

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh izolačních konstrukčních prvků

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan ŘEZÁČEK
Osobní číslo:	E18N0061P
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Elektroenergetika
Téma práce:	Návrh izolačních konstrukčních prvků
Zadávací katedra:	Katedra elektroenergetiky a ekologie

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte odbornou literaturu a internetové zdroje týkající se izolačních konstrukčních prvků vedení vn a vn.
2. Sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro řešení rozložení elektromagnetického pole.
3. Uvažujte různé materiály i různá geometrická uspořádání. Řešte problém z hlediska elektrických i mechanických vlastností.
4. Realizujte numerické modely na počítači.
5. Zhodnoťte obdržené výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.
2. Míka, S., Přikryl, P., Brandner, M.: Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice, Plzeň, Vydavatelský servis, 2006.
3. Mayer, D., Ulrych, B.: Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí, Praha, SNTL, 1988.

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

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



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

L.S.

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

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh kompozitních izolačních konstrukcí, které odolají elektrickému i mechanickému namáhání. Návrh je znázorněn pomocí 2D a 3D počítačových modelů, které jsou podrobeny simulacím elektrického namáhání v ustáleném elektrostatickém a harmonickém magnetickém poli. Následně je zjišťována mechanická odolnost modelů konstrukcí simulací mechanického namáhání. Elektrickému i mechanickému namáhání odolal návrh kompozitní izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou, trubicovitými kapacitními kruhy a silikonovým přechodem na napěťové hladině 110 kV, a návrh kompozitní izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou, speciálními kapacitními „M-W“ kruhy a silikonovým přechodem na napěťové hladině 400 kV. Výsledky těchto simulací jsou podkladem pro vývoj prototypu kompozitní izolační konstrukce, která může sloužit jako alternativa k příhradovým ocelovým stožárovým konstrukcím s izolátory.

Klíčová slova

Kompozitní izolační konstrukce, izolátor, stožárová konstrukce, ocelový příhradový stožár, venkovní vedení, elektrostatické pole, magnetické pole

Abstract

The aim of this master's thesis is to design composite insulated cross-arms that can withstand electrical and mechanical stress. These designs are depicted by 2D and 3D computer models which are subjected to electrical stress simulations in a steady electrostatic and harmonic magnetic field. Subsequently, the mechanical resistance of the cross-arm designs is determined by a mechanical stress simulation. The composite insulated cross-arm designs that withstood the electrical and mechanical stress were the model with a strong supporting armature, tubular grading rings and a silicone transition at a voltage level of 110 kV, and the model with a strong supporting armature, special grading "M-W" rings and a silicone transition at a voltage level of 400 kV. The results of these simulations are the basis for further development of a composite insulated cross-arm prototype which can serve as an alternative to lattice steel mast structures with insulators.

Key words

Composite insulated cross-arm, insulator, steel lattice tower, overhead line, electrostatics field, magnetic field

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 18.6.2020

Bc. Jan Řezáček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	11
1 IZOLÁTOROVÉ KONSTRUKCE VENKOVNÍCH VEDENÍ	12
1.1 NAVRHOVÁNÍ IZOLÁTOROVÝCH KONSTRUKCÍ.....	12
1.2 TYPY IZOLÁTORŮ PODLE TYPU UCHYCENÍ.....	13
1.2.1 Podpěrné izolátory.....	13
1.2.2 Závěsné (tahové) izolátory.....	13
1.3 ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE IZOLÁTORŮ.....	13
1.3.1 Roubíková podpěrka.....	13
1.3.2 Talířové izolátory.....	14
1.3.3 Tyčové izolátory.....	16
1.4 ROZDĚLENÍ IZOLÁTORŮ PODLE POUŽITÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ.....	16
1.4.1 Keramické izolátory.....	17
1.4.2 Skleněné izolátory.....	18
1.4.3 Kompozitní izolátory.....	19
2 KOMPOZITNÍ IZOLAČNÍ KONSTRUKCE	24
2.1 KOMPOZITNÍ IZOLAČNÍ KONSTRUKCE VVN.....	25
2.1.1 110 kV a 400 kV konstrukce.....	25
2.1.2 750 kV a 1000 kV konstrukce.....	31
2.2 KOMPOZITNÍ IZOLAČNÍ KONSTRUKCE VN.....	33
3 POČÍTAČOVÉ MODELY IZOLAČNÍCH KONSTRUKCÍ	34
3.1 3D MODELY – SOLIDWORKS.....	35
3.2 2D MODELY – SOLIDWORKS/AUTOCAD.....	36
3.3 OBECNÝ MATEMATICKÝ MODEL.....	37
3.3.1 Maxwellovy rovnice.....	38
3.3.2 Model elektrostatického pole.....	38
3.3.3 Model magnetického pole.....	40
3.4 NUMERICKÝ MODEL ELEKTRICKÉHO NAMÁHÁNÍ – COMSOL.....	43
3.4.1 Zvolené materiály a jejich vlastnosti.....	43
3.4.2 Výpočet proudových hustot.....	44
3.4.3 2D numerický model.....	45
3.4.4 3D numerický model.....	52
3.5 NUMERICKÝ MODEL MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ – SOLIDWORKS.....	58
3.5.1 Zvolené materiály a jejich vlastnosti.....	59
3.5.2 3D numerický model.....	59
4 ZÁVĚR	71
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	73
PŘÍLOHY	81

Úvod

V současné době prochází elektrizační soustavy mnoha států dlouhodobým procesem rozvoje s cílem posílit přenášený výkon ve vnitrozemí i v přeshraničních předávacích místech a zvýšit spolehlivost dodávky elektrické energie.

Posilování elektrizační soustavy může probíhat dvěma způsoby – výstavbou nového elektrického vedení nebo modernizací stávajícího vedení. Stavba nových vedení přináší výrazné navýšení přenosové kapacity, ale i určitou finanční a časovou náročnost. Proto je modernizace stávajícího vedení jednodušší a dostupnější variantou posilování elektrizační soustavy. Při modernizaci vedení se provádí výměna starých fázových vodičů za nové s větším průřezem a výměna kratších izolátorů za delší. S touto modernizací však rostou nároky na dodržování dostatečných izolačních vzdáleností mezi pracovními vodiči a stožárovými konstrukcemi, které nelze vždy v praxi realizovat.

Z tohoto důvodu se tato diplomová práce zaměřuje na vytvoření 2D a 3D počítačových modelů 110kV a 400kV kompozitních izolačních konstrukcí. Tyto modely jsou simulovány na elektrická a mechanická zatížení. Izolační konstrukce mohou být alternativou k ocelovým příhradovým konstrukcím s izolátory od napěťových hladin VVN až po UVN. Výhodou těchto konstrukcí je především nízká hmotnost, větší povrchová i přeskoková izolační vzdálenost, dlouhá životnost, vysoká elektrická a mechanická odolnost, vysoká spolehlivost, snadná instalace a bezúdržbový provoz. Naopak největší nevýhodou je především vysoká pořizovací cena kvůli náročnému technologickému výrobnímu procesu.

Uvedená práce se skládá celkem ze tří hlavních částí – dvou teoretických a jedné simulační. V první části jsou popisovány izolátorové konstrukce. Zmíněny jsou typy základních konstrukcí izolátorů a jejich rozdělení podle použitého materiálu nebo typu uchycení. V druhé části je popisována problematika kompozitních izolačních konstrukcí. Rozvojem kompozitních izolačních materiálů vyztužených skelnými vlákny lze navrhovat a vytvářet složitější struktury izolátorů. Těchto výhod je využito při návrhu kompozitních izolačních konstrukcí. Ve třetí části jsou vytvořeny počítačové modely, jež simulují elektrická a mechanická namáhání, která se vyskytují na elektrických vedeních v běžném provozním stavu.

Seznam symbolů a zkratek

CAD.....	Počítačem podporované projektování
div	Divergence (diferenciální operátor)
DXF	Univerzální CAD formát umožňující výměnu dat
EPDM.....	Ethylene Propylene Diene Monomer
GFRP	Polymerní kompozitní tyč vyztužená skleněnými vlákny
grad.....	Gradient (diferenciální operátor)
HTV SiR.....	Vysokoteplotně vulkanizovaný silikonový kaučuk
PTFE.....	Polytetrafluoroethylen (teflon)
SiR	Silikonový kaučuk
rot.....	Rotace (matematický operátor)
NN	Nízké napětí
UVN	Ultra vysoké napětí
UV	Ultrafialové záření
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN.....	Zvlášť vysoké napětí

Seznam použitých veličin

Elektrické veličiny

A	Magnetický vektorový potenciál ($\text{Wb}\cdot\text{m}^{-1}$)
B	Magnetická indukce (T)
D	Elektrická indukce ($\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$)
E	Intenzita elektrického pole ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)
H	Intenzita magnetického pole ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
I	Elektrický proud (A)
J	Proudová hustota ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)
U	Elektrické napětí (V)
γ	Měrná elektrická vodivost ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
ε	Permitivita prostředí ($\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$)
μ	Permeabilita prostředí ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
ρ	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
φ	Elektrický potenciál (V)
ω	Úhlová rychlost ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

Mechanické veličiny

E	Modul pružnosti v tahu (Pa)
G	Modul pružnosti ve smyku (Pa)
FOS	Koeficient (součinitel) bezpečnosti (-)
U_{RES}	Výsledné posunutí (mm)
μ	Poissonova konstanta (-)
ρ	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
σ_{ekv}	Ekvivalentní napětí von Mises (Pa)
σ_k	Mez kluzu (Pa)
σ_t	Pevnost v tahu (Pa)
σ_{tl}	Pevnost v tlaku (Pa)

1 Izolátorové konstrukce venkovních vedení

Izolátory venkovních vedení slouží k mechanickému propojení a upevnění vodičů nadzemních vedení (silové části pod napětím) se stožárovými konstrukcemi (uzemněné části), a zároveň k elektrickému oddělení těchto prvků. [1] Izolátory jsou upevněny pomocí koncových kovových armatur k nosné stožárové konstrukci, tzv. konzolové konstrukci, která navazuje na samostatný stožár (dřík). [2] Běžně používanými materiály na zhotovení izolátorů jsou zejména keramika (porcelán), tvrzené sklo a kompozitní materiály. Izolátory vyrobené z těchto izolačních materiálů se vyskytují na všech napěťových hladinách.

1.1 Navrhování izolátorových konstrukcí

Při návrhu izolátorů jsou kladeny vysoké nároky z hlediska dlouhodobé spolehlivosti a finanční náročnosti celého zařízení od počátku výzkumu, procesu výroby, až po provoz zařízení po několik desítek let. [3] Návrh izolátorové konstrukce musí splňovat mechanické požadavky, např. na specifické mechanické zatížení, návrhovou únosnost v mezních stavech nebo při jednostranném uvolnění tahu vodiče. Izolační konstrukční prvky je nutné dimenzovat na mechanická a elektrická namáhání, která musí splnit typové zkoušky podle daných norem. Mechanická namáhání jsou při běžném provozním (zatěžovacím) stavu způsobena vlastní vahou a tahem samotných zavěšených vodičů elektrického vedení. Tyto konstrukce musejí odolávat dynamickým silám při zkratech a přídatným silám způsobených okolními klimatickými vlivy, zejména ve větrných, námrazových a znečištěných oblastech. U konstrukcí vytvořených z polymerních nebo kompozitních materiálů je nutné navíc počítat s možnou degradací materiálu způsobenou UV zářením pocházejícího ze slunečních paprsků nebo korónového výboje. Z článku [4] lze vyčíst, že experimentálním měřením byl zjištěn zjevný degradační vliv UV záření na polymerní izolátor za určitých povětrnostních podmínek. Elektrická namáhání jsou způsobena různými přechodnými atmosférickými a spínacími přepětími. Vlivem těchto přepětí může docházet k přeskokům na povrchu izolátoru či průrazům jeho izolace. Elektrickými požadavky při návrhu izolátorů jsou výdržná napětí (při síťovém kmitočtu, při atmosférickém a spínacím impulzu), zkratová odolnost při obloukovém zkratu, elektrická pevnost a přeskoková a průrazná napětí. [5]

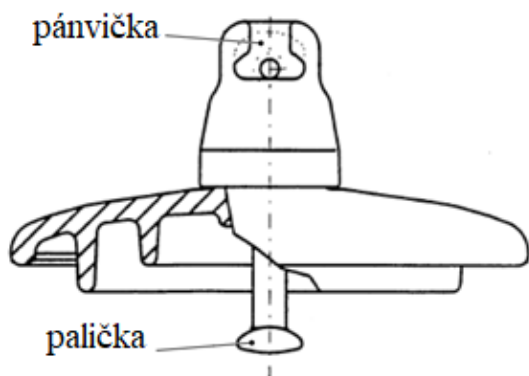
1.2 Typy izolátorů podle typu uchycení

1.2.1 Podpěrné izolátory

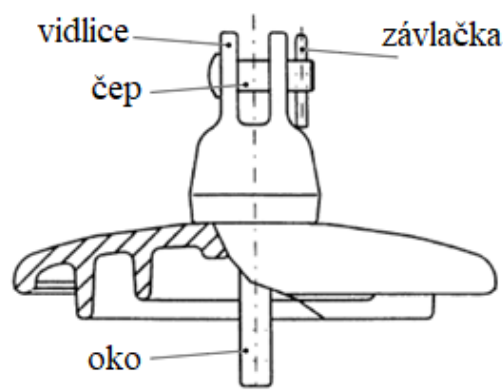
Podpěrné izolátory (anglicky *rigid insulators*) se převážně používají na venkovních vedeních distribuční soustavy od napět'ových hladin NN až po VVN. Mohou být v provedení roubíková podpěrka (ang. *pin-type insulator*), plnojádrová linková podpěrka pro vedení (ang. *line-post insulator*) nebo staniční podpěrka (ang. *post insulator*). Roubíková podpěrka slouží jako vertikální pevná podpěra pro vodiče venkovních vedení do 33 kV. Plnojádrová linková podpěrka pro vedení je podobná roubíkové podpěrce, ale má větší počet stříšek a používá se pro vyšší napět'ové hladiny VN a VVN. Staniční podpěrka slouží jako horizontální i vertikální pevná podpěra pro elektrická vedení v elektrických stanicích. [6] Podpěrné izolátory pro venkovní vedení jsou obecně namáhány tlakem, tahem a ohybem.

1.2.2 Závěsné (tahové) izolátory

Závěsné izolátory (ang. *string insulator units*) se dělí na talířové nebo tyčové izolátory elektrických vedení od napět'ových hladin VN až po ZVN. Koncové armatury závěsných izolátorů slouží jako pohyblivá spojení k dalším izolátorům podobného typu nebo spojovacím armaturám. Pohyblivé spojení z kovového materiálu je tvořeno dvěma typy: spojení typu palička a pánvička, viz Obr. 1.1, [7] nebo spojení typu vidlice a oko, viz Obr. 1.2, [8] pomocí spojovacího čepu se závlačkou.



Obr. 1.1: Spojení typu palička a pánvička – upraveno [9]



Obr. 1.2: Spojení typu vidlice a oko – upraveno [9]

1.3 Základní konstrukce izolátorů

1.3.1 Roubíková podpěrka

Roubíková podpěrka (ang. *pin insulator*) venkovního vedení je tvořena izolační částí (tzv. dříkem), z které vyčnívají stříšky proti dešť'ové vodě. Výrobním materiálem může být

keramika, sklo nebo polymer. Skrze vnitřní část dřívku prochází tzv. roubík z galvanizované oceli, jehož spodní část je pevně připevněna k stožárové konstrukci. Pracovní vodiče jsou uloženy a upevněny v drážce (viz Obr. 1.3) v horní části izolátoru. [6]



Obr. 1.3: Roubíková keramická podpěrka – převzato [10]

Konstrukce z jednoho kusu je technologicky náročná vzhledem k přibývající tloušťce izolačního materiálu a počtu stříšek. Pro vyšší napětí se vyrábí ze dvou nebo tří vzájemně spojených kusů pomocí speciálního cementu. [6]

1.3.2 Talířové izolátory

Talířové izolátory (ang. *cap and pin insulators*) se skládají z jednotlivých disků/talířů z keramického nebo skleněného materiálu. Disky jsou nejčastěji spojeny pohyblivými spojeními, viz Podkapitola 1.2.2, kterými lze tvořit izolátorový řetězec (ang. *insulator string*). Počet jednotlivých talířů v jednom řetězci je odvozen od napěťové hladiny, na které bude izolátor použit. Pro vyšší napěťové hladiny lze jednotlivé řetězce spojovat do tzv. izolátorových závěsů (ang. *insulator set*), které jsou navíc opatřeny ochranným jiskřištěm proti atmosférickým přepětím. [11]

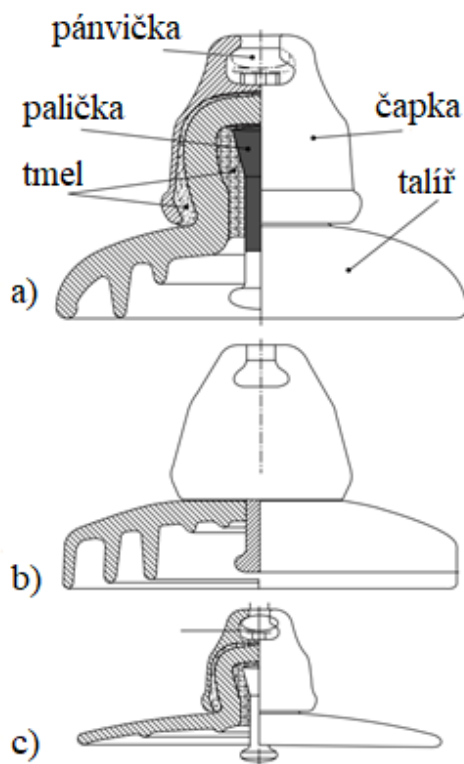


Obr. 1.4: Izolátorový řetězec – převzato [12]



Obr. 1.5: Izolátorový závěs – převzato [12]

Sklonem stříšek vyšším než je úhel 5° a glazurováním povrchu lze docílit tzv. samočisticího efektu při silnějších dešťových přeháňkách. Spodní strana disku může být buď perforována (viz Obr. 1.6) kvůli zvýšení povrchové vzdálenosti v oblastech s vyšším výskytem mlh, nebo naopak opatřena hladkým povrchem kvůli zlepšení aerodynamiky ve větrných nebo pouštních oblastech. [13]

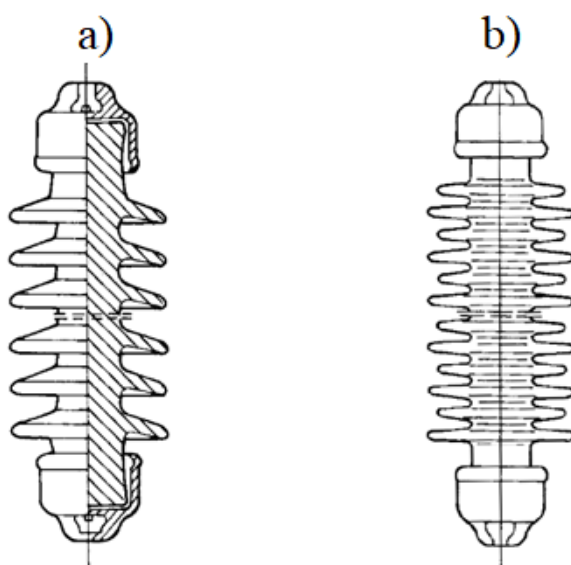


Obr. 1.6: Typy profilů – a) standardní talíř, b) mlhový talíř, c) aerodynamický talíř – upraveno [14]

Výhodou talířových izolátorů je velmi vysoká mechanická pevnost v tahu, kterou jim propůjčuje kónický tvar paličky zapuštěné do čapky pomocí cementu, a snadná detekce porušení izolátorových disků. V případě poškození jednoho či více disků je izolátorový řetězec schopen odolávat plnému zatížení v tahu, a přičemž je zachována jeho plná provozuschopnost. Venkovní vedení tak není třeba vypínat při každém dílčím poškození. Tudiž odpadá nutnost okamžité výměny poškozeného izolátoru, což vede k úspoře provozních a údržbových nákladů. [13] Hlavní nevýhodou talířových izolátorů jsou kovová uchycení jednotlivých disků podél řetězce, která snižují povrchový odpor v oblasti spojení paličky s pánvičkou. Proto je nutné zařadit do řetězce více disků o menším průměru a navýšit tak axiální délku. [14]

1.3.3 Tyčové izolátory

Tyčové izolátory (ang. *long rod insulators*) jsou namáhány převážně v tahu. Podobají se plnojádrovým válcovým staničním podpěrkám, avšak obě strany izolátoru jsou zakončeny spojením typu palička a pánvička, viz Podkapitola 1.2.2. Vnitřní část (dřík) tyčového izolátoru je válcového tvaru a tato část je společně se stříškami vyrobena z jednoho kusu izolačního materiálu (porcelán, polymerní nebo kompozitní materiál). Tvar stříšek může být stejný po celé délce (viz Obr. 1.7), nebo se tvary mohou střídavě měnit (viz Obr. 1.7). Tyčové izolátory lze, stejně jako talířové izolátory, spojovat do izolátorových řetězců či závěsů dle napěťové hladiny. [13]



Obr. 1.7: Tyčový izolátor – a) stejné stříšky, b) střídavé stříšky – upraveno [13]

Nevýhodou keramických tyčových izolátorů je sklon k úplné destrukci způsobené mechanickým namáháním izolátoru v tahu. Dodávka elektrické energie by tak musela být přerušena a postižený izolátor vyměněn za nový. Proto je v dnešní době používán zejména kompozitní tyčový izolátor, jehož jádro je tvořeno skleněnými vlákny vzájemně spojenými pryskyřicí. Tento typ izolátoru je velmi lehký a dobře odolává namáhání v tahu. [14]

1.4 Rozdělení izolátorů podle použitých izolačních materiálů

V dnešní době dochází k vývoji nových izolačních materiálů s mnohem lepšími vlastnostmi. Do popředí se dostávají izolační konstrukční prvky vytvořené z polymerního materiálu (jeden izolační organický materiál) nebo z kompozitního materiálu (dva a více izolačních materiálů). [15] Tyto elektroizolační materiály vynikají svojí vysokou

elektrickou, mechanickou a chemickou odolností, nízkou hmotností a také nižší výrobní cenou.

