

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Izolátory venkovních vedení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Ondřej NAXER**
Osobní číslo: **E16B0040P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Izolátory venkovních vedení**
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 odbornou literaturu a internetové zdroje týkající se izolačních prvků pro vvn a vn.
2. Sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro řešení rozložení elektromagnetického pole.
3. Uvažujte různé materiály i různá geometrická uspořádání.
4. Realizujte numerický model na počítači.
5. Zhodnoťte obdržené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

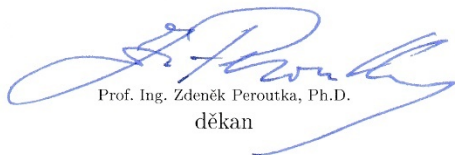
Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 60305: Izolátory pro venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 1 kV - Keramické nebo skleněné závěsné izolátory pro AC sítě - Charakteristiky talířových izolátorů. Český normalizační institut, 1997.
2. ČSN EN 61109: Izolátory pro venkovní vedení Kompozitní závěsné a kotevní izolátory pro systémy střídavého napětí se jmenovitým napětím vyšším než 1 000 V Definice, zkušební metody a přejímací kritéria. Český normalizační institut, 2009.
3. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je zjištění minimálních rozměrů a stanovení vhodných tvarů izolátorů venkovních vedení na napěťových úrovních 6, 22 a 110 kV, a to na základě analýzy chování těchto struktur v elektromagnetickém poli. Samotné simulace jsou realizovány s využitím specializovaných softwarových řešení založených na metodě konečných prvků Agros2D a COMSOL Multiphysics. Použité modely stožárů a izolátorů jsou realizovány v reálném měřítku.

Klíčová slova

Izolátory, stožáry, venkovní vedení, distribuční soustava, izolační materiály, poruchy izolace, elektrostatické pole, elektromagnetické pole, numerický model, simulace, Agros2D, COMSOL, metoda konečných prvků.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to find out the minimum dimensions and to determine suitable shapes of the overhead line insulators at the voltage levels of 6, 22 and 110 kV, based on the analysis of the behavior of these structures in the electromagnetic field. The simulations are realized using specialized software solutions Agros2D and COMSOL Multiphysics, based on the finite element method. Used poles and insulators models are implemented in their real scale.

Key words

Insulators, poles, overhead lines, distribution system, insulation materials, insulation failures, electrostatic field, electromagnetic field, numerical model, simulation, Agros2D, COMSOL, finite element method.

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 Chomutově dne 11.6.2019

Ondřej Naxer

Poděkování

Rád bych v první řadě poděkoval své rodině za láskyplnou a finanční podporu během náročných vysokoškolských studií. Dědovi za nasměrování na správný a perspektivní obor. Dále vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za přípravu zajímavého a praktického tématu, poskytnutí cenných odborných rad z oblasti počítačového modelování a teorie polí, tematické připomínky a ochotný přístup při řešení technických problémů, jichž nebylo zrovna málo. Za zmínku určitě také stojí společnost Autodesk, která mi prostřednictvím studentských licencí k předním CAD produktům AutoCAD a Inventor usnadnila tvorbu 2D a 3D výkresů.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA.....	13
1.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA	13
1.2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA	14
1.3 ZÁKLADNÍ TYPY LINEK	15
1.4 VENKOVNÍ VEDENÍ.....	15
1.4.1 Poruchové stavy.....	16
1.4.2 Konstrukce a výstroj stožárů.....	18
2 IZOLÁTORY VENKOVNÍCH VEDENÍ	20
2.1 CHARAKTERISTICKÉ POJMY A VELIČINY	20
2.2 ZNAČENÍ IZOLÁTORŮ	22
2.3 TŘÍDY IZOLÁTORŮ	22
2.4 POUŽÍVANÉ ELEKTROIZOLAČNÍ MATERIÁLY	22
2.5 TYPY ZÁVĚSNÝCH IZOLÁTORŮ.....	24
2.5.1 Talířové.....	24
2.5.2 Tyčové	25
2.6 ZKOUŠKY IZOLÁTORŮ	26
2.6.1 Typové zkoušky	26
2.6.2 Výběrové zkoušky.....	27
2.6.3 Kusové zkoušky	27
3 TEORIE POLÍ	28
3.1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE.....	28
3.2 PŮSOBNOST ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	29
3.3 VELIČINY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	29
3.4 TYPY PROSTŘEDÍ A PARAMETRY	30
3.5 MAXWELLOVY ROVNICE.....	32
3.6 ROVNICE PRO PROUDOVOU HUSTOTU.....	32
3.7 PODMÍNKY NA ROZHRAŇÍ	33
3.7.1 Rozhraní dvou dielektrik.....	33

3.7.2	<i>Rozhraní dvou magnetik</i>	33
3.7.3	<i>Rozhraní dvou vodivých prostředí</i>	34
3.8	SILOVÉ ÚČINKY	34
3.9	ENERGIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	34
3.10	ZTRÁTY V ELEKTROMAGNETICKÉM POLI	35
3.11	ŘEŠENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ	36
3.11.1	<i>Stacionární elektromagnetické pole</i>	36
3.11.2	<i>Přehled metod</i>	38
3.11.3	<i>Metoda konečných prvků</i>	39
3.11.4	<i>Okrajové podmínky</i>	40
4	MODELOVÁNÍ	41
4.1	SEZNÁMENÍ SE SE SOFTWAREM	41
4.1.1	<i>Agros2D</i>	41
4.1.2	<i>COMSOL Multiphysics</i>	42
4.2	VÝPOČET PARAMETRŮ VEDENÍ VVN.....	43
4.3	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI.....	44
4.4	MATEMATICKÝ MODEL	46
4.5	NUMERICKÝ MODEL.....	47
4.6	PRÁCE SE SOFTWAREM.....	47
4.6.1	<i>Postup řešení v Agros2D</i>	47
4.6.2	<i>Postup řešení v COMSOL Multiphysics</i>	51
4.7	ROZBOR DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	55
4.7.1	<i>Zkušenosti s použitým softwarem</i>	55
4.7.2	<i>Vliv izolačních prvků a konstrukce stožáru</i>	56
4.7.3	<i>Vliv stavební délky izolátoru</i>	63
4.7.4	<i>Porovnání skleněného a plastového izolátoru</i>	65
4.7.5	<i>Transpozice vedení</i>	69
4.7.6	<i>Zvýšení přenášeného výkonu vedení vn</i>	72
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	77
	PŘÍLOHY	1

Úvod

Teoretická část bakalářské práce bude pojednávat o elektrizační soustavě, se zaměřením na prostředky pro přenos elektrické energie, kam spadají stožáry a jejich výstroj. Důraz bude kladen na izolační a nosné prvky – izolátory, bez nichž by byl přenos prostřednictvím venkovních vedení jen obtížně realizovatelný. Návrh izolátorů musí respektovat dostatečné rozměry vztažené k dané napěťové hladině, elektrické a mechanické vlastnosti použitých materiálů a rovněž ekonomická hlediska. Pro pochopení dějů souvisejících s jejich provozem je zapotřebí získat fyzikální představu o působení elektromagnetických polí.

V praktické části budou následně zhodnoceny takto nabyté poznatky a stanoven postup řešení s využitím dostupné počítačové techniky.

Výstupem budou simulace vypovídající o chování zkoumaných součástí za definovaných podmínek a případné odhalení nežádoucích poruchových stavů či jiných provozních vlivů.

Seznam symbolů a zkratk

A	vektorový magnetický potenciál [-]
B	magnetická indukce [T]
D	elektrická indukce [$C \cdot m^{-2}$]
dl	elementární délkový element [m]
dS	elementární plošný element [m^2]
dV	elementární objemový element [m^3]
E	intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
H	intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
I, i	elektrický proud [A]
J	proudová hustota [$A \cdot m^{-2}$]
K_N	normálová složka proudu tekoucího vrstvou rozhraní [A]
l	délka, libovolná uzavřená křivka [m]
N	Poyntingův vektor [$W \cdot m^{-2}$]
Q, q	elektrický náboj [C]
S	průřez, plocha vymezená křivkou [m^2]
t	čas [s]
U	elektrické napětí [V]
U_{50}	50 % přeskokové napětí atmosférického impulsu [kV]
V	objem tělesa [m^3]
v	rychlost pohybu elektronů [$m \cdot s^{-1}$]
γ	měrná elektrická vodivost [$S \cdot m^{-1}$]
ϵ	permitivita [$F \cdot m^{-1}$]
ϵ_0	permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$]
ϵ_r	relativní permitivita [-]
μ	permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]

μ_0	permeabilita vakua [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]
μ_r	relativní permeabilita [-]
ρ	objemová hustota náboje [$\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$]
σ	plošná hustota náboje [$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$]
τ	lineární hustota náboje [$\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$]
ϕ	magnetický indukční tok [Wb]
φ	elektrický potenciál [V]
Ψ	posuvný proud [A]

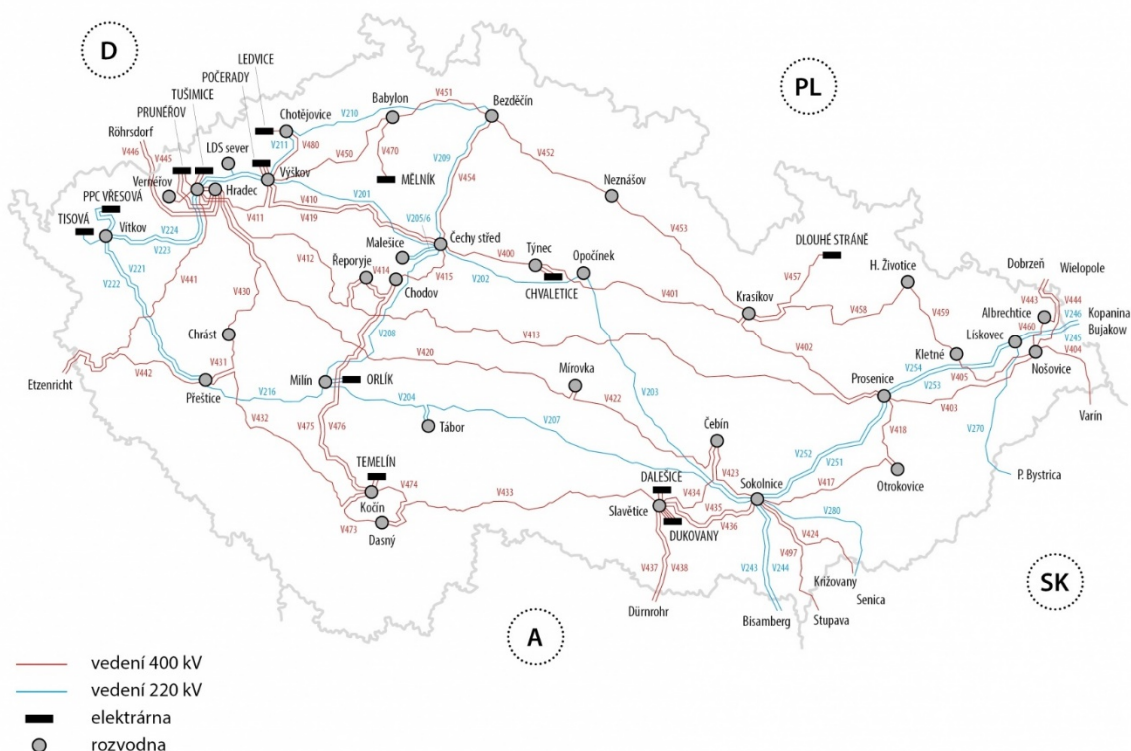
1 Elektrizační soustava

Přenos elektrické energie z místa výroby do místa spotřeby je realizován prostřednictvím elektrizační soustavy. Jedná se vlastně o vzájemně provázaný soubor veškerých technických prostředků a zařízení, sloužících k výrobě, transformaci, přenosu a distribuci silové elektřiny. Pro dosažení určitého stupně kvality a spolehlivosti dodávky, a to nejen v dostatečném množství, ale i požadovaném čase, jsou nezbytné další systémy. Sem spadají například systémy měřicí, řídicí, ochranné, zabezpečovací a dnes poměrně populární informační a telekomunikační technika. [9] Dále se budeme zabývat především možnostmi dálkového přenosu.

1.1 Přenosová soustava

Přenosová soustava, někdy též právem nazývaná jako „páteřní síť“, strategicky propojuje jednotlivé zdroje, transformační stanice a rovněž i soustavy sousedních zemí, a to s využitím vedení velmi vysokého napětí (hladiny 110, 220 a 400 kV). [10] [12] Jejím provozovatelem je u nás státní podnik ČEPS, a.s. Konfigurace sítě se provádí centrálně dispečerským způsobem ze dvou lokalit. Hlavní dispečerské pracoviště se nachází v Praze, záložní potom v Ostravě. Hlavním úkolem je zajistit v každém okamžiku rovnováhu mezi výrobou a spotřebou. [11] Další článek řetězu tvoří distribuční síť, jenž tvoří tzv. mezistupeň mezi přenosovou soustavou a koncovými odběrateli.

Schéma sítí 400 kV a 220 kV

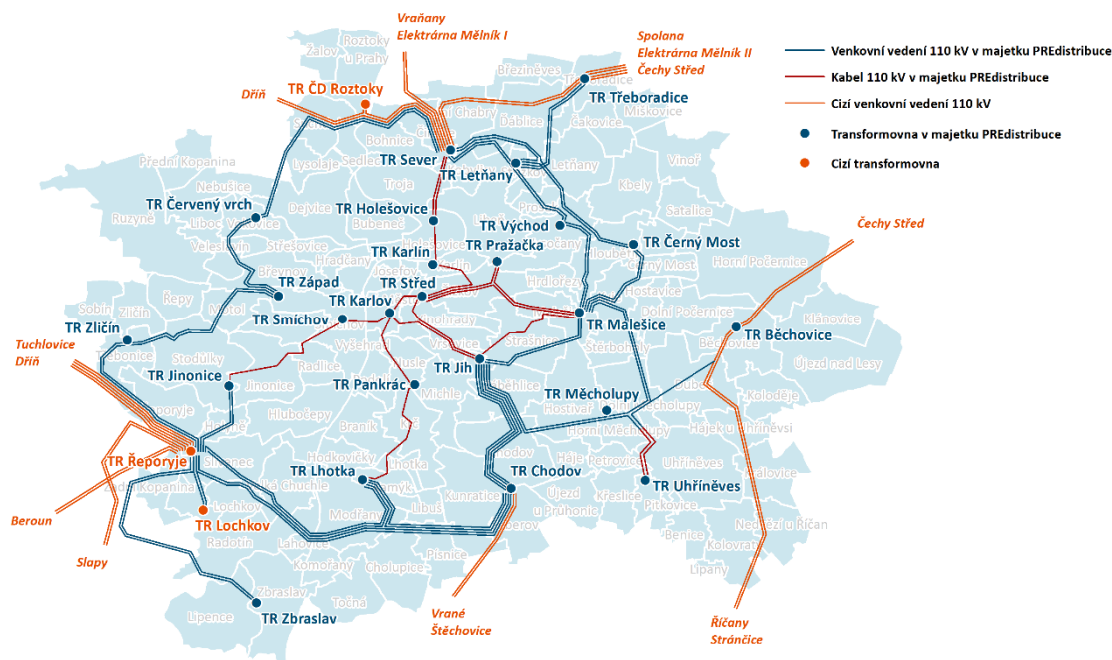


Obr. 1: Vedení přenosové soustavy ČR, [35]

1.2 Distribuční soustava

Distribuční soustava, resp. distributoři elektrické energie, zprostředkovává dodávku elektrické energie ke koncovým zákazníkům. Na rozdíl od přenosové soustavy je správa distribuční soustavy v režii distributorů. Spadají sem linky, rozvodny a transformační stanice o systémovém napětí 110 kV a nižším. [14] Mezi nejvýznamnější distributory na českém trhu patří ČEZ Distribuce, EO.N Distribuce a PRE Distribuce. [13] Avšak v souvislosti s hierarchickou strukturou, jsou veškeré významné zásahy podřízeny centrálnímu dispečinku ČEPS. Ovšem za správné fungování soustavy ručí samotní distributoři a jejich dílčí divize. Dle rozsahu působnosti rozlišujeme podnikové a rajónní dispečinky, neboť takto rozsáhlou síť by bylo velice obtížné spravovat z jediného místa.

**Polohopisné schéma vedení 110 kV
na území PREdistribuce, a.s.**



Obr. 2: Vedení 110 kV distribuční soustavy na území Prahy, [36]

1.3 Základní typy linek

Silová vedení, nezávisle na typu soustavy, jsou v současné době technicky řešena dvojím způsobem – venkovní a kabelová vedení. Každá z variant má svoje přednosti, ale i parazitní vlastnosti. [15] Roli při jejich projektování hrají bezpečnost, ekonomická a estetická hlediska a v neposlední řadě také vliv na životní prostředí. S ohledem na náplň této práce se zaměříme pouze na problematiku venkovních vedení a souvisejících komponent.

1.4 Venkovní vedení

Základním nosným prvkem všech venkovních, resp. nadzemních vedení, jsou stožáry. Tyto mřížové podpěrné body se v závislosti na provozních napětích a charakteru krajiny navrhuji s rozlišnými výškami a vzájemnými odstupy (délkami polí), tak aby nedocházelo ke vzájemným kontaktům jednotlivých fází, ani s jinými okolními neživými částmi. V prostoru, bezprostředně podél linek (nejen venkovních), se nachází tzv. ochranné pásmo, dále definované v zákoně č. 458/2000 Sb. V tomto pásmu je např. striktně zakázáno

umísťovat stavby a jiné případné předměty a zařízení, provádět výkopové práce nebo vyvíjet takové činnosti, které by mohly omezit provoz zařízení energetické soustavy nebo způsobit škodu na zdraví nebo majetku. [16]

1.4.1 Poruchové stavy

- *Přepětí*

Jako přepětí označujeme taková napětí, která jsou vyšší než nejvyšší dovolené provozní hodnoty napětí. Za jejich vznikem stojí vnitřní změny v konfiguraci sítě (spínací pochody, způsoby provozování sítě – chod naprázdno) nebo vnější, jejichž příčinou jsou atmosférické výboje. Během chodu vedení naprázdno, nebo se zatížením pod hodnotou přirozeného výkonu, se vlivem všudypřítomných kapacit mezi jednotlivými vodiči a jejich vazbami se zemí, zvýší napětí na konci vedení. Přepětí mají neblahý vliv na izolační prvky (stárnutí, degradace, průrazy), které je nutno správně dimenzovat a zvážit použití ochranných členů – jiskřišť a svodičů přepětí. [17]

- *Zemní spojení*

Se zemním spojením se lze setkat pouze u sítí s izolovaným nebo neúčinně uzemněným nulovým uzlem, kam spadají distribuční sítě vysokého napětí. Zemní spojení může mít charakter kovový (zanedbatelný odpor poruchy) nebo odporový. Podle doby trvání rozlišujeme poruchy trvalé, mžikové, krátkodobé a nejnepríznivější přerušované, které vedou ke vzniku přepětí. Dojde-li v síti k zemnímu spojení, změní se především napěťové poměry, avšak síť je stále v provozuschopném stavu. Napětí proti zemi postižené fáze je nulové, uzel soustavy vykazuje fázové napětí proti zemi a zbylé fáze jsou na sdružených hodnotách. Síť se stává nesymetrickou, fázovými vodiči a zemí tečou kapacitní proudy. Ty mohou být při vyšších hodnotách nebezpečné nejen pro izolační systémy (hoření oblouku), ale v podobě krokového napětí v místě zemního spojení i pro živé organismy. Kapacitní proudy je možno kompenzovat prostřednictvím vhodně zvolené indukčnosti Pettersonovy tlumivky

- *Zkraty*

Za zkrat považujeme vzájemný dotyk živých částí mezi sebou nebo vůči zemi. Příčinou může být špatný stav izolace související s jejím stárnutím a postupnou degradací

materiálu, čemuž do jisté míry také přispívají přepět'ové stavy v síti. Dále může být zkrat způsoben různorodými vnějšími faktory (přímé narušení ochranného pásma, silné poryvy větru, nadměrná zátěž lan od námrazy aj.) nebo nesprávně provedenou montáží. Statisticky k většině zkratů (80 % - 90 %) dochází právě na venkovních vedeních, zbytek připadá na vybavení elektrických stanic a přípojnicové systémy. Ve více jak polovině případů je zkratována pouze jedna fáze se zemí, zhruba čtvrtina odpovídá dvojfázovým zkratům a občas se objeví dvojfázový zemní, trojfázový a trojfázový zemní zkrat. [7] Všechny tyto poruchy jsou provázeny enormními zkratovými proudy, které jsou v případě venkovních vedení omezeny pouze malou reaktancí a mají tepelné a dynamické účinky. Mohou také ohrozit stabilitu sítě při charakteristickém poklesu napětí nebo naopak vyvolat vlnu přepětí. Vzhledem k předcházejícím projevům je včasné a rychlé vybavení zkratu vhodně nastavenou ochranou zcela klíčové. [18]



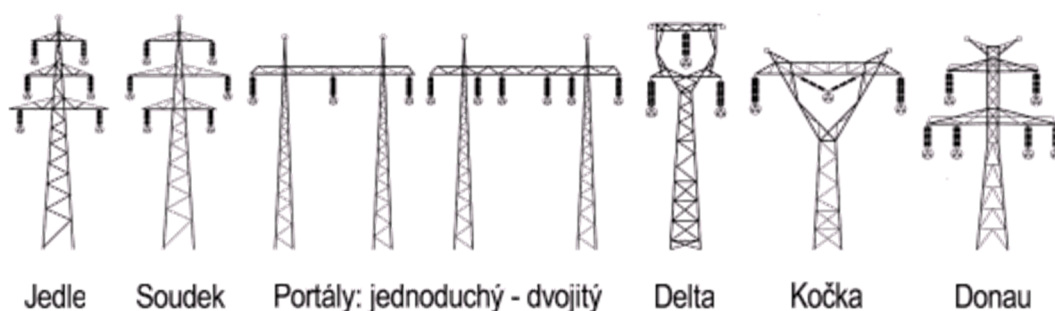
Obr. 3: Hořící elektrický oblouk, [37]

- **Koróna**

Jedná se o doutnavý výboj vyskytující se v okolí vodičů, hrotů a ostrých hran o vysokém potenciálu v nehomogenním elektrickém poli, dosáhne-li hodnota elektrické intenzity kritické úrovně, tj. překročí-li elektrickou pevnost vzduchu. [20] Projevuje se zvýšenými ztrátami na vedeních, počínaje hladinou 110 kV. Může se vyskytovat i v podobě tzv. Eliášova světla na vrcholech stožárů vlivem vybíjení atmosférické statické elektřiny. [19] Při návrhu částí zařízení elektrizační soustavy proto preferujeme spíše „uhlazené“ konstrukce a od linek na napětí 220 kV se uplatňují svazkové vodiče. Vlastní geometrické uspořádání svazkového vodiče se jeví z pohledu koróny jako jediný ekvivalentní vodič o značném průřezu minimalizujícím šance na výboje.

1.4.2 Konstrukce a výstroj stožárů

V elektrizační soustavě se podle napěťových hladin využívají různé druhy konstrukcí stožárů, jak je možné vidět na *Obr. 4*. Jiný způsob dělení může záviset na konkrétním účelu. Nejčastějším typem jsou stožáry nosné, jež jsou namáhány svislými silami od závěsných izolátorů a k nim upevněným AIFe lanům. Také vliv povětrnostních a klimatických podmínek je nezanedbatelný. Tyto stožáry střídají ve stanovených vzdálenostech několika polí (až jednotky km) stožáry výztužné. Oproti předchozímu typu jsou masivní a musí vydržet velká mechanická namáhání způsobená např. zhroutilím celé řady nosných stožárů. Tvoří pevné body trasy celého vedení a předcházejí tak „domino efektu“. K ostatním, méně častým, avšak nezastupitelným druhům konstrukcí řadíme odbočné, koncové, rozvodné a křižovatkové stožáry. [21] [22]



Obr. 4: Typy konstrukcí stožárů různých napěťových hladin, [22]

Mezi hlavní konstrukční části patří betonový základ, dřík, hlava a konzole. Dobře vybudované základy jsou nezbytné pro zabezpečení dostatečné stability celé konstrukce i při

velkých silových namáhání, např. od silných poryvů větru. Většinou však nevydrží samotná ocelová konstrukce než samotné základy. Samozřejmě se v praxi používají i jiné materiály. Na nižších napěťových hladinách se můžeme běžně setkat i s dřevěnými či železobetonovými dříky. Dále se však zaměříme pouze na ocelové typy. Používají se oceli se zvýšenou odolností vůči atmosférické vlhkosti, označované pod obchodními názvy jako Atmosfix nebo Corten. Vyznačují se schopností vytvářet za vhodných podmínek na svém povrchu tenkou vrstvičku oxidů, která významně zpomaluje korozi, resp. jejich prvotní koroze slouží podobně jako ochranný nátěr. [23]

Dřík, v provedení čtyřboké příhradové konstrukce z ocelových válcovaných profilů, postupně přechází v hlavu stožáru, která nese jednotlivé konzole. Ke konzolám jsou vhodným montážním vybavením upevněny izolátory nebo izolátorové řetězce. Moderní konzole se konstruují z kompozitních izolačních materiálů, které poskytují dodatečnou ochranu proti atmosférickým přepětím. [21]



Obr. 5: Stožár venkovního vedení, zdroj: autor

2 Izolátory venkovních vedení

Izolátory umožňují oddělit silové prvky nadzemního vedení od uzemněných částí. Jejich nízkonapěťovou stranou jsou upevněny ke konzoli. Konstrukční návrh vychází nejen z hmotnosti vodičů/lan při běžných podmínkách, ale zohledňuje také zvýšená namáhání vlivem zhoršených podmínek okolního prostředí (námrazek, vítr, stupeň znečištění ovzduší) a především napěťové poměry. Na hladině vysokého napětí se můžeme setkat s podpěrnými izolátory, pro vyšší úrovně jsou spíše typické závěsné a tahové. [8]

2.1 Charakteristické pojmy a veličiny

- *Izolátorový řetězec*

Jedná se o spojení více závěsných izolátorů namáhaných především na tah a zabezpečujících oporu fázových vodičů.

- *Povrchová cesta*

Délka povrchové cesty je definována jako nejkratší vzdálenost podél povrchu izolátoru, oddělující jeho vodivé části, mezi nimiž se běžně vyskytuje provozní napětí. Uvažuje se přitom pouze povrch izolačních materiálů, popř. povlak o vysokém odporu.

- *Přeskok, přeskoková vzdálenost*

Za přeskok označujeme výboj podél povrchu izolátoru nebo také porušující výboj vzduchu v blízkosti izolátoru. Nejkratší přeskoková vzdálenost je uvažována vně samotný izolátor, vzdušným prostředím a mezi kovovými armaturami.

- *Kovové armatury*

Koncové pevné části izolátoru, sloužících k jeho ukotvení ke konzolové konstrukci, připojení vodičů k izolátoru nebo ke vzájemnému propojení dílčích izolátorů v izolátorový řetězec.

- ***Průraz, průrazné napětí***

Hodnota napětí, stojící za průrazem zkoušeného tuhého nebo závěsného izolátoru za předepsaných podmínek. Průraz způsobuje trvalou ztrátu dielektrické pevnosti pevného izolačního materiálu.

- ***Napětí atmosférického impulzu***

Napětí atmosférického impulzu je definováno časovými parametry 1.2/50 μ s, což je vlastně poměr dob čela a půltýlu přepět'ové vlny. Pro účely zkoušek jej generujeme pomocí impulzních generátorů. [24]

- ***Výdržné napětí atmosférického impulzu***

Nejvyšší hodnota napětí atmosférického impulzu, kterou izolátor vydrží za normovaných podmínek zkoušky.

- ***50 % přeskokové napětí atmosférického impulzu***

Napětí, označované jako U_{50} , se statisticky 50 % pravděpodobností, že dojde za předepsaných podmínek zkoušky k přeskoku na izolátoru v suchém prostředí.

- ***Výdržné střídavé napětí***

Velikost napětí, kterou izolátor spolehlivě vydrží za normou stanovených podmínek. Do jisté míry je ovlivněno strukturou stožáru a rozložením elektromagnetického pole, jež je závislé na provozním uspořádání a tvarech kovových částí. [4]

- ***Elektromechanická, mechanická porušující síla***

Maximální porušující síla, které bylo dosaženo u závěsného izolátoru, testovaného za normovaných podmínek.

Bližší informace dostupné v normách [2] a [3].

2.2 Značení izolátorů

Každý izolátor musí být viditelně a trvanlivě označen jménem nebo značkou výrobce a rokem výroby. Navíc u závěsných izolátorů je uváděna elektromechanická nebo mechanická porušující síla, kdykoliv je použitelná. [5] Příklady takovýchto značení uvádí normy IEC 305, IEC 433 a IEC 720. Při výběru izolátoru v katalogích sledujeme následující charakteristické parametry [2], přičemž některé z nich se promítají i do samotného označení výrobku:

- jmenovité napětí a frekvence sítě,
- možné specifické mechanické zatížení (SML),
- výdržné napětí při normalizovaném atmosférickém impulzu,
- výdržné střídavé napětí při síťovém kmitočtu za sucha a deště,
- minimální povrchová cesta,
- minimální doskoková vzdálenost,
- provedení koncových armatur (typ spojení),
- další konstrukční rozměry.

2.3 Třídy izolátorů

V závislosti na konstrukci, resp. délce průrazné dráhy izolačním materiálem, lze izolátory venkovních vedení rozdělit do dvou základních tříd [2]:

- A. délka průrazné dráhy větší nebo rovna polovině nejkratší vzdušné vzdálenosti (délce oblouku), např. tyčový izolátor,
- B. délka průrazné dráhy menší než polovina délky oblouku, např. talířový izolátor.

2.4 Používané elektroizolační materiály

V následující tabulce (*Tab. 1*) jsou uvedeny tři základní druhy nejčastěji používaných izolačních materiálů a jejich charakteristické vlastnosti.

Materiál	Vlastnosti
Keramika, porcelán	dlouhodobě osvědčený materiál, šetrný k životnímu prostředí, samočistící schopnost, vhodný do znečištěných oblastí, dobrá mechanická pevnost v tlaku a tvrdost, vysoká elektrická pevnost
Tvrzené sklo	dlouhodobě osvědčený materiál, vysoká pevnost v tahu, teplotní stálost rozměrů, snadno identifikovatelné poškození (roztříštění skla při nárazu)
Polymery	vysoká elektrická a mechanická pevnost, nízká hmotnost a cena, odolné proti rozbití (vandalismus), hydrofobní, vhodné do značně znečištěných oblastí, snadné dosažení požadovaných tvarů, zrychlený proces stárnutí vlivem UV záření

Tab. 1: Vlastnosti nejpoužívanějších izolačních materiálů pro izolátory, [8] [25] [26]



Obr. 6: Spadlý keramický izolátor, zdroj autor

Venkovní izolaci je nutno navrhovat s ohledem na stupeň znečištění okolního prostředí (viz Tab. 2), a to na základě zkoušek s umělým znečištěním nebo dle délky měrné povrchové cesty izolátoru, o čemž pojednává norma ČSN 33 0405. [6] Výdržné napětí takové izolace

musí být vždy větší než nejvyšší fázové střídavé napětí sítě. U izolačních závěsů na vedeních a v elektrických stanicích je tendence volit takové materiály a struktury, aby nebylo nutné provádět manuální čištění až do doby jejich předpokládané životnosti (samočisticí funkce).

Stupeň znečištění	Charakteristika oblasti
Stupeň I (malé)	oblasti bez průmyslu a s malou hustotou domů vybavených topným zařízením; oblasti s malou hustotou průmyslu nebo domů, vystavené častým větrům a dešťům; zemědělské a horské oblasti
Stupeň II (střední)	oblasti s průmyslem s nízkými exhalacemi a průměrnou hustotou domů; oblasti s velkou hustotou domů a průmyslu vystavené častým větrům a dešťům
Stupeň III (silné)	oblasti s velkou hustotou průmyslu a městské oblasti s velkou hustotou topných zařízení vytvářejících znečištění
Stupeň IV (velmi silné)	oblasti v bezprostřední blízkosti zdrojů velkého znečištění
Stupeň N (námraza)	oblasti se zvýšenou tvorbou vodivé námrazy; okolí chladících věží, vychlazovacích rybníků a čistících stanic s rozstříkem vody

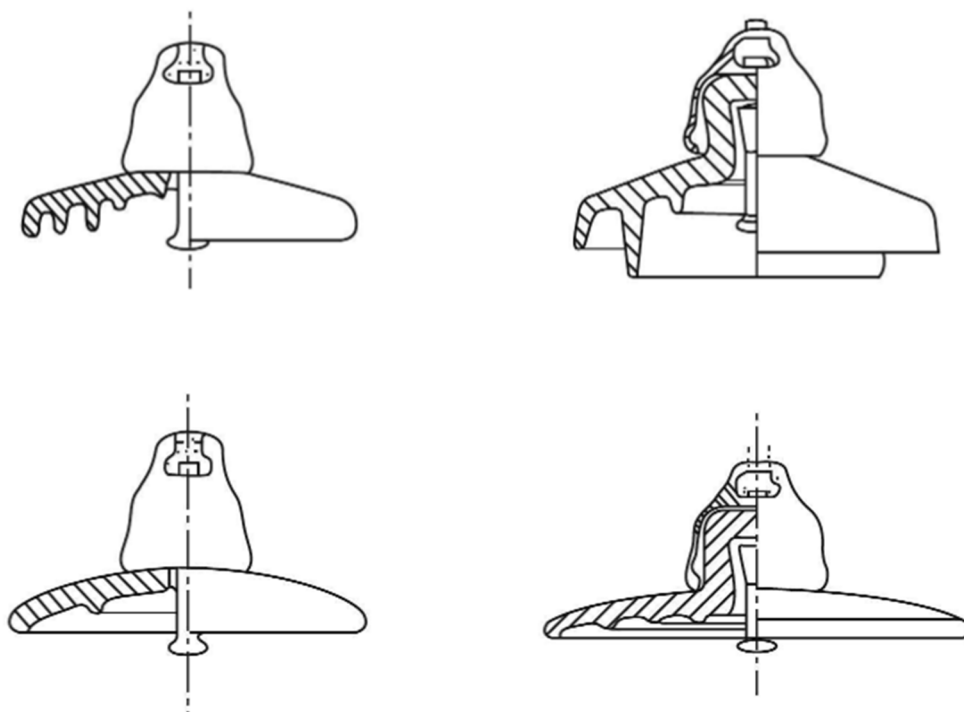
Tab. 2: Dělení oblastí podle stupně znečištění, převzato z [6]

2.5 Typy závěsných izolátorů

2.5.1 Talířové

Talířové izolátory se vyrábějí buď jako porcelánové nebo skleněné. Potřebné povrchové cesty se dosahuje zařazením určitého počtu talířů do jednoho řetězce. Možné způsoby spojení jsou kombinace palička-pánvička nebo vidlice-oko. Dostatečně hladkým svrchním povrchem jednotlivých členů se předchází hromadění nečistot a vlhkosti. Dodatečný sklon podporuje samočisticí funkci. Spodní strana je navrhována s ohledem na požadavky na aerodynamiku a prodloužení povrchové cesty. Na Obr. 6 jsou zobrazeny jednotlivé typy profilů talířových izolátorů. Závěsné izolátory tohoto typu jsou jen zřídka používány v elektrických rozvodnách. Stejně tak tahové mlhové izolátory nejsou vhodné pro přípojnícové systémy, u nichž díky žebrovaným profilům nedochází k přirozenému čištění deštěm v jejich vodorovné poloze. Izolátory venkovních vedení jsou oproti staničním,

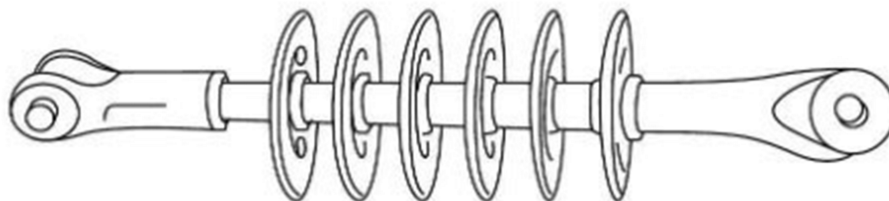
s kratšími rozpětími, namáhány větším mechanickým zatížením, s čímž souvisí maximální velikost porušující elektromechanické síly. [8]



Obr. 7: Profily izolačních segmentů talířových izolátorů, [8]

2.5.2 Tyčové

Tyčové izolátory mohou působit jako samostatné jednotky nebo lze jejich spojováním získat izolátorové řetězce, které vedou ke zlepšení elektrických a mechanických vlastností. Polymerní druhy jsou tvořeny izolačním jádrem, zastávajícího funkci základního nosného prvku. Pro tyto účely se používá orientovaného skelného vlákna impregnovaného v pryskyřici. Na jádro je následně nanesen silikonový plášť zajišťující základní povrchovou cestu a chránící izolační jádro před vnějšími vlivy okolního prostředí. Na takto hotový dřík jsou procesem vulkanizace umístěny jednotlivé stříšky a na jeho konce natlačeny armatury. Stříšky přispívají k prodloužení dosavadní povrchové cesty a snižují riziko průrazu, např. při dešti. Veškeré části izolátoru musí na sebe dokonale doléhat, aby nedocházelo k pronikání vlhkosti jednotlivými spoji a nebyla tím ohrožena správná funkce izolátoru. [27]



Obr. 8: Tyčový kompozitní izolátor, [8]

2.6 Zkoušky izolátorů

Zkoušky se rozdělují do tří základních skupin, přičemž každá z těchto skupin zahrnuje dílčí mechanické, elektrické, tepelné či jiné zkoušky izolátorů, které jsou stanoveny v příslušných výrobních normách. Konkrétní zkušební postupy a požadavky uvádějí normy ČSN IEC 383-1 a ČSN IEC 1109. [2]

2.6.1 Typové zkoušky

Úkolem typových zkoušek je odhalení nedostatků souvisejících s návrhem konstrukce izolátorů, volbou materiálů, případně technologií výroby. Například u polymerních izolátorů je třeba ověřit:

- materiál jádra, pláště a koncových armatur,
- tloušťku pláště na nosném jádře (včetně povlaku jádra),
- konstrukční řešení jednotlivých částí,
- vhodnost výrobních postupů. [2]

Typové zkoušky se často provádí na několika testovacích vzorcích, zásadně při uvádění nových konstrukcí nebo změn ve výrobních postupech. Výstupem je zkušební certifikát potvrzený kvalifikovanou organizací nebo přijatý odběratelem.

Do této skupiny řadíme zkoušky atmosférickým impulzním napětím, střídavým napětím průmyslového kmitočtu za deště, ověření rozměrů (spojení, stavební výška), zkoušky elektromechanickou a mechanickou porušující silou apod. [2]

2.6.2 Výběrové zkoušky

Výběrové zkoušky slouží k posouzení charakteristik dodaných izolátorů a aplikují se na náhodně vybraných vzorcích při jejich přejímce. Spadají sem například výběrová průrazná zkouška (pouze izolátory třídy B), stejně tak ověření rozměrů a vychýlení nebo systému zajištění. [2]

2.6.3 Kusové zkoušky

Tyto zkoušky mají za úkol odhalit všechny izolátory s výrobní vadou a provádí se na všech dostupných kusech. V praxi se především uplatňují kusová vizuální prohlídka (kvalita provedení glazování, povrchové poškození, bubliny a vrásky), elektrická a mechanická zkouška (namáhání v tahu a ohybu). [2]

3 Teorie polí

V minulé kapitole jsme si přiblížili význam a konstrukční řešení zařízení elektrizační soustavy, včetně možných provozních a poruchových stavů na vedení. Pro analýzu chování těchto zařízení, v podmínkách blížících se reálným prostředím, s výhodou využíváme různých matematických aparátů, jenž jsou založeny na teorii elektromagnetického pole.

Na základě experimentů a geniálních úvah anglického chemika a fyzika – Michaela Faradaye – se podařilo Jamesi Clerku Maxwellovi jeho poznatky o existenci elektromagnetických polí zobecnit a matematicky zformulovat do časově-prostorových rovnic, které se používají dodnes. Avšak na objasnění fyzikální podstaty těchto polí se podíleli další významní fyzikové, především Albert Einstein s jeho teorií relativity. Bylo dokázáno, že elektromagnetické pole je jednou z forem hmoty, jenž je nositelem energie, charakteristická svou hmotností a hybností, a platí pro ni zákony zachování energie. Je nutno podotknout, že v případě Maxwellovy teorie se uplatňuje fenomenologický a makroskopický přístup při řešení problému, tzn. že je založena na experimentálním pozorování, nepřihlíží k částicové struktuře látek, a navíc platí pouze pro prostředí v klidovém stavu. Pro tyto účely dospěl H. A. Lorentz k mnohým vylepšením v podobě mikroskopické (elektronové) teorie, známé jako kvantová elektrodynamika. I přesto je původní Maxwellova teorie hojně využívána v řadě klíčových oblastí elektrotechniky, konkrétně při návrhu elektrických strojů a zařízení, přenosových vedení apod. [1]

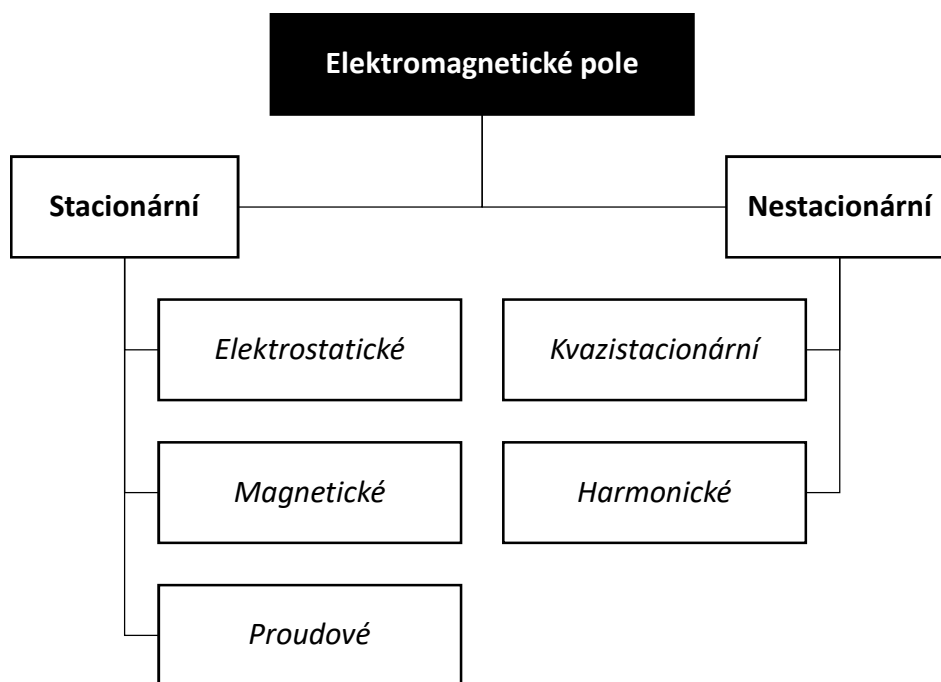
3.1 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole a veličiny jej charakterizující, jsou obecně funkcí času a prostoru. Z hlediska prostoru uvažujeme závislost nejvýše na třech geometrických souřadnicích (osách x, y a z , popř. poloměru r). Řešíme potom jednorozměrné, dvojrozměrné nebo trojrozměrné pole. Speciálním druhem je homogenní pole, jehož veličiny, resp. vlastnosti, nejsou závislé na prostorových souřadnicích a v rámci uvažované oblasti se jeví jako neměnné – stejné. Elektromagnetické pole je možné vyšetřovat ze dvou rozdílných úhlů pohledu na danou úlohu – analýzy a syntézy. Analýzu aplikujeme tehdy, známe-li rozmístění zdrojů pole (náboje, indukce, proudy) a zajímají nás průběhy charakteristických veličin v čase a prostoru. Výsledkem je jediné řešení. Při syntéze

postupujeme zcela opačně, tzn. k předepsanému chování pole hledáme příčiny jeho vzniku – zdroje, u kterých jsou pro nás klíčové zejména jejich umístění v prostoru a vývoj v čase. Tím však získáváme buď více nebo žádné řešení. V elektrotechnické praxi zpravidla vyšetřujeme vzájemné ovlivňování polí a látek (elektrická namáhání), polí a jejich zdrojů (silová působení) nebo parametry pasivních prvků (kapacit, indukčností, odporů).

3.2 Působnost elektromagnetického pole

Na elektromagnetické pole lze pohlížet jako na časově neproměnné (stacionární) nebo časově závislé (nestacionární). Stacionární studie zahrnuje projevy dalších dílčích polí – elektrostatického, magnetického a proudového, které lze řešit samostatně. Toto však není možné u pole nestacionárního, kde je potřeba zohlednit vzájemné ovlivňování elektrického a magnetického pole v čase.



Obr. 9: Klasifikace elektromagnetického pole, [1]

3.3 Veličiny elektromagnetického pole

Rozlišujeme skalární a vektorové veličiny, jejichž základní přehled je k nahlédnutí v Příloze P.

3.4 Typy prostředí a parametry

Jak již bylo dříve naznačeno, ve výrazech pro popis elektromagnetického pole se vyskytují veličiny ε , μ , γ , charakterizující dané prostředí (materiál). V závislosti na typu prostředí mohou mít také různý charakter, což demonstruje právě následující tabulka.

Typ prostředí	Charakteristika prostředí	Charakter materiálové veličiny
Izotropní	ve všech směrech stejné (neměnné) vlastnosti, látky amorfni a polykrystalické	skalár
Anizotropní	v různých směrech různé vlastnosti monokrystalických látek (např. u orientovaných plechů závislost na směru válcování)	tenzor
Homogenní	ve všech bodech prostředí tytéž vlastnosti	konstanta
Nehomogenní	vlastnosti závislé na prostorových souřadnicích	funkce polohy
Lineární	nezávislost materiálových charakteristik na stavových veličinách popisujících pole	konstanta
Nelineární	závislost materiálových charakteristik na hodnotě stavových veličin pole	funkce velikosti stavového vektoru
Disperzní	frekvenční závislost	tenzor

Tab. 3: Charakter prostředí a materiálových veličin, [1] [31]

Výše uvedené vlastnosti bychom uplatnili při rozboru ideálních prostředí, v reálných podmínkách se však setkáme spíše s jejich kombinacemi. Potom materiálové charakteristiky nemusejí být ryze čistého charakteru, ale např. ve formě skalárních konstant.

Každý elektroizolační materiál je charakterizován svojí relativní permitivitou, která se v technické praxi určuje měřením nebo je pro základní materiály dohledatelná v tabulkách. Výsledná permitivita je dána vztahem:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (1)$$

kde:

ε_0	...	permitivita vakua ($\approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$),
ε_r	...	relativní permitivita.

Pro vakuum a vzduch uvažujeme relativní permitivitu rovnou 1, zatímco pro ostatní látková prostředí $\varepsilon_r > 1$.

Další skupinou materiálů jsou magnetika, jež jsou reprezentována permeabilitou a platí pro ně obdobný vztah:

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (2)$$

kde:

μ_0	...	permeabilita vakua ($\approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$),
μ_r	...	relativní permeabilita.

Rozlišujeme látky diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. Diamagnetika a paramagnetika buď mírně zeslabují nebo v druhém případě naopak mírně zesilují účinky vnějšího magnetického pole. Jejich relativní permeabilita se pohybuje těsně pod nebo nad hodnotou 1. Pro feromagnetika jsou typické hodnoty $\mu_r \gg 1$, řádově 10^2 až 10^5 . Již při nízkých intenzitách magnetického pole u nich dochází k magnetizaci látky, tj. souhlasnému natáčení magnetických domén, a tím k výraznému zesílení zdrojového pole. O chování feromagnetických látek, které mimo jiné představují nelineární prostředí, vypovídá tzv. hysterezní křivka, závislost $B = f(H)$.

Obecně všechny materiály (vodiče, polovodiče a izolanty), vykazují při daných podmínkách určitý stupeň elektrické vodivosti, reprezentované v našem případě konduktivitou, jež může nabývat řádově následujících hodnot:

- kovové vodiče: $\gamma = 10^6 \div 10^8 \text{ S.m}^{-1}$,
- polovodiče: $\gamma = 10^{-8} \div 10^6 \text{ S.m}^{-1}$,
- kovové vodiče: $\gamma = 10^{-19} \div 10^{-8} \text{ S.m}^{-1}$.

3.5 Maxwellovy rovnice

Zákonitosti elektromagnetického pole jsou formulovány soustavou celkem čtyř Maxwellových rovnic v integrálním a diferenciálním tvaru. Integrální tvar rovnic má obecnou platnost a umožňuje řešení vybraných oblastí v prostoru. Uplatňuje se zejména u jednoduchých geometrických struktur (válcová, kulová, ...). Diferenciální tvar je častější a je zaměřen na konkrétní (regulární) body dané oblasti prostředí, ale nelze jej přímo použít k popisu chování pole na rozhraní těchto prostředí, kde může docházet ke skokové změně vektoru. Toto omezení lze překonat definováním tzv. podmínek na rozhraní. V regulárních bodech jsou jinak stavové vektory pole spojité a diferencovatelné.

	Integrální tvar	Diferenciální tvar
I.	$\oint_c \mathbf{H} \, dl = \sum I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
II.	$\oint_c \mathbf{E} \, dl = -\frac{d\phi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
III.	$\oint_s \mathbf{D} \, dS = Q$	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$
IV.	$\oint_s \mathbf{B} \, dS = 0$	$\text{div } \mathbf{B} = 0$

Tab. 4: Přehled Maxwellových rovnic, [1]

3.6 Rovnice pro proudovou hustotu

Rovnici lze opět vyjádřit jak v integrálním, tak diferenciálním tvaru. Plošný integrál z vektoru proudové hustoty \mathbf{J} je úměrný časové změně náboje vyskytujícího se uvnitř uzavřené oblasti o ploše S . Diferenciální tvar je platný pouze pro regulární body a lze jej vhodnými úpravami odvodit z I. a III. Maxwellovy rovnice.

$$\oint_s \mathbf{J} \, dS = -\frac{dQ}{dt}, \tag{3}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4)$$

3.7 Podmínky na rozhraní

Definováním podmínek na rozhraní lze rozšířit působnost diferenciálního tvaru předešlých rovnic, přičemž rozhraním se rozumí oblast přechodu mezi typově totožnými prostředími, avšak s rozdílnými materiálovými charakteristikami. Na přechodu může docházet k vychýlení stavových vektorů pole podle zákona lomu, a tedy i siločar, případně proudnic.

3.7.1 Rozhraní dvou dielektrik

Uvažujme dielektrická prostředí o různých relativních permitivitách a zaměříme se na konkrétní bod rozhraní. V tomto bodě je zaručen spojitý průběh tečných složek vektorů elektrické intenzity, což ale nemá vliv na celkovou velikost vektorů intenzit. Intenzita je závislá na parametrech daného prostředí. Pro indukce se uplatňuje vztah, kdy rozdíl jejich normálových složek je roven plošné hustotě náboje na rozhraní. [1]

$$E_{1t} = E_{2t}, \quad (5)$$

$$D_{2n} - D_{1n} = \sigma \quad (6)$$

3.7.2 Rozhraní dvou magnetik

Pro každý bod na rozhraní dle [1] platí:

$$H_{1t} - H_{2t} = K_N, \quad (7)$$

kde:

H_{xt} ... tečné složky vektorů intenzit magnetického pole v příslušném prostředí x o relativní permeabilitě μ_x ,

K_N ... normálová složka proudu tekoucího tenkou vrstvou rozhraní,

a

$$B_{1n} = B_{2n}, \quad (8)$$

kde:

B_{xn} ... normálové složky vektorů magnetické indukce v příslušném prostředí x o relativní permeabilitě μ_x .

3.7.3 Rozhraní dvou vodivých prostředí

Pro každý bod na rozhraní dle [1] platí:

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (9)$$

a

$$J_{1n} = J_{2n}, \quad (10)$$

kde:

J_{xn} ... normálové složky vektorů proudové hustoty v příslušném prostředí x o vodivost γ_x .

3.8 Silové účinky

V elektromagnetickém poli se uplatňují tři základní silové mechanismy: Coulombovy, Lorentzovy a Maxwellovy síly. V elektrickém poli působí Coulombovy síly mezi elektricky nabitými tělesy o příslušné hustotě náboje. Mohou být jak přitažlivé, tak i odpuzivé. Síly Lorentzova typu ovlivňují proudovodiče v magnetickém poli. Obecně platí, že proudovodiče opačného směru se odpuzují. Proto se např. vodiče jedné cívky drží pohromadě. Poslední skupinou jsou síly Maxwellovské. Jedná se o síly působící v elektrickém poli na dielektrika nebo v magnetickém poli na feromagnetika. Na rozdíl od předchozích je nelze počítat objemově. Síla je potom vztažena na celé těleso. Příkladem může být dielektrikum deskového kondenzátoru vtahované mezi jeho elektrody.

3.9 Energie elektromagnetického pole

Výpočet energie se odvíjí od typu pole a prostředí, ve kterém dochází k jejímu hromadění. Příslušné vztahy měrných energií vystihuje tabulka níže.

pole/prostředí	lineární	nelineární
elektrické	$w_e = \frac{1}{2} \mathbf{E} \mathbf{D} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2$	$w_e = \int_0^{D_{max}} \mathbf{E} dD$
magnetické	$w_m = \frac{1}{2} \mathbf{H} \mathbf{B} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r H^2$	$w_e = \int_0^{B_{max}} \mathbf{H} dB$

Tab. 5: Vztahy pro výpočet energie v elektromagnetickém poli, [34]

Pro zjištění výsledné energie dílčích polí je nutno aplikovat dodatečnou integraci přes celkový objem. Ve specifických případech, kdy se stavové veličiny pole mění skokově (body rozhraní), je výhodnější řešit množství akumulované energie pomocí potenciálů:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \rho \varphi dV, \quad (11)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{J} \mathbf{A} dV \quad (12)$$

Zde se již nejedná o měrné veličiny.

3.10 Ztráty v elektromagnetickém poli

Jako v každém reálném funkčním systému, i v elektromagnetickém poli dochází ke ztrátám, které se obvykle projevují tepelnými účinky. Rozlišujeme tři základní druhy ztrát:

- **Jouleovy ztráty** – způsobené průchodem proudu vodivými strukturami látky,
- **Hysterezní (magnetizační)** – energie spotřebovaná k natáčení magnetických momentů,
- **Dielektrické** – vznikající vlivem repolarizace molekul dielektrika.

3.11 Řešení elektromagnetických polí

3.11.1 Stacionární elektromagnetické pole

- *Elektrostatické pole*

Za vznikem elektrostatického pole v dielektrických izolačních materiálech stojí elektrické náboje, které se však nepohybují a nevytvářejí tak elektrický proud (nemagnetický charakter pole). Pro popis pole slouží II. a III. Maxwelllova rovnice, ovšem vlivem časové stálosti se neuplatňují jejich časové derivace, a proto jsou tyto členy vypuštěny. Druhá Maxwelllova rovnice zde nalézá uplatnění pro výpočet velikosti napětí, jež je definováno rozdílem potenciálů ve dvou odlišných bodech prostoru, přičemž nezávisí na tvaru ani délce integrační cesty. [1] U elektrického potenciálu musí být zaručen jeho spojitý průběh a je určen vztahy:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (13)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (14)$$

$$\Delta \varphi = 0 \quad (15)$$

Gradient udává směr největší změny, v tomto případě poklesu (znaménko „-“), skalární funkce $\varphi(x, y, z)$ a výsledkem je vektor intenzity. Druhý vztah představuje Poissonovu rovnici, jejíž modifikací (pro oblasti s nulovou objemovou hustotou náboje ρ) získáme rovnici Laplaceovou (třetí vztah). Siločáry sledují vektory elektrické intenzity a k nim kolmé jsou tzv. ekvipotenciály, jež spojují místa o stejném potenciálu. [1] Podle Coulombova zákona na sebe jednotlivé (bodové) náboje vzájemně působí přitažlivými a odpudivými elektrostatickými silami.

Vlivem působení vnějšího elektrického pole na dielektrikum, dochází v jeho vnitřní struktuře k polarizaci částic. Doposud neutrální molekuly a atomy se mění na elektrické dipóly, které jsou orientovány proti směru tohoto pole, čímž jej současně zeslabují. [1] Rozlišujeme dva základních typy polarizace – posuvnou a orientační.

Elektrostatické pole se projevuje i na vodičích, jejichž hraniční povrch je zároveň ekvipotenciálou, k níž jsou kolmé vektory elektrické intenzity. Náboj se zde zdržuje pouze na povrchu a uvnitř předpokládáme intenzitu pole nulovou. [1]

- **Stacionární proudové pole**

Na rozdíl od elektrostatického pole zde dochází k pohybu nosičů elektrického náboje, což má za následek vznik elektrického proudu. K tomu je zapotřebí jednak trvalý zdroj těchto nosičů (galvanický článek, indukované napětí, ...) a také vhodné prostředí – vodivý materiál, např. kov. Je-li průchod elektrických nábojů v čase konstantní, proud potom označujeme jako stacionární. Do této skupiny spadá i proud stejnosměrný. [33] Stacionární proudové pole je dále charakterizováno proudovou hustotou a rovněž se zde uplatňuje Ohmův zákon v integrálním tvaru:

$$U_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \, dl = \int_A^B \frac{\mathbf{J}}{\gamma} \, dl = \int_A^B \frac{\mathbf{J}}{\gamma} \frac{S}{S} \, dl = \int_l \frac{\mathbf{J}}{\gamma S} \, dl = I \int_l \frac{1}{\gamma S} \, dl, \quad (16)$$

kde:

U_{AB}	...	napětí mezi konci vodiče,
\mathbf{E}	...	vektor intenzity elektrického pole,
\mathbf{J}	...	vektor proudové hustoty,
γ	...	měrná elektrická vodivost,
S	...	ekvipotenciální průřez,
dl	...	element délky vodiče.

Na rozdíl od elektrostatického pole již není povrch vodiče ekvipotenciální plochou, dokonce ani vnitřní intenzita není rovna nule. Siločáry proudového pole nazýváme proudnicemi, k jimž jsou tečné vektory proudové hustoty. Proud vtékající do libovolné uzavřené plochy je roven proudu z ní vytékající (zákon kontinuity). Z rovnic a uvedených zákonitostí proudového pole vyplývají I. a II. Kirchhoffův zákon. [1]

- **Stacionární magnetické pole**

Vznik stacionárního magnetického pole je podmíněný existencí stejnosměrného proudu nebo permanentního magnetu. Klíčovými jsou zde I. a IV. Maxwellova rovnice, opět se zanedbáním časově závislých členů. Pole je obecně, až na speciální případy, vírové (nepotenciální) a pro orientaci magnetických siločar, resp. směru tečných vektorů magnetické intenzity se používá např. pravidlo pravé ruky – vodič jakoby „uchopíme“ do dlaně pravé ruky, palec sleduje uvažovaný tok proudu a prsty ukazují směr vektorů intenzity.

