

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Numerický výpočet rozložení elektrického pole

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Milan FLOR**
Osobní číslo: **E11B0021P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Numerický výpočet rozložení elektrického pole**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

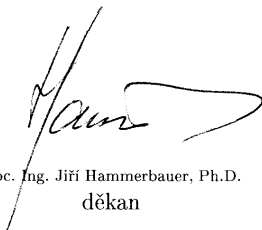
1. Zpracujte teoretický úvod k metodám řešení elektrických polí.
2. Vytvořte geometrický model a připravte okrajovou úlohu pro řešení elektrického pole v zadaném elektrickém zařízení.
3. Proveďte numerickou simulaci, vypočtené výsledky vyhodnoťte.
4. Zhodnoťte možnosti zlepšení rozložení elektrického pole u řešeného zařízení.

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


1. Mayer, D.: **Teorie elektromagnetického pole. FEL ZČU Plzeň.**
2. **Uživatelské manuály a dokumentace výpočetního programu.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**
Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na numerický výpočet rozložení elektrického pole na bezjiskříš'ovém omezovači přepětí. Na začátku práce jsou stručně popsány metody, které umožňují řešit elektrické pole. Poté je představen softwarový produkt, v kterém se provádějí numerické výpočty rozložení elektrického pole. Práce se dále zabývá vytvořeným geometrickým modelem bezjiskříš'ového omezovače přepětí a zadanou okrajovou úlohou pro výpočet rozložení elektrického pole. Poslední části práce jsou zaměřeny na numerickou simulaci, zhodnocení vypočtených výsledků a možnosti zlepšení rozložení elektrického pole u bezjiskříš'ového omezovače přepětí.

Klíčová slova

Geometrický model, okrajová úloha, elektrické pole, numerická simulace, omezovač přepětí.

Abstract

The bachelor thesis is focused on the numerical calculation of the electric field on nonspark surge arrester. First the methods solving an electric field are briefly described. Then a software product which carried out numerical calculations of the electric field is introduced. The study also discusses generated geometric model nonspark surge arrester and given a boundary value problem for calculating the electrical field distribution. The last part of the work focuses on numerical simulation, evaluation of the calculated results and the possibility of improving the distribution of the electric field at nonspark surge arrester.

Key words

Geometric model, boundary value problem, electric field, numerical simulation, surge arrester.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2015

Milan Flor

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat všem učitelům Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni, kteří mi po dobu mého studia poskytli mnoho drahocenných informací. Na závěr též děkuji za věčnou podporu všem přátelům a rodině.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 METODY ŘEŠENÍ ELEKTRICKÝCH POLÍ.....	11
1.1 TEORETICKÉ ŘEŠENÍ ELEKTROTECHNICKÉHO ZAŘÍZENÍ	11
1.1.1 Přesnost výsledků řešení.....	12
1.2 ANALYTICKÉ METODY	13
1.2.1 Přímé řešení Maxwellových rovnic v integrálním tvaru	13
1.2.2 Řešení okrajových úloh pro rovnice potenciálů přímou integrací.....	15
1.2.3 Řešení pomocí integrálních výrazů	16
1.2.4 Metoda zrcadlení.....	16
1.3 NUMERICKÉ METODY	17
1.3.1 Metoda konečných diferencí	17
1.3.2 Metoda konečných prvků.....	18
2 ŘEŠENÍ ELEKTRICKÝCH POLÍ POMOCÍ MODERNÍCH SOFTWAREVÝCH PRODUKTŮ....	20
2.1 STRUKTURA NYNĚJŠÍHO PROFESIONÁLNÍHO SOFTWARE	21
2.2 POUŽITÝ PROFESIONÁLNÍ SOFTWARE PRO ŘEŠENÍ MODELU	22
3 GEOMETRICKÝ MODEL A OKRAJOVÁ ÚLOHA BEZJISKŘIŠŤOVÉHO OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	22
3.1 PŘEPĚTÍ	23
3.2 KONSTRUKCE BEZJISKŘIŠŤOVÉHO OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ.....	23
3.3 PARAMETRY BEZJISKŘIŠŤOVÉHO OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	25
3.4 GEOMETRICKÝ MODEL BEZJISKŘIŠŤOVÉHO OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	27
3.5 OKRAJOVÁ ÚLOHA	28
3.5.1 Okrajová úloha bezjiskřišťového omezovače přepětí	29
4 NUMERICKÁ SIMULACE BEZJISKŘIŠŤOVÉHO OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	34
5 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE NA BEZJISKŘIŠŤOVÉM OMEZOVAČI PŘEPĚTÍ	41
5.1 OVĚŘENÍ VLIVU ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE PŘI RŮZNÝCH ZMĚNÁCH KONSTRUKCE BEZJISKŘIŠŤOVÉHO OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ.....	41
5.2 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE NA BEZJISKŘIŠŤOVÉM OMEZOVAČI PŘEPĚTÍ ÚPRAVOU STÍNÍČÍCH KRUHŮ	44
ZÁVĚR.....	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48

Seznam symbolů a zkratek

2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
ZnO.....	Oxid zinečnatý
V-A.....	Voltampérová
φ	Elektrický potenciál
ε	Permitivita
γ	Měrná elektrická vodivost (konduktivita)
D	Vektor elektrické indukce
E	Vektor elektrické intenzity
J	Vektor proudové hustoty
MR.....	Maxwellova rovnice
S.....	Plocha
dS.....	Element plochy
Q.....	Elektrický náboj
\perp	Kolmost
\parallel	Rovnoběžnost
cos.....	Cosinus
π	Pí
Ω	Definiční oblast
Γ	Křivka
U.....	Elektrické napětí
U_r	Jmenovité napětí
U_c	Trvalé provozní napětí
U_m	Nejvyšší napětí
kV	Kilovolty
I_n	Výbojový jmenovitý proud
kA.....	Kiloampéry
μs	Mikrosekundy
α	Činitel nelinearity
V/m.....	Volt/metr
$S.m^{-1}$	Siemens.metr ⁻¹

Úvod

Předmětem této práce je numerický výpočet rozložení elektrického pole na bezjiskřivém omezovači přepětí a v jeho blízkém okolí.

Práce je rozdělena do pěti částí; první obsahuje teoretické řešení elektrotechnického zařízení a stručně zpracovaný teoretický úvod k metodám řešení elektrických polí. V druhé jsou uvedeny informace o softwarovém produktu, v kterém byl proveden numerický výpočet rozložení elektrického pole. Třetí se zaměřuje na vytvořený geometrický model daného omezovače přepětí a okrajovou úlohu pro řešení elektrického pole. Čtvrtá část zahrnuje numerickou simulaci a zhodnocení vypočtených výsledků. Poslední pátá část je zaměřena na ověření možností zlepšení rozložení elektrického pole u řešeného bezjiskřivého omezovače přepětí při různých změnách jeho konstrukce.

1 Metody řešení elektrických polí

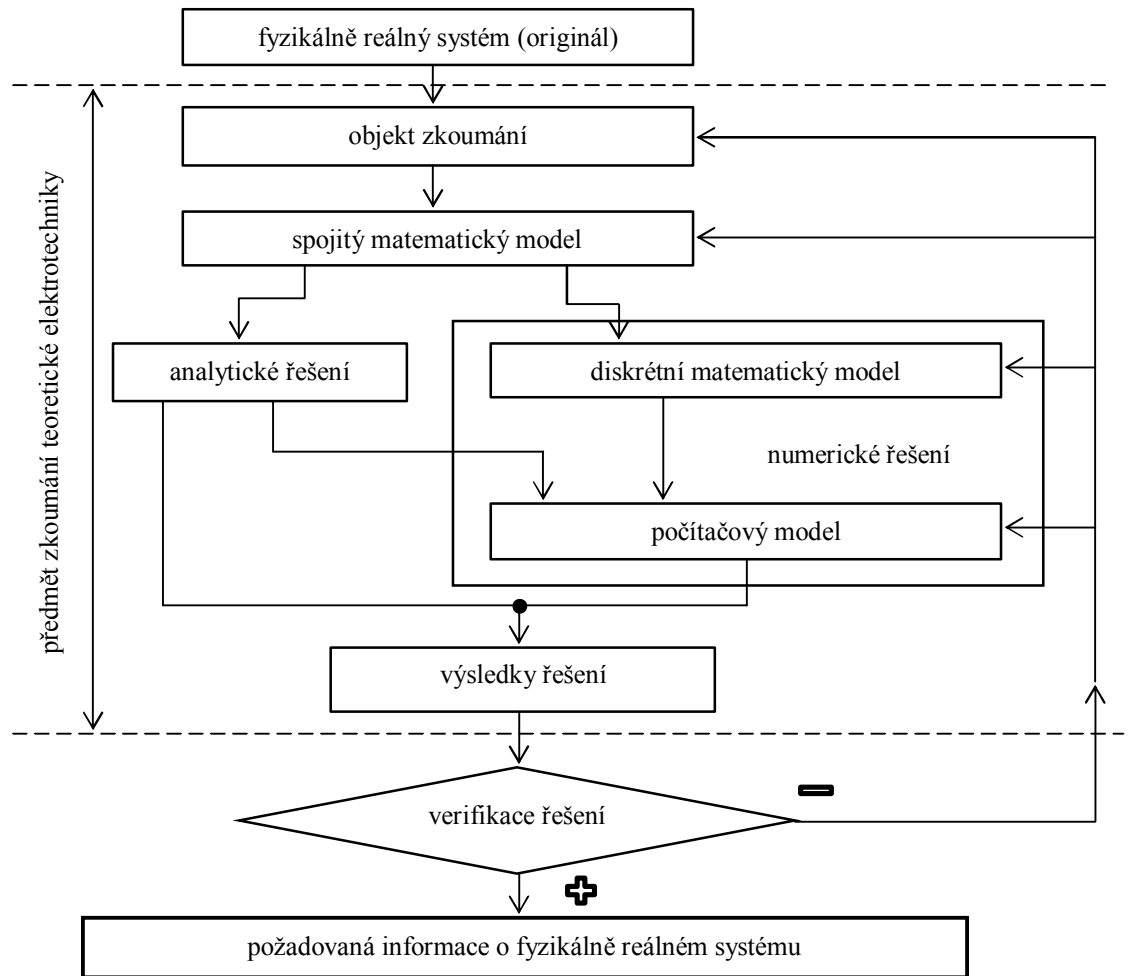
Tato kapitola je věnována teoretické analýze elektrotechnického zařízení a způsobům výpočtů elektrických polí pomocí různých metod. Popsán je vždycky jenom stručný teoretický úvod k těmto metodám, které se dělí na analytické a numerické.

1.1 Teoretické řešení elektrotechnického zařízení

Zkoumání vlastností některého elektrotechnického zařízení se nikdy nedělá na vlastním skutečném zařízení, nazývaném fyzikálně reálným systémem neboli tzv. originálem. Pro vyšetření určitých hodnot, se stačí zaobírat zjednodušeným (idealizovaným) modelem, který nese název objekt zkoumání.

Postup při teoretickém řešení elektrotechnického zařízení je znázorněn na *Obr. 1.1*. Nejprve je sestaven model. Ten má pouze ty nejdůležitější vlastnosti, bez kterých by se zkoumaný jev neobešel, a které vedou ke správnému výslednému řešení. Díky tomu je nahrazen fyzikálně reálný systém zjednodušeným fyzikálním modelem (tj. objektem zkoumání). Dále se objekt zkoumání popíše matematicky, pomocí zákonů teorie elektromagnetického pole. Z toho všeho vyplyne spojitý matematický model, ze kterého se dále hledá výsledné řešení.

Různé objekty zkoumání mají různé matematické modely, které jsou jinak přesné a hlavně složité. Při řešení jednoduchých případů, se nalézá analytické řešení spojitého matematického modelu. Pro složitější případy, které by nešlo snadno vyřešit analyticky, tak je použito přibližné numerické řešení. Z tohoto důvodu se přechází od spojitého matematického modelu k diskrétnímu matematickému modelu, řešenému dále na počítači. Každý diskrétní model potřebuje pro správné výsledné řešení vhodný algoritmus. Když se toto spojí dohromady, tak je vytvořen výpočetní program pro danou problematiku. Dále je nahrán výpočetní program do počítače, kde z toho vznikne výsledný počítačový model pro konkrétní problém. Toto vše se dělá z toho důvodu, aby pak šlo kdykoliv počítačovým modelem simulovat (napodobovat) řešený fyzikální reálný systém. Výhody počítačové simulace jsou ty, že jsou velmi operativní i nenákladné, a taky se díky nim snadno prozkoumávají vlastnosti a všelijaké jevy, které jsou pro daný fyzikální reálný systém (originál) typické [1].



Obr. 1.1 Postup při teoretickém řešení elektrotechnického zařízení [1]

1.1.1 Přesnost výsledků řešení

Občas může vyjít nepřesný nebo úplně špatný výsledek. Většinou to je kvůli tomu, že se moc zjednodušil fyzikálně reálný systém nebo se staly chyby při matematickém popisování objektu zkoumání. Dále se mohou vyskytnout chyby při numerickém řešení. Příčinou může být velice hrubá diskretizace spojitého matematického modelu nebo špatně zadaný výpočtový algoritmus. Nesprávné výsledné řešení může být také způsobené programátorskou chybou v počítačovém modelu. Díky těmto všem popisovaným chybám, které mohou nastat při řešení nějakého elektrotechnického zařízení, je dobré na úplném konci všech procesů udělat verifikaci (ověření) výsledků. Nejlepší možnost jak ověřit výsledky, je porovnání konečných hodnot s nějakými jinými údaji k podobné problematice. Při nevyhovujících výsledcích, se musí nalézt zdroj problémů, který způsobuje nesprávné hodnoty. Ten pak musí být opraven. Po těchto krocích se celý proces řešení opakuje.

V dnešní době jsou fyzikálně reálné systémy nahrazovány velice přesnými modely, ale hodně to závisí na výkonu výpočetní techniky. Ta je schopná vypočítat modely jen do určité hranice složitosti, protože čím je větší přesnost, tím je větší složitost daného problému [1].