1.4.1 Keramické izolátory

Keramické (porcelánové) izolátory jsou využívány v elektroenergetickém průmyslu po mnoho let vzhledem ke stálosti svých vlastností při dlouholetém provozu. Mezi tyto vlastnosti patří vysoká elektrická pevnost, dobrá mechanická pevnost v tahu i tlaku, tepelná i chemická stálost a odolnost proti účinkům svodových proudů za určitých provozních podmínek. Hlavní složkou porcelánu jsou převážně hlinitokřemičitany, polykrystalické křemičitany anebo jednoduché sloučeniny různých oxidů, které tvoří specifická směs kaolínu (jíl), živce a křemene. [16]



Obr. 1.8: Keramický tyčový izolátor – převzato [17]

Nejčastěji používaným materiálem jsou alkalické hlinitokřemičitany se skupinovým označením C 100 v normě ČSN 60672-1. [18] V této skupině jsou jednotlivé materiály rozděleny do podskupin podle jejich složení, charakteristických vlastností a použití. Keramický izolační materiál prochází tzv. mokrým procesem, kdy vznikne pastovitý materiál smícháním směsi společně s vodou. Následně je tento materiál vlisován tlakem do formy navrhovaného izolátoru o požadovaném tvaru a rozměrech. Vytvarovaný izolátor má však vysokou pórovitost a hydrofilnost povrchu, která by mohla značně ovlivnit dielektrické vlastnosti působením vlhkosti. Glazurováním povrchu dochází k zacelení těchto mezer a dutin v daném materiálu, což zlepšuje také mechanické vlastnosti. Izolátor je poté vypalován teplotou přesahující 1200 °C. V konečné ochlazovací fázi jsou připevněny koncové kovové armatury sloužící k instalaci izolátoru na stožárové konstrukce. [19] Výhodou keramických

izolátorů je jejich vysoká izolační schopnost a vysoká pevnost v tahu i tlaku. Hlavními nevýhodami jsou vysoká hmotnost, křehkost materiálu a vyšší provozní náklady. [20]

1.4.2 Skleněné izolátory

Skleněné izolátory se vyrábějí pouze ve formě talířových izolátorů (viz Obr. 1.9). Mají podobné elektrické a mechanické vlastnosti jako izolátory z keramických izolačních materiálů. Výhodou je jejich delší životnost, protože v materiálu nemohou vznikat mikrotrhliny. [21] Skleněné izolační materiály tvoří směs oxidů, které se nejprve vytavují a následně prudce ochlazují bez vzniku mikrotrhlin uvnitř materiálu. Po vypálení mají skleněné izolátory hladký povrch a není třeba je glazurovat. Nejpoužívanějšími materiály jsou tvrzená skla alkalicko-vápenato-křemičitá se skupinovým označením G 100, borito-křemičitá s označením G 200 nebo hlinito-vápenato-křemičitá s označením G 400. Dalším možným materiálem je sklokeramický materiál s označením GC 100, který vzniká tavením skleněného prášku. Poslední možností jsou slídové materiály s označením GM 100. [18]

Skleněné a porcelánové izolátory špatně odolávají vlhkosti, která kondenzuje na jejich povrchu, a povrchovým usazeninám v silně znečištěných oblastech. Nečistoty tvoří např. prachové částice z povrchových uhelných dolů nebo mořská sůl, která se může rozpouštět ve vodě. Vzniklá slabě koncentrovaná kyselina funguje jako elektrolyt. Elektrická pevnost izolátoru může být elektrolytem snižována a vytváří se tak elektricky vodivá cesta, přes kterou se uzavírají povrchové svodové proudy. Snižováním povrchového odporu se zvyšuje velikost svodových proudů, která roste lineárně s přiloženým napětím. Pokud velikost svodového proudu dosáhne určité kritické hodnoty, dochází k přeskoku na izolátoru. K degradování izolátoru může docházet i při menších hodnotách svodového proudu, než je kritická hodnota pro přeskok. [14][22]



Obr. 1.9: Skleněný talířový izolátor – převzato [23]

Znečištěné izolátory je nutné pravidelně čistit až několikrát do roka podle stupně znečištění prostředí. Čištění se provádí pouze ve vypnutém stavu kvůli zachování bezpečnosti lidského zdraví. Dochází ke značnému navýšení finančních nákladů spojených s penalizacemi nedodání elektrické energie. Údržba izolátorů není možná ve špatně přístupných oblastech. [24] Řešením je použití tenké vrstvy RTV silikonového kaučuku na povrchu vysokonapěťového izolátoru (ang. *silicone room temperature vulcanizing high voltage insulator coating*). [24] Izolátory opatřené touto ochrannou vrstvou není třeba čistit. Dochází k tzv. samočisticímu efektu, kdy případný silnější déšť nečistoty bez problémů smyje. V rámci experimentu na malajsijské univerzitě Putra Malaysia bylo zjištěno, že aplikováním RTV silikonu na povrch izolátoru dojde k výraznému navýšení přeskokového napětí U_{50} (napětí, při kterém s 50% pravděpodobností dojde k přeskoku [25]). Toto napětí se zvýšilo až o 50 % v znečištěném prostředí, 20 % ve vlhkém prostředí a 5 % v běžném suchém prostředí než u izolátoru bez této povrchové úpravy. [26]

1.4.3 Kompozitní izolátory

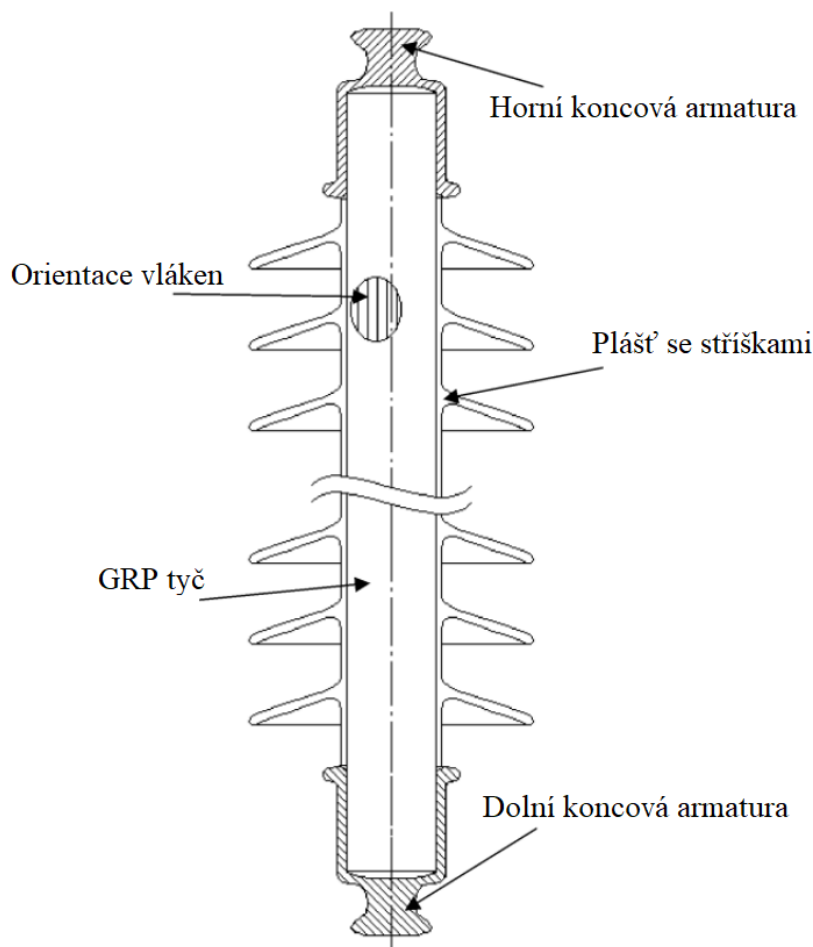
Moderní kompozitní materiály umožnily vytvoření izolátorů s vynikajícími vlastnostmi. Kompozitní izolátory (ang. *polymer composite insulators*) se staly konstrukčně menšími a

lehčími, díky čemuž dochází k úsporám výrobních nákladů. Polymerní materiály propůjčily izolátoru skvělé hydrofobní vlastnosti a odolnost proti poškození a znečištění, což opět snížilo náklady na provoz a údržbu. [27]



Obr. 1.10: Kompozitní izolátory – převzato [28]

Konstrukce kompozitních izolátorů je tvořena z vnitřní a vnější izolační části. Vnitřní izolační část tvoří pevné tyčové jádro, tj. polymerní kompozitní tyč vyztužená skleněnými vlákny (ang. *glass fibre reinforced polymer composite rod*), která nese veškeré mechanické zatížení v tahu, tlaku či ohybu. [29] Kompozitní GRP tyč je vyráběna tažením za tepla, tzv. pultruzací. V tomto procesu jsou skleněná vlákna, která jsou orientována souhlasně v axiálním směru, pojena epoxidovou nebo fenolovou pryskyřicí. [30] Tento prefabrikát následně prochází skrze tvarovací trubici za přítomnosti tepla, které slouží k vytvrzení pryskyřice a zpevnění celé tyče. [31] Na obou koncích kompozitní tyče jsou připevněny koncové kovové armatury, kterými lze izolátor nainstalovat horní částí ke stožárové konstrukci a dolní částí k pracovním vodičům



Obr. 1.11: Kompozitní tyčový izolátor – upraveno [29]

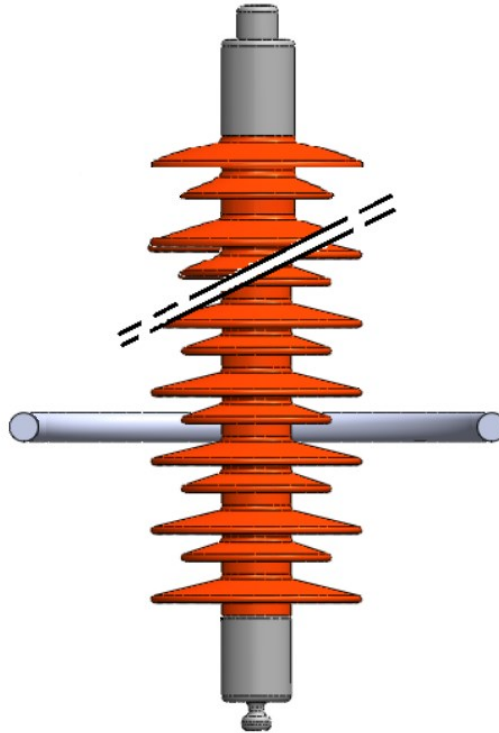
Vnější izolační část kompozitního izolátoru tvoří polymerní plášť se stříškami, který chrání nosnou GRP kompozitní tyč. Zásadní je výběr vhodného polymerního materiálu, který ovlivňuje elektrické vlastnosti celého izolátoru. Nejčastěji používanými materiály jsou silikonové kaučuky SiR (ang. *Silicone Rubber*), vysokoteplotně vulkanizované silikonové kaučuky HTV SiR (ang. *High Temperature Vulcanized Silicone Rubber*), EPM kaučuky (ang. *Ethylene and Propylene Monomer*), EPDM kaučuky (ang. *Ethylene Propylene Diene Monomer*) nebo teflonové PTFE polymery (ang. *Polytetrafluoroethylene*). [27] Ačkoliv izolátory ze SiR kaučuku mají vynikající elektrické vlastnosti v oblastech s větším výskytem vlhkosti nebo znečištění, jejich nevýhodou jsou vyšší náklady a menší odolnost vůči degradaci povrchu izolátoru a tvorbě vodivých stop na povrchu materiálu. EPDM kaučuky mají naopak horší odolnost vůči povětrnostním vlivům než SiR kaučuky. Kombinací ideálního poměru polymerů SiR a EPDM lze získat materiál, který kombinuje jejich mechanické a elektrické vlastnosti. Zvýšením poměru EPDM kaučuku se materiál stává dielektricky odolnějším vůči elektrickému poli, zvýšením poměru SiR kaučuku naopak odolnějším vůči vlivům počasí, zejména teple, vlhkosti, znečištění a UV záření. [32]

Vzhledem ke svým vynikajícím vlastnostem se kompozitní izolátory běžně používají na nejvyšších napěťových hladinách VVN/ZVN. Koncové armatury na silové straně jsou nejvíce namáhanými místy. Vlivem nízké permitivity materiálu a tvaru konstrukce je v těchto místech nejvyšší elektrický potenciál, který však od tohoto místa směrem k izolátoru klesá. [33] Vytváří se tak nerovnoměrně rozložené elektrické pole. Vysoké hodnoty intenzity elektrického pole mají zásadní vliv na degradaci izolačních materiálů a jejich životnost. V kritických místech (zejména na rozhraní izolačního obalu a jádra izolátoru) mohou vznikat různá lokální poškození materiálu (trhliny, lomy apod.) vlivem působení vznikajících vnitřních výbojů. Může také dojít k vyvolání korónového výboje po překročení určité velikosti počátečního napětí na povrchu kovových materiálů poblíž pracovních vodičů. Výboj se může přenést do výše uvedených oblastí a způsobovat další degradaci izolačních materiálů. Koróna dále způsobuje rušivé účinky ve vysokofrekvenčních oblastech.

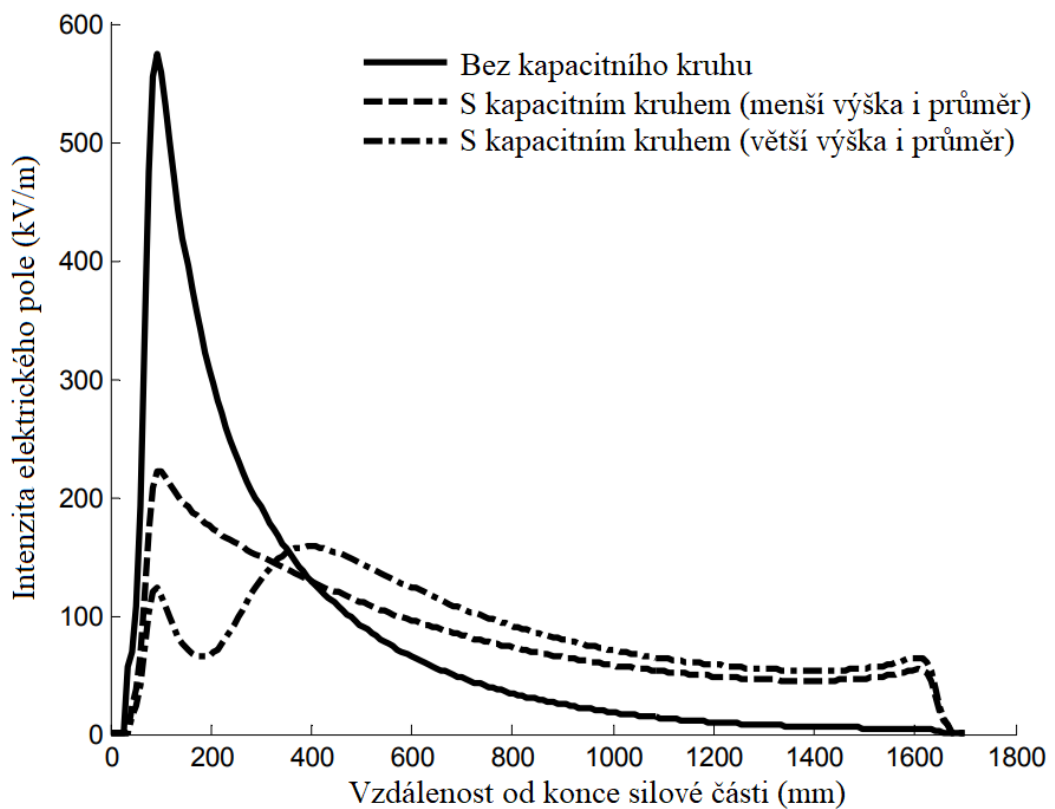
Kapacitní kruhy slouží jako korónové stínění a linearizují elektrické pole podél izolátoru (viz Obr. 1.12). [34] Intenzita elektrického pole se na straně silové části snižuje pod kritickou hodnotu a mírně zvyšuje na straně uzemněné části. Článek [35] se zabývá simulováním působení intenzit elektrických polí na kompozitní izolátory. Na základě výsledků simulací byly stanoveny a doporučeny kritické hodnoty pro suché a neznečištěné kompozitní izolátory (dále i pro kompozitní izolační konstrukce uvedené v další kapitole). Efektivní hodnoty intenzit elektrického pole by neměly přesahovat tyto hodnoty:

- $4,5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ na povrchu stříšek izolátoru a na přechodu mezi koncovou armaturou a dalším izolačním materiálem (měřeno ve vzdálenosti 0,5 mm od povrchu izolačního obalu)
- $30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ uvnitř jádra a stříšek izolátoru
- $17 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ na povrchu kovových armatur a kapacitních kruhů

Rozložení intenzity elektrického pole bez použití a s použitím kapacitních kruhů v závislosti na vzdálenosti od konce silové části lze vidět na grafu (viz Obr. 1.13) Počet kruhů se zpravidla odvíjí dle napěťové hladiny – na napěťové hladině VVN se používá jeden kruh na silové části a napěťové hladině ZVN dva kruhy na obou koncích.



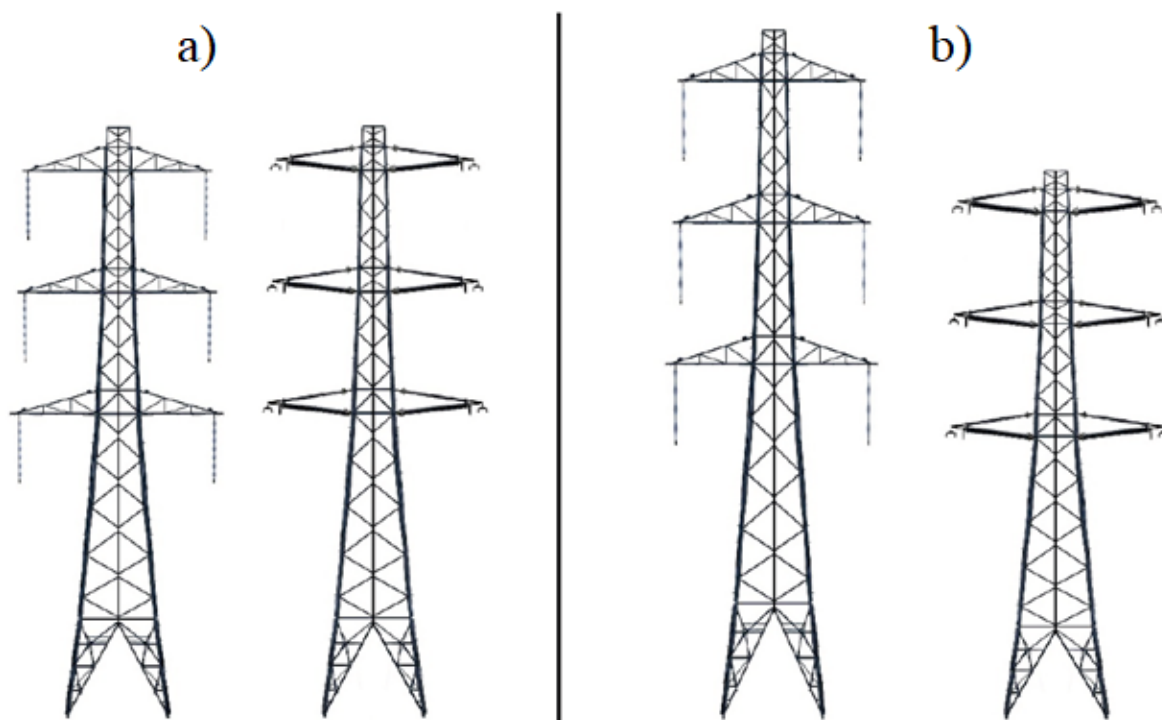
Obr. 1.12: Kompozitní izolátor s kapacitním kruhem – upraveno [34]



Obr. 1.13: Graf závislosti intenzity elektrického pole na vzdálenosti od konce silové části –upraveno [34]

2 Kompozitní izolační konstrukce

Určitou moderní alternativou jsou izolační konstrukce (ang. *insulating cross-arms*), které mohou být zhotovené z kompozitních materiálů, tzv. kompozitní izolační konstrukce (ang. *composite insulating cross-arms*). Tyto topologie slouží obecně jako náhrada ocelových příhradových konzolí s izolátory při modernizaci vedení, aniž by bylo třeba výrazně upravovat samotnou konstrukci stožáru. V případě výstavby nového vedení s izolačními konstrukcemi lze dosáhnout menší výšky, šířky i hmotnosti stožáru při zachování izolačních vzdáleností (viz Obr. 2.1). Menší rozměry stožáru zároveň snižují jeho ohybový moment vůči základům, které lze tak stavět levněji a méně robustně. [36] Menší mezifázové vzdálenosti dále snižují emise elektromagnetického pole. Výhodami těchto konstrukcí jsou elektrická a mechanická odolnost, úspora použitých materiálů, zrychlení doby výstavby a dlouhá životnost celého systému. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena odvíjející se od složitosti výrobního procesu.



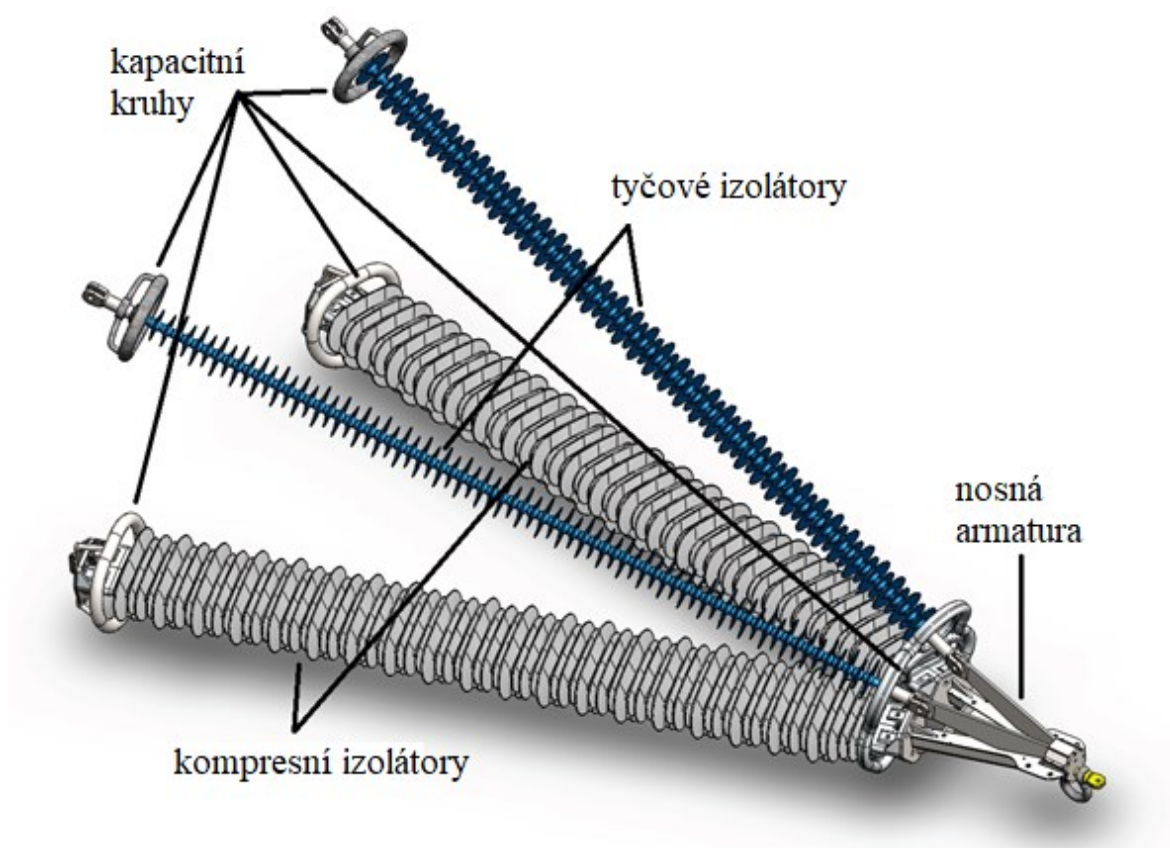
Obr. 2.1: Izolační konstrukce 400 kV – a) při modernizaci, b) nové vedení – upraveno [36]

2.1 Kompozitní izolační konstrukce VVN

2.1.1 110 kV a 400 kV konstrukce

Do současné doby byly vyvinuty a úspěšně použity izolační konstrukce na napěťových hladinách 110 kV a 400 kV. Na univerzitě v anglickém Manchesteru byla vyvinuta speciální izolační konstrukce jehlanového tvaru, která byla navržena na tyto napěťové hladiny. [36] Stěžejní částí byl ostrý test šesti izolačních konstrukcí na 132 kV elektrickém vedení ve Skotsku v roce 2013. Koncové armatury byly navíc opatřeny kapacitními kruhy speciálního „motýlovitého“ tvaru, které snížily elektrickou intenzitu na kritických místech armatury. Výsledky testu posloužily zároveň jako zdroj poznatků ke zlepšení stávající 132 kV konstrukce, ale také konstrukce na vyšší napěťové hladině 400 kV.

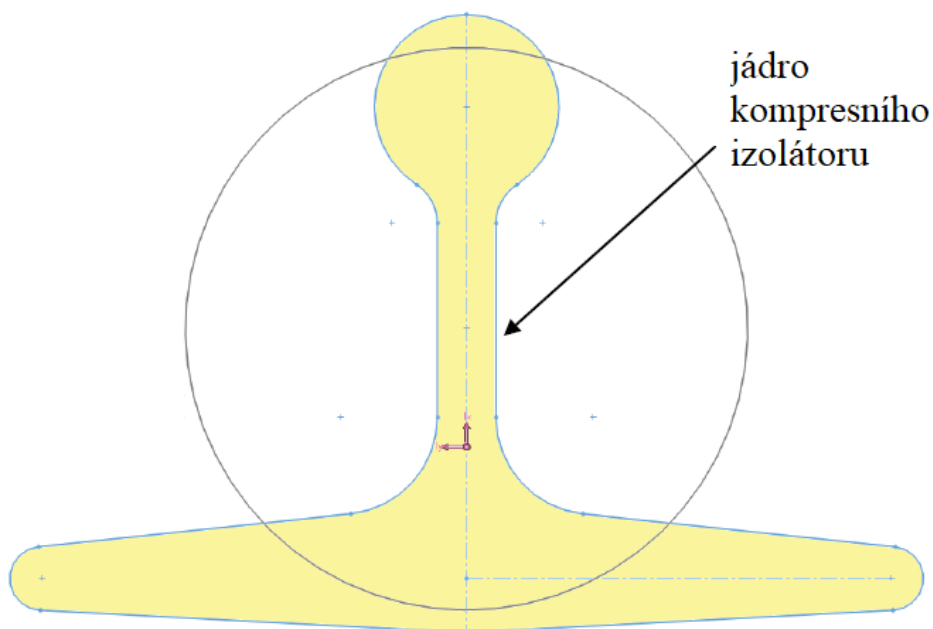
Jehlanová konstrukce (viz Obr. 2.2) je tvořena dvěma tyčovými izolátory odolávajícím tahovému zatížení, dvěma kompresními izolátory odolávajícím tlakovému a ohybovému zatížení, nosnou armaturou a kapacitními kruhy.



Obr. 2.2: Kompozitní izolační konstrukce 400 kV – upraveno [36]

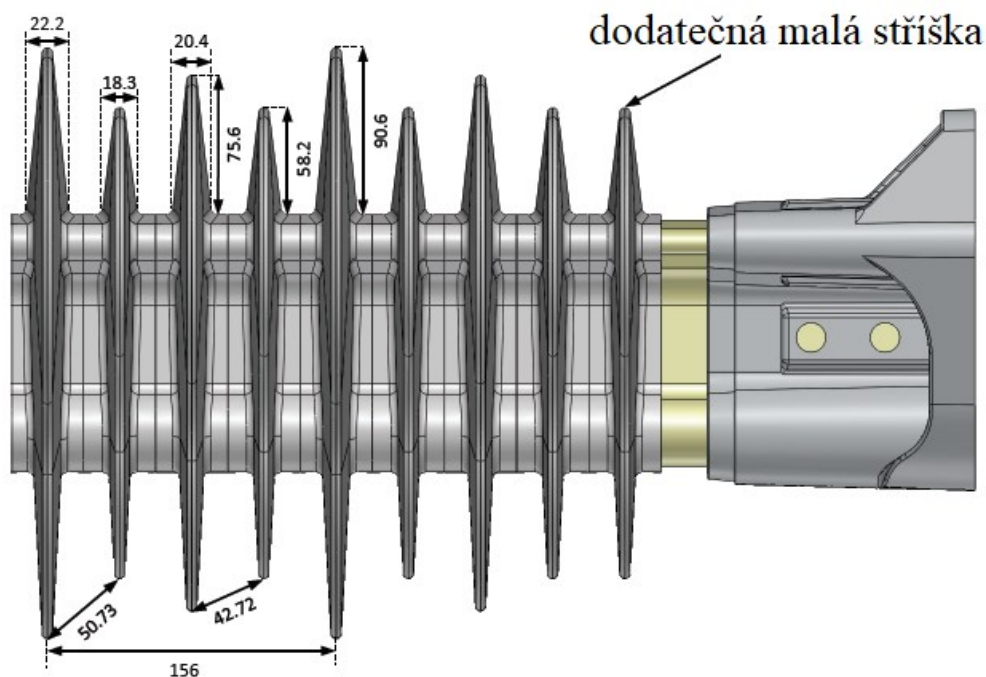
Klíčovou částí je kompresní izolátor, jehož kompozitní jádro je speciálně navrženo ve tvaru písmena „T“ (viz Obr. 2.3). V porovnání s klasickým kruhovým tvarem má však o

polovinu menší průřez při zachování stejného kvadratického momentu. Pomocí tohoto údaje lze předpokládat odpor prutů při jejich deformaci. [36] Vlivem redukování průřezu dochází k významné úspoře výrobního materiálu a snížení hmotnosti při zachování odolnosti vůči mechanickému namáhání.