[1] První Maxwellova rovnice určuje tzv. oběhové magnetické napětí v jednotkách ampér. Nepřítomnost volných elektrických a magnetických nábojů udává nezřídlový (solenoidální) charakter pole. [1] Podobně jako v případě proudového pole, v magnetickém poli figuruje zákon kontinuity, konkrétně však pro indukční toky. Pro práci s vektory pole se navíc zavádí vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} , definovaný následujícím vztahem:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (17)$$

Jako doplněk ve stacionárním magnetickém poli dále slouží Coulombova podmínka:

$$\text{div } \mathbf{A} = 0 \quad (18)$$

Při řešení úloh často využíváme tzv. normování, spočívající ve stanovení míst, kde je vektorový magnetický potenciál nulový:

$$\mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (19)$$

Stacionární magnetické pole lze popsat s pomocí Poissonovy a Laplaceovy rovnice ve vektorovém tvaru, v nichž se vyskytuje právě magnetický vektorový potenciál:

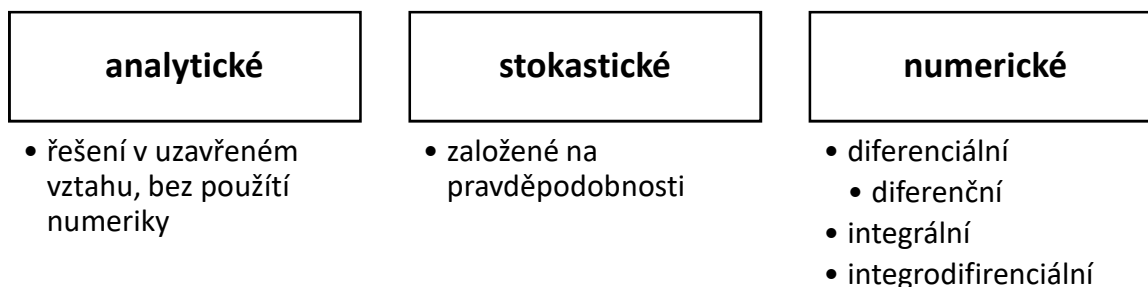
$$\Delta \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}, \quad (20)$$

$$\Delta \mathbf{A} = 0 \quad (21)$$

Obdobně jako u elektrostatického pole, vložením magnetika do vnějšího magnetického pole, dochází k polarizaci. Interakce zdrojového pole s mikroskopickými proudy uvnitř látky způsobí jeho zeslabení nebo dokonce výrazné zesílení (viz diamagnetika, paramagnetika, feromagnetika). [1]

3.11.2 Přehled metod

Pro účely řešení elektromagnetického pole využíváme tři základních skupin metod, jak je zobrazeno na *Obr. 10*.



Obr. 10: Metody řešení elektromagnetických polí, [34]

Diferenční metody řešení dále zahrnují:

- metody sítí,
- metody konečných diferencí,
- metody vážených reziduí,
- metody variační.

Z hlediska zaměření bakalářské práce a uplatnění v technické praxi je pro nás rozhodující metoda konečných prvků spadající do kategorie numerických variačních metod.

3.11.3 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (angl. *Finite Element Method - FEM*), využívá známých Maxwellových rovnic, jejichž numerické řešení je realizováno pomocí výpočetní techniky. Výsledkem je tedy vícero fyzikálních veličin (elektrická intenzita, magnetická indukce), a to včetně zobrazení rozložení elektromagnetického pole. Takto je možno získat lepší představu a odhalit případné poruchové či jiné nežádoucí vlivy. Numerické metody se uplatňují v případě složitých tvarů a konfigurací proudovodných drah, kde věrně vystihují silová působení. [32] Samotná analýza zahrnuje tři základní etapy:

1. Pre-processing,
2. Solution,
3. Post-processing.

První fáze spočívá v nahrání modelu (1D, 2D, příp. 3D úloha, možné jsou i znaky symetrie) o požadovaných rozměrech, definování vlastností materiálů, okrajových podmínek a vytvoření výpočetní sítě.

Dále se určí typ analýzy (statická, harmonická, transientní), vybere vhodný řešič s ohledem na fyzikální podstatu pole a požadovanou přesnost řešení. Dodatečně je možné specifikovat časovou oblast řešení, frekvenční pásmo či modifikovat interpretaci výsledků.

Poslední fáze je zaměřena na vyhodnocení dané úlohy – zpravidla grafický výstup průběhů charakteristických veličin.

3.11.4 Okrajové podmínky

V elektrostatice se používají dvě základní okrajové podmínky – Dirichletova a Neumannova. Prostřednictvím Dirichletovy se stanoví hranice o konstantním potenciálu (např. potenciál elektrod deskového kondenzátoru). Neumannova určuje plošnou hustotu náboje. [1] Příkladem může být oblast, na jejíž hranici předpokládáme nulovou hustotu náboje a která takto vymezuje rozsah řešení dané úlohy. V magnetických polích je tomu ekvivalentní nulový magnetický potenciál.

$$\varphi = \varphi_0, \quad (22)$$

$$\sigma = D_n = \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \sigma_0, \quad (23)$$

$$A = A_0 \quad (24)$$

4 Modelování

4.1 Seznámení se se softwarem

4.1.1 Agros2D

Jedná se o volně dostupný specializovaný 2D software navržený k řešení lineárních (i nelineárních) elektrických, magnetických a dalších fyzikálních polí na základě metody konečných prvků FEM. K řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes2D. Kromě ustáleného stavu dokáže analyzovat také děje přechodné a harmonické. Každá úloha nutně prochází třemi základními moduly aplikace – preprocesorem, procesorem a postprocesorem. [38]

V rámci preprocesoru uživatel definuje geometrii, stanoví materiálové konstanty a okrajové úlohy. Geometrii lze importovat v podobě CAD souboru nebo přímo vytvářet prostřednictvím interních nástrojů, jakou jsou uzly a hrany. [38]

Procesor slouží k diskretizaci oblasti řešení na konečný počet elementů vyššího řádu přesnosti, jejichž tvar odpovídá vybranému typu výpočetní sítě. Mezi základní typy sítí patří trojúhelníková a čtyřúhelníková. Pro dosažení požadované kvality program využívá Delaunayho triangulaci a automatickou hp-adaptivitu zaručující vhodné zjemnění sítě a řád polynomu. Vše je následně předáno řešiči, konkrétně jde o UMFPACK z balíku SuiteSparse. [38]

Třetím a závěrečným modulem je postprocesor, s jehož pomocí personalizujeme výstupy. Obdržené hodnoty je možné prezentovat v podobě konturovaných a vektorových map nebo grafů. Dále lze např. nechat spočítat vybrané charakteristické veličiny v daných bodech. [38]

Součástí Agros2D je i editor skriptů na bázi programovacího jazyka Python, díky němuž je možné provádět řadu výpočetních úkonů přímo v aplikaci a odpadá tak zdlouhavá ruční změna parametrů nebo částí geometrie. Obrovskou výhodou Pythonu je rovněž kompatibilita s celou řadou rozšiřujících knihoven pro vědecké výpočty, např. SciPy. [38]

4.1.2 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics je dalším z inženýrských nástrojů, jež vychází z metody konečných prvků. Velkou předností tohoto softwaru je analýza více fyzikálních jevů zároveň, čímž se výsledné řešení mnohem více blíží skutečnosti. COMSOL je navíc vybaven množstvím předdefinovaných úloh, které vědeckým pracovníkům usnadňují práci během formulace problému. Jádro aplikace obsahuje pokročilé nástroje sloužící k vytvoření geometrie, definování počátečních a okrajových podmínek, nastavení řešičů a profesionální interpretaci obdržených výsledků. Soustavy rovnic mohou být formulovány jako parciální diferenciální rovnice nebo také obyčejné diferenciální rovnice. Vše se nastavuje v pohodlí přehledného uživatelského prostředí, bez nutnosti dodatečného skriptování. COMSOL může být navíc prostřednictvím doplňků integrován přímo do některých dalších programů (MATLAB, Microsoft Excel, Autodesk AutoCAD). Součástí je rovněž rozsáhlá knihovna technických materiálů a chemických prvků. [39]

Práci s tímto softwarem lze rozdělit do několika základních kroků, podobně jako tomu bylo u Agros2D:

- **návrh geometrie** – s použitím interního CAD modulu nebo importováním existujícího CAD souboru s rozšiřujícími možnostmi (volba jednotek apod.),
- **definování okrajových úloh a oblastí** – přiřazení proměnných, výrazů, případně funkcí jednotlivým prvkům geometrické struktury (bodům, hranám, oblastem),
- **generování výpočetní sítě** – možné jsou i kombinace několika variant sítí o různých parametrech,
- **samotné řešení modelu** – k dispozici jsou různé varianty řešičů pro výpočet lineárních (přímé a iterační řešiče) a nelineárních úloh, úloh v časové a frekvenční oblasti nebo s proměnnými parametry [39]
- **zpracování a vizualizace výsledků** – zobrazení fyzikálních veličin pomocí 2D a 3D grafů tvořených izočarami, izoplochami, proudnicemi, konturami apod.

4.2 Výpočet parametrů vedení vvn

Vycházíme z řady jmenovitých hodnot napětí (1. sloupec *Tab. 6*) dle mezinárodních předpisů IEC.

U_n [kV]	U_{max} [kV]	$U_{zkuš. sin.}$ [kV]	$U_{zkuš. ráz.}$ [kV]
22	24	55	125
110	121	185	450
220	245	335	900

Tab. 6: Napěťové hladiny v ČR, [40]

Pro výpočet proudů tekoucích vodiči venkovního vedení je třeba znát hodnotu přirozeného výkonu vztaženou na danou napěťovou hladinu, v našem případě 110 kV.

Napětí [kV]	110 kV	220 kV
Počet vodičů ve svazku [-]	1	1
Vlnová impedance [Ω]	390	390
Přirozený výkon [MW]	30	120

Tab. 7: Hodnoty přirozeného výkonu, [40]

Pomocí vzorce pro výkon dopočteme absolutní proud (velikost):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 1} = 157,46 \text{ A}$$

Dále tento proud budeme uvažovat v komplexním tvaru, tj. pro každou ze tří fází systému, které jsou vzájemně posunuty o 120° elektrických.

$$I_U = I (\cos 0^\circ + i \cdot \sin 0^\circ) = 157,47 \text{ A}$$

$$I_V = I (\cos(-120^\circ) + i \cdot \sin(-120^\circ)) = (-78,73 - 136,36 i) \text{ A}$$

$$I_W = I (\cos 120^\circ + i \cdot \sin 120^\circ) = (-78,73 + 136,36 i) \text{ A}$$

COMSOL Multiphysics bude později vyžadovat zadání proudové hustoty. K tomu použijeme výrobcem stanovené rozměry AlFe lana, konkrétně typu AFL-6 185.

Označení lana dle: PN-74/E-90083	AFL-6 120	AFL-6 185	AFL-6 240
Průměr v [mm]:			
- ocelové jádro	5,8	7,2	8,1
- lano celkem	15,7	19,2	21,7
Průřez v [mm²]:			
- ocel	20,91	31,67	40,08
- hliník	122,60	183,80	236,10
- lano celkem	143,51	215,47	276,18

Tab. 8: Katalogové parametry AlFe lan výrobce ACword, spol. s.r.o., [41]

Při výpočtu proudové hustoty zavedeme jistá zjednodušení:

- zanedbáme povrchový jev,
- předpokládáme průchod proudu pouze hliníkovým pláštěm.

Potom získáme následující proudové hustoty:

$$J_U = \frac{I_U}{S_{Al}} = \frac{157,47}{183,8 \cdot 10^{-6}} = 856\,692 \text{ A/m}^2$$

$$J_V = \frac{I_V}{S_{Al}} = \frac{(-78,73 - 136,36 i)}{183,8 \cdot 10^{-6}} = (-428\,346 - 741\,917 i) \text{ A/m}^2$$

$$J_W = \frac{I_W}{S_{Al}} = \frac{(-78,73 + 136,36 i)}{183,8 \cdot 10^{-6}} = (-428\,346 + 741\,917 i) \text{ A/m}^2$$

4.3 Materiálové vlastnosti

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny charakteristické parametry elektroizolačních materiálů a vodivých součástí vedení.

Materiál	ϵ_r [-]	μ_r [-]	γ^* [S.m ⁻¹]
hliník	1e6 ^{**}	1,000022	3.7e7
korozivzdorná ocel	1e6 ^{**}	1000	1.5e6
ocelové armatury	1e6 ^{**}	600	1e7
porcelán	6	1	1e-12
pryž	4	1	1e-13
skelné vlákno	5.5	1	1e-12
sklo	3.5	1	1e-11
vzduch	1	1	1e-10
vzduch (zvýšená vodivost prostředí)	1	1	1e-2
voda	80	1	1e-3
železo	1e6 ^{**}	1000	1e7
železobeton	4.5	100	1e-6

* měrné elektrické vodivosti uvažovány při teplotě 20 °C

** materiály s vysokou polarizovatelností, uměle stanovená hodnota pro simulaci elektrostatického pole [52]

Tab. 9: Elektrické a magnetické vlastnosti uvažovaných materiálů, [42-50]

Případný přepočítání měrných elektrických vodivostí na provozní teplotu by se realizoval pomocí vzorce:

$$\gamma_{(\vartheta)} = \frac{\gamma_{(20)}}{1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta}, \quad (25)$$

kde:

- $\gamma_{(\vartheta)}$... vodivost při dané teplotě,
- $\gamma_{(20)}$... vodivost při teplotě 20 °C,
- α ... teplotní součinitel elektrického odporu,
- $\Delta\vartheta$... rozdíl teplot.

Maximální dovolená teplota vodičů vedení je stanovena na 80 °C. Těto hodnoty však v praxi nelze běžně dosáhnout a je spíše charakteristická pro izolované vodiče kabelových vedení, u kterých jsme omezeni dovoleným tepelným namáháním izolace. Měrná elektrická vodivost hliníku by při zvýšení na tuto teplotu klesla z 3.7e7 na 2.9e7 S/m.

$$\gamma_{(80)} = \frac{\gamma_{(20)}}{1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta} = \frac{3.7e7}{1 + 0.0043 \cdot 60} \approx 2,9e7 \text{ S/m}$$

S rostoucí teplotou tedy roste elektrický odpor vodiče. Jelikož je reálná teplota vodičů podstatně nižší než dovolená a mění se s roční dobou a okamžitým zatížením, budeme pro účely výpočtu uvažovat měrnou elektrickou vodivost vztaženou pouze na teplotu 20 °C. Změna rezistivity/vodivosti se pochopitelně týká i izolantů, s rostoucí teplotou a nepřízní vlivů prostředí (vlhkost, záření) se zhoršují jejich elektroizolační vlastnosti.

4.4 Matematický model

Matematický aparát vychází z diferenciálního tvaru Maxwellových rovnic, konkrétně I. a III. (viz *Tab. 4*). Odvození rovnice pro elektrostatické pole by se realizovalo následujícím způsobem:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

$$\operatorname{div} (\varepsilon \mathbf{E}) = \rho$$

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

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

Dále je potřeba definovat základní okrajové podmínky – Dirichletovu (vztah č. 22) a Neumannovu (vztah č. 23).

V případě magnetického pole by se postupovalo takto:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

(posuvná složka proudu $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ je při naší zvolené frekvenci 50 Hz zanedbatelná)

$$\operatorname{rot} \frac{\mathbf{B}}{\mu} = \mathbf{J}$$

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}$$

Výsledná rovnice v programu Agros2D má však tvar:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} - \underline{\mathbf{B}}_r) \right) - \gamma \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext}$$

Druhý a třetí člen rovnice budou při vlastním výpočtu nulové, což je dáno charakterem úlohy. Neuvažujeme totiž žádné pohyblivé části geometrie, ať už posuvný (v) nebo rotační pohyb (ω). Okrajová úloha je zde vztažena k magnetickému vektorovému potenciálu (viz vztah č. 24). V obou případech vyšetřujeme čistě lineární prostředí, k materiálovým vlastnostem lze potom přistupovat jako ke konstantám, které je možno vytýkat před jednotlivé matematické operátory těchto parciálních diferenciálních rovnic.

4.5 Numerický model

Ve zmíněných programech budou vyšetřovány průběhy veličin charakterizujících elektrostatické a magnetické pole. Modely staví na různých geometrických uspořádáních stožárů a izolátorů, vlastnostech materiálů (*Tab. 9*) a standardních provozních podmínkách (viz *Kapitola 4.2*). Elektrostatické pole bude řešeno v ustáleném stavu při dané napěťové hladině. V případě magnetického pole dojde na harmonickou analýzu při frekvenci 50 Hz a proudy tekoucí pracovními vodiči tak budou vykazovat vzájemný fázový posuv (komplexní tvar čísla).

4.6 Práce se softwarem

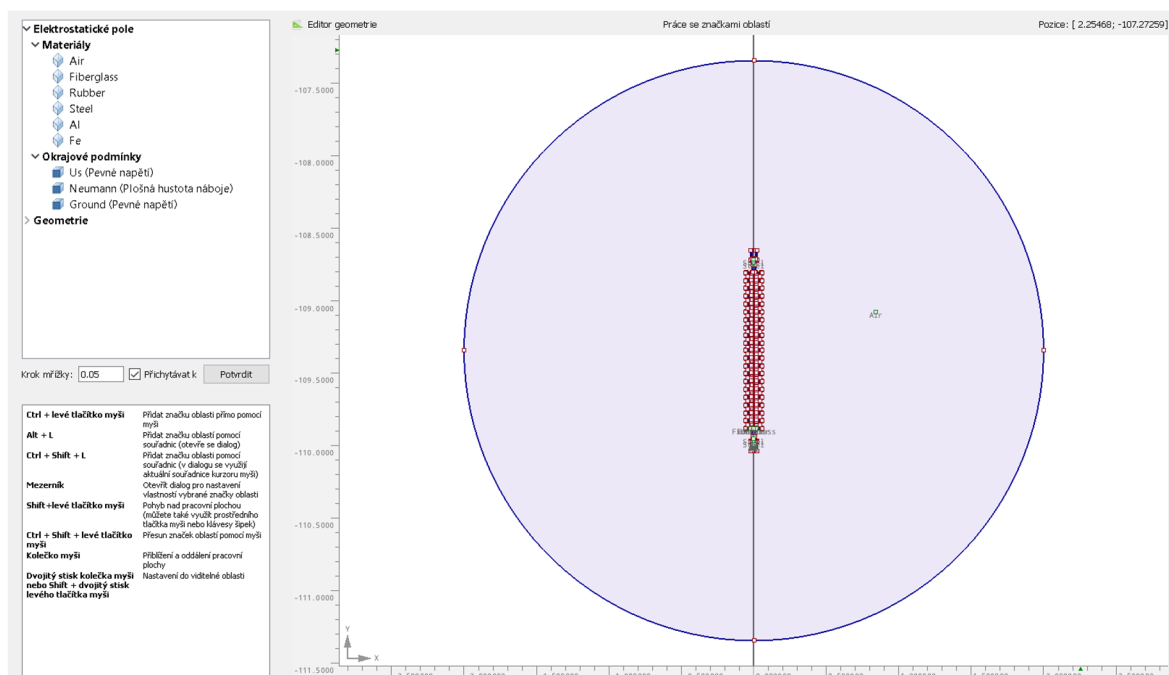
4.6.1 Postup řešení v Agros2D

Z funkčních důvodů budeme odděleně provádět výpočet elektrostatického a magnetického pole.

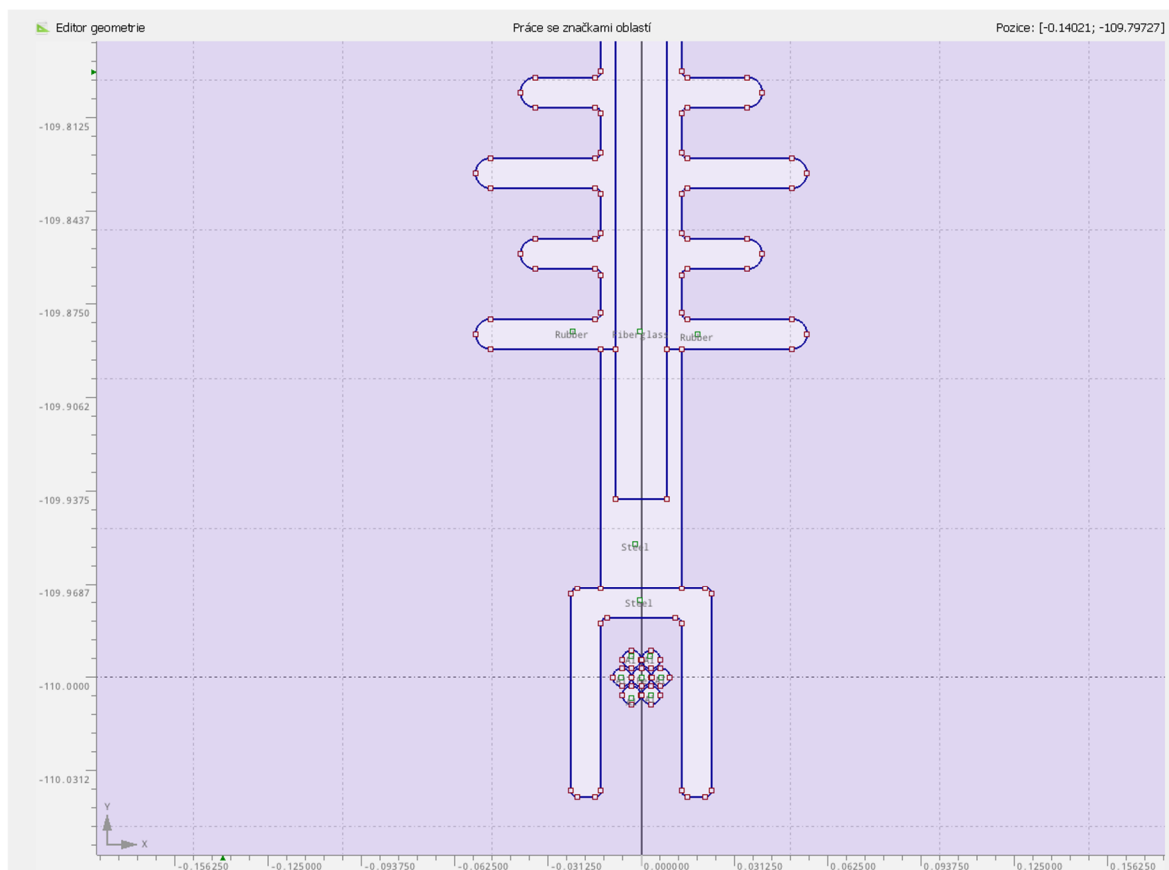
- *Elektrostatické pole*

Po otevření programu přidáme nové fyzikální pole. Řešení budeme hledat v ustáleném stavu, s využitím výchozích typů řešičů (lineární, MUMPS), jemností sítě a s vypnutou prostorovou adaptivitou. 2D geometrii vytvořenou v CAD softwaru (kompatibilní pouze formát DXF) importujeme do kartézského souřadnicového systému Agrosu. Pouze v případě simulace samotného izolátoru bychom mohli zvolit osově symetrický souřadnicový systém.

Importovaný model musí být nakreslen v jednotkách metrů, nelze dodatečně specifikovat jiné jednotky při vlastním importu. Výkresy formátu DXF jsou totiž bezrozměrové/nesou informaci o zdrojových jednotkách. Úspěšně nahaná geometrie se zobrazí v sekci preprocesoru. Případné nedokonalosti vzniklé při importu je možné odstranit pomocí interních nástrojů. Dále je potřeba definovat jednotlivé materiály a jejich vlastnosti a přidat okrajové podmínky. Dílčí součásti geometrie popíšeme značkami oblastí, kterým rovnou přiřadíme odpovídající materiál ze seznamu. Okrajové podmínky lze aplikovat pouze na vybrané hrany. Jedná se např. o povrchy s konstantním potenciálem nebo známou velikostí povrchového náboje.

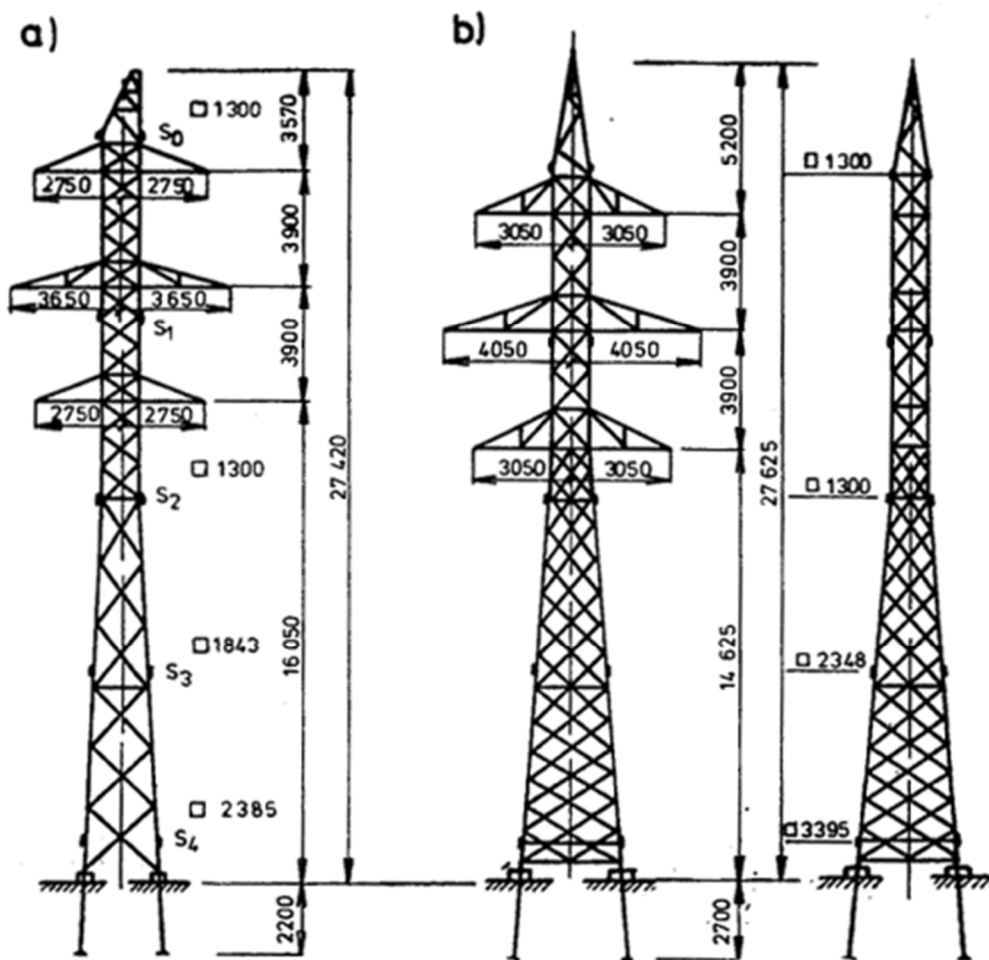


Obr. 11: Geometrie (sekce preprocesoru) v programu Agros2D, zdroj autor



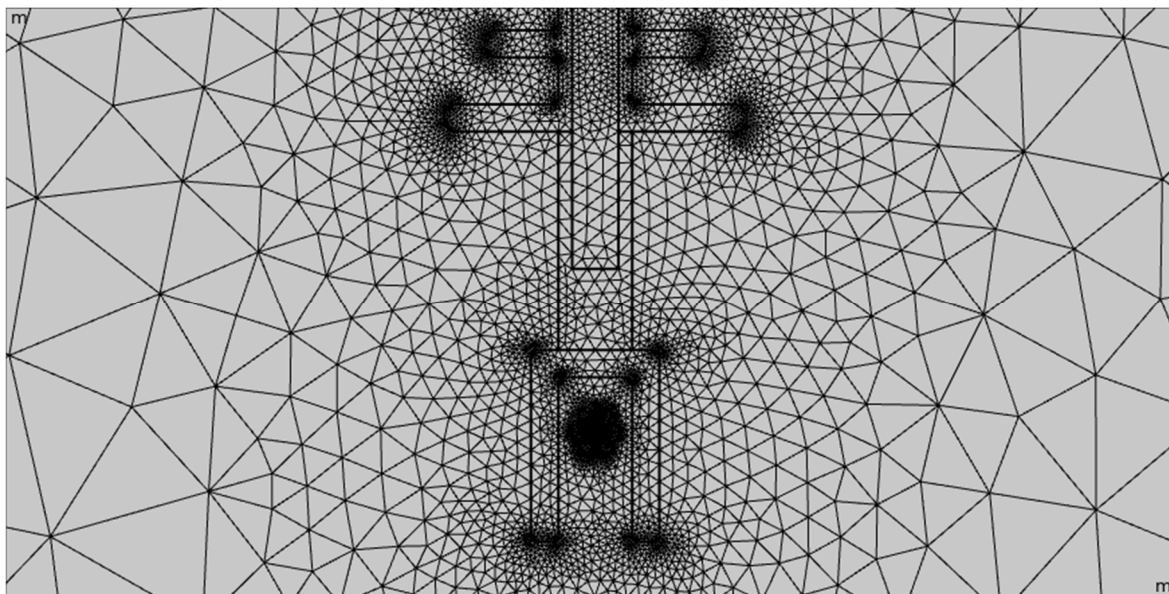
Obr. 12: Detail geometrie izolátoru, zdroj autor

Jak je vidět z předchozích obrázků, izolátor je uzavřen do kruhové oblasti, jejíž hranici tvoří Neumannova okrajová podmínka (viz vztah č. 23), a jenž reprezentuje nulovou povrchovou hustotu náboje, simuluje tzv. „nekonečno“. Pevný potenciál 110 kV přísluší lanovým vodičům a je určen Dirichletovou okrajovou podmínkou (viz vztah č. 32). Obdobně horní kotevní část izolátoru je na potenciálu země 0 V. Všechny materiály mají odpovídající relativní permitivitu uvedenou v *Tab. 9* a jsou svázány s danými oblastmi. Jádrem izolátoru tvoří tyč ze skelných vláken, na ní jsou navulkanizovány pryžové stříšky a ze stran nalisovány koncové ocelové armatury. V dolní části izolátoru je umístěno zjednodušené AlFe lano, duše z Fe a plášť z Al. Výplňovým prostředím je vzduch. U varianty se stožárem byla použita standardní 110 kV příhradová korozivzdorná konstrukce typu soudek.



Obr. 13: Stožár 110 kV - soudek, a) nosný, b) výztužný, [51]

V dalším kroku necháme program vygenerovat výpočetní síť *Mesh area*, pokud je třeba zjemníme globálně nebo lokálně výpočetní síť, zvýšíme tak počet elementů sítě, čímž prodloužíme i samotnou dobu výpočtu. Bohužel někdy se tomuto nevyhneme, jde o případy, kdy některé součásti geometrie jsou v porovnání s celkem miniaturistické a dané nastavení jemnosti sítě nedovoluje jejich zasilování. Element sítě musí být vždy menší, než je hrana nejmenšího prvku geometrie. Výchozím typem sítě v Agros2D je síť trojúhelníková.



Obr. 14: Trojúhelníková výpočetní síť, zdroj autor

Po úspěšném vytvoření sítě následuje samotný výpočet *Solve*. Grafické výstupy lze konfigurovat v sekci *Post 2D*, kde vybereme požadované veličiny (rozložení elektrické intenzity, indukce a potenciálu). Veličiny lze zobrazit jako směrové vektory nebo konturovanou oblast s gradientní legendou. Volitelně může uživatel zjistit přesné hodnoty veličin v konkrétním bodě a využít je pro vlastní dodatečné výpočty (např. energie).

- **Magnetické pole**

Postup řešení magnetického pole je obdobný jako v předchozím případě. Hned ze začátku je však třeba přidat magnetické pole a zvolit jeho harmonickou analýzu při frekvenci 50 Hz. Další rozdíl je pochopitelně ve vlastnostech materiálů (uvádíme relativní permeability a měrné elektrické vodivosti) a je zde dostupná jediná okrajová podmínka, magnetický vektorový potenciál (viz vztah č. 24), která zastává stejnou funkci jako Neumannova u elektrostatického pole. Zdrojem magnetického pole jsou zde proudy protékající pracovními vodiči. Proudů v jednotlivých fázích zadáváme pro příslušné materiály (oblasti) v komplexním tvaru na základě výpočtů uvedených v *Kapitole 4.2*. V postprocessingu se pak vyskytují veličiny charakteristické pro magnetické pole.

4.6.2 Postup řešení v COMSOL Multiphysics

Na rozdíl od Agros2D budeme výpočet magnetického a elektrostatického pole provádět současně. Nejprve vytvoříme nový model, využijeme k tomu průvodce při spuštění

softwaru. Zvolíme 2D úlohu, v následujícím kroku přidáme obě fyzikální pole (*Electrostatics* a *Magnetic Fields*) a ukončíme průvodce, aniž bychom zvolili typ studie (analýzy).

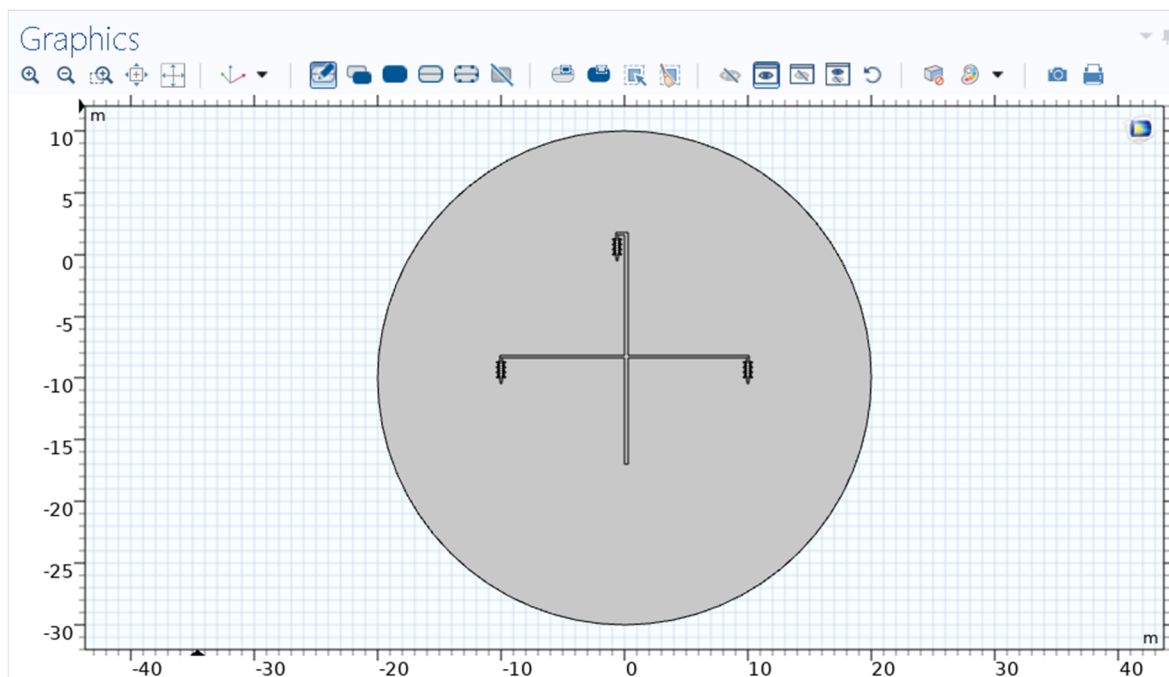
COMSOL využívá při řešení námi zvolených fyzikálních polí následující parciální diferenciální rovnice...

Elektrostatické pole	Magnetické pole
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$ $\mathbf{E} = -\nabla \cdot \mathbf{V}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_E$

Tab. 10: Rovnice používané programem COMSOL Multiphysics

Jakmile se otevře pracovní prostředí COMSOLu, definujeme dvě nové studie (záložka v horním panelu *Study > Add Study*). Pro elektrostatické pole vybereme ze seznamu (systém zaškrtávání) *Stationary* a u magnetického *Frequency Domain* (potřeba ještě dodatečně nastavit frekvenci 50 Hz).

Dalším klíčovým bodem je nahrání geometrie (záložka *Geometry > Import*). Typ souboru můžeme zvolit opět DXF, stejně jako předtím v Agros2D, ale jsou zde dostupné i jiné výkresové formáty aplikací jako SOLIDWORKS, AutoCAD, Inventor apod. Délkové jednotky jsou defaultně metry, což lze však uživatelsky dodatečně specifikovat nebo lze také vyjít z informací obsažených v CAD souboru. Potvrdíme import a ověříme stav takto získané geometrie. Pokud model neodpovídá skutečnému výkresu, je potřeba ručně stanovit např. relativní importní toleranci. Geometrii lze taktéž vytvářet nebo upravovat přímo v programu COMSOL s využitím CAD nástrojů.



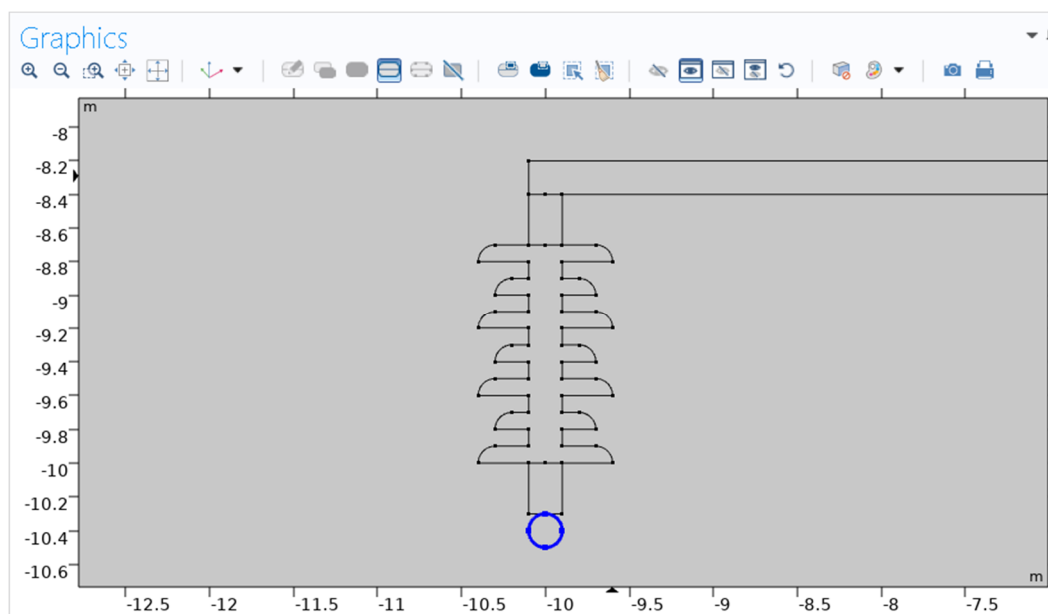
Obr. 15: Aktuálně naimportovaná geometrie v okně Graphics, zdroj autor

Máme-li k dispozici použitelnou geometrii, nezbyvá nic jiného než přidat všechny stěžejní materiály. COMSOL sice přímo obsahuje knihovnu materiálů, ale jako rychlejší a snadnější způsob se jeví obohatit současnou knihovnu o nové položky (záložka *Materials* > *Blank Material*). U každého materiálu je potřeba zadat relativní permitivitu, permeabilitu, měrnou elektrickou vodivost a také jeho typ – *Solid* / *Nonsolid*. Přísluší se každý materiál pojmenovat a případně pevně uložit do knihovny pro pozdější použití. Rozkliknutím konkrétního materiálu definujeme domény (oblasti), jež v dané geometrii zaujímá. Domény se automaticky přidávají do seznamu aktuálně vybraného materiálu výběrem/kliknutím na odpovídající části geometrie (*Active Selection*).

Material type:					
Solid					
Material Contents					
Property	Variable	Value	Unit	Prop	
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma...	1e-12	S/m	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_is...	1	1	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilo...	5.5	1	Basic	

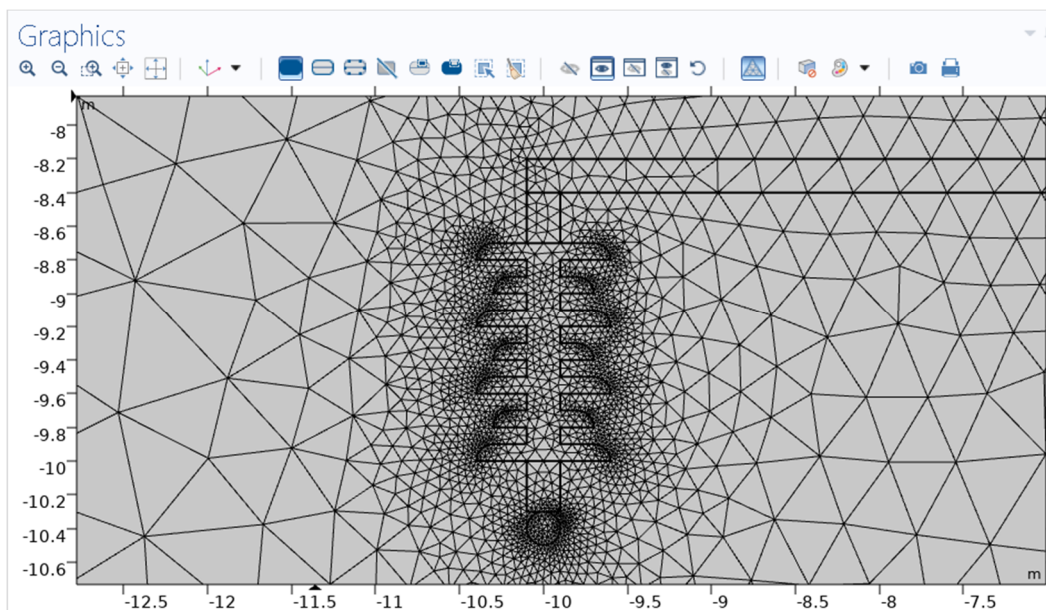
Obr. 16: Povinné vlastnosti materiálů, zdroj autor

Nyní následuje přidání okrajových podmínek. Pravým kliknutím na příslušný typ pole v levém panelu *Model Builder* navolíme *External Current Density* a *Electrical Potential*, případně *Ground*. Externí proudovou hustotu (ve směru osy z) aplikujeme na oblast pracovních vodičů generujících magnetické pole; potenciály a zem potom na příslušející povrchy v elektrostatickém poli. Použijeme hodnoty z *Kapitoly 4.2*. Hraniční oblast zde řešit nemusíme, COMSOL ji automaticky rozpozná a přiřadí jí vhodnou okrajovou podmínku (možno ověřit).



Obr. 17: Nastavení okrajové podmínky – elektrického potenciálu, zdroj autor

Dalším krokem je nastavení výpočetní sítě. Pokud se jedná o jednoduchý model, nemusíme se pouštět do žádných pokročilých nastavení a můžeme rovnou vytvořit síť (*Build Mesh*). Jestliže dojde k problémům během jejího generování, je potřeba zvolit jemnější síť, jiný typ nebo použít metodu více sítí. V programu jsou předdefinovány stupně velikosti prvků sítě – *Fine*, *Normal*, *Course* apod., vycházející z fyzikálních předpokladů pro danou úlohu.



Obr. 18: Automatické zasíťování, zdroj autor

Po úspěšném zasíťování nezbyvá nic jiného než zahájit konečný výpočet jednotlivých polí. Do *Results* v levém panelu se automaticky přidají 2D zobrazení základních veličin pole. Další je možno přidat v podobě *2D Plot Group* s odkazem na konkrétní studii. Každá *2D Plot Group* musí obsahovat alespoň jeden typ grafického zobrazení/interpretace veličiny, tedy např. *Surface*, *Arrow Surface* nebo *Contour*. Samotné veličiny se zadávají prostřednictvím tzv. *Expressions* (např. V , $es.normE$, $mf.normB$).

4.7 Rozbor dosažených výsledků

Grafické výstupy jsou uvedeny v přílohách této práce. Zahrnují izolátory různých typů a tvarů, rozdílných stavebních délek, lišících se v počtu elementárních stříšek a použitých materiálech, dále vliv konstrukce stožárů a chování v elektrostatickém a magnetickém poli. Celkové zhodnocení potom náleží závěru bakalářské práce. Některá dílčí šetření budou blíže objasněna již v této kapitole.

4.7.1 Zkušenosti s použitým softwarem

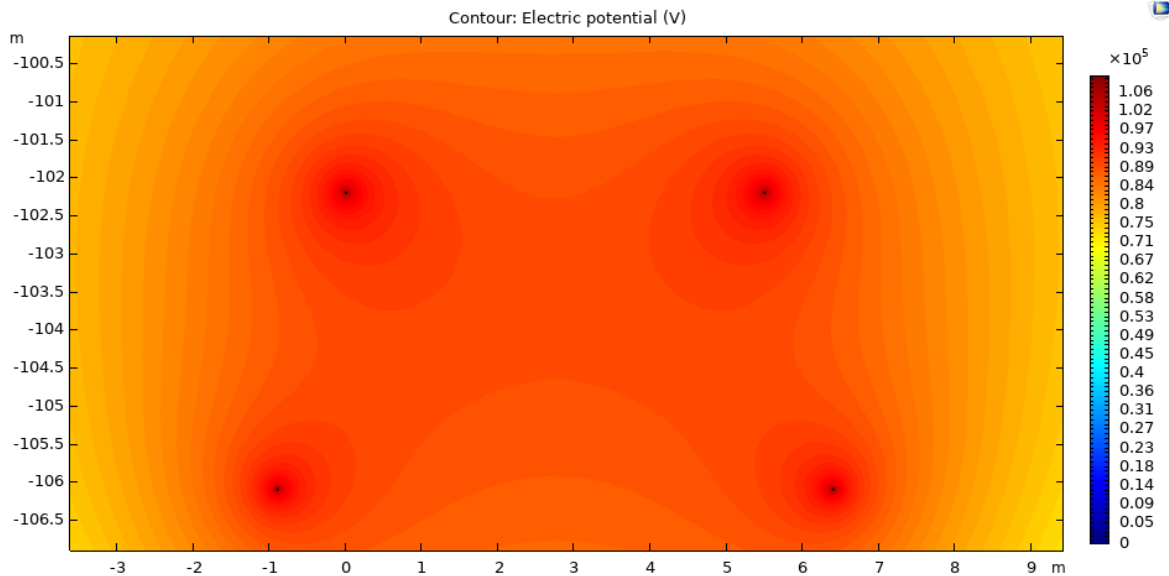
Veškeré výkresy a modely vznikly s pomocí inženýrských nástrojů AutoCAD a Inventor společnosti Autodesk. Většina simulací elektrostatických a magnetických polí byla realizována v softwaru COMSOL Multiphysics. Některé jednoduché geometrie se povedlo vyřešit i s fakultním programem Agros2D, bohužel jen v případě magnetického pole.

Agros2D snadno zvládá málo rozměrné úlohy jako kulové jiskřiště nebo podpěrný izolátor o několika stříškách určený pro vedení vn, ale nedokáže si poradit s geometriemi v řádu jednotek či desítek metrů. U složitějších struktur docházelo k deformaci hran při importu geometrie. Rovněž práce s oblastmi a další nezbytné dodatečné úpravy s využitím interních nástrojů byly v porovnání s COMSOL Multiphysics příliš zdlouhavé a neefektivní. Zatímco COMSOL již při importu geometrie vyhledal všechny dostupné domény/oblasti, Agros2D tuto práci přenechal uživateli, a navíc u enormních geometrií (konstrukce stožáru) tak vznikalo dodatečné zpoždění při definování jednotlivých oblastí (až několik desítek sekund na oblast). V drtivé většině případů po navolení materiálů a okrajových podmínek skončil výpočet už při generování výpočetní sítě nebo později hlášením o potenciální singularitě matic nebo přetečením paměti. Nepomohlo ani zapnutí adaptivit, extra zjemnění sítě, jiný typ sítě, zvýšení řádu polynomu nebo zvolení ostatních podporovaných maticových řešičů. Z výše uvedených důvodů se muselo použít komplexnějšího komerčního řešení. Samozřejmě i v případě COMSOLu se vyskytly některé incidenty, které ale však neměly zásadní vliv na samotné výsledky, např. problém s nastavením počátku souřadnicového systému (hodnoty na osách nemusí proto odpovídat reálné poloze v systému, rozměry jsou však skutečné).

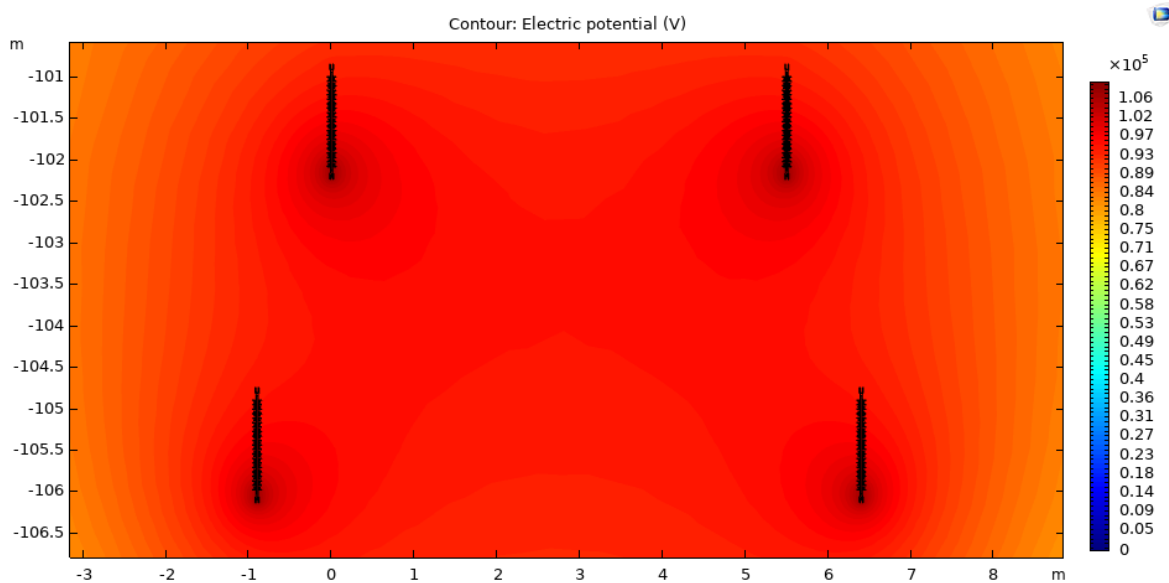
3D modely konstrukcí stožárů (Příloha O) jsou připravené a mohou být použity pro pozdější simulace. Na základě pozorování systémových prostředků během probíhajícího řešení v COMSOL Multiphysics je třeba výpočet provádět na výkonném stroji s minimálně 64 GB paměti RAM nebo dostatečně velkým stránkovacím souborem a rychlým SSD úložištěm, stejně tak moderním vícejádrovým procesorem a grafickou kartou, jelikož počet elementů sítě hravě přesahuje několik stovek milionů (pro hraniční oblast cca 30 m³) v závislosti na aktuální konfiguraci sítě.

4.7.2 Vliv izolačních prvků a konstrukce stožáru

Po provedení simulace samotných pracovních vodičů bychom získali poměrně symetrické rozložení elektrostatického a magnetického pole.

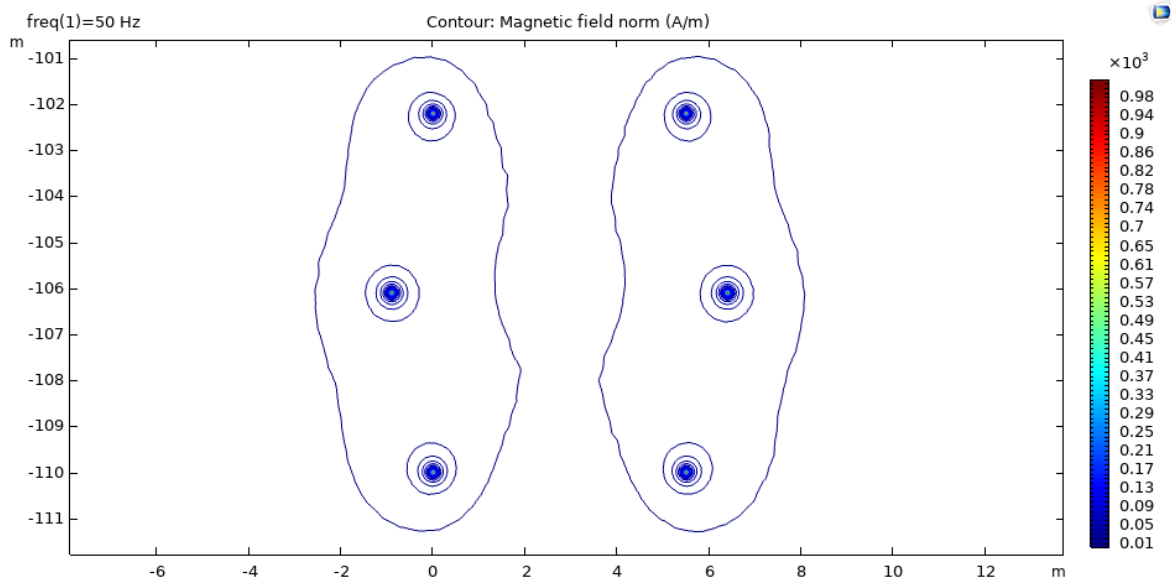


Obr. 19: Rozložení elektrického potenciálu od samotných vodičů, zdroj autor

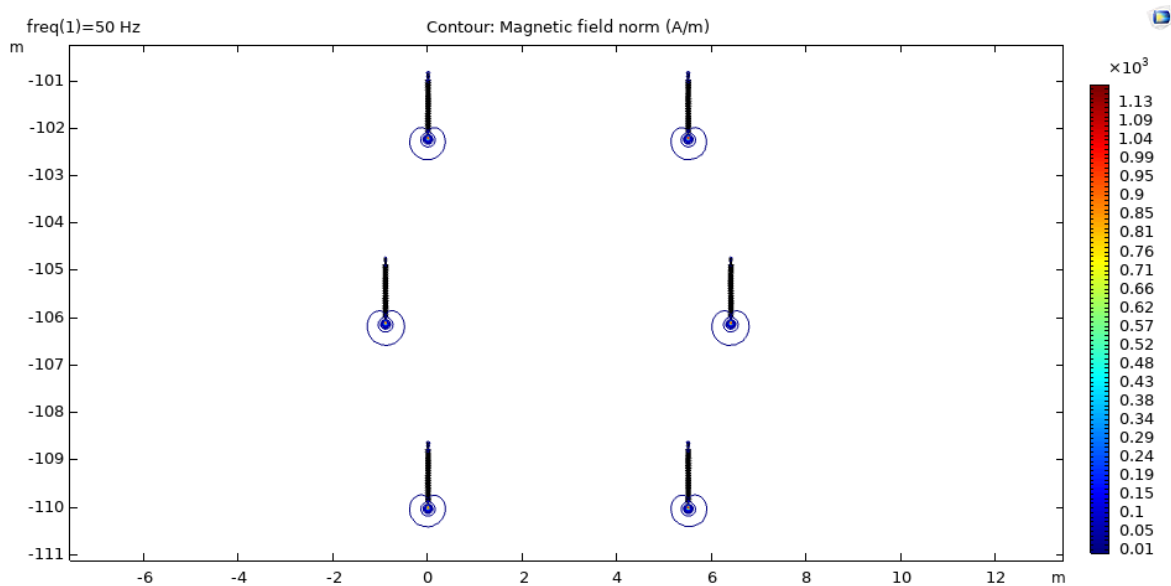


Obr. 20: Rozložení elektrického potenciálu od vodičů zavěšených na izolátorech, zdroj autor

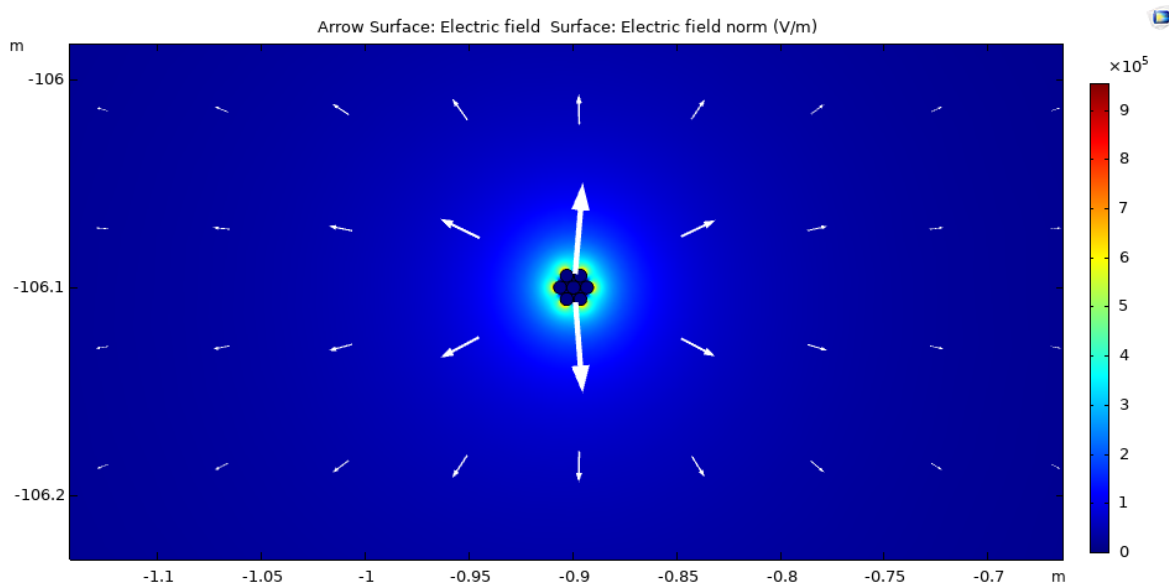
U vodičů zavěšených na izolátorech vedení vvn 110 kV je oblast o vysokém potenciálu rozsáhlejší (Obr. 20) než v případě samostatných vodičů (Obr. 19), což je dáno přítomností vodivých struktur, na jejichž povrchu je potenciál konstantní.



