízkosti katody oblasti s negativním nábojem, které zeslabují lokální elektrické pole a zamezují další injekci elektronů. Proces injekce elektronů se může opakovat až po přesunutí této oblasti do míst s nižší intenzitou elektrického pole, kde více snižuje vodivost. Před pozitivně polarizovanou anodou se na zakřivených místech shromažďují elektrony (vytvořené v kapalině, či přenesené z katody), které posilují elektrické pole v těchto částech (efekt polarity elektrod) [1].

Při zvýšené intenzitě elektrického pole (1000 kV/mm [1]) se v objemu začnou projevovat a vytvářet zmiňované oblasti se sníženou hustotou, do kterých se vodivé cestičky začnou rozšiřovat, a rozvíjet tak vytvořené struktury. Uvedený proces je často označován jako primární streamer [1], z důvodu nárazové ionizace probíhající v těchto mikrobublínkách s plynem, a tedy i podobnosti vzniku výboje v plynech. Prozatím nedochází k výraznějšímu poklesu napětí [1], obr. 2.1, 4).

Z vytvořené rozvětvené struktury se postupně začne rozšiřovat hlavní vodivý kanál, a to skrze další oblasti se sníženou hustotou, ale také prostřednictvím cizích částic obsažených v kapalině. Zmíněný vodivý kanál je označován jako sekundární streamer, či lépe jako leader [1]. Důvodem je rychlý postup vodivého kanálu poháněný tepelnou ionizací. Vodivý kanál přenáší potenciál katody do kapaliny a dochází k postupnému poklesu napětí [1], obr. 2.1, 5).

Ve chvíli, kdy hlavní kanál dosáhne druhé elektrody, má vysokou vodivost a protéká jím vysoký proud. Následkem vysokých teplot se olej začne odpařovat a ve výparech vznikají další výboje. Zmíněný kanál se označuje buď opět jako leader, nebo jako terciální streamer [1], *obr. 2.1, 6*).

V případě záporného kanálu vznikají oblasti s převážně pozitivním nábojem, které zabraňují propagaci hlavního kanálu. Avšak pozitivní kanál se šíří téměř bez přerušení vysokou rychlostí, je tedy brán za více nebezpečný (vliv polarity elektrod) [1].

2.2 Teorie prvotního procesu propagace přeskoku

Jak již bylo zmíněno výše, střední volná vzdálenost mezi srážkami elektronů s molekulami a atomy kapaliny není dostačující pro vznik nárazové ionizace, která by proces přeskoku způsobila. Při měření dielektrické pevnosti testované kapaliny nedosahovaly ovšem zjištěné hodnoty předpokládané úrovně. Vznikly proto různé teorie, které se snaží zmíněný fenomén odůvodnit. První tři uvedené teorie uvažují absenci cizích částic a nižší drsnost povrchu elektrody [1].

2.2.1 Uspořádání molekulové struktury kapaliny vnějším elektrickým polem

Dříve již bylo zmíněno, že bez přiloženého elektrického pole jsou molekuly kapaliny v neuspořádaném stavu, a nepřijímají proto cizí elektrony, *obr. 2.1, 1*). Ovšem po přiložení elektrického pole dojde náhle na mikroskopických výběžcích k částečnému uspořádání molekul s různými energetickými hladinami, které jsou obsazeny elektrony. Dochází k polarizování sousedních molekul a vytváření nových energetických hladin, což ve výsledku usnadňuje pohyb dalších elektronů, *obr. 2.1, 2*). Jinými slovy začnou skrze mikroskopické výběžky na katodě, kde je intenzita elektrického pole nejsilnější, protékat proudy a dojde ke zvyšování teploty a vodivosti kapaliny [1], *obr. 2.1, 3*).

Pohyb elektronů je popsán pomocí tunelového jevu z kvantové mechaniky, kde je elektron popsán tzv. vlnovou funkcí, ale zároveň také jako částice. Vlnová funkce mimo jiné popisuje

nenulovou pravděpodobnost prostupu elektronu s nižší energií skrze bariéru s vyšší energií [10]. Teorie tunelového jevu je zde velice příhodná, a to z důvodu její nezávislosti na teplotě, která byla potvrzena i u testovaných kapalin [2].

2.2.2 Kolizní ionizace v objemu kapaliny

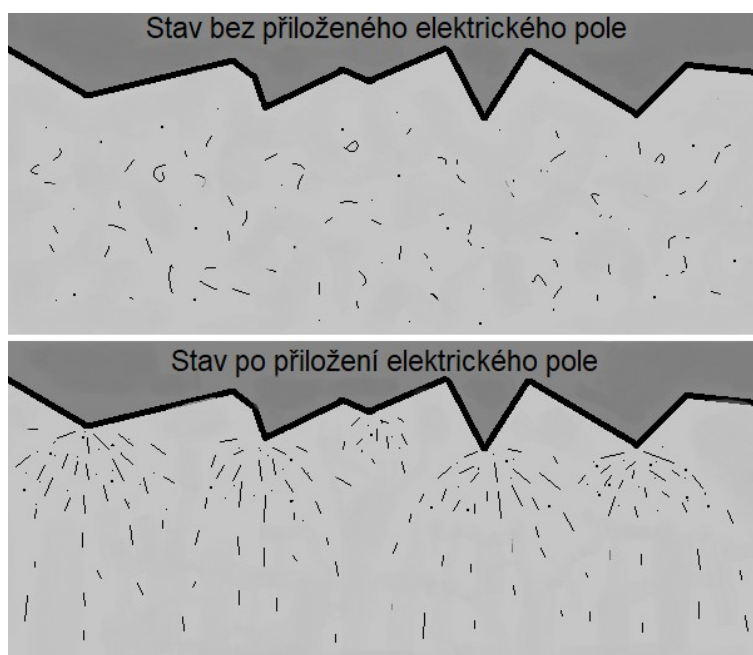
Teorie popisuje odstartování nárazové ionizace a výskytu elektronových lavin v kapalině při dosažení hodnoty intenzity elektrického pole přibližně 1000 kV/mm, *obr. 2.1, 2*). Energie, kterou elektrony musí naakumulovat pro následnou ionizaci, se pohybuje okolo 9 eV. Výsledné elektronové laviny vytvářejí mikrobublínky, v nichž probíhá propagace streameru [1], *obr. 2.1, 4*).

2.2.3 Snížené povrchové napětí na elektrodě

Jak již bylo zmíněno dříve, na výběžcích nedokonalého povrchu elektrody je vyšší intenzita elektrického pole (1000 kV/mm). Zvýšená intenzita může snižovat povrchové napětí kapaliny. Ve výsledku dochází k oslabování soudržnosti molekul oleje a začnou se objevovat oblasti se sníženou hustotou, které jsou doprovázené rozvíjením streameru [1], *obr. 2.1, 4*).

2.2.4 Výskyt cizích částic

Výskyt nečistot může znatelně narušit celkovou dielektrickou pevnost, viz *obr. 2.2.4*. Existují důkazy o výskytu mikroskopických vláken obsahujících vodu, která se po přiložení elektrického pole začnou shlukovat a orientovat před mikroskopickými výběžky elektrody podle lokálního pole. Začnou se vytvářet struktury umožňující přesun elektronů, viz *obr. 2.2.4* dole. Postupně se začne navyšovat teplota a voda obsažená v těchto mikrovláknách se začne vypařovat. Vznikají tak mikrobublínky, ve kterých se výboj dále rozvíjí. Přesun mikroskopických vláken může trvat řádově sekundy až minuty [1].



Obr. 2.2.4: Přítomnost mikroskopických vláken v objemu kapaliny před a po přiložení elektrického pole.

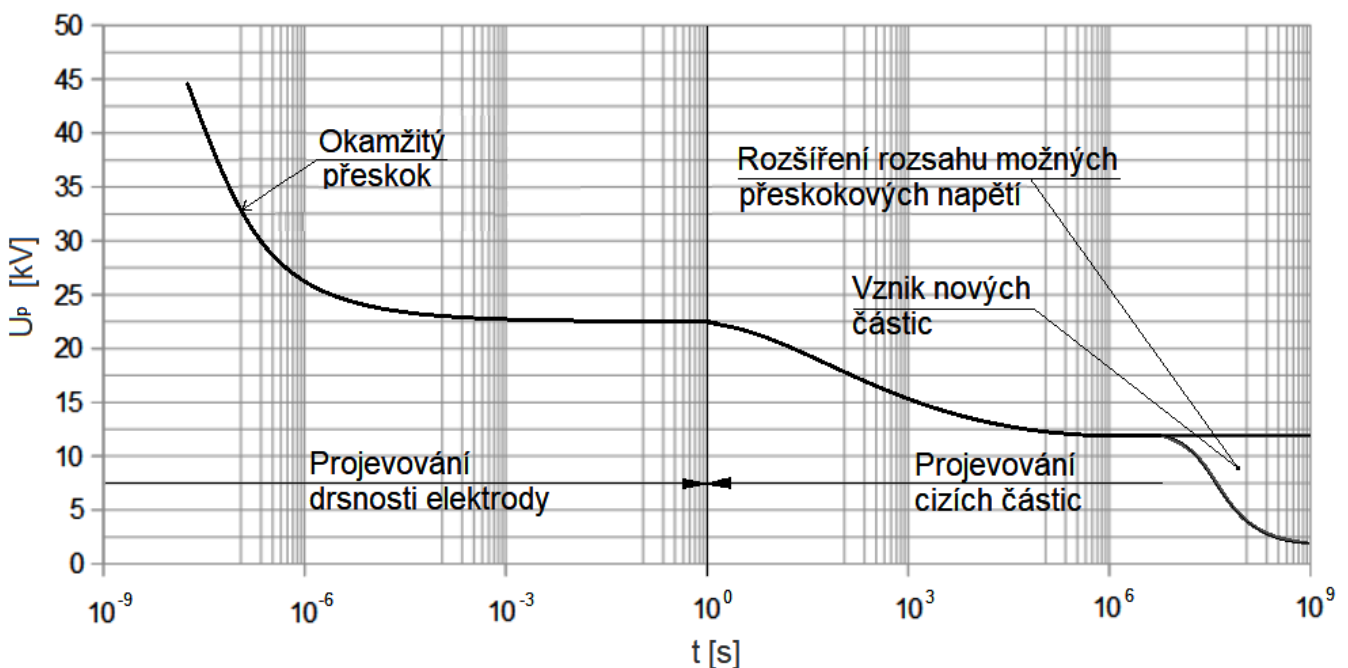
2.3 Vliv objemu kapaliny, plochy elektrody a délky namáhání

V případě **krátkodobého namáhání** (cca do 1 s) je rozvoj přeskočů ovlivňován čistě povrchem elektrody, přesněji výskytem mikroskopických nedokonalostí, které způsobují známé zesílené mikroskopické intenzity elektrického pole (od 250 kV/mm do 1000 kV/mm). Faktem je, že při zvětšování plochy elektrody se nedokonalosti stanou více četnými, a dielektrická pevnost proto klesá [1].

Podobně jako při zvětšování plochy elektrody se navyšuje četnost mikroskopických nedokonalostí, se u navyšování objemu kapaliny zvyšuje četnost cizích částic. U **dlouhodobého namáhání** (cca od 1 s) se začnou zmíněné částice projevovat, a dokonce se i začnou vytvářet nové, což způsobuje velký rozsah možných přeskočových napětí s délkou namáhání, viz *obr. 2.3* vpravo. Důvodem, proč se přítomnost cizích částic projevuje s větším zpožděním, je jejich pomalý pohyb v objemu kapaliny vyvolaný vnějším elektrickým polem. Částicím a zmiňovaným mikroskopickým vláknům trvá déle, než se nashromáždí do určitého uspořádání, které ve výsledku snižuje celkovou dielektrickou pevnost [1], viz *obr. 2.2.4* dole.

Na obr. 2.3 je znázorněna závislost snižování přeskového napětí na době namáhání při konkrétních rozměrech elektrody (drsnosti povrchu) a objemu kapaliny (obsahu cizích částic). Ovšem obsah cizích částic v objemu není s časem konstantní, což přispívá k velkému rozsahu možných přeskových napětí [1].

Je však možné snížení vlivu povrchu elektrody a objemu kapaliny na dielektrickou pevnost. Dodatečné potažení elektrody izolačním materiálem může snížit vliv nedokonalostí povrchu elektrody, a snížit tak prostup elektronů do kapaliny. Pro omezení tvorby uspořádaných struktur tvořených cizími částicemi a mikroskopickými vlákny, které oslabují dielektrickou pevnost, se mohou používat bariéry z různých materiálů s vhodným umístěním v objemu kapaliny, což výrazně omezuje rozvoj streameru [1].



Obr. 2.3: Závislost přeskového napětí izolační kapaliny na době namáhání [1].

2.4 Faktory ovlivňující dielektrickou pevnost kapalin

2.4.1 Kontaminace

Tento faktor jsme již zmiňovali v úvodu a poté dále jako dlouhodobého činitele dielektrické pevnosti. Ovšem kontaminace je obecný výraz obsahující více dílčích faktorů.

V případě **výskytu vody** v objemu oleje jde o nejvýznamnější činitel ovlivňující dielektrickou pevnost. Přítomnost vody může být zapříčiněna kontaktem oleje se vzduchem (dilatační nádoba transformátorů), stěnami nádoby aj. Tyto a další důvody jsou výsledkem procesu stárnutí, jak je olej neustále vystavován vnějšímu prostředí a elektrickému namáhání. Proto se za pomoci vakua zbavujeme bublinek, dělají se testy na přeskoková napětí, olej se ošetřuje různými vysoušeči, provádí se tzv. regenerace oleje, či jeho úplná výměna [1], [3].

Výskyt vody je také jedním z důvodů vzniku bublinek s plynem, které jsou hlavní příčinou snížení zapalovacího napětí pro vznik částečných výbojů při zachování konfigurace elektrod, tj. homogenity elektrického pole. Mezi další důvody **výskytu plynu** patří nahodilé proudění oleje v celkovém objemu (například při plnění nádoby) a vliv provozu [1]. Během provozování daného zařízení dochází totiž k rozkladu použitého oleje a popřípadě i pevné izolace (transformátor olej-papír). Rozklad probíhá z důvodu elektrických a tepelných poruch, které se v konkrétním izolačním systému běžně vyskytují (především jde o částečné výboje). Přítomnost zmíněných poruch má za následek vznik plynů jako je etylen, acetylen, ethan, methan aj. [3].

Dalším dílčím faktorem kontaminace jsou zmiňovaná **mikrovlákna**, která mohou obsahovat vodu, viz kapitola 2.2.4.

Přítomnost cizích částic výrazně ovlivňuje dielektrickou pevnost, ale také přestup tepla, cirkulaci oleje a způsobuje vznik usazenin na částech daného zařízení. Uvedené důsledky představují významnější roli v případě uspořádání s malými přeskokovými vzdálenostmi. Cizí částice se projevují jako nerozpustné produkty oxidačního stárnutí. Jejich četnost a velikost se zjišťuje na membránových ultrafiltrech za pomoci mikroskopů. **Přítomnost rozpustných kalů** zvyšuje schopnost izolačního oleje pohlcovat vodu a znatelně urychluje proces stárnutí [3].

Pohybujeme-li se ovšem ve větších přeskokových vzdálenostech, či ve větších objemech, oba zmínění činitelé nepředstavují výrazné riziko v porovnání s přítomností mikrovláken obsahujících vodu [1].

2.4.2 Frekvence napětí

Je známo, že při navyšování frekvence přiloženého elektrického pole působícího na izolační médium vzrůstají dielektrické ztráty, které se projevují jako přídavné teplo narušující celkovou dielektrickou pevnost dané kapaliny (frekvence zhruba od 1 kHz [1]).

2.4.3 Teplota

Negativní vlastností při navyšování teploty je snižování viskozity, což souvisí s navyšováním rychlosti volných elektronů, které se poté podílejí na nárazové ionizaci [34].

Vliv teploty také úzce souvisí s vlhkostí. Navyšováním koncentrace vody olej pomalu ztrácí schopnost vodu účinně rozpouštět, avšak navyšováním teploty tuto schopnost opět můžeme navýšit. Takto je možné do jisté míry faktor vlhkosti snížit. Problém nastává při nižších provozních teplotách oleje, kdy je přítomnost vysoušečů nutná [1].

2.4.4 Tlak

Existují technologické aplikace, které za pomoci navyšování tlaku působícího na kapalinu do jisté míry umožní eliminovat výskyt oblastí se sníženou hustotou, a navýšit tak i dielektrickou pevnost [34].