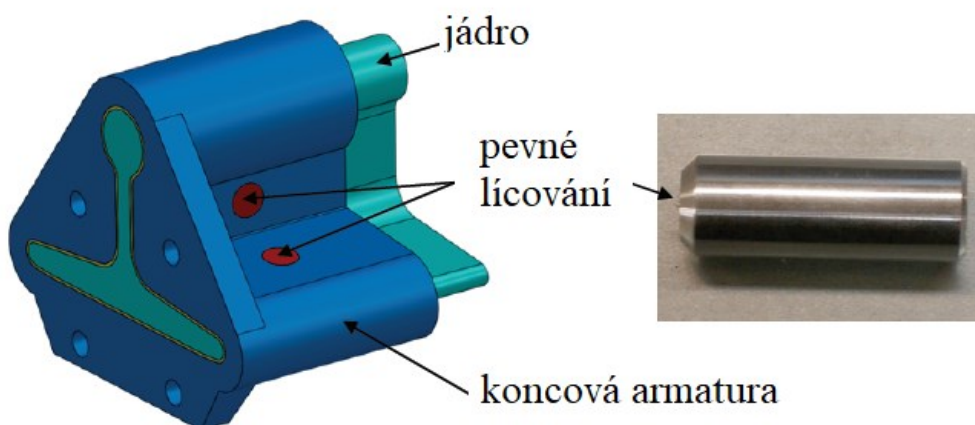
Obr. 2.3: Jádro kompresního izolátoru – upraveno [36]

Tvar izolačního obalu se stříškami je vyráběn většinou ze SiR silikonového kaučuku nebo EPDM kaučuku pomocí vstřikovacího lisu. Pro snadnější výrobní proces není obal vyráběn vcelku, ale je rozdělen na několik segmentů, které se pak v navazujících místech zatavují do sebe. Rozdílné velikosti a vzdálenosti jednotlivých stříšek zvyšují povrchovou i vzdušnou vzdálenost (viz Obr. 2.4). Ostré hrany jednotlivých stříšek jsou zaobleny z důvodu snížení pravděpodobnosti vzniku potenciálního korónového výboje. Nutným opatřením je použití přídavné malé stříšky na vysokonapětové straně izolátoru, aby nedocházelo k dotyku stříšek kompresních izolátorů. [36]



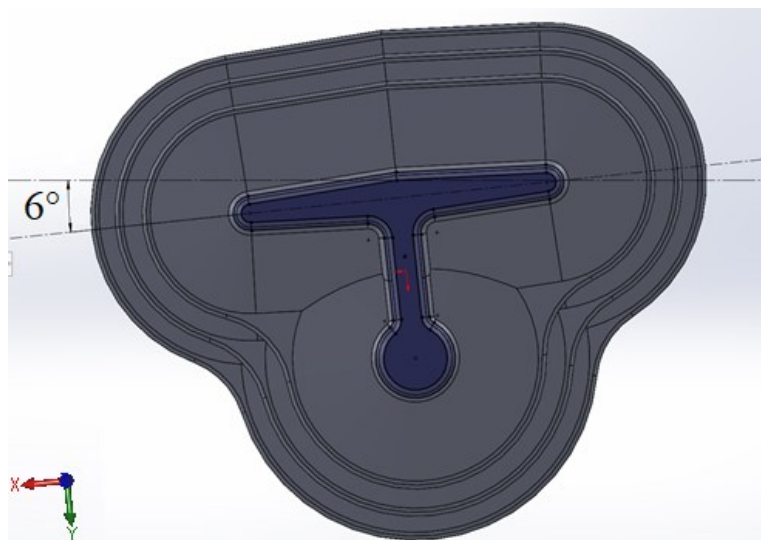
Obr. 2.4: Stříšky kompresního izolátoru – upraveno [36]

Vzhledem k unikátnímu tvaru jádra nelze připevnit kovové koncové armatury pomocí nalisování jako u klasických tyčových izolátorů. [36] Upevnění je provedeno tzv. pevným lícováním pomocí hřídele a díry v armatuře (viz Obr. 2.5). Princip tkví v použití malé hřídele o větším průměru, než je samotný průměr díry. Obě části jsou do sebe nalisovány za tepla nebo studena a dochází tak k vytvoření pevného spojení. [37]



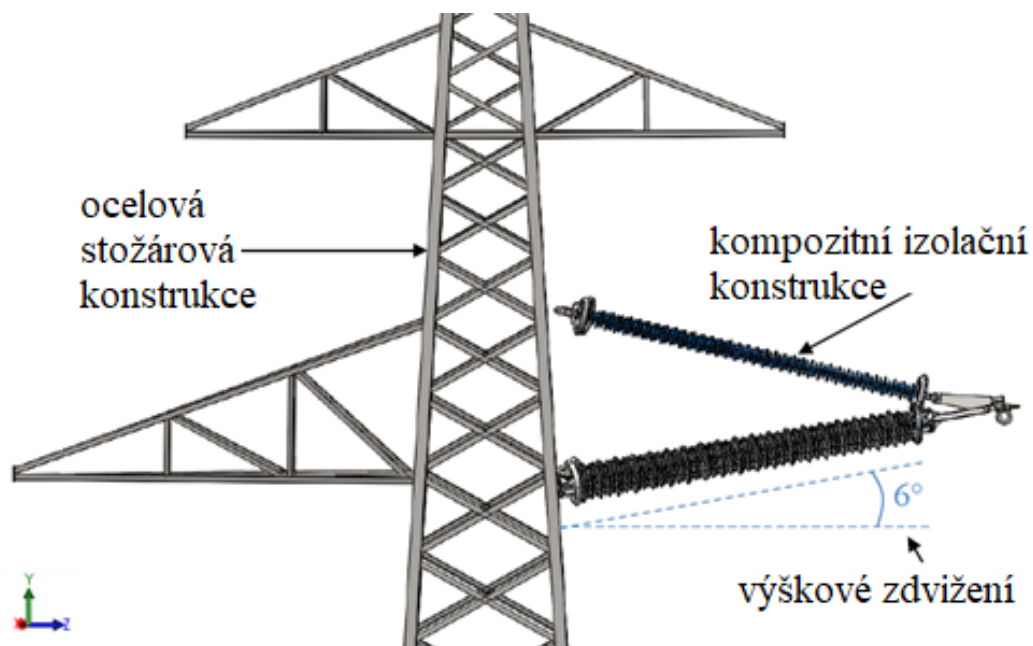
Obr. 2.5: Koncová armatura izolátoru – upraveno [36]

Na základě experimentu bylo zjištěno optimální natočení osy jádra kompresního izolátoru o 6° vůči horizontální ose X (viz Obr. 2.6). [36] Dostatečným sklonem bylo zajištěno stékání dešťové vody a zachován samočistící efekt.



Obr. 2.6: Natočení osy jádra kompresního izolátoru

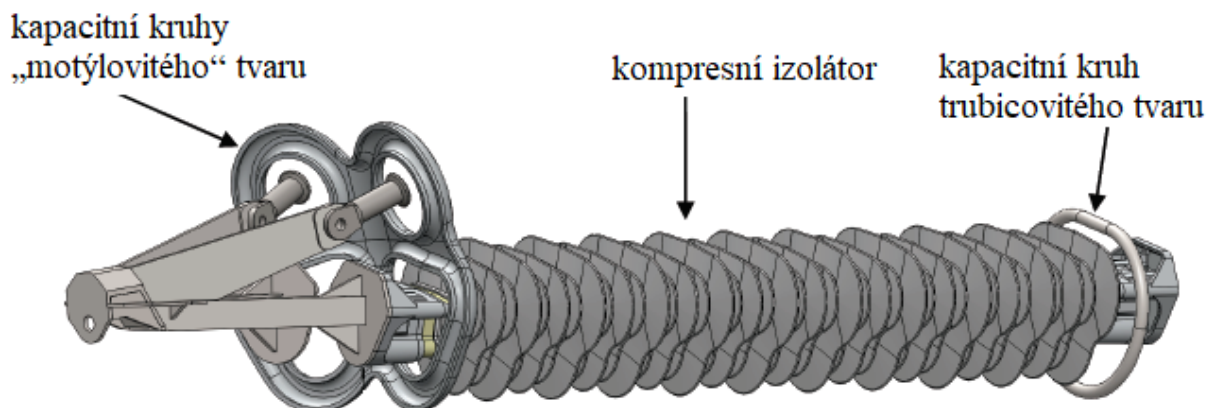
Celá izolační konstrukce je výškově zdvižena o 6° vůči horizontální ose Z (viz Obr. 2.7). [36] Důvody jsou stejné jako v předchozím případě natočení kompresního izolátoru. Celkový profil obsahuje příliš rovinných částí, v kterých by se mohla zadržovat voda nebo nečistoty.



Obr. 2.7: Výškové zdvižení izolační konstrukce – upraveno [36]

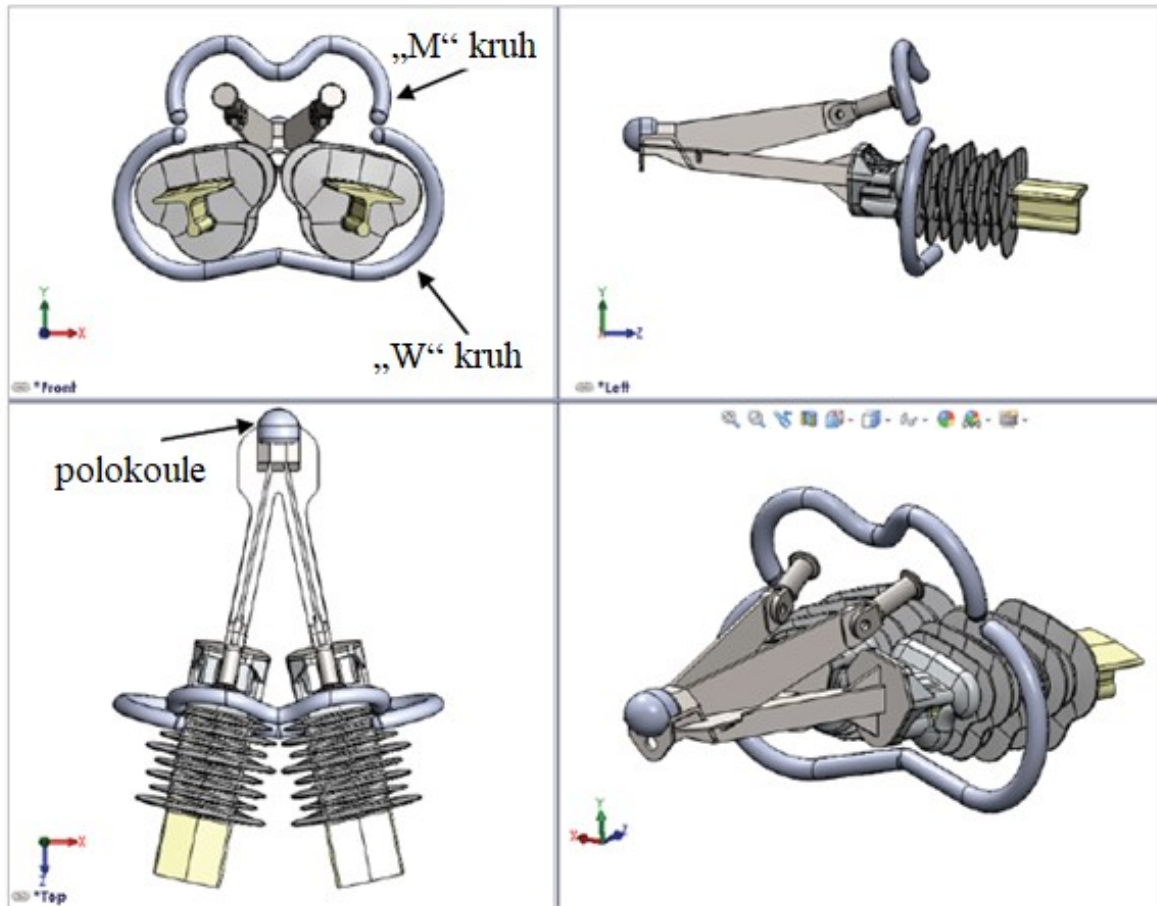
Aby izolační konstrukce vyhověla elektrickému namáhání, musela být opatřena kapacitními kruhy na silové i nízkonapěťové straně izolátoru. Speciální „motýlovitý“ tvar kruhů na vysokonapěťové straně spojuje ochrannou funkci vůči korónovému výboji pro všechny čtyři izolátory. Ze simulačních výsledků [36] bylo zjištěno, že se tento typ kapacitních kruhů nehodí na napěťovou hladinu 400 kV, ale je dostačující pro napěťovou

hladinu 110 kV, resp. 132 kV. Důvodem byl výskyt příliš vysoké hodnoty elektrické intenzity v oblasti tzv. trojného bodu a na samotné ochranné konstrukci. Trojný bod je místem, kde se střetávají tři materiály – hliníková koncová armatura, kompozitní jádro izolátoru a vzduch okolního prostředí. V oblasti trojného bodu byl určen limit intenzity elektrického pole, která nesmí přesáhnout hodnotu $3,5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ a na kovové nosné konstrukci $18 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.



Obr. 2.8: Kapacitní kruhy izolační konstrukce 110/132 kV – upraveno [36]

Pro kompozitní izolační konstrukci 400 kV byl navržen nový typ kapacitních kruhů na základě předchozích výsledků. Tvarem připomíná spojenou dvojici písmen „M-W“ a skládá se celkem ze dvou tvarovaných trubkových polokruhů (viz Obr. 2.9). [36] Špička nosné armatury byla opatřena kovovou koulí, která snižuje hodnotu elektrické intenzity pod $18 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ v oblasti poblíž vodiče. Nízké hodnoty intenzity nepřesahující $16 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ bylo dosaženo na samotné ochranné „M-W“ konstrukci. V oblasti trojného bodu bylo dosaženo maximální hodnoty intenzity kolem $3,3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.



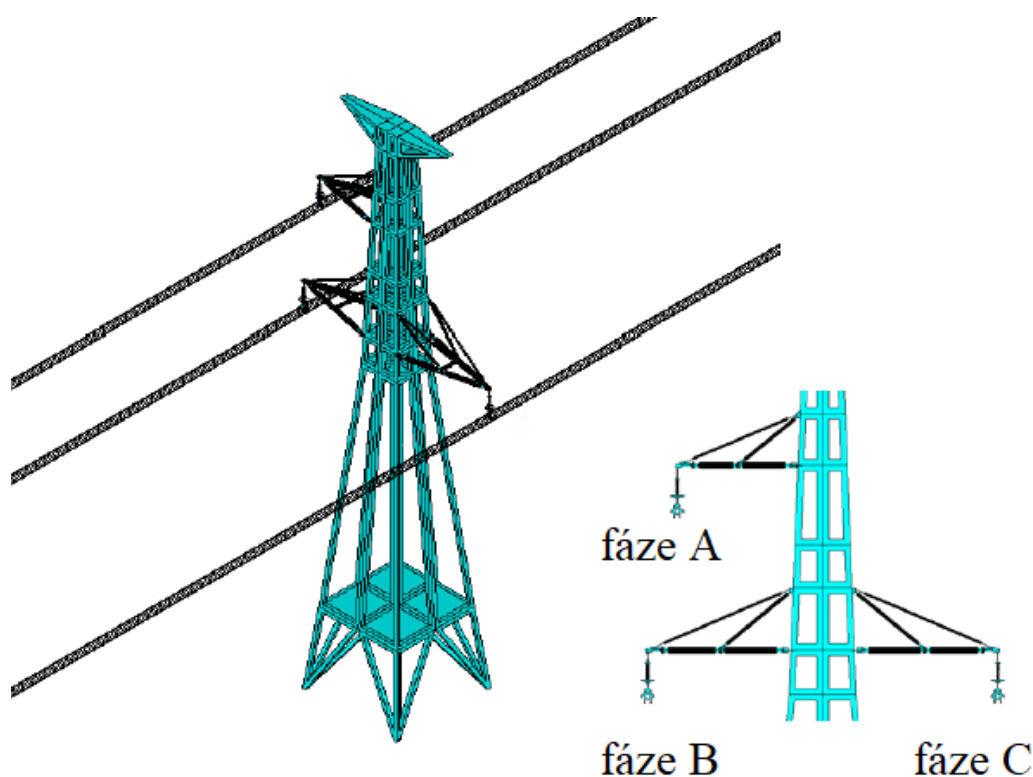
Obr. 2.9: Kapacitní „M-W“ kruhy izolační konstrukce 400 kV – upraveno [36]

Po úspěšných simulačních testech následovalo reálné vytvoření a sestavení dvou prototypů kompozitních izolačních konstrukcí pro napěťové hladiny 132 kV a 400 kV. Oba prototypy byly podrobeny typizovaným zkouškám především na elektrické namáhání. Protože v současné době neexistují mezinárodní zkušební standardy pro izolační konstrukce, bylo provedeno několik zkušebních metod z typizovaných zkoušek pro izolátory venkovních vedení. [36] Přestože nebyly provedeny všechny testy, kompozitní izolační konstrukce pro 110 (132) kV a 400 kV prokázaly svůj velký potenciál.

2.1.2 750 kV a 1000 kV konstrukce

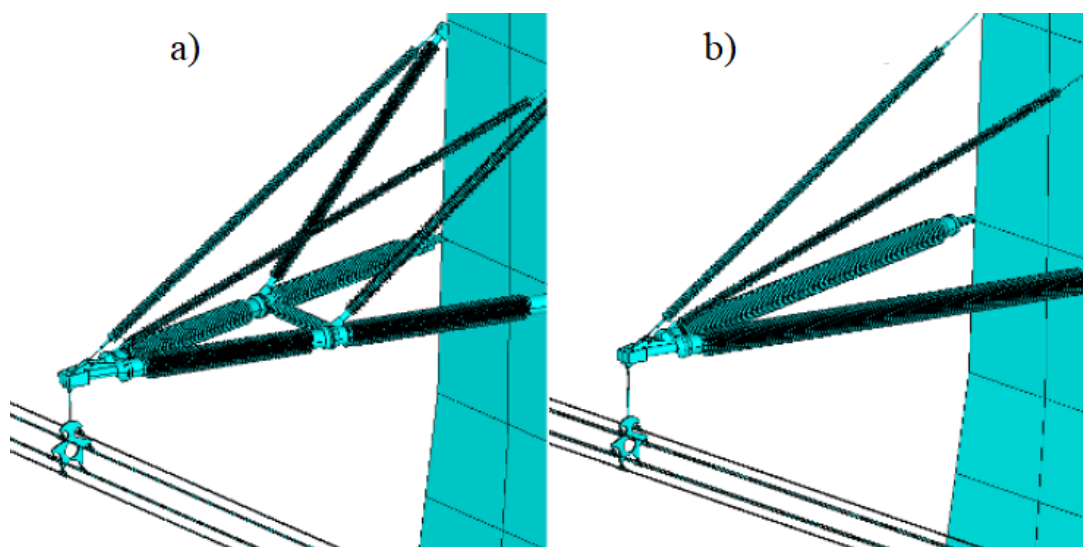
Nové návrhy izolačních konstrukcí pro ještě vyšší napětové hladiny byly zkoumány na čínských univerzitách v Xi'an Jiaotungu a Wuhanu, které prokázaly schopnost odolávat mechanickým a elektrickým silám na elektrických vedeních ZVN a UVN – napětové hladiny 750 kV a 1000 kV.

Kompozitní izolační konstrukce pro napětovou hladinu 750 kV byla vyvíjena a zkoumána na čínské univerzitě v Xi'an Jiaotungu. [38] Tvarem připomíná výše zmiňovanou 110 kV nebo 400 kV konstrukci; rozdíl je v použití válcových podpěrných izolátorů namísto kompresních izolátorů (viz Obr. 2.10).



Obr. 2.10: 3D model kompozitní izolační konstrukce 750 kV – upraveno [38]

V počáteční fázi návrhu byl zavěšen jeden izolátorový řetězec s kapacitním kruhem na konec nosné armatury. Řetězec prodlužuje izolační vzdálenost a zároveň nese šestisvazkový vodič. Podpěrný izolátor byl rozdělen na dva stejné segmenty především kvůli prodloužení izolační povrchové vzdálenosti. Obě části byly doplněny mezipřírubou z menšího podpěrného izolátoru, jehož konce byly opatřeny dalšími dvěma tahovými izolátory (viz Obr. 2.11).



Obr. 2.11: Kompozitní izolační konstrukce 750 kV – a) s mezipřírubou b) bez mezipřírubu – upraveno [38]

Na základě simulačního výpočtu bylo zjištěno, že izolátorový řetězec je nadměrně vystaven vysokému elektrickému potenciálu oproti ostatním částem konstrukce a byl tak v návrhu vynechán. Prodloužení délky řetězce nebo použití izolátorového závěsu se dvěma řetězci mělo malý vliv na rozložení elektrického potenciálu podél celé konstrukce. Vynecháním izolátorového řetězce se zvýšil elektrický potenciál na nosné koncové armatuře. V konečném návrhu byly koncové armatury izolátorů a nosná armatura opatřeny kapacitními kruhy. Porovnáním výsledků simulací kompozitní izolační konstrukce a stožárové konstrukce s izolátory bylo zjištěno lepší rozložení elektrického potenciálu v případě izolační konstrukce. Výsledky byly dále potvrzeny reálnými zkouškami na elektrické namáhání vykonané prostřednictvím Čínského institutu pro výzkum elektrické energie (CEPRI).

V článku [39] je uvedena kompozitní izolační konstrukce pro napěťovou hladinu 1000 kV, která byla vyvíjena na čínské univerzitě ve Wuhanu. Topologie se tvarově podobá kompozitní izolační konstrukci pro 750 kV, avšak celkové rozměry konstrukce jsou navýšeny. Podpěrné izolátory nejsou rozděleny mezipřírubou a nosná armatura byla přepracována a osazena mohutnějšími kapacitními kruhy. Správnost návrhu izolační konstrukce byla úspěšně ověřena a potvrzena simulačními i reálnými testy.

2.2 Kompozitní izolační konstrukce VN

Kompozitní izolační nebo stožárové konstrukce pro napěťové hladiny VN vyrábí jen několik firem na světě, například australská energetická společnost Ergon Energy Corporation [40] nebo americká společnost Shakespeare Valmont Composite Structures, Inc. [41] V naprosté většině se jedná o jednoduché kompozitní konstrukce typu lehká konzola s kompozitními izolátory pro venkovní vedení VN. Stožárovou konstrukcí může být dřevěný, ocelový, hliníkový, železo-betonový nebo kompozitní stožár. [42]



Obr. 2.12: Kompozitní izolační konstrukce VN – převzato [42]

3 Počítačové modely izolačních konstrukcí

V této části práce jsou vytvořeny 2D a 3D počítačové modely izolačních konstrukčních prvků z kompozitních materiálů, které jsou následně podrobeny 2D a 3D simulacím na elektrostatická a magnetická pole. Jako výchozí model byla použita 110 kV kompozitní izolační konstrukce na napěťové hladině VVN, viz disertační práce [36]. Byly vytvořeny vždy dvě varianty – s i bez kapacitních kruhů, které jsou klasického trubicovitého tvaru. Taktéž byl vytvořen model 400kV varianty kompozitní izolační konstrukce, který může být použit na stávající stožáry při modernizaci elektrického vedení z napěťové hladiny 220 kV na 400 kV nebo při výstavbě nového. Této 400kV izolační konstrukci byly nainstalovány speciální kapacitní kruhy ve tvaru „M-W“, viz Obr. 2.9.