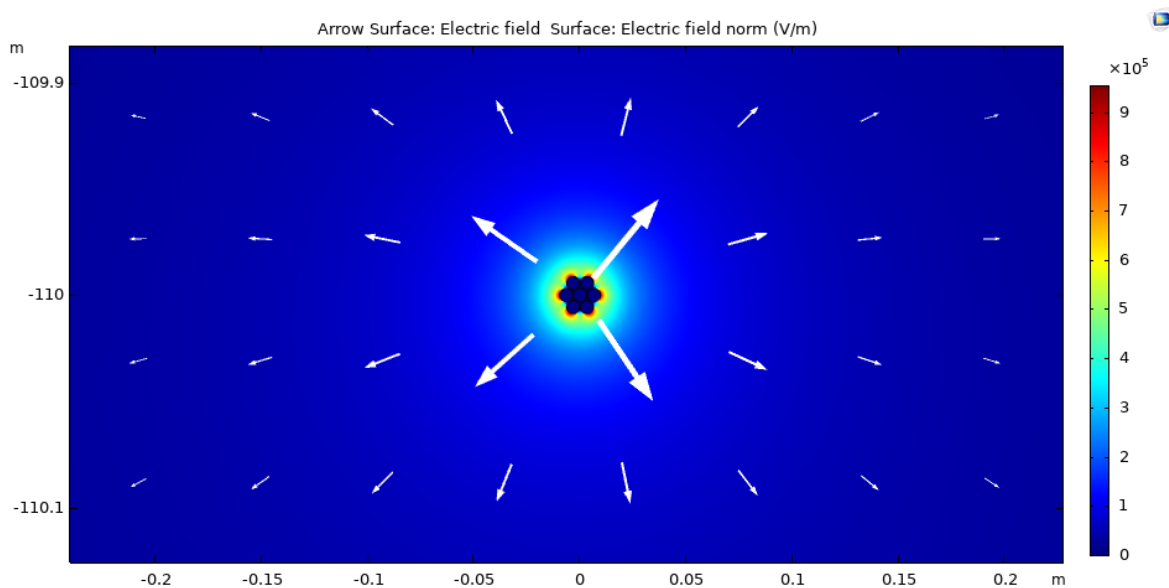
Obr. 21: Rozložení intenzity magnetického pole od vodičů, zdroj autor



Obr. 22: Rozložení magnetické intenzity od vodičů zavěšených na izolátorech, zdroj autor

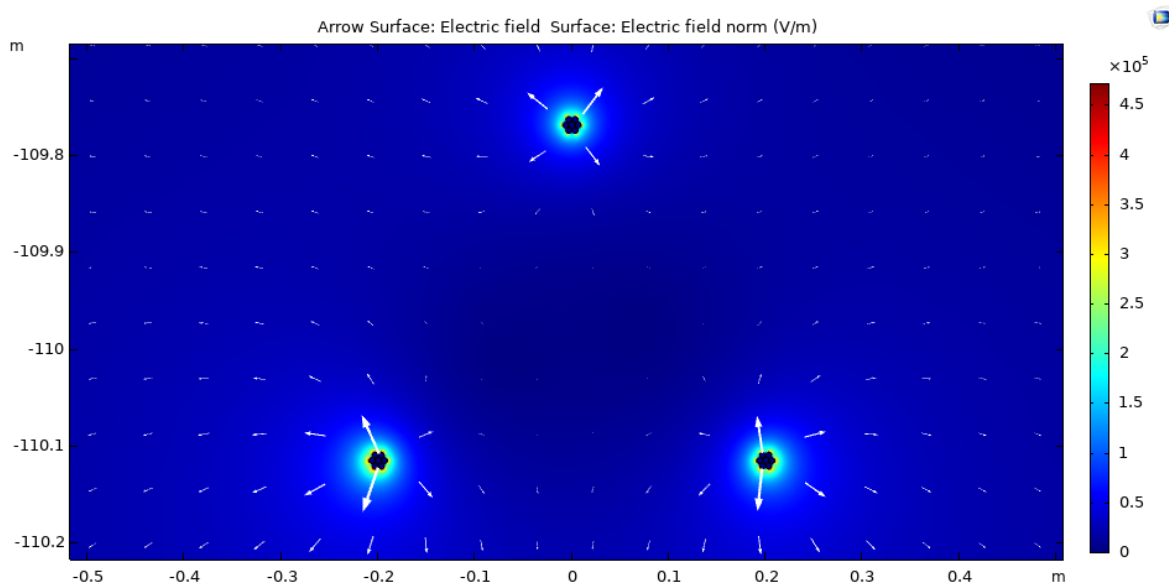


Obr. 23: Rozložení elektrické intenzity v okolí fáze V (prostřední vodič), zdroj autor



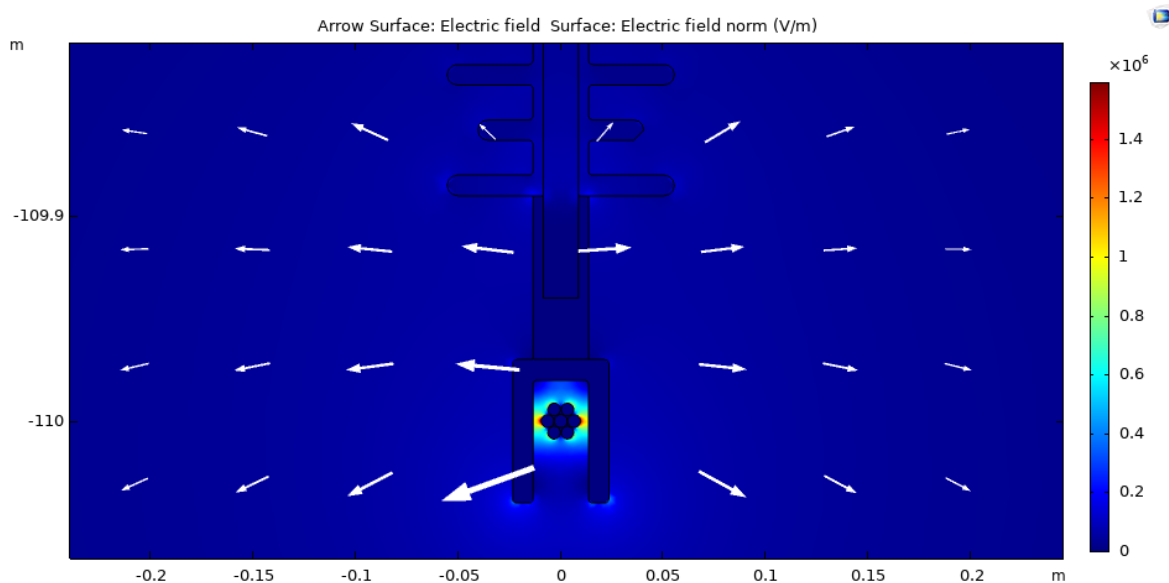
Obr. 24: Rozložení elektrické intenzity v okolí fáze W (dolní vodič), zdroj autor

Z předchozích snímků (Obr. 23 a 24) je patrné, že elektrická intenzita roste se zmenšující se vzdáleností vodičů od země. Kromě toho je zde také výrazný zřídlový charakter elektrostatického pole.



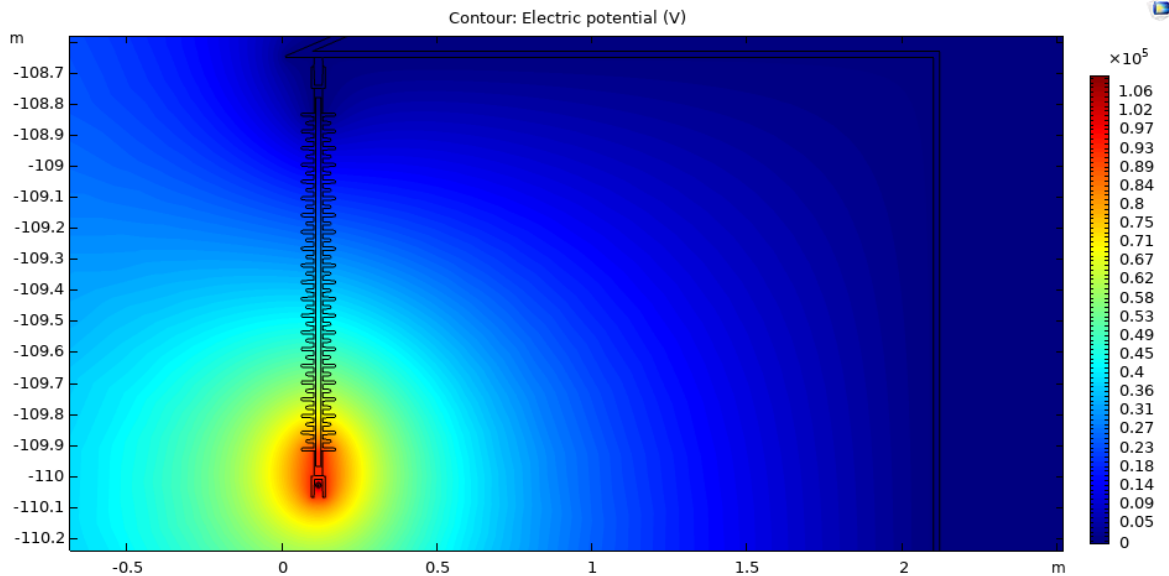
Obr. 25: Rozložení elektrické intenzity 110 kV trojsvazku, fáze W (dolní vodič), zdroj autor

Oproti jedinému vodiči se při použití trojsvazku dvakrát zmenšila maximální elektrická intenzita z 0,95 na 0,475 MV/m. Opět platí, že u dolních fází systému je intenzita vyšší.



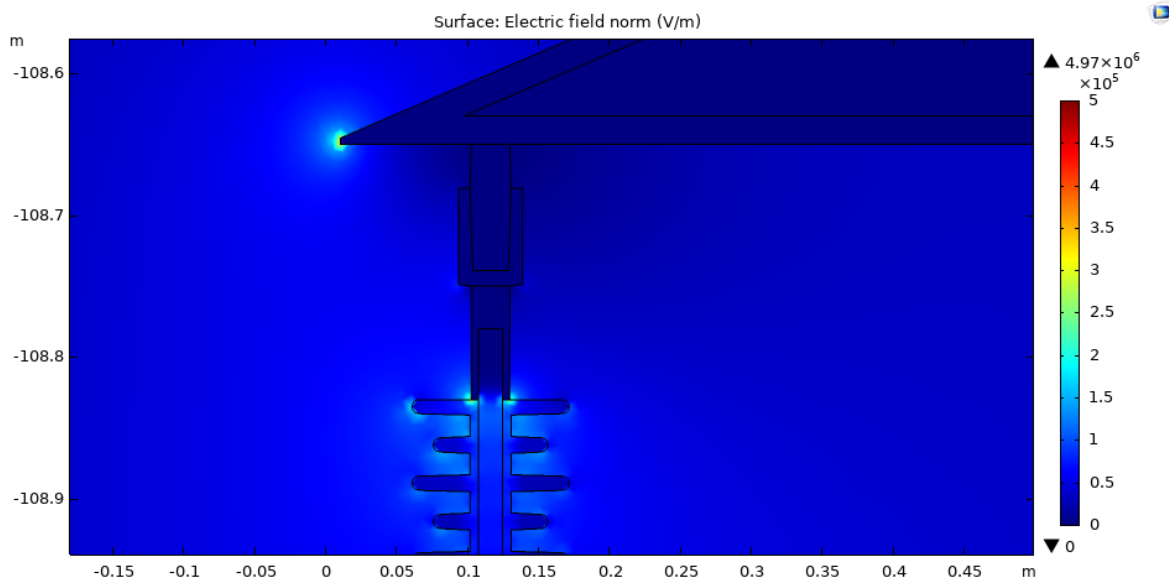
Obr. 26: Rozložení elektrické intenzity v oblasti fázového vodiče, zdroj autor

Při interakci fázového vodiče s izolátorem se začnou objevovat místa o vyšší intenzitě elektrického pole, zpravidla v rozích o malém poloměru zaoblení. Uvnitř vodivých materiálů je intenzita nulová.



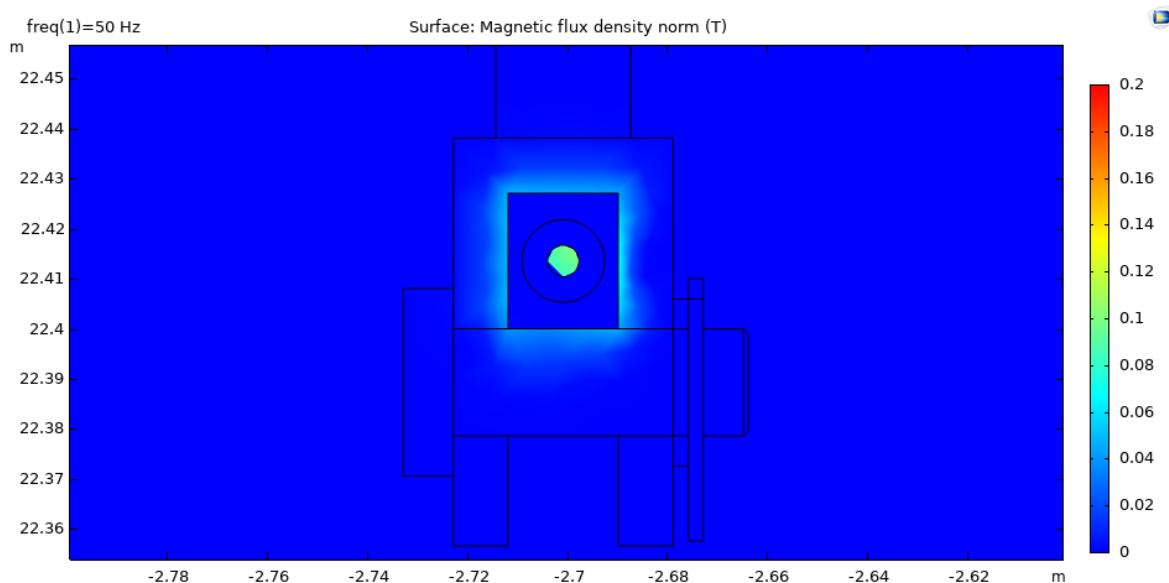
Obr. 27: Rozložení elektrického potenciálu v oblasti konzole, zdroj autor

Přidáme-li uzemněnou konstrukci stožáru, rapidně se změní rozložení potenciálu (kontury kopírují tvar konzole a stožáru). Dochází tak k deformaci pole. Navíc se slabé „píky“ intenzity nově objeví i v oblasti horních koncových armatur izolátorů a samotných konzol (Obr. 28).



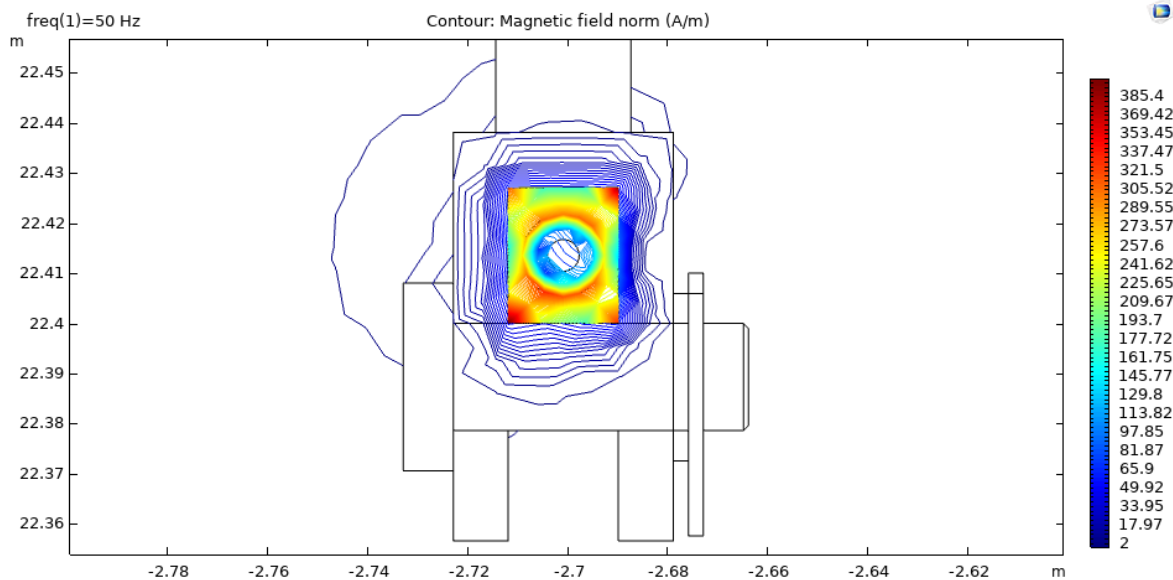
Obr. 28: Píky elektrické intenzity v oblasti konzole, zdroj autor

Co se týče působnosti magnetického pole, indukce a intenzita je v rovině řezu omezena (stíněna) kotevní částí AIFe lana (Obr. 29 a 30).



Obr. 29: Zobrazení magnetické indukce, fáze U, zdroj autor

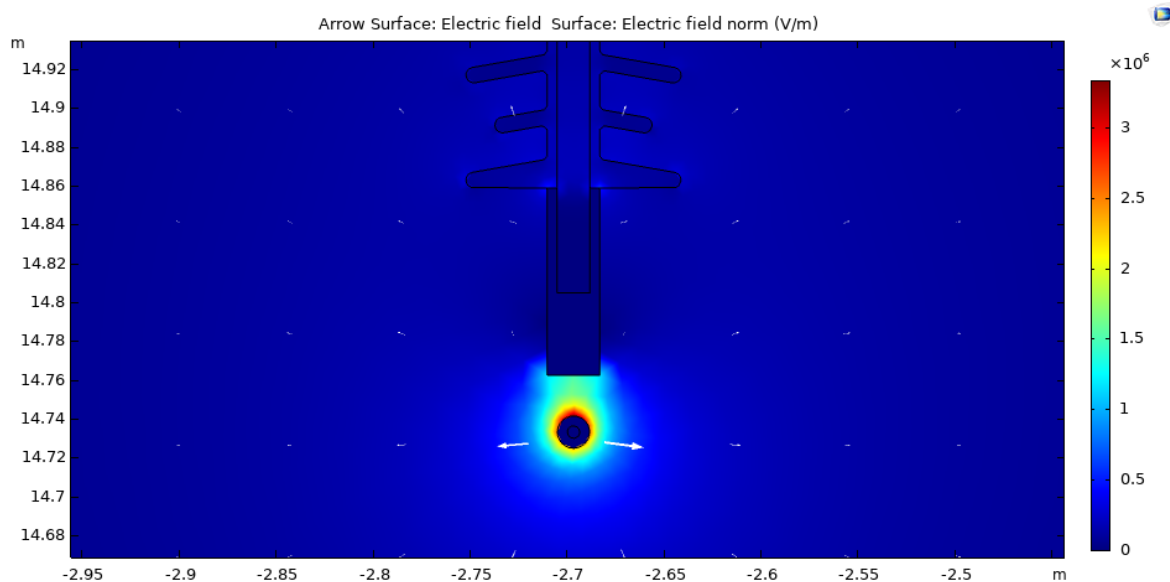
Maximální hodnota indukce se vyskytuje na hranici Fe duše lana, u níž jsme uvažovali relativní permeabilitu $\mu_r = 1000$. Z toho vyplývá, že nejvyšší indukce dosahujeme u materiálů představujících pro pole malý magnetický odpor, roli zde samozřejmě také hraje vzdálenost daného materiálu od zdrojového pole s níž indukce klesá.



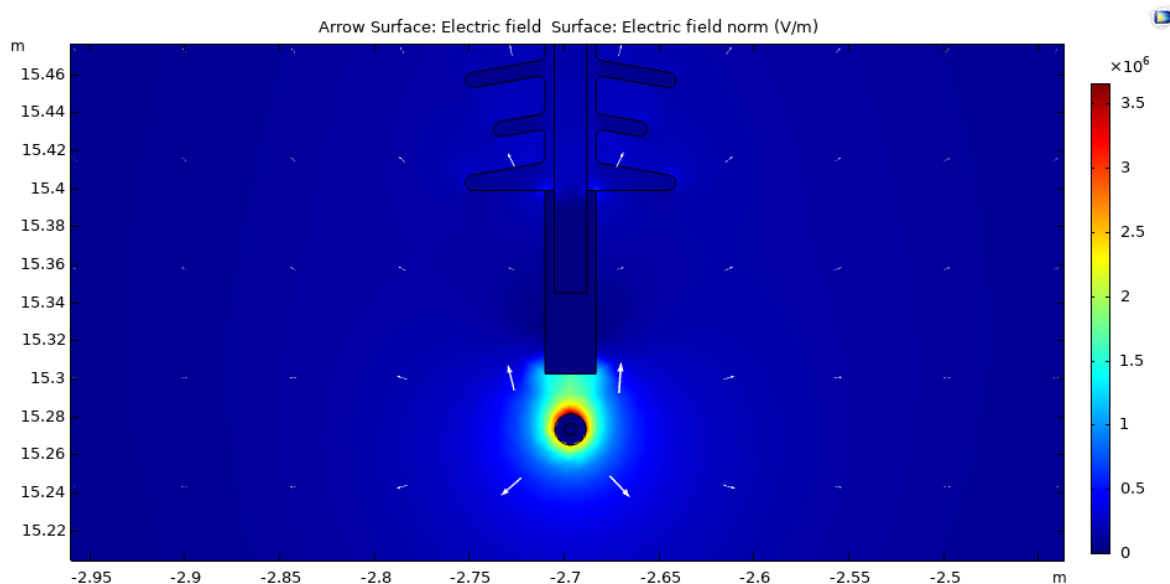
Obr. 30: Zobrazení intenzity magnetického pole, fáze U, zdroj autor

4.7.3 Vliv stavební délky izolátoru

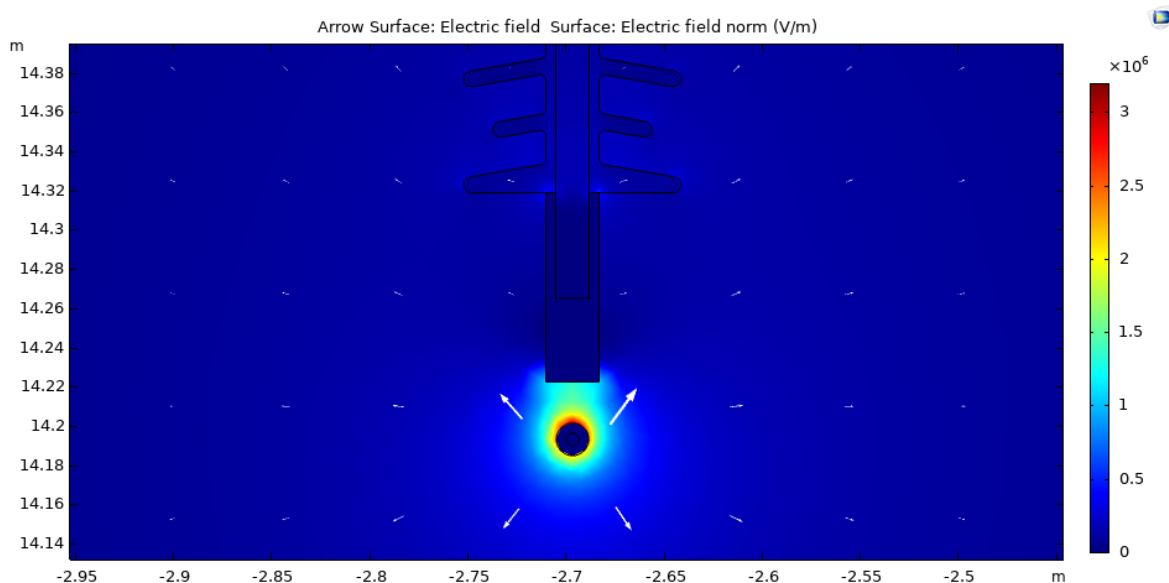
Počet a tvar izolačních stříšek ovlivňuje celkovou povrchovou izolační cestu. Nejprve budeme uvažovat standardní stavební délku, dále cca 50 % snížení a 50 % zvýšení počtu stříšek.



Obr. 31: Elektrická intenzita, standardní počet stříšek izolátoru, fáze W, zdroj autor

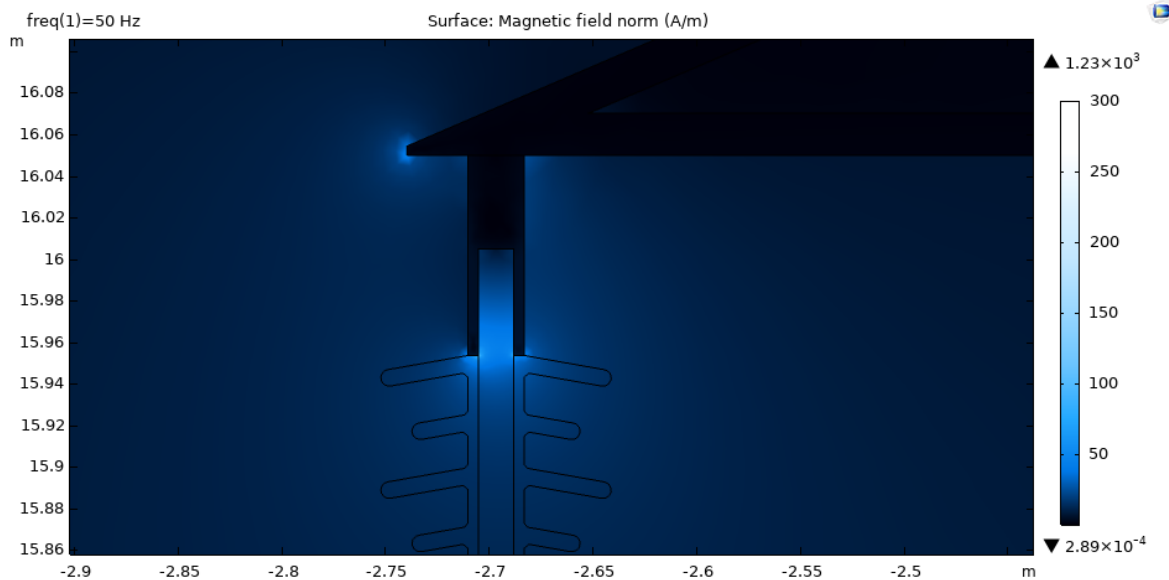


Obr. 32: Elektrická intenzita, cca 50 % stříšek izolátoru, fáze W, zdroj autor

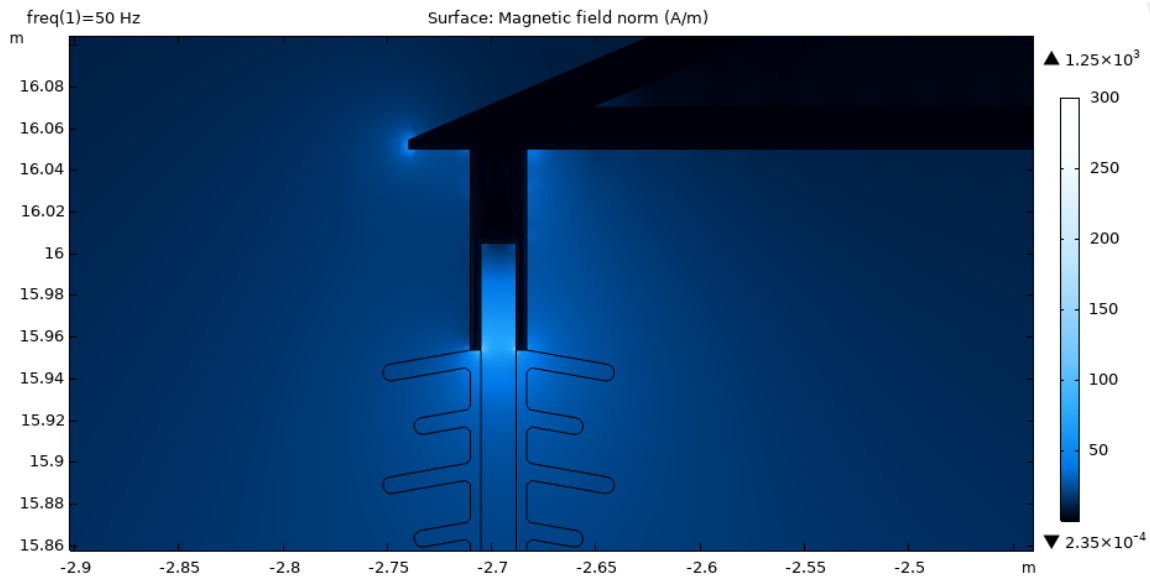


Obr. 33: Elektrická intenzita, cca 150 % stříšek izolátoru, fáze W, zdroj autor

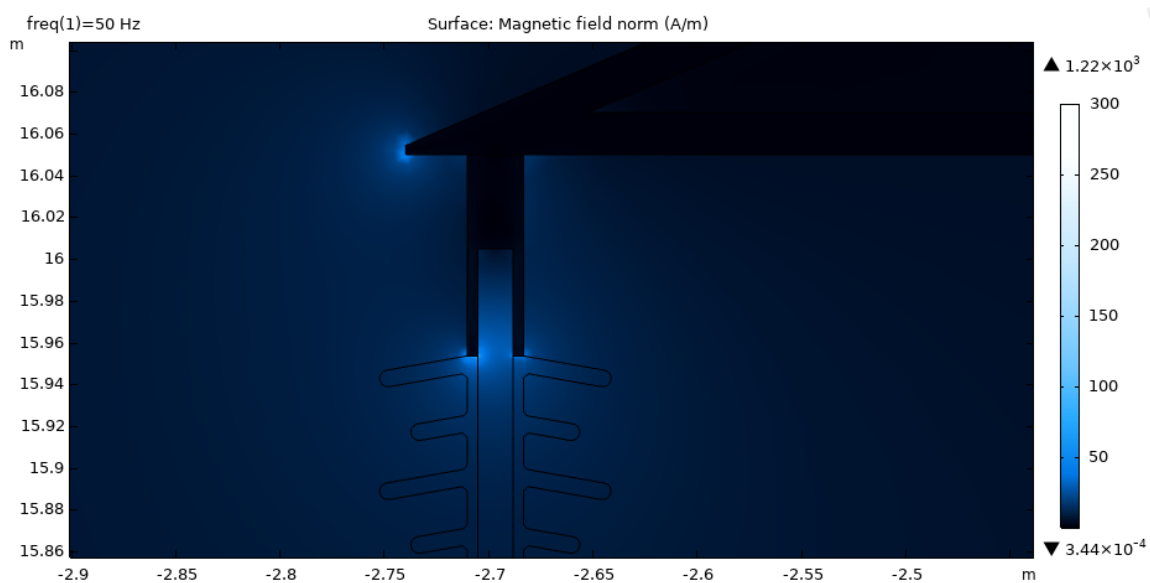
S proměnným počtem stříšek se mění velikost, ale nepatrně i směr vektorů elektrostatického pole. Nejvyšší intenzity bylo dosaženo při 50 % standardní délky izolátoru (Obr. 32). Obdobně je tomu s intenzitou magnetického pole. Níže uvedené výstupy (Obr. 34, 35 a 36) znázorňují její hodnoty v blízkosti konzole.



Obr. 34: Intenzita magnetického pole, standardní počet stříšek izolátoru, fáze W, zdroj autor



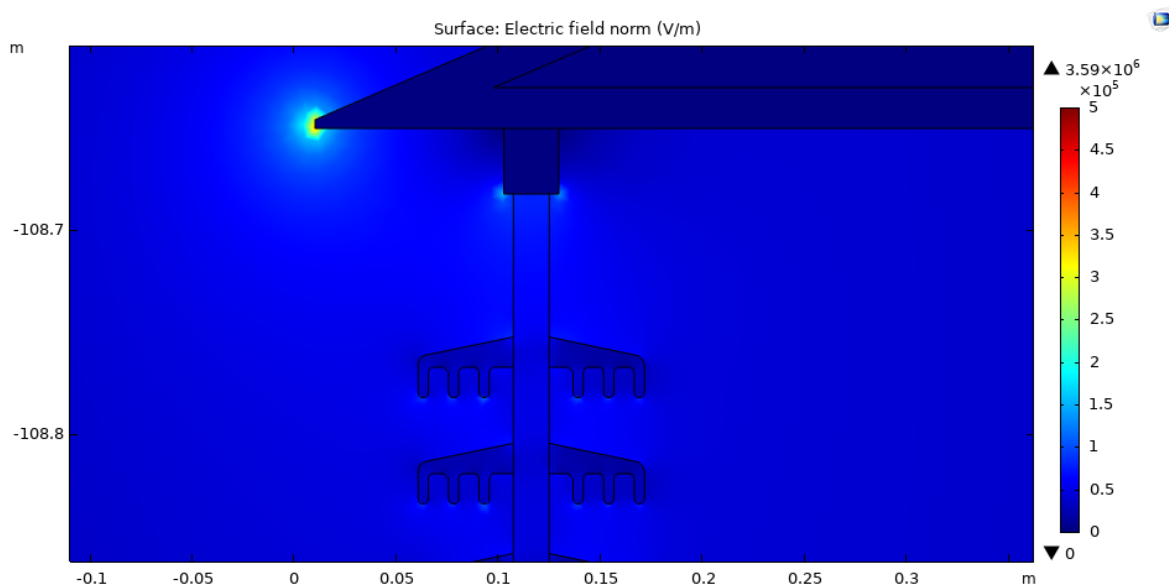
Obr. 35: Intenzita magnetického pole, cca 50 % stříšek izolátoru, fáze W, zdroj autor



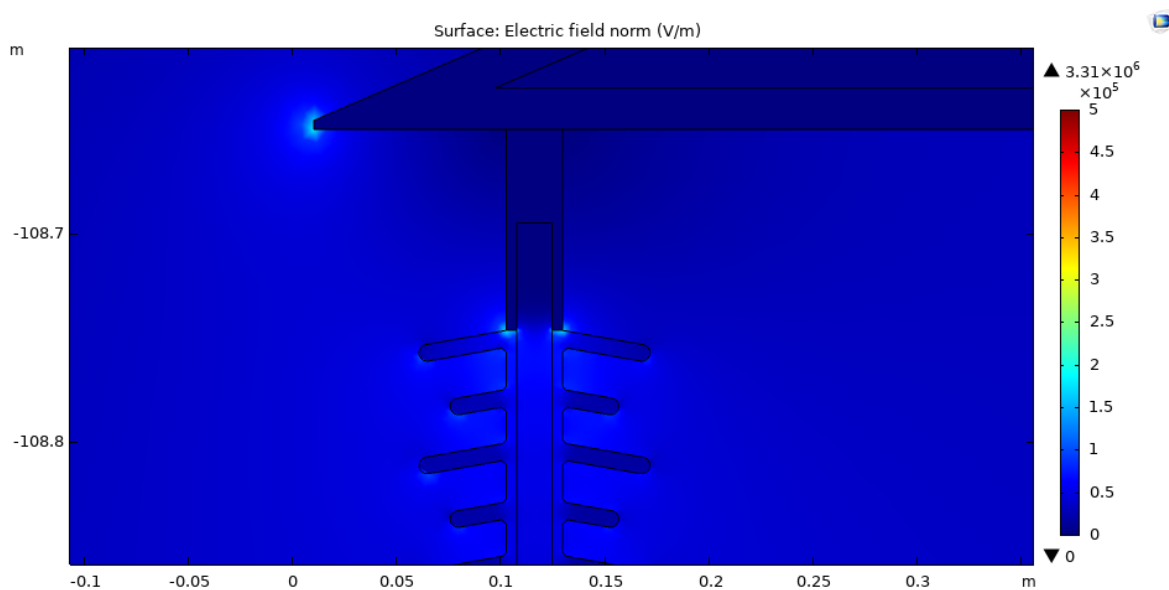
Obr. 36: Intenzita magnetického pole, cca 150 % stříšek izolátoru, fáze W, zdroj autor

4.7.4 Porovnání skleněného a plastového izolátoru

Sklovláknové jádro bylo zachováno, stejně tak délka izolačního řetězce, změnilo se pouze materiál a tvar stříšek.



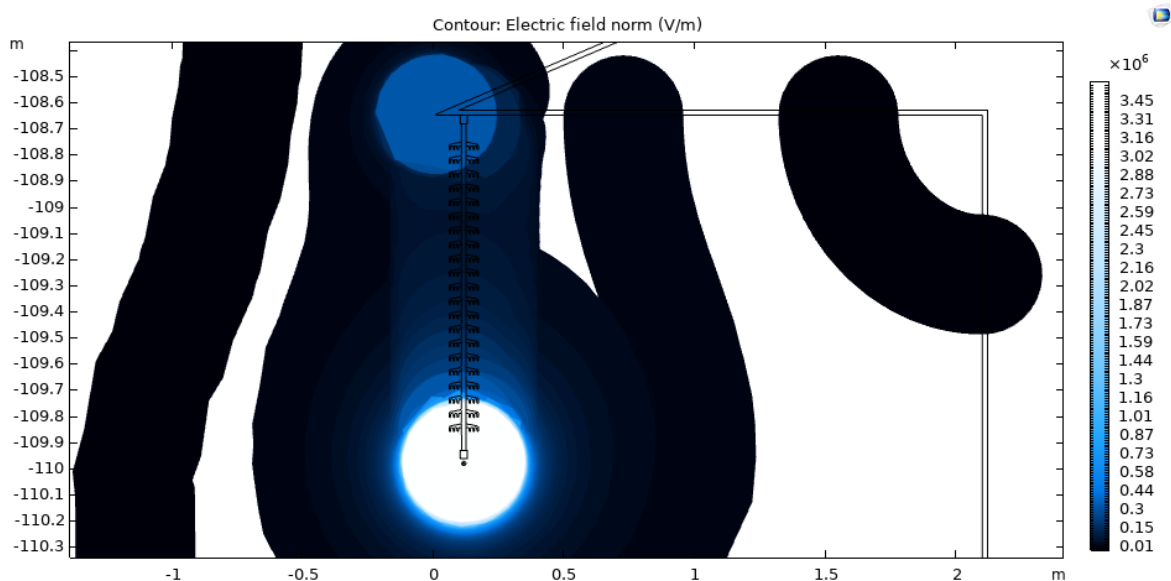
Obr. 37: Intenzita elektrického pole skleněného izolátoru, zdroj autor



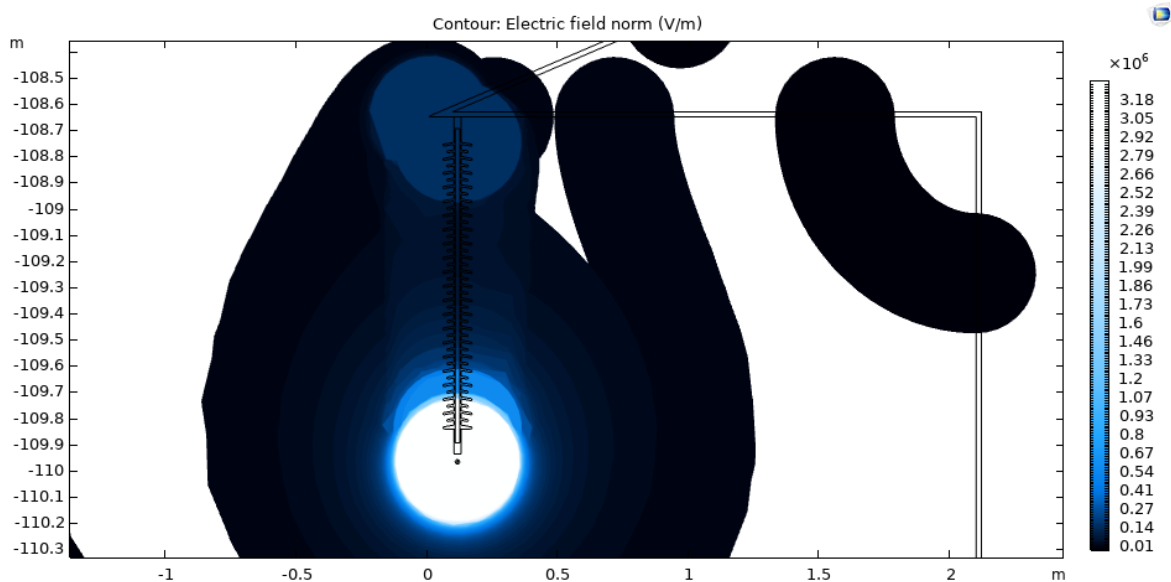
Obr. 38: Intenzita elektrického pole plastového izolátoru, zdroj autor

U varianty se skleněnými stříškami a nižší relativní permitivitou, je elektrostatické pole nepatrně silnější. V obou případech elektrická intenzita roste směrem k tyčovému jádru. Domény o vyšší relativní permitivitě tak kladou elektrickému poli menší odpor, a proto by hlavní materiály pro izolační prvky měly mít permitivitu co možná nejvyšší. V úkosu konzole byl programově zjištěn dvojnásobný rozdíl elektrických intenzit mezi těmito

materiály – cca 0,3 MV/m pro sklo a 0,15 MV/m pro plast. Na následujících snímcích (Obr. 39 a 40) je možné pozorovat útlum intenzity ve středu plastového typu.

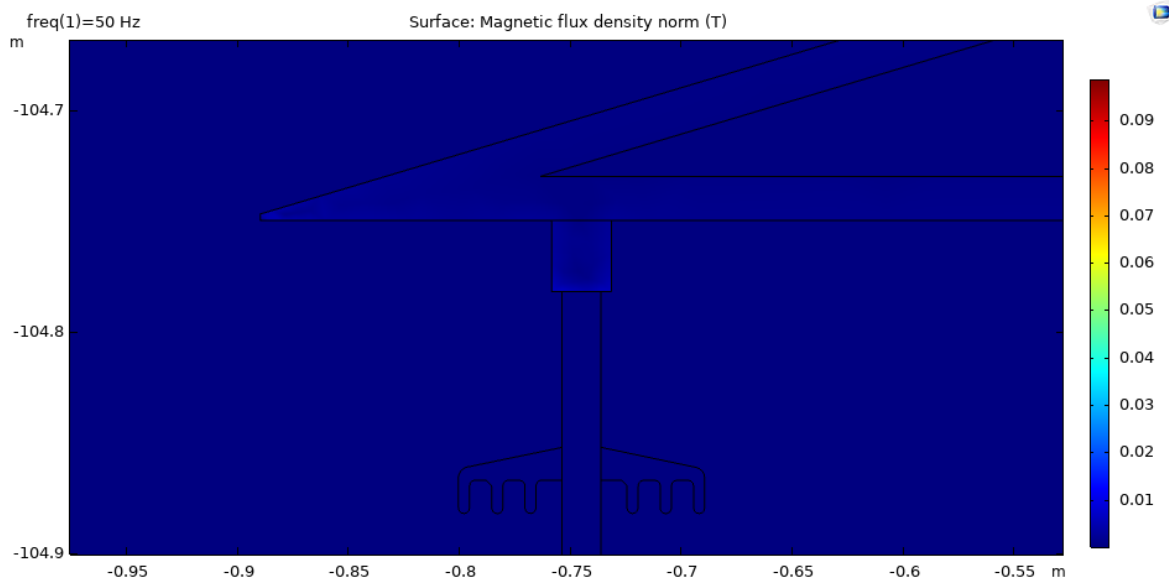


Obr. 39: Intenzita elektrického pole skleněného izolátoru, zdroj autor

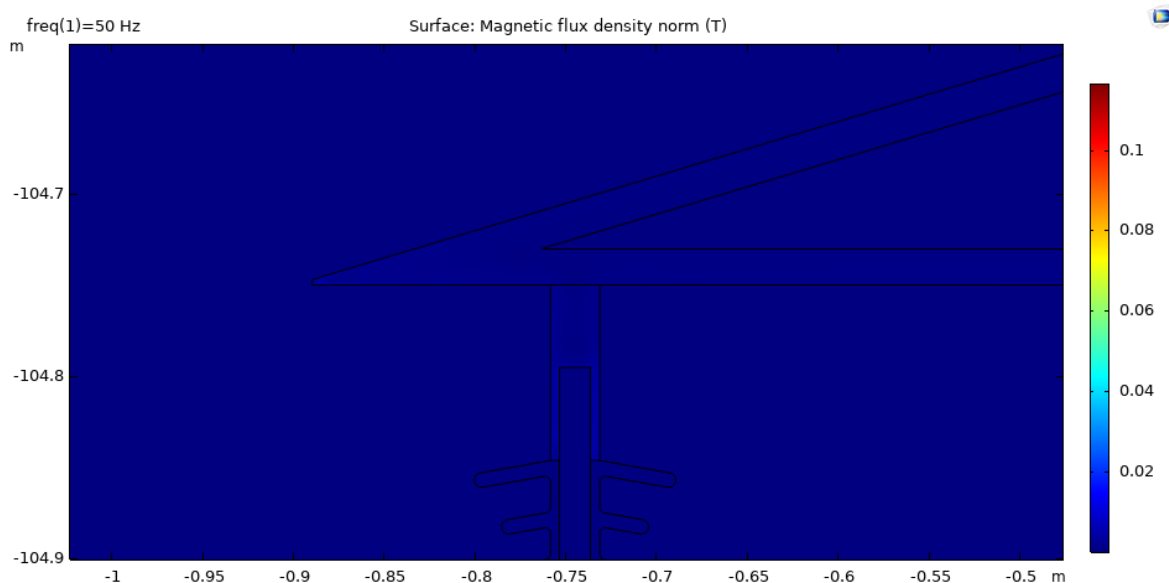


Obr. 40: Intenzita elektrického pole plastového izolátoru, zdroj autor

Dalším bodem šetření je srovnání veličin magnetického pole...

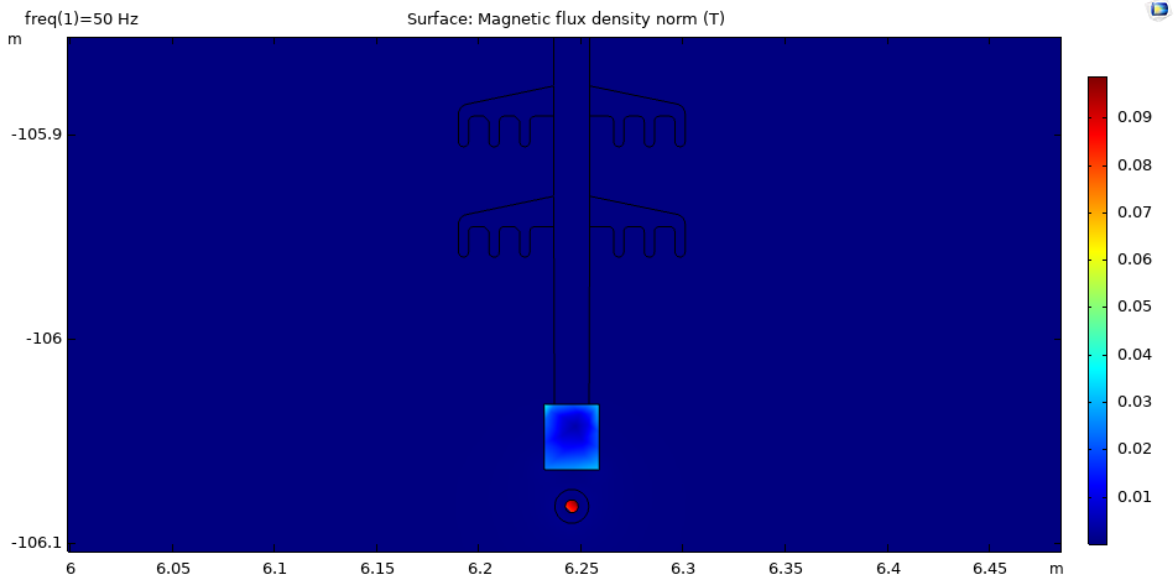


Obr. 41: Magnetická indukce do konzole u skleněného typu izolátoru, zdroj autor

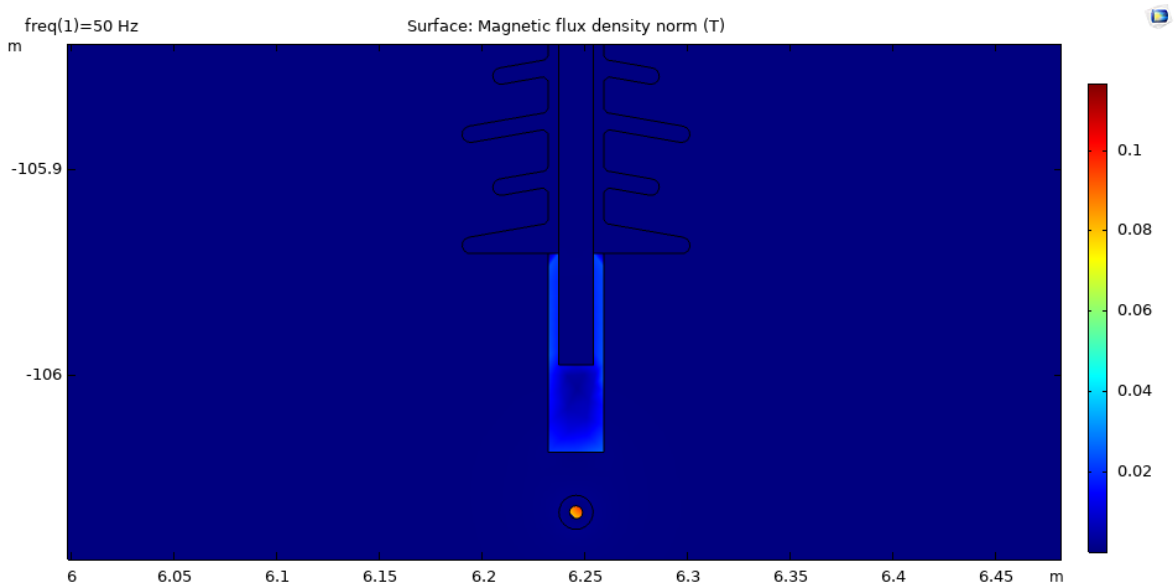


Obr. 42: Magnetická indukce do konzole u plastového typu izolátoru, zdroj autor

Pokud se zaměříme výhradně na oblast ukotvení izolátoru, potom se magnetická indukce při konzoli pohybuje řádově v jednotkách mT, což je zhruba 15-30× vyšší hodnota, než produkuje magnetické pole Země, tj. 70 μ T. [53] Maximální indukce v okolí pracovních vodičů dosahuje až jedné desetiny Tesla.



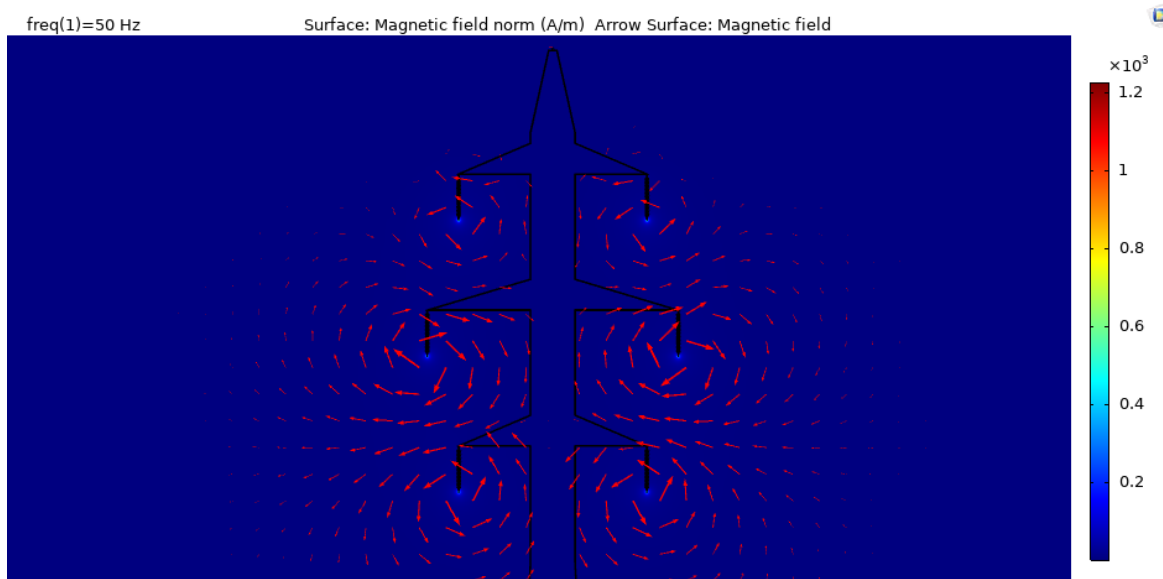
Obr. 43: Magnetická indukce v oblasti pracovních vodičů, skleněný typ, zdroj autor



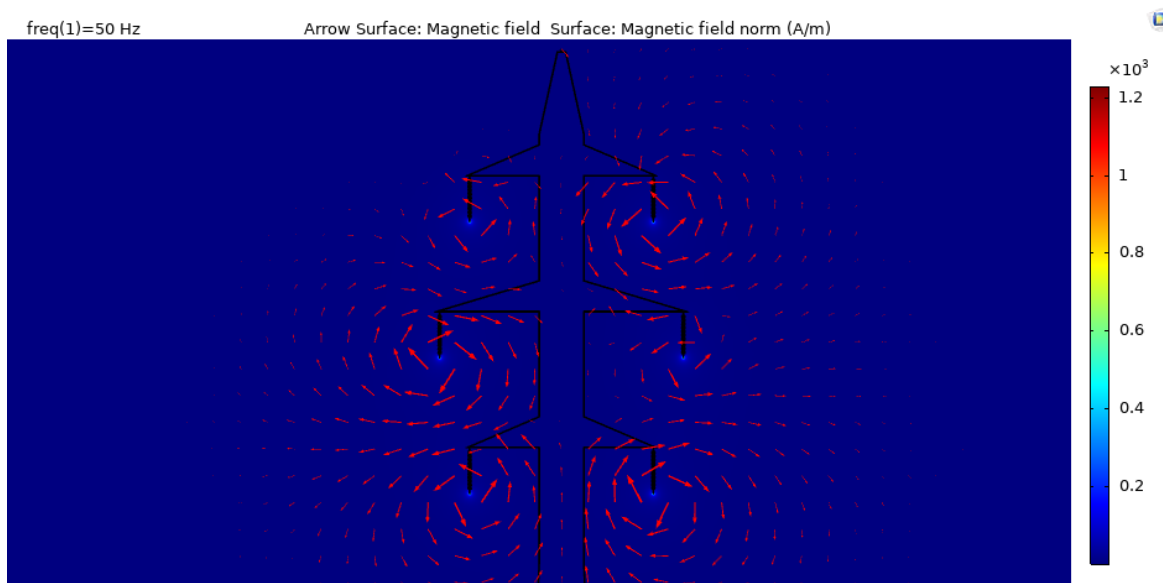
Obr. 44: Magnetická indukce v oblasti pracovních vodičů, plastový typ, zdroj autor

4.7.5 Transpozice vedení

Levý trojfázový systém zůstal beze změny, v pravé polovině došlo k prostřídání fází $U \rightarrow W$, $V \rightarrow U$ a $W \rightarrow V$. Pro názornost byly vybrány veličiny magnetická intenzita a magnetický vektorový potenciál.



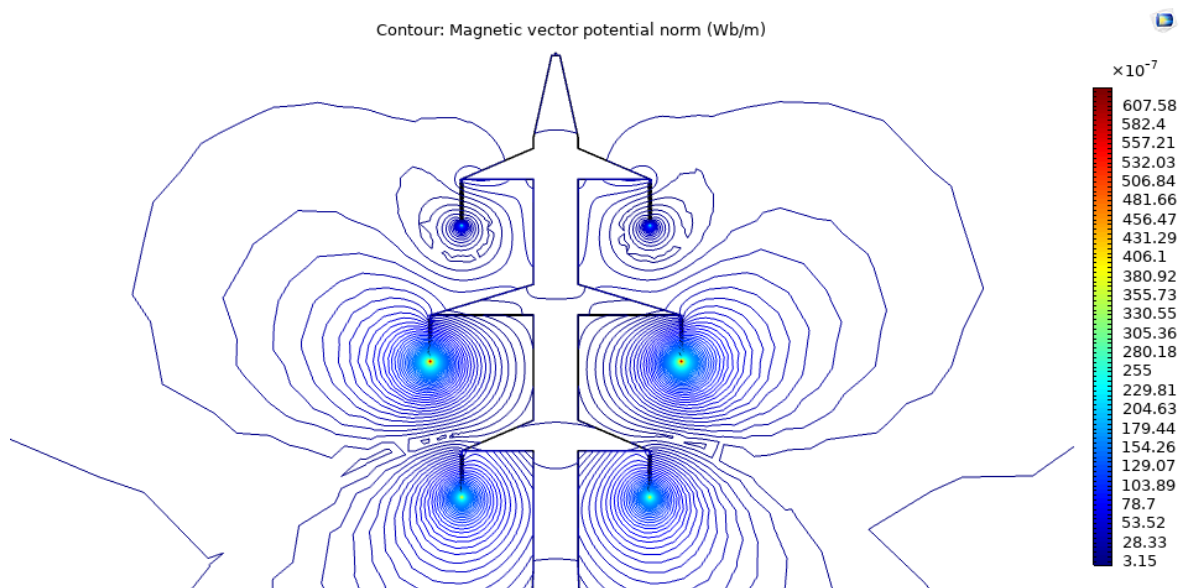
Obr. 45: Zobrazení intenzity magnetického pole pomocí vektorů (běžné fázové uspořádání), zdroj autor



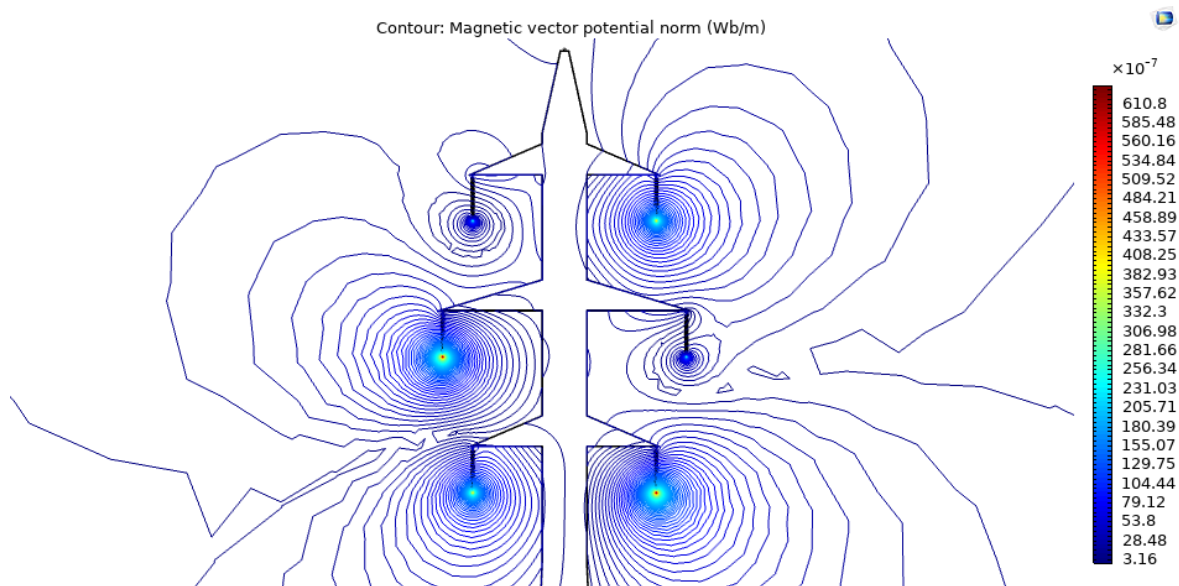
Obr. 46: Zobrazení intenzity magnetického pole pomocí vektorů (transponované vedení), zdroj autor

Zatímco u „běžného“ vedení je rozložení intenzity magnetického pole totožné s příslušnou fází protilehlého systému a pole se vzájemně kompenzují, v případě transponovaného vedení je viditelný posun jednotlivých fází a v dolní části stožáru se dokonce účinky polí od fází V a W sčítají. Jistou analogii je možno pozorovat i v rozložení magnetických vektorových

potenciálů. Rovněž se nám potvrdil teoretický předpoklad pojednávající o vírovosti magnetického pole.