1.2 Analytické metody

Analytické metody lze použít jen u jednodušších objektů zkoumání. Je to z toho důvodu, že pro složitější geometrické objekty se analytické řešení nedá najít nebo jen velmi těžce při hodně dobré znalosti matematických postupů. Ty jsou ve většině případů docela složité. Velká výhoda těchto metod spočívá v tom, že nalezené řešení daného problému má obecný charakter. Díky tomu se dostane hlubší náhled na hledané jevy [1].

1.2.1 Přímé řešení Maxwellových rovnic v integrálním tvaru

Pomocí Maxwellových rovnic se velice dobře popisují makroskopické elektromagnetické jevy, protože na to stačí pouze poměrně jednoduchý integrální výraz. Výsledkem těchto rovnic jsou stavové vektory pole, které určují charakter daného jevu. Přímé řešení Maxwellových rovnic v integrálním tvaru se provádí nejčastěji jen ve velmi jednoduchých jednodimenzionálních případech. Aby se daly lehce vyřešit, tak je nutností znát přibližný tvar siločár, resp. indukčních čar daného zkoumaného objektu. Dále se předpokládá- izotropní, homogenní a lineární prostředí. Z toho vyplývá, že takové vlastnosti má jen nejjednodušší prostředí, které lze lehce řešit. Při složitějších sestavách lze použít princip superpozice [1].

U **stacionárního elektrického pole** existují dvě formy tohoto pole:

- ***Elektrostatické pole***

Základní veličiny, které se stanovují u elektrostatického pole je potenciál φ , permitivita ϵ , elektrická indukce \mathbf{D} a elektrická intenzita \mathbf{E} .

- ***Stacionární proudové pole***

Základní veličiny, které se stanovují u proudového pole je potenciál φ , měrná elektrická vodivost γ , proudová hustota \mathbf{J} a elektrická intenzita \mathbf{E} .

1.2.1.1 Elektrostatické pole

Při řešení elektrostatického pole se vychází z 3. Maxwellovy rovnice. Také třetí MR je nazývána jako Gaussova věta:

$$\oint_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = Q$$

(1. 1)

Z integrálního výrazu je jasné, že uvedená rovnice je platná pouze pro uzavřenou plochu S , která musí být vhodně uzavřená, aby šel lehce vyjádřit stavový vektor \mathbf{D} , který se nachází na levé straně rovnice. Pokud je toto všechno splněno, tak lze velice snadno vyřešit dané elektrostatické pole. Z toho všeho vyplývá, že tomu mohou vyhovět jen nějaké jednoduché jednodimenzionální situace, u kterých se lehce provede vhodná volba uzavřené plochy S kvůli zjednodušení rovnice.

Pro přímé řešení elektrostatického pole pomocí Maxwellových rovnic v integrálním tvaru se musí znát tvar indukčních čar nebo úhel, pod kterým vstupují do plochy. Většina toho je snadno určitelná u jednoduchých jednodimenzionálních případů. U nich se lehce dá předvídat dráha indukčních čar, protože stačí znát základní znalosti z chování vodičů v elektrostatickém poli. Poté je postup následující [1]:

1.) Napřed se určí nějaký daný bod. Podle něj se zvolí uzavřená plocha S , na které musí ležet. V tomto bodě pak je výsledný hledaný vektor elektrické indukce \mathbf{D} .

2.) Tato zvolená uzavřená plocha S se může skládat i ze dvou částí, S_1 a S_2 ($S = S_1 + S_2$).

Jestliže se nějaký objekt skládá ze dvou částí ploch, tak první plocha S_1 musí být stanovená tak, aby indukční čáry (siločáry) směřovaly kolmo k ní (tedy $\mathbf{D} \perp d\mathbf{S}_1$). Rovněž musí být velikost vektoru elektrické indukce \mathbf{D} všude stejná na této zvolené ploše S_1 ($|\mathbf{D}|_{S_1} = D = \text{konstantní}$). Díky těmto předpokladům se pak může psát $\mathbf{D} \, d\mathbf{S}_1 = D \, d\mathbf{S}_1$ a tudíž

$$\int_{S_1} \mathbf{D} \, d\mathbf{S}_1 = \int_{S_1} D \, d\mathbf{S}_1 = D \int_{S_1} d\mathbf{S}_1 = D S_1$$

Když je stanovena první plocha S_1 , tak stačí jednoduše ještě určit plochu S_2 . Ta se zvolí rovnoběžně s indukčními čarami, tudíž v dané ploše S_2 leží siločáry (tedy $\mathbf{D} \parallel d\mathbf{S}_2$). Díky těmto předpokladům se pak může psát následující rovnice: $\mathbf{D} d\mathbf{S}_2 = D \cos(\pi/2) dS_2 = 0$.

Pro takto určené plochy S_1 a S_2 , přechází 3. Maxwellova rovnice na velice jednoduchý matematický tvar bez integrálního výrazu $\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_{S_1} \mathbf{D} d\mathbf{S}_1 + \int_{S_2} \mathbf{D} d\mathbf{S}_2 = D S_1 = Q$

a z toho vyplývající velikost vektoru elektrické indukce D je:

$$D = \frac{Q}{S_1} \quad (1.2)$$

1.2.1.2 Stacionární proudové pole

Při řešení stacionárního proudového pole se vychází z rovnice kontinuity:

$$\oint_S \mathbf{J} d\mathbf{S} = 0 \quad (1.3)$$

Uzavřená plocha S musí být zase vhodně zvolená. Postupuje se úplně stejně, jak to bylo uvedené u elektrostatického pole. Akorát rozdíl je v tom, že se teď bere uzavřená plocha S vzhledem k vektoru proudové hustoty \mathbf{J} a nikoliv jako u elektrostatiky k vektoru elektrické indukce \mathbf{D} [1].

1.2.2 Řešení okrajových úloh pro rovnice potenciálů přímou integrací

U této metody se pomocí skalárního potenciálu, určují patřičné stavové vektory pro stacionární elektrické pole. Pro potenciál φ platí příslušná Laplaceova rovnice, která má pro každý geometrický systém jiný tvar [1].

Nejsnadnější řešení mají okrajové úlohy pro rovnice potenciálů v lineárním prostředí, protože se tam může uplatnit osa souměrnosti, střed souměrnosti nebo rovina souměrnosti a to způsobí, že i indukční čáry jsou souměrné. Toho je využito v soustavách kartézských,

sférických nebo cylindrických souřadnic, což vede ke zjednodušení daného problému. Díky tomu parciální diferenciální rovnice pro potenciál se změny na obyčejnou lineární diferenciální rovnici 2. řádu. V tomto tvaru je už rovnice lehce řešitelná přímou integrací.

U nějakých jednodušších okrajových úloh se dá nalézt výsledné řešení také pomocí Maxwellových rovnic v integrálním tvaru, které mají přímé řešení. Pro složitější 2D a 3D pole už Maxwellovy rovnice nejdou použít, a proto se pro tyto případy používá řešení okrajových úloh pro rovnice potenciálů přímou integrací. Díky této metodě je docela snadné nalézt výsledné řešení i u složitějších problémů [2].

1.2.3 Řešení pomocí integrálních výrazů

U nějakých okrajových úloh se dá najít takové analytické řešení, které má výraz v integrálním tvaru. To platí u okrajové úlohy pro skalární potenciál, která vyhovuje následujícím podmínkám [1]:

- daná celá definiční oblast se musí skládat z toho nejjednoduššího prostředí, které má tyto vlastnosti: je homogenní, izotropní a lineární,
- nesmí mít daná definiční oblast žádnou hranici,
- musí mít v nekonečnu potenciál φ určitou nějakou hodnotu.

1.2.4 Metoda zrcadlení

Metoda zrcadlení se používá nejčastěji u okrajové úlohy elektrostatického pole, kde v určitém místě prostoru se chce vypočítat potenciál elektrostatického pole elektricky nabitého tělesa. To je umístěno v dielektriku s permitivitou ϵ . V dané vzdálenosti od elektricky nabitého tělesa je vodivá rovina s nulovým potenciálem, která zapříčiní elektrostatickou indukci vznik náboje. Ten je rozložen nerovnoměrně na této vodivé rovině. Z tohoto důvodu se používá metoda zrcadlení, s kterou se dá uvedený problém velmi lehce vyřešit.

Postup metody zrcadlení je snadný a rychlý. Elektricky nabitě těleso se zobrazí v souměrnosti podle vodivé roviny. Obraz tělesa má opačný náboj. Tím pádem odpadá řešení výchozí okrajové úlohy, ale stačí vyřešit elektrostatické pole, které je vytvořené nabitým tělesem a jeho elektrickým obrazem.

Všechny původní vlastnosti zůstávají zachovány při použití této metody. Analogicky se dá metoda zrcadlení využít i pro řešení okrajové úlohy stacionárního proudového pole, kde je vodič s měrnou vodivostí γ protékáný proudem [2].

1.3 Numerické metody

Numerické metody se používají pro řešení okrajových úloh složitějších 2D a 3D případů, kde by analytické řešení nešlo nalézt vůbec nebo jen velmi těžce za pomoci speciálních znalostí z teorie parciálních diferenciálních rovnic. Z těchto důvodů je v současnosti většina problémů řešena pomocí numerických metod, které jsou velmi promyšlené a propracované. Díky tomu se může řešit takový objekt zkoumání, který je konstrukčně složitější a obsahuje více podrobností, čímž se může více přiblížit fyzikálně reálnému systému. Nástroje pro aplikaci numerických metod jsou vytvářeny pro konečné uživatele ve formě profesionálních softwarových produktů. Ty se mohou použít na hodně širokou škálu různých problémů a z toho vyplývá, že jsou velmi univerzální. S profesionálními softwarovými produkty se pracuje rychle a efektivně. Tyto produkty jsou v řadě případů relativně nenáročné na pochopení jak s nimi správně pracovat a nevyžadují detailní znalosti numerických metod a algoritmů. Z těchto všech jmenovaných důvodů jsou numerické metody v současnosti velmi používané.

Níže jsou popsány dvě numerické metody používané často při řešení elektromagnetických polí. První nese název metoda konečných diferencí, která je koncepčně i programátorsky jednodušší. Druhá se nazývá metoda konečných prvků, která je výhodnější třeba u složitějších geometrických objektů, a i proto je v dnešní době rozšířenější [1]. V této části je ve stručnosti vysvětlen princip těchto dvou metod.

1.3.1 Metoda konečných diferencí

Rovněž nese označení jako diferenční metoda, nebo metoda sítě. Tato metoda je založena na principu nahrazení derivace diferencemi při řešení okrajové úlohy a z toho pak vychází takový matematický model, který je ve tvaru algebraických rovnic.

Postup metody konečných diferencí při řešení okrajové úlohy je ukázán ve čtyřech krocích. Princip je prováděn ve 2D definiční oblasti Ω , která je ohraničena po částech hladkou

křivkou Γ a může se skládat z pár různých suboblastí, které mají odlišné materiálové vlastnosti. Při těchto předpokladech je algoritmus následující [1]:

- 1.) Nejprve se pokryje definiční oblast Ω sítí, která je pro řešení okrajových úloh v pravoúhlých souřadnicích čtvercová nebo obdélníková a pro polární souřadnice se používá polární síť. Na obecně křivočaré hranici Γ má schodovitý průběh, a proto tam vznikají menší nepřesnosti, které lze do určité míry odstranit zjemněním sítě na této hranici. Díky takto zvoleným sítím se definiční oblast Ω diskretizuje na konečný počet bodů. Tyto body jsou průsečíky čar tvořící síť. V těchto uzlech se pak hledá výsledné řešení okrajové úlohy.
- 2.) Uzly nacházející se uvnitř definiční oblasti Ω mají příslušnou parciální rovnici pro potenciál. U uzlů ležících na hranici Γ platí okrajová podmínka a pro uzly nalézajícími se na rozhraní mezi suboblastmi definiční oblasti Ω platí podmínka na rozhraní. U těchto všech uzlů se daná rovnice nebo podmínka nahradí přibližnou rovnicí algebraickou. Tomu se říká, že vznikne jejich diferenční aproximace.
- 3.) Díky aproximaci všech uzlů se přechází od spojitého matematického modelu pro potenciál φ k diskrétnímu modelu, který má soustavu algebraických rovnic pro přibližné hodnoty potenciálů. Přesnost výsledků závisí na proložení sítě v definiční oblasti Ω , a proto se někde síť zhušťuje a jinde je hrubší, kvůli důležitosti dané oblasti. Čím je síť hustší, tím je rozsáhlejší soustava algebraických rovnic. Lze tedy použít rovnoměrnou i nerovnoměrnou síť.
- 4.) Výsledná soustava rovnic má takovou matici, která je řídká, protože má mnoho nulových prvků. Pro řešení těchto soustav s řídkými maticemi se používají hodně rychlé algoritmy, které to lehce vyřeší.

1.3.2 Metoda konečných prvků

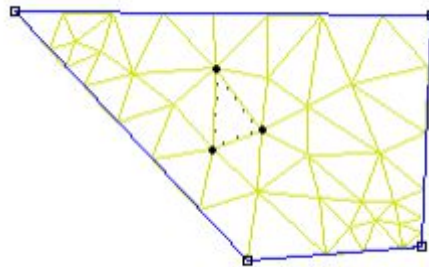
Metoda konečných prvků je v dnešní době fakticky nejpoužívanější numerickou metodou pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Velmi účinně se díky ní řeší všechny okrajové úlohy inženýrské praxe, které jsou popsány diferenciálními rovnicemi. Tato metoda je hodně

používaná pro řešení technických systémů, u kterých se vyskytuje více fyzikálních polí najednou.

Na začátek se zavede síť, která vytvoří uzly a uzlové potenciály. Velká výhoda je, že dané uzly mohou ležet přesně na hraničních plochách, protože je lze v oblasti rozložit nerovnoměrně. Na místech, která jsou pro výsledné řešení nejdůležitější, nebo se tam odehrává velká změna pole, se zavádí hustší síť.