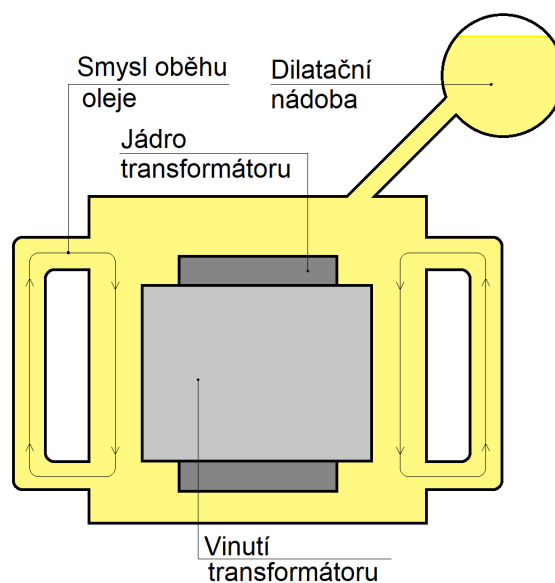
2.4.5 Konfigurace elektrického pole

Konfigurací elektrického pole se rozumí tvar elektrod a jejich vzdálenost. Faktor je rozhodující i u ostatních skupenství, ovšem u kapalin je výrazněji ovlivňován kontaminací. V případě silně nehomogenního pole, například uspořádání jehla a desková elektroda, je tedy zapalovací napětí částečného výboje značně sníženo přítomností plynů, vody a cizích částic v kapalině [1].

2.5 Izolační oleje a jejich rozdělení

Jako hlavním kapalným izolačním médiem jsou v dnešní době hojně využívány tři druhy izolačních olejů, tj. minerální, syntetické a přírodní.

Obecně při výběru izolační kapaliny se hledí na požadované elektrické a chemické vlastnosti, tj. vysoká rezistivita a permitivita, nízká viskozita (vyplnění celého prostoru nádoby transformátoru), oxidační stabilita, dielektrické ztráty, ale také vlastnosti jako je teplota tuhnutí, vzplanutí a hoření či hrozba uvolňování toxických látek při hoření [27], [34]. V poslední době, podobně jako v případě plynu SF₆, je velké úsilí věnováno hledání ekologičtějších alternativ, které by při úniku nebyly škodlivé pro okolní prostředí a měly by krátkou dobu rozkladu. Z tohoto důvodu se v mnoha případech setkáme se syntetickými, či přírodními oleji [15].



Obr. 2.5: Řez transformátoru ONAN.

Nejznámější zástupcem v použití izolačního oleje je transformátorový olej s funkcí izolační, chladicí, ale také promazávací. Využívá se ve všech větších transformátorech pro svou vysokou účinnost [15].

2.5.1 Minerální oleje

Vyrábí se rafinací ropy a jsou hojně využívány pro svou vysokou dielektrickou pevnost a nízkou cenu. Hlavní nevýhodou je však vysoká hořlavost, při které uvolňují do ovzduší velké množství toxických látek. Při úniku škodí okolnímu prostředí a jsou typické dlouhou dobou biologického rozkladu. Dalšími nevýhodami jsou vysoká závislost viskozity na teplotě a výrazné zhoršení dielektrické pevnosti při výskytu vlhkosti. Všechny zmíněné nevýhody lze do jisté míry eliminovat dodáním dalších přísad [15], [16], [25].

Jedním z hlavních představitelů minerálních olejů je **Shell Diala D** vytvořený smícháním rafinovaných naftových olejů a dalších aromatických extraktů. Jeho hlavní výhodou je vysoká oxidační stabilita, což velice zjednodušeně představuje rychlost stárnutí oleje. Díky této schopnosti je ve velkém množství využíván ve všech typech transformátorů, ale také v dalších elektrických zařízeních. Výbornou vlastností je také nízký bod tekutosti (< -60 °C), který je nezbytný u zařízeních pracujících při nízkých teplotách. To vše ovšem doprovází zmiňovaná nízká teplota vzplanutí (137 °C) a nízká ekologičnost [40].

Tab. 2.5.1: Vlastnosti oleje Shell Diala D a Nytro 10X [40], [37].

	Minerální oleje	
	Shell Diala D	Nytro 10X
Přeskokové napětí [kV]	70	50
Teplota vzplanutí [°C]	137	144
Teplota tekutosti [°C]	< -60	-60
Hustota při 20 °C [kg/m ³]	870	876

V případě dalších zástupců minerálních olejů jde o velice podobné vlastnosti jako u Shell Diala D. Ve zkratce bychom se zmínili o minerálním oleji **Nytro 10X**, viz tab. 2.5.1, vyvinutý společností Nynas AB, který je využíván v distribučních a výkonových transformátorech, ale také u dalších elektrických zařízeních [37].

2.5.2 Syntetické oleje

Jde opět o produkt rafinace ropy, avšak dále syntetizovaný pro konkrétní účely. Využívá se tam, kde je aplikace minerálních olejů vyloučena (požadavky na ochranu životního prostředí, zvýšenou bezpečnost proti vzniku požáru aj.) [15], [25].

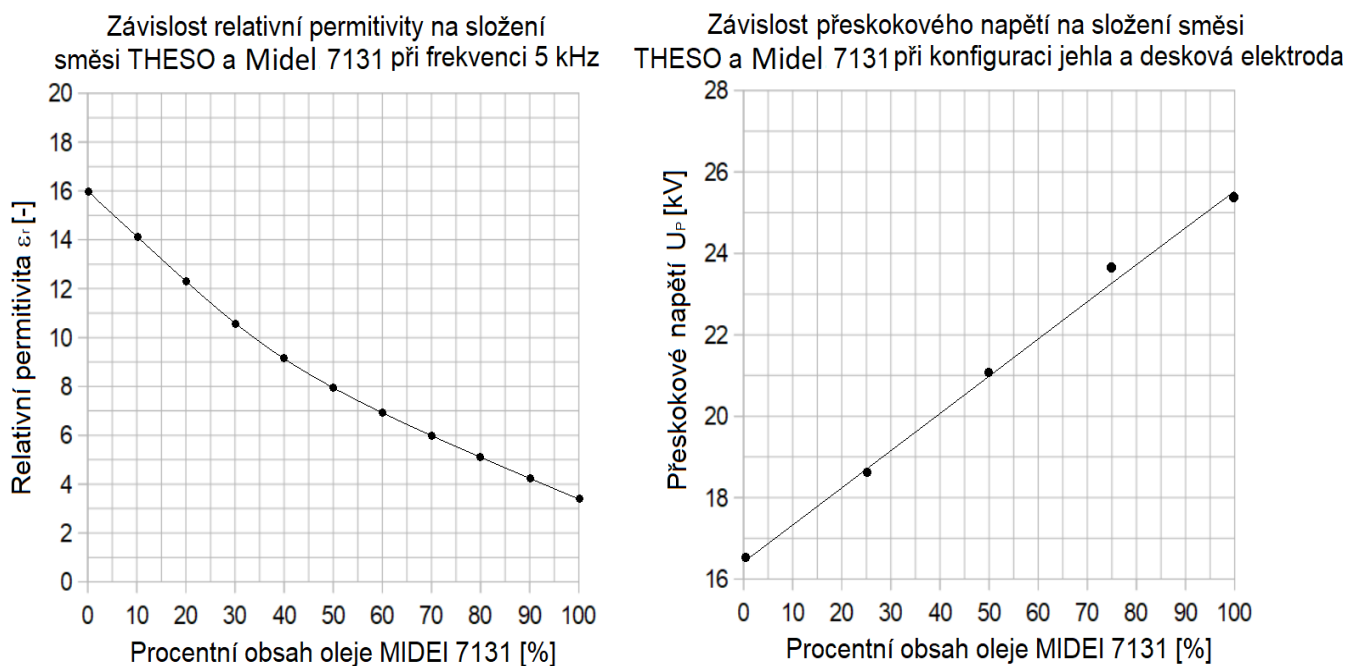
Aktuálním představitelem na bázi syntetických esterů, který při úniku neškodí životnímu prostředí a je zároveň rychle rozložitelný, je **Midel 7131**, viz *tab. 2.5.2*. V porovnání s minerálními oleji přináší výborné vlastnosti jako je udržení izolačních schopností při absorpci vlhkosti, vysoká oxidační stabilita, vysoká teplota vzplanutí (275 °C [38]) a nízké nároky na pravidelnou údržbu. To vše při udržení dielektrické pevnosti na úrovni minerálních olejů. Zároveň při hoření neuvolňuje do ovzduší žádné toxické látky. Běžně se využívá v distribučních transformátorech, ale před použitím v transformátorech o vyšších výkonech jsou zapotřebí určitá opatření, jelikož Midel 7131 má větší viskozitu než minerální oleje. Řešením jsou směsi minerálního oleje s takovým procentním obsahem Midel 7131, aby byly splněny veškeré nároky pro konkrétní použití (ekologičnost, nízké riziko vzplanutí, dlouhá trvanlivost aj.). Jako výsledek obvykle vzniká směs, která ve všech směrech převyšuje vlastnosti čistého minerálního oleje, a to i v dielektrické pevnosti (při nižších provozních teplotách) [16], [29], [25], [40], [38].

Dále bychom se zmínili o **Silikonu**, ze skupiny polydimethylsiloxanů, jako o běžně používaném izolačním oleji do všech druhů transformátorů, a to pro své výborné chladicí a dielektrické schopnosti (srovnatelné s minerálními oleji), oxidační stabilitu aj. Silikon je ovšem dražší variantou a využívá se v případech, kde je nutné splnit požadavky na bezpečnost proti vzniku požáru (teplota vzplanutí překračuje 300 °C [16]), viz *tab. 2.5.2*. Splňuje také požadavky na ochranu životního prostředí, jelikož je při úniku šetrný vůči živým organismům. V neposlední řadě je typický velice nízkou závislostí viskozity na teplotě [16], [36].

Tab. 2.5.2: Vlastnosti oleje Midel 7131 a Silikonu [16], [29], [40], [38].

	Syntetické oleje	
	Midel 7131	Silikon
Relativní permitivita při 25 °C a 50 Hz [-]	3,2	2,9
Přeskokové napětí [kV]	70	> 50
Teplota vzplanutí [°C]	275	> 300
Teplota hoření [°C]	311	> 335
Teplota tekutosti [°C]	-60	-53
Hustota při 20 °C [kg/m ³]	970	960

Izolační olej **THESO**, vyvinutý společností Tetra Corporation, představuje nové možnosti ve vytváření stabilních směsí s olejem Midel 7131 umožňující volbu relativní permitivity ϵ_r podle konkrétních požadavků (schopnost oleje odolávat elektrickému poli). Olej THESO je totiž charakteristický velmi vysokou relativní permitivitou (přibližně 15 [29]), ale také nižší dielektrickou pevností oproti Midel 7131. S vhodným procentuálním poměrem těchto dvou olejů je ale možné docílit směsí s požadovanými vlastnostmi [29], [28], viz obr. 2.5.2.

Obr. 2.5.2: Závislost relativní permitivity ϵ_r a přeskokového napětí U_p směsí olejů THESO a Midel 7131 na konkrétním procentním poměru [29].

2.5.3 Přírodní (rostlinné) oleje

Představují především ekologickou alternativu za minerální oleje, jelikož při úniku jednak neškodí okolnímu prostředí a zadruhé jsou rychle rozložitelné (jde o sloučeniny organického původu). To vše ale za cenu nižší dielektrické pevnosti. Další výhodou přírodních olejů je, že zdrojový materiál patří mezi obnovitelné zdroje. Vyrábí se totiž lisováním rostlinných semen (řepka, slunečnice, kukuřice, sója aj.) [15].

Zástupcem přírodního oleje je přírodní ester **Envirotemp FR3** vyvinutý firmou Cargill, viz *tab. 2.5.3*. Důvodem častého využití tohoto oleje v distribučních a výkonových transformátorech je jeho velmi vysoká teplota vzplanutí (až 360 °C [27]), dlouhá životnost, výborná chladicí schopnost a v neposlední řadě i udržení dielektrických schopností při absorbování vody. To vše ve výsledku zvyšuje životnost pevné izolace transformátorového vinutí (izolačního papíru), a tedy i životnost transformátoru jako celku [35], [27].

Tab. 2.5.3: Základní vlastnosti oleje Envirotemp FR3 [35], [27], [41].

	Přírodní oleje
	Envirotemp FR3
Přeskokové napětí [kV]	> 30
Teplota vzplanutí [°C]	330
Teplota hoření [°C]	360
Teplota tekutosti [°C]	-21
Hustota při 80 °C [kg/m ³]	880

Použití **řepkového, slunečnicového, sezamového či kokosového oleje** také poskytuje zvýšenou bezpečnost proti narušení životního prostředí a vzniku požáru, ovšem se sníženou izolační schopností [41].

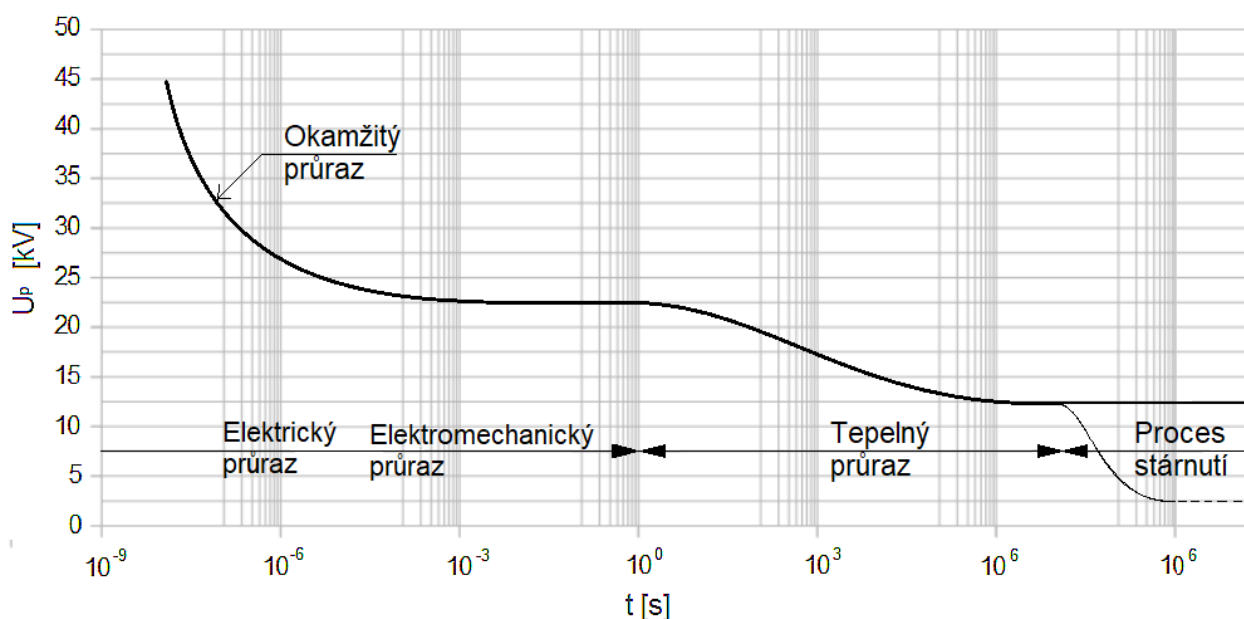
3 Úvod do vzniku průrazu v pevných izolantech

Pevné izolační materiály patří do skupiny s nejvyšší dielektrickou pevností, což je dáno především hustotou materiálové struktury, která se od plynů přes kapaliny k pevným látkám zvyšuje, tzn. snižuje se střední volná dráha pro nosiče náboje. Dalším faktorem jsou zvyšující se vazebné síly elektronů k atomu, tj. navyšování ionizační energie. Mezi nevýhody pevných izolantů ovšem patří nízká tepelná vodivost, nevratná destrukce po vzniku průrazu, vysoká hmotnost a vysoké technologické požadavky [1].

Dielektrickou pevnost u pevné izolace určuje četnost nečistot a poruch ve struktuře daného materiálu, která se ovšem s časem navyšuje procesem stárnutí. Velká pozornost je proto věnována zdokonalování procesům výroby. Dalším podstatným faktorem jsou provozní podmínky, tj. okolní teplota, vlhkost, chemické vlivy, mechanické namáhání, v některých případech i tlak, záření aj. Využití pevných izolantů je velice pestré a zahrnuje například izolaci kabelů a průchodek, dielektrika u kondenzátorů, podpěrné či závěsné izolátory u venkovních vedení a mnoho dalších [1].

Z obr. 3 je vidět, že průraz v pevných izolantech lze rozdělit podle mechanismu, který tomuto procesu předchází. Pohybujeme-li se v časech do 1 s, je **průraz** nazýván **elektrický**. Elektrický průraz může nastat pouze při velmi vysokých intenzitách elektrického pole, během kterých začne docházet k nárazové ionizaci. V tomto intervalu se ovšem také nachází **průraz elektromechanický**, který není příliš obvyklý. Jeho vzniku předchází elektrostatická síla působící mezi opačně nabitými elektrodami. Síla působí v podobě tlaku a způsobuje poruchy ve struktuře materiálu [1], [34].

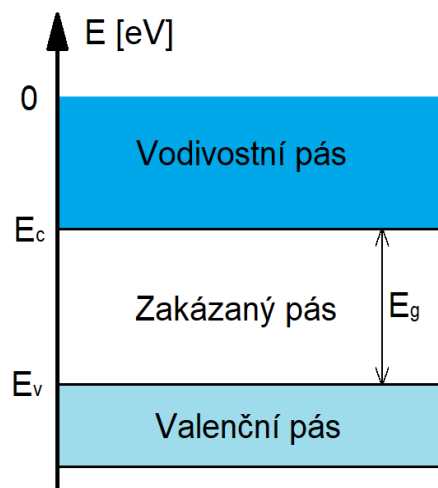
V časovém intervalu sekund až hodin se začne projevovat tepelné namáhání, které při překročení hodnoty U_p vede k tzv. **tepelnému průrazu**. Po určité době se začne projevovat i **stárnutí materiálu**, které způsobuje velký rozptyl možných hodnot U_p . Zmíněný rozptyl je dán především množstvím dějů, které v této části života dané izolace probíhají (částečné výboje, chemické změny vlivem elektrického pole aj.). Ať už je ale průraz vyvolán zvýšenou teplotou, či poruchami ve struktuře materiálu, proces bude vždy doprovázen elektronovými lavinami [1], [34].



