

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Simulace v technice vysokého napětí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel ROKŮSEK**
Osobní číslo: **E19N0076P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Simulace v technice vysokého napětí**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte přehled uplatnění simulačních nástrojů v technice vysokého napětí, především v oblasti vysokonapěťových testů a koordinace izolace.
2. Zaměřte se na simulační nástroje související s problematikou částečných výbojů a analyzujte možnosti jejich využití.
3. Na základě této analýzy realizujte simulaci pro konkrétní problém.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>
2. <https://www.mdpi.com/about/journals>
3. <https://www.researchgate.net/>

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



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





Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Následující text se zabývá uplatněním simulačních nástrojů v technice vysokého napětí, a to zejména v oblastech vysokonapěťových testů, koordinace izolace a částečných výbojů. S rozmachem výpočetní techniky vzrůstá i skutečný potenciál využití simulačních software při optimalizaci návrhu a provozu vysokonapěťových zařízení. V textu bude na základě nejnovějších informací analyzováno, jaké jsou aktuální hranice uplatnění simulačních nástrojů v tak širokém oboru, jako je technika vysokého napětí. Na základě získaných znalostí je závěrem práce provedena vlastní simulace.

Klíčová slova

Simulační nástroje, software, technika vysokého napětí, počítačové modelování, koordinace izolace, vysokonapěťové testy, částečné výboje, COMSOL Multiphysics, ATP-EMTP, optimalizace zařízení

Abstract

The following text deals with the application of simulation tools in high voltage technology, especially in the areas of high voltage tests, insulation coordination and partial discharges. With the rise of computer technology, the real potential of using simulation software to optimize the design and operation of high-voltage equipment increases. Based on the latest information, the text will analyze the current limits of the application of simulation tools in such a wide field as high voltage technology. Based on the knowledge gained, the conclusion of the thesis is carried out by self-simulation.

Key words

Simulation tools, software, high voltage technology, computer modeling, insulation coordination, high voltage tests, partial discharges, COMSOL Multiphysics, ATP-EMTP, device optimization

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Daniel Rokůsek

Poděkování

Tímto bych rád srdečně poděkoval doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za profesionální, trpělivý a vlídný přístup, kterým jsem byl motivován v celém průběhu tvorby této práce. Jsem vděčný za veškeré nové znalosti, kterých jsem díky této spolupráci nabyl. Rovněž děkuji své rodině a přátelům za všechnu podporu.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	12
2 SIMULACE PRO OPTIMALIZACI NÁVRHU A PROVOZU ZAŘÍZENÍ	13
2.1 NUMERICKÉ METODY VÝPOČTU POLÍ	13
2.1.1 <i>Metoda konečných prvků</i>	14
2.2 SIMULACE PROBLÉMŮ IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ V SOFTWARE COMSOL	16
2.2.1 <i>Predikce vzniku koróny</i>	17
2.2.2 <i>Zapouzdřené systémy</i>	18
2.2.3 <i>Návrh transformátoru</i>	21
2.2.4 <i>Kabelové soubory</i>	24
2.2.5 <i>Uzemňovač</i>	28
2.2.6 <i>Lopatky větrné elektrárny</i>	30
2.3 SIMULACE STANDARDNÍCH PŘEPĚTÍ	32
2.3.1 <i>Úder blesku</i>	32
2.3.2 <i>Svodiče přepětí – omezovače</i>	34
2.3.3 <i>Výkonový vypínač střídavého proudu</i>	39
2.3.4 <i>Stejnoseměrné rychlovypínače</i>	42
2.3.5 <i>Zatížitelnost vedení</i>	45
2.3.6 <i>Plymem izolované vedení</i>	48
3 SIMULACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	51
3.1 VNITŘNÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	51
3.1.1 <i>Dutinka</i>	52
3.1.2 <i>Různé křivky napětí</i>	54
3.2 POVRCHOVÉ VÝBOJE	59
3.2.1 <i>Propagace striméru</i>	59
3.3 STEJNOSMĚRNÉ SYSTÉMY	64
3.3.1 <i>Přípojnice hybridního letadla</i>	64
4 REALIZACE SIMULACE	67
4.1 SESTAVENÍ MODELU	67
4.2 POLOMĚR NÁDOBY	68
4.3 AKUMULACE NÁBOJE	71
4.3.1 <i>Různé úrovně nabitých částic</i>	71
5 ZÁVĚR	73
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	74

Seznam symbolů a zkratek

MKP	Metoda konečných prvků
ε	Permitivita ($F \cdot m^{-1}$)
φ	Elektrický potenciál (V)
ρ	Objemová hustota náboje ($C \cdot m^{-3}$)
σ	Plošná hustota náboje ($C \cdot m^{-2}$)
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
E	Intenzita elektrického pole ($V \cdot m^{-1}$)
SF6.....	Fluorid sírový
GIS.....	Zapouzdřená rozvodna
k_v	Poměrná hodnota objemové vodivosti (–)
CFD	Computational fluid dynamics
IEC.....	Mezinárodní elektrotechnická komise
CIGRE	Mezinárodní rada pro velké elektrické systémy
ATP.....	Alternative transient program
EMTP	Electromagnetic transients program
VVN	Velmi vysoké napětí
VN	Vysoké napětí
I_0	Vrcholová hodnota proudu (A)
η	Korekční činitel amplitudy proudu Heidlerova zdroje (–)
t	Čas (s)
τ_1	Časová konstanta čela vlny (s)
τ_2	Časová konstanta týlu vlny (s)
DDC.....	Direct discharge crossing
D funkce	Distribuční funkce blesku
DE.....	Disruptive effect
U_{krit}	Přeskokové napětí (V)
VTE	Větrná elektrárna
LPS	Lightning protection systém
CFN	Carbon fiber net
SPD.....	Surge protection device

GV	Generátorový vypínač
HGV	Hybridní generátorový vypínač
G	Generátor
MC	Hlavní kontaktní prvek
ACV	Kontakty ve vakuové komoře
TS	Tyristorový spínač
D	Pohonná jednotka
OS	Ovládací jednotka tyristorů
CT	Přístrojový transformátor proudu
E_G	Vnitřní napětí generátoru (V)
R_G	Odpor vinutí generátoru (Ω)
L_G	Vlastní indukčnost generátoru (H)
$i(t)$	Okamžitá hodnota proudu (A)
HVDC	Stejnoseměrný přenosový systém
CB	Sériově zapojené vypínače hlavní větve
C	Kapacitor (F)
L	Induktor (H)
MOA	Metal oxide arrester
PSCAD	Power system computer aided design
IGCT	Integrated gate-commutated thyristor
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud
PLECS	Piecewise linear electrical circuit Ssimulation
P_p	Přirozený výkon vedení (MW)
U_s	Jmenovité napětí (kV)
Z_0	Vlnová impedance (Ω)
FDTD	Finite-difference time-domain
U	Napětí (V)
U_c	Zápalné napětí koróny (V)
E_c	Gradient intenzity koróny ($V \cdot m^{-1}$)
α	Násobitel (-)
ZVN	Zvlášť vysoké napětí
U_{res}	Zbytkové napětí omezovače (V)

ČV.....	Částečné výboje
Abc	Trojkapacitní model ČV
ICC	Koncept indukovaného náboje
$N_{tot}^{\cdot}(t)$	Celková rychlost vzniku volných elektronů (-)
$N_{surf}^{\cdot}(t)$	Rychlost produkce volných elektronů prostřednictvím povrchové emise (-)
e	Elektron
$N_{vol}^{\cdot}(t)$	Rychlost produkce volných e prostřednictvím objemové ionizace (-)
$E_{dut0}(t)$	Elektrické pole dutinky bez povrchového náboje ($V \cdot m^{-1}$)
f	Upřesňující koeficient (-)
$E_{int}(t)$	Intenzita elektrického pole vyvolaného povrchovým nábojem ($V \cdot m^{-1}$)
$E_{dut}(t)$	Výsledné elektrické pole uvnitř dutinky ($V \cdot m^{-1}$)
PRPD	Phase resolved partial discharge
$E_{zap}(t)$	Zapalovací intenzita elektrického pole ($V \cdot m^{-1}$)
τ	Časová konstanta poklesu povrchového náboje (s)
$u(t)$	Okamžitá hodnota napětí (V)
U_a	Amplituda napětí (V)
f	Frekvence (Hz)
τ_d	Časová konstanta tlumení kmitů (s)
t_0	Okamžik vzniku impulsu (s)
N_e	Hustota elektronů (m^{-3})

1 Úvod

Následující diplomová práce je výsledkem analýzy uplatnění počítačové simulace v technice vysokého napětí. Tímto textem je objasněn současný potenciál využití softwarových simulací při optimalizaci návrhu a provozu zařízení, zejména v oblastech koordinace izolace a částečných výbojů.

Závazkem provozovatelů přenosových a distribučních sítí je spolehlivě a bezpečně dodávat elektrickou energii spotřebitelům v požadované kvalitě a množství. Vysokonapěťová zařízení, klíčová součást energizační soustavy, musí být podrobena zkouškám systému řízení kvality, aby se zabezpečila spolehlivost a bezpečnost dodávky elektrické energie. Přestože standardem certifikace zařízení stále zůstává laboratorní testování, pokrok v počítačové technologii rozšiřuje oblast vysokonapěťových testů o zcela nový pohled.

Při návrhu a provozu zařízení se často setkáme s konfiguracemi, kde snaha vyhovět přísným provozním požadavkům vede k enormnímu lokálnímu namáhání. Těmito problematickými oblastmi jsou často komponenty izolačního systému. Protože je izolační systém klíčovou technologií v technice vysokého napětí, jsou metody koordinace izolace neustále zdokonalovány a význam aplikace simulačních software pro optimalizaci zařízení narůstá. Výsledky poskytnuté simulační analýzou jsou zohledněny při návrhu a zkouškách zařízení, kde včasná eliminace problémových míst vede k rychlejšímu, levnějšímu a více bezpečnému uvedení zařízení do provozu.

Předkládaná práce usiluje o nalezení hloubky uplatnění simulace v technice vysokého napětí a ozřejmit možnosti jejího využití v oblasti vysokonapěťových testů, koordinace izolace a částečných výbojů. Na základě získaného povědomí je realizována vlastní simulace.

2 Simulace pro optimalizaci návrhu a provozu zařízení

Globální komunita sdílející expertízu v oblasti energetiky CIGRE prozkoumala otázku použití simulačních nástrojů k hodnocení vysokonapěťových vypínačů. Došlo k porovnání výsledků simulovaných a fyzických dielektrických testů na vypínači SF6 se zjednodušenou geometrií. Byly provedeny nezávislé simulace pomocí čtyř komerčních softwarových balíčků. Výsledky byly poté porovnány navzájem a s výsledky fyzikálních testů. Studie zjistila, že se simulační nástroje ukázaly jako vynikající při predikci elektrických polí uvnitř komory vypínače za statických podmínek, ale byly výrazně horší v předpovídání dynamických změn namáhání. Jinými slovy, simulační nástroje přesně analyzují elektrické namáhání v bezporuchovém stavu, až do bodu selhání. Software se tedy neprokázal jako vhodný v oblasti stanovení odolnosti. Ve skutečnosti se totiž lišily hodnoty simulované od hodnot reálně testovaných přibližně o 40 % [5].

Optimalizace návrhu izolačního systému je stěžejním faktorem ovlivňujícím spolehlivý a bezpečný chod zařízení. Ověření návrhu normalizovanými zkušebními postupy a monitorování jeho stavu po uvedení do provozu je interes vysokonapěťové techniky [8].

2.1 Numerické metody výpočtu polí

Numerický výpočet pole je jeden z hlavních nástrojů pro inženýry vysokonapěťové techniky při návrhu, vývoji a výzkumu technologických zařízení. Dostatečně přesné úrovně elektrické pevnosti pro komplikované konfigurace izolačních systémů mohou být určeny pouze díky numerickému výpočtu. Různé numerické metody, jako například metoda konečných prvků (MKP), metoda povrchových nábojů (SCM), metoda simulovaných nábojů (CSM), momentová metoda (MoM) a metoda hraničních prvků (MHP), se používají v simulacích pro jejich matematické modely, teoretické podstaty a předpoklady. Nicméně, numerické výpočty nemohou nahradit intelektuální analýzu zadaného typu zatížení. Je proto nutná důkladná příprava výpočtu i následná diskuse výsledků, aby se předešlo chybám a příliš dalekosáhlým výsledkům. O kvalitě výsledků rozhoduje i zvolení nejvhodnější metody pro konkrétní aplikaci. Ve složitých systémech, navzdory výhodám použití dané metody, vždy odhalíme i nevýhody jejího použití pro konkrétní problém. To může negativně ovlivnit efektivnost simulace, přesnost simulačních výpočtů nebo možnost je vůbec provést [1].

2.1.1 Metoda konečných prvků

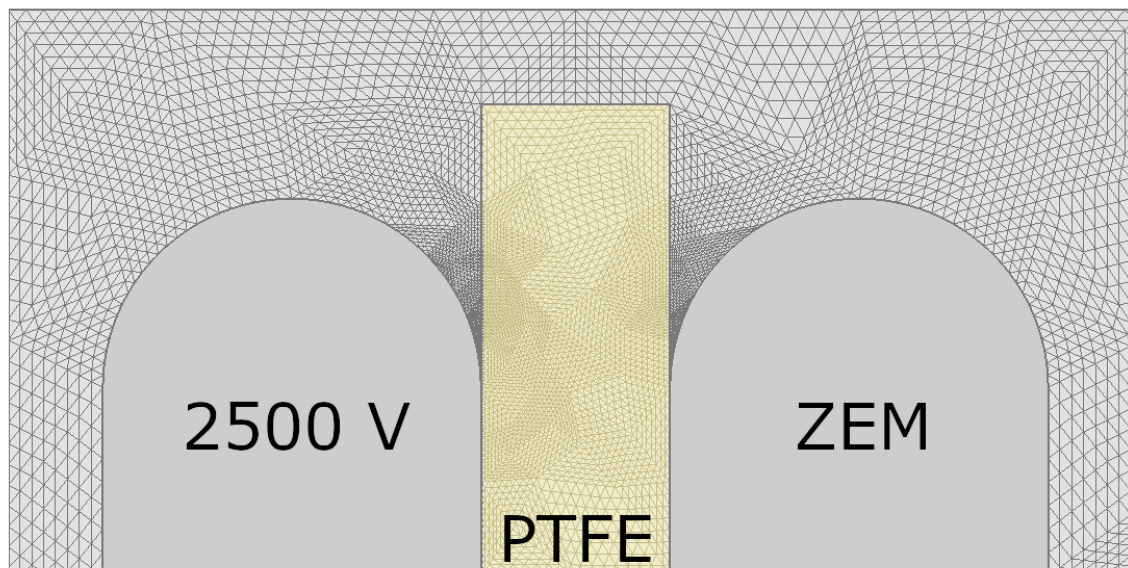
Jedním z hlavních parametrů komplikujících výpočet a ovlivňujících zápalné napětí výbojů je nerovnoměrnost pole. Rozložení intenzity elektrického pole, například u řetězce izolátorů, je nerovnoměrné, což může zapříčinit korónový efekt, degradaci povrchu izolátoru, a dokonce bypass. Metoda konečných prvků je nejvíce praktická v oblastech, kde je mnoho dielektrik, heterogenních a nelineárních materiálů, komplexních složených polí, polí prostorových nábojů a singulárních bodů. Je to jedna z nejefektivnějších numerických metod simulování problémů elektrostatických polí. Je schopna diskretizace řešené prostorové domény podle očekávané úrovně distribuce pole. Tato metoda je flexibilní i v případě řešení geometricky složitých problémů.

Metoda konečných prvků (MKP) je založena na diskretizaci fyzikálního pole pomocí sítě trojúhelníků. Pro výpočet Laplaceovo polí se určí potenciál v uzlech sítě takovým způsobem, že je energie pole minimalizována. Velkou výhodou MKP je možnost jejího uplatnění při výpočtu různých typu polí. Speciálně v průmyslových aplikacích, kde musí být vysokonapěťová zařízení navržena s respektováním mnoha rozdílných typů namáhání. Tato metoda může být uplatněna jak pro lineární překrývající se pole, časově harmonická pole, tak i transientní pole [26].

Například typickým problémem vysokonapěťových aplikací je existence míst, kde se vzhledem k požadavkům na konstrukci izolačního systému může objevit nepřijatelná úroveň namáhání. To je dobře patrné na modelu dvou elektrod a dielektrika mezi nimi, sestaveném v Agros2D. Pro výpočet intenzity elektrického pole jsou použity metody trojúhelníků, tedy konečných prvků. Software Agros2D uplatňuje pro výpočet elektrostatického pole upravený tvar 3. Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru:

$$-\operatorname{div}(\varepsilon \cdot \operatorname{grad}\varphi) = \rho \quad (1)$$

Jako vstupní podmínka je uvažován stav, kdy dielektrikum vystavené elektrickému poli není nabitě a hustota prostorového náboje je rovna nule. Potom, díky numerické MKP, software vyhodnotil intenzitu elektrického pole následovně:



Obrázek 1: Simulace intenzity elektrického pole pomocí MKP v softwaru Agros2D

Na obrázku 1 je vidět rozložení intenzity elektrického pole mezi dvěma přípojnicemi vzájemně od sebe izolovanými polytetrafluorethylenem. V oblasti zaoblení elektrod a styku s dielektrikem dochází k takzvanému „triple-pointu“, kde je intenzita elektrického pole nejsilnější a je zde nejvyšší riziko vzniku výbojové aktivity.

2.2 Simulace problémů izolačních systémů v softwaru COMSOL

Smysl koordinace izolace spočívá v zajištění nepřerušované a spolehlivé dodávky elektrické energie od zdroje k odběrateli za všech technických a atmosférických podmínek. Ve své podstatě je to selekce dielektrické pevnosti zařízení ve vztahu k napětím, která se mohou objevit v systému, v němž je zařízení provozováno, a to s ohledem na vlastnosti ochranných zařízení. Návrh izolačních systémů zahrnuje optimalizaci podle složité řady ekonomických, elektrických, mechanických a environmentálních kritérií a omezení. Pomocí simulací je možné analyzovat například chování jednotlivých prvků i částí systému před vlastní výrobou zařízení a vysokonapětovým testováním za menších finančních a časových nákladů.

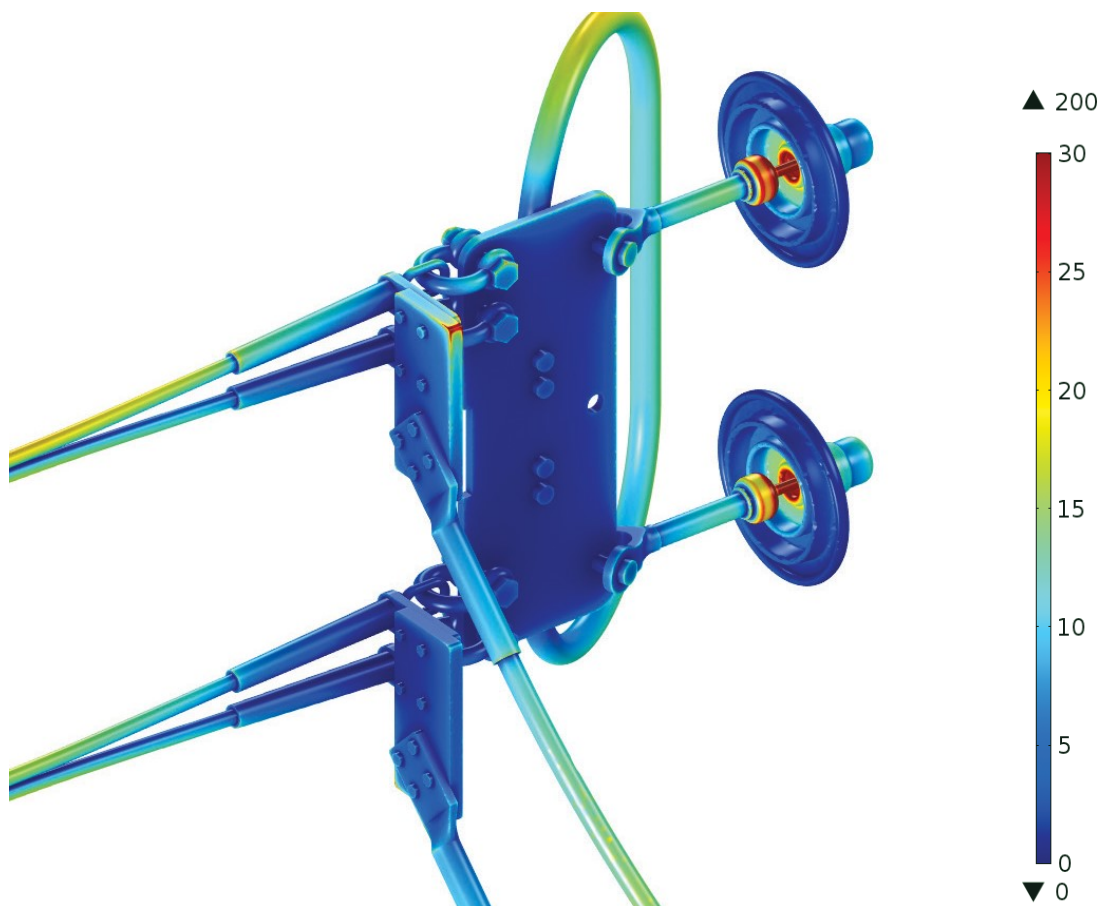
Využití softwaru COMSOL Multiphysics pro elektrickou optimalizaci izolačních prvků poskytuje vysoce přesné simulace, a to i velmi jemných efektů, které by šlo jenom velice složitě posoudit pomocí jinak běžně používaných nákladných a přísných testů. Jednou oblastí, ve které jsou simulace úspěšně aplikovány, je analýza nepříznivých účinků korónového výboje na přenosových vedení a souvisejících zařízení. Elektrické pole obklopující vysokonapětové vodiče a nosné prvky může ionizovat okolní molekuly vzduchu a způsobit tím korónový výboj. Důsledek takového fenoménu je vznik energetických ztrát, elektromagnetické interference, slyšitelný hluk, viditelné záření a možné eroze materiálů.

Určitá úroveň korónové aktivity a přidružených vlivů je na vodičích přenosové soustavy tolerovaná, ale na podpůrném hardware by neměla být aktivita koróny patrná. Se záměrem optimalizace izolace vedení je možné v Comsolu stanovit intenzitu elektrického pole poblíž povrchu zařízení a odhadnout pravděpodobnost vzniku korónového výboje v oblastech se silnými elektrickými poli. Příkladem pro závěsný izolátor lze namodelovat osově symetrický 2D model, stanovit rozložení potenciálu na čepičce posledního izolátoru a díky tomu vytvořit 3D model celého řetězce izolátorů s určitou přesností, aniž by byla zahrnuta opakující se geometrická komplexita a výpočetní náročnost celého řetězce [9].

2.2.1 Predikce vzniku koróny

Korónový výboj je komplexní fyzikální fenomén, který je ovlivněný kombinací intenzity elektrického pole, geometrie, atmosférických podmínek a stavem povrchu vodiče. V rámci koordinace izolace se u vysokonapěťových systémů setkáme s nutností omezit intenzitu elektrického pole. Možnost využití simulačních nástrojů pro tento typ aplikace ukazuje práce [9].

Zavedením empirických prostorově závislých rovnic do softwaru COMSOL lze provést zpracování výsledků elektrického pole k odhadu počtu ionizací vzduchu poblíž oblastí se silnými elektrickými poli. Lze tak přímo určit pravděpodobnost vzniku korónové aktivity. V případě závěsného izolátoru simulace v [9] vyhodnotila dvě místa s dostatečně silnými poli. Jsou to póly samotných izolačních jednotek a ostré hrany montážních podložek na spojovací konstrukci. Na obrázku 2 jsou tato místa znázorněna červeně.



Obrázek 2: Intenzita elektrického pole na povrchu spojovací konstrukce izolčního systému. Červené oblasti znázorňují místa se silnými elektrickými poli (kV/cm).

Výsledek simulace tedy prokazuje, že vnější rohy čtvercové podložky jsou náchylné ke korónovému výboji, ale pouze nepatrně. Nicméně, póly izolátorů mohou zaznamenat

významný korónový výboj. Kromě slyšitelného hluku a rádiové interference, může mít korónový výboj silné degradační účinky na izolační komponent a může vést ke ztrátě izolační schopnosti. Pokud simulace ukáže, kde může na zkoumaném zařízení docházet k problémům, jsou tyto výsledky zohledněny při úpravě designu a následným laboratorním testováním. Laboratorní testování je důležitá součást návrhu nového zařízení, ale existují náklady, které lze zejména díky předběžné analýze ušetřit. Časový plán je ve vysokonapěťových laboratořích velmi citlivý na náhlé pracovní změny. Tím, že máme možnost softwarově prověřit design zařízení ještě před testováním, je pravděpodobnost narušení projektu vlivem neefektivního řešení designu snížena.

2.2.2 Zapouzdřené systémy

Zvyšující se poptávkou po elektrické energii se elektrické sítě rozšiřují, to má za následek větší počet užitého elektrického vybavení. Transformátorové rozvodny jsou důležitou součástí elektrického systému. Hlavní funkcí těchto rozvodů je transformovat napětí stejně jako přijímat a distribuovat elektrickou energii. Rozvodna běžně obsahuje vysoký počet elektrických komponent, které jsou rozmístěny v různých sekcích v závislosti na jejich funkci. Protože se jako izolační médium používá vzduch, komponenty jsou v rozvodně rozmístěny daleko od sebe k zajištění izolačních požadavků. Proto jsou venkovní transformátorové rozvodny rozlehlé, a navíc často vystaveny povětrnostním vlivům, jako jsou velké změny teploty, vlhkosti a znečištění vzduchu, následkem čehož požadují zařízení rozvodny intenzivní údržbu.

Plynně izolovaná zapouzdřená rozvodna (GIS), moderní typ vysokonapěťového distribučního zařízení, je v porovnání s tradičními rozvodnami výhodná díky své spolehlivosti a menšími nároky na údržbu. Přestože je tento systém spolehlivý, elektrický náboj kumulovaný na povrchu pevných izolačních částí může vést po dlouhodobém provozu k poruše izolace. Protože jsou všechny komponenty uzavřeny v systému, je velmi náročné je alokovat a opravit poruchu zapouzdřeného systému, což dělá poruchu neviditelnou. Akumulovaný náboj je nejčastějším podnětem simulačních analýz v zapouzdřených systémech obecně. K výzkumu možných řešení vedoucích k vývoji efektivní, stabilní a spolehlivé zapouzdřené rozvodny je v [10] použita simulace.

Plyn SF₆ se v zapouzdřených rozvodnách používá pro své izolační schopnosti a skvělé předpoklady pro zhasení elektrického oblouku. Díky tomu mohou být vzdálenosti

mezi komponenty redukovány. Když je ale stanice zatížena po dlouhou dobu, dojde k akumulaci elektrického náboje na rozhraní mezi izolačním plynem a pevnými izolačními částmi. Porucha izolace je běžná překážka omezující energetické využití zapouzdřeného systému. Mechanismus takové poruchy je komplexní problém založený na spojení několika fyzikálních jevů zahrnujících elektromagnetismus, přenos tepla a strukturální mechaniku. Použití experimentálního testování takového problému je náročné a drahé, protože je stavba prototypního systému velmi nákladná a je zapotřebí několika experimentů k odhalení skutečné příčiny problému. Možnosti použití simulačních softwarů pro tento problém jsou ukázány v práci [10].

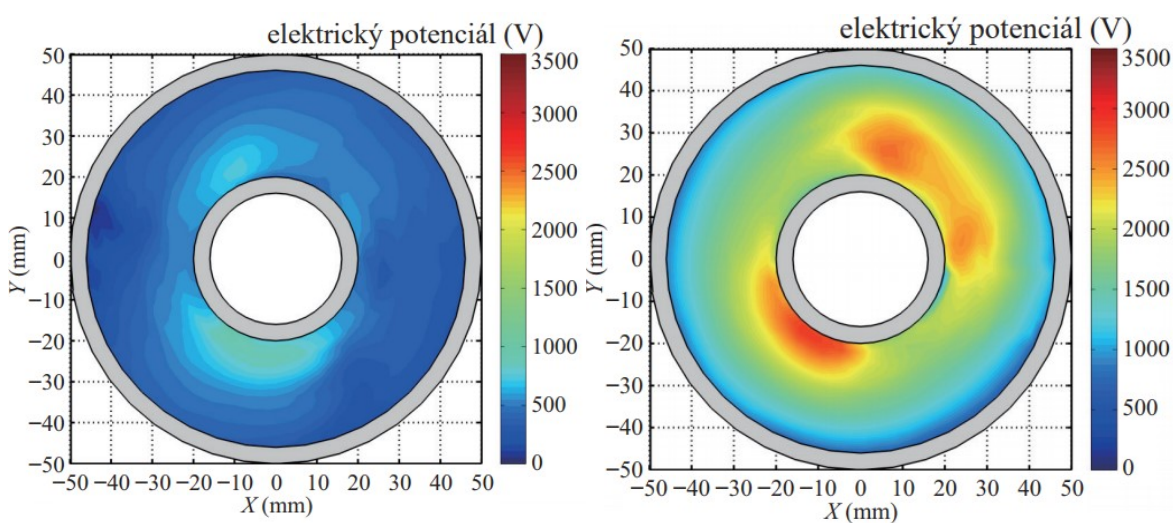
Pomocí numerického modelu lze v Comsolu vypočítat rozložení elektrického pole v plynem izolovaném systému stejně jako akumulaci elektrického náboje na povrchu izolace. Model se skládá z vysokonapěťové elektrody, nízkonapěťové elektrody, izolátoru a kovové vložky. Tyto komponenty jsou obklopeny plynem SF₆ při tlaku 0.4 MPa, napětí na vysokonapěťové elektrodě je 100 kV. V grafickém postprocesoru je poskytnuto řešení rozložení elektrického pole. Hustota náboje pevného izolačního média závisí na dielektrické konstantě a konduktivitě materiálu. Konduktivita v oblasti plynu je velmi nelineární kvůli pozitivním a negativním iontům, které v plynu kvůli elektrickému poli driftují a gradient intenzity zapřičiňuje jejich difuzi. Elektrický náboj se akumuluje na rozhraní plyn-pevná látka, kde je vodivost a dielektrická konstanta diskontinuální. Změna v distribuci iontů způsobí deformace původního elektrického pole a ovlivní pevnost izolace. Na základě simulace [10] je v tomto případě možné určit rozdělení koncentrace pozitivních a negativních iontů v izolantu, distribuci koncentrace částic v různých intervalech v oblasti plynu a nerovnoměrné prostorové rozdělení vodivosti plynu. Výsledkem simulace je určení povrchového potenciálu a povrchového náboje jako funkce aplikovaného tlaku. Akumulace náboje se časem zvyšuje a ustáleného stavu dosáhne po přibližně 3000 hodinách.

Aby se zlepšil izolační design GIS, prozkoumávají se faktory, které by mohly ovlivnit rychlost výroby a distribuci plynných iontů, jakož i polaritu a distribuci povrchově akumulovaného náboje. Na základě výsledků simulace je možné optimalizovat geometrii a materiálové vlastnosti izolátorů a následně ověřit, zda konstrukční změny vedly ke snížení elektrického pole a minimalizaci akumulaci povrchového náboje v problémové oblasti.