Pro výpočet daného problému se sestaví soustava rovnic pro neznámé uzlové hodnoty. U metody konečných prvků se vypočítávají koeficienty matice soustavy a pravých stran z integrálů přes jednotlivé plošky nebo objemy, které mají ve svých vrcholech uzly. Těmto jednotlivým útvarům se říká konečné prvky.

V rovině se nejvíce používají konečné prvky ve tvaru trojúhelníku a také nanejvýš ve tvaru čtyřúhelníku. Na *Obr. 1.2* je ukázán nejpoužívanější konečný prvek, který má tvar trojúhelníku.



Obr. 1.2 Konečný prvek ve tvaru trojúhelníku [3]

Tato numerická metoda se zakládá na Lagrangeově principu, kdy je dané těleso v rovnovážném stavu a splňuje podmínku, že celková potenciální energie deformace soustavy je nejnižší.

Pro správné výsledné řešení daného problému pomocí metody konečných prvků je postup následující [1] [3] [4]:

- 1.) vytvoří se geometrický model.

- 2.) Zavede se síť konečných prvků s uzly (diskretizace geometrického modelu).
- 3.) Pro každý uzel se zavedou rovnice, které popisují pole vyšetřovaných veličin.
- 4.) Přidělí se definované okrajové podmínky pro konkrétní model.
- 5.) V tomto kroku se nejprve nahradí funkce vyšetřovaných veličin určitým polynomem a pak se tyto funkce vyjádří.
- 6.) Při zrealizování předešlých kroků se už může spočítat soustava lineárních algebraických rovnic.
- 7.) V posledním kroku před výsledným zobrazením vypočtených hodnot se ještě spočítají pro dílčí konkrétní uzly hodnoty vyšetřovaných veličin.

2 Řešení elektrických polí pomocí moderních softwarových produktů

V dnešní době jsou moderní softwarové produkty už tak propracované, že se mohou použít na širokou škálu různých fyzikálních problémů. V současnosti jsou velmi používané pro svoji přesnost výsledků u nejrůznějších složitých modelů. Práce s nimi je poměrně jednoduchá především proto, že dokážou vyřešit výpočtové algoritmy, což usnadňuje uživateli práci. Kvůli těmto všem vlastnostem jsou tyto produkty velmi oblíbené u konečných uživatelů. Pro správné výsledky musí uživatel znát princip programu a zejména rozumět fyzikální podstatě problémů, které řeší. Při řešení některých konkrétních jevů musí uživatel pouze:

- vytvořit vhodný výpočtový model (ten obsahuje definiční oblast, okrajové podmínky, podmínky na rozhraní atd.) a
- bezchybně si objasnit a ověřit výstupní údaje.

Aby při použití softwarového produktu byla větší záruka správnosti výsledného řešení problému, tak je dobré mít základní znalosti o fyzikálně-matematických vlastnostech elektromagnetických polí [1].

2.1 Struktura nynějšího profesionálního softwaru

Současný profesionální program se skládá ze tří více méně nezávislých částí na sobě. Názvy těchto částí jsou preprocessor, procesor a postprocessor.

Preprocessor je zaměřen na přímé zadávání vstupních hodnot a dat do programu pro řešení model, který má dále za úkol správně zpracovat. Obvykle uživatel zadává následující parametry:

- Druh fyzikálního pole a z toho vyplývající hodnoty zdroje tohoto pole.
- Nastavení vhodné sítě a k tomu si může vybrat náležité matematické postupy, protože některé jsou přesnější pro výsledné řešení. Síť lze podle libosti v určitých oblastech zjemnit.
- Geometrii daného modelu.
- Druhy materiálových prostředí, které se tam vyskytují.
- Všechny hodnoty podmínek na hraničních čarách modelu.

Procesor vykonává matematicky nejdůležitější část a to je numerické řešení okrajové úlohy pro daný model, u kterého se zadaly všechny potřebné parametry pro výpočet už v preprocessoru. Výsledky výpočtů předá procesor do postprocessoru, který je zpracuje. Většinou se procesor může skládat z více modulů, protože každý je zaměřen na jiný druh řešených úloh (2D a 3D úlohy atd.). Při pořízení nějakého procesoru na konkrétní problém se nemusí kupovat celý balíček profesionálního softwarového produktu, protože je většina procesorů prodávána samostatně.

Postprocessor má za úkol zpracovat výsledky výpočtů z procesoru a na základě toho dělá tyto operace:

- Zobrazuje graficky získané hodnoty v kterémkoliv místě definiční oblasti.
- Pro uživatele dopočítává ostatní veličiny, které je potřeba znát pro daný problém.
- Provádí export výsledků a hodnot pro další zpracování.

Většinou je v současnosti spojen dohromady do jediného samostatného modulu preprocesor a postprocesor. Procesor se dodává na trh zvlášť, kvůli svojí zaměřenosti na určité typy řešených problémů. Také se v současnosti už vyrábí většina softwarových produktů tak, aby byly slučitelné s analogickými softwarovými produkty od jiných výrobců [1].

2.2 Použitý profesionální software pro řešení modelu

V dnešní době je vyráběno na trh pro uživatele mnoho různých programů zabývajících se řešením elektrického pole. Pro numerický výpočet rozložení elektrického pole na konkrétním zařízení jsem použil profesionální program jménem Agros2D. Pro kontrolu výsledků výpočtů jsem využil jiný profesionální program, který se nazývá FEMM. Porovnání obou profesionálních programů a jejich typických rysů je v *Tab. 2.1*. Uvedené údaje nemusí platit věčně, protože všechny profesionální programy se pořád zdokonalují.

Produkt	Výrobce	Geometrie	Podpora platformy	Webové stránky	Popis	Poznámka
Agros2D	Pavel Karban, Plzeň, ČR	2D	Windows, Linux, MacOSX	http://hpfem.org/agros2d	Řešení fyzikálních polí založené na knihovně Hermes2D pro hp-FEM (Pavel Šolín et al., Reno, USA)	lineární problémy
FEMM	David Meeker, Waltham, USA	2D	Windows	http://femm.info	Program pro řešení fyzikálních polí	lineární problémy (pouze B-H nelineární)

Tab. 2.1 Softwarové produkty pro řešení elektrických polí [1]

3 Geometrický model a okrajová úloha bezjiskřišťového omezovače přepětí

Následující kapitoly se zabývají řešením elektrického pole na konkrétním bezjiskřišťovém omezovači přepětí pro hladinu velmi vysokého napětí. Ten mi byl zadán vedoucím práce spolu s potřebnými podklady. Omezovač přepětí chrání elektrické zařízení před spínacím a atmosférickým přepětím. Zadaný typ bezjiskřišťového svodiče přepětí s keramickým izolátorem se nejvíce používá v oblastech s velmi vysokou intenzitou

atmosférických výbojů a také tam, kde jsou nepříznivé uzemňovací podmínky. Využíván je rovněž pro zóny s vysokými energetickými nároky. Má velmi vysokou mechanickou pevnost. Svoji funkcí slouží k ochraně rozvodů, transformátorů a ostatních vysokonapěťových zařízení nacházejících se v těchto oblastech.

3.1 Přepětí

Je to takové napětí, které má vyšší amplitudu než jmenovité napětí daného zařízení. Přepětí vzniká mezi fází a zemí nebo mezi jednotlivými fázemi v určitém místě elektrizační soustavy. Přepětí se dělí podle původu vzniku na vnitřní (provozní) a na vnější (atmosférická). Podle doby trvání se přepětí dělí na [5] [6]:

- dočasná – tato přepětí mají většinou delší dobu trvání, která se pohybuje v řádu sekund až hodin a vyskytují se netlumená nebo jen velmi málo tlumená. Příčiny výskytu dočasných přepětí jsou zemní spojení, Ferrantiho jev, ferorezonance atd.,
- krátkodobá – ty zahrnují spínací a atmosférická přepětí. Spínací přepětí mají krátkou dobu trvání v řádu milisekund a méně. Jsou docela silně tlumená a mají přechodnou povahu, neboli vznikají při výskytu přechodného děje, který nastává při vzniku nebo přerušení zemního spojení a zkratu, zapínání a vypínání vedení, připojení a odpojení kapacitních proudů nebo také při vypínání indukčních proudů atd. Další přepětí jsou atmosférická, která mají velmi krátkou dobu trvání. Ta se pohybuje v řádu mikrosekund. Při tomto přepětí se šíří vedením přepěťová vlna s velmi velkou amplitudou. Příčina výskytu atmosférických přepětí je způsobena přímým úderem blesku do sítě nebo do jejího blízkého okolí.

Já jsem se zabýval v následujících částech vyšetřením rozložení elektrického pole na omezovači přepětí při stavech odpovídajících normálnímu provoznímu stavu, účinkům dočasného a atmosférického přepětí.

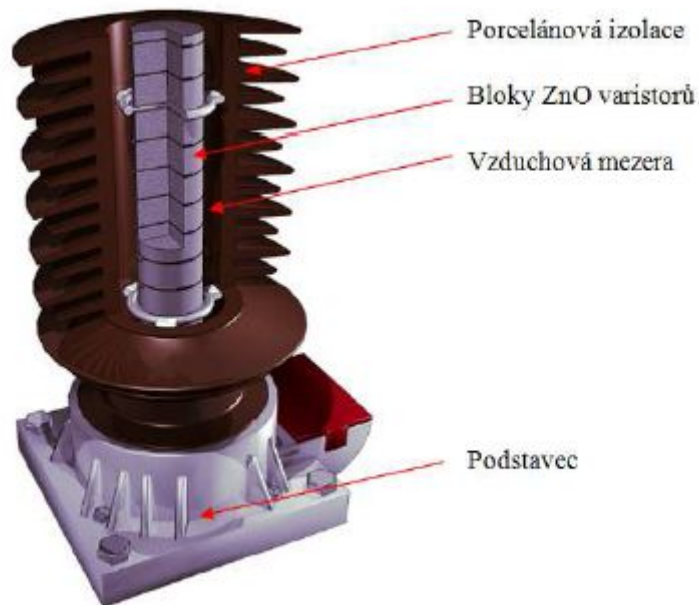
3.2 Konstrukce bezjiskřišťového omezovače přepětí

Tvar konstrukce konkrétního řešeného bezjiskřišťového omezovače přepětí vysokého 5,66 m se třemi stínícími kruhy je na *Obr. 3.1*.



Obr. 3.1 Bezjiskříšťový omezovač přepětí [7]

Uvnitř konstrukce jsou umístěny bloky varistorů, které jsou fixovány do sloupce uvnitř keramického izolátoru. Varistor obsahuje 90% oxidu zinečnatého (ZnO). Zbylé procenta zaujímají další oxidy kovů (např. mangan, kobalt, antimon atd.). Ve formě prášku se všechny oxidy kovů slisovávají do válců a díky tomu pak vznikne výsledný varistor. Mezi jednotlivými varistory jsou umístěny hliníkové plošky. Hlavní jejich funkcí je to, že zaručí uvnitř svodiče přepětí rovnoměrné rozložení elektrického proudu. Uvnitř se také nalézá vzduchová mezera, která je umístěna mezi varistorem a keramickým izolátorem. Ta umožňuje dilataci jednotlivých prvků a dále odvod plynů při extrémním namáhání varistoru. Na ilustračním Obr. 3.2 lze vidět v řezu konstrukci bezjiskříšťového omezovače přepětí s keramickým izolátorem.



Obr. 3.2 Řez bezjiskříšťového omezovače přepětí [8]

3.3 Parametry bezjiskříšťového omezovače přepětí

Jak lze vidět v *Tab. 3.1*, tak dané zařízení má jmenovité napětí $U_r = 420$ kV a trvalé provozní napětí $U_c = 336$ kV. Nejvyšší napětí pro zařízení U_m je rovno hodnotě 550 kV. Výbojový jmenovitý proud je $I_n = 40$ kA (8/20 μ s). Každý omezovač přepětí má určitou energetickou třídu, která se pohybuje od 1 do 5. Čím je vyšší číslo energetické třídy, tím je vyšší energetická kapacita daného svodiče přepětí, a tudíž může více absorbovat energie, aniž by nastala jeho degradace nebo ztráta tepelné stability při provozním napětí. Můj řešený bezjiskříšťový omezovač přepětí má druhou nejvyšší energetickou třídu a tj. 4.

U_m [kV]	U_r [kV]	U_c [kV]	I_n [kA] (8/20 μ s)
550	420	336	40

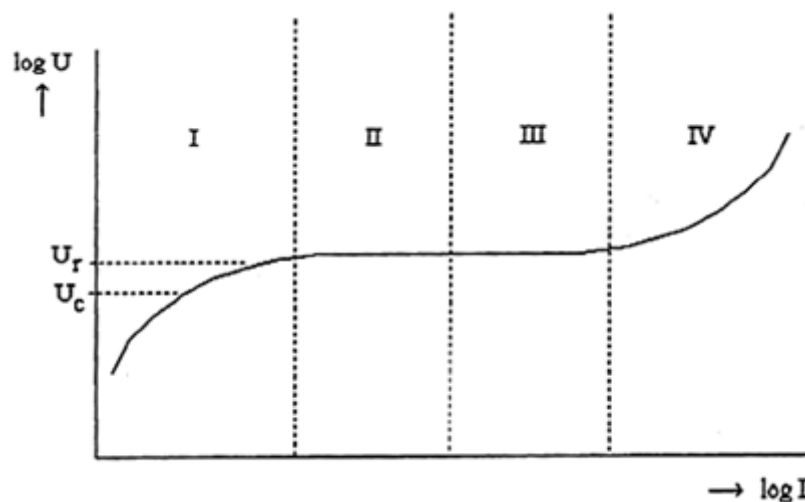
Tab. 3.1 Parametry omezovače přepětí

V tomto svodiči přepětí je nejdůležitějším prvkem napětově závislý odpor ZnO neboli varistor, který má největší výhodu v tom, že je jeho V-A charakteristika velmi nelineární. Toho se právě využívá proto, že začne svádět až takové hodnoty přepětí, na které je dimenzován a po zániku přepětí díky těmto varistorům se omezí sváděný proud. Při normálním stavu na síti je tedy svodič přepětí skoro neaktivní.