Obr. 3: Závislost průrazného napětí pevného izolačního materiálu na době namáhání [1].

3.1 Elektrický průraz

Průběh má některé podobné prvky s procesem přeskoku u plynů, avšak střední volná dráha elektronů je zřetelně kratší, a je tedy nutná mnohem silnější intenzita elektrického pole, aby i volné elektrony byly více urychlovány. Dalším podstatným rozdílem je hodnota potřebné kinetické energie volného elektronu pro interakci s elektrony ve valenčním pásu atomu. Důvodem je široký zakázaný pás u atomů pevných izolačních materiálů, viz obr. 3.1 - 1. Proto je i pravděpodobnost existence volných elektronů ve vodivostním pásu u pevných izolantů velice nízká. Dalším velkým rozdílem od výboje v plynech je tedy ve způsobu uvolnění primárního elektronu pro první elektronovou lavinu. To může nastat především dvěma způsoby [1], [31]:



Obr. 3.1 - 1: Pásový model atomu.

- *Externí emise* - Volné elektrony jsou uvolněny přímo z elektrody po přiložení vnějšího elektrického pole. Uvolněné elektrony se účastní elektronové laviny těsně u elektrody, která probíhá odlišným způsobem než u plynů [1]. Hodnota kinetické energie, kterou volný

elektron musí nashromáždit, je přímo závislá na konkrétní struktuře daného materiálu (amorfní polyethylen cca 8,8 eV [31]). Po dosažení této hodnoty začne docházet k přímým interakcím mezi urychleným volným elektronem a elektrony ve valenčním pásu. Jakmile se přímé interakce objeví, začnou se objevovat i neelastické srážky, které vedou k uvolnění dalších elektronů [31].

- *Interní emise* - Nastává po aplikaci vnějšího elektrického pole a popisuje proces, při kterém po překročení určité hodnoty intenzity začne docházet k ovlivňování pásového modelu atomu, viz *obr. 3.1 - 1*, kde E představuje konkrétní potenciální energii elektronu (E_c je horní hranice zakázaného pásu a E_v je horní hranice valenčního pásu). Elektron může za těchto podmínek díky tunelovému jevu přeskocit z valenčního pásu skrz oslabenou potenciálovou bariéru zakázaného pásu do pásu vodivostního [1], tj. při $E \leq E_v < E_c$. Dalším faktorem ovlivňující proces interní emise je přítomnost tzv. mezioblastí vyskytujících se v zakázaném pásu a umožňující snadší přesun valenčních elektronů do vodivostního pásu [31].

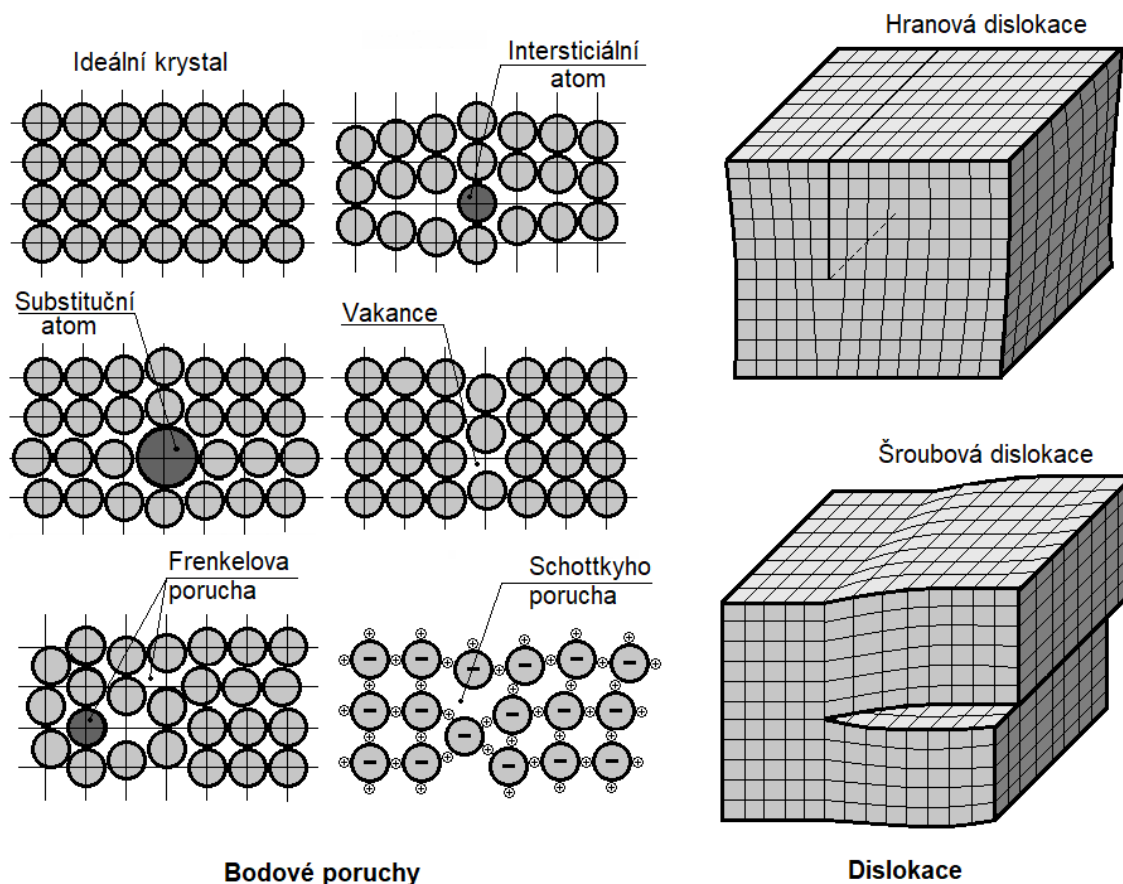
E je možné získat ze vzorce

$$E = -\frac{m_o \cdot q^4}{2 \cdot (4\pi \cdot \epsilon_o \cdot h \cdot n)^2}, \quad (3.1 - 1)$$

kde m_o je hmotnost elektronu, q je náboj elektronu, ϵ_o je permitivita vakua, h je Planckova konstanta a n je hlavní kvantové číslo [43].

Hodnota intenzity elektrického pole pro interní emisi je závislá na struktuře daného materiálu. V případě plně amorfní, či naopak dokonale krystalické struktury je hodnota intenzity nejvyšší. Dosáhnout dokonale krystalické struktury je ovšem nemožné, a tak se spíše setkáme s materiály, které budou mít amorfní strukturu, tj. sklo, pryskyřice, kaučuk, celulóza, a nebo ve své krystalické struktuře budou obsahovat určité poruchy či oblasti s amorfním prostředím [31], tj. slída.

Na *obr. 3.1 - 2* jsou znázorněny bodové poruchy a dislokace v krystalické struktuře. Tyto a jiné další poruchy mají za následek výskyt zmiňovaných mezioblastí v zakázaném pásu, což ve výsledku snižuje intenzitu elektrického pole potřebnou pro interní emisi u krystalických izolantů. Platí také vliv objemu, tzn. se zvětšujícím se objemem roste četnost poruch. Dielektrická pevnost se také snižuje s teplotou, tj. zvyšuje se pravděpodobnost výskytu volného elektronu ve vodivostním pásu [1].



Obr. 3.1 - 2: Bodové poruchy a dislokace v krystalické struktuře.

3.2 Tepelný průraz

Podmínka pro rozvoj tepelného průrazu je

$$P_G > P_O, \quad (3.2 - 1)$$

kde P_G je tepelný výkon generovaný a P_O je tepelný výkon odváděný ze systému. Při takovéto nerovnováze dochází k trvalému navyšování teploty izolačního materiálu, a tedy k navyšování i jeho elektrické vodivosti. Po uplynutí určité doby, která je dána především poměrem těchto dvou výkonů, schopností izolantu odolávat vyšším teplotám, geometrií a okolním prostředím, dojde k tepelnému průrazu [1]. Mezi hlavní složky generovaného tepelného výkonu patří:

- *Dielektrické ztráty* - Často se vyjadřují za pomoci ztrátového činitele $tg\delta$, nebo ztrátového výkonu P_z . Dielektrické ztráty jsou přímo závislé na teplotě izolačního materiálu T a frekvenci f přiloženého napětí [1].

- *Jouleovy ztráty* - Často označované jako ΔP_J . Vyjadřují tepelný výkon generovaný vodičem o odporu R , který je protékán proudem I . Vodič je obvykle přímo pokryt daným izolačním materiálem, proto je zdroj tohoto tepla nezanedbatelný. Jouleovy ztráty nejsou však závislé na teplotě izolantu T .

Pro ztrátový výkon v dielektriku platí vztah

$$P_Z = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3.2 - 2)$$

kde C představuje první prvek náhradního schématu dielektrika a $\operatorname{tg} \delta$ lze vyjádřit jako

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}, \quad (3.2 - 3)$$

kde R představuje druhý prvek náhradního schématu dielektrika [44], viz *obr. 3.2 - 2*.

Obecný vztah pro Jouleovy ztráty je ve tvaru

$$\Delta P_J = R \cdot I^2. \quad (3.2 - 4)$$

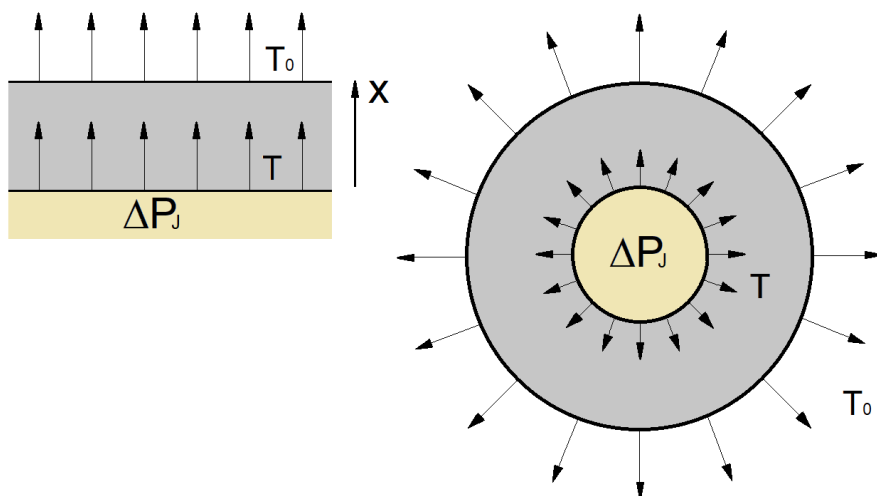
Když nyní známe hlavní zdroje generovaného tepelného výkonu můžeme psát, že

$$P_G = P_Z + \Delta P_J. \quad (3.2 - 5)$$

Pro tepelný výkon odvedený ze systému platí vztah

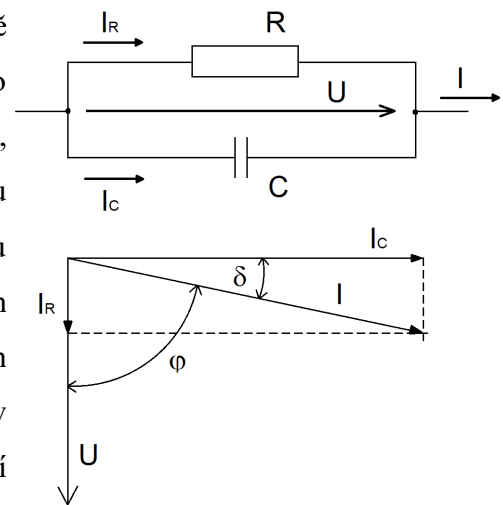
$$P_O = \lambda \cdot A(x) \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3.2 - 6)$$

kde λ je tepelná vodivost daného materiálu, $A(x)$ je chladicí plocha a poslední člen představuje tepelný gradient ve směru odvodu tepla x (viz *obr. 3.2 - 1*), tj. čím větší je rozdíl teploty materiálu T a teploty okolního prostředí T_0 , tím lze očekávat větší P_O [1].

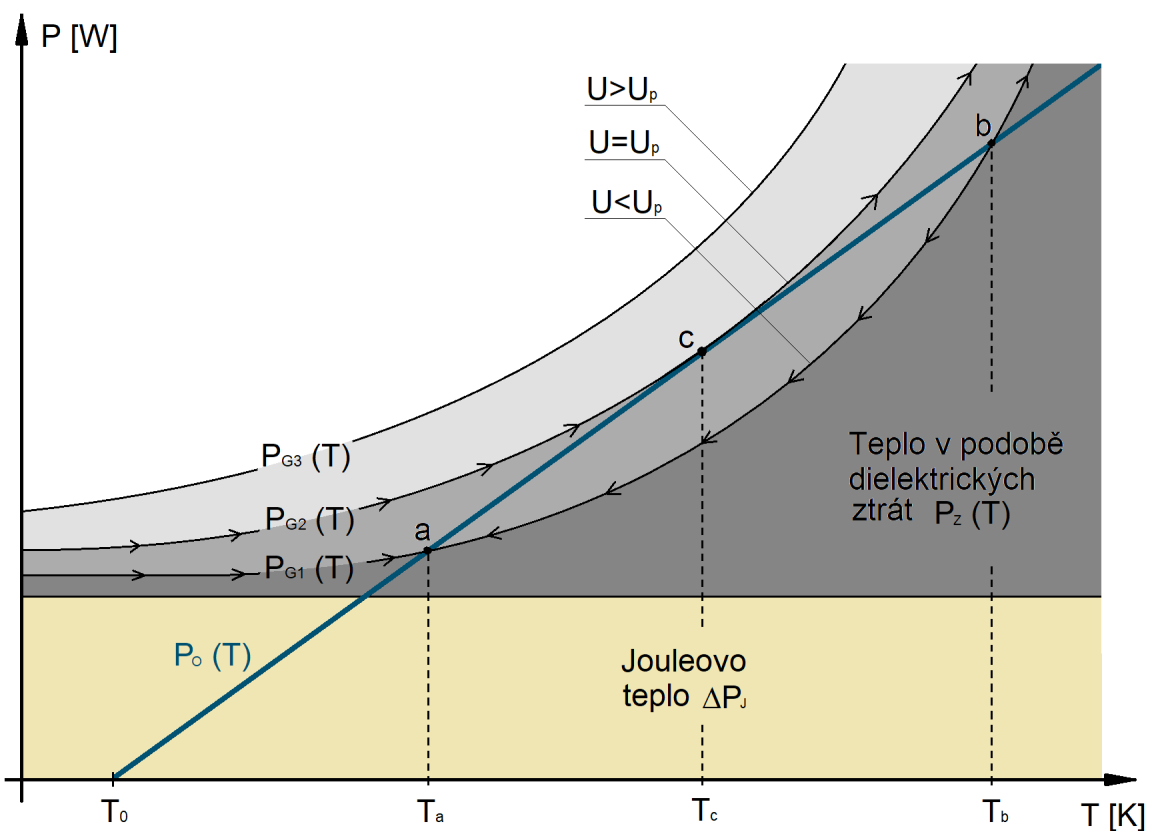


Obr. 3.2 - 1: Smysl odvodu tepla z vodiče.

Na obr. 3.2 - 3 je znázorněna závislost P_G a P_O na teplotě T , která se bere jako konstantní v celém objemu daného izolačního materiálu [1]. Křivka $P_O(T)$ začíná v bodě T_0 , jelikož v případě rovnosti teploty T a T_0 , tj. teplota materiálu se rovná teplotě okolního prostředí, nedochází k žádnému přesunu tepla. V případě křivky $P_{G1}(T)$ vznikají protnutí křivky $P_O(T)$ body **a** a **b**. Bod **a** je na obr. 3.2 - 3 znázorněn jako stabilní a bod **b** jako nestabilní. Zmíněný stav probíhá v případě, že $U < U_p$. Při překročení bodu **b** vlivem zvýšení teploty T , tj. například zvýšením proudu I nad povolenou hodnotu, začne samovolně narůstat generovaný tepelný výkon, což povede až k tepelnému průrazu. Na křivce $P_{G2}(T)$ je znázorněn nestabilní bod **c**, tj. při $U = U_p$, ve kterém dochází k samovolnému navyšování teploty, což je opět doprovázeno tepelným průrazem. Extrémním případem je křivka $P_{G3}(T)$, kde k protnutí s křivkou $P_O(T)$ nedochází vůbec, tj. $U > U_p$ [1].



Obr. 3.2 - 2: Paralelní verze náhradního schématu dielektrického materiálu s příslušným fázorovým diagramem.



Obr. 3.2 - 3: Závislost P_{G1} , P_{G2} , P_{G3} a P_O na teplotě izolačního materiálu T , která se bere jako stejná v celém objemu [1].