S akumulací náboje na epoxidových distančních vložkách sloužících k upevnění vodičů se zabývá zdroj [17]. Simulace problémů s akumulací náboje na distančních vložkách na jsou u zapouzdřených systémů velmi časté. Nesprávná konfigurace distančních vložek při návrhu GIS může být v provozu příčinou výbojové aktivity. Akumulace náboje na jejím

povrchu je velmi silná v elektrickém poli vyvolaném stejnosměrným napětím, a to vede ke snadným přeskokům. Utvořit simulaci pro stejnosměrné pole je mnohem náročnější než pro pole střídavé, a to z těchto důvodů:

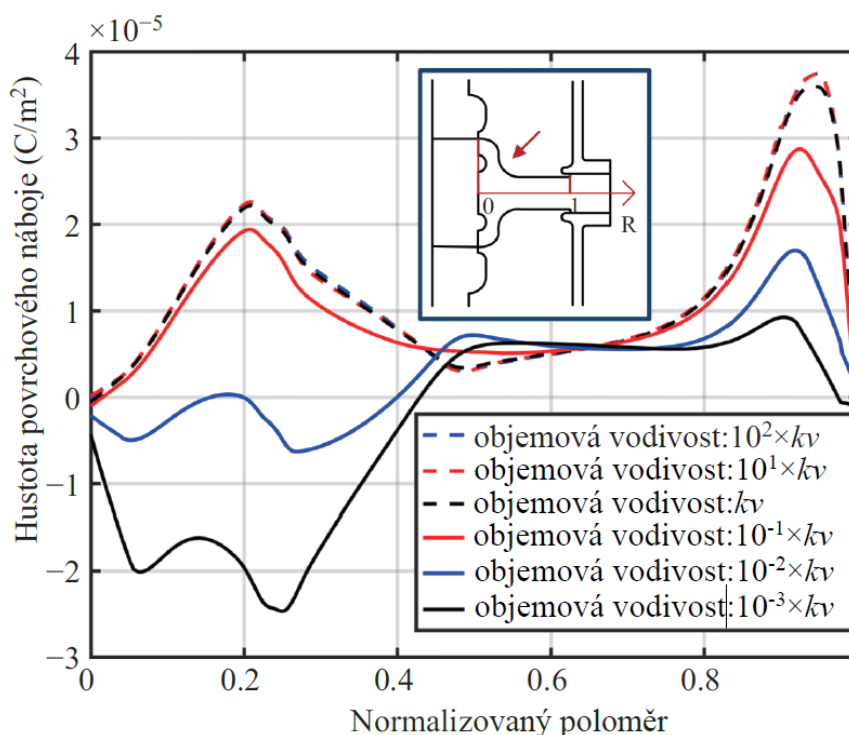
- Stejnosměrná pole jsou řízena složitějšími procesy než pole střídavá. Často nejsou spolehlivě známy jak nosiče náboje, tak jejich původ.
- Nízkofrekvenční přenos náboje vykazuje velmi citlivou závislost na různých podmínkách a parametrech [17].



Obrázek 3: Rozložení elektrického potenciálu na povrchu vložky za pokojové teploty (vlevo) a za vysoké teploty (vpravo).

Na obrázku 3 je vidět velký rozdíl v distribuci elektrického potenciálu při různých provozních teplotách. To je důsledkem toho, že akumulace povrchového náboje se zhoršuje (roste) se zvyšující se teplotou systému. V [17] jsou simulací doloženy tyto způsoby snížení akumulace náboje:

- Optimalizace tvaru distanční vložky.
- Snížení objemové vodivosti, tedy změna materiálu vložky, je znázorněno na obrázku 4.
- Změna fyzikálně-chemických vlastností povrchu.



Obrázek 4: Závislost hustoty povrchového náboje distanční vložky pro materiály s různou objemovou vodivostí (k_v) [17]

2.2.3 Návrh transformátoru

Simulace se v odvětvích vysokonapěťové techniky používá k výzkumu interakce prostoru se zařízením, které je v tomto prostoru provozováno. Obecně platí, že čím je zařízení složitější a dražší, tím více je proces koordinace izolace specifický. Provedením simulací se podle článků [11][12] ověřuje, zda je konstrukční provedení vysoce namáhaných prvků elektrizační soustavy bezpečné k provozu. Vlivem fyzikálních polí, ve kterých se zařízení nachází, může bez správné optimalizace dojít k potížím s lokálním přehříváním nebo k nadměrné akustické emisi.

2.2.3.1 Lokální přehřívání

Kompenzační tlumivky se používají k absorpci jalového výkonu a ke zvýšení energetické účinnosti přenosových systémů. Výkonové transformátory jsou navrženy tak, aby efektivně přenášely energii z jedné hladiny napětí na druhou. Obě zařízení se používají ve všech fázích elektrické sítě, od výroby energie přes distribuci až po koncové uživatele. Rostoucí poptávka po elektrické energii se promítá do potřeby větších zařízení. Někdy je však jejich velikost omezena podmínkami. Přeprava a prostor pro umístění zařízení v závodě

zákazníka jsou příklady těchto omezení.

Potřeba dodávat více energie při zachování rozměrů zařízení se projeví jejich přetížením a přehřátím. Zatímco metody pro návrh aktivních částí (jádra a vinutí) těchto zařízení jsou dobře zavedené, návrh jejich neaktivních součástí (konstrukčních částí) stále není přímočarý a vyžaduje další zkoumání. Pokud není zařízení pečlivě navrženo, existuje riziko přehřátí, které může vést ke zhoršení materiálových vlastností izolačního oleje transformátoru.

K řešení těchto konstrukčních omezení a řízení indukčního ohřevu kovových dílů se používá simulace. Indukční ohřev je jev ohřevu vodivého tělesa vystaveného měničím se elektromagnetickému poli, kde vířivé proudy vedou vlivem elektrického odporu k Jouleovu ohřevu materiálu. Oblasti s vysokou hustotou indukovaného proudu, které jsou nejvíce tepelně namáhány, se nazývají „hotspoty“. Eliminace takových míst se realizuje před uvedením zařízení do provozu. V některých případech je však nutné dojít ke kompromisu v podobě změny materiálu, tvaru, stínění či chlazení. Hotspotům se však u transformátorů vzhledem k jejich geometrické a materiální složitosti nedá plně vyhnout.

Transformátorový olej je silný elektrický izolant a funguje také jako chladicí kapalina. Hotspoty mohou olej lokálně přehřát a vytvářet bubliny plynu. Tyto bubliny mají menší dielektrickou pevnost než izolační olej a mohou v oleji způsobit elektrický výboj a potenciálně poškodit transformátor. Výše uvedenou problematiku je možné simulovat v Comsolu použitím modulu AC/DC. Simulace a návrh designových změn je uvedený v práci [11].

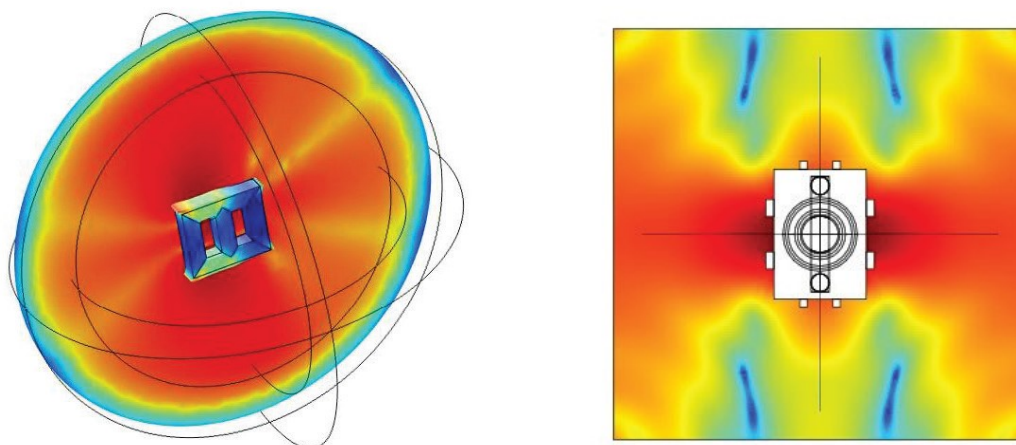
Předmětem simulace v článku [11] je upínacím rám kompenzační tlumivky. Teploty rámu lokálně přesahují přípustné hodnoty a cirkulace oleje není optimální. Původním plánem bylo rám kompenzační tlumivky vybavit stínícím měděným plátem. Simulace však ukázala, že při instalaci dřevěných podpěr na upínací rám dojde k eliminaci potřeby měděného stínění a tím k ušetření nákladů. Výsledkem optimalizace je snížení teploty o 40°C.

Poměr tepelných ztrát v jádře ku ztrátám ve vinutí tlumivky je vyšší než v transformátoru a může dojít k přehřátí. Návrh tedy musí zaručovat účinné chlazení jádra. K analýze časově závislých a ustálených problémů distribuce kapaliny v systému je v Comsolu dostupný modul CFD [11]. Na základě analýzy cirkulace oleje a přenosu tepla v kompenzační tlumivce se optimalizuje konstrukce potrubí a tím distribuce oleje a materiálové náklady.

2.2.3.2 Optimalizace akustické emise

Článek [12] zabývající se akustickou emisí transformátoru popisuje způsob, jakým se simulace uplatňuje pro eliminaci vibrací vysokonapěťových zařízení. Série simulací a výpočetních aplikací pro výpočet magnetického toku generovaného v jádře a vinutí transformátoru vede k optimalizaci konstrukčního provedení.

Simulace vychází z elektromagnetického modelu, jehož geometrie zahrnuje ocelové jádro, vinutí a nádobu transformátoru. Výpočtem magnetických polí indukovaných střídavým proudem se v modelu stanoví magnetostrikční napětí v oceli. Na základě odchylky ocelových plechů od stabilní polohy, způsobené magnetostrikčním napětím, se modální analýzou stanoví minoritní a majoritní rezonance pro různé frekvence [12]. Stejný postup je proveden pro vinutí. Predikcí pohybu zvukových vln olejem je získán povrchový tlak na stěny nádrže v důsledku výsledného zvukového pole. Výsledná akustická emise do okolního prostředí je zobrazena na obrázku 5.

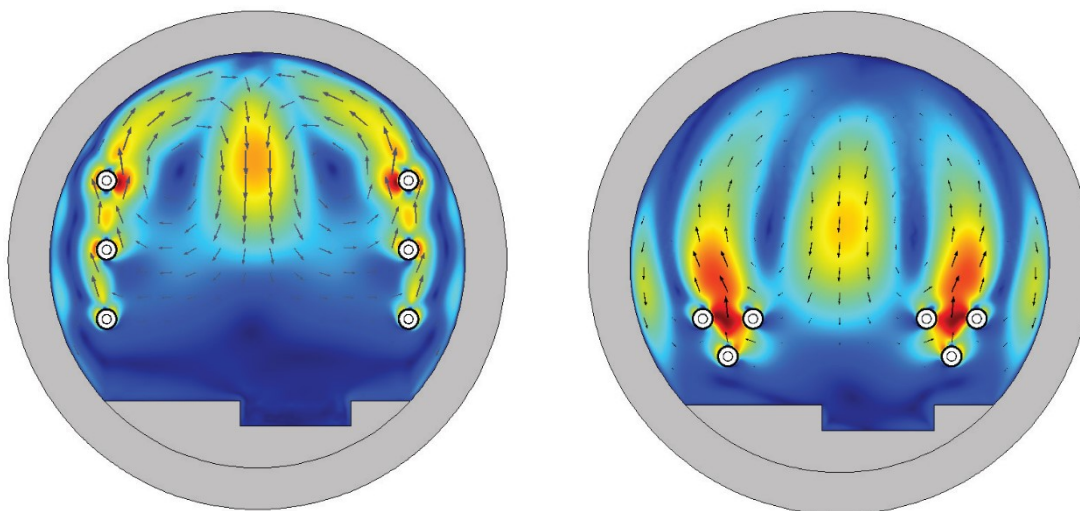


Obrázek 5: Výsledné pole akustického tlaku okolo jádra (vlevo) a okolo transformátoru (vpravo)

Podle parametrických studií, které ilustrují složité vztahy mezi konstrukčními parametry (například tloušťkou nádrže a vlastnostmi materiálu) a výsledným akustickým tlakem, je možné upravit geometrii a dispozici jádra, vinutí a nádrže tak, aby se minimalizoval hluk.

2.2.4 Kabelové soubory

Zajištění požadavků na kvalitu dodávané energie v přijatelných mezích je zásadní pro bezpečnost, spolehlivost a cenovou dostupnost elektrické energie. Provoz kabelových rozvodů zahrnuje teplotní management, díky kterému lze kabelem přenášet potřebné množství energie při zajištění optimálního rozsahu provozních teplot. K dobré distribuci tepla je potřeba optimalizovat trasy pro pokládku a správně stanovit zatížitelnost kabelů. Kabelové rozvody jsou typickým příkladem nehomogenního rozložení provozních parametrů. Problematické jsou zejména případy, kdy opravy starších úseků kabeláže vedly ke kombinaci různých materiálů ve stejné přenosové lince. Splnění těchto potřeb vyžaduje důkladné pochopení vlivu okolní půdy, stáří kabelů a jejich oprav nebo toho, jak blízké kabely ovlivní provoz dané linky. Problematika teplotního managementu je významná zejména v zemích, kde jsou kabelové sítě robustní, nachází se v některých případech až 50 metrů pod zemí a existují v kontextu většího systému, nikoliv izolovaně. Testování takových vysokonapěťových systémů je po technické stránce komplikovaný problém. Teplota země kolem kabelu se může podél jeho délky lišit a tepelné zatížení se mění tam, kde kříží nebo procházejí ostatní kabely, například distribučních nebo železničních sítí. Proto je výsledky zkoušek náročné ověřit a neustále se hledá způsob, jak přesněji kabeláž hodnotit.



Obrázek 6: Výsledky simulace normalizovaného profilu proudění vzduchu v průřezu dlouhého vodorovného tunelu

Většina přenosových a distribučních sítí používá standardy vydané Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC) a podporované Mezinárodní radou pro velké elektrické systémy (CIGRE) pro stanovení zatížitelnosti kabelu, maximálního zatížení, kterému může

být kabel vystaven, aniž by došlo k překročení teplotních limitů a poškození. Využití simulace pro optimalizaci a zajištění bezpečnosti provozu kabelových souborů je uvedeno například v publikaci [13].

V Comsolu je možné pomocí metody konečných prvků vytvořit empirický model, v kterém lze simulovat různá prostředí pro provoz kabelů. Mokrý půda odvádí z vodiče teplo rychleji než suchá půda, která je díky přítomnosti malých vzduchových kapes špatným vodičem tepla. Vzduchové kapsy odvod tepla omezují a ovlivňují tepelný výkon kabelu. Model kabelového příkopu může na základě standardů pro speciální zásypové materiály zahrnovat různé jakostní vady, jako praskliny půdy a vlhkost. Tyto specifické parametry se mění v čase a jsou po délce kabelu nehomogenní, proto se v simulacích přijímá pesimistický předpoklad stavu půdy a tím byl model přiměřeně naddimenzován.

Modelování v Comsolu vnáší do problematiky optimalizace konfigurace kabelových tras a samotného hodnocení kabelů nový pohled, zejména pokud leží vodiče blízko u sebe. Malá vzdálenost mezi kabely může narušit volné proudění vzduchu a tím bránit odvodu tepla, což má za následek zvýšení teploty obou kabelů a snížení proudové zatížitelnosti. Někdy je však hodnocení naopak příliš opatrné a může vést ke zbytečným nákladům v podobě položení dalšího kabelu. Software má potenciál navrhnout problém s přehřátím i v případech, kdy jsou vodiče desítky metrů od sebe a mají na sebe minimální vliv.

Výsledek modelování může podle [13] poskytnout informace o vazbě nového systému na stávající síť. Zatímco dříve se problémy s ovlivňujícími se inženýrskými sítěmi řešily prohloubením výkopů, dnes lze pomocí metody konečných prvků posoudit skutečnou situaci přesněji a poskytnout tak více možných řešení problémů při návrhu a instalaci systému.

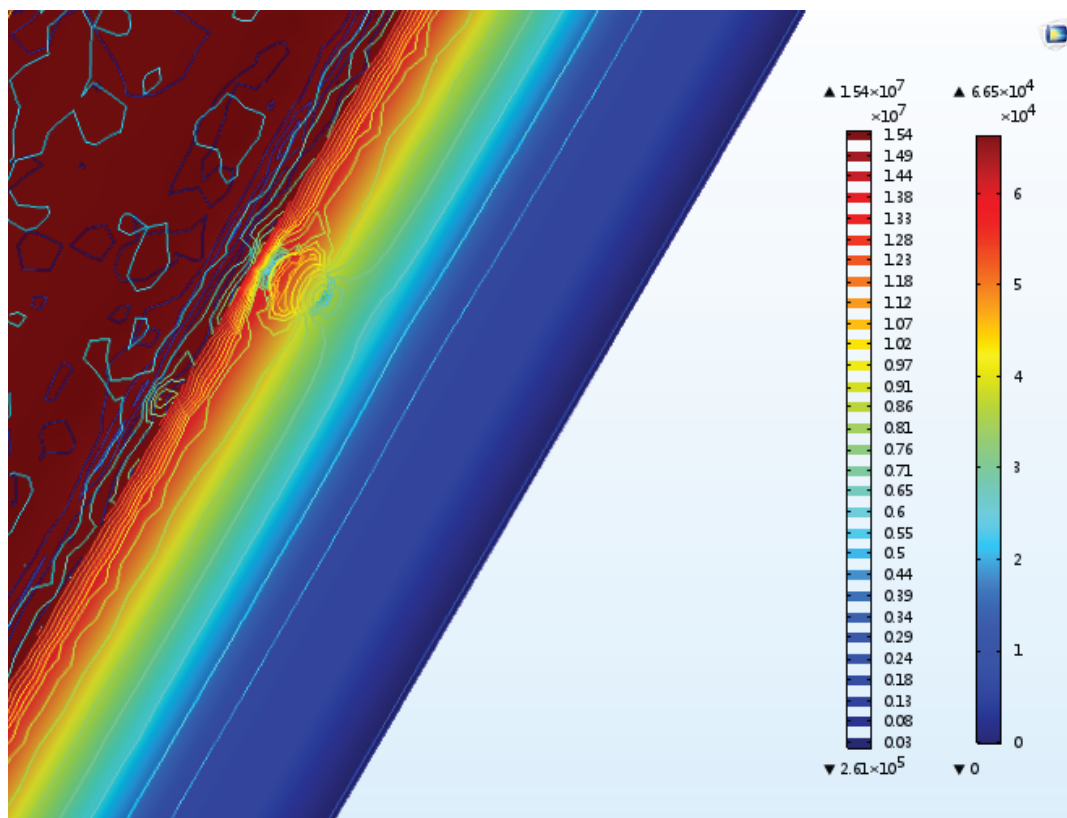
V publikaci [13] je ukázáno, že se Comsol používá nejen pro optimalizaci návrhu nových kabelových tras, ale uplatňuje se i pro simulování problémů v úsecích se smíšenými materiály, které jsou výsledkem oprav a údržby starších systémů. U zastaralých rozvodů distribučních sítí se lze setkat s oloveným vnějším pláštěm, zatímco nové kabely bývají hliníkové. Z finančních hledisek se upřednostňuje výměna pouze poškozené části kabelu. Mnoho kabelových systémů je však navrženo tak, aby minimalizovaly indukované proudy a tím maximalizovaly kapacitu. Smícháním materiálů při jakékoli dané opravě může být tento prvek konstrukce kabelu narušen. Stávající průmyslové normy případ paralelně smíšených vodičů nezohledňují. Schopnost stanovit v Comsolu ztráty kabelové linky způsobené kombinováním konkrétních materiálů umožňuje zavést požadovaná protiopatření. Znalosti získané simulací znamenají, že je možné se bezpečně rozhodnout pro méně složité možnosti minimalizace nákladů a maximalizace kapacity kabelu. Zvýšené

výkonové zatížení může způsobit kolísání parametrů elektrických systémů nebo okamžité přerušování dodávky. To může vést k poruše síťového vybavení nebo v extrémních případech k požárům.

2.2.4.1 Nečistoty a vodní stromečky

Kabely jsou tvořeny složitou vícevrstvou strukturou. Jádro se skládá z jedné, nebo několika sad vzájemně izolovaných slaněných vodičů zabalených ve vysoce izolační vrstvě. Když se v izolační vrstvě vyskytnou rizikové faktory jako je vlhkost, nečistoty, poškození, nehomogenity nebo prostorový náboj, mohou se v izolačním materiálu rozvíjet mikrokanálky elektrických stromečků jako důsledek kombinovaného působení vlhkosti a elektrického pole. V provozu kabelu dochází k jevu, kdy elektrické pole působí na vlhkost takovým způsobem, že se neustále hromadí v místech poruchy. To má za následek rozšíření mechanického poškození izolační vrstvy.

Tento jev známý jako „vodní stromečky“ je považován za hlavní příčinu poškození vysokonapěťových kabelů používaných pro přenos energie. K pochopení dopadu na stav kabelů nabízí Comsol předdefinovaná fyzikální rozhraní [12]. K simulaci poruchy kabelu jsou vyžadovány dva kroky. Nejprve nastavit poloměr a elektrické vlastnosti materiálů v každé vrstvě kabelu a následně stanovit elektrické pole po přivedení napětí. Dalším krokem je zavedení parametrů představujících nečistoty a přítomnost vrstvy s vodními stromečky. Srovnání výsledků elektrických polí za normálních a abnormálních podmínek umožní přesné pochopení vlivu nečistot a vlhkosti na kabel. Elektrické pole standardních kabelů je homogenní. Jsou-li v simulaci zohledněny nečistoty, jak je znázorněno na obrázku 7, homogenita elektrického pole je narušena. Jakmile lokální rozdíl elektrického potenciálu překročí maximální přípustné napětí v izolační vrstvě, je vrstva narušena a prorazí se v relativně krátké době.



Obrázek 7: Distribuce potenciálu v kabelu a kontury elektrického pole za přítomnosti nečistot.

Simulační aplikaci lze vytvořit z libovolného multifyzikálního modelu pomocí nástroje Application Builder přímo v Comsolu [12]. Aplikace vytvořena v tomto rozhraní umožňuje předběžně modifikovat podkladový multifyzikální model, vypočítat a odeslat data nezbytná k určení toho, co způsobilo poruchu. Aplikace rychle poskytuje výsledky elektrického pole a distribuce potenciálu na základě kterých se rozhoduje, zda je nutné kabel vyměnit nebo opravit.

2.2.5 Uzemňovač

U systémů, které jsou nedílnou součástí elektrizační soustavy, jako například elektrárny, je ochrana proti prostojům klíčová. Generátorové vypínače přerušením poruchových proudů během desítek milisekund brání vážným škodám na důležitých aktivech elektrárny. Proces koordinace izolace zařízení musí uvažovat poměry v daném místě sítě, kde je zařízení instalováno. Zkratové proudové rázy mohou v daném okamžiku vzniknout buď na straně sítě, nebo generátoru. Z tohoto důvodu musí být generátorové vypínače spolehlivé a musí bezchybně zapůsobit i po dlouhém období klidu.

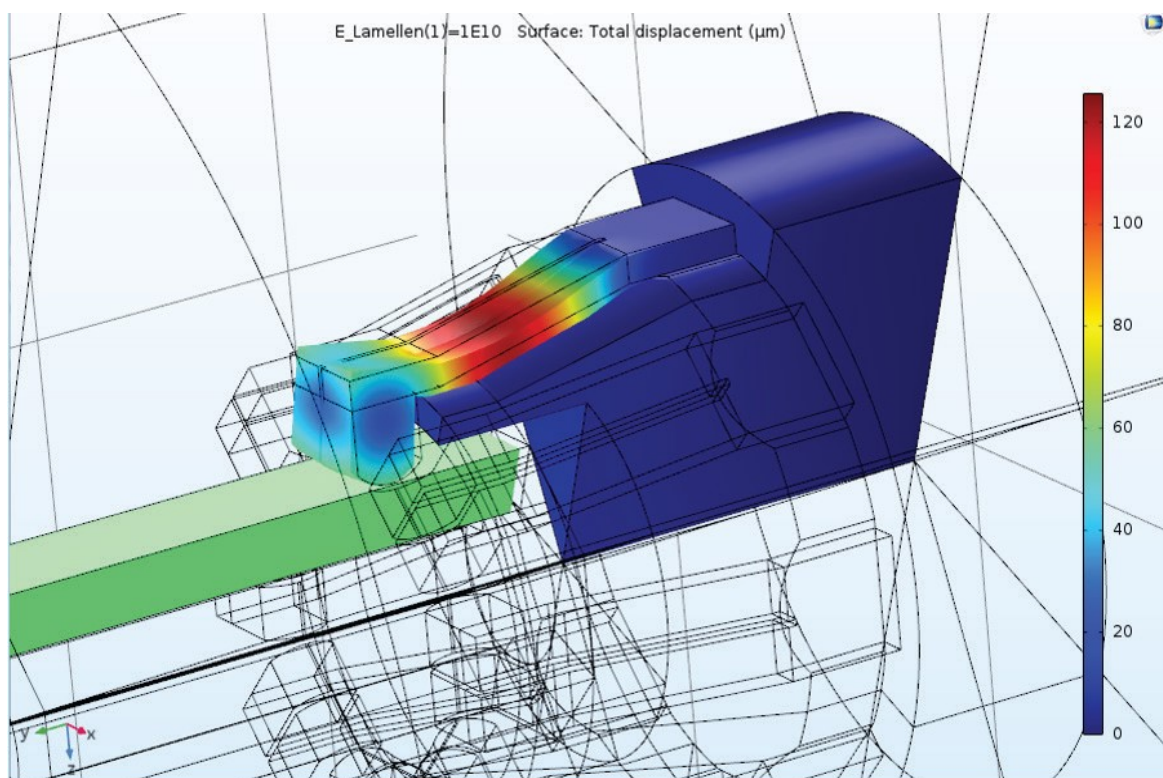
Za normálního provozu je vypínač běžnou částí obvodu s nízkým odporem, který spojuje generátor s transformátorem a sítí. V případě potřeby však musí být schopen přerušit proudy mnohonásobně větší než při běžných provozních podmínkách, aniž by došlo k poškození ostatních součástí. Při vývoji vylepšeného designu v reakci na moderní požadavky musí být splněny rozsáhlé testovací standardy, aby bylo zaručeno komerční použití vypínacího zařízení. Některé z těchto norem platí pro uzemňovače, součást kritické bezpečnosti v systému vypínače. Jeho úkolem je uzemnit napájené části systému a elektricky je spojit se zemí. Používají se také k ochraně personálu při práci na provozovaném zařízení, a proto musí být velmi spolehlivé a bezpečné, a to i za nepříznivých klimatických podmínek.

V reakci na tyto požadavky je v [15] modelován uzemňovač se speciální konfigurací kontaktních částí, tzv. „tulipánový kontakt“. Konstrukce uzemňovače využívá postříbřené pevné a posuvné kontakty, které tvoří rozpínací kontakt pro protékání proudu a pružiny pro aplikaci statických sil na každý prst kontaktu. Na jednu stranu musí být schopen odolat plnému zkratovému proudu dle norem IEC, když je kontakt sepnutý. Na druhou stranu, způsobují vysoké proudy vznik velkých elektromagnetických sil a je třeba řídit jejich vedlejší účinky. K pochopení komplexních účinků kontaktní síly se používá počítačová simulace, v které lze celkové síly a elektromechanické chování kontaktu kvantifikovat [15].

Účinky elektromagnetických sil, které působí na prsty tulipánového kontaktu, jsou dvojí. Odpudivá síla v kontaktech je Holmova síla. Lorentzova síla, je síla, která na předmět protékáný proudem v magnetickém poli působí přitažlivě. Problém spočívá v požadavku, aby přitažlivá síla byla mnohem větší než odpudivá. Odpudivý účinek mezi prsty může snížit jejich kontaktní sílu a případně je oddělit, což významně zvyšuje elektrický odpor kontaktu. Vyšší odpor vede k vyšším odporovým ztrátám a s tím souvisí zvýšení teploty, což může poškodit generátorový vypínač a vést až ke svaření kontaktů uzemňovače. Proto musí být přítlačná síla dostatečně velká.

Tulipánový kontakt je konstruován tak, aby byla podpořena Lorentzova síla a přitažlivé síly byly větší než odpudivé, a to i když je uzemňovač zatížen poruchovým proudem. Kontakt je díky takové distribuci sil schopný přenést větší poruchové proudy a nerozpojit se. Vyhodnocení celkové síly na kontakty vyžaduje propojení většího počtu fyzikálních interakcí: elektrický proud protékající každým prstem vytváří magnetické pole a magnetické pole zase silově působí na každý další prst kvůli příslušným proudům.

Podle článku [15] se analýza provádí několika experimentálně ověřenými způsoby. Symetrií systému se model a výpočet v softwaru zjednoduší. Jako vzorek lze díky symetrii použít pouze jeden prst a tím je zachyceno chování celé spojovací části uzemňovače. S použitím Maxwellova tenzoru napětí výpočty Lorentzovy síly potvrzují, že přitažlivá síla převládá nad odpudivou silou a že tulipánová konstrukce brání rozpojení. Ze simulované hodnoty celkové síly lze vypočítat teoretickou hodnotu přenášeného proudu. Simulace umožní optimalizaci hodnoty přenášeného proudu, aniž by došlo ke svaření kontaktů.



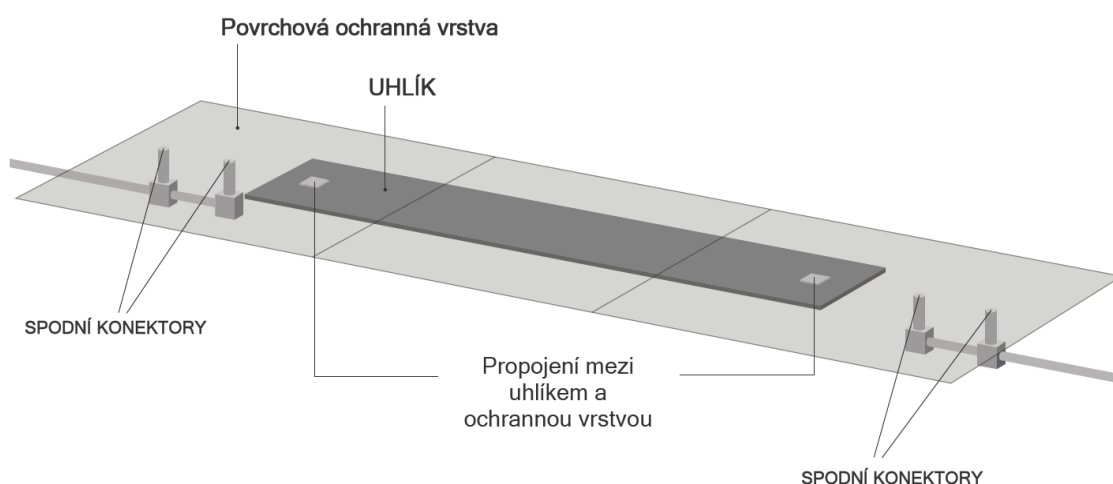
Obrázek 8: Dislokace (μm) jediného prstu uzemňovače vlivem působení elektromagnetických sil.

Jakmile je simulace dokončena, skutečný design je podroben řadě testovacích postupů. Jsou to dielektrické testy, testy mechanické odolnosti, testy provozní teploty a výkonový test, při kterém je spínač vystaven reálným podmínkám a ověřuje se teoretická hodnota proudu.

2.2.6 Lopatky větrné elektrárny

Velká část celkového počtu instalovaných větrných elektráren je postavena ve vysokých nadmořských výškách nebo v izolovaných oblastech se zvýšenou bleskovou aktivitou. Soubor norem IEC 62305 vyžaduje, aby výrobci větrných elektráren začlenili do návrhu lopatek i ochrany před bleskem. Pro maximální ochranu je důležité vědět, kolik proudu pravděpodobně protéká listem po zásahu bleskem a přesné místo, kudy proud poteče. Problém spočívá v tom, že jednoduché předpoklady o chování bleskového proudu často vedou k nepřesným závěrům. O simulaci průchodu bleskového proudu listem větrné elektrárny pojednává článek [15].

Tradiční schémata ochrany větrných turbín se skládají z povrchové ochranné vrstvy pokrývající lehké, vysoce pevné kompozitní listy z uhlíkových vláken. Ochranná vrstva se často skládá z vodivé sítě, která má bezpečně přenášet bleskový proud z místa, kde blesk zasahuje, k zemi. Mnoho projektů lopatek obsahuje vrstvenou strukturu uhlíkových vláken umístěnou paralelně k povrchové ochranné vrstvě, ty jsou mezi sebou pravidelně elektricky propojeny, aby mezi nimi nevznikal velký rozdíl potenciálů, následný elektrický oblouk a poškození listu. Nicméně, přestože tato elektrická spojení mohou snížit napětí, umožňují také protékání proudu v uhlíkové struktuře listu. Vzhledem k nákladům na fyzické testování těchto listů, z nichž některé jsou až 70 a více metrů dlouhé, se numerické modelování účinků blesku stalo součástí procesu navrhování.