V-A charakteristika bezjiskříšového omezovače přepětí je na *Obr. 3.3*. Danou charakteristiku popisuje vztah:

$$I = k \cdot U^\alpha \quad (3.1)$$

Pro svodič přepětí, který obsahuje napěťově závislé odpory, má konstanta α různé hodnoty pro různé materiály. Např. pro oxid zinečnatý (ZnO) se konstanta exponentu α pohybuje v rozmezí hodnot 20-50. Hodnota konstanty k se určuje podle toho, na kterou napěťovou úroveň je daný omezovač přepětí konstruován.



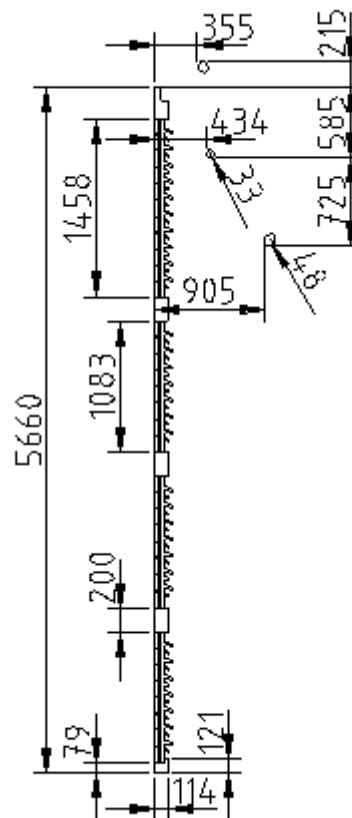
Obr. 3.3 V-A charakteristika omezovače přepětí [9]

Daný průběh charakteristiky se skládá ze 4 částí a je to kvůli tomu, že hodnota činitele α není konstantní po celém průběhu charakteristiky. V prvním segmentu se nalézá trvalé provozní napětí, pro které je hodnota činitele α 4-8. Sváděný proud zde dosahuje velikostí v řádu několika miliampér. V druhém úseku se vyskytují napětí na úrovni dočasných přepětí, u kterých je hodnota činitele α 15-25 a proud je v řádu několika Ampér. Třetí část zahrnuje napětí na úrovni spínacích přepětí. Činitel α je zde 15-25 a proud v řádu kiloampér. Poslední čtvrtý sektor zahrnuje napětí na úrovni atmosférického přepětí, pro která se pohybuje činitel α v rozmezí hodnot 7-10 a proudy zde dosahují maximálních hodnot dle schopnosti omezovače přepětí (desítky kiloampér až např. 150 kA) [10].

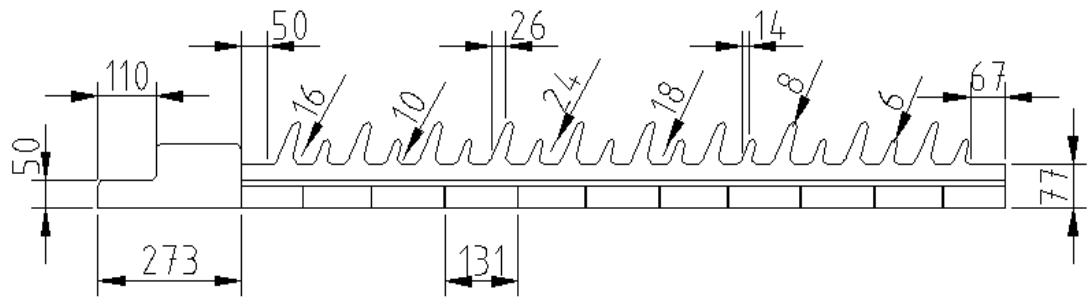
3.4 Geometrický model bezjiskříšťového omezovače přepětí

Geometrický model svodiče přepětí jsem dělal v profesionálním kreslicím programu QCad. Je to 2D CAD program a to znamená, že je všechno navrhováno v rovině. Výhoda tohoto programu je jeho jednoduchost, uživatelsky příjemné pracovní prostředí a hlavně je kompatibilní s profesionálním výpočtovým programem Agros2D. Díky tomu tam lze bez problémů vložit geometrický model nakreslený v programu QCad a dále s ním pracovat.

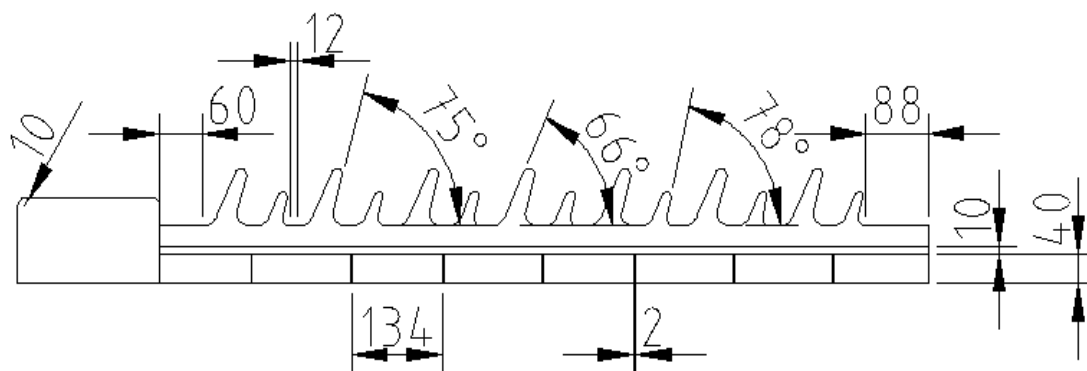
Rozměry geometrického modelu bezjiskříšťového omezovače přepětí v řezu jsou zakótovány ve více obrázcích. Na *Obr. 3.4* lze vidět celkový geometrický model omezovače přepětí v řezu a jeho některé rozměry. Geometrický model svodiče přepětí v řezu se může zjednodušit jen na polovinu jeho původního tvaru z důvodu osy symetrie.



Obr. 3.4 Okótovaná část rozměrů geometrického modelu bezjiskříšťového omezovače přepětí



Obr. 3.5 Okótovaná horní část omezovače přepětí



Obr. 3.6 Okótovaná vnitřní část omezovače přepětí

Na Obr. 3.5 je okótovaná horní část omezovače přepětí. Další jeho část, která se tam nachází třikrát, je okótovaná na Obr. 3.6. Rozměry stříšek jsou pro všechny díly stejné, stejně tak je to i u hliníkových plošek a u dalších rozměrů. V těchto třech obrázcích jsou zakótovány všechny potřebné rozměry pro nakreslení geometrického modelu bezjiskřivého omezovače přepětí. Nakreslený geometrický model daného zařízení jsem pak vložil do profesionálního softwarového produktu jménem Agros2D, který posloužil pro výpočet rozložení elektrického pole na mém zadaném svodiči přepětí.

3.5 Okrajová úloha

Pro možnost vyšetření rozložení elektrického pole na nějakém konkrétním zařízení se musí jeho geometrický model popsat okrajovou úlohou pro rovnice potenciálů, kvůli správnému výslednému numerickému výpočtu v daném softwarovém produktu. Okrajovou úlohou lze nazývat matematický model, který je popsán diferenciálními rovnicemi,

okrajovými podmínkami a podmínkami na rozhraní. Díky tomu se pak může určit potenciál φ v kterémkoliv místě definiční oblasti [1].

3.5.1 Okrajová úloha bezjiskříš'ového omezovače přepětí

Geometrický model daného typu svodiče přepětí jsem importoval do profesionálního softwarového produktu Agros2D a následně v tomto programu se mu přidělí určitá okrajová úloha, která se skládá z definiční oblasti Ω , rovnice pro potenciál φ , okrajové podmínky pro potenciál φ a podmínky pro potenciál φ na rozhraní dvou prostředí, kvůli správnému numerickému výpočtu rozložení elektrického pole. V programu jsem ho zadával ve válcových souřadnicích (r, z) , protože je osově symetrický. Díky této symetrii stačí mít poloviční geometrický model omezovače přepětí pro určení všech výsledných hodnot.

Já jsem se zabýval vyšetřením rozložení elektrického pole na zadaném omezovači přepětí při třech různých provozních stavech. První odpovídá stavu, kdy se vyskytuje na daném zařízení jeho jmenovité napětí, u třetího provozního stavu jsem uvažoval vrcholovou hodnotu jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulzu pro danou napěťovou hladinu a u druhého stavu odpovídá hodnota napětí aritmetickému průměru předchozích dvou napětí. Ve skutečnosti je na svodiči přepětí napětí střídavé, ale pro simulaci vyšetření rozložení elektrického pole to lze zjednodušit jen na elektrostatické pole. To není časově závislé, tudíž lze uvažovat vrcholové hodnoty napětí pro dané provozní stavy, které představují okamžiky maximálního zatížení omezovače přepětí. Dále vyšetřuji proudové pole, které tam také působí. Simulace na zadaném bezjiskříš'ovém omezovači přepětí byla tedy prováděna v elektrostatickém a proudovém poli.

U elektrostatického pole jsem se zabýval zkoumáním rozložení intenzity elektrického pole \mathbf{E} [V/m] a elektrického potenciálu φ [V] v blízkém okolí daného omezovače přepětí. Jak lze vidět v *Tab. 3.2*, tak je pro první případ vyšetřováno elektrostatické pole pro vrcholovou hodnotu napětí $U = 594$ kV, která je určena z efektivní hodnoty jmenovitého napětí $U_r = 420$ kV svodiče přepětí. Pro toto napětí jsou ZnO bloky ve velmi malém vodivostním stavu, kterému odpovídá hodnota náhradní relativní permitivity při řešení elektrostatického pole $\epsilon_r = 60$. Za druhé se zkoumaly hodnoty pro napětí, které je mezi vrcholovou hodnotou jmenovitého napětí a vrcholovou hodnotou jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulzu (8/20 μ s). Tomu odpovídá napětí $U = 1010$ kV a vodivostní stav ZnO bloků s

náhradní relativní permitivitou $\epsilon_r = 480$. U třetího případu je vyšetřován stav elektrostatického pole na bezjiskřivém omezovači přepětí při atmosférickém přepětí. Při tomto stavu je na daném zařízení uvažováno napětí $U = 1425$ kV, které se rovná vrcholové hodnotě jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulsu ($8/20\mu\text{s}$). Varistory ZnO při tomto stavu mají velmi velkou vodivost kvůli svádění přepětí. Hodnota jejich náhradní relativní permitivity byla pro tento případ zvolena $\epsilon_r = 900$.

Provozní stav	U [kV]	ϵ_r [-]
1.	594	60
2.	1010	480
3.	1425	900

Tab. 3.2 Hodnoty napětí a náhradní permitivity ZnO bloků při vyšetřování elektrostatického pole na omezovači přepětí pro tři různé provozní stavy

Proudové pole na omezovači přepětí jsem zkoumal také pro všechny tři provozní stavy, u kterých jsem zjišťoval rozložení elektrického potenciálu ϕ [V] v závislosti na elektrickém proudu. Napětí je zadáváno stejné pro všechny tyto tři stavy, jako při zkoumání elektrostatického pole, jen místo permitivity ZnO bloků, se tam zadává jejich měrná elektrická vodivost neboli konduktivita γ . Hodnoty napětí a konduktivity γ ZnO bloků pro jednotlivé provozní stavy lze vidět v Tab. 3.3. Měrná elektrická vodivost γ byla pro první případ, kdy je svodič přepětí ve velmi nízkém vodivostním stavu (uvažován svodový proud $I = 2$ mA), dopočtena na hodnotu $\gamma = 6,2 \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$. U druhého vyšetřovaného stavu je dopočtená konduktivita $\gamma = 3,7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ (uvažován svodový proud $I = 2$ kA). Pro poslední třetí stav je dopočtená konduktivita $\gamma = 52,6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ (uvažován svodový proud $I = 40$ kA). Pro tento případ je největší měrná elektrická vodivost ZnO varistorů. Svodič přepětí musí totiž při tomto stavu nejvíce svádět dané přepětí, protože působí na vedení atmosférický impuls.

Provozní stav	U [kV]	γ [S/m]
1.	594	$6,2 \cdot 10^{-6}$
2.	1010	3,7
3.	1425	52,6

Tab. 3.3 Hodnoty napětí a konduktivity ZnO bloků při vyšetřování proudového pole na omezovači přepětí pro tři různé provozní stavy

Pro úspěšné řešení numerického výpočtu rozložení elektrického pole na daném omezovači přepětí se musí zadat správná okrajová úloha pro potenciál φ . Za prvé se určí definiční oblast Ω svodiče přepětí složená z několika jednotlivých suboblastí ($\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$ a Ω_6). Kvůli srozumitelnému zaznamenání všech vyskytujících se suboblastí, je matematický model ukázán ve více obrázcích. Celou definiční oblast Ω lze vidět na *Obr. 3.7*. Na *Obr. 3.8* je ukázána horní část matematického modelu svodiče přepětí a na *Obr. 3.9* je jeho dolní část. Pro elektrostatické pole oblast Ω_1 definuje vzduch s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$, oblast Ω_2 je pro spojky jednotlivých dílů s relativní permitivitou $\epsilon_r = 10^9$, oblast Ω_3 značí ZnO varistory s relativní permitivitou pohybující se v rozmezí hodnot $\epsilon_r = 60 - 900$, oblast Ω_4 je pro porcelánové pouzdro, které má relativní permitivitu $\epsilon_r = 6$. Oblast Ω_5 značí hliníkové plošky mezi ZnO bloky a ty mají relativní permitivitu $\epsilon_r = 10^9$ a poslední oblast Ω_6 je pro vzduchovou mezeru s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$. U proudového pole se k jednotlivým oblastím místo relativní permitivity přiřazuje měrná elektrická vodivost neboli konduktivita γ . Pro oblast Ω_1 je konduktivita $\gamma = 10^{-7} \text{ S.m}^{-1}$, u oblasti Ω_2 je konduktivita $\gamma = 40 \text{ MS.m}^{-1}$. Oblast Ω_3 má konduktivitu v rozmezí hodnot $\gamma = 6,2 \cdot 10^{-6} - 52,6 \text{ S.m}^{-1}$, oblast Ω_4 má měrnou elektrickou vodivost $\gamma = 0.1 \text{ pS.m}^{-1}$, pro další oblast Ω_5 je měrná elektrická vodivost rovna hodnotě $\gamma = 37 \text{ MS.m}^{-1}$ a poslední oblast Ω_6 má zadanou konduktivitu $\gamma = 10^{-7} \text{ S.m}^{-1}$.