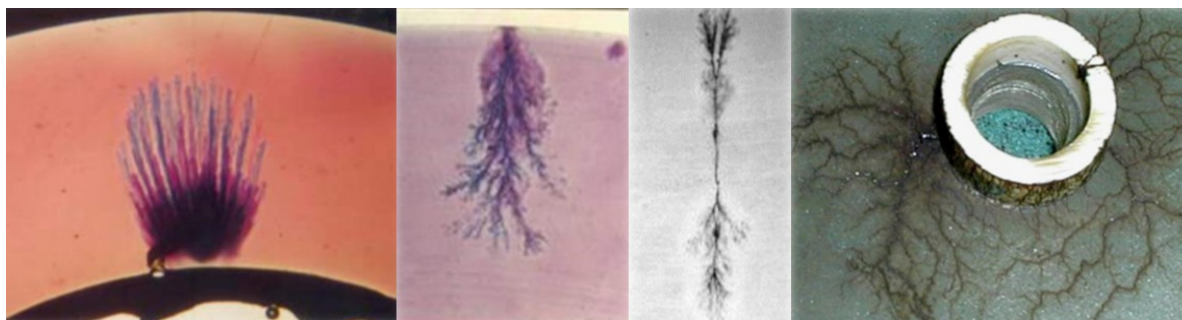
Základní způsoby jak zabránit vzniku tepelného průrazu jsou:

- *použití materiálu s nízkými dielektrickými ztrátami, tj. nízký ztrátový činitel $\tan\delta$,*
- *snížení Jouleových ztrát, tj. navýšení průřezu vodiče S , či záměna za materiál s nižší měrnou rezistivitou ρ ,*
- *lepší systém pro odvod tepla, tj. větší tepelná vodivost λ , větší plocha A či přídavné chlazení.*

3.3 Proces stárnutí

Proces stárnutí je nevyhnutelnou součástí každého materiálu. V oblasti pevných izolačních materiálů můžeme za zmíněným procesem hledat důsledek elektrického, či neelektrického namáhání. Vlivem velkého množství procesů je poslední část života pevné izolace doprovázena velkým rozptylem průrazných napětí U_p , viz *obr. 3*. Mezi hlavní sledované elektrické vlivy u pevných izolantů patří především [1]:

- *Částečné výboje* - Vznikají díky nedokonalostem ve struktuře daného materiálu (dutinky, trhlinky aj.). V mikrotrhlinkách s plynem, či jiným médii skokově klesá dielektrická pevnost. V případě, že je v dutince nižší relativní permitivita než v jejím okolí, je prostor dutinky více napětíově namáhán a při překročení zapalovacího napětí ČV zde dochází k výbojům, které mohou vytvářet další lokální poruchy, a erodovat tak přes celé izolační prostředí (kladné ionty a volné elektrony uvolněné při výboji naráží do stěn dutinky) [1], [34], viz *obr. 1.2.6*.



Obr. 3.3: Rozvoj elektrického stromečku v kapalném (první tři zleva) a pevném izolačním materiálu [34].

- *Vliv elektrického pole* - Při dlouhodobém namáhání dochází k pomalému rozvoji výbojů skrz izolační materiál v podobě rozvětvených struktur, které v konečné fázi poskytnou cestu hlavnímu vodivému kanálu. Příčinou jsou vodivé nečistoty na elektrodě či v samotném izolantu. Takovýto projev je znám pod názvem elektrický stromeček [34], viz obr. 3.3.
- *Kombinace vlhkosti a vnějšího elektrického pole* - Následkem jsou elektrochemické reakce, které ovlivňují strukturu daného materiálu, a to v podobě tzv. vodních stromečků. Charakteristické struktury se začínají obvykle rozvíjet od nehomogenních částí izolačního systému. Typickým příkladem jsou polyethylenové kabely [1].

Mezi hlavní sledované neelektrické vlivy patří především [1]:

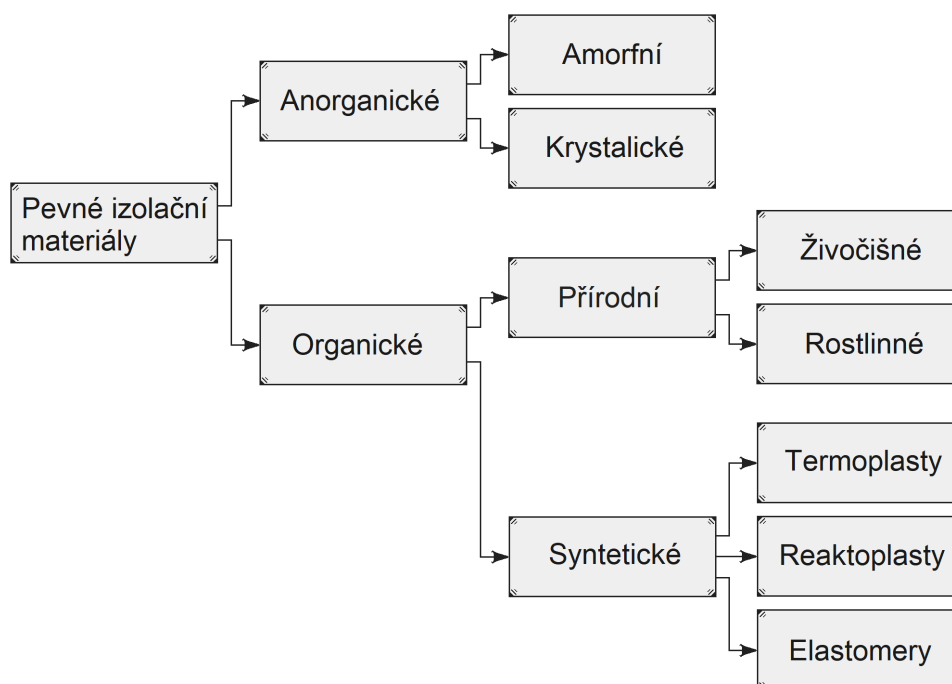
- *Mechanické namáhání* - Hrozí především u vodičů a kabelů, kde dochází ke zřetelnému poškozování struktury jejich izolace.
- *Chemické namáhání* - Působení vlhkosti na izolační materiál je především v případě vodních elektráren či venkovních aplikací. V některých případech hrozí degradace vlivem přítomnosti soli či jiných látek.
- *Vliv teploty* - Může se jednat o tepelnou roztažnost materiálu, ale také o změnu celkové dielektrické pevnosti, tj. uvolnění nových volných elektronů, či dodání kinetické energie již volným elektronům.

Indikátorem aktuálního a do jisté míry i budoucího stavu izolačního systému je provozní křivka. Její základní podstatou je poskytnout stručné, ale zároveň přesné informace o odolnosti daného izolačního systému, a to pouze při jeho provozu v konkrétních podmínkách, tj. při provozní vlhkosti, teplotě aj. Získání věrohodné provozní křivky je ovšem velice složitý a nákladný úkol. V principu její získání představuje pravidelné napěťové zkoušky izolačního systému, který je zhotovený přesně danými procesy při splnění požadovaných parametrů a provozovaný za konkrétních podmínek. V některých případech se můžeme setkat s napěťovými zkouškami, které jsou aplikovány na systém, který je podrobený tzv. urychlenému stárnutí. Zmíněná metoda se provádí za pomoci zintenzivnění provozních faktorů (vyšší teplota, vlhkost, elektrické namáhání aj.). Zde je nutné aplikovat některé korekční členy, které mají za úkol co nejvíce získané výsledky

přiblížit realitě. Obecně lze ovšem díky tomuto nástroji detekovat nežádoucí anomálie jako jsou například částečné výboje, které by se projevíly značnou odchylkou od příslušné provozní křivky [3].

3.4 Rozdělení pevných izolačních materiálů

Skupina pevných izolantů nabízí nejrozsáhlejší škálu používaných materiálů. Volba konkrétního materiálu se provádí na základě účelu, kterému bude materiál sloužit, tj. například izolace vinutí transformátorů a točivých strojů, závěsné či podpěrné izolátory venkovního vedení, izolace kabelů aj. Konkrétní účel sebou přináší i specifické vlivy, kterým bude izolační materiál po dobu svého provozu vystaven. Proto musí zvolený materiál splňovat požadované vlastnosti, a to jak elektrické (dielektrická pevnost, povrchový odpor, ztrátový činitel $tg\delta$, ...), tak neelektrické (odolnost vůči tepelnému, mechanickému či chemickému namáhání). Určení nesprávného materiálu má za následek zrychlený proces stárnutí, který se může projevit zvýšenou poruchovostí daného zařízení, či jeho úplným zničením [4].



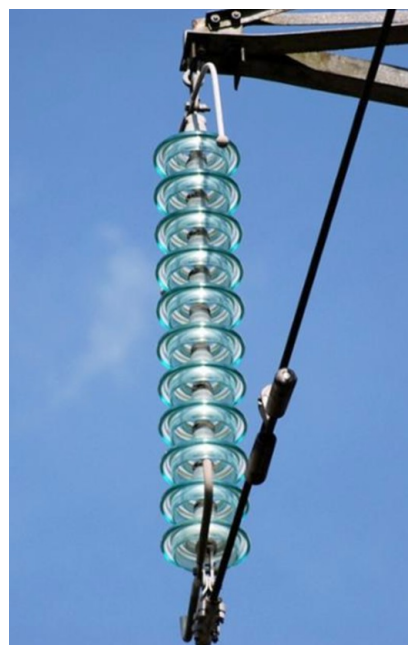
Obr. 3.4: Základní rozdělení pevných izolačních materiálů.

Základní rozdělení pevných izolačních materiálů představuje *obrázek 3.4*. Největší skupinou používaných materiálů jsou látky organické, které mohou být syntetického (epoxidová pryskyřice (EP), polyvinylchlorid (PVC), polyethylen (PE) aj.) či přírodního původu (např. dřevo, jantar, hedvábí, ...). Další velkou skupinou jsou anorganické amorfnní či polykrystalické látky, kde hlavními představiteli jsou keramické materiály (porcelány) a skla. Méně obvyklou skupinu představují anorganické látky s krystalickou strukturou (slída, azbest, ...) [4].

3.4.1 Anorganické izolační materiály

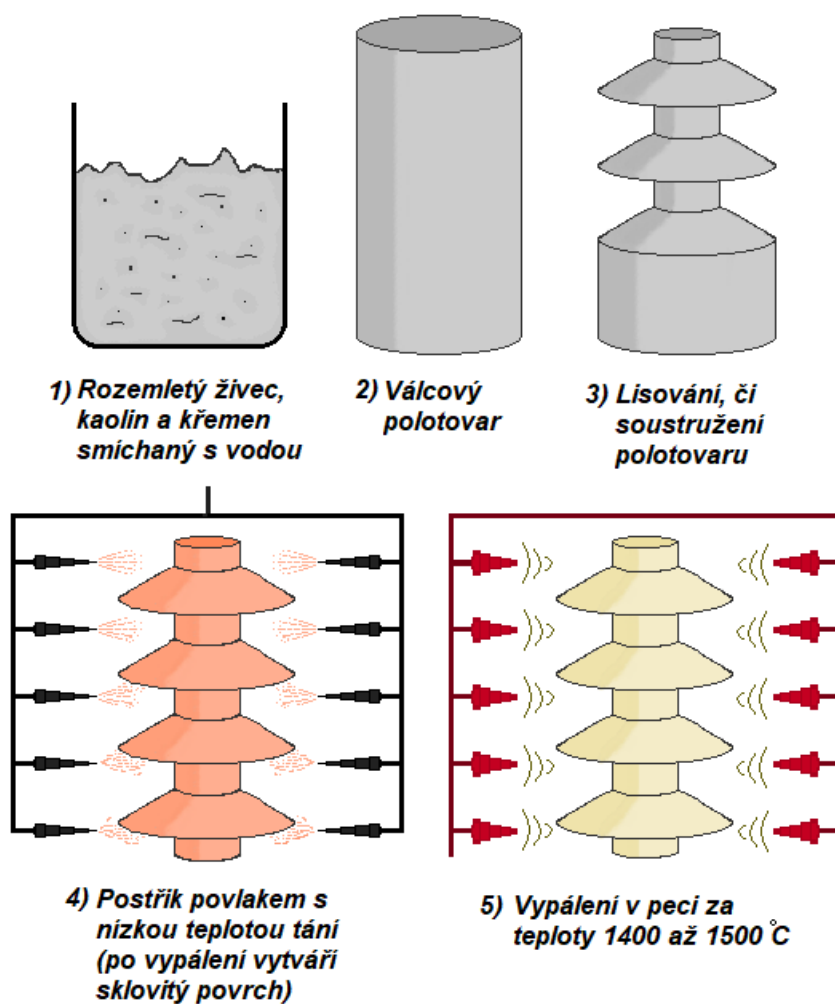
Jedná se o skupinu materiálů, které přináší vysokou odolnost vůči vysokým teplotám, chemickým vlivům a méně podléhají částečným výbojům. Další charakteristickou vlastností je vysoká mechanická pevnost, která se využívá například u izolátorů venkovního vedení [4], viz *obr. 3.4.1 - 1*.

Velkou část anorganických izolantů tvoří **keramické látky**, které jsou vyráběné spékáním přírodních minerálních látek jako je jíla, kaolín, živec, křemen a slída. V elektrotechnice jsou běžně využívány z výše zmíněných důvodů, ale také pro své výborné izolační vlastnosti. Mimořádné schopnosti v pevnosti (vyšší než u oceli) a chemické odolnosti představuje tzv. oxidová keramika (spékání oxidu hlinitého Al_2O_3), jejíž teplota tání dosahuje až $3\,000\text{ °C}$ [4], [1]. Na *obr. 3.4.1 - 2* jsou uvedeny kroky při výrobě porcelánového izolátoru.



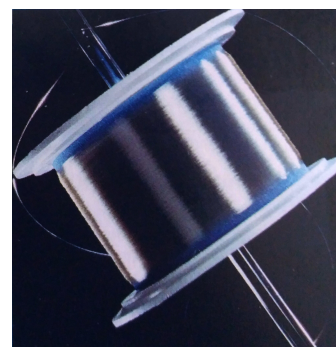
Obr. 3.4.1 - 1: Závěsný izolátor venkovního vedení z tvrzeného skla [34].

Konkrétní využití keramických materiálů zahrnuje například zmiňované izolátory, ale také průchodky například u transformátorů, dielektrika u kondenzátorů, čipové odpory, kapacitní trimry aj. [4], [1].



Obr. 3.4.1 - 2: Jednotlivé kroky při výrobě porcelánového izolátoru [1].

Dalším velkým představitelem anorganických izolantů je skupina skel, která má podobné vlastnosti jako keramické látky. V případě mechanické pevnosti jsou však méně odolné a izolační schopnosti jsou závislé na teplotě. Při jejich výrobě je hlavním komponentem křemičitan sodno-vápenatý, či křemičitan draselno-vápenatý. Hlavním využitím skel jsou například světlovodná vlákna (viz obr. 3.4.1 - 3), trubice zářivek, ale slouží také jako složka mechanického zesílení u kompozitních materiálů ve formě tenkých vláken [4], [1].

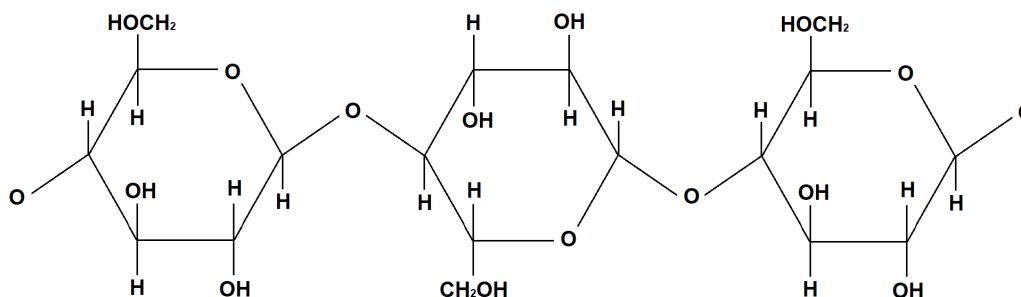


Obr. 3.4.1 - 3: Optické skleněné vlákno na cívce [4].

3.4.2 Organické izolační materiály

Jedná se o nejvíce využívanou skupinu pevných izolačních materiálů, které mají ve většině případech makromolekulární strukturu. Oproti látkám anorganickým mají nižší tepelnou i mechanickou odolnost a více podléhají procesu stárnutí. Podstatnou výhodou organických látek je ale jejich rozmanitost, která umožňuje velký výběr použitelných materiálů charakteristických svými specifickými přednostmi. Z obrázku 3.4 je vidět, že organické látky mohou být přírodního původu, či uměle syntetizovány z jednoduchých látek [4], [1].

Mezi přírodní organické izolační **látky rostlinného původu** lze zahrnout například kalafunu (přírodní pryskyřice), jantar, bavlna a dřevo. Poslední dva uvedené materiály jsou hlavním zdrojem celulózy, viz obr. 3.4.2, ze které se dále vyrábí velké množství druhů izolačních papírů lišící se od sebe výrobními postupy [3]. Dále se můžeme setkat s organickými **látkami živočišného původu** jako je hedvábí a šelak [11].