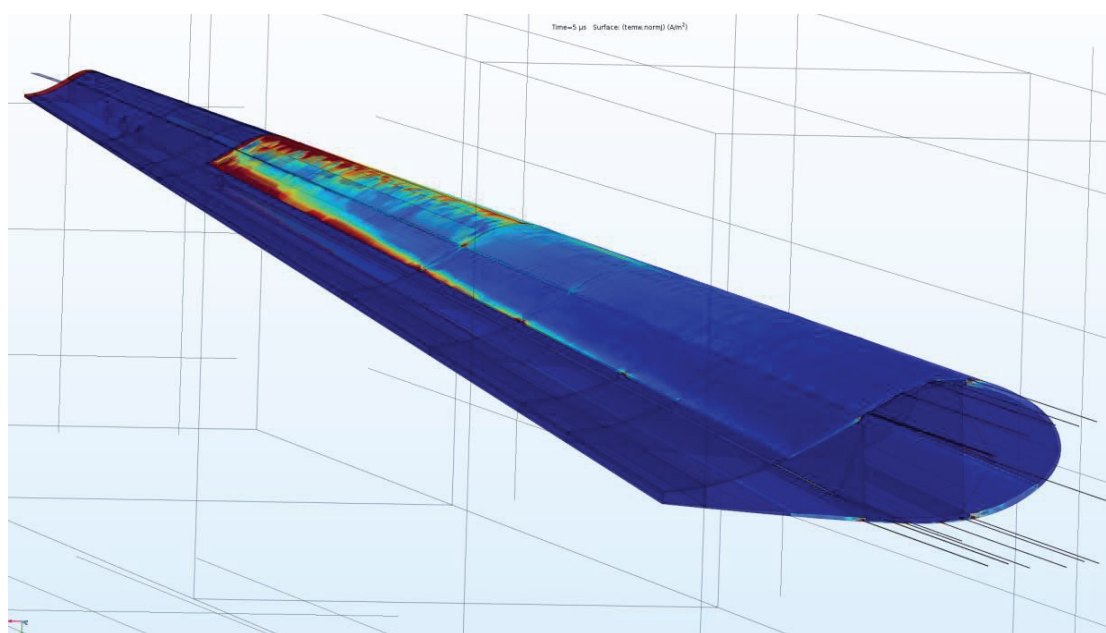


Obrázek 9: Tenká hliníková ochranná vrstva umístěna na struktuře listu z uhlíkových vláken

Jedním běžným ale nesprávným předpokladem je, že vodivost vrstev uhlíku je ve všech směrech stejná, i když ve skutečnosti mohou existovat významné rozdíly ve vodivosti

uhlíku v různých směrech. Na obrázku 9 je znázorněn svazek uhlíkových vláken umístěný 5 mm pod 500 μm silnou ochrannou sítí vyrobenou z hliníkového plechu, jehož vodivost je nastavena podle experimentálních měření. Idealizované izotropní a realistické anizotropní chování vodičku bylo uvažováno v modelu COMSOL [15].

K injektování proudu na jeden konec ochranného plechu se používá analytická reprezentace proudové křivky podle standardu IEC. Proud vychází na opačném konci svodičem, který je vyroben z mědi stejně jako všechna propojení k uhlíkové vrstvě. Pro zkoumání propagace elektromagnetických pulsů lze v Comsolu vytvořit časově závislou vlnovou rovnici pro magnetický vektorový potenciál. Výsledky lze použít pro určení přidružených proudů, elektrických polí a dalších hodnot, což poskytuje představu o chování proudu v celé struktuře. Izotropní případ podhodnocuje množství proudu procházejícího ochrannou vrstvou, což znamená, že více proudu prochází uhlíkem. Uhlík je tvořen mnoha vrstvami jednotlivých vláken a v jejich směru je dobře vodivý, ale přenos proudu do a ven z uhlíkové vrstvy je problém. Pokud přes rozhraní mezi uhlíkem a jiným materiálem protéká příliš velký proud, může se mnoho jednotlivých vláken v uhlíku spálit zahřátím nebo také elektrickým obloukem. Struktura z uhlíku nese primární konstrukční zatížení a její poškození značně snižuje životnost listu a v některých případech může vést až ke ztrátě listu turbíny. Velké proudy v uhlíkových svazcích jsou tedy nežádoucí. Izotropní model nadhodnocuje množství proudu v uhlíku, protože ignoruje závislost odporu na orientaci vláken. Uhlík má oproti ochranné vrstvě velký objem a jeví se pro proud jako preferovaná cesta, ale ve skutečnosti není.



Obrázek 10: Výsledky simulace zobrazující hustotu proudu na listu větrné turbíny

Přechodné chování zemnicího systému větrné elektrárny s ohledem na půdní podmínky a parametry blesku je zkoumáno v softwaru ATP-EMTP a popsáno v práci [16].

2.3 Simulace standardních přepětí

ATP-EMTP je analytický nástroj používaný k řešení jevů v obvodech energetických systémů. Jeho výhodou je poměrně snadná analýza a správa problémů vznikajících v elektrických energetických systémech a jejich různých součástech, jako například transformátorech, generátorech a přenosových systémech. Prostřednictvím těchto aplikací je EMTP ve světě široce používán. K získání správných výsledků je nutný výběr vhodných modelů s vhodnými parametry. V některých zdrojích se výsledky získané simulací porovnávají s daty získanými empirickým testováním a diskutuje se o přesnosti EMTP. Proto je vždy důležitá znalost empirických závislostí ze statisticky zpracovaných testů nebo použít kontrolní software k zajištění důvěryhodných výsledků. Modelování přechodných dějů v se EMTP provádí převedením reálného prvku soustavy na matematický model. Tedy například převod přenosové soustavy VVN na ekvivalentní obvod s pasivními prvky, který simuluje chování rázové vlny způsobené úderem blesku, která postupuje konstrukcemi stožárů, soubory izolátorů a odporem zemnění [2][4].

2.3.1 Úder blesku

Elektrické napájecí systémy jsou vystaveny různým úrovním přepětí, ať už dočasným, trvalým nebo vznikajícím při spínání či úderech blesku. Přepětí způsobená úderem blesku mají vysokou amplitudu, ale krátkou dobu trvání a obvykle způsobují neplánované odstávky v sítích s nízkou úrovní izolace [19]. V současnosti existují tři základní matematické modely bleskového proudu [21]:

- I. model dvojité exponenciální funkce.
- II. model impulsní funkce.
- III. model typu Heidler.

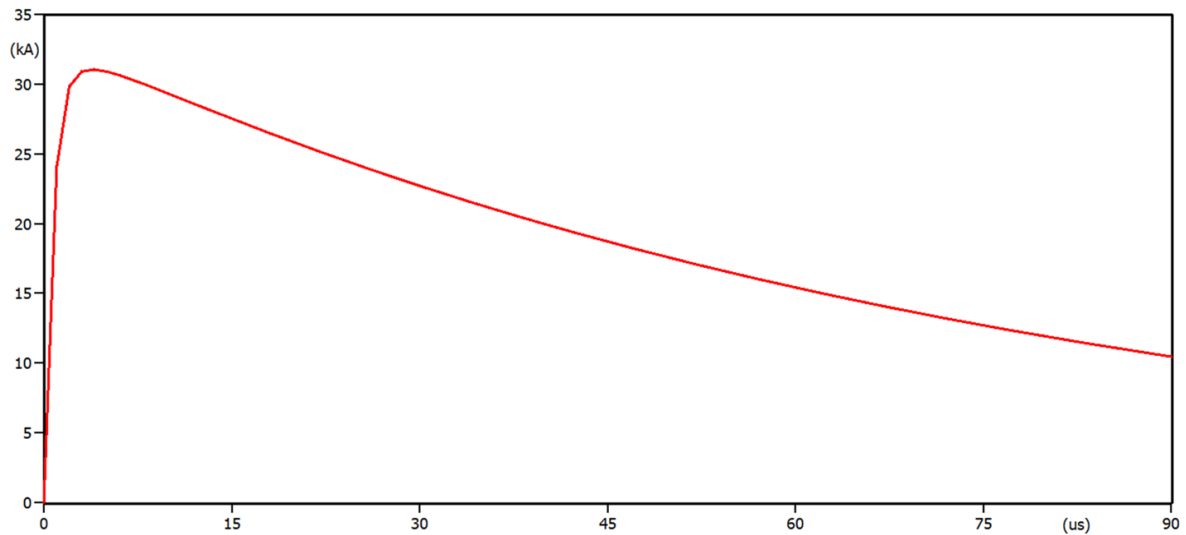
Modelování blesku se v simulacích standardně provádí pomocí Heidlerova proudového zdroje (2), reprezentujícího proudovou vlnu.

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2} \quad (2)$$

kde I_0 je vrcholová hodnota proudu, τ_1 je časová konstanta čela vlny, τ_2 je časová konstanta týlu vlny, n je hodnota pohybující se v rozmezí $2 \div 10$, η je korekční činitel amplitudy a vypočítá se jako:

$$\eta = e^{-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{(1/n)}} \quad (3)$$

Po dosazení do rovnic má vlna výsledný tvar:



Obrázek 11: Heidlerův proudový impuls [19]

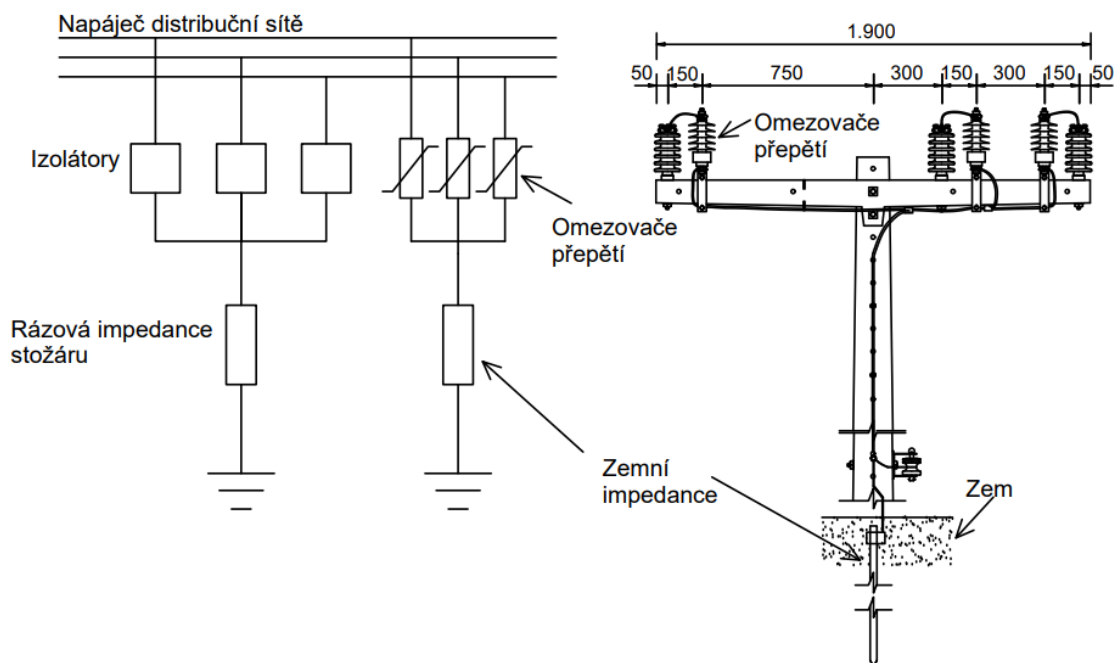
2.3.2 Svodiče přepětí – omezovače

2.3.2.1 Omezovače

Přímé údery blesku stále způsobují v nadzemních distribučních sítích vážné poškození izolace. Instalace omezovačů může být velmi efektivní a obvykle se problém s poškozením izolace minimalizuje, nicméně vzhledem k tomu, že elektrické rozvodné sítě disponují velkým počtem elektrických uzlů, nemusí být masivní instalace omezovačů ekonomicky přístupná. Článek [19] využívá simulaci k optimalizaci návrhu ekonomicky šetrného strategického rozmístění omezovačů tak, aby byla dodržena odpovídající úroveň ochrany distribuční sítě.

Metodika „Direct Discharge Crossing“ (DDC) analyzuje kritičnost sítě na základě dvou hlavních faktorů, kterými jsou velikost přepětí a počet přeskoků vyvolaných bleskovými výboji a definuje distribuční funkci blesku, tzv. „D funkci“, která se používá k určení strategického rozmístění omezovačů. Simulační software ATP se v tomto článku uplatňuje k prokázání účinnosti navrhovaného řešení.

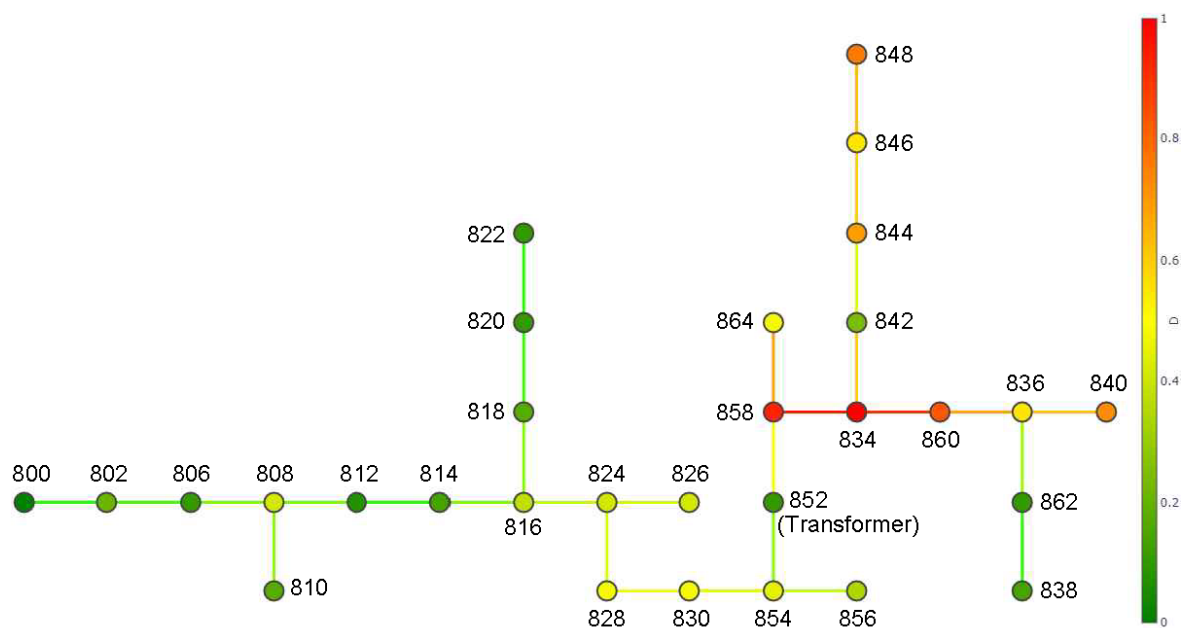
Pro studium přechodných jevů souvisejících s výboji blesku je nutné, aby byla zařízení na různých typech stožárů správně modelována a reprezentovala problematiku skutečné sítě. Elektrická distribuční síť uvažovaná v této studii má tři různé modely stožárů, P1, P2 a P3. Všechny stožáry jsou uzemněny. Aby výsledky prezentované DDC byly spolehlivé a kompatibilní s realitou, je nutné znát podmínky zemního odporu [19]. Jednotlivé modely představují základní konfigurace stožárů distribuční soustavy. P1 je model představující jednoduchý stožár a jsou v něm zahrnuty pouze nosné prvky. P2 je ekvivalentní model pro stožár s omezovači a je ilustrován na obrázku 12. P3 se liší tím, že je navíc na stožáru upevněn i distribuční transformátor. Díky těmto prvkům lze sestavit model distribuční sítě.



Obrázek 12: Model stožáru s omezovači

Pro každou sadu izolátorů existuje kritické přeskokové napětí U_{krit} , při kterém dojde k selhání izolace. To je v postupu zohledněno zavedením parametru DE („disruptive effect“). Tento parametr se určí integrací rozdílu aplikovaného napětí jako funkce času a minimálního přeskokového napětí s použitím empiricky stanovené konstanty. Model je implementován prostřednictvím programovacího modulu MODELS softwaru ATP. V [19] jsou zvoleny vhodné způsoby modelové reprezentace jednotlivých částí stožáru. Protože se jedná o přechodný jev, musí být dodržena přesnost při frekvencích až do jednotek MHz. Model blesku představuje Heidlerův proudový zdroj.

Při úderu blesku do bodu 1 náležícímu modelu distribuční sítě se maximální napětí v tomto bodě šíří i dál do dalších bodů sítě. V těchto bodech se při úderu blesku do bodu 1 stanoví maximální napětí. Pro všechny body se stanoví i napětí při úderu blesku do bodu 2. Tímto způsobem se postupně sestavuje matice maximálních napětí, z které lze získat průměrnou hodnotu přepětí pro jednotlivé body. Zároveň, když je známa hodnota přeskokového napětí pro daný bod, lze určit, zda dojde v tomto místě k selhání izolace. Díky tomu lze také definovat nejkritičtější body a v jakém směru způsobí úder blesku největší přepětí. Tento odhad směru se v článku použil jako výchozí bod pro několik algoritmů optimálního rozdělení svodičů přepětí do sítě. Kritičnost sítě ve vztahu k počtu přeskoků v jednotlivých bodech je ilustrována na obrázku 13 a tuto analýzu lze využít pro strategické rozmístění omezovačů [19].



Obrázek 13: Kritická místa v síti

Aplikace je zaměřena na elektrické distribuční sítě a slouží pro rychlou citlivostní analýzu s ohledem na přímé údery blesku, takže odborníci mohou na základě výsledků strategicky vybrat nejlepší body sítě, ve kterých omezovače instalovat. Tato technika nezávisí na povětrnostních podmínkách a byla testována v paprskových distribučních sítích [19].

2.3.2.2 Vyhřevný systém lopatek VTE

V oblastech s nízkou teplotou a vysokou úrovní vlhkosti jsou větrné elektrárny vystaveny riziku námrazy. Aerodynamické vlastnosti lopatek jsou námrazou značně zhoršeny a výkon elektrárny je omezen nebo i přerušeno. Jak se simuluje akumulace ledu na povrchu lopatek větrné elektrárny je popsáno v článku [20]. Akumulace ledu znamená více než jen omezený výkon. Rovněž způsobuje namáhání lopatek, zesílení hluku a odletující led z rotujících listů, který je nebezpečný pro blízké okolí elektrárny. Aby se zamezilo těmto komplikacím, byl kromě ochranné vrstvy a mechanické ochrany navržen i topný systém. Topný systém sestává ze sítě z uhlíkových vláken. Při úderu blesku do lopatky s odmrazovacím topným systémem vzniká přepětí mezi systémem ochrany proti blesku (LPS) a topným systémem (CFN) a může dojít k selhání izolace. Jak se přepětí mezi těmito systémy sníží vlivem instalace zařízení pro ochranu před přepětím (SPD) zkoumá pomocí simulace studie [21].

Při úderu blesku do listu s odmrazovacím systémem se list i systém snadno poškodí vlivem vzniklého přepětí mezi CFN a svodičem LPS. Model lopatky s tímto systémem je sestaven v softwaru pro řešení elektromagnetických přechodných jevů ATP-EMTP. Přesnost simulace je ověřena experimentem. Vliv bleskového proudu, SPD a odporu uzemnění je analyzován výpočtem napětí mezi LPS a CFN.

Nejnovější návrhy lopatek obsahují vícevrstvou tepelně vodivou strukturu napájenou střídavým proudem. Když zasáhne blesk LPS, vlivem vlastní indukčnosti a vysokého procházejícího proudu vznikne na svodiči velká změna napětí. Výboj nastane, když napětí překoná elektrickou pevnost vzduchové izolace mezi svodičem a výhřevným systémem. Zároveň je část bleskového proudu injektována do přírodních kabelů uhlíkové sítě a může zapříčinit požár a kolaps lopatky. Když k přeskoku nedojde, do topného systému se proudy naindukují vlivem vzájemné indukčnosti.

Modelem bleskového proudu je Heidlerova funkce, protože je podle článku [21] nejvhodnější pro simulaci blesků v horských oblastech, kde je problém s akumulací ledu značný. Síť z uhlíkových vláken leží na povrchu listu větrné elektrárny a její model připomíná stejný tvar. Vzhledem k tomu, že změna poloměru sítě je shora dolů malá v porovnání s její délkou, je tvar modelu zjednodušen na kónus. Z ekvivalentního poloměru tohoto zjednodušeného tvaru lze vypočítat odpor, indukčnost a kapacitu CFN. Aby bylo možné simulovat šíření vlny topným systémem, vytvoří se impedanční model sítě a rozdělí se tak, aby i při maximálních frekvencích bleskového proudu vždy odpovídala délka jednoho segmentu alespoň desetinu vlnové délky. Model přírodního kabelu je sestaven v [21] nástrojem pro modelování přenosových vedení v ATP. Volt-ampérová charakteristika SPD je simulována modelem vytvořeným rovněž v ATP-EMTP.

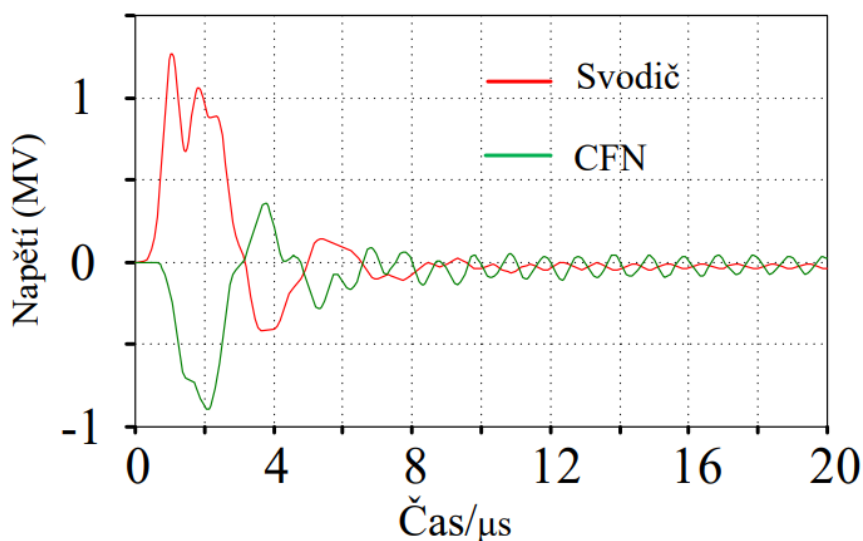
Simulace se provede pro různé tvary proudové vlny. V tabulce 1 je vidět, že když je doba čela vlny bleskového proudu konstantní, hodnota napětí je téměř úměrná amplitudě proudu. Když je konstantní amplituda proudu ale roste doba čela, tak hodnota napětí klesá.

Tabulka 1: Napětí mezi svodičem ochrany před bleskem a sítí z uhlíkových vláken

Amplituda bleskového proudu (kA)	Napětí mezi svodičem a CFN (MV)			
	1.2/50 μ s	2.6/50 μ s	8/50 μ s	20/50 μ s
10	0.62	0.37	0.19	0.06
50	3.14	1.84	0.95	0.34
100	6.24	3.69	1.91	0.69
200	12.8	7.38	3.68	1.38

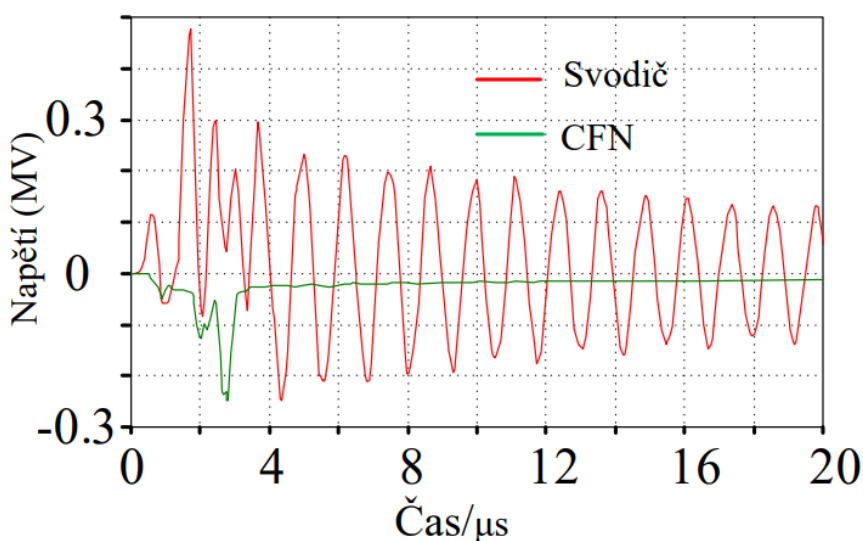
V druhém řádku tabulky je pro proud 50 kA napětí mezi svodičem a CFN rovno 3.14

MV, přičemž napětí pouze na svodiči je 3.03 MV, takže indukované napětí na CFN je pouze 110 kV. Ze simulace je patrné, že čím delší doba čela je, tím se doba maxima napěťové vlny svodiče blíží době maxima indukovaného napětí na CFN.



Obrázek 14: Napěťové poměry při proudové vlně s amplitudou 50 kA a tvarem 2.6/50 μ s

Vzhledem k reálným naměřeným datům se ve studii pro bližší výzkum vybrala varianta na obrázku 14. Cílem je snížit napětí mezi svodičem a CFN zavedením SPD. V normě 61643-12 jsou uvedeny 3 různé konfigurační varianty provozu přepětiových ochranných zařízení, a proto se v článku sestavují různá zapojení. Výsledky ukázaly, že instalace SPD mezi svodičem a CFN může výrazně snížit přepětí a tato změna je ovlivněna počtem SPD a místem instalace. V nejlepším případě přepětí kleslo z 1.84 MV na 0.51 MV, což splňuje požadavky na izolaci lopatky VTE. Simuloval se rovněž vliv uzemňovacího odporu, když není SPD instalováno a pokles napětí byl minimální.



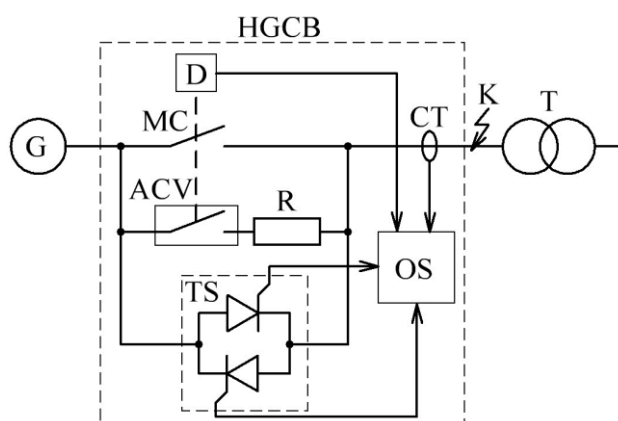
Obrázek 15: Napěťové poměry po instalaci přepětiových ochranných zařízení mezi topnou sítí a svodič

2.3.3 Výkonový vypínač střídavého proudu

2.3.3.1 Hybridní generátorový vypínač

Generátorový vypínač je nedílná součást výbavy elektráren. Zajišťuje ochranu nejen generátoru, ale také blokového transformátoru. Generátorový vypínač (GV) se nachází spolu s odpojovačem mezi generátorem a blokovým transformátorem. V současné době jsou používány vysokonapěťové GV s dvěma systémy zhašení oblouku: SF₆ a vakuum. Oba typy vypínačů mají konkrétní nedostatky. Simulací přechodných jevů v hybridním generátorovém vypínači (HGV) se zabývá studie [22].

Vývoj výkonové polovodičové technologie umožňuje návrh vysoce výkonných tyristorových spínacích zařízení schopných vypínat vysoké proudy vznikajících při zkratech na svorkách generátorů s výkony 1000-1300 MW. To je nejnebezpečnější zkrat, při kterém je proud omezen pouze reaktancemi stroje. Přechodné jevy v takovém zařízení se v článku simulují v softwaru ATP. Základní jednofázové schéma zařízení je ukázáno na obrázku 16.

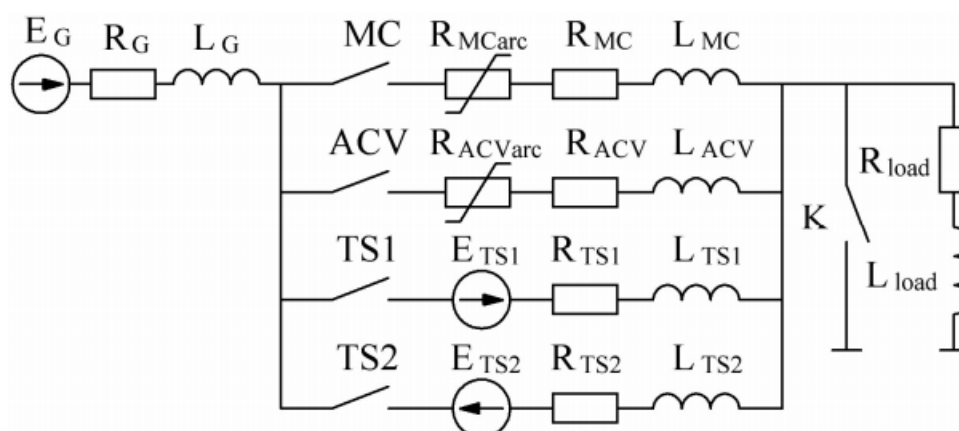


Obrázek 16: Jednofázové schéma HGCB (HGCV) (G – generátor; MC – hlavní kontaktní prvek; ACV – kontakty potlačení el. oblouku ve vakuové komoře; TS – tyristorový spínač; D – pohonná jednotka; OS – ovládací jednotka tyristorů; CT – přístrojový transformátor proudu)

Princip hybridního generátorového vypínače je následovný. V případě poruchy v místě K zaznamená OS prostřednictvím CT nárůst proudu a signalizuje zapůsobení vypínače. D je konstruována tak, že MC zapůsobí jako první a oblouk mezi kontakty je tak zapálen. Následně je poruchový proud rozdělen do dvou paralelních větví: MC a ACV. Pokles proudu na MC, společně s rozpojováním kontaktů, vede k navýšení odporu oblouku a výrazněji omezí proud protékající MC. Tento lavinový efekt vede ke zhašení oblouku. Zkratový proud v ten moment protéká pouze ACV předtím, než dojde k průchodu celkového proudu HGV nulou. Celková doba vypínacího procesu závisí na činných a jalových ztrátách a na odporu oblouku. Během postupného rozpínání ACV se zapaluje oblouk ve vakuové

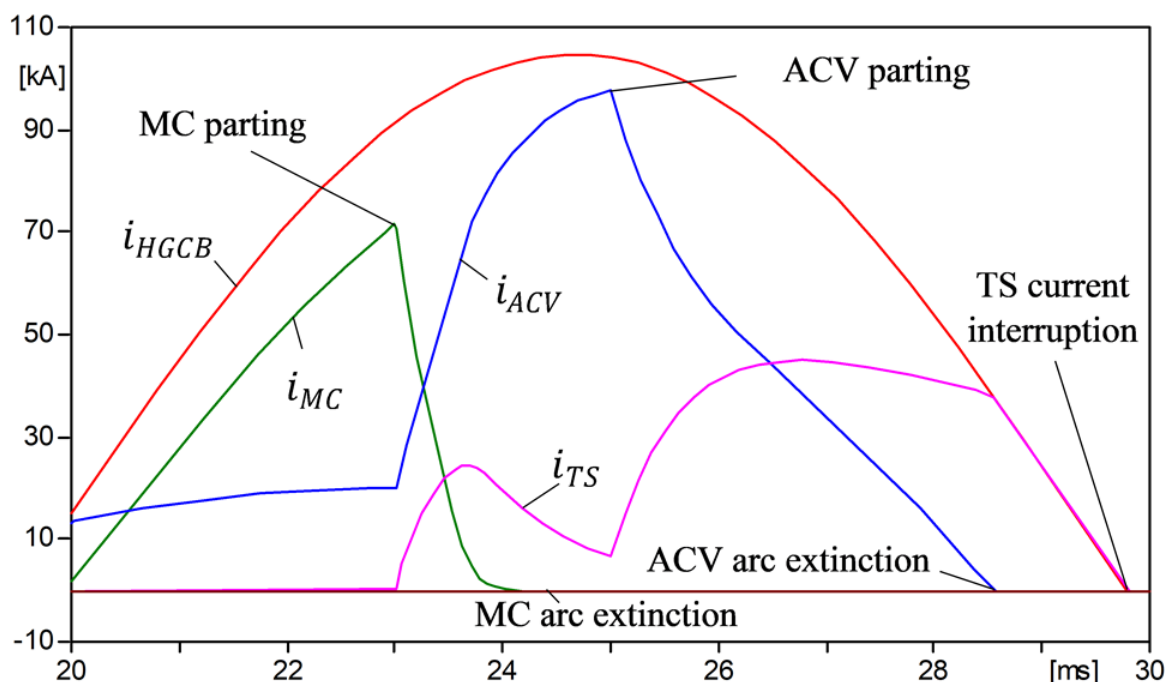
komoře. Kvůli úbytku napětí mezi kontakty ve vakuu se kladné anodové napětí objeví na TS a kde je utvořena vodivá cesta v antiparalelním spojení tyristorů. OS zaznamená proud v MC a signalizuje TS. Tyristory jsou sepnuty a vedou převládající část proudu z ACV. Odsávání proudu z ACV napomáhá zhašení. Jakmile se zkratový proud uchyluje k nule, TS je přepnut do nevodivého stavu za předpokladu, že OS negeneruje signál. Proces vypínání zkratového proudu je ukončen [22].

