

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv poruchového stavu na 3f vedení na ocelové potrubí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel WEISS**
Osobní číslo: **E10B0651P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vliv poruchového stavu na trojfázovém vedení na ocelové potrubí**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Prostudujte teorii k danému tématu a uveďte stav řešené problematiky.
2. Klasifikujte nežádoucí proudy vznikající v ocelovém potrubí.
3. Proveďte numerické řešení vlivu vybraných poruchových stavů na venkovním vedení na ocelové potrubí v blízkosti vedení.
4. Navrhněte možnosti potlačení vlivu elektromagnetických polí venkovních vedení na ocelové potrubí.

Téma

Vliv poruchového stavu na 3f vedení na ocelové potrubí.

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení magnetického pole v okolí venkovního vedení a vliv jeho poruchového stavu na ocelové potrubí.

Klíčová slova

3-f venkovní vedení, simulace magnetického pole, skin efekt, indukovaný proud, Agros, poruchový stav

Theme

Impact of faulty behaviour of three phase power lines on steel pipe lines.

Abstract

The master theses presents the solution for magnetic field in the surrounding area of power lines and correlation between their faulty behaviour with steel pipe lines.

Key words

Three-phase power line, simulation of magnetic field, skin-effect, induced current, Agros, fault in power lines

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 8.6.2012

Pavel Weiss

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval své rodině za podporu a vytvoření zázemí nejen při tvorbě této bakalářské práce, ale při celém studiu.

Zvláště děkuji své vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Šroubové za odborné konzultace, rady a trpělivost při zpracování této práce.

Obsah

OBSAH.....	6
SEZNAM SYMBOLŮ.....	7
ÚVOD.....	7
TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE.....	8
1.1 VZNIK A VÝVOJ TEORIE.....	8
1.2 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE A MAXWELLOVY ROVNICE.....	9
1.2.1 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru.....	9
1.2.2 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru.....	11
1.3 ROVNICE KONTINUITY.....	12
1.4 SKINEFEKT.....	12
NUMERICKÉ ŘEŠENÍ ELEKTRICKÝCH A MAGNETICKÝCH POLÍ.....	12
1.5 SPOJITÝ MODEL.....	12
1.6 DISKRÉTNÍ MODEL.....	13
1.7 ŘEŠENÍ ÚLOHY Z PŮHLEDU SOFTWARE.....	15
SOFTWARE AGROS2D.....	16
PŘENOSOVÁ A ROZVODNÁ SOUSTAVA V ČR.....	17
1.8 PROVOZ SÍTĚ Z PŮHLEDU UZLU TRANSFORMÁTORU.....	18
1.9 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	18
1.10 PŘEDPISY A SMĚRNICE.....	19
1.11 PORUCHOVÉ STAVY.....	20
ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY.....	21
1.12 PRE-PROCESSING.....	22
1.13 VLIV UMÍSTĚNÍ POTRUBÍ.....	24
1.14 SKINEFEKT.....	28
1.15 VODIVOST ZEMĚ.....	29
1.16 NÁVRATOVÝ ZKRATOVÝ PROUD.....	30
1.17 VELIKOST POTRUBÍ.....	31
1.18 NESOUBĚŽNÁ POTRUBÍ.....	31
1.19 MAGNETICKÁ INDUKCE V POTRUBÍ.....	32
1.20 ZTRÁTY V POTRUBÍ.....	32
MOŽNOSTI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY.....	32
ZÁVĚR.....	33
POUŽITÁ LITERATURA.....	35
SEZNAM PŘÍLOH.....	1

Seznam symbolů

A [Wb/m].....	Magnetický vektorový potenciál
B [T].....	Magnetická indukce
c [m].....	Uzavřená křivka
D [C/m ²].....	Elektrická indukce
E [V/m].....	Intenzita elektrického pole
G [Ω^{-1}].....	Elektrická vodivost
H [A/m ²].....	Intenzita magnetického pole
I [A].....	Elektrický proud
J [A/m ²].....	Proudová hustota
K_N [C/m ²].....	Normálová složka hustoty plošného proudu
Q [C].....	Elektrický náboj
R [Ω].....	Elektrický odpor
dS [m ²].....	Element plochy
t [s].....	Čas
U [V].....	Elektrické napětí
dV [m ³].....	Element objemu
\mathcal{V} [C/m].....	Konduktivita
\mathcal{D} [m].....	Hloubka vniku
\mathcal{E} [F/m].....	Permitivita
Φ [Wb].....	Magnetický indukční tok
φ [-].....	Elektrický potenciál
φ_m [-].....	Magnetický skalární potenciál
μ [H/m].....	Permeabilita
ω [rad/s].....	Úhlová rychlost
Ψ [C].....	Elektrický indukční tok
ρ [Ωm].....	Měrný elektrický odpor
ρ [C/m ³].....	Objemová hustota náboje
σ [C/m ²].....	Plošná hustota náboje
τ [C/m].....	Křivková hustota náboje

Úvod

Technický pokrok je nedílnou součástí každé civilizace. S rozvojem technologií a zvyšující se životní úrovně obyvatelstva přichází zvýšená poptávka po elektrické energii domácností, průmyslových podniků a dalších institucí. S tím souvisí rozšiřování starých a budování nových koridorů pro energetické systémy. Z ekonomických důvodů a také z důvodu problematiky výkupu pozemků jsou koridory společné pro více přenosových systémů. Vzniká tak nutnost vzájemné elektromagnetické kompatibility daných systémů, tedy požadavek na schopnost zařízení správně pracovat bez závažného vzájemného ovlivnění svých funkcí. Je nutné také respektovat ekologické požadavky.

Předkládaná práce se zabývá poruchovým stavem na třífázovém venkovním vedení a jeho vlivem na ocelové potrubí. Zaměřuje se na různé vstupní parametry. Jedná se především o

různé typy vedení při různých napěťových hladinách, vodivost země, vliv umístění potrubí, vliv zkratového proudu vracejícího se zemí a vliv velikosti potrubí.

Text je rozdělen do několika částí. V první části je teoreticky popsána problematika elektromagnetického pole. Zahrnuje Maxwellovy rovnice, rovnice kontinuity, popis skinefektu a základní metody jejich numerického řešení. V druhé části se zaměřuje na popis použitého softwaru Agros 2D a přenosové a rozvodné soustavy používané v České republice.

Třetí částí jsou simulace dané problematiky. Zahrnují rozbor problému v použitém softwaru a výsledky simulací. Následují závěry z nich plynoucí a možnosti řešení případných problémových stavů.

Teorie elektromagnetického pole

1.1 Vznik a vývoj teorie

Elektromagnetické jevy byly zkoumány mnoha významnými fyziky již od konce 18. století. Mezi nejvýznamnější patří Charles Coulomb, Alessandro Volta, Georg Ohm, Gustav R. Kirchhoff a další. Revoluční myšlenky patřily bezpochyby také Michaelu Faradayovi (1791 – 1867), který objevil zákon elektromagnetické indukce. Také přišel s myšlenkou, že celý prostor vyplňuje jakýsi éter, který zprostředkuje působení jevů. Tedy, že nejde o působení na dálku, ale že se působení šíří prostřednictvím éteru s konečnou rychlostí. Matematicky se snažil tyto představy vyjádřit James Clerk Maxwell (1831 – 1879). Na jeho počest byly výsledné rovnice nazvány Maxwellovy rovnice (dále MR).

V této době se ještě nepodařilo vysvětlit podstatu elektromagnetického pole. Až později Albert Einstein v roce 1905 formuloval speciální teorii relativity. Ta ukázala, že pole má podstatu hmoty (je nositelem energie, má hmotnost).

Maxwellova teorie založena na Faradayových experimentech - je tzv. makroskopická. Nelze jí řešit mikroskopická měřítká, kde se významně projevuje atomární či molekulová struktura. Existuje ještě jedno omezení této teorie: platí pro prostředí v klidu. Počátkem 20. století byla vybudována teorie pro pohybující se prostředí, říká se jí relativistická elektrodynamika. Ta nám vysvětluje jednotnou povahu elektromagnetických jevů. Její výklad je však matematicky složitý a v technické praxi nám výsledky podstatně neovlivní, proto se spokojíme s předrelativistickou teorií. [1]

1.2 Elektromagnetické pole a Maxwellovy rovnice

Rozlišuje se několik typů pole podle různých hledisek.

Prostorové uspořádání :

- pole jednorozměrné (1D), dvojrozměrné (2D), trojrozměrné (neboli prostorové, 3D)
- homogenní (veličiny charakterizující pole jsou stejné v celém prostoru)
- charakter pole : vírové / nevírové (neboli potenciální) , zřídlové / nezřídlové (solenoidální)

Časový průběh pole :

- neproměnné (stacionární, náboje se nepohybují)
- proměnné (nestacionární), při pomalém pohybu nábojů – kvazistacionární, speciálním případem je stav harmonický

Problémy, které řešíme v souvislosti s elektromagnetickým polem, jsou dvojího druhu. Jedná se o analýzu pole, kdy se snažíme z parametrů zdrojů určit rozložení pole. Inverzní úloha je syntéza pole, při níž určujeme zdroje pole z jeho časo-prostorové charakteristiky [1]. Tato práce se zabývá analýzou pole.

1.2.1 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru

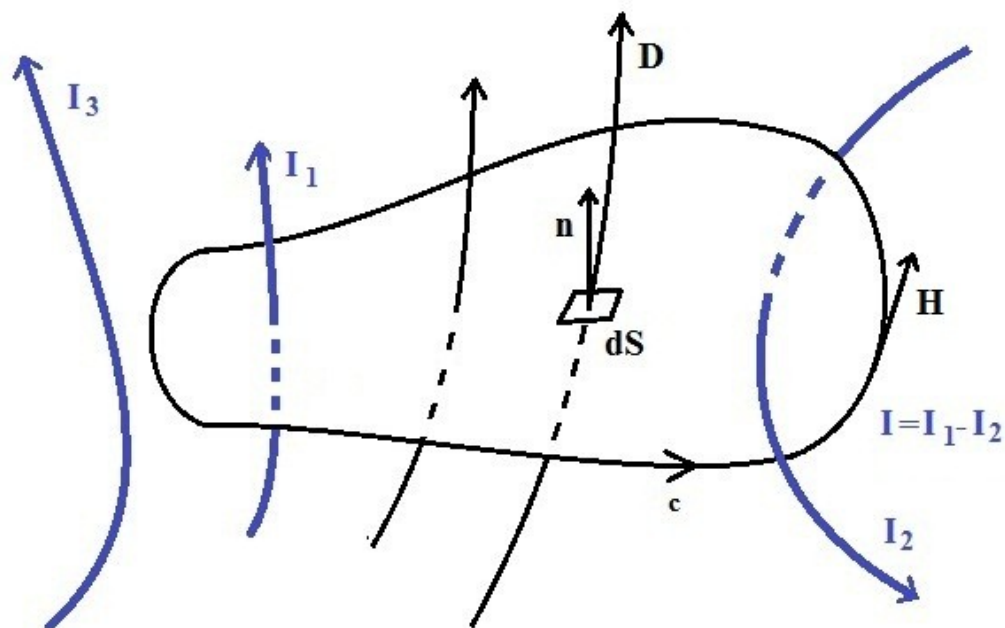
Zákon celkového proudu, zobecněný Ampérův zákon

$$\text{I.} \quad \oint_C H dl = I + \frac{d\Psi}{dt}, \quad \text{kde} \quad \Psi = \int_S D dS \quad (1)$$

- integrace (cirkulace) vektoru intenzity magnetického pole po libovolně uzavřené

křivce je rovna součtu proudu I a tzv. posuvného proudu $\frac{d\Psi}{dt}$, spřažených s touto křivkou.