Obr. 3.4.2: Chemická struktura celulózy [3].

Větší zastoupení organických izolantů ovšem představují zmiňované **látky syntetické**, které nabízí rozmanitou škálu použitelných materiálů lišící se výrobními postupy a výslednými vlastnostmi. Další podstatnou výhodou oproti anorganickým izolačním materiálům je jejich nižší elektrická vodivost. Postupy výroby zahrnují řízenou polymeraci, polykondenzaci či adiční polymeraci, při kterých dochází ke spojování makromolekul s jinými molekulami. Ve výsledku tak lze dosáhnout různých druhů plastů, které se od sebe odlišují svými specifickými vlastnostmi. Podle konkrétních vlastností rozlišujeme uvedené plasty [4], [1]:

- *Termoplasty* - Materiály, které lze po zahřátí tvarovat, vstříkovat do forem či svařovat [4]. Zástupci této skupiny jsou uvedeni v tabulce 3.4.2 - 1 [4].

Tab. 3.4.2 - 1: Hlavní zástupci termoplastických materiálů, jejich vlastnosti a použití [4].

Materiál	Vlastnosti	Použití
Polyvinylchlorid (PVC)	Hustota: 1,35 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 80 °C	Izolace vodičů a kabelů, izolační pásy, zásuvky aj.
Polyethylen (PE)	Hustota: 0,92 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 110 °C	Izolace vodičů a kabelů (pro vf techniku), smršťovací obalové fólie aj.
Polyamid (PA)	Hustota: 1,14 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 150 °C	Pouzdra přístrojů, zásuvky, nosné části izolačních krytů aj.
Polytetrafluorethylen (PTFE)	Hustota: 2,2 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 250 °C	Těsnění, izolace vodičů, kostry cívek, desky plošných spojů aj.
Polystyren (PS)	Hustota: 1,1 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 90 °C	Kryty el. přístrojů, tlačítka aj.

- *Reaktoplasty* - Dříve nazývané jako termosety, není možné po vytvrzení opětovným zahřátím tvarovat. Při teplotě 20 °C jsou tvrdé a křehké. Po navýšení jejich teploty nad teplotu provozní více zkrehnou, zuhelnatí, či úplně shoří [4]. Zástupci této skupiny jsou převážně umělé pryskyřice, které jsou uvedeny v *tabulce 3.4.2 - 2* [4].

Tab. 3.4.2 - 2: Hlavní zástupci reaktoplastických materiálů, jejich vlastnosti a použití [4].

Materiál	Vlastnosti	Použití
Fenolformaldehydová pryskyřice (PF)	Hustota: 1,25 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 130 °C	Desky plošných spojů, kostry cívek, svorkové lišty aj.
Epoxidová pryskyřice (EP)	Hustota: 1,2 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 150 °C	Zalévací pryskyřice pro elektromotory, kryty přístrojů, kabelové spojky, vícevrstvé desky plošných spojů aj.
Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)	Hustota: 1,2 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 150 °C	Krabice pro odbočky a vypínače, pouzdra, kryty aj.
Polyuretanová pryskyřice (PUR)	Hustota: 1,25 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 100 °C	Pěna pro izolaci chladniček, zalévací pryskyřice aj.
Melamin-formaldehydová pryskyřice (MF)	Hustota: 1,5 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 120 °C	Vypínače, zásuvkové a odbočkové krabice, díly pro autoelektroniku aj.
Silikonová pryskyřice (SI)	Hustota: 1,9 kg/dm ³ Nejvyšší provozní teplota: 300 °C	Impregnace vinutí elektromotorů a transformátorů, uložení elektronických prvků aj.

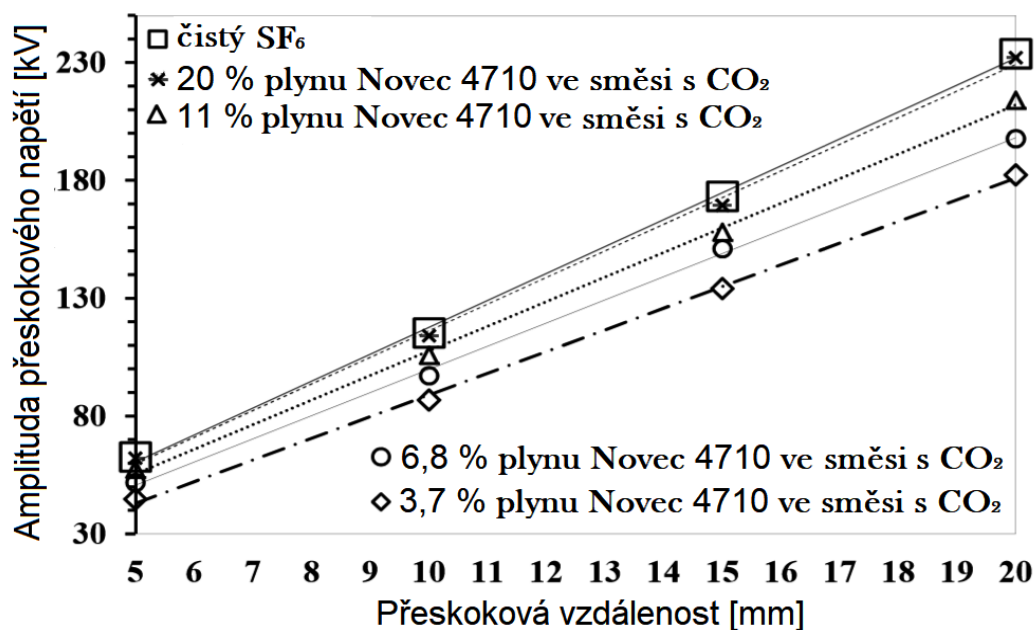
- *Elastomery* - Jsou složeny z prostorově zesíťených makromolekul, což dodává těmto materiálům velkou pružnost a především tvarovou paměť. Zmíněné vlastnosti se dobře uplatňují převážně u kabelových izolací, které jsou výrazně mechanicky namáhané. Základ elastomerů tvoří dlouhé polymerní řetězce (kaučuk), které jsou při tzv. vulkanizaci (vpravení síry) propojeny v síť. Konkrétní vlastnosti jsou dány procentním obsahem síry v kaučuku (čím více síry, tím pevnější materiál). Hlavními zástupci elastomerů jsou přírodní kaučuk (NR), chloroprenový kaučuk (CR), ethylen-propylenový kaučuk (EPR) a silikonový kaučuk (SIR). Další zvláštní skupinou jsou tzv. termoplastické elastomery, které kombinují snadnou výrobu a recyklaci termoplastů a elastické schopnosti elastomerů (například síťovaný polyethylen (XLPE)) [4], [1].

4 Prognóza v oblasti izolačních materiálů

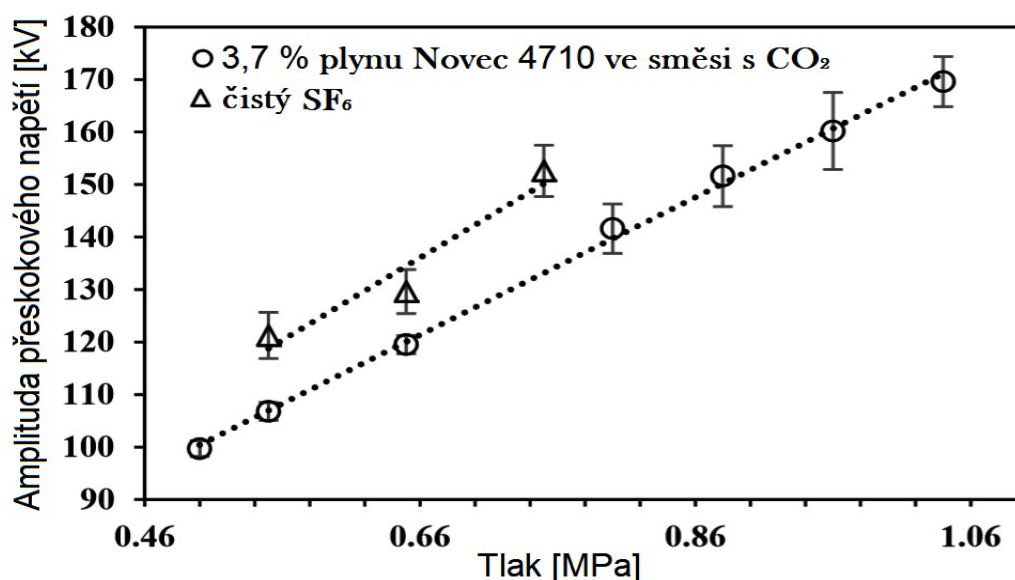
4.1 Oblast izolačních plynů

V souladu s rozvojem lidské společnosti je v aktuální době kladen značný důraz na dříve opomíjená témata související s problematikou používaných izolačních médií. Nejvíce diskutovanými tématy jsou například dopad na životní prostředí, zdraví člověka či bezpečnost v provozu, a to z důvodu aplikace zmíněných materiálů v nejrůznějších elektrických zařízeních (zmíněné GIL, GIS, GCB aj.). V případě dopadu na životní prostředí byla velká pozornost zaměřena především na zmiňovaný plyn SF₆, a to díky svému vysokému GWP (22 800 - 23 500x vyšší než u CO₂). V řešení jsou proto různá opatření, která mají za cíl částečnou (různé směsi plynu SF₆ a plynů s nižším GWP), či úplnou (alternativní náhrady za SF₆) eliminaci škodlivého plynu.

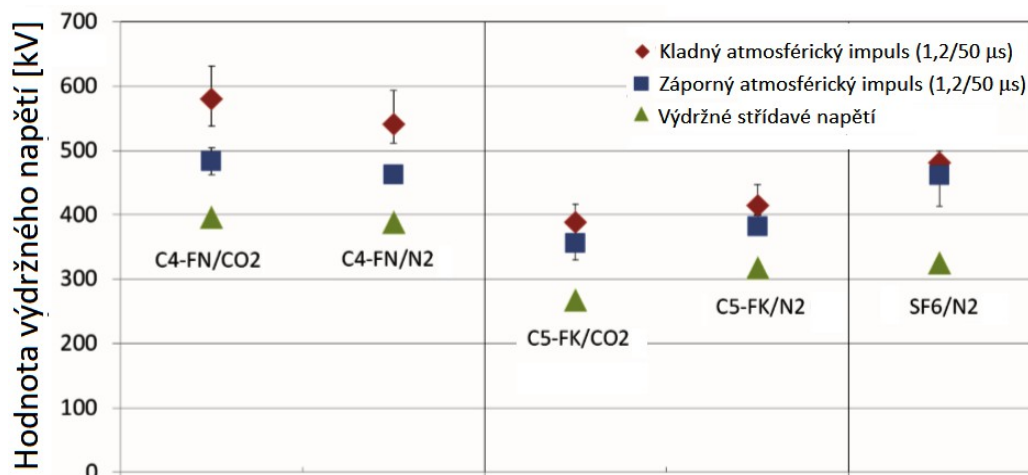
Mezi nejslibnější alternativní náhrady, kterým je plánována věnovat velká pozornost, je například zmiňovaný Novec 4710 či Novec 5110, a to díky výborným dielektrickým vlastnostem a nízkému GWP, viz *tab. 1.9.3 - 1*. Jejich výzkumem, ohledně konkrétních vlastností a možných směsí s plyny CO₂, N₂ aj., se podrobně zabývá literatura [22], [30], [26]. Jedná se především o výzkum zaměřující se na testování různých procentuálních koncentrací zmíněných směsí při různých hodnotách tlaku, a to za účelem vyrovnání dielektrické pevnosti plynu SF₆ při současném snížení bodu varu plynů Novec 4710 a Novec 5110, viz *obr. 4.1 - 1*, *obr. 4.1 - 2* a *obr. 4.1 - 3*.



Obr. 4.1 - 1: Závislost střídavého přeskokového napětí na přeskokové vzdálenosti v uspořádání s kulovými elektrodami u čistého SF₆ a konkrétních směsí plynu Novac 4710 s plynem CO₂ při atmosférickém tlaku (0,1 MPa) a teplotě 20 °C [22].



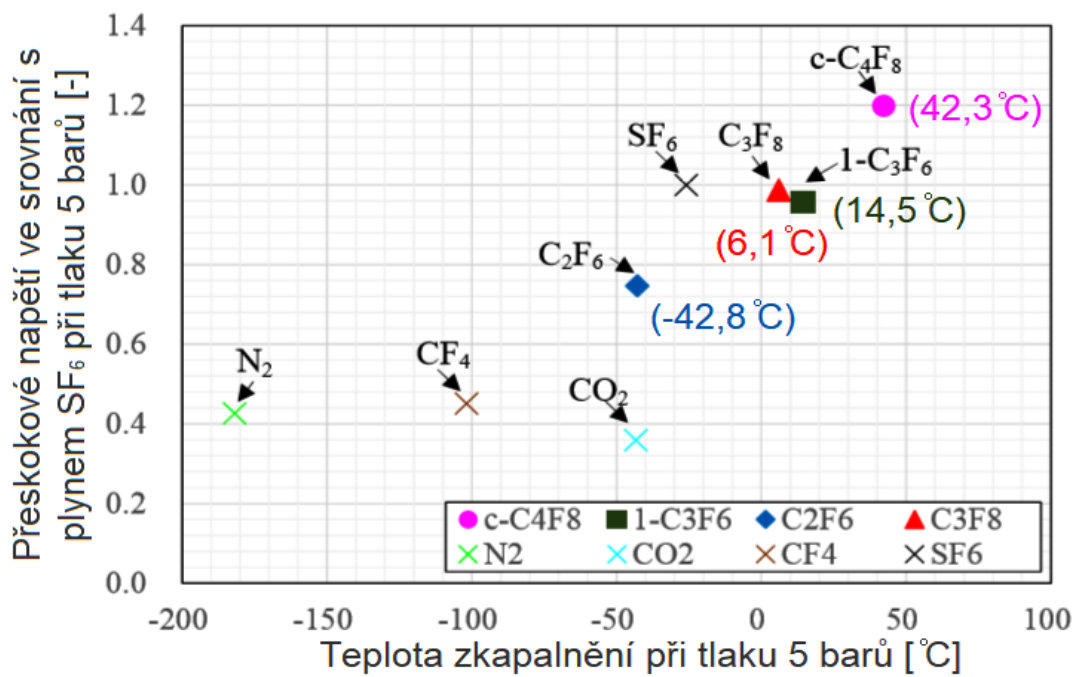
Obr. 4.1 - 2: Závislost střídavého přeskokového napětí na tlaku pro čistý SF₆ a 3,7% koncentraci plynu Novac 4710 ve směsi s plynem CO₂ [22].



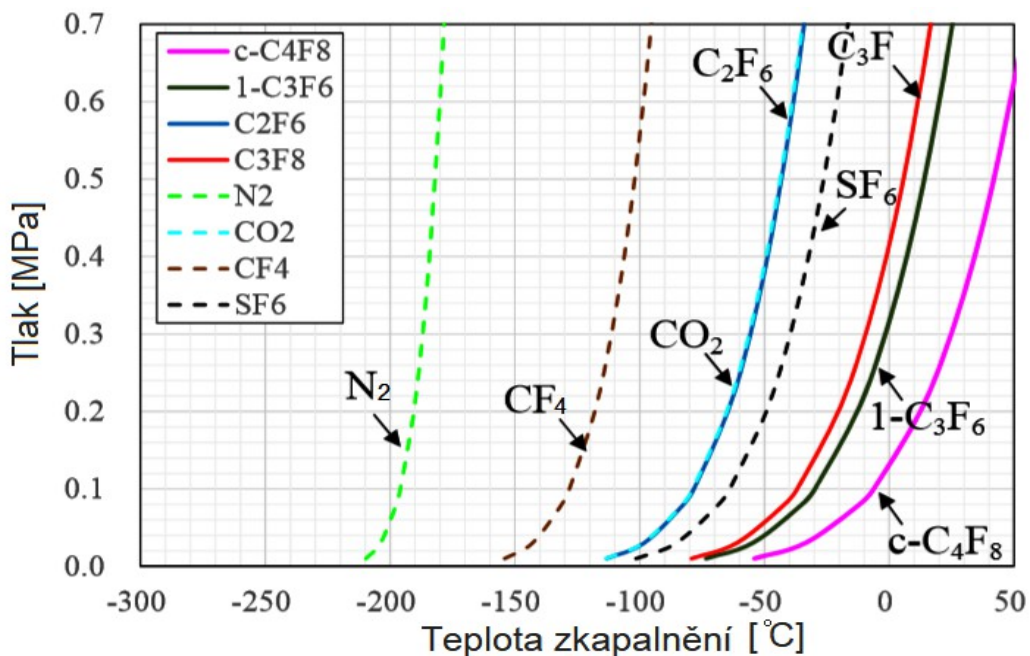
Obr. 4.1 - 3: Hodnoty výdržných napětí (uspořádání s kulovou a deskovou elektrodou) pro směsi plynu SF₆, Novec 4710 a Novec 5110 s plyny přírodního původu umožňující aplikaci při minimální přípustné provozní teplotě -10 °C bez zkapalnění [30].

