

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Bakalářská práce

---

IZOLAČNÍ PRVKY VN A VVN

---

Jan KOHOUT

červen 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan KOHOUT**  
Osobní číslo: **E17B0147P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Izolační prvky vedení vn a vvn**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Zásady pro vypracování

1. Zpracujte rešerši týkající se izolátorů pro venkovní vedení 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.



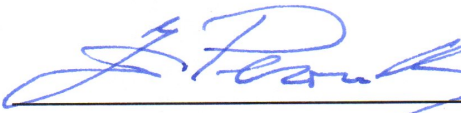
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

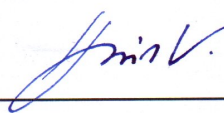
1. ČSN EN 60305: Izolátory pro venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 1 kV – Keramické nebo skleněné závěsné izolátory pro AC sítě – Charakteristiky talířových izolátorů. Český normalizační institut, 1997.
2. ČSN EN 61109: Izolátory pro venkovní vedení ? Kompozitní závěsné a kotevní izolátory pro systémy střídavého napětí se jmenovitým napětím vyšším než 1 000 V. Definice, zkušební metody a přijímací kritéria. Český normalizační institut, 2009.
3. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.
4. Mayer, Daniel. Elektrodynamika v energetice. Praha: BEN – technická literatura, 2005.

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

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

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



  
**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

---

## ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

---

Bakalářská práce se zabývá řešením rozložení elektrických a magnetických polí na izolačních prvcích na hladinách vysokého a velmi vysokého napětí. V práci jsou řešeny i mechanické vlivy působící na tyto izolační prvky. Simulace byly zaměřeny na již používaná uspořádání izolačních prvků a na jejich teoretické alternativy. Jako hlavní nástroje, pro tvorbu modelů a simulací, byly použity specializované programy COMSOL Multiphysics, SOLIDWORKS a ProgeCAD.

### KLÍČOVÁ SLOVA

Izolační prvky, izolátory, izolační materiály, elektrické pole, magnetické pole, mechanické namáhání, numerický model.

---

## ANNOTATION AND KEYWORDS

---

The bachelor's thesis deals with the study of the layout of electric and magnetic fields on insulating elements at high and very high voltage levels. The work also examines the mechanical effects on these insulating elements. The simulations were focused on the already used arrangements of insulating elements and their theoretical alternatives. The specialized programs COMSOL Multiphysics, SOLIDWORKS, ProgeCAD were used as the main tools for creating numerical models and simulations.

### KEYWORDS

Isolating elements, insulators, insulation materials, electric field, magnetic field, mechanical stress, numerical model.

---

## PODĚKOVÁNÍ

---

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D za odborné vedení, rady, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala. Také chci poděkovat svému dědečkovi Václavu Sýkorovi za jeho důvěru a za to, že mi byl vždy oporou.

---

## PROHLÁŠENÍ

---

Předkládám tímto k posouzení bakalářskou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury, a pramenů a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, dne 18. června 2020

Jan Kohout

---

## OBSAH

---

1	ÚVOD	9
2	IZOLÁTORY	10
2.1	Základní funkce izolátoru . . . . .	10
2.2	Historie používání izolátorů . . . . .	10
2.3	Rozdělení izolátorů podle konstrukce . . . . .	11
2.4	Rozdělení izolátorů podle způsobu uchycení . . . . .	11
2.5	Rozdělení izolátorů podle výrobního materiálu . . . . .	14
2.6	Rozdělení izolátorů podle napěťové hladiny . . . . .	16
2.7	Geometrické uspořádání izolátorů . . . . .	21
2.8	Rozdělení izolátorů dle úrovně znečištění . . . . .	23
3	ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	24
3.1	Základní pojmy elektromagnetického pole . . . . .	24
3.2	Metody řešení rozložení elektromagnetického pole . . . . .	29
4	MECHANIKA	30
5	NUMERICKÝ MODEL	34
5.1	Numerický model elektromagnetického pole . . . . .	34
5.2	Numerický model mechanického namáhání . . . . .	38
6	ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY	40
6.1	Bezporuchové vedení VN . . . . .	40
6.1.1	Reálně používané uspořádání . . . . .	40
6.1.2	Teoreticky navržené uspořádání . . . . .	43
6.2	Mechanické namáhání konzol na hladině VN . . . . .	47
6.2.1	Reálně používané uspořádání . . . . .	47
6.2.2	Teoreticky navržené uspořádání . . . . .	48
6.3	Bezporuchové vedení VVN . . . . .	49
6.3.1	Reálně používané uspořádání . . . . .	49
6.3.2	Teoreticky navržené uspořádání . . . . .	53
6.4	Porucha na vedení VVN . . . . .	56
6.4.1	Reálně používané uspořádání . . . . .	56
6.4.2	Teoreticky navržené uspořádání . . . . .	58
6.5	Mechanické namáhání konzol na hladině VVN . . . . .	59
6.5.1	Reálně používané uspořádání . . . . .	59
6.5.2	Teoreticky navržené uspořádání . . . . .	60
7	ZÁVĚR	61
A	PŘÍLOHY	65



---

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

---

$A$	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$	magnetický vektorový potenciál
$C$	F	kapacita
$f$	Hz	frekvence
$F$	N	síla
$B$	T	magnetická indukce
$E$	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	intenzita elektrického pole
$E$	MPa	modul pružnosti v tahu
$D$	$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$	elektrická indukce
$H$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	intenzita magnetického pole
$I$	A	elektrický proud
$J$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	proudová hustota
$l$	m	délka
$P$	W	elektrický výkon
$R$	$\Omega$	elektrický odpor
$S$	$\text{m}^2$	plocha
$U$	V	elektrické napětí
$U_m$	A	magnetické napětí
$v$	m/s	rychlost
$\gamma$	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	elektrická vodivost (konduktivita)
$\epsilon$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	permitivita prostředí
$\epsilon_r$		relativní permitivita
$\epsilon_{prod}$		poměrné prodloužení
$\sigma$	Pa	mechanické napětí
$\rho$	$\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$	objemová hustota náboje
$\rho$	$\Omega \cdot \text{m}$	měrný odpor
$\tau$	Pa	mechanické tečné napětí
$\Phi$	Wb	magnetický tok
$\varphi$	V	elektrický potenciál
$\varphi$	rad	fázový posuv proudu a napětí
$\mu$	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	permeabilita prostředí
$\mu_r$		relativní permeabilita
$\omega$	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	úhlová rychlost

---

## ÚVOD

---

V SOUČASNÉ době se vyvíjejí izolační prvky vysokého a velmi vysokého napětí z kompozitních materiálů, kterými mohou být nahrazeny komponenty na sloupech, stěžích a konzolách tak, aby byly dosaženy co nejlepší elektroizolační a mechanické vlastnosti. Hlavními důvody použití izolačních prvků z kompozitních materiálů a nahrazení stávajících izolačních prvků, je jejich nižší hmotnost a taktéž nižší náklady na jejich výrobu. Dalším důležitým důvodem použití kompozitních materiálů je možnost vytvoření materiálu, který je velice pevný a má výborné elektroizolační vlastnosti. Nahlíženo je rovněž na environmentální hledisko, kdy se na izolační prvky z kompozitních materiálů, z důvodu zabránění sedání plectva, přidávají stříšky.

V první části této bakalářské práce budou popsány používané druhy izolátorů v České republice na hladinách vysokého a velmi vysokého napětí, jejich stručná historie a rozdělení. V práci budou uvedeny a popsány základní materiály používané pro výrobu izolačních prvků, přičemž zde bude velice stručně popsána i samotná výroba. V následujících částech budou uvedeny základní teoretické poznatky z teorie elektromagnetického pole a z pružnosti a pevnosti. Z těchto teoretických poznatků bude následně vytvořen matematický a numerický model, pro výpočet rozložení elektrických a magnetických polí v okolí používaných a teoreticky navržených izolačních prvků na hladinách vysokého a velmi vysokého napětí. V práci budou také simulovány i mechanické vlivy na tyto izolační prvky.

Simulace budou prováděny z makroskopického hlediska, kdy bude na daný materiál nahlíženo jako na celek s jednotnými vlastnostmi. V simulacích budou zkoumány základní veličiny elektrického a magnetického pole (elektrický potenciál, elektrická intenzita a magnetická indukce), dle kterých bude závěrem posouzeno, zda je možné použít teoreticky navržené alternativy praxi.

---

## IZOLÁTORY

---

**V** ELEKTROTECHNICE hraje izolace velmi důležitou roli, z tohoto důvodu jsou také izolátory nedílnou součástí distribučních a přenosových sítí v elektroenergetice. Můžeme je nalézt na stožárech vedení vysokého napětí. Dále je také můžeme vidět v rozvodnách například na odpojovačích, vypínačích a transformátorech.

### 2.1 ZÁKLADNÍ FUNKCE IZOLÁTORU

Izolátor je mechanická součástka, která slouží k vzájemnému elektrickému oddělení (elektrickému odizolování) konstrukčních částí elektrických zařízení o rozdílném napětí, současně umožňuje přenos mechanických sil mezi konstrukčními částmi. [1]

Požadavky na funkci izolátorů:

1. Udržovat vzdálenost mezi vodičem a zemí (zemním vodičem).
2. Oddělovat vodič od konstrukce stožáru.
3. Odolávat mechanickému namáhání (statickému a dynamickému zatížení).
4. Odolávat elektrickým vlivům (elektromagnetickým jevům, přepětí).
5. Odolávat přírodním vlivům (teplo, mráz, UV záření, znečištění, déšť, sníh). [2]

### 2.2 HISTORIE POUŽÍVÁNÍ IZOLÁTORŮ

První využití izolátorů vzniklo při potřebách telegrafního průmyslu koncem 18. století a začátkem 19. století.

1840 - 1850 - První využívání skleněných izolátorů u telegrafních sítí. Lidé samozřejmě zkoušeli i jiné druhy materiálů, jako například: dřevo, cement, porcelán, včelí vosk a podobně. Nakonec ale převládlo sklo a porcelán.

### 2.3 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE KONSTRUKCE

- 1902 - 1920 - Postupem času se zvyšoval odběr elektřiny a tím se zvyšovaly i samotné napěťové hladiny, návrh izolátorů se tedy stal o něco komplexnější.
- Nejpoužívanějším byla stále keramika a sklo.
  - V roce 1907 inženýři Harold Buck a Edward Hewlett vynalezli první diskový izolátor.
- 1970 - SOUČASNOST - Rozvoj kompozitních izolátorů (polymerní izolátory). Mezi používané materiály patří například silikonová guma s přidanými aditivami a další materiály. [2]

### 2.3 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE KONSTRUKCE

Izolátory musí odolávat elektrickému a mechanickému namáhání, povětrnostním a chemickým vlivům a náhlým změnám teplot. Pro tyto podmínky musí být izolátory řádně konstruované. Druh konstrukce se dělí na dva typy:

- Izolátor typu A je izolátor, jehož délka nejkratší průrazné dráhy v pevném izolačním materiálu se rovná nejméně polovině délky nejkratší přeskokové vzdálenosti vzduchem vně izolačního tělesa. [3]
- Izolátor typu B je izolátor, jehož délka nejkratší průrazné dráhy v tuhém izolačním materiálu je kratší než polovina délky nejkratší přeskokové vzdálenosti vzduchem vně izolačního tělesa. [3]

### 2.4 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE ZPŮSOBU UCHYCENÍ

Rozdělení izolátorů podle upevnění je dáno především napěťovou hladinou, ve které jsou izolátory použity.

#### ***Podpěrné izolátory***

Podpěrné izolátory se používají na hladinách do 35 kV. Tyto izolátory se využívají pro holé i jednoduše izolované vodiče všech povolených průřezů. Podpěrné izolátory mají zpravidla hnědou barvu. [4] Izolátory jsou upevněny na příčných ramenech sloupů elektrického vedení. Na horním konci izolátoru je drážka pro uložení vodiče. Vodič prochází touto drážkou a je zde zajištěn vázáním. [5] Na následujících obrázcích 1 jsou příklady podpěrných izolátorů na hladině vysokého napětí .

## 2.4 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE ZPŮSOBU UCHYCENÍ



Obr. 1: Podpěrné izolátory na hladině VN

Podpěrné izolátory se také vyskytují v rozvodnách, kde se používají například u vypínačů, nebo odpojovačů. Na následujícím obrázku 2 můžeme vidět odpojovač s podpěrnými izolátory. Z velikosti stříšek na těchto izolátorech lze konstatovat, že odpojovač je pro vnitřní použití.



Obr. 2: Podpěrné izolátory na odpojovači

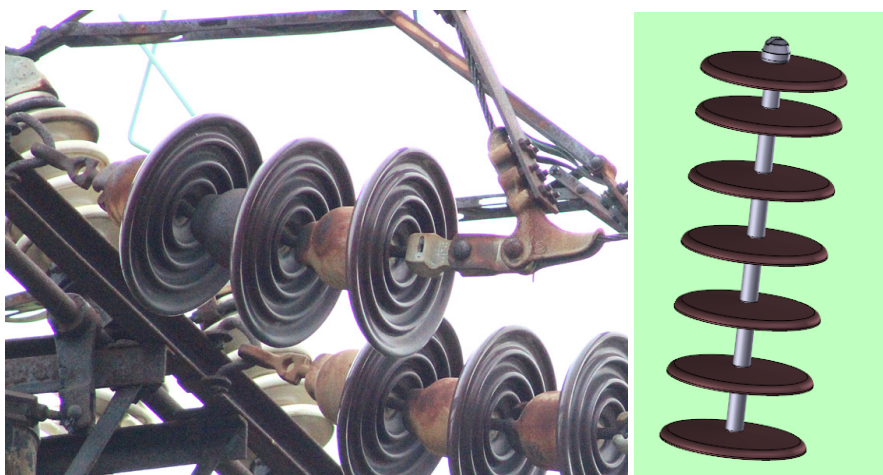
### *Závěsné izolátory*

Závěsné izolátory se používají výhradně na hladinách velmi vysokého napětí. Jsou určeny pro upevnění holých, nebo izolovaných vodičů. Velkou výhodou je zde umístění vodiče, který je umístěn níže než samotný izolátor, proto je vodič chráněn izolátorem

## 2.4 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE ZPŮSOBU UCHYCENÍ

proti atmosférickému přepětí, zároveň mají tyto izolátory vyšší odolnost vůči průrazům. Další výhodou je například samotné upevnění izolátoru, díky němu totiž nedochází k mechanickému namáhání konzoly (například při silném větru), na druhou stranu, kvůli této skutečnosti musí být dodržena dostatečná vzdálenost mezi izolátory. Kdyby se vodiče upevněné na izolátorech vzájemně dotkly, došlo by k mezifázovému zkratu. Dále je u závěsných izolátorů potřeba vyšší nosné konstrukce, kvůli dodržení dostatečné vzdálenosti od země. [4]

V praxi se můžeme setkat se dvěma typy závěsných izolátorů, jedním typem jsou izolátory talířové a druhým typem jsou izolátory tyčové.



Obr. 3: Talířové izolátory [6]

Talířový izolátor je složen z několika jednotlivých izolátorů do jednoho řetězce. Velkou výhodou je, že můžeme délku izolátoru regulovat počtem jednotlivých izolátorů v řetězci. Mezi další výhody patří například možnost výměny jednoho izolátoru v řetězci, namísto celého řetězce.

Tyčové izolátory jsou dnes asi nejpoužívanější závěsné izolátory na hladinách VVN. Jsou tvořeny pevným jádrem a na koncích jsou kovové armatury pro následné upevnění. Výhodou těchto izolátorů, oproti talířovým, je vyšší přeskokové napětí přibližně o 100 kV. Další výhodou je, že tyto izolátory jsou, v porovnání s talířovými izolátory, díky absenci kovových spojů kratší. Nevýhodou je, že při poškození spadne vodič na zem, nebo na konzolu, naopak u talířových izolátorů při zničení jednoho izolátoru v řetězci drží řetězec spojený dál. [7]

## 2.5 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE VÝROBNÍHO MATERIÁLU



Obr. 4: Tyčové keramické izolátory [8]

### *Průchodkové izolátory*

Průchodkové izolátory umožňují izolovaný průchod vodiče částí o jiném potenciálu, například uzemněnou nádobou transformátoru nebo stěnou rozvodny. Zvláštním provedením jsou kondenzátorové průchodkové izolátory, jejich dielektrikum je složeno z mnoha vrstev izolantu a vodivé folie. Folie nejsou vzájemně spojeny. Elektrické pole ve vrstvách izolantu je rozloženo rovnoměrně, nedochází k sršení a celý kondenzátorový průchodkový izolátor je menší v porovnání s klasickým [1]. Jelikož tato práce není zaměřena na průchodkové izolátory, nebudeme se jimi v následujících částech zabývat.

## 2.5 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE VÝROBNÍHO MATERIÁLU

Na výrobu izolátorů se používají nevodivé a nemagnetické materiály, kterými jsou zpravidla keramika, sklo, plast a kompozitní materiály.

Z mechanického hlediska musí mít materiály pro výrobu izolátorů takovéto vlastnosti:

- Vysoká mechanická pevnost
- Odolnost vůči změnám teplot

Z hlediska elektrického jsou důležité tyto vlastnosti:

- Vysoká rezistivita
- Nízká relativní permitivita
- Vysoká elektrická pevnost

### **Keramika**

Keramika je velmi pevný polykrystalický, žárupevný a žáruvzdorný materiál, který vzniká vypálením anorganických nekovových surovin. Vlastnosti keramiky jsou závislé na technologii zpracování. V České republice mají keramické izolátory zatím největší tradici. Na obrázku 6 je dle zdroje [2] blokově uveden velmi zjednodušený model výroby keramických izolátorů.

### **Sklo**

Sklo je obecně homogenní a amorfní, tedy nekystalická pevná látka, která je velmi odolná proti povětrnostním a chemickým vlivům, zároveň má nízkou tepelnou vodivost a elektrická pevnost se pohybuje v řádech 20 až 40 kV/mm. Pro výrobu izolátorů se díky výborným elektrickým parametrům používá sklo křemičité ( $SiO_2$ ), dále se používá živec, střepey a menší množství dalších látek [9].

Samotný postup výroby je dle zdroje [2] blokově uveden na obrázku 7.

### **Kompozitní materiály**

Kompozitní materiály jsou takové materiály, které vznikají sloučením dvou materiálů s různými vlastnostmi. Materiály dohromady mají vlastnost, jež nemá ani jeden materiál samostatně. Příkladem může být tedy jakýkoliv vícefázový materiál, tvořící pevnou látku, jako například litina nebo beton.

Na výrobu nosné konstrukce kompozitního izolátoru se používá orientované skleněné vlákno pojené reaktoplastickou pryskyřicí (polyester, epoxid), tato nosná konstrukce je vyrobená pultruzí (tažení za tepla). Na výrobu stříšek se používá silikonová pryž.

Izolátory z kompozitních materiálů jsou nejmladší druhy izolátorů. Za poslední dekádu se využití polymerních/kompozitních materiálů velice zvýšilo. Výhody kompozitních izolátorů oproti ostatním jsou:

- Vysoká odolnost proti mechanickým rázům a proti vandalismu
- Nízká hmotnost
- Snadnější manipulace při dopravě a při opravách
- Nižší cena u izolátorů vysokých hladin

Jako elektrická izolace se kompozitní materiály začali používat už v polovině 20.století. První generace polymerních izolátorů pro přenosové sítě pak byla představena v 70.tých letech 20.století. [10]

Na obrázku 8 je dle zdroje [11] blokově popsána výroba kompozitních izolátorů.



## 2.6 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE NAPĚŤOVÉ HLADINY



Obr. 5: Izolátor z kompozitního materiálu

### 2.6 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE NAPĚŤOVÉ HLADINY

Pro každou napěťovou hladinu jsou vyráběny různé druhy izolátorů. V bakalářské práci se zabývám rozdělením izolátorů pouze na hladinách:

- Vysokého napětí (VN)
- Velmi vysokého napětí (VVN)

#### *Izolátory VN*

Hodnoty napětí na úrovni vysokého napětí mezi vodiči se pohybují v rozmezí 1 kV až 52 kV. Napětí mezi vodičem a zemí se pohybuje v rozmezí 0,6 kV až 30 kV. Vodiče mohou být na izolátory upevněny dvěma způsoby, buďto svorkou, nebo třmenem. Příklad uchycení vodiče je možné vidět na obrázku 1.

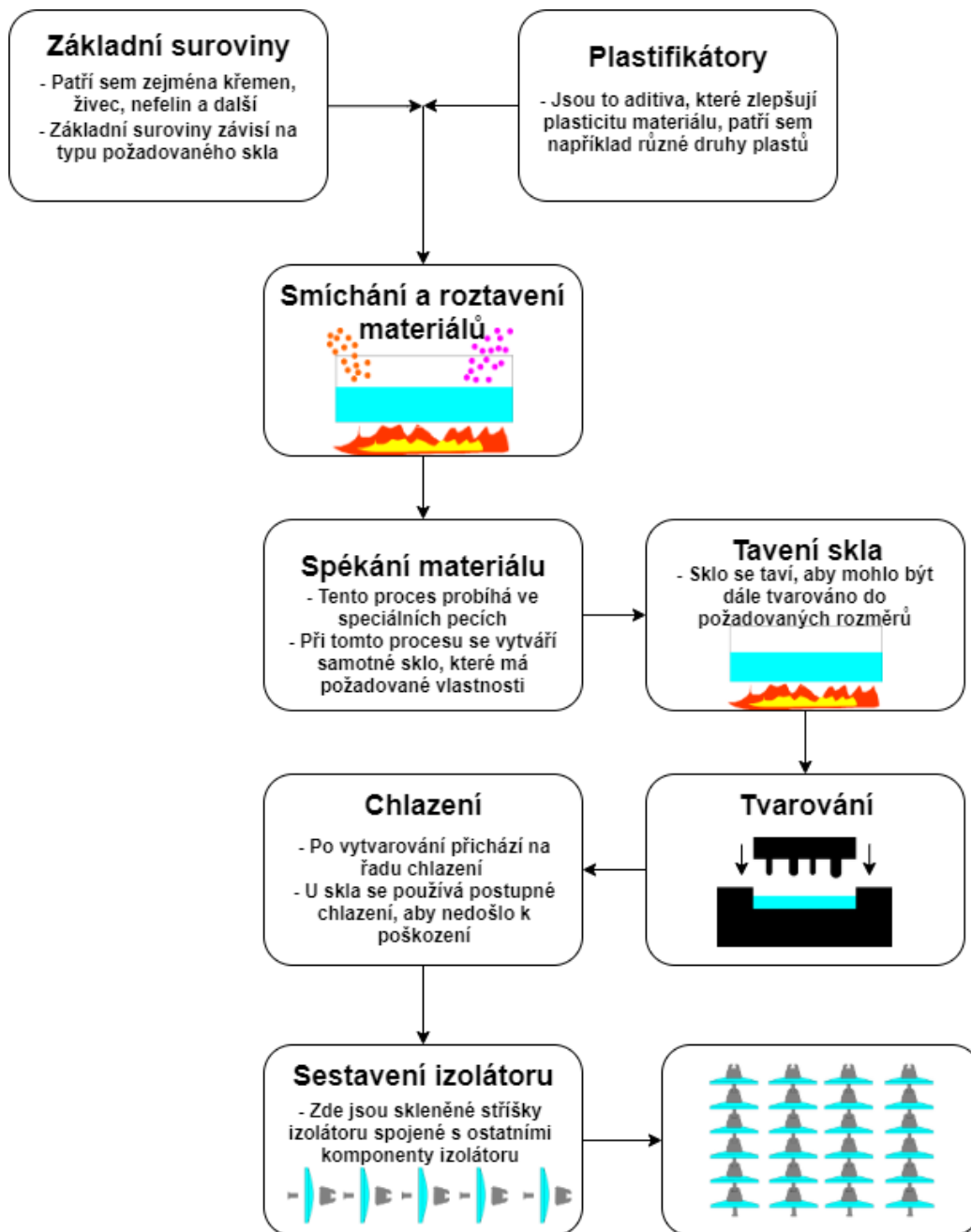
Jak už je zmíněno na straně 11, tak se podpěrné izolátory používají nejčastěji na 22 kV a 35 kV, přičemž 35 kV je hraniční hodnota napětí pro použití podpěrného izolátoru. Podpěrné izolátory VN jsou, dle zdroje [12] nejčastěji používány pro přímá vedení. Na obrázku 9 jsou zobrazeny modely podpěrných izolátorů pro hladiny VN.

## 2.6 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE NAPĚŤOVÉ HLADINY

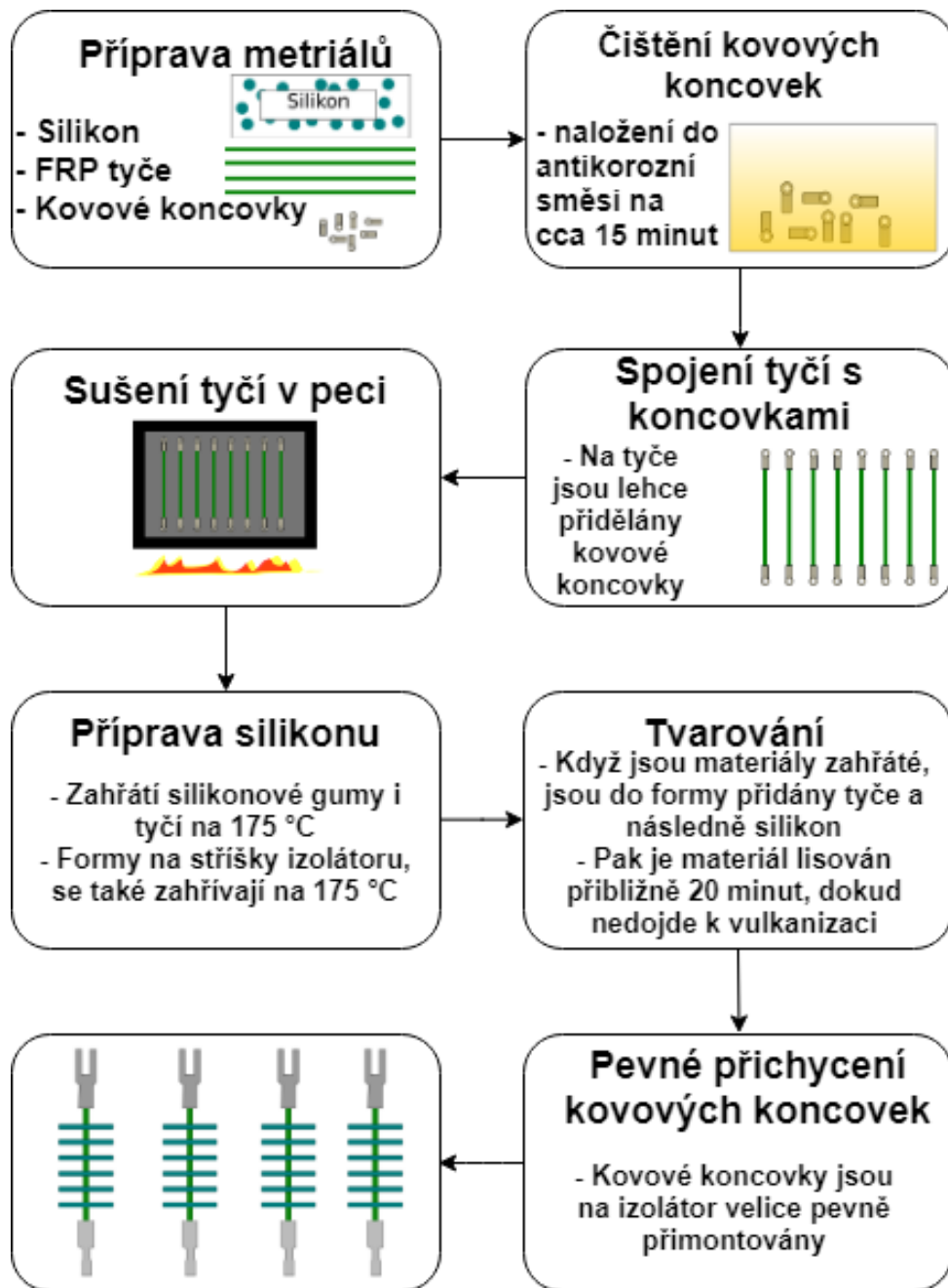


Obr. 6: Výroba keramických izolátorů

## 2.6 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE NAPĚŤOVÉ HLADINY

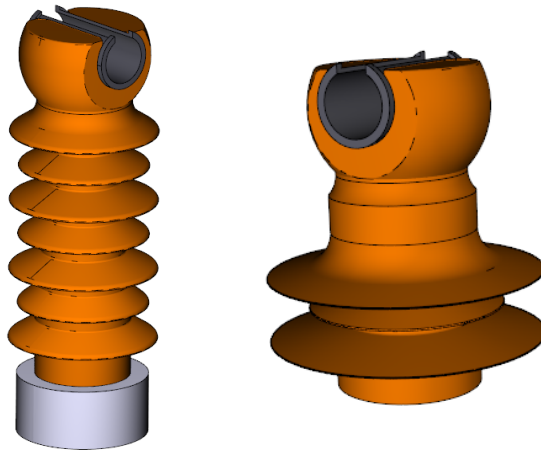


Obr. 7: Výroba skleněných izolátorů



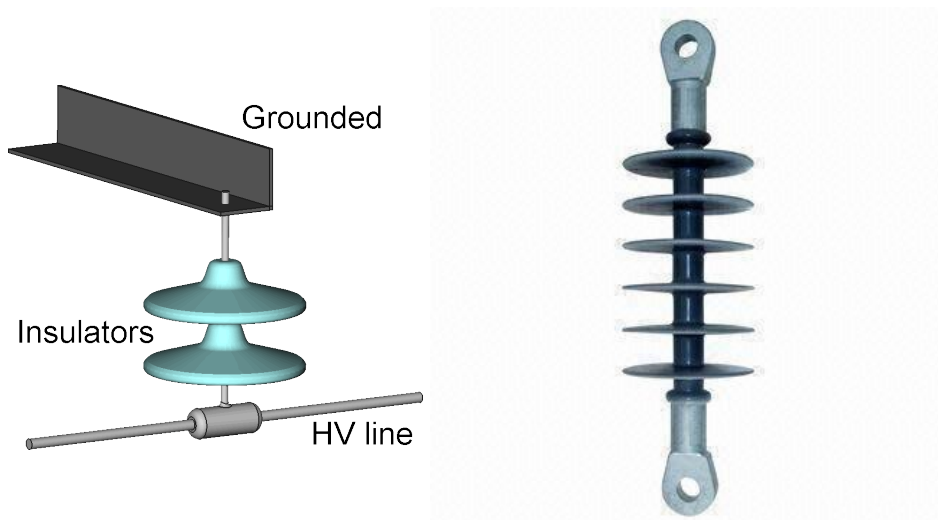
Obr. 8: Výroba kompozitních izolátorů

## 2.6 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE NAPĚŤOVÉ HLADINY



Obr. 9: Podpěrný izolátor vysokého napětí

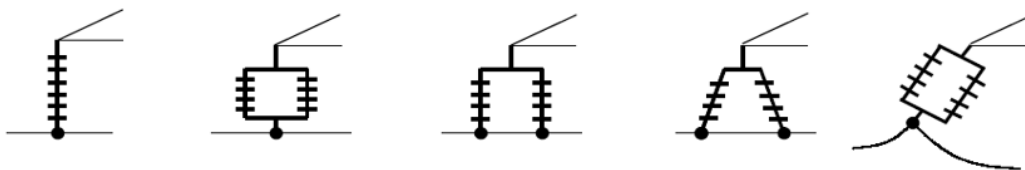
Na hladinách vysokého napětí, se od 22 kV také používají závěsné izolátory, které jsou zde především používány jako kotevní závěsy. Jejich největší využití, je ale na hladinách velmi vysokého napětí, čímž se budeme zabývat později. Bližší informace o závěsných izolátorech jsou dostupné na straně 12. Na obrázku 10 jsou tyto izolátory zobrazeny.