Nejzajímavějšími přechodnými ději, které během procesu vypínání jsou distribuce proudu mezi paralelní větve MC a ACV a následné nasměrování proudu z ACV do TS. Protože prostředí, kde hoří oblouk je v případě MC vzduch a v případě ACV vakuum, jsou utvořeny dva rozdílné modely oblouku [22]. Ekvivalentní schéma je na obrázku 17.



Obrázek 17: Ekvivalentní schéma hybridního generátorového vypínače

Pro odladění modelu se v grafickém preprocesoru ATPDraw definují všechny parametry prvků a stanoví se funkční podmínky. Čas přestupu proudu z MC do AVC je závislý na úhlu, při kterém dojde k zareagování vypínače. Maximální doba je získána při 60-80 elektrických stupních, nejrychleji se proud z MC do AVC přesune při úhlech blízkých 180°. Po úspěšném přestupu proudu do větve AVC a zhašení oblouku se musí zároveň otevřít tyristory, aby se mohl proud přesunout do větve TS [22]. Distribuce zkratového proudu do jednotlivých větví HGV je vidět na výsledném grafu na obrázku 18.



Obrázek 18: Oscilogramy proudů procházejících prvky hybridního generátorového vypínače

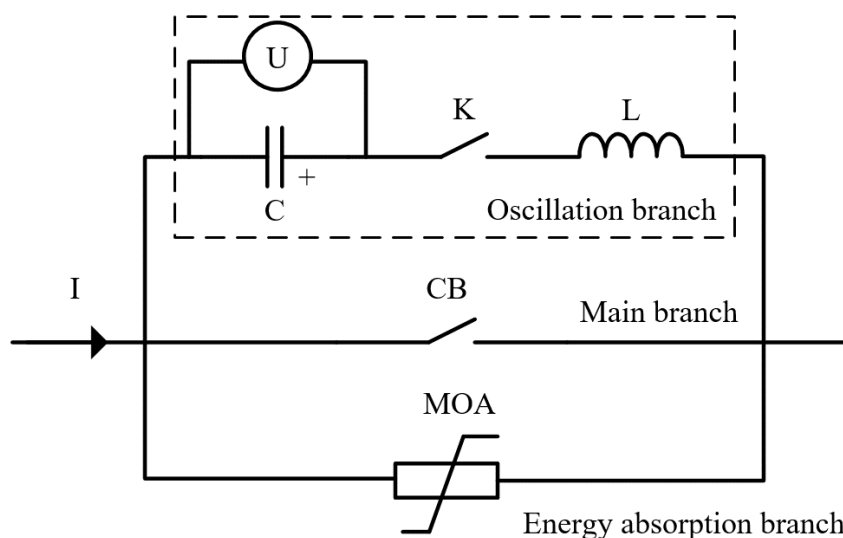
kde: i_{HGCB} je okamžitá hodnota proudu procházejícího vypínačem; i_{MC} je okamžitá hodnota proudu procházejícího hlavním vypínacím prvkem a „MC parting“ je doba, kdy dojde k rozpojení hlavních kontaktů; i_{ACV} je o. h. proudu procházejícího zhášecím ústrojím a „ACV parting“ je okamžik rozpojení kontaktů ve vakuové komoře; i_{TS} je o. h. proudu procházejícího tyristorovými spínači; „MC, ACV arc extinction“ jsou okamžiky úplného zhašení oblouku mezi kontakty a „TS current interruption“ je doba úplného přerušení proudu v nule a ukončení vypínacího procesu [22].

Model poruchy vytvořený v softwaru Multisim implementováním testovacího oscilačního obvodu je použit pro simulaci odpojení zkratových proudů vypínačem v článku [27].

2.3.4 Stejnoseměrné rychlovypínače

Současným trendem na poli energetiky je instalace obnovitelných zdrojů energie a integrace přenosu energie stejnosměrným proudem. Tento trend se odráží v potřebě simulovat problémy s vypínáním stejnosměrných proudů. Mnohem více aktuálních studií se zabývá záležitostmi stejnosměrných vypínačů nežli střídavých. Vypínání poruchových stejnosměrných proudů je simulováno v článku [23].

Stejnoseměrné linky jsou široce používány v systémech přenosu energie po celém světě. Jejich výhodou jsou nízké ztráty vedení, jednoduchá regulace výkonu, nízké náklady na konstrukci přenosového vedení a schopnost řešit synchronní provoz mezi různými frekvenčními systémy [23]. V stejnosměrném přenosovém systému (HVDC) je vypínač důležitým zařízením ke zlepšení provozní spolehlivosti. V současné době neexistuje jednotný standard pro testování nebo kontrolu HVDC vypínačů a chybí relevantní zkušenosti. Podle [23] navíc neexistují žádné odpovídající výsledky výzkumu ani normy pro metodiku „on-site“ kontroly vypínačů. Zároveň existuje velká poptávka po zátěžových analýzách a on-site hodnocení klíčových komponent HVDC vypínačů. Impedance způsobená indukčností přenosového systému je při stejnosměrném proudu minimální, takže jakékoliv zkratové proudy rostou rychleji než v systémech střídavého proudu a postrádají okamžiky přirozeného průchodu nulou [24]. HVDC vypínač musí být schopen vytvořit nulový proud uměle a absorbovat jalovou energii uloženou v systému, čímž se pracovní princip a podmínky zcela liší od střídavého vypínače. S využitím standardů střídavých vypínačů a stejnosměrných spínačů je možné simulací analyzovat komponenty vypínače a poskytnout tak zpětnou vazbu k optimalizaci klíčových částí jeho designu [23].

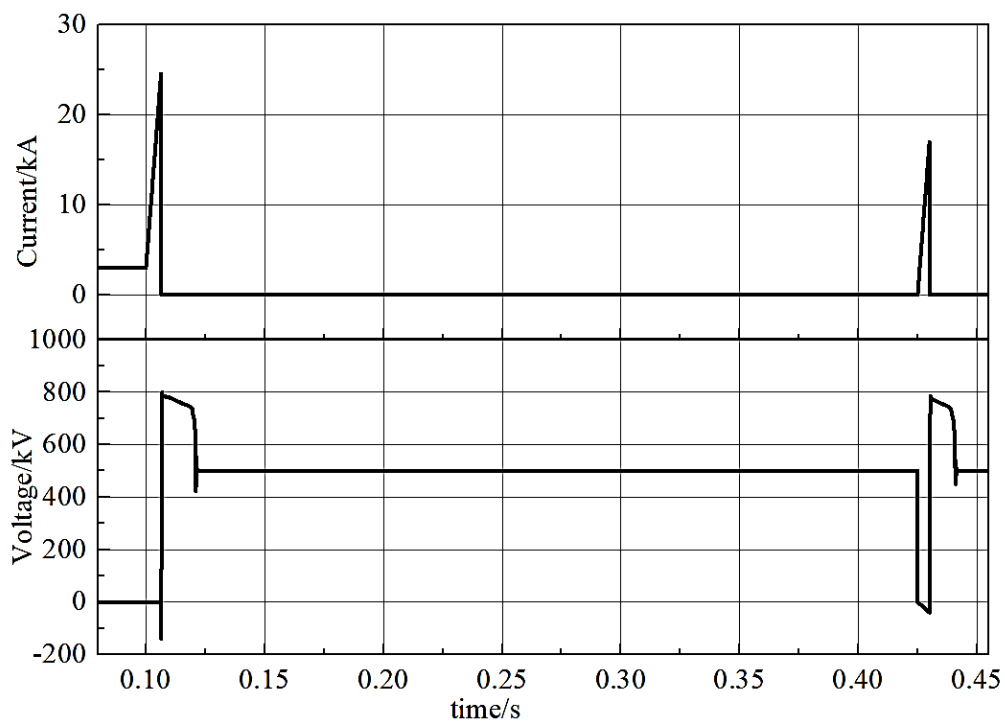


Obrázek 19: Základní schéma mechanického stejnosměrného vypínače

Základní topologie mechanického stejnosměrného vypínače je na obrázku 19. Skládá se ze 3 hlavních částí: hlavní větev se sériově zapojenými vypínači CB, oscilační větev s předem nabitým kapacitorem C, spouštěcím kontaktem K a induktorem L a větev obsahující sério-paralelní svodiče s oxidem kovu (MOA). Hlavní větví prochází provozní proud, oscilační větev se používá k výrobě vysokofrekvenčního oscilujícího proudu, který utvoří nulový bod proudu na CB a pomůže uhasit oblouk. Absorbující větev obsahuje svodič MOA limitující přepětí stejnosměrného vypínače a absorbující energii uloženou v indukčních komponentech systému.

Model je v tomto případě o něco více komplikovaný, ale stále zjednodušený. Jednotlivé části skutečného vypínače jsou v modelu reprezentovány náhradním prvkem. Sestavený model je připojen přes tlumivku ke zdroji 500 kV stejnosměrného napětí a zátěžným odporem je nastaven jmenovitý proud 3 kA. Zkrat nastane v době 0.1 s. Model v PSCAD simuluje vypnutí proudu 25 kA do 3 ms a potom vypnutí proudu 17 kA. To představuje situaci, kdy se nejedná o přechodnou poruchu a ale o tzv. „zpětné zapínání“, kdy vypínač po zareagování zapne síť do zkratu. Proces vypnutí ani v jednom případě nepřekročí dobu 3 ms.

Na obrázku 20 je ukázáno elektrické zatěžování CB, kde se model mechanické části vypínače vystavuje hlavně jmenovitému DC napětí ve vypnutém stavu, přechodnému přepětí během procesu vypínání, jmenovitému proudu, zkratovému proudu během poruchy. Zatížení svodičů přepětí a IGCT tranzistorů, které napomáhají komutaci proudu a simulace namáháním proudem při neúspěšném vypnutí jsou v [23] také simulovány. Výsledky simulace zatížení lze poskytnout jako referenci pro optimalizaci komponent vypínače a vyhodnocení parametrů zkoušky.



Obrázek 20: Zpětné zapínání HVDC vypínače s úspěšným vypnutím poruchového proudu (nahore) a napětí na vypínači (dole).

Velmi rychlý stejnosměrný vypínač v palubní elektrické síti, který dokáže odpojit poruchu do 100 μ s, je modelován v softwaru PLECS v článku [24].

2.3.5 Zatížitelnost vedení

V reakci na stále rostoucí poptávku po elektrické energii pokračuje výzkum a vývoj metod pro zvýšení přenosové kapacity stávajících vedení a navrhování nových kompaktních struktur. Vyšší kapacita přenosu energie vede ke snížené toleranci napěťových rázů. To zdůrazňuje význam pečlivé kvantifikace všech faktorů ovlivňujících distribuci přepětí a lépe tak stanovit hranice návrhu a maximalizovat kapacitu při zachování spolehlivosti.

Optimalizace přenosové kapacity vedení je spojena se zdokonalováním designu izolace na základě dat z provozu či výzkumu. Článek [18] implementuje praktickou simulační platformu schopnou generovat data pro návrh izolace nadzemního vedení.

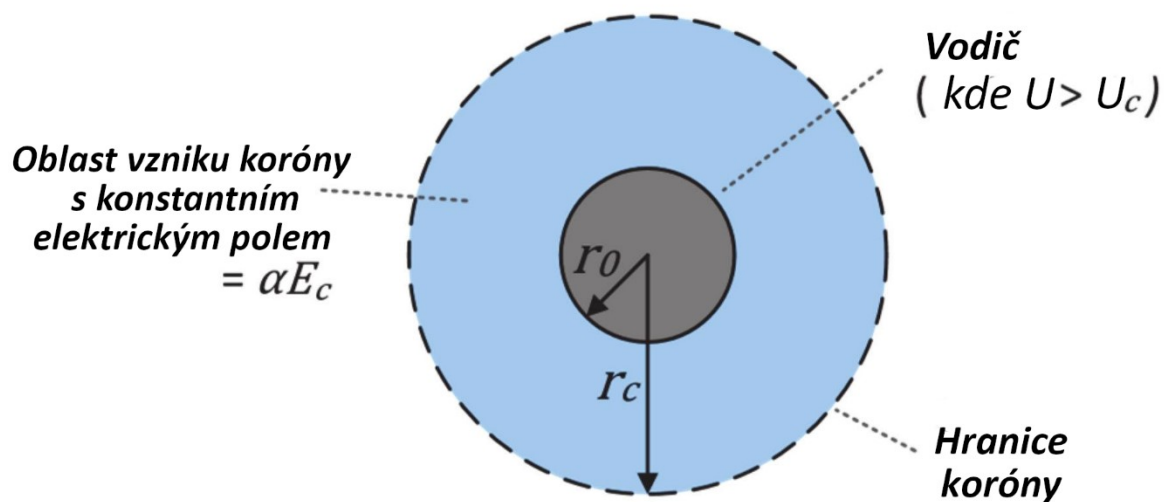
Výkonovou kapacitu linky lze u relativně dlouhých vedení přiblížit jako „přirozený výkon“. Přesněji lze celkovou kapacitu vedení aproximovat výrazem (4).

$$P_p = |U_s|^2 / Z_0 \quad (MW) \quad (4)$$

kde U_s je mezifázové napětí v kilovoltech a Z_0 je vlnová impedance přenosové linky. Historicky se potřeba navýšení zatížitelnosti vedení řešila zvýšením provozního napětí. Malého navýšení však lze dosáhnout snížením vlnové impedance. Rázová impedance třífázového přenosového vedení může přímo souviset s prostorovým rozložením elektrického pole mezi fázemi. Čím prostorověji rovnoměrnější elektrické pole je, tím menší je vlnová impedance a větší přirozený výkon. Rovnoměrnost elektrického pole je nepřímo úměrná kritickému přeskokovému napětí (U_{krit}) mezi linkami. Snížení U_{krit} je omezeno rozložením statického spínacího přepětí vyvolaného spínacími procesy v přenosové lince, jinými slovy, rozdělení spínacího přepětí také limituje zvýšení přenosové kapacity vedení. U návrhů s vysokým přirozeným výkonem je třeba věnovat velkou pozornost ochraně před přepětím [18].

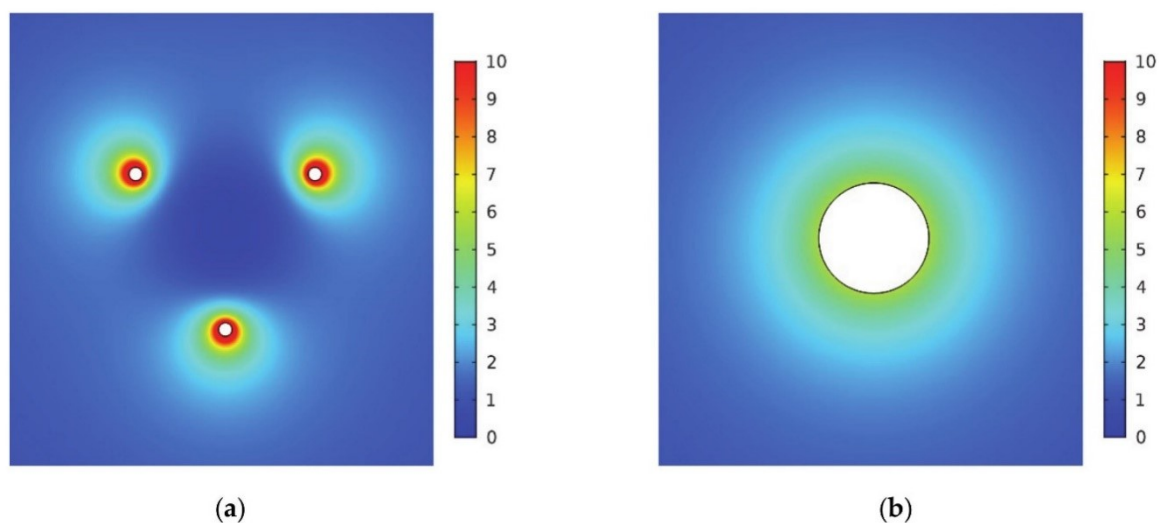
Studie [18] se zaměřuje na simulace korónového jevu, který je obecně považován za omezující faktor pro kompaktní přenosová vedení, přesto existuje jeho možná výhoda. Ztráty korónou, které jsou významné pro napětí vyšší než provozní, obvykle zmírňují vlny šířící se podél vedení. Korónové ztráty tedy mohou mít za následek menší pravděpodobnost přeskoků. V současné době tradiční simulační softwary jako ATP-EMTP mohou stanovit ztráty ve vodičích přenosových soustav, umožňují také modelovat aplikovaná nelineární zařízení jako svodiče přepětí. Korónové ztráty jsou distribuovaný nelineární jev, pro který v EMTP zatím neexistuje model dostupný pro typického uživatele.

Jakýkoliv útlum největších napěťových rázů, který obvykle není zahrnut ve studiích návrhu izolace, by tedy mohl být vítaným vedlejším účinkem korónových zrát. V článku [18] se pomocí metody konečných diferencí v časové doméně (FDTD) stanoví model pro prostorový náboj kolem vodiče. Obrázek 21 znázorňuje oblast působení korónové aktivity.



Obrázek 21: Oblast prostorového náboje okolo vodiče

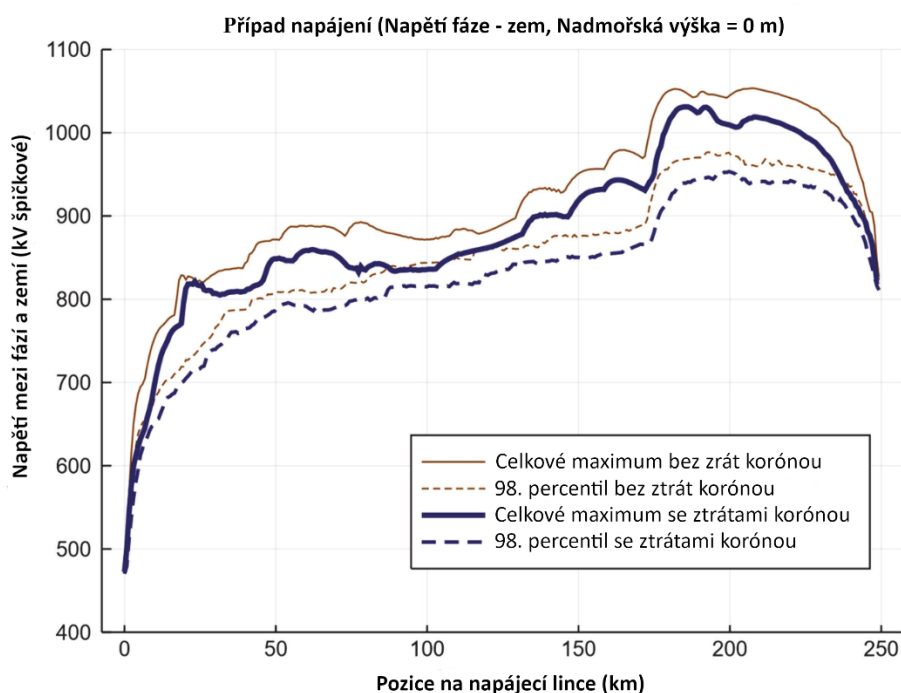
Dalším krokem je určení gradientu nástupu koróny ve směru od vodiče. Vodiče velmi vysokého napětí jsou běžně provozovány ve svazkové konfiguraci. Peekova formule je vhodná použít pro obyčejný válcový vodič, ale je méně přesná pro svazek vodičů. Proto je vhodné pro lepší stanovení gradientu použít složitý matematický postup. Na základě výsledků gradientu pole pro svazkový a ekvivalentní obyčejný vodič jsou pomocí metody konečných prvků vytvořeny simulace intenzity elektrického pole (Obrázek 22) [18].



Obrázek 22: Elektrické pole (a) svazkového vodiče (b) ekvivalentního vodiče

Důvěryhodnost výsledků modelu EMTP se ověřila porovnáním s daty z literatury. EMTP simulace přechodných napájení linek a opětovných zapnutí se shodují s výsledky poskytnuté modely FDTD, když byly ztráty korónou deaktivovány. Výsledky se ztotožňují i s naměřenými daty.

Korónové ztráty snížily nominální velikost vlny o $4 \div 14 \%$ pro 98. percentil přechodných fázových přepětí. Výsledky se liší v závislosti na úrovni přepětí a podmínkách vzniku koróny ovlivněných geometrií vodičů a svazků, nadmořskou výškou, atmosférickými podmínkami apod. Pravděpodobnost přeskočení mezi fázemi a zemí se snížila o $54 \div 80 \%$.



Obrázek 23: Profil přepětí na lince 500 kV v závislosti na vlivu korónových ztrát

2.3.6 Plynem izolované vedení

Technologie zapouzdřených vodičů může rovněž být použita k přenosu výkonu na dlouhé vzdálenosti, a to instalací plynem izolovaných přenosových linek (GIL). Jedná se o vodič v uzemněném kovovém potrubí, které je zaplněno izolačním plynem SF₆ [29]. GIL kombinuje výhody kabelových rozvodů a nadzemních linek: rovněž jako kabel je systém uzavřený a stíněný, ale permitivita a provozní kapacita je nižší. Samo-obnovující dielektrikum navíc nestárne a nemůže být tepelně přetížené. Stejně jako u plynem izolovaných rozvodů je nezbytné po montáži GIL provádět on-site testy pro detekci poruch [26]. Díky schopnosti přenášet vysoký výkon (>1000 MVA) je GIL slibnou alternativou přenosu energie. Zároveň ale vnáší do problematiky koordinace izolace a ochrany před přepětím nové podněty ke studiím optimalizace zařízení. Studie [28] [29] [30] se zaměřují na simulace provozních přepětí GIS a na základě výsledků optimalizují návrh a provoz systému. Studie [31] simuluje provoz GIL implementací modelu vzájemně provázaných elektrických, mechanických a tepelných namáhání.

Zvláště vysoké napětí a velký tok energie přenosovým vedením GIL produkují velký indukční proud, který zapříčiňuje náročně uhasitelný sekundární oblouk a selhání opětovného zapnutí. K vyřešení tohoto problému jsou na obou stranách GIL instalována zařízení, která indukční proud omezí.

On-site kontrola GIL se provádí pro odhalení chyb způsobených montáží. Ve studii [28] se z časových důvodů provádí montáže GIL sestavováním dvou otevřených smyček systému odděleně. To může způsobit problémy s řízením napětí a elektromagnetickými přechodnými jevy při uvádění hlavních částí systému do provozu. Navržené odpovídajících opatření vychází z výsledků simulačních studií.

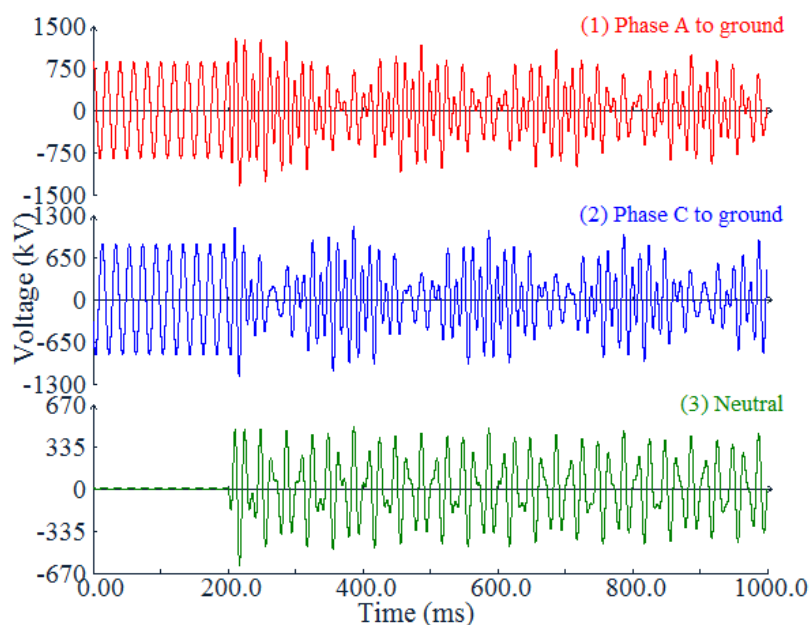
Během uvádění do provozu by měla být provedena série testů zapnutí a vypnutí nezátíženého přenosového vedení 1000 kV, aby se zkontroloval výkon vypínačů a izolace GIL a ověřila se strategie řízení napětí. Kvůli kapacitě vedení k zemi však může koncové napětí vedení dosáhnout hodnot až 1100 kV, což je maximální provozní napětí systému. Aby se snížila kapacita vedení, jsou na každém jeho konci instalovány kompenzační tlumivky. S ohledem na omezení v systémech ZVN se provádí elektromechanická přechodná analýza v simulačním softwaru.

Mezi zemí a nulovým bodem vysokonapěťových kompenzačních tlumivek je nainstalována malá zhášecí tlumivka pro uzavření smyčky vedení, hodnota její reaktance je navržena 700 Ω. Před uvedením GIL do provozu může nesprávně navržená tlumivka

způsobit problém při provozu nezatížené fáze. Provoz nezatížené fáze je způsobem zejména neúspěšným zapnutím vypínače během připojení sítě. Za těchto podmínek se napětí vlivem propojení mezifázových kapacit rozšíří i do nezatížených fází. Nesprávná koordinace parametrů zhášecí tlumivky může vést k vysokofrekvenčním přepět'ovým oscilacím a ohrožení izolace kompenzačních tlumivek [28].

Studie tohoto problému se provádí pomocí elektromagnetického simulačního softwaru EMTP. Z výsledků na obrázku 24 jsou patrná přechodná přepětí fází A a C ve stavu naprázdno a napětí nulového bodu. Maximální přepětí fází je 1.5 p.u. (1.5 maximální hodnoty fázového napětí) a v nulovém bodě je napětí 613 kV a tato hodnota přesahuje zbytkové napětí omezovače U_{res} rovné 399 kV. Ze simulace [28] plyne, že při připojování vedení nastane v nezatížených fázích již připojené sítě k rezonancím.

Zhášecí tlumivka se používá k potlačení sekundárního oblouku a k urychlení zhášení a zvýšené spolehlivosti opětovného zapnutí. Nicméně, během uvádění systému do provozu nejsou tyto automatické funkce tlumivky potřebné, a proto je doporučeno spojit uzel kompenzačních tlumivek přímo se zemí.



Obrázek 24: Přepětí na vedení ve stavu naprázdno

Zároveň se v [28] pomocí EMTP simuluje vypínání nezatíženého vedení v napěťové nule (proudovém maximu) při vyvinutí maximální stejnosměrné složky proudu a také je modelována porucha jedné fáze typu zemní zkrat viz příloha 1.

Ekvivalentní model výše popsaného vedení je sestaven v [29], kde jsou pomocí softwarů ATP-EMTP a COMSOL zkoumány závislosti konfigurace izolátorů, délky vedení a

zbytkového náboje na přepětí. Simulační analýza provozních přepětí GIL a obecně jejich parametrů je prezentována v [30] a výsledky jsou porovnány s provozem klasického nadzemního vedení. Výzkumy vzájemných souvislostí fyzikálních polí GIL a příčin nerovnoměrného rozložení teploty jsou prostřednictvím simulace provedeny v [31].

3 Simulace částečných výbojů

Částečné výboje (ČV) jsou výboje, které se vyskytují jen v části izolační vzdálenosti a objevují se ve všech typech izolačních systémů. ČV neznamenají bezprostřední výpadek dodávky, ale jejich dlouhodobý výskyt představuje zejména pro organické izolátory významný degradační vliv. Erozní efekt mají zejména opakované výboje způsobené napěťovými impulsy ve střídavé napájecí síti [26].

Ve vysokonapěťových zařízeních se simulací, měřením i testováním částečných výbojů hodnotí provedení izolačních systémů, a to i pro stejnosměrné systémy. Částečné výboje vznikají obecně v oblastech se zvýšenou intenzitou elektrického pole nebo v místech se sníženou elektrickou pevností. Defekty v izolačním materiálu jsou často hlavní příčinou výbojů v dielektriku a s ČV se lze nejčastěji setkat v nehomogenitách ve vnitřní struktuře materiálu. Vlastnosti výbojů se liší v závislosti na přivedeném napětí [26]. Přivedením různých druhů aplikovaného napětí lze dosáhnout ČV způsobujících různé podmínky pro selhání izolace [7].

Rozlišuje se mezi výboji na špičkách vodivých elektrod ve vzduchu a v plynu izolovaných uspořádáních, vnitřními částečnými výboji v dielektriku a povrchovými výboji na rozhraní [26]. Existuje několik metod simulace částečných výbojů, ačkoliv se nejčastěji používá numerický model, společný cíl těchto simulací je studium ČV ve prospěch optimalizace návrhu a provozu zařízení.

3.1 Vnitřní částečné výboje

Způsoby modelování vnitřních částečných výbojů lze kategorizovat do čtyř typů. Jsou to trojkapacitní modely (abc), koncept indukovaného náboje (ICC), metoda konečných prvků (MKP) a multifyzikální modely. Trojkapacitní modely jsou příliš jednoduché pro detailní analýzu fyzikálních jevů spojených s ČV. Modely v multifyzikálním software (Comsol, Ansys, aj.) vyžadují množství fyzikálních parametrů získaných z empirických testů, jenž jsou často specifické. Použití analytického modelu ICC je podmíněno uvažováním homogenního pole uvnitř dutinky, jehož intenzita navíc zůstane během výbojové aktivity neměnná. Takové podmínky lze přijmout v případě velmi malých dutinek. Simulace v [32] potvrzují, že model MKP poskytuje přesnější výsledky. V modelu s konečnými prvky není potřeba předpokládat homogenitu elektrického pole ani v dutince ani v dielektriku. Nicméně, v simulacích ČV se velmi často uvažuje vznik počátečního

elektronu pouze uvolněním z povrchu dutinky. Ostatní možné mechanismy vzniku volného elektronu v dielektriku v blízkosti dutinky se neuvažují [32].

Modely MKP spočívají v použití numerických metod pro řešení diferenciálních rovnic, které charakterizují výbojový jev. Částečné výboje jsou jednoznačně multifyzikální jev. Procesy jako rychlost generování volných elektronů a pokles povrchového náboje na povrchu dutinky jsou závislé na teplotě a tlaku. Změny teploty a tlaku vlivem ČV jsou simulovány v [33]. Zároveň podle Ohmova zákona platí, že intenzita ČV roste, když se rádius dutinky zvětšuje. Krom toho je třeba vzít v úvahu, že malá vzdálenost protilehlých nabitých částic v případě zploštělých dutin usnadňuje rekombinaci ve srovnání s kulovitými dutinkami. Vliv akumulovaného náboje v dutince na elektrické pole a vznik dalších ČV je analyzován numerickým modelem v [32] a popsán v kapitole 3.1.1.

3.1.1 Dutinka

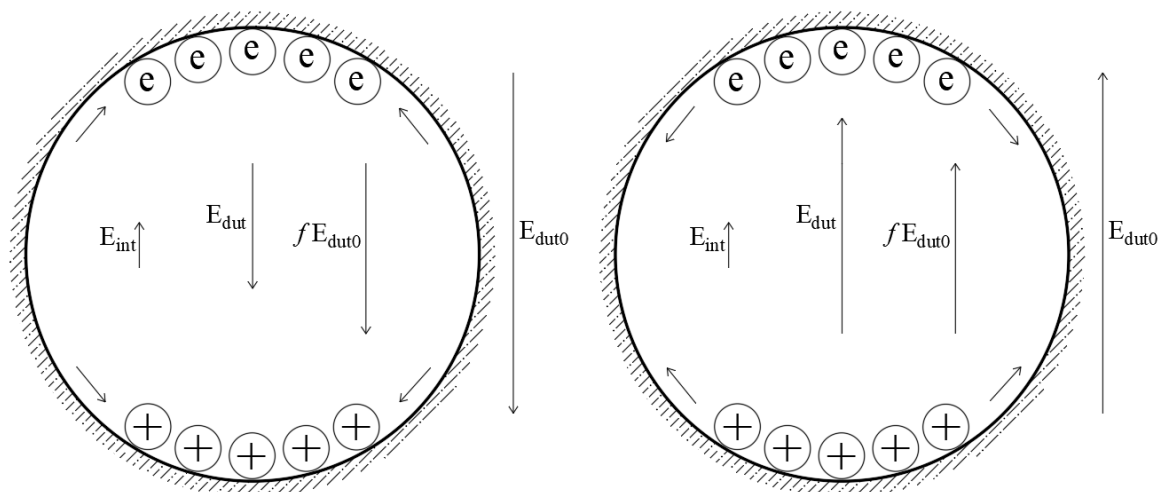
V dutince vznikají volné elektrony prostřednictvím objemové ionizace a povrchové emise na základě následujících mechanismů [32]:

Povrchová emise	}	I.	Uvolnění elektronů z povrchu izolantu
		II.	Emise elektronů fotoefektem z povrchu izolantu
		III.	Uvolnění elektronů nárazem iontů
		IV.	Emise elektronů fotoefektem z povrchu vodiče
		V.	Uvolnění elektronu z vodiče působením elektrického pole
Objemová ionizace	}	VI.	Ionizace plynu zářením
		VII.	Uvolnění elektronů z negativních iontů působením elektrického pole

Celková rychlost vzniku ($\dot{N}_{tot}(t)$) volných elektronů je součtem generací prostřednictvím povrchové emise ($\dot{N}_{surf}(t)$) a objemové ionizace ($\dot{N}_{vol}(t)$) [32]:

$$\dot{N}_{tot}(t) = \dot{N}_{surf}(t) + \dot{N}_{vol}(t) \quad (5)$$

V přesných modelech ČV se zohledňuje postupný nárůst volných elektronů při přeskočce vlivem lavinového efektu, tj. nárůst povrchového náboje, a postupný úbytek povrchového náboje v čase.