Výraz na levé straně rovnice nazýváme *oběhové magnetické napětí*.

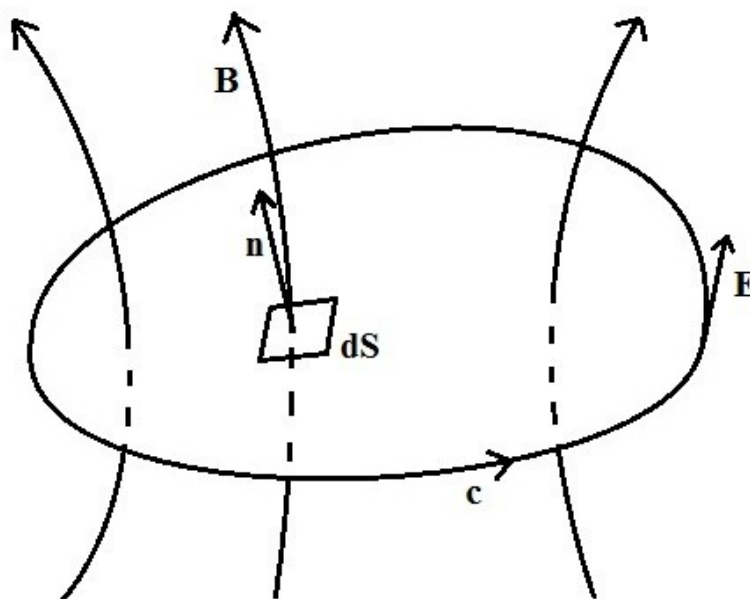


Obr. 1-1 Zobecněný Ampérův zákon

Faradayův indukční zákon

$$\text{II. } \oint_c E dl = -\frac{d\phi}{dt}, \quad \text{kde } \phi = \int_s B dS \quad (2)$$

- cirkulace vektoru intenzity elektrického pole po libovolné uzavřené smyčce je rovna záporné změně magnetického indukčního toku podle času. Levou stranu rovnice můžeme nazvat *oběhové elektrické napětí*.



Obr. 1-2 Faradayův indukční zákon

Gaussova věta

$$\text{III.} \quad \oint_S D dS = Q, \quad \text{kde} \quad Q = \int_V \rho dV \quad (3)$$

- elektrický indukční tok na libovolné uzavřené ploše je roven celkovému náboji obsaženém touto plochou. V takovém případě je pole zřídlové.

Zákon spojitosti magnetického indukčního toku

$$\text{IV.} \quad \oint_S B dS = 0 \quad (4)$$

- magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou plochou je roven nule. Magnetické pole je nezřídlové.

1.2.2 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru

S integrálním tvarem se nám nepracuje tak dobře. Proto zavádíme diferenciální tvar. Je nutné si uvědomit, že na rozdíl od integrálního tvaru, platí jen v regulárních bodech (tam kde je pole spojitě včetně její první derivace). V bodech nespojitosti zavádíme podmínky na rozhraní.

$$\text{I.} \quad \text{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (5)$$

- rotace vektoru intenzity magnetického pole je rovna proudové hustotě a hustotě posuvného proudu

$$\text{II.} \quad \text{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (6)$$

- rotace vektoru intenzity elektrického pole je rovna záporné změně intenzity magnetického pole podle času.

$$\text{III.} \quad \text{div} D = \rho \quad (7)$$

- divergence vektoru elektrické indukce je rovna objemové hustotě náboje.

$$\text{IV.} \quad \text{div} B = 0 \quad (8)$$

- divergence vektoru intenzity magnetického pole je rovna nule.

Podmínky na rozhraní :

- dvě dielektrika o permitivitách ϵ_1, ϵ_2

$$E_{1t} = E_{2t} \quad D_{2n} - D_{1n} = \sigma \quad (9)$$

- dvě magnetika o permeabilitách μ_1, μ_2

$$H_{1t} - H_{2t} = K_N \quad B_{1n} = B_{2n} \quad (10)$$

- dvě vodivá prostředí o konduktivitách γ_1, γ_2

$$E_{1t} = E_{2t} \quad J_{1n} = J_{2n} \quad (11)$$

X_{1t} a X_{2t} označují tangenciální složky vektoru X . Složky X_{1n} a X_{2n} nazýváme normálové.

Výraz K_N značí normálovou složku hustoty plošného proudu.

1.3 Rovnice kontinuity

Jedná se o tzv. pátou Maxwellovu rovnici pro proudovou hustotu.

$$\oint_S \mathbf{J} dS = -\frac{dQ}{dt} \quad (12)$$

- platí pro libovolnou uzavřenou plochu S a náboj Q uvnitř této plochy

Uveďme pro úplnost ještě materiálové vztahy.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad [\text{C/m}^2] \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \text{kde } \mu = \mu_0 \mu_r \quad (\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}) \quad (14)$$

1.4 Skinefekt

Jedná se o fyzikální jev v elektromagnetickém poli. Skinefekt (neboli povrchový jev) se projevuje nerovnoměrným rozložením proudové hustoty, případně magnetického toku v průřezu vodiče protékaným střídavým proudem. Rozlišujeme tedy *elektrický* a *magnetický* povrchový jev. Proud procházející vodičem indukuje magnetické pole, jehož působení na jinou část vodiče, způsobí vznik vířivých proudů. Tyto proudy působí stejným směrem s protékaným proudem po okraji vodiče, uvnitř vodiče se odečítají. Tím vzniká nerovnoměrné rozložení proudu. Tento jev se vyskytuje pouze u střídavého proudu. Indukované napětí, které je příčinou vířivých proudů, vzniká pouze u časově proměnného magnetického toku. Platí, že proudová hustota klesá exponenciálně od kraje vodiče. V této souvislosti definujeme tzv. *hloubku vniku*, tedy hloubku, v níž intenzita poklesne na 37%. Odvození lze najít v [5].

$$J = J_s e^{-d/\delta}, \quad \text{kde } \delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (15)$$

Je tedy vidět, že povrchový jev závisí na rezistivitě a permeabilitě vodiče, ale také na frekvenci střídavého napájení.

Numerické řešení elektrických a magnetických polí

1.5 Spojitý model

Uvažujme geometrickou oblast Ω , kde řešíme rozložení elektromagnetického pole. Můžeme si tuto oblast rozdělit na podoblasti $\Omega_1, \Omega_2, \dots$ o různých elektrických vlastnostech $\mu_{1,\epsilon_1,\gamma_1}, \mu_{2,\epsilon_2,\gamma_2}, \dots$. Ke každé podoblasti přiřadíme parciální diferenciální rovnici popisující chování zkoumané veličiny v daném místě. Řešení takových rovnic je nekonečně mnoho. K jednoznačnosti řešení potřebujeme ještě přidat tzv. *hraniční podmínky* (tedy *okrajové podmínky* a *podmínky přechodu* mezi jednotlivými podoblastmi). Takto zadanou úlohu označujeme jako *stacionární okrajovou úlohu*. Pokud řešíme časo-prostorovou oblast, nazýváme jí *nestacionární okrajovou úlohu*. Podrobnější popis najdeme v [2].

V předchozí kapitole jsme si již uvedli rovnice stacionárního elektrického (II., III. Maxwellova rovnice a rovnice kontinuity), a magnetického pole (I. a IV. MR), včetně materiálových vztahů (13), (14). Tyto rovnice většinou neřešíme přímo, ale prostřednictvím potenciálů. Při zobrazování dvojrozměrných potenciálních polí kreslíme obvykle *ekvipotenciální čáry* (hypotetické čáry s konstantním potenciálem).

potenciálové pole (skalární potenciál)

$$\text{elektrický potenciál } \varphi \quad E = -\text{grad } \varphi \quad (16)$$

$$\text{magnetický potenciál } \varphi_m \quad H = -\text{grad } \varphi_m \quad (17)$$

vírové pole (vektorový potenciál, $\text{div } A = 0$.. podmínka nezřídlovosti)

$$\text{magnetický potenciál } A \quad B = \text{rot} A \quad (18)$$

Hraniční podmínky

Podmínky přechodu mezi jednotlivými rozhraními jsme si také již uvedli (9), (10) a (11). Uvedeme si ještě okrajové podmínky. Označme si \mathcal{U} jednu z následujících veličin \mathbf{E} , \mathbf{B} , φ , \mathbf{A} , \mathbf{u} . Pro jednoznačnost řešení potřebujeme na hranici oblasti Ω , značené Γ , znát jednu z následujících informací :

$$\psi|_{\Gamma} = f \quad \text{tzv. Dirichletova okrajová podmínka} \quad (19)$$

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial n} \right|_{\Gamma} = f \quad \text{tzv. Neumannova okrajová podmínka} \quad (20)$$

Jinými slovy potřebujeme znát průběh dané veličiny nebo její derivace podle vnější normály n hranice Γ . Pro úplnost uveďme, že ještě existuje **Newtonova** okrajová podmínka. Ta se však v elektrotechnice vyskytuje jen výjimečně. [2]

1.6 Diskrétní model

Chceme-li vyřešit problém diskrétně, pomocí počítače, využíváme obvykle metodu sítí. Její výhoda spočívá v univerzálnosti použití - lze ji aplikovat na téměř libovolný typ oblasti i úlohy. Základní myšlenka této metody spočívá v pokrytí řešené oblasti pomyslnou sítí čtvercovou, obdélníkovou, trojúhelníkovou, popř. jiného tvaru buňky. Vzdálenost mezi uzly sítě označujeme *krok*. Můžeme použít síť s konstantním krokem (rovnoměrné) nebo s proměnným krokem (nerovnoměrné). Takové sítě vedou k delšímu výpočtu, zato dosáhneme lepší aproximace. Ve vnitřních uzlech nahradíme parciální diferenciální rovnici její *diferenční aproximací*. Stejnou operaci provedeme i na hraniční podmínky. Tím vytvoříme *diskrétní model* našeho problému. Takovou soustavu diferenčních rovnic řešíme vhodnou numerickou metodou. [2]

Aproximace parciálních diferenciálních rovnic

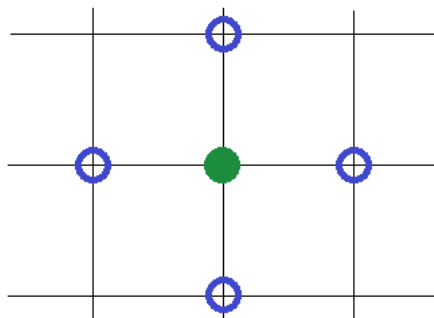
Obvykle se provádí následujícím postupem. Nejdříve se vytvoří diferenční aproximace všech derivací, které se vyskytují v řešení diferenciální rovnice, následně se dosazují za

derivace v diferenciální rovnici. Tím nám vznikne diferenční aproximace dané rovnice. Podle toho, jakou zvolíme přesnost diferenční aproximace, vyjde nám úměrně přesná aproximace rovnice.

K vytvoření diferenční aproximace bereme Taylorův rozvoj funkce ve tvaru :

$$v(\xi) = v(\xi_i) + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} \frac{d^{(k)}v(\xi_i)}{d\xi^k} (\xi - \xi_i)^k + R_{n+1}(\xi) \quad (21)$$

Existuje více postupů jak aproximace aplikovat. Třibodové uvažují pouze hodnoty ve dvou uzlech, třetí se dopočítává. Lepší aproximace dosáhneme např. pětibodovým schématem.



Obr. 2-3 Příklad pěti-bodového schématu

Vlastnosti diferenčních aproximací

V [2] se uvádí, že pro zvolení vhodné aproximace bereme v úvahu především následující hlediska.