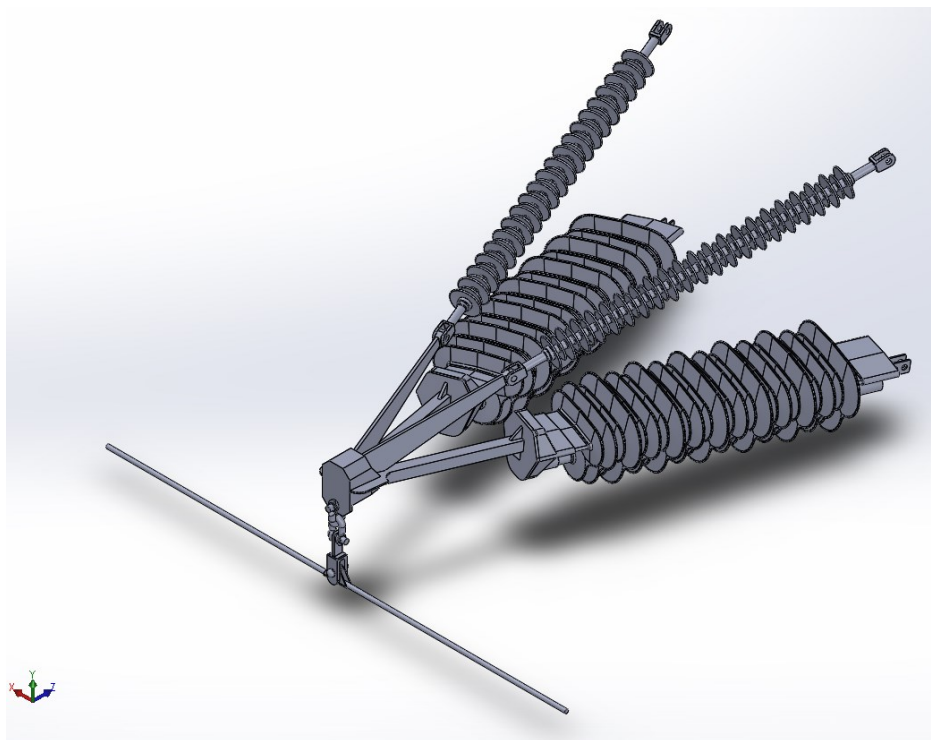
	110 kV konstrukce	400 kV konstrukce
Počet stříšek kompresního izolátoru	6 velkých (D = 386 mm)	18 velkých (D = 386 mm)
	6 středních (D = 356 mm)	18 středních (D = 356 mm)
	12 malých (D = 322 mm)	36 malých (D = 322 mm)
Počet stříšek tyčového izolátoru	21 velkých (D = 115 mm)	61 velkých (D = 115 mm)
	20 malých (D = 85 mm)	60 malých (D = 85 mm)
Rozteč mezi stříškami kompresního / tyčového izolátoru	156 / 51 mm	156 / 51 mm
Minimální vzdálenost mezi stříškami kompresního / tyčového izolátoru	39 / 23 mm	39 / 23 mm
Přeskoková vzdálenost kompresního izolátoru	936 mm	2808 mm
Přeskoková vzdálenost tyčového izolátoru	1085 mm	3245 mm
Povrchová vzdálenost kompresního izolátoru	11207 mm	33621 mm
Povrchová vzdálenost tyčového izolátoru	3891 mm	14717 mm
Délka GFRP kompresního jádra	1210,5 mm	3148 mm
Délka GFRP tyčového jádra	1151 mm	3371 mm

Tab. 1: Rozměry jednotlivých částí kompozitních izolačních konstrukcí

Z výše uvedené disertační práce byly převzaty rozměry kompresního izolátoru a jeho koncových armatur. Tvar nosné armatury byl taktéž odvozen z výše uvedené práce, ale upraven podle vlastních potřeb. Kapacitní kruhy a armatura uchycující fázový vodič byly vytvořeny podle vlastního návrhu. Rozměry tyčových izolátorů byly zvoleny podle katalogového listu ČEZ (označení A304.002D). Veškeré ostatní rozměry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 1).

3.1 3D modely – SolidWorks

Nejprve bylo nutné vytvořit 3D model 110 kV kompozitní izolační konstrukce pomocí CAD navrhovacího softwaru SolidWorks. Celý model se skládá ze tří hlavních částí – nosné armatury s vodičem, dvou tyčových a dvou kompresních izolátorů (viz Obr. 3.1). Pro snadnější práci s modely byly všechny tyto části vytvořeny a uloženy jako samostatné díly ve formátu *.SLDPRT. Hotové díly byly vloženy do sestavy pomocí funkce „Vložit součást“. Nejprve byla vložena nosná armatura tak, aby počátek souřadnicového systému byl v jejím geometrickém středu. Následovalo vložení dílů kompresních a tyčových izolátorů. Dokonalého připojení izolátorů k nosné armatuře bylo dosaženo pomocí funkce „Vazby“. Uložení celé sestavy ve formátu *.SLDASM vznikl soubor, který lze vkládat bez problémů do simulačního programu Comsol Multiphysics. 3D model 400kV izolační konstrukce vznikl prodloužením tyčových i kompresních izolátorů o dvě třetiny jejich délky.

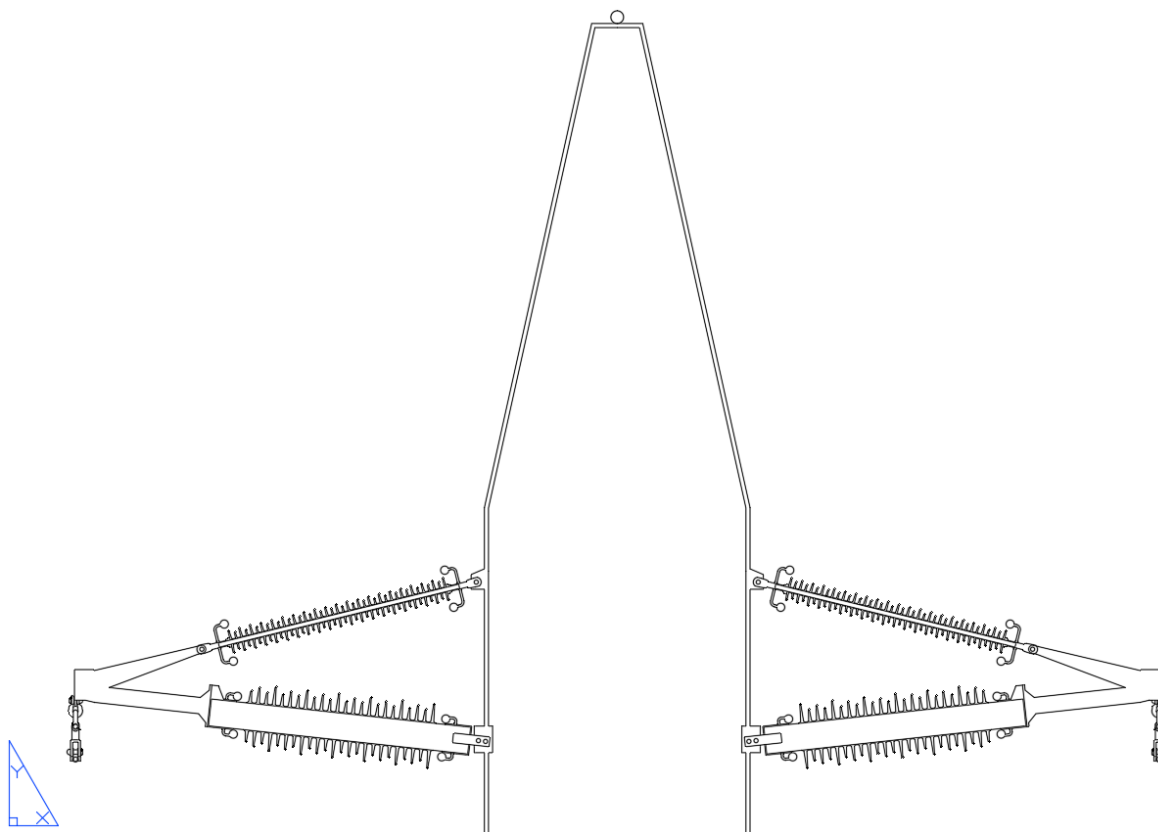


Obr. 3.1: 3D model sestavy 110 kV kompozitní izolační konstrukce

3.2 2D modely – SolidWorks/AutoCad

Pomocí 2D modelů lze uskutečnit prvotní simulace, díky kterým lze otestovat geometrii modelu i výpočetní síť a získat první informace o chování konstrukce v elektrostatickém a magnetickém poli. 2D modely byly získány exportováním jednotlivých dílů 3D modelů do formátu *.DXF v bočním pohledu v programu SolidWorks. DXF soubory byly následně importovány do nového dílu jako 2D skica pomocí interního průvodce. Jako jednotka importovaných dat byl zvolen milimetr dle původních souborů. Importní tolerance, resp. sloučení bodů, byla nastavena na hodnotu 0,1 mm a dále bylo zapnuto sloučení překrývajících se entit. Skici modelů byly značně zjednodušeny a opět uloženy jako samostatné díly. Dalším krokem bylo vložení jednotlivých dílů do nové skici. Pro efektivní práci s modely je výhodné vkládat díly jako bloky. Celý model 2D konstrukce tak lze jednoduše sestavit pomocí bloků a vazeb mezi nimi. Posledním krokem bylo dodatečné rozložení bloků pro případné doladění modelu. Výsledný 2D model izolační konstrukce byl uložen jako díl ve formátu *.SLDPRT a také ve formátu *.DXF.

Pro pohodlnější práci s 2D modely byl následně zvolen CAD software AutoCad. Nejprve bylo nutné vytvořit model stožárové konstrukce. Výchozí konstrukcí byl zvolen typizovaný stožár typu „Soudek“ pro napěťovou hladinu 110 kV, viz článek [43]. Vytvořena byla také vnější kružnice s poloměrem 50 m pro definování okrajové podmínky. Izolační konstrukce byly poté nakopírovány a usazeny na upravenou stožárovou konstrukci. Hotový 2D model stožáru s izolační konstrukcí (viz Obr. 3.2) byl uložen ve formátu *.DXF pro pozdější importování do simulačního programu Comsol Multiphysics.



Obr. 3.2: Část 2D modelu stožáru s izolační konstrukcí

3.3 Obecný matematický model

Obecný matematický model vychází z teorie elektromagnetického pole, která je popsána pomocí tzv. Maxwellových rovnic (viz Podkapitola 3.3.1). Elektromagnetické pole je obecně tvořeno vzájemným působením nestacionárního (časově i prostorově proměnného) elektrického a magnetického pole. Formálně může být elektromagnetické pole rozdělováno z hlediska časového průběhu na časově neproměnné (stacionární) nebo časově proměnné (nestacionární). Další rozdělením může být z prostorového hlediska na jednorozměrné (1D), dvourozměrné (2D) a trojrozměrné (3D).

Předpokladem pro stacionární pole je zanedbání časových změn polních veličin nebo procházejícího proudu danou oblastí. Problematiku polí lze řešit analyticky poměrně přesně pro jednodušší objekty. Zjednodušující podmínky umožňují zkoumat zvláště elektrické a magnetické jevy. Vyskytují se zde celkem tři formy polí – elektrostatické, proudové a magnetické. V nestacionárním poli nelze zkoumat a řešit odděleně jevy, protože jsou vzájemně propojeny a ovlivňovány. Speciálními případy jsou elektromagnetická pole kvazistacionární, která se mění s časem velmi pomalu, a harmonická elektromagnetická pole, která se mění podle sinusové či kosinové funkce. [44][45]

3.3.1 Maxwellovy rovnice

Fyzikální principy a zákony elektromagnetických polí jsou popsány matematickými vztahy tzv. soustavou čtyř Maxwellových rovnic (MR), které lze vyjádřit v integrálním nebo diferenciálním tvaru. Integrální tvar se vztahuje přímo na řešení v určité oblasti. Pomocí diferenciálního tvaru rovnic lze převádět integrální veličiny na měrné veličiny přímo do určitého (regulárního) bodu řešené oblasti, v němž jsou stavové veličiny spojité. [44] Rovnice v diferenciálním tvaru je nutné doplnit tzv. okrajovými podmínkami na rozhraní, kterými lze dodefinovat přechod mezi dvěma prostředími. [45]

	Integrální tvar	Diferenciální tvar
První MR	$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
Druhá MR	$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
Třetí MR	$\oint_s \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q$	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$
Čtvrtá MR	$\oint_s \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$	$\text{div } \mathbf{B} = 0$

Tab. 2: Úplná soustava Maxwellových rovnic – převzato [44]

3.3.2 Model elektrostatického pole

Model elektrostatického pole je matematicky odvozován ze vztahů druhé a třetí Maxwellovy rovnice (MR) v diferenciálním tvaru pro stacionární pole. [44]

Druhá MR (zákon elektromagnetické indukce) má tvar:

- Integrální: $\oint_C \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = 0$ (1.1)

- Diferenciální: $\text{rot } \mathbf{E} = 0$ (1.2)

Třetí MR (Gaussův zákon elektrostatiky) má tvar:

- Integrální: $\oint_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = Q$ (1.3)

- Diferenciální: $\text{div } \mathbf{D} = \rho$ (1.4)

Intenzita elektrického pole \mathbf{E} je vektorovou veličinou charakterizující elektrické pole (směr i velikost), kterou lze znázornit pomocí siločar (vektorové čáry). Vyjadřuje sílu působící na kladný jednotkový náboj. Velikost je definována vztahem:

$$\mathbf{E} = \frac{F_e}{Q} \quad (V \cdot m^{-1}) \quad (1.5)$$

Elektrická indukce vyjadřuje indukovaný náboj na jednotkovou plochu vodiče vloženého do elektrostatického pole. Velikost je definována vztahem:

$$\mathbf{D} = \frac{Q}{S} \quad (C \cdot m^{-2}) \quad (1.6)$$

Vztah mezi veličinami (1.5) a (1.6) je přímo úměrný a je definován pomocí permitivity prostředí ε :

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (F \cdot m^{-1}) \quad (1.7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (F \cdot m^{-1}), \quad (1.8)$$

kde: ε_0 ... permitivita vakua ($\varepsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$)

ε_r ... relativní permitivita – bezrozměrná veličina ($\varepsilon_r = 1,0006$ pro vzduch, $\varepsilon_r = 1$ pro vakuum, $\varepsilon_r > 1$ pro ostatní materiály)

Elektrostatické pole je nevírové (potenciální, zřídlové) pole v regulárních bodech. Výsledkem gradientu je vektorové pole, které udává velikost a směr největší změny skalárního pole elektrického potenciálu.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{grad} \varphi) = 0 \quad (1.9)$$

Postupnou úpravou vztahů (1.2) a (1.9) a jejich vzájemným dosazením lze získat vztahy:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \operatorname{rot}(\operatorname{grad} \varphi) = 0 \quad (1.10)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (V \cdot m^{-1}) \quad (1.11)$$

Dosazením (1.7) do (1.11) plyne, že:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot (-\operatorname{grad} \varphi) \quad (C \cdot m^{-2}) \quad (1.12)$$

Dosazením (1.12) do (1.4) lze získat vztah:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \operatorname{div} \varepsilon \cdot (-\operatorname{grad} \varphi) = \rho \quad (1.13)$$

Pro $\varepsilon = \text{konst.}$:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.14)$$

Vztah (1.14) je znám jako Poissonova rovnice (1.15). V místech, kde je objemová hustota volného náboje nulová ($\rho = 0$) je vztah (1.14) znám jako Laplaceova rovnice (1.16):

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.15)$$

$$\Delta \varphi = 0 \quad (1.16)$$

Poté je ještě nutné dodefinovat okrajové podmínky na rozhraní dvou dielektrických prostředí. Výhodou programu Comsol Multiphysics je automatické přiřazení okrajové podmínky pro danou hraniční oblast.

3.3.3 Model magnetického pole

Model magnetického pole je matematicky odvozován ze vztahů z první a čtvrté Maxwellovy rovnice (MR) v diferenciálním tvaru pro stacionární pole. Protože je uvažován harmonický průběh proudu, je nutné vztahy posléze převést pro řešení v nestacionárním harmonickém magnetickém poli. [44]

První MR (zákon celkového proudu) má tvar:

- Integrální: $\oint_C \mathbf{H} d\mathbf{l} = I$ (2.1)

- Diferenciální: $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$ (2.2)

Čtvrtá MR (zákon spojitosti indukčního toku) má tvar:

- Integrální: $\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$ (2.3)

- Diferenciální: $\text{div } \mathbf{B} = 0$ (2.4)

Magnetická indukce \mathbf{B} je vektorovou veličinou charakterizující magnetické pole, kterou lze znázornit pomocí indukčních čar. Vyjadřuje silové účinky působící maximální síly na jednotkovou hodnotu bodového náboje.

$$\mathbf{B} = \frac{F_{max}}{Q \cdot v} \quad (T) \quad (2.5)$$

Intenzita magnetického pole \mathbf{H} ($A \cdot m^{-1}$) vyjadřuje míru silových účinků magnetického pole, které je vyvolávané vnějšími (volnými) proudy. Mezi veličinami \mathbf{B} a \mathbf{H} je definován vztah pomocí permeability prostředí μ :

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (H \cdot m^{-1}) \quad (2.6)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (H \cdot m^{-1}) \quad (2.7)$$

kde: μ_0 ... permeabilita vakua ($\mu_0 \cong 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$)

μ_r ... relativní permeabilita – bezrozměrná veličina ($\mu_r \cong 1$ pro diamagnetika a paramagnetika, $\mu_r \gg 1$ pro ostatní materiály)

Elektromagnetické pole je nezřídlové, nestacionární (vírové) pole. Protože pole tohoto typu nelze popisovat skalárním potenciálem, je nutné zavést vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} ($Wb \cdot m^{-1}$) ze čtvrté MR (2.4):

$$\text{div } \mathbf{B} = \text{div} (\text{rot } \mathbf{A}) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (2.9)$$

Aby vztah platil, je nutné jej doplnit o Coulombovu podmínku:

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0 \quad (2.10)$$

Dosazením (2.6) do (2.2) lze získat vztah:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \mathbf{B} = \mathbf{J} \quad (2.11)$$

Pro převod polních veličin na potenciály se využije vztahu (2.9) a pomocí něj upraví (2.10):

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (2.12)$$

Druhá MR v diferenciálním tvaru má tvar:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

Dosazením (2.9) do (2.13) plyne, že:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \operatorname{rot} \mathbf{A}}{\partial t} = - \operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.14)$$

Úpravou (2.14) lze získat konečný tvar:

$$\mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \varphi \quad (2.15)$$

Dále je nutné zavést vztah pro proudovou hustotu \mathbf{J} :

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (A \cdot m^{-2}) \quad (2.16)$$

kde: γ ($S \cdot m^{-1}$) ... měrná elektrická vodivost (konduktivita)

Dosazením (2.16) do (2.15) lze získat vztah:

$$\mathbf{J} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \operatorname{grad} \varphi \quad (2.17)$$

Dosazením (2.12) do (2.17) plyne, že:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \operatorname{grad} \varphi \quad (2.18)$$

Úpravou (2.18) lze získat vztah:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_{ext} \quad (2.19)$$

kde: \mathbf{J}_{ext} ... vnucená proudová hustota

\mathbf{J}_v ... proudová hustota vířivých proudů

Převedením vztahů na nestacionární harmonické magnetické pole lze získat vztah:

$$\mathbf{J}_v = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\gamma j \omega \underline{\mathbf{A}} \quad (2.20)$$

Dosazením (2.20) do (2.19) plyne, že:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) = -\gamma j \omega \underline{\mathbf{A}} + \mathbf{J}_{ext} \quad (2.21)$$

Upravením rovnice (2.21) lze získat tzv. Helmholtzovu rovnici popisující elektromagnetické pole pro kvazistacionární děj:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + \gamma j \omega \underline{\mathbf{A}} = \mathbf{J}_{ext} \quad (2.22)$$

3.4 Numerický model elektrického namáhání – Comsol

Numerický model elektrického namáhání je řešen metodou konečných prvků (FEM) v simulačním programu Comsol Multiphysics. Zkoumané 2D a 3D modely 110kV a 400kV kompozitních izolačních konstrukcí byly podrobeny simulacím v ustáleném elektrostatickém a harmonickém magnetickém poli při frekvenci 50 Hz. Mezi nejdůležitější sledované veličiny elektrického namáhání patří intenzita elektrického pole \mathbf{E} ($V \cdot m^{-1}$). Její velikost a rozložení v jednotlivých částech izolační konstrukce umožňuje zkoumat chování materiálů v ustáleném elektrostatickém poli.

3.4.1 Zvolené materiály a jejich vlastnosti

Všem částem fyzikálních 2D/3D modelů byly určeny jednotlivé materiály podle jejich specifických elektrických vlastností. Vybírat lze z interní knihovny předdefinovaných materiálů nebo lze přidat vlastní materiály. V tomto případě byla zvolena varianta vložení nových materiálů. V záložce „Materials“ lze přes funkci „Blank Material“ vložit prázdný materiál. Položka „Geometric Entity Selection“ umožňuje manuálně vybírat jednotlivé oblasti (domény). Rolováním kolečka myši lze zvýraznit konkrétní oblast a výběr uskutečnit

stiskem levého tlačítka. Každému materiálu je nutné zadat jeho název, relativní permitivitu ϵ_r , relativní permeabilitu μ_r a měrnou elektrickou vodivost (konduktivitu) γ .

Bylo zvoleno celkem pět výchozích materiálů – GFRP kompozit vyztužený skelnými E-vlákný (jádra izolátorů), silikonový kaučuk (obal a stříšky izolátorů), konstrukční ocel (nosná armatura, koncová armatura tyčových izolátorů a stožárová konstrukce), hliník (fázový vodič, koncové armatury kompresních izolátorů) a vzduch (okolní prostředí), viz Tab. 3.

Materiál	Relativní permitivita ϵ_r (-)	Relativní permeabilita μ_r (-)	Měrná elektrická vodivost γ ($S \cdot m^{-1}$)
Hliník	$1 \cdot 10^6$	1,000022	$3,5 \cdot 10^7$
Ocel	$1 \cdot 10^6$	1000	$1,45 \cdot 10^7$
Silikonový kaučuk	3,5	1	$1 \cdot 10^{-13}$
GFRP kompozit	6	1	$4 \cdot 10^{-12}$
Vzduch	1	1	$3 \cdot 10^{-15}$

Tab. 3: Seznam použitých materiálů a jejich vlastností – zdroj [36],[46],[47],[48],[49],[50]

3.4.2 Výpočet proudových hustot

Při výpočtu harmonického magnetického pole je nutné zadat externí proudové hustoty. Výpočet vychází z vyjádření velikosti proudu při přenosu přirozeného výkonu na vedení ($P = 30 \text{ MW}$) na napěťové hladině 110 kV dle vztahu [51]:

$$I_f = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 1} \cong 157,5 \text{ A} \quad (3.1)$$

Protože se jedná o třífázový systém s fázově posunutými proudy, je potřeba zadávat velikosti proudových hustot, resp. velikosti fázových proudů, v komplexním tvaru:

$$I_U = I \cdot (\cos 0^\circ + i \cdot \sin 0^\circ) = 157,5 \text{ A} \quad (3.2)$$

$$I_V = I \cdot (\cos(-120^\circ) + i \cdot \sin(-120^\circ)) = -78,85 - i \cdot 136,6 \text{ A} \quad (3.3)$$

$$I_W = I \cdot (\cos(120^\circ) + i \cdot \sin(120^\circ)) = -78,85 + i \cdot 136,6 \text{ A} \quad (3.4)$$

Vzhledem k danému průměru ($d = 21 \text{ mm}$) fázového vodiče ve 2D/3D modelu byl zvolen konkrétní typ AlFe lana s označením AFL-6 240 [52] o matematickém průřezu

hliníkového pláště ($S_{MAT} = 235,8 \text{ mm}^2$), kterým prochází uvažovaný proud. Konečný výpočet jednotlivých proudových hustot byl získán dle následujících vztahů:

$$J_U = \frac{I_U}{S_{MAT}} = \frac{157,5}{235,8 \cdot 10^{-6}} = 667\,939 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (3.5)$$

$$J_V = \frac{I_V}{S_{MAT}} = \frac{-78,85 - i \cdot 136,6}{235,8 \cdot 10^{-6}} = -334\,394 - i \cdot 579\,304 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (3.6)$$

$$J_W = \frac{I_W}{S_{MAT}} = \frac{-78,85 + i \cdot 136,6}{235,8 \cdot 10^{-6}} = -334\,394 + i \cdot 579\,304 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (3.7)$$

3.4.3 2D numerický model

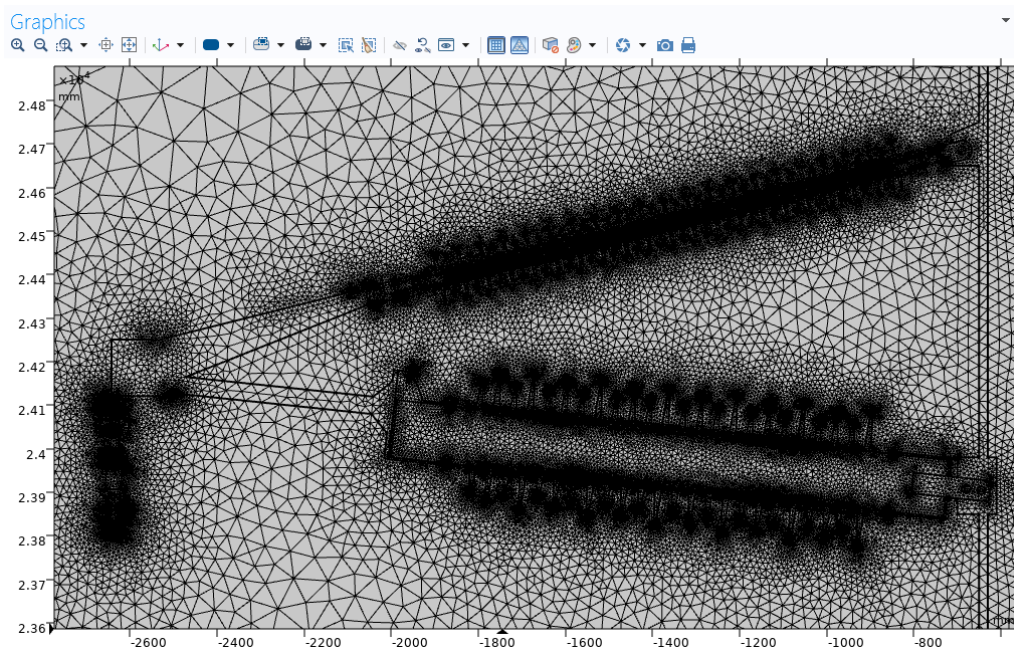
Pro řešení 2D úlohy byl využit interní průvodce zvolením ikony „*Model Wizard*“ v okně „*New*“ a vytvořeno tak vlastní fyzikální prostředí. Poté bylo vybráno „*2D*“ z nabídky dostupných prostorových dimenzí. V dalším okně „*Select Physics*“ se zobrazil přehled několika dostupných fyzikálních rozhraní, v kterých lze řešit hned několik fyzikálních jevů najednou. Byly zvoleny dvě fyzikální rozhraní v modulu „*AC/DC*“ – „*Electrostatics (es)*“ pro řešení v elektrostatickém poli a „*Magnetic Fields (mf)*“ pro řešení v magnetickém poli. Přidání více studií lze rychleji uskutečnit ukončením průvodce tlačítkem „*Done*“. Zvolením záložky „*Study*“ a stisknutím tlačítka „*Add Study*“ se zobrazí přehled studií v pravé části obrazovky. V nabídce obecných studií „*General Studies*“ byly vybrány dvě studie – „*Stationary*“ pro řešení ustáleného děje v elektrostatickém poli a „*Frequency Domain*“ pro řešení harmonického magnetického pole (nutné nastavit frekvenci 50 Hz).