Obrázek 25: Demonstrace pohybu nabitých částic v dutince, když se směr pole mezi dvěma po sobě jdoucími částečnými výboji nezmění (vlevo), a když se změní (vpravo).

Na obrázku 25 je naznačen směr pohybu nabitých částic při dvou rozdílných podmínkách. Elektrické pole dutinky ($E_{dut0}(t)$), způsobené přiloženým napětím, je jedna ze dvou složek elektrického pole uvnitř dutinky. Kvůli permitivitě plynu, která je v plynu nižší než v pevném dielektriku, se amplituda E_{dut0} násobí upřesňujícím koeficientem (f), který kvantifikuje intenzifikaci E_{dut0} uvnitř dutinky. Kromě fE_{dut0} , obsahuje elektrické pole složku $E_{int}(t)$, což je elektrické pole způsobené zbývajícími náboji na povrchu dutinky po předešlé aktivitě ČV. Součet těchto dvou složek je roven velikosti amplitudy elektrického pole uvnitř dutinky ($E_{dut}(t)$).

Na obrázku 25 vlevo zůstává po výbojové aktivitě směr pole $E_{dut0}(t)$ stejný a nabitě částice se pohybují opačným směrem. Pokud se směr pole $E_{dut0}(t)$ mezi dvěma po sobě jdoucími ČV otočí, složky elektrického pole budou mít stejný směr a nosiče náboje se přibližují. Kvůli neutralizaci nabitých částic se sníží počet volných elektronů pro další částečný výboj [32][34].

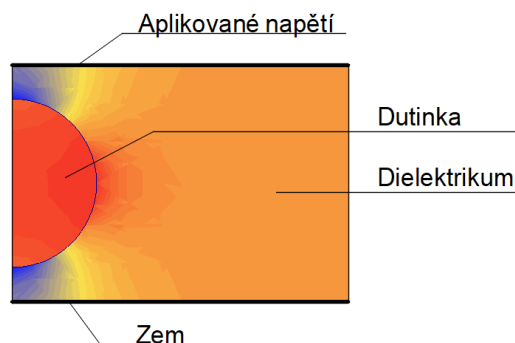
3.1.2 Různé křivky napětí

V [7] je použita metoda konečných prvků (MKP) pro analýzu aktivity částečných výbojů (ČV) při aplikaci různých křivek napětí. Simulace je provedena pro napětí sinusové, tlumené sinusové, impulsní a pomocí PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) jsou získány diagramy výskytu částečných výbojů. Účelem použití této metody k simulaci sférické dutiny v elektricky namáhaném dielektriku je porozumění chování částečných výbojů, diagnostika izolace a hodnocení výkonu izolačního systému.

Prvním předpokladem pro vznik částečných výbojů v dielektrickém materiálu je elektrické pole v dutince, E_{dut} musí být větší, než zapalovací intenzita pole [7]. Druhou podmínkou pro vznik ČV je počáteční elektron, který je důležitý pro zahájení ionizace. Dodání počátečního elektronu ovlivňuje statistické charakteristiky výbojové aktivity, jako je zapalovací zpoždění, počet vzniků ČV a jejich distribuce s respektováním aplikovaného napětí. Počáteční elektron může být do dutinky dodán vysokou přírodní energetickou radiací skrze fotoionizaci v plynu, prostřednictvím fotoionizace v izolaci nebo emitovaným polem z povrchu dutiny. Pro dutinku, v které se ČV ještě nikdy nevyskytly, je hlavním zdrojem volného elektronu ionizace energetickými fotony. Pokud v modelu uvažujeme, že médium v dutince je vzduch, poté může být vypočtena rychlost objemové ionizace. Po vzniku prvního ČV se naskytne alternativní zdroj počátečního elektronu, díky náboji na povrchu dutinky, nahromaděném díky předchozím ČV.

Jeden z faktorů, ovlivňujících ČV v izolačním systému vysokonapěťového zařízení je aplikované napětí. Měření a simulace výbojové činnosti při střídavém sinusovém napětí sférické dutinky vypověděli o vzrůstajícím počtu ČV na periodu a vzrůstajícím celkovém náboji ČV na periodu, při navyšování frekvence a amplitudy. Z výzkumu [7] plyne, že částečné výboje opisují změny tvaru sinusového napětí. Na obrázku 26 je vidět dvoudimenzionální model skládající se ze sférické dutinky a dielektrika cylindrického tvaru. Pomocí modelu a metody konečných prvků se určí intenzita elektrického pole v počátečním stavu, kdy ještě k žádným ČV nedošlo. Tato hodnota intenzity pole se periodicky mění s napětím, které bylo v literatuře zvoleno 19.25 kV [7].

Model s vykreslenou intenzitou pole na obrázku 26 je stanoven při hodnotě napětí 19.25 kV. Pokud chceme sledovat chování ČV v případě různých křivek napětí, musíme uvažovat měnící se elektrické pole v čase.

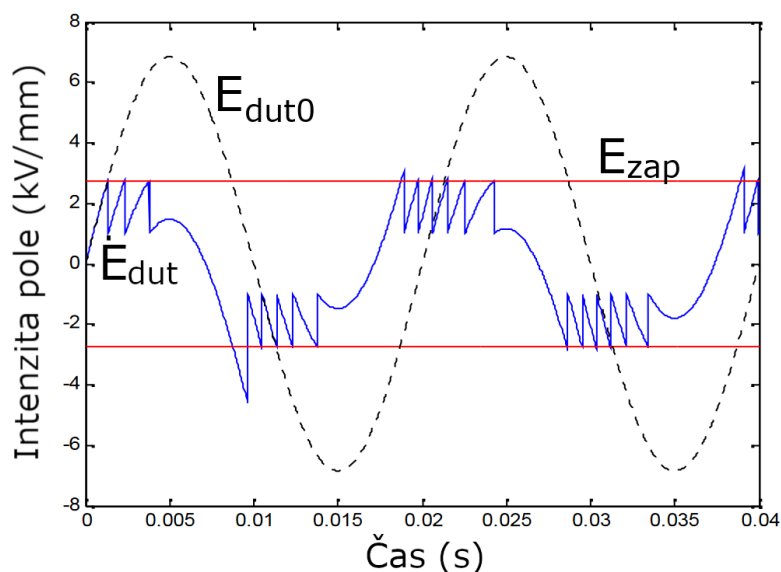


Obrázek 26: AGROS 2D model dutinky v dielektriku mezi elektrodami

I. Aplikované napětí – AC sinusové

Na obrázku 27 je vidět průběh elektrického pole v případě uvážení 50 Hz sinusového napětí 19.25 kV, jehož hodnota v čase je získána prostřednictvím modelu MKP. Pokud elektrické pole v dutince ($E_{dut}(t)$) překoná úroveň „zapalovací“ intenzity pole ($E_{zap}(t)$) a pokud existuje volný počáteční elektron, výboj se zapálí a intenzita elektrického pole v dutince klesne, což způsobí uhašení ČV. Pokud není k dispozici volný počáteční elektron, E_{dut} kopíruje intenzitu elektrického pole v dutince bez povrchového náboje ($E_{dut0}(t)$). V úseku mezi 0.005 s a 0.01 s nedojde k okamžitému zapálení výbojů, protože dokud je E_{dut} vyšší než E_{zap} , není k dispozici žádný volný elektron pro zapálení částečných výbojů. Toto zpoždění se nazývá statistická časová prodleva.

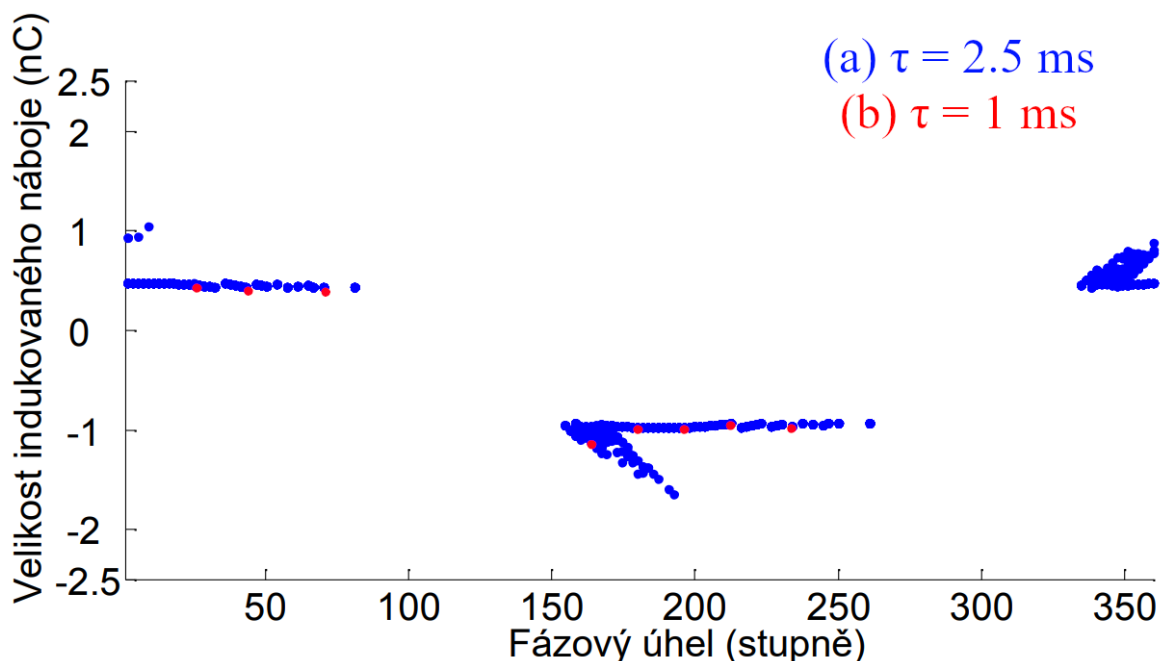
Když dochází k výbojové činnosti při střídavém sinusovém napětí, existují dva typy statistické časové prodlevy. Prvním typem je prodleva způsobená prvními ČV. Prodleva je dlouhá, protože je pro elektrony těžké se emitovat z povrchu dutinky. Druhý typ prodlevy je prodleva po dosažení prvních ČV. Toto zpoždění je kratší, protože je dostupných více volných elektronů na povrchu dutinky. Časová prodleva ovlivní počet částečných výbojů na periodu [7].



Obrázek 27: Časový průběh intenzity elektrického pole

Diagramy PRPD zobrazují výskyt a úroveň náboje částečných výbojů pro specifické fáze napětí na obrázku 28. V tomto grafu se ČV zaznamenávají body, a to podle natočení fázoru napětí, při kterém došlo k jejich zapálení, tedy od 0 do 360 stupňů. Pokud dojde během periody k zapálení více výbojů, bude v diagramu PRPD více bodů. PRPD se běžně využívají při monitorování kondice vysokonapětového zařízení [7].

Na obrázku 28 se diagramy PRPD významně mění v závislosti na časové konstantě poklesu povrchového náboje τ . Když τ vzroste, dochází k zaznamenání více ČV při jedné periodě. τ ovlivňuje, jak pomalu bude množství náboje nahromaděného vlivem předchozích ČV na povrchu dutinky klesat v čase a s rostoucím τ roste i pravděpodobnost výskytu ČV. Díky tomu si lze v diagramu všimnout, že při časové konstantě τ rovné 2.5 ms, se objeví částečné výboje téměř okamžitě po tom, co je intenzita E_{zap} překročena a zároveň tak dochází k zapálení většího počtu výbojů menší velikosti [7].

Obrázek 28: Diagramy PRPD pro rozdílnou časovou konstantu τ

II. Aplikované napětí – AC sinusové tlumené

Tlumené přiložené napětí je simulováno v [7] pro rozbor aktivity částečných výbojů v modelu dutinky v dielektriku. Tlumené kmity reprezentuje následující vztah:

$$u(t) = U_a \sin(2\pi ft) \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (6)$$

kde f je frekvence, t je čas a τ_d je časová konstanta tlumení kmitů.

Průběh intenzity elektrického pole je v příloze 2 na obrázku 42. PRPD diagramy v případě tlumeného sinusového napětí jsou v příloze 2 na obrázku 43. Když konstanta tlumení roste, počet částečných výbojů na periodu klesá kvůli rychlejšímu poklesu amplitudy intenzity elektrického pole. Hodnota intenzity elektrického pole se sníží pod úroveň E_{zap} dříve, což zamezí opětovnému výskytu částečných výbojů. Obecně je diagram PRPD obdobný diagramu pro netlumené sinusové napětí [7].

III. Aplikované napětí – Napěťový impuls

V [7] je napěťový impuls představen vztahem:

$$u(t) = U_a \left[\exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_2}\right) \right] \quad (7)$$

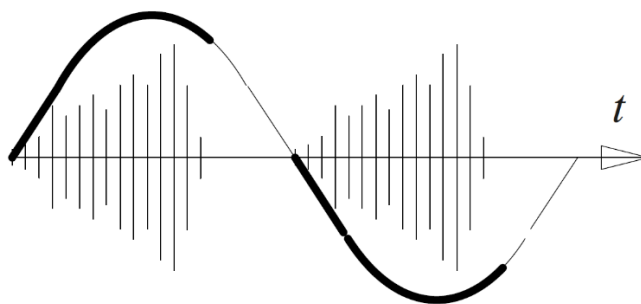
kde τ_1 a τ_2 jsou časové konstanty vlny a t_0 je okamžik vzniku impulsu.

Konfigurace dielektrika je stejná jako v předchozích případech. V případě namáhání napěťovým impulsem se částečné výboje projeví zejména v čelní oblasti vlny a mnohem

méně v oblasti týlu, to je vidět na obrázku 44 v příloze 3. Aby se analyzovalo chování ČV, je simulace provedena pro různé doby čela. Z výsledků simulace plyne, že delší doba čela navyšuje počet ČV v prvních 100 μs , ale celkový počet výbojů v průběhu vlny je stejný. Delší doba čela je příčinou pomalejšího nárůstu napětí, a tedy větší pravděpodobnosti výskytu volného elektronu k zapálení ČV [7].

3.2 Povrchové výboje

Povrchové výboje vznikají na okrajích elektrod. Jejich vznik obvykle závisí na amplitudě přiloženého střídavého napětí $u(t)$. Narůstající amplituda zvětšuje délku a intenzitu výboje, to je prezentováno na obrázku 29. Izolačním systémem protéká v případě střídavého napětí nabíjecí proud kapacitního charakteru, který způsobuje zkreslení elektrického pole a podporuje vznik povrchových výbojů [26].



Obrázek 29: Nárůst intenzity částečných výbojů při zvětšující se amplitudě napětí

V případě stejnosměrného napětí už kapacitní proud nepodporuje aktivitu částečných výbojů na povrchu, protože nedochází ke střídavé polarizaci dielektrika. Nicméně, povrchy materiálů, vystavených stejnosměrnému namáhání, mohou akumulovat povrchové náboje. Povrchový náboj se může následně vybit skrze jeden silný výboj, případně i plnohodnotný přeskok a selhání izolace [26].

3.2.1 Propagace striméru

Ve vysokonapěťových zařízeních a výkonové elektronice často dochází k elektrickým výbojům podél dielektrických materiálů. V oblastech vysokého elektrického namáhání izolačních prvků může dojít k elektronové lavině a strimérovým výbojům. Kvůli zesílené intenzitě elektrického pole na rozhraní dielektrika je kritické napětí v případě přeskoku po povrchu až o 50% nižší oproti přeskokovému napětí samotné plynové mezery [26][37]. Nejenže přítomnost dielektrika v blízkosti elektrod ovlivňuje elektrické pole mezi elektrodami, ale zároveň produkuje i absorbuje elektrony během výbojové aktivity. Simulační studie interakcí mezi dielektrikem a strimérovým výbojem v [37] a [38] jsou důležité k porozumění vzniku povrchových přeskoků.

V [37] a [38] je sestavena simulační platforma, kde figuruje dielektrikum mezi dvěma paralelními rovinnými elektrodami. Dielektrikum je mezi elektrodami umístěno paralelně

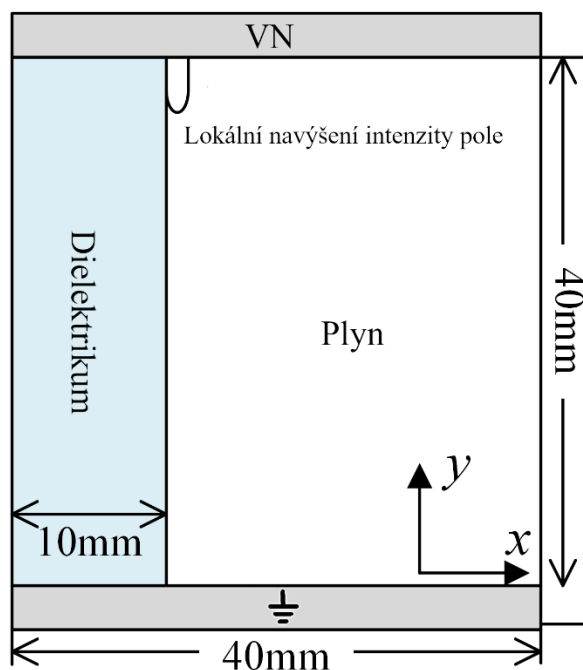
s plynným izolantem. Díky tomu mohou být povrchové výboje propagovány podél dielektrika nebo skrz plyn. Tato metoda poskytuje dobré podmínky pro výzkum interakce mezi dielektrikem a povrchovými výboji.

Simulační platforma sestává z výpočetního modulu Afivo-streamer, což je otevřený software pro výpočet distribuce plasmy při strimérových výbojích a poskytuje adaptivní zjemnění výpočetních sítí. Pojmem strimér (z anglického „streamer“) se nazývá slabě světélkující tenký výbojový kanál [39]. Modul je upraven pro potřeby simulace. Je sestaven model hustoty elektronů a pozitivních a negativních iontů. Transport elektronů je generován simulací Monte Carlo. Elektrony a ionty se při toku k dielektriku přichytí k povrchu, kde vzájemně neinteragují, nicméně sekundární emise elektronu z povrchu je v modelu uvažována.

I. Interakce pozitivních strimérů s dielektrikem

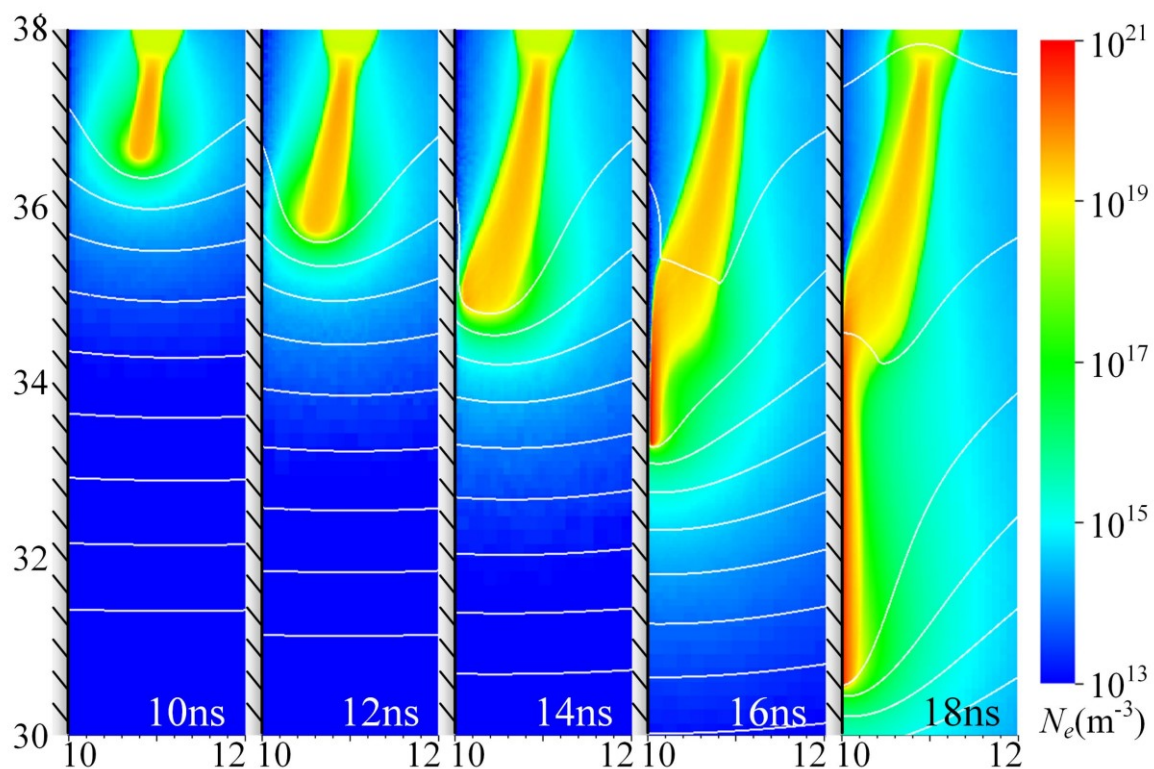
Když je izolant ozářen dopadajícím elektronovým paprskem, zpomalení elektronů generuje velké množství párů elektron/díra blízko povrchu dielektrika a způsobí emisi sekundárních elektronů a zanechá za sebou tenkou vrstvu kladných nábojů [36]. Pozitivní strimér potřebuje ke své propagaci zdroj volných elektronů. Jak je popsáno v předešlých kapitolách, fotony mohou elektron uvolnit skrze fotoionizaci v plynu nebo fotoemisi z dielektrika. Role fotoemise je v problematice povrchových výbojů méně známá. Pravděpodobnost fotoemise nezávisí pouze na energii fotonu, ale i na vlastnostech povrchu. Zjednodušený model uvažuje fotony vysokoenergetické a nízkoenergetické a jevy fotoionizace a fotoemise jsou reprezentovány metodou Monte Carlo. Následně je určeno, kolik fotonů narazí do povrchu dielektrika a přispěje k lokální fotoemisi.

V simulační platformě je mezi dielektriky uvažován umělý vzduch (80 % N_2 a 20 % O_2) pod tlakem 1 bar a termodynamickou teplotou 300 K. Neumannovy a Dirichletovy podmínky jsou stanoveny pro elektrody a dielektrikum. Napětí mezi elektrodami je 120 kV. Ke spuštění propagace výboje musí být lokálně zvýšena intenzita pole zavedením umělé nečistoty.



Obrázek 30: Konfigurace rovinných elektrod a dielektrika vhodná k simulaci interakce mezi dielektrikem a strimérem

Když elektrony z nečistoty driftují směrem vzhůru, elektrické pole se ve spodní části nečistoty zvýší, takže se může vytvořit pozitivní strimér. To je vidět na výsledcích simulace na obrázku 31 [37].



Obrázek 31: Propagace striméru počínaje 10 ns po umístění nečistoty 1 mm od dielektrika.

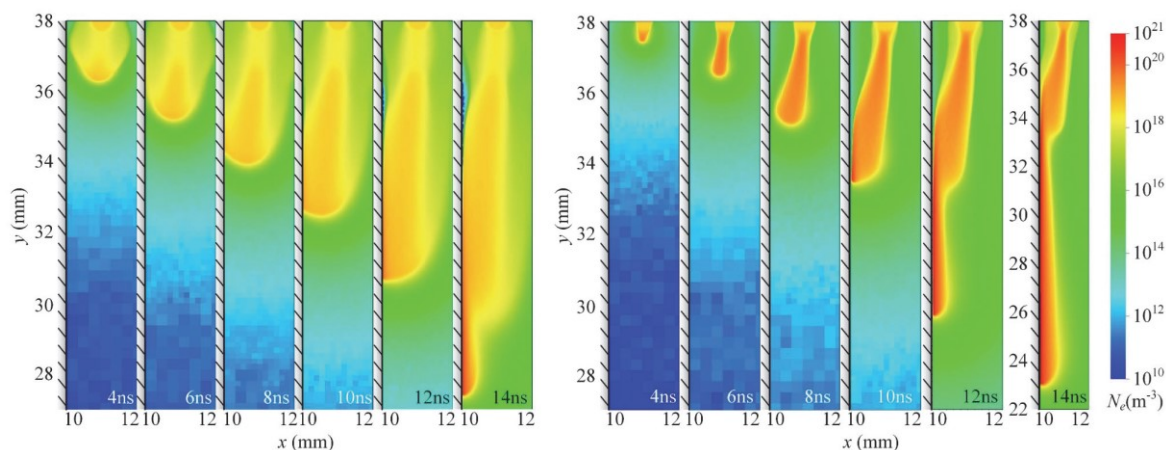
Z výsledku simulace na obrázku 31 je patrné, že dielektrikum působí na pozitivní strimér přitažlivě. Strimér začne růst ve vzduchu a postupně se vyvíjí směrem k dielektriku. Během přilnutí k dielektriku se propagace zrychlí a pokračuje podél povrchu.

Další vlivy jako změna oblasti počátečního navýšení intenzity pole, rychlost striméru, přitažlivost k dielektriku, změna napětí či permitivity aj. jsou simulovány v článku [37].

II. Interakce negativních strimérů s dielektrikem

Výzkum vlastností negativních povrchových výbojů je proveden v [38]. Stejně jako v předchozí kapitole je model zprostředkován prostřednictvím Afivo-streamer na simulační platformě na obrázku 30. Napětí mezi elektrodami je -120 kV. Jsou simulovány interakce negativních strimérů s povrchem dielektrika, propagace striméru na povrchu, vliv přiloženého napětí a změny permitivity dielektrika nebo vliv povrchového náboje na negativní povrchové výboje.

Výboje obvykle vznikají z oblastí, kde je elektrické pole lokálně zesíleno. Ve vysokonapěťových zařízeních je obvykle intenzita elektrického pole nejsilnější v triple pointech mezi elektrodou, plynem a dielektrikem. V případě pozitivních strimérů je sekundární emise elektronů z povrchu důležitá, protože tyto elektrony mohou inicializovat lavinu, která roste ve směru propagace „čela“ striméru. V případě negativního vodivého kanálu se elektrony od čela striméru vzdalují, takže by se sekundární elektrony po emitaci z povrchu ihned vrátili zpět [38]. Tato a ostatní odlišnosti musí být v novém modelu ošetřeny.



Obrázek 32: Evoluce negativních (vlevo) a pozitivních strimérů (vpravo). Aplikované napětí je -120 kV pro negativní striméry a 120 kV pro pozitivní striméry.

Příkladem interakce dielektrika se strimérem jsou doloženy některé z výsledků simulací: Propagace negativních povrchových strimérů je podobná jako v případě pozitivních, rozdíl je v nižší maximální intenzitě elektrického pole oproti pozitivním strimérům, Negativní striméry na povrchu dielektrika mají oproti strimérům v plynu větší maximální intenzitu elektrického pole, větší hustotu elektronů a rychlejší propagaci. Když je negativní strimér propagován po povrchu, tak se dielektrikum záporně nabije. Vrcholová hodnota hustoty náboje je v oblasti čela striméru a generuje silné elektrické pole uvnitř dielektrika. Na obrázku 32 je patrný efekt odpudivého vlivu striméru na elektrony a jejich vytlačování na stěnu dielektrika v porovnání s pozitivním strimérem, kde jsou elektrony přitahovány směrem ke striméru, takže hustota elektronů a intenzita elektrického pole je vyšší [38].

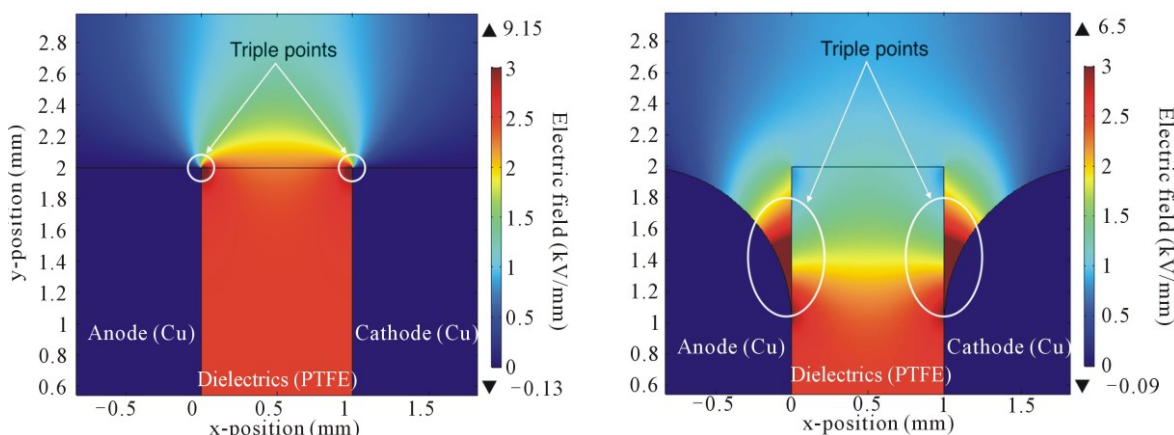
3.3 Stejnoseměrné systémy

3.3.1 Přípojnice hybridního letadla

V technice vysokého napětí se lze často setkat se zařízeními vystavenými měnícím se povětrnostním podmínkám. Dielektrické materiály použité v těchto zařízeních odolávají měnícím se parametrům jako tlak, teplota a vlhkost. Tyto parametry zároveň často rozhodují o vzniku povrchových výbojů v místech se silnými elektrickými poli. Jak je zmíněno v předešlé kapitole, v případě elektrického pole indukovaného elektrickými náboji je prokázáno, že chování nábojů ovlivňuje intenzitu pole a vznik ČV v dielektrických materiálech. Polarita, velikost i rozložení náboje by mohla mít značný vliv na optimalizaci elektrického pole zejména v kritických částech na rozhraní dielektrik v triple pointech. Článek [35] pojednává o simulacích kritických míst izolačního systému stejnosměrných napájecích přípojníc hybridního letadla, kde je velké riziko vzniku ČV.

Snaha omezit dopad emisí skleníkových plynů na životní prostředí vede k návrhům letadel s hybridními pohonnými systémy. Návrh systémů přeměny a distribuce energie pro pohonné zařízení hybridního letadla musí splňovat požadavky na spolehlivost a bezpečnost zařízení. Výkon je v těchto systémech obvykle přenášen laminovanými přípojnícemi, které jsou izolovány pevnými organickými dielektriky. Z dostupných izolátorů se často používají fólie PTFE. V mnoha případech se však v systémech výkonové elektroniky, kde hrají roli vysoký výkon (vysoké napětí) a požadavky na malý rozměr zařízení, objevují oblasti s vysokým rizikem vzniku ČV na rozhraní vodiče, plynu a izolátoru. Z toho důvodu se provádí kromě experimentálních měření stále více teoretických studií s cílem navrhnout různá analytická řešení distribuce elektrického pole v namáhaném triple pointu.

Nenabitě dielektrikum PTFE je vloženo mezi dvě měděné přípojnice a vystaveno stejnosměrnému elektrickému poli 2.5 kV/mm. Jsou uvažovány dvě geometrické konfigurace, aby byl zřetelný vliv triple pointu na intenzitu elektrického pole.



Obrázek 33: Rozložení intenzity elektrického pole pro dvě různé konfigurace přípojnicového systému

Tato oblast výkonového měniče je nekritičtější oblastí z hlediska namáhání elektrickým polem a zároveň nejrizikovější pro vznik částečných výbojů jak v přechodném, tak v ustáleném stavu.