- *Numerická stabilita řešení* – při přechodu z jedné časové hladiny na další se dopouštíme chyby. Jedná se především o chyby zaokrouhlovací a ty způsobené nepřesným zadáním pravé strany řešené diferenciální rovnice. Hledáme tedy podmínky, za kterých se tyto chyby nezvětšují. Toto je vlastnost přímo diferenční formule. Pro danou diferenciální rovnici existují formule stabilní, podmíněně stabilní (závislost kroku sítě na časovém kroku) i nestabilní.
- *Konvergence řešení* – při nahrazování spojitého modelu diskretním dochází k chybám. Konvergence nám udává, jak se tyto chyby zmenšují v závislosti na voleném kroku sítě. Určitou představu nám dává zbytkový člen aproximace.
- *Odhad chyby řešení* – obvykle neznáme přesné řešení diferenciální rovnice. Abychom dokázali určit chybu spočteného řešení, odhadujeme ji z následujícího postupu. Necháme proběhnout výpočet s plným krokem a polovičním krokem. Z rozdílu spočtených výsledků lze již určit chybu dané metody.

Metoda konečných prvků

Mezi dnešními moderními metodami v oblasti inženýrských výpočtů převládá metoda

konečných prvků. Analytické metody jsou založeny na integrálním, popřípadě diferenciálním počtu ([10]). MKP využívá variačního počtu, hledá minimum nějakého funkcionálu. Funkcionál je zobrazení množiny funkcí do množiny čísel (např. určitý integrál). Základním funkcionálem je v tomto případě *energie napjatosti*. Tuto energii lze určit pro libovolný deformovaný tvar, ze všech tvarů si však soustava vybere tu nejméně energeticky náročnou variantu. To matematicky vyjadřuje *věta o minimu kvadratického funkcionálu*. Variační metody dokážou při daných okrajových podmínkách najít minimum této energie a nalézt tedy takový tvar, který se ve skutečnosti realizuje. Z deformačních posuvů bodů stavu tělesa lze následně určit, pomocí materiálových charakteristik, složky výsledného tenzoru napětí. Pro dvojrozměrné úlohy využívá obvykle trojúhelníkové sítě. V jeho vrcholech se určují hodnoty složek posuvů.

1.7 Řešení úlohy z pohledu softwaru

Každý program, řešící rozložení pole, prochází při výpočtu třemi etapami ([9]).

1) Pre-processing (tzv. příprava úlohy)

V této části se zvolí základní parametry úlohy. Podle druhu řešené úlohy se vybere standardní oblast analýzy pole. Mezi nejpoužívanější oblasti v elektrotechnice patří řešení elektrostatiky, proudového pole (stejnoseměrná a střídavá), magnetostatiky, střídavých magnetických polí a přechodných elektromagnetických jevů. Každá oblast je popsána diferenciálními rovnicemi, podle kterých se chová rozložení daného pole. Dále je potřeba určit souřadný systém a měřítko modelu. Volba vhodného souřadného systému je důležitá, díky symetriím se může snížit dimenze řešení úlohy (např. použití válcových souřadnic na řešení proudového pole koaxiálního kabelu nám z 3D modelu umožní počítat v jedné dimenzi – $(0, 0, R)$). Poté pokračujeme vytvořením geometrického modelu v grafickém prostředí programu. Model skládáme z hraničních úseček a křivek. Určíme také hraniční podmínky a prostředí, která se v modelu vyskytují. Nakonec spustíme generování diskretizační sítě.

2) Processing (řešení úlohy)

Jedná se o proces počítání hodnot v uzlech sítě pomocí diferenčního schématu. Tato část je zcela automatizovaná, stačí stisknout tlačítko výpočtu. V závislosti na složitosti úlohy může tato etapa trvat řádově od několika sekund až k desítkám minut.

3) Post-processing (analýza výsledků)

Výsledné rozložení pole se obvykle zobrazuje ve formě barevných map. U většiny programů si můžeme zobrazit ekvi-čáry (u elektrostatiky ekvipotenciály), rozložení vektorů pole a další veličiny. Při simulaci se obvykle počítá základní veličina – rozložení potenciálu. Většinu ostatních veličin lze pomocí operace gradientu, integrace délkových, plošných, popř. objemových integrálů dopočítat. Tyto možnosti jsou další ze základních vlastností každého simulačního softwaru. Je však obvykle na uživateli, aby znal souvislosti a aby určil jaký typ operace potřebuje použít k dopočítání hledané veličiny. Další obsah se liší u každého softwaru.

Software Agros2D

V dnešní době existuje různý komerční i nekomerční software zabývající se simulacemi fyzikálních polí. Uvedme např. komerční programy QuickField (2D) od firmy Tera Analysis, Opera (3D/2D). Z aplikací pro řešení multifyzikálních polí, tedy i jejich vzájemných vazeb, uvedme ANSYS, nebo COMSOL. Tyto aplikace jsou však natolik profesionální, že cena základní licence se pohybuje řádově v milionech korun. Systém vyvíjený na katedře teoretické elektrotechniky FEL ZCU se jmenuje Agros 2D. V této práci bude využit k simulacím. [6]

Klíčové vlastnosti

Jedná se o multiplatformní aplikaci (distribuce pro MS Windows i Ubuntu Linux) napsanou v jazyce C++. K řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes 2D. V dnešní době lze tímto softwarem simulovat elektrostatické, elektrické proudové a magnetické pole (ustálený stav, harmonická analýza, přechodové jevy), teplotní pole a strukturální mechaniku. Ve vývoji je simulace nestlačitelného proudění a vysokofrekvenčního pole. Nabízí řešení dvourozměrných polí v kartézském nebo osově symetrickém uspořádání. Existuje možnost importu sestavy z CAD programu ve formátu DXF. Dále podporuje skriptování v jazyce Python. To například umožňuje rychlé výpočty iterované v cyklu při posunu části sestavy o malý krok. Jednoduchý editor skriptů je přímo zabudovaný v aplikaci. Nechá nás mimo jiné spouštět části skriptů, popř. vytvoření skriptu z graficky vytvořeného modelu.

GNU GPL licence

Aplikace je vyvíjena pod General Public Licence v2, což lze přeložit jako Všeobecná veřejná licence. Zajišťuje, že se jedná o svobodný software. To dává uživateli právo spouštět program za jakýmkoliv účelem, studovat, jak program pracuje, a přizpůsobit ho svým

potřebám (tedy předpokládá přístup ke zdrojovému kódu), svobodnou možnost redistribuovat kopie a vylepšovat program, zveřejnit zlepšení, dokonce prodávat jeho kopie. [7]

Tvorba sítě

Program využívá k diskretizaci program Triangle založený na Delaunay triangulaci. Jedná se o triangulaci, která se snaží vytvořit trojúhelníky blížící se co nejvíce rovnostrannému trojúhelníku. Minimalizuje maximální úhel v každém z nich. Platí, že uvnitř kružnice opsané libovolnému trojúhelníku, by neměl ležet žádný jiný bod dané množiny. Triangle byl vytvořen na Carnegie Mellon University jako součást projektu Quake, zabývající se simulacemi zemětřesení ve velkém měřítku. V soutěži James Hardy Wilkinson Prize, hodnotící numerický software, v roce 2003 Triangle vyhrál. [8]

Hermes 2D

Jedná se o knihovnu pro vývoj adaptivních hp-FEM / hp-DG řešičů. Algoritmy umožňují řešit širokou škálu problémů od obyčejných diferenciálních rovnic (ODR), stacionární parciální diferenciální rovnice (PDR) až po časové závislé nelineární PDR. Tento projekt je unikátní použitím automatické hp-adaptivity. Dokáže podle potřeby automaticky zjemnit síť, popř. zvýšit řád polynomu na elementu. Knihovna je vyvíjena ve spolupráci Ústavu termomechaniky Akademie věd (Praha), University of Nevada (Reno) a Západočeské univerzity.

Na řešení získané soustavy algebraických rovnic je použit UMFPACK z balíku SuiteSparse (oblíbená soustava funkcí pro řešení nesymetrických, řídkých lineárních systémů $Ax = b$). Oba zdroje jsou distribuovány pod licencí GNU LGPL. [6]

Přenosová a rozvodná soustava v ČR

Elektrizační soustava se skládá z výroben, přenosových a rozvodných soustav a spotřebičů elektrické energie. Jmenovité napěťové hladiny používané v České republice, jsou uvedeny v následující tabulce.

Nízké napětí (nn) [kV]	0,4			0,5	0,69
Vysoké napětí (vn) [kV]	3	6	10	22	35
Velmi vysoké napětí (vvv) [kV]	110			220	
Zvláště vysoké napětí (zv) [kV]	400			750	

Tab. 1 Napěťové hladiny ČR

V první kapitole [12] je uvedeno, že přenosová (nadřazená) soustava slouží k přenosu energie od elektrárny k rozvodným stanicím, napěťová hladina je obvykle 400 a 220 kV. Hladina 400 kV je připojena k evropské síti UCTE. Konstrukčně se řeší jako okružní síť pro zajištění dodávky bez výpadků. Co se týče rozvodné soustavy, používaná napětí jsou nižší, většinou

110 kV, vn a 0.4 kV sdružených. Je provozována paprskovitě, popř. s použitím průběžného rozvodu jako záloha pro případ poruchy. V hustě obydlených oblastech je řešení obvykle mřížové.

1.8 Provoz sítě z pohledu uzlu transformátoru

Transformátory vvn a v distribučních sítích 110 kV jsou s účinně uzemněným uzlem. Případná porucha se okamžitě projeví snížením napětí a zvýšením proudu v postižené fázi. Ta se musí okamžitě odstavit kvůli jeho velikosti. V každé fázi je samostatně ovládaný vypínač. Je možné na nich použít jednopólový systém OZ. V sítích vn jsou převážně uzly uzemněny přes zhášecí tlumivku, která omezuje kapacitní proudy a umožňuje provoz sítě při 1f zemním spojení. Malé distribuční sítě, například v průmyslových závodech, popř. sítě vlastní spotřeby elektráren a tepláren, jsou provozovány s izolovaným uzlem. V takovém případě se kapacitní proud nekompensuje. Podrobněji kapitola 1.3 v [12].