Obr. 10: Závěsné izolátory vysokého napětí [13], [14]

Při požadavku zvýšené bezpečnosti se používají tzv. dvojité závěsy. Příklad uspořádání těchto závěsů je zobrazen na následujícím obrázku 11.

## 2.7 GEOMETRICKÉ USPOŘÁDÁNÍ IZOLÁTORŮ



Obr. 11: Izolátorové závěsy [15]

### ***Izolátory VVN***

Velmi vysoké napětí (VVN) je označení pro elektrické napětí mezi vodičem a zemí v mezích od 30 kV do 171 kV, resp. od 52 kV do 300 kV mezi vodiči [16]. Izolátory pro hladiny velmi vysokého napětí jsou, co se týká konstrukce, pouze závěsné. Tyto závěsné izolátory pak tvoří řetězce, jejichž velikost je dána napěťovou hladinou. Dle zdroje [4] lze řetězce řadit následovně:

- 110 kV - 9 talířových izolátorů nebo 1 izolátor tyčový
- 220 kV - 17 talířových izolátorů nebo 2 izolátory tyčové
- 400 kV - 24 talířových izolátorů nebo 3-4 izolátory tyčové

Tyto izolátory jsou hojně používané jako izolátorové závěsy, jak je uvedeno na obrázku 11.

## 2.7 GEOMETRICKÉ USPOŘÁDÁNÍ IZOLÁTORŮ

Jelikož v naší zemi převládá venkovní vedení, sloupy a stožáry jsou nezbytnou součástí přenosové i distribuční soustavy. V tomto ohledu existují pravidla a předpisy, jak izolátory na sloupy či stožáry umístit. V následující kapitole jsou zmíněna některá základní geometrická uspořádání izolátorů na konzolách sloupů vysokého napětí a na stožárech velmi vysokého napětí.

### ***Geometrické uspořádání izolátorů na hladinách VN***

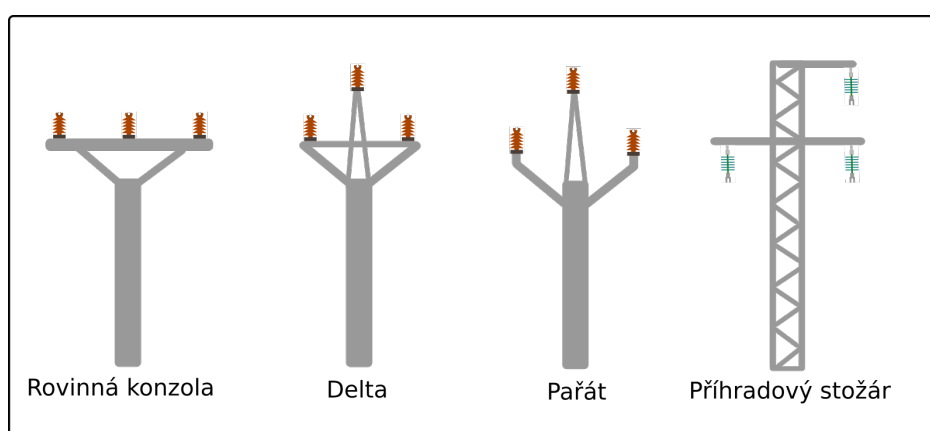
Obecně se jako podpěrné body v sítích vysokého napětí používají sloupy a stožáry:

- Betonové sloupy
- Dřevěné sloupy
- Příhradové stožáry
- Ocelové a plechové sloupy

Ke stožárům a sloupům jsou připevněny konzoly, na kterých jsou umístěny izolátory. Konzoly dle zdroje [12] dělíme na:

- Rovinná konzola
- Delta
- Pařát
- Šestivodič
- Stromečkové závěsné konzoly

Několik příkladů je uvedeno na následujícím obrázku 12.



Obr. 12: Typy používaných konzol

### ***Geometrické uspořádání izolátorů na hladinách VVN***

Pro venkovní vedení jsou na hladinách velmi vysokého napětí používány, jako nosné body izolátorů, stožáry různých geometrických uspořádáních. V následující části této podkapitoly se čtenář okrajově dozví, jaké druhy stožáru jsou u nás v ČR používány.

Stožáry na hladině 110 kV bezpečně poznáme tak, že obsahují pouze jedno zemnicí lano. Toto lano je umístěné nejvýše ze všech lan a jeho hlavní funkcí je chránit ostatní vodiče před atmosférickým přepětím. Níže jsou uvedeny dva nejvíce používané stožáry na hladině 110 kV:

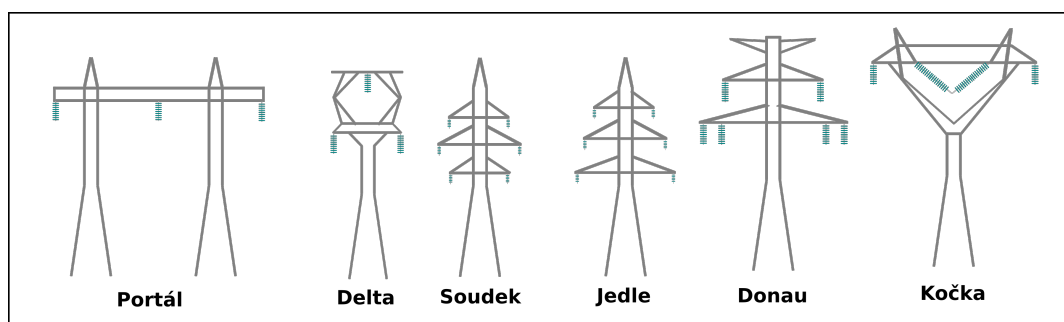
- Jedle
- Soudek

## 2.8 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ DLE ÚROVNĚ ZNEČIŠTĚNÍ

Na hladině 220 kV se používají stožáry, které musí být dimenzovány na vyšší namáhání. Stožáry na hladině 220 kV bezpečně poznáme podle dvou zemnicích lan. Nejrozšířenější stožáry na hladině 220 kV v ČR jsou:

- Portál
- Kočka
- Delta
- Donau

Všechny výše uvedené stožáry jsou zobrazeny na následujícím obrázku obrázku 13.



Obr. 13: Typy stožárů

## 2.8 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ DLE ÚROVNĚ ZNEČIŠTĚNÍ

Co se týče znečištění, rozlišujeme oblasti na tzv. stupně znečištění dle tabulky 1. Podle stupně znečištění se určuje tvar a velikost stříšek na izolátoru, které prodlužují povrchovou délku, za deště udržují část povrchu suchou a zamezují usazování nečistot po celé délce povrchu. Velmi důležitým parametrem je zde tzv. niťová vzdálenost, což je jinými slovy očekávaná dráha přeskoků [17].

Tab. 1: Stupně znečištění

Stupeň I	Malé znečištění (Horské oblasti)
Stupeň II	Střední znečištění (Vesnice)
Stupeň III	Silné znečištění (Města)
Stupeň IV	Velmi silné znečištění (Okolí zdrojů, okolí tepláren)
Stupeň N	Námraza



---

 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE
 

---

**T**HEORIE elektromagnetického pole je velmi důležitá partie ve všech oborech elektrotechniky. Ať už se jedná o návrh plošného spoje, přes návrh elektromotoru, či návrh nějakého sdělovacího systému, vždy musíme brát v potaz účinky tohoto pole. Elektromagnetické pole tedy hraje velmi významnou roli i u zkoumání a návrhu izolačních prvků. Proto, abychom mohli elektromagnetické pole řešit, musíme se seznámit se základními pojmy a s metodami řešení, kterým je věnována tato kapitola.

### 3.1 ZÁKLADNÍ POJMY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Tato kapitola okrajově čtenáře seznámí se základními veličinami, pojmy a vztahy elektromagnetického pole, které jsou nezbytné pro řešení problémů spojených právě s elektromagnetickým polem.

V následující části jsou vyjmenovány skalární veličiny elektromagnetického pole. Tyto veličiny jsou popisovány, jak název napovídá, pouze velikostí, nikoliv směrem. Jsou to tedy veličiny jednorozměrné. Mezi tyto veličiny dle zdroje [18] patří:

- Elektrický náboj

$$Q = I \cdot t(\text{C}) \quad (1)$$

- Elektrické napětí

$$U_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}(\text{V}) \quad (2)$$

- Magnetické napětí

$$U_{mAB} = \int_A^B \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}(\text{A}) \quad (3)$$

- Elektrický indukční tok

$$\Psi = \iint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}(\text{C}) \quad (4)$$

### 3.1 ZÁKLADNÍ POJMY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

- Magnetický indukční tok

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} (\text{Wb}) \quad (5)$$

- Elektrický proud

$$I = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} (\text{A}) \quad (6)$$

- Elektrický potenciál

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi \quad (7)$$

V popisu elektromagnetického pole se setkáváme nejen se skalárními veličinami, ale i s vektorovými, které mají kromě své velikosti i směr. V teorii elektromagnetického pole jsou hlavními vektorovými veličinami tzv. stavové vektory pole, které jsou, dle zdroje [19], uvedeny v následující tabulce 2.

Tab. 2: Stavové vektory pole

Intenzita elektrického pole	$(\text{Vm}^{-1})$	$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{Q}$
Magnetická indukce	(T)	$\mathbf{F}_m = Q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$
Elektrická indukce	$(\text{Cm}^{-2})$	$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$
Proudová hustota	$(\text{Am}^{-2})$	$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E}$
Intenzita magnetického pole	$(\text{Am}^{-1})$	$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \mathbf{B}$

Vzorce pro intenzitu elektrického pole a magnetickou indukci, jenž jsou uvedeny v tabulce 2, vychází z Lorentzovy síly 8, což je síla, kterou působí elektromagnetické pole na částici s nábojem  $Q$ , pohybující se rychlostí  $\mathbf{v}$ . [20]

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m = Q \cdot [\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})], \quad (8)$$

kde  $\mathbf{F}_e$  je příspěvek síly od elektrického pole,  $\mathbf{F}_m$  je příspěvek síly od magnetického pole,  $\mathbf{E}$  je intenzita elektrického pole,  $\mathbf{v}$  je rychlost pohybujícího se náboje a  $\mathbf{B}$  je magnetická indukce.

Další vektorovou veličinou, se kterou se můžeme setkat je tzv. Magnetický potenciál, který je definován vztahem:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (9)$$

Podrobnější informace o těchto veličinách jsou uvedeny ve zdroji [20].

Vztahy mezi stavovými vektory jsou dány tzv. materiálovými konstantami, které jsou uvedeny v následující části.

Pro řešení elektromagnetického pole se používají tzv. Maxwellovy rovnice. Tyto rovnice jsou axiomy elektromagnetického pole. Vznikly zobecněním Faradayových experimentů a jejich důsledky, které z nich plynou, jsou praxí plně potvrzeny [20].

### 3.1 ZÁKLADNÍ POJMY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Maxwellovy rovnice můžeme psát v integrálním, či diferenciálním tvaru, přičemž Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru platí pouze v regulárních bodech pole, tzn. v bodech, kde jsou tyto vektory spojité a diferencovatelné. K takovým bodům nepatří například rozhraní. Tyto body nazýváme singulárními body. Pro použití Maxwellových rovnic v singulárních bodech pak musíme použít podmínky na rozhraní.

Samotné Maxwellovy rovnice v integrálním i diferenciálním tvaru jsou, dle zdroje [20], uvedeny v následující tabulce 3.

Tab. 3: Maxwellovy rovnice

Název	Pořadí	Integrální tvar	Diferenciální tvar
Zobecněný Ampérův zákon	I.	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}$
Faradayův indukční zákon	II.	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$
Gaussova věta	III.	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q$	$\text{div}\mathbf{D} = \rho$
Zákon kontinuity mag. indukčního toku	IV.	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\text{div}\mathbf{B} = 0$

Další důležitou rovnicí, která se používá při výpočtech elektromagnetického pole, je tzv. rovnice pro proudovou hustotu. Tato rovnice lze opět vyjádřit v integrálním a diferenciálním tvaru. A její formulace je dle zdroje [20] následující:

$$\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{dQ}{dt} \quad \text{div}\mathbf{J} = -\frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (10)$$

Materiálové charakteristiky jsou takové charakteristiky, které nám popisují charakter použitého materiálu, nebo látky. Materiálové konstanty používané v řešení elektromagnetických polí jsou uvedeny dle zdrojů, [19] a [20], v tabulce 4.

Tab. 4: Materiálové konstanty

Název	Jednotka	Vztah/označení	Konstanta charakterizuje
Permitivita	(F/m)	$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$	Dielektrika
Konduktivita	(S/m)	$\gamma$	Vodiče
Permeabilita	(H/m)	$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$	Magnetika

Přičemž:

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ (F/m) se nazývá permitivitou vakua,

$\varepsilon_r(-)$  je relativní permitivita,

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ (H/m) se nazývá permeabilita vakua,

$\mu_r(-)$  je relativní permeabilita.

Jak už bylo zmíněno v předchozí části, lze pomocí materiálových konstant uvést vztahy mezi stavovými vektory, a ty jsou:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad \mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E} \quad (11)$$

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru platí jen v regulárních bodech. Regulárními body nejsou například body plochy, které oddělují jedno prostředí od druhého a kde dochází ke skokové (nespojité) změně parametrů  $\varepsilon$ ,  $\mu$  a  $\gamma$ . Stavové vektory  $\mathbf{2}$  se tam mění nespojitě a Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru tam neplatí [20]. Elektromagnetické pole je v těchto bodech popisováno pomocí podmínek na rozhraní, jež jsou uvedeny v tabulce 5, dle zdroje [19].

Tab. 5: Podmínky na rozhraní

-	El. stat. pole	El. proudové pole	Mag. stac. pole
Tečné složky	$E_{1t} = E_{2t}$	$E_{1t} = E_{2t}$	$H_{1t} - H_{2t} = K$
Normálové složky	$D_{2n} - D_{1n} = \sigma$	$J_{1n} = J_{2n}$	$B_{1n} = B_{2n}$
Zákon lomu vektorových čar	$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$	$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$	$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$

Ve výpočtech elektrických a magnetických polí se setkáváme s okrajovými podmínkami. Okrajové podmínky využívané v elektromagnetismu jsou:

- Dirichletova okrajová podmínka
  - okrajová podmínka 1. druhu
  - tato podmínka pracuje se známým potenciálem  $\varphi$  na okraji určené oblasti
- Neumannova okrajová podmínka
  - okrajová podmínka 2. druhu
  - tato podmínka pracuje se známou derivací potenciálu  $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$  ve směru vnější normály na okraji určené oblasti
- Smíšená okrajová podmínka
  - kombinace obou výše uvedených podmínek

Stacionární elektrická a magnetická pole lze popsat i pomocí potenciálů, jejichž definiční vztahy jsou uvedeny v rovnicích 7 a 9.

Pro popis elektrostatického pole pomocí potenciálu vycházíme z následujících rovnic:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad \mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad \mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$$

Po úpravách pak dostáváme nejobecnější tvar rovnice pro popis stacionárního elektrického pole 12.

$$\operatorname{div} (\varepsilon \cdot \operatorname{grad} \varphi) = -\rho \quad (12)$$

Pokud uvažujeme  $\varepsilon$  konstantní, získáme tzv. Poissonovu rovnici 13.

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (13)$$

### 3.1 ZÁKLADNÍ POJMY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

V oblasti bez nábojů se pravá strana Poissonovy rovnice 13 rovná nule, této rovnici pak říkáme Laplaceova rovnice 14.

$$\Delta\varphi = 0 \quad (14)$$

Pro popis magnetického stacionárního pole, při platnosti tzv. Coulombovy podmínky  $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$ , vycházíme z rovnic:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad \mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad \mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$$

Po úpravách dostáváme nejobecnější tvar rovnice pro popis stacionárního magnetického pole 15.

$$\operatorname{rot} \left[ \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right] = \mathbf{J} \quad (15)$$

Za předpokladu, že  $\mu$  je konstantní a po několika úpravách dostaneme parciální diferenciální rovnici popisující magnetické stacionární pole pomocí magnetického potenciálu 16.

$$\Delta \mathbf{A} = -\mu \cdot \mathbf{J} \quad (16)$$

Pro odvození vztahu sloužícího k popisu časově proměnného elektromagnetického pole budeme uvažovat frekvence nižší než 1 MHz, díky čemuž lze zanedbat posuvné proudy (druhý člen pravé strany první Maxwellovy rovnice) [18]. Za těchto předpokladů pak rovnice nabývají tvaru

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

Pokud uvažujeme kartézský souřadný systém, lineární prostředí (toto prostředí nesmí obsahovat nelineární feromagnetikum), tedy  $\mu = \textit{konst.}$ ,  $\gamma = \textit{konst.}$  a harmonický průběh proudu, můžeme po úpravách vyjádřit následující parciální diferenciální rovnici pomocí symbolicko-komplexního zobrazení pro fázor magnetického vektorového potenciálu  $\mathbf{A}$  jako:

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}}) + \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \mu \cdot \underline{\mathbf{A}} = \mu \cdot \underline{\mathbf{J}}_{ext} \quad (17)$$

Po dalších úpravách pak dostáváme tzv. Helmholtzovu parciální diferenciální rovnici 18.

$$\Delta \underline{\mathbf{A}} - \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \underline{\mathbf{A}} = \mu \cdot \underline{\mathbf{J}}_{ext}, \quad (18)$$

kde  $\underline{\mathbf{J}}_{ext}$  je vnější proudová hustota.

### 3.2 METODY ŘEŠENÍ ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Metody, které používáme pro řešení rozložení elektromagnetického pole, jsou dle zdroje [18] následující:

**ANALYTICKÉ METODY** - tyto metody lze využívat jen u zcela jednoduchých okrajových úloh.

**STOKASTICKÉ METODY** - tyto metody jsou založeny na principu statistických algoritmů

**NUMERICKÉ METODY** - tyto metody se dále dělí na:

- **Diferenciální metody**
  - diferenční metody - mezi tyto metody patří tzv. metoda konečných diferencí
  - variační metody - mezi tyto metody patří tzv. metoda konečných prvků
  - metody vázaných reziduí
- **Integrální metody** - tyto metody jsou založeny na principu řešení integrálních rovnic
- **Hybridní metody**

V této bakalářské práci jsou prováděny simulace elektrických a magnetických polí pomocí programu COMSOL Multiphysics, který využívá pro řešení metodu konečných prvků [21]. Tato metoda spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do konečného počtu prvků.

Postup této metody je následující:

- **Příprava modelu**
  - definice geometrie
  - definice materiálů a jejich vlastností
  - definice okrajových podmínek
  - vytvoření sítě
- **Výpočet**
- **Zobrazení**

## MECHANIKA

**N**A izolátory je nutné nahlížet nejen z elektrického hlediska, ale i z mechanického. Je velmi důležité, aby izolátor vydržel různá mechanická namáhání, které se mohou vyskytnout například vlivem silného větru, námrazy, či jiných nepříznivých klimatických podmínek.

V této části se čtenář seznámí se základními pojmy z oboru, radícího se pod mechaniku a to, z pružnosti a pevnosti. Celá následující kapitola vychází ze zdroje [22].

V pružnosti a pevnosti se rozlišují dva druhy sil, a to, vnitřní a vnější síly. Vnitřní působí uvnitř daného tělesa v důsledku působení vnějších sil a představují tak silovou vazbu, která brání deformaci nebo porušení tělesa. Vnější síly, jež jsou způsobeny jinými tělesy nebo silovým polem a působí vně daného tělesa.

Pro posouzení velikosti vnitřních sil v řezu tělesa je zavedeno tzv. mechanické napětí. Toto napětí je definováno vztahem

$$\sigma = \frac{F_{VV}}{S}, \quad (19)$$

kde  $\sigma$  je mechanické napětí,  $F_{VV}$  je síla působící v rovině řezu a  $S$  je celková plocha řezu. Jednotkou mechanického napětí je pascal (Pa), v praxi se při výpočtech převážně využívá megapascal (MPa).

Mechanické napětí se v některých případech rozděluje na mechanické napětí normálové, které je dáno vztahem

$$\sigma = \frac{F_{VN}}{S}, \quad (20)$$

a mechanické napětí tečné, které je uvedeno následující rovnicí.

$$\tau = \frac{F_{VT}}{S} \quad (21)$$

Deformací tělesa rozumíme změnu tvaru tělesa v důsledku působících sil na těleso. Druhy deformací jsou popsány níže.

Délková deformace je změna tvaru tělesa, kdy se nám mění délka součásti, například, když se těleso působením sil prodlužuje nebo zkracuje. Dále pak zavádíme pojem "Prosté

prodloužení", které je dáno rozdílem délky zatížené součásti  $l_1$  a délky nezatížené součásti  $l_0$ , pak tedy platí vztah:

$$\Delta l = l_1 - l_0, \quad (22)$$

kde  $\Delta l$  je prosté prodloužení.

Často se také používá pojem "Poměrné prodloužení", což je poměr prostého prodloužení  $\Delta l$  a původní délky nezatížené součásti  $l_0$ . Pro poměrné prodloužení potom platí následující vztah:

$$\epsilon_{prod.} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (23)$$

Tvarová deformace je změna tvaru tělesa, kdy působící síly mění úhly tvaru tělesa. Pokud se těleso, po zániku vnějších sil, vrátí do svého původního tvaru, pak tuto deformaci nazýváme pružnou neboli elastickou deformací. Pokud se těleso, po zániku vnějších sil, nevrátí do svého původního tvaru, pak tuto deformaci nazýváme trvalou neboli plasticou deformací.

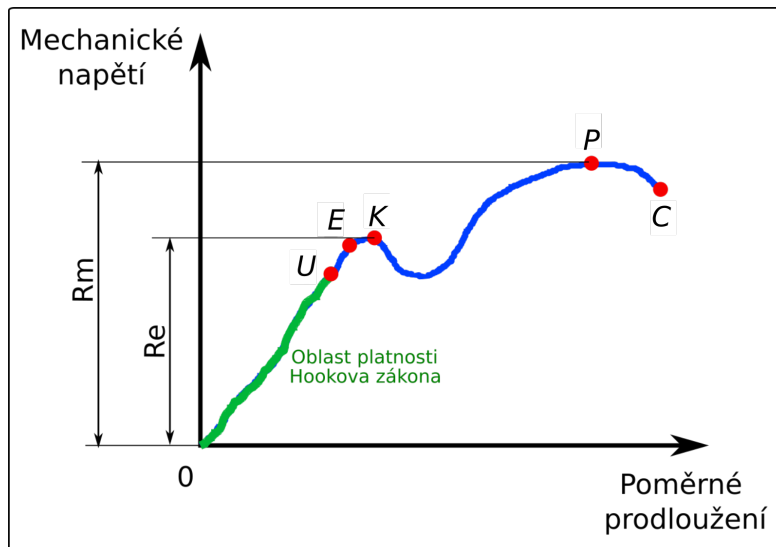
Závislost mezi napětím a poměrným prodloužením znázorňuje tzv. smluvní diagram statické zkoušky tahem pro příslušný materiál, který je uveden na obrázku 14. Na tomto diagramu se vyskytují velmi důležité pracovní body, které určují mechanické vlastnosti materiálů. Na obrázku 14 vidíme tyto meze:

- Mez úměrnosti  $U$  - do této meze je závislost mezi napětím a poměrným prodloužením lineární
- Mez pružnosti  $E$  - při dosažení této meze dochází k trvalé deformaci
- Mez kluzu  $K$  - v tomto bodě se těleso začíná značně prodlužovat, aniž by výrazně stoupalo mechanické napětí, pomocí tohoto bodu pak definujeme tzv. dovolené napětí  $R_e$
- Mez pevnosti  $P$  - je bod, ve kterém je dosaženo maximálního smluvního napětí  $R_m$

Hookův zákon řeší závislost mezi zatížením a následným prodloužením tělesa. Znění Hookova zákona je následující: "*U většiny materiálů existuje mez, do které je deformace přímo úměrná napětí.*"

Ve smluvním diagramu je pak tato oblast dána mezi úměrnosti, tato oblast platnosti Hookova zákona je vyznačena zeleně na obrázku 14.





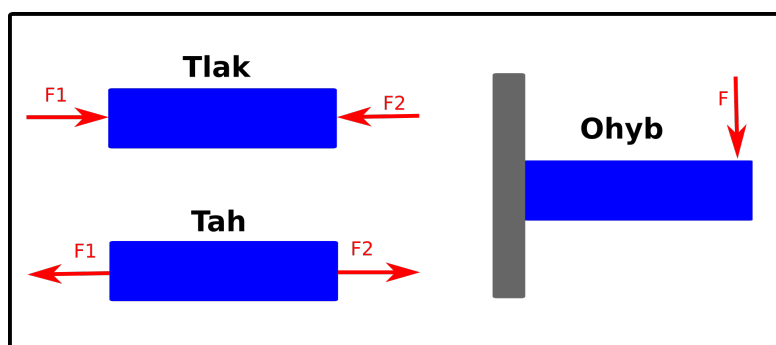
Obr. 14: Smluvní diagram statické zkoušky tahem

Matematicky pak lze Hookův zákon vyjádřit následujícím způsobem:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_{prod.}}, \quad (24)$$

kde  $\sigma$  je mechanické napětí v tahu udávané v megapascálech (MPa),  $\epsilon_{prod.}$  je poměrné prodloužení uvedené v rovnici 23 a  $E$  je modul pružnosti v tahu udávaný taktéž v megapascálech (MPa). Ve stručnosti nám tedy Hookův zákon umožňuje předpovídat prodloužení natahovaných předmětů v dané oblasti smluvního diagramu.

Tělesa mohou být namáhána několika možnými způsoby. Tyto způsoby jsou uvedeny a stručně popsány níže.



Obr. 15: Působení sil na těleso při namáhání tlakem, tahem a ohybem

Namáhání tlakem je způsobeno dvěma silami, které působí na těleso směrem dovnitř tělesa a jsou opačné velikosti. Působení těchto sil má za následek zkrácení tělesa a je znázorněno na obrázku 15.

Namáhání tahem je způsobeno také dvěma silami, ale tyto síly, na rozdíl od předchozího případu, působí směrem ven z tělesa. Působení těchto sil má za následek prodloužení tělesa a je opět znázorněno na obrázku 15.

Jako příklad namáhání ohybem si můžeme představit trám pevně připevněný ke zdi, na který budeme působit silou shora, podobně, jako je uvedeno na obrázku 15. Působením naší síly vytvoříme tzv. ohybový moment. Při tomto namáhání se část vláken trámu prodlužuje (je namáhána tahem), část se zkracuje (je namáhána tlakem) a celkově tak dochází k deformaci, která se nazývá průhyb.

V mechanice se samozřejmě setkáváme ještě s dalšími typy namáhání, jako například namáhání krutem či stříhem. Tyto typy namáhání, ale nejsou důležité pro účely této bakalářské práce.

---

 NUMERICKÝ MODEL
 

---

V NÁSLEDUJÍCÍ části jsou uvedeny numerické modely, které byly použity pro modelování rozložení elektrických a magnetických polí a pro modelování mechanického namáhání na izolačních prvcích vysokého a velmi vysokého napětí.

### 5.1 NUMERICKÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Numerický model elektromagnetického pole byl vytvořen v programu COMSOL Multiphysics [21] a byly uvažovány různé materiály a různá geometrická uspořádání. Nyní se zaměříme na ukázkou tvorby samotného modelu pro výpočet elektromagnetického pole.