Běžně se vyhodnocuje aktivita částečných výbojů mezi dvěma elektrodami srovnáním Paschenovo teoretických a experimentálních křivek. U vzduchových mezer větších než 1 mm (lineární část Paschenovy křivky) lze analyzovat vznik ČV hodnocením elektrického pole v uvažovaném médiu a určit riziko přeskoku na základě prahové přeskokové hodnoty.

Model je implementován metodou konečných prvků v softwaru Comsol Multiphysics a simulace je založena na řešení parciálních diferenciálních rovnic v matematickém modulu softwaru. Postup sestavení modelu je následovný:

- I. Sestavení 2D geometrie v preprocesoru a stanovení výpočetních parametrů
- II. Implementace modelu Poissonovo rovnice k vyřešení rovnic rozložení elektrického pole
- III. Stanovení okrajových podmínek
- IV. Realizace výpočtu a zpracování dat
- V. Zhodnocení výsledků simulace

Na obrázku 33 jsou kartografy výsledného elektrického pole dvou rozdílných konfigurací přípojníc. Konvenční design přípojníc se zachováním stejné délky elektrod i izolace je porovnán s konfigurací zakřivených elektrod. Intenzita elektrického pole je vyšší v návrhu se zarovnaným uspořádáním (9.15 kV/mm) oproti konfiguraci zakřivených elektrod (6.5 kV/mm). Pro oba případy je elektrické pole zesíleno v triple pointech.

V případě zarovnaných elektrod je navíc pozorována lepší homogenita elektrického pole v dielektriku. Výsledky elektrického pole v případě zakřivených elektrod jsou zohledněny v následném vývoji modelu.

Dalšího snížení intenzity pole je provedeno optimalizací tvaru dielektrika. V případě zapuštěného dielektrika jsou triple pointy eliminovány a intenzita pole klesne na 2.76 kV/mm, viz Příloha 4. Tato hodnota je stále blízko přeskokovému napětí vzduchu (3 kV/mm) a riziko vzniku ČV je vysoké, protože elektrody jsou v problematickém místě izolovány pouze vzduchem. Z toho důvodu je více vhodná varianta s prodlouženým dielektrikem na obrázku 33 vpravo.

V článku [35] se pomocí simulace studuje i vliv akumulace náboje v systému přípojníc. Z výsledků simulace plyne, že přítomnost prostorových nábojů uvnitř dielektrika indukovaných vnějšími vlivy teploty, tlaku a mechanického namáhání, vede ke ovlivnění celkového elektrického pole a zvýšení rizika vzniku částečných výbojů. Model uvažuje různé typy a velikost prostorového náboje rozloženého v různých místech systému a výsledné elektrické pole je v některých případech několikanásobně zesíleno. Závěrem simulace je předesláno, že v hybridních letadlech je kvůli vysokému namáhání vnějšími vlivy nutné instalovat dielektrika s minimálními sklony k akumulaci náboje, aby se zabránilo vzniku ČV. Alternativním řešením by mohlo být stínění přípojníc [35].

4 Realizace simulace

Důsledkem toho, že se práce opírá o nejaktuálnější studie, je zrcadlení současného vývoje vysokonapěťové techniky v textu. Jedním z nejčastějších simulovaných problémů jsou záležitosti zapouzdřených systémů.

V univerzitní laboratoři byla nádoba GIS podrobena řadě zkušebních postupů. Součástí testů systému byly zkoušky impulsním napětím při několika konfiguracích elektrod umístěných v nádobě. Z výzkumné povahy zkoušek plyne potřeba objasnění vlivu změny poloměru nádoby na rozložení intenzity elektrického pole v zapouzdřeném systému. Na základě výsledků zkoušek se zároveň klade otázka intenzifikace pole vlivem akumulovaného náboje na povrchu nádoby.

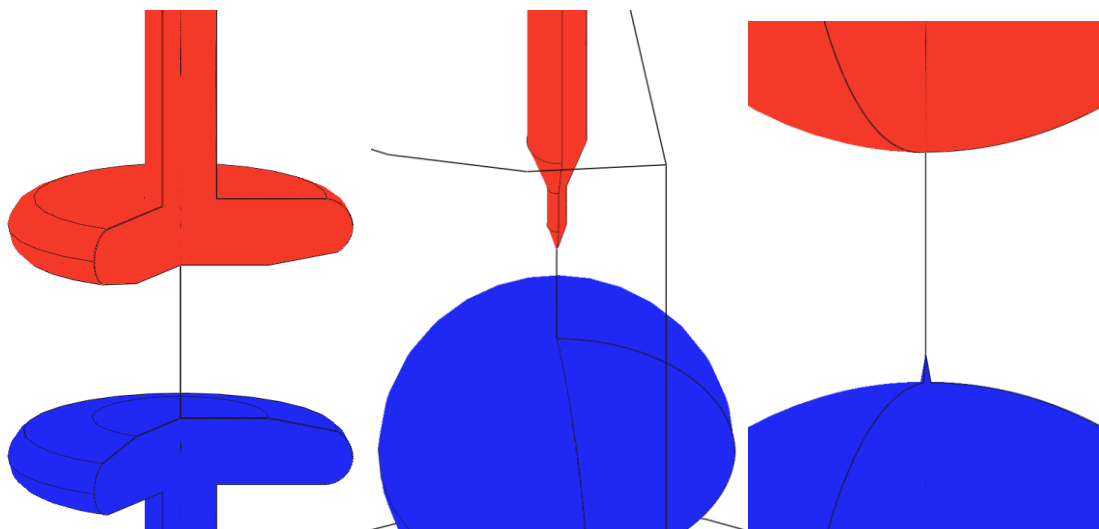
K objasnění těchto problémů je použita simulace v softwaru Agros2D.

4.1 Sestavení modelu

V ose uzemněné nádoby jsou modelovány následující konfigurace elektrod:

- I. Dvě rovinné elektrody
- II. Hrotová elektroda proti kulové elektrodě
- III. Kulová elektroda proti kulové elektrodě s jehlou

Geometrie modelu je utvořena v grafickém preprocesoru. Nádoba GIS i použité elektrody jsou osově souměrné, a proto je v Agrosu výpočet zjednodušen zavedením osově symetrického souřadnicového systému. Počátek souřadnicového systému je znázorněn na obrázku 47 v příloze 6. Simulované konfigurace elektrod jsou na obrázku 34.



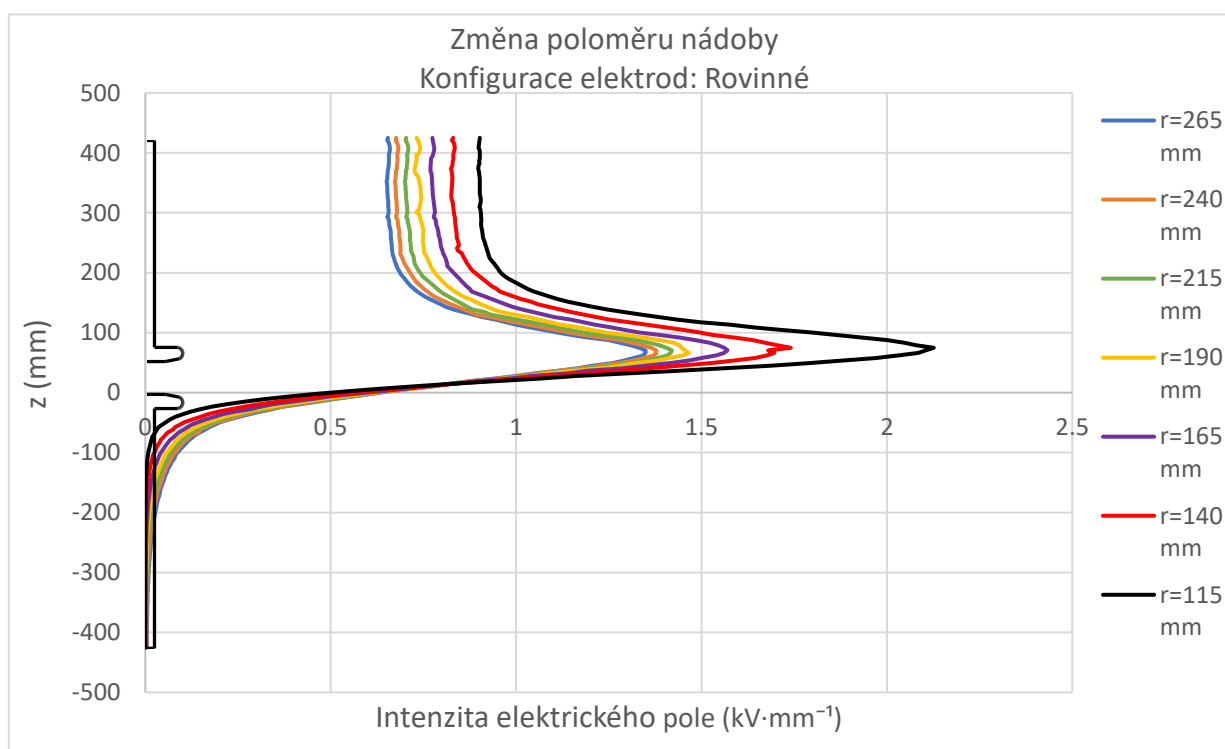
Obrázek 34: Modely elektrod

System je souměrný podle osy z . Poloměr nádoby je $r = 0.265 \text{ m}$. Nádoba a spodní elektroda jsou uzemněny. Na svrchní elektrodu je přivedeno napětí 200 kV. Izolačním médiem je vzduch. Na grafech je zobrazeno rozložení intenzity elektrického pole 100 mm od osy elektrod a následně mezi elektrodami. Intenzita elektrického pole je sledována ve dvou oblastech, viz obrázek 46 příloha 5.

4.2 Poloměr nádoby

Prvním motivem realizace simulace je objasnit vliv změny poloměru nádoby na rozložení intenzity elektrického pole v zapouzdřeném systému. Poloměr nádoby se snižuje s krokem 25 mm. Na základě lineárně se snižujícího poloměru se projeví linearita či nelinearita změny intenzity elektrického pole v jednotlivých místech uspořádání.

I. Dvě rovinné elektrody

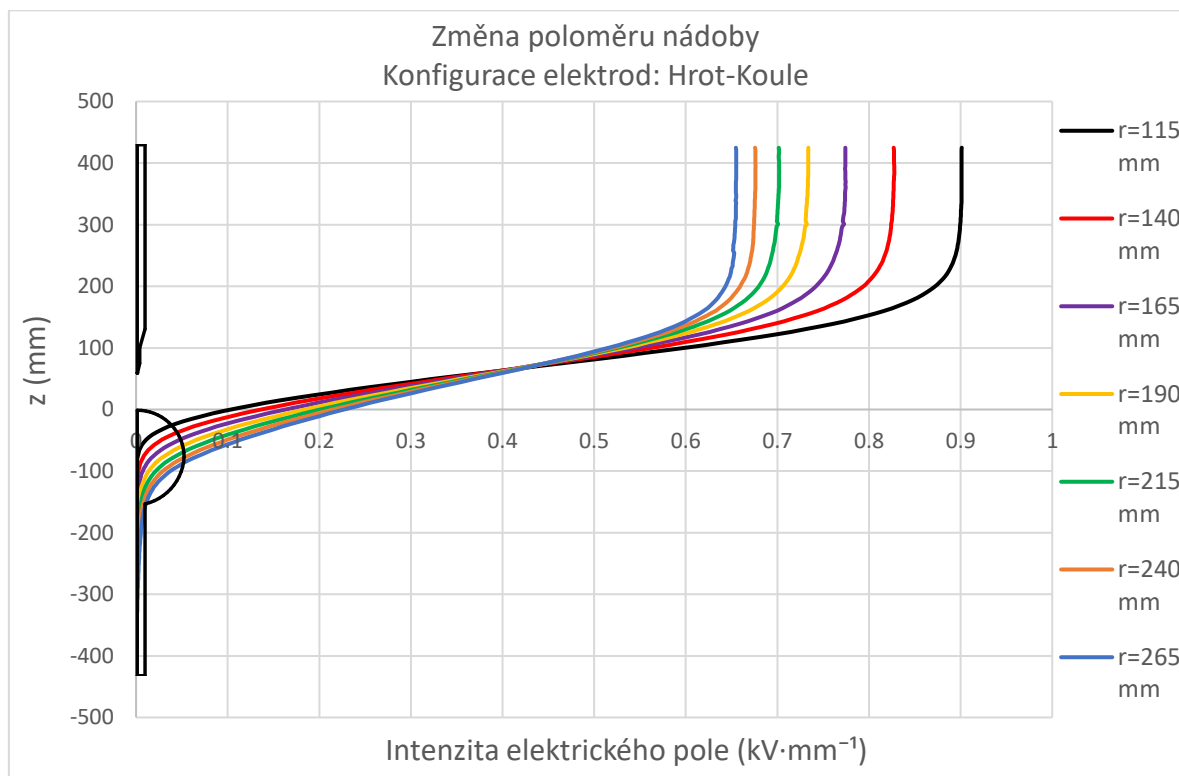


Obrázek 35: Rozložení intenzity elektrického pole v okolí rovinných elektrod

Na obrázku 35 je možné porovnat změnu intenzity elektrického pole při měnícím se poloměru válce. Postupným snižováním poloměru s krokem 25 mm dochází u prvních 4 iterací k lineárnímu nárůstu intenzity pole (modrá, oranžová, zelená, žlutá). Od 5. iterace

dochází k prudkému nárůstu, a to zejména v zakřivených částech napájené elektrody. U změny intenzity mezi elektrodami je rovněž patrná nelinearita. V tomto případě však nedochází k velkým rozdílům hodnot. Graf změny intenzity mezi elektrodami je na obrázku 48 v příloze 7. Výsledky z grafického postprocesoru pro krajní rozměry nádoby jsou na obrázku 49 v příloze 8.

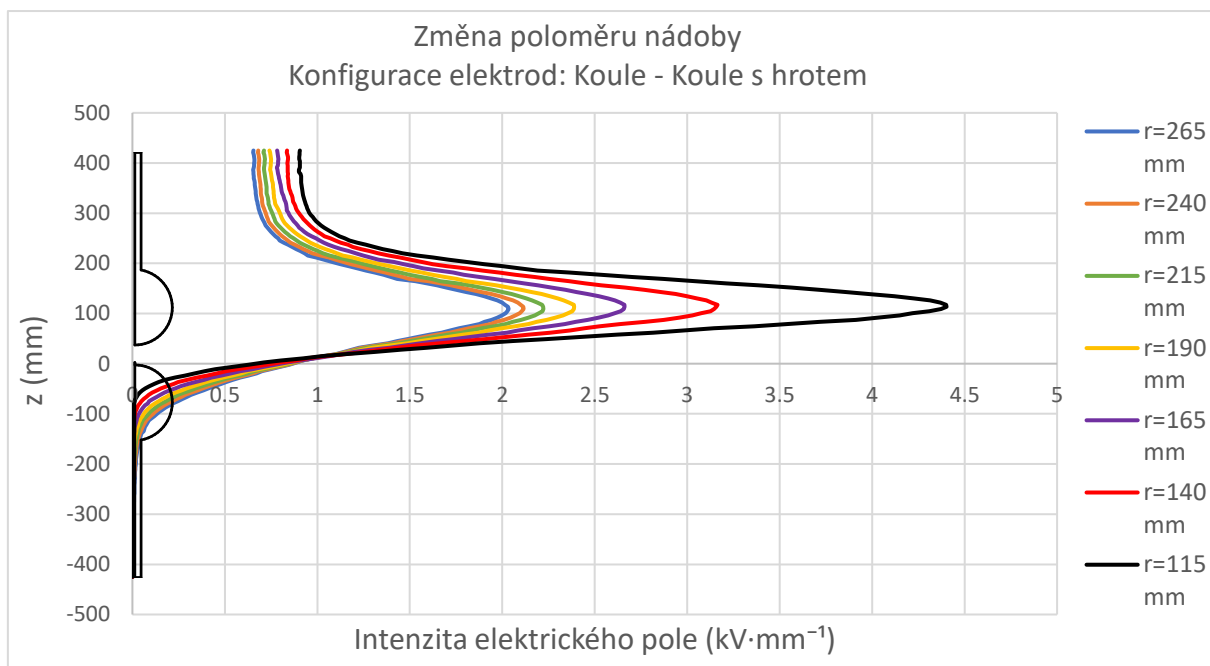
II. Hrot proti kouli



Obrázek 36: Rozložení intenzity elektrického pole v okolí hrotové a kulové elektrody

Další simulovanou konfigurací elektrod byl hrot proti uzemněné kouli. Na výsledcích není patrná významná nelinearita, jako v případě rovinných elektrod. Na obrázku 50 v příloze 9 lze pozorovat silné namáhání v oblasti hrotu, kde dochází ke zvýšení intenzity elektrického pole. V tomto místě intenzita dosahuje několika desítek $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Gradient pole v bezprostřední blízkosti hrotu prudce klesá a v oblasti 10 cm od osy elektrod je intenzita snížena na hodnoty na obrázku 36. Takto soustředěné nehomogenní elektrické pole je navíc velmi málo ovlivněno změnou rozměru nádoby, a to simulace potvrzuje na obrázku 51 v příloze 10.

III. Koule proti kouli s jehlou



Obrázek 37: Rozložení intenzity elektrického pole v okolí kulových elektrod

Třetí simulovanou konfigurací je koule proti uzemněné kouli, která má ve své ose umístěnou jehlu. Přestože je na špičce jehly intenzita mnohem silnější než v okolí kulových elektrod, její přítomnost nemá skoro žádný vliv na celkové rozložení intenzity, to je ověřené simulací na obrázku 52 v příloze 11. Pole je kolem napájené elektrody více homogenní než v případě rovinných elektrod. To je možnou příčinou toho, že k nelinearitě nárůstu intenzity je pozorovatelná už v prvních iteracích.

4.3 Akumulace náboje

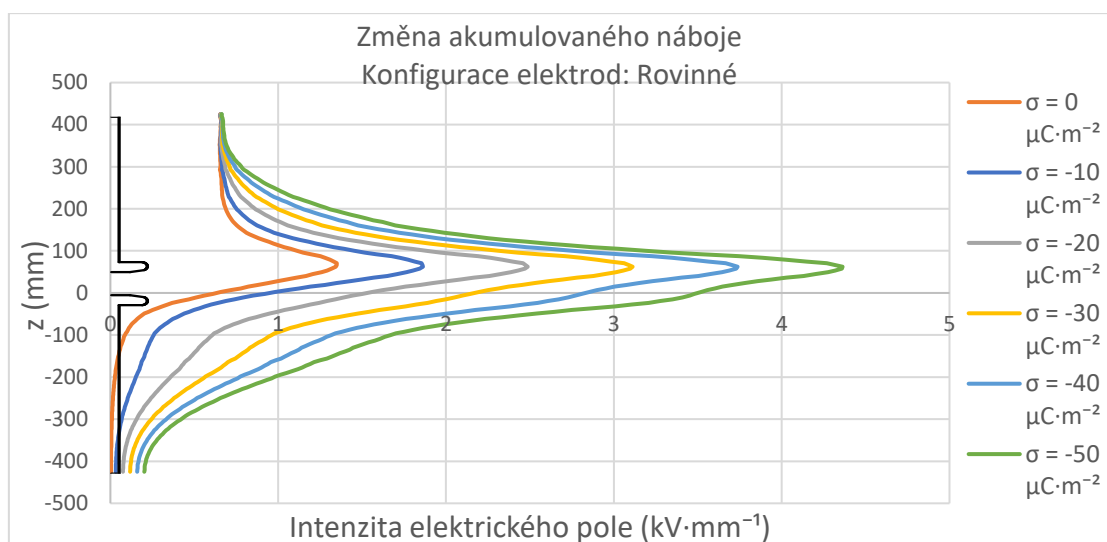
Nejčastěji se v zapouzdřených systémech simuluje povrchová akumulace náboje. Izolace GIS je optimalizována tak, aby se akumulace náboje snížila na minimum. Jak je vysvětleno v kapitole 2.2.2, problematika akumulace náboje je velmi komplexní a je mnohdy náročné předpovědět, co je nosičem náboje, kde se náboj nahromadí a jak ovlivní provoz zařízení.

Důsledkem opakovaných zkoušek může dojít k akumulaci nabitých částic na nádobě GIS. V laboratoři došlo k několika přeskokům mezi elektrodou a nádobou, přičemž vzdálenost mezi elektrodami byla nižší. Cílem této kapitoly je zjistit, jak může akumulace nabitých částic na nádobě ovlivnit celkové elektrické pole.

4.3.1 Různé úrovně nabitých částic

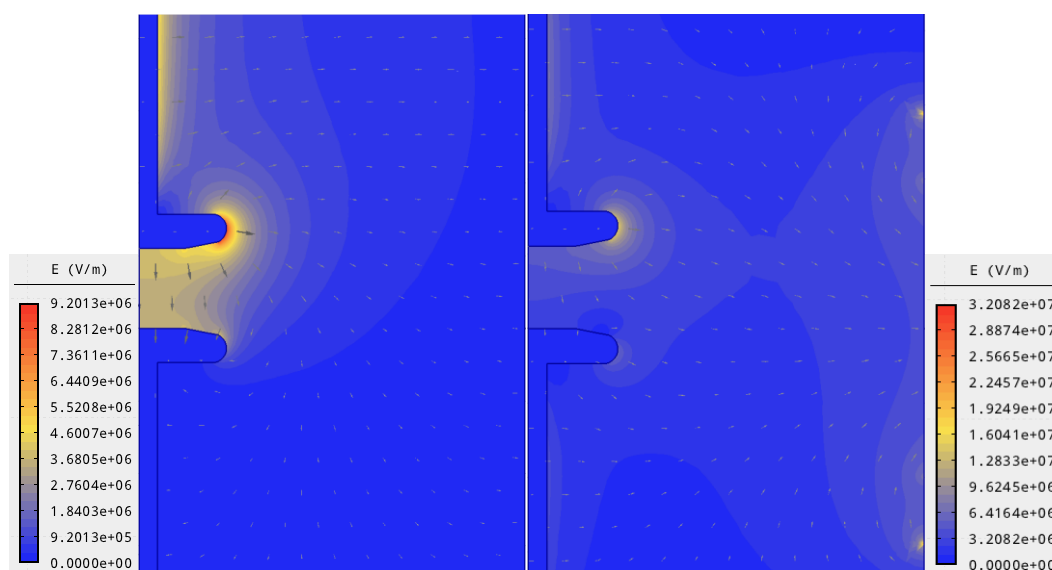
Z rešeršní části plyne, že ve stejnosměrných systémech může vést dlouhodobá akumulace náboje ke vzniku strimérového výboje. Vzhledem k řadě možných příčin akumulace je přesná predikce úrovně akumulovaného náboje náročná a během laboratorních testů nebyla změřena. Nicméně, některé zdroje uvádí hodnoty prostorového náboje v řádu desítek až stovek mikrocoulombů na metr čtvereční. V této části jsem pomocí simulace studoval vliv změny velikosti náboje na intenzitu elektrického pole.

K simulaci povrchového náboje na nádobě jsem zvolil oblast blízko elektrodám. K reálnější distribuci náboje jsem vytvořil oblasti s menší akumulací, čímž se sníží rušivé účinky vyvolané rozhraním nabitě a nenabitě oblasti. Uvažované rozložení akumulace náboje na nádobě je na obrázku 53 v příloze 12.



Obrázek 38: Rozložení intenzity elektrického pole v okolí rovinných elektrod pro různé úrovně nabitých částic

Na obrázku 38 je patrná téměř lineární závislost změny intenzity elektrického pole v blízkosti elektrod při rostoucí akumulaci plošného náboje. V nejhorsím uvažovaném případě ($\sigma = -50 \mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$) dosáhla intenzita ve vzdálenosti 4 cm od elektrody velikosti větší než $4 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$. Uvažujeme-li prudký gradient nárůstu intenzity v oblasti okrajů napájené elektrody a přeskokového napětí vzduchu $3 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$, riziková oblast vzniku výbojové aktivity se rozšiřuje. Rostoucí intenzita elektrického pole kolem elektrod navíc způsobuje efektivnější ionizaci plynu a tvoří tak lepší podmínky pro akumulaci náboje a přeskok [40]. Intenzita elektrického pole je u napájené elektrody posílena a u uzemněné elektrody potlačena, plyne to z výsledků na obrázku 54 v příloze 13. Výsledky pro konfigurace hrotových elektrod jsou uvedeny v přílohách 14 – 17.



Obrázek 39: Intenzita elektrického pole bez akumulovaného náboje (vlevo) a s povrchovým nábojem $-30 \mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ (vpravo).

5 Závěr

Rozsáhlé studium problematiky uplatnění softwarových simulací v technice vysokého napětí mi umožnilo nahlédnout do aktuálního dění ve světě energetiky. Propojení stále se rozvíjející výpočetní techniky s rozličnými problémy provozu vysokonapěťových zařízení se odráží ve schopnosti simulovat více a více komplikované záležitosti, které se objevují při výzkumech, projektování a provozu nových zařízení, a dokonce i způsobů přenosu a distribuce elektrické energie. Postupné obohacování znalostí v oboru techniky vysokého napětí ve mně podnítilo odpovědnost zpracovat kvalitní diplomovou práci a objasnit skutečný smysl uplatnění softwarové simulace v tomto skutečně zajímavém oboru.

Rešeršní část práce je průřezem techniky vysokého napětí. Simulace zkrátka prolíná všechny aktuální trendy energetiky a informace na vědeckých fórech často působí jako otevřené okno do budoucnosti. S jejím uplatněním v odvětví obnovitelných zdrojů jsou spjaty i modely stejnosměrných systémů. Velmi obvyklým uplatněním simulací poslední doby je koordinace izolace zapouzdřených systémů. Ve střídavých přenosových systémech se často simulují velmi konkrétní problémy, které jsou často způsobeny rostoucí poptávkou po elektrické energii a navyšováním požadavků na již provozovaná zařízení.

Bez správné korekce empirickými vztahy a provozními zkušenostmi neposkytuje simulace dostatečně přesné výsledky. Nicméně, správným zpracováním simulace lze dosáhnout nových, levnějších alternativ řešení problémů, které vyplývají z potřeby optimalizace návrhu a provozu zařízení. Dalo by se říci, že smysl existence simulace se opírá o potřebu ušetření finančních a časových prostředků.

V průběhu psaní diplomové práce jsem si uvědomil, že to, co je někde malý problém, může být v jiných okolnostech kritická záležitost. Na základě získaných znalostí věřím, že počítačová simulace bude stále důvěryhodnější oporou světových podniků na poli vysokonapěťové techniky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Z. Liu, J. Wang, M. Wang, Y. Lu, R. huang and Y. Chen, "Finite Element Method and Charge Coupling Method for Distortion Field of AC Transmission Line," 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Beijing, China, 2019, pp. 1049-1053, doi: 10.1109/iSPEC48194.2019.8975080.
- [2] HAGINOMORI, Eiichi, Tadashi KOSHIDUKA, Junichi ARAI a Hisatochi IKEDA. *Power System Transient Analysis: Theory and Practice using Simulation Programs (ATP-EMTP)*. United Kingdom: John Wiley, 2016.
- [3] R. Oshiro, Y. Hachiman, T. Shiozuka and E. Kaneko, "Proposal of EMTP analysis model for a surge phenomenon arising on a power cable assembled in a transmission tower," 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy (ACES), Florence, 2017, pp. 1-2, doi: 10.23919/ROPACES.2017.7916368.
- [4] C. C. A. C and F. Román, "550 kV HVDC Transmission Line Surge Arrester: EMTP-ATP Simulation Model," 2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA), São Paulo, Brazil, 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/SIPDA47030.2019.8951566.
- [5] FONTEIJNE, Jacob a Kema LABORATORIES. *Simulation Versus Laboratory Testing*. INMR [online]. 2018, 17. listopadu 2018, 2018, 1 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.inmr.com/simulation-versus-laboratory-testing/>
- [6] Z. Anane and A. Bayadi, "Implantation of a static model of the corona effect in the ATP-EMTP software," International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications, WOSSPA, Tipaza, 2011, pp. 39-42, doi: 10.1109/WOSSPA.2011.5931407.
- [7] H. Illias, Low Tau Jian, A. H. A. Bakar and H. Mokhlis, "Partial discharge simulation under various applied voltage waveforms," 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, 2012, pp. 967-972, doi: 10.1109/PECon.2012.6450358.
- [8] MÜLLEROVÁ, Eva. *Průvodce technikou vysokého napětí* [online]. 2020, 1 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://phix.zcu.cz/moodle/course/view.php?id=4784>
- [9] FOLEY, Alexandra. *Enhancing Transmission Line Performance:: Using Simulation to Optimize Design*. COMSOL NEWS: High-Voltage Engineering [online]. 2019, 24-25 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/offers/comsol-news-2019-special-edition-power>
- [10] QIN, YUHANG. *OPTIMIZING A GIS FOR HIGHVOLTAGE DISTRIBUTION WITH MULTIPHYSICS SIMULATION*. COMSOL NEWS: High-Voltage Engineering [online]. 2019, 26-27 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/offers/comsol-news-2019-special-edition-power>

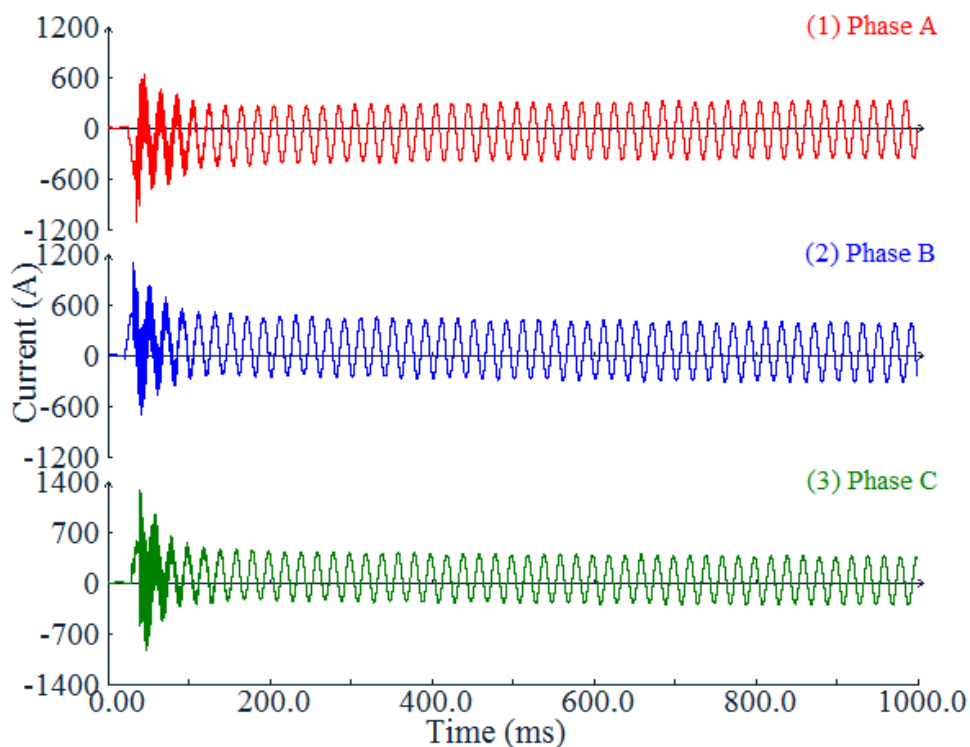
- [11] JOHNSON, DEXTER. SIMULATION ENABLES THE NEXT GENERATION OF POWER TRANSFORMERS AND SHUNT REACTORS. *COMSOL NEWS: High-Voltage Engineering* [online]. 2019, 29-31 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/offers/comsol-news-2019-special-edition-power>
- [12] HAND, JENNIFER. FROM SPREADSHEETS TO MULTIPHYSICS APPLICATIONS, ABB CONTINUES TO POWER UP THE TRANSFORMER INDUSTRY. *COMSOL NEWS: High-Voltage Engineering* [online]. 2019, 6-9 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/offers/comsol-news-2019-special-edition-power>
- [13] HAND, JENNIFER. NATIONAL GRID MODELS UNDERGROUND CABLE ROUTES. *COMSOL NEWS: High-Voltage Engineering* [online]. 2019, 10-12 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/offers/comsol-news-2019-special-edition-power>
- [14] QIQI, ZHANG. EFFICIENT GRID OPERATION AND MAINTENANCE WITH SIMULATION APPS. *COMSOL NEWS: High-Voltage Engineering* [online]. 2019, 42-43 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/offers/comsol-news-2019-special-edition-power>
- [15] CONRAD, ZACK. TIPTOEING THROUGH THE TULIPS TO PROTECT POWER PLANTS. *COMSOL NEWS: High-Voltage Engineering* [online]. 2019, 34-36 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/offers/comsol-news-2019-special-edition-power>
- [16] S. A. PASTROMAS, K. MAIMARIS, I. K. STASINOS, I. A. NAXAKIS, E. C. PYSRGIOTI, "Assessment of Wind Turbine Grounding System," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642241, [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8642241>
- [17] H. ZHOU et al., "Review of charge accumulation on spacers of gas insulated equipment at DC stress," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 496-517, Sept. 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.00820, [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8928282>
- [18] LEMAN, JON T. a ROBERT G. OLSEN. Bulk FDTD Simulation of Distributed Corona Effects and Overvoltage Profiles for HSIL Transmission Line Design. *ENERGIES* [online]. 2020, 2020, 22 [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13102474>
- [19] BARRADAS, RAPHAEL P.D.S.; ROCHA, GABRIEL V.S.; MUNIZ, JOÃO R.S.; BEZERRA, UBIRATAN H.; NUNES, MARCUS V.A.; SILVA, JUCILENO S.E 2020. "Methodology for Analysis of Electric Distribution Network Criticality Due to Direct Lightning Discharges" *Energies* 13, no. 7: 1580. <https://doi.org/10.3390/en13071580>

- [20] Z. LI a X. JIANG, "Simulation of Rime Ice Accretion on Wind Turbine Blade," 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279794.
- [21] Zhao, Yang; Wang, Xi; Zhou, Qibin; Wang, Zhenxing; Bian, Xiaoyan. 2020. "Numerical Study of Lightning Protection of Wind Turbine Blade with De-Icing Electrical Heating System" *Energies* 13, no. 3: 691. <https://doi.org/10.3390/en13030691>
- [22] S. V. Smirnov, G. A. Evdokunin, A. D. Petrova and A. S. Brilinskii, "Computer Simulation of Transient Processes in Hybrid Generator Circuit Breaker During Interruption of Short Circuit Current," 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), 2020, pp. 1320-1325, doi: 10.1109/EIconRus49466.2020.9039412.
- [23] H. Xu, J. Zhang, G. Shi, S. Hu and Y. Qin, "Research on Simulation and On-site Inspection Technology of 500kV Mechanical HVDC Circuit Breaker," 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9280036.
- [24] T. Arvin, J. He, N. Weise and T. Zhao, "Modeling and Simulation of a 20kV Ultra-Fast DC Circuit Breaker for Electric Shipboard Applications," 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2020, pp. 795-801, doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161624.
- [25] M. T. Dhotre, F. Agostini and S. Kotilainen, "CFD Simulation of a High Voltage Circuit Breaker Coupled with a Mechanical Operating Mechanism," 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2019, pp. 440-443, doi: 10.1109/EIC43217.2019.9046599.
- [26] KÜCHLER, Andreas. *High Voltage Engineering*. GERMANY: Springer Vieweg, 2018. 650 s. ISBN 978-3-642-11992-7.
- [27] Y. Ma, G. Qian, H. Ma, W. Wang, D. Xu and Z. Ning, "Simulation method for large current opening process of circuit breaker based on damped oscillating voltage," 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2020, pp. 546-548, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158587.
- [28] D. Ning et al., "Research on Key Technical Problem of System Commissioning of Sutong GIL Utility Tunnel Project," 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 2020, pp. 1928-1932, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136418.
- [29] A. Gong et al., "Transient Overvoltage Simulation Analysis of 1100kV Long Distance GIL," 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2019, pp. 596-599, doi: 10.1109/CEIDP47102.2019.9009836.