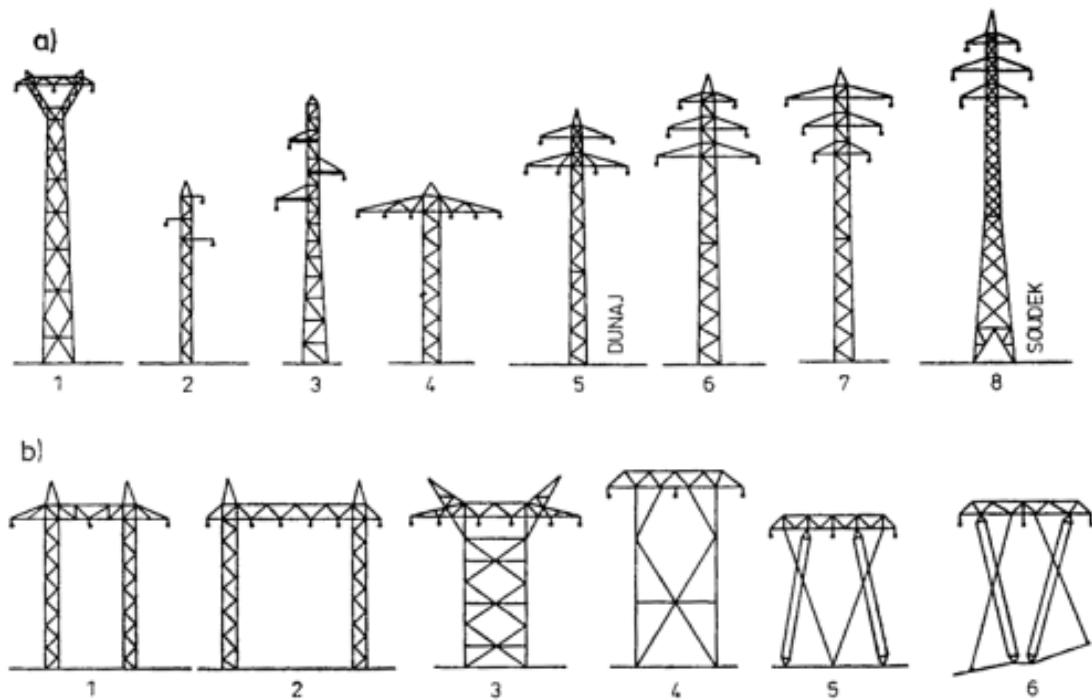
1.9 Venkovní vedení

Existují dvě varianty vedení, podzemní nebo venkovní. Mají různé parametry. Tato práce se zabývá poruchovým stavem na venkovním vedení. Při projektování vedení je potřeba brát v úvahu materiál lan i stožárů. Důležité jsou jeho elektrické a mechanické vlastnosti, ale také z pohledu ekonomického, jeho cena. Berou se v úvahu dané povětrnostní podmínky, námraza i okolní terén.

V přenosové a distribuční soustavě se používají AlFe lana. Železná část působí jako mechanická podpěra, proud vede převážně hliníkovou částí. U 400 kV vedení se obvykle používá trojsvazek s průřezem $3 \times 500 \text{ mm}^2$. Trojsvazky lépe omezují ztráty korunou. Proto u nižší hladiny 220 kV jsou již realizovány pouze jednoduché (450 mm^2), popřípadě dvojsvazkové vodiče s průřezem $2 \times 210 \text{ mm}^2$. V případě 110 kV se pohybují průřezy od 185 do 680 mm^2 . [12]

Stožáry

Existují různé tvary a druhy stožárů pro vvn. Podle funkce a polohy stožáru rozeznáváme nosné, výztužné (kotevní) a rohové stožáry. Rozdíl je hlavně ve směru a velikosti namáhání stožáru. Nosné jsou namáhány vodorovnou silou pouze od tlaku větru na stožár. Jiné vodorovné namáhání se ruší připojením na okolní stožáry. Pevné body na trase jsou výztužné stožáry. Ty jsou plně namáhány tahem vodičů.



Obr. 4-1 Typy stožárů vn, vvn (110 / 220 / 400 kV), převzato z [12]

1.10 Předpisy a směrnice

Stavba těchto zařízení je podřízena velkému množství zákonů, nařízení vlády, vyhlášek a technických norem. Uvedme například zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). Tento zákon např. v § 46 vymezuje jednotlivá ochranná pásma podél vedení. Jedná se o bezpečnostní prostor vymezený po obou stranách vedení (viz Tab. 2). Zákon, určuje jak lze s daným prostorem nakládat, co na něm například nelze pěstovat.

Napětí 1 – 35 kV	vodič bez izolace - 7 m
	vodič s izolací základní - 2 m
	závěsná kabelová vedení - 1 m
110 kV	12 m
220kV	15 m
400 kV	20 m

Tab. 2 Ochranná pásma dle zákona

Nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením stanovuje limity pro nízkofrekvenční elektrická a magnetická pole. Technické normy také mimo jiné určují vzdálenost vodičů nad volně přístupnými plochami.

Venkovní vedení nad

polní cestou	silnicí I. a II. třídy	dálnicí	sportovním hřištěm	neschůdnou částí budovy
6 m	6 m	7 m	10 m	2 m

Tab. 3 Výška vedení nad plochami, převzato z [4]

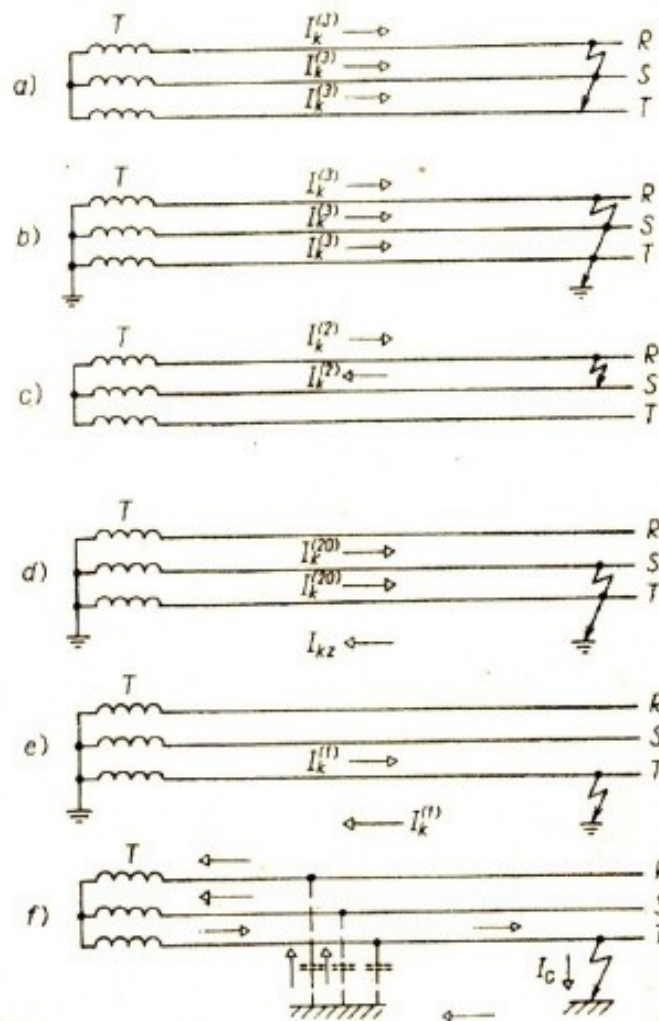
Dále se obvykle řídíme normami ČSN. Jedná se o výňatek ze sbírky zákonů [11].

- ČSN EN 50341-1: Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV
- ČSN EN 50423-1: Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1 kV do AC 45 kV včetně
- ČSN 60909-0: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů
- ČSN 60865-1: Zkratové proudy – výpočet účinníků - Část 1: Definice a výpočetní metody – Část 0: Výpočet proudů
- ČSN 33 30 20: Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě.

1.11 Poruchové stavy

V trojfázových sítích se rozlišuje několik typů poruch. Jedná se o zkraty a nebo zemní spojení. Jako zemní spojení je označována porucha, při které jeden nebo více fázových vodičů je spojen se zemí, avšak uzel sítě je neúčinně uzemněný (přes Petersenovu tlumivku) a nebo je izolovaný. Tato práce se zabývá především jednofázovým zkratem, protože při jednofázovém zkratu tečou největší proudy.

- *trojfázový zkrat* – se označuje vodivé spojení všech tří fází soustavy v jednom místě (obr. 4-4 a)
- *trojfázový zemní zkrat* – nastane při spojení všech fází a země v jednom místě soustavy (obr. 4-4 b)
- *dvojfázový zkrat* – nastane při spojení libovolných dvou fází (obr. 4-4 c)
- *dvojfázový zemní zkrat* – označujeme spojení dvou fází a země v libovolném místě (obr. 4-4 d)
- *jednofázový zkrat* – je stav, kdy se spojí fáze a země v soustavě s uzemněným nulovým bodem (obr. 4-4 e)
- *zemní spojení* – je spojení fáze a země v soustavě s izolovaným (neúčinně uzemněným) nulovým bodem (obr. 4-4 f)



Obr. 4-4 Zkratky 3f sítě, převzato z [13]

Ilustrativní příklady

Agros2D je program schopný řešit pouze plošné (2D) úlohy. Nejdříve je tedy potřeba zvolit vhodný řez prostorového problému. Využijeme faktu, že při kolmém řezu ke směru vedení se parametry modelu nemění. Pro nás je důležitý vliv proudů (zkratových) na ocelové potrubí. Jedná se tedy o vliv harmonického magnetického pole s konstantní frekvencí sítě 50 Hz, tzv. kvazistacionární pole.

Matematický model

Posuvný proud (daný druhým členem pravé strany v první Maxwellově rovnici) je možno zanedbat při pomalých časových změnách (50 Hz). V tomto případě první (5) a druhá (6) Maxwellova rovnice nabývají tvaru

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (22)$$

V jednotlivých oblastech předpokládám lineární prostředí, tj. $\mu = \text{konst.}$, $\gamma = \text{konst.}$ Dále

předpokládám harmonický průběh proudu, což umožňuje přejít na symbolicko-komplexní zobrazení. Použijeme vztahy (14) a (18). Pak je rozložení elektromagnetického pole možno popsat parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu \underline{A} ve tvaru:

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \underline{A}) + j\omega \underline{A} = \underline{J}_{\text{ext}} \quad (23)$$

Použitím vektorové identity $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \underline{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \underline{A} - \Delta \underline{A}$ a zavedením Coulombovské kalibrační podmínky ($\operatorname{div} \underline{A} = 0$) v případě harmonicky proměnného magnetického pole obdržím Helmholtzovu rovnici ve tvaru:

$$\Delta \underline{A} - j\omega \mu \underline{A} = \mu \underline{J}_{\text{ext}} \quad (24)$$

Okrajová úloha je tedy formulována pro magnetický vektorový potenciál. Uvažujeme kartézský souřadnicový systém.

Okrajová podmínka:

$$\underline{A}_z = 0 \quad (25)$$

1.12 Pre-processing

Jako model využijeme vedení vn (obr. 4-1, a-5, typ „Dunaj“), vvn 110 kV (obr. 4-1, a-8, typ „Soudek“) a 400 kV (obr. 4-1, b-1) umístěné ve vzduchu. Dále je potřeba určit fyzikální parametry modelu. Vedení se skládá z AlFe lan, v případě vvn nebo zvn vícesvazkových pro potlačení vlivu korony. V modelu jsou ponechány jednosvazkové vodiče o stejném obsahu průřezu jako u skutečného vedení. Vodivost vzduchu je zanedbatelná, v simulaci tedy nula a korona ji tím pádem neovlivní. Pro vedení vn je zvolen poloměr hliníkového vodiče 1 cm. Vodivost hliníku se obvykle uvádí 37.7 MS/m.