Po určení definiční oblasti Ω se přiřadí rovnice pro potenciál φ , okrajové podmínky pro potenciál φ a podmínky pro potenciál φ na rozhraní dvou prostředí, kvůli správnému výslednému numerickému výpočtu rozložení elektrického pole na zadaném omezovači přepětí. Při řešení elektrostatického a proudového pole se potenciál $\varphi(r, z)$ vypočte pomocí Laplaceovy rovnice, která má tvar pro válcové souřadnice:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

(3.2)

Potenciál φ má určité okrajové podmínky a podmínky na rozhraní dvou prostředí. Pro elektrostatické i proudové pole se nachází na hranici A-CH-I-J-K-H v *Obr. 3.8* pro první řešený případ potenciál $\varphi = 594 \text{ kV}$, u druhého je potenciál $\varphi = 1010 \text{ kV}$ a pro poslední třetí případ je určen potenciál $\varphi = 1425 \text{ kV}$. Dále se tyto potenciály také nachází na všech třech stínících kruzích. Lze to vidět v *Obr. 3.8*, kde je na hranici od T do T, od U do U a od V do V tento daný potenciál φ . Na hranici G-L-M-N-S-F v *Obr. 3.9* se zadává pro všechny tři případy potenciál $\varphi = 0 \text{ V}$. Na těchto všech popsanych hranicích platí Dirichletova okrajová

podmínka, též jí lze nazývat okrajovou podmínkou 1. druhu. Pro elektrostatické i proudové pole lze vidět v *Obr. 3.7* na hranici A-B-C-D-E-F a G-H nulovou Neumannovu okrajovou

podmínku $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, která je nulová, protože daný problém je osově symetrický a v osách symetrie leží siločára. Také se jí říká okrajová podmínka 2. druhu. Tato podmínka vyjadřuje derivaci potenciálu φ ve směru vnější normály k dané hranici. Při výskytu Dirichletovy i Neumannovy okrajové podmínky na některých úsecích hranice se říká, že je tam smíšená okrajová podmínka. Na zbylých hranicích platí pro potenciál φ podmínky na rozhraní, které mají tvar pro elektrostatické pole:

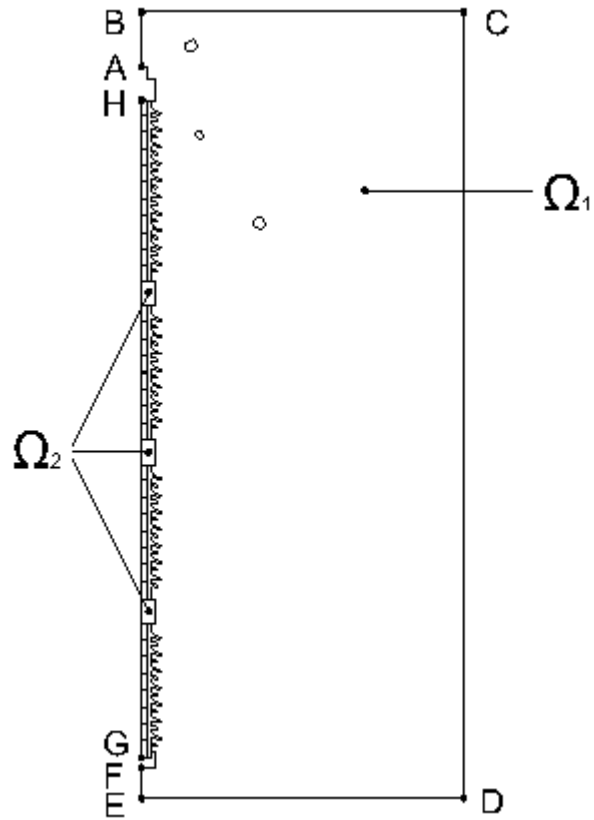
$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad (3.4)$$

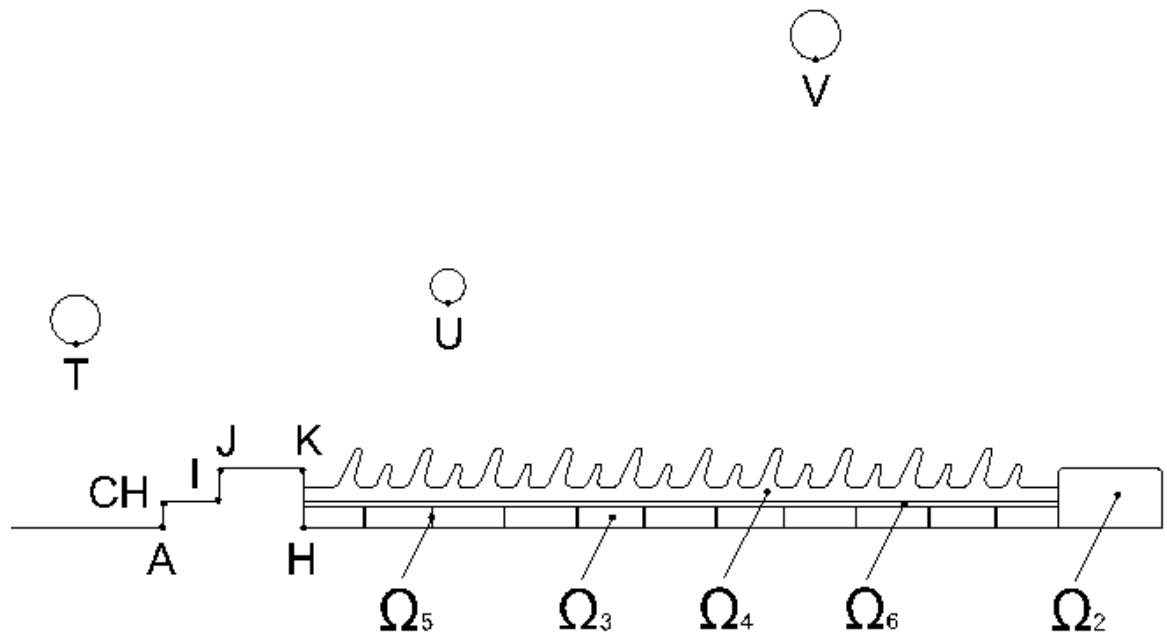
a pro proudové pole:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (3.5)$$

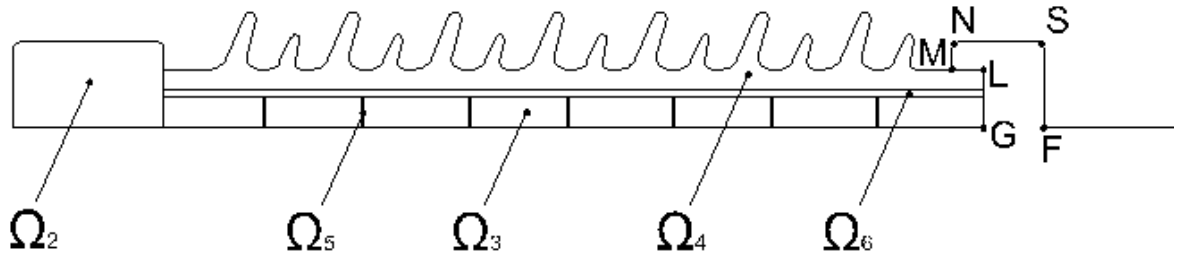
$$\gamma_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \gamma_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad (3.6)$$



Obr. 3.7 Celá definiční oblast omezovače přepětí



Obr. 3.8 Horní část omezovače přepětí a jeho definiční oblast



Obr. 3.9 Dolní část omezovače přepětí a jeho definiční oblast

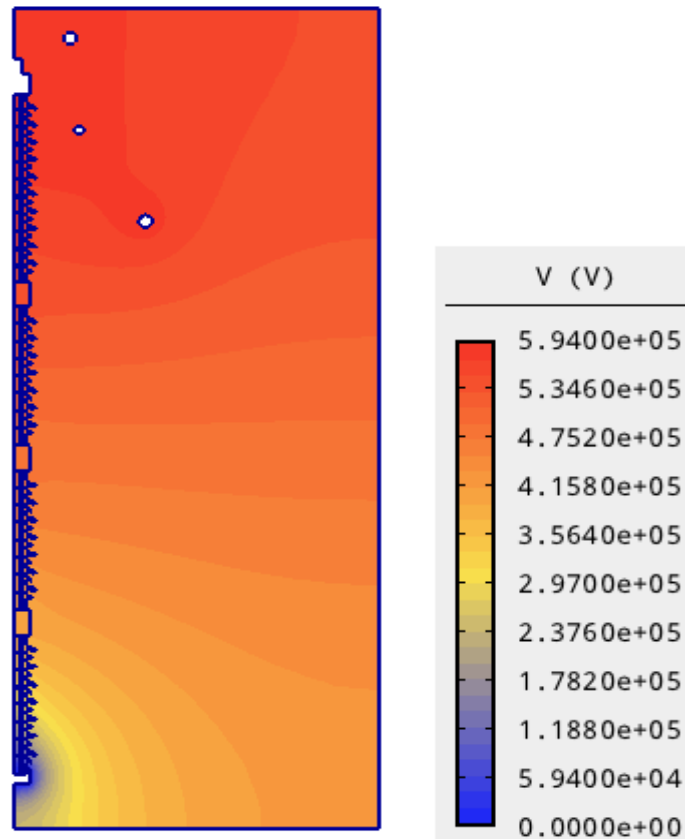
4 Numerická simulace bezjiskřivého omezovače přepětí

Po zadání potřebné okrajové úlohy jsem provedl numerický výpočet rozložení elektrického pole na bezjiskřivém omezovači přepětí. Numerický výpočet je prováděn v programu Agros2D, který ho řeší pomocí metody konečných prvků. U této metody kvůli správnému výslednému řešení se proloží definiční oblast trojúhelníkovou sítí s určitým počtem uzlů. Pro výpočet elektrostatického a proudového pole na daném zařízení je použita síť s 43164 elementy. Díky vyřešení okrajové úlohy se nalezne rozložení potenciálu φ v dané definiční oblasti Ω . Rozložení potenciálu φ na omezovači přepětí při výpočtu elektrostatického pole pro napětí $U = 594$ kV je na *Obr. 4.1*, pro napětí $U = 1010$ kV je na *Obr. 4.2* a pro napětí $U = 1425$ kV lze vidět rozložení potenciálu φ na *Obr. 4.3*.

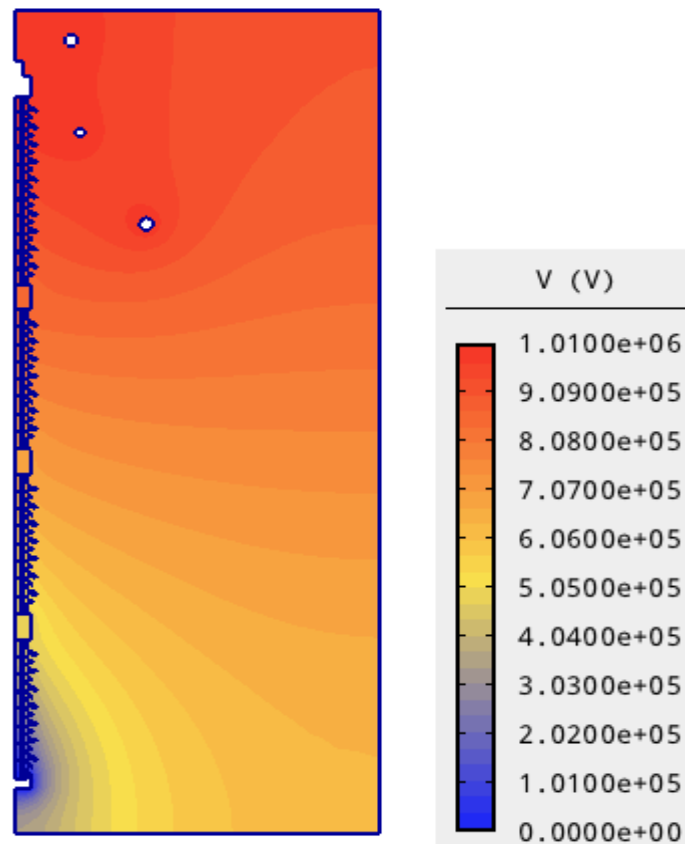
Při známém rozložení potenciálu φ v nějaké definiční oblasti Ω se může díky tomuto potenciálu φ určit rozložení intenzity elektrického pole \mathbf{E} v této dané definiční oblasti Ω . Výpočet rozložení intenzity elektrického pole \mathbf{E} se provádí pomocí definičního vztahu pro potenciál φ . Ten má následující tvar:

$$\mathbf{E} = - \text{grad } \varphi \quad (4.1)$$

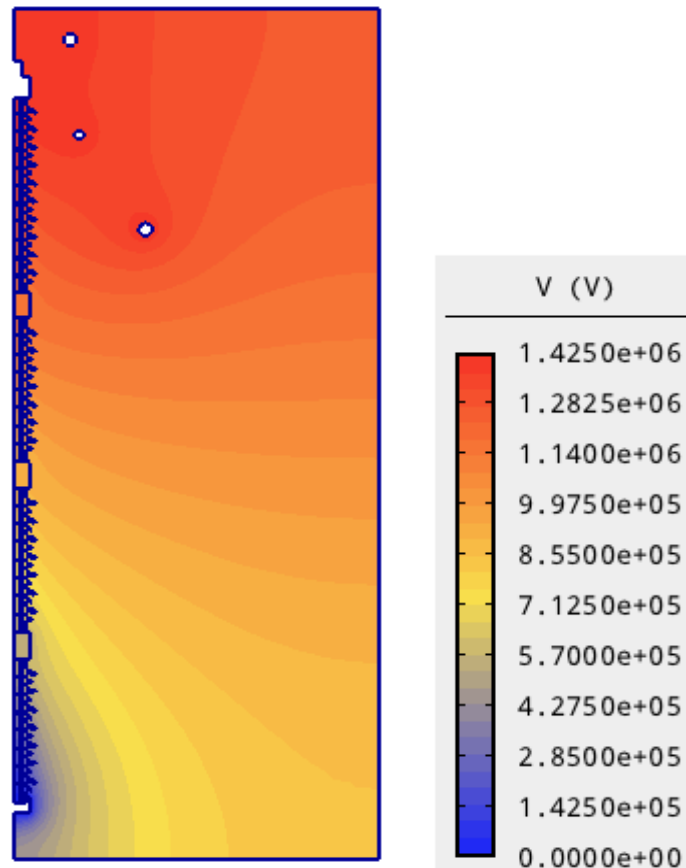
U elektrostatického pole jsem se také zabýval jeho rozložením intenzity \mathbf{E} , která je vyšetřována rovněž pro tři různé stavy napětí. Na *Obr. 4.4* lze vidět rozložení intenzity elektrického pole \mathbf{E} v celé definiční oblasti omezovače přepětí pro napětí $U = 594$ kV, pro napětí $U = 1010$ kV na *Obr. 4.5* a pro poslední stav, kdy je napětí $U = 1425$ kV na *Obr. 4.6*.