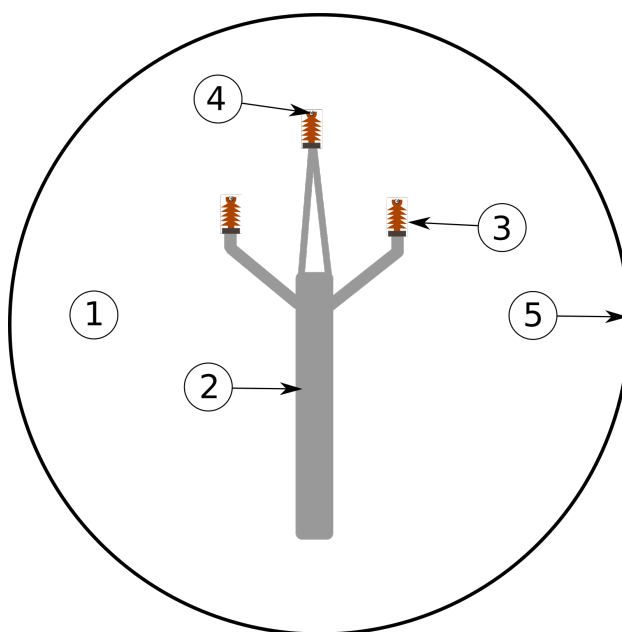
V první části tvorby modelu je nutné definovat a poté nakreslit geometrii modelované součásti. Konkrétní rozměry stožárů a konzol jsem čerpal ze zdrojů [12], [23]. Pro tvorbu geometrie jsem použil dva programy v závislosti na tom, zda-li byl problém modelován ve 2D anebo ve 3D. Pro tvorbu 2D geometrie byl použit program ProgeCAD [24], a pro tvorbu geometrie ve 3D byl použit program SOLIDWORKS [25]. Nakreslenou geometrii jsem pak uložil v patřičném formátu, který lze importovat do programu COMSOL Multiphysics.

Tab. 6: Materiálové konstanty různých materiálů

Materiál	$\epsilon_r(-)$	$\gamma(S/m)$	$\mu_r(-)$
Porcelán	6	$10^{-11}$	1
Sklo	3,7 – 10	$10^{-12}$	1
Silikonová pryž	3,9	$10^{-14}$	1
Skleněné vlákno	6,5	$10^{-14}$	1
Hliník	1	$3,77 \cdot 10^7$	1
Železo	8	$9,93 \cdot 10^6$	300 – 10000
Vzduch	1	$10^{-12}$	1
Voda	81	$40 \cdot 10^{-3}$	1
Dřevo	2,04 – 7,3	$10^{-4} - 10^{-3}$	1

Po importu geometrie do programu COMSOL Multiphysics přichází na řadu určení materiálů jednotlivých částí geometrie. Pro numerický model v COMSOLu jsou potřebné tři základní materiálové konstanty a to relativní permitivita  $\epsilon_r$ , relativní permeabilita  $\mu_r$  a vodivost  $\gamma$ . Hodnoty těchto materiálových konstant jsou pro různé materiály uvedeny v tabulce 6 dle zdrojů [9], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34].

Rozložení časově proměnného elektromagnetického pole obecně vychází z Helmholtzovy parciální diferenciální rovnice 18. Tato rovnice ale nebude ve všech částech našeho modelu stejná viz obrázek 16.



Obr. 16: Geometrický model

Pro oblasti 1 (vzduch), 2 (konstrukce stožáru) a 3 (tělo izolátoru) z obrázku 16 platí Helmholtzova parciální diferenciální rovnice 18 ve tvaru:

$$\Delta \underline{\mathbf{A}} - \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \underline{\mathbf{A}} = 0, \quad (25)$$

Pro oblast 4 (vodič) pak platí Helmholtzova parciální diferenciální rovnice v původním tvaru 18, pro úplnost tedy:

$$\Delta \underline{\mathbf{A}} - \mathbf{j} \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \underline{\mathbf{A}} = \mu \cdot \underline{\mathbf{J}}_{ext},$$

Pro hranici oblasti 5 pak formulujeme Dirichletovu okrajovou podmínku, pro kterou platí:

$$\underline{\mathbf{A}} = 0 \quad (26)$$

Dalším postupem je nastavení parametrů vedení, na kterém simulujeme rozložení elektromagnetického pole. Do programu COMSOL Multiphysics je nutné definovat parametry, jako například rozložení proudové hustoty, elektrický potenciál atp..

Pro výpočet proudové hustoty vycházím z následující tabulky 7, kde jsou uvedeny velikosti přirozených výkonů a dopočtené absolutní velikosti proudů pro jednotlivé napěťové hladiny VN a VVN.

Tab. 7: Velikost přirozených výkonů a absolutní velikost proudů napěťových hladin

Napěťová hladina (kV)	Přirozený výkon (MW)	Absolutní velikost proudu (A)
6	1	96,23
10	1,3	57,74
15	1,5	57,74
22	1,8	47,24
35	2	32,99
110	30	157,46
220	150	393,65

Byl uvažován ideální stav, tedy  $\cos \varphi = 1$ , a z přirozených výkonů byly vypočítány absolutní velikosti proudů jednotlivých napěťových hladin [15], které jsou uvedeny v předchozí tabulce 7. Tyto proudy byly vypočteny následujícím způsobem:

$$I_{ABS} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \quad (27)$$

V praxi je tento proud rozdělen do všech tří fází. Jednotlivé proudy těchto fází jsou v bezporuchovém stavu souměrné, mají stejnou velikost a jsou mezi sebou fázově posunuty o  $120^\circ$ .

Pro výpočet proudové hustoty ještě potřebujeme znát průřez samotného vodiče. Do simulací byla použita AlFe lana, jejichž průřez se lišil pro danou napěťovou hladinu. Uvažované průřezy jsou uvedeny v následující tabulce 8.

Tab. 8: Typy AlFe lan uvažovaných v simulacích

Napěťová hladina (kV)	6, 10	15, 22, 35	110	220
Typ AlFe lana	120 AlFe 6	150 AlFe 6	185 AlFe 6	210 AlFe 6

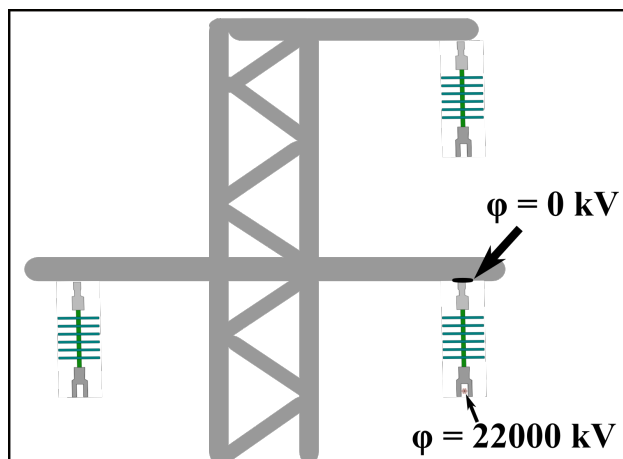
Výpočet proudové hustoty jednotlivými vodiči je dán vztahem:

$$\underline{J} = \frac{\underline{I}}{S} \quad (28)$$

Jednotlivé proudové hustoty v bezporuchovém stavu mají opět stejnou velikost a jsou mezi sebou fázově posunuty o  $120^\circ$ . Hodnoty jednotlivých proudových hustot se zadávají do COMSOLu v komplexním tvaru.

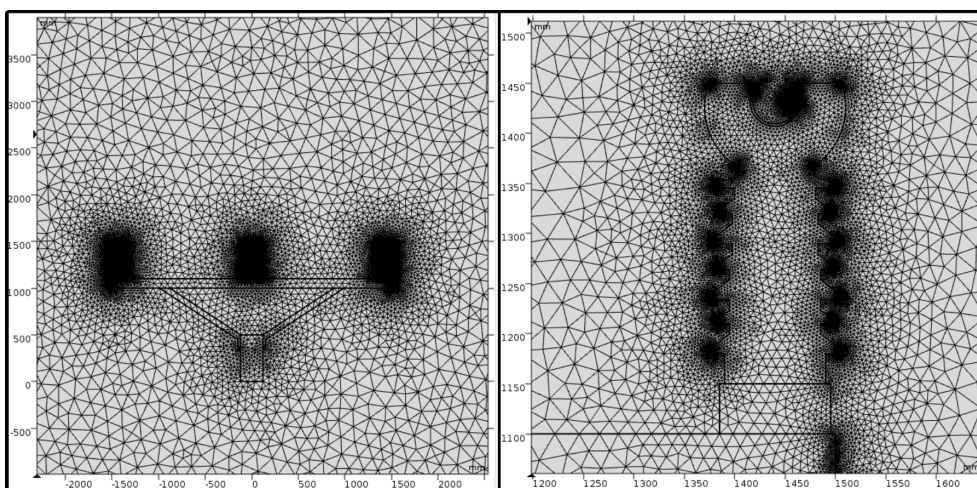
## 5.1 NUMERICKÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

V předchozím případě výpočty vycházely z proudových hustot jednotlivých vodičů. Pro výpočty elektrostatického pole jsem vycházel z rozložení elektrického potenciálu, který byl na jednotlivých částech definován pomocí Dirichletovy okrajové podmínky. Příklad je uveden na obrázku 17, kde je na vedení 22 kV potenciál na vodiči a izolátor je uzemněný.



Obr. 17: Definice elektrického potenciálu na jednotlivých částech izolátoru

Po vytvoření geometrického modelu a následné definici materiálů a okrajových podmínek přichází na řadu generování výpočetní sítě, v jejíchž uzlech budou vypočtena potřebná data. Pro základní geometrie lze použít síť, kterou program vygeneruje automaticky. Při použití nějaké složitější geometrie lze síť ovlivňovat nastavováním parametrů ve zvolených částech modelu. Příklad zasíťování je uveden na obrázku 18.



Obr. 18: Příklad vygenerované výpočetní sítě

## 5.2 NUMERICKÝ MODEL MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ

V levé části obrázku 18 je vidět rozložení sítě na modelu rovinné konzoly se třemi izolátory a vodičem. Je evidentní, že největší hustota sítě je v okolí izolátorů. V pravé části obrázku 18 je pak detail na samotný izolátor, na kterém vidíme, že síť je nejhustější v záhybech izolátoru a také na vodiči. Po vygenerování sítě je možné spustit simulaci, která vypočítá rozložení příslušného pole.

### 5.2 NUMERICKÝ MODEL MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ

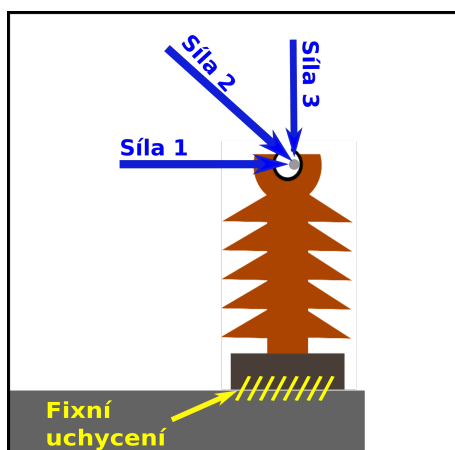
Numerický model mechanického namáhání byl realizován v programu SOLIDWORKS [25]. Byly zde opět uvažovány různé materiály a různá geometrická uspořádání. Dále je popsána tvorba modelu pro výpočet mechanického namáhání.

Tvorba geometrie byla prováděna v programu SOLIDWORKS [25], což přinášelo velké výhody, jelikož SOLIDWORKS dokáže sám simulovat mechanické zatížení, proto nebylo nutné výslednou geometrii exportovat a dále importovat do jiného programu.

Po vytvoření geometrie přichází na řadu určení materiálů pro jednotlivé části modelu. Mechanické síly působící na prvky, ve kterých je uchycen vodič, způsobují mechanické namáhání v tahu a tlaku.

Tab. 9: Mechanické parametry materiálů

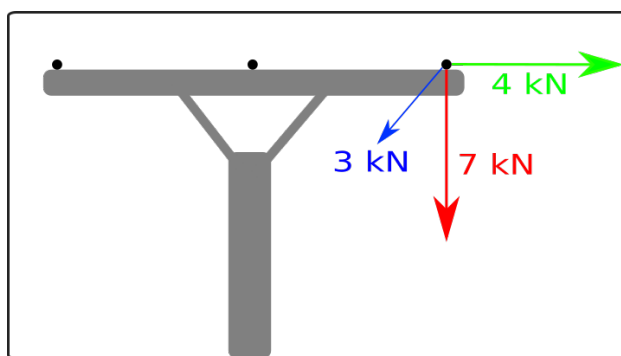
Materiál	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)
Porcelán	30 - 100	240-820
Sklo	100 - 120	210 - 300
Kompozit (pro stříšky izol.)	20 - 35	80 - 170
Kompozit (pro jádra izol.)	1300 - 1600	700 - 750



Obr. 19: Ukázka fixní geometrie a externího zatížení na keramickém izolátoru

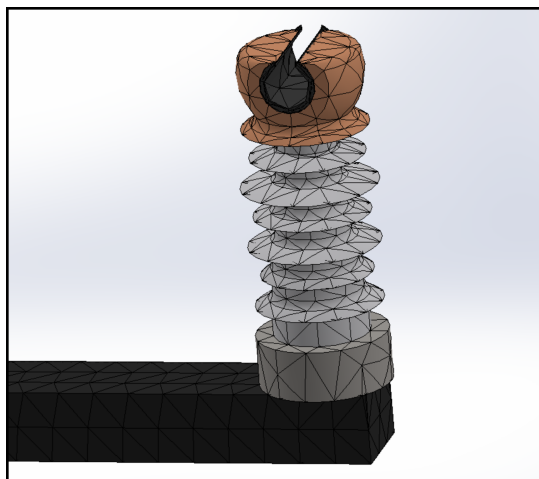
Z toho důvodu je nutné znát hodnoty mechanické pevnosti daného materiálu, aby při působení mechanického napětí na prvek, nedošlo k jeho deformaci a nebo k jeho zničení. Hodnoty pevností pro různé materiály jsou, dle zdrojů [26] a [35], uvedeny v tabulce 9.

Dále je nutné definovat fixní uchycení daného tělesa, na které působí síla. Na obrázku 19 je tato definice znázorněna na keramickém izolátoru. Jednotlivé hodnoty sil působící na vodič jsou ve všech simulacích uvažovány dle následujícího obrázku 20.



Obr. 20: Síly působící na vodič

Jako další krok přichází tvorba sítě. Je opět možné volit automatické generování sítě nebo si lze síť samostatně nastavit. Stejně tak, jako při generování sítě v COMSOLu i SOLIDWORKS dokáže pro jednoduchou geometrii vytvořit dostatečně kvalitní síť. Ukázka vygenerované sítě na keramickém izolátoru je zobrazena na obrázku 21 .



Obr. 21: Příklad vygenerované sítě

Po úspěšném vygenerování sítě je program připraven k následnému výpočtu mechanického namáhání.



---

## ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY

---

**N**YNÍ budou v práci uvedeny ilustrativní příklady namodelovaných izolačních prvků a vedení. Tato kapitola je dále členěna na několik dílčích podkapitol, které se zabývají rozložením elektromagnetického pole v bezporuchovém a poruchovém stavu a také mechanickým namáháním jednotlivých prvků.

### 6.1 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VN

Tato část se věnuje rozložení veličin elektromagnetického pole za bezporuchových stavů na izolačních prvcích na hladině 22 kV. Je zde zkoumáno již používané uspořádání sloupů VN s rovinnou konzolou a s keramickými izolátory. Dále jsou zde také zkoumány alternativní možnosti sloupů s konzolou z kompozitního materiálu, taktéž při úvaze bezporuchových stavů.

#### 6.1.1 *Reálně používané uspořádání*

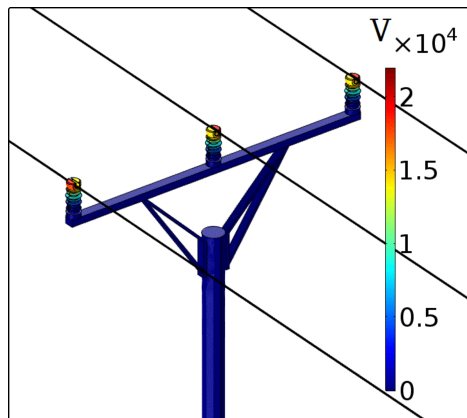
Jak již vyplynulo z názvu, jedná se o používané geometrické uspořádání na hladině 22 kV, konkrétně o rovinnou konzolu s keramickými izolátory.

Následují výsledky simulací jednotlivých veličin elektromagnetického pole. Jako první je na obrázku 22 zobrazeno rozložení elektrického potenciálu na keramických izolátorech umístěných na rovinné konzole na hladině 22 kV. Jak vidíme na obrázku 22, elektrický potenciál se rozkládá na jednotlivých izolátorech, přičemž uvažujeme všechny izolátory uzemněny.

Další zkoumanou veličinou je intenzita elektrického pole, která nás zajímá zejména z důvodu přeskočení a průrazu izolátoru. Průraz izolátoru může nastat, pokud elektrická intenzita překročí dielektrickou pevnost izolantu, ze kterého je izolátor zhotoven. K přeskočení pak může dojít, pokud je elektrická intenzita větší, než dielektrická pevnost vzduchu. K přeskočení tedy může dojít i za zhoršených meteorologických podmínek, například při dešti, mlze a podobně.

V tabulce 10, jsou dle zdroje [36] uvedeny dielektrické pevnosti uvažovaných materiálů pro další výpočty.

## 6.1 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VN

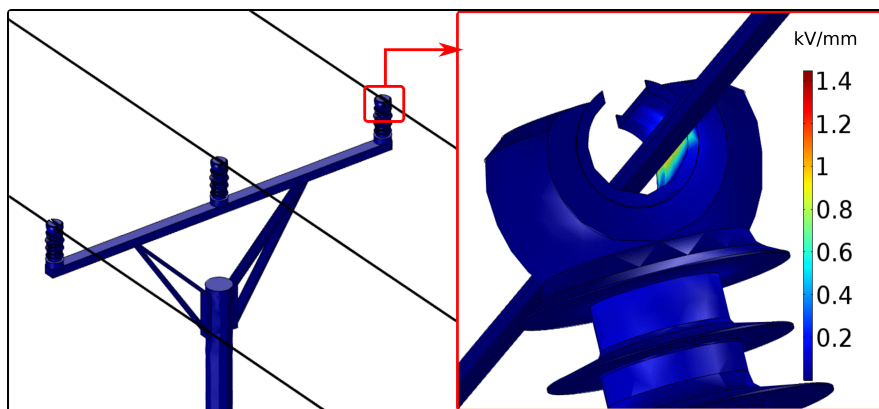


Obr. 22: Elektrický potenciál - rovinná konzola + keramické izolátory

Tab. 10: Elektrická pevnost

Materiál	Elektrická pevnost (kV/mm)
Vzduch	3
Keramický izolátor	15
Guma	12
Kompozitní izolátor	20

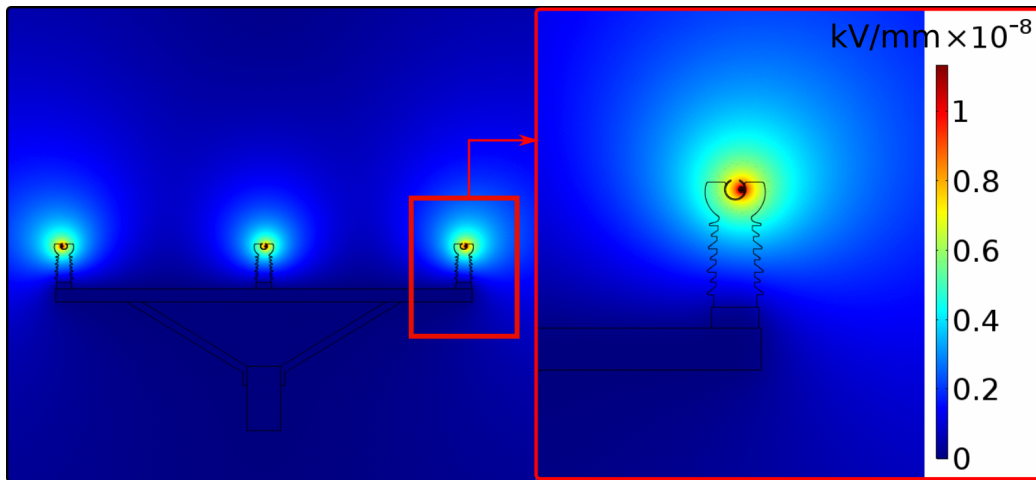
Na následujícím obrázku 23 je zobrazena elektrická intenzita zkoumaná z hlediska průrazu na keramickém izolátoru.



Obr. 23: Elektrická intenzita - rovinná konzola + keramické izolátory

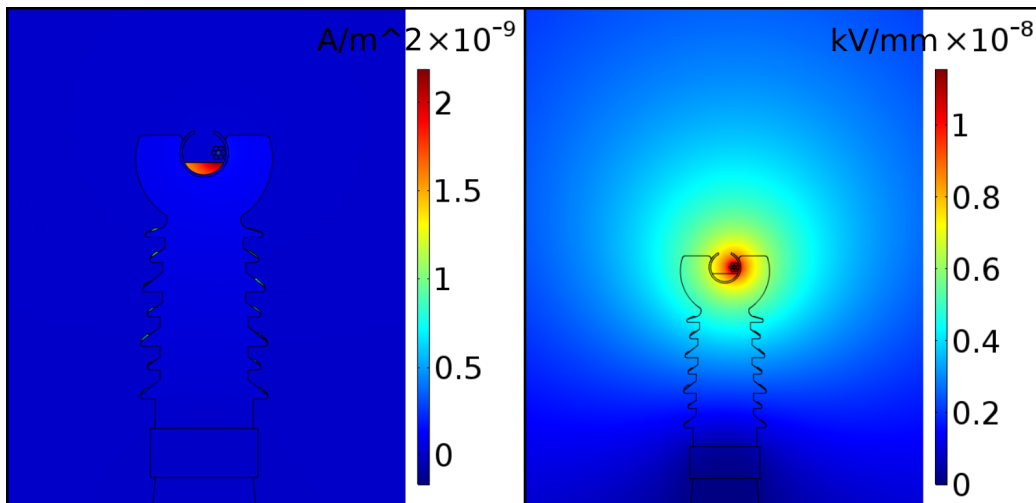
Hodnoty elektrické intenzity na obrázku 23 dosahují maximálních hodnot kolem 1,4 kV/mm, z čehož, v porovnání s tabulkou 10, vyplývá, že na izolátoru při bezporuchovém stavu nedojde k průrazu.

Na dalším obrázku 24 je zobrazena elektrická intenzita zkoumaná z hlediska přeskoku na izolátoru.



Obr. 24: Elektrická intenzita - rovinná konzola + keramické izolátory

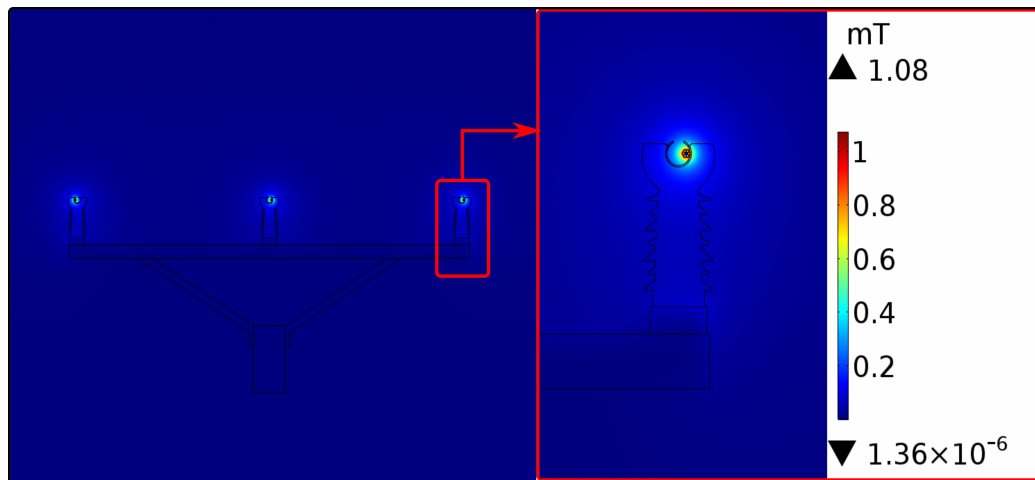
Z hodnot vypočítaných na obrázku 24 vidíme, že dielektrická pevnost vzduchu není překročena, to znamená, že za normálních podmínek nenastane na izolátoru přeskok. Je ovšem nutné uvažovat i různé meteorologické stavy, například déšť, při kterém je vodivost vzduchu větší a na samotných stříškách izolátoru je voda.



Obr. 25: Proudová hustota (vlevo), elektrická intenzita (vpravo) - keramické izolátory + déšť

Na obrázku 25 (vpravo) vidíme, že při úvaze deštivého počasí (vyšší vodivost vzduchu a výskyt vody na stříškách izolátoru) se velikost elektrické intenzity příliš nezměnila, proto tedy můžeme prohlásit, že k přeskoku nedojde. Na obrázku 25 (vlevo) je pak pro ilustraci zobrazena proudová hustota.

Další důležitou veličinou elektromagnetického pole je magnetická indukce, ta je pro uvažované uspořádání zobrazena na obrázku 26 .



Obr. 26: Magnetická indukce - rovinná konzola + keramické izolátory

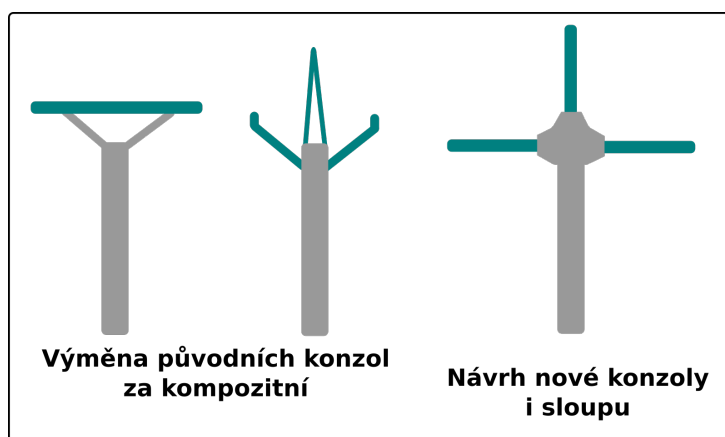
Maximální hodnota magnetické indukce na obrázku 26 dosahuje 1 mT. Tato hodnota není přípustná pro prostory, které jsou přístupné osobám. Izolátory jsou ovšem umístěny na konzole, která se nachází několik metrů nad zemí, takže není možné, aby byl člověk vlivem elektrického vedení VN vystaven vysoké magnetické indukci. Tato hodnota je tedy pro provoz přípustná.

### 6.1.2 Teoreticky navržené uspořádání

Následující teoreticky navržené uspořádání je uspořádání, ve kterém teoreticky uvažujeme kompozitní materiál s parametry:

- Relativní permitivita:  $\epsilon_r = 3$
- Elektrická vodivost:  $\gamma = 10 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$
- Relativní permeabilita:  $\mu_r = 1$

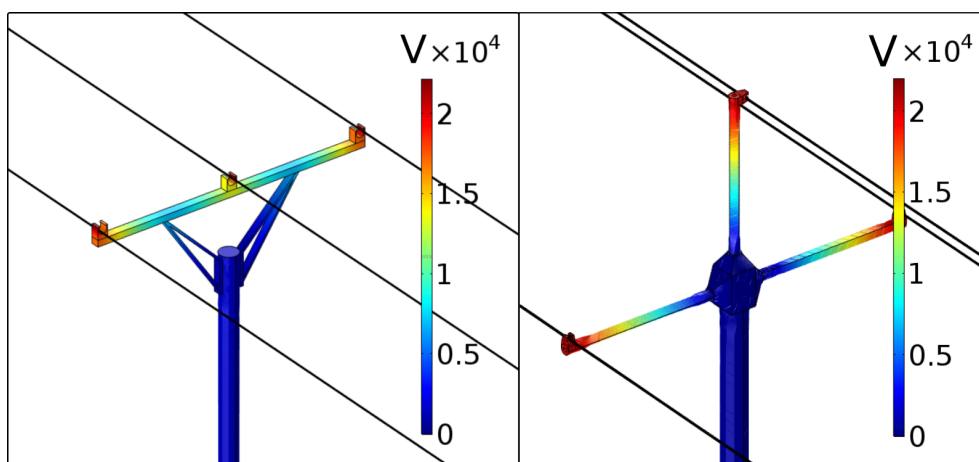
Rovinnou konzolu s izolátory, je pak možné nahradit konzolou z kompozitního materiálu, nebo úplně novým uspořádáním taktéž z kompozitního materiálu, viz obrázek 27.



Obr. 27: Alternativní možnosti uspořádání konzol z kompozitního materiálu

V této práci jsou zkoumána uspořádání dle obrázku 27, konkrétně uspořádání, ve kterém je nahrazena původní rovinná konzola kompozitní rovinnou konzolou o stejných rozměrech. Dále je pak zkoumáno teoreticky navržené uspořádání.

Začneme opět rozložením elektrického potenciálu na obou alternativních uspořádáních na hladině 22 kV, která jsou zobrazena na obrázku 28.

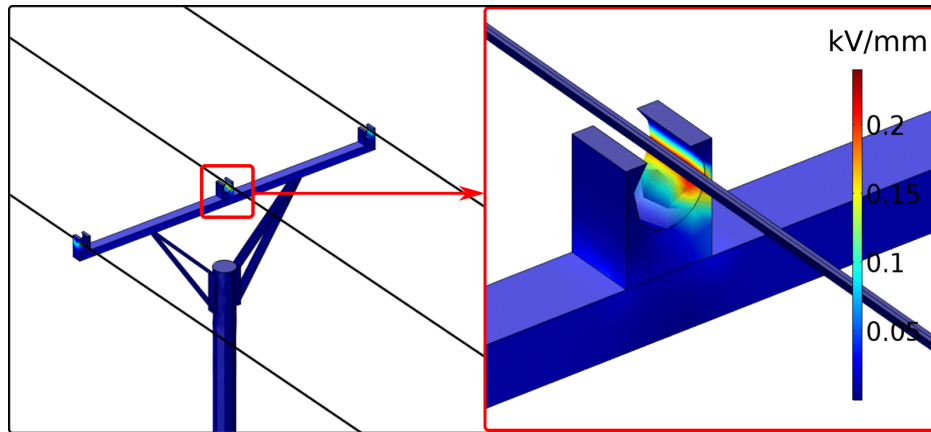


Obr. 28: Elektrický potenciál - alternativní konzoly

Na obrázku 28 vlevo, vidíme rozložení elektrického potenciálu na rovinné konzole. Konzola je uzemněna v částech, kde se spoje této konzoly dotýkají nosného sloupu.