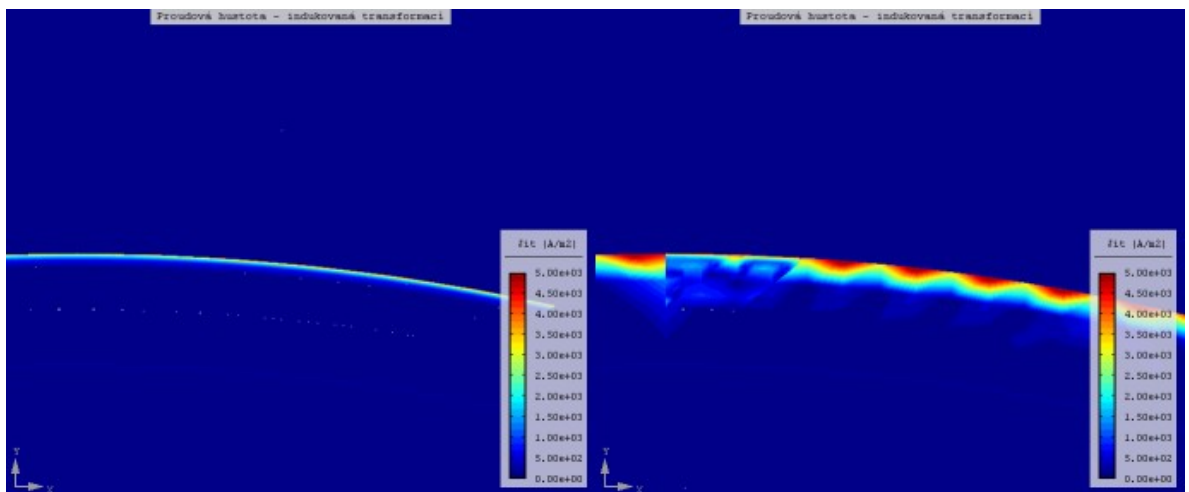
Ocelové potrubí se pokládá do nezámrzné hloubky, tedy minimálně 70 cm pod povrch země. Podle okolních podmínek se pokládá i do větších hloubek, s rostoucí hloubkou však roste cena výkopových prací. Rozměry potrubí závisí na tlaku převáděného plynu. V simulaci uvažujeme vnější poloměr 0.5 m při tloušťce stěny 2.5 cm. Relativní permeabilita oceli se uvádí okolo 8000, konduktivita se liší v závislosti na obsahu příměsí v železe. Pohybuje se v rozmezí 0.5 až 1 MS/m.

Výsledky simulace záleží také na vodivosti země. Ta se liší v relativně velkých rozmezích podle vlhkosti, materiálu podloží, pH a dalších vlivů v rozmezí 0.001 – 0.2 S/m.

Okrajové podmínky a volba přesnosti výpočtu

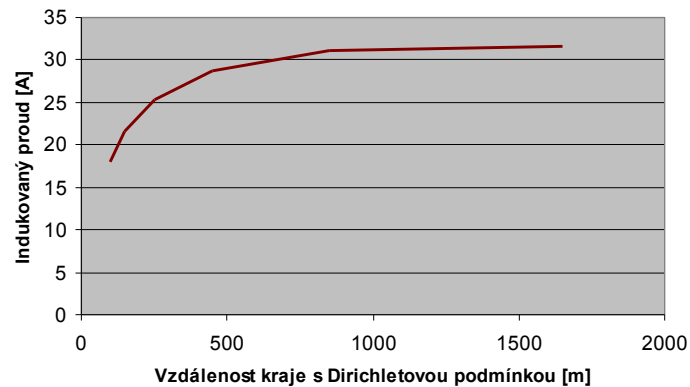
Zvolený model není symetrický a má relativně velké rozměry. U zvn je vzdálenost mezi fázovými vodiči dokonce 12 metrů. Nelze tedy model nějakou symetrií zmenšit a ušetřit tím výpočetní prostředky. Vzhledem k velikosti modelu je tedy vidět, že si nemůžeme dovolit

zvolit příliš velké zjemnění sítě. Nestačila by nám na výpočet paměť počítače. Na druhou stranu požadujeme co nejpřesnější rozlišení (malý krok sítě) v potrubí, aby nám chyby výpočtu neovlivnily výsledky. Po několika pokusech je vidět, že nejvhodnější způsob zjemnění sítě je funkce *zjemnění sítě k hranám*. Dokonce díky vlivu skin efektu v potrubí stačí zjemnění zvolit pouze u vnějšího kraje potrubí. Hp-adaptivita se snaží zjemnit síť celého modelu a přesnost v potrubí není dostatečná, jak je vidět v Obr. 5-1 a). Levá část obrázku zobrazuje rozložení proudové hustoty při zjemnění k vnějším hranám stupně 5, vpravo při hp-adaptivitě, nastavení při 3 krocích, toleranci 1%.



Obr. 5-1 a) Proudová hustota v potrubí

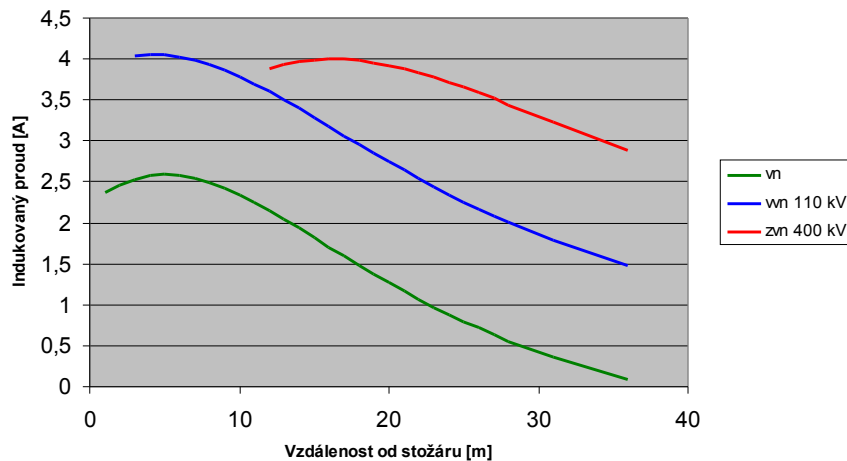
Okrajová podmínka daného modelu je pouze jedna a to Dirichletova podmínka na okraji počítaného prostoru. Otázkou je jak daleko daný okraj zvolit. Daná podmínka se má blížit podmínce v nekonečné vzdálenosti. Pokud bychom zvolili okraj příliš blízko, ovlivní nám to významně počítané hodnoty v potrubí. Příliš daleko zase zpomalí výpočet. Následující graf zobrazuje jak se mění vypočtený indukovaný proud podle vzdálenosti okraje modelu. Kraj je volen jako kruh o daném poloměru, na vedení je simulován zkrat na fázi při zkratovém proudu 1kA. Proud se vrací s opačnou fází částečně zemním vodícím lanem (voleno 75%) a částečně zemí (25%, vzdálenost od stožáru voleno do 50 metrů). Z obrázku 5-1 b) je vidět, že při rádiusu kraje 0.8 km se hodnoty začínají ustalovat. V následujících simulacích je tedy kraj s Dirichletovou podmínkou volen 800m od stožáru.



Obr. 5-1 b) Vliv vzdálenosti Dirichletovy podmínky

1.13 Vliv umístění potrubí

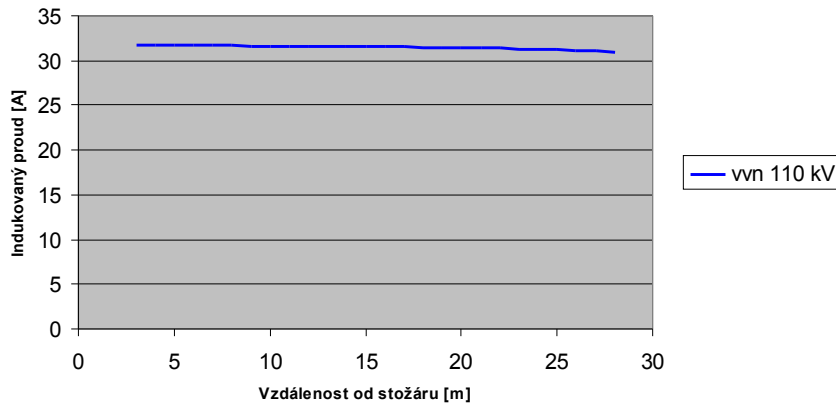
Potrubí se obvykle nepokládá přímo pod vedení, ale rovnoběžně s vedením v určité vzdálenosti od krajního vodiče. Minimální vzdálenosti jsou uvedeny v zákoně č. 458/2000 Sb., § 68. U plynovodů nad průměr 500 mm je to 12 metrů, 200-500 mm je minimum 8 metrů a u menších se zkracuje na 4 metry [11]. Nejobvyklejším typem zkratu na venkovním vedení je jednofázový zkrat (92%). Ocelové potrubí je ovlivněno nejvíce při zkratu na nejbližší fázi. Tak je volena i simulace. Velikost zkratových proudů na hladinách vn se pohybují řádově v kA, na vvn popř. zvn v desítkách kA. Závisí však na mnoha faktorech. Mezi nejvýznamnější patří velikost napěťové hladiny, impedance vedení, reaktance transformátorů a generátoru generujícího zkratový proud. U následujících simulací byly zvoleny uvedené hodnoty zkratového proudu (1 kA pro vn, 10 kA pro 110 kV a 400 kV vedení) pro jednotlivá vedení. Zkratový proud je veden zpět zemním vodičem a má opačnou fázi. U vedení 400 kV jsou zemní vodiče dva, dělí se tedy napůl. Obr. 5-2 a) vyjadřuje velikost indukovaného proudu v ocelovém potrubí v závislosti na vzdálenosti od stožáru. Hloubka potrubí je zvolena 1.5 metru, vodivost země 0.01 S/m.



Obr. 5-2 a) Závíslost indukovaného proudu v potrubí na vzdálenosti od stožáru

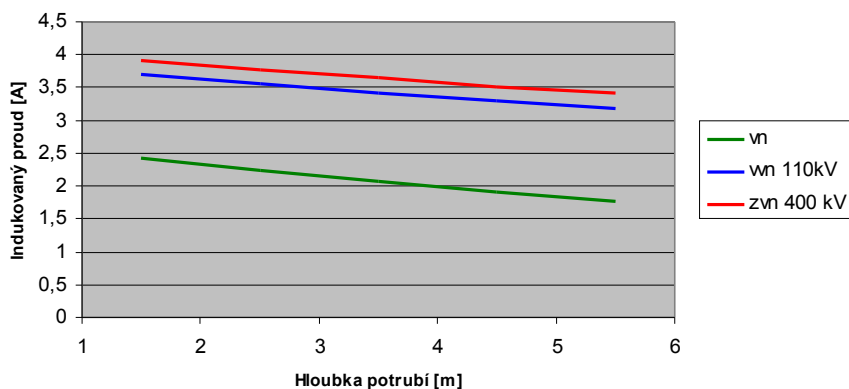
Z Obr. 5-2 a) je vidět, že indukovaný proud klesá se zvětšující se vzdáleností od vodiče. Prvotní růst indukovaného proudu je dán faktem, že zkratovaná fáze a zemní lano nejsou nad sebou. Model vedení vn je pro dvě průběžná vedení. Mají společné ochranné zemní lano, proto je mimo osu. Pokud bychom vedli přímku zemním lanem a postiženou fází, protáhla by se nám k zemi do místa největšího indukovaného proudu v potrubí. To odpovídá přibližně pěti metrům od stožáru v případě vn. Z grafu je vidět, že maximální indukovaný proud při jednofázovém zkratu na vedení vvn/zvn vychází řádově dvojnásobný oproti hladině vn. Dále lze vyčíst, že pokles je největší v krátkém rozsahu řádově od 10 do 25 metrů od stožáru. Poté se začíná pokles mírnit.

Část zkratového proudu se však často zemí vrací. Může se jednat až o 50% jeho hodnoty. Množství proudu závisí zejména na měřeném místě, na vzdálenosti od zkratovaného místa a vzdálenosti od rozvodny. Jak se změní pokles indukovaného proudu v potrubí v takovém případě je vidět na Obr. 5-2 b). Simulace je zvolena tak, že 75% zkratového proudu se vrací zemním lanem, zbytek zemí. Mají stejnou fázi, opačnou vzhledem k proudu ve fázi. Tento příklad je však velmi idealizovaný. Proud je v simulaci rovnoměrně rozložený v půdě v okolí stožáru. Ve skutečnosti však hledá cestu nejmenšího odporu. Skutečné rozložení je tedy velmi nerovnoměrné.