Podobný výzkum probíhá i s plyny PFC, viz *tab. 1.9.4*, kde podrobný náhled poskytuje například [13]. Zmíněný výzkum obsahuje testování různých směsí plynů PFC s plyny přírodního původu za účelem snížení bodu varu na přijatelnou mez. V grafu na *obr. 4.1 - 4* je znázorněno porovnání hodnot přeskokového napětí a teploty zkapalnění jednotlivých plynů PFC a plynů přírodního původu s plynem SF₆ při tlaku 500 kPa (5 barů) a na *obr. 4.1 - 5* je uvedena závislost tlaku na teplotě zkapalnění zmíněných plynů. Z grafů na *obr. 4.1 - 6* jsou poté patrné závislosti přeskokového napětí na daném procentuálním složení konkrétní směsi.

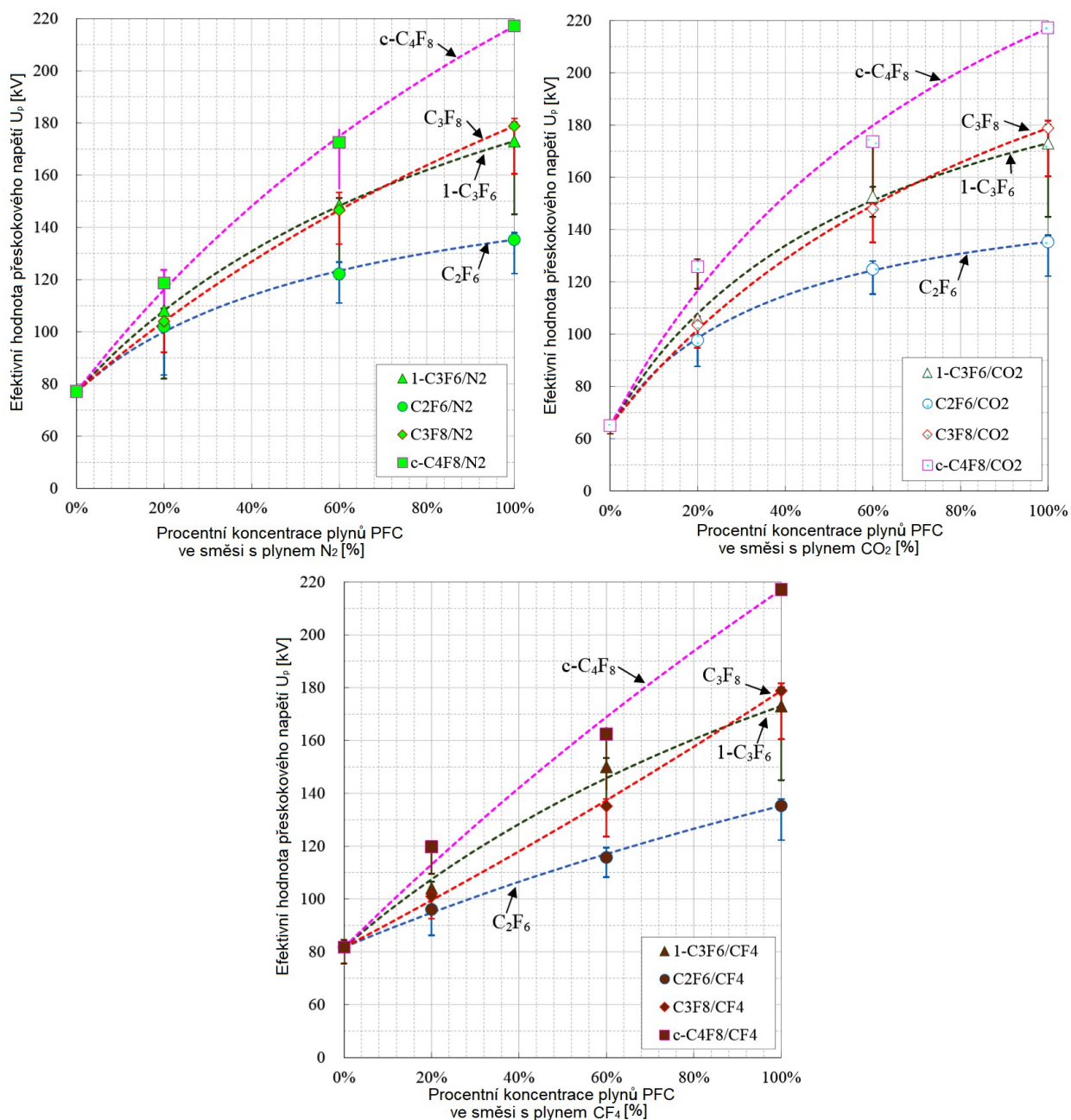
Velká pozornost je věnována také plynu dichlortrifluoroethan (CF₃CHCl₂), jež je v Kjótském seznamu alternativních náhrad za plyn SF₆, a to pro své nízké GWP (23 [17]). Zmíněný plyn se také pyšní vysokou elektronegativitou (7,14 [17]), která je téměř dvakrát větší než u čistého SF₆. Podrobnější náhled poskytuje například [18], [17]. Další způsob omezení aplikace škodlivého plynu nabízí [30] v jeho nižší koncentraci ve směsích s plyny přírodního původu (CO₂, N₂ aj.) při zachování dielektrické pevnosti čistého SF₆.



Obr. 4.1 - 4: Porovnání hodnot přeskokového napětí a teploty zkapalnění jednotlivých plynů PFC a plynů přírodního původu s plynem SF₆ při tlaku 5 barů [13].



Obr. 4.1 - 5: Závislost tlaku plynů PFC, plynů přírodního původu a plynu SF₆ na teplotě zkapalnění [13].

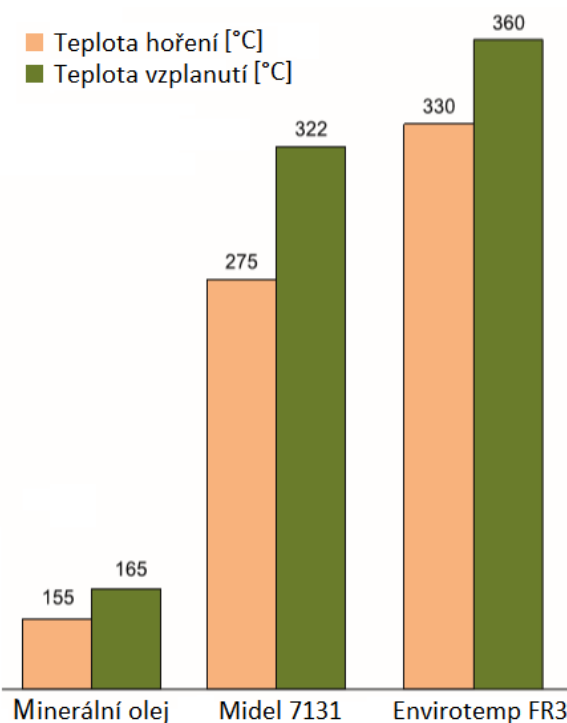


Obr. 4.1 - 6: Závislost efektivní hodnoty přeskokového napětí U_p na procentuálním složení dané směsi plynu PFC s plynem přírodního původu [13].

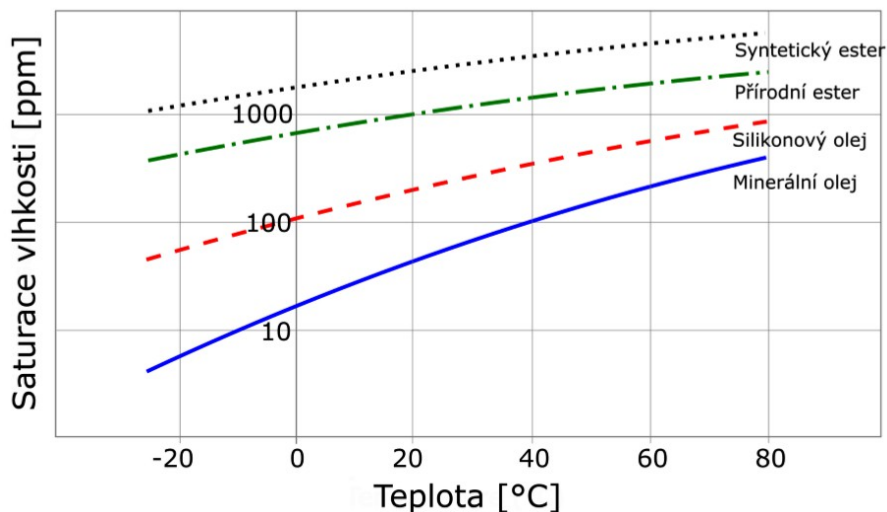
4.2 Oblast izolačních kapalin

Aktuálním tématem v oblasti izolačních kapalin, podobně jako je tomu i u ostatních fází, je problematika ekologičnosti při jejich využívání (např. transformátorový olej) a následné likvidaci (nevyhnutelný proces degradace). Ovšem ekologičnost není jediným úskalím, na které je směřována veškerá pozornost. Aby izolační kapalina splňovala základní předpoklady pro bezpečnost při její aplikaci v provozu, s ohledem na zmíněnou ekologičnost, je nutné zahrnout také provozní vlivy, které na kapalinu budou působit. Je proto nezbytné, aby konkrétní biodegradabilní kapalina splňovala požadavky jednak na elektrické parametry, tj. například dielektrická pevnost odpovídající použité hladině napětí pro dané zařízení či nízký ztrátový činitel $tg\delta$, který souvisí s ohříváním kapaliny, ale také na neelektrické vlastnosti, tj. viskozita, oxidační stabilita, teplota vzplanutí, hoření a tuhnutí aj. V současné době se proto rozvíjí trend, který směřuje velkou pozornost na aplikaci a výzkum nových izolačních olejů syntetického či přírodního původu, které by splňovaly všechny výše uvedené požadavky.

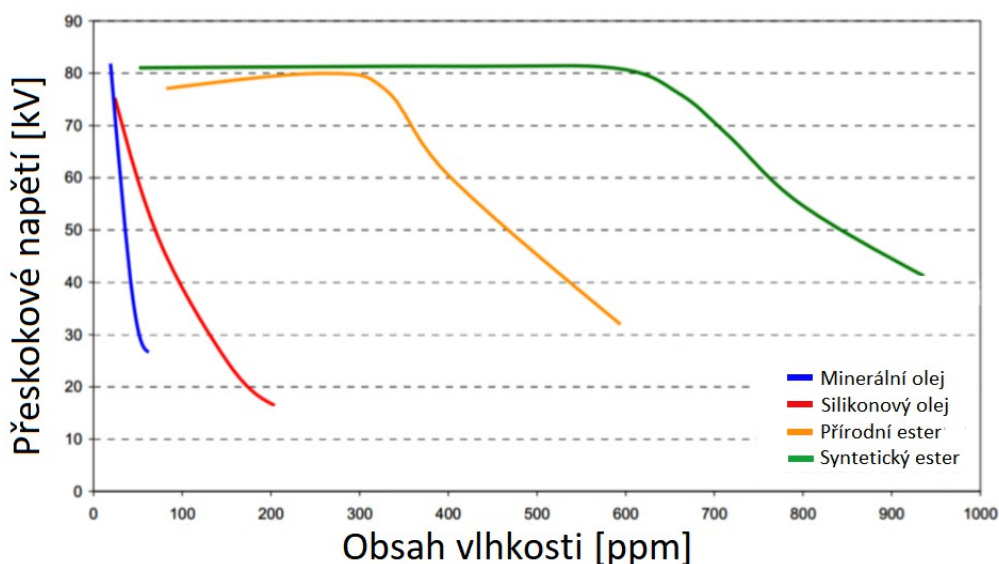
Nejslibnější potenciál představují izolační oleje přírodního původu, kde aktuálně zkoumanou skupinou jsou především přírodní estery. Zmiňovaný přírodní ester Envirotemp FR3 je již nasazován jako izolační kapalina do transformátorů s izolačním systémem olej-papír, a to pro své výjimečné elektrické i neelektrické vlastnosti, viz *tab. 2.5.3*. Jeho hlavním potenciálem v budoucích aplikacích je velmi vysoká teplota vzplanutí, viz *obr. 4.2 - 1*, a vysoká ekologičnost. Mezi jeho dalšími přednostmi je ochrana papírové izolace výkonových transformátorů, a to díky schopnosti absorbovat vodu z pevné izolace, viz grafy na *obr. 4.2 - 2* a *obr. 4.2 - 3*, která následně reaguje s esterovou kapalinou a vytváří mastné kyseliny. Mastné kyseliny poté reagují za vzniku nových esterových vazeb, které vytváří ochrannou vrstvu pro celulózový papír. Podrobným výzkumem se zabývá literatura [27], [35], [42].



Obr. 4.2 - 1: Porovnání teploty vzplanutí a hoření oleje Envirotemp FR3 s oleji minerálními a zástupcem olejů syntetických Midel 7131 [35].

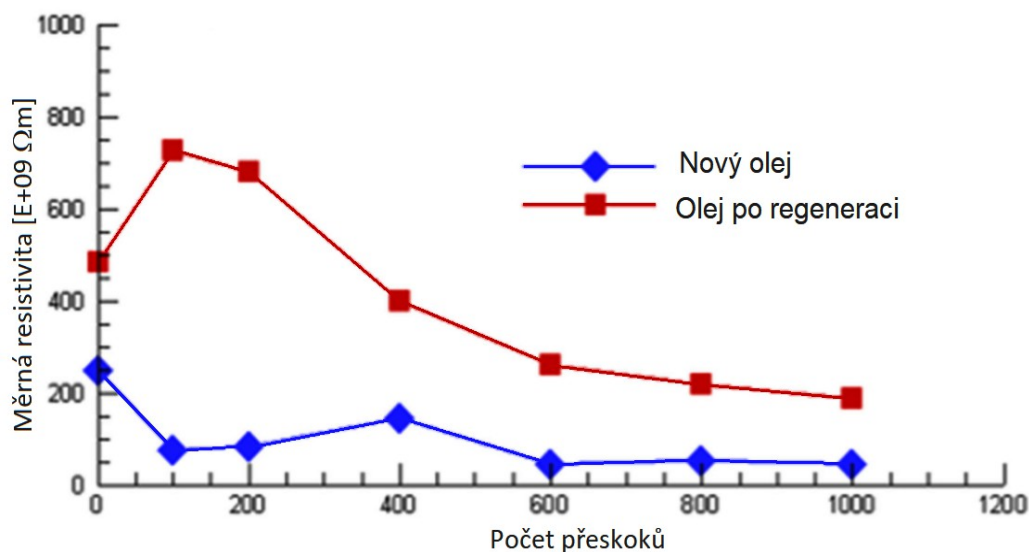


Obr. 4.2 - 2: Porovnání saturace vlhkosti u různých typů oleje [42].



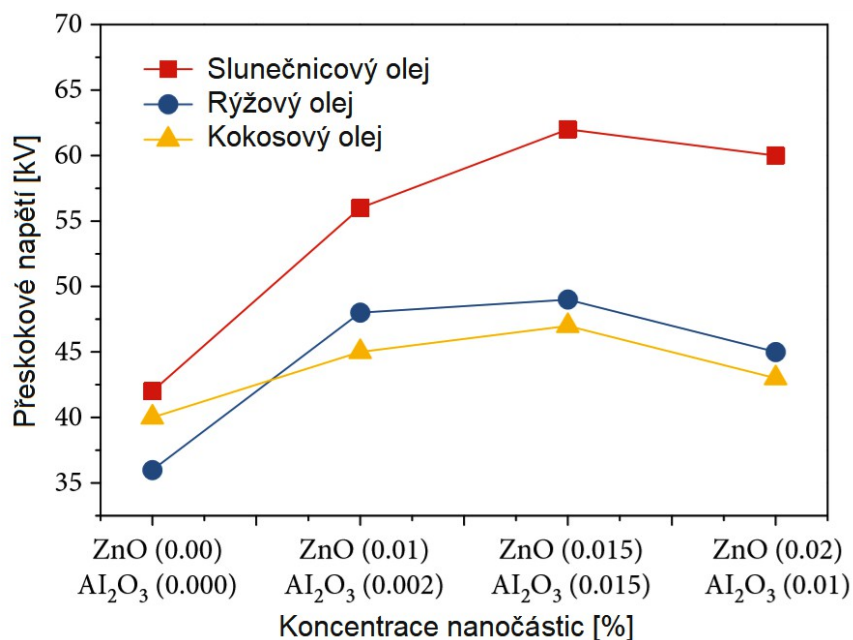
Obr. 4.2 - 3: Porovnání vlivu vlhkosti na přeskovové napětí u různých typů oleje [42].

Snaha o navýšení ekologičnosti probíhá také u aktuálně využívaných minerálních olejů, a to pomocí navýšení jejich životnosti, viz graf na obr. 4.2 - 4. Zdokonalování tzv. procesu regenerace oleje je v současné době věnováno značné úsilí, a postupně se tak stává běžným prvkem u velkých výkonových transformátorů s olejovou náplní. Podrobným popisem celého procesu regenerace oleje se zabývá literatura [3], [23].



Obr. 4.2 - 4: Porovnání nového oleje s olejem regenerovaným v závislosti měrné rezistivity na počtu přeskoků [23].