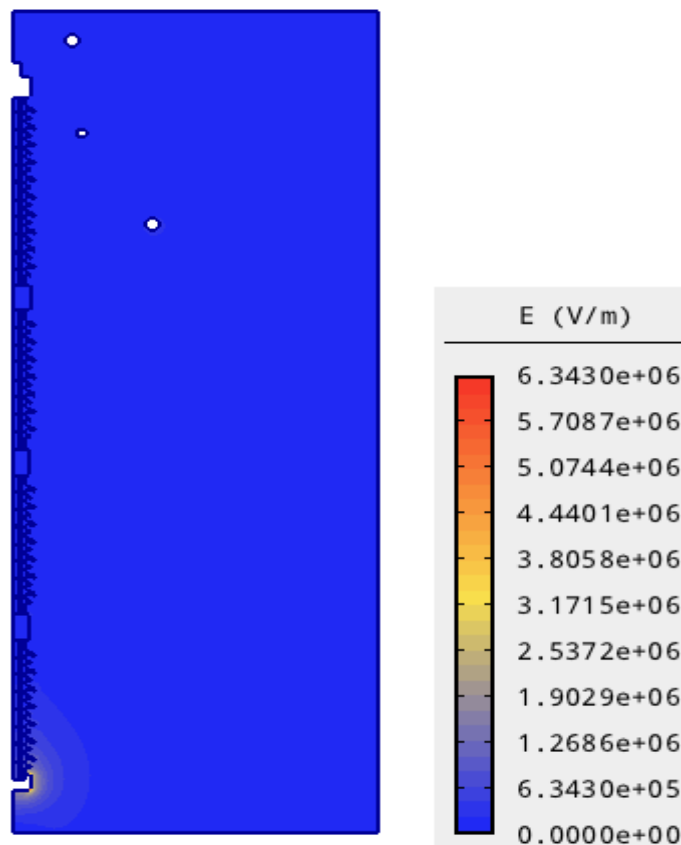
Obr. 4.1 Rozložení potenciálu $\varphi = 594$ kV na bezjiskříštvém omezovači přepětí



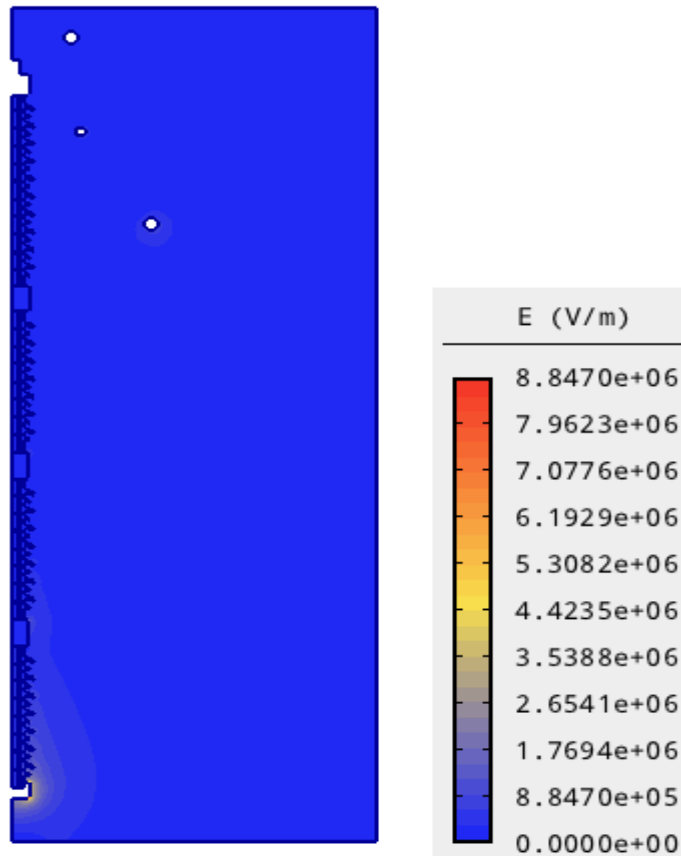
Obr. 4.2 Rozložení potenciálu $\varphi = 1010$ kV na bezjiskříštvém omezovači přepětí



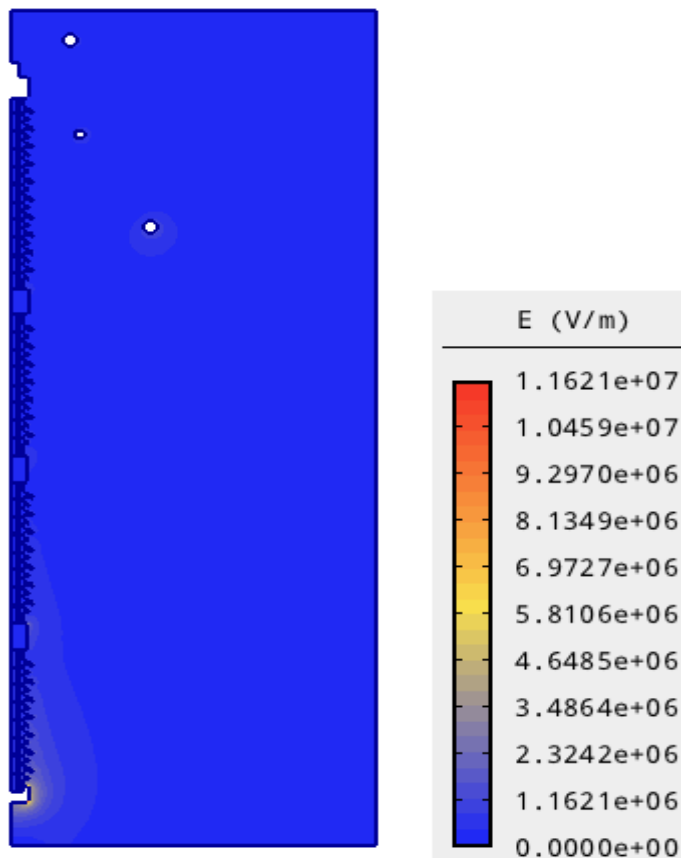
Obr. 4.3 Rozložení potenciálu $\varphi = 1425$ kV na bezjiskřišťovém omezovači přepětí



Obr. 4.4 Rozložení intenzity elektrického pole E na omezovači přepětí pro napětí $U = 594$ kV

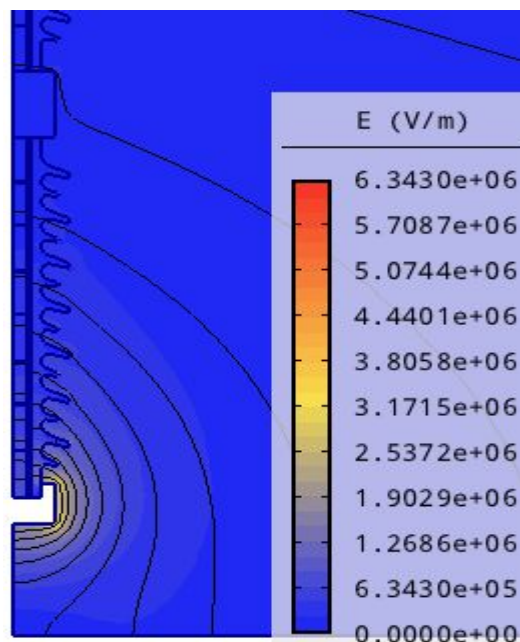


Obr. 4.5 Rozložení intenzity elektrického pole E na omezovači přepětí pro napětí $U = 1010$ kV

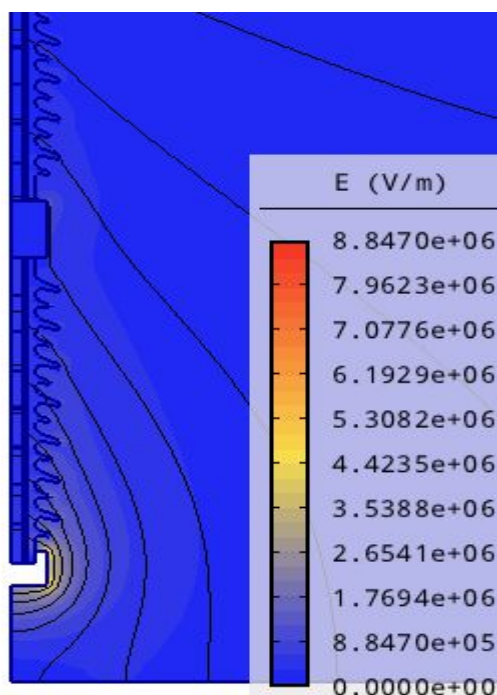


Obr. 4.6 Rozložení intenzity elektrického pole E na omezovači přepětí pro napětí $U = 1425$ kV

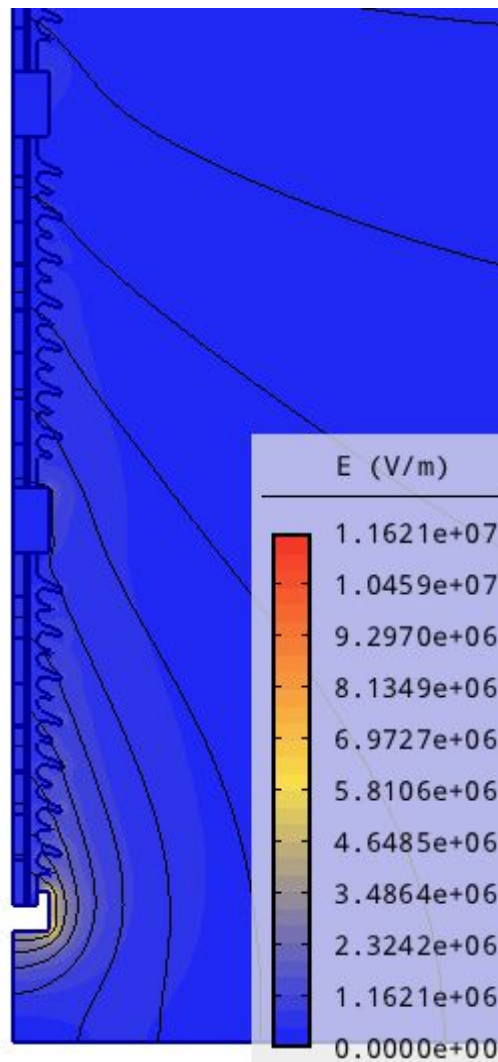
Největší intenzita elektrického pole E je v dolní části omezovače přepětí. Z tohoto důvodu na následujících obrázcích lze vidět podrobněji tuto konkrétní oblast a intenzitu elektrického pole E , která se tam nachází. V *Obr. 4.7* je pro napětí $U = 594$ kV ukázána intenzita elektrického pole E pro přibližnou dolní definiční oblast omezovače přepětí, pro napětí $U = 1010$ kV je v *Obr. 4.8* a pro poslední stav při napětí $U = 1425$ kV je v *Obr. 4.9*.