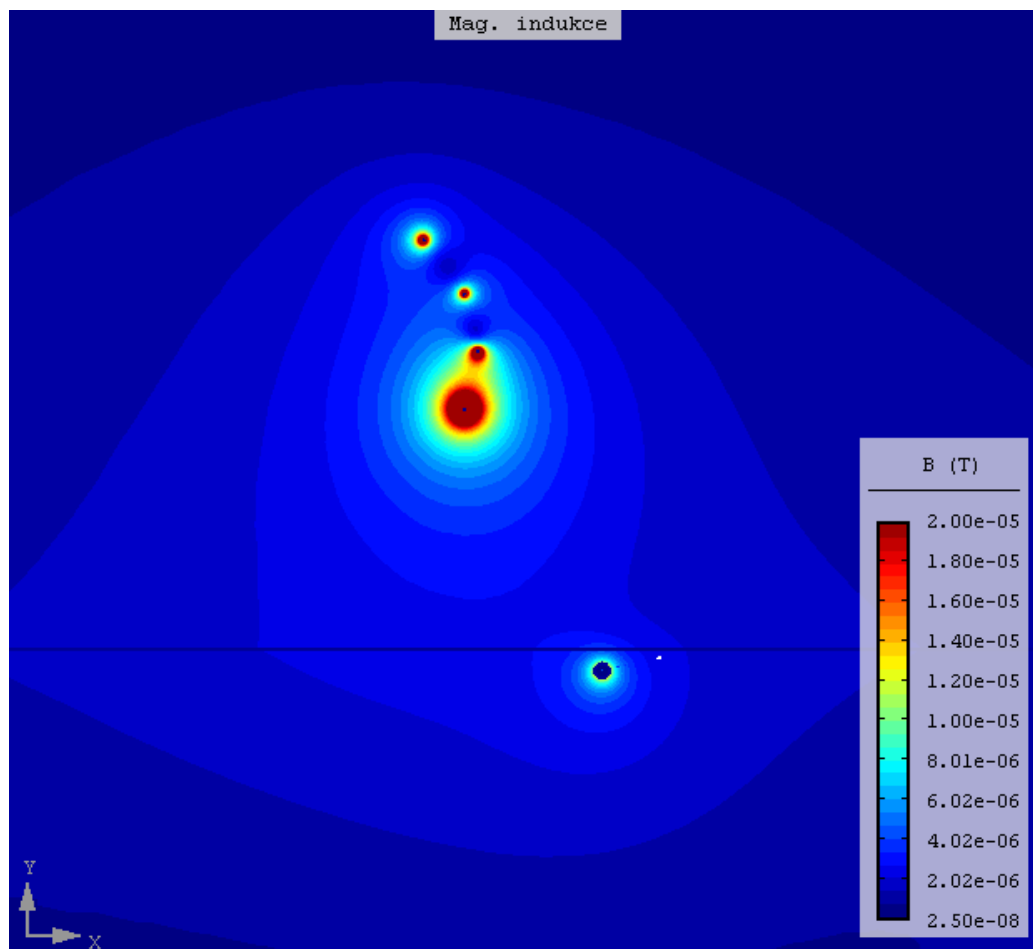
Obr. 5-2 b) Závislost indukovaného proudu na vzdálenosti od stožáru při 25% zkratového proudu v zemi

Potrubí lze také zakopat do různých hloubek. Výpočet je aplikován na model potrubí v okolí vedení ve vzdálenosti 8 metrů od krajního vodiče. Taková vzdálenost odpovídá velikosti potrubí, je to minimální vzdálenost od krajního vodiče daná legislativou. Následující graf zobrazuje indukovaný proud v hloubkách od 1.5 m do 5.5 m. Zkratový proud se opět vrací zemním lanem s posunutou fází o 180° . Simulace je zvolena pro případy, kdy se zemí nevrací žádný proud. Ostatní parametry jsou totožné s předchozí simulací.



Obr. 5-2 c) Závislost indukovaného proudu na hloubce potrubí

Je vidět, že pro všechny typy vedení klesá indukovaný proud víceméně lineárně s hloubkou. Při hloubce 5 metrů se oproti minimální hloubce indukuje přibližně o 1A méně.



Obr. 5-2 d) Magnetická indukce modelu vvn

Obrázek 5-2 d) je přiložen na ukázkou rozložení magnetické indukce v okolí vedení vvn 110 kV z předchozích simulací. Potrubí je uloženo do země ve vzdálenosti 8 metrů od krajního vodiče, jak je dáno zákonem. Zkratovaná fáze je vodič vedený nejnižše. Je vidět, že tam je indukce největší. Zemí se v simulaci vrací 25% zkratového proudu. Podle rozložení indukce je vidět, že se vzdáleností klesá její intenzita, tedy i indukovaný proud. Tomuto faktu odpovídají i grafy. Zjemnění u hran potrubí bylo nahrazeno zjemněním sítě. V této simulaci není tak důležité rozložení indukce uvnitř potrubí. Zjemnění sítě je nastaveno na 2.

Skriptování

Výše uvedené simulace byly provedeny pomocí skriptu. Jak bylo již zmíněno, Agros podporuje skriptovací jazyk Python. Existují příkazy pro vytvoření modelu daných parametrů, planární operace pro vytvoření modelu (kreslení čar, kruhů apod.), příkazy pro vytvoření a úpravu okrajových podmínek a materiálových vlastností a mnoho dalších. Lze na ně najít odkaz na stránkách projektu Agros [6]. Skripty pro vytvoření modelů vn, vvn a zvn jsou v příloze. Kód je velmi krátký, jedná se o jednoduchý cyklus. Každé projetí cyklu znamená posun potrubí o vektor (dx, dy) , vyřešení problému (příkaz solve), spočtení integrálu hustoty

proudu (volumeintegral) a vypsání výsledného indukovaného proudu (print). Pro posun vedení je třeba určit posouvané hrany. Ty jsou definovány indexem, který lze zjistit přejetím myši nad hranou. Jazyk je velmi podobný klasickým programovacím jazykům. Člověk znalý programování nemá problém vpravit se do jeho syntaxe rychle. Přesto jeden rozdíl stojí za zmínku. Již v takovém krátkém kódu se nelze vyhnout vytvoření bloků (standardně kombinace begin – end v jazyku Pascal, závorky { a } v C). Zde se provádí oddělení pomocí znaku tabulátor. Je pravda, že to zpřehlední kód. Přesto hledání chyby, která spočívá v záměně několika mezer za znak tabulátoru, které na první pohled vypadají stejně, se může ukázat problematické.

```

N = 28
dx = 1
dy = 0
Iy = []
selectnone()

for i in range(N):
    if i > 0:
        selectedge(25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32)
        moveselection(dx, dy, False)
        selectlabel(3,4)
        moveselection(dx, dy, False)
    solve()
    result = volumeintegral(3)
    Iy.append( sqrt(result["Iit_real"]*result["Iit_real"] + result["Iit_imag"]*result["Iit_imag"]) )
    print(Iy[-1])

```

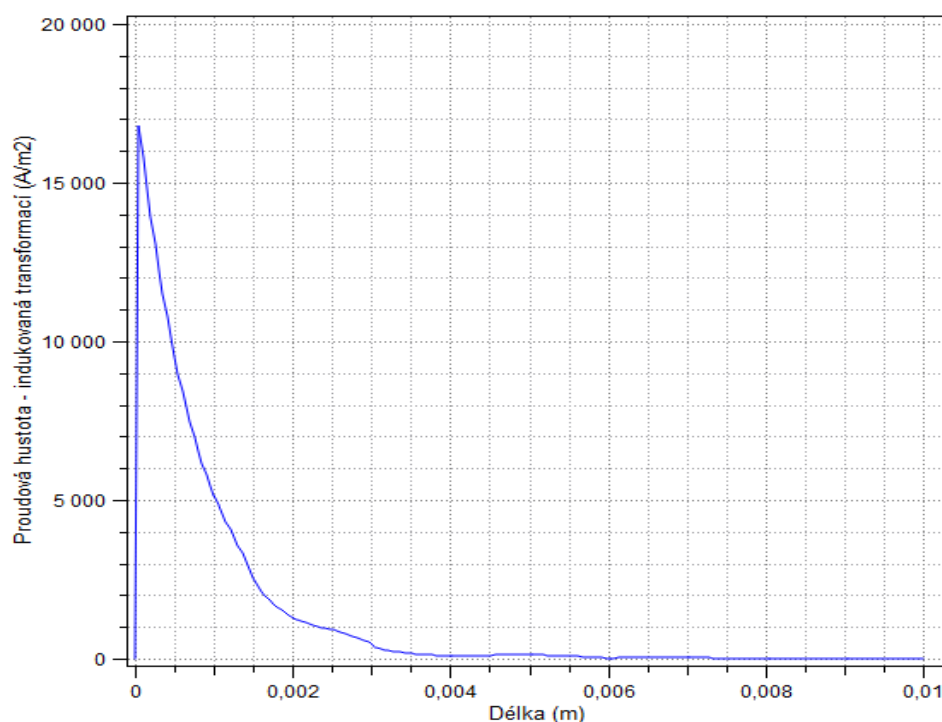
Při nastavení zjemnění k hraně potrubí 4 trvá výpočet závislosti indukovaného proudu na vzdálenosti od stožáru pro jedno vedení přibližně dvě hodiny. Tato doba je pouze orientační, je závislá na výpočetních schopnostech daného počítače.

1.14 Skinefekt

Podle vzorce (27) závisí hloubka vniku pouze na frekvenci proměnného magnetického pole a rezistivitě (konduktivitě) materiálu. Frekvence 50 Hz je daná napětím sítě, ta se nemění. Hloubka vniku tedy závisí pouze na materiálu. Pro volené rozmezí konduktivity oceli 0.5 až 1 MS/m vychází

$$\delta_{\text{vjp}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\alpha\mu}} = \sqrt{\frac{2}{\alpha\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \cdot \mu_0\mu_r \cdot \sigma}} = 0,076 - 0,113\text{cm}$$

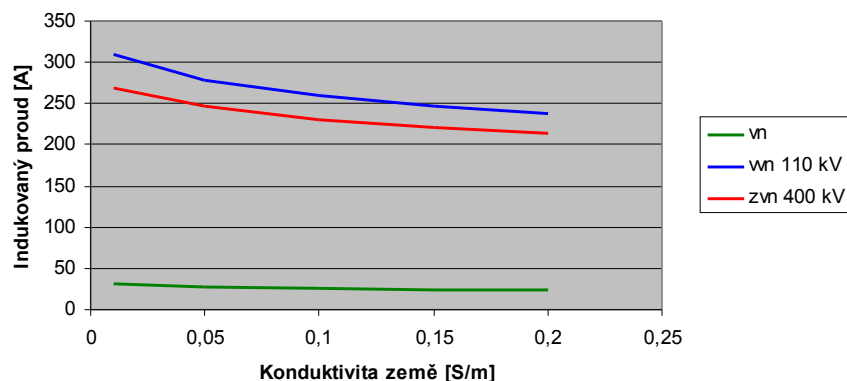
Na Obr. 5-3 je vidět rozložení proudové hustoty ve stěně ocelového potrubí ze simulace. Z grafu se odečte hodnota J_{max} , hledaná hloubka vniku je vzdálenost od kraje potrubí, kde klesne hodnota proudové hustoty na 36.78 % z J_{max} . Protože jsou výsledky diskrétní, aproximují se dva nejbližší body pro získání výsledku, vychází $\delta_{\text{sim}} = 0,079 - 0,118\text{cm}$.