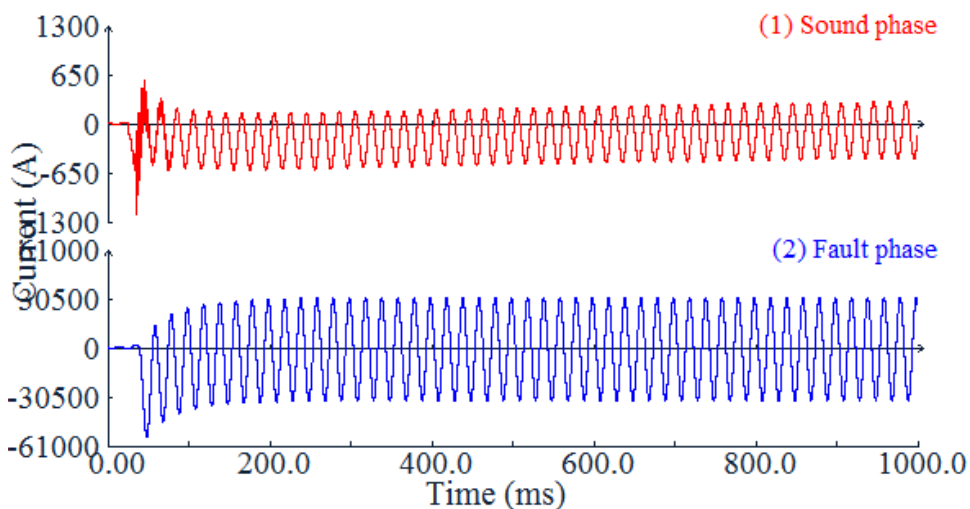
- [30] X. Wenjia and X. Zutao, "Influence of Gas-Insulated Transmission Line (GIL) on Energization Overvoltage," 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602353.
- [31] H. Niu et al., "Multi-Physical Coupling Field Study of 500 kV GIL: Simulation, Characteristics, and Analysis," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131439-131448, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009694.
- [32] M. Borghei, M. Ghassemi, J. M. Rodriguez-Serna and R. Albarracin, "A Finite-Element-Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2991589.
- [33] Rodríguez-Serna JM, Albarracín-Sánchez R. Numerical Simulation of Temperature and Pressure Changes due to Partial Discharges in Spherical Cavities Within Solid Dielectrics at Different Ageing Conditions. *Energies*. 2019; 12(24):4771. <https://doi.org/10.3390/en12244771>
- [34] C. Pan, G. Chen, J. Tang and K. Wu, "Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, pp. 981-1000, June 2019, doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.
- [35] Mallys Banda, David Malec, Jean-Pascal Cambronner. Simulation of Space Charge Impact on Partial Discharge Inception Voltage in Power Busbars Dedicated to Future Hybrid Aircrafts. *Circuits and Systems*, 2018, 09 (11), pp.196-212. 10.4236/cs.2018.911018. hal-02182458
- [36] N. Ghorbel, A. Kallel, G. Damamme, Analytical model of secondary electron emission yield in electron beam irradiated insulators, *Micron*, Volume 112, 2018, Pages 35-41, ISSN 0968-4328, <https://doi.org/10.1016/j.micron.2018.06.002>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968432818301434>)
- [37] Li, Xiaoran, Anbang, Sun, Guanjun, Zhang, and Jannis, Teunissen. "A computational study of positive streamers interacting with dielectrics". *Plasma Sources Science and Technology* 29, no.6 (2020): 065004.
- [38] X. Li, A. Sun and J. Teunissen, "A computational study of negative surface discharges: Characteristics of surface streamers and surface charges," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 4, pp. 1178-1186, Aug. 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008880.
- [39] HÁBA, Tomáš. Numerické modely klouzavých výbojů ve střídavém elektrickém poli [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73942/F3-DP-2018-Haba-Tomas-Numericky_model_klouzavych_vyboju.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Martin Kněnický.

- [40] Akram S, Castellon J, Agnel S. *Progress in Gas/Solid Interface Charging Phenomena*. *Coatings*. 2020; 10(12):1184.
<https://doi.org/10.3390/coatings10121184>

Příloha 1

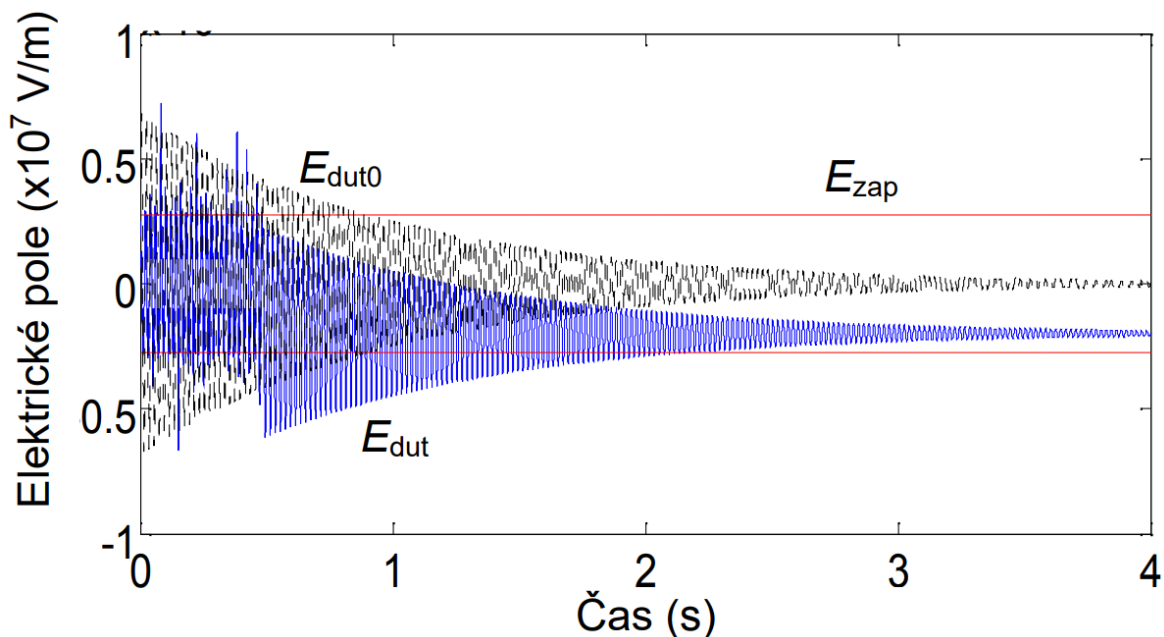


Obrázek 40: Vypínání odlehčeného vedení v napětové nule a vyvinutí maximální stejnosměrné složky proudu [28]

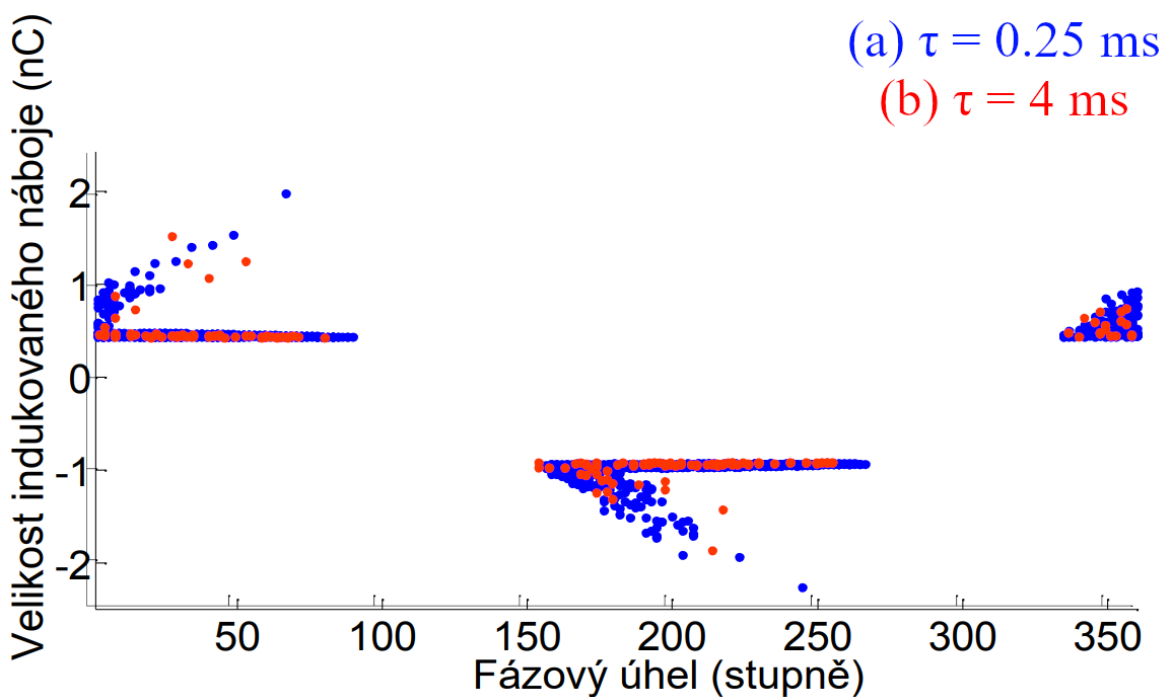


Obrázek 41: Vliv jednofázového zemního zkratu (modrá) nezatiženého vedení na zdravou fázi (červená) [28]

Příloha 2

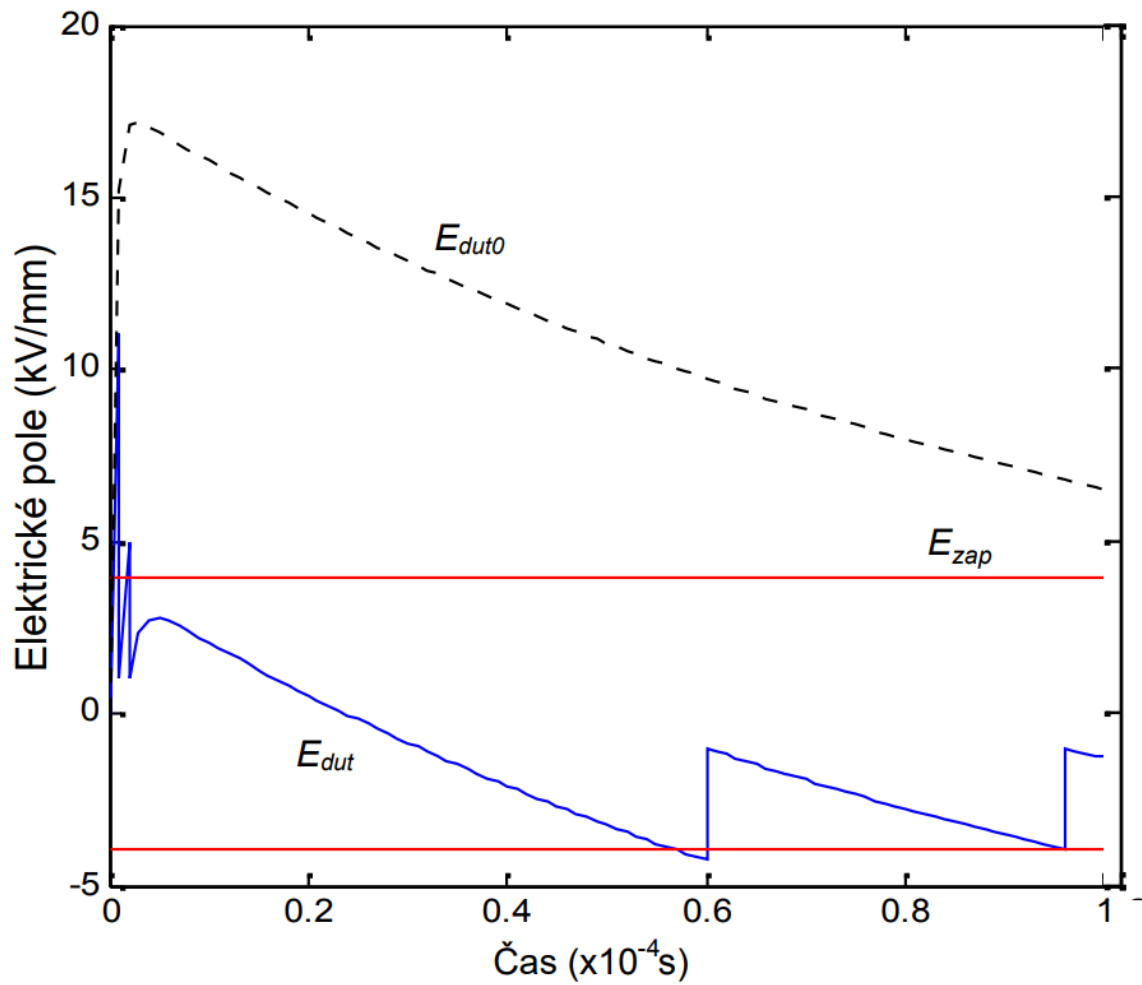


Obrázek 42: Intenzita elektrického pole v dutince po přiložení tlumeného sinusového napětí [7]



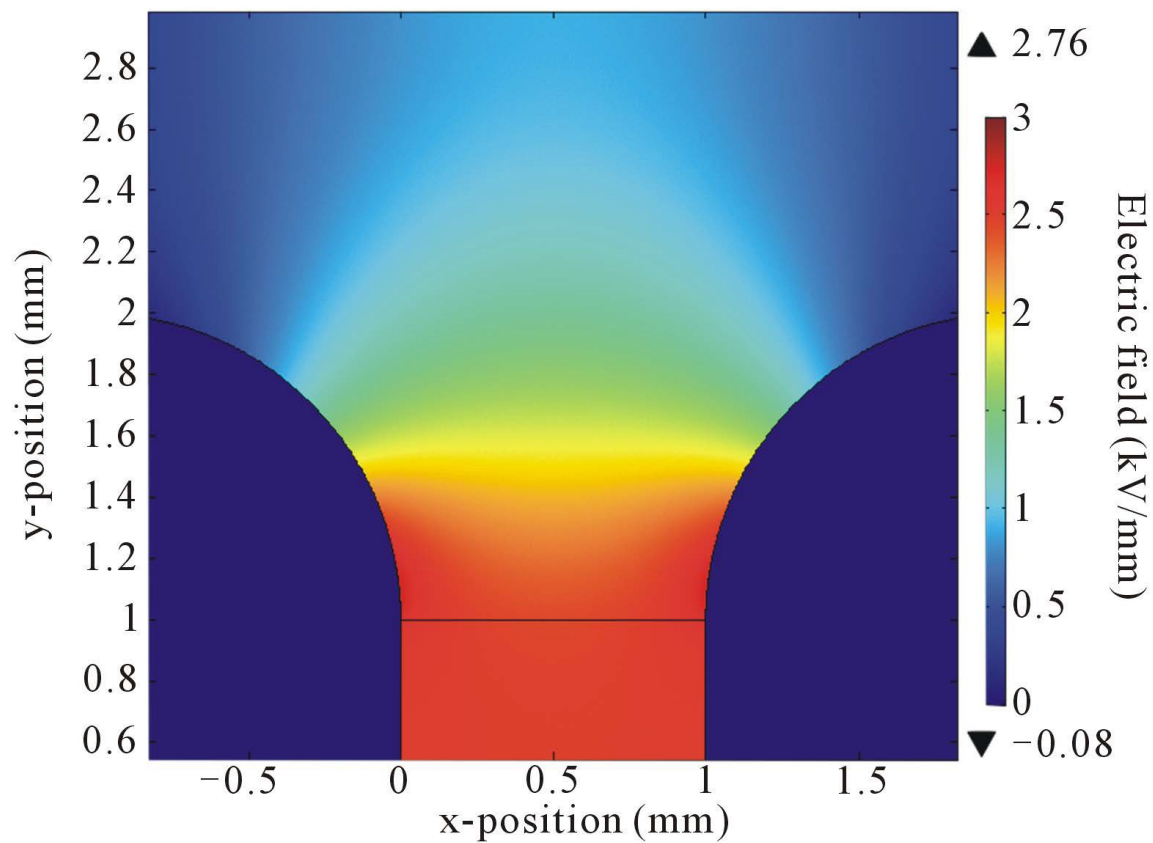
Obrázek 43: PRPD pro rozdílnou časovou konstantu τ pro tlumené sinusové napětí [7]

Příloha 3



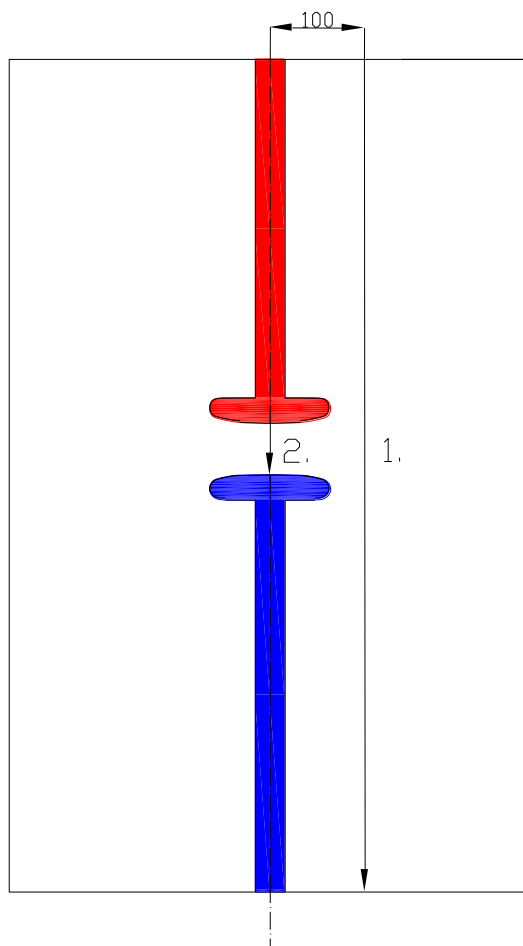
Obrázek 44: Průběh intenzity elektrického pole v dutince namáhané napěťovým impulsem [7]

Příloha 4



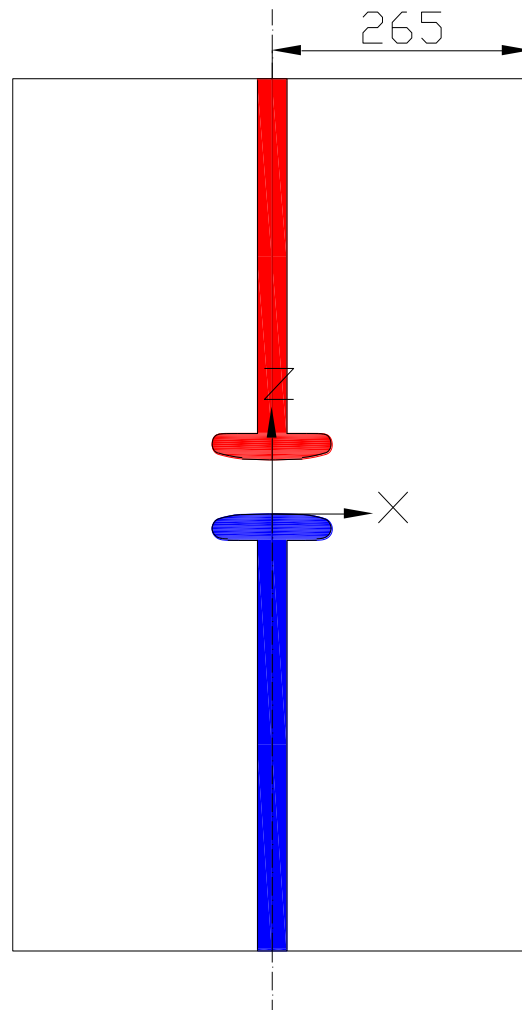
Obrázek 45: Konfigurace přípojnic se zapuštěným dielektrikem [35]

Příloha 5



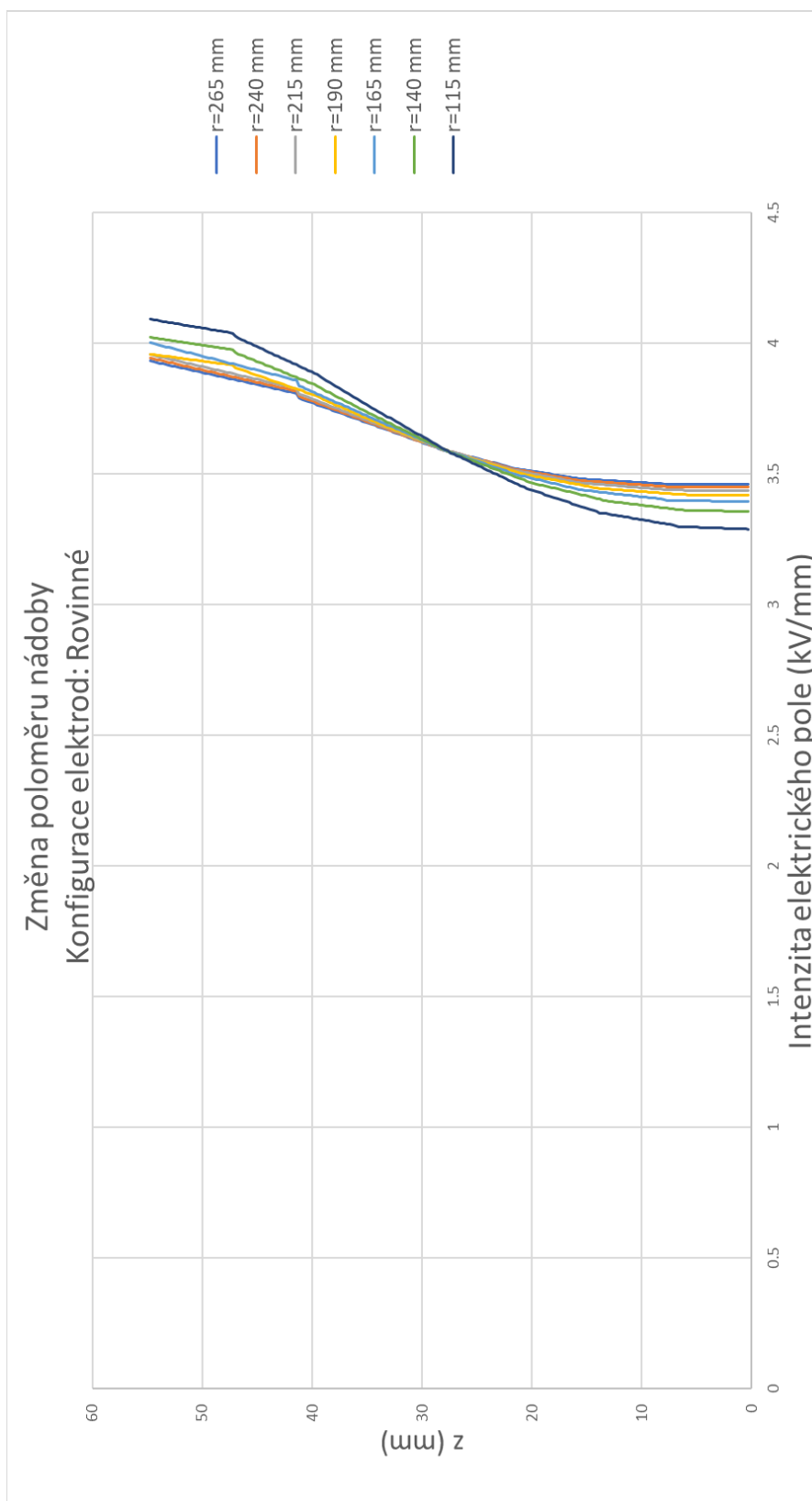
Obrázek 46: Dvě oblasti sledování změn elektrického pole

Příloha 6



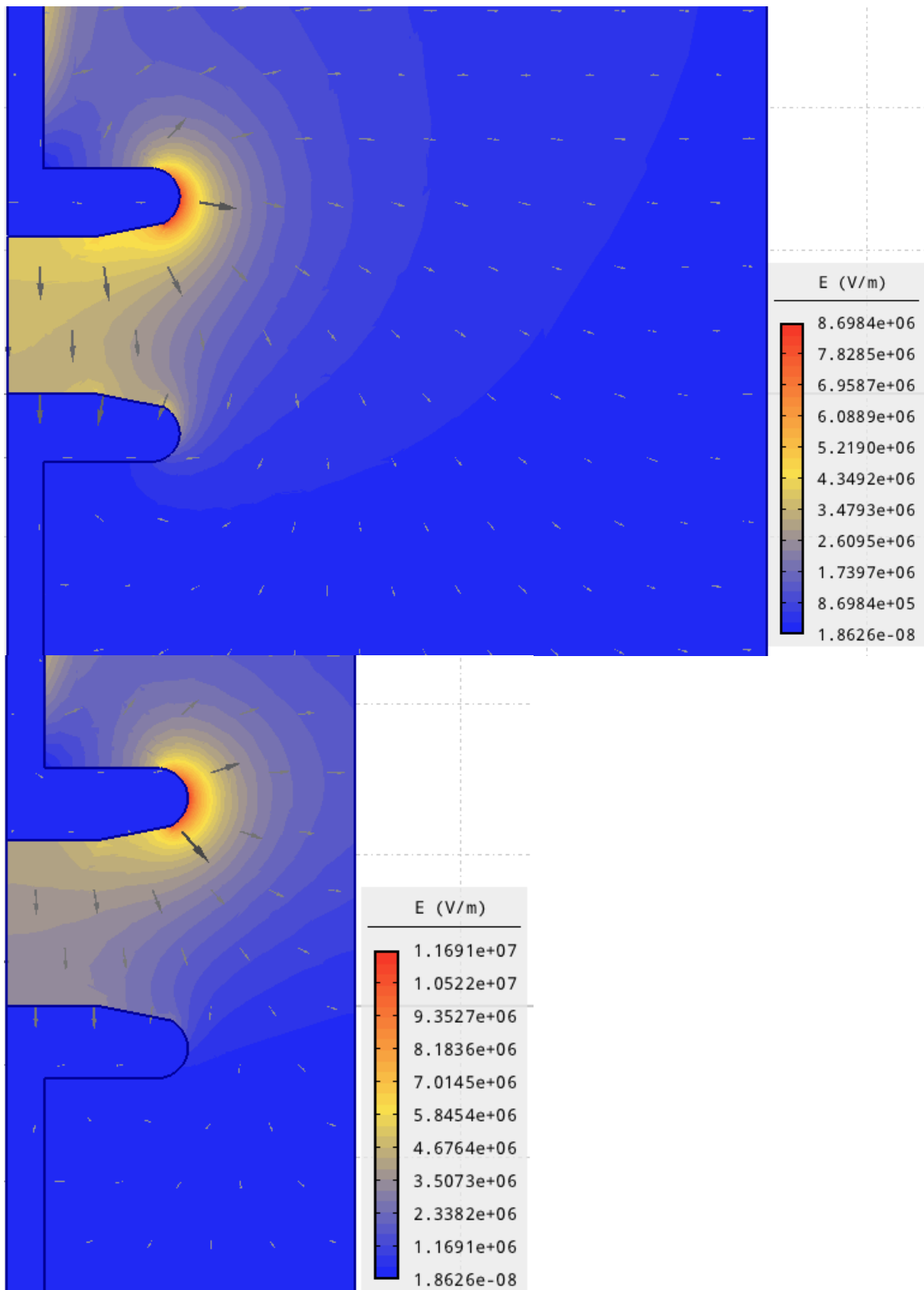
Obrázek 47: Počátek souřadnicového systému modelu

Příloha 7



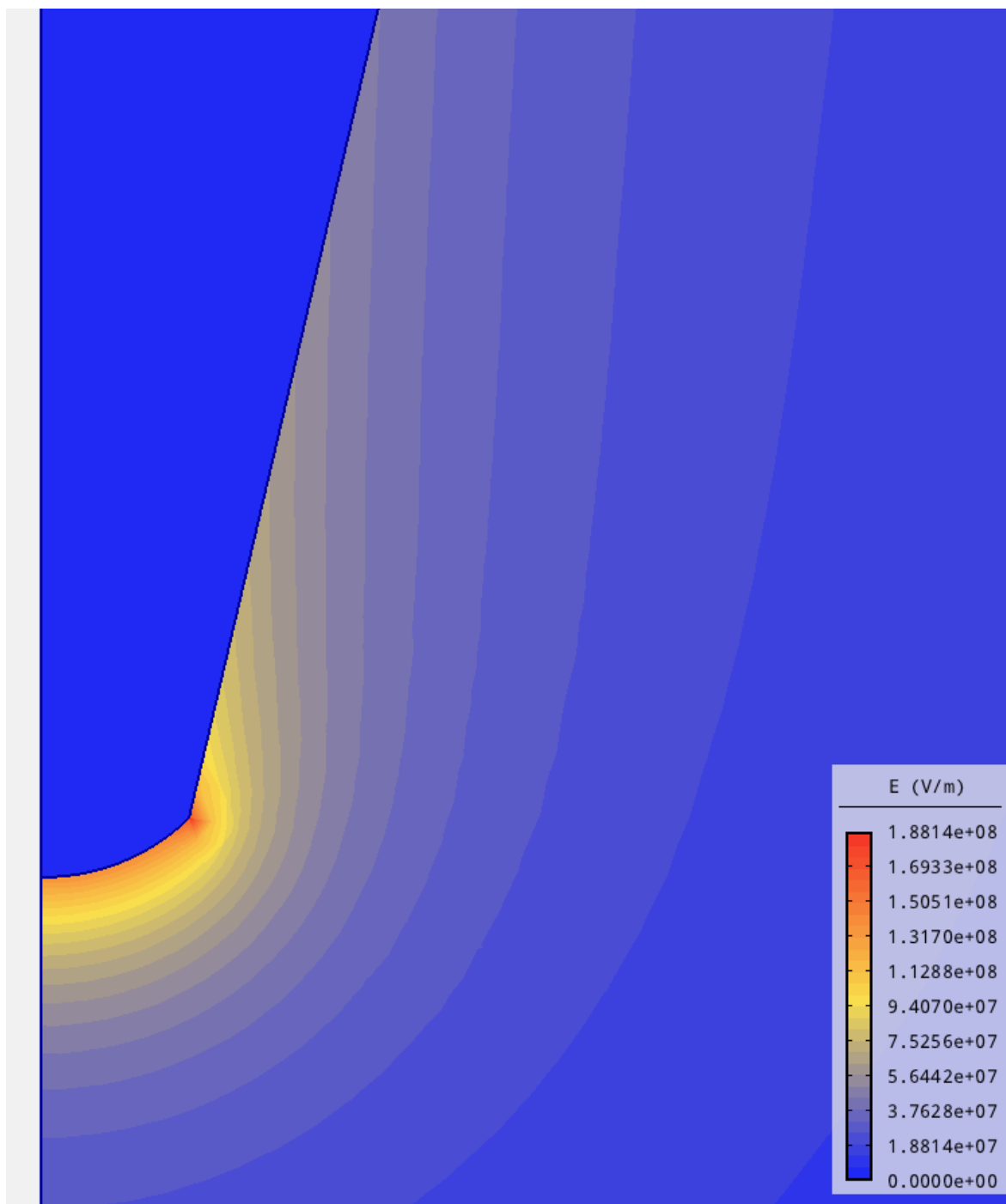
Obrázek 48: Rozložení intenzity elektrického pole mezi rovinnými elektrodami