Obr. 4.7 Intenzita elektrického pole E v dolní oblasti omezovače přepětí pro napětí $U = 594$ kV (kontury značí obrysy ekvipotenciál)

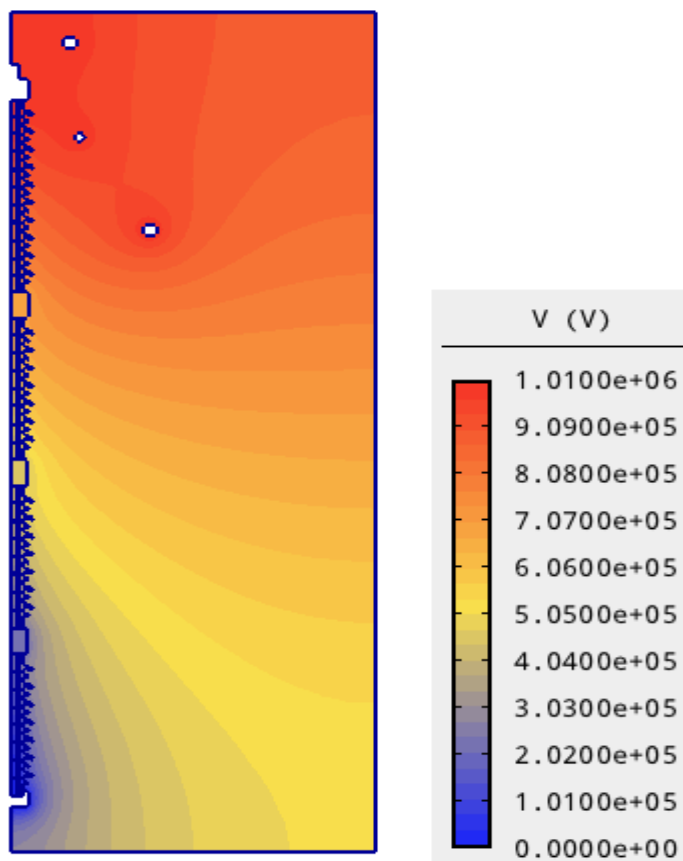


Obr. 4.8 Intenzita elektrického pole E v dolní oblasti omezovače přepětí pro napětí $U = 1010$ kV (kontury značí obrysy ekvipotenciál)

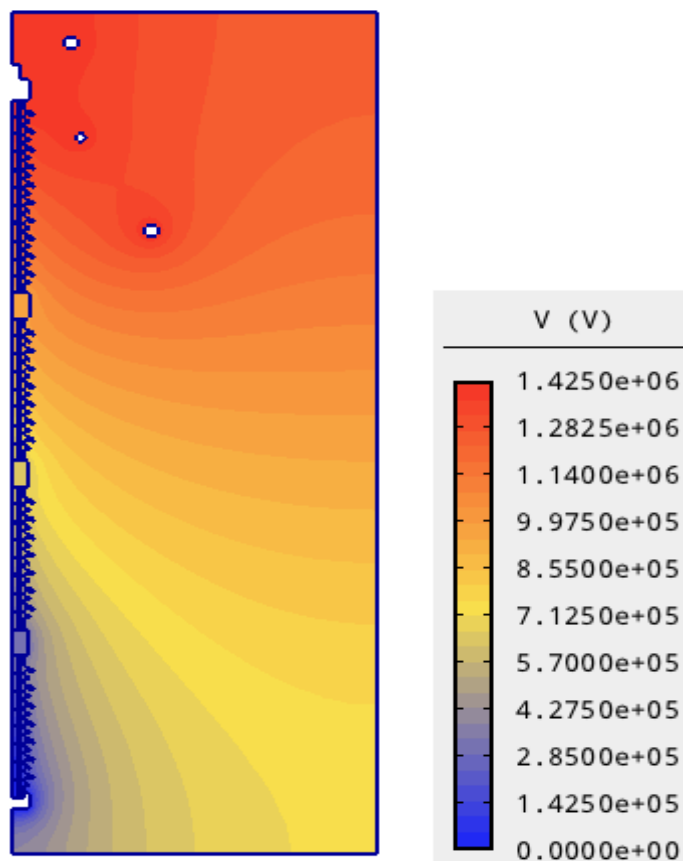


Obr. 4.9 Intenzita elektrického pole E v dolní oblasti omezovače přepětí pro napětí $U = 1425$ kV (kontury značí obrysy ekvipotenciál)

Rozložení potenciálu φ na omezovači přepětí při výpočtu proudového pole pro napětí $U = 1010$ kV je na Obr. 4.10 a pro napětí $U = 1425$ kV lze vidět rozložení potenciálu φ na Obr. 4.11. U proudového pole se nedělal výpočet pro napětí $U = 594$ kV z důvodu velmi nízké elektrické vodivosti varistoru, která vedla v rámci numerického řešení na nereálné výsledky.



Obr. 4.10 Rozložení potenciálu $\phi = 1010$ kV na omezovací přepětí pro proudové pole



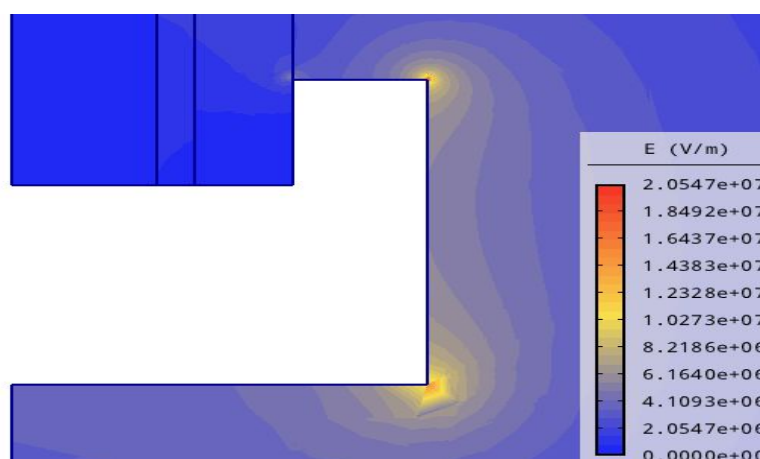
Obr. 4.11 Rozložení potenciálu $\phi = 1425$ kV na omezovací přepětí pro proudové pole

Z výsledků simulací lze pozorovat, že největší potenciál φ je rozložen v horní části omezovače přepětí okolo horní elektrody a stínících kruhů. Stínící kruhy slouží k tomu, aby nedocházelo na povrchu horní elektrody k výbojové činnosti kvůli vysoké intenzitě elektrického pole \mathbf{E} . Stínící kruhy také po celé konstrukci od shora dolů rovnoměrně rozloží potenciál φ , protože velké skokové změny jsou nežádoucí. Při zvětšujícím se elektrickém napětí U na elektrodách, roste intenzita elektrického pole \mathbf{E} a také v rozdílném úhlu přestupují elektrické siločáry z jednoho daného prostředí o permitivitě ε_1 (konduktivitě γ_1) do druhého daného prostředí o permitivitě ε_2 (konduktivitě γ_2). Rozložení potenciálu φ na omezovači přepětí je jak pro elektrostatické, tak i pro proudové pole téměř shodné, což odpovídá předpokladům možnosti aplikace obou přístupů k výpočtu.

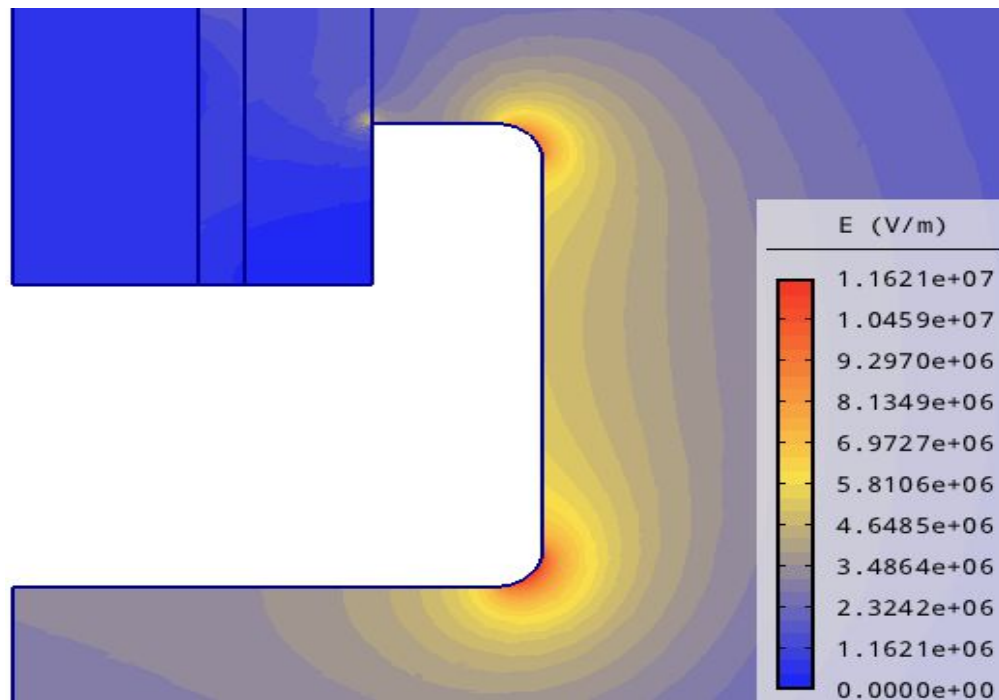
5 Možnosti zlepšení rozložení elektrického pole na bezjiskřišťovém omezovači přepětí

5.1 Ověření vlivu rozložení elektrického pole při různých změnách konstrukce bezjiskřišťového omezovače přepětí

Základním předpokladem vhodného rozložení elektrického pole na omezovači přepětí resp. jiných prvků elektrizační soustavy na úrovni zvláště vysokého napětí je, že jeho konstrukce nebude mít žádné ostré hrany, tudíž je snaha o to, aby byly všechny ostré hrany zaoblené. Pro názornost na *Obr. 5.1* je provedena simulace intenzity elektrického pole \mathbf{E} na omezovači přepětí při napětí $U = 1425$ kV, který má ostré hrany. Pro porovnání na *Obr. 5.2* je zobrazena simulace při těch samých parametrech se zaoblenými hranami. Z obrázků je viditelné, že na omezovači přepětí s ostrými hranami se vyskytují mnohem větší hodnoty intenzity elektrického pole \mathbf{E} , které jsou nejvíce soustředěné právě na těchto ostrých hranách.

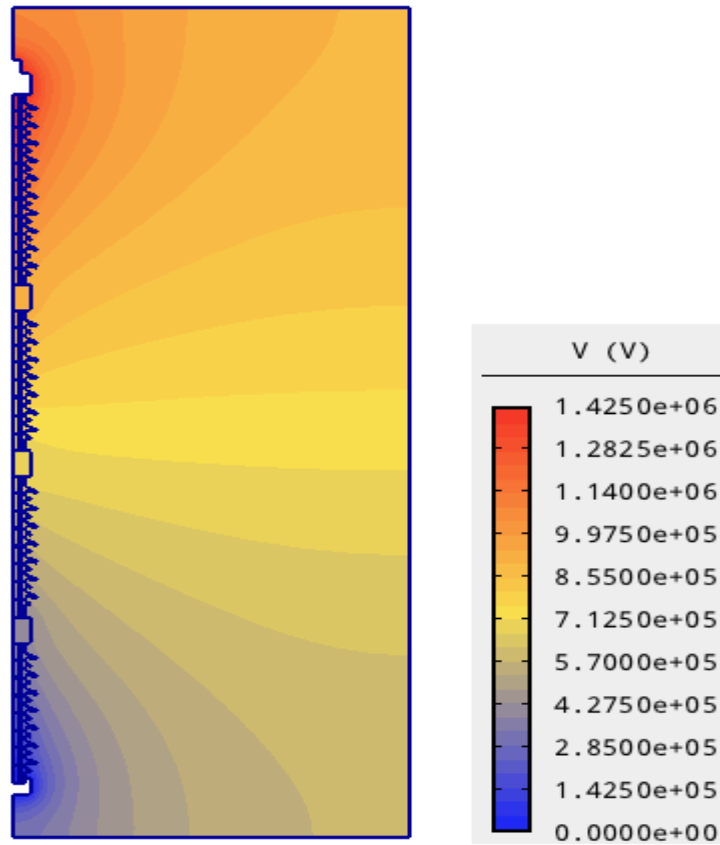


Obr. 5.1 Omezovač přepětí s ostrými hranami při napětí $U = 1425$ kV

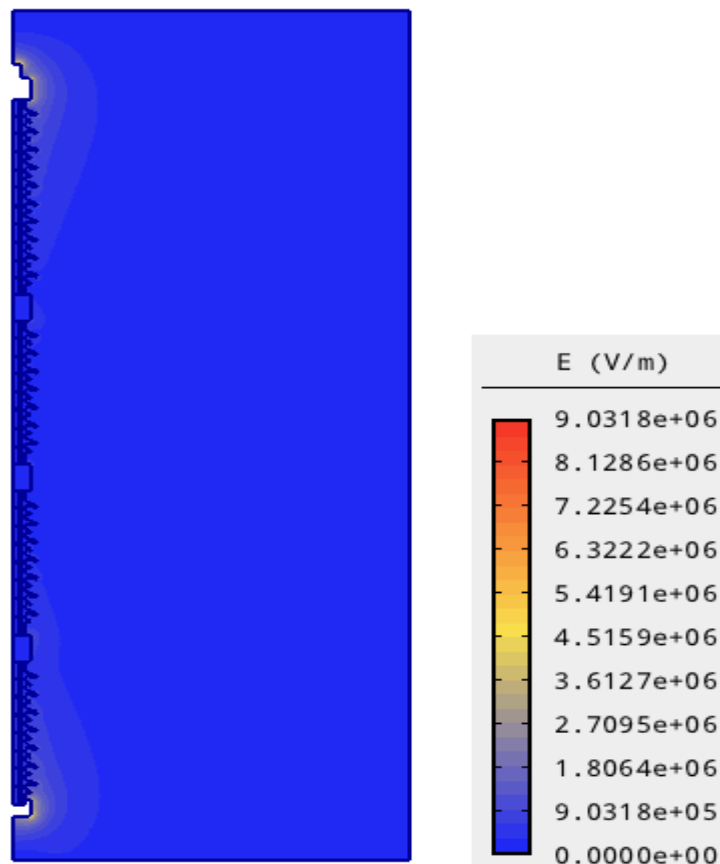


Obr. 5.2 Omezovač přepětí se zaoblenými hranami při napětí $U = 1425$ kV

Další možnost zlepšení rozložení elektrického pole na omezovači přepětí je ta, že se právě použijí stínící kruhy. Ty za normálního stavu zamezí výbojovým činnostem zejména u povrchu horní elektrody, s ohledem na zmenšení vzdálenosti mezi částmi s vysokým a nízkým potenciálem, ale naopak zhorší situaci u spodní příruby. Jejich funkce je ale významná i během svodu přepětí, kdy zlepšují rozložení napětí na sloupci varistorů. Pro svodič přepětí bez stínících kruhů při napětí $U = 1425$ kV je vidět na Obr. 5.3 rozložení potenciálu φ a na Obr. 5.4 rozložení intenzity elektrického pole E . Porovnání změny rozložení potenciálu φ a intenzity elektrického pole E lze udělat s Obr. 4.3 a Obr. 4.6, na kterých je pro stejné parametry omezovač přepětí se stínícími kruhy. Na Obr. 5.4 je patrné, že právě bez stínících kruhů se u plochy horní elektrody vyskytuje velká intenzita elektrického pole E , která způsobí výbojovou činnost (korónu) při překročení elektrické pevnosti vzduchu E_p , jenž má hodnotu 3 MV/m. Tudíž právě bez stínících kruhů bude probíhat výbojová činnost u plochy horní elektrody omezovače přepětí. Tento jev je nežádoucí, protože způsobuje na elektrických vedeních energetické ztráty, korozi vodičů, a také může rušit rozhlas. Z těchto všech důvodů se právě používají na omezovači přepětí stínící kruhy, aby zabraňovaly koróně. Výbojová činnost se s ohledem na obdobné hodnoty intenzity může vyskytnout i u plochy dolní elektrody, tam je ale otázkou konkrétní umístění svodiče přepětí v síti (na vedení, na rozvodně), tj. rozložení zemního potenciálu v okolí svodiče, které bude tyto hodnoty ovlivňovat. V rámci provedených simulací nebylo okolí svodiče uvažováno.