Dále je na obrázku 28 vpravo zobrazeno rozložení elektrického potenciálu na teoreticky navržené konzole. Uzemnění bylo ve výpočtech uvažováno na koncích jednotlivých kompozitních ramen této konzoly.

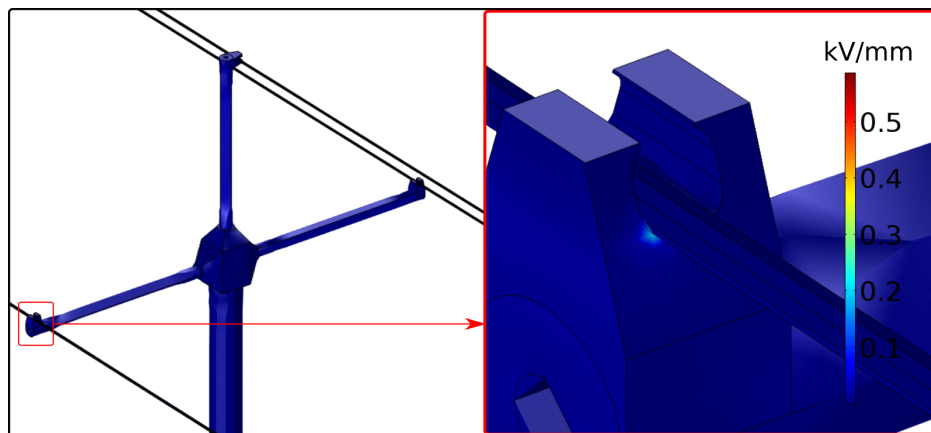
Nyní budeme sledovat rozložení intenzity elektrického pole. V následujících případech ale sledujeme intenzitu pouze z hlediska průrazu izolačního materiálu, jelikož k přeskoku by, kvůli rozměrům kompozitních konzol, nemělo dojít. Samotné rozložení elektrické intenzity je na obrázcích 29 a 30. Na obrázku 29 vidíme, že maximální hodnota intenzity



Obr. 29: Elektrická intenzita - kompozitní rovinná konzola

elektrického pole lehce přesahuje hodnotu 0,2 kV/mm. Pokud bychom uvažovali materiál, který má dielektrickou pevnost stejnou, jako materiály pro výrobu kompozitních izolátorů, viz tabulka 10, můžeme konstatovat, že hodnota elektrické intenzity ani zdaleka nedosahuje takových hodnot, aby byl izolační prvek poničen průrazem.

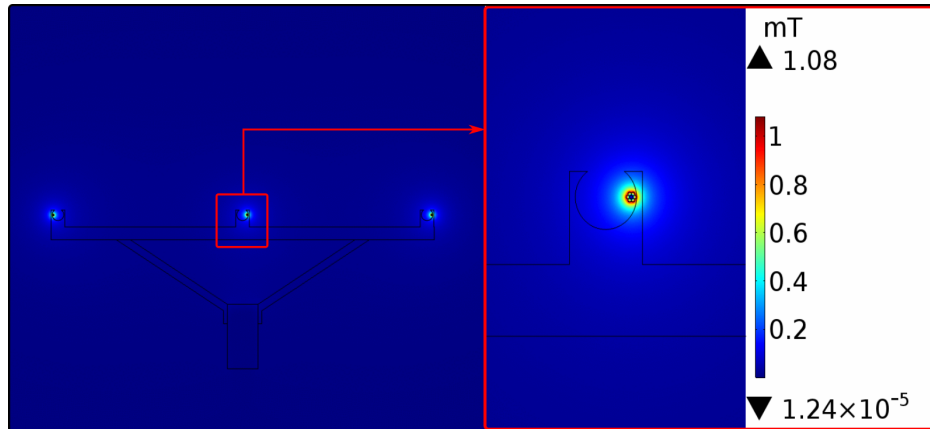
Na obrázku 30 potom vidíme, že maximální hodnota elektrické intenzity se pohybuje nad hodnotou 0,5 kV/mm, tato hodnota je sice větší, než v předchozím případě, ale ani tak, při úvaze dielektrické pevnosti kompozitního materiálu z tabulky 10, není dostatečná na to, aby poškodila izolační prvek z hlediska průrazu.



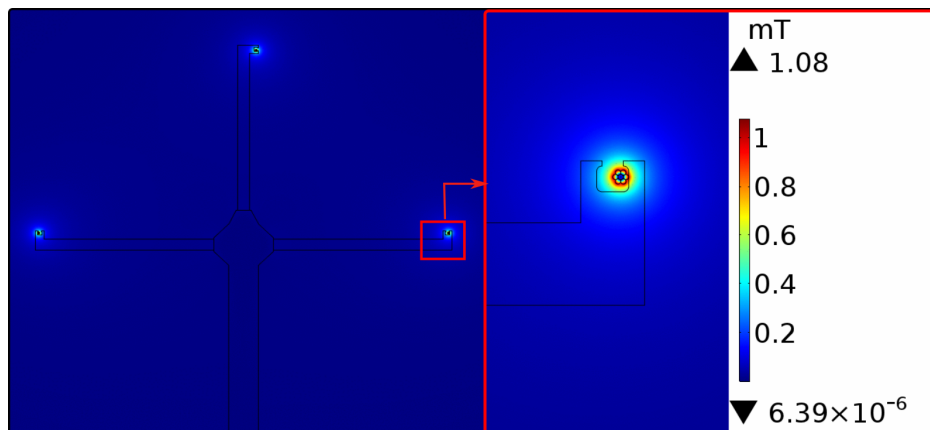
Obr. 30: Elektrická intenzita - kompozitní teoreticky navržená konzola

## 6.1 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VN

Z hlediska magnetické indukce, pro oba případy, které jsou zobrazeny na obrázcích 31 a 32, vychází maximální hodnota podobně, jako v předchozím případě u reálně používané konzoly s keramickými izolátory. Stejně jako v předchozím případě na obrázku 26 tedy můžeme konstatovat, že hodnoty magnetické indukce na obrázcích jsou pro provoz přípustné.



Obr. 31: Magnetická indukce - kompozitní rovinná konzola



Obr. 32: Magnetická indukce - kompozitní teoreticky navržená konzola

### 6.2 MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ KONZOL NA HLADINĚ VN

V této části se zabývám mechanickým namáháním jednotlivých izolačních prvků na hladině VN. Pro výpočty mechanického namáhání byly uvažovány hodnoty sil, působící na vodič, které jsou zobrazeny na obrázku 20 v kapitole 5.

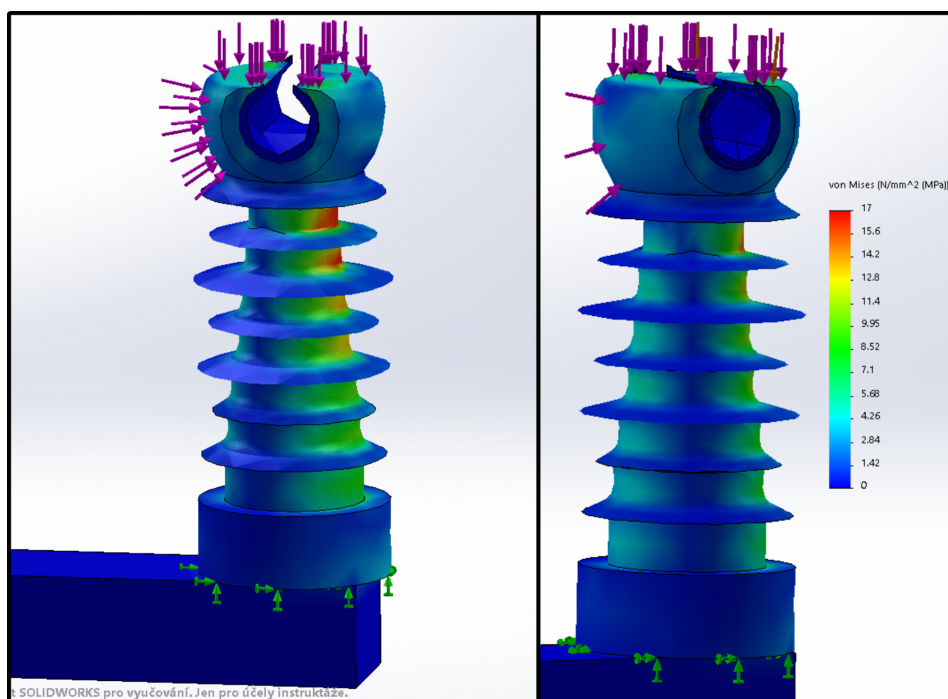
Důležité mechanické parametry, se kterými jsou výsledné hodnoty simulací porovnávány, jsou pak uvedeny v tabulce 9 taktéž v kapitole 5.

#### 6.2.1 Reálně používané uspořádání

Jako první je na obrázku 33 simulace, zobrazující mechanické namáhání keramického izolátoru.

Na keramický izolátor, který je umístěn na rovinné konzole, působí síly dle obrázku 20. Tyto síly se nejvíce podepisují na části pod hlavou izolátoru, kde na tělo izolátoru působí 17 MPa v tlaku. Tato hodnota, ale není dostatečně vysoká na to, aby izolátor mechanicky poškodila.

Z legendy uvedené na obrázku 33 v porovnání s hodnotami z tabulky 9 vidíme, že izolátor toto namáhání s rezervou vydrží.



Obr. 33: Mechanické namáhání na keramickém izolátoru

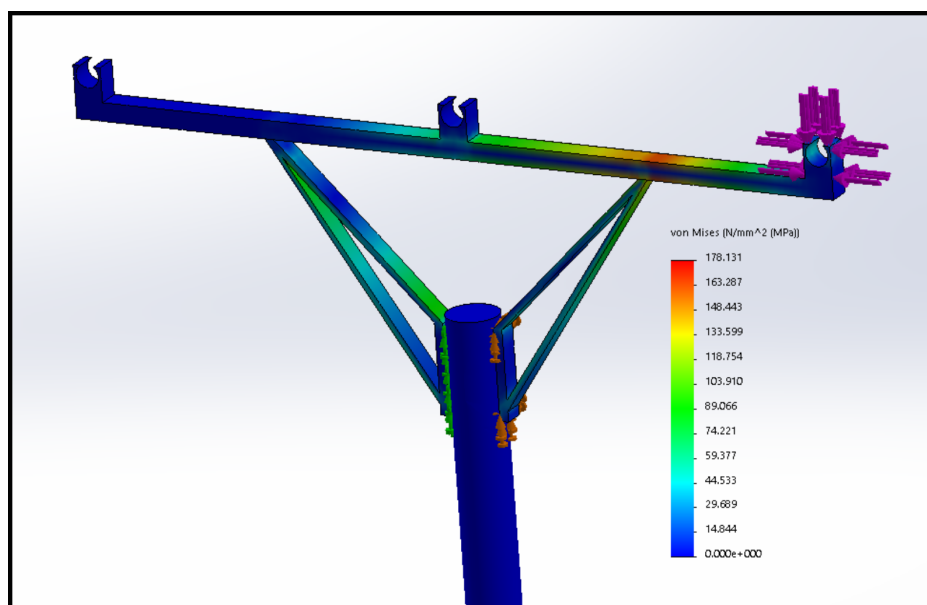


### 6.2.2 Teoreticky navržené uspořádání

V následujících případech opět počítáme s teoretickou alternativou, ve které uvažujeme konzoly z kompozitního materiálu. Obecně pro kompozitní materiál, který chceme použít jako izolační prvek musí platit, že jedna složka tohoto kompozitního materiálu musí mít velice dobré vlastnosti z hlediska elektrické izolace. Z mechanického hlediska, potřebujeme velice pevný materiál, který vydrží různá mechanická namáhání, která mohou být způsobena například spadnou větví ze stromu, vysokou vahou sněhu a silnými větry, které lomcují s vodiči.

Příklad takového materiálu, který je testován a vyvíjen na univerzitě v Calgary, je dle zdroje [37] "Fibreglass reinforced cementitious composite", v přímém překladu pak "sklolaminátový cementem vyztužený kompozit". V Brazílii například, dle zdroje [38] testují a používají jako kvalitní mechanický i izolační prvek dřevo.

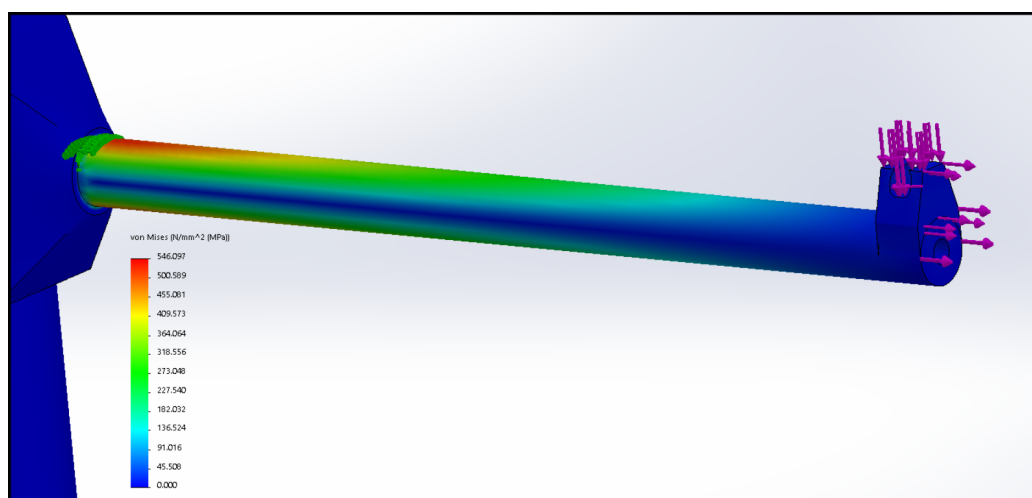
Pro simulace uvažují mechanickou pevnost kompozitního materiálu, který se používá pro výrobu jader kompozitních izolátorů. Samotné hodnoty pro tento materiál jsou uvedeny v tabulce 9 v kapitole 5.



Obr. 34: Mechanické namáhání - rovinná konzola z kompozitního materiálu

Jak je vidět na obrázku 34, při úvaze působení sil na pravý vodič konzoly, největší namáhání dosahuje hodnot 180 MPa v tahu a to v bodě, kde je konzola podepírána. Tato hodnota, při srovnání s tabulkovou hodnotou mechanické pevnosti materiálu používaného pro výrobu jader kompozitních materiálů, uvedenou v tabulce 9, nedosahuje dostatečně vysokých hodnot, které by znamenaly poničení izolačního prvku.

### 6.3 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VVN



Obr. 35: Mechanické namáhání - kompozitní teoreticky navržená konzola

Pro případ teoreticky navržené konzoly na obrázku 35, mechanické namáhání v tahu i v tlaku, dosahuje trojnásobně vyšších hodnot, než v předchozím případě, tedy až 540 MPa. Při porovnávání maximální hodnoty s tabulkovou hodnotou vidíme, že ani v tomto případě nedojde k mechanickému poškození izolačního prvku.

### 6.3 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VVN

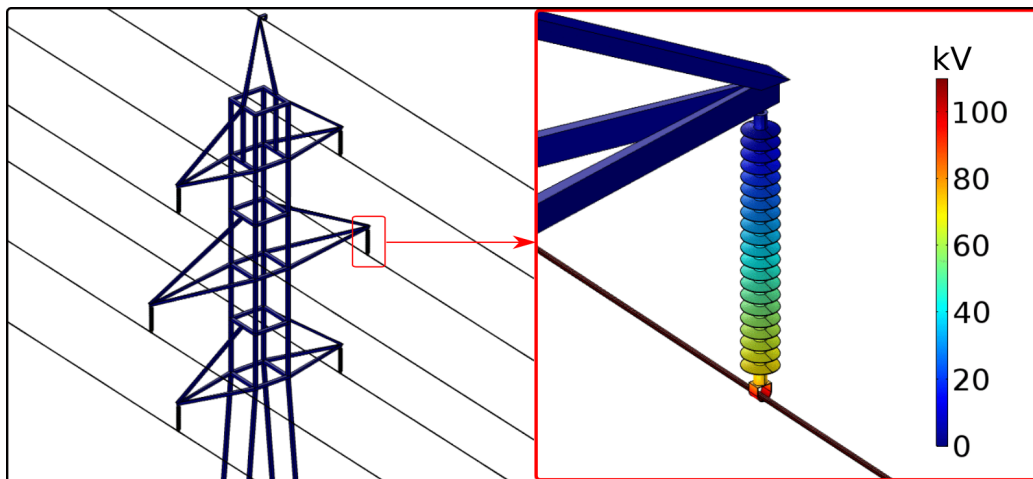
Nyní se tato práce věnuje rozložení veličin elektrického a magnetického pole na hladině 110 kV, přičemž uvažujeme bezporuchové stavy. Opět se zde zaměříme na již provozované stožáry s izolátory a následně se zaměříme na alternativní možnosti uspořádání, s využitím kompozitních materiálů, pro tuto napěťovou hladinu.

#### 6.3.1 *Reálně používané uspořádání*

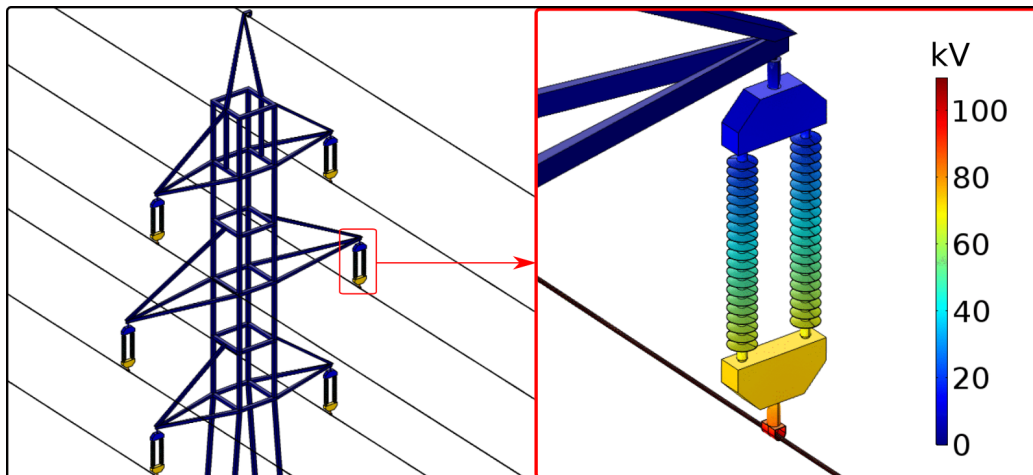
Pro výpočty byl uvažován stožár typu soudek. Ve výpočtech jsou dále uvažovány dvě možnosti uspořádání izolátorů a to, samotný závěsný izolátor, nebo dvojité izolátorové závěs.

Na obrázcích 36 a 37 je vyobrazeno rozložení elektrických potenciálů jednotlivých uspořádání.

### 6.3 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VVN



Obr. 36: Elektrický potenciál - soudek + závěsný izolátor



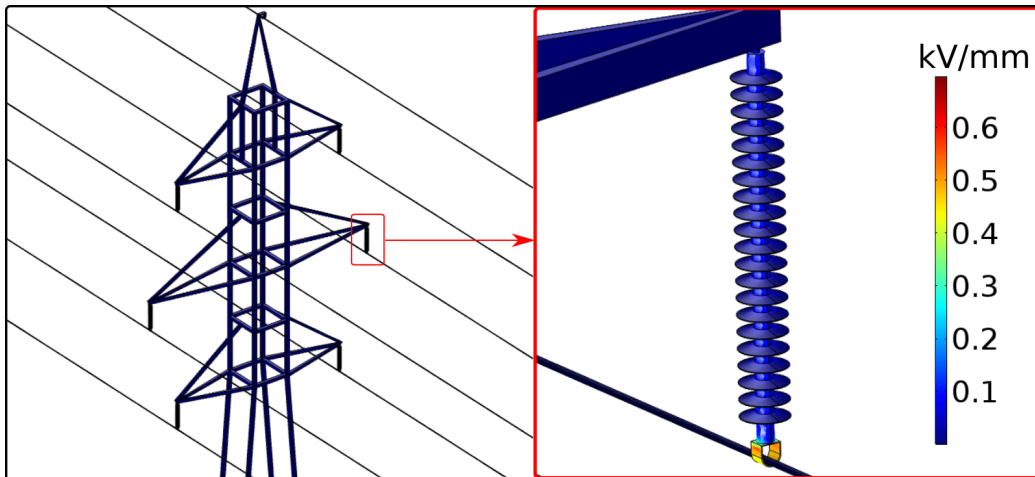
Obr. 37: Elektrický potenciál - soudek + izolátorový závěs

Jak vidíme, elektrický potenciál se rozkládá na celém izolačním prvku. U obou variant uvažujeme uzemnění izolátorů přímo na ramenech stožáru.

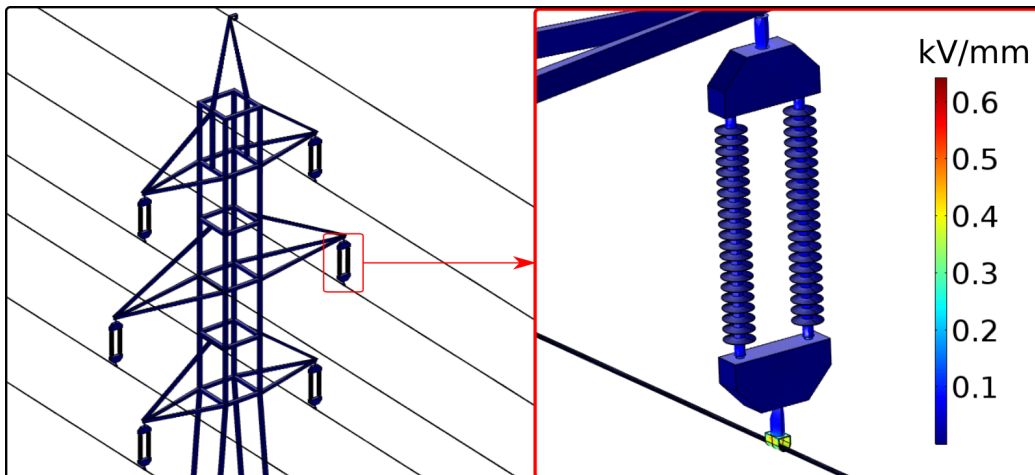
Rozložení elektrické intenzity zde, stejně jako na hladině VN, zkoumáme z hlediska průrazu a přeskoků.

Nejprve je na obrázcích 38 a 39 zkoumána elektrická intenzita z hlediska průrazu izolačního prvku.

### 6.3 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VVN



Obr. 38: Elektrická intenzita - soudek + závěsný izolátor

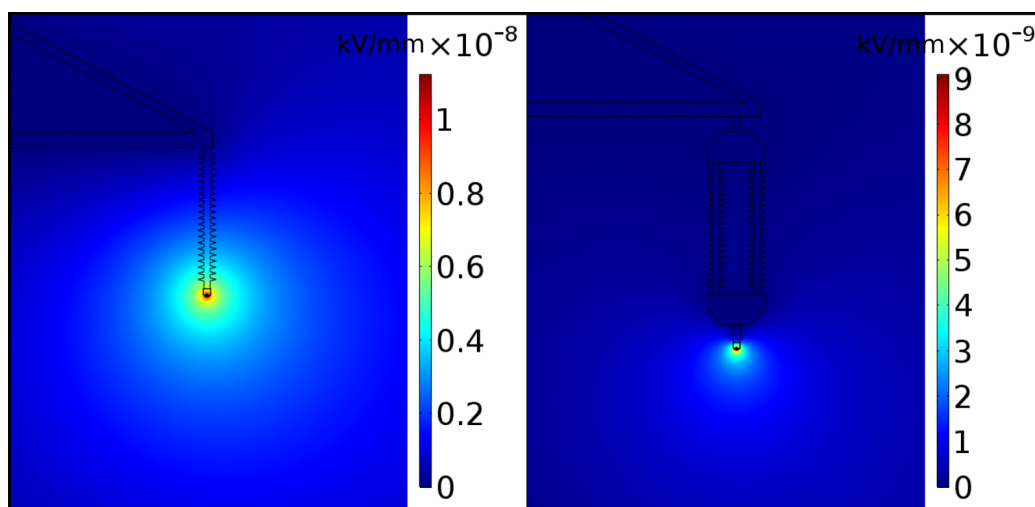


Obr. 39: Elektrická intenzita - soudek + izolátorový závěs

V obou případech dosahuje intenzita elektrického pole maximálně 0,65 kV/mm, z čehož, dle tabulky 10, vyplývá, že k průrazu ani na jednom z výše uvedených uspořádání nedojde.

Zkoumání elektrické intenzity z hlediska přeskočení na obou variantách je zobrazeno na obrázku 40.

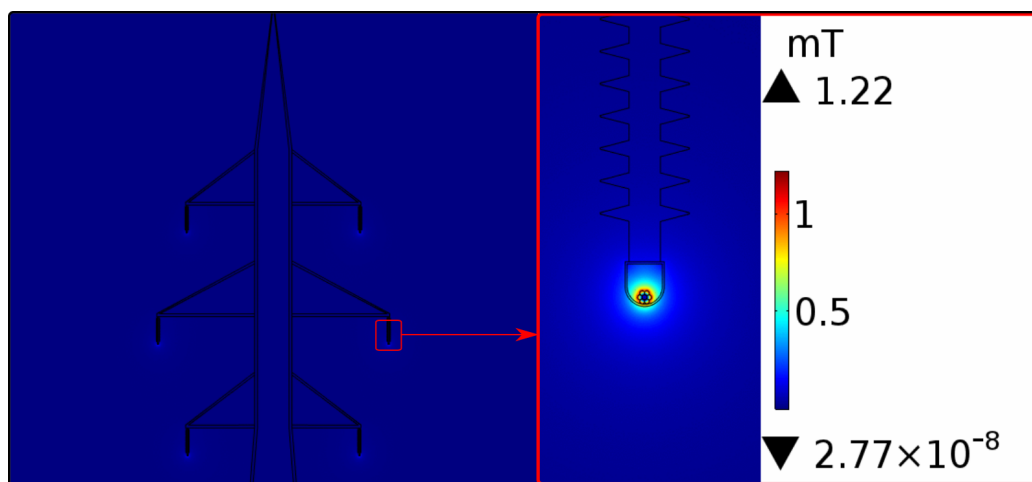
### 6.3 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VVN



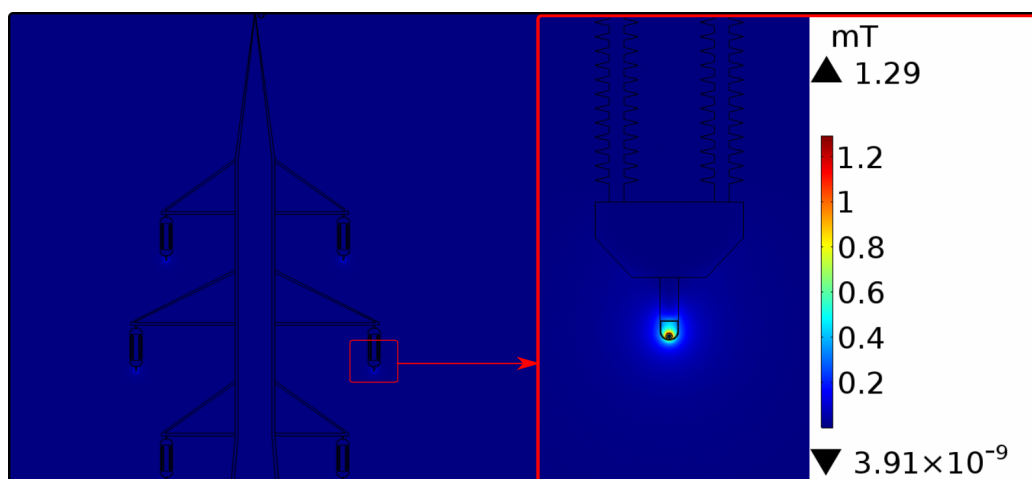
Obr. 40: Elektrická intenzita - izolátor (vlevo), izolátorový závěs (vpravo)

Z obrázku 40 vidíme, že intenzita elektrického pole je v obou případech srovnatelná. Její velikost, ani zdaleka, nedosahuje přeskovového napětí vzduchu, jehož velikost je dle tabulky 10 rovna 3 kV/m. K přeskočtu tedy za normálních podmínek nedojde ani na jednom z uvedených uspořádání.

Na následujícím obrázcích 41 a 42 je znázorněno rozložení magnetické indukce na závěsném izolátoru 41 a na dvojitém izolátorovém závěsu 42, umístěných na stožáru typu soudek na hladině 110 kV.



Obr. 41: Rozložení magnetické indukce



Obr. 42: Rozložení magnetické indukce

Z obrázků 41 a 42 je vidět že, magnetická indukce je v obou případech velice podobná a pohybuje se nad hranicí 1 mT. Jak už bylo řečeno v předchozí části, která se zabývala rozložením elektrických a magnetických veličin na hladinách VN, tato hodnota magnetické indukce je přípustná pro provoz v praxi.