Příloha 8



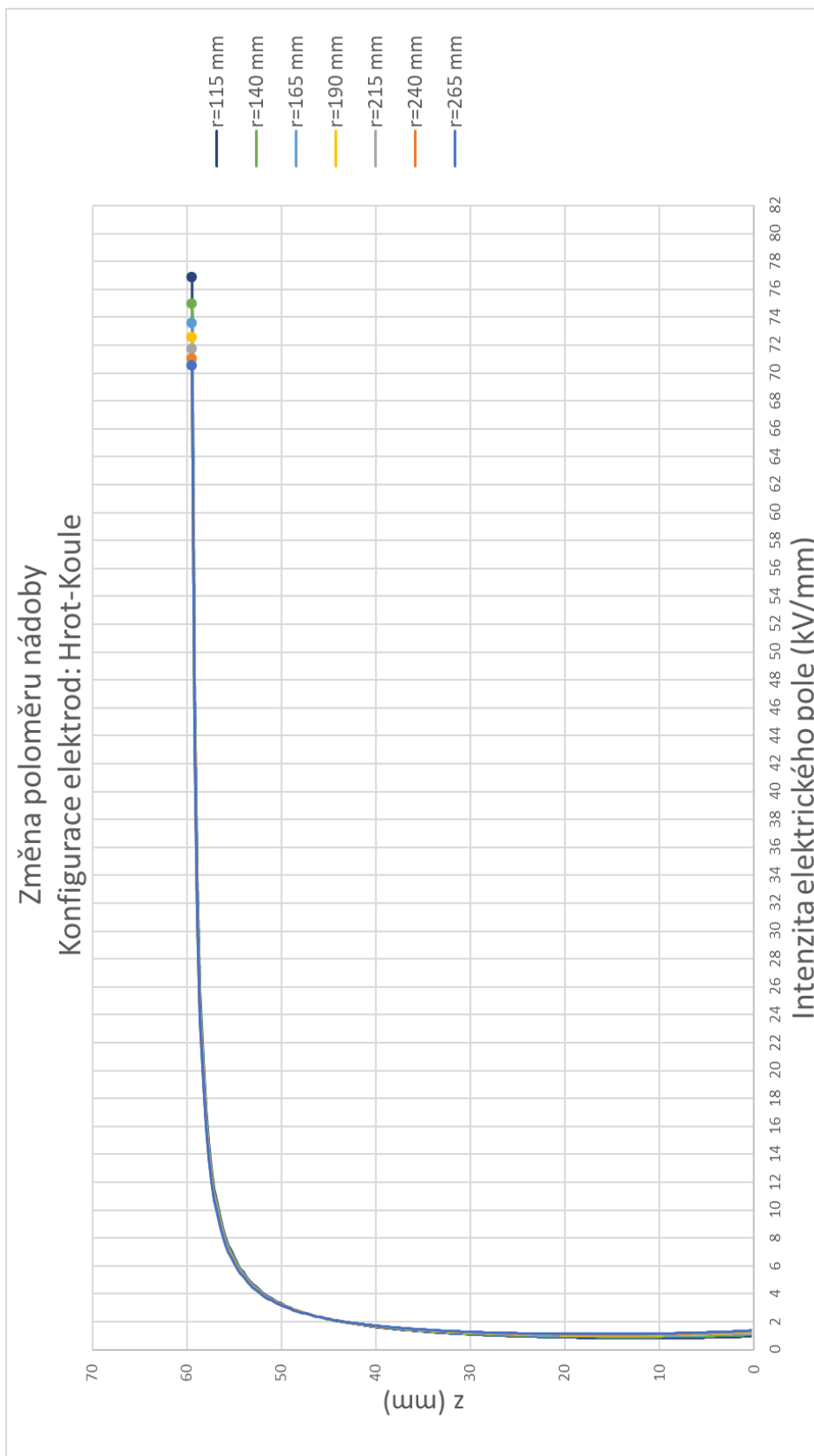
Obrázek 49: Rozložení intenzity elektrického pole pro nádobu s $r = 0.265$ (nahore) a s $r = 0.115$ (dole)

Příloha 9



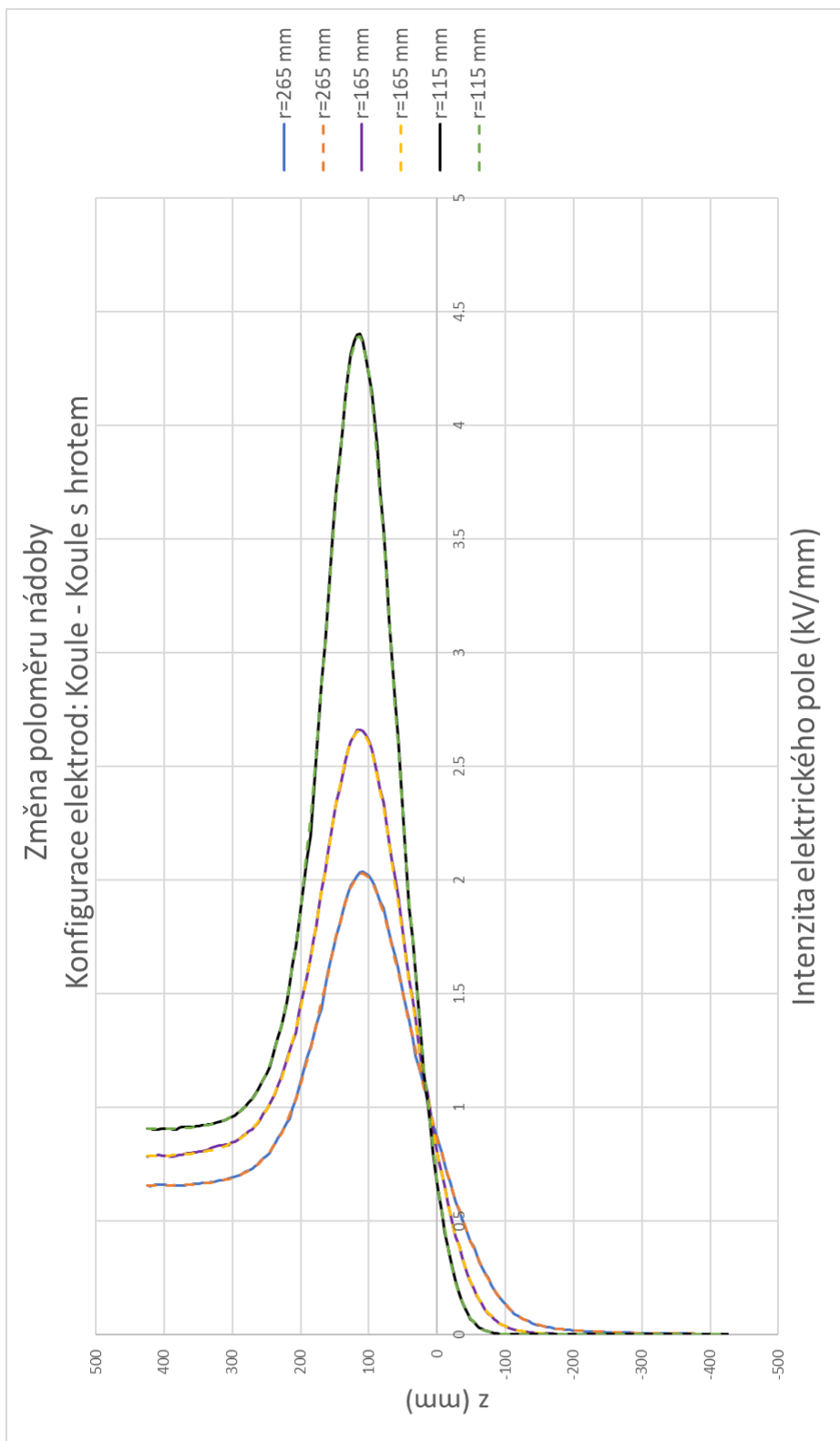
Obrázek 50: Rozložení intenzity elektrického pole okolo hrotu

Příloha 10



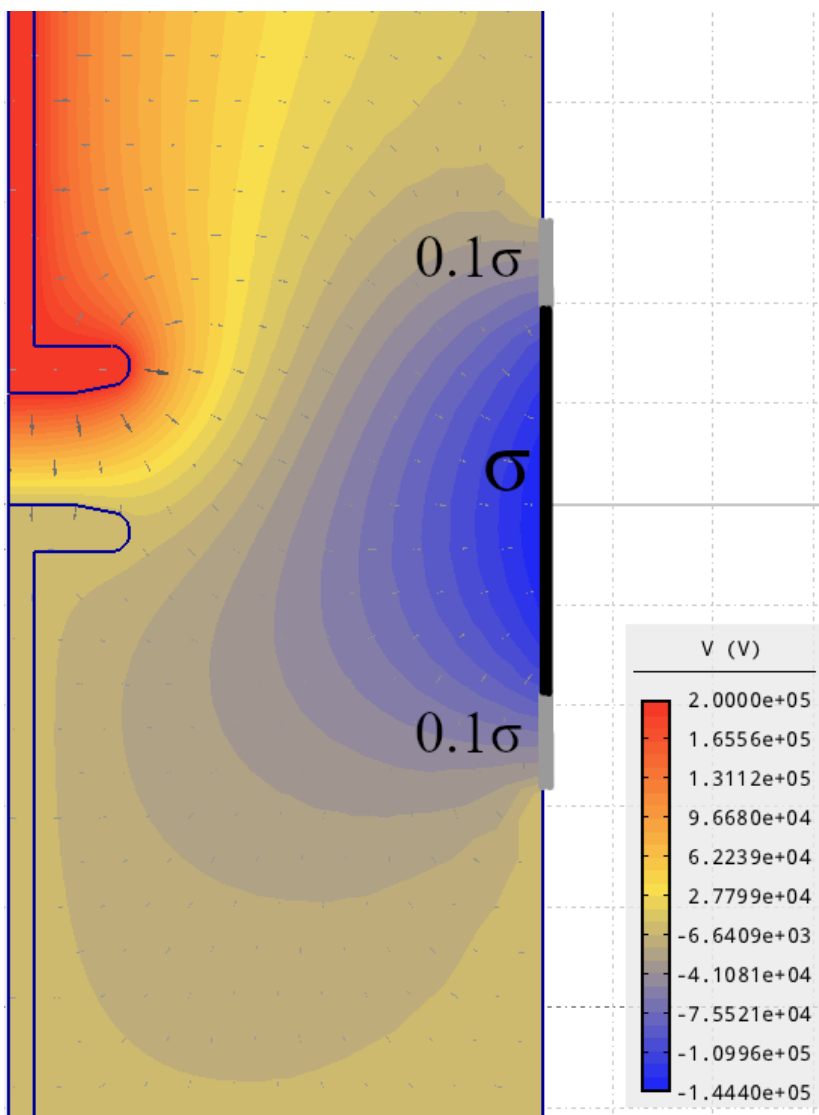
Obrázek 51: Intenzita elektrického pole mezi hrotem a koulí. Vzdálenost hrotu a uzemněné koule je 60 mm.

Příloha 11



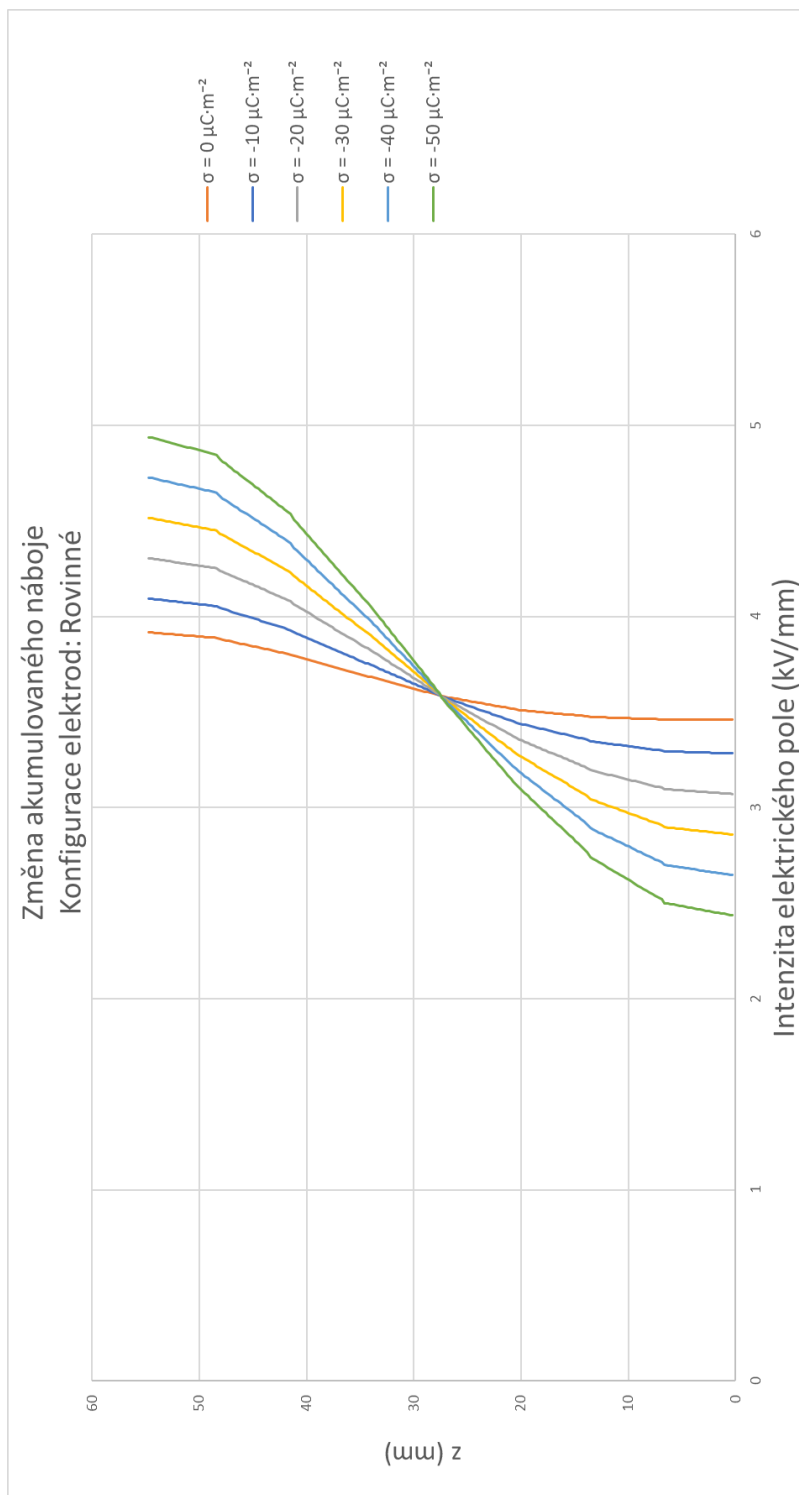
Obrázek 52: Vliv jehly na rozložení intenzity kolem kulových elektrod. Bez jehly – plná čára. S jehlou – přerušovaná čára

Příloha 12



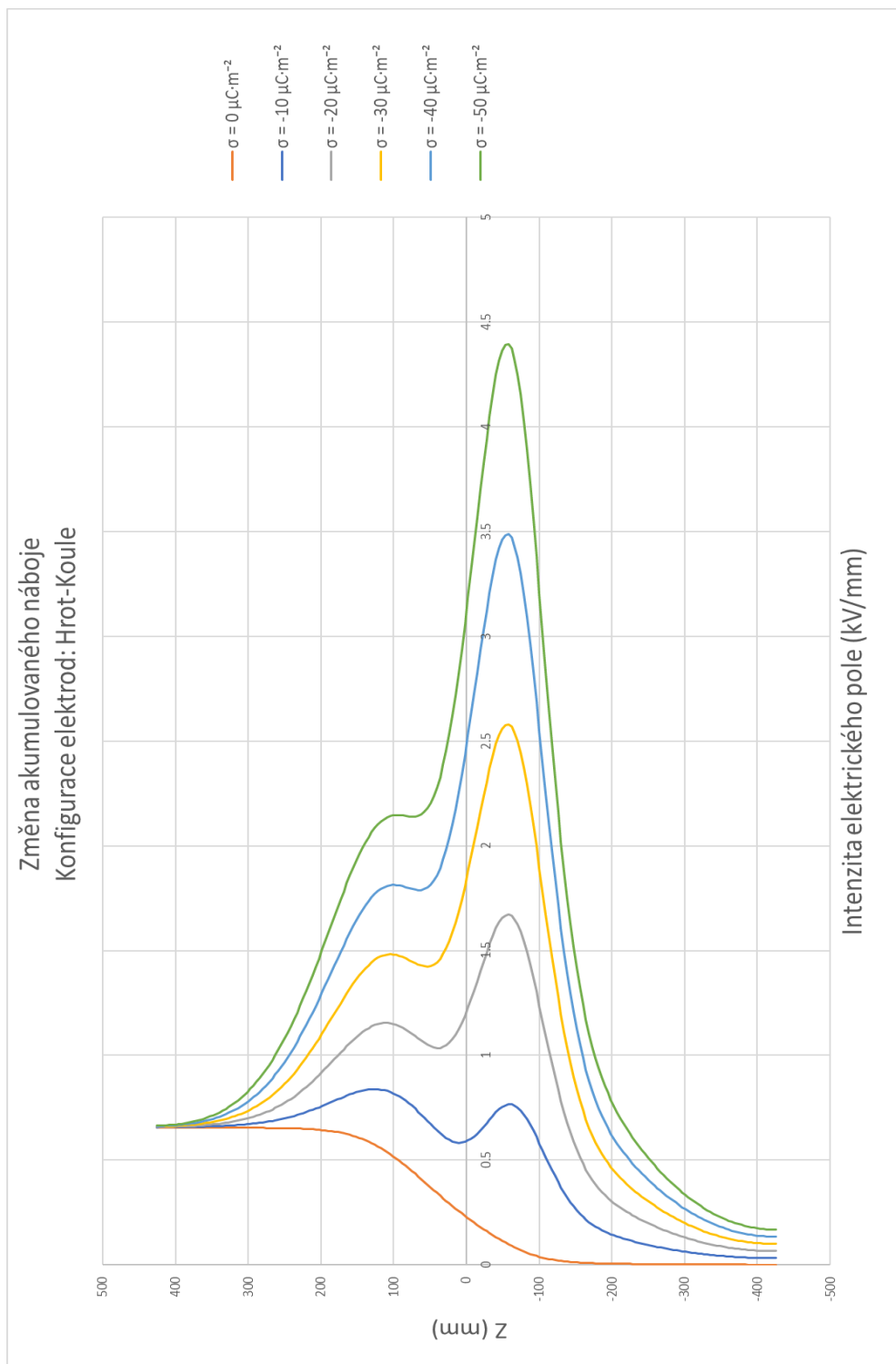
Obrázek 53: Uvažovaná akumulace záporného povrchového náboje na povrchu nádoby

Příloha 13



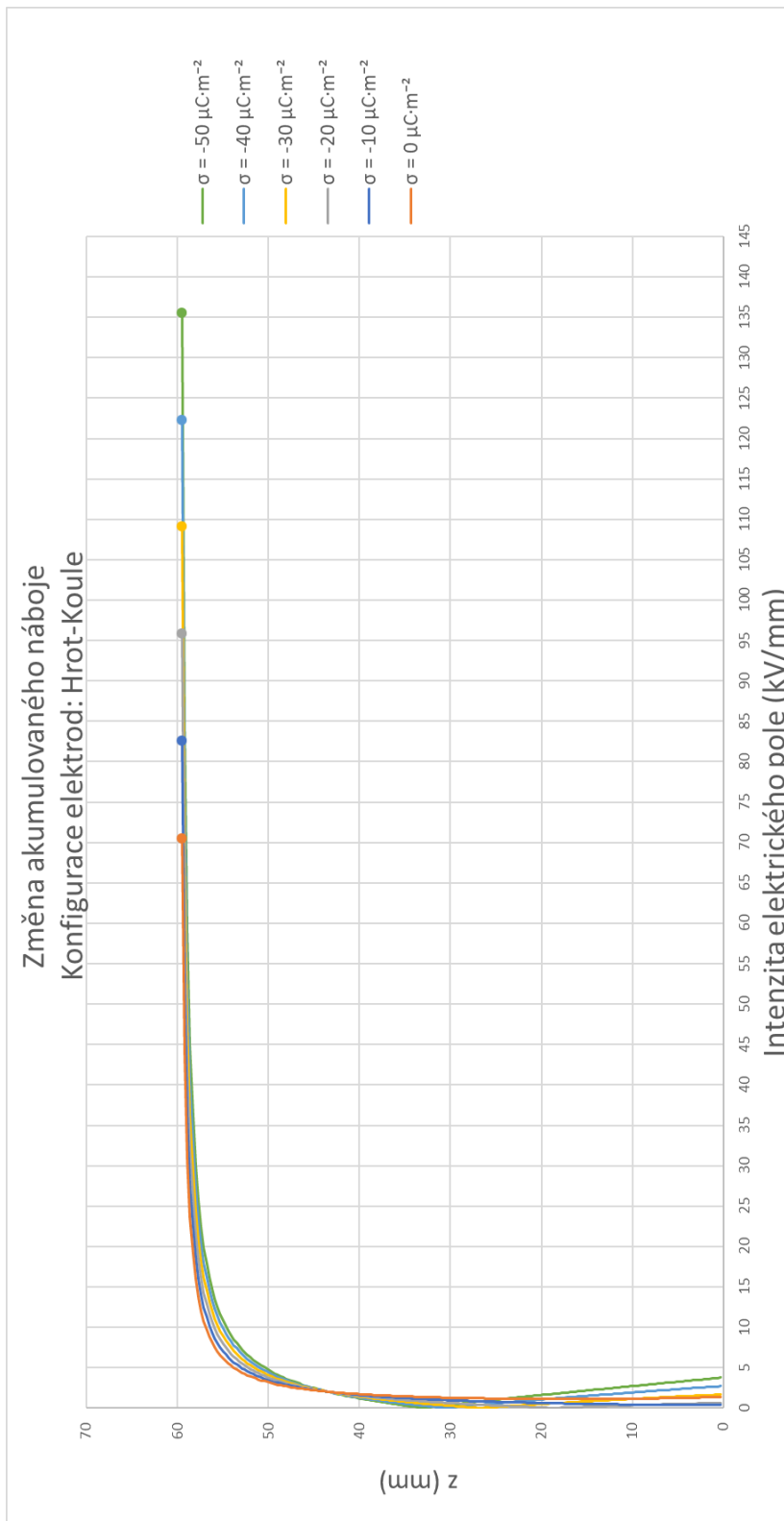
Obrázek 54: Změna intenzity pole mezi rovinnými elektrodami při rostoucí akumulaci náboje na nádobě

Příloha 14



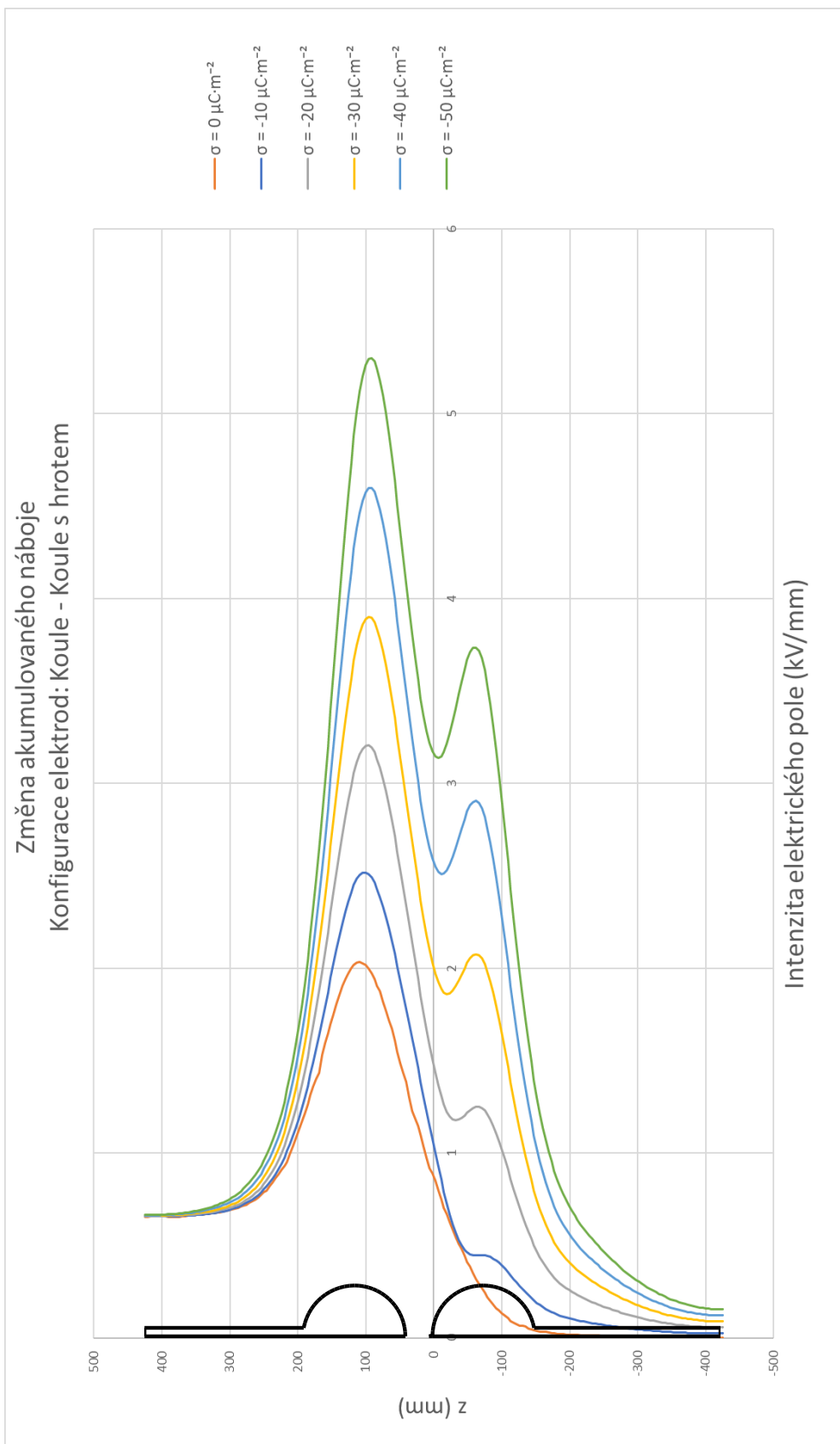
Obrázek 55: Změna intenzity pole kolem elektrod při rostoucí akumulaci náboje na nádobě. Vzdálenost hrotu a uzemněné koule je 60 mm.

Příloha 15



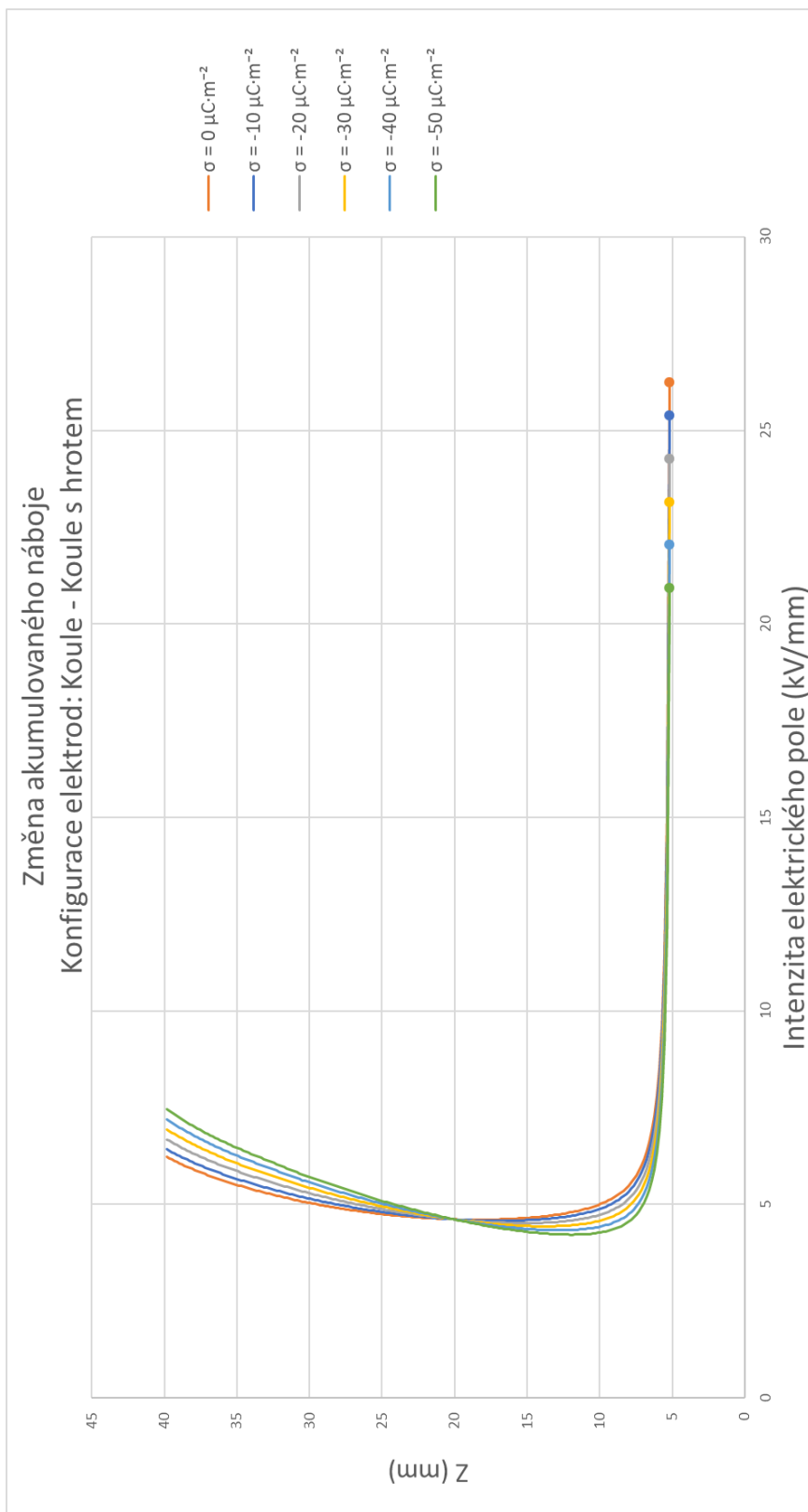
Obrázek 56: Změna intenzity pole mezi hrotovou a kulovou elektrodou při rostoucí akumulaci náboje na nádobě. Vzdálenost hrotu a uzemněné koule je 60 mm.

Příloha 16



Obrázek 57: Změna intenzity pole kolem kulových elektrod při rostoucí akumulaci náboje na nádobě.

Příloha 17



Obrázek 58: Změna intenzity pole mezi kulovými elektrodami při rostoucí akumulaci náboje na nádobě.