Obr. 5.3 Rozložení potenciálu $\varphi = 1425$ kV na omezovači přepětí bez stínících kruhů

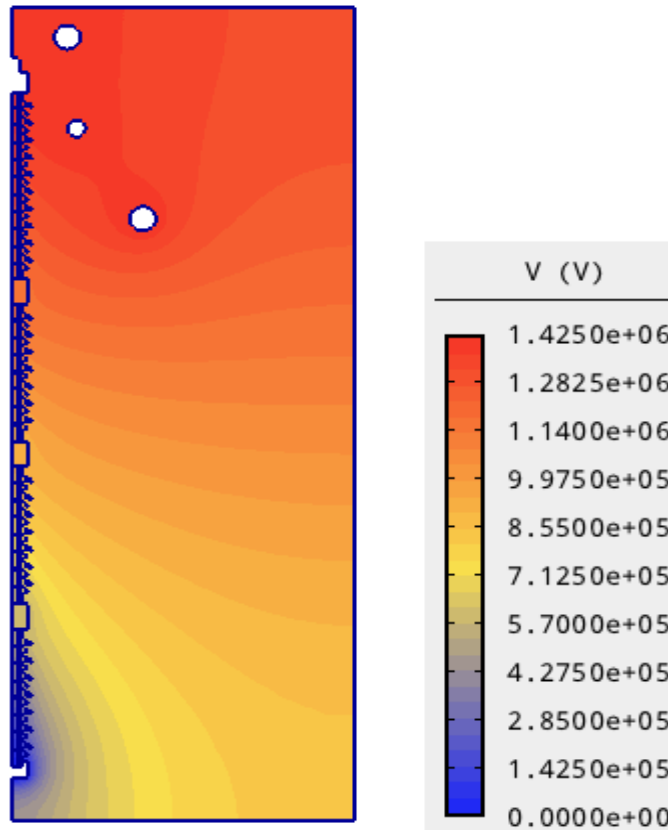


Obr. 5.4 Rozložení int. el. pole E na omezovači přepětí bez stínících kruhů pro napětí $U = 1425$ kV

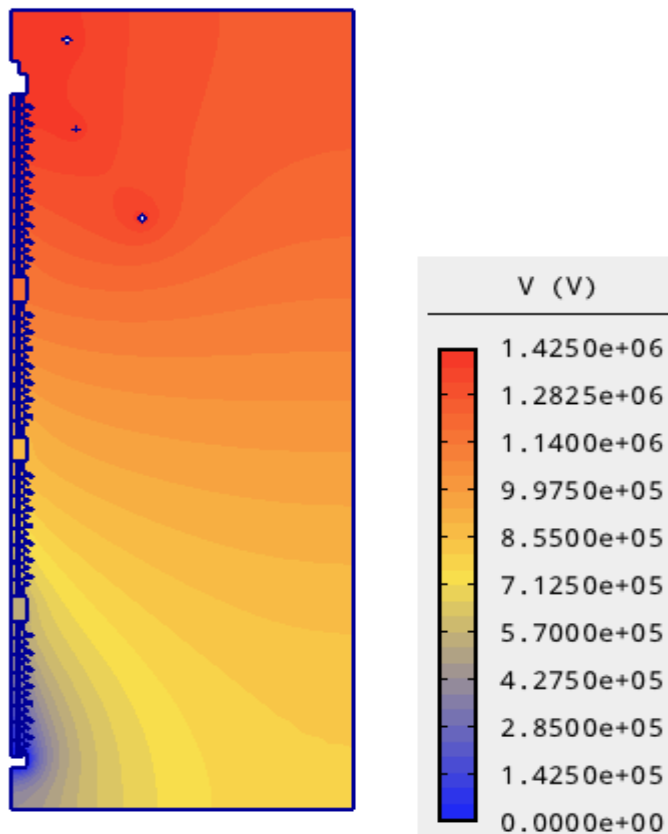
5.2 Možnosti zlepšení rozložení elektrického pole na bezjiskřišťovém omezovači přepětí úpravou stínících kruhů

Dále lze ovlivnit rozložení elektrického pole u omezovače přepětí například zvětšováním a zmenšováním průměru stínících kruhů. Těmito možnostmi lze docílit jiného rozložení elektrického pole u omezovače přepětí, které může být horší či lepší. Na *Obr. 5.5* je vidět, jak se změní rozložení potenciálu $\varphi = 1425$ kV při zvětšení stínících kruhů na dvojnásobek jejich poloměru. Při zmenšení poloměru stínících kruhů na polovinu se změní rozložení potenciálu $\varphi = 1425$ kV tak, jak je vidět na *Obr. 5.6*. U těchto možností lze nejvíce sledovat, jak se na horní části svodiče přepětí jinak rozloží velikost potenciálu φ . Srovnání rozložení potenciálu $\varphi = 1425$ kV lze provést se základní konstrukcí bezjiskřišťového omezovače přepětí na *Obr. 4.3*. Při zvětšení stínících kruhů na dvojnásobek se zmenší velikost intenzity elektrického pole \mathbf{E} okolo stínících kruhů. Naopak při poloviční velikosti stínících kruhů stoupá hodnota intenzity elektrického pole \mathbf{E} okolo stínících kruhů a také začíná nepatrně vzrůstat u plochy horní elektrody.

Možností jak zlepšit rozložení elektrického pole u svodiče přepětí je velmi mnoho. Já jsem zde ukázal pár základních způsobů jak toho docílit. Zlepšení rozložení elektrického pole u omezovače přepětí se dělá pro omezení výbojové činnosti za normálních provozních podmínek resp. dočasného přepětí a dále optimalizaci funkce svodiče během působení přepětí.



Obr. 5.5 Rozložení potenciálu $\varphi = 1425$ kV na omezovači přepětí s 2x většími stínícími kruhy



Obr. 5.6 Rozložení potenciálu $\varphi = 1425$ kV na omezovači přepětí s poloviční velikostí stínících kruhů

Závěr

Hlavním tématem této práce byl numerický výpočet rozložení elektrického pole na bezjiskřišťovém omezovači přepětí. Rozložení elektrického pole na nějakém objektu zkoumání a v jeho blízkém okolí, se zjišťuje pomocí různých matematických metod, které vedou ke správnému výslednému řešení. Matematické metody pro výpočet elektrického pole se dělí na analytické a numerické. Analytické řešení lze použít jen u jednodušších objektů zkoumání. Při řešení složitějších okrajových úloh u 2D a 3D případů se používají numerické metody, protože pomocí analytických metod by výsledné řešení nešlo nalézt vůbec nebo jen velmi těžce za pomoci speciálních znalostí z teorie parciálních diferenciálních rovnic. V současnosti se nejvíce problémů řeší pomocí numerických metod, které jsou velmi promyšlené a propracované. Pro uživatele je na trhu k dispozici mnoho profesionálních softwarových produktů, které umožňují řešit rozložení elektrického pole na nějakém složitějším objektu zkoumání pomocí numerických metod. Nejčastěji je používaná numerická metoda konečných prvků. S těmito softwarovými produkty se velice snadno pracuje, a proto jsou v dnešní době velmi oblíbené pro řešení nejrůznějších fyzikálních problémů. Já jsem využil pro numerický výpočet rozložení elektrického pole na bezjiskřišťovém omezovači přepětí program Agros2D.

Geometrický model bezjiskřišťového omezovače přepětí v řezu jsem dělal v profesionálním kreslicím programu QCAD, který je kompatibilní s programem Agros2D. Díky tomu jsem výsledný geometrický model bez problému importoval do programu Agros2D a tam mu přidělil patřičnou okrajovou úlohu. Výpočet rozložení elektrického pole na svodiči přepětí byl proveden pro tři různé provozní stavy. První provozní stav je takový, kdy se na omezovači přepětí nachází hodnota napětí $U = 594$ kV, která je určena z efektivní hodnoty jmenovitého napětí $U_r = 420$ bezjiskřišťového omezovače přepětí. Druhý provozní stav odpovídá napětí $U = 1010$ kV. To je napětí, které se nachází mezi vrcholovou hodnotou jmenovitého napětí a vrcholovou hodnotou jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulzu ($8/20\mu\text{s}$). Pro třetí provozní stav je na daném svodiči přepětí napětí $U = 1425$ kV. To odpovídá vrcholové hodnotě jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulzu. Pro každý provozní stav se měnila hodnota náhradní permitivity ϵ a vodivosti γ ZnO bloků podle jejich vodivostního stavu.

Po přidělení správné okrajové úlohy geometrickému modelu byl proveden numerický výpočet rozložení elektrického pole na bezjiskřišťovém omezovači přepětí. Řešení bylo uskutečněno pro elektrostatické a proudové pole. Z výsledků simulací lze vidět, že největší potenciál φ se nachází v horní části omezovače přepětí okolo horní elektrody a stínících kruhů. Dále lze pozorovat, že čím je vyšší elektrické napětí U na elektrodách, tím je větší intenzita elektrického pole \mathbf{E} . Rovněž při zvyšujícím se napětí U na elektrodách omezovače přepětí přestupují v rozdílném úhlu elektrické siločáry z jednoho daného prostředí o permitivitě ε_1 (konduktivitě γ_1) do druhého daného prostředí o permitivitě ε_2 (konduktivitě γ_2). Simulace elektrostatického i proudového pole jsou vesměs totožné, což odpovídá předpokladům.

V závěrečné části práce jsem ověřoval možnosti, jak zlepšit rozložení elektrického pole na bezjiskřišťovém omezovači přepětí při různých změnách jeho konstrukce. Velký vliv na velikost intenzity elektrického pole \mathbf{E} mají ostré hrany. Ty způsobují zvyšování výsledných hodnot intenzity elektrického pole \mathbf{E} . Zamezit tomu lze zaoblováním ostrých hran. Tudíž je snaha o to, aby svodič přepětí měl co nejméně ostrých hran. U řešeného bezjiskřišťového omezovače přepětí mají značný vliv na výslednou intenzitu elektrického pole \mathbf{E} také stínící kruhy. Jejich hlavní funkcí je zamezení výbojových činností u plochy horní elektrody a vhodné rozložení potenciálu φ od shora dolů po celé konstrukci. Po odstranění stínících kruhů se vyskytuje u plochy horní elektrody výbojová činnost (koróna) z důvodu velké intenzity elektrického pole \mathbf{E} , která je vyšší než elektrická pevnost vzduchu E_p . Při zvětšování a zmenšování rozměrů stínících kruhů lze pozorovat, jak se mění rozložení potenciálu φ u svodiče přepětí. Dochází také ke změnám velikosti intenzity elektrického pole \mathbf{E} v horní části. Při zvětšení stínících kruhů na dvojnásobek jejich poloměru se intenzita elektrického pole \mathbf{E} zmenší okolo stínících kruhů. Naopak při zmenšení stínících kruhů na polovinu jejich poloměru se intenzita elektrického pole \mathbf{E} zvětší okolo stínících kruhů a také nepatrně vzroste u plochy horní elektrody. Možností jak zlepšovat rozložení elektrického pole je mnoho. Já chtěl poukázat akorát na pár způsobů, jak lze docílit lepších výsledných hodnot rozložení elektrického pole na bezjiskřišťovém omezovači přepětí při různých změnách jeho konstrukce.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus*. 2. vyd. České Budějovice: KOPP, 2012. 538 s. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [2] MAYER, Daniel a POLÁK, Josef. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 456 s.
- [3] PEŠEK, Michal. *Program FEMM – podklady pro výuku v elektronické formě*. Bakalářská práce VUT v Brně, 2009
- [4] Metoda konečných prvků. [online]. [Cit. 10.3.2015]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků
- [5] Přepětí. [online]. [Cit. 28.3.2015]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Přepětí>
- [6] SEDLÁČEK, Roman. *Numerický model svodiče přepětí a rozložení elmg. pole v jeho blízkosti pro hladinu VN*. Diplomová práce ZČU v Plzni, 2011
- [7] Surge Arrester porcelain-housed EXLIM. [online]. [Cit. 9.4.2015]. Dostupné z: <http://new.abb.com/high-voltage/surge-arresters/high-voltage-arresters/protection-of-high-voltage-equipment/substation-applications-porcelain-housed-surge-arrester-exlim>
- [8] KOREJČÍK, Michal. *Návrh svodičů přepětí v průmyslovém rozvodu*. Bakalářská práce VUT v Brně, 2009
- [9] SEDLÁČEK, Jan. *Soubor přednášek z Elektrických přístrojů v EE (EPRE)*. FEL ZČU v Plzni, 2011
- [10] NĚMEC, Ondřej. *Návrh svodičů přepětí v rozváděči vysokého napětí v závislosti na parametrech připojené zátěže*. Bakalářská práce VUT v Brně, 2011