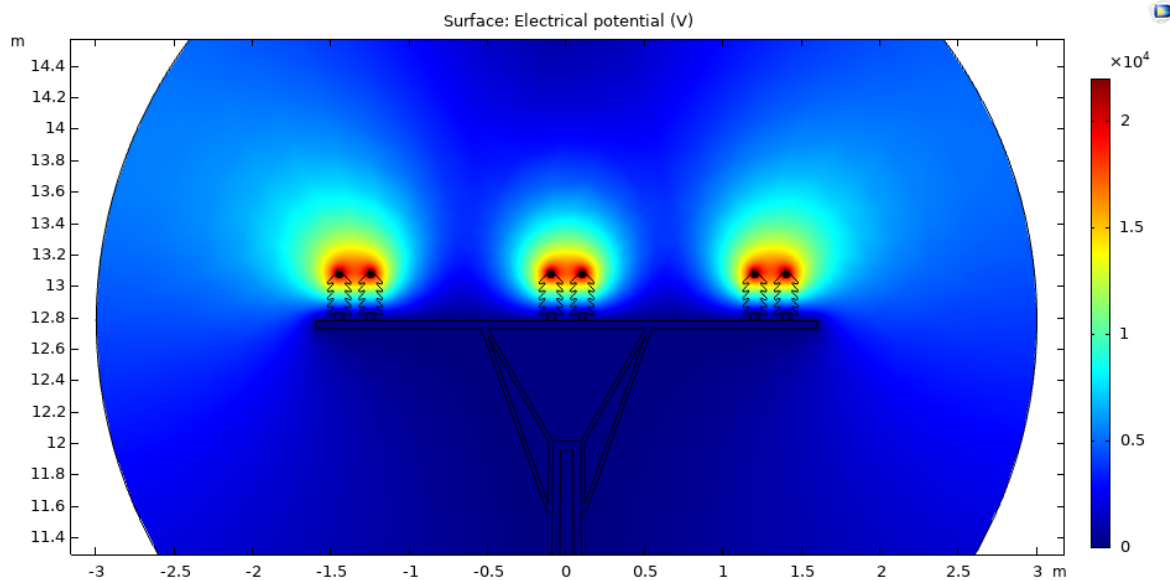
Obr. 47: Rozložení magnetického vektorového potenciálu (běžné fázové uspořádání), zdroj autor



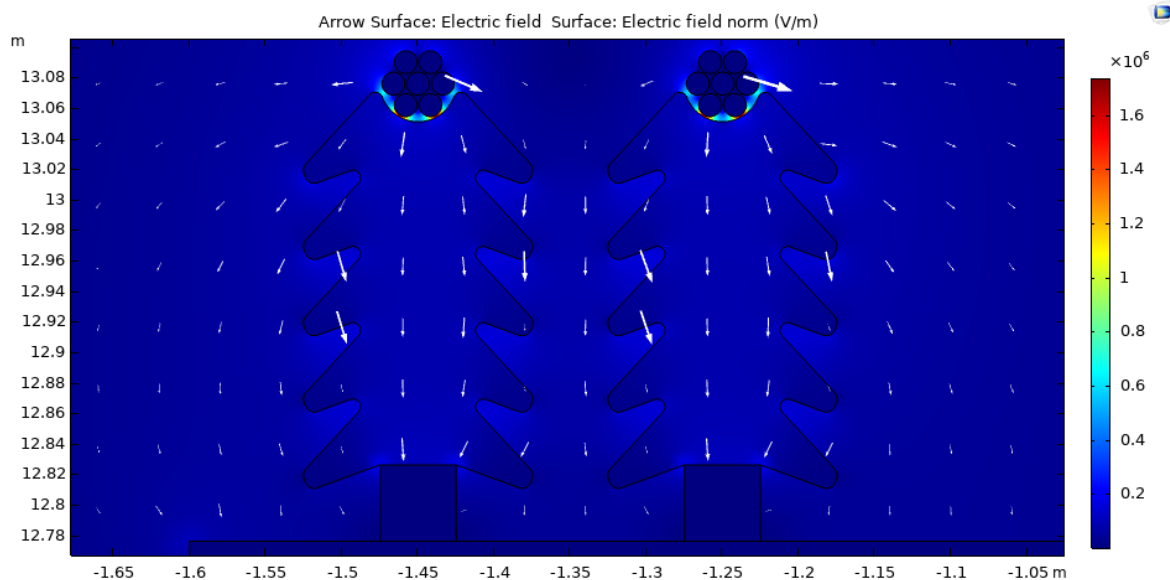
Obr. 48: Rozložení magnetického vektorového potenciálu (transponované vedení), zdroj autor

4.7.6 Zvýšení přenášeného výkonu vedení vn

Tentokrát bude použit model vedení vn 22 kV o výkonech 4 a 8 MW.

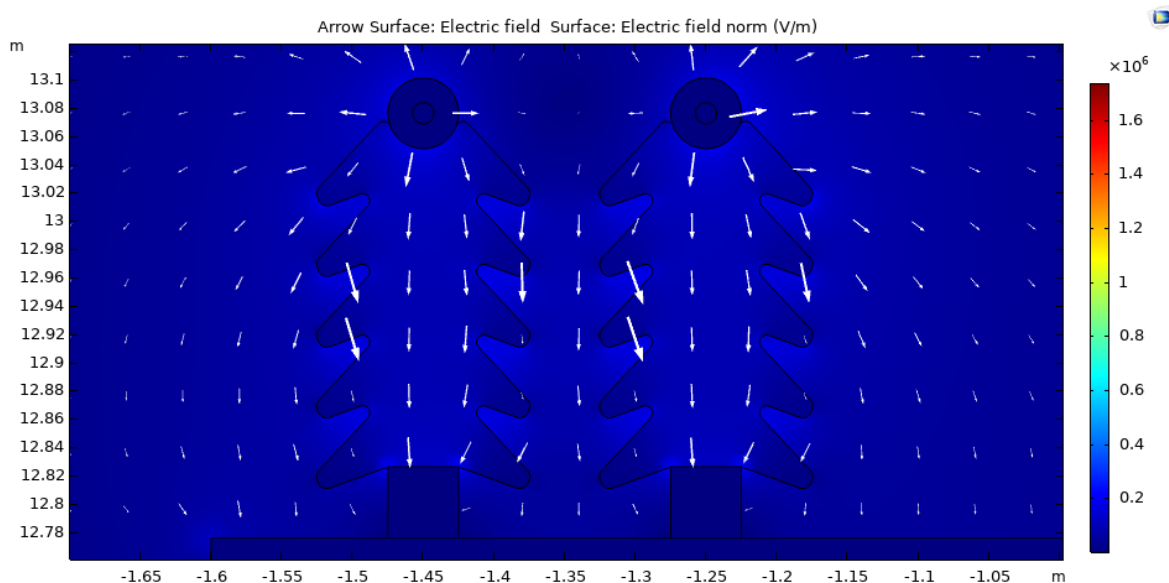


Obr. 49: Konzole sloupového vedení vn 22 kV, zdroj autor

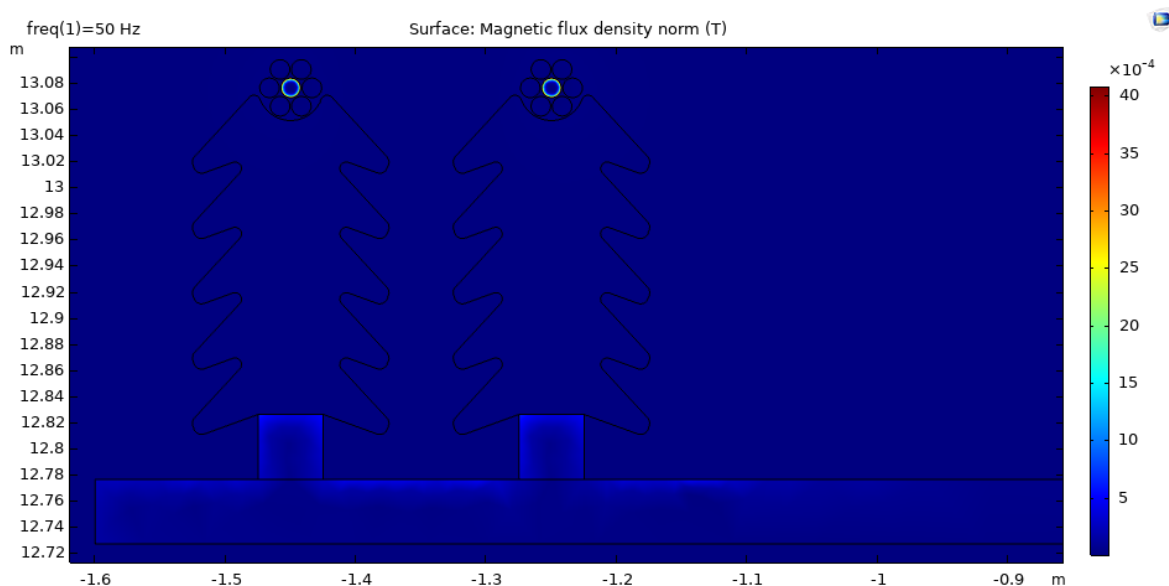


Obr. 50: Rozložení elektrické intenzity, zdroj autor

Elektrická intenzita je opět nejvyšší v okolí lanových vodičů. Pokud bychom místo nich použili plný průřez (Obr. 51) nebo lanko z dostatečného počtu žil, tak aby se vytěsnil vzduch kolem uložení fázového vodiče, hodnoty intenzity rapidně poklesnou, až o jeden řád.

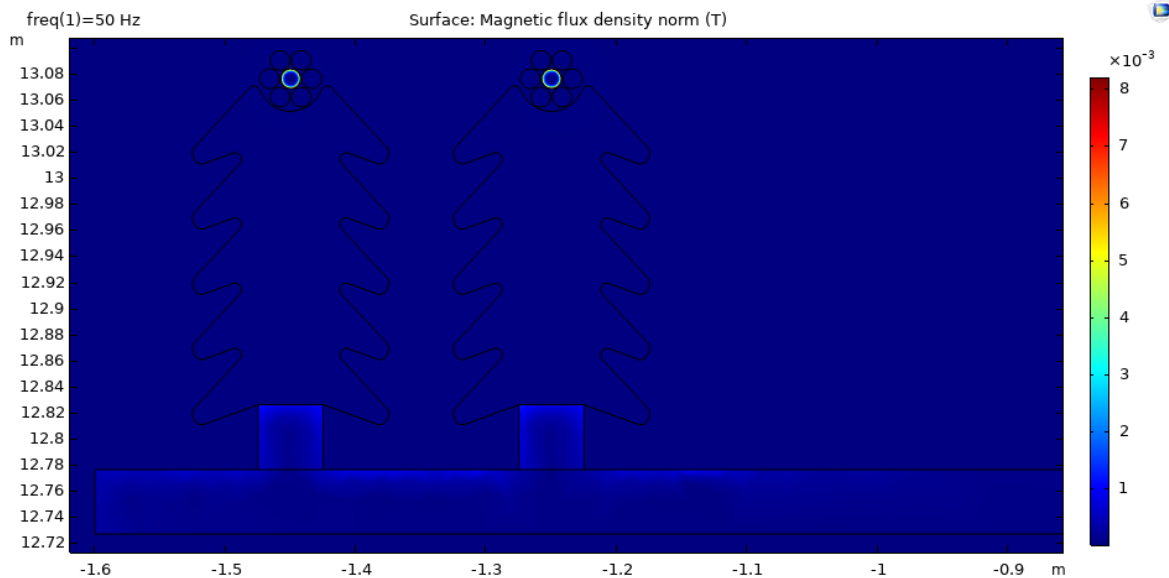


Obr. 51: Rozložení elektrické intenzity s dokonale kruhovými fázovými vodiči, zdroj autor

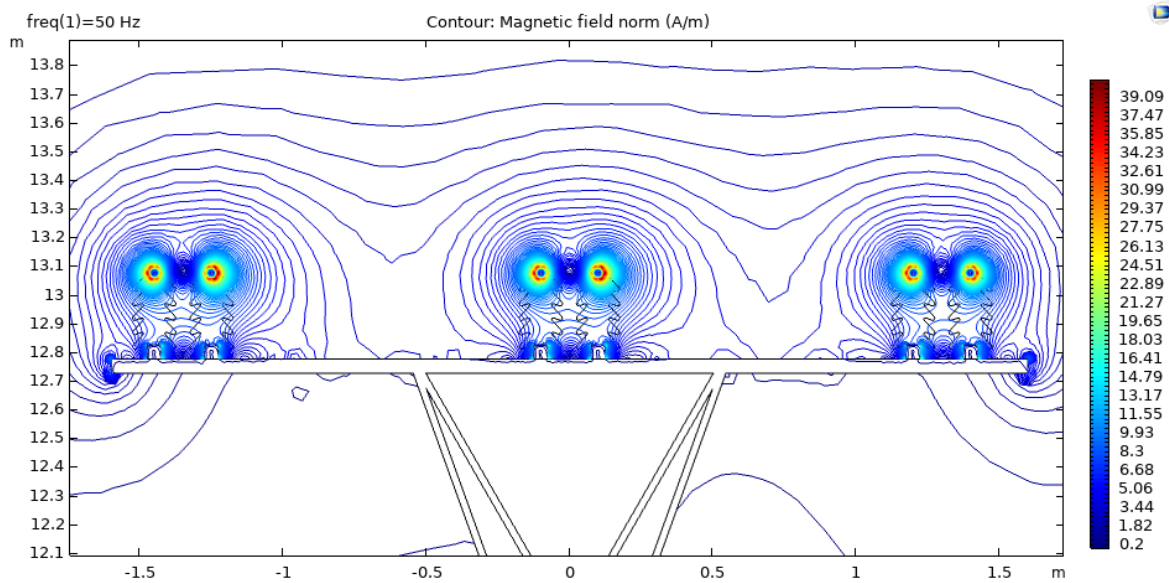


Obr. 52: Zobrazení magnetické indukce při výkonu 4 MW, zdroj autor

Stejně jako u modelu vedení vvn (Kapitola 4.7.3) se i zde magnetická indukce v částech konzole pohybuje řádově v jednotkách mT. Maximální indukce do duše AlFe lana je však podstatně nižší. Pokud bychom zdvojnásobili přenášený výkon vedení, maximální hodnota indukce (i intenzity) by se rovněž zdvojnásobila.



Obr. 53: Zobrazení magnetické indukce při výkonu 8 MW, zdroj autor



Obr. 54: Relativně symetrické rozložení intenzity magnetického pole, zdroj autor

Závěr

V praxi se vyskytuje obrovské množství různých typů izolátorů, uspořádání, nosných konstrukcí a dalšího souvisejícího příslušenství, jejichž tvary, rozměry a materiály se liší v závislosti na konkrétní aplikaci, pracovních podmínkách a cenových relacích. Vzhledem k časovým, ale i dostupným softwarovým a hardwarovým limitům není možné takto rozsáhlou oblast rozumně pokrýt v rámci jediné práce.

Obecně lze říci, že v místech výskytu velké elektrické intenzity se může projevit výbojová činnost (např. koróna). Konkrétně se jedná o ostré hrany či výstupky (nehomogenity) nebo rozhraní dvou typově odlišných prostředí/materiálů (kombinace velmi dobrý izolant a vynikající vodič). Při překročení kritické hodnoty intenzity v daném prostředí dochází k přeskočení či průrazu. Pro vzduch je charakteristická elektrická pevnost cca 3 MV/m, může se ovšem lišit v závislosti na okolních podmínkách. Zvýšená hodnota intenzity se objevila u simulovaných objektů zejména v okolí pracovních vodičů, tedy v oblastech o vysokém potenciálu. Z toho důvodu se u vedení vvn, počínaje 220 kV, upřednostňují svazkové vodiče, které minimalizují šanci na vznik koróny.

Magnetická indukce je v uvažovaných geometriích (rovině řezu) zpravidla omezena na okolí pracovních vodičů (10^{-1} T), ale poměrně slabé hodnoty se vyskytly i v oblasti ukotvení izolátorů ke konzoli, řádově 10^{-3} T. Na základě vědeckých poznatků a doporučení mezinárodní komise ICNIRP, by neměly být civilní osoby trvale vystaveny hodnotám převyšujícím 400 mT. [54] Je tedy zapotřebí dodržovat určité vzdálenosti od silových vedení. Lidé s kardiostimulátory by se v žádném případě neměli přibližovat do těsné blízkosti stožárů elektrického vedení, jelikož pro ně platí výrazně nižší limitní hodnota 0,5 mT.

U nižších napěťových hladin se také často zohledňuje i ochrana ptactva (*Příloha J*), jenž spočívá v návrhu vhodných konstrukcí umožňující jejich bezpečný dosed, bez rizika fázového nebo zemního spojení, nebo vybavením stávajících vedení izolačními kryty pro pokrytí vodičů a izolátorů. Druhá varianta se jeví jako nepříliš vhodná v prostředích se zvýšenou vlhkostí (mlha, déšť), neboť vodivá vrstvička vznikající na povrchu izolantu má

charakter elektrody, která v kombinaci s vodičem a přítomným dielektrikem tvoří kapacitor. V důsledku toho dochází k dílčím průrazům a postupně se vytrácí význam této ochrany.

Současným zahraničním trendem jsou konzole z kompozitních materiálů nebo izolačních řetězců (*Příloha N*). Oproti kovovým jsou lehčí, nízko údržbové, s dlouhou životností a stálostí parametrů a prakticky je lze snadno aplikovat na již existující vedení, kde je zaručena zaměnitelnost komponent. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká pořizovací cena odvíjející se od složitosti výrobních metod.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd.-přepřac. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-708-2826-9.
- [2] ČSN IEC 383-1. *IZOLÁTORY VENKOVNÍCH VEDENÍ SE JMENOVITÝM NAPĚTÍM NAD 1000 V: Část 1: Keramické nebo skleněné izolátory pro soustavy se střídavým napětím. Definice, zkušební metody a přejímací kritéria*. 4. vydání. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1996.
- [3] ČSN EN 62217. *Polymerové izolátory vysokého napětí pro vnitřní a venkovní použití - Obecné definice, zkušební metody a přejímací podmínky*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [4] ČSN EN 60383-2. *IZOLÁTORY PRO VENKOVNÍ VEDENÍ SE JMENOVITÝM NAPĚTÍM NAD 1000 V: Část 2: Izolátorové řetězce a izolátorové závěsy pro soustavy se střídavým napětím - Definice, zkušební postupy a přejímací kritéria*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1996.
- [5] ČSN EN 61466-2. *Kompozitní tyčové izolátory pro venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 1 kV - Část 2: Rozměry a elektrické charakteristiky*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2000.
- [6] ČSN 33 0405. *NAVRHOVÁNÍ VENKOVNÍ ELEKTRICKÉ IZOLACE PODLE STUPNĚ ZNEČIŠTĚNÍ*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1989.
- [7] Tleis, N. D. (2008). *Power systems modelling and fault analysis: Theory and practice*. Amsterdam Boston: Elsevier/Newnes. ISBN 9780080554273.
- [8] Bayliss, C., Hardy, B. (2011). *Transmission and Distribution Electrical Engineering*. London: Elsevier Science. ISBN 9780080969138.
- [9] *Stránka Energetický slovník*. ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/stranka-energeticky-slovník>
- [10] *Přenosová soustava elektrické energie*. TZB-info [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [11] *Dispečink ČEPS*. ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/dispecink-ceps>
- [12] *Často kladené otázky*. ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://ceps.cz/cs/casto-kladene-otazky>
- [13] *Distributor, nebo dodavatel? Kdo je kdo?*. Elektrina.cz [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/distribuce-elektriny>
- [14] *Technická data*. ČEZ Distribuce [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/technicka-data.html>
- [15] *Porovnání nadzemního a kabelového vedení*. ČEZ Distribuce [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-media/vedeni-110-kv-novy-bor-varnsdorf/porovnani-reseni-nadzemniho-a-kabeloveho-vedeni.html>
- [16] *Vedení PS*. ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/vedeni-ps>
- [17] *Přepětí*. ElektriKa.cz [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-05-23.7953032978>
- [18] *Nadproudy a zkratové poměry ve vedení (základní pojmy 13.)*. ElektriKa.cz [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/nazpvv030114>

- [19] KUSALA, Jaroslav. *Výboje v plynech*. Miniencyklopedie ELEKTRINA [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz8.htm>
- [20] *Samostatný výboj v plynu za atmosférického a za sníženého tlaku*. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/283-samostatny-vyboj-v-plynu-za-atmosferickeho-a-za-snizeneho-tlaku>
- [21] ČERMÁK, Jiří. *Elektrické stožáry aneb poznáš kočku na poli?*. OEnergetice.cz [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/elektricke-stozary-aneb-poznas-kocku-na-poli/>
- [22] *STOŽÁR ELEKTRICKÉHO VEDENÍ* [online]. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/stozar_elvedeni.html
- [23] *Patinující ocel* [online]. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: http://www.atmofix.cz/ocel_cz.php
- [24] VEISHEIPL, Karel. *Charakteristiky impulzního generátoru v závislosti na typu zátěže* [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26521/1/Veisheipl.pdf>. Západočeská univerzita v Plzni.
- [25] *Elektrický izolátor | Izolační materiál Porcelánový skleněný polymerní izolátor* [online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://riverglennapts.com/cs/insulator/475-electrical-insulator-insulating-material-porcelain-glass-polymer-insulator.html>
- [26] *Polymer Insulators* [online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.ofilsystems.com/news/history.html>
- [27] *Kompozitní izolátory VVN Maclean Power Systems*. DRIBO, spol. s.r.o. [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: http://www.dribo.cz/pdf/CZ_Kompozitni_izolatory_VVN.pdf
- [28] *Elektrický náboj a jeho vlastnosti*. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/220-elektricky-naboj-a-jeho-vlastnosti>
- [29] *Vodič*. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/227-vodic>
- [30] *Elektrický proud jako děj a jako fyzikální veličina*. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/238-elektricky-proud-jako-dej-a-jako-fyzikalni-velicina>
- [31] *Otázka č.6: Parametry prostředí* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/sireni_vln/teze/otazka_06.pdf
- [32] KAČOR, Petr. *Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/
- [33] *Stacionární proudové pole: Základní vztahy* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: https://elmag.fel.cvut.cz/sites/default/files/users/pankrac/files/Priklady_III_proudove_pole.pdf
- [34] DOLEŽEL, Ivo. *Předmět Teorie elektromagnetického pole*. Západočeská univerzita v Plzni. [přednáška]
- [35] *Schéma PS*. In: ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/admin-assets/pages/6408/modules/gallery/217_schema-ps/1207_schema-siti-2018-cz-fhd.jpg

- [36] *Polohopisné schéma vedení 110 kV*. In: PREdistribuce, a. s. [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/technicke-informace/polohopisne-schema-vedeni-110-kv/Contents/12/schema_detail_2018.png
- [37] Power Systems Short Circuit Analysis. In: PSPT. [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.getpspt.com/>
- [38] KARBAN, Pavel. *Agros2D – aplikace pro řešení fyzikálních polí* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>
- [39] *COMSOL Multiphysics*. Humusoft [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/comsol/details/>
- [40] NOHÁČ, Karel. *Energetika* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Energetika.pdf>
- [41] *Ocelovo-hliníkové vodiče (AlFe lana) pro venkovní elektrické vedení*. ACword, spol. s. r. o. [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.acword.cz/portal/hromosvodovy-zemnici-a-hutni-material/produkty/alfe-lana/alfe-lana-1644.htm>
- [42] *Electrical resistivity and conductivity*. Wikipedia, the free encyclopedia [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity
- [43] *Permeability (electromagnetism)*. Wikipedia, the free encyclopedia [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))
- [44] *Permeability*. Engineering ToolBox [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html
- [45] *Resistivity Of Steel*. The Physics Factbook [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://hypertextbook.com/facts/2006/UmransUgur.shtml>
- [46] *Power Line Insulator*. ElectroMagneticWorks, Inc. [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.emworks.com/application/power-line-insulator>
- [47] *Resistance and Resistivity*. Engineering ToolBox [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/resistance-resistivity-d_1382.html
- [48] *Resistivity and Temperature Coefficient at 20 C*. HyperPhysics [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html>
- [49] *Relative Permittivity - the Dielectric Constant*. Engineering ToolBox [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d_1660.html
- [50] *Electrical Properties*. Porcelain Enamel Institute [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://care-hhh.web.cern.ch/CARE-HHH/ECL2/Literature/Electrical%20Properties%20-%20Porcelain%20Enamel%20Institute.htm>
- [51] *Stožáry VVN (III)*. In: TZB-info [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4192-stozary-vvn-iii>
- [52] *Why is the dielectric constant for metals infinity?*. In: ResearchGate [online]. [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/Why_is_the_dielectric_constant_for_metals_infinity

- [53] KOŠTÁL, Josef. EMF a lidské zdraví. *ELEKTRO* [online]. 02/2005 [cit. 2019-06-06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/emf-a-lidske-zdravi--13777>
- [54] *ICNIRP GUIDELINES ON LIMITS OF EXPOSURE TO STATIC MAGNETIC FIELDS* [online]. 2009 [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatgdl.pdf>

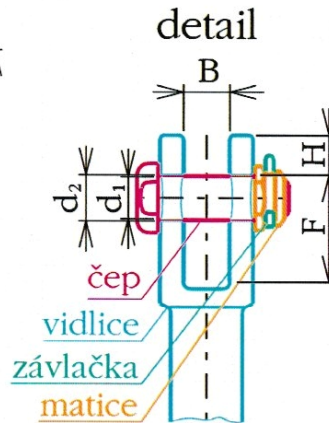
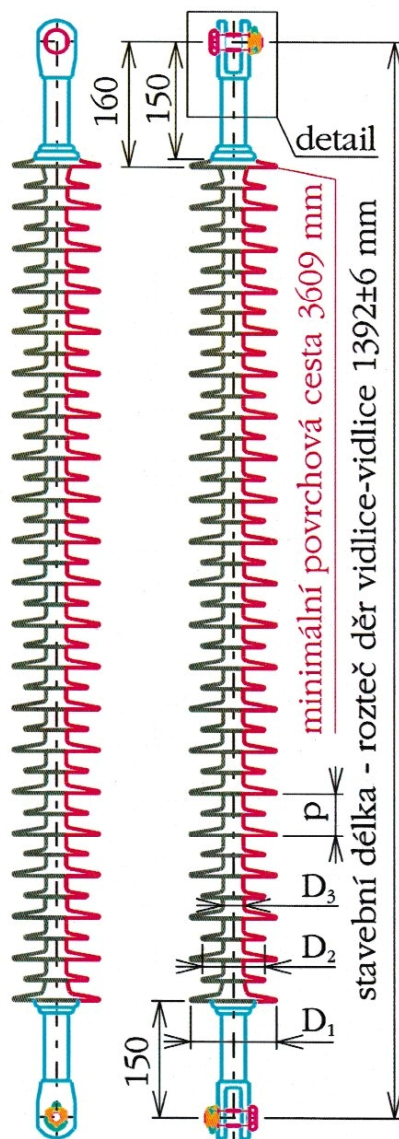
Přílohy

Příloha A – Výkresová dokumentace izolátoru 110 kV



materiál – sestava	Izolátorové řetězce
přesné typové označení	Izolátory plastové VVN

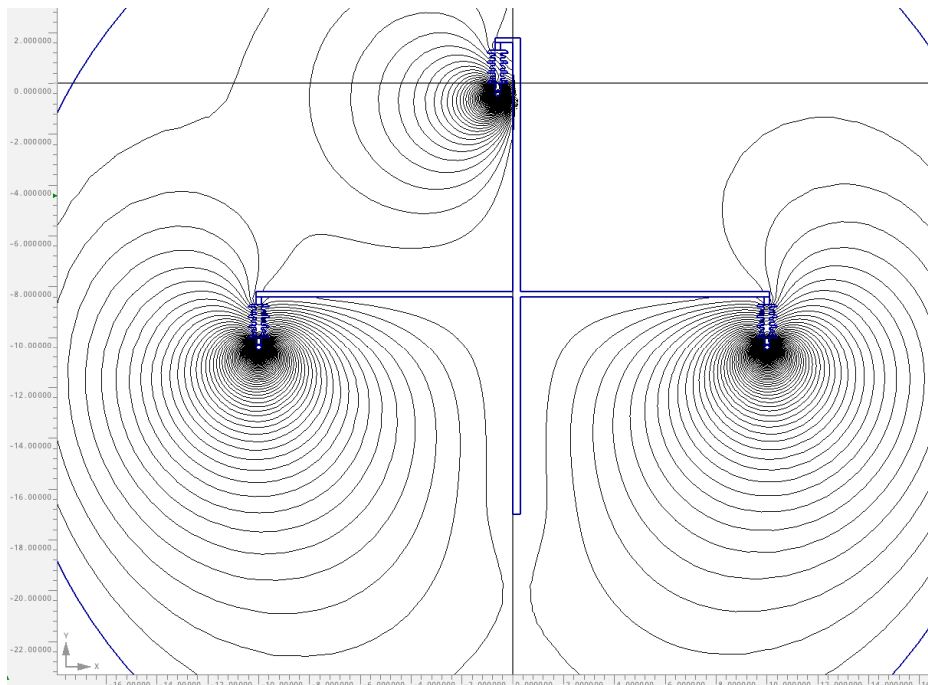
č. KL vč. revize
A304.002D
strana č. 5
(celkem 6)



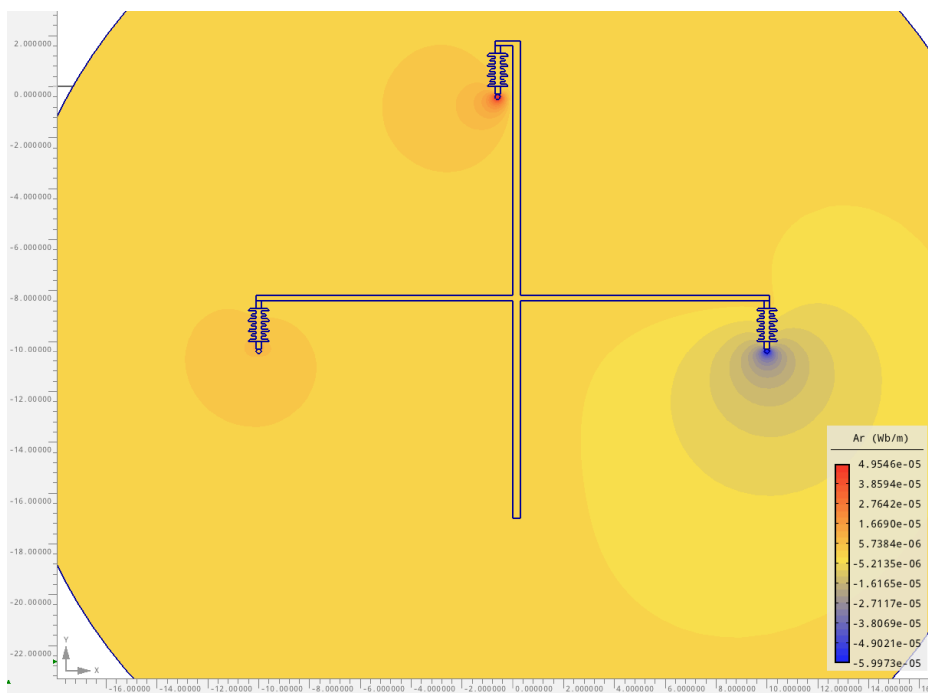
B = 20,0 - 22,0 mm
d₁ = 18,6 - 19,4 mm
d₂ = 19,8 - 21,4 mm
F = 46,0 - 48,5 mm
H = 14,0 - 22,0 mm
p = 54 mm
D₁ = 111 mm
D₂ = 81 mm
D₃ = 27 mm
počet stříšek D₁/D₂ - 21/20
hmotnost - 5,1 kg
specifické mech. zatížení
SML - 160 kN
zkratová odolnost - 40 kA
minimální výdržné napětí při norm.
atmosférickém impulzu - 645 kV
minimální výdržné střídavé napětí
průmyslového kmitočtu za deště - 320 kV
maximální hladina rušivých
napětí 0,5 MHz - 56 dB

Příloha B – Zjednodušený model izolátoru, napět'ová hladina 110 kV, výkon 30 MW

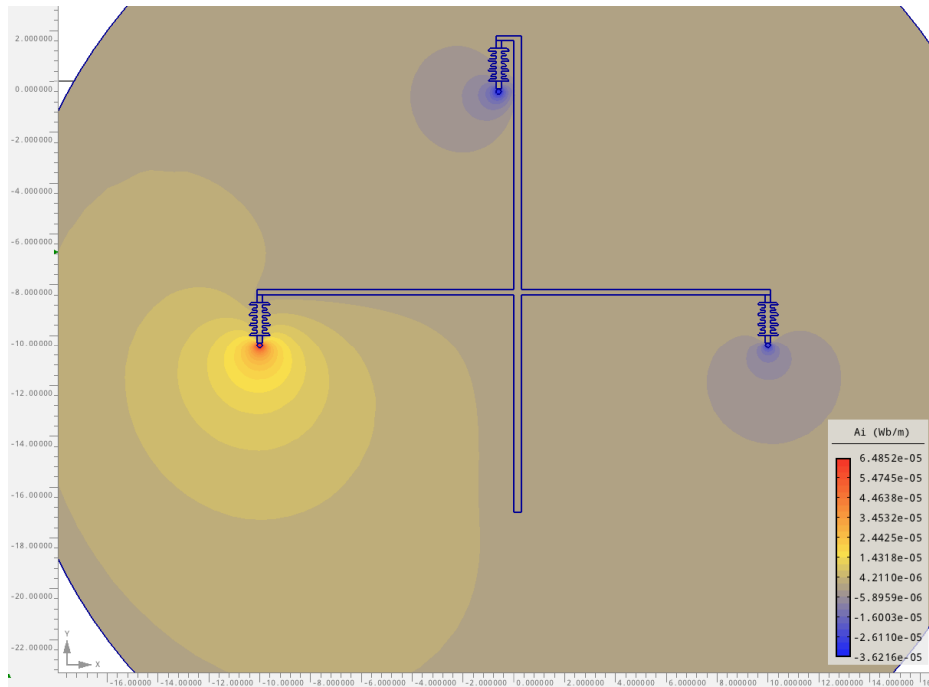
Grafické výstupy Agros2D



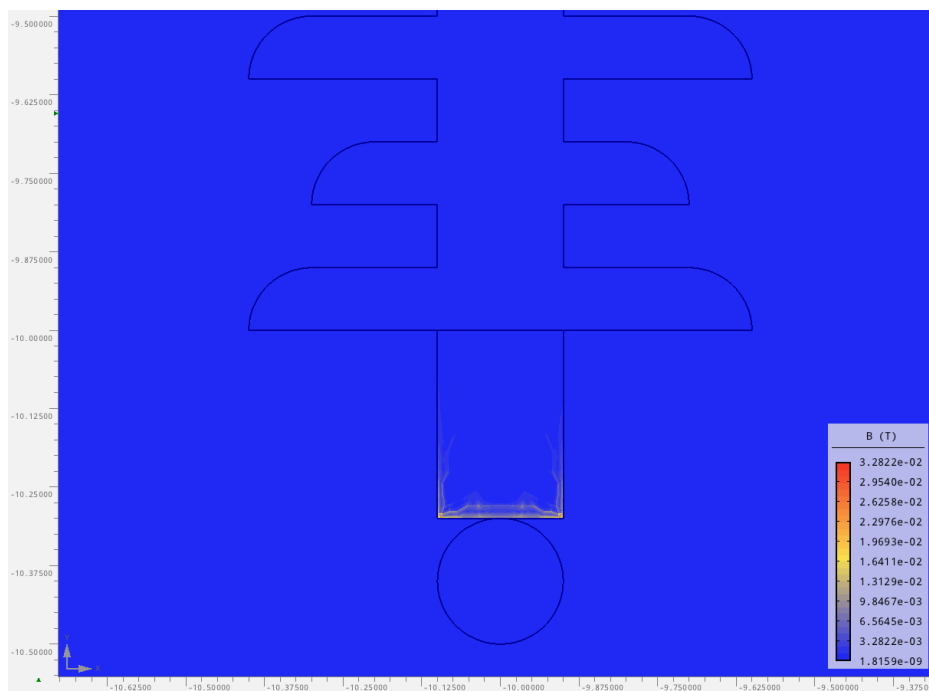
Obr. B1: Rozložení veličiny A



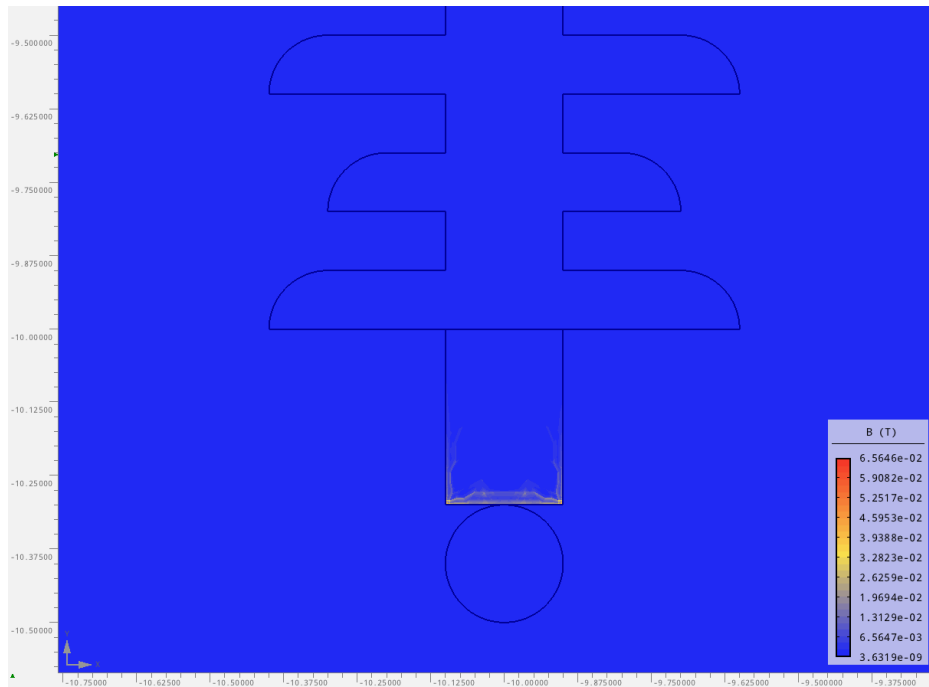
Obr. B2: Zobrazení reálné složky veličiny A



Obr. B3: Zobrazení imaginární složky veličiny A

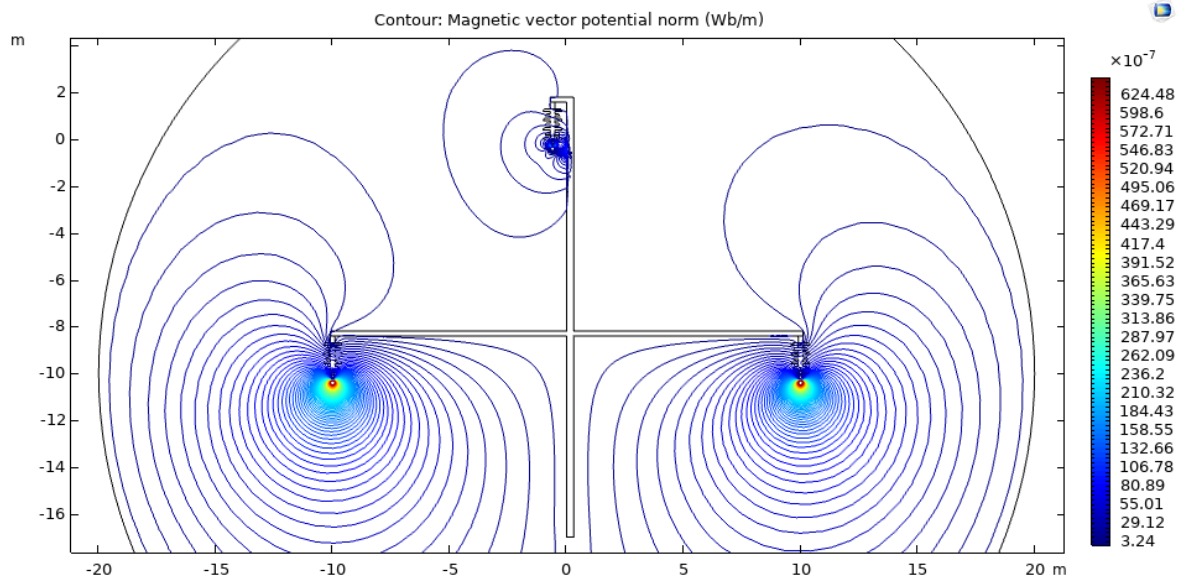


Obr. B4: Rozložení veličiny B , detail levého izolátoru

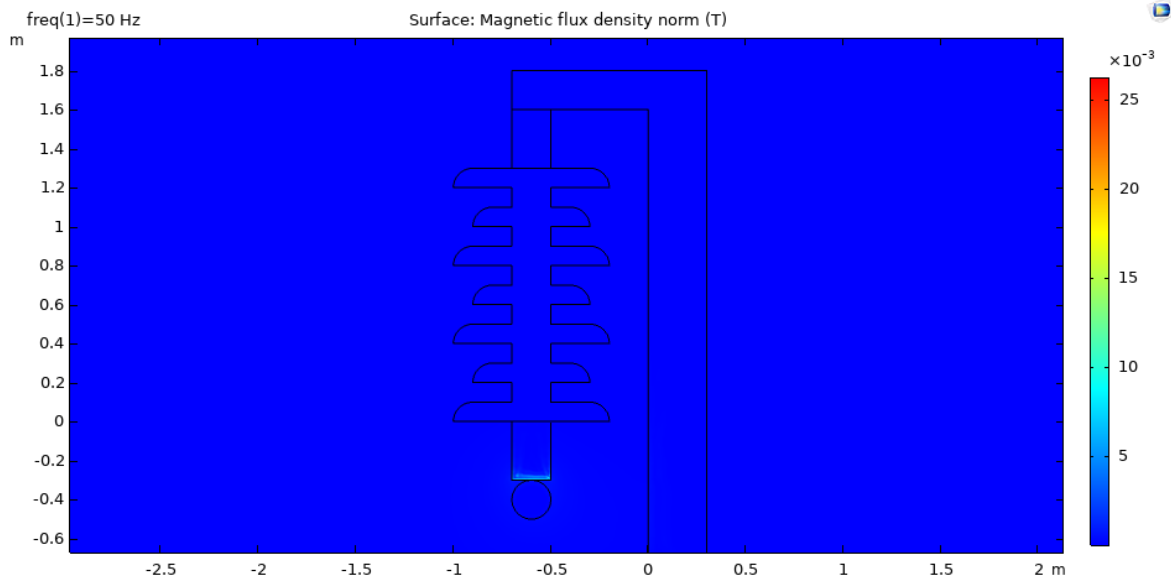


Obr. B5: Rozložení veličiny B při výkonu 60 MW, detail levého izolátoru

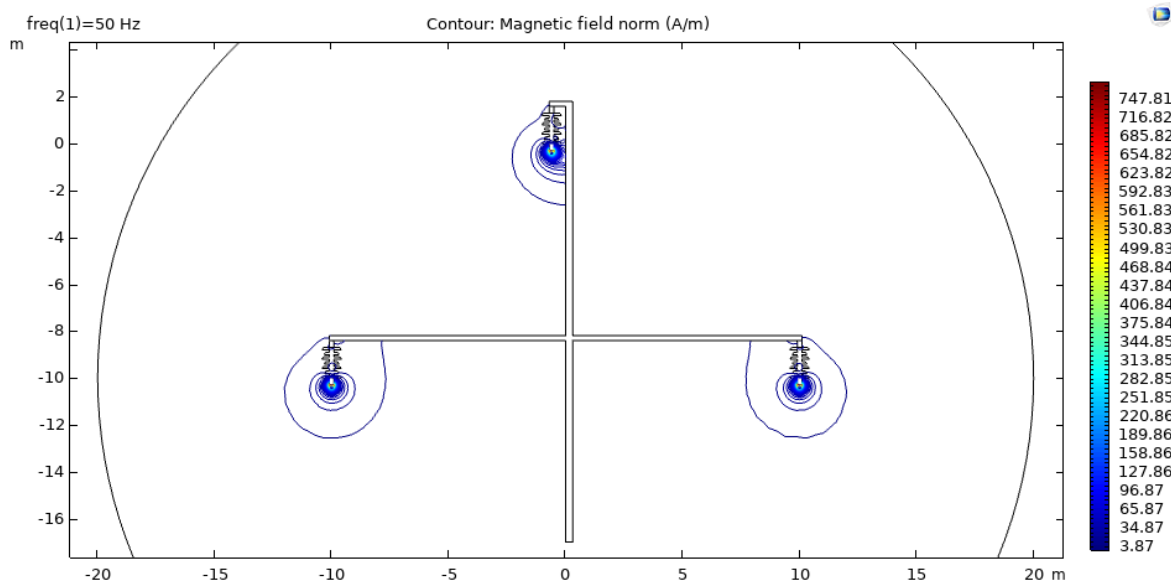
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



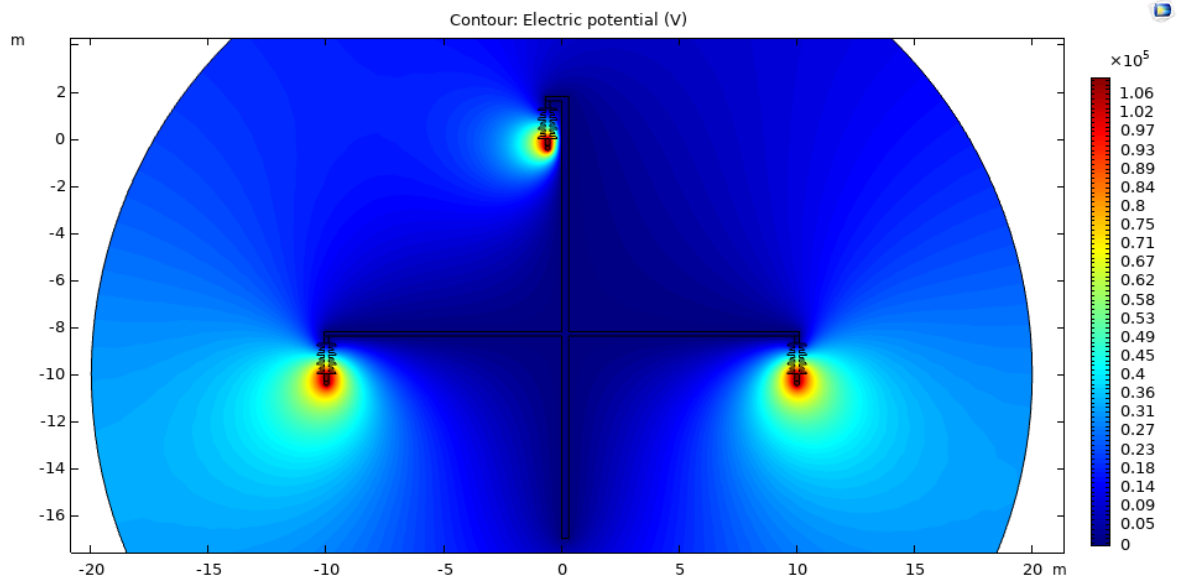
Obr. B6: Rozložení veličiny A



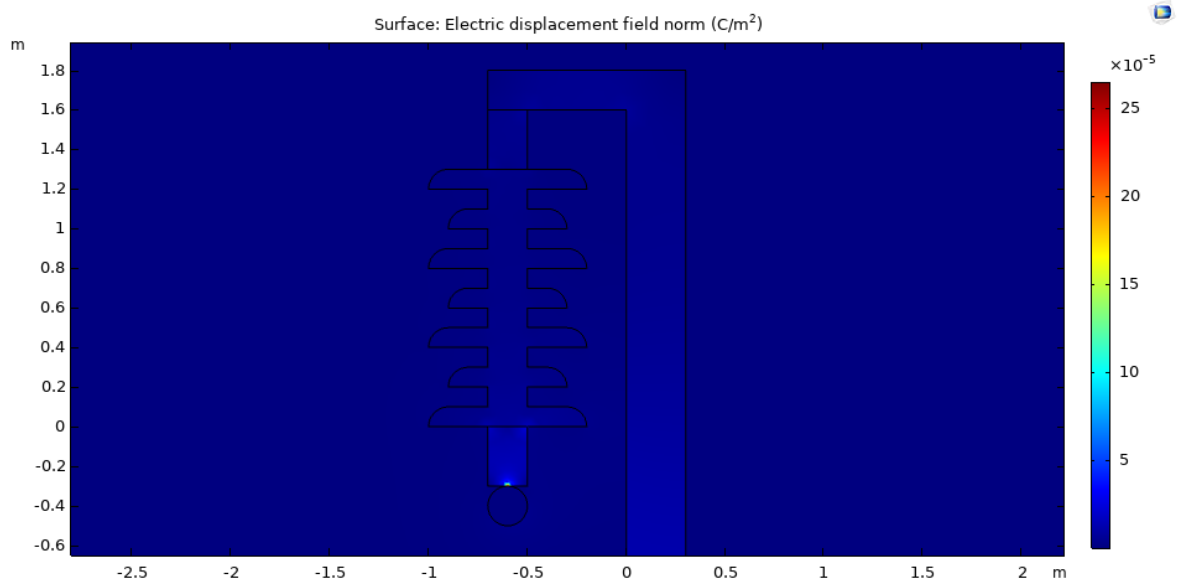
Obr. B7: Rozložení veličiny B , detail vrchního izolátoru



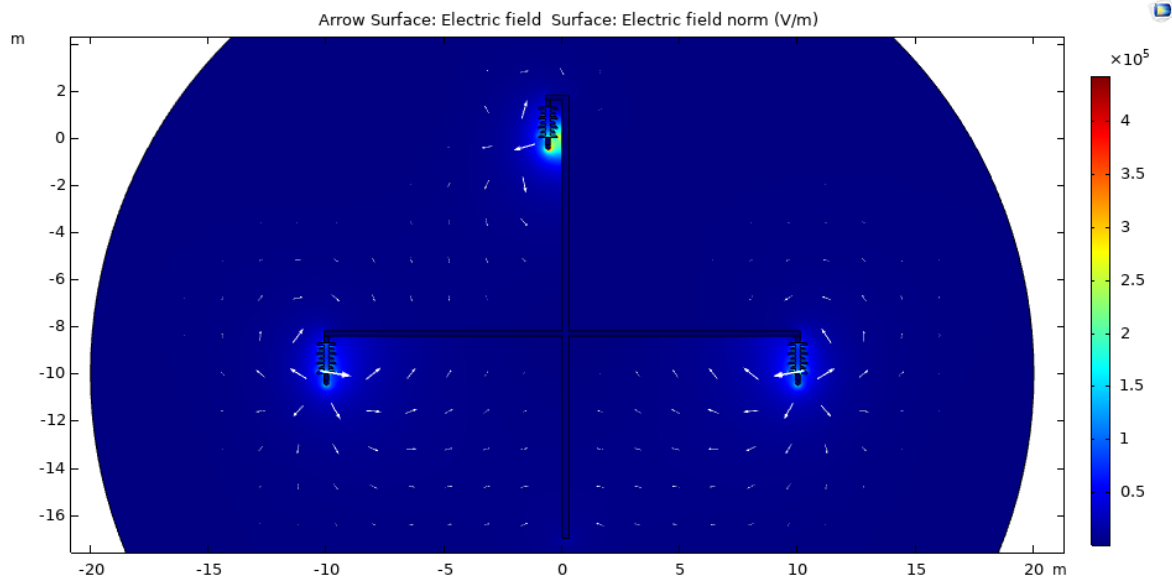
Obr. B8: Rozložení veličiny H



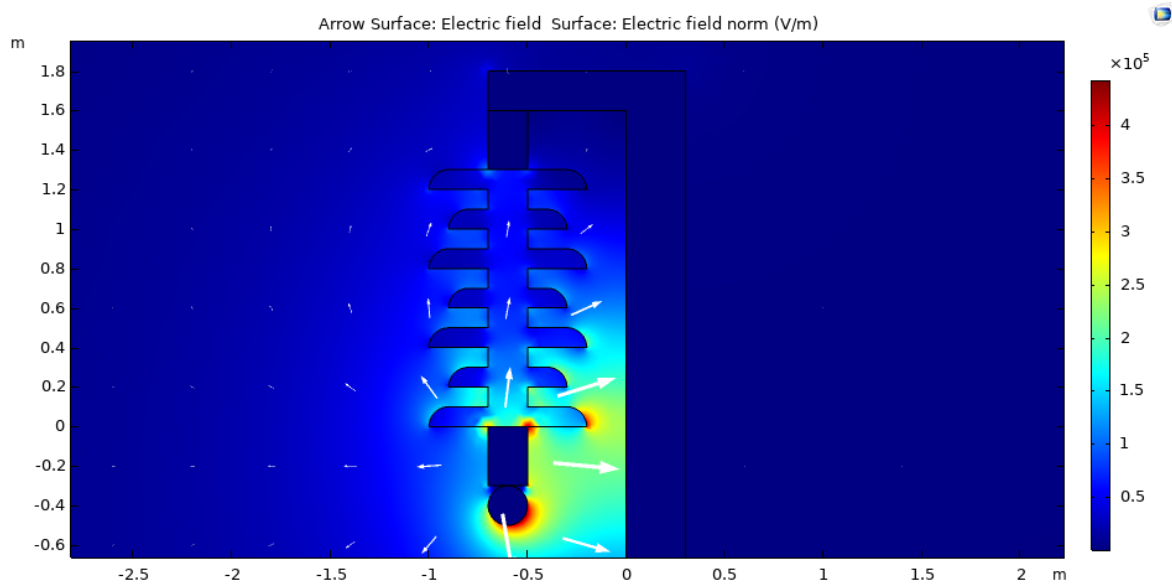
Obr. B9: Rozložení veličiny φ



Obr. B10: Rozložení veličiny D , detail vrchního izolátoru



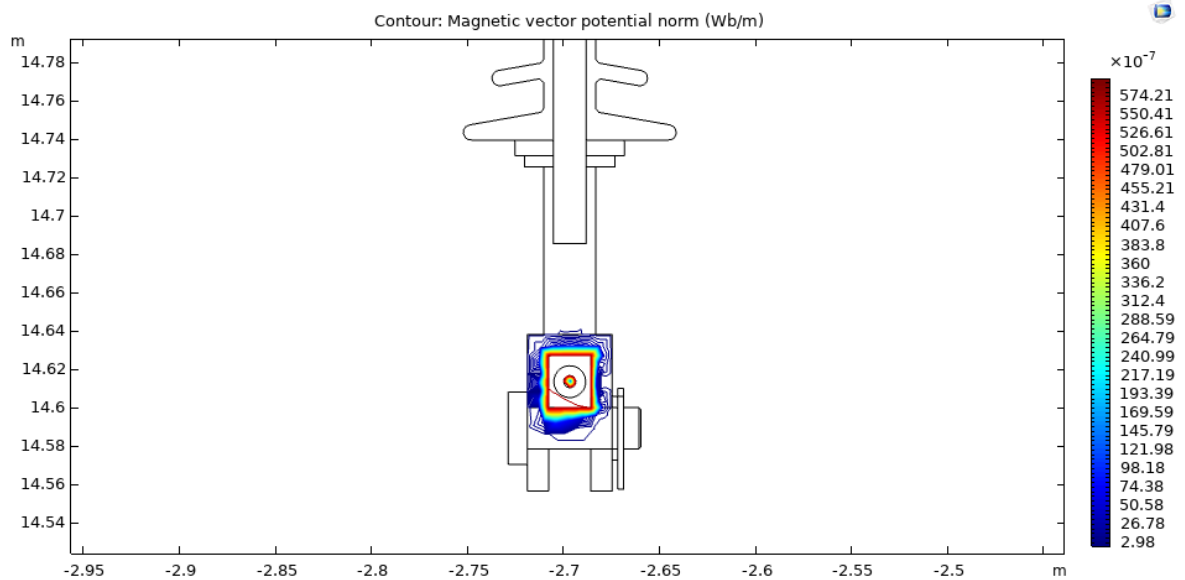
Obr. B11: Rozložení veličiny E



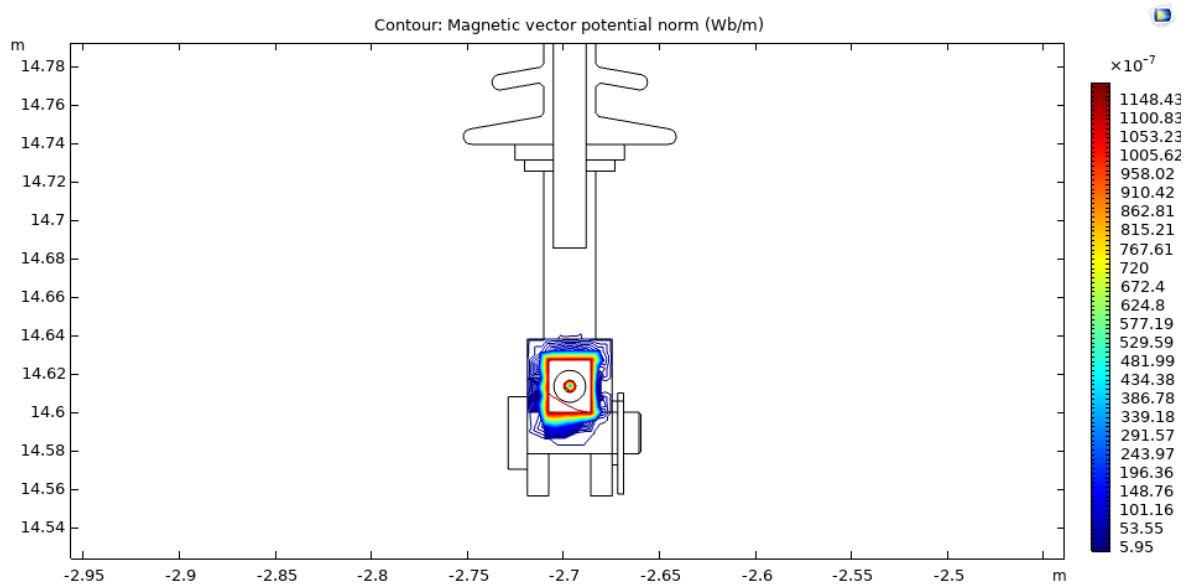
Obr. B12: Rozložení veličiny E , detail vrchního izolátoru