Obr. 5-3 Rozložení proudové hustoty v potrubí

1.15 Vodivost země

Země je velmi různorodá směs různých látek. Nelze tedy určit přesnou hodnotu její vodivosti. Ta závisí zejména na vlhkosti, druhu horniny, ze které se skládá, teplotě a dalších parametrech. Její konduktivita se pohybuje řádově v rozmezí 0.001 – 0.2 S/m. Simulace je provedena pro jednofázový zkrat na nejbližší fázi u modelu vn, vvn a zvn. Je dán návratový zkratový proud zemí o hodnotě 25% z celkového zkratového proudu. Při vyšších hodnotách konduktivity se dá čekat oslabení elektromagnetického pole procházejícího potrubím v důsledku spotřebování části energie na vznik vířivých proudů, tedy snížení indukovaného proudu potrubí. Simulujeme opět jednofázový zkrat na nejbližší fázi.

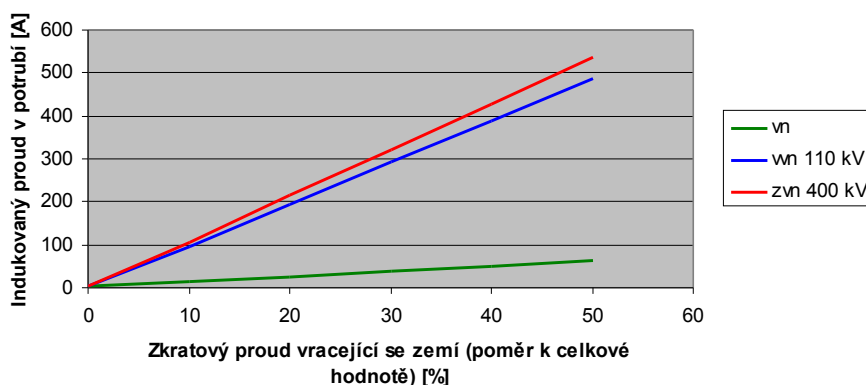


Obr. 5-4 Vliv konduktivity země na indukovaný proud

Na Obr. 5-4 lze vyčíst, že zvýšení konduktivity země, má na indukovaný proud tlumící vliv. Dá se odhadnout, že změna je v řádu jednotek až desítek procent.

1.16 Návrátový zkratový proud

Při zkratu na části vedení se zkratový proud vrací částečně zemí a částečně zemním lanem. Obvykle se udává, že zemním lanem prochází 50 – 75% zkratového proudu, na zemi zůstává tedy 25 až 50%. Tyto hodnoty se mohou lišit v závislosti na vzdálenosti od místa zkratu, aktuální konduktivitě země, vzdálenosti od rozvodny nebo např. odporu uzemnění zemního lana. Následující pokus je zaměřen na zjištění hodnoty indukovaného proudu v potrubí v závislosti na zpětném zkratovém proudu. Minimální mez je zvolena jako nulový proud v zemi. Jedná se o krajní případ, přesto za určitých okolností je možné, že se mu reálná hodnota blíží. V následující simulaci je zkrat na nejbližší fázi u vedení vn, vvn a zvn.



Obr. 5-5 Vliv rozložení návratového proudu mezi zem a zemní vodič

Jak bylo již dříve naznačeno, tato simulace je velmi zkrácená rovnoměrným rozložením proudové hustoty a konduktivity země. Proud si vybírá cestu nejmenšího odporu. Přesto lze vyčíst, že indukovaný proud v potrubí roste s množstvím zkratového proudu vracejícího se zemi přibližně lineárně. Nejméně proudu se do potrubí indukuje při stavu, kdy zemí neprochází žádný proud.

1.17 Velikost potrubí

Velikost indukovaného proudu závisí mimo jiné na velikosti potrubí. Tloušťka stěny je u všech případů volena 2.5 mm. Stejně jako v předchozích případech, je simulován 1f zkrat na vedení vn, vvn a zvn. Zkratový proud se v simulaci vrací zemním lanem.

Vnější poloměr [mm]	Indukovaný proud [A]		
	vn	vvn 110 kV	zvn 400 kV
300	1,64	2,52	2,65
400	2,05	3,14	3,32
500	2,42	3,71	3,92

Tab. 4 Závislost indukovaného proudu na velikosti potrubí

Z tab.4 je vidět, že s velikostí potrubí roste i indukovaný proud. Proto si lze podle zákona dovolit položit menší potrubí blíže k vedení.

1.18 Nesouběžná potrubí

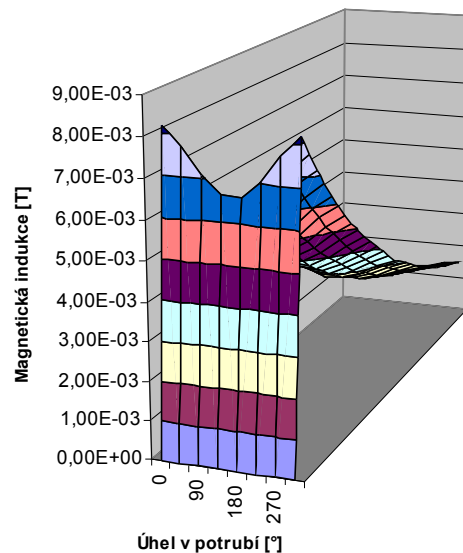
Nejvíce proudu se indukuje do potrubí, je-li umístěno podél vedení. Takový případ v praxi nenastane. Přesto díky husté síti a rozvětvení vedení se v určitých místech ocelové potrubí s vedením vysokého napětí kříží. Pro modelování takové situace by byl zapotřebí software umožňující nejen planární, ale i trojrozměrné simulace. Agros zatím takovou

možnost neposkytuje.

V příkladech z předchozích kapitol jsou však simulace navrženy pro nejméně vhodnou variantu. Pro určení nejhoršího možného případu jsou tedy postačující.

1.19 Magnetická indukce v potrubí

V následujícím grafu je zobrazeno rozložení magnetické indukce v potrubí. Simulace při zkratu na vn. U simulace bylo zvýšeno zjemnění k hraně potrubí na 5 pro hladší vykreslení grafu. Na vodorovné ose grafu je úhel, pod kterým je indukce zjišťována. Svislá osa vyjadřuje hodnotu magnetické indukce. Graf je zobrazen od kraje potrubí 1 cm dovnitř. Nula stupňů začíná na svislé ose, v horních částech potrubí. Maximální hodnoty na kraji potrubí se pohybují řádově v jednotkách mT. V dolních částech potrubí je indukce nejmenší (úhel 180°).



Obr. 5-8 Rozložení magnetické indukce v potrubí

1.20 Ztráty v potrubí

Indukovaný proud v potrubí způsobuje ztráty. Díky relativně nízkým hodnotám proudu jsou ztráty malé, přesto vznikají. V předchozí simulaci je zjištěna hodnota 1,2 mW na 1 metr délky potrubí. Při rozměrech potrubí vychází průměrně 0,159 W/m³ oceli.

Možnosti řešení problematiky

Ocelové potrubí je třeba vést primárně tak, aby bylo bezpečné. Z pohledu elektrotechnika to znamená snížit indukovaný proud v potrubí na minimum, aby nemohlo dojít ani v krajním případě ke vznícení plynu převáděného uvnitř potrubí. Dalším důvodem je fakt, že zemní proudy, zpětné zkratové i z jiných zdrojů, mají korozní účinky na potrubí.

Z předchozích simulací je vidět, že jedna z možností je umístit potrubí dále od vedení. Další možnost je nějakým způsobem odstínit potrubí od vlivu vnějšího magnetického pole. Muselo by se jednat o materiál s vysokou relativní permeabilitou. Tedy nějaká slitina železa, kobaltu, popř. měď. Pokud jde o cenu, vycházelo by jednoznačně nejlépe železo. Přesto ekonomicky výhodnější je umístit potrubí dále od vedení. Zohledňuje to i legislativa.

Závěr

Ze simulací provedených v softwaru Agros 2D vyplývá, že při jednofázovém zkratu se do

ocelového potrubí v jeho blízkosti indukuje transformací proud. Jeho velikost se pohybuje řádově v jednotkách procent z voleného zkratového proudu (pro vn, vvn i zvn), v závislosti na okolním prostředí. Rozložení proudové hustoty klesá exponenciálně od vnějšího kraje potrubí k vnitřnímu kraji. Bylo ověřeno, že hloubka vniku, tedy vzdálenost, kdy klesne na 37% maximální hodnoty, je nezávislá na zkratovém proudu procházejícím fází. Závisí pouze na vodivosti a permeabilitě oceli (při konstantní napájecí frekvenci 50 Hz). Pohybuje se přibližně okolo 1 mm.

Indukovaný proud začne výrazněji klesat, pokud umístíme potrubí do větší vzdálenosti od vedení. Vliv hloubky uložení potrubí je velmi malý. Nejvýraznější vliv na indukovaný proud v potrubí má však ze všech řešených různých vstupních parametrů změna množství protékajícího zpětného zkratového proudu zemí. Zkratový proud se vrací od místa zkratu do uzlu sítě částečně zemí a částečně zemním lanem. Uvádí se, že zemí teče v některých místech až 50% proudu. V takovém případě roste hodnota indukovaného proudu až k 7-8% hodnoty zkratového proudu.

Pokud jde o venkovní prostředí, vyšší vodivost země způsobuje snížení indukovaného proudu v řádu desítek procent. Tento výsledek je však zavádějící, protože simulace je provedena pro konstantní proud. Dá se očekávat, že při zvýšené vodivosti země, jí bude protékat větší proud a v důsledku se indukovaný proud opět zvětší.

Pro omezení indukovaného proudu v ocelovém potrubí tedy přichází v úvahu dvě možnosti, odstínit elektromagnetické pole v jeho okolí nebo ho uložit do větší vzdálenosti od elektrického vedení. Z ekonomických důvodů je vhodnější druhá varianta, pokud to legislativní a územní poměry dovolí.

Použitá literatura

- [1] Mayer, D. : *Teorie elektromagnetického pole* 3. vyd. Plzeň, FEL ZČU, 2001. ISBN 80-7082-826-9
- [2] Mayer, D.; Ulrych B. : *Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí*, Praha, SNTL, 1988
- [3] Mertlová J.; Noháčová L. : *Elektrické stanice a vedení*, Plzeň ZČU, 2008, ISBN 978-80-7043-724-7
- [4] Meduna, V. : *Bezpečnost práce v elektrotechnice*; VŠB – Technická univerzita Ostrava; Ostrava 2003
- [5] Studijní materiály ČVUT – popis povrchového jevu. [online] Žďárek, J.: ČVUT [cit.2012-6-4]
Dostupné z http://moon.felk.cvut.cz/~pjb/Jak/_phys/f234/html/skef.htm
- [6] Domovské stránky projektu Agros 2D. [online]
Dostupné z <http://www.agros2d.org>
- [7] Popis licencí GNU. [online]
Dostupné z <http://www.gnu.org/licenses/>
- [8] Domovské stránky projektu Triangle. [online]
Dostupné z <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>
- [9] Článek Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi. [online] Kačor, P. : VŠB-TU [cit.2012-6-4]
Dostupné z http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/
- [10] Studijní materiály VUT. [online] Burša, J.: VUT-FSI [cit.2012-6-4]
Dostupné z <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/MKP4.doc>
- [11] Aplikace pro vyhledání sbírky zákonů. [online]
Dostupné z <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu>
- [12] Portál TZB-info. [online] Procházka, R.: [cit.2012-6-4]
Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii>
- [13] Studijní materiály VOŠ Liberec. [online]
[cit.2012-6-4]. Dostupné z http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zkrat/dokumenty/REE_pr_zkraty.pdf