Samotný model lze vložit tlačítkem „*Import*“ v záložce „*Geometry*“. V tomto případě byl zvolen typ zdrojového souboru „*DXF file*“ ve výběrové kolonce „*Source*“. Vyhledáním konkrétního modelu přes tlačítko „*Browse*“ jej lze vložit tlačítkem „*Import*“. Vložená geometrie se nemusí vždy úspěšně nahrát a je třeba ji zkontrolovat. Případné nedokonalosti lze opravit importní tolerancí pomocí „*Repair Tolerance*“. Pro dokončení geometrie byla zvolena výchozí finalizační metoda „*Form Union*“, která sloučila všechny objekty do jednoho. Následně bylo provedeno vkládání jednotlivých materiálů v záložce „*Materials*“, viz výše Podkapitola 3.4.1.

V další části byly blíže nastaveny obě fyzikální pole. Elektrostatickému poli bylo nutné definovat elektrický potenciál „*Electric Potential*“ a zemi „*Ground*“ kliknutím pravého tlačítka myši na „*Electrostatics (es)*“. V položce „*Electric Potential*“ byly manuálně definovány jednotlivé obrysy (povrchy) fázových vodičů a nastaveny velikosti elektrického

potenciálu na hodnotu 63,5 kV (fázová hodnota napětí 110 kV). V položce „Ground“ byly opět manuálně vybrány jednotlivé obrysy pro přiřazení země. Konkrétně bylo nutné vybrat celý povrch země včetně základů stožáru, aby se země aplikovala na celou stožárovou konstrukci. Magnetickému poli byly přiřazeny externí proudové hustoty jednotlivých fázových vodičů. Kliknutím pravého tlačítka myši na „Magnetic Fields (mf)“ a zvolením položky „External Current Density“ byly manuálně přiřazeny proudové hustoty jednotlivým oblastem fázových vodičů. V tomto případě se jednalo celkem o tři proudové hustoty v komplexním tvaru pro jednotlivé fáze do osy Z, viz Podkapitola 3.4.2.

V poslední části byla generována výpočetní síť. Výpočetní síť lze přidat v záložce „Mesh“ tlačítkem „Add Mesh“. Postačí ponechat výchozí nastavení sekvence na fyzikou řízenou síť „Physics-controlled Mesh“. Kolonka „Element Size“ slouží pro nastavení jemnosti sítě, která má přímý vliv na velikost a počet prvků v síti. Velikost elementů byla nastavena na velmi jemnou „Extra Fine“ pro přesnější výpočet. Výpočetní síť se vygenerovala stisknutím tlačítka „Build All“.



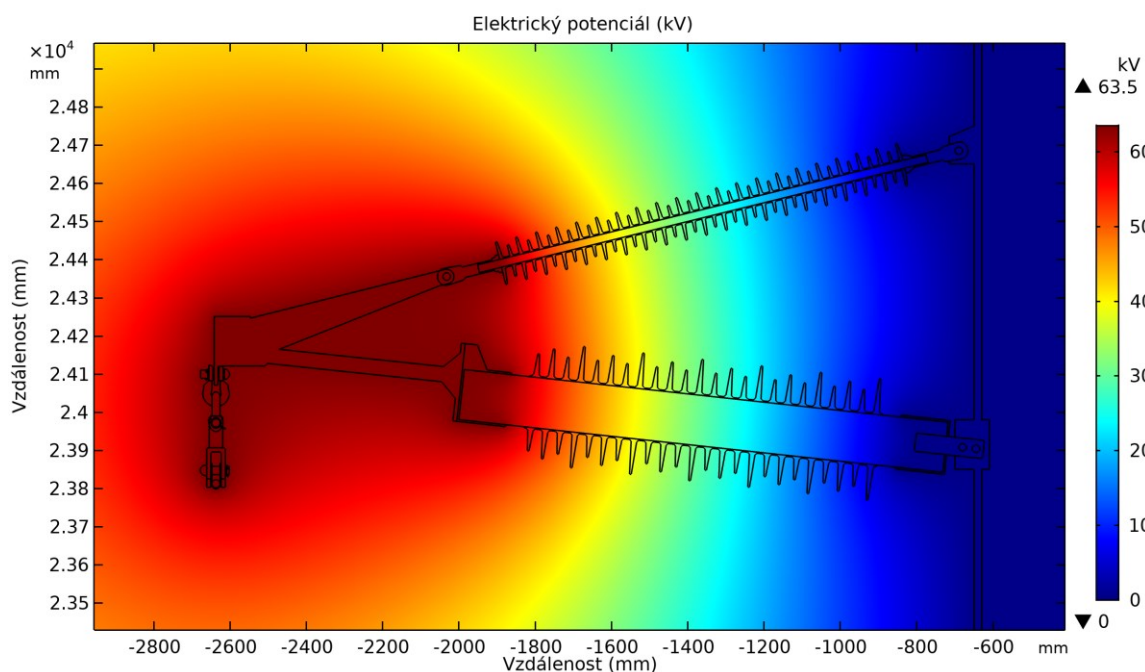
Obr. 3.3: Výpočetní 2D síť izolační konstrukce

Po úspěšném vygenerování sítě lze bez problémů spustit simulaci. Výběrem jednotlivé studie a kliknutím na tlačítko „Compute“ se spustí samotný výpočet. Zobrazení výsledků lze provést kliknutím pravého tlačítka na „Results“ a přidat 2D graf „2D Plot Group“. Kliknutím na 2D graf lze v okně „Settings“ nastavit například zdroj dat, ze kterých se budou výsledky zobrazovat, navolit pohled nebo různá dodatečná nastavení. Kliknutím pravého

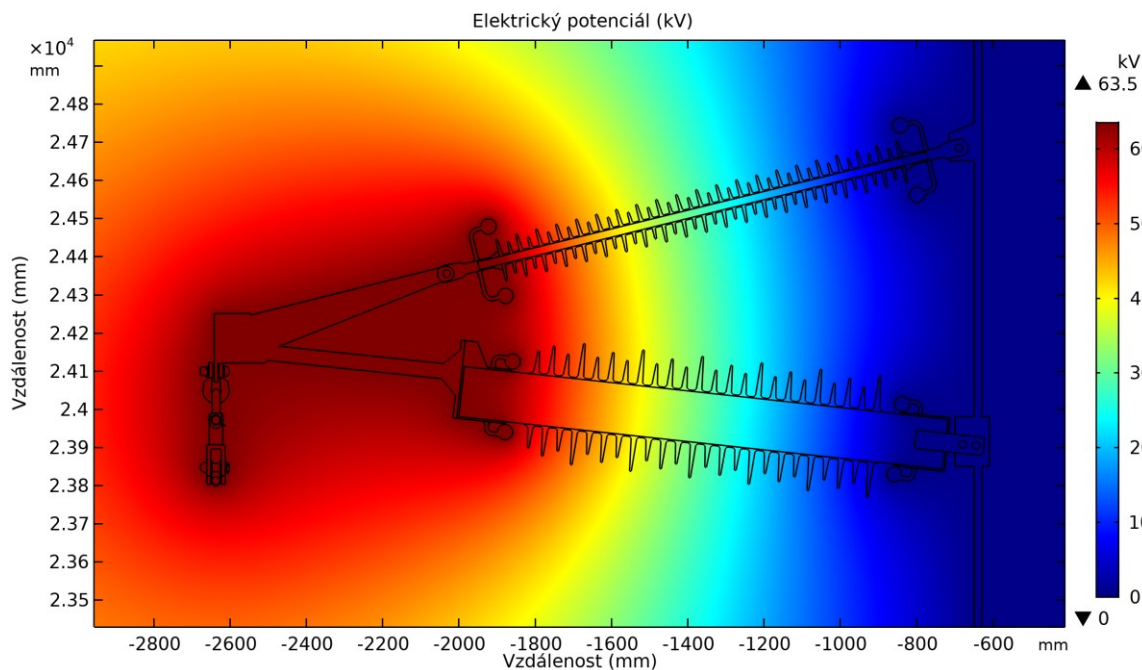
tlačítka na 2D graf lze přidat grafické zobrazení výsledků. Pro výsledné rozložení pole je nutné přidat plošné zobrazení „Surface“. Kliknutím na dvojici zeleno-červených šipek v okně „Expression“ lze navolit zobrazovanou veličinu. V kolonce „Unit“ lze zvolit zobrazovanou jednotku dané veličiny. Jednotlivá rozložení veličin lze poté exportovat například jako obrázky v kolonce „Export“.

3.4.3.1 Výsledky 2D simulace 110kV izolační konstrukce v elektrostatickém poli

Simulací elektrického namáhání bylo zjištěno, že topologie s lehkou nosnou armaturou mají shodné výsledky jako topologie se silnější variantou izolační konstrukce. Na následujících obrázcích je znázorněno téměř totožné rozložení elektrického potenciálu na 2D modelu 110kV kompozitní izolační konstrukce bez kapacitních kruhů (viz Obr. 3.4) a s kapacitními kruhy (viz Obr. 3.5). Umístění izolační konstrukce je situováno v místě horní konzole na stožárové konstrukci.

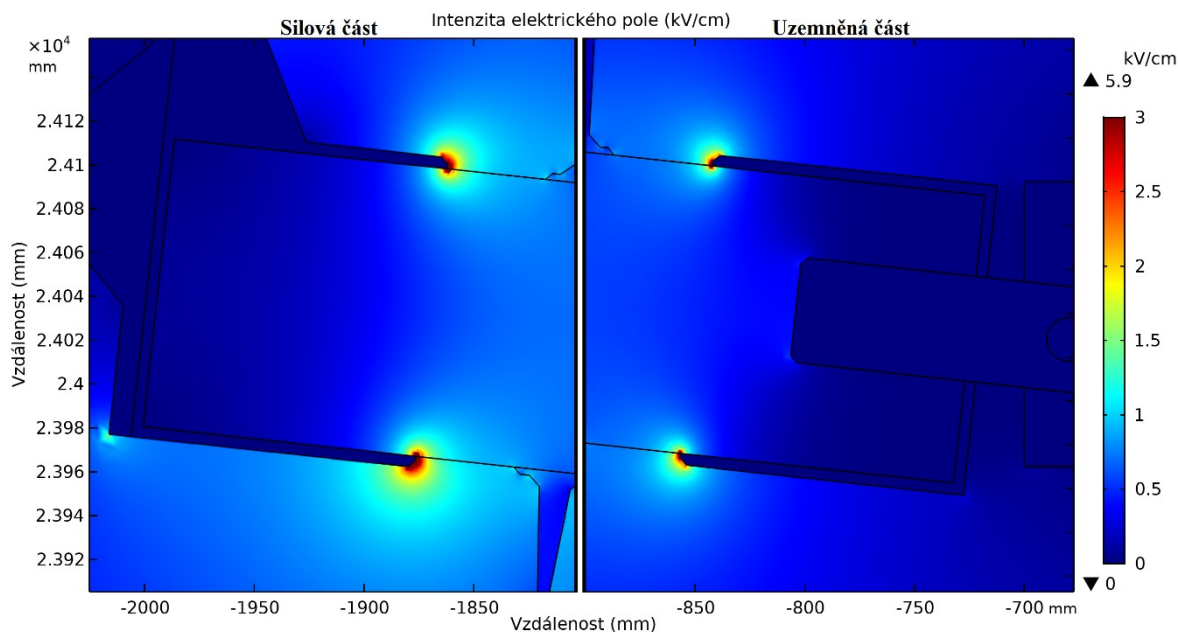


Obr. 3.4: Rozložení elektrického potenciálu na 110kV izolační konstrukci bez kapacitních kruhů



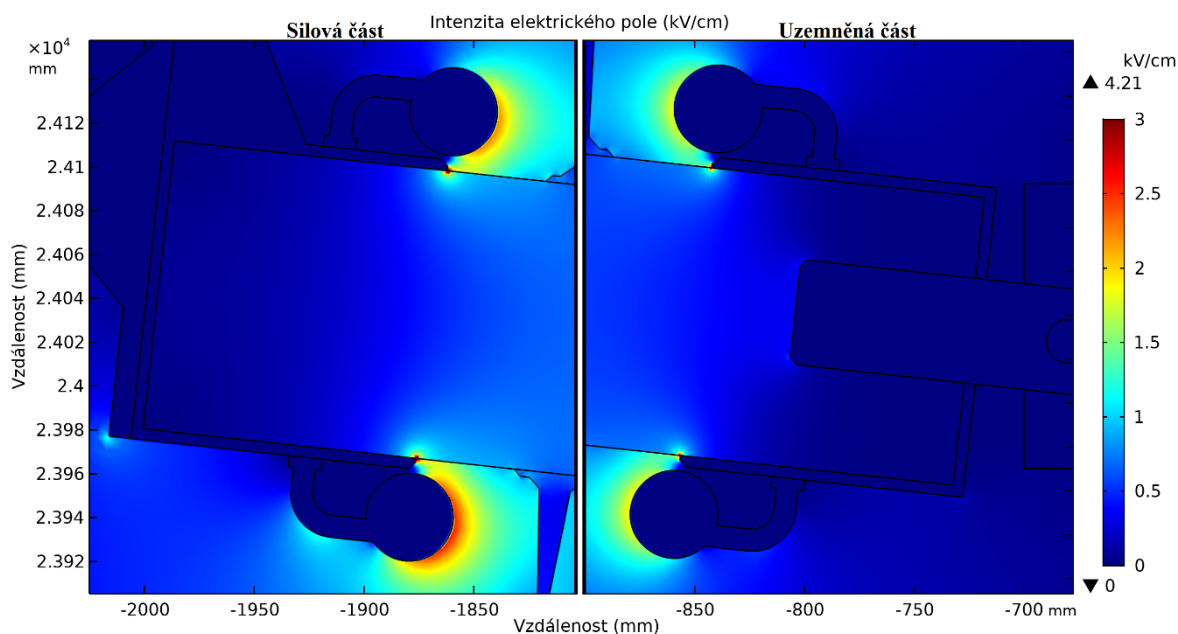
Obr. 3.5: Rozložení elektrického potenciálu na izolační konstrukci s kapacitními kruhy

Obr. 3.6 znázorňuje rozložení intenzity elektrického pole na kompresním izolátoru bez kapacitních kruhů. Nejvyšší velikosti intenzity elektrického pole o hodnotě $5,9 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ je dosaženo v silové části na spodní straně koncové armatury v místě rozhraní mezi koncovou armaturou a jádrem izolátoru. Na uzemněné části dosahuje intenzita elektrického pole průměrných hodnot kolem $4 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.



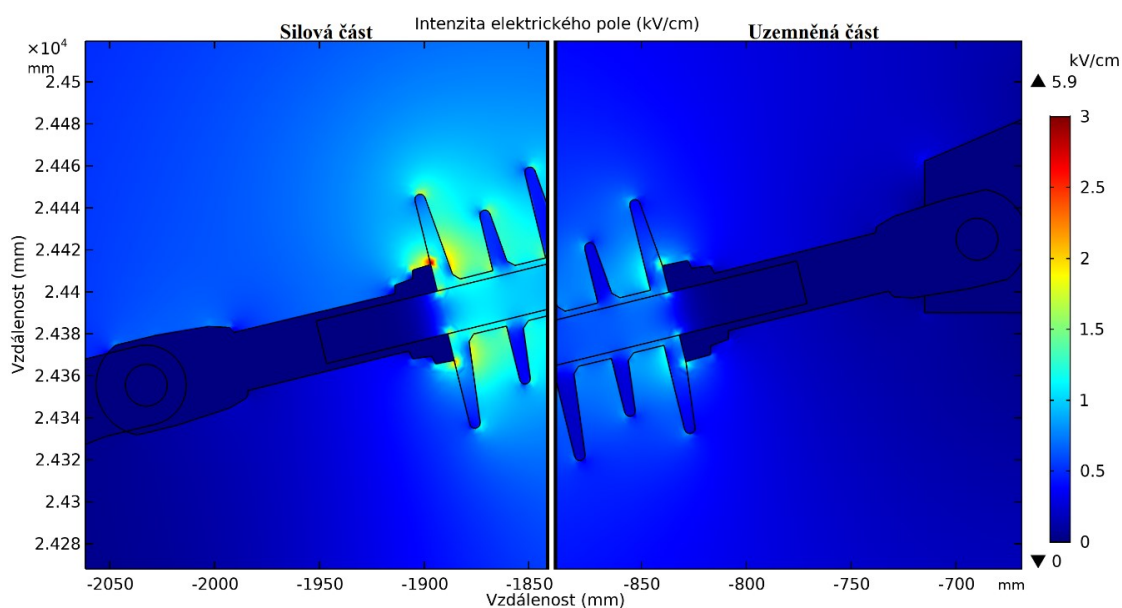
Obr. 3.6: Intenzita elektrického pole na kompresním izolátoru bez kapacitních kruhů

Po opatření kompresního izolátoru kapacitními kruhy (viz Obr. 3.7) došlo k celkovému poklesu intenzity elektrického pole přibližně o $1,5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ oproti předchozímu případu. Silová část dosahuje průměrných hodnot kolem $3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ a uzemněná část pod $3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.



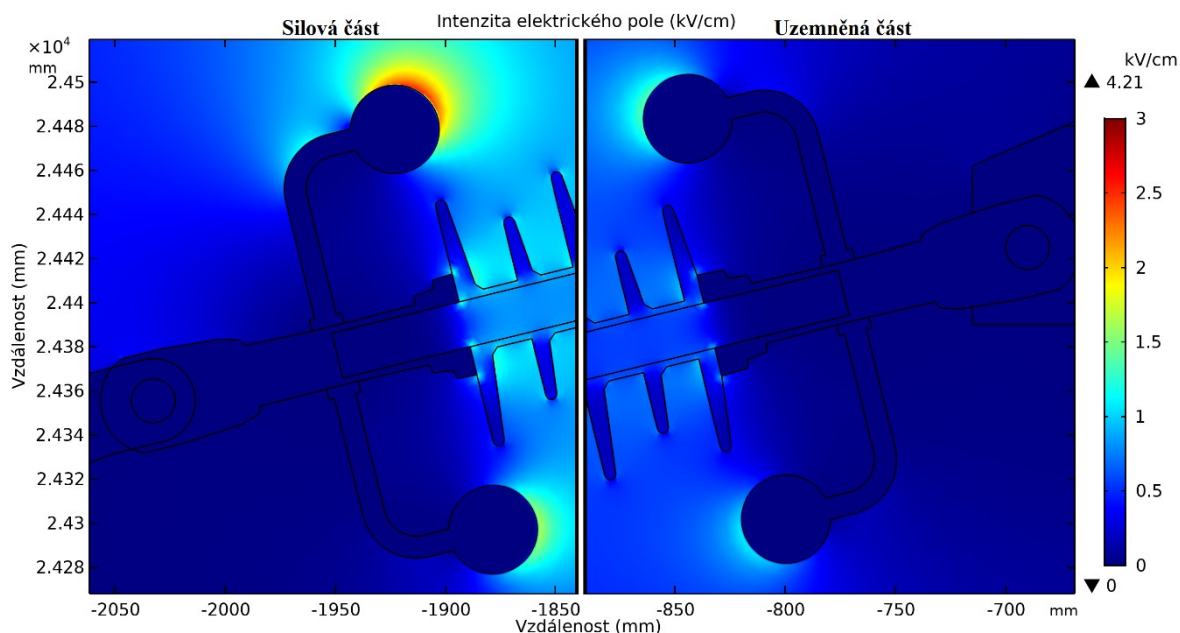
Obr. 3.7: Intenzita elektrického pole na kompresním izolátoru s kapacitními kruhy

Na obrázku (viz Obr. 3.8) je patrná vyšší koncentrace intenzity elektrického pole na rozhraní koncové armatury a stříšky na silové části tyčového izolátoru. Silová část dosahuje průměrných hodnot pod $3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ a uzemněná část kolem $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.



Obr. 3.8: Intenzita elektrického pole na tyčovém izolátoru bez kapacitních kruhů

Přidáním kapacitních kruhů (viz Obr. 3.9) bylo dosaženo „přesunutí“ vyšší koncentrace intenzity elektrického pole z inkriminovaného místa na samotnou konstrukci kapacitních kruhů. V místě rozhraní na silové části se hodnoty intenzity elektrického pole pohybují kolem $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$, zatímco na kapacitním kruhu kolem $2,5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.

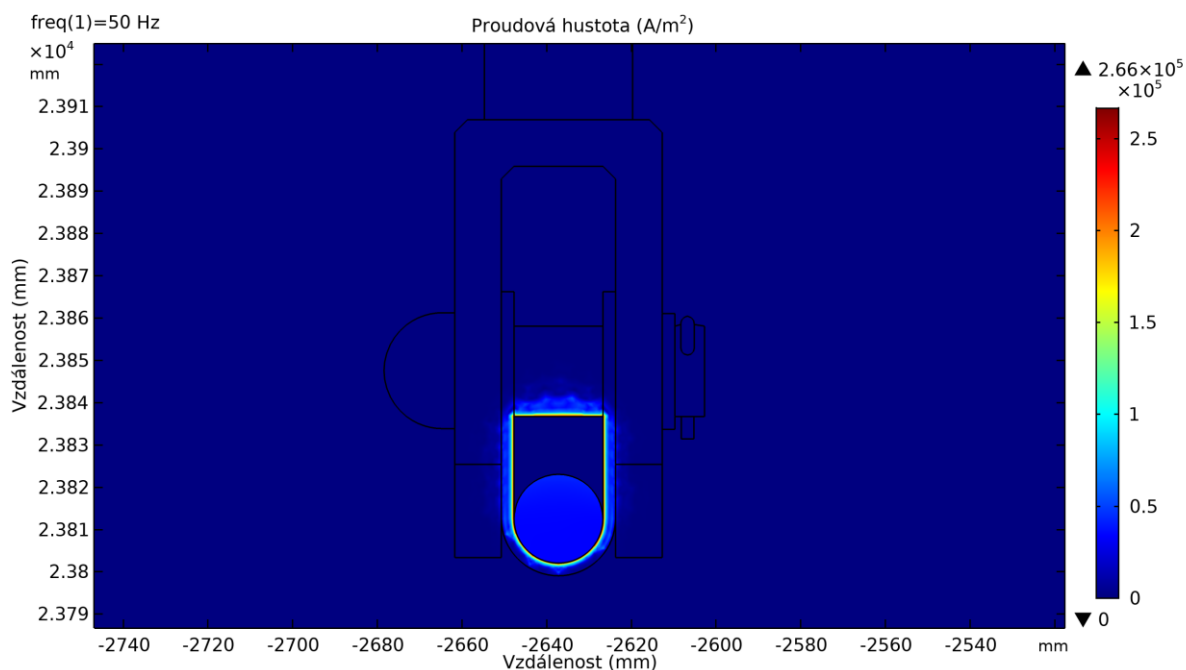


Obr. 3.9: Intenzita elektrického pole na tyčovém izolátoru s kapacitními kruhy

Výsledkem těchto simulací je ověřena funkce kapacitních kruhů. Vysoká koncentrace intenzity elektrického pole se soustředila na rozhraní koncové armatury a jádra kompresního izolátoru ($5,9 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) a na rozhraní koncové armatury a stříšky tyčového izolátoru ($4 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$). V těchto místech by docházet k lokálním výbojům, které by mohly poškozovat izolační materiál. Pomocí kapacitních kruhů bylo dosaženo přemístění intenzity elektrického pole z těchto inkriminovaných míst na svoji konstrukci.