Příloha C – Model izolátoru dle výkresové dokumentace v Příloze A

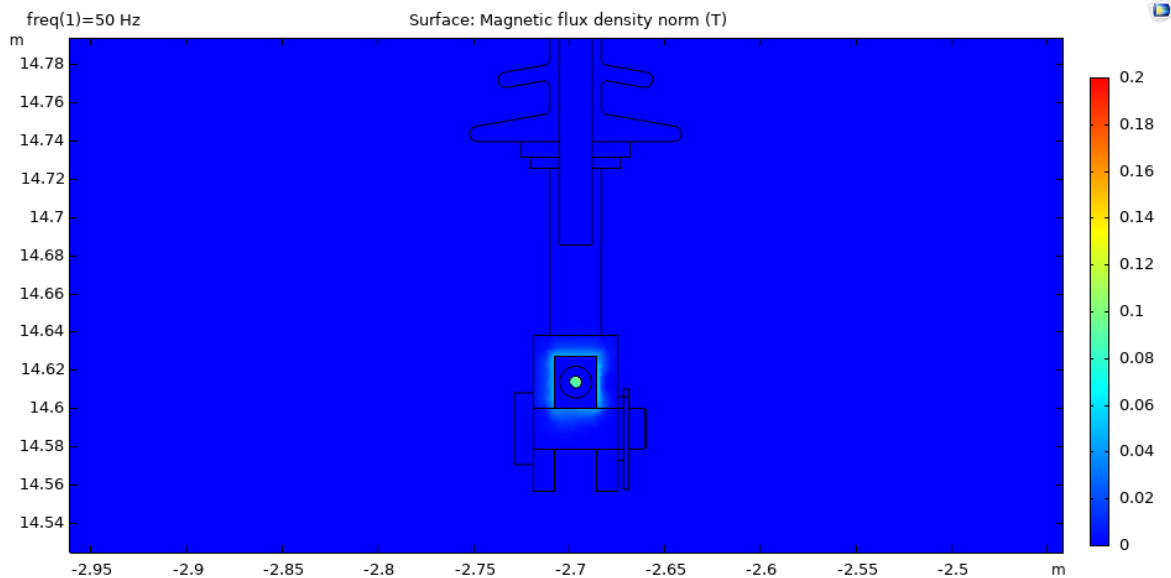
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



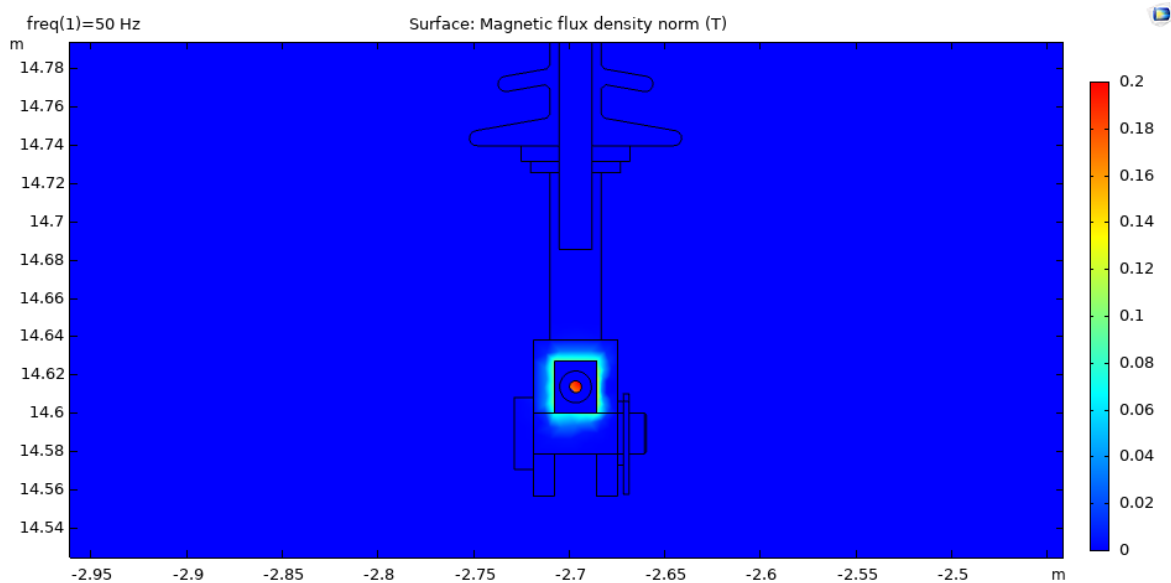
Obr. C1: Rozložení veličiny A při přenášeném výkonu 30 MW



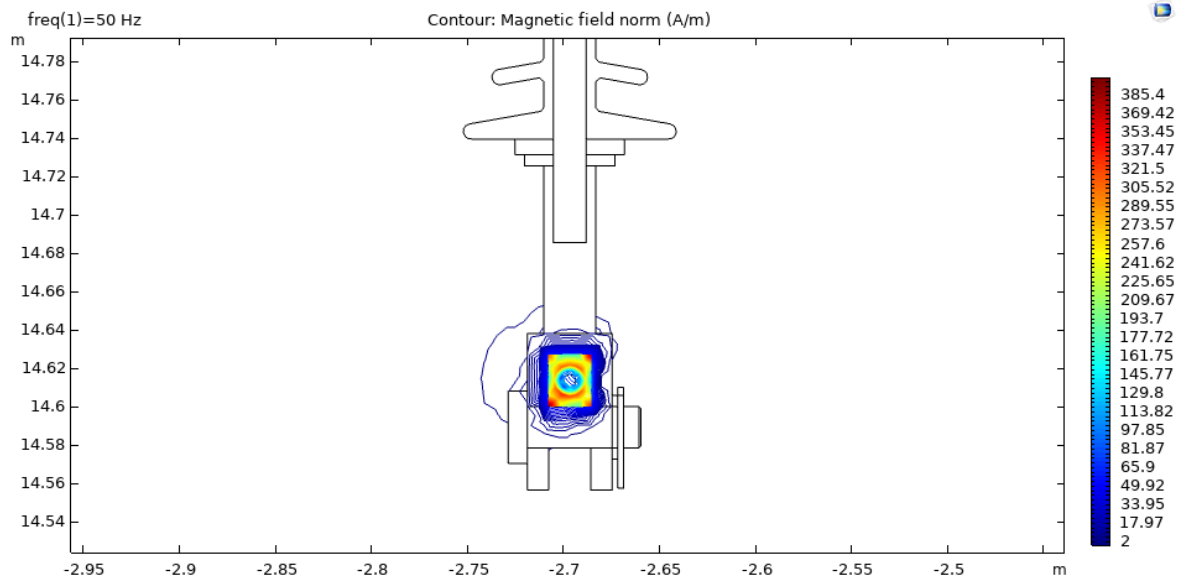
Obr. C2: Rozložení veličiny A při přenášeném výkonu 60 MW



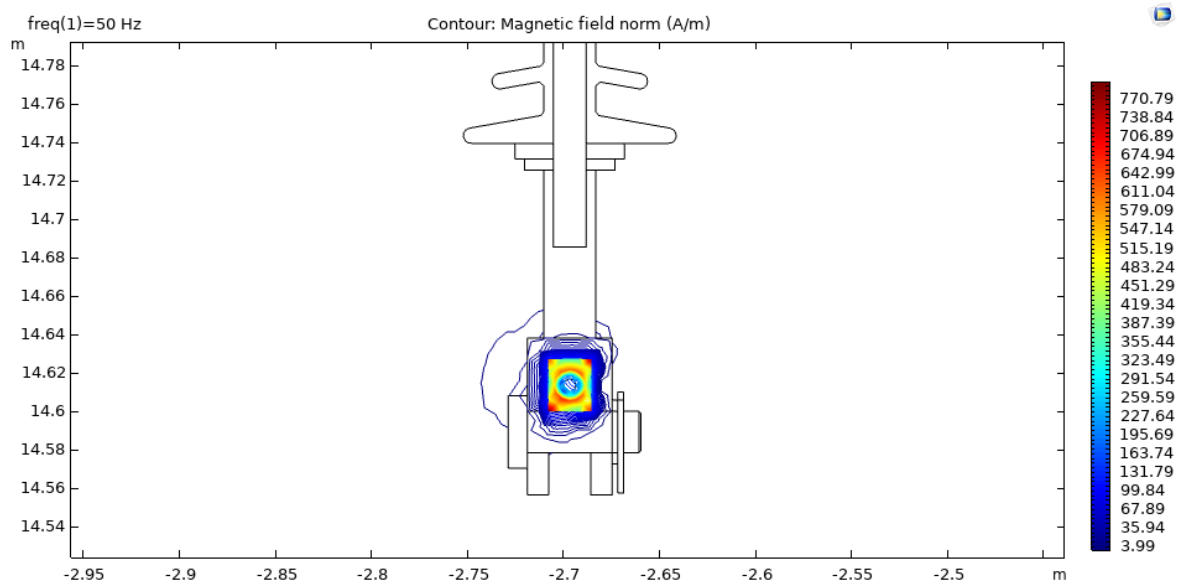
Obr. C3: Rozložení veličiny B při přenášeném výkonu 30 MW



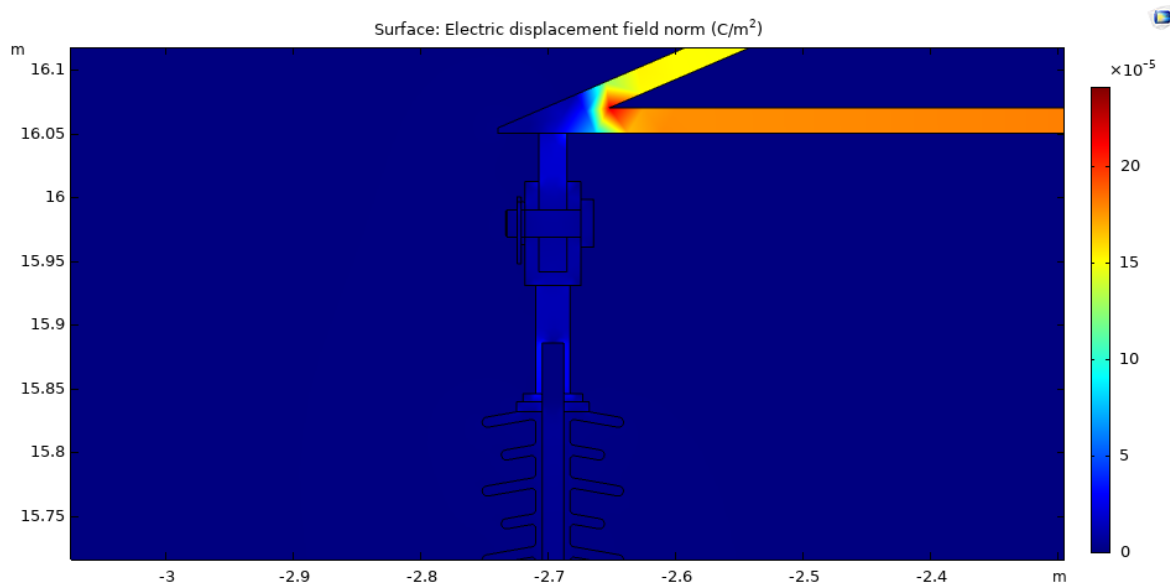
Obr. C4: Rozložení veličiny B při přenášeném výkonu 60 MW



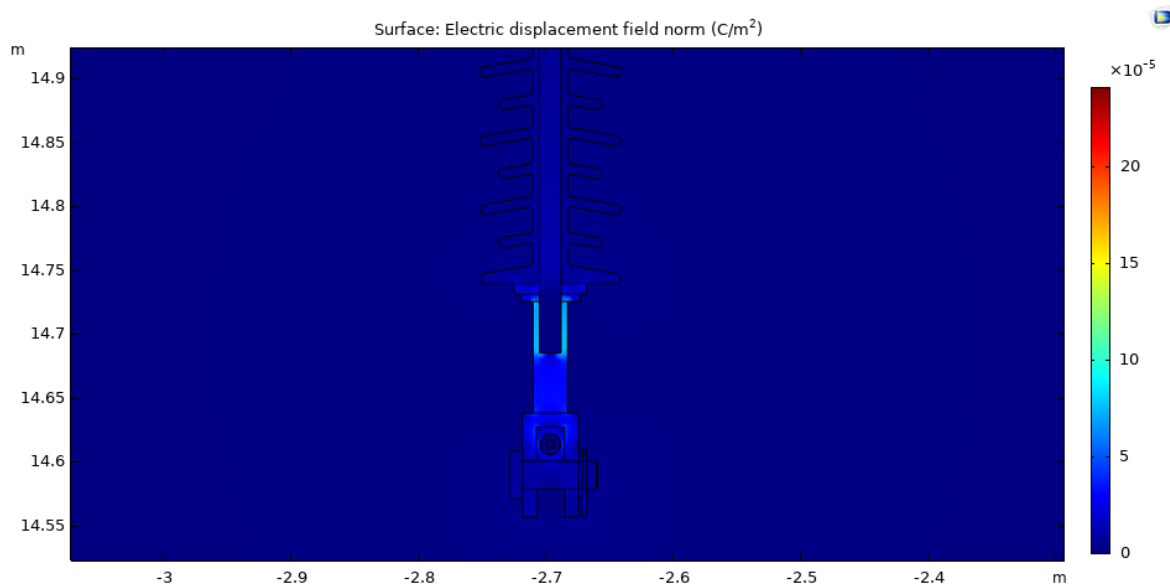
Obr. C5: Rozložení veličiny H při přenášeném výkonu 30 MW



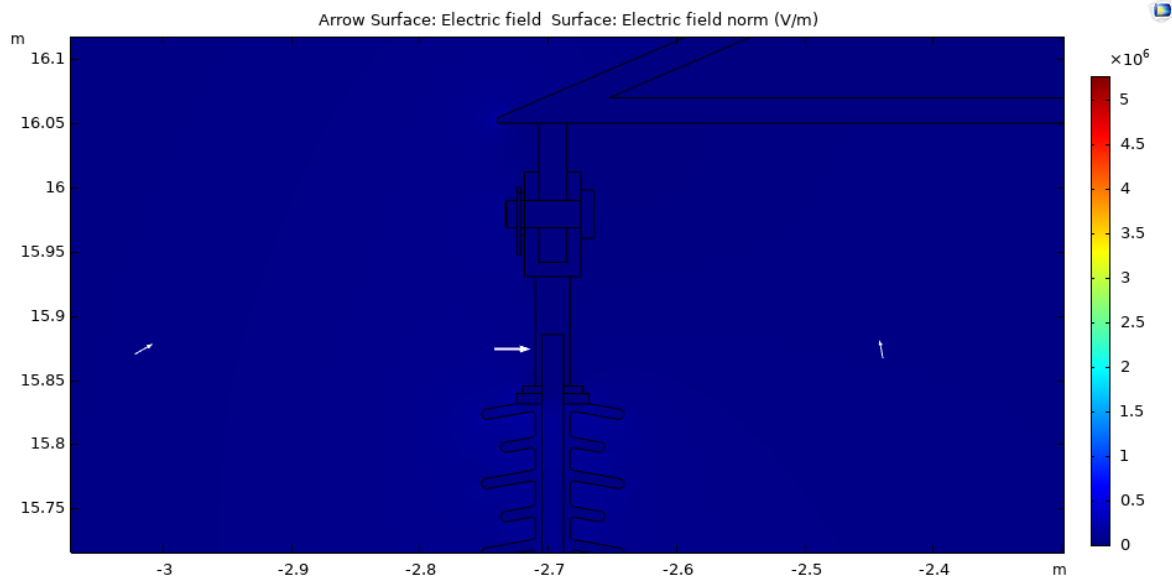
Obr. C6: Rozložení veličiny H při přenášeném výkonu 60 MW



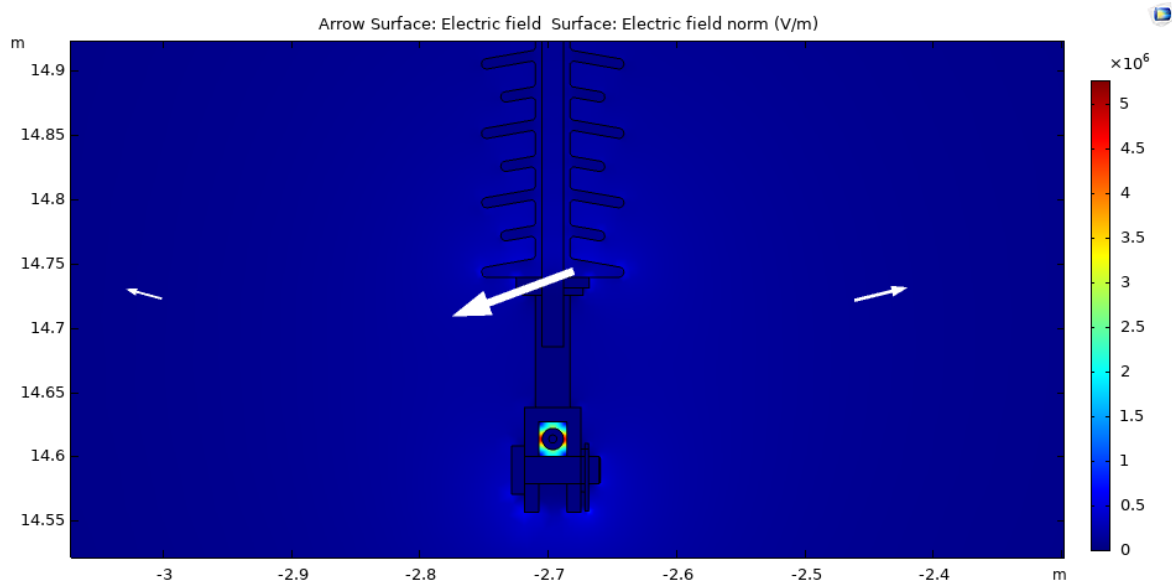
Obr. C7: Rozložení veličiny D , detail na konzoli



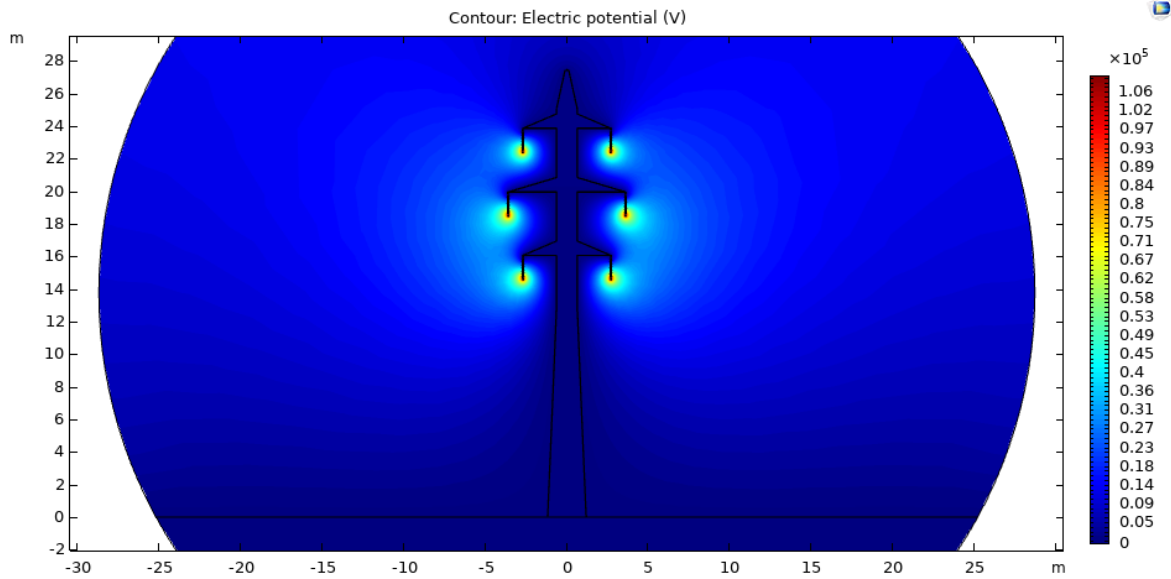
Obr. C8: Rozložení veličiny D , detail na silovou část



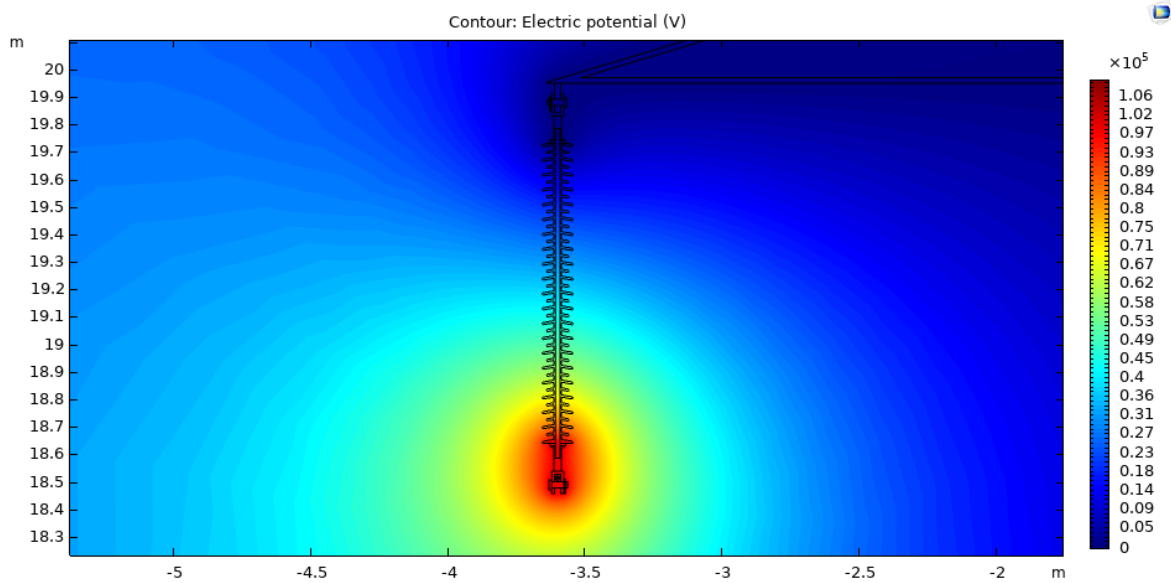
Obr. C9: Rozložení veličiny E , detail na konzoli



Obr. C10: Rozložení veličiny E , detail na silovou část



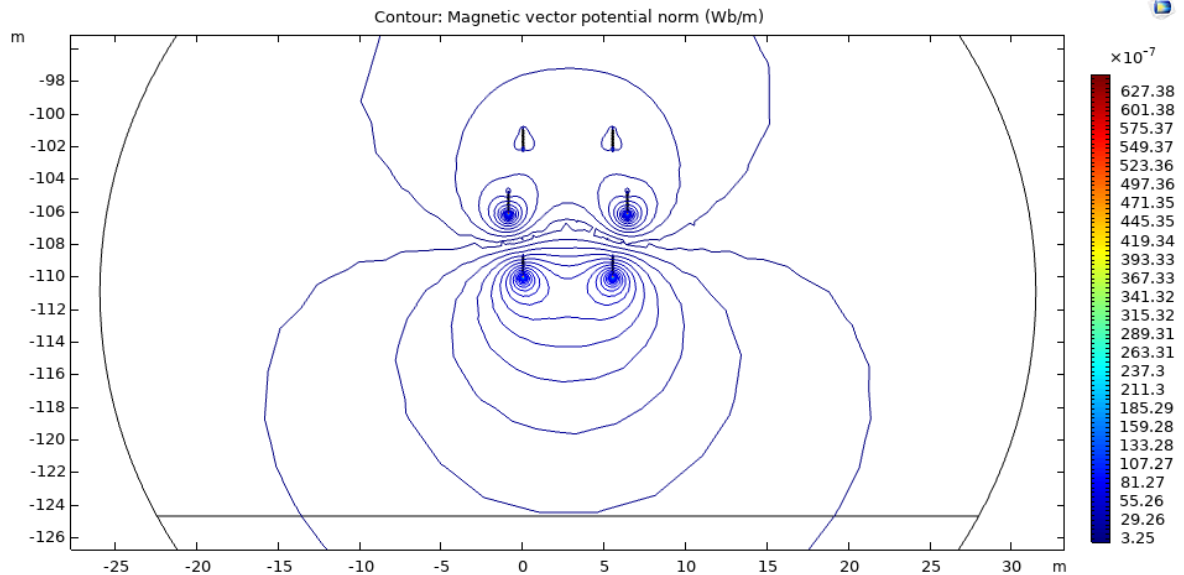
Obr. C11: Rozložení veličiny φ



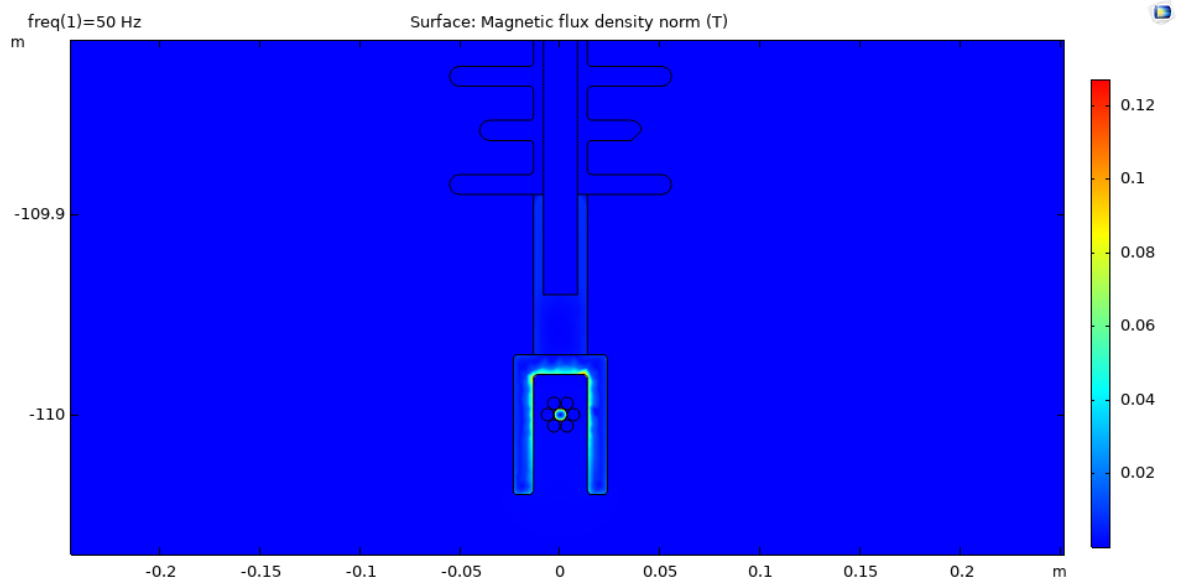
Obr. C12: Rozložení veličiny φ , detail tyčového izolátoru

Příloha D – Elementární izolátory v reálné výšce nad zemí, konst. napětí 110 kV, bez uvažování stožáru

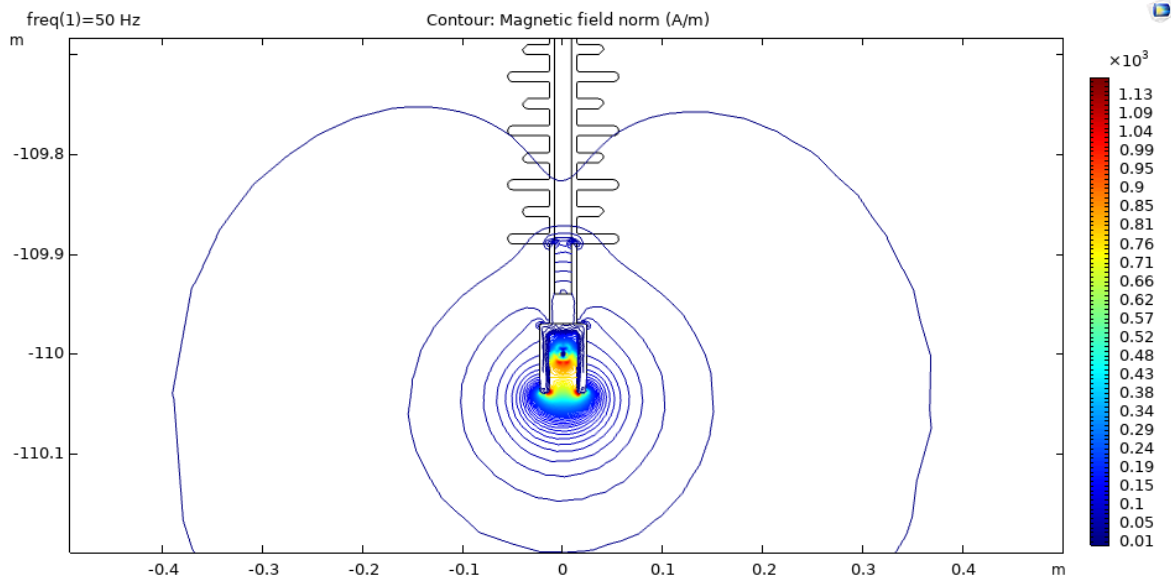
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



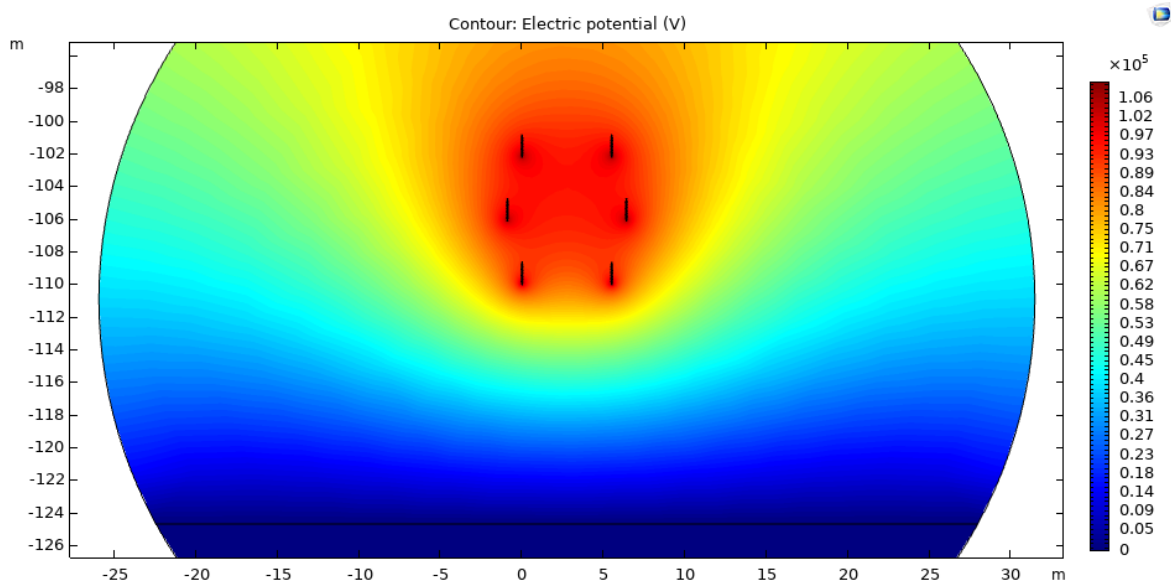
Obr. D1: Rozložení veličiny A



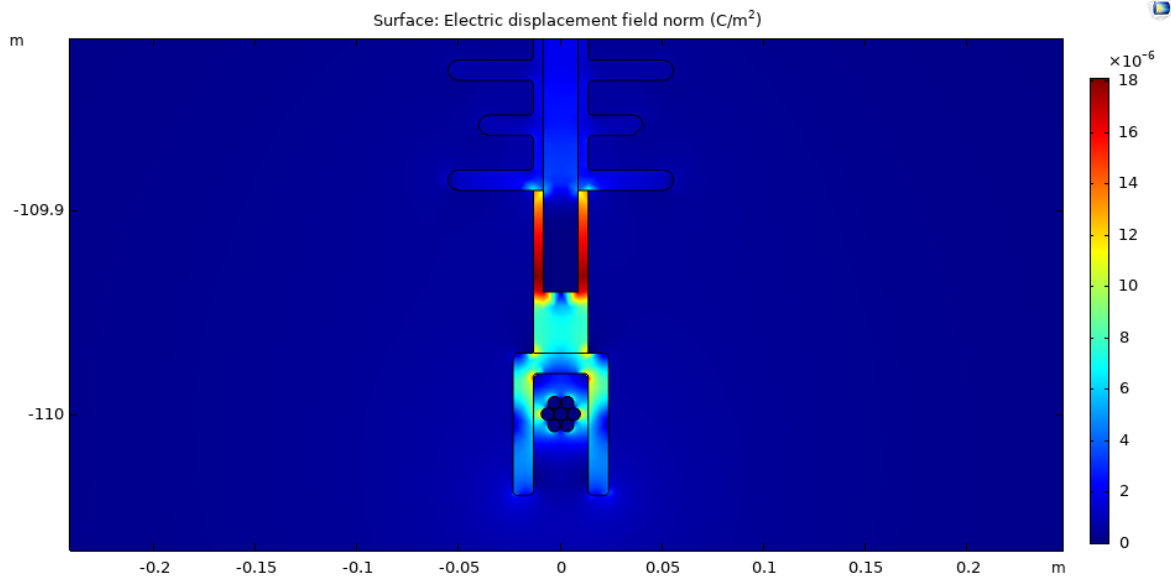
Obr. D2: Rozložení veličiny B



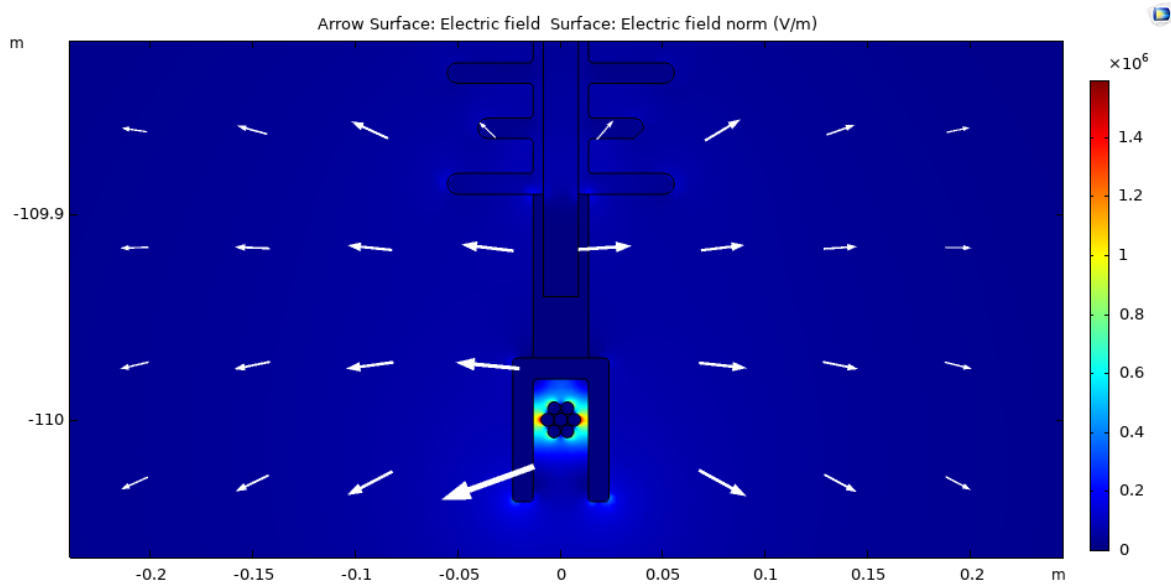
Obr. D3: Rozložení veličiny H



Obr. D4: Rozložení veličiny φ



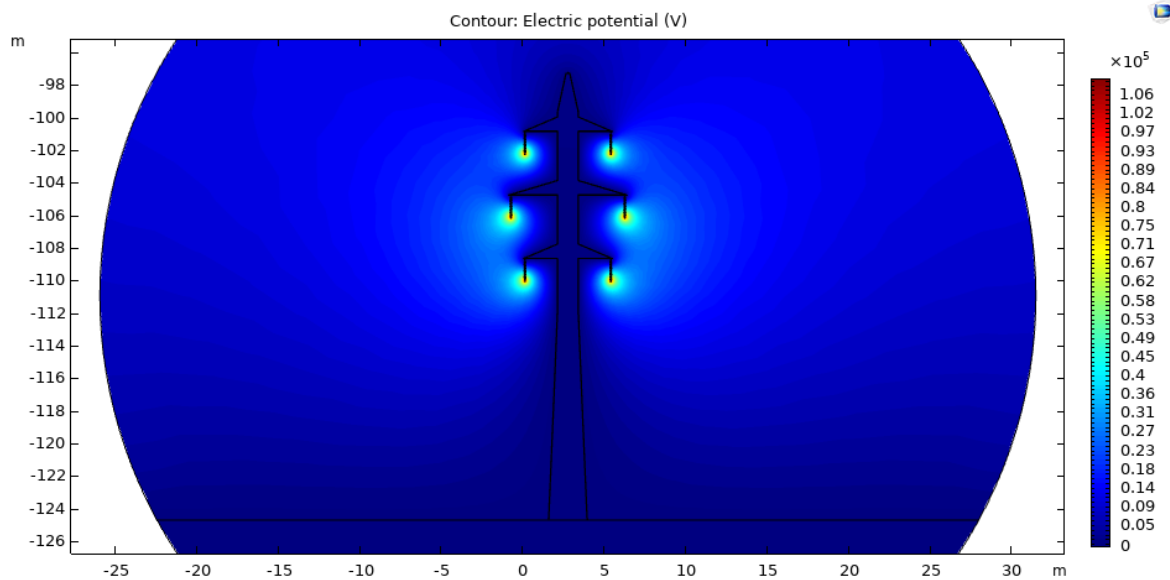
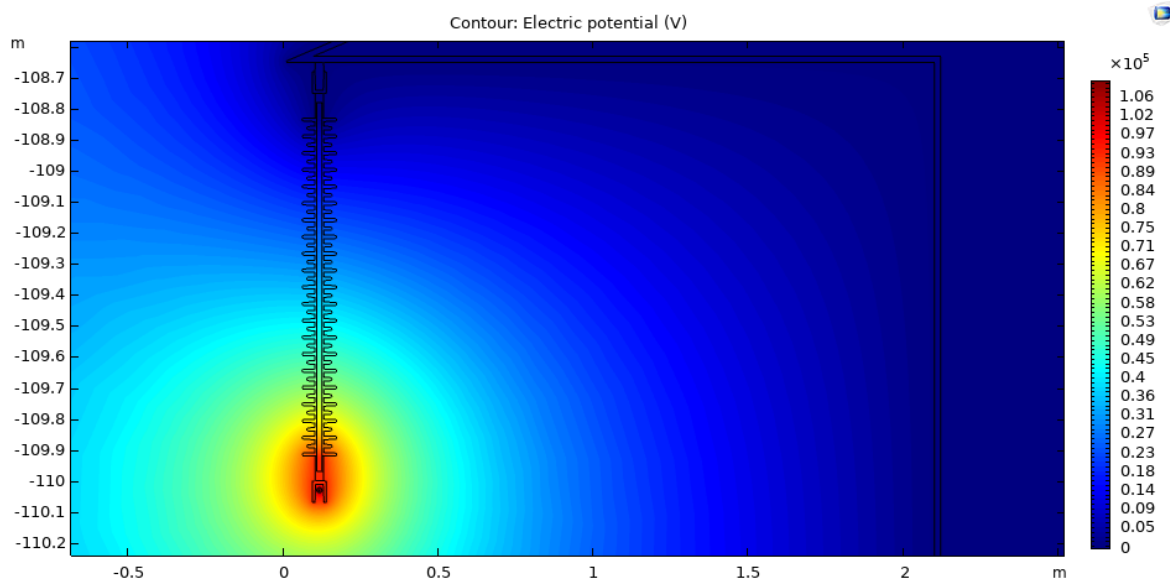
Obr. D5: Rozložení veličiny D , silová část izolátoru

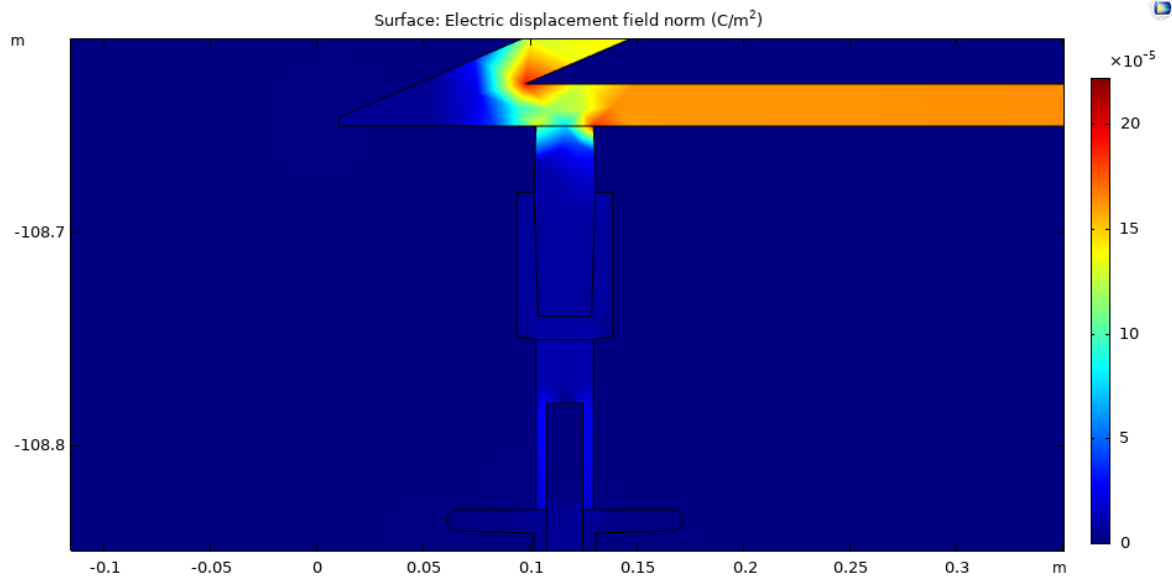


Obr. D6: Rozložení veličiny E , silová část izolátoru

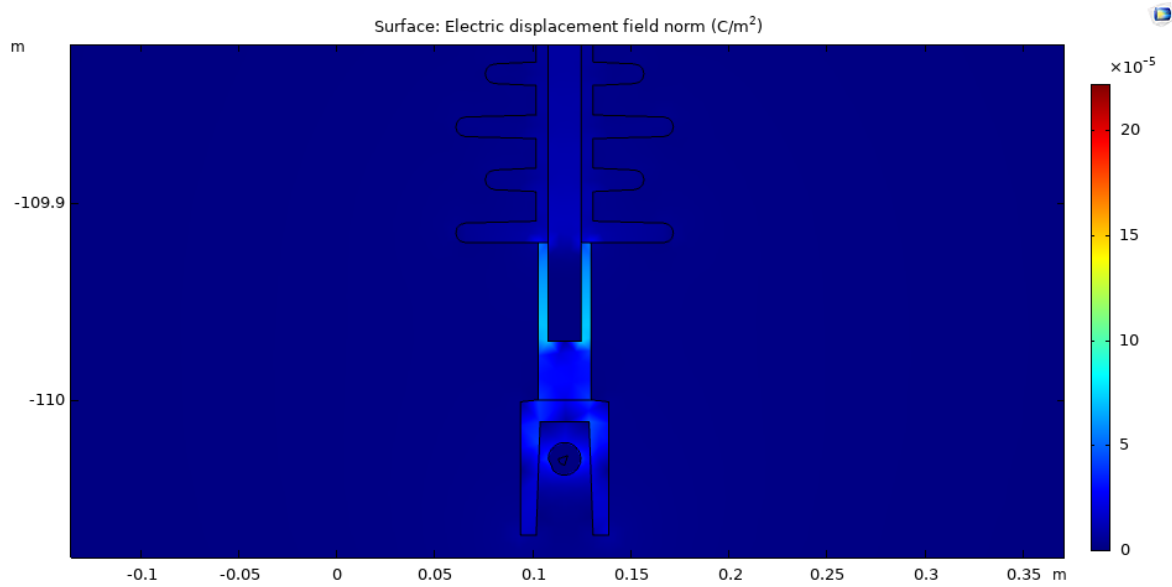
Příloha E – Elementární izolátory zavěšené na konzoli stožáru

Grafické výstupy COMSOL Multiphysics

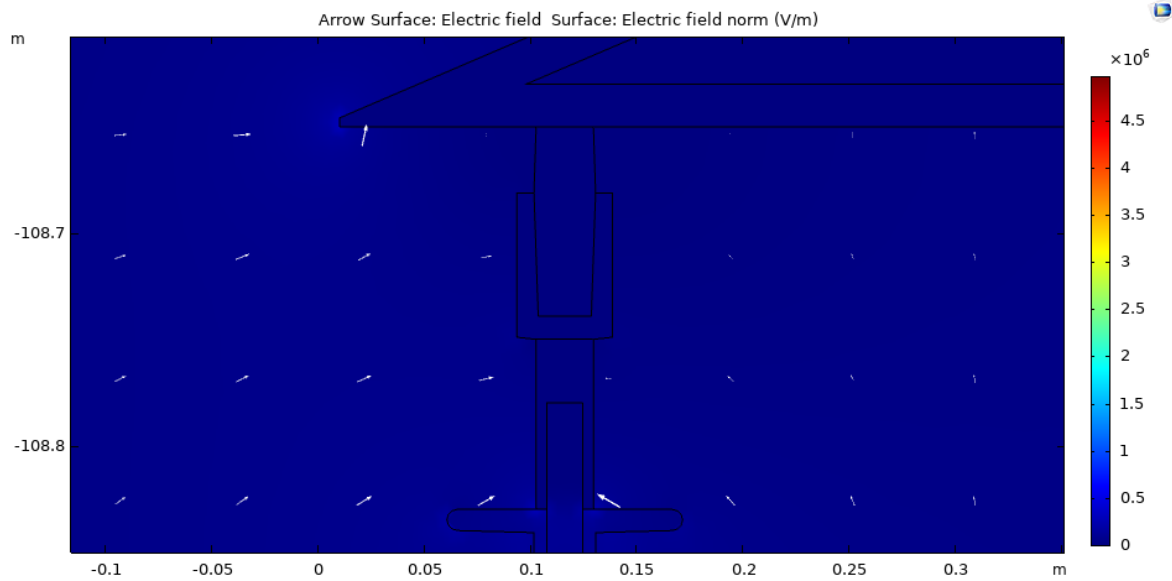
Obr. E1: Rozložení veličiny φ Obr. E2: Rozložení veličiny φ , detail izolátoru



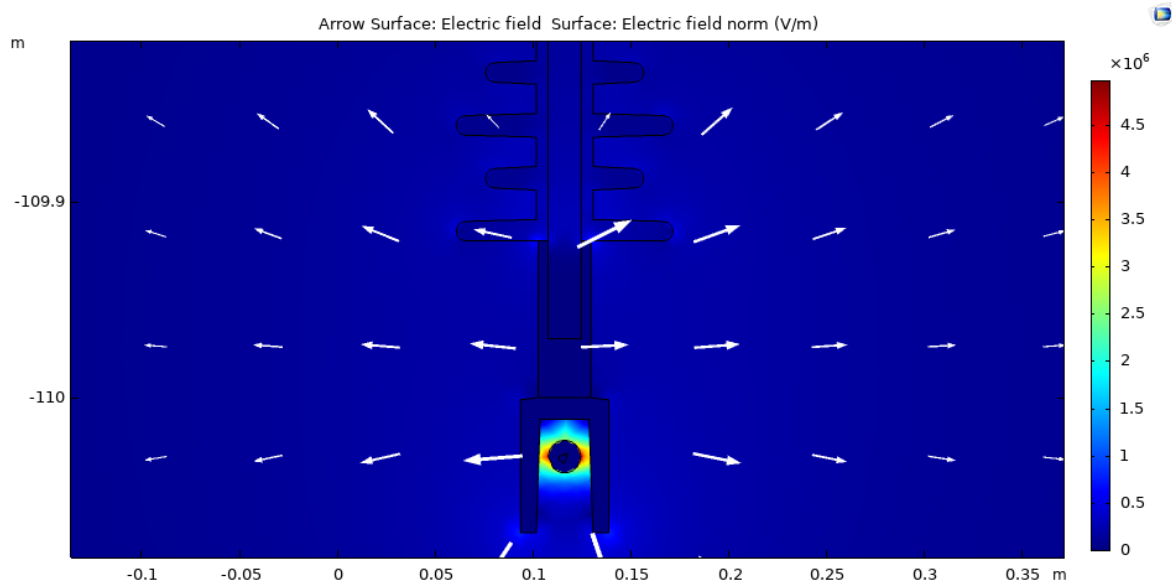
Obr. E3: Rozložení veličiny D , kotevní část izolátoru



Obr. E4: Rozložení veličiny D , silová část izolátoru



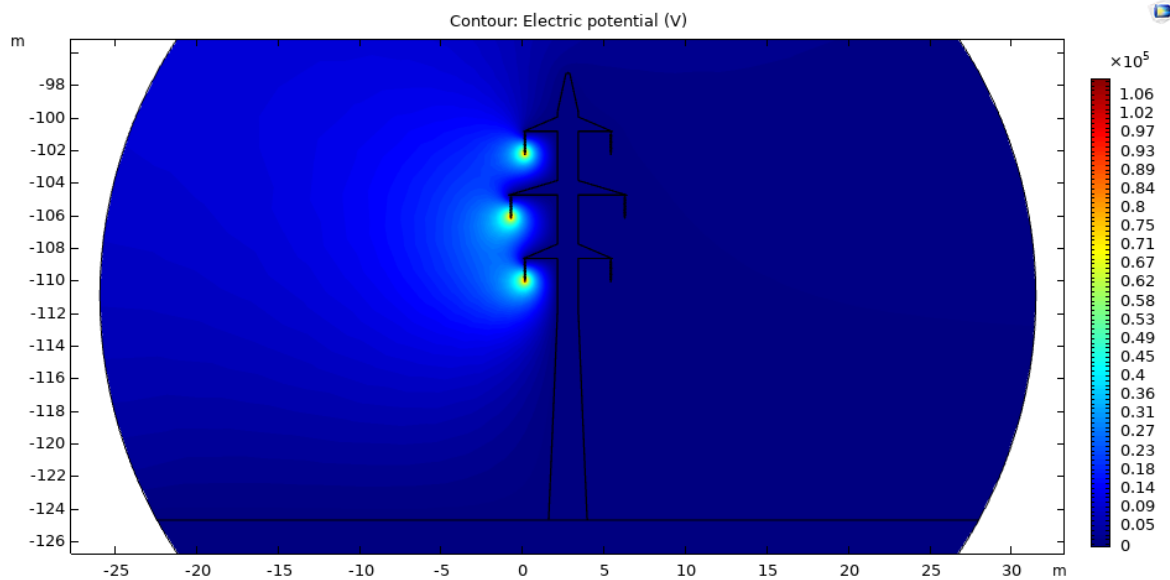
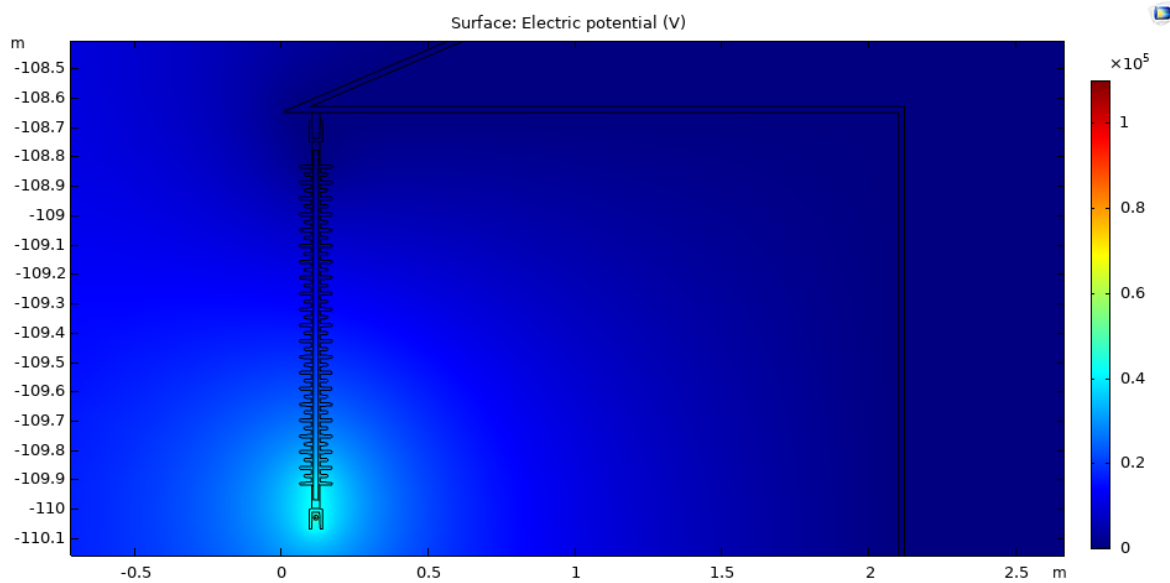
Obr. E5: Rozložení veličiny E , kotevní část izolátoru

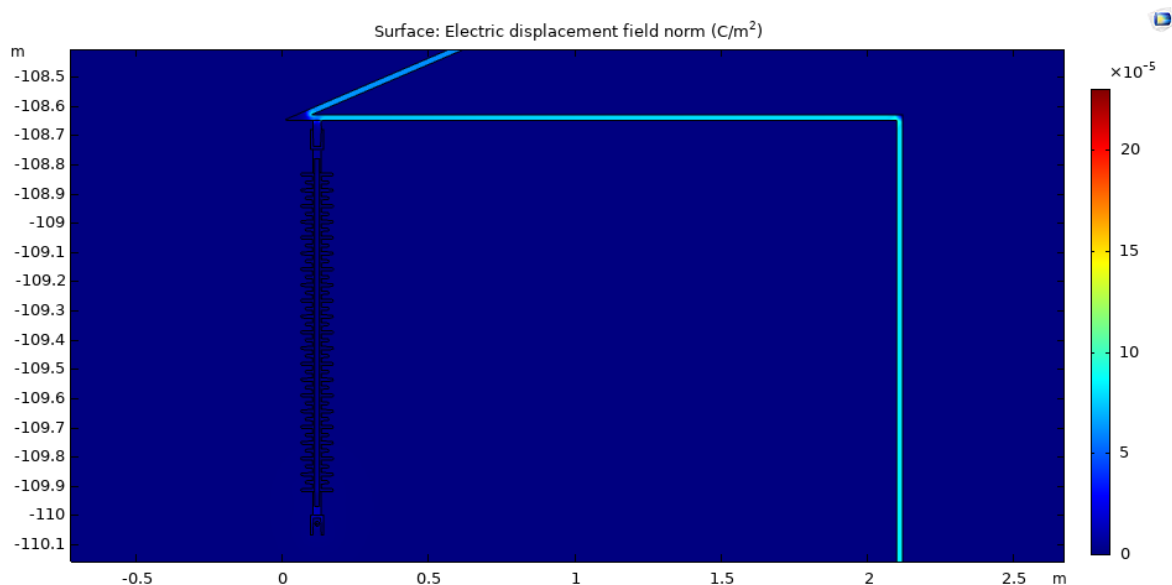


Obr. E6: Rozložení veličiny E , silová část izolátoru

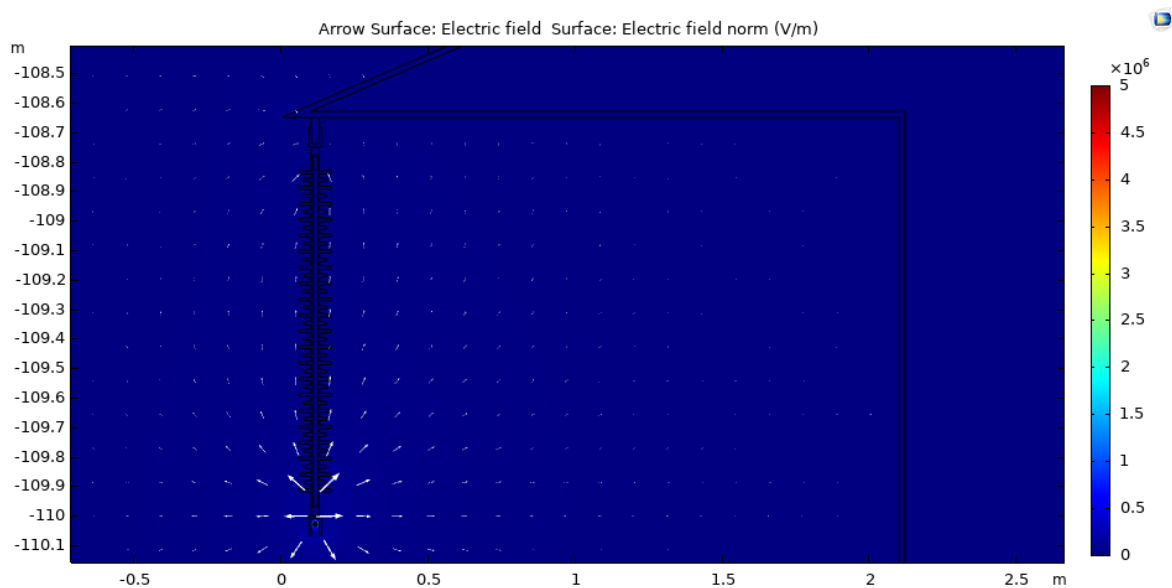
Příloha F – Změny v napájení

Grafické výstupy COMSOL Multiphysics

*Obr. F1: Rozložení potenciálu φ při napájení pouze části vedení 110 kV**Obr. F2: Rozložení potenciálu při sníženém napětí 50 kV*