Progresivní charakter vykazují také izolační kapaliny s nanočásticemi. Aplikace vodivých, částečně vodivých či nevodivých nanočástic způsobí zpomalování volných elektronů v kapalině, a má tedy příznivý dopad na výsledné přeskokové napětí, viz graf na obr. 4.2 - 5. Podrobný popis nabízí například [42], [24].

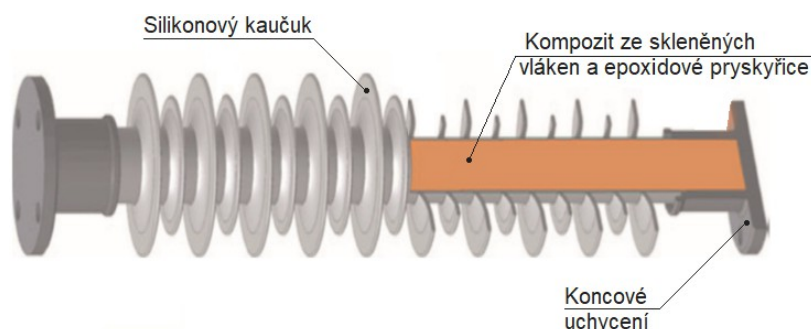


Obr. 4.2 - 5: Vliv aplikace nanočástic na přeskokové napětí používaných olejů přírodního původu [24].

4.3 Oblast pevných izolačních materiálů

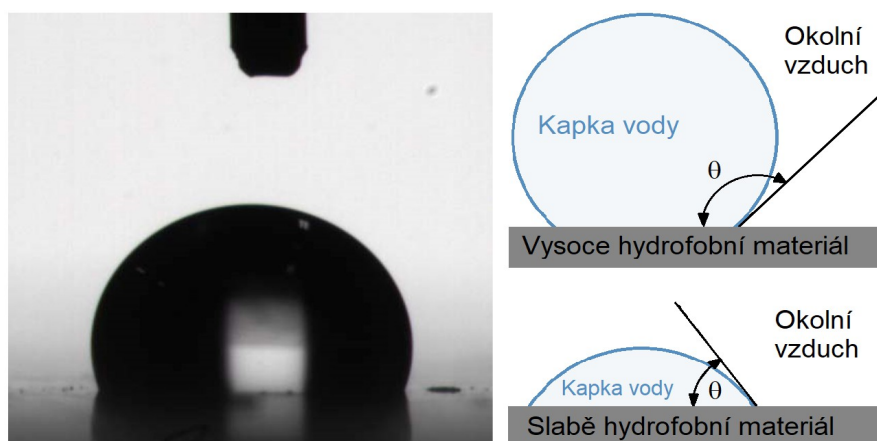
V oblasti pevných látek je obecně velká obliba ve využívání různých kompozitních materiálů v nejrůznějších odvětvích, a to pro vysokou variabilitu požadovaných vlastností, které jsou dány jejich konkrétním složením. Kompozitem totiž rozumíme materiál, který kombinuje přednosti dvou a více materiálů pro dosažení lepších vlastností (beton s ocelovou výztuží). V oblasti pevných izolačních materiálů se nejčastěji setkáme s kompozity skládající se z plastů, které jsou vyztužené různými druhy vláken. Kompozity se v průběhu času ukazují jako nejvhodnější alternativou za těžkou keramikou a sklo. Důvody k tomuto trendu jsou především zvyšující se požadavky na izolační schopnosti, mechanickou pevnost, nízkou hmotnost, nízké pořizovací náklady a dlouhou životnost při působení různých negativních provozních vlivů.

Výborným příkladem ve využití kompozitních materiálů jsou izolátory venkovních vedení, které postupně více nachází své uplatnění jak ve střídavých, tak stejnosměrných systémech na hladinách uvn. Nutností pro další rozvoj je ovšem aplikace nových testovacích metod pro verifikaci požadovaných vlastností. Na *obr. 4.3 - 1* je vidět konstrukční uspořádání nejčastěji využívané varianty venkovního kompozitního izolátoru. Vnější část je nejčastěji silikonový kaučuk (Silicone rubber, SIR) a vnitřní část je poté tvořena kompozitním materiálem, tj. polymerní materiál vyztužený skleněnými vlákny [5].



Obr. 4.3 - 1: Konstrukční uspořádání kompozitního izolátoru [5].

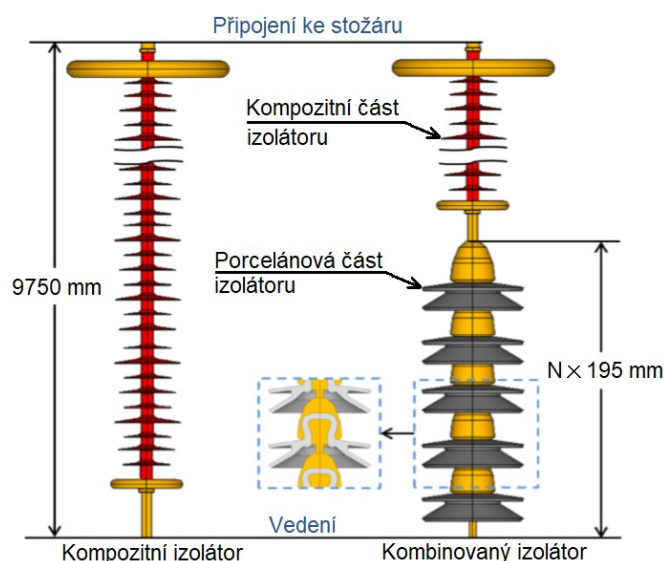
Zmíněná vnější část izolátoru představuje ochranu před povětrnostními vlivy, ale také například ochranu proti plazivým proudům. Materiál, který se pro tento účel využívá, je například zmíněný silikonový kaučuk, který nabízí unikátní hydrofobní vlastnosti [19]. Výborné hydrofobní vlastnosti u SIR reprezentuje *obr. 4.3 - 2* vlevo. Jde tedy o úroveň nesmáčivosti povrchu vyjádřenou úhlem θ , který představuje kontaktní úhel mezi podložkou a kapkou vody, viz *obr. 4.3 - 2* vpravo. Podrobnější náhled do hydrofobních schopností silikonového kaučuku nabízí [19].



Obr. 4.3 - 2: Vizualizace hydrofobní schopnosti silikonového kaučuku (SIR) [19].

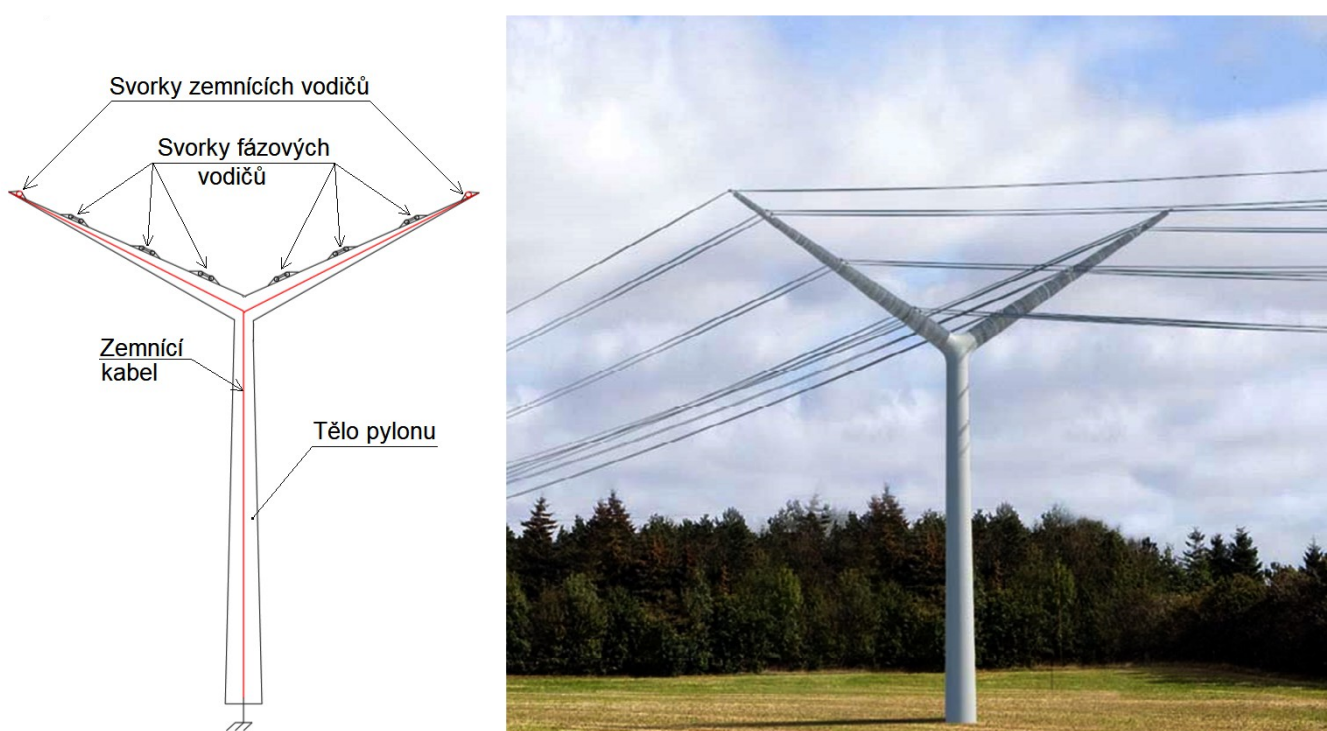
Kompozitní materiál, který představuje jádro samotného izolátoru (obr. 4.3 - 1), je tvořen matricí z epoxidové pryskyřice a paralelně orientovaných skleněných vláken, které splňují nejen hlavní izolační složku, ale také mechanickou výztuž celého izolátoru, která je zapotřebí především u zmíněných venkovních vedení uvn, kde je nutné tíhové a tahové napětí všech vodičů převést na podpěrný stožár [5].

Výše uvedené konstrukční uspořádání prezentuje spoustu výhod oproti porcelánovým či skleněným izolátorům, ovšem v některých směrech stále ne zcela splňuje některé požadavky, a to především v odolnosti proti negativním účinkům koróny. Řešení nabízí [21] ve vhodné kombinaci porcelánových (více odolných vůči erozivním účinkům elektrického pole) a kompozitních izolátorů (více odolným vůči povětrnostním vlivům), viz obr. 4.3 - 3.



Obr. 4.3 - 3: Konfigurace kompozitního izolátoru (vlevo) a kombinace porcelánového a kompozitního izolátoru (vpravo) [21].

Využití kompozitních materiálu je pro svou variabilitu konkrétních vlastností velice pestré. Další možností představuje [20] v jejich využití jako stožáry venkovního vedení z čistě kompozitního materiálu pro hladinu 400 kV. Zmíněné konstrukční řešení by mohlo v budoucnosti vyřešit vysoké náklady a náročnou montáž aktuálně využívaných mřížových stožárů. Celé téma je ovšem teprve v raném stádiu vývoje a do hromadného využívání kompozitních pylonů zbývá vyřešit spoustu klíčových problémů zahrnující například metody testování. Konstrukce kompozitního pylonu je patrná z *obr. 4.3 - 4*, ze kterého je také zřejmý jeden z dalších problémů, a tím je ochrana vedení před úderem blesku, jelikož jsou zemní vodiče v nevýhodné pozici [20].



Obr. 4.3 - 4: Konstrukční provedení nových kompozitních pylonů [20].

5 Závěr

Hlavním záměrem této bakalářské práce byl komplexní přehled o problematice vzniku přeskoku a průrazu v různých izolačních materiálech s uvedením nejaktuálnějších témat v této oblasti, tj. náhrada škodlivého plynu SF₆ s vysokým dopadem na globální oteplování, náhrada minerálních olejů biodegradabilními přírodními estery či aplikace kompozitních materiálů, např. jako hlavní složka izolátorů venkovních vedení.

Během líčení mechanismů, které probíhají při přeskoku v plynném médiu, je nutné zdůraznit, že konkrétní konfigurace či podmínky prostředí, ve kterých k výboji dochází (tlak plynu, tvar, vzdálenost, polarita elektrod aj.), určují finální podobu elektrického výboje, tj. například zda-li dojde k rozvoji Townsendovy korony, či streamerové korony určuje především vzdálenost mezi elektrodami. Podstatným faktorem při zmapování všech dějů je hustota materiálové struktury, což je jeden z hlavních důvodů, proč je výboj v plynu relativně snadno interpretovatelný do matematických modelů umožňujících určení relativně přesnou, s ohledem na zmíněnou konkrétní konfiguraci, hodnotu přeskokového napětí (Paschenův zákon). Nízká hustota materiálové struktury ovšem také souvisí s nízkou dielektrickou pevností v porovnání s kapalinami či pevnými izolačními látkami.

Zmiňovaná souvislost hustoty materiálové struktury s porozuměním procesů vzniku výboje zahluje plný náhled do mechanismů tohoto procesu v kapalných a pevných izolačních materiálech. S ohledem na tento fakt jsou v této práci uvedeny nejužívanější teorie popisující vznik přeskoku a průrazu ve zmíněných médiích. Ovšem jednoznačná odpověď opět neexistuje, jelikož, podobně jako je tomu u plynů, záleží především na konkrétních podmínkách, tj. například hrubost a materiál elektrod, obsah vody v izolačním oleji, teplota izolačního prostředí, mechanické namáhání aj. Proto jsou pro určení příčiny vzniku přeskoku či průrazu esenciální především konkrétní podmínky, na jejichž základě je poté možné aplikovat nejvhodnější zjišťovací metody.

V oblasti izolačních plynů jsme se také zmiňovali o některých nejatraktivnějších řešení problému aktivního využívání škodlivého plynu SF₆ například v plynem plněných přenosových vedení či v plynem plněných vypínačích. Perspektivním řešením se ukazují zcela nové plyny s nízkým dopadem na globální oteplování (Novec 4710 aj.) či jejich směsi s plyny přírodního původu

(N₂, CO₂, He aj.). Trend ve výzkumu nových méně škodlivých izolačních plynů také nepřímo podporuje rozvoj zcela nových zkušebních postupů a technologií. Podobně se tak děje i v oblasti zbylých dvou fází, jelikož rozvoj nových materiálů a technologií je doprovázen i u kapalných (zmiňovaná aplikace nanočástic či olejů přírodního původu) a pevných izolanů (využívání kompozitních materiálů v nejrůznějších aplikacích). Veškeré toto úsilí je poháněno zvyšujícími se nároky na snížení dopadu lidské činnosti na životní prostředí při současném zdokonalování dosavadních technologií.

Seznam použité literatury

- [1] KÜCHLER, Andreas. *High Voltage Engineering: Fundamentals - Technology - Applications*. 5th ed. Springer Vieweg, 2017. 650 s. ISBN 978-3-642-11992-7.
- [2] KUFFEL, John, ZAENGL, Walter S. a KUFFEL, Peter. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2000. 534 s. ISBN 0-7506-3634-3.
- [3] MENTLÍK, Václav, PIHERA, Josef, POLANSKÝ, Radek, PROSR, Pavel a TRNKA, Pavel. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] TKOTZ, Klaus a kolektiv. *Průručka pro elektrotechnika*. 25th ed. Praha: Europa-Sobotáles cz. s.r.o., 2006. 624s. ISBN 80-86706-13-3.
- [5] TAHERIAN, Reza. *Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites*. Elsevier Books, 2018. 432 s. ISBN 0128125411.
- [6] Příspěvatelé Wikipedie, 2005. Brownův pohyb. In: *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie* [online]. 5.8. Datum poslední revize 3.9.2019, 11:48 UTC [cit. 7.3.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Brown%C5%AFvpohyb&oldid=17613958>
- [7] Příspěvatelé Wikipedie, 2005. Blesk. In: *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie* [online]. 20.5. Datum poslední revize 1.3.2020, 14:30 UTC [cit. 10.3.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Blesk>
- [8] Příspěvatelé Wikipedie, 2003. Dusík. In: *Wikipedie: Otevřená Encyklopedie* [online]. 5.12. Datum poslední revize 18.1.2020, 10:23 UTC [cit. 8.3.2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dusík>
- [9] Příspěvatelé Wikipedie, 2007. Double layer (surface science). In: *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. 4.10. Datum poslední revize 30.1.2020, 12:38 UTC [cit. 8.3.2020]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_\(surface_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_(surface_science))
- [10] Příspěvatelé Wikipedie, 2004. Quantum tunnelling. In: *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. 9.5. Datum poslední revize 3.3.2020, 7:05 UTC [cit. 8.3.2020]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_tunnelling
- [11] Příspěvatelé Wikipedie, 2005. Elektrický izolant. In: *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. 13.2. Datum poslední revize 28.1.2020, 14:42 UTC [cit. 3.5.2020]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický_izolant
- [12] KHUN, Josef a SCHOLTZ, Vladimír, 2012. Nízkoteplotní plazma IV - doutnavý výboj. *Aldebaran Bulletin* [online]. 10(42) [cit. 7.3.2020]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_42_pla.php
- [13] WADA, Junichi, UETA, Genyo, OKABE, Shigemitsu a HIKITA, Masayuki, 2016. Dielectric Properties of Gas Mixtures with Per-fluorocarbon Gas and Gas with Low Liquefaction Temperature. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 23(2) [cit. 8.3.2020]. ISSN 1558-4135. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7480645>