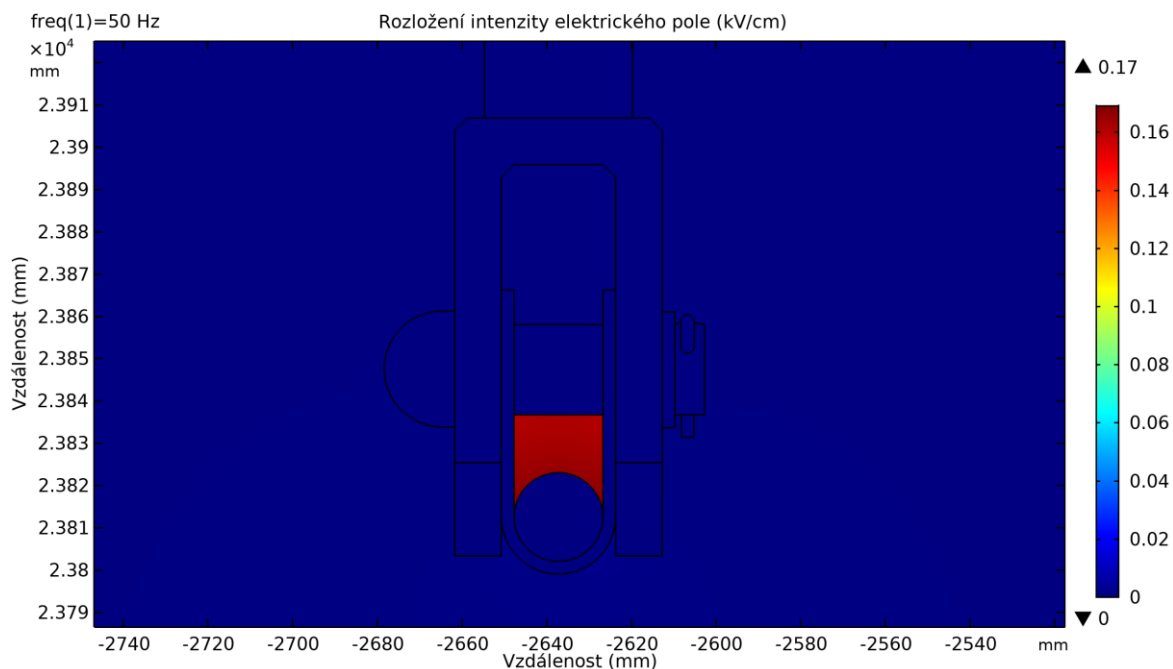
3.4.3.2 Výsledky 2D simulace 110kV izolační konstrukce v magnetickém poli

Obr. 3.10 znázorňuje rozložení proudové hustoty na povrchu 110kV nosné armatury, která uchycuje pracovní vodič při normální elektrické vodivosti vzduchu. Maximální hodnota této veličiny je přibližně $2,6 \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.



Obr. 3.10: Rozložení proudové hustoty na povrchu nosné armatury vodiče

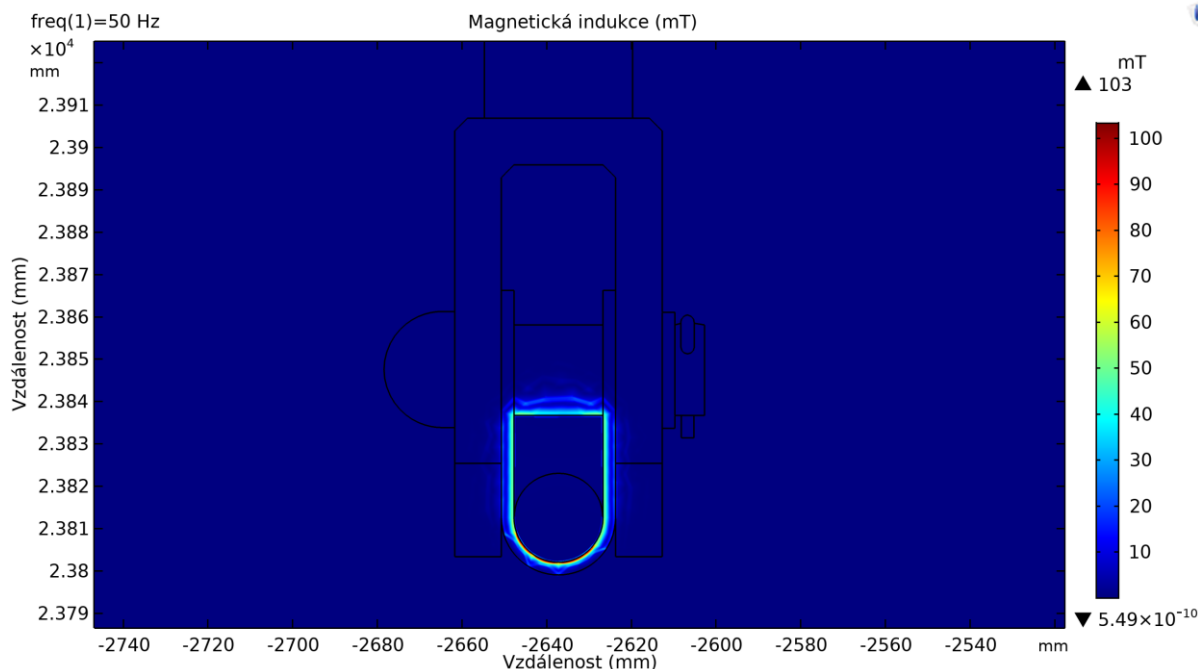
Vynásobením výše zmíněné proudové hustoty s elektrickou vodivostí v ose Z (viz vztah 2.16) lze získat intenzitu elektrického pole vyvolanou působením magnetického pole, viz Obr. 3.11. Její maximální hodnota je $0,17 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.



Obr. 3.11: Rozložení intenzity elektrického pole vyvolané působením magnetického pole

Rozložení magnetické indukce v oblasti pracovního vodiče je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 3.12). Maximální hodnota magnetické indukce je 103 mT. Vliv

této veličiny se řeší spíše z hlediska působení na člověka. Limity jsou zjišťovány podle nařízení vlády č.291/2015 Sb. Protože se člověk běžně nevyskytuje přímo v blízkosti elektrického vedení, není zkoumání této veličiny předmětem mé diplomové práce.



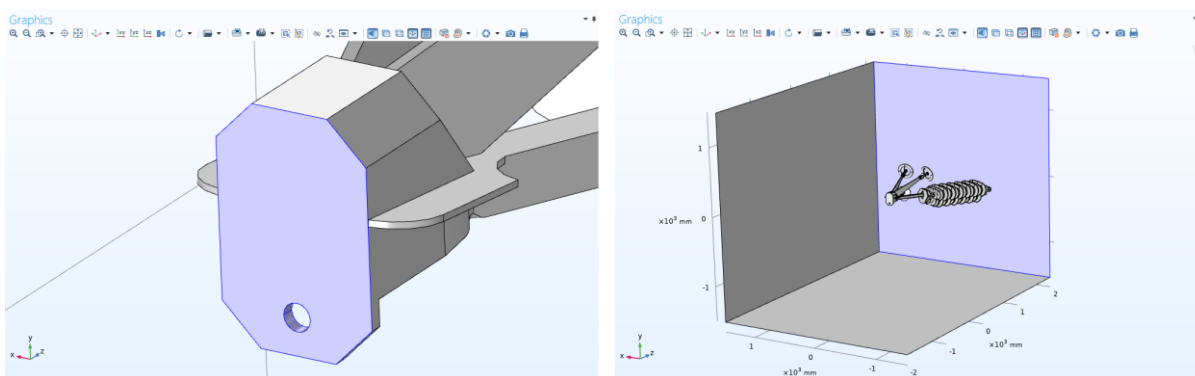
Obr. 3.12: Rozložení magnetické indukce v oblasti pracovního vodiče

3.4.4 3D numerický model

Postup řešení 3D numerického modelu je velmi podobný jako v předchozím případě. V simulaci byla použita pouze topologie se silnější nosnou konstrukcí, protože vyhovuje mechanickému namáhání. Opět lze využít interního průvodce „*Model Wizard*“ a zvolit prostorovou dimenzi „*3D*“. Výběr fyzikálních polí a uvažovaných studií se provádí stejně jako u 2D numerického modelu. Bylo zvoleno pouze elektrostatické pole, protože nedošlo ke konvergenci řešení v magnetickém poli. Pomocí elektrostatického pole lze nejlépe sledovat elektrické namáhání dané konstrukce. Sledovanou veličinou byla v tomto případě intenzita elektrického pole. Vysoká komplexita 3D modelu přímo úměrně zvyšuje výpočetní dobu simulace a velikost celého souboru. Jednotlivé topologie bylo nutné zjednodušit na nejnutnější minimum pro simulační použití. Z tohoto důvodu byly pro model použity pouze nosná koncová armatura bez vodiče, koncové armatury tyčových izolátorů a celý kompresní izolátor i s koncovými armaturami.

Největší zřetel je třeba dávat na správnost importované 3D geometrie. Neexistuje žádný osvědčený postup, který by zaručil úspěch na první pokus, protože ve hře je mnoho aspektů

a faktorů. V tomto případě byla nastavena importní tolerance na hodnotu $1E-8$ včetně všech dodatečných importních nastavení. V tomto modelu byla navíc využita virtuální operace, která odstraňuje velmi malé hrany v modelu, v záložce „*Virtual Operations*“ a položce „*Colapse Edges*“. Okrajovou podmínku, resp. výpočetní prostředí, zde tvořil kvádr o rozměrech $3 \times 3 \times 4$ m (šířka \times výška \times hloubka) na napěťové hladině 110 kV, a kvádr o rozměrech $3 \times 3 \times 6$ m na napěťové hladině 400 kV, v jejichž středu byl umístěn 3D model. Kvádry byly vloženy tlačítkem „*Block*“ v záložce „*Geometry*“ a jako výplňové médium byl zvolen vzduch. Ostatní použité materiály byly opět použity z tabulky Tab. 3, viz Podkapitola 3.4.1. Elektrostatickému poli byly opětovně definovány elektrický potenciál a země dle stejného postupu jako u 2D numerického modelu. Zdroji elektrického potenciálu (velikost 63,5 kV pro 110kV izolační konstrukci a 231 kV pro 400kV izolační konstrukci) byly zvoleny plochy přední části nosné armatury včetně otvoru pro armaturu fázového vodiče. Země byla aplikována na zadní stranu kvádrů, která simuluje zemi stožárové konstrukce a koncovou armaturu kompresního izolátoru, viz Obr. 3.13.



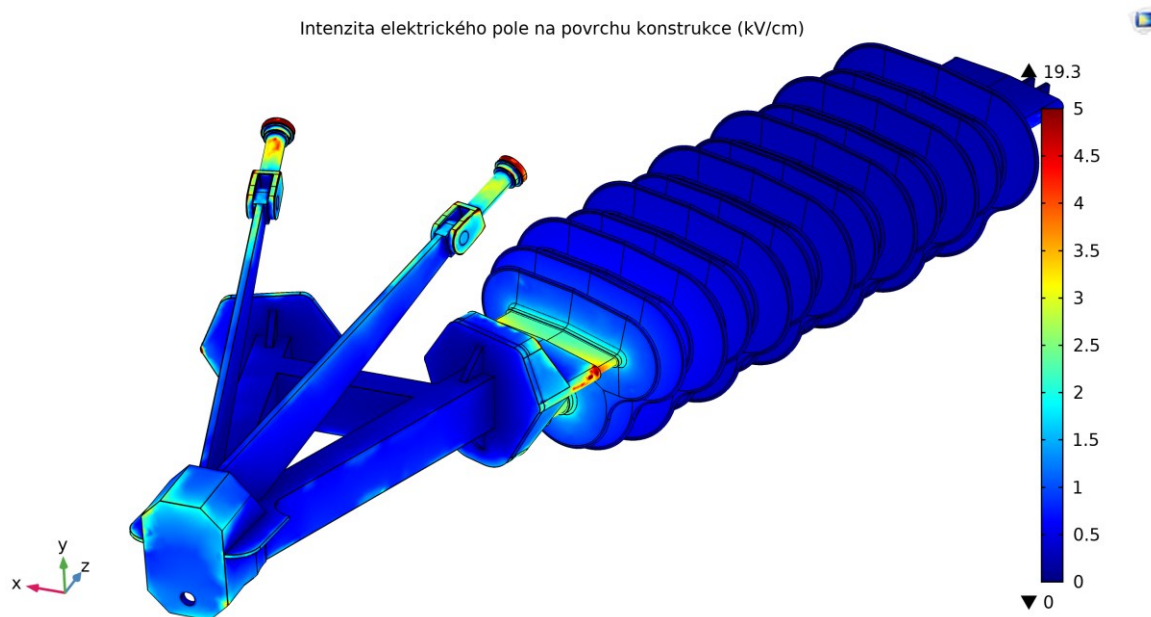
Obr. 3.13: Definované plochy elektrického potenciálu a země

Výpočetní síť byla vytvořena zvlášť pro jednotlivé části izolační konstrukce. Výhodou tohoto postupu je především větší kontrola nad kvalitou výpočetní sítě. Lze tím dodefinovat jemnější síť v některých místech, kde se může více deformovat a vytvářet velmi malé elementy. Samotný výpočet studie byl prováděn na výpočetním clusteru Edison FEL katedry teoretické elektrotechniky. Výstupní veličiny lze opět zobrazit přidáním 1D/2D/3D grafu dle potřeby.

3.4.4.1 Výsledky 3D simulace modelu 110kV izolační konstrukce v elektrostatickém poli

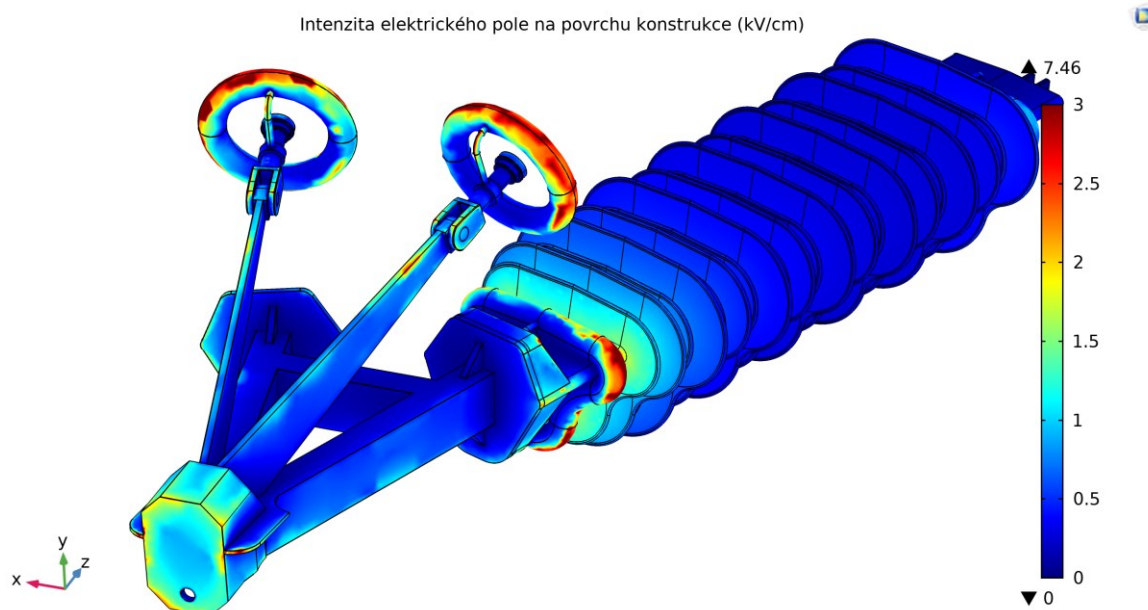
Na následujícím obrázku (Obr. 3.14) je znázorněno rozložení intenzity elektrického pole na povrchu 110 kV izolační konstrukce bez kapacitních kruhů. Místa s největší intenzitou

elektrického pole jsou na obou rozhraních koncových armatur tyčových izolátorů i na rozhraní koncové armatury (trojný bod) kompresního izolátoru. Maximální hodnoty elektrické intenzity na této konstrukci ($19,3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) je dosaženo právě na koncových armaturách tyčových izolátorů. Protože by mohlo docházet k lokálním výbojům a následnému poškození izolačních materiálů, je nutné snížit velikosti ve všech těchto místech použitím kapacitních kruhů.



Obr. 3.14: Rozložení intenzity elektrického pole na povrchu 110 kV izolační konstrukce bez kapacitních kruhů

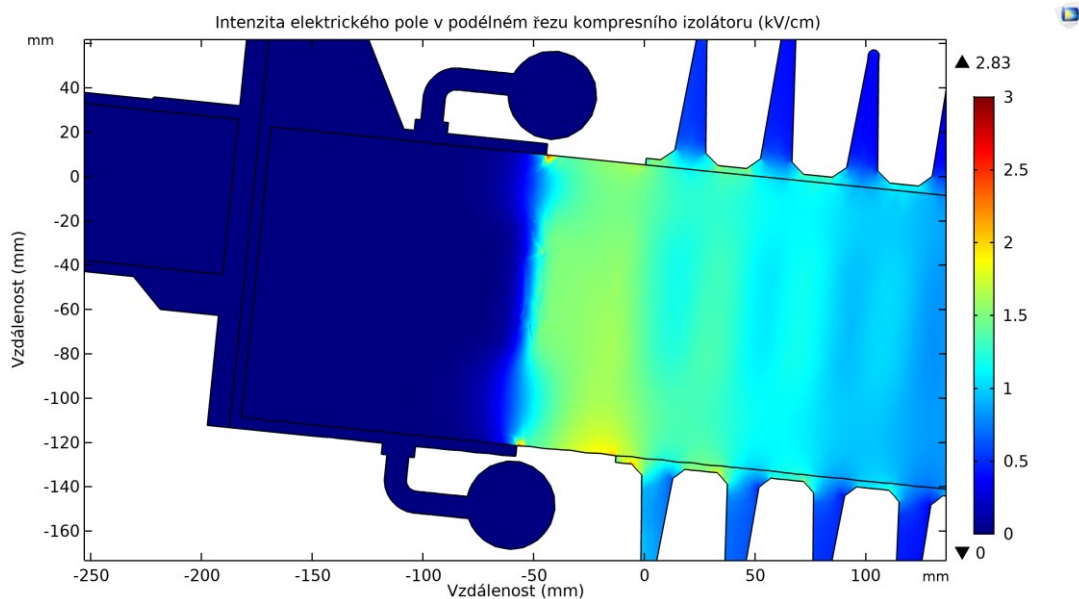
Po aplikování kapacitních kruhů dojde ke značnému celkovému poklesu velikosti intenzity elektrického podle (cca o dvou a půl násobek) dle teoretického předpokladu. Elektrické namáhání se přesunulo takřka všechno na kapacitní kruhy v místech rozhraní koncových armatur tyčových izolátorů (viz Obr. 3.15).



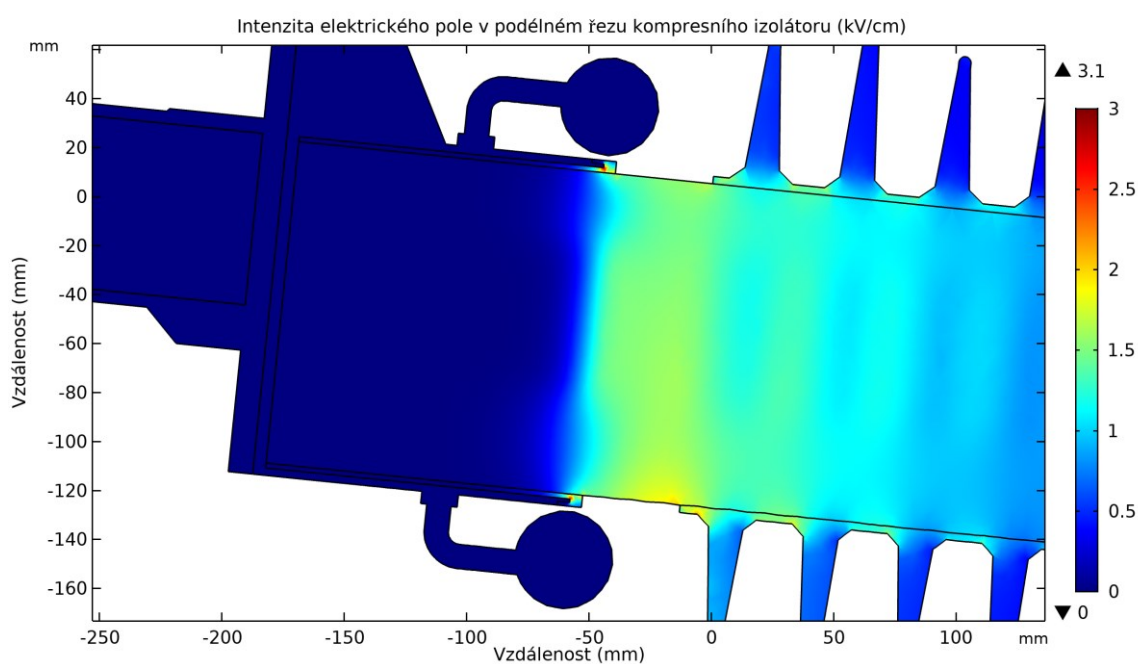
Obr. 3.15: Rozložení intenzity elektrického pole na povrchu 110 kV izolační konstrukce s kapacitními kruhy

Kapacitní kruh na silové části kompresního izolátoru převzal na sebe z větší části také elektrické namáhání. V některých místech rozhraní se však stále drží intenzita elektrického pole kolem $4 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$. Ačkoliv se nejedná o značně vysoké hodnoty, je třeba brát zřetel na další možné zvýšení hodnot vlivem nepříznivých klimatických podmínek. Při použití konstrukce v náročnějším prostředí (například deštivé nebo prašné prostředí) může docházet k značnému dlouhodobému navyšování velikosti elektrické intenzity v těchto místech. Mohou tak vznikat lokální výboje, trhliny a praskliny v izolačním materiálu. Následné poškození výztuhy ze skelných vláken může vézt až k úplné destrukci jádra izolátoru.

Aby došlo ke snížení hodnot v místě rozhraní bylo vyzkoušeno použití tzv. silikonového přechodu. Odebráním materiálu ve vnitřní části koncové armatury a vytvořením drážky na konci armatury bylo vytvořeno místo pro vložení 2 mm vrstvy silikonového kaučuku. Tato vrstva fyzicky odizoluje jádro izolátoru od koncové armatury. Důsledkem toho dochází k poklesu intenzity elektrického pole na povrchu jádra v místě trojného bodu pod stanovený limit $3,5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$. Naopak ke zvýšení soustředění elektrické intenzity dochází mezi silikonovým přechodem a koncovou armaturou. Intenzita elektrického pole v těchto místech dosahuje průměrných hodnot kolem $3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$. Pro lepší představu funkce silikonového přechodu znázorňují následující obrázky rozložení intenzity elektrického pole v podélném řezu kompresního izolátoru bez (Obr. 3.16) a se silikonovým přechodem (Obr. 3.17). Maximální hodnoty elektrické intenzity v tomto přechodu dosahují velikosti pod $3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.



Obr. 3.16: Rozložení intenzity elektrického pole v podélném řezu kompresního izolátoru bez silikonového přechodu

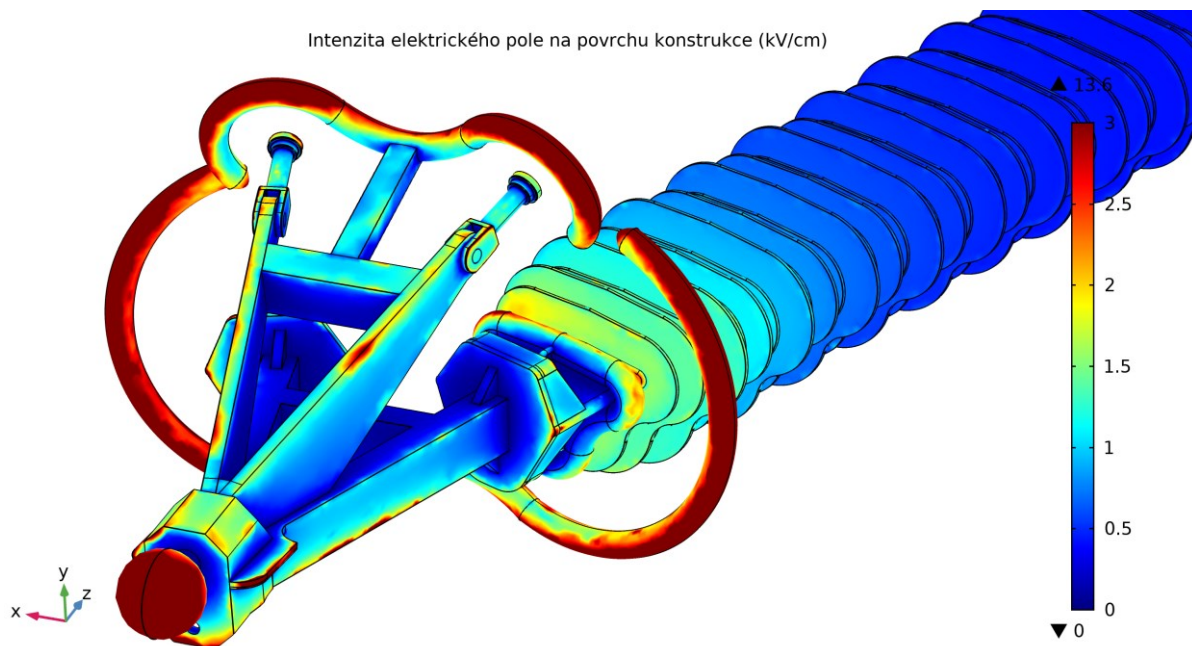


Obr. 3.17: Rozložení intenzity elektrického pole v podélném řezu kompresního izolátoru se silikonovým přechodem

Výstupy z 3D simulace potvrdily výsledky z 2D simulace. Kapacitní kruhy na sebe převzaly větší část intenzity elektrického pole. Tím došlo ke snížení její hodnoty v trojných bodech jednotlivých izolátorů. Silikonový přechod přesunul elektrickou intenzitu z povrchu kompresního jádra do místa přechodu a omezil tak jeho elektrické namáhání.