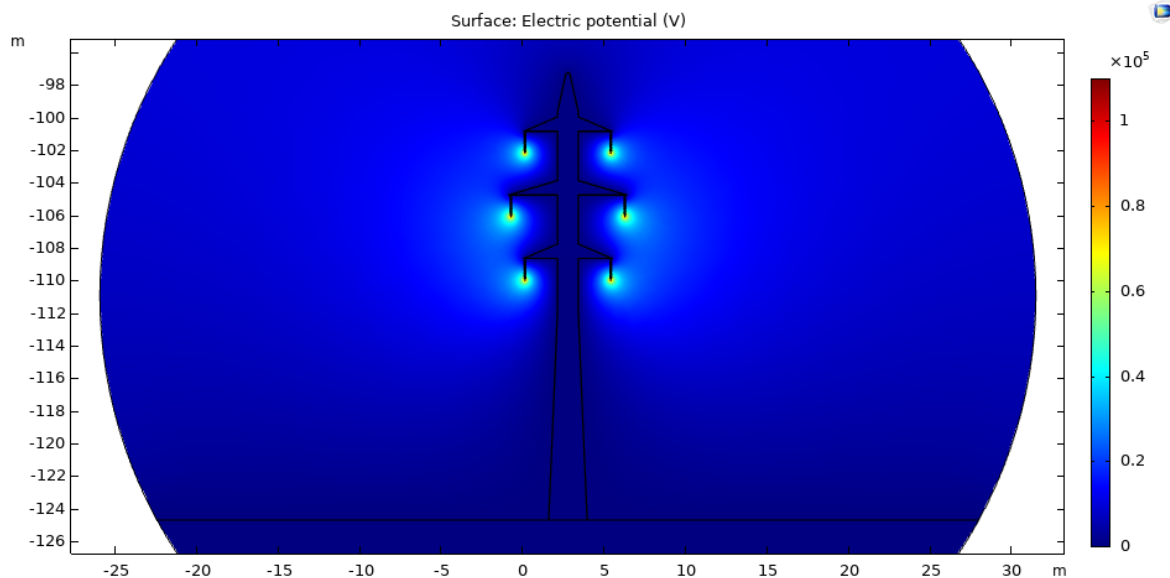
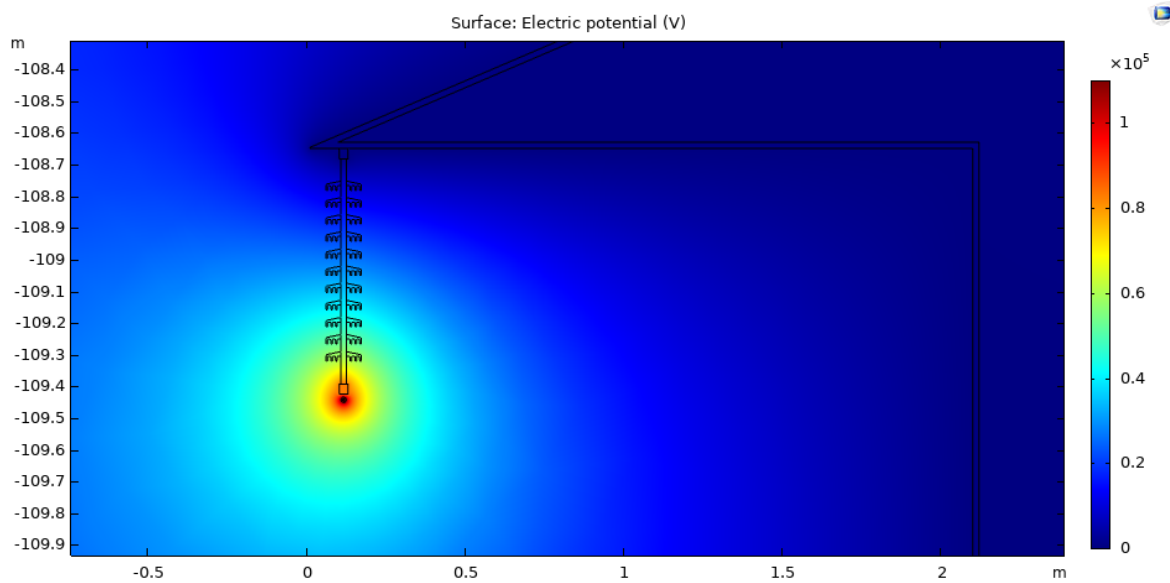
Obr. F3: Rozložení elektrické indukce při sníženém napětí 50 kV

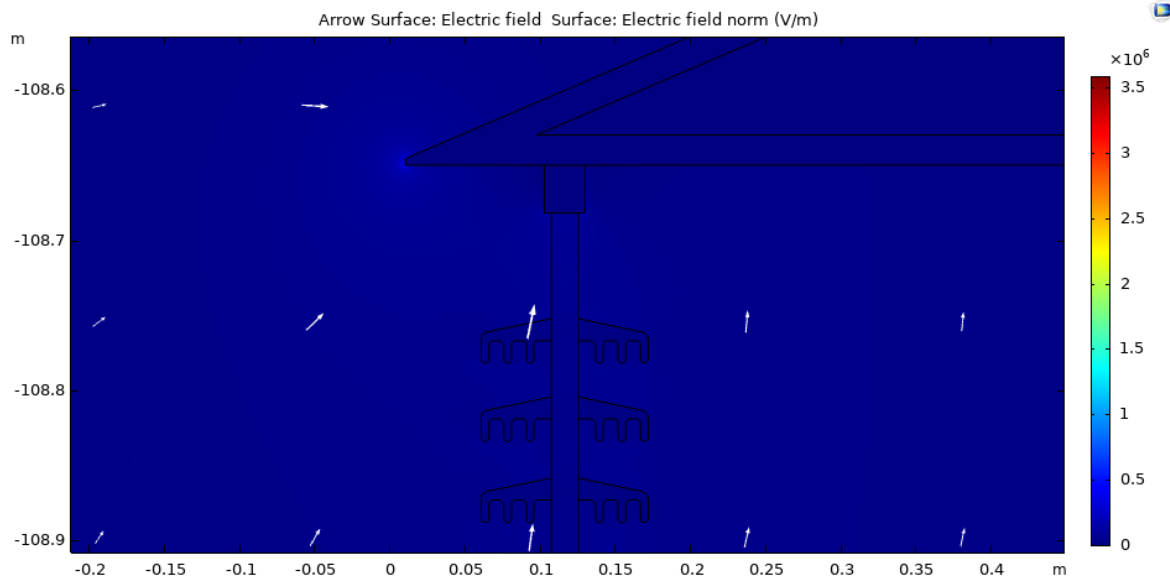


Obr. F4: Rozložení elektrické intenzity při sníženém napětí 50 kV

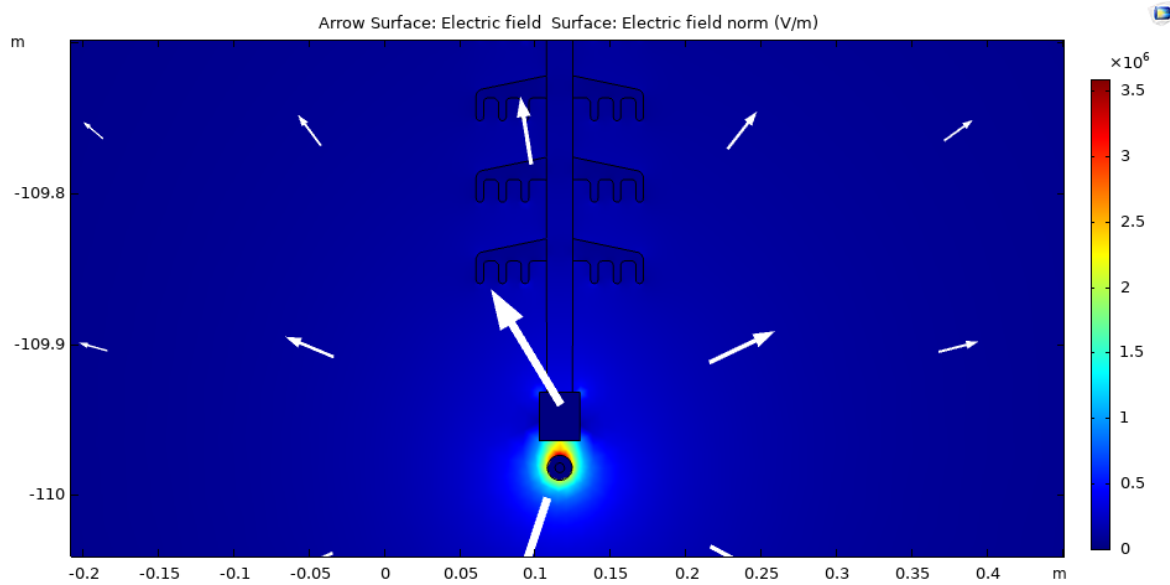
Příloha G – Zjednodušená konstrukce skleněných čapkových izolátorů

Grafické výstupy COMSOL Multiphysics

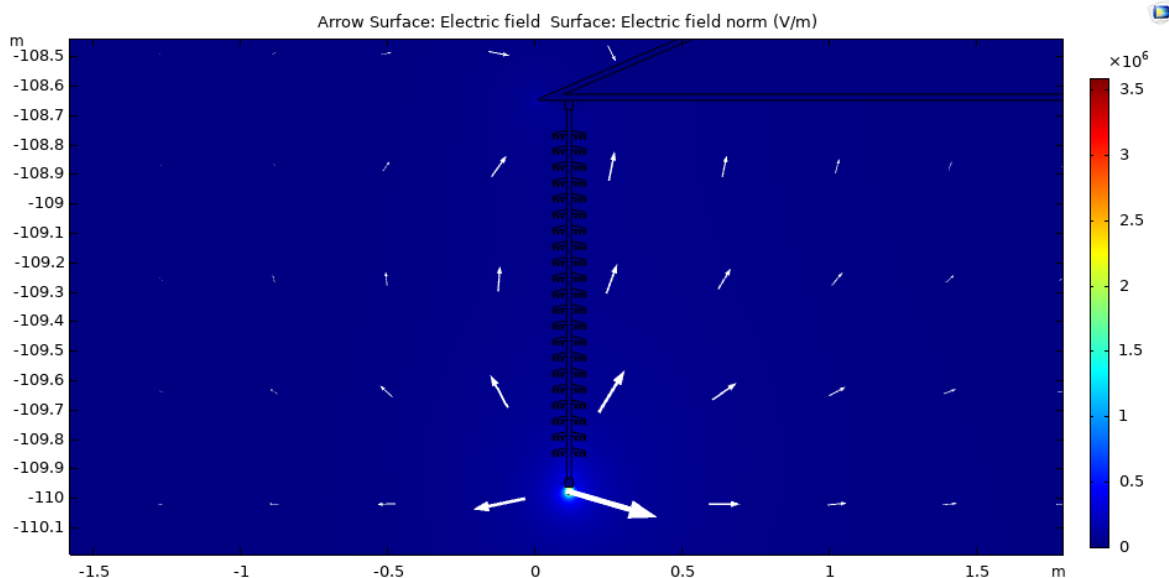
*Obr. G1: Celkové rozložení potenciálu ϕ : 110 kV, 30 MW, 21 čapek izolátoru**Obr. G2: Rozložení potenciálu ϕ : 110 kV, 30 MW, 11 čapek izolátoru*



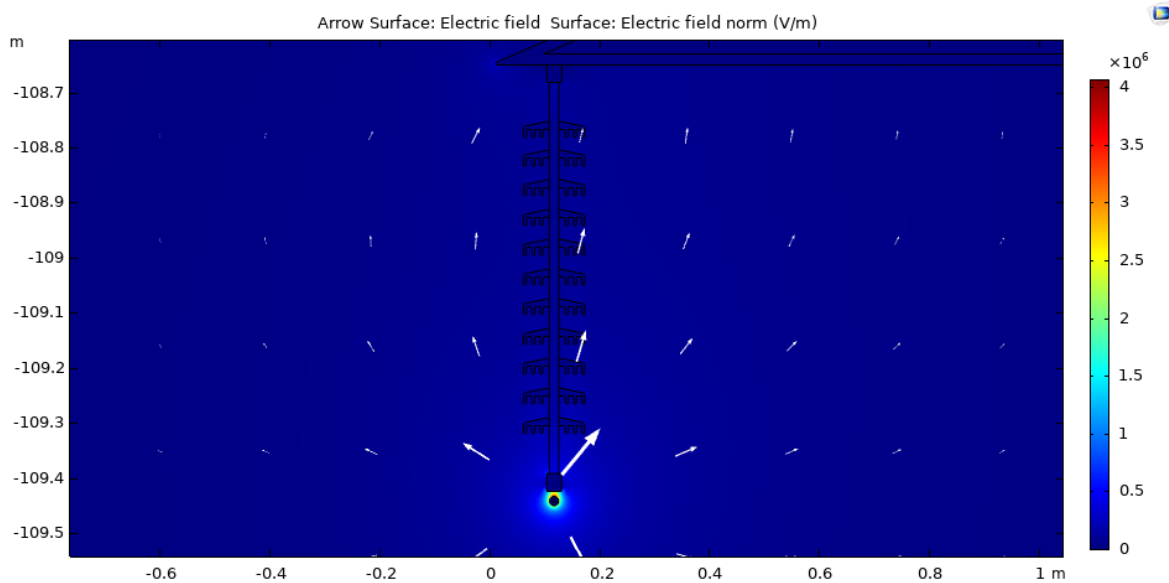
Obr. G3: Rozložení veličiny E v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



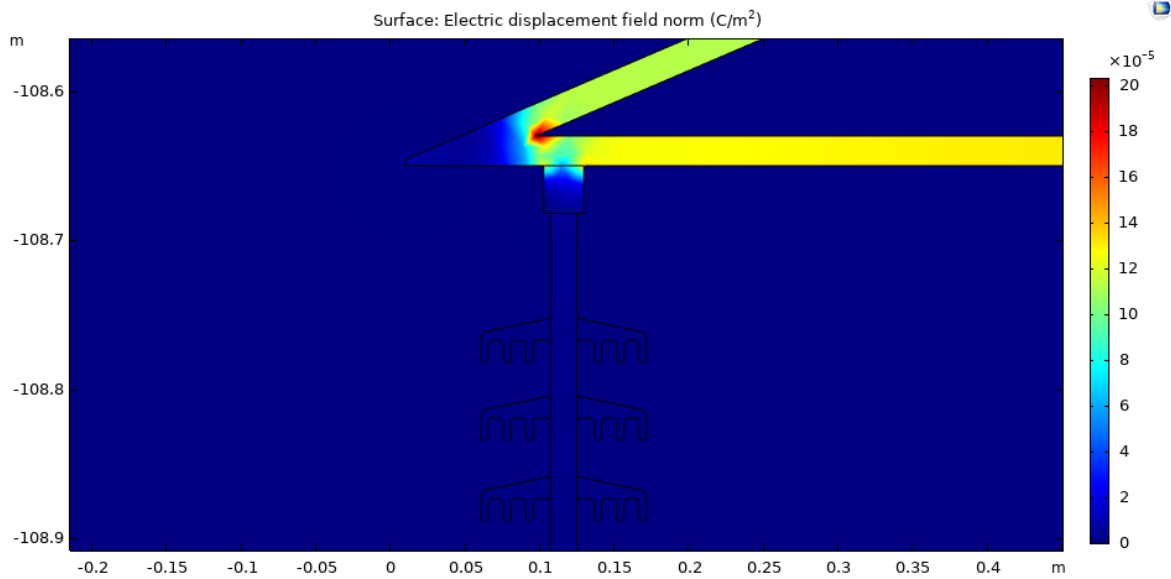
Obr. G4: Rozložení veličiny E v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



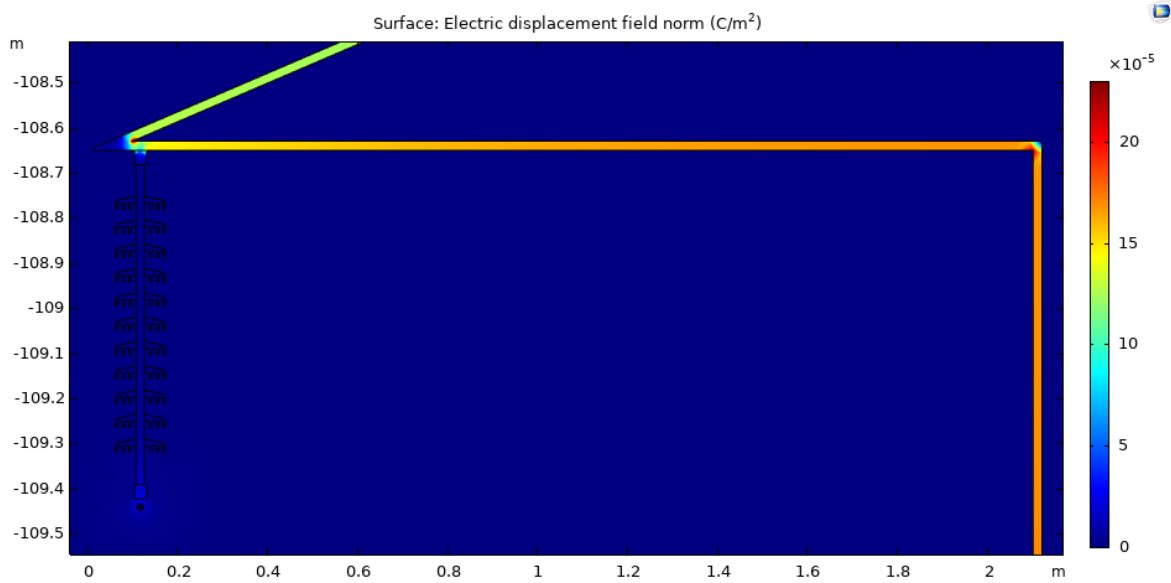
Obr. G5: Rozložení veličiny E v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



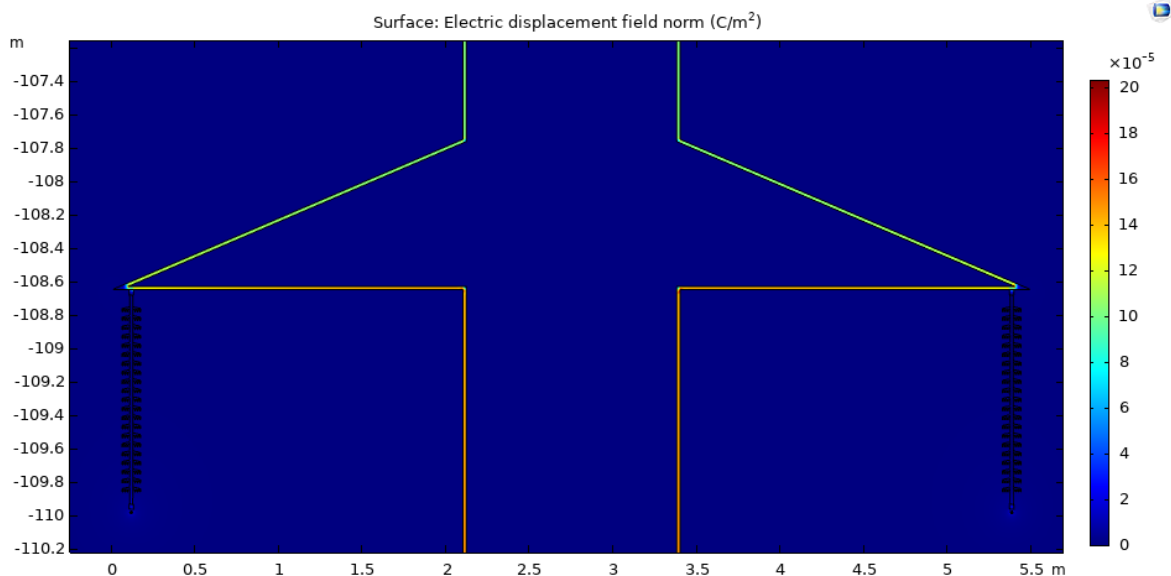
Obr. G6: Rozložení veličiny E v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)



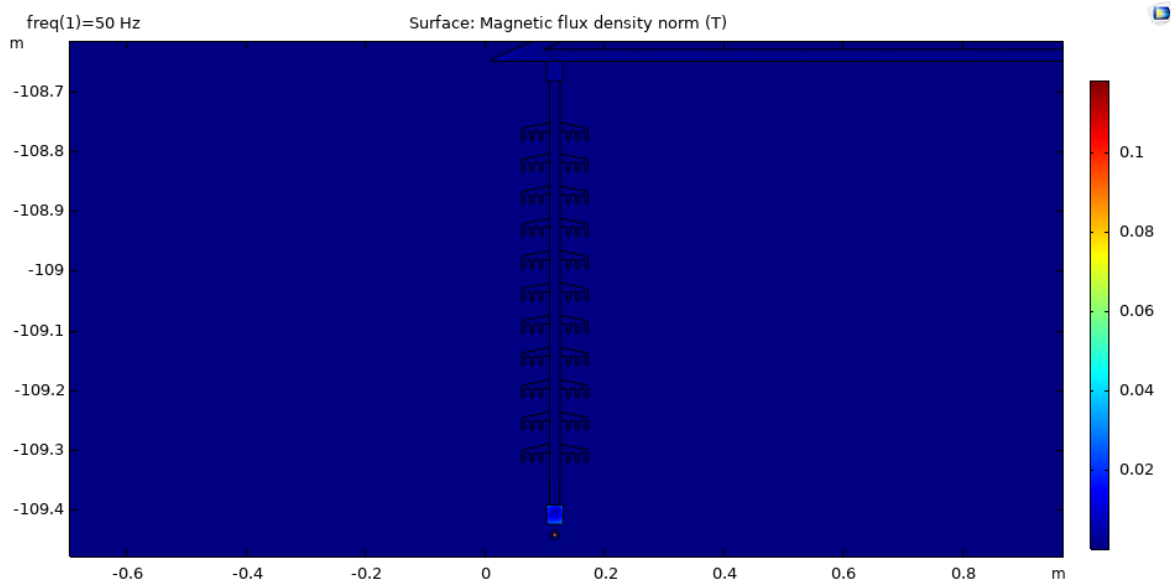
Obr. G7: Rozložení veličiny D v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



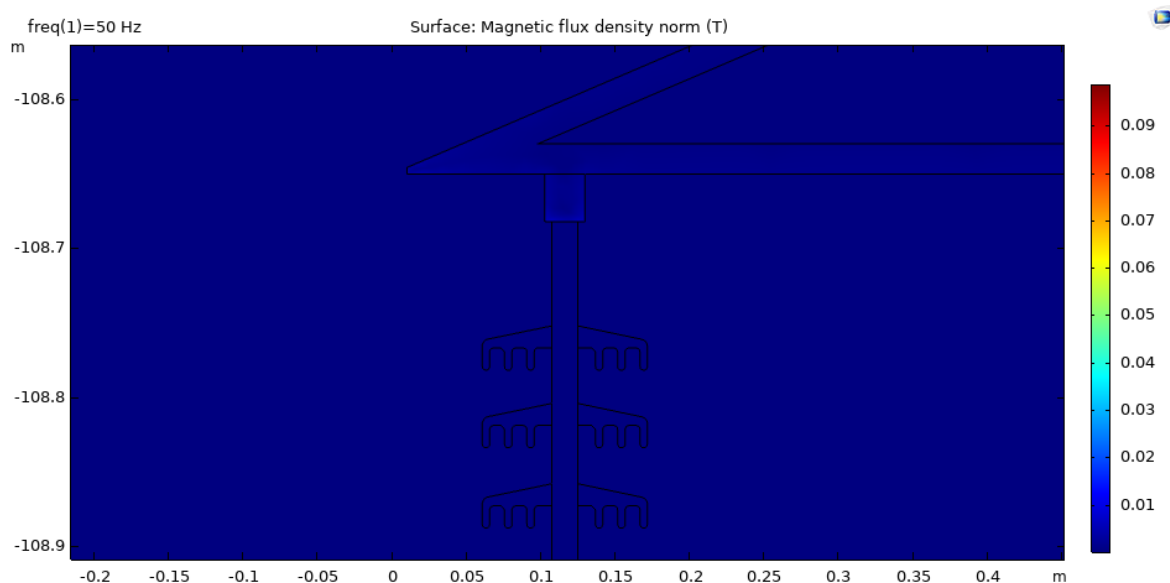
Obr. G8: Rozložení veličiny D v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)



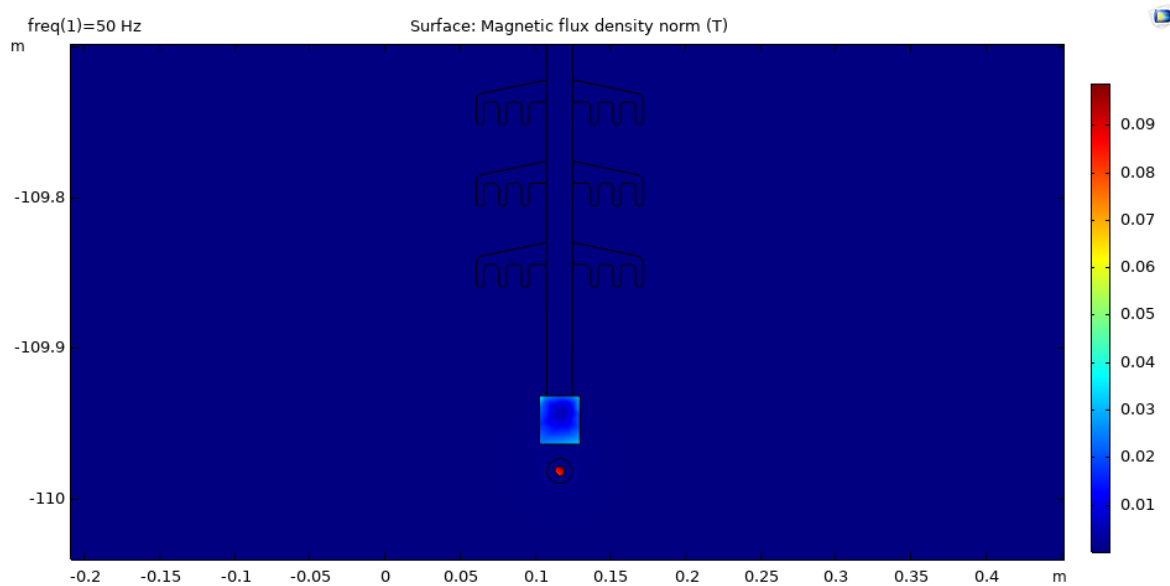
Obr. G9: Rozložení veličiny D , detail na dolní konzole
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)



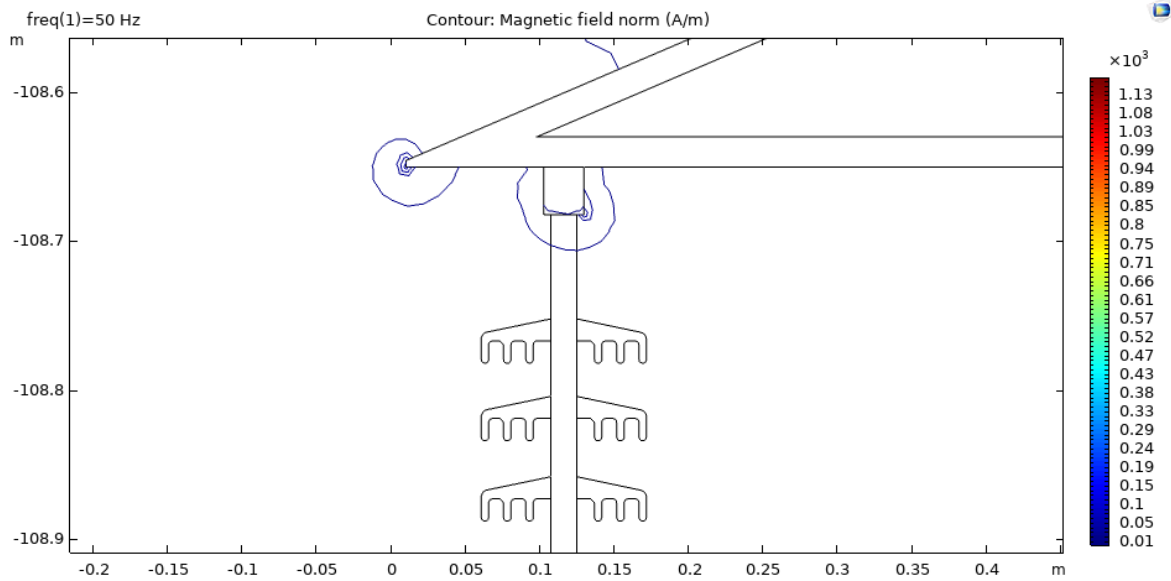
Obr. G10: Rozložení veličiny B v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)



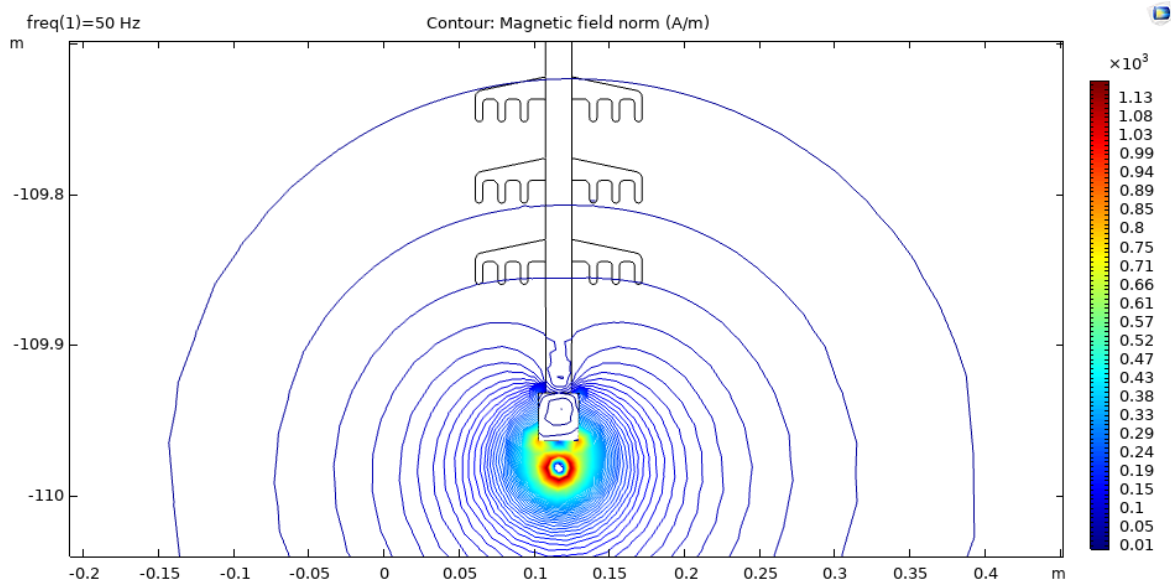
Obr. G11: Rozložení veličiny B v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



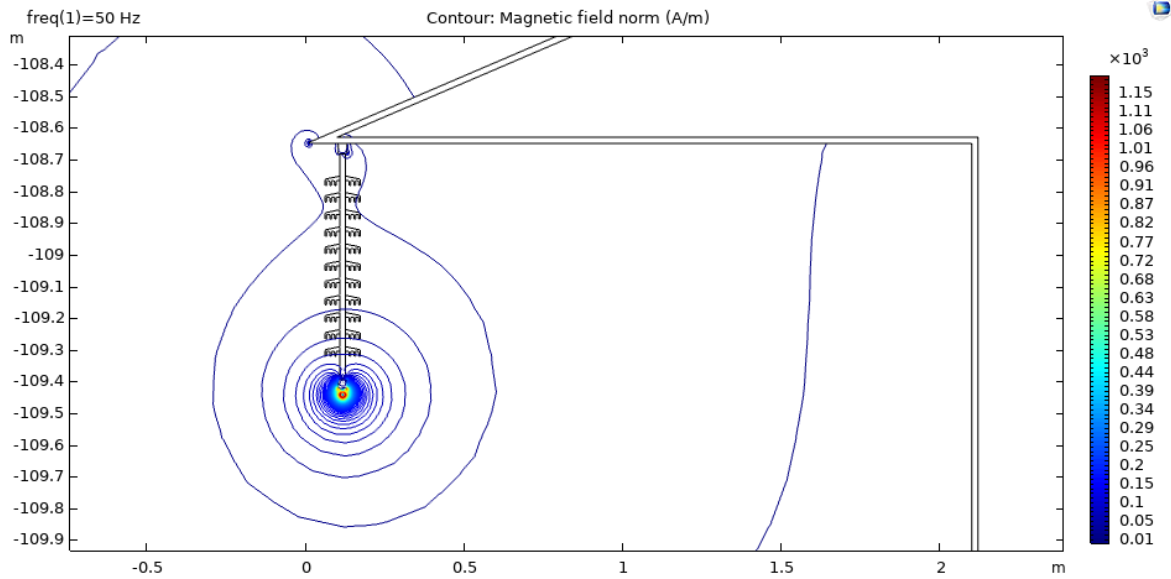
Obr. G12: Rozložení veličiny B v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



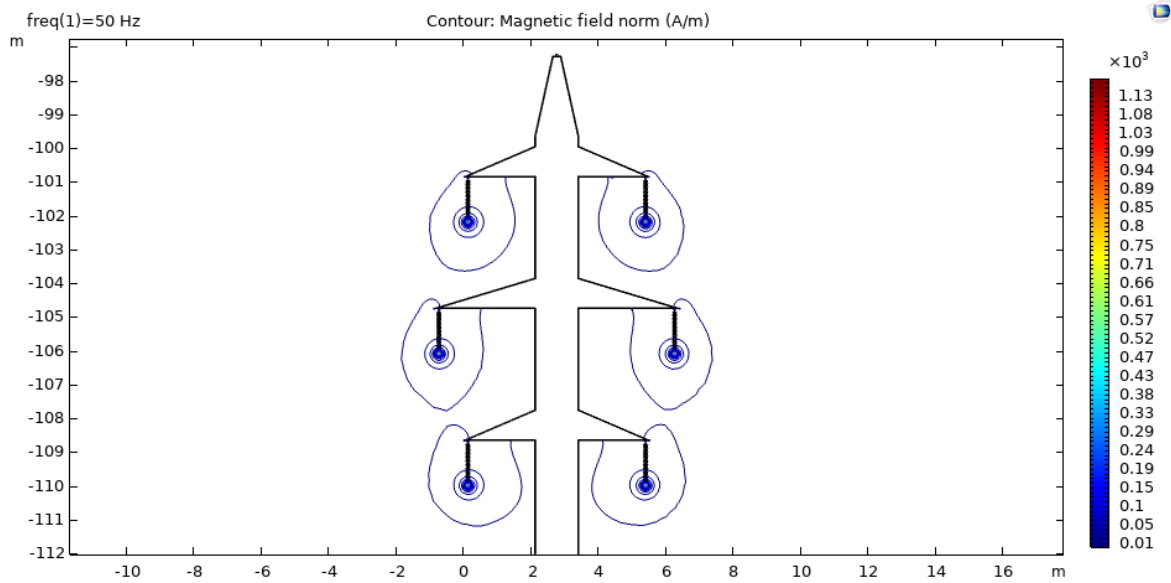
Obr. G13: Rozložení veličiny H v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



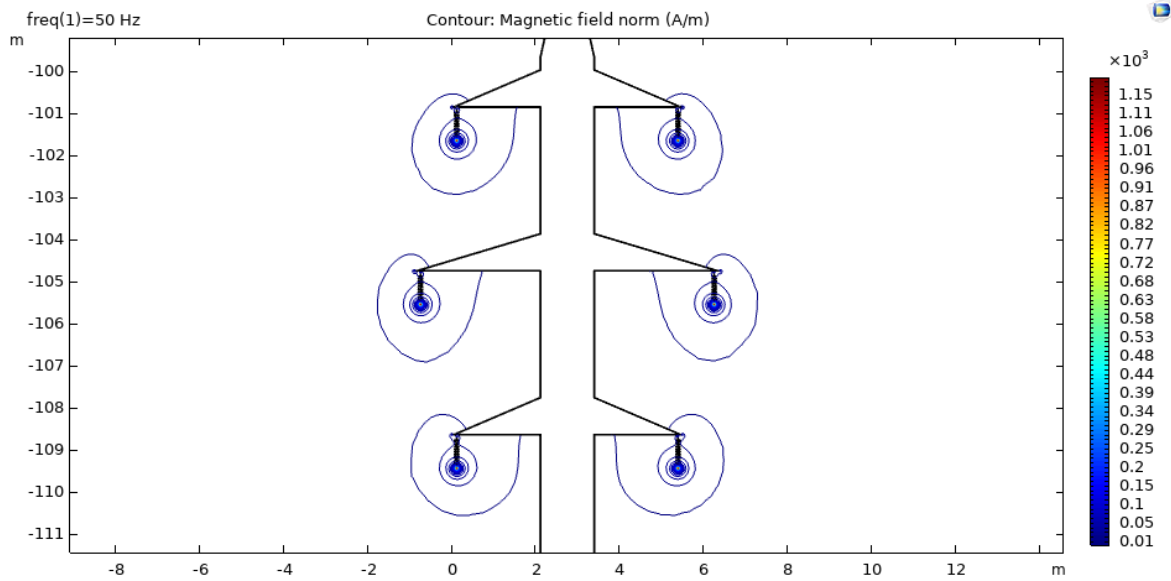
Obr. G14: Rozložení veličiny H v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



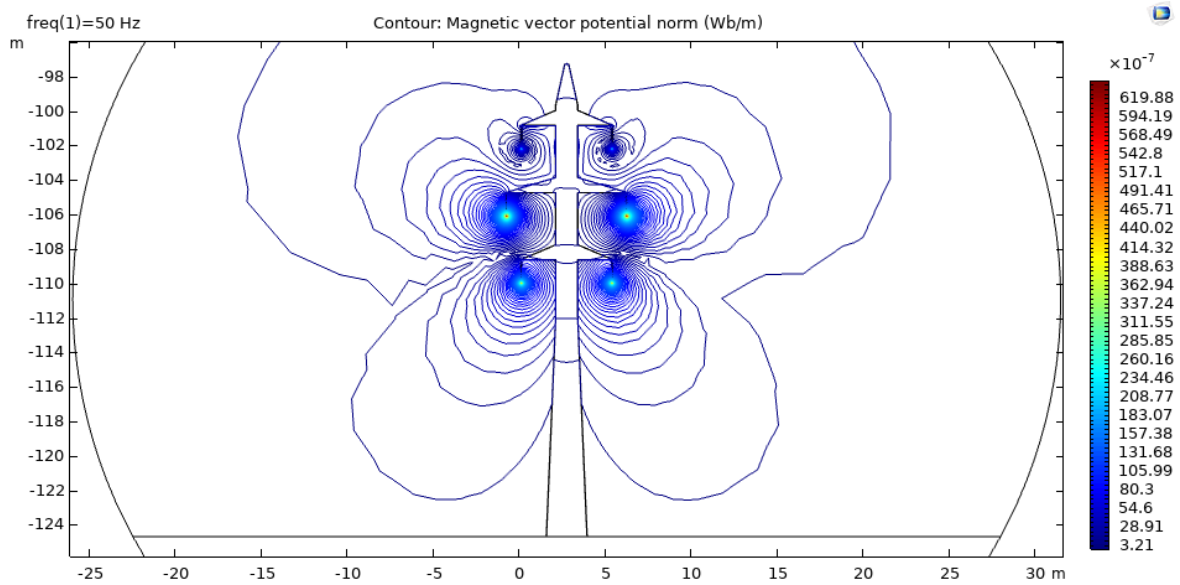
Obr. G15: Rozložení veličiny H v oblasti levého spodního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)



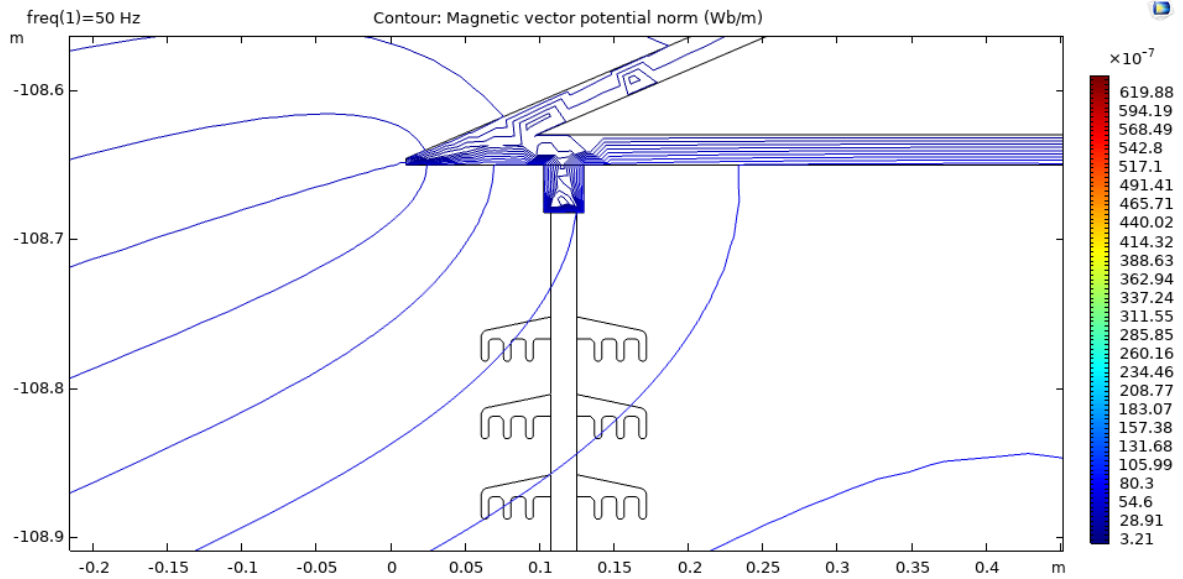
Obr. G16: Celkové rozložení veličiny H v okolí věže
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



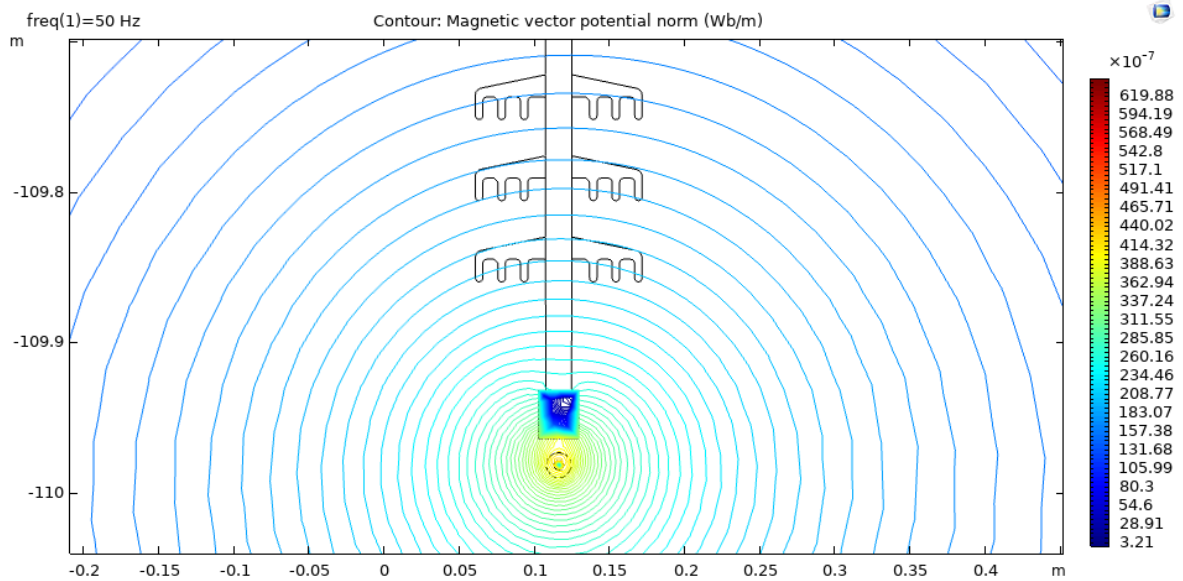
Obr. G17: Celkové rozložení veličiny H v okolí věže
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)



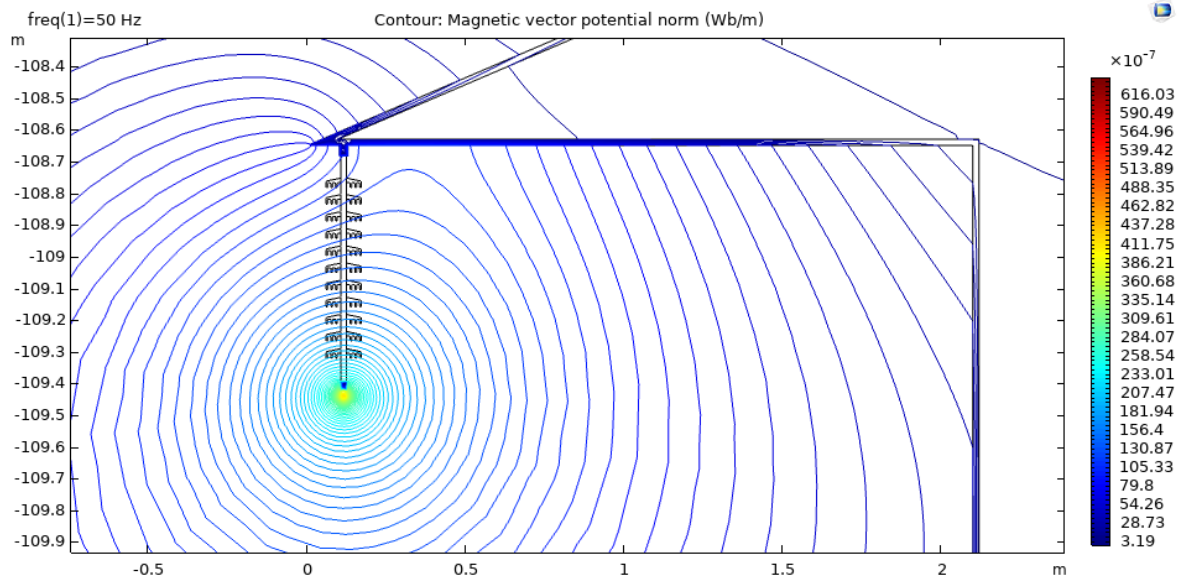
Obr. G18: Celkové rozložení veličiny A
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



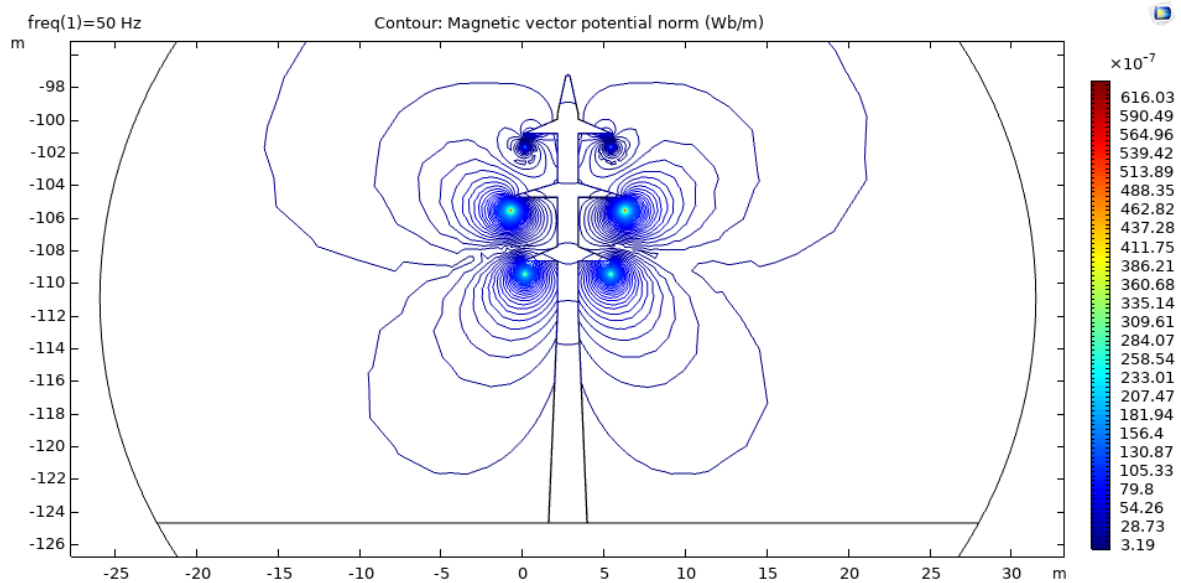
Obr. G19: Rozložení veličiny A , oblast levého dolního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



Obr. G20: Rozložení veličiny A , oblast levého dolního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 21 čapek)



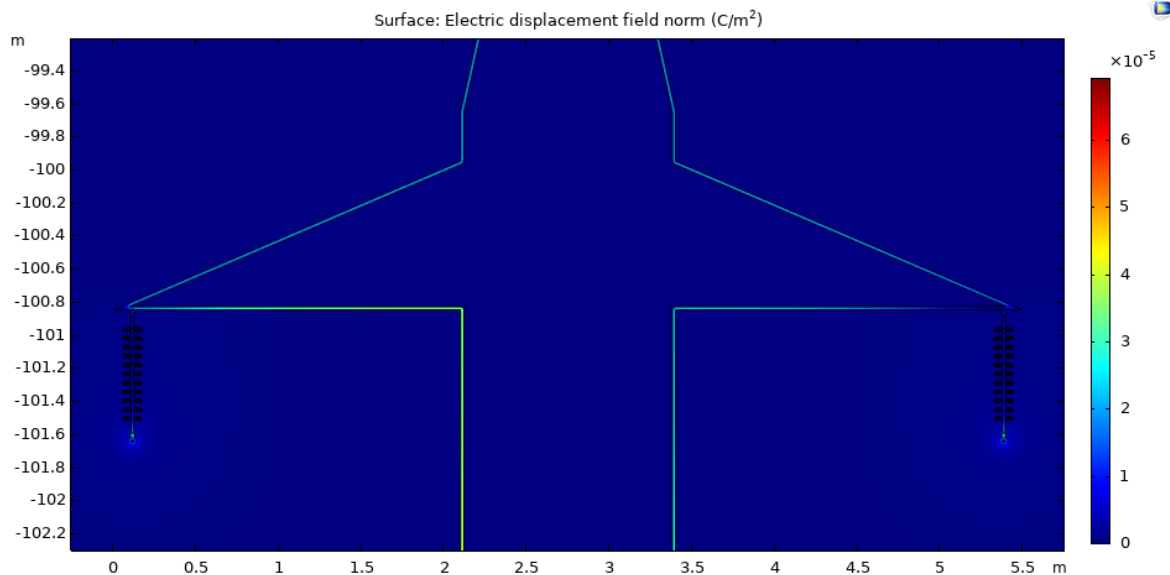
Obr. G21: Rozložení veličiny A , oblast levého dolního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)



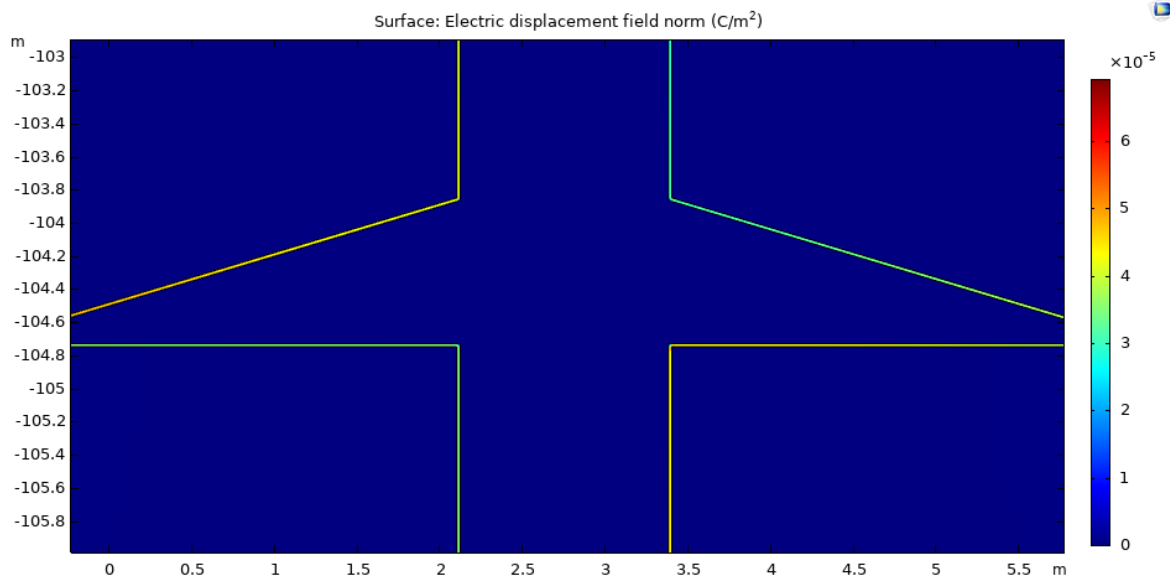
Obr. G22: Celkové rozložení veličiny A , oblast levého dolního izolátoru
(110 kV, 30 MW, 11 čapek)

Příloha H – Transpozice vedení 110 kV, zkrácené skleněné čapkové izolátory

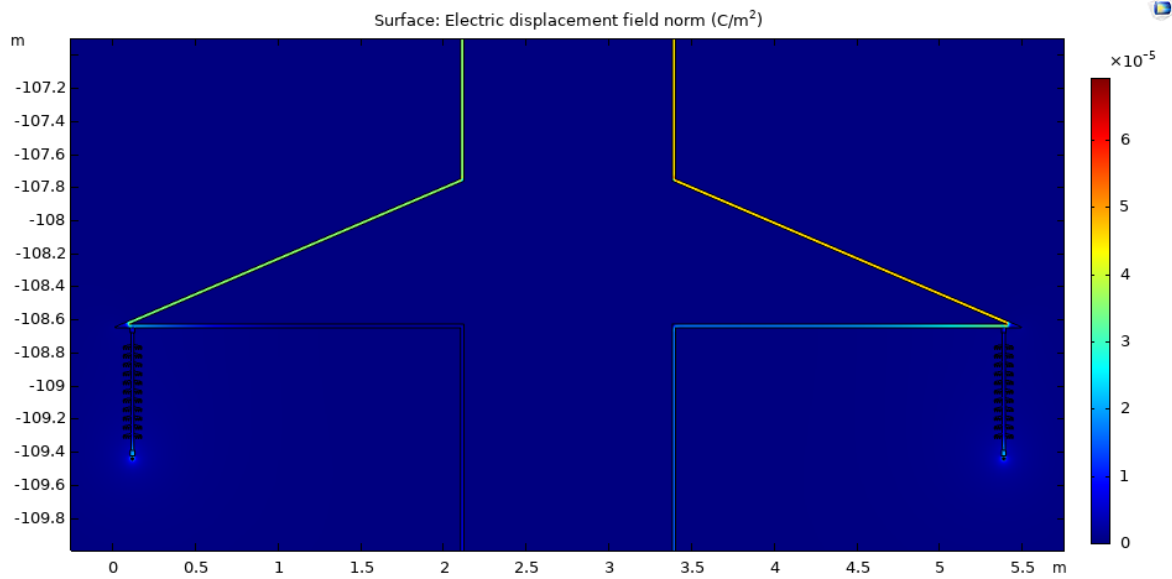
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



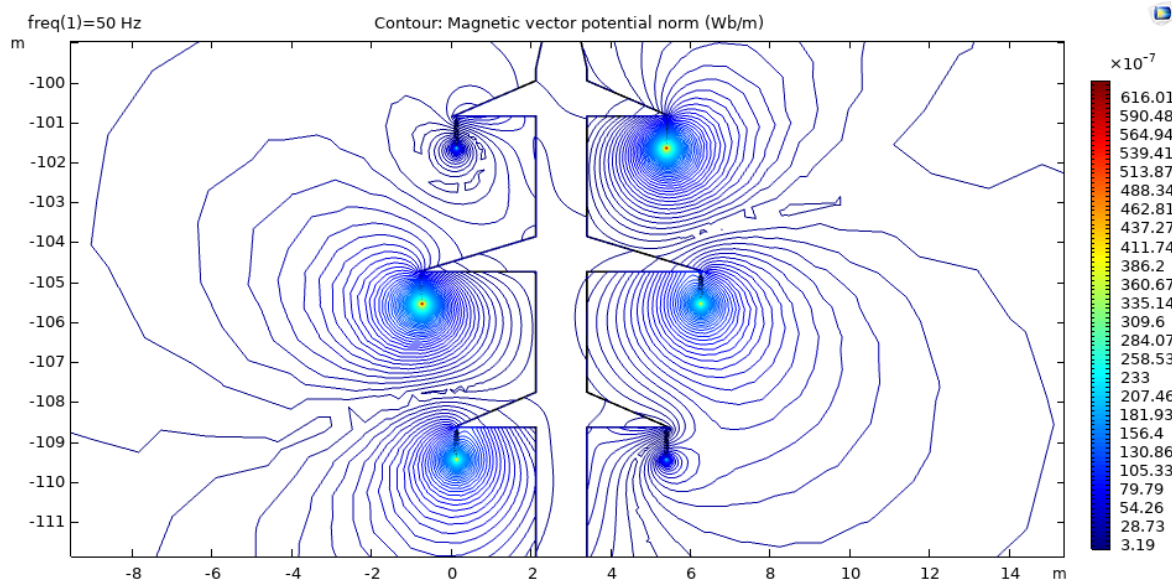
Obr. H1: Rozložení veličiny D , horní konzole,
(110 kV, 30 MW, 11 čapek izolátoru)



Obr. H2: Rozložení veličiny D , prostřední konzole,
(110 kV, 30 MW, 11 čapek izolátoru)



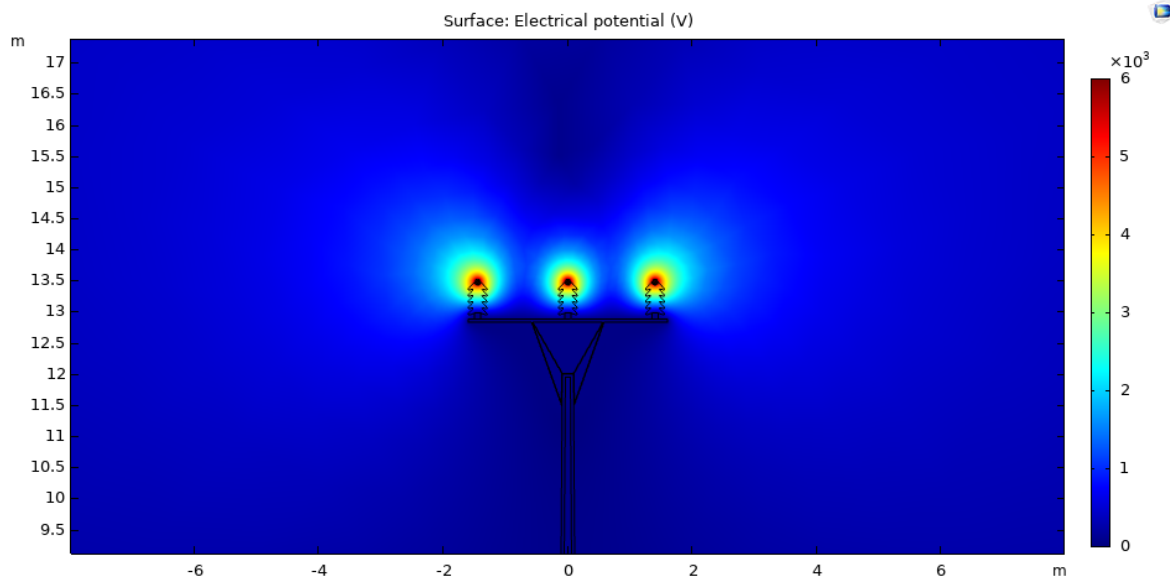
Obr. H3: Rozložení veličiny D , spodní konzole,
(110 kV, 30 MW, 11 čapek izolátoru)