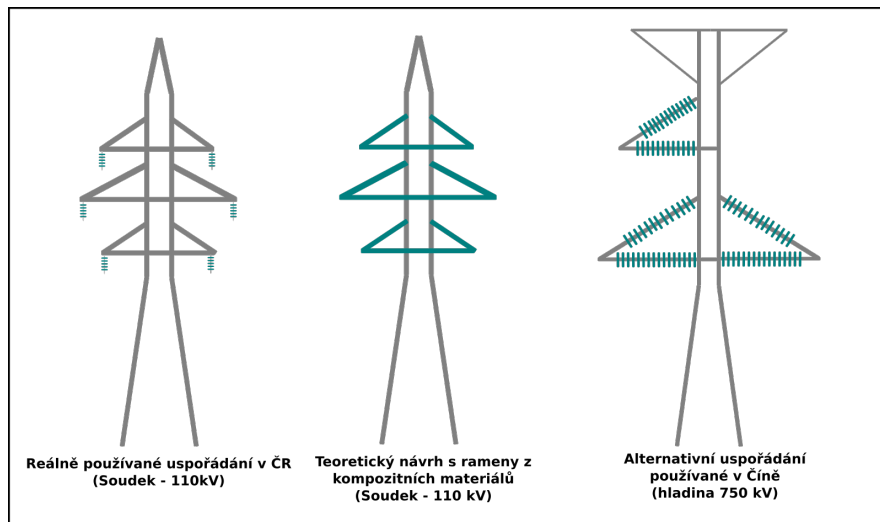
### 6.3.2 Teoreticky navržené uspořádání

Pro návrh tohoto uspořádání jsem čerpal velikou inspiraci z článku [39], ve kterém je příčné rameno stožáru nahrazeno "kompozitním izolátorovým ramenem", přičemž příklad z tohoto článku je již provozován v Číně na hladině 750 kV. Pro moji práci jsem vycházel z tohoto uspořádání, ale místo nahrazení příčného ramene izolátorovým ramenem, jsem uvažoval celé příčné rameno z kompozitního materiálu. Materiálové konstanty mnou uvažovaného kompozitního materiálu jsou následující:

- Relativní permitivita:  $\epsilon_r = 3$
- Elektrická vodivost:  $\gamma = 10 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$
- Relativní permeabilita:  $\mu_r = 1$

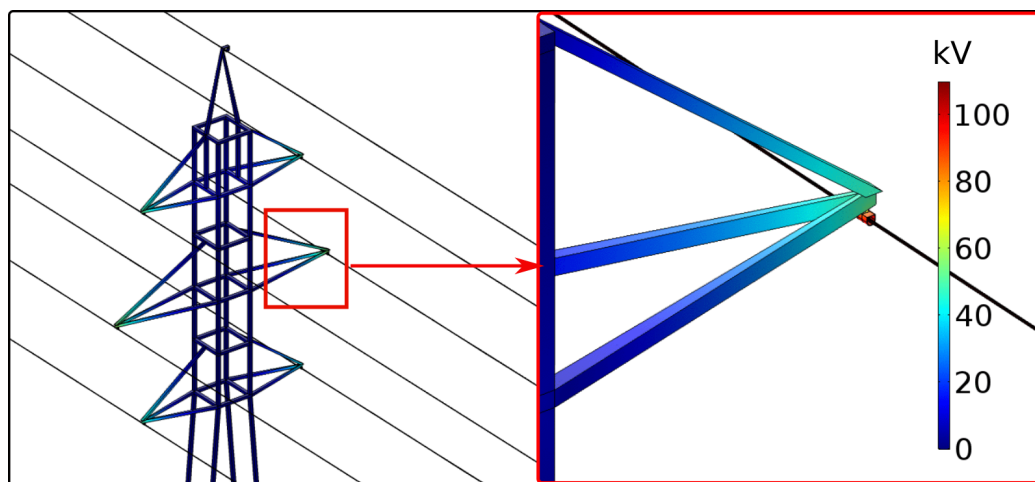
Na obrázku 43 je znázorněna mnou uvažovaná teoretická alternativa a alternativa již provozovaná v Číně na hladině 750 kV.

### 6.3 BEZPORUCHOVÉ VEDENÍ VVN



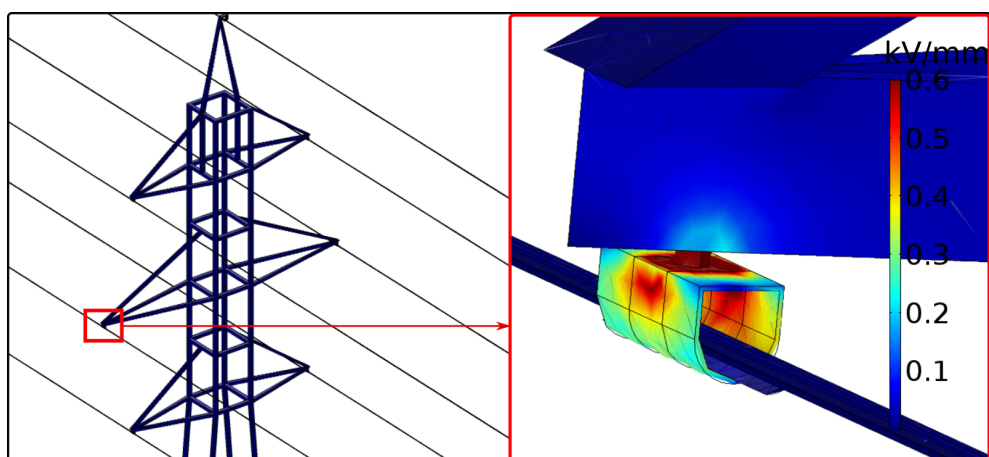
Obr. 43: Reálné a alternativní uspořádání izolačních prvků

Na obrázku 44 je zobrazeno rozložení elektrického potenciálu na stožáru s kompozitními rameny na hladině 110 kV. Při úvaze uzemnění celé kovové části stožáru vidíme, že se elektrický potenciál rozkládá po celém kompozitním rameni.



Obr. 44: Elektrický potenciál - alternativní uspořádání

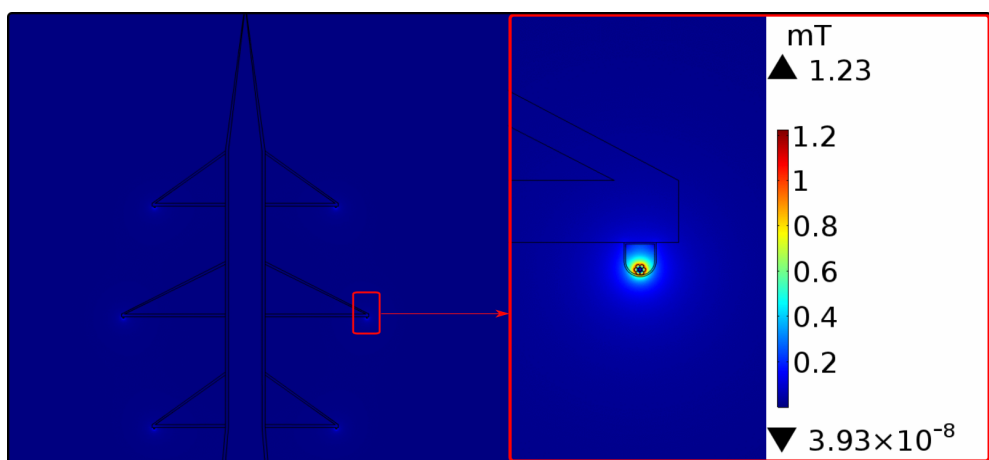
Na dalším obrázku 45 je zobrazen výsledek simulace elektrické intenzity na stožáru s kompozitními rameny na hladině 110 kV. Z obrázku je evidentní, že velikost elektrické intenzity je opravdu velice malá a dosahuje maximálně 0,6 kV/mm. Když porovnáme rozložení elektrické intenzity na reálně používaných stožárech s izolátory (viz obrázky 38 a 39) vidíme, že velikost elektrické intenzity dosahuje podobných hodnot.



Obr. 45: Intenzita elektrického pole - alternativní uspořádání

Z obrázku 45 vidíme, že největší intenzita elektrického pole je, stejně jako v předchozích případech reálného uspořádání, největší na úchyty vodiče. Při úvaze elektrické pevnosti materiálu, používaného pro výrobu kompozitních izolátorů (viz tabulka 10) nedojde k průrazu izolačního prvku.

Další zkoumanou veličinou je magnetická indukce, jejíž rozložení pro alternativní uspořádání je zobrazeno na obrázku 46.



Obr. 46: Magnetická indukce - alternativní uspořádání

Velikost magnetické indukce nám opět vychází velice podobně, jako v předchozích případech reálně používaného uspořádání (viz obrázky 41 a 42), tedy přibližně 1,2 - 1,3 mT. Hodnoty magnetické indukce pohybující se v tomto rozmezí jsou pro provoz přípustné.



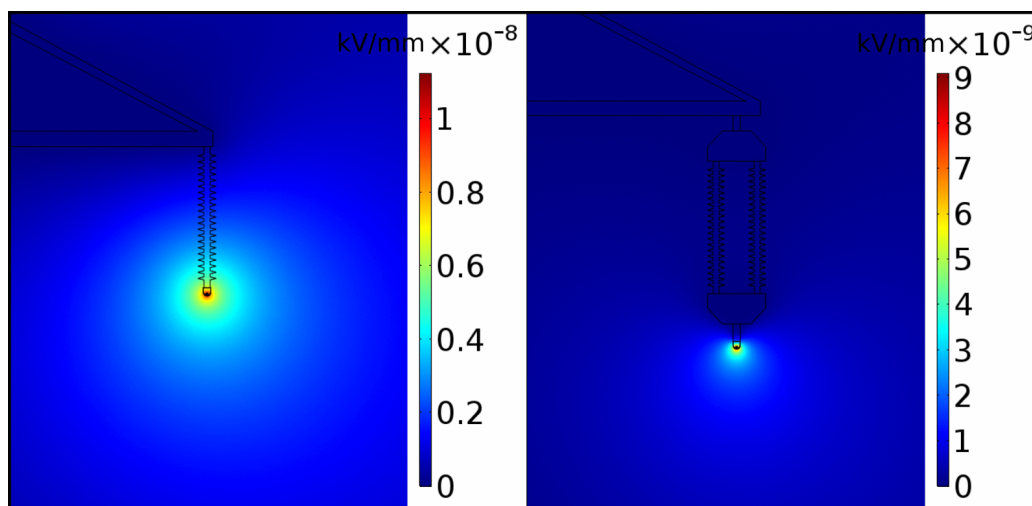
#### 6.4 PORUCHA NA VEDENÍ VVN

Z hlediska dimenzování izolačních prvků, je nutné uvažovat i poruchové stavy. Poruchové stavy mohou mít velmi negativní vliv na izolační prvek, například při zkratu, může vzniknout na izolátoru přeskok.

Soustava VVN je provozována, jako soustava s přímo uzemněným uzlem ( tj. soustava účinně uzemněná). V této konfiguraci sítě se setkáváme především s nesymetrickou poruchou, konkrétně s jednofázovým zkratem. Tato porucha způsobuje zkratový proud induktivního charakteru, který je  $x$ -násobně vyšší, než proud při provozním stavu. Pro simulaci, byla použita velikost zkratového proudu, dle zdroje [15]  $I''_k = 15$  kA. Z hlediska napětí, při této poruše, zůstává napětí ve zdravých fázích na fázové hodnotě. Proto jsou tyto sítě dimenzovány na fázové napětí.

##### 6.4.1 Reálně používané uspořádání

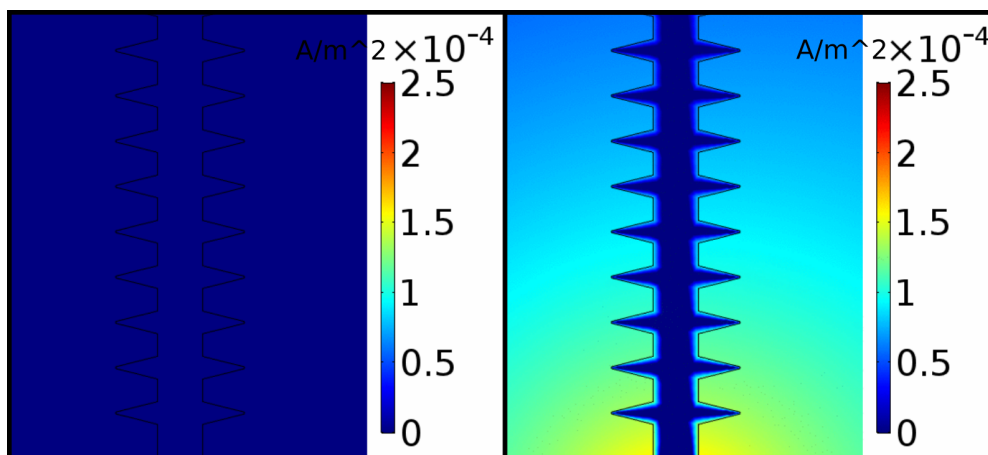
Nejprve budeme opět zkoumat reálná uspořádání izolátorů. Na obrázku 47 je zobrazeno rozložení intenzity elektrického pole na reálně používaných izolačních prvcích, které je zkoumáno z hlediska přeskočení na izolátoru. Vidíme, že intenzita elektrického pole se v obou případech reálně používaných uspořádání při poruchovém stavu zvýšila oproti bezporuchovým stavům, které jsou uvedeny na obrázku 40, o dva řády. Tyto hodnoty ovšem, i při těchto podmínkách nejsou dostatečné na to, aby vznikl přeskok, jelikož elektrická pevnost vzduchu je dle tabulky 10 rovna 3 kV/mm.



Obr. 47: Intenzita elektrického pole - reálně uspořádání, poruchový stav

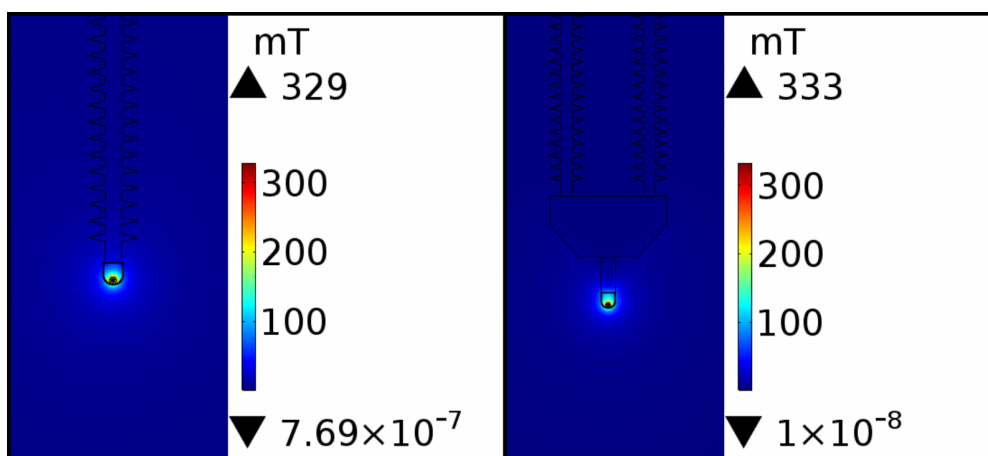
Dále jsem zkoumal rozložení elektrické intenzity na závěsném izolátoru v poruchovém stavu při zvýšené vodivosti vzduchu (například při dešti). Elektrická intenzita opět

nedosahovala takových hodnot, aby došlo k přeskoku. Na obrázku 48, je pro ilustraci zobrazeno rozložení proudové hustoty na závěsném izolátoru, při úvaze různých vodivostí vzduchu.



Obr. 48: Proudová hustota - závěsný izolátor, poruchový stav, za sucha (vlevo), za deště (vpravo)

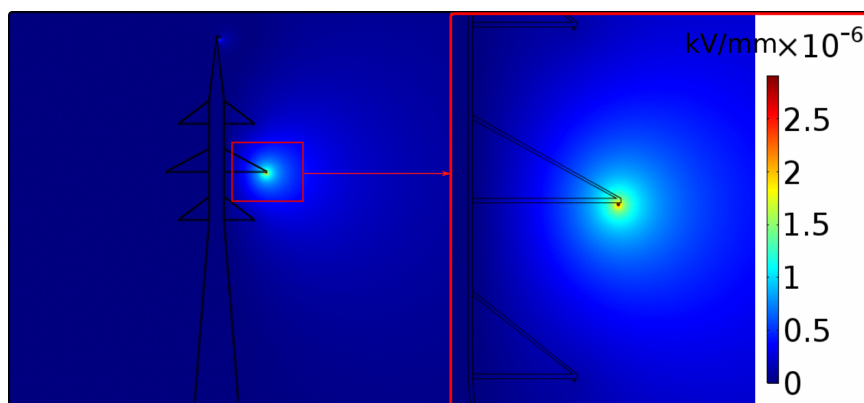
Další zkoumanou veličinou je magnetická indukce, která je zobrazena na následujícím obrázku 49. Z obrázku je vidět, že magnetická indukce v obou případech dosahuje velikosti až 333 mT, což je přibližně 277 krát více, než při bezporuchovém stavu (viz obrázky 41 a 42), kde se pohybujeme na hodnotách kolem 1 mT. O této hodnotě už můžeme mluvit, jako o velmi nebezpečné hodnotě pro člověka, neboť silné, časově proměnné magnetické pole může mít na člověka velmi negativní vliv. Časově proměnné magnetické pole totiž, dle zdroje [40], indukuje v těle proudy, které mohou způsobovat různá zdravotní rizika.



Obr. 49: Magnetická indukce - reálné uspořádání, poruchový stav

### 6.4.2 Teoreticky navržené uspořádání

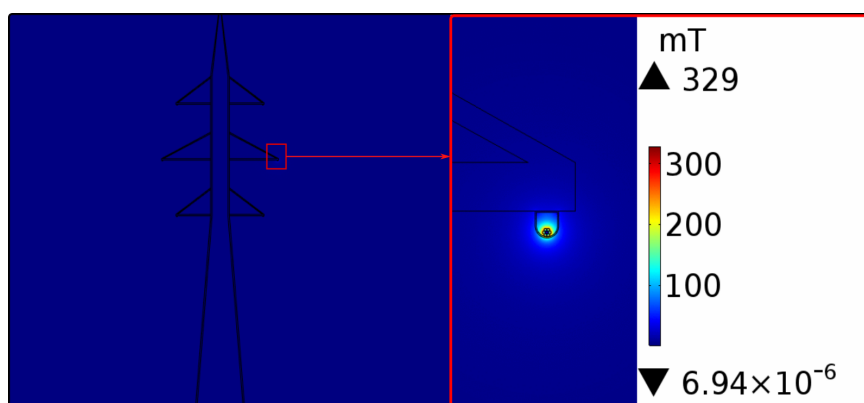
Nyní budou zkoumány poruchové stavy na teoreticky navrženém uspořádání, které je uvedeno na obrázku 43. Na následujícím obrázku 50 je zobrazena intenzita elektrického pole na stožáru s kompozitními rameny při poruše na hladině 110 kV.



Obr. 50: Intenzita elektrického pole - alternativní uspořádání, poruchový stav

Jak vidíme na obrázku, intenzita elektrického pole, je pro alternativní uspořádání při poruchovém stavu o dva řády vyšší, než na reálně používaných izolačních prvcích, jenž jsou zobrazeny na obrázku 47, přesto hodnota elektrické intenzity nepřesahuje elektrickou pevnost vzduchu 10.

Další zkoumanou veličinou je magnetická indukce na kompozitním rameni při poruše na hladině 110 kV. Rozložení této veličiny je pak uvedeno na obrázku 51. Zde stejně jako v předchozích případech (viz 49) dosahuje magnetická indukce hodnot kolem 330 mT.



Obr. 51: Magnetická indukce - alternativní uspořádání, poruchový stav

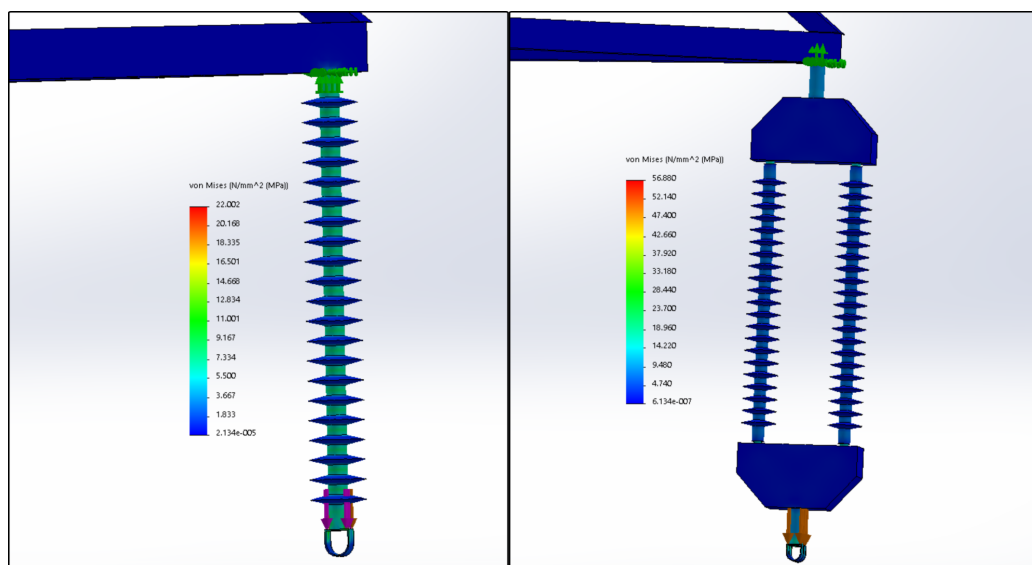
### 6.5 MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ KONZOL NA HLADINĚ VVN

Nyní, stejně jako na hladivě VN, budeme zkoumat mechanické namáhání izolačních prvků umístěných na hladině VVN. Hodnoty uvažovaných sil, působících na vodič, jsou zobrazeny na obrázku 20. Mechanické parametry jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tabulce 9. S těmito parametry budeme výsledky simulací srovnávat.

#### 6.5.1 *Reálně používané uspořádání*

Na obrázku 52 je uvedeno mechanické namáhání působící na reálně používané uspořádání, konkrétně na závěsný izolátor a na dvojitý izolátorový závěs. Jelikož jsou oba druhy izolačních prvků uchyceny na rameni stožáru pomocí kloubu, který umožňuje oběma izolačním prvkům se vlivem větru hýbat, aniž by byly mechanicky namáhány, působí na tyto izolační prvky pouze mechanické namáhání v tahu. Toto namáhání, dle obrázku 52, dosahuje u závěsného izolátoru 22 MPa a u dvojitého izolátorového závěsu 57 MPa.

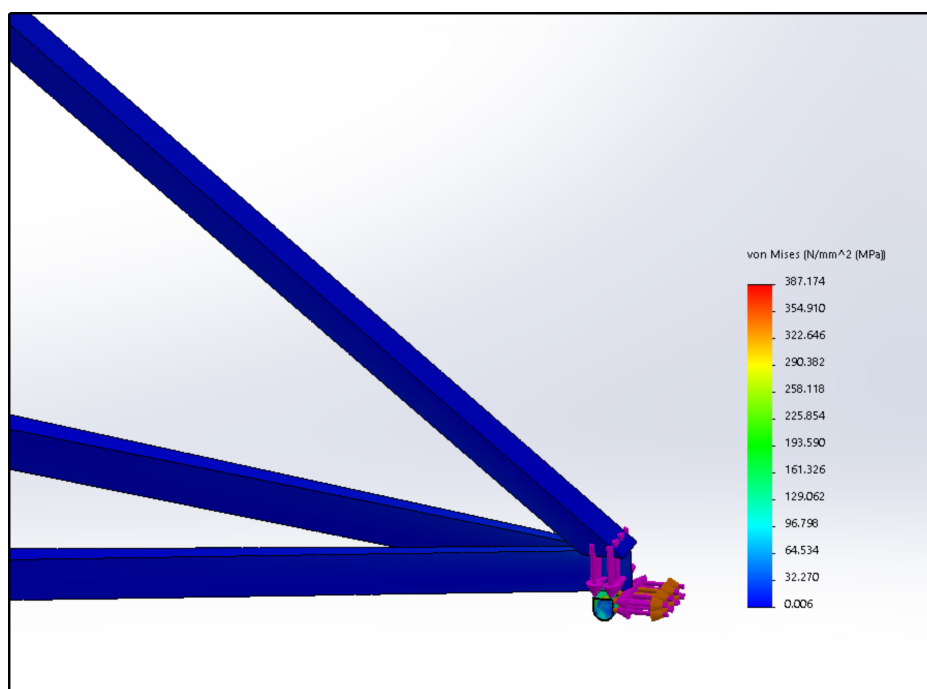
Při porovnání s tabulkou 9 vidíme, že ani jeden z již reálně používaných izolačních prvků není vlivem mechanického namáhání poškozen.



Obr. 52: Mechanické namáhání - reálně uspořádání

### 6.5.2 Teoreticky navržené uspořádání

Dále budeme zkoumat mechanické zatížení simulované na teoreticky navrženém rameni z kompozitního materiálu na hladině 110 kV. Toto uspořádání je zobrazeno na obrázku 43.



Obr. 53: Mechanické namáhání - alternativní uspořádání

Při výpočtech mechanického zatížení uvažujeme mechanické vlastnosti kompozitního materiálu stejné, jako mechanické vlastnosti kompozitního materiálu, ze kterého se vyrábějí jádra kompozitních izolátorů. Hodnoty pevností v tahu i tlaku jsou uvedeny v tabulce 9.

Samotná simulace mechanického namáhání, na kompozitním rameni, je zobrazena na obrázku 53, ze kterého vidíme, že nejvíce mechanicky zatížený je úchyt vodiče. Na tento úchyt působí mechanické namáhání, které dosahuje velikosti přes 387 MPa. Samotné rameno pak není nijak zvlášť namáháno. Při porovnání s hodnotami, které jsou uvedeny v tabulce 9, hodnota 387 MPa není dostatečně vysoká na to, aby mechanicky poškodila izolační prvek.

V této kapitole byly uvedeny ilustrativní příklady a byl vytvořen algoritmus pro řešení elektrických a magnetických polí a mechanického namáhání. Některé další příklady jsou uvedeny v příloze této bakalářské práce A.

---

## ZÁVĚR

---

**P**ŘEDKLÁDANÁ bakalářská práce se zabývá izolačními prvky pro venkovní vedení vysokého a velmi vysokého napětí. V první části mé práce jsem zpracoval základní přehled izolátorů používaných v ČR na uvedených napěťových hladinách. Uvažoval jsem zde rozdělení izolátoru podle způsobu uchycení, podle konstrukce, podle napěťové hladiny a podle výrobního materiálu, přičemž je v práci taktéž velmi stručně popsána samotná výroba jednotlivých izolátorů.

V dalších kapitolách byla popsána potřebná teorie týkající se elektromagnetického pole a mechanického namáhání, podle které byl následně sestaven matematický model a vytvořen algoritmus pro řešení rozložení elektrického a magnetického pole a mechanického namáhání. Pro výpočty byla uvažována různá geometrická uspořádání již v praxi používaných izolátorů a izolačních prvků, ale také teoreticky uvažované kompozitní alternativy těchto uspořádání. Následně byl pro tato uspořádání sestaven numerický model.

Ve výpočtech jsem se zaměřil na simulace rozložení elektrického a magnetického pole v okolí izolátorů a izolačních prvků na hladině nejprve vysokého napětí, poté velmi vysokého napětí v bezporuchovém i poruchovém stavu. Byly zjištěny všechny významné veličiny elektrického a magnetického pole pro reálná uspořádání i pro alternativní uspořádání. Následně pak bylo vypočítáno mechanické zatížení reálných i alternativních izolačních prvků. Z simulací elektromagnetického pole vyplývá, že ani v jenom z případů by nedošlo k průrazu či přeskoku ani jiným nebezpečným jevům.

Z hlediska mechanického namáhání, byl potvrzen předpoklad, že používané keramické izolátory nebudou vlivem uvažovaného mechanického namáhání zničeny. U alternativních konzol je zřejmé, že tato namáhání nezpůsobí poničení izolačních prvků a ani kompozitní ramena alternativních uspořádání taktéž nebudou, dle simulací, těmito mechanickými vlivy poničena.

Z výsledných simulací, uvedených v této bakalářské práci, lze konstatovat, že teoreticky navržená alternativní uspořádání, mohou být použita v praxi a mohou tak nahradit stávající izolační prvky a izolátory na hladinách vysokého a velmi vysokého napětí.

---

## LITERATURA

---

- [1] Izolátor [online]. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Izolátor>. cit. 23.9.2019.
- [2] Subba Reddy. Manufacturing process for ceramic/glass insulators [online]. [https://www.youtube.com/watch?v=0\\_MpFKr59tA&t=1950s](https://www.youtube.com/watch?v=0_MpFKr59tA&t=1950s). cit. 24.9.2019.
- [3] Vodiče, izolátory, stožáry [online]. <https://files.milanovo-misto.webnode.cz/200000440-04f5406e94/0420VodiC48De20izolC3A1tory20stoC5BEC3A1ry.pdf>. cit. 1.10.2019.
- [4] Tomáš Krejčí. *Diplomová práce - Přeizolace vedení 110 kV*. Vysoké učení technické v Brně, 2015.
- [5] Izolátory používané v nadzemním elektrickém vedení [online]. <https://webstarsnet.com/cs/74-insulators-used-in-overhead-power-lines.html>. cit. 8.10.2019.
- [6] Talířové izolátory [online]. <http://www.vybojky-zarovky.cz/odpinac135.html>. cit. 10.10.2019.
- [7] Michalík Marián and Daniela Reváková. *Izolátory vsv. IEEE, 2007*.
- [8] Izolátor keramický závěsný - vzl 50 / 435 [online]. [https://online.sse.sk/pls/kpfc/kpfc\\_web.detail?meno=&idk=2&ids=6&csap=7914](https://online.sse.sk/pls/kpfc/kpfc_web.detail?meno=&idk=2&ids=6&csap=7914). cit. 3.11.2019.
- [9] Eva Kučerová and Robert Vik. *Podklady k předmětu elektrotechnické materiály*.
- [10] Subba Reddy. Manufacturing process for polymeric insulators [online]. <https://www.youtube.com/watch?v=nSEqgsCIv3I>. cit. 27.9.2019.
- [11] Lu Jiazheng, Li Bo, Jiang Zhenglong, Fang Zhen, and Zhang Hongxian. *Manufacture and experiment of a novel composite insulator. IEEE, 2011*.
- [12] Mechanika vedení [online]. <https://slideplayer.cz/slide/1946815/>. cit. 8.12.2019.
- [13] Suspension insulator [online]. [https://quickfield.com/advanced/suspension\\_insulator.htm](https://quickfield.com/advanced/suspension_insulator.htm). cit. 8.12.2019.
- [14] High voltage composite suspension insulator with 70kn rated mechanical bending load [online]. <https://www.globalsources.com/si/AS/Zhejiang-Zhongneng/6008828328024/pdtl/High-Voltage-Composite-Suspension-Insulator/1137066447.htm>. cit. 14.12.2019.