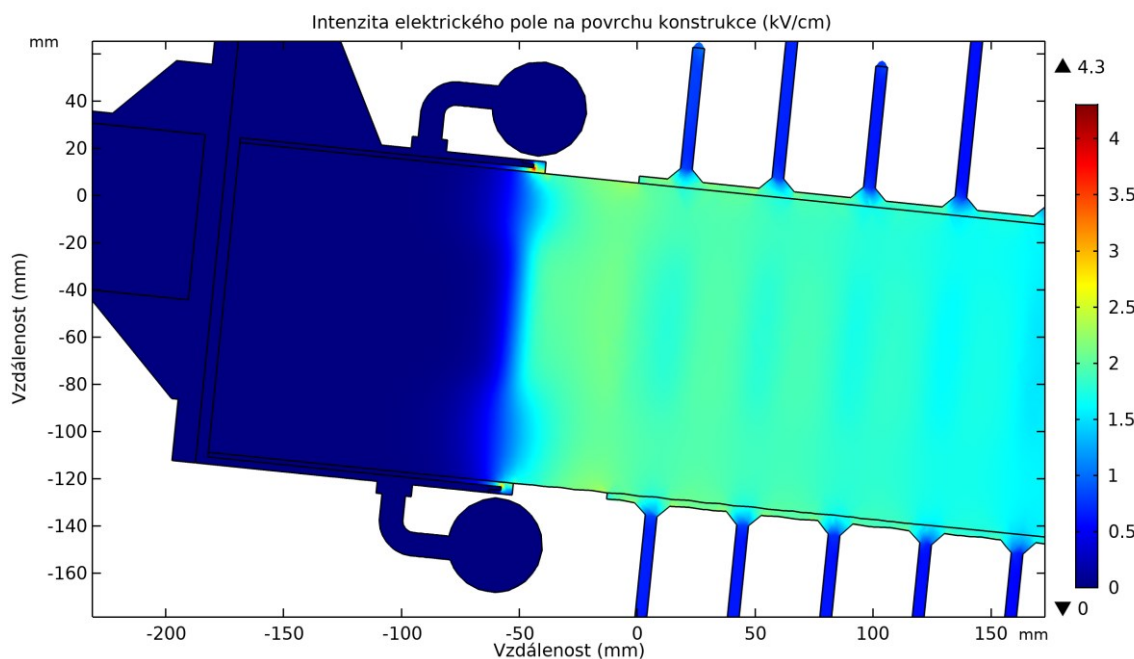
3.4.4.2 Výsledky 3D simulace modelu 400kV izolační konstrukce v elektrostatickém poli

Rozložení intenzity elektrického pole na povrchu 400kV izolační konstrukce je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 3.18). Místa s největší intenzitou elektrického pole (přibližně kolem $14 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) jsou na povrchu kapacitních „M-W“ kruhů a na kulové armatuře. Použitím těchto dvou armatur se elektrická intenzita nesoustřeďuje v oblastech trojných bodů, kde by mohla způsobovat lokální výboje, ale na samotných konstrukcích.



Obr. 3.18: Rozložení intenzity elektrického pole na povrchu 400kV izolační konstrukce

Následující obrázek (Obr. 3.19) znázorňuje rozložení intenzity elektrického pole v podélném řezu kompresního izolátoru. Použitím silikonového přechodu bylo dosaženo přesunutí intenzity elektrického pole, stejně jako u 110kV izolační konstrukce.



Obr. 3.19: Rozložení intenzity elektrického pole v podélném řezu kompresního izolátoru se silikonovým přechodem

3.5 Numerický model mechanického namáhání – SolidWorks

V následující podkapitole jsou porovnávány celkem tři topologie – 110kV izolační konstrukce s lehkou i se silnou nosnou armaturou a 400kV izolační konstrukce pouze se silnou nosnou armaturou. Lehká nosná armatura nebyla u 400kV izolační konstrukce použita, jelikož nevyhovuje nárokům na mechanické namáhání. Sledovanými veličinami mechanického namáhání jsou především ekvivalentní napětí von Mises σ_{ekv} (MPa), výsledné posunutí U_{RES} (mm) a bezrozměrný koeficient bezpečnosti FOS. Pokud na těleso působí vnější síly, vzniká v tělese mechanické napětí jako interpretace vnitřního rozložení sil na jednotku plochy. V případě trojrozměrného tělesa vzniká celkem šest složek napětí, které lze sloučit do tzv. ekvivalentního napětí von Mises. Pokud hodnota tohoto napětí překročí určitou mez (ve většině případů mez kluzu nebo pevnost v tahu), začíná se daný materiál trvale deformovat. Poměr maximálního dovoleného napětí ku ekvivalentnímu napětí von Mises se označuje jako koeficient (součinitel) bezpečnosti. [53] Aby navrhovaný model vyhovoval tomuto kritériu, musí být jeho koeficient bezpečnosti vždy větší než jedna. V praxi se běžně konstrukce navrhují na mnohem vyšší hodnoty koeficientu, především kvůli zvýšení životnosti a spolehlivosti daného zařízení. Výsledné posunutí pouze ukazuje, o jakou délku se výsledný deformovaný stav změnil oproti původnímu stavu.

Numerický model mechanického namáhání je řešen přímo v CAD programu SolidWorks pomocí doplňkového modulu Solidworks Simulation. Výsledné sestavy

jednotlivých variant 3D modelů kompozitních izolačních konstrukcí byly minimálně zjednodušeny. Vynechána byla pouze nosná armatura pro fázový vodič včetně samotného pracovního vodiče, které příliš neovlivní výsledky simulace. Doplnkový modul lze spustit kliknutím na tlačítko „Solidworks Simulation“ v záložce „Doplňkové moduly Solidworks“. Vedle této záložky se poté objeví nová záložka „Simulace“. Vložením nové studie pomocí tlačítka „Nová studie“ se objeví přehled studií, kterými lze řešit různé problémy. Pro tento případ postačí vybrat „Statická analýza“ v kategorii „Obecná simulace“ pro řešení mechanického namáhání na konstrukci.

3.5.1 Zvolené materiály a jejich vlastnosti

V další části je nutné jednotlivým dílům sestavy definovat použité materiály s jejich mechanickými vlastnostmi. Lze využít interní knihovny nebo přidat vlastní materiály. Byly zvoleny dva materiály z interní knihovny – konstrukční ocel s označením 1.8912 (S420NL) pro nosnou armaturu a koncové armatury tyčových izolátorů, hliník s označením 3.3549 (EN-AW 5182) pro koncové armatury kompresních izolátorů a kapacitní kruhy. Další dva materiály byly přidány jako vlastní nové materiály – silikonový kaučuk pro izolační obaly se stříškami a GFRP kompozit vyztužený skelnými E-vláknými pro jádra izolátorů. Seznam použitých materiálů s jejich mechanickými vlastnostmi lze vyčíst v následující tabulce:

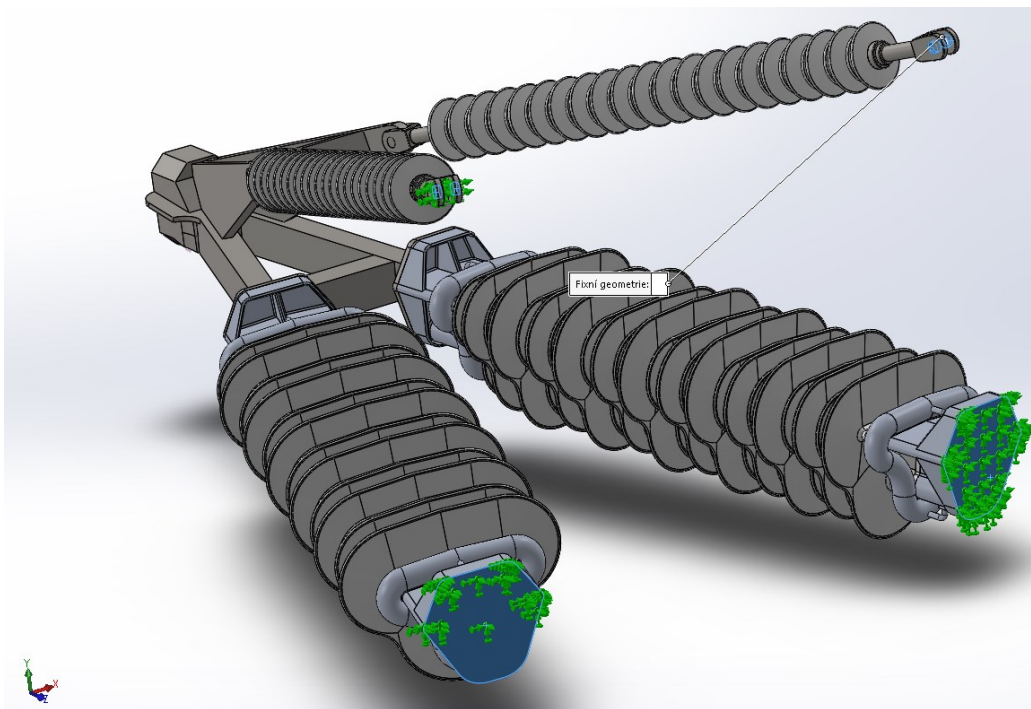
Vlastnost	Hliník	Konstrukční ocel	Silikonový kaučuk	GFRP kompozit
Modul pružnosti ($\frac{N}{m^2}$)	$6,69 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$7,93 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^{10}$
Poissonův poměr (-)	0,33	0,28	0,48	0,23
Modul pružnosti ve smyku ($\frac{N}{m^2}$)	$2,6 \cdot 10^{10}$	$7,9 \cdot 10^{10}$	$2,08 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^{10}$
Hustota ($\frac{kg}{m^3}$)	2650	7800	1250	2770
Pevnost v tahu ($\frac{N}{m^2}$)	$3,8 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$	$7,15 \cdot 10^6$	$3,445 \cdot 10^9$
Pevnost v tlaku ($\frac{N}{m^2}$)	-	-	$2,08 \cdot 10^7$	$1,08 \cdot 10^9$
Mez kluzu ($\frac{N}{m^2}$)	$3,2 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^8$	$4,61 \cdot 10^6$	-

Tab. 4: Seznam použitých materiálů a jejich vlastností – zdroj [30],[54],[55],[56],[57],[58],[59]

3.5.2 3D numerický model

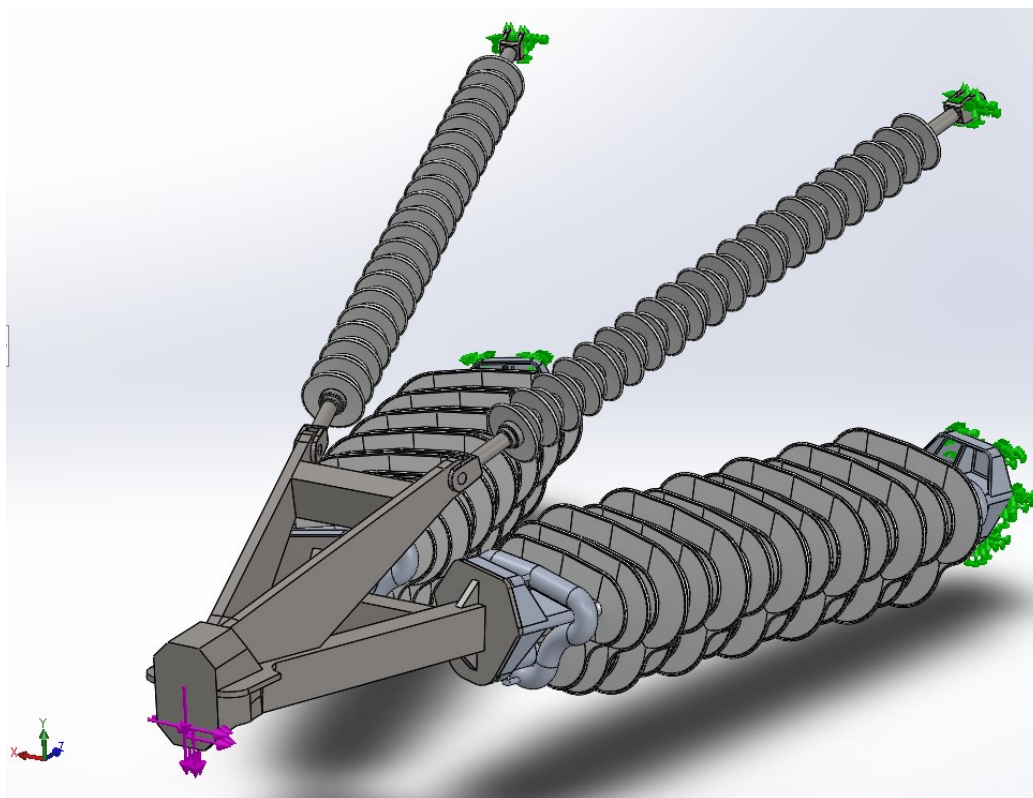
Po vložení studie a přiřazení materiálů jednotlivým dílům sestavy je nutné konstrukci uchytnit. Kliknutím levého tlačítka myši lze zvolit položku „Fixní geometrie“ v záložce

„Poradce uchycení“. V následujícím okně lze vybírat jednotlivé plochy, hrany či vrcholy přímo v modelu pro fixní uchycení konstrukce. Byly vybrány otvory pro šrouby v koncových armaturách tyčového izolátoru a zadní strana koncových armatur kompresních izolátorů, viz Obr. 3.20.



Obr. 3.20: Fixní uchycení izolační konstrukce

V další části bylo nutné definovat externí zatížení v záložce „Poradce externího zatížení“ zvolením položky „Síla“. V tomto případě byly uvažovány celkem tři osová mechanická zatížení – tahové (tah vlastního vodiče), tlakové (vlastní váha vodiče, námrazky) a přídavné (vítr). Zatížení je aplikováno na otvor v nosné konstrukci, který slouží pro instalaci armatury uchycující samotný vodič. V případě 110kV varianty izolační konstrukce bylo zvoleno tahové zatížení o velikosti 4 kN v záporném směru osy X, tlakové zatížení o velikosti 7 kN v záporném směru osy Y a přídavné zatížení o velikosti 3 kN v záporném směru osy Z, viz Obr. 3.21. V případě 400kV varianty byly zvoleny stejné síly navýšené o jeden a půl násobek svých velikostí. Protože na této napěťové hladině jsou použity trojsvazkové vodiče, které jsou těžší a mají větší plochu, mohou se na nich tvořit větší námrazky a působí na ně větší síly.



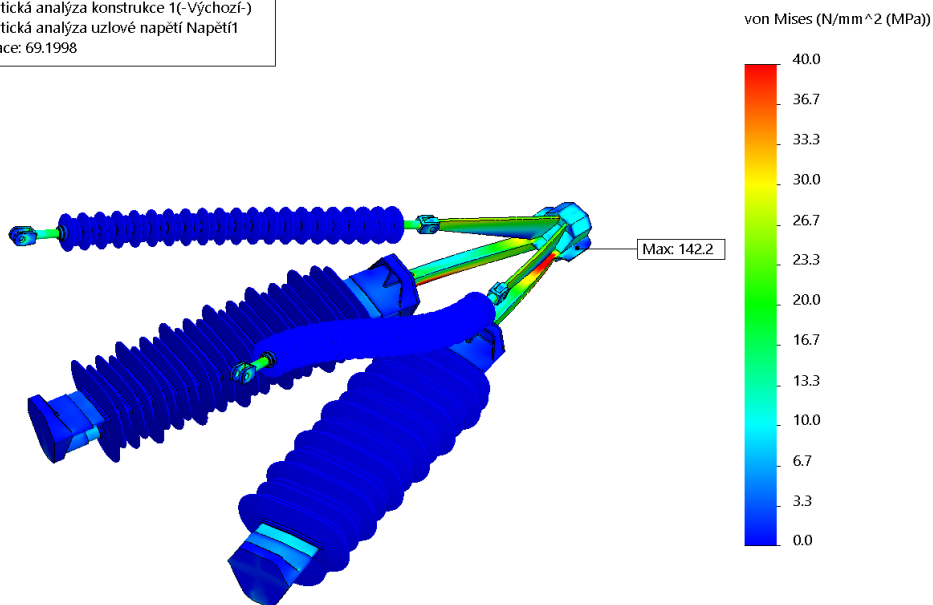
Obr. 3.21: Externí zatížení izolační konstrukce

V poslední části byla vytvořena výpočetní síť. V případě neúspěšného vytvoření sítě některých částí je potřeba zjemnit síť v těchto místech zmenšením velikosti nejmenšího elementu sítě. Po úspěšném zasiťování modelu lze spustit studii pomocí tlačítka „Spustit tuto studii“. Zobrazení výsledků simulace lze provést rozkliknutím položky „Výsledky“ a zvolit výstupní veličinu.

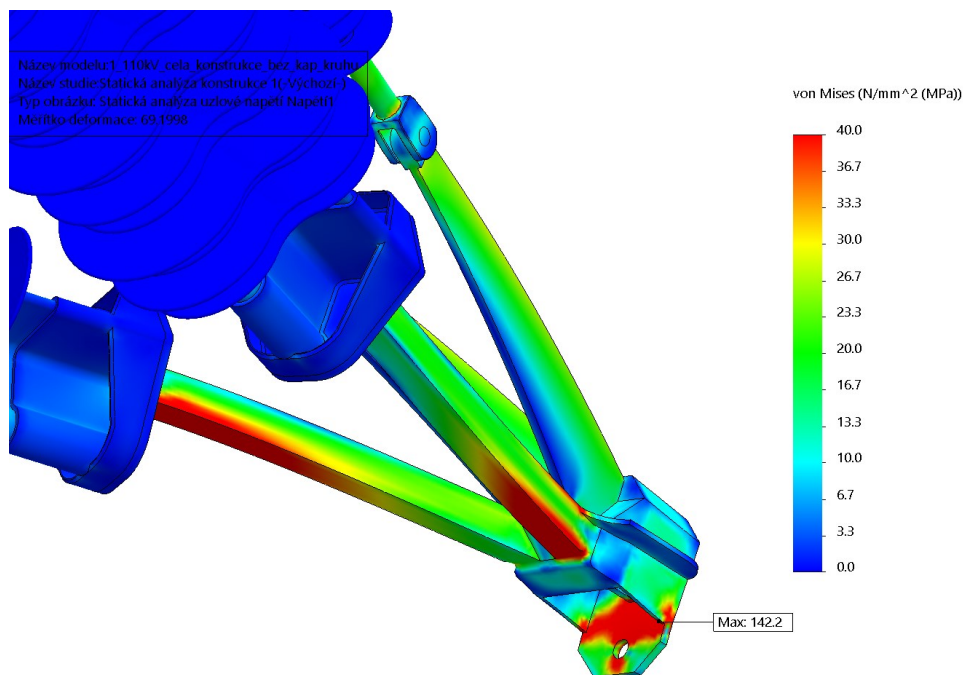
3.5.2.1 Výsledky 3D simulace 110kV izolační konstrukce s lehkou nosnou armaturou při mechanickém namáhání

Nadcházející obrázek (Obr. 3.22) znázorňuje rozložení ekvivalentního napětí von Mises na povrchu 110kV kompozitní izolační konstrukce s lehkou nosnou armaturou bez kapacitních kruhů. Vyšší hodnoty napětí jsou soustředěny zejména na koncových armaturách všech izolátorů. V případě lehké nosné armatury jsou patrná místa s vyšší koncentrací napětí. Zatímco horní plochy obdélníkových profilů (jeklů) jsou namáhány zejména na ohyb, dolní plochy jsou namáhány na tlak či krut. Maximální hodnota ekvivalentního napětí je cca 142 MPa v místech poblíž uchycení pro armaturu vodiče, viz Obr. 3.23.

Název modelu: 1_110kV_cela_konstrukce_bez_kap_kruhu
 Název studie: Statická analýza konstrukce 1(-Výchozí-)
 Typ obrázku: Statická analýza uzlové napětí Napětí1
 Měřítko deformace: 69,1998

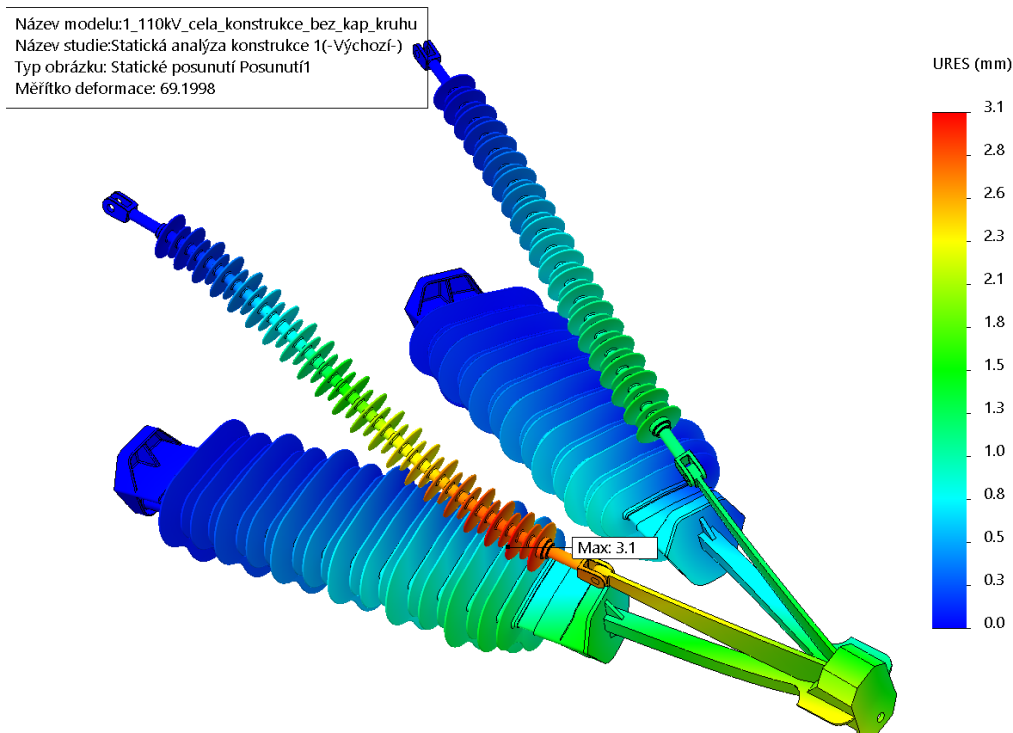


Obr. 3.22: Rozložení ekvivalentního napětí von Mises na povrchu 110 kV kompozitní izolační konstrukce s lehkou nosnou armaturou



Obr. 3.23: Detailní pohled na rozložení ekvivalentního napětí von Mises na povrchu lehké nosné armatury

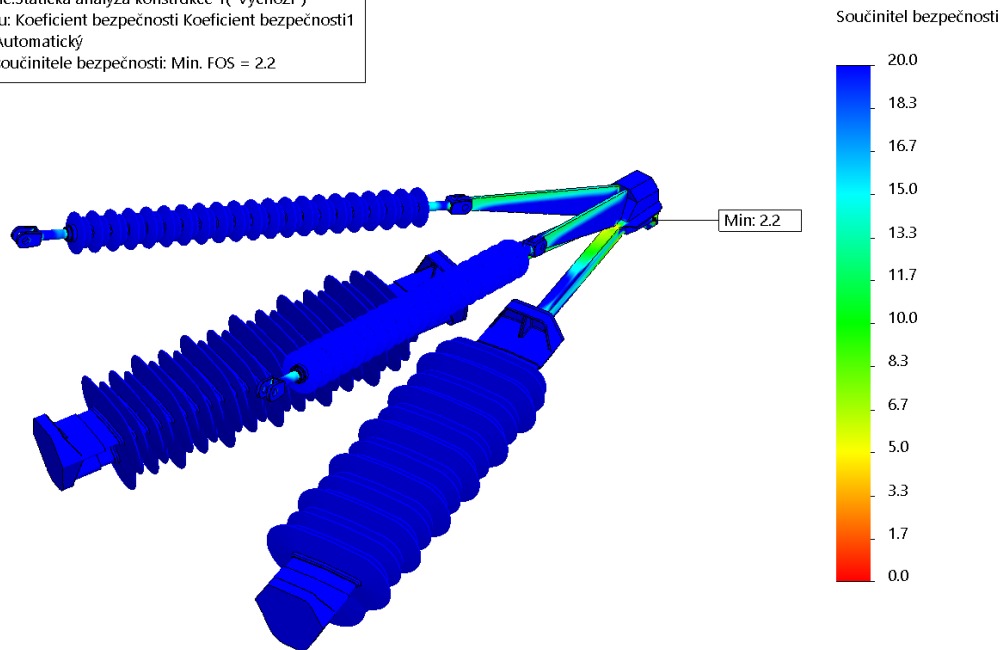
Další sledovanou veličinou je výsledné posunutí, které určuje změnu deformovaného stavu od původního stavu. Maximální hodnota výsledného posunutí je 3,1 mm na levém tyčovém izolátoru v izometrickém pohledu, viz Obr. 3.24.