- [14] DERVOS, Constantine T. a VASSILIOU, Panayota, 2011. Sulfur Hexafluoride (SF₆): Global Environmental Effects and Toxic Byproduct Formation. *Journal of the Air & Waste Management Association* [online]. **50**(1) [cit. 8.3.2020]. ISSN 1096-2247. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10463996>
- [15] SPOHER, Milan, 2017. Study of Dielectric Properties of Mineral Oils and Natural Oils and Methyl Esters of Natural Oils. *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)* [online]. [cit. 9.3.2020]. ISSN 2153-3733. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8124717>
- [16] BORIS, Hossein a GOCKENBACH, Ernst, 2008. New Insulating Liquids for High Voltage Apparatus. *2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)* [online]. [cit. 9.3.2020]. ISSN 2153-3733. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4622531/authors#authors>
- [17] JULIANDY, Tedy a kolektiv, 2018. Investigation of the Reliability of CF₃CHCl₂ + N₂ Gas Mixture as a Potential Substitute for SF₆. *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)* [online]. [cit. 12.5.2020]. ISBN 9978-1-5386-5813-0. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8528688/authors#authors>
- [18] JULIANDHY, Tedy a kolektiv, 2017. Comparison of CF₃CHCl₂ Gas with SF₆ Gas as an Alternative Substitute for Gas Insulated Switchgear Equipment. *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)* [online]. [cit. 12.5.2020]. ISBN 978-1-5386-0945-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8225942>
- [19] ZHAO, Lin, LI, Wen-Dong, WEI, Yan-Hui, SU, Guo-Qiang, SONG, Bai-Peng a ZHANG, Guan-Jun, 2015. Study on hydrophobicity recovery and measurement of aged silicone rubber material. *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)* [online]. [cit. 30.5.2020]. ISSN 2160-9241. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7295367>
- [20] WANG, Qian, BAK, Claus L. a da SILVA, Filipe F., 2016. A state of the art review-methods to evaluate electrical performance of composite cross-arms and composite-based pylons. *2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* [online]. [cit. 30.5.2020]. ISBN 978-1-4673-8706-4. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7548647>
- [21] WANG, Jialong, CHEN, Yannan, LIAO, Jintao a PENG, Zongren, 2015. Voltage and E-field distribution of UHV composite insulator with connection of porcelain insulators. *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)* [online]. [cit. 30.5.2020]. ISSN 2160-9241. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7295350>
- [22] BEROUAL, Abderrahmane a kolektiv, 2016. Fluoronitriles/CO₂ Gas Mixture as Promising Substitute to SF₆ for Insulation in High Voltage Applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. **23**(5) [cit. 12.5.2020]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7736816>
- [23] OUMERT, Leila S., BOUCHERIT, Ahmed, ZAFOR, Amel H. a ISSOUF, Fofana, 2018. Comparative study of the degradation rate of new and regenerated mineral oils following electrical stress. *IET Generation, Transmission Distribution* [online].

- 12(21) [cit. 17.5.2020]. ISSN 1751-8695. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8548760>
- [24] SUHAIMI, Sabrina N., RAHMAN, Abdul R. A., HASSAN, Muhammad Z., ISHAK, Mohd T. a JUSOH, Mohd T., 2020. A Review on Oil-Based Nanofluid as Next-Generation Insulation for Transformer Application. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2020 [cit. 17.5.2020]. ISSN 1687-4110. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2020/2061343>
- [25] BORIS, Hossein a GOCKENBACH, Ernst, 2005. Properties of Ester Liquid Midel 7131 as an Alternative Liquid to Mineral Oil for Transformers. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)* [online]. [cit. 9.3.2020]. ISSN 2153-3733. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1490104>
- [26] ROMERO, Adriana, RÁCZ, Levente, MÁTRAI, Attila, BOKOR, Tamás a CSELKÓ, Richárd, 2017. A Review of Sulfur-hexafluoride Reduction by Dielectric Coatings and Alternative Gases. *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)* [online]. [cit. 8.3.2020]. ISBN 978-1-5090-6409-0. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8003750>
- [27] PAPPER, Ernst, MUHR, Michael, BRAUNSTEIN, René, TIEBER, Michael, RAPP, Kevin a SBRAVATI, Alan, 2018. Natural Ester FR3 Insulating Liquid — Very Paper Friendly. *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)* [online]. [cit. 9.3.2020]. ISSN 2160-9241. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8401265>
- [28] MOENY, William M., 2005. Development of a High Dielectric Constant Insulating Oil. *2005 IEEE Pulsed Power Conference* [online]. [cit. 9.3.2020]. ISSN 2158-4923. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4084424>
- [29] TIMOSHKIN, Igor V., MACGREGOR, Scott J., GIVEN, Martin J. a WILSON, Mark P., 2011. Mixtures of Midel 7131 and THESO Insulating Liquids for Pulsed Power Applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 18(4) [cit. 9.3.2020]. ISSN 1558-4135. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5976124>
- [30] KOCH, Hermann, GOLL, Felix, MAGIER, Tomasz a JUHRE, Karsten, 2018. Technical Aspects of Gas Insulated Transmission Lines and Application of New Insulating Gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation insulating gases* [online]. 25(4) [cit. 8.3.2020]. ISSN 1558-4135. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8424382>
- [31] LIMA, Antonio M. N., MELCHER, Elmar U. K., NEFF, Helmut. 2011. Refined Dielectric Breakdown Model for Crystalline Organic Insulators: Electro-thermal Instability Coupled to Interband Impact Ionization. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 18(4) [cit. 1.5.2020]. ISSN 1558-4135. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5976093>
- [32] VÁLEK, Petr. Fluorid sírový. *Arnika* [online]. [cit. 8.3.2020]. Dostupné z: <https://arnika.org/fluorid-sirovy>
- [33] MÜLLEROVÁ, Eva, 2007. *Technika Vysokého Napětí* [prezentace]. Plzeň: Západočeská univerzita, 6.3. Datum poslední revize 19.11.2018 [cit. 8.3.2020].

- [34] *Liquid and solid insulation - Lecture 4. ELEC-E8409 - High Voltage Engineering* [online]. 9.9. 2019 [cit. 12.5 2020]. Dostupné z: <https://mycourses.aalto.fi/mod/folder/view.php?id=480562>
- [35] *Dielectric Fluids: Envirotemp™ FR3™ Fluid*, ©2016 [online]. Cargill, Incorporated [cit. 9.3.2020]. Dostupné z: <https://www.cargill.com/bioindustrial/envirotemp/fr3>
- [36] *STO-50 Silicone Transformer Oil*, ©2015 [online]. Clearco [cit. 9.3.2020]. Dostupné z: http://www.clearcoproducts.com/silicone_transformer_oil.html
- [37] *Naphthenics Product Data Sheet: Nynas Transformer Oil - Nytro 10X* [online]. Nynas [cit. 9.3.2020]. Dostupné z: <https://www.nynas.com/en/product-areas/transformer-oils/oils/nytro-10xn/>
- [38] „*Midel 7131 – nehořlavá, biologicky odbouratelná izolační kapalina*“ [online]. Elpro - Energo s.r.o. [cit. 9.3.2020]. Dostupné z: <https://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/olej/>
- [39] *Gas-insulated transmission lines* [online]. Siemens AG [10.3. 2020]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/br/en/products/energy/high-voltage/power-transmission-lines/gas-insulated-lines.html>
- [40] MÜLLER, Lukáš, 2010. *Průzkum trhu - Transformátorového oleje*. Ostrava. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Martin MAREK.
- [41] TOTZAUER, Pavel, 2015. *Vlastnosti perspektivních elektroizolačních kapalin*. Plzeň. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce MENTLÍK, Václav.
- [42] TOTZAUER, Pavel, 2019. *Aspekty používání biodegradabilních elektroizolačních kapalin*. Plzeň. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Školitel TRNKA, Pavel.
- [43] BOBALÍK, Lukáš, 2011. *Zařízení pro měření intenzity slunečního záření*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce STOJAN, Radek.
- [44] JABŮREK, Ladislav, 2009. *Studium elektrického namáhání drážkové izolace*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce FRK, Martin.
- [45] ČSN EN 60071-1. *Koordinace izolace - Část 1: Definice, principy a pravidla*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010.

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

<i>Obr. 1 - 1: Plynotěsný díl zapouzdřené rozvodny s plynem SF₆.</i>	14
<i>Obr. 1 - 2: Závislost proudu I a poměrné odchytky od Ohmova zákona η na napětí U, kde R_0 je izolační odpor měřený při nízkých hodnotách napětí [3].</i>	16
<i>Obr. 1.1 - 1: Začátek V-A charakteristiky výboje v plynném izolačním médiu [1].</i>	17
<i>Obr. 1.1 - 2: Příklad uspořádání elektrod s homogenním polem (vlevo) a nehomogenním polem (vpravo).</i>	18
<i>Obr. 1.1 - 3: Kompletní V-A charakteristika výboje v plynném izolačním médiu [1].</i>	19
<i>Obr. 1.2.1: Schématické znázornění doutnavého výboje ve výbojové trubici za sníženého tlaku.</i>	20
<i>Obr. 1.2.2: Elektrické pole v uspořádání dvou jehlových elektrod.</i>	21
<i>Obr. 1.2.6: Projev vnitřních částečných výbojů typu A na zkušební napětí v zobrazení Lissajousova obrazce [3].</i>	23
<i>Obr. 1.3 - 1: Lavinový proces ionizace plynu.</i>	24
<i>Obr. 1.3 - 2: Tři možné rozvoje elektronových laviny, kde $n(t)$ je aktuální počet volných elektronů v konkrétní lavině, $i(t)$ je vyvolaný proud a N'_n jsou celková množství vygenerovaných elektronů v konkrétní lavině [1].</i>	26
<i>Obr. 1.4.1: Proces nárazové ionizace.</i>	28
<i>Obr. 1.5: Paschenova křivka [1].</i>	32
<i>Obr. 1.6 - 1: Elektronová lavina s vlastním elektrickým polem a výsledný průběh intenzity elektrického pole $E(x)$ v porovnání s původní intenzitou E_0.</i>	34
<i>Obr. 1.6 - 2: Vznik nových elektronových lavin v objemu izolačního plynu vlivem fotoionizací.</i>	35
<i>Obr. 1.6.2: Rozvoj Raetherova výboje v silně nehomogenním poli, tj. uspořádání jehla a desková elektroda.</i>	37
<i>Obr. 1.7.1: Vliv prostorového náboje na výsledné elektrické pole $E(x)$ při uvažování kladně polarizované hrotové elektrody.</i>	39
<i>Obr. 1.7.2 - 1: Vliv prostorového náboje na výsledné elektrické pole $E(x)$ při uvažování záporně polarizované hrotové elektrody.</i>	40

<i>Obr. 1.7.2 - 2: Závislost přeskokového napětí U_p a počátečního napětí koróny U_k na faktoru homogenity η a polaritě hrotové elektrody.</i>	41
<i>Obr. 1.8: Průběh časově proměnného napětí při přeskoku.</i>	42
<i>Obr. 1.9.2: Průřez plynem izolovaného přenosového vedení (GIL) [39].</i>	44
<i>Obr. 1.9.6: Závislost přeskokového napětí na drsnosti a polaritě elektrod (nahore kladná polarita, dole záporná polarita) [26].</i>	49
<i>Obr. 2.1: Proces vzniku přeskoků v izolačním oleji.</i>	52
<i>Obr. 2.2.4: Přítomnost mikroskopických vláken v objemu kapaliny před a po přiložení elektrického pole.</i>	56
<i>Obr. 2.3: Závislost přeskokového napětí izolační kapaliny na době namáhání [1].</i>	57
<i>Obr. 2.5: Řez transformátoru ONAN.</i>	60
<i>Obr. 2.5.2: Závislost relativní permitivity ϵ_r a přeskokového napětí U_p směsí olejů THESO a Midel 7131 na konkrétním procentním poměru [29].</i>	63
<i>Obr. 3: Závislost průrazného napětí pevného izolačního materiálu na době namáhání [1].</i>	66
<i>Obr. 3.1 - 1: Pásový model atomu.</i>	66
<i>Obr. 3.1 - 2: Bodové poruchy a dislokace v krystalické struktuře.</i>	68
<i>Obr. 3.2 - 1: Smysl odvodu tepla z vodiče.</i>	69
<i>Obr. 3.2 - 2: Paralelní verze náhradního schématu dielektrického materiálu s příslušným fázorovým diagramem.</i>	70
<i>Obr. 3.2 - 3: Závislost P_{G1}, P_{G2}, P_{G3} a P_O na teplotě izolačního materiálu T, která se bere jako stejná v celém objemu [1].</i>	70
<i>Obr. 3.3: Rozvoj elektrického stroměčku v kapalném (první tři zleva) a pevném izolačním materiálu [34].</i>	72
<i>Obr. 3.4: Základní rozdělení pevných izolačních materiálů.</i>	73
<i>Obr. 3.4.1 - 1: Závěsný izolátor venkovního vedení z tvrzeného skla [34].</i>	74
<i>Obr. 3.4.1 - 2: Jednotlivé kroky při výrobě porcelánového izolátoru [1].</i>	75
<i>Obr. 3.4.1 - 3: Optické skleněné vlákno na cívce [4].</i>	75
<i>Obr. 3.4.2: Chemická struktura celulózy [3].</i>	76
<i>Obr. 4.1 - 1: Závislost střídavého přeskokového napětí na přeskokové vzdálenosti v uspořádání s kulovými elektrodami u čistého SF_6 a konkrétních směsí plynu Novec 4710 s plynem CO_2 při atmosférickém tlaku (0,1 MPa) a teplotě 20 °C [22].</i>	79
<i>Obr. 4.1 - 2: Závislost střídavého přeskokového napětí na tlaku pro čistý SF_6 a 3,7%</i>	

<i>koncentraci plynu Novec 4710 ve směsi s plynem CO₂ [22].</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 4.1 - 3: Hodnoty výdržných napětí (uspořádání s kulovou a deskovou elektrodou) pro směsi plynu SF₆, Novec 4710 a Novec 5110 s plyny přírodního původu umožňující aplikaci při minimální přípustné provozní teplotě -10 °C bez zkapalnění [30].</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 4.1 - 4: Porovnání hodnot přeskového napětí a teploty zkapalnění jednotlivých plynů PFC a plynů přírodního původu s plynem SF₆ při tlaku 5 barů [13].</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 4.1 - 5: Závislost tlaku plynů PFC, plynů přírodního původu a plynu SF₆ na teplotě zkapalnění [13].</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 4.1 - 6: Závislost efektivní hodnoty přeskového napětí U_p na procentuálním složení dané směsi plynu PFC s plynem přírodního původu [13].</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 4.2 - 1: Porovnání teploty vzplanutí a hoření oleje Envirotemp FR3 s oleji minerálními a zástupcem olejů syntetických Midel 7131 [35].</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 4.2 - 2: Porovnání saturace vlhkosti u různých typů oleje [42].</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 4.2 - 3: Porovnání vlivu vlhkosti na přeskovové napětí u různých typů oleje [42].</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 4.2 - 4: Porovnání nového oleje s olejem regenerovaným v závislosti měrné rezistivity na počtu přeskoků [23].</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 4.2 - 5: Vliv aplikace nanočástic na přeskovové napětí používaných olejů přírodního původu [24].</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 4.3 - 1: Konstrukční uspořádání kompozitního izolátoru [5].</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 4.3 - 2: Vizualizace hydrofobní schopnosti silikonového kaučuku (SIR) [19].</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 4.3 - 3: Konfigurace kompozitního izolátoru (vlevo) a kombinace porcelánového a kompozitního izolátoru (vpravo) [21].</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 4.3 - 4: Konstrukční provedení nových kompozitních pylonů [20].</i>	<i>88</i>

Tabulky

<i>Tab. 1.9.3 - 1: Porovnání vlastností plynu Novec 5110 a Novec 4710 s plynem SF₆ [26].</i>	46
<i>Tab. 1.9.3 - 2: Možnosti procentního obsahu testovaného plynu při teplotě -10 °C bez zkapalnění [30].</i>	46
<i>Tab. 1.9.4: Porovnání vlastností plynů PFC a možných příměsí s plynem SF₆ [13].</i>	47
<i>Tab. 1.9.5: Porovnání vlastností plynu CF₃I a g³ s plynem SF₆ [26].</i>	48
<i>Tab. 2.5.1: Vlastnosti oleje Shell Diala D a Nytro 10X [40], [37].</i>	61
<i>Tab. 2.5.2: Vlastnosti oleje Midel 7131 a Silikonu [16], [29], [40], [38].</i>	63
<i>Tab. 2.5.3: Základní vlastnosti oleje Envirotemp FR3 [35], [27], [41].</i>	64
<i>Tab. 3.4.2 - 1: Hlavní zástupci termoplastických materiálů, jejich vlastnosti a použití [4].</i>	77
<i>Tab. 3.4.2 - 2: Hlavní zástupci reaktoplastických materiálů, jejich vlastnosti a použití [4].</i>	77