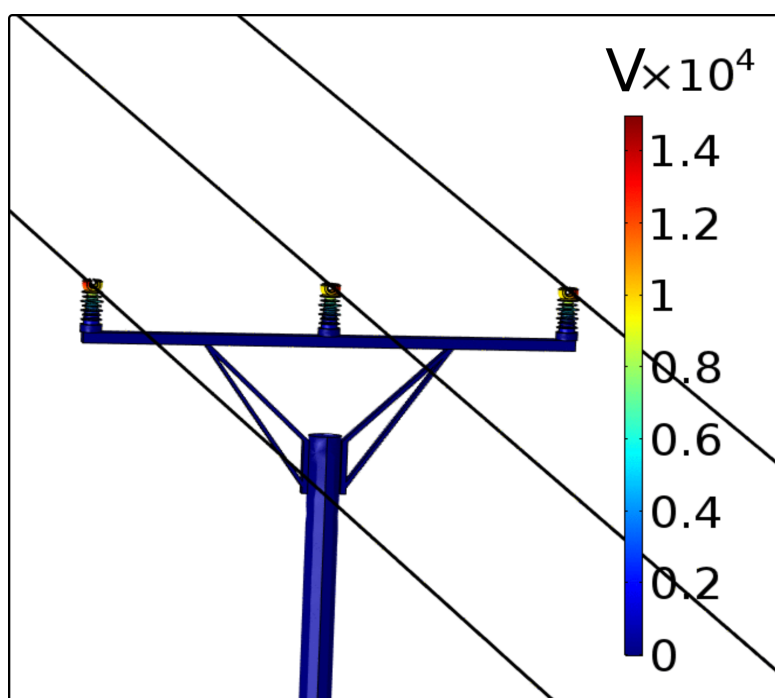
## Literatura

- [15] Miloslava Tesařová. *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2*.
- [16] Velmi vysoké napětí [online]. [https://cs.wikipedia.org/wiki/velmi\\_vysoke\\_napet](https://cs.wikipedia.org/wiki/velmi_vysoke_napet). cit. 6.2.2020.
- [17] Jan Sedláček. *Podklady k předmětu elektrické přístroje v energetice*.
- [18] Ivo Doležel. *Přednášky z předmětu TEMP*.
- [19] Zdeňka Benešová and Daniel Mayer. *Základní příklady z teorie elektromagnetického pole*. Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [20] Daniel Mayer. *Aplikovaný elektromagnetismus*. Kopp nakladatelství České Budějovice, 2012.
- [21] Comsol multiphysics [online]. <https://www.humusoft.cz/comsol/details/>. cit. 18.4.2020.
- [22] Jaroslav Prorok. *Základní pojmy z pružnosti a pevnosti*. Střední průmyslová škola strojní a Jazyková s právem státní jazykové zkoušky Kolín, 2013.
- [23] Konstrukční řešení stožárů [online]. <https://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4192-stozary-vvn-iii>. cit. 10.12.2019.
- [24] Progecad – application for software for 2d and 3d design and construction [online]. <https://www.progesoft.com/>. cit. 20.5.2020.
- [25] Solidworks – application for software for 3d design and construction and for solution of mechanical stress [online]. <https://www.solidworks.com/>. cit. 20.5.2020.
- [26] Eva Kučerová. *Elektrotechnické materiály*. Západočeská univerzita v Plzni, 2002.
- [27] Resistivity and conductivity - temperatura coefficients for common materials [online]. [https://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d\\_418.html](https://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d_418.html). cit. 24.2.2020.
- [28] Relative permittivity - the dielectric constant [online]. [https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d\\_1660.html](https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d_1660.html). cit. 24.2.2020.
- [29] Permeability (electromagnetism) [online]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism)). cit. 25.2.2020.
- [30] Determination of dielectric properties of insitu concrete at radar frequencies [online]. <https://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v078/v078.htm>. cit. 25.2.2020.
- [31] Table of electrical resistivity and conductivity [online]. <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>. cit. 25.2.2020.



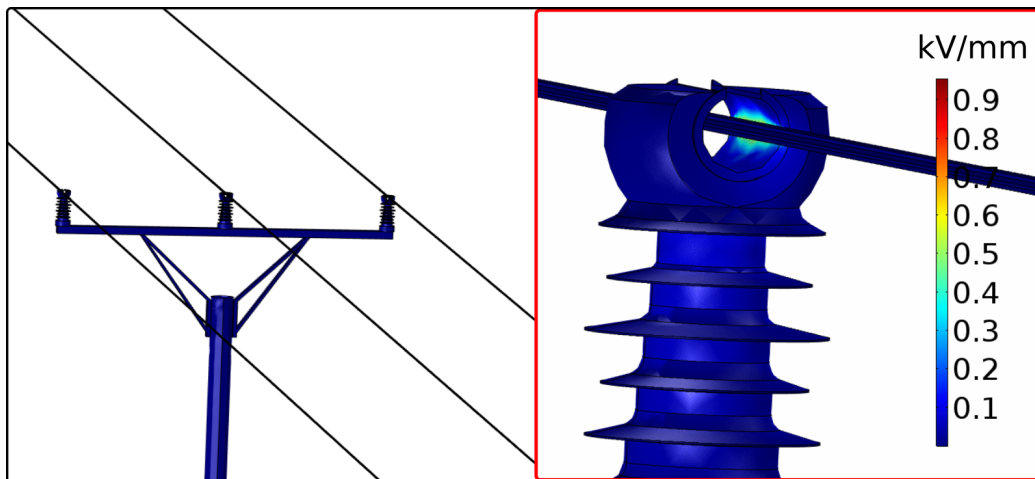
- [32] What is the magnetic permeability of wood? [online]. <https://www.quora.com/What-is-the-magnetic-permeability-of-wood>. cit. 26.2.2020.
- [33] Muhammad Majid Hussain, Shahab Ferokhi, and S.G. McMeekin. The effects of salt contamination deposition on hv insulators under enviromental stresses. *IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2015.
- [34] Arshad, Azam Nekahi, Shahab Ferokhi, and S.G. McMeekin. Effect of dry band location on electric field distribution along a polymeric insulator under contaminated conditions. *IEEE*, 2015.
- [35] Subba Reddy. Desing considerations of transmission insulators [online]. <https://www.youtube.com/watch?v=6tBbWfOgZSk>, note=cit. 31.3.2020.
- [36] Jon Rennie. The dielectric strength of insulating materials [online]. <https://peakdemand.com/archived-knowledge-center/dielectric-strength-of-insulating-materials>. cit. 4.5.2020.
- [37] Raafat El-Hacha. Structural testing of fibreglass reinforced cementitious composite cross arm after being exposed to electrical lighting impulses. 2010.
- [38] C.Boaventura Wallace, S.Paulino José Osvaldo, Ivan José Lopes, and Glásio C.Miranda. Alternative structures for rural distribution networks. *International conference on lighting protection, Shanghai, China*, 2014.
- [39] Xi Yang, Li Naiyi, Peng Zongren, Liao Jintao, and Qingyu Wang. Potential distribution computation and structure optimization for composite cross-armsin 750 kv ac transmission line. *IEEE*, 2014.
- [40] Luděk Pekárek. Člověk v magnetickém poli [online]. <https://clanky.rvp.cz/clanek/k/z/154/CLOVEK-V-MAGNETICKEM-POLI.html/>. cit. 12.5.2020.

## PŘÍLOHY

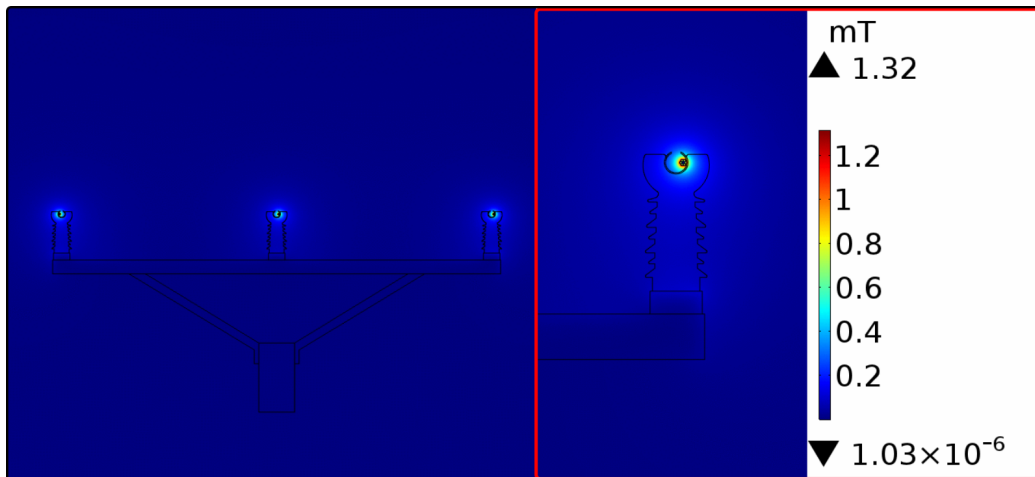
*Rovinná konzola - hladina 15 kV*

Obr. 54: Elektrický potenciál - rovinná konzola + keramické izolátory (15 kV)

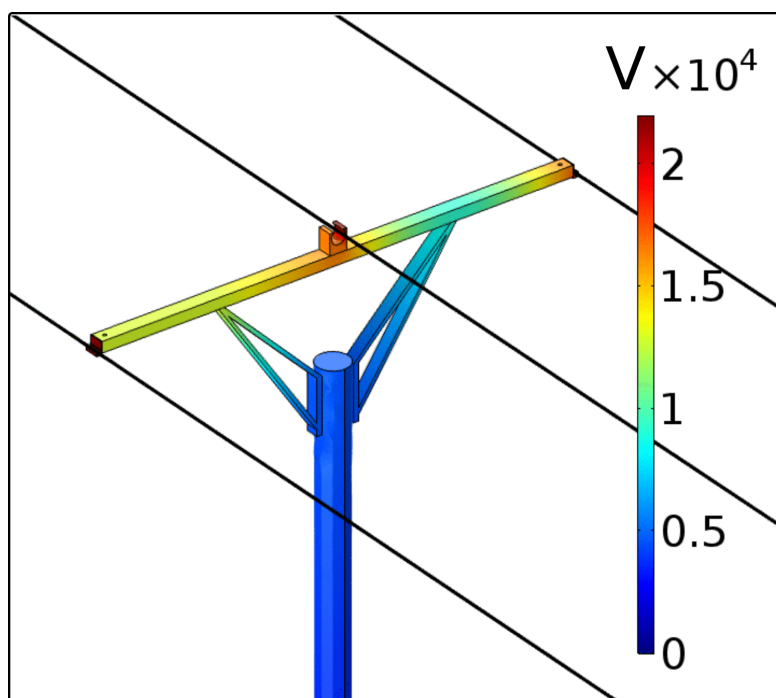
PŘÍLOHY



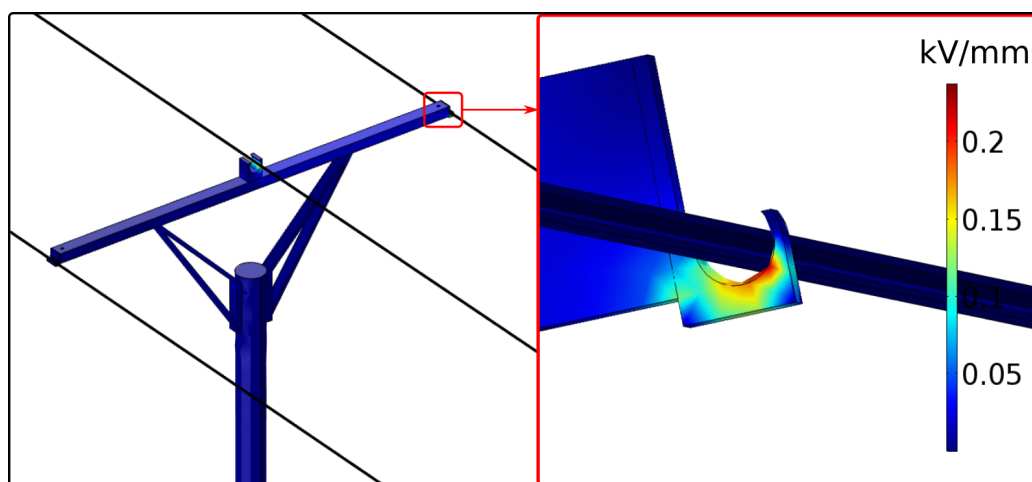
Obr. 55: Elektrická intenzita - rovinná konzola + keramické izolátory (15 kV)



Obr. 56: Magnetická indukce - rovinná konzola + keramické izolátory (15 kV)

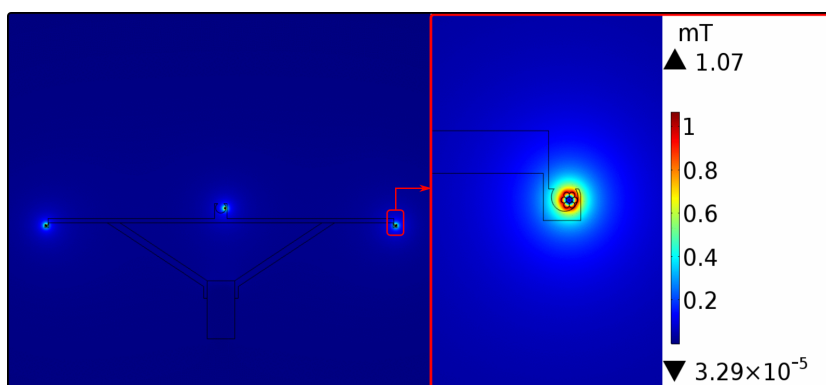
**Rovinná konzola - hladina 22 kV**

Obr. 57: Elektrický potenciál - rovinná konzola z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

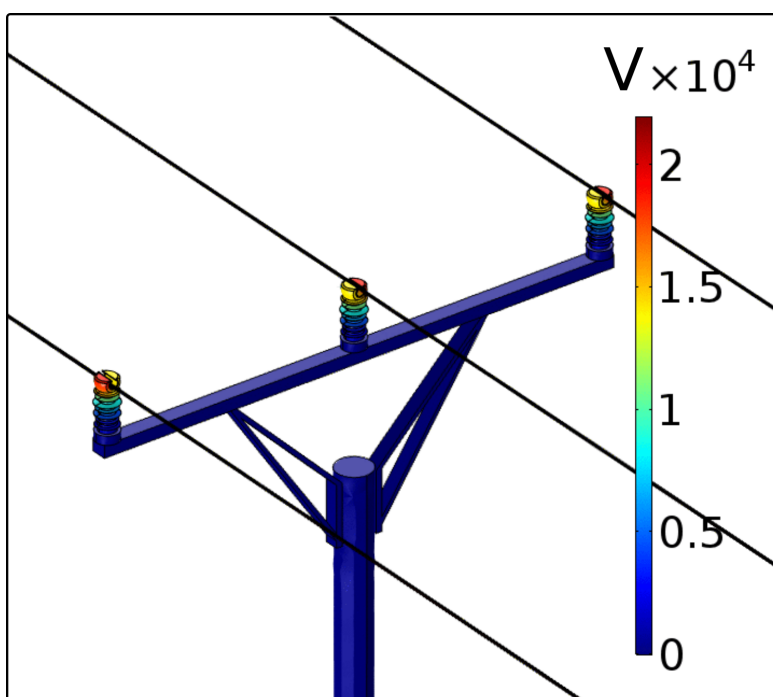


Obr. 58: Elektrická intenzita - rovinná konzola z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

PŘÍLOHY

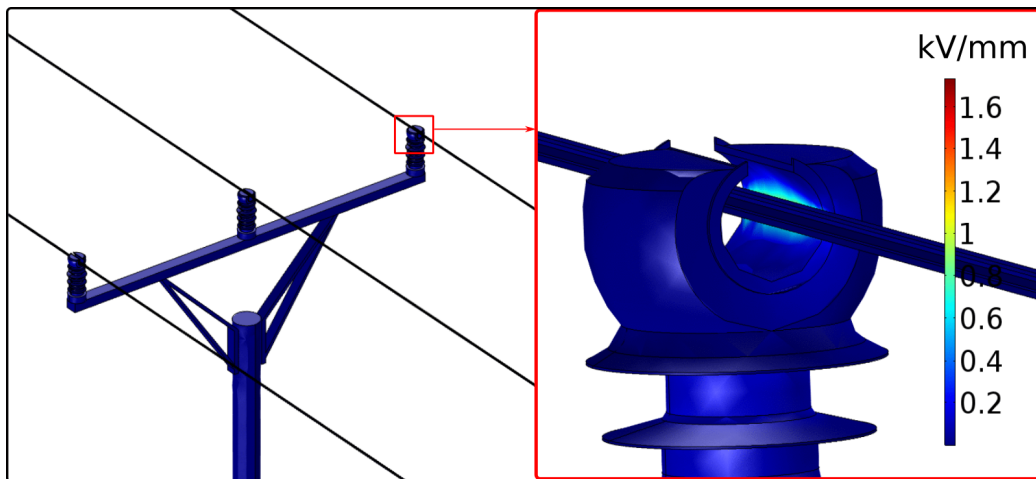


Obr. 59: Magnetická indukce - rovinná konzola z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

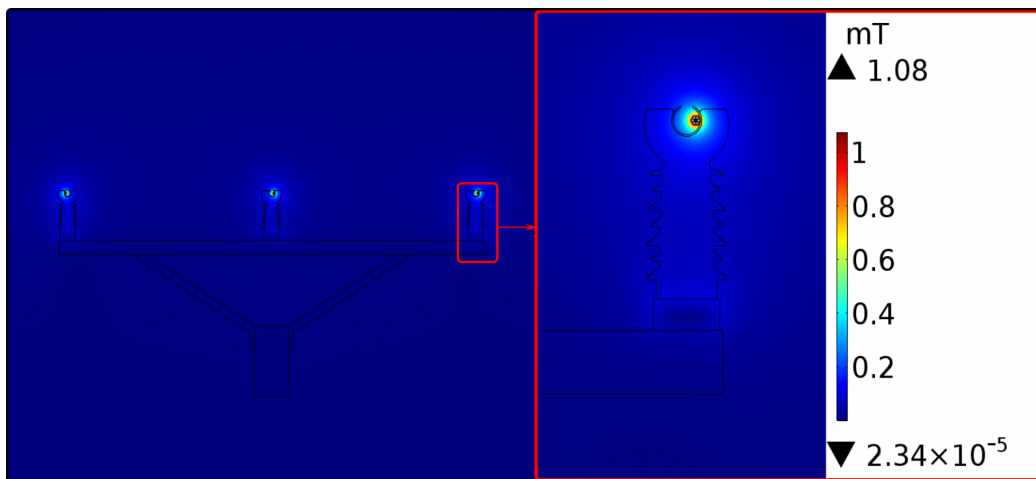


Obr. 60: Elektrický potenciál - rovinná konzola z kompozitního materiálu + keramické izolátory ( $\epsilon_r = 3$ ) (22 kV)

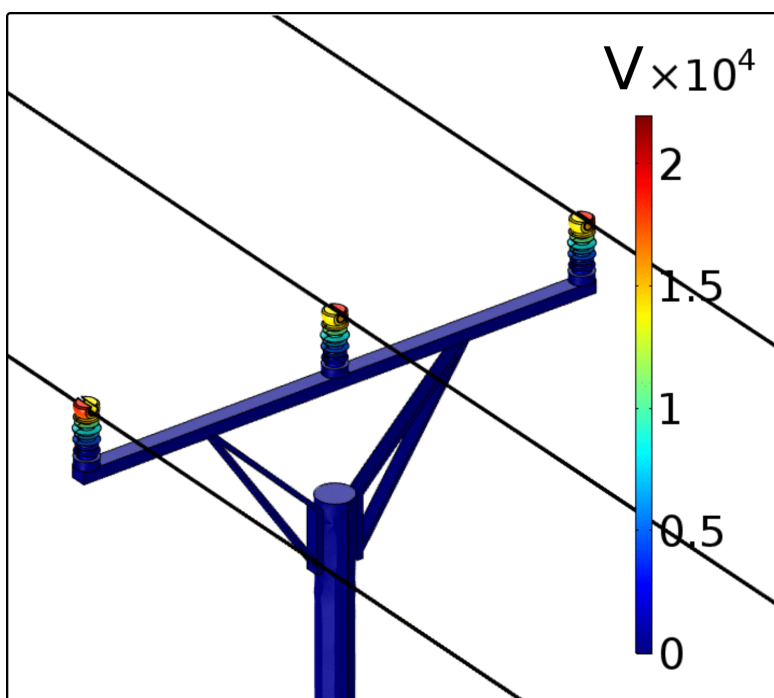
PŘÍLOHY



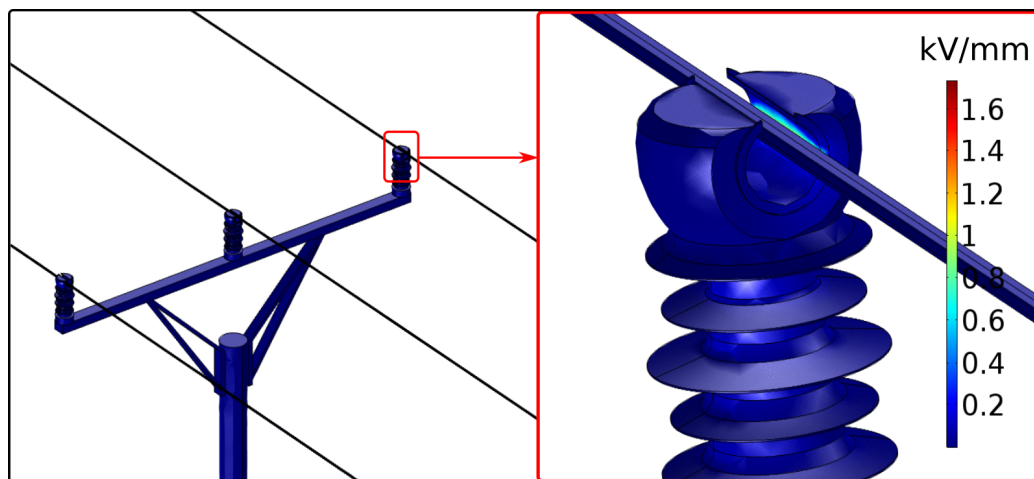
Obr. 61: Elektrická intenzita - rovinná konzola z kompozitního materiálu + keramické izolátory ( $\epsilon_r = 3$ ) (22 kV)



Obr. 62: Magnetická indukce - rovinná konzola z kompozitního materiálu + keramické izolátory ( $\epsilon_r = 3$ ) (22 kV)

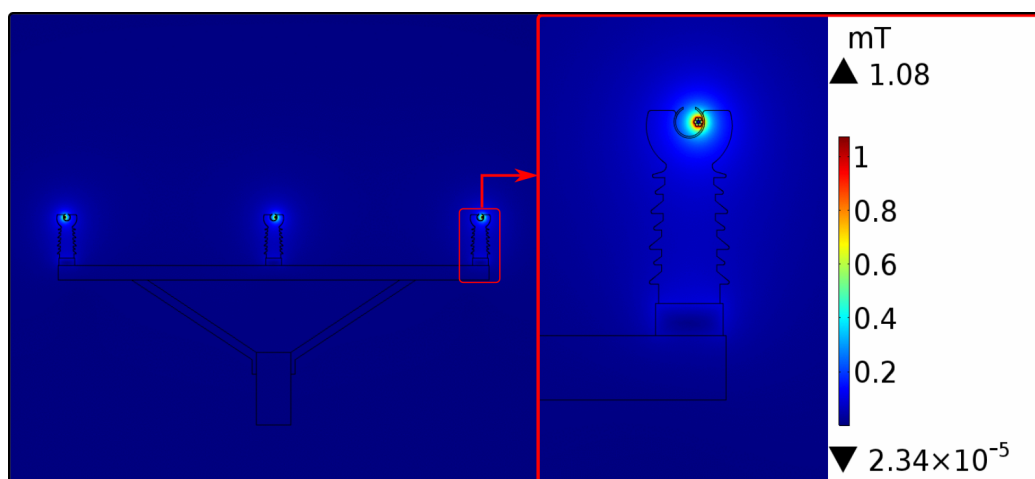


Obr. 63: Elektrický potenciál - rovinná konzola z kompozitního materiálu + keramické izolátory ( $\epsilon_r = 4$ ) (22 kV)

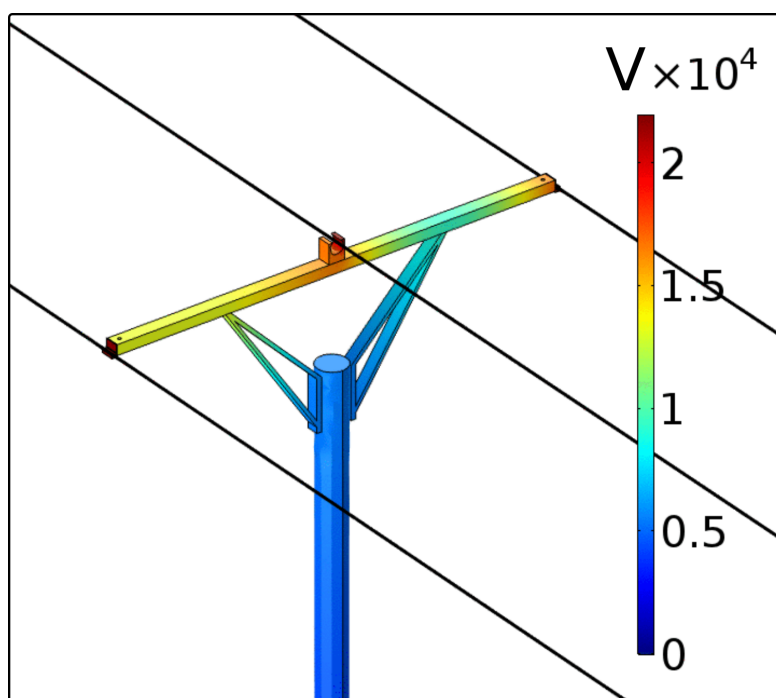


Obr. 64: Elektrická intenzita - rovinná konzola z kompozitního materiálu + keramické izolátory ( $\epsilon_r = 4$ ) (22 kV)

PŘÍLOHY



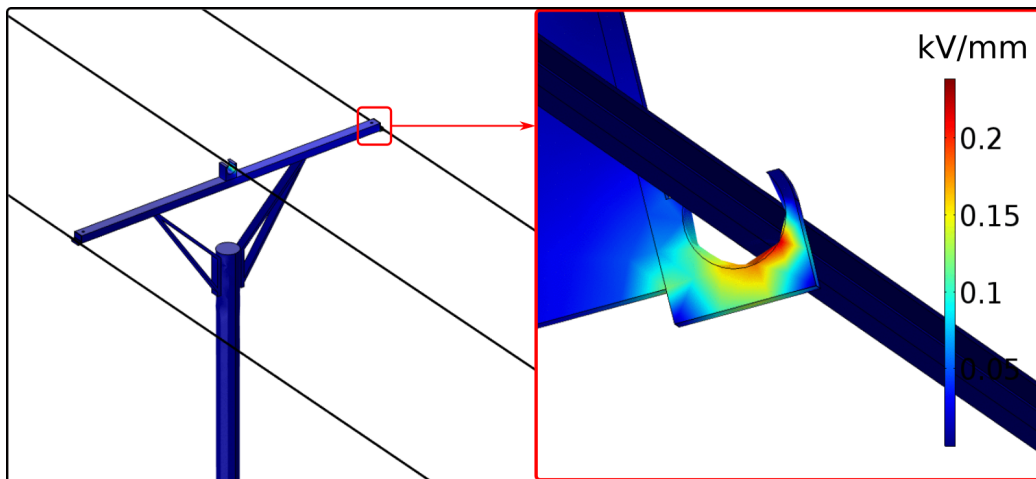
Obr. 65: Magnetická indukce - rovinná konzola z kompozitního materiálu + keramické izolátory ( $\epsilon_r = 4$ ) (22 kV)