Seznam příloh

Příloha A – Vytvoření modelu vn při 1-f zkratu

```

# model
newdocument("Vliv poruchového stavu na 3f vedení", "planar", "magnetic", 0, 2, "disabled", 1, 1, 50,
"harmonic", 1, 1, 0)

OKRAJ = 800
VEDENI_Ux = -1
VEDENI_Uy = 15
VEDENI_Vx = 0
VEDENI_Vy = 19
VEDENI_Wx = 1
VEDENI_Wy = 15
VEDENI_zemni_x = -3.25
VEDENI_zemni_y = 23
VEDENI_r = 0.01
TRUBKA_HLOUBKA = 1.5
TRUBKA_r = 0.5
TRUBKA_z = 0.025
PUDA_POD_PROUDEM_r = 50
J = 0/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J0 = 1000/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J_zemni_vodic = 0.75*1000/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J_puda = 0.25*1000*2/(3.14*PUDA_POD_PROUDEM_r*PUDA_POD_PROUDEM_r)

# okrajové podmínky
addboundary("Dirichlet", "magnetic_vector_potential", 0, 0)

# materiály
addmaterial("Vzduch", 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Ocel", 0, 0, 8000, 10e5, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Puda", -J_puda, 0, 1, 1e-2, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Puda bez proudu", 0, 0, 1, 1e-2, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik U", -J/2, J*(-0.866), 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik V", -J/2, 0.866*J, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik W", J0, 0, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik zemni", -J_zemni_vodic, 0, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)

# hranice
addcircle(0,0, OKRAJ, "Dirichlet");
addcircle(0,0, PUDA_POD_PROUDEM_r, "none");
selectnone()
selectnode(6)
deleteselection()

addedge(OKRAJ, 0, PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
addedge(-PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
addedge(-OKRAJ, 0, -PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
# vedeni
addcircle(VEDENI_Ux, VEDENI_Uy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_Vx, VEDENI_Vy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_Wx, VEDENI_Wy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, VEDENI_r)
# potrubí
addcircle(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA, TRUBKA_r)
addcircle(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA, TRUBKA_r-TRUBKA_z)

```

```
# materiály
addlabel(-4, 4, 0, 0, "Vzduch")
addlabel(-4, -4, 0, 0, "Puda")
addlabel(-75, -4, 0, 0, "Puda bez proudu")
addlabel(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA +TRUBKA_r-TRUBKA_z/2, 0, 0, "Ocel")
addlabel(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA, 0, 0, "Vzduch")
addlabel(VEDENI_Ux, VEDENI_Uy, 0, 0, "Hlinik U")
addlabel(VEDENI_Vx, VEDENI_Vy, 0, 0, "Hlinik V")
addlabel(VEDENI_Wx, VEDENI_Wy, 0, 0, "Hlinik W")
addlabel(VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, 0, 0, "Hlinik zemni")

zoombestfit()
selectnone()
```

Příloha B – Vytvoření modelu vvn 110kV při 1-f zkratu

```
# model
newdocument("Vliv poruchového stavu na 3f vedení", "planar", "magnetic", 0, 2, "disabled", 1, 1, 50,
"harmonic", 1, 1, 0)
```

```
OKRAJ = 800
VEDENI_Ux = 2.75
VEDENI_Uy = 16.05+2*3.9
VEDENI_Vx = 3.65
VEDENI_Vy = 16.05+3.9
VEDENI_Wx = 2.75
VEDENI_Wy = 16.05
VEDENI_zemni_x = 0
VEDENI_zemni_y = 16.05+2*3.9+3.57
VEDENI_r = 0.045
TRUBKA_HLOUBKA = 1.5
TRUBKA_r = 0.5
TRUBKA_z = 0.025
PUDA_POD_PROUDEM_r = 50
J = 0/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J0 = 10000/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J_zemni_vodic = 1*10000/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J_puda = 0*10000*2.5477e-4
```

```
# okrajové podmínky
addboundary("Dirichlet", "magnetic_vector_potential", 0, 0)
```

```
# materiály
addmaterial("Vzduch", 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Ocel", 0, 0, 8000, 10e5, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Puda", -J_puda, 0, 1, 1e-2, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Puda bez proudu", 0, 0, 1, 1e-2, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik U", -J/2, J*(-0.866), 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik V", -J/2, 0.866*J, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik W", J0, 0, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik zemni", -J_zemni_vodic, 0, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
```

```
# hranice
addcircle(0,0, OKRAJ, "Dirichlet");
addcircle(0,0, PUDA_POD_PROUDEM_r, "none");
selectnone()
selectnode(6)
deleteselection()
```

```
addedge(OKRAJ, 0, PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
addedge(-PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
```

```

addedge(-OKRAJ, 0, -PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
# vedeni
addcircle(VEDENI_Ux, VEDENI_Uy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_Vx, VEDENI_Vy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_Wx, VEDENI_Wy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, VEDENI_r)
addcircle(-VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, VEDENI_r)
# potrubí
addcircle(3, -TRUBKA_HLOUBKA, TRUBKA_r)
addcircle(3, -TRUBKA_HLOUBKA, TRUBKA_r-TRUBKA_z)

# materiály
addlabel(-4, 4, 0, 0, "Vzduch")
addlabel(-4, -4, 0, 0, "Puda")
addlabel(-75, -4, 0, 0, "Puda bez proudu")
addlabel(3, -TRUBKA_HLOUBKA + TRUBKA_r - TRUBKA_z/2, 0, 0, "Ocel")
addlabel(3, -TRUBKA_HLOUBKA, 0, 0, "Vzduch")
addlabel(VEDENI_Ux, VEDENI_Uy, 0, 0, "Hlinik U")
addlabel(VEDENI_Vx, VEDENI_Vy, 0, 0, "Hlinik V")
addlabel(VEDENI_Wx, VEDENI_Wy, 0, 0, "Hlinik W")
addlabel(VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, 0, 0, "Hlinik zemni")
addlabel(-VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, 0, 0, "Hlinik zemni")

zoombestfit()
selectnone()

```

Příloha C – Vytvoření modelu zvn 400kV při 1-f zkratu

```

# model
newdocument("Vliv poruchového stavu na 3f vedení", "planar", "magnetic", 0, 2, "disabled", 1, 1, 50,
"harmonic", 1, 1, 0)

OKRAJ = 800
VEDENI_Ux = -12
VEDENI_Uy = 18
VEDENI_Vx = 0
VEDENI_Vy = 18
VEDENI_Wx = 12
VEDENI_Wy = 18
VEDENI_zemni_x = 7.8
VEDENI_zemni_y = 29
VEDENI_r = 0.05
TRUBKA_HLOUBKA = 1.5
TRUBKA_r = 0.5
TRUBKA_z = 0.025
PUDA_POD_PROUDEM_r = 50
J = 0/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J0 = 10000/(3.14*VEDENI_r*VEDENI_r)
J_zemni_vodic = 1*10000*63.69
J_puda = 0*10000*2.5477e-4

# okrajové podmínky
addboundary("Dirichlet", "magnetic_vector_potential", 0, 0)

# materiály
addmaterial("Vzduch", 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Ocel", 0, 0, 8000, 10e5, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Puda", -J_puda, 0, 1, 1e-2, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Puda bez proudu", 0, 0, 1, 1e-2, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik U", -J/2, J*(-0.866), 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hlinik V", -J/2, 0.866*J, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0)

```

```

addmaterial("Hliník W", J0, 0, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)
addmaterial("Hliník zemní", -J_zemni_vodic, 0, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0)

# hranice
addcircle(0,0, OKRAJ, "Dirichlet");
addcircle(0,0, PUDA_POD_PROUDEM_r, "none");
selectnone()
selectnode(6)
deleteselection()

addedge(OKRAJ, 0, PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
addedge(-PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
addedge(-OKRAJ, 0, -PUDA_POD_PROUDEM_r, 0, 0, "none")
# vedeni
addcircle(VEDENI_Ux, VEDENI_Uy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_Vx, VEDENI_Vy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_Wx, VEDENI_Wy, VEDENI_r)
addcircle(VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, VEDENI_r)
addcircle(-VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, VEDENI_r)
# potrubí
addcircle(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA, TRUBKA_r)
addcircle(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA, TRUBKA_r-TRUBKA_z)

# materiály
addlabel(-4, 4, 0, 0, "Vzduch")
addlabel(-4, -4, 0, 0, "Puda")
addlabel(-75, -4, 0, 0, "Puda bez proudu")
addlabel(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA +TRUBKA_r-TRUBKA_z/2, 0, 0, "Ocel")
addlabel(VEDENI_Wx, -TRUBKA_HLOUBKA, 0, 0, "Vzduch")
addlabel(VEDENI_Ux, VEDENI_Uy, 0, 0, "Hliník U")
addlabel(VEDENI_Vx, VEDENI_Vy, 0, 0, "Hliník V")
addlabel(VEDENI_Wx, VEDENI_Wy, 0, 0, "Hliník W")
addlabel(VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, 0, 0, "Hliník zemní")
addlabel(-VEDENI_zemni_x, VEDENI_zemni_y, 0, 0, "Hliník zemní")

zoombestfit()
selectnone()

Příloha D – Skript pro změnu polohy potrubí
N = 28
dy = 1
dz = 0
Iy = []
selectnone()

for i in range(N):
    if i > 0:
        selectedge(25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32)
        moveselection(dy, dz, False)
        selectlabel(3,4)
        moveselection(dy, dz, False)
    solve()
    result = volumeintegral(3)
    Iy.append( sqrt(result["Iit_real"]*result["Iit_real"] + result["Iit_imag"]*result["Iit_imag"]) )
    print(Iy[-1])

```

Příloha E – Skript pro změnu konduktivity země

```

N = 5
d_vodivost = 0.05
Iy = []

```

```

for i in range(N):
    if i > 0:
        modifymaterial( "Puda", -0.0636943, 0, 1, i*d_vodivost, 0, 0, 0, 0, 0 )
        modifymaterial( "Puda bez proudu", 0, 0, 1, i*d_vodivost, 0, 0, 0, 0, 0 )
    solve()
    result = volumeintegral(3)
    Iy.append( sqrt(result["Iit_real"]*result["Iit_real"] + result["Iit_imag"]*result["Iit_imag"]) )
    print(Iy[-1])

```

Příloha F – Skript pro změnu toku zkratového proudu mezi zemí a zemním lanem

$N = 6$

$d_procent = 0.1$

$Iy = []$

```

for i in range(N):
    if i > 0:
        procent_v_zemi = i*d_procent
        J_zemni_vodic = (1-procent_v_zemi)*1000/(3.14*0.01*0.01)
        J_puda = procent_v_zemi*1000/3926
        modifymaterial( "Puda", -J_puda, 0, 1, 0.01, 0, 0, 0, 0, 0 )
        modifymaterial( "Hlinik zemni", -J_zemni_vodic, 0, 1, 3.77e7, 0, 0, 0, 0, 0 )
    solve()
    result = volumeintegral(3)
    Iy.append( sqrt(result["Iit_real"]*result["Iit_real"] + result["Iit_imag"]*result["Iit_imag"]) )
    print(Iy[-1])

```

Příloha G – Skript pro vzdálenosti kraje – Dirichletovy podmínky

$N = 5$

$dx = 50$

$q = 2$

$Iy = []$

$selectnone()$

```

for i in range(N):
    if i > 0:
        selectnode(1)
        moveselection(dx, 0, False)
        selectnode(3)
        moveselection(-dx, 0, False)
        selectnode(0)
        moveselection(0, -dx, False)
        selectnode(2)
        moveselection(0, dx, False)
        dx = dx*q
    solve()
    result = volumeintegral(3)
    Iy.append( sqrt(result["Iit_real"]*result["Iit_real"] + result["Iit_imag"]*result["Iit_imag"]) )
    print(Iy[-1])

```