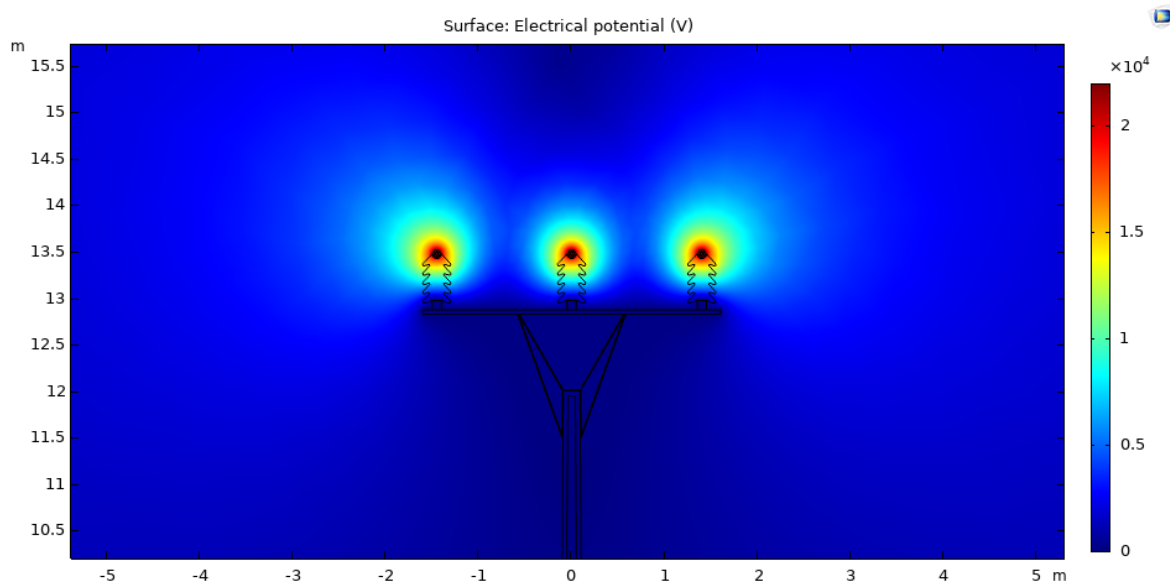
Obr. H4: Celkové rozložení veličiny A ,
(110 kV, 30 MW, 11 čapek izolátoru)

Příloha I – Železobetonový dřík a porcelánové podpěrné izolátory vedení 6 kV

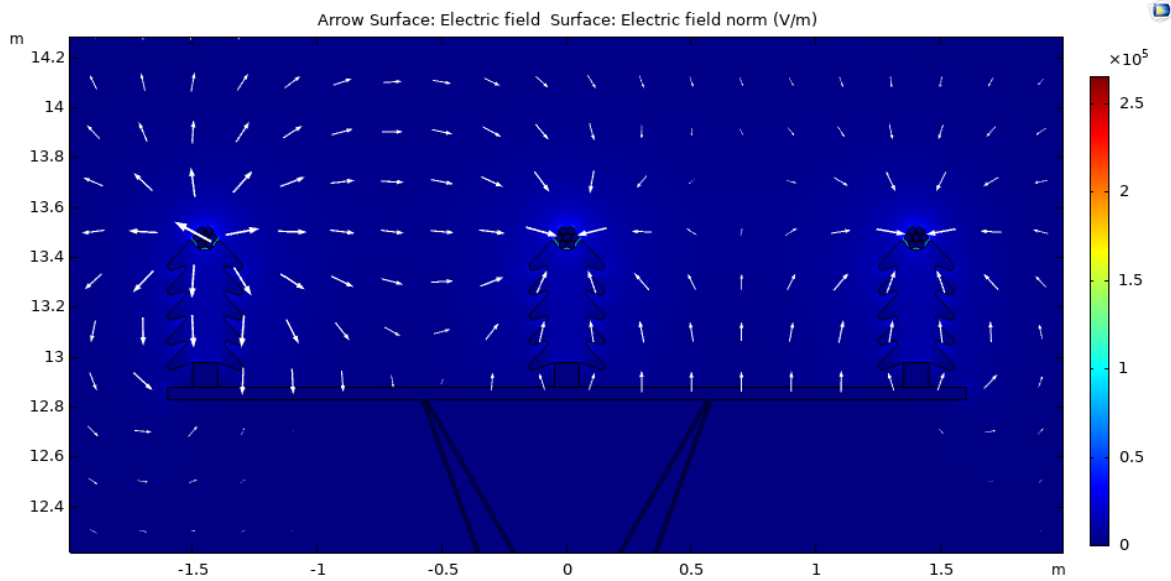
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



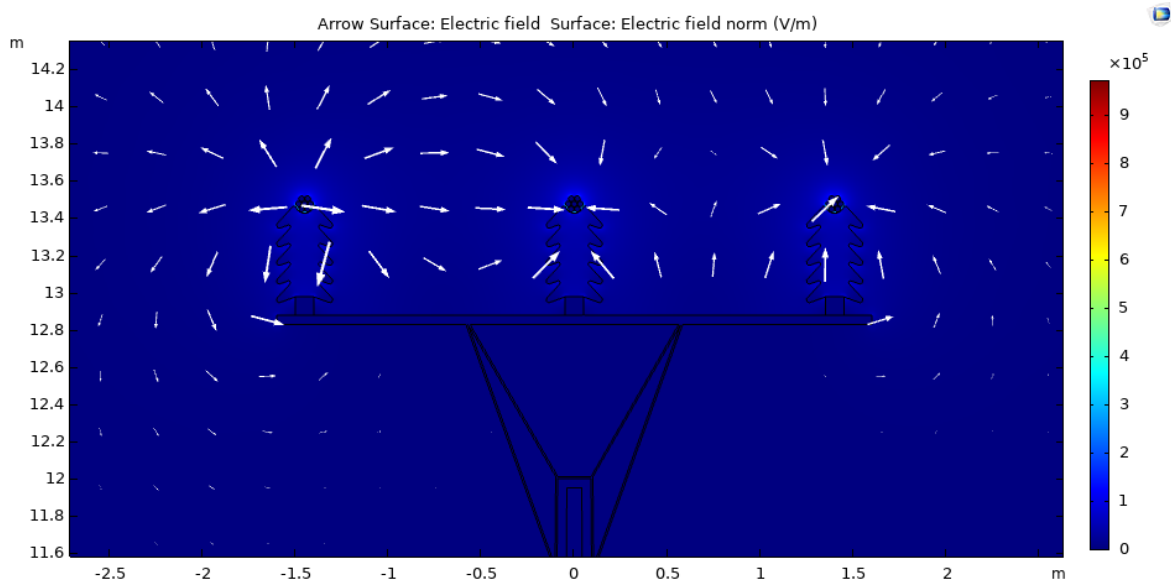
Obr. I1: Rozložení elektrického potenciálu
(6 kV, 1 MW, 5 stříšek izolátoru)



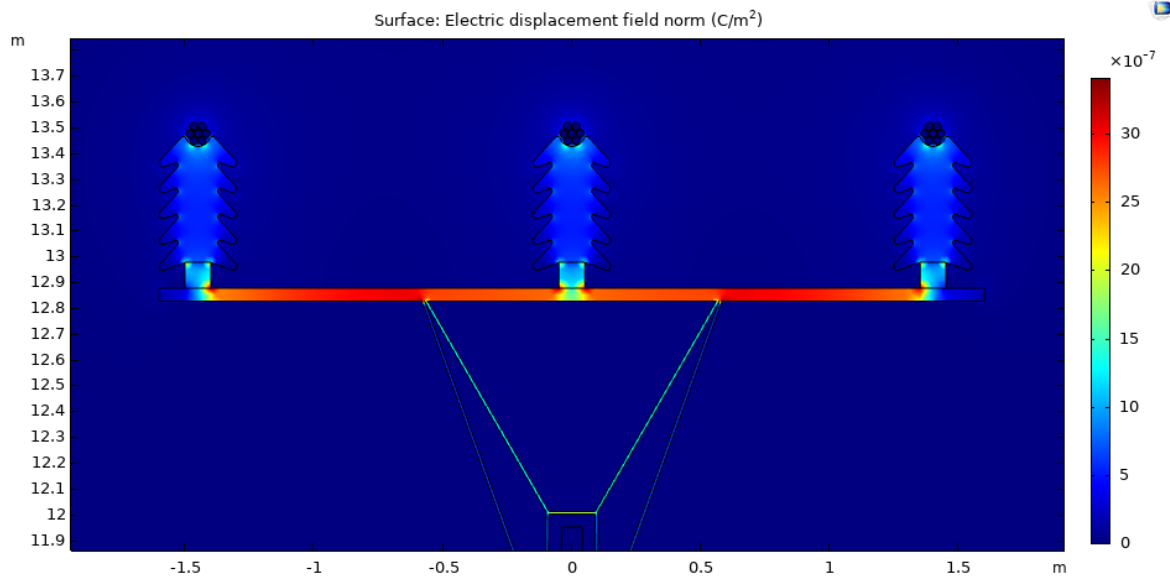
Obr. I2: Rozložení elektrického potenciálu
(22 kV, 4 MW, 5 stříšek izolátoru)



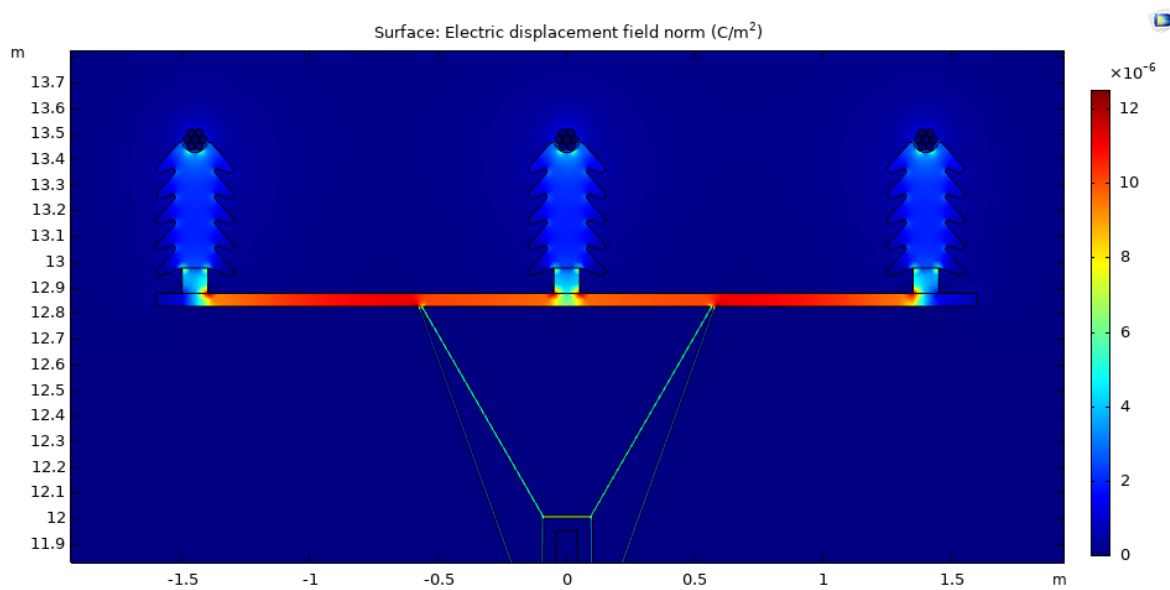
Obr. 13: Rozložení elektrické intenzity
(6 kV, 1 MW, 5 stříšek izolátoru)



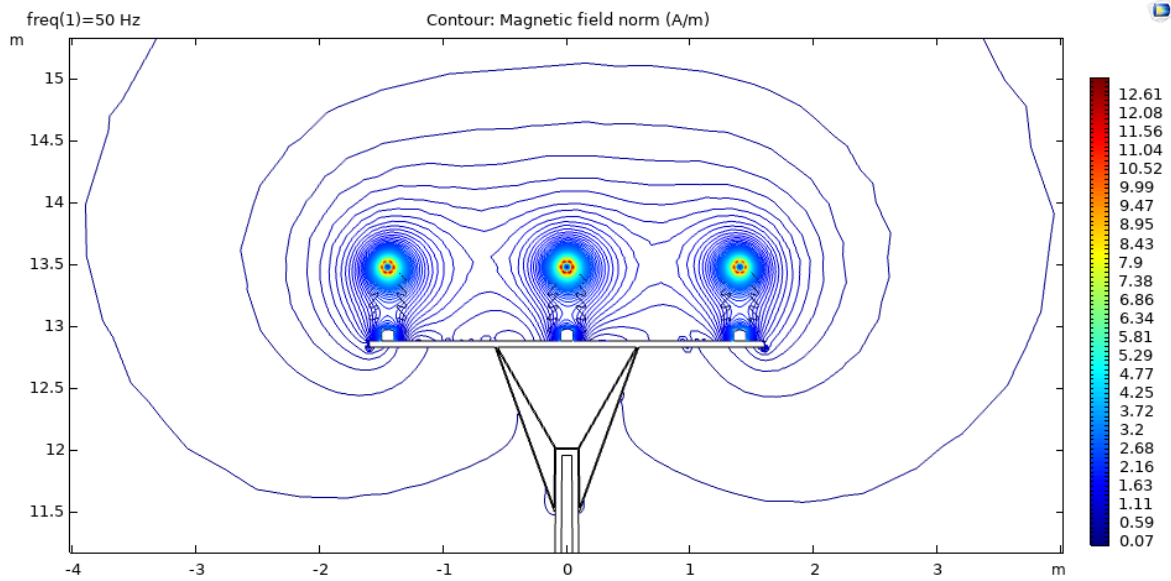
Obr. 14: Rozložení elektrické intenzity
(22 kV, 4 MW, 5 stříšek izolátoru)



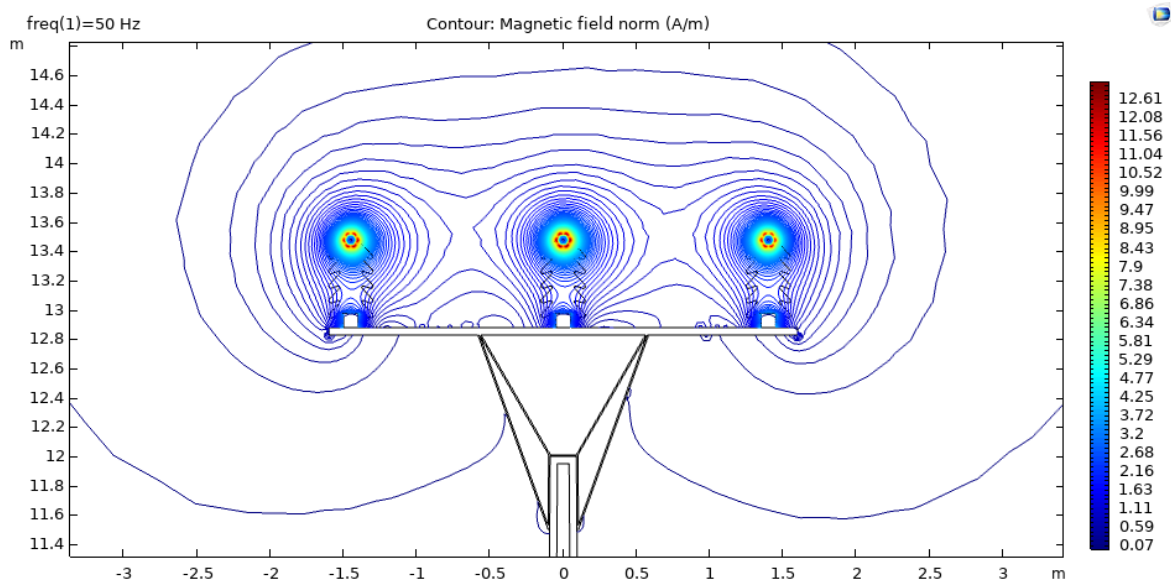
Obr. 15: Rozložení elektrické indukce
(6 kV, 1 MW, 5 stříšek izolátoru)



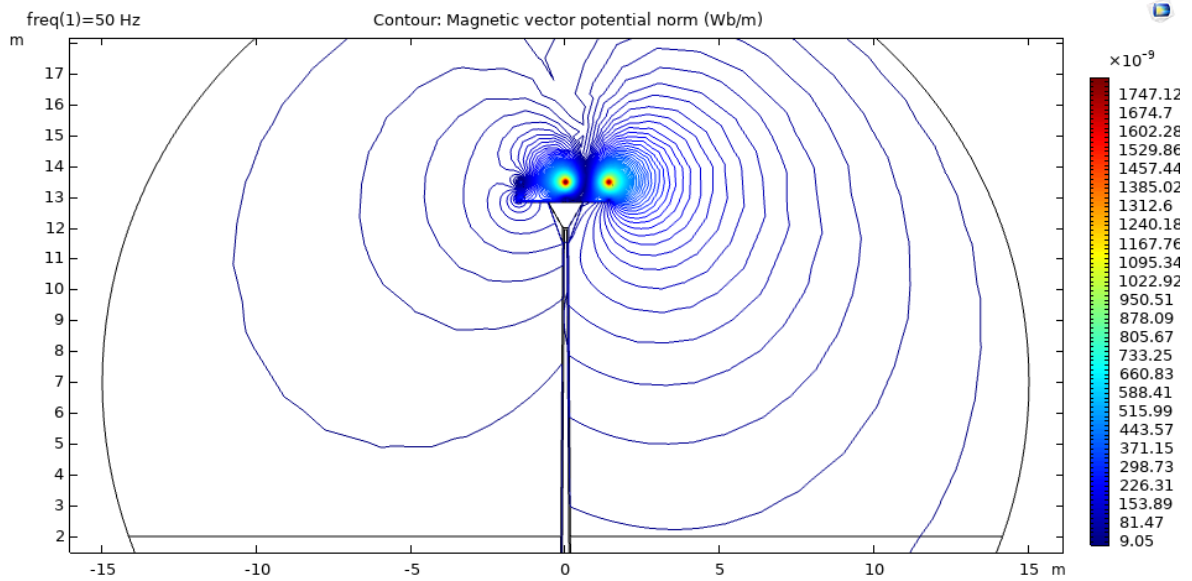
Obr. 16: Rozložení elektrické indukce
(22 kV, 4 MW, 5 stříšek izolátoru)



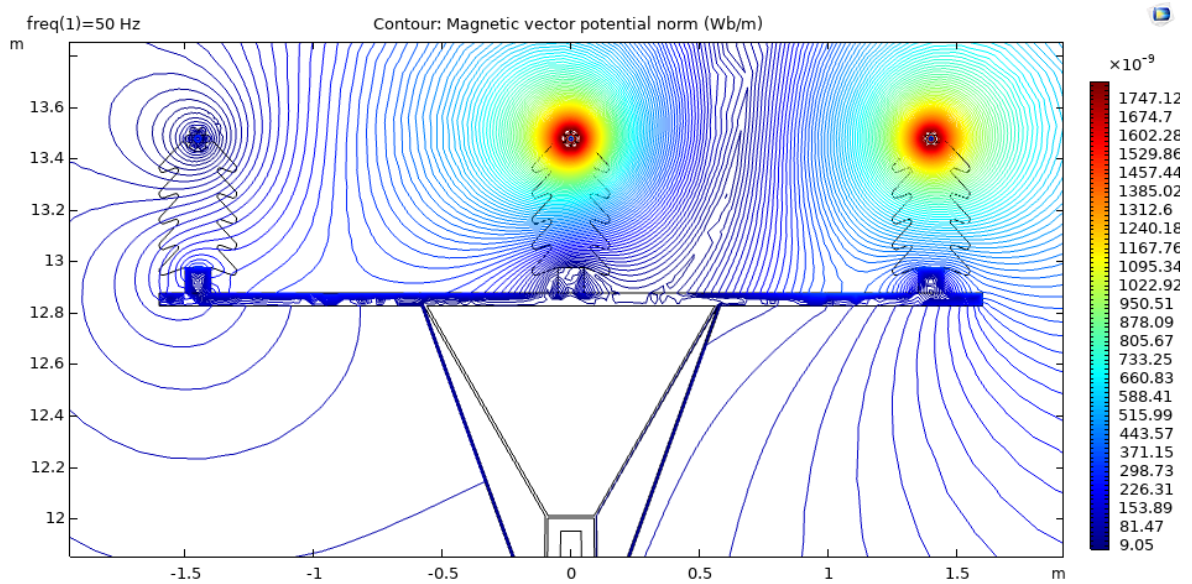
Obr. 17: Rozložení intenzity magnetického pole
(6 kV, 1 MW, 5 stříšek izolátoru)



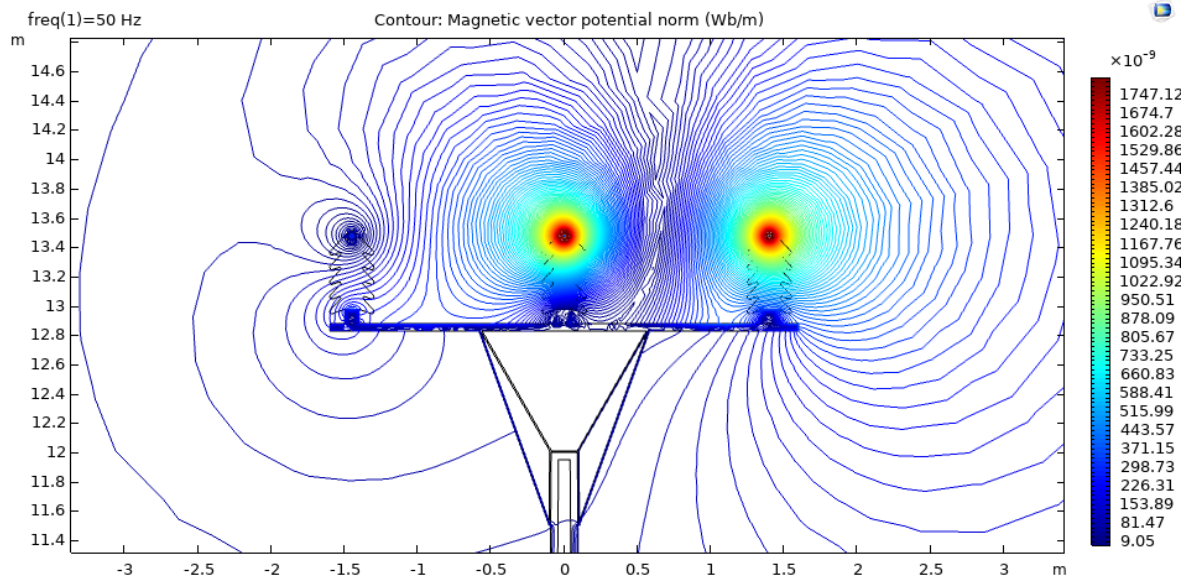
Obr. 18: Rozložení intenzity magnetického pole
(22 kV, 4 MW, 5 stříšek izolátoru)



Obr. I9: Rozložení magnetického potenciálu
(6 kV, 1 MW, 5 stříšek izolátoru)



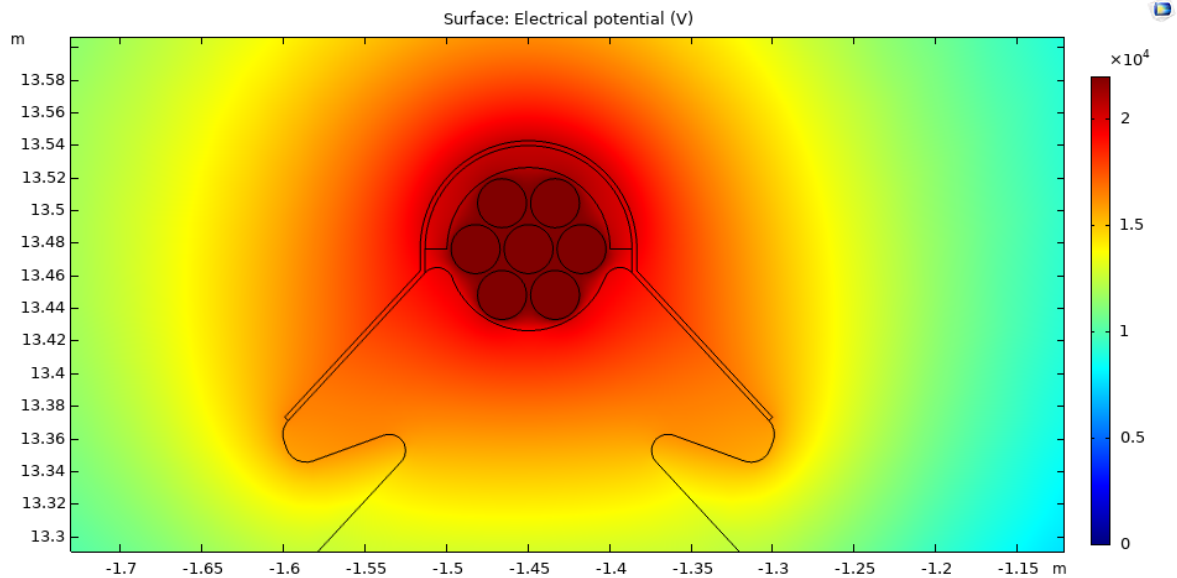
Obr. I10: Rozložení magnetického potenciálu
(6 kV, 1 MW, 5 stříšek izolátoru)



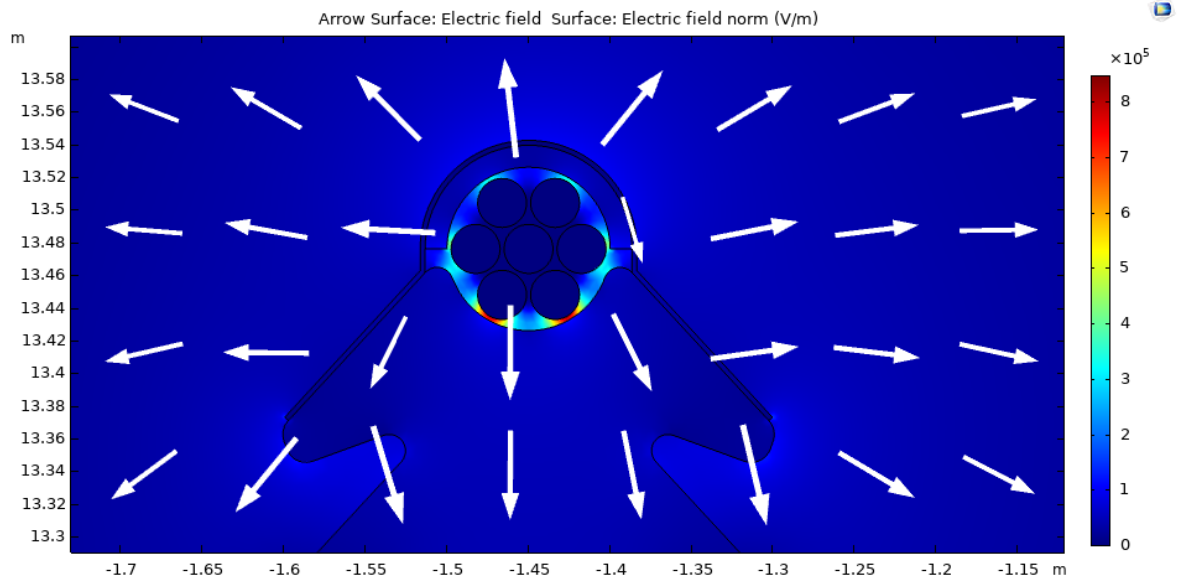
Obr. 111: Rozložení magnetického potenciálu
(22 kV, 4 MW, 5 stříšek izolátoru)

Příloha J – Vedení 22 kV, zatížené 4 MW + ochrana ptactva
(ochrana zabezpečena pryžovou lepenkou, uvažována slabá vrstva vody na jejím povrchu a vrchní stříšce izolátoru, dále zvýšená vlhkost vzduchu)

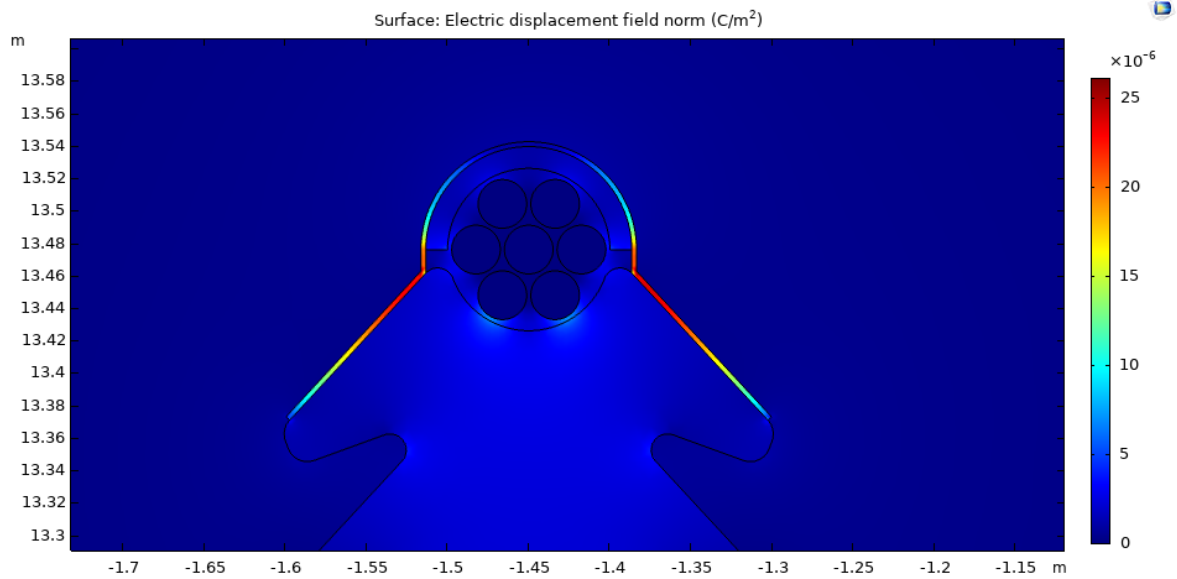
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



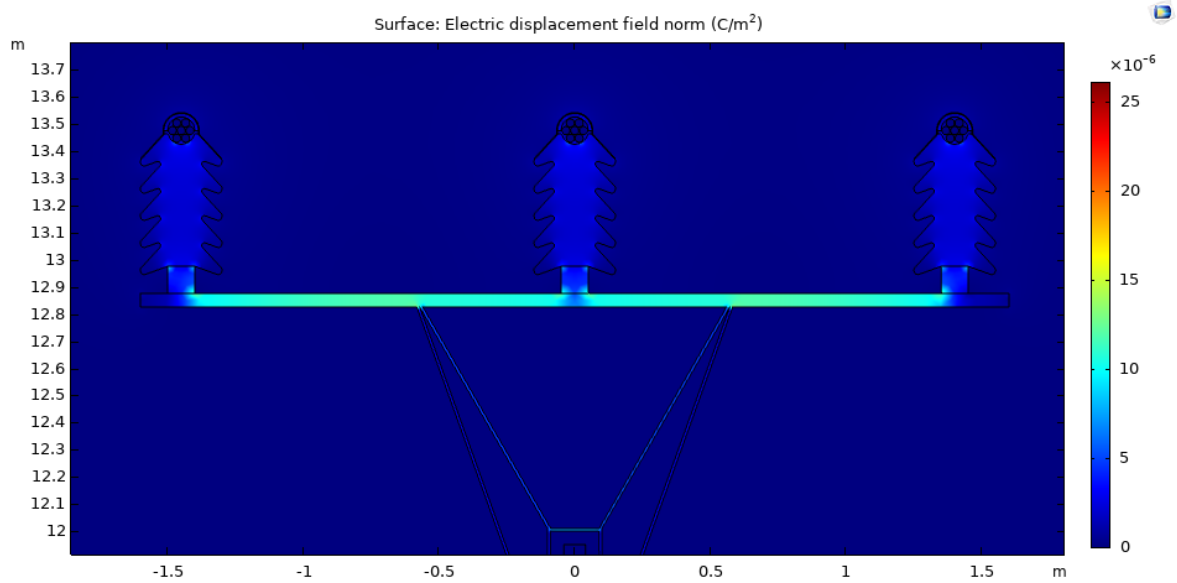
Obr. J1: Rozložení elektrického potenciálu při silové části izolátoru



Obr. J2: Rozložení elektrické intenzity při silové části izolátoru



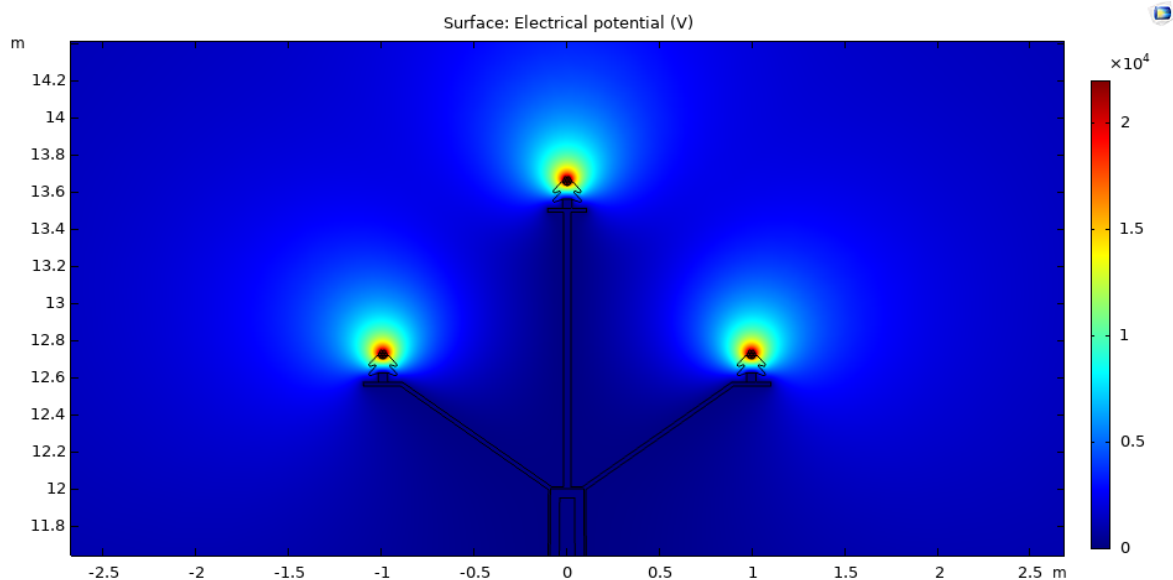
Obr. J3: Rozložení elektrické indukce při silové části izolátoru



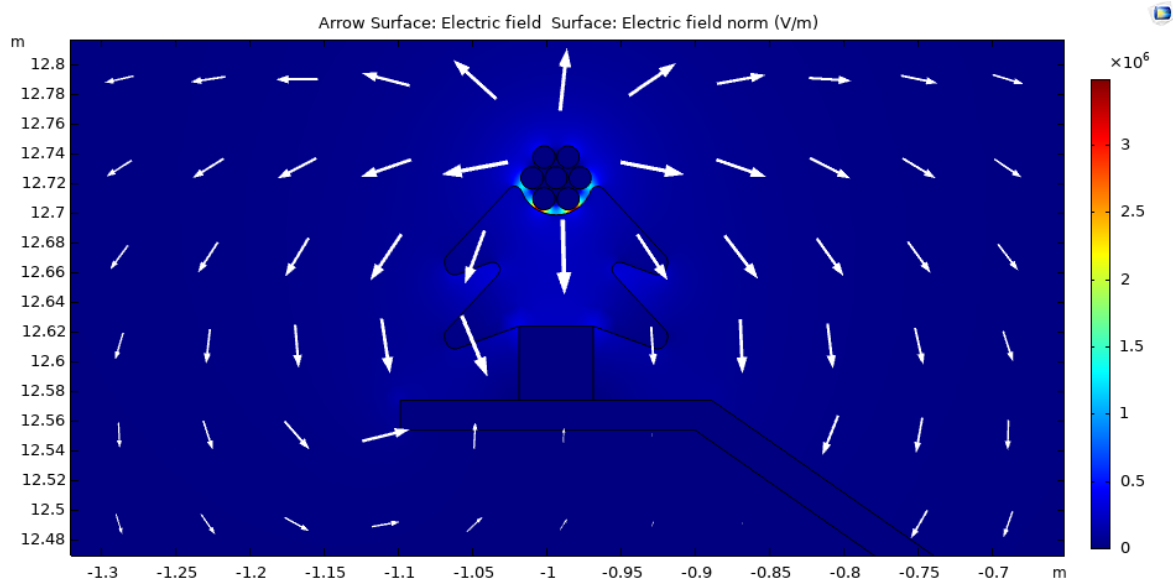
Obr. J4: Rozložení elektrické indukce, oblast konzole

Příloha K – Jiné uspořádání vedení 22 kV, zatížené 4 MW

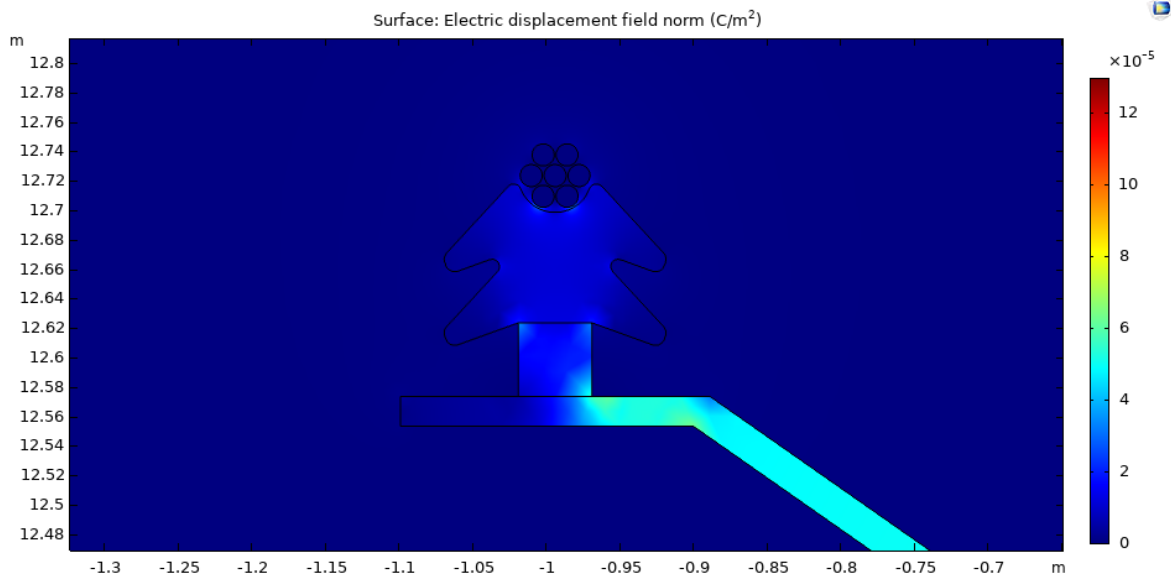
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



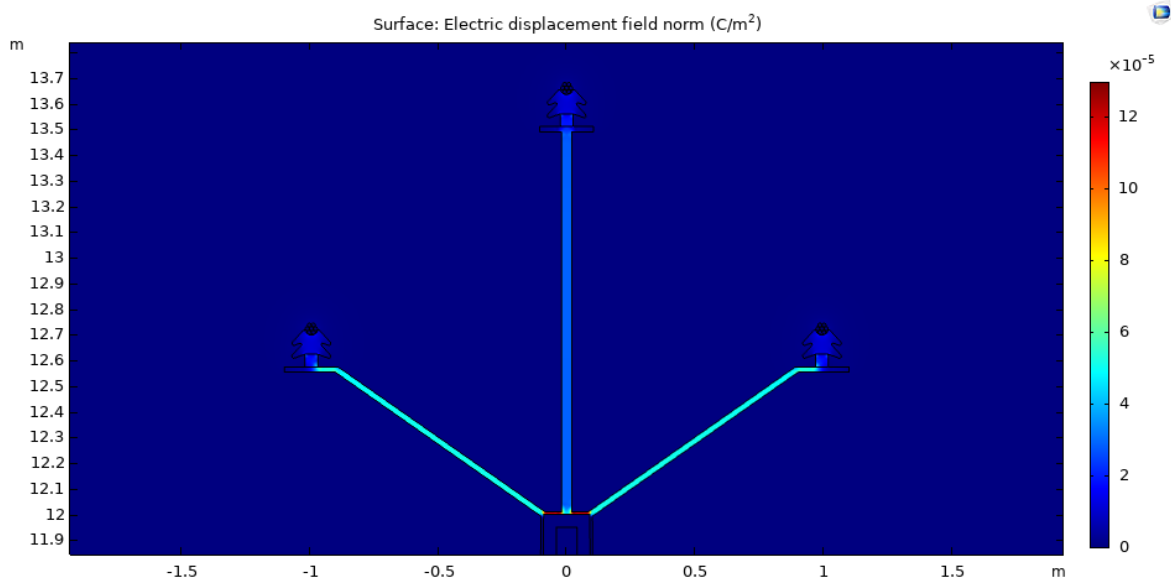
Obr. K1: Rozložení elektrického potenciálu v okolí konzole



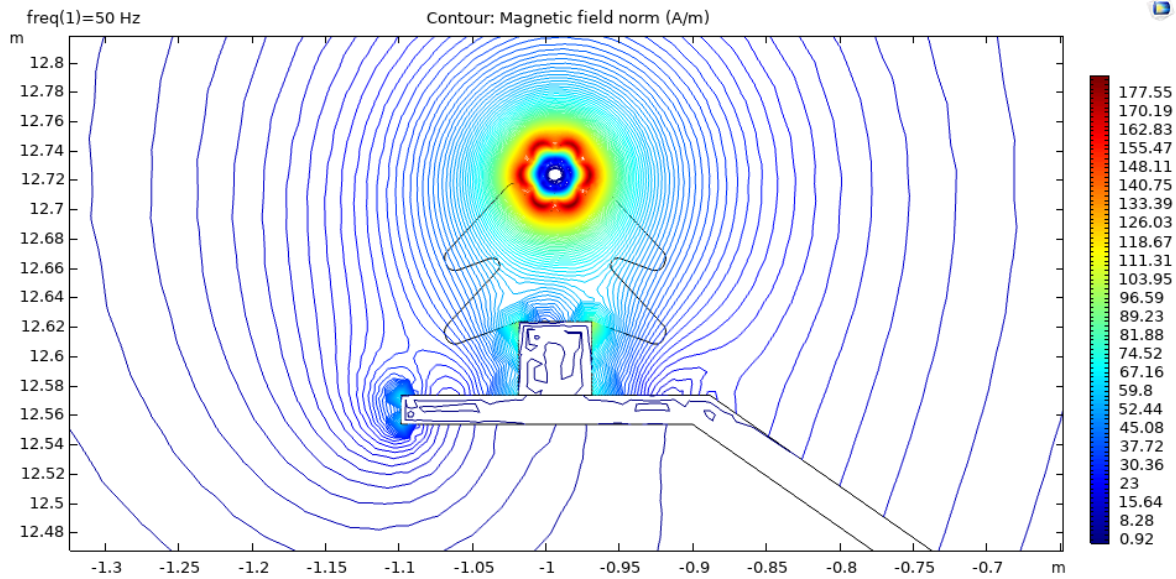
Obr. K2: Rozložení elektrické intenzity v okolí levého izolátoru



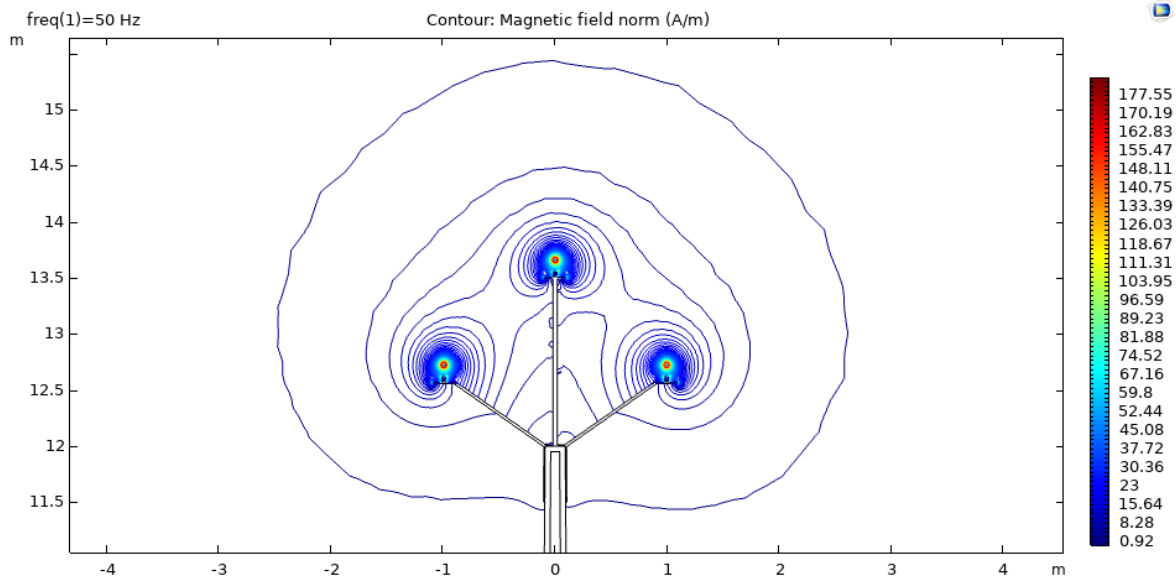
Obr. K3: Rozložení elektrické indukce v okolí levého izolátoru



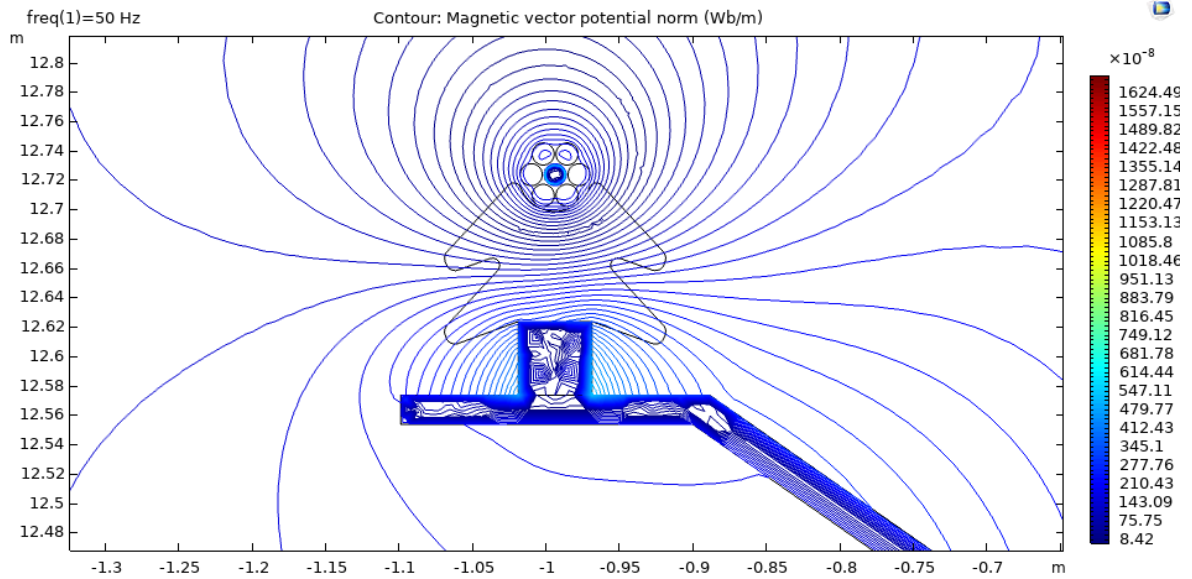
Obr. K4: Rozložení elektrické indukce na konzoli



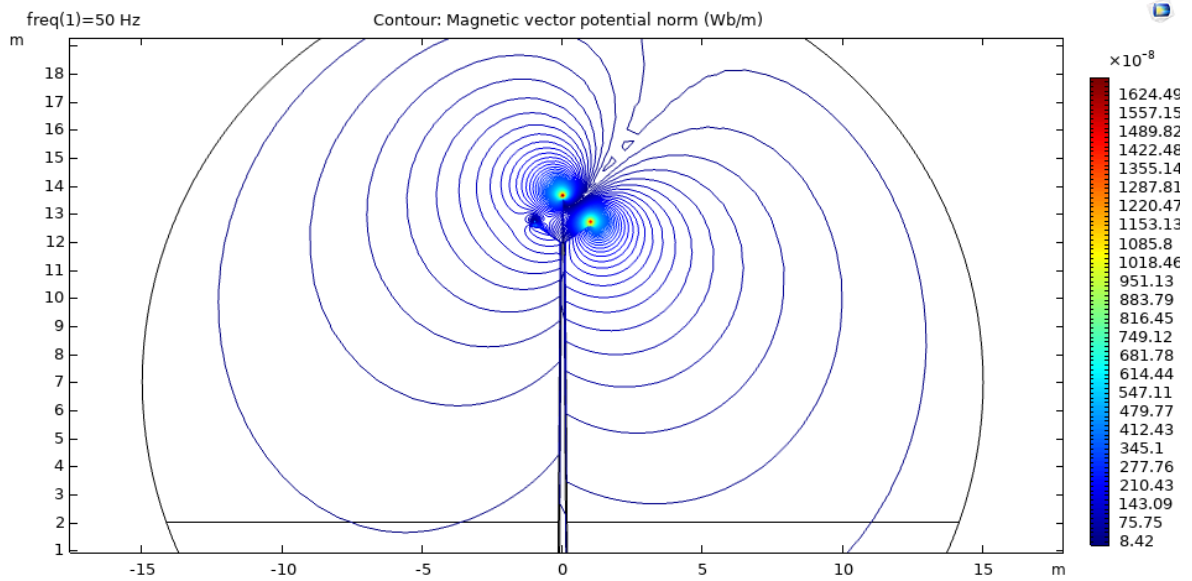
Obr. K5: Rozložení intenzity magnetického pole podél levého izolátoru



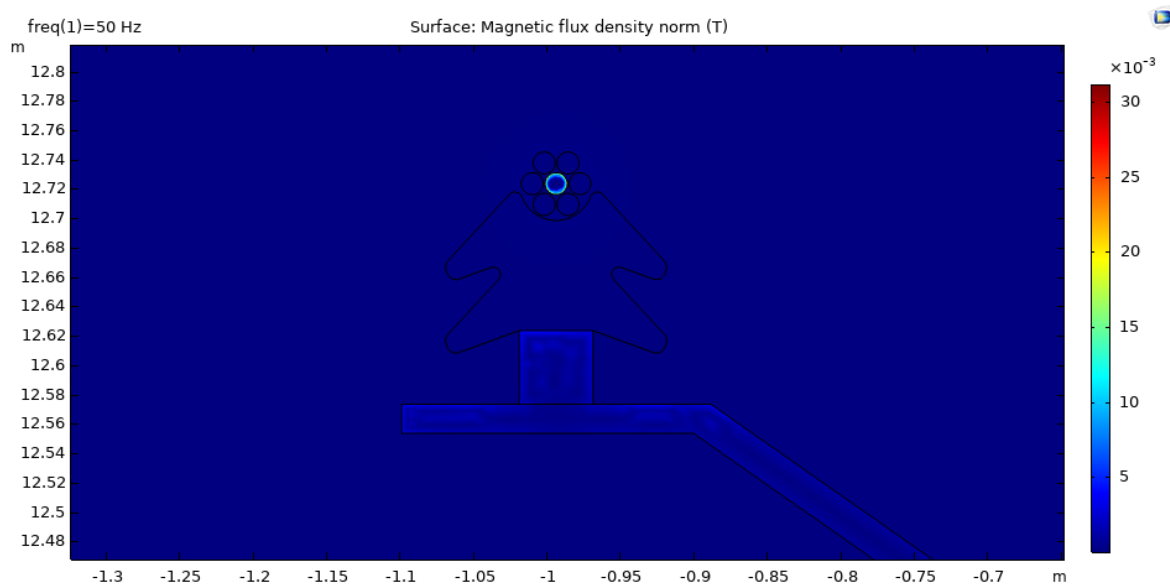
Obr. K6: Rozložení intenzity magnetického pole v okolí konzole



Obr. K7: Rozložení magnetického potenciálu podél levého izolátoru



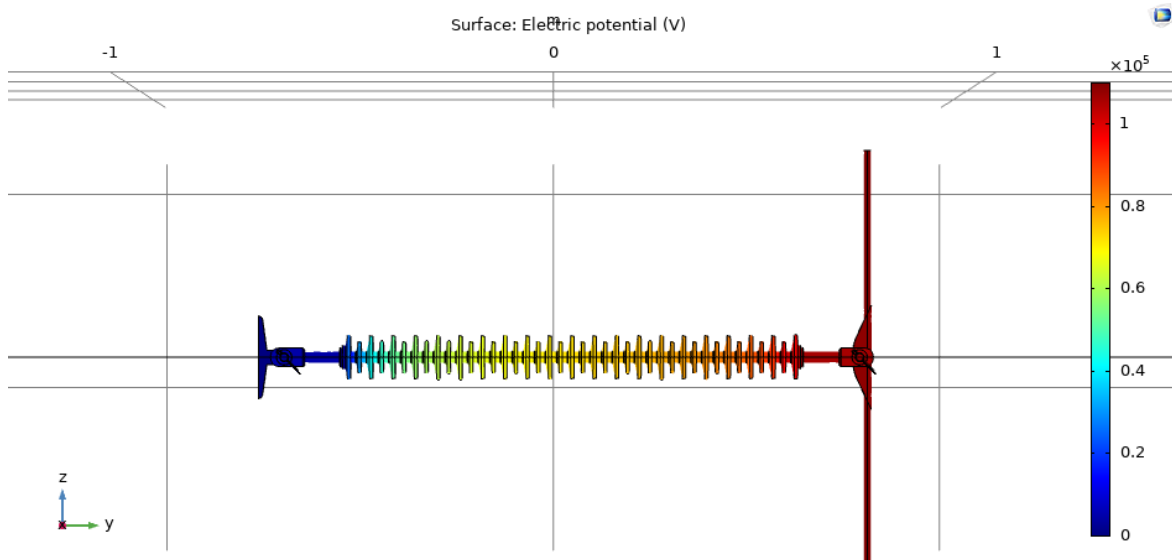
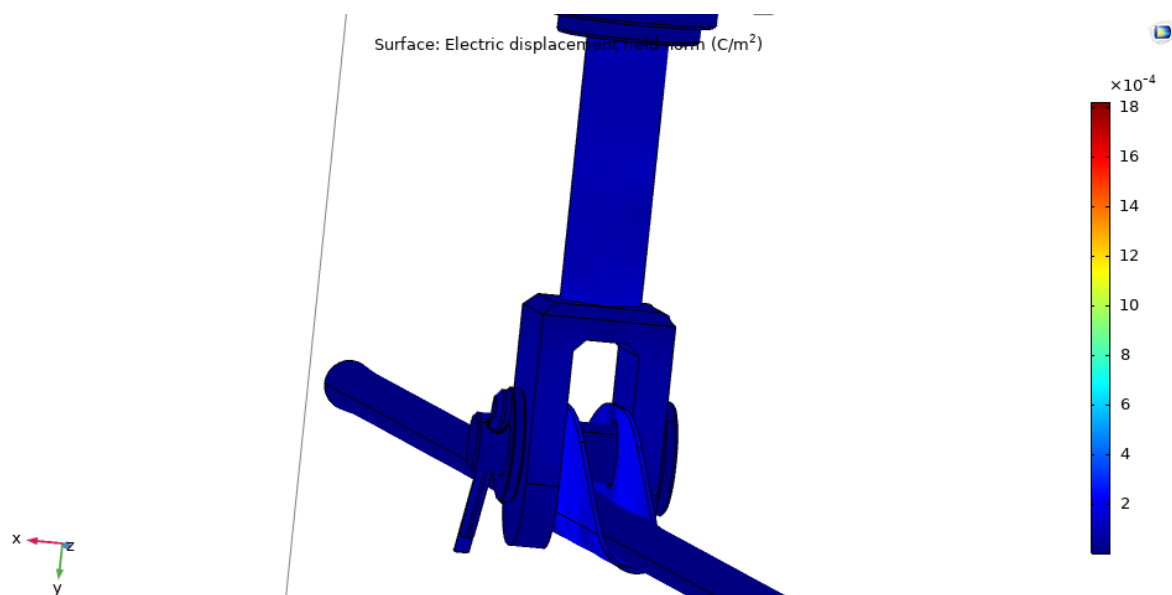
Obr. K8: Rozložení magnetického potenciálu v okolí konzole

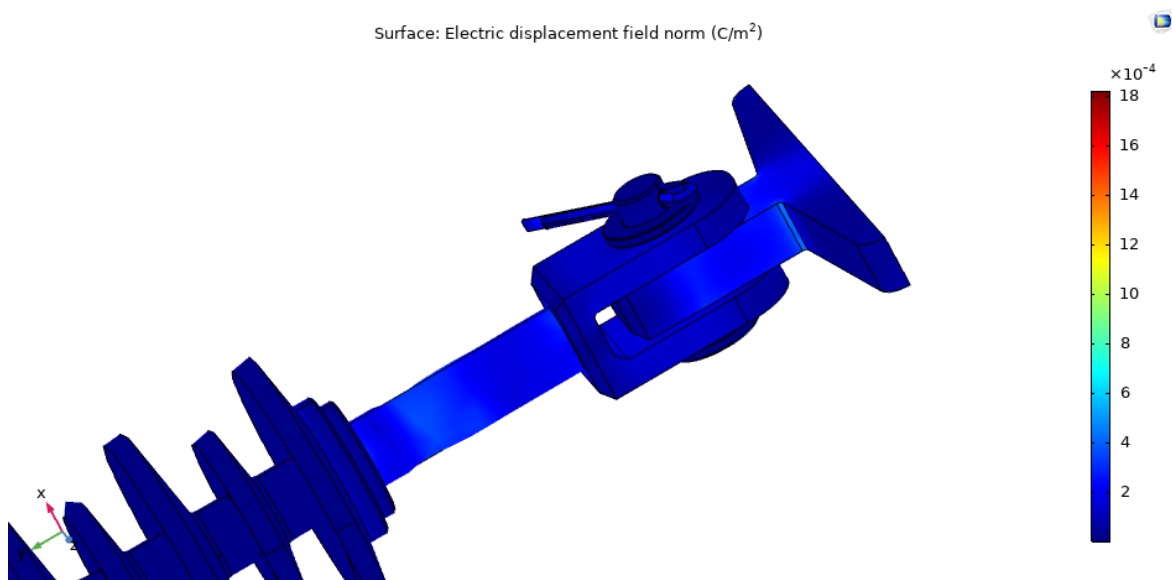


Obr. K9: Rozložení magnetické indukce v blízkosti levého izolátoru

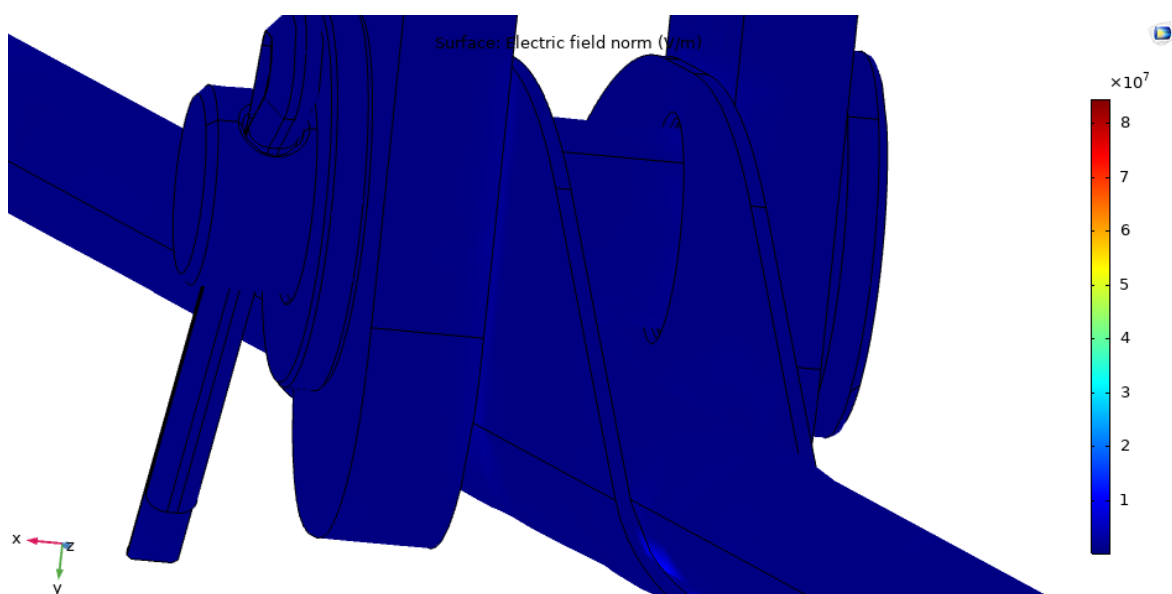
Příloha L – 3D model izolátoru pro napěťovou hladinu 110 kV