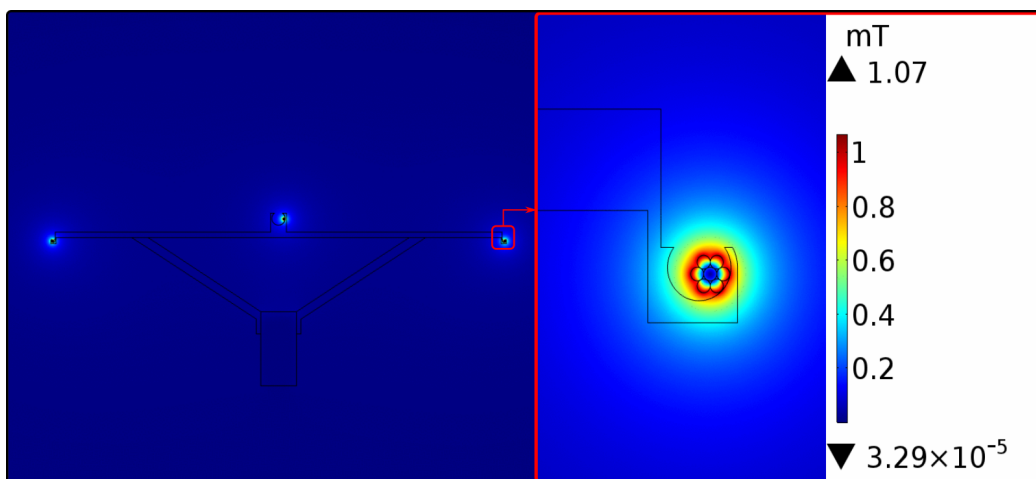
Obr. 66: Elektrický potenciál - rovinná konzola z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)



PŘÍLOHY

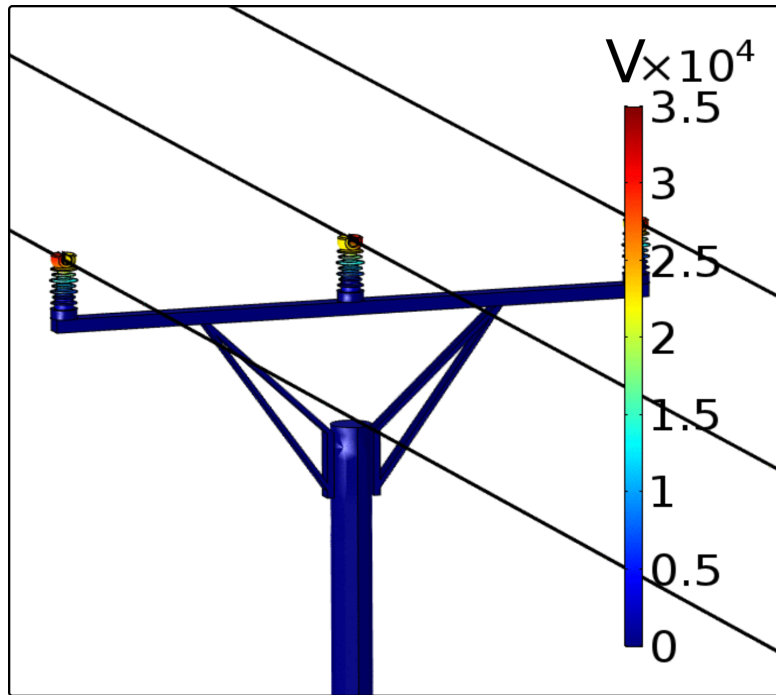


Obr. 67: Elektrická intenzita - rovinná konzola z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

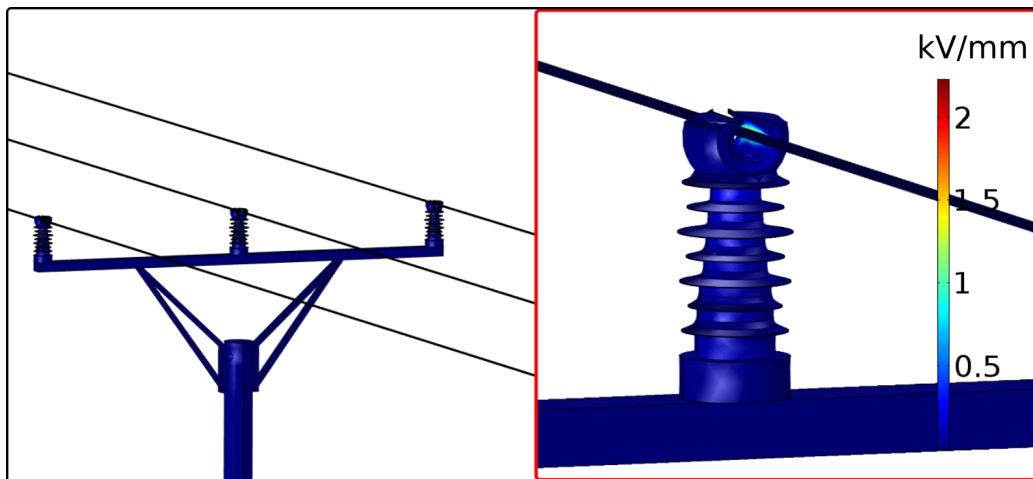


Obr. 68: Magnetická indukce - rovinná konzola z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

*Rovinná konzola - hladina 35 kV*

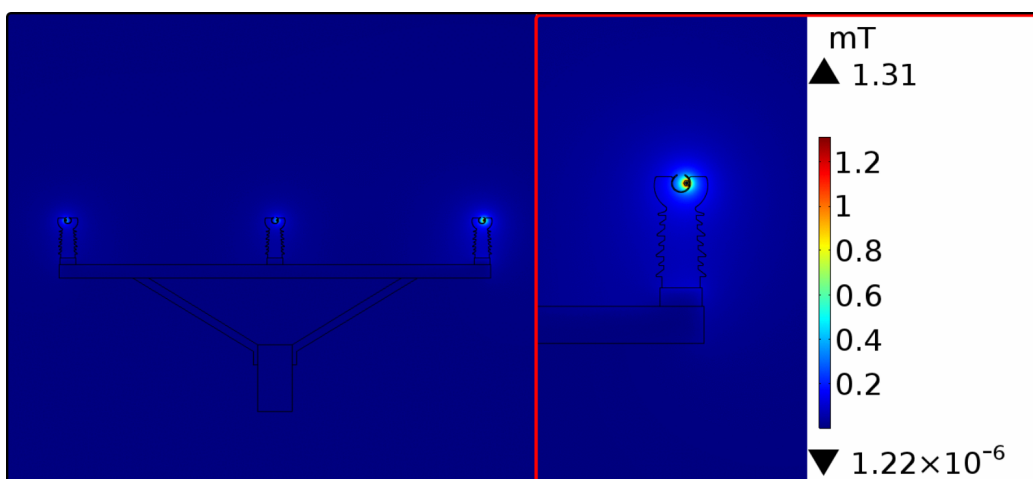


Obr. 69: Elektrický potenciál - rovinná konzola + keramické izolátory (35 kV)



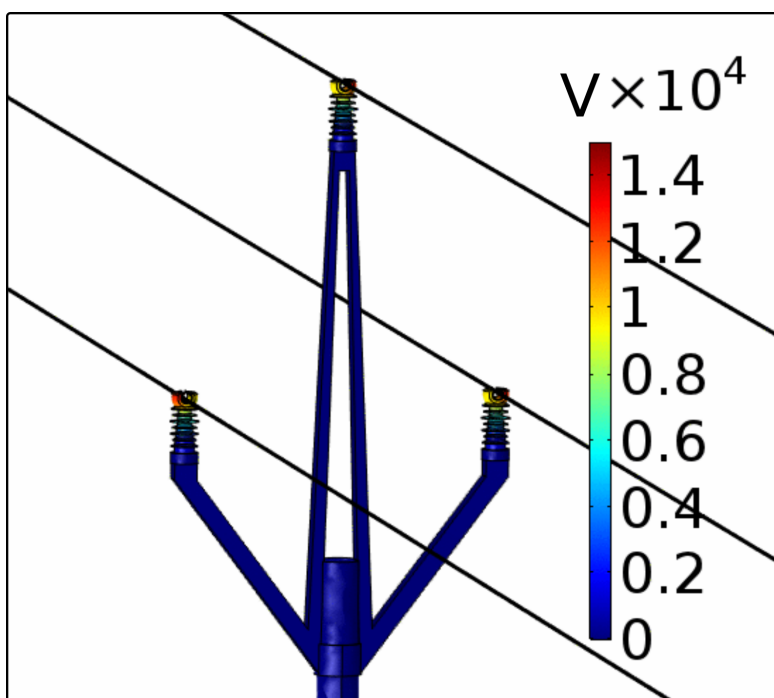
Obr. 70: Elektrická intenzita -rovinná konzola + keramické izolátory (35 kV)

PŘÍLOHY



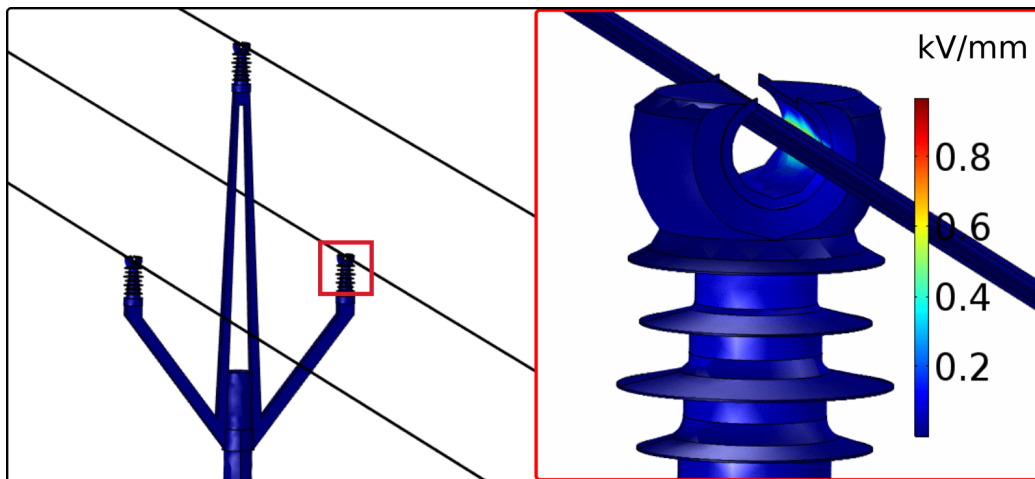
Obr. 71: Magnetická indukce - rovinná konzola + keramické izolátory (35 kV)

*Konzola typu pařát - hladina 15 kV*

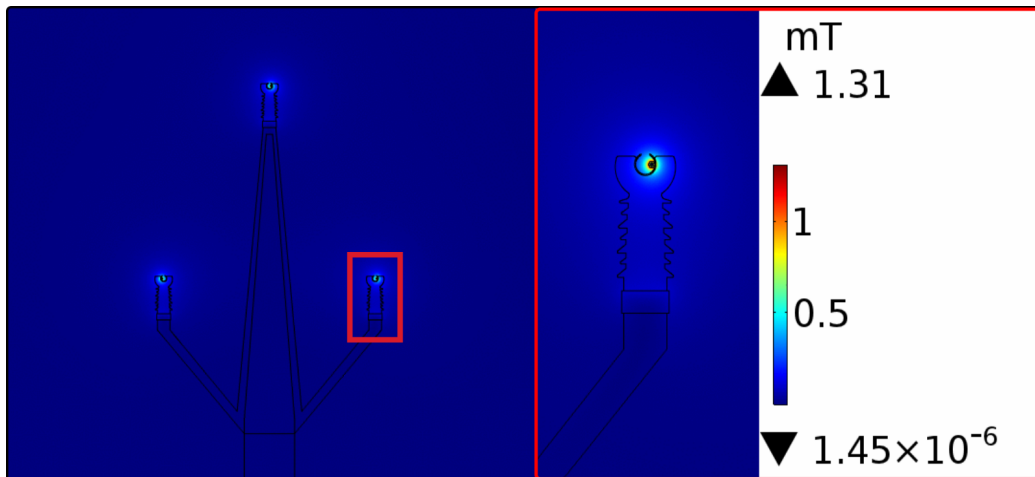


Obr. 72: Elektrický potenciál - konzola typu pařát + keramické izolátory (15 kV)

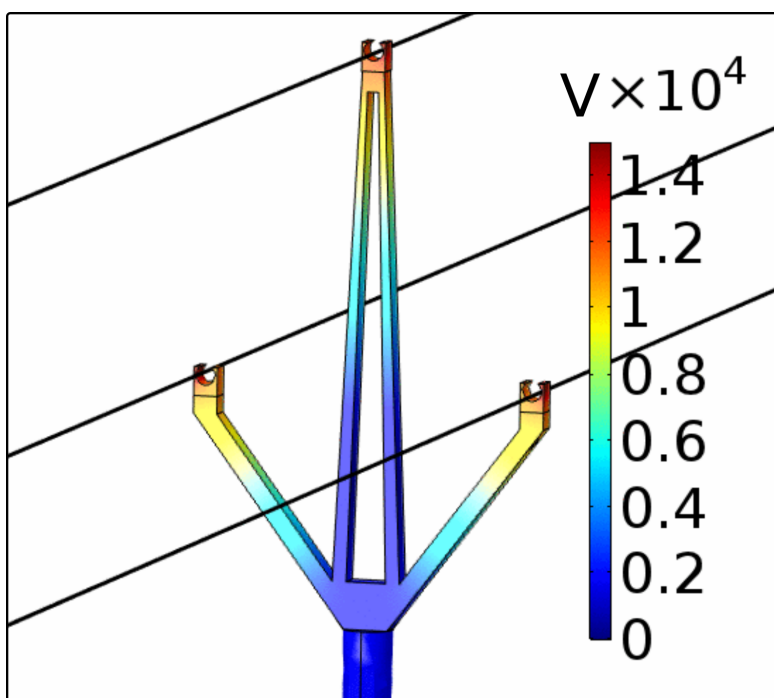
PŘÍLOHY



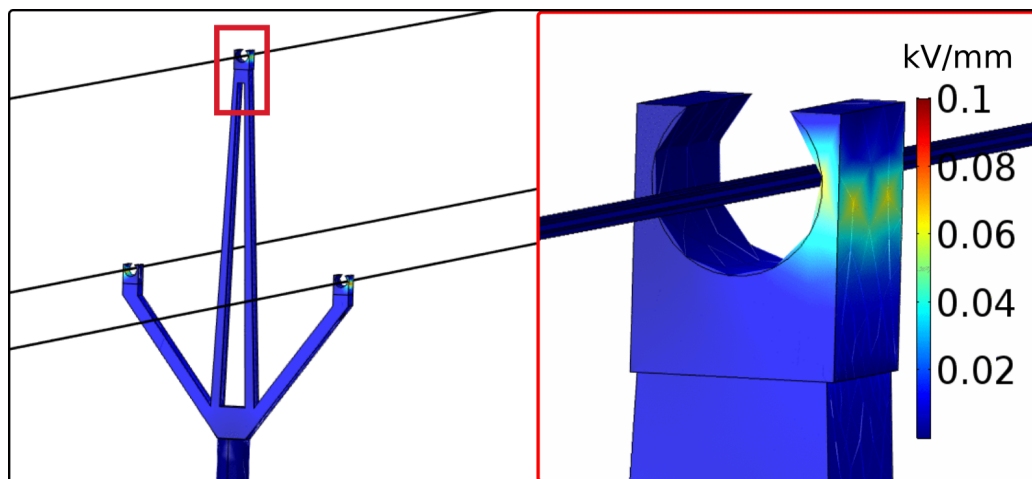
Obr. 73: Elektrická intenzita - konzola typu pařát + keramické izolátory (15 kV)



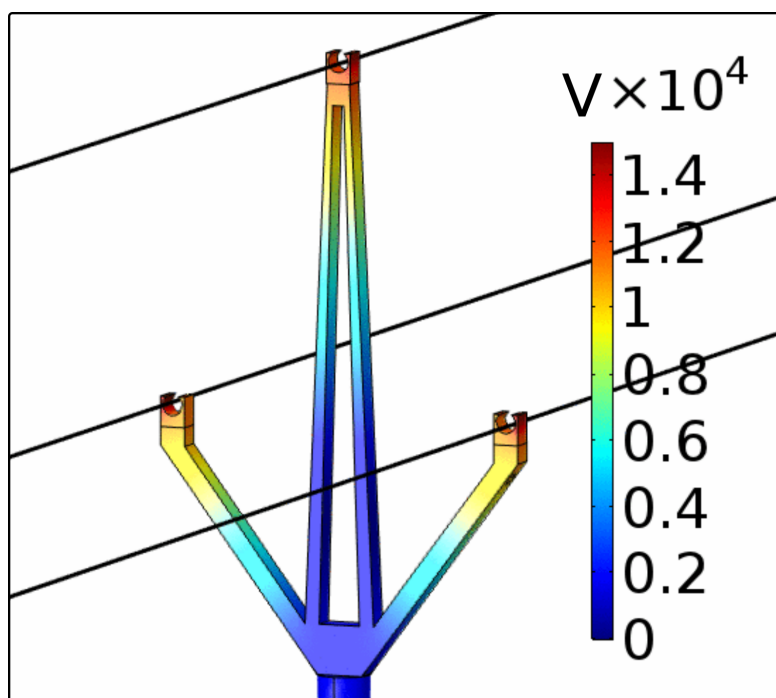
Obr. 74: Magnetická indukce - konzola typu pařát + keramické izolátory (15kV)



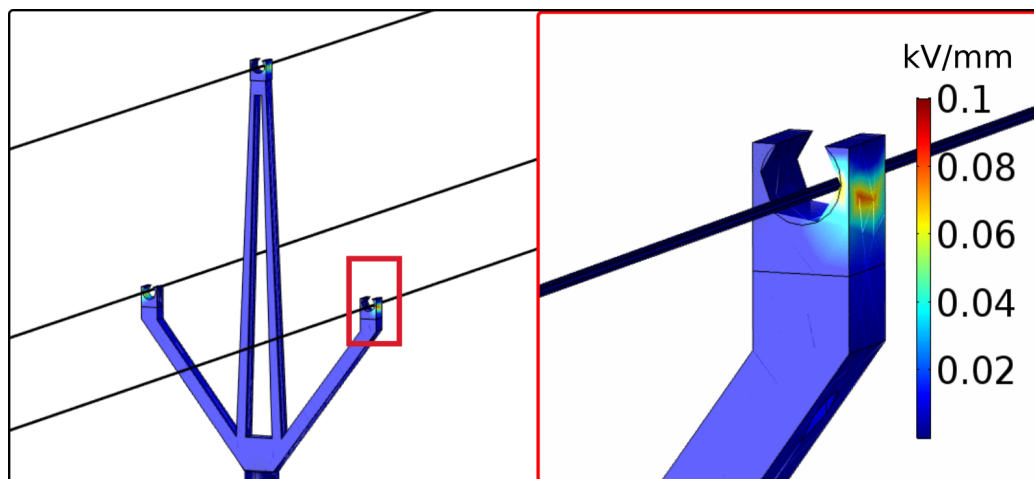
Obr. 75: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (15 kV)



Obr. 76: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (15 kV)

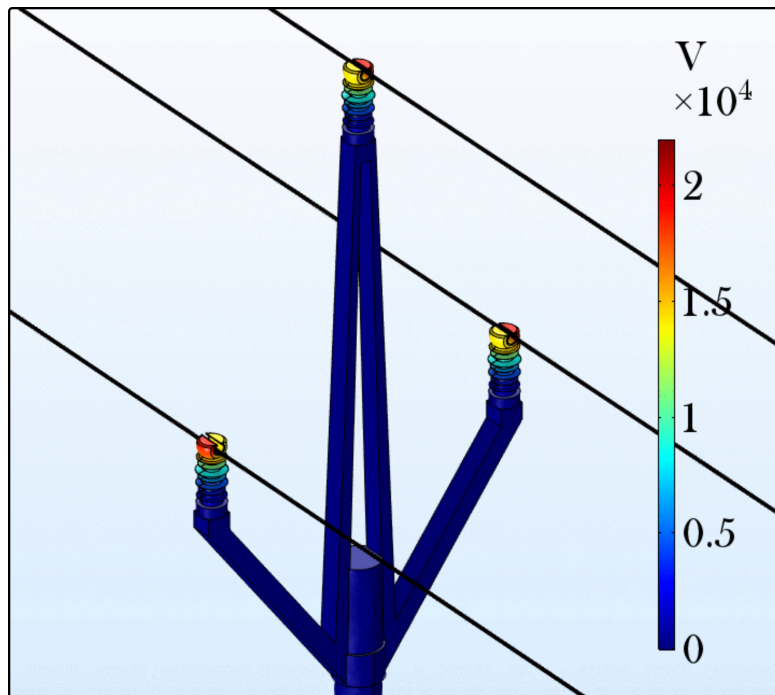


Obr. 77: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (15 kV)

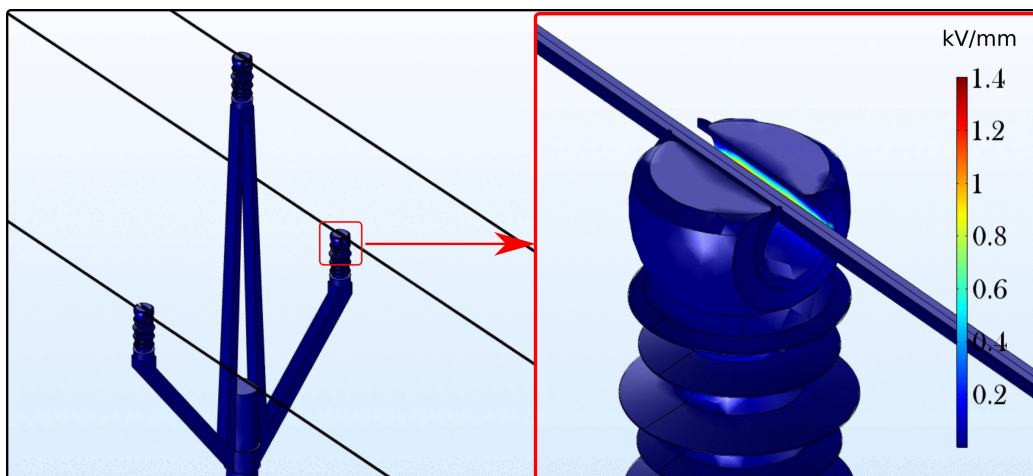


Obr. 78: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (15 kV)

*Konzola typu pařát - hladina 22 kV*

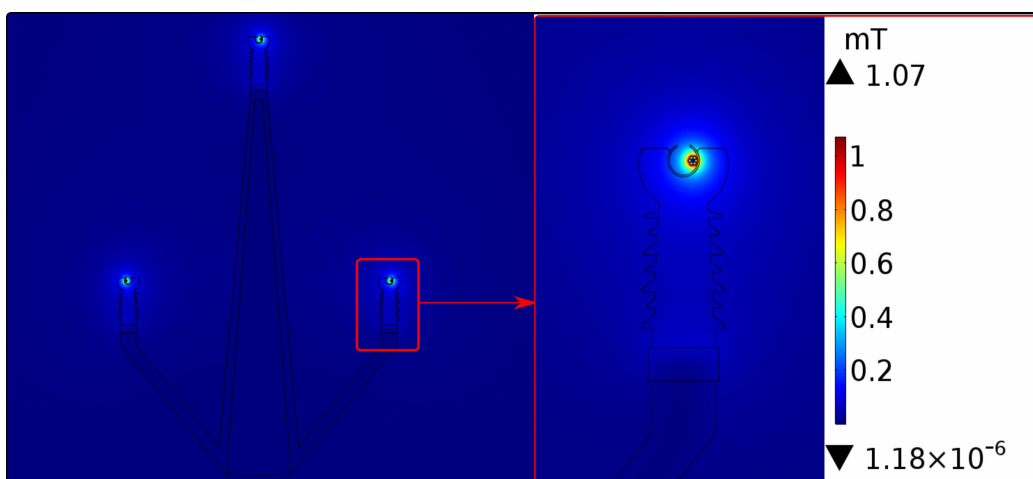


Obr. 79: Elektrický potenciál - konzola typu pařát + keramické izolátory (22 kV)

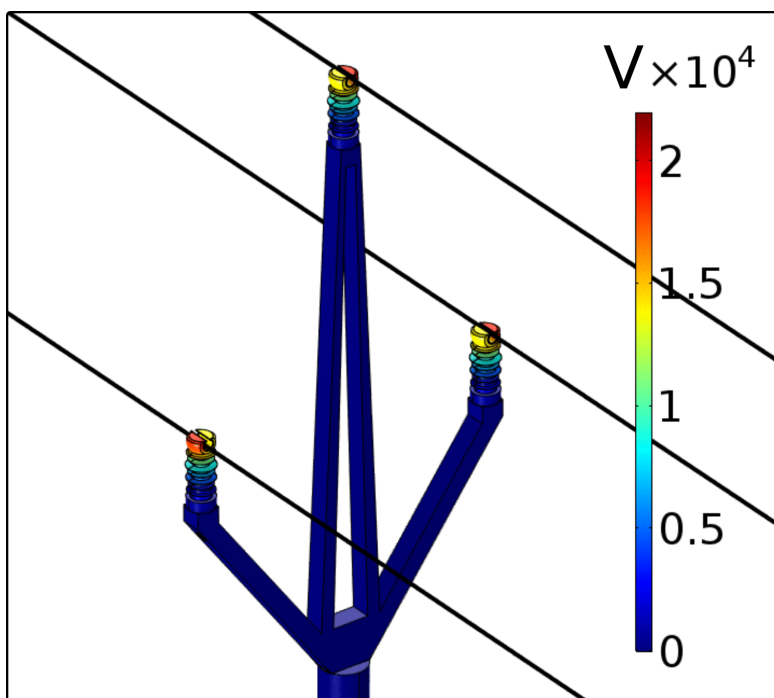


Obr. 80: Elektrická intenzita - konzola typu pařát + keramické izolátory (22 kV)

PŘÍLOHY



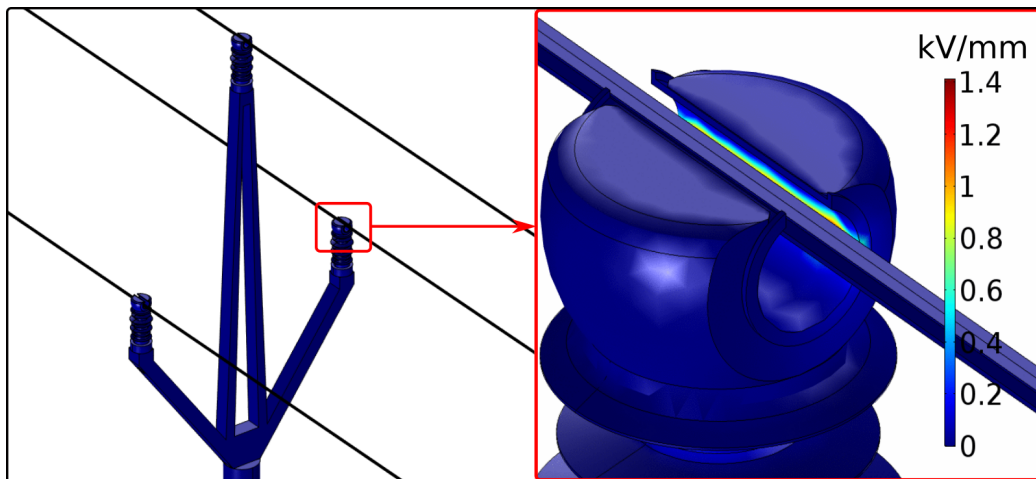
Obr. 81: Magnetická indukce - konzola typu pařát + keramické izolátory (22 kV)



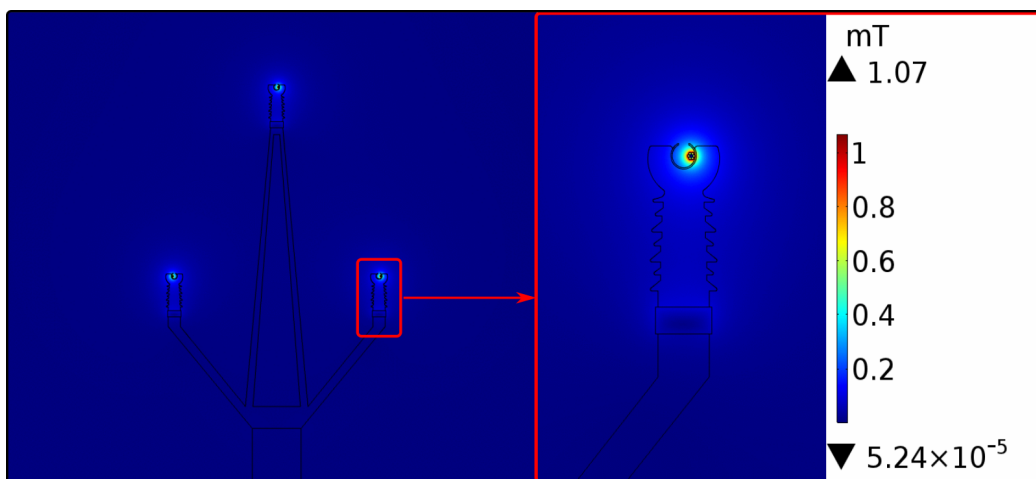
Obr. 82: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + keramické izolátory (22 kV)



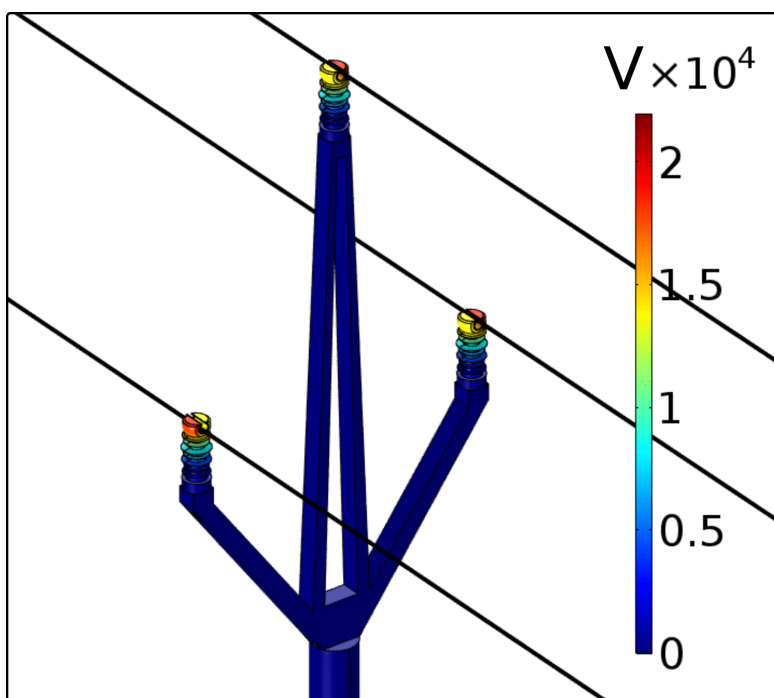
PŘÍLOHY



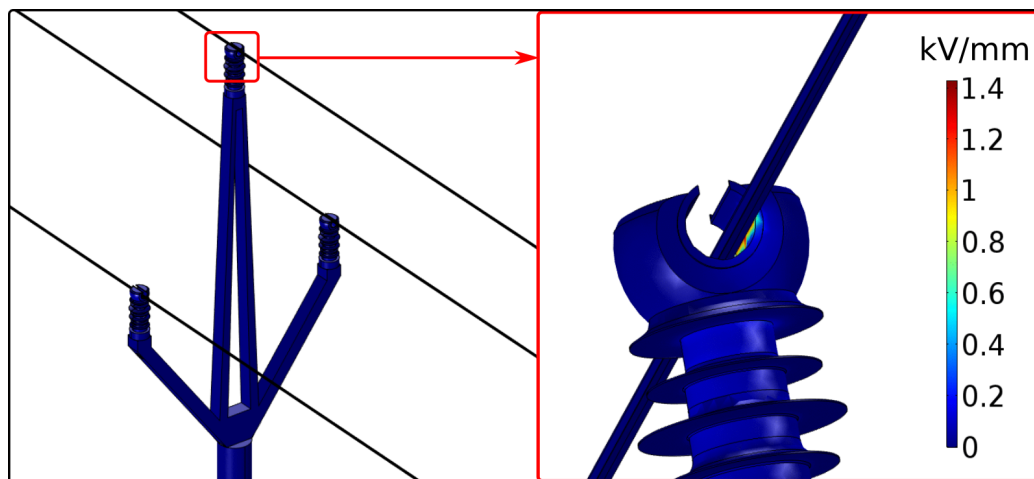
Obr. 83: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + keramické izolátory (22 kV)



Obr. 84: Magnetická indukce - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + keramické izolátory (22 kV)

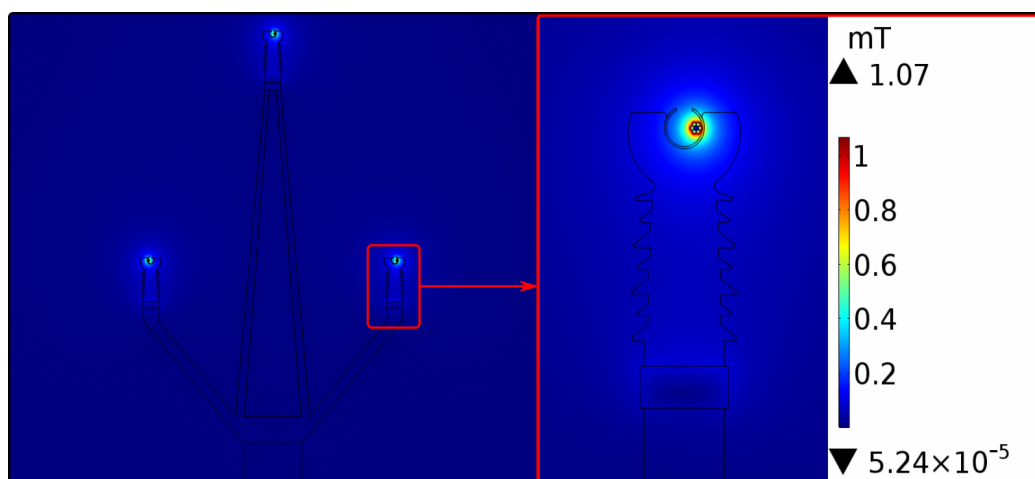


Obr. 85: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + keramické izolátory (22 kV)

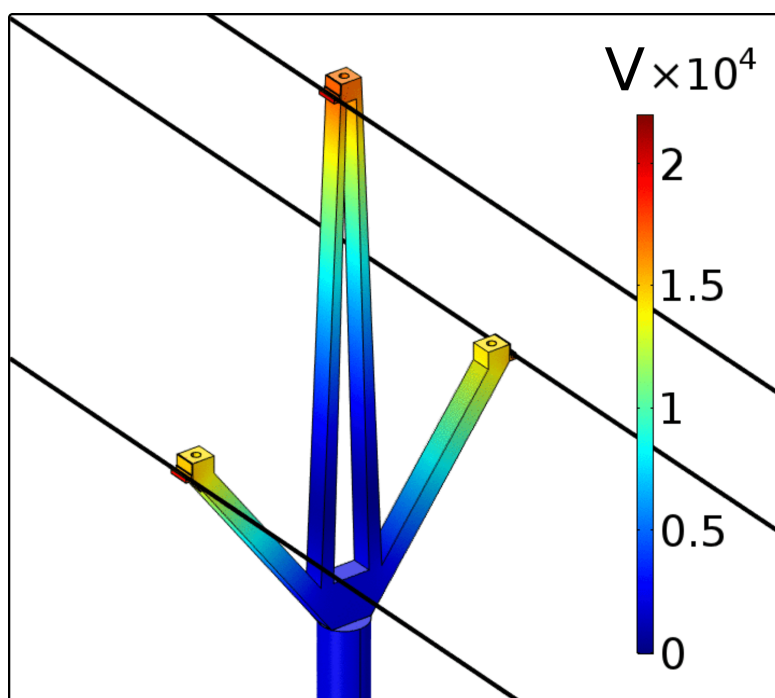


Obr. 86: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + keramické izolátory (22 kV)

PŘÍLOHY

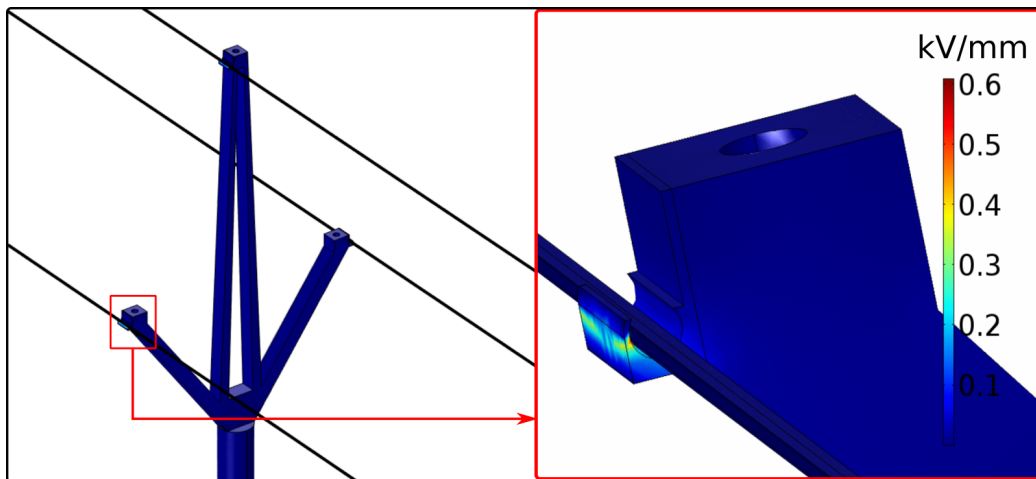


Obr. 87: Magnetická indukce - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + keramické izolátory (22 kV)

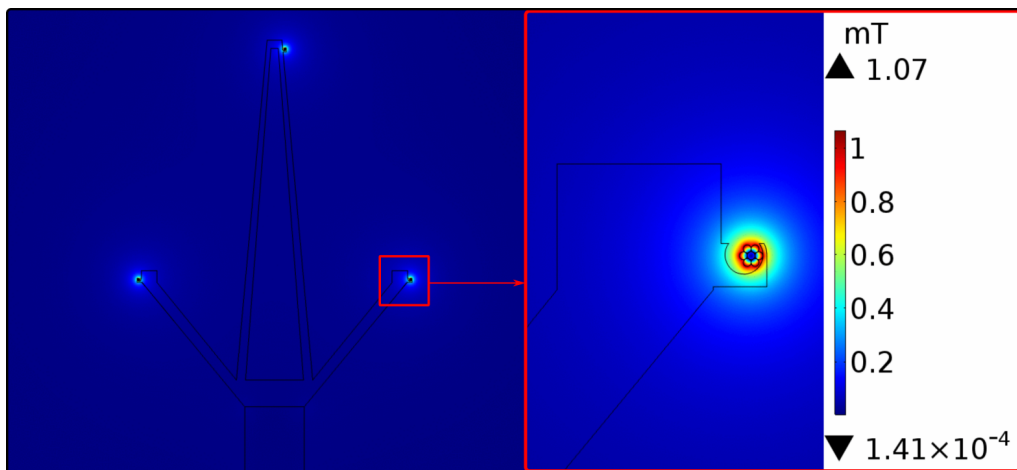


Obr. 88: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

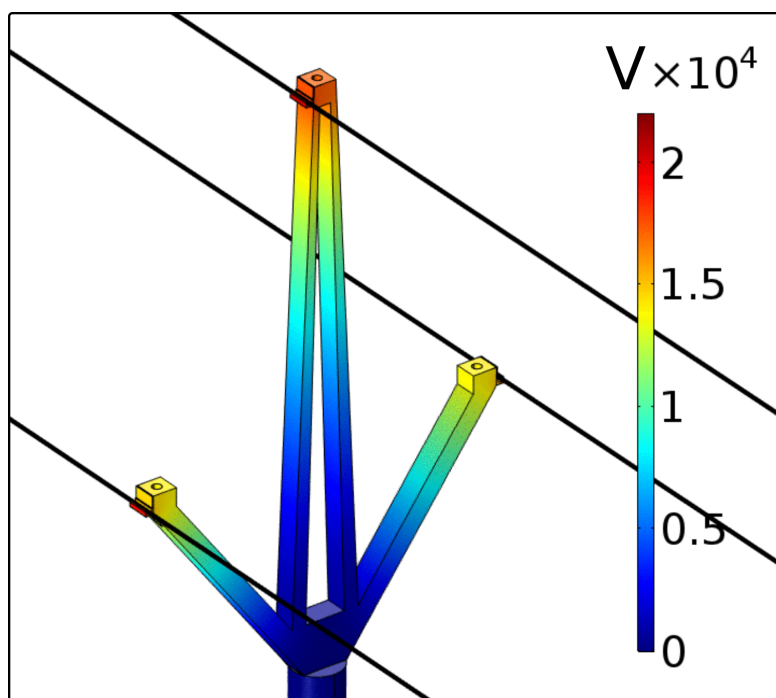
PŘÍLOHY



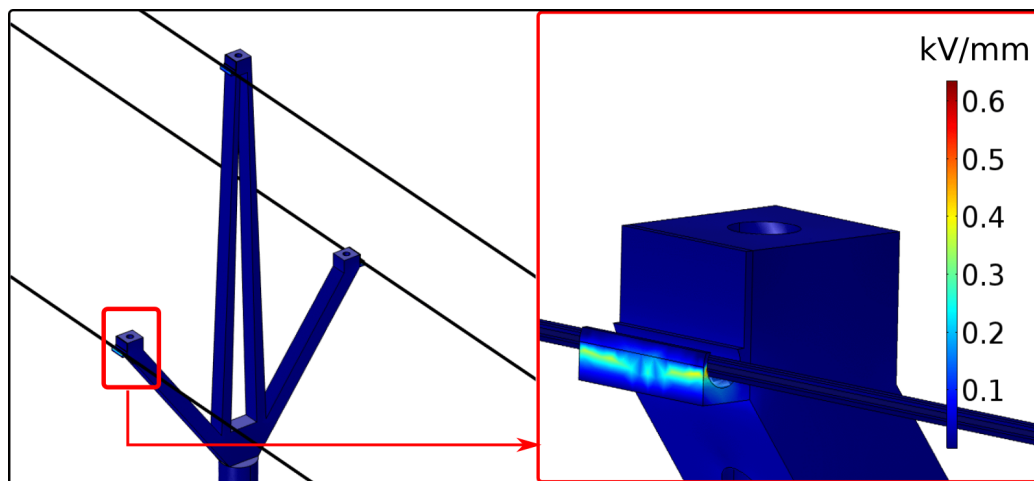
Obr. 89: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)



Obr. 90: Magnetická indukce - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

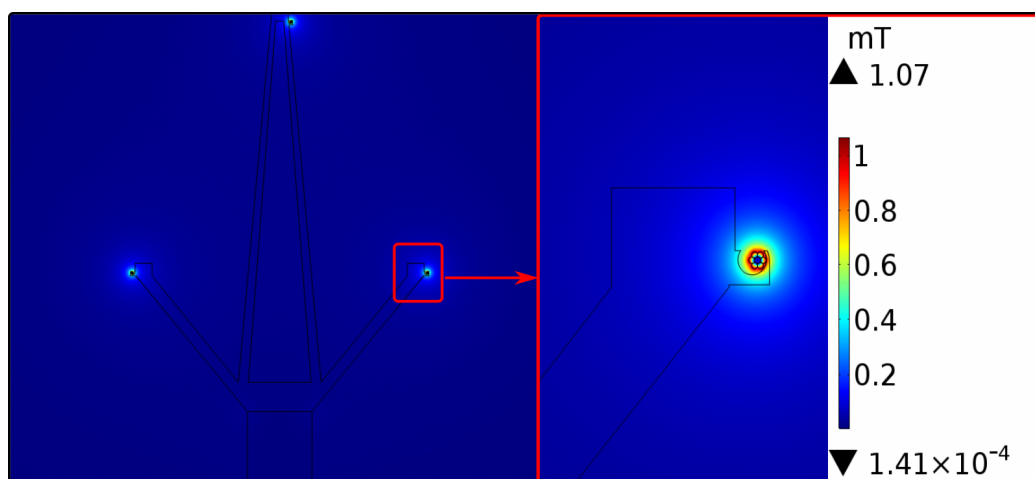


Obr. 91: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

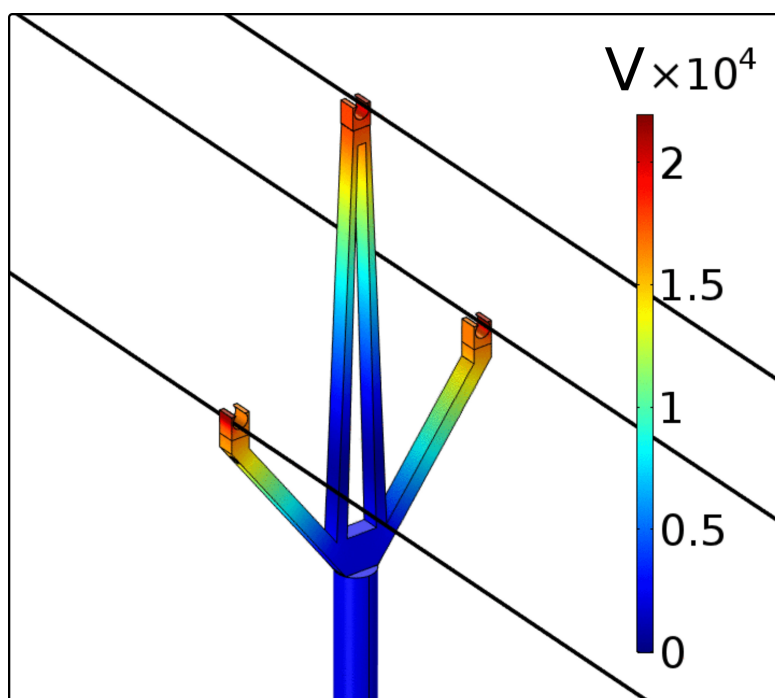


Obr. 92: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

PŘÍLOHY

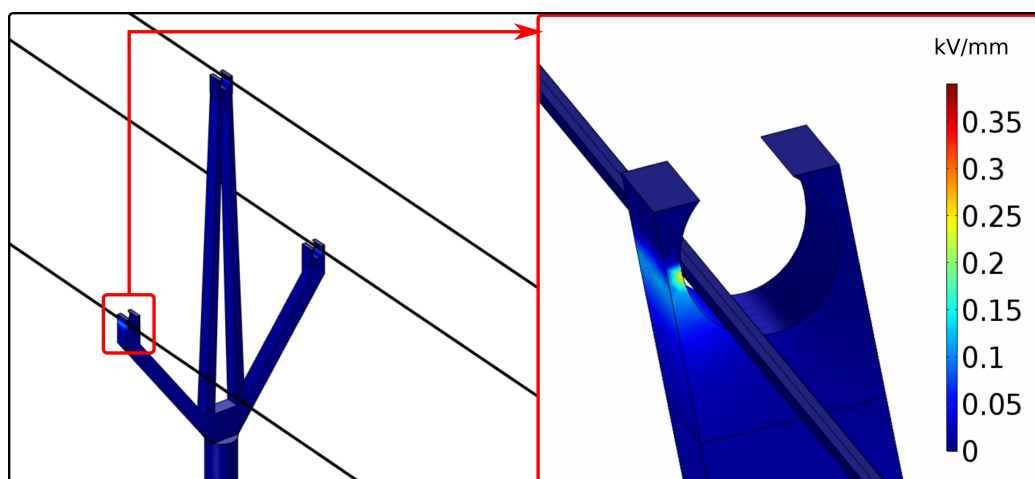


Obr. 93: Magnetická indukce - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů na kraji konzoly (22 kV)

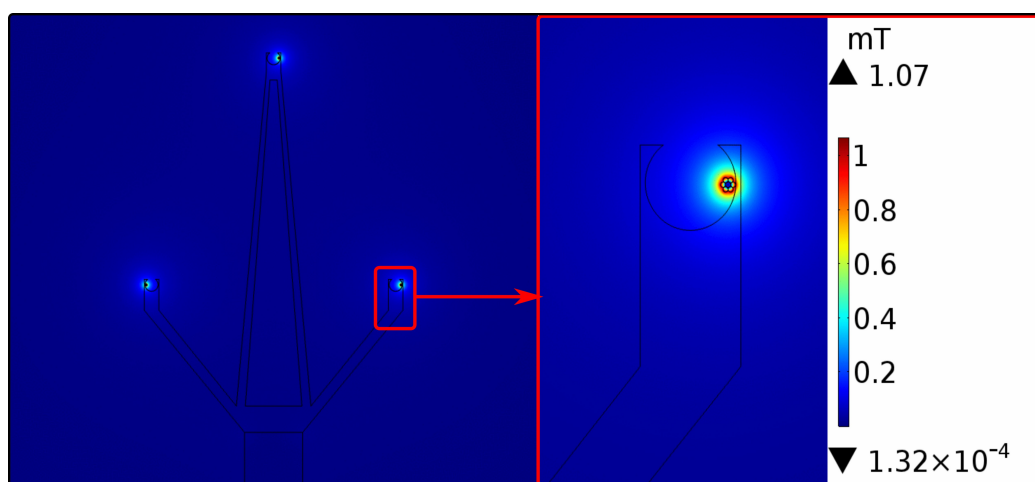


Obr. 94: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (22 kV)

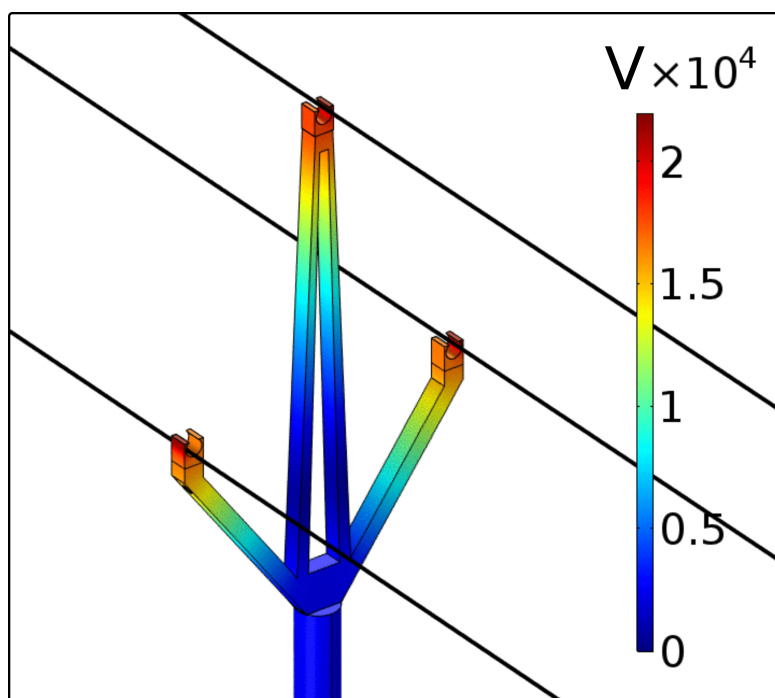
PŘÍLOHY



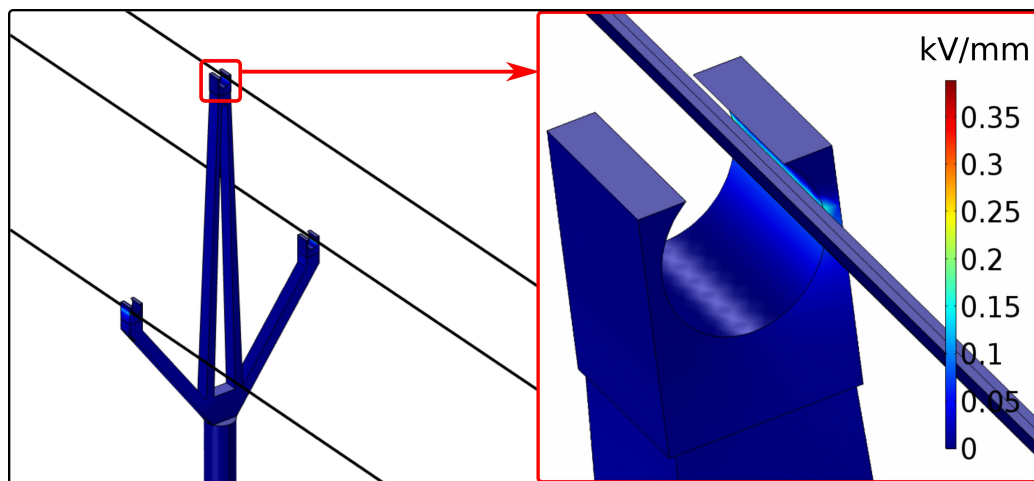
Obr. 95: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (22 kV)



Obr. 96: Magnetická indukce - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 3$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (22 kV)

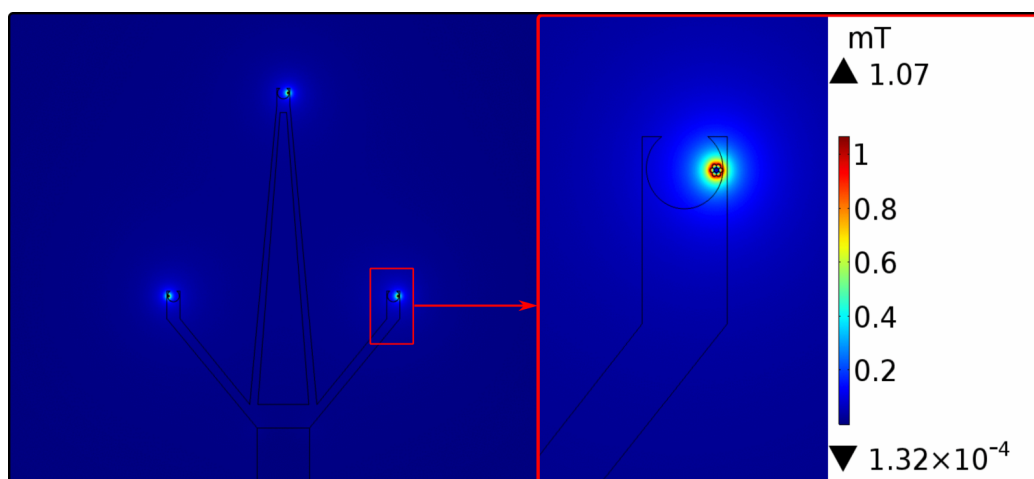


Obr. 97: Elektrický potenciál - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (22 kV)



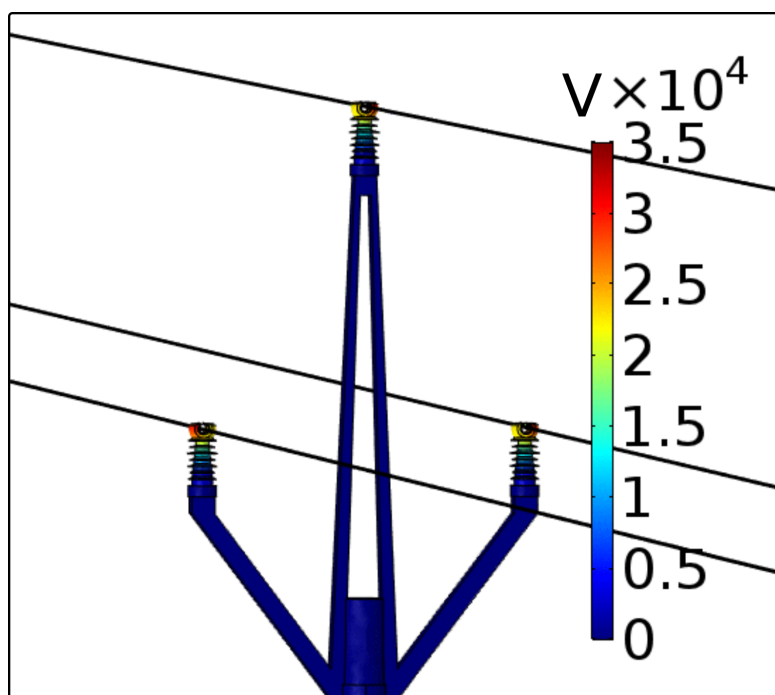
Obr. 98: Elektrická intenzita - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (22 kV)





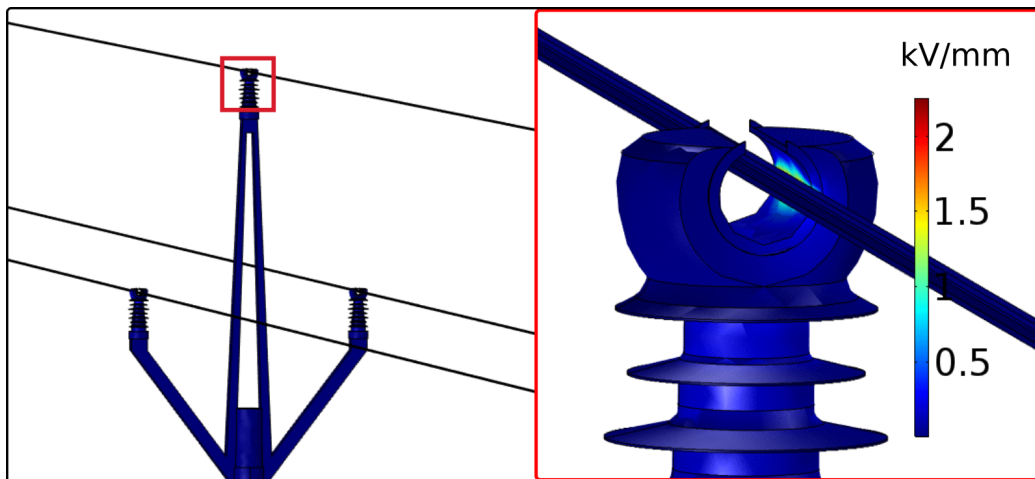
Obr. 99: Magnetická indukce - konzola typu pařát z kompozitního materiálu ( $\epsilon_r = 4$ ) + uchycení vodičů v horních částech konzoly (22 kV)

*Konzola typu pařát - hladina 35 kV*

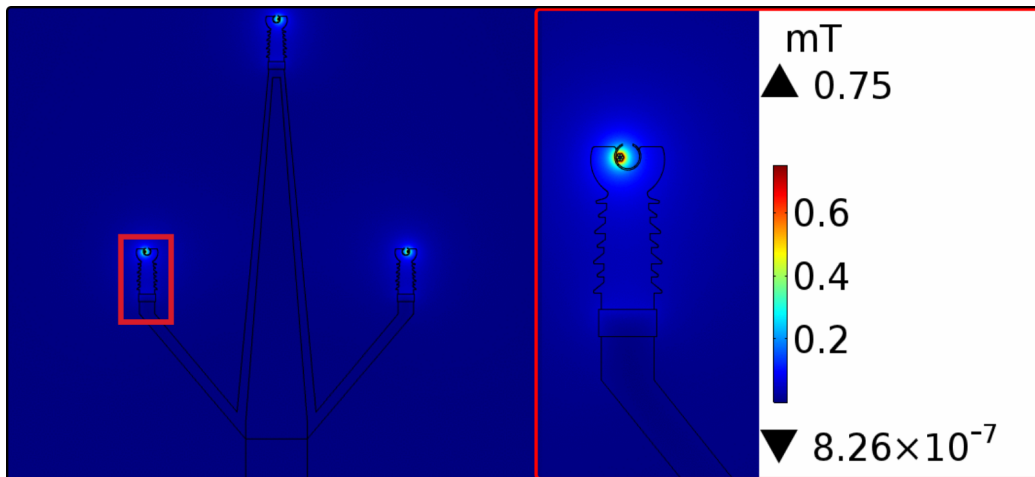


Obr. 100: Elektrický potenciál - konzola typu pařát + keramické izolátory (35 kV)

PŘÍLOHY



Obr. 101: Elektrická intenzita - konzola typu pařát + keramické izolátory (35 kV)



Obr. 102: Magnetická indukce - konzola typu pařát + keramické izolátory (35 kV)