Grafické výstupy COMSOL Multiphysics

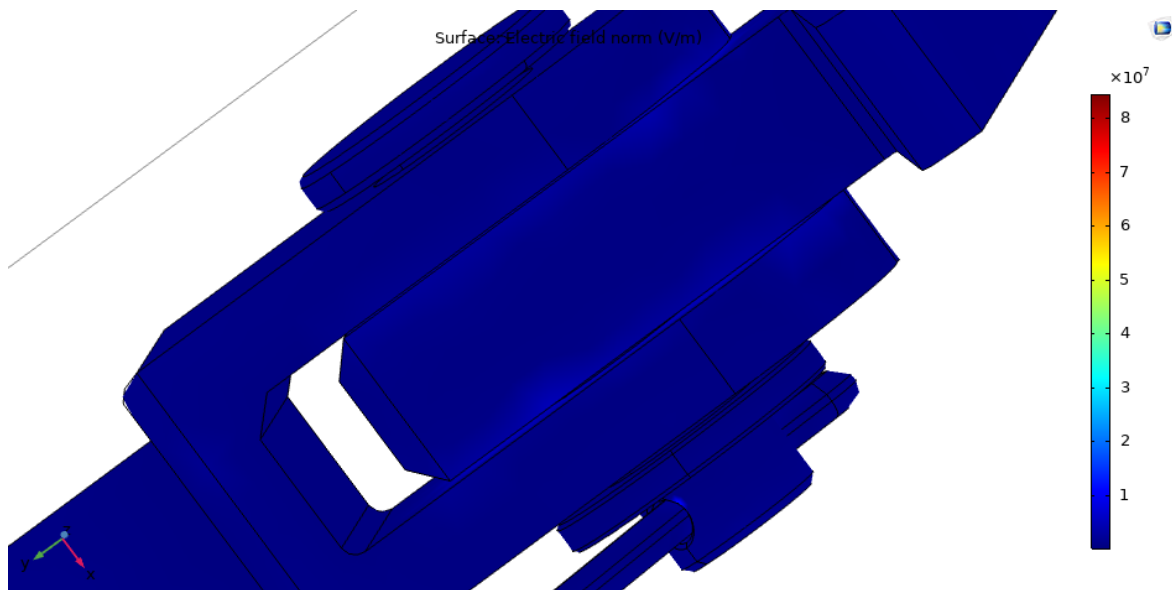
*Obr. L1: Rozložení elektrického potenciálu**Obr. L2: Rozložení elektrické indukce*



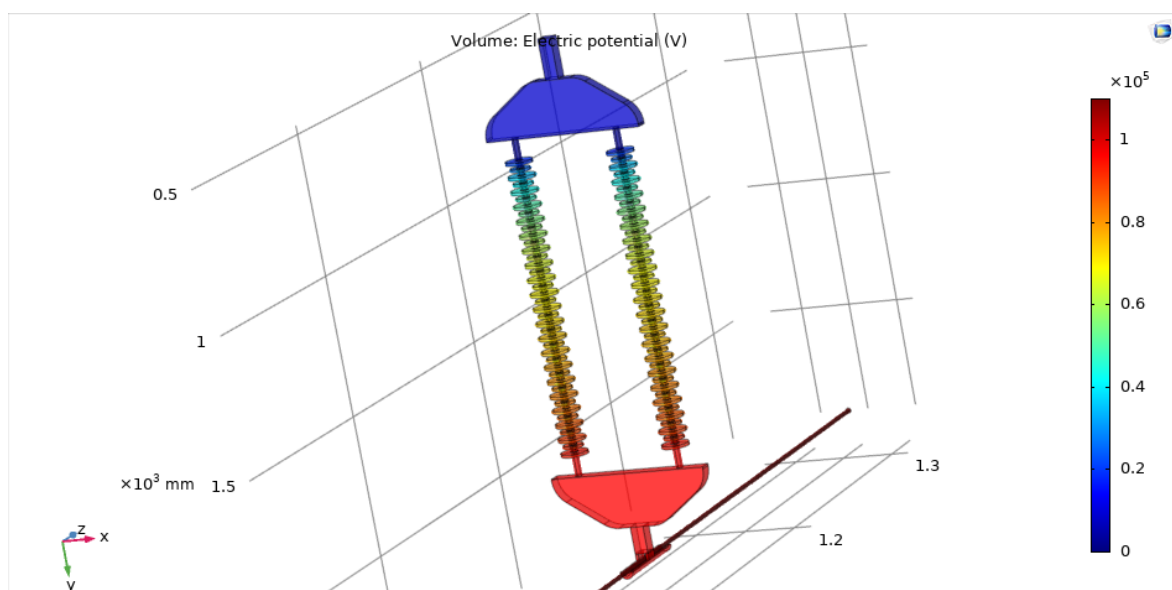
Obr. L3: Rozložení elektrické indukce



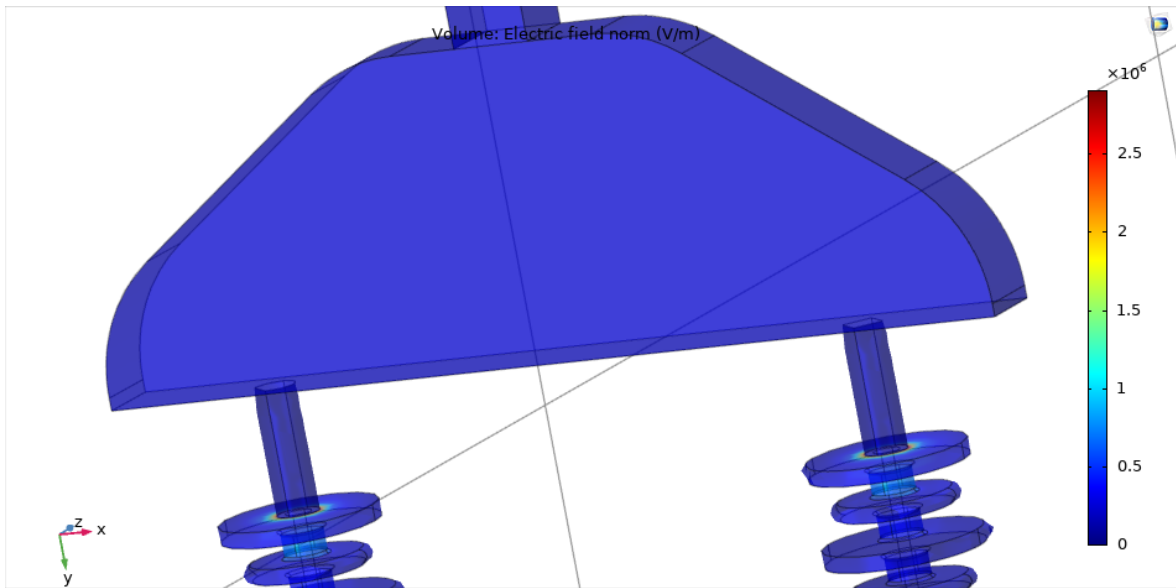
Obr. L4: Rozložení elektrické intenzity



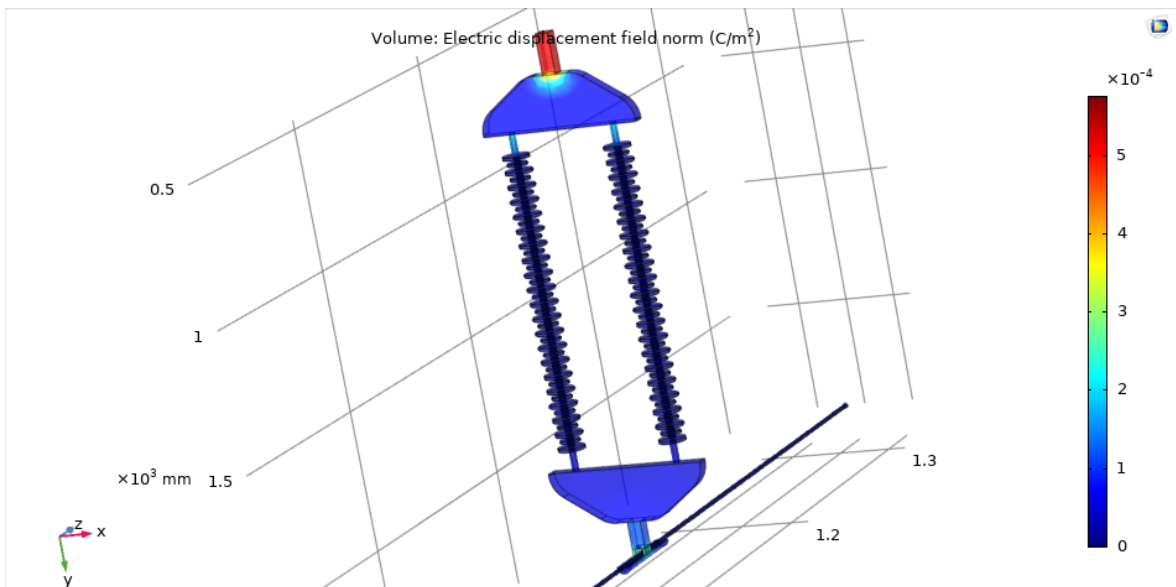
Obr. L5: Rozložení elektrické intenzity



Obr. L6: Dvojité izolační závěs– rozložení elektrického potenciálu



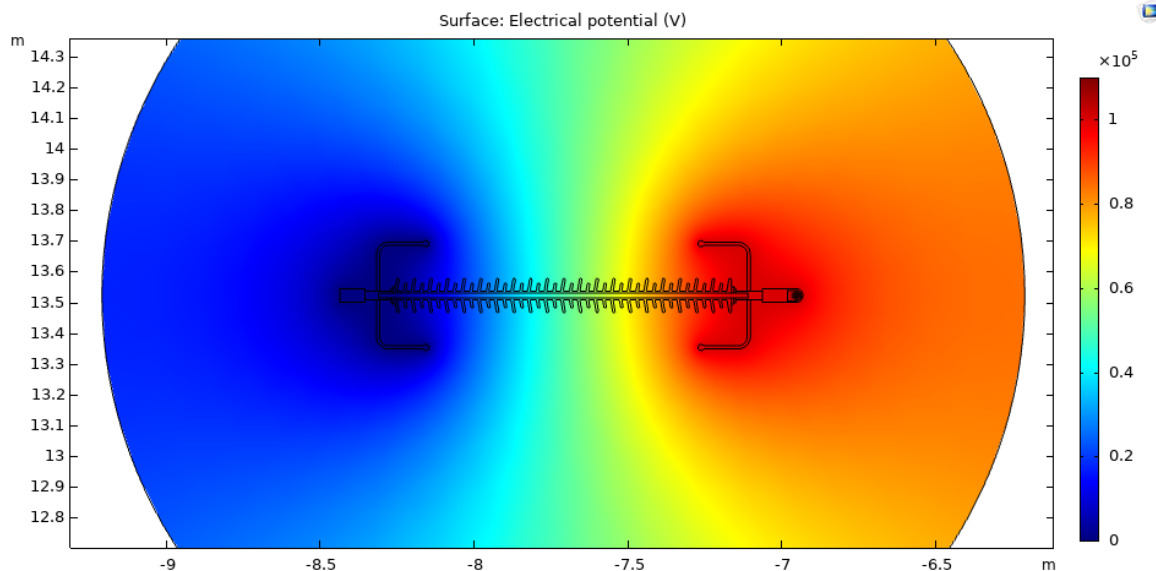
Obr. L7: Dvojité izolační závěs – rozložení elektrické intenzity



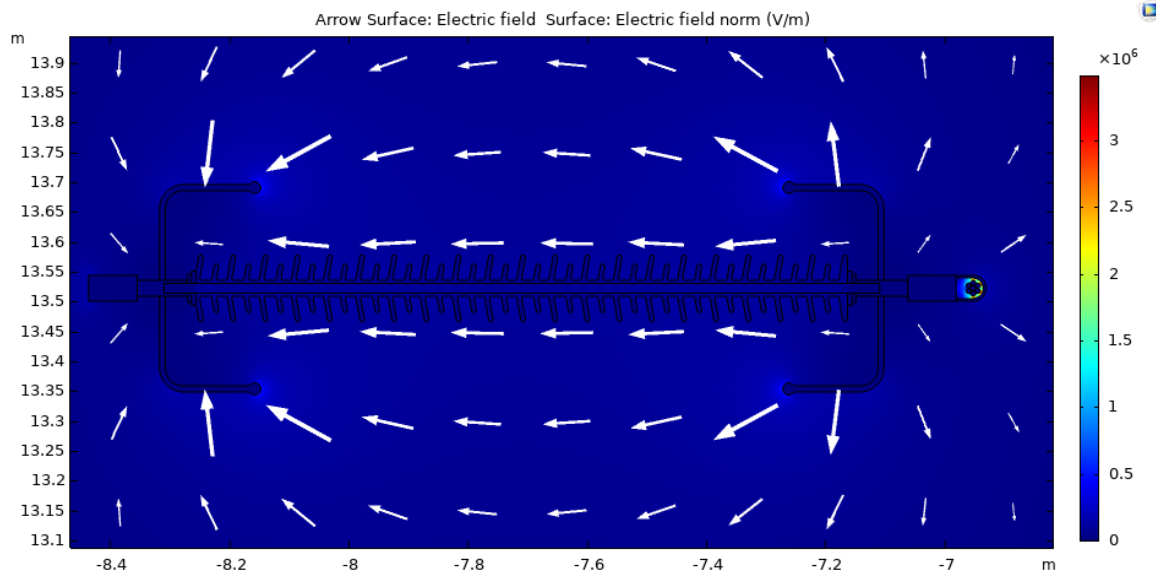
Obr. L8: Dvojité izolační závěs – rozložení elektrické indukce

Příloha M – Aplikace ochranného jiskříště, 110 kV, 30 MW

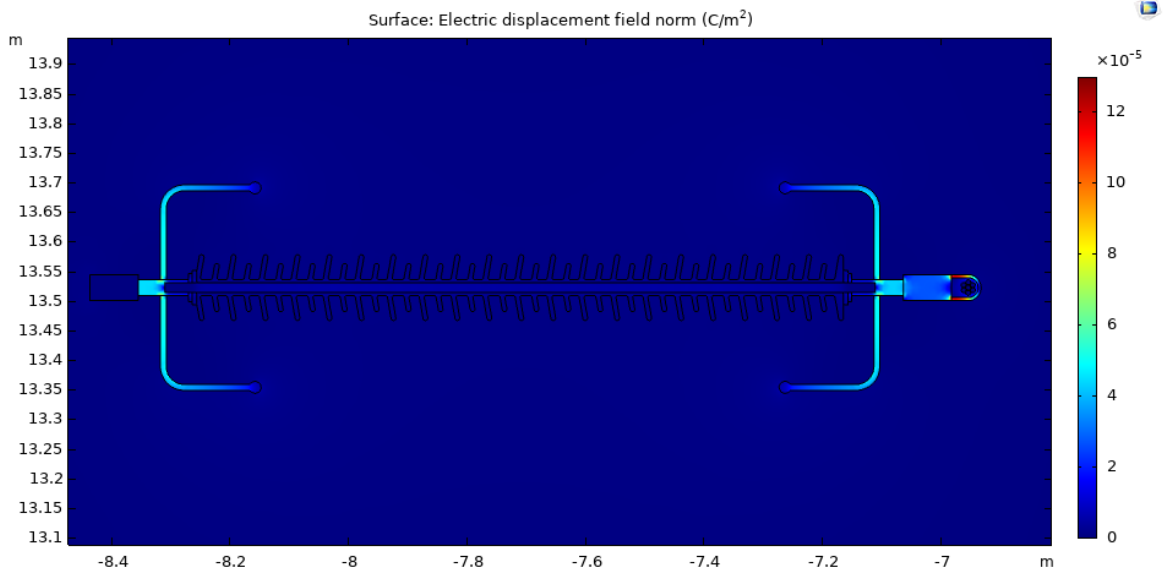
Grafické výstupy COMSOL Multiphysics



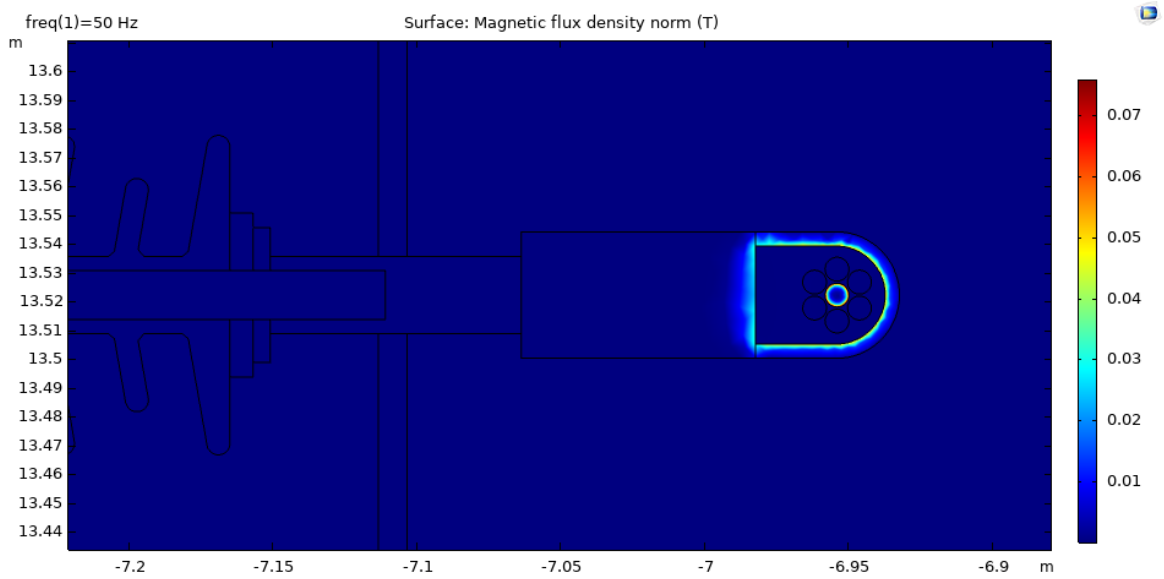
Obr. M1: Rozložení elektrického potenciálu



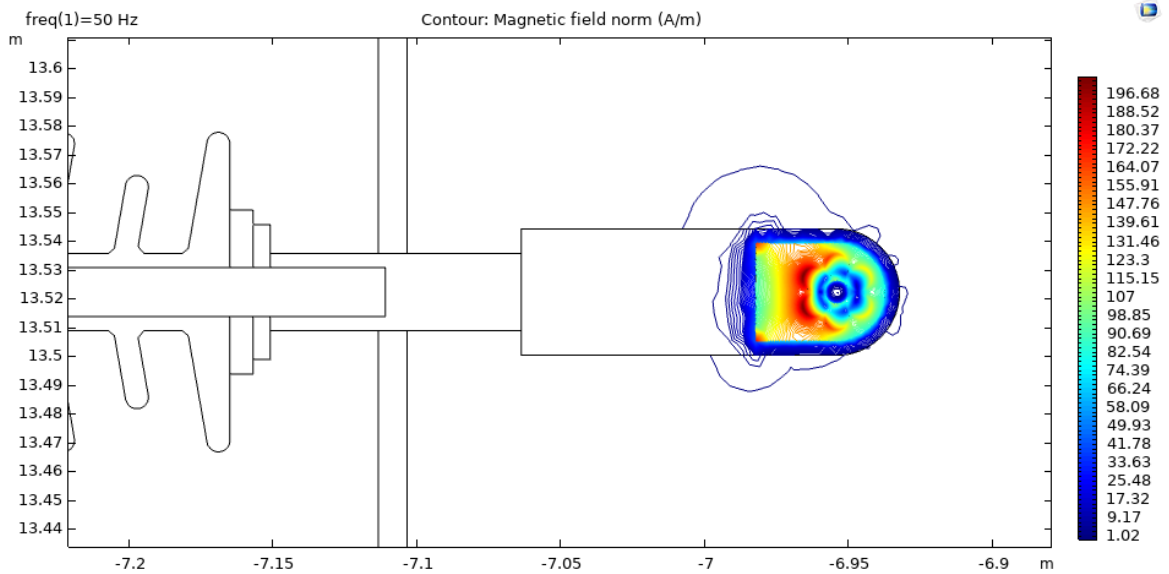
Obr. M2: Rozložení elektrické intenzity



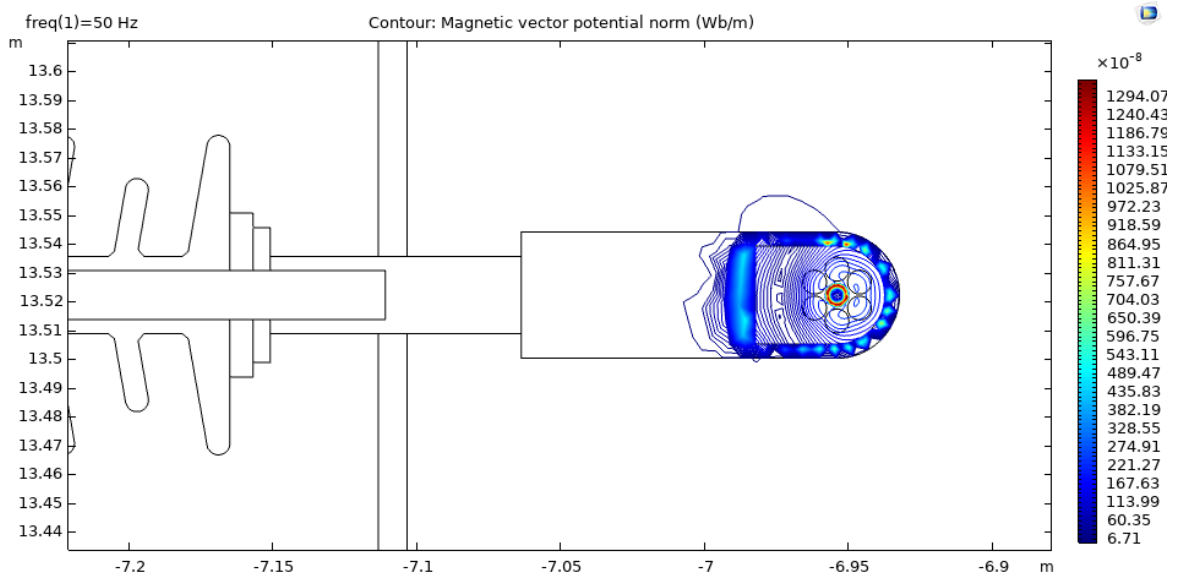
Obr. M3: Rozložení elektrické indukce



Obr. M4: Rozložení magnetické indukce



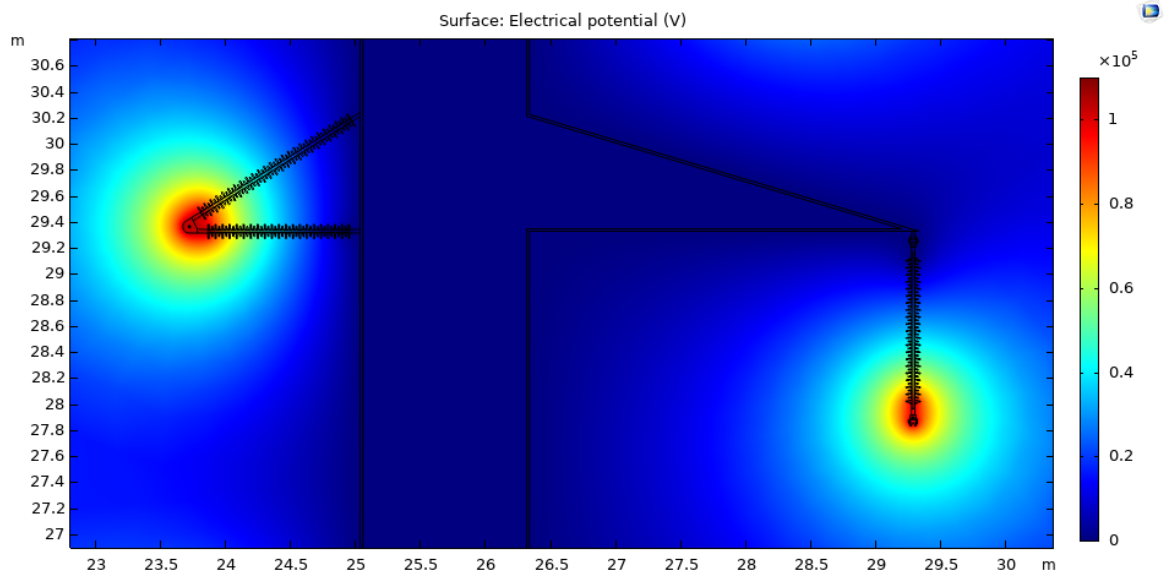
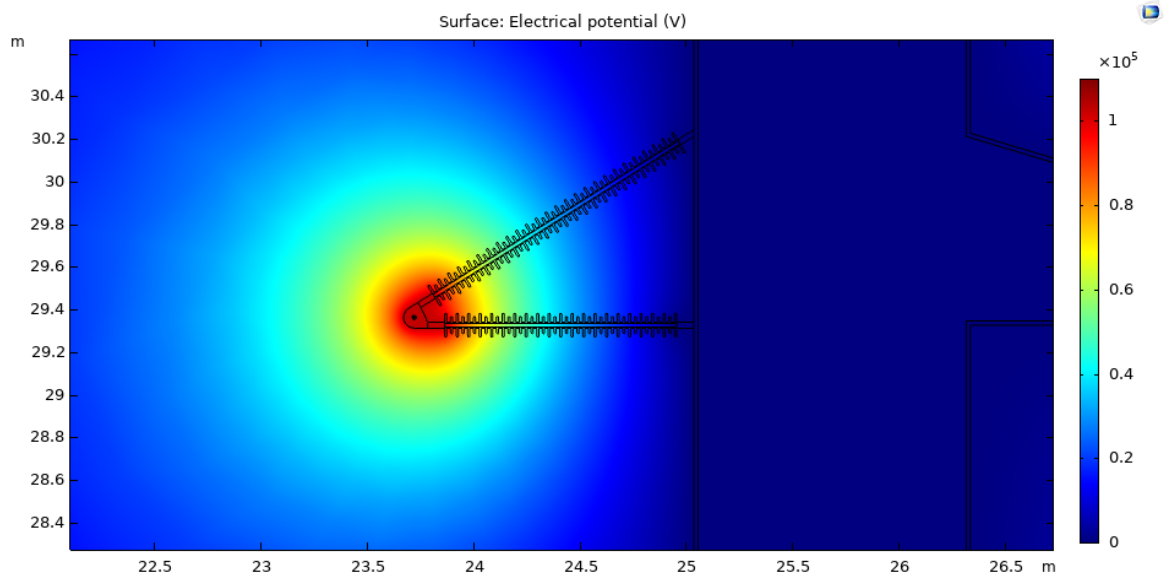
Obr. M5: Rozložení magnetické intenzity

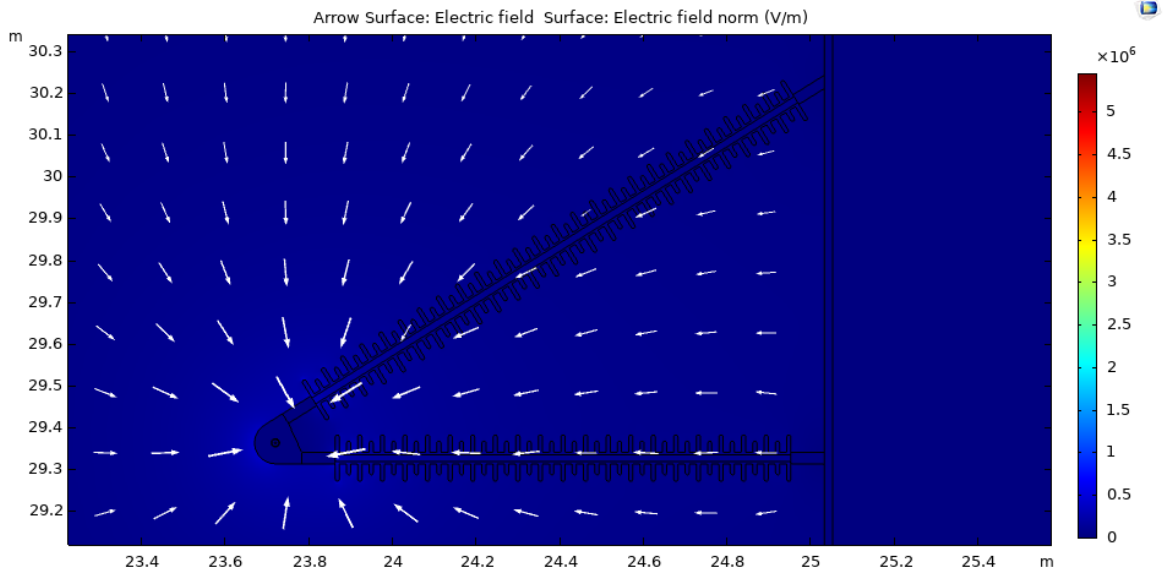


Obr. M6: Rozložení magnetického potenciálu

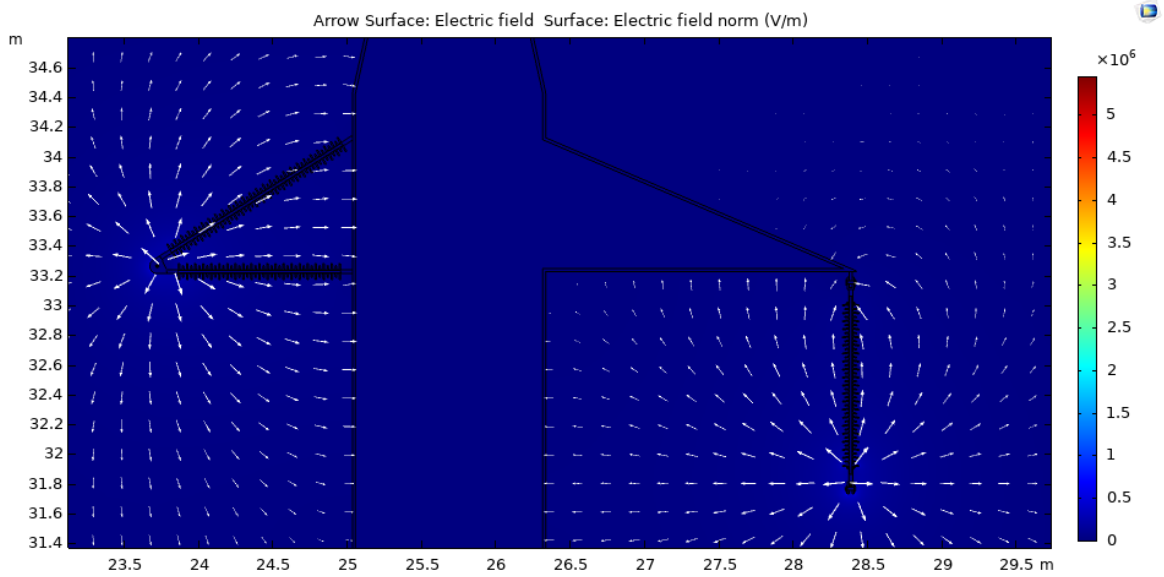
Příloha N – Konzole tvořená kompozitními izolačními řetězci

Grafické výstupy COMSOL Multiphysics

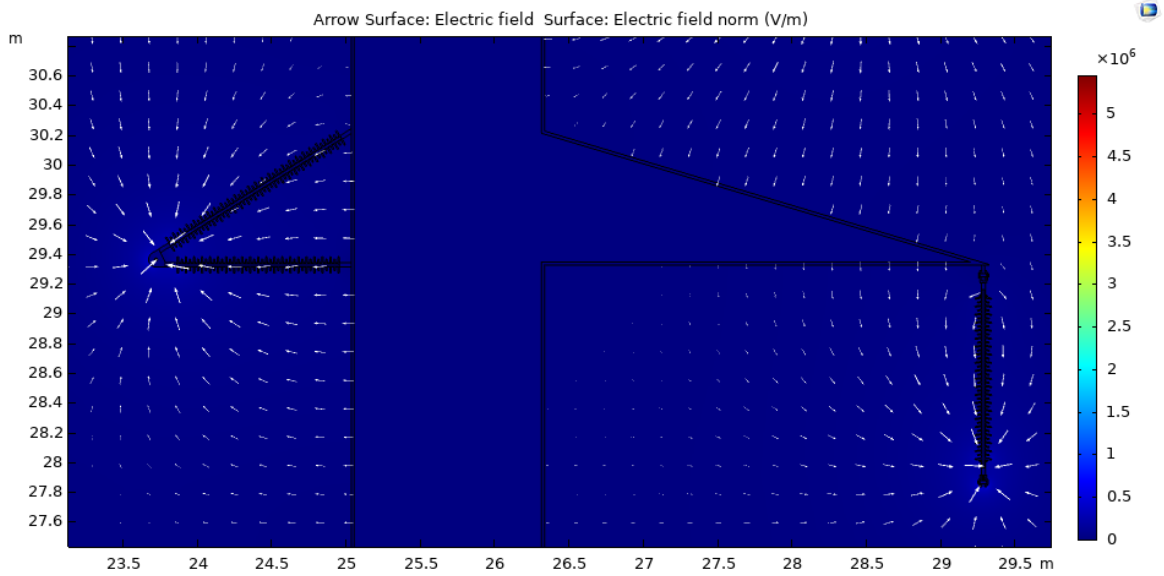
*Obr. N1: Rozložení elektrického potenciálu**Obr. N2: Rozložení elektrického potenciálu v okolí střední fáze*



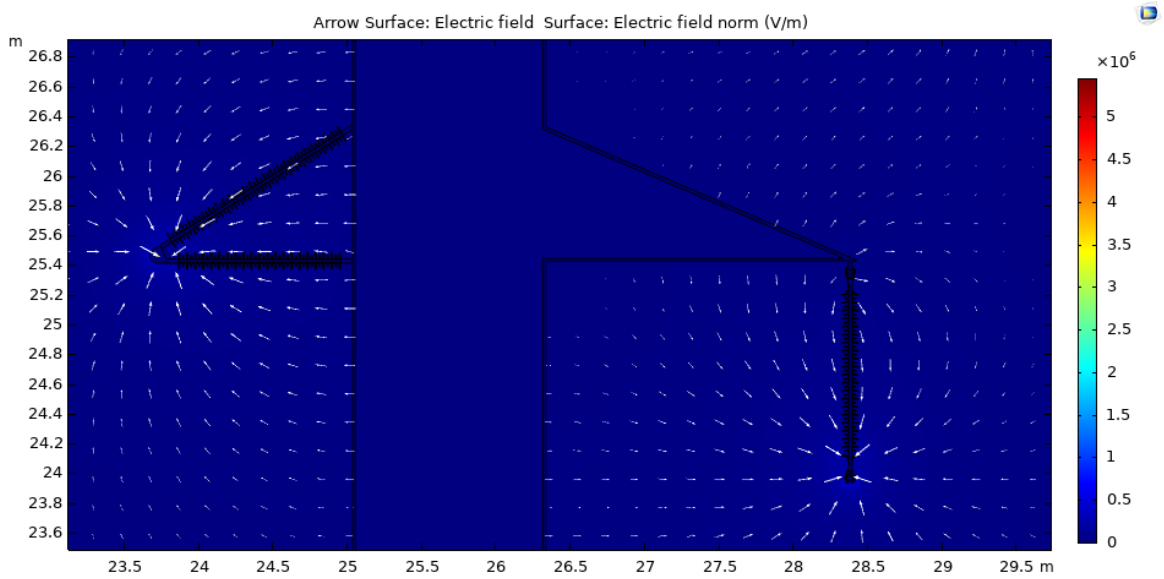
Obr. N3: Rozložení elektrické intenzity v okolí prostřední fáze



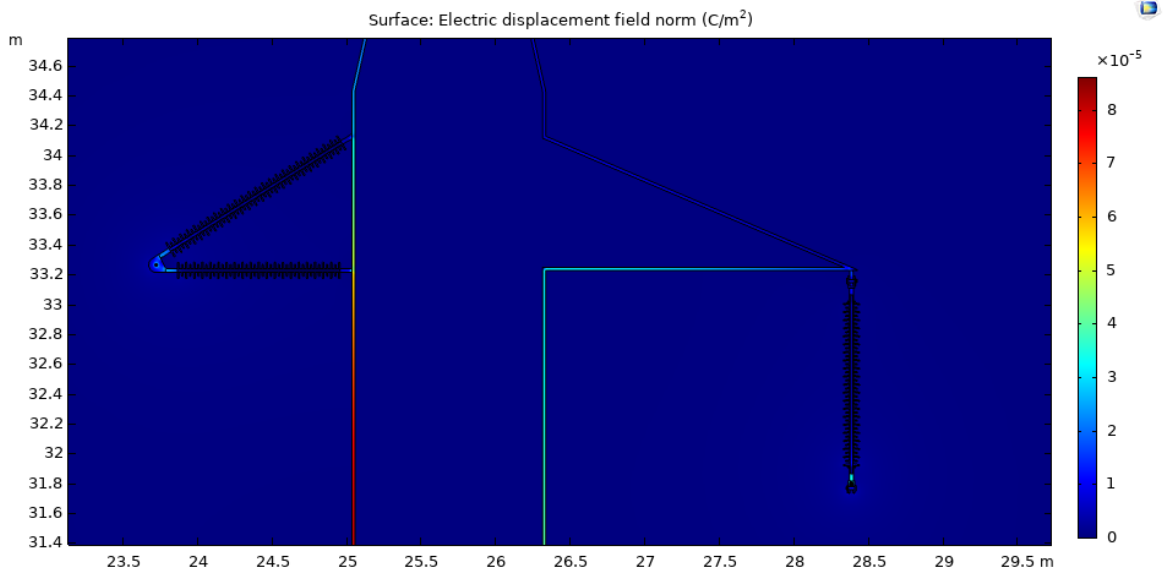
Obr. N4: Rozložení elektrické intenzity – fáze U



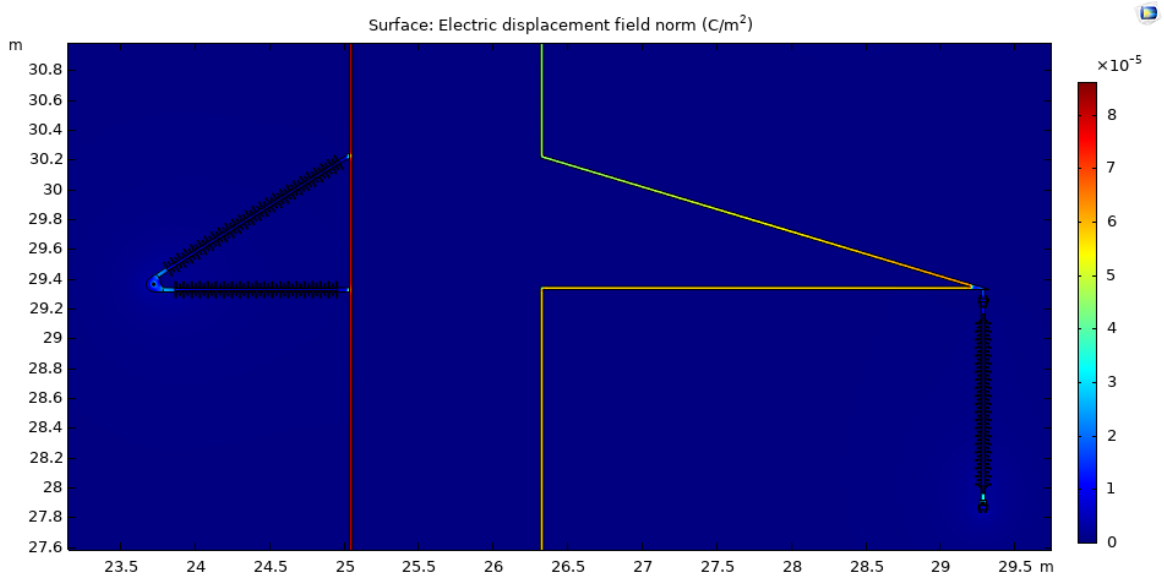
Obr. N5: Rozložení elektrické intenzity – fáze V



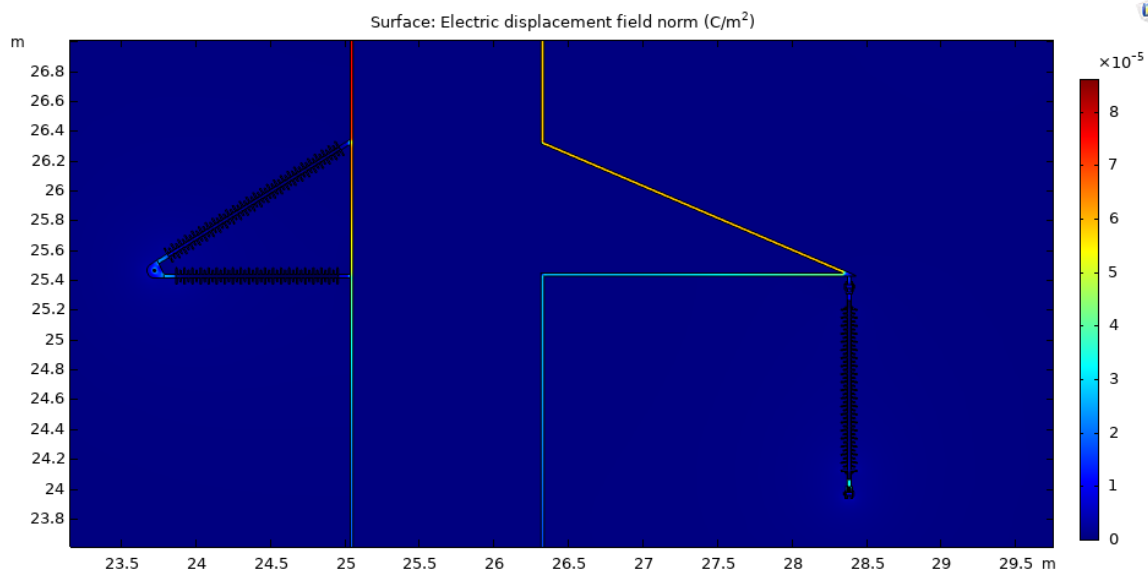
Obr. N6: Rozložení elektrické intenzity – fáze W



Obr. N7: Rozložení elektrické indukce – vrchní konzole



Obr. N8: Rozložení elektrické indukce – prostřední konzole

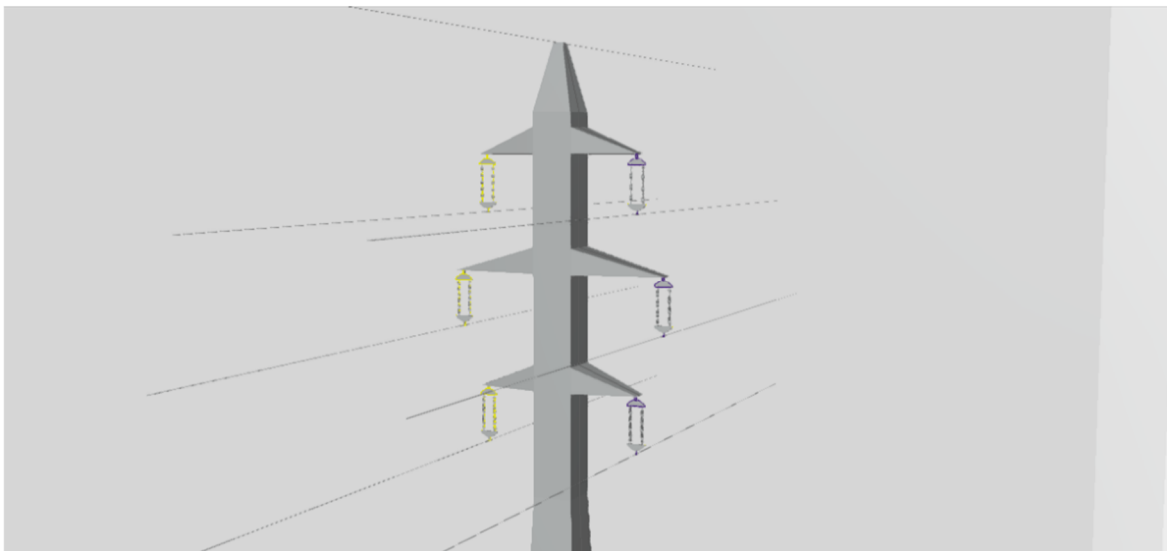


Obr. N9: Rozložení elektrické indukce – spodní konzole

Příloha O – Připravené 3D modely stožáru vedení vvn 110 kV

Sestava CAD aplikace Autodesk Inventor

tower.stp

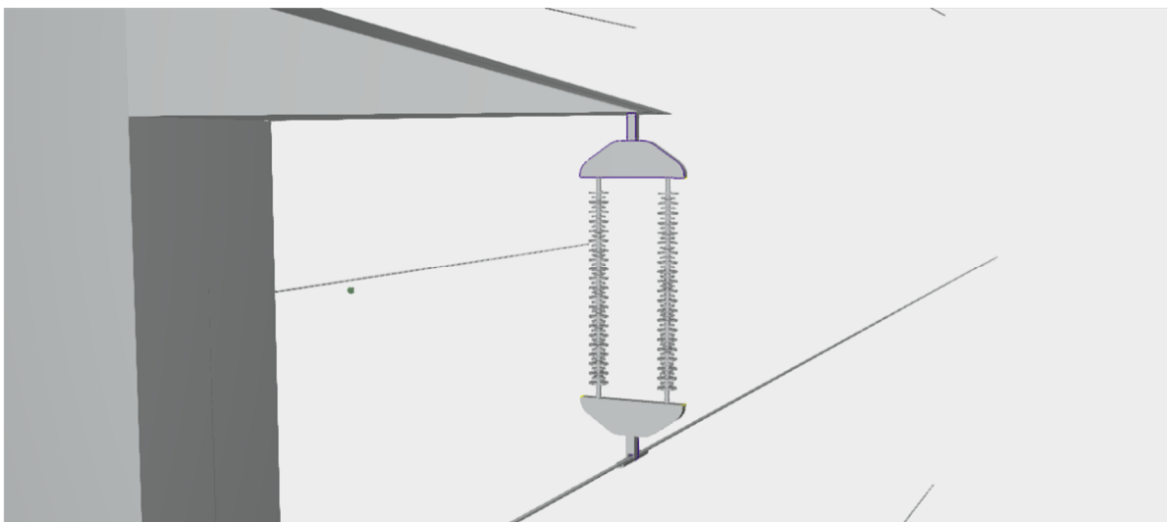


AUTODESK VIEWER

AUTODESK

Obr. O1: Pohled 1 na stožár vvn

tower.stp

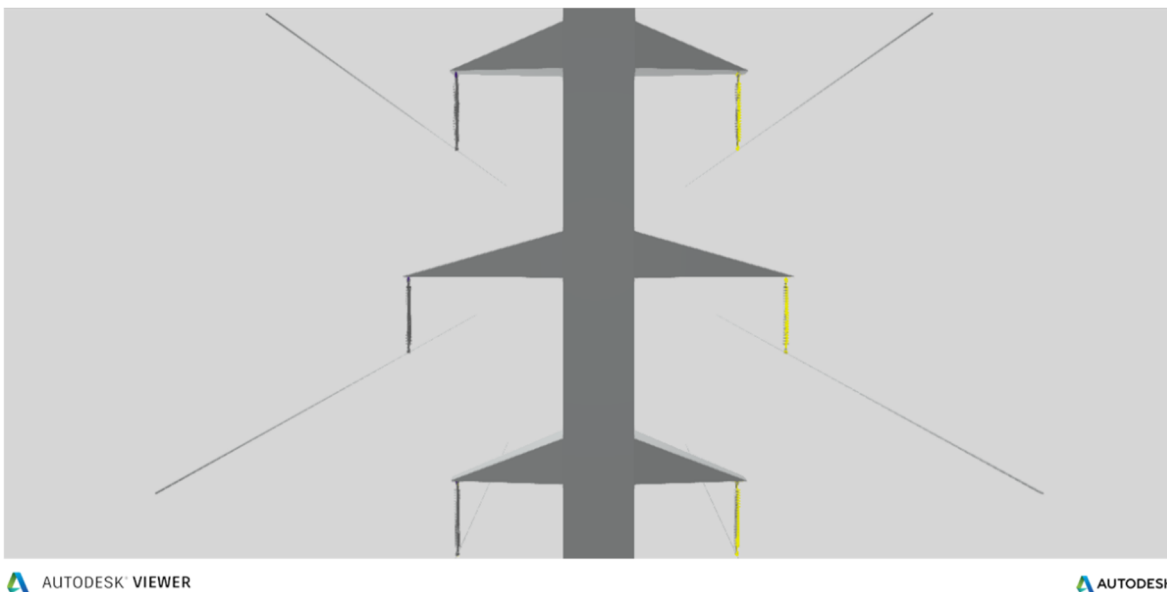


AUTODESK VIEWER

AUTODESK

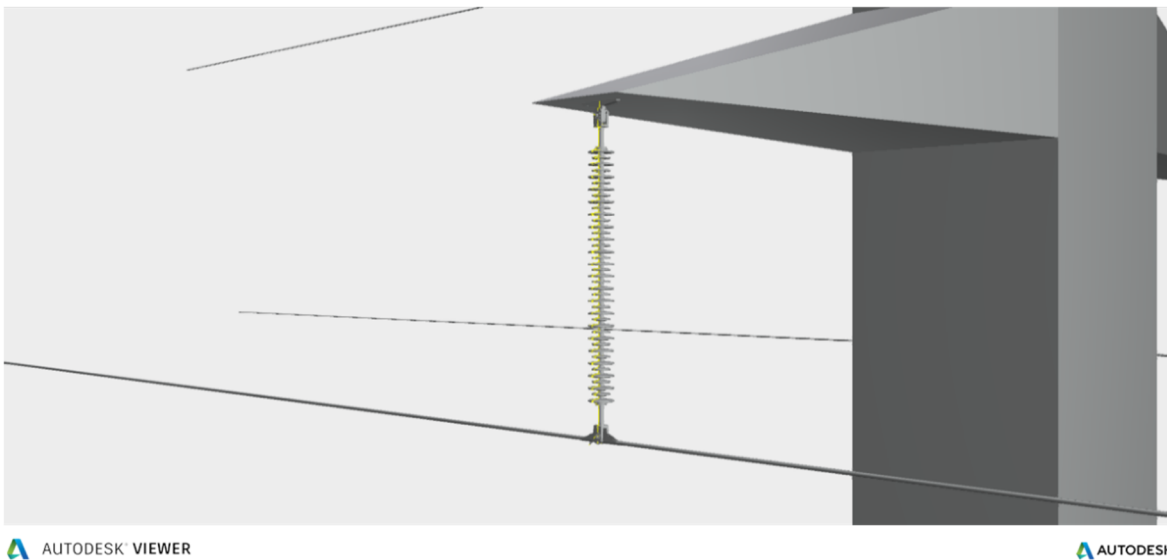
Obr. O2: Pohled 2 na stožár vvn, detail konzole a izolátorového závěsu

single-tower.stp



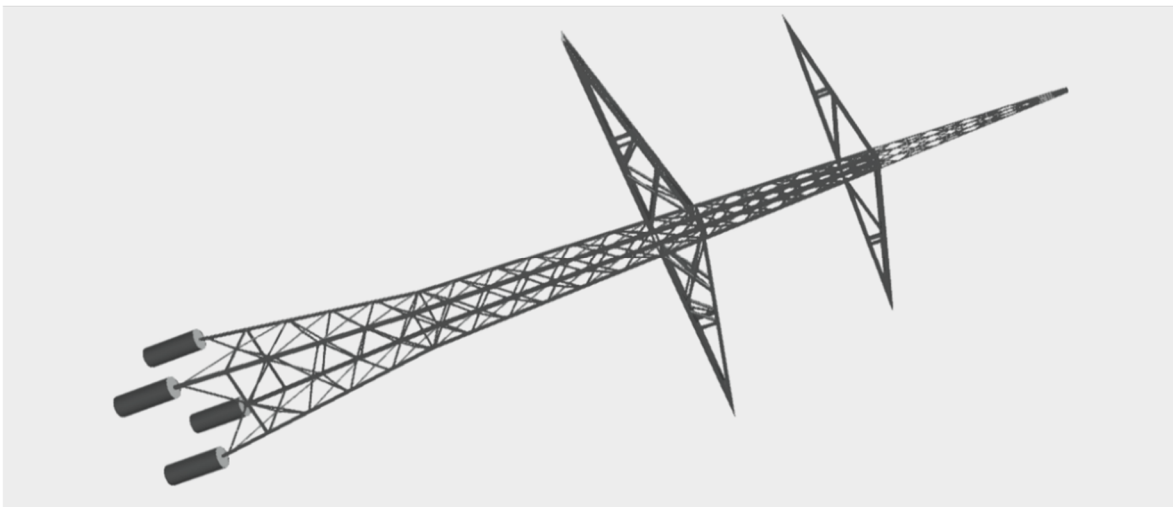
Obr. 03: Jiné uspořádání izolátorů

single-tower.stp



Obr. 04: Jiné uspořádání izolátorů 2

stozar-jehlan.stl



AUTODESK VIEWER

AUTODESK

Obr. 05: Stožár vedení 220 kV, starší provedení

Příloha P – Veličiny elektromagnetického pole

Skalární veličiny

- **Elektrický náboj**

Celkový elektrický náboj Q je tvořen volnými nebo vázanými nosiči a jeho hodnota je vždy násobkem elementárního náboje ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C). [28] Volné nosiče se mohou přemísťovat v makroskopickém měřítku, tedy i mimo samotné těleso, a jedná se buď o volné elektrony (v kovech) nebo ionty (v kapalinách a plynech). Vázané nosiče jsou elektrostatickou silou pevně svázány s vodičem. [29] Náboj může být rozložen v určitém objemu, ploše nebo po křivce. Vyjadřujeme jej s pomocí příslušné hustoty elektrického náboje:

- objemová hustota náboje

$$\rho = \frac{dQ}{dV} \quad (P1)$$

- plošná hustota náboje

$$\sigma = \frac{dQ}{dS} \quad (P2)$$

- lineární hustota náboje

$$\tau = \frac{dQ}{dl} \quad (P3)$$

- **Elektrický proud**

Elektrický proud je uspořádaný pohyb volných částic s elektrickým nábojem, daným průřezem, v určitém časovém intervalu a samozřejmě materiálem umožňujícím snadný průchod těchto částic. Jsou-li částice rovnoměrně rozloženy v celém průřezu a pohybují-li se stále stejným směrem, jedná se o stejnosměrný proud. Na rozdíl od proudu střídavého, který je dán obecnou, časově proměnnou funkcí $i(t)$ a jehož směr se v průběhu jeho působení mění. Okamžitá orientace proudu odpovídá směru kladně nabitých částic. [30] Nezbytnou podmínkou, aby mohl téci proud, je uzavřený elektrický obvod.

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (P4)$$

Vektorové veličiny

- **Síla působící na náboj**

Okolo vodiče protékajícího elektrickým proudem se utváří elektromagnetické pole, u něhož lze předpokládat silové účinky na elektrické náboje. Pole lze charakterizovat celkovou Lorentzovou silou \mathbf{F} , skládající se z elektrické složky \mathbf{F}_e a magnetické \mathbf{F}_m složky, která působí pouze na pohybující se náboje. [1] Obě tyto složky jsou zastoupeny v dalších fyzikálních (vektorových) veličinách, tj. intenzitě elektrického pole \mathbf{E} a magnetické indukci \mathbf{B} .

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (P5)$$

kde:

$$\mathbf{F}_e = q \mathbf{E} \quad (P6)$$

$$\mathbf{F}_m = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (P7)$$

- **Intenzita elektrického pole**

Vektorová veličina a základní parametr popisující vlastnosti elektrického pole, pro níž jsou typické elektrické silové čáry – siločáry. Pojmeme siločáry se rozumí křivky, k nimž jsou vektory elektrické intenzity tečnými vektory ve všech jejich definovaných bodech. Intenzita elektrického pole je určena vztahem pro elektrickou složku Lorentzovy síly:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q} \quad (P8)$$

- **Elektrická indukce**

Elektrická indukce \mathbf{D} úzce souvisí s elektrickou intenzitou \mathbf{E} , s níž je spjata přes látkovou konstantu – permitivitu daného prostředí ε .

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (P9)$$

- **Magnetická indukce**

Vektorová veličina a základní parametr popisující vlastnosti magnetického pole. K vizuálnímu zobrazení magnetického pole se využívá magnetických indukčních čar. Magnetická indukce je určena vztahem pro magnetickou složku Lorentzovy síly, která obsahuje vektorový součin rychlosti pohybu náboje \mathbf{v} a příslušnou velikost magnetické indukce \mathbf{B} :

$$\mathbf{F}_m = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (P10)$$

- **Intenzita magnetického pole**

Intenzita magnetického pole \mathbf{H} je provázána s magnetickou indukcí přes látkovou konstantu prostředí – permeabilitu prostředí μ .

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \mathbf{B} \quad (P11)$$

- **Proudová hustota**

Proudová hustota \mathbf{J} je svázána s elektrickou intenzitou přes konduktivitu γ , neboli měrnou elektrickou vodivost materiálu – prostředí. Konduktivita udává, jak je daná látka schopna vést elektrický proud. Převrácenou hodnotou konduktivity, tj. $1/\gamma$, dostáváme rezistivitu ρ (měrný elektrický odpor). Uvedené materiálové charakteristiky jsou teplotně závislé.

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (P12)$$