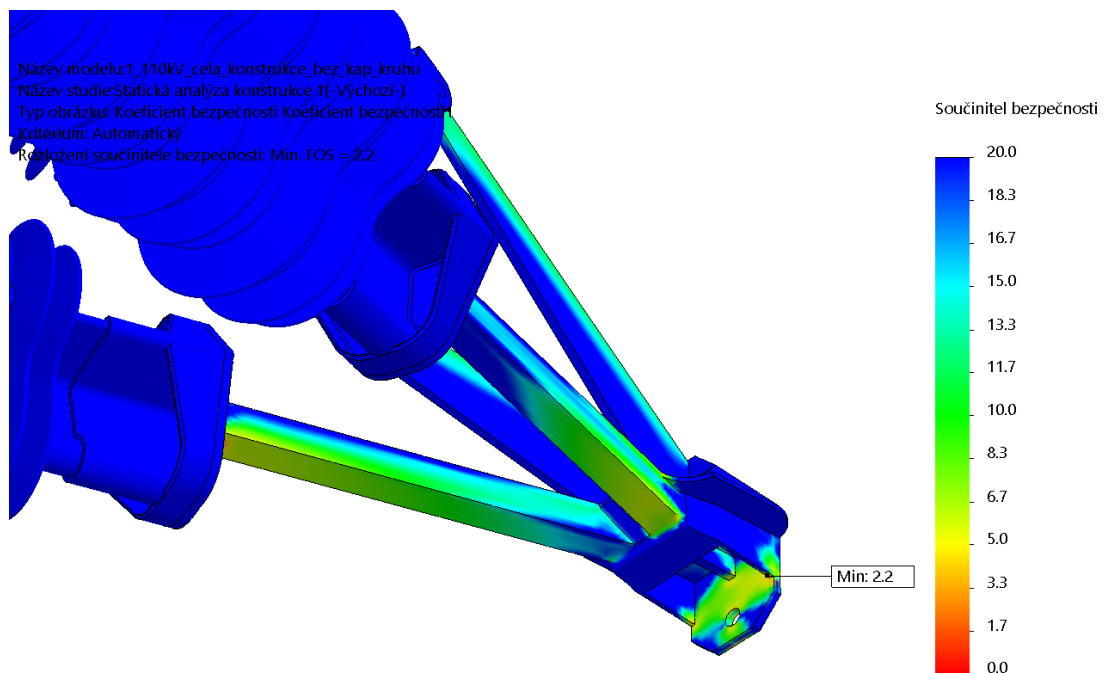
Obr. 3.24: Výsledné posunutí deformovaného stavu lehké nosné armatury od původního stavu

Poslední dva obrázky znázorňují rozložení koeficientu bezpečnosti FOS na povrchu lehké nosné armatury kompozitní izolační konstrukce. Jak již bylo řečeno na začátku podkapitoly, koeficient bezpečnosti určuje poměr maximálního dovoleného napětí (mez kluzu) ku ekvivalentnímu napětí von Mises. Při navrhování spolehlivých zařízení s předpokladem možného vysokého zatížení s opakujícími se cykly je snaha dosahovat vyšších hodnot FOS (minimálně 2–4). Avšak platí, že čím je vyšší tato hodnota, tím je spotřebováno více materiálu na dané zařízení a dochází tak k navyšování výrobních nákladů. Minimální hodnoty koeficientu FOS je 2,2 v místech poblíž uchycení pro armaturu vodiče, jako v případě rozložení ekvivalentního napětí von Mises, viz Obr. 3.25 nebo Obr. 3.26.

Název modelu: 1_110kV_cela_konstrukce_bez_kap_kruhu
 Název studie: Statická analýza konstrukce 1(-Výchozí-)
 Typ obrázku: Koeficient bezpečnosti Koeficient bezpečnosti
 Kritérium: Automatický
 Rozložení součinitele bezpečnosti: Min. FOS = 2.2



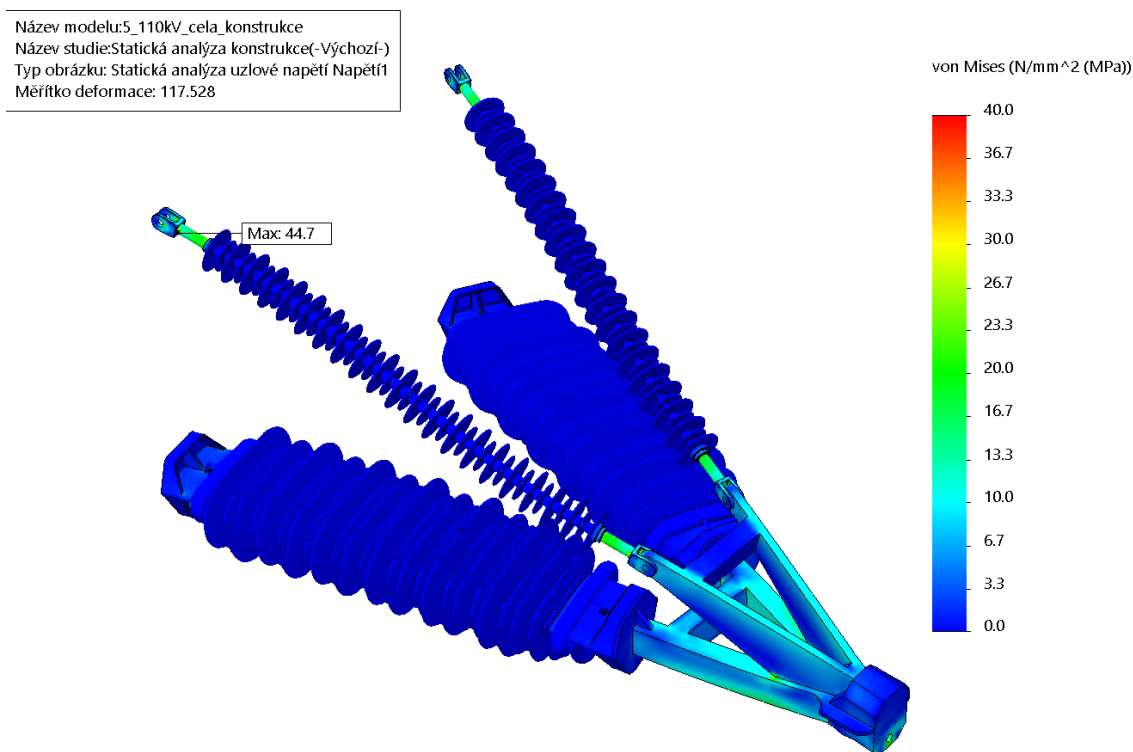
Obr. 3.25: Rozložení koeficientu bezpečnosti na povrchu lehké nosné armatury



Obr. 3.26: Detailní pohled na rozložení koeficientu bezpečnosti na povrchu lehké nosné armatury

3.5.2.2 Výsledky 3D simulace 110kV izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou při mechanickém namáhání

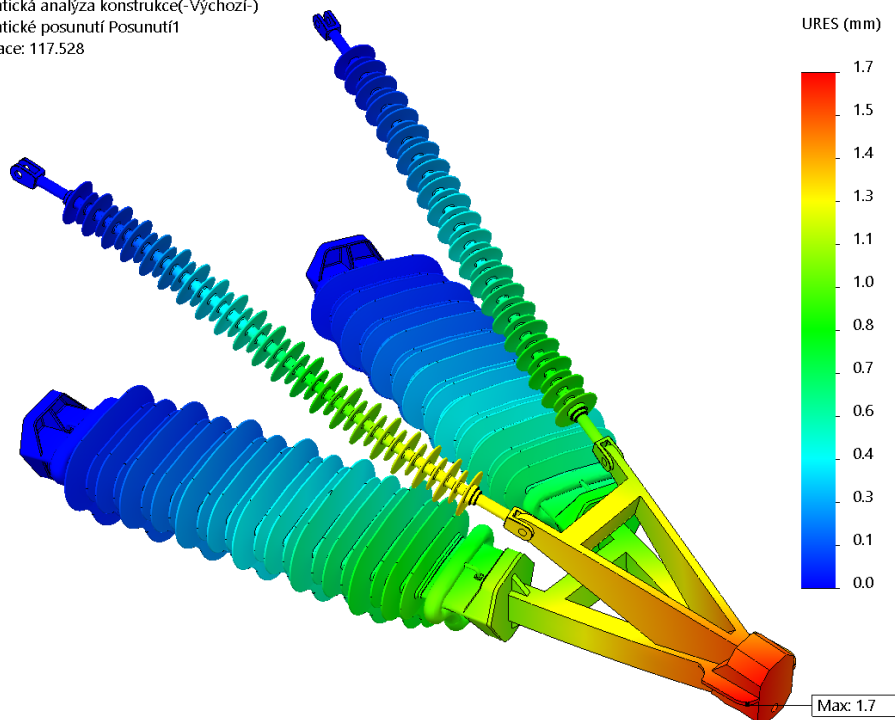
Předchozí 110kV topologie s lehkou nosnou armaturou není vhodná pro zajištění spolehlivosti provozu v náročnějších klimatických podmínkách. Nosná armatura byla posílena větší tloušťkou materiálu a vyztužena příčnými obdélníkovými profily (jekly). Hmotnost této topologie bez uchycovací armatury pro vodič a bez samotného vodiče je přibližně 154 kg. Nadcházející obrázek (Obr. 3.27) znázorňuje rozložení ekvivalentního napětí na izolační konstrukci se silnější nosnou armaturou. Maximální hodnoty napětí u této konstrukce (44,7 MPa) je dosaženo na koncové armatuře tyčového izolátoru na uzemněné (stožárové) části. Nejvíce jsou namáhány opět koncové armatury izolátorů. Protože konstrukce dosahuje velmi malých změn, je použito velké měřítko deformace.



Obr. 3.27: Rozložení ekvivalentního napětí von Mises na povrchu 110 kV kompozitní izolační konstrukce se silnější nosnou armaturou

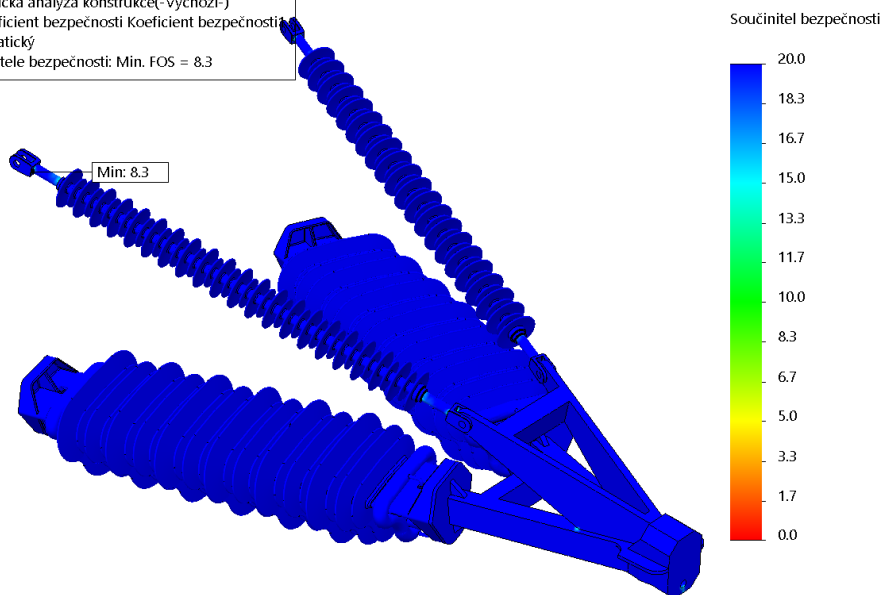
Na obrázku (Obr. 3.28) je znázorněno výsledné posunutí konstrukce se silnější armaturou od původního stavu. Maximální hodnoty posunutí této konstrukce (1,7 mm) je dosaženo v přední části nosné armatury. Poslední obrázek (Obr. 3.29) znázorňuje rozložení koeficientu bezpečnosti na povrchu silnější nosné armatury. Minimální hodnoty o velikosti 8,3 je dosaženo na koncové armatuře tyčového izolátoru na uzemněné (stožárové) části.

Název modelu: 5_110kV_cela_konstrukce
 Název studie: Statická analýza konstrukce(-Výchozí-)
 Typ obrázku: Statické posunutí Posunutí
 Měřítko deformace: 117.528



Obr. 3.28: Výsledné posunutí deformovaného stavu silnější nosné armatury od původního stavu

Název modelu: 5_110kV_cela_konstrukce
 Název studie: Statická analýza konstrukce(-Výchozí-)
 Typ obrázku: Koeficient bezpečnosti Koeficient bezpečnosti
 Kritérium: Automatický
 Rozložení součinitele bezpečnosti: Min. FOS = 8.3



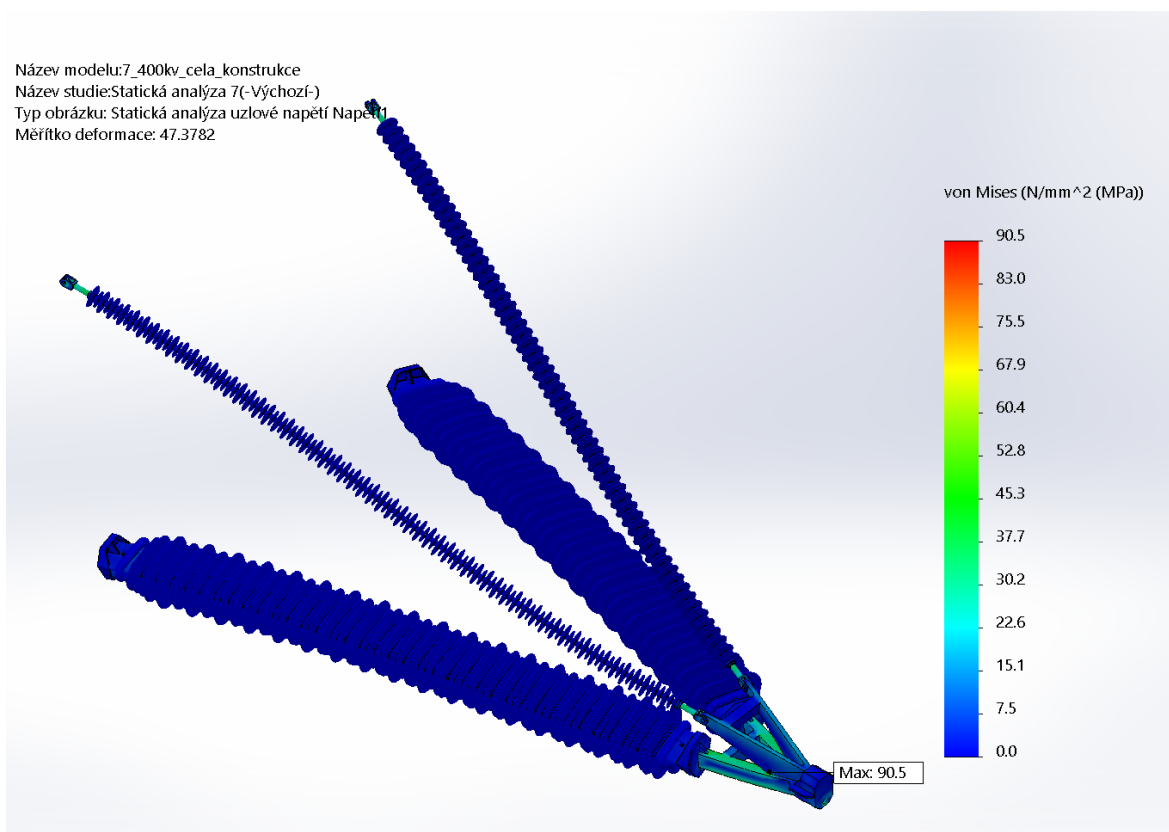
Obr. 3.29: Rozložení koeficientu bezpečnosti na povrchu silnější nosné armatury

Na základě těchto výsledků je potvrzena dostatečná odolnost silnější 110kV kompozitní izolační konstrukce vůči mechanickému namáhání, protože je dosaženo nízkých hodnot

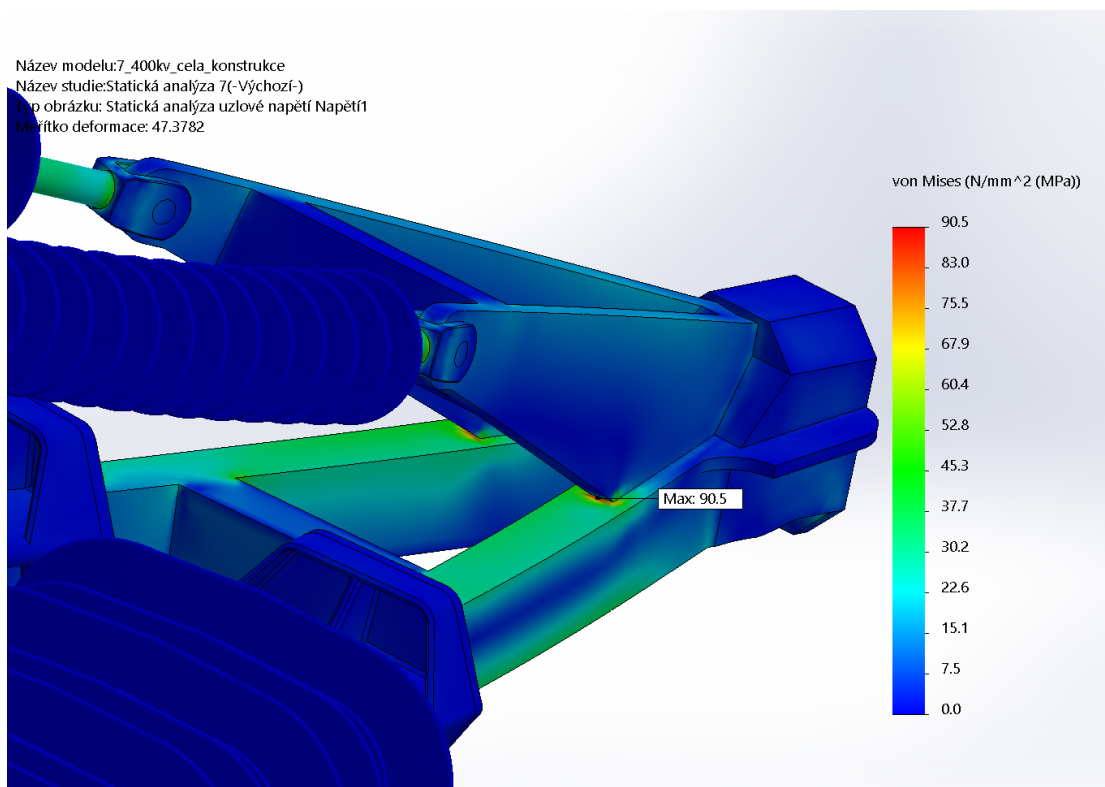
ekvivalentního napětí a vysokých hodnot součinitele bezpečnosti. Na základě těchto hodnot je patrná schopnost izolační konstrukce odolat mnohem větším silám, aniž by došlo k jejímu poškození.

3.5.2.3 Výsledky 3D simulace 400kV izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou při mechanickém namáhání

Následující obrázek (Obr. 3.30) znázorňuje rozložení ekvivalentního napětí von Mises na povrchu 400kV kompozitní izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou. Hmotnost celé konstrukce je přibližně 255 kg. Horní plochy obdélníkových profilů na nosné armatuře jsou namáhány na ohyb, dolní plochy jsou namáhány na tlak či krut. Maximální hodnota ekvivalentního napětí je cca 90,5 MPa v místech střetu nosných armatur pro tyčový a kompresní izolátor, viz Obr. 3.31.

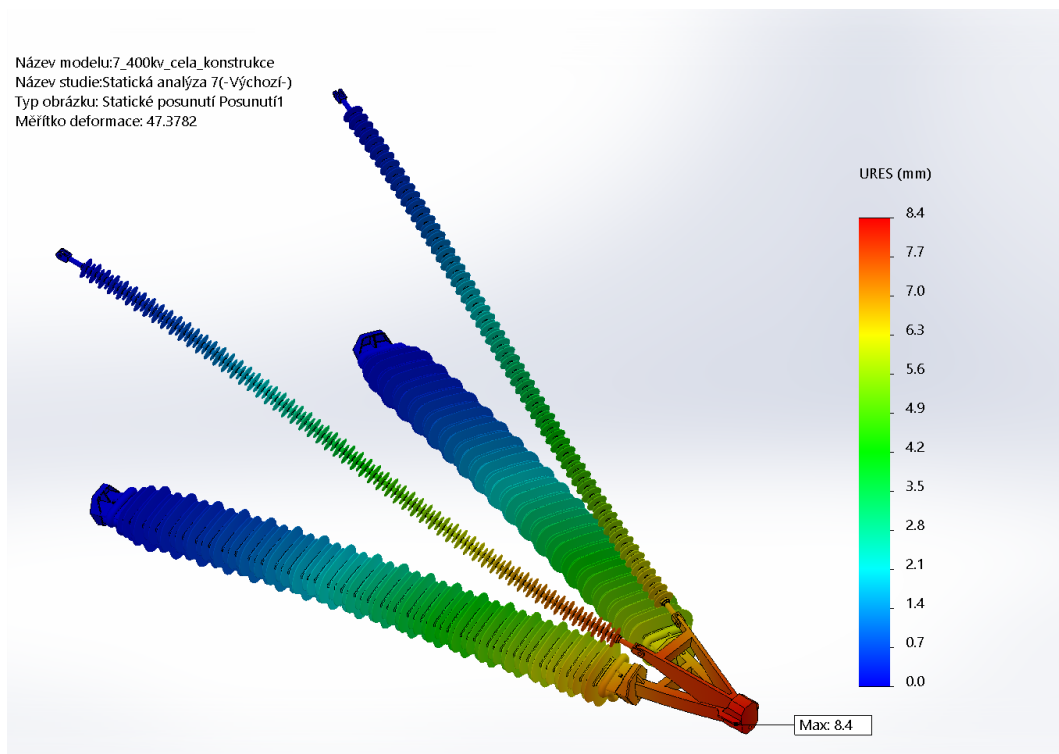


Obr. 3.30: Rozložení ekvivalentního napětí von Mises na povrchu 400kV kompozitní izolační konstrukce se silnější nosnou armaturou



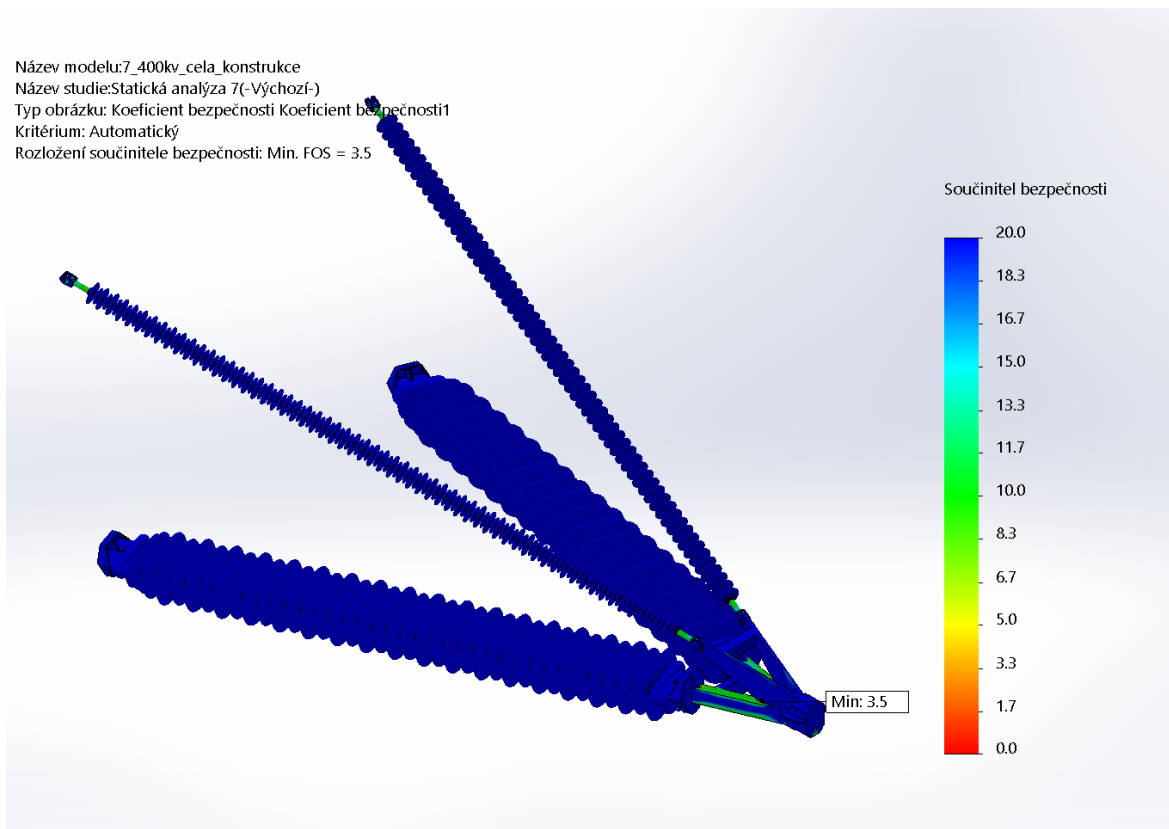
Obr. 3.31: Detailní pohled na rozložení ekvivalentního napětí von Mises na povrchu silné nosné armatury

Na obrázku (Obr. 3.32) je znázorněno výsledné posunutí 400kV konstrukce se silnější armaturou. Maximální hodnota posunutí je 8,4 mm v přední části nosné armatury, což je vzhledem k rozměrům konstrukce velmi malá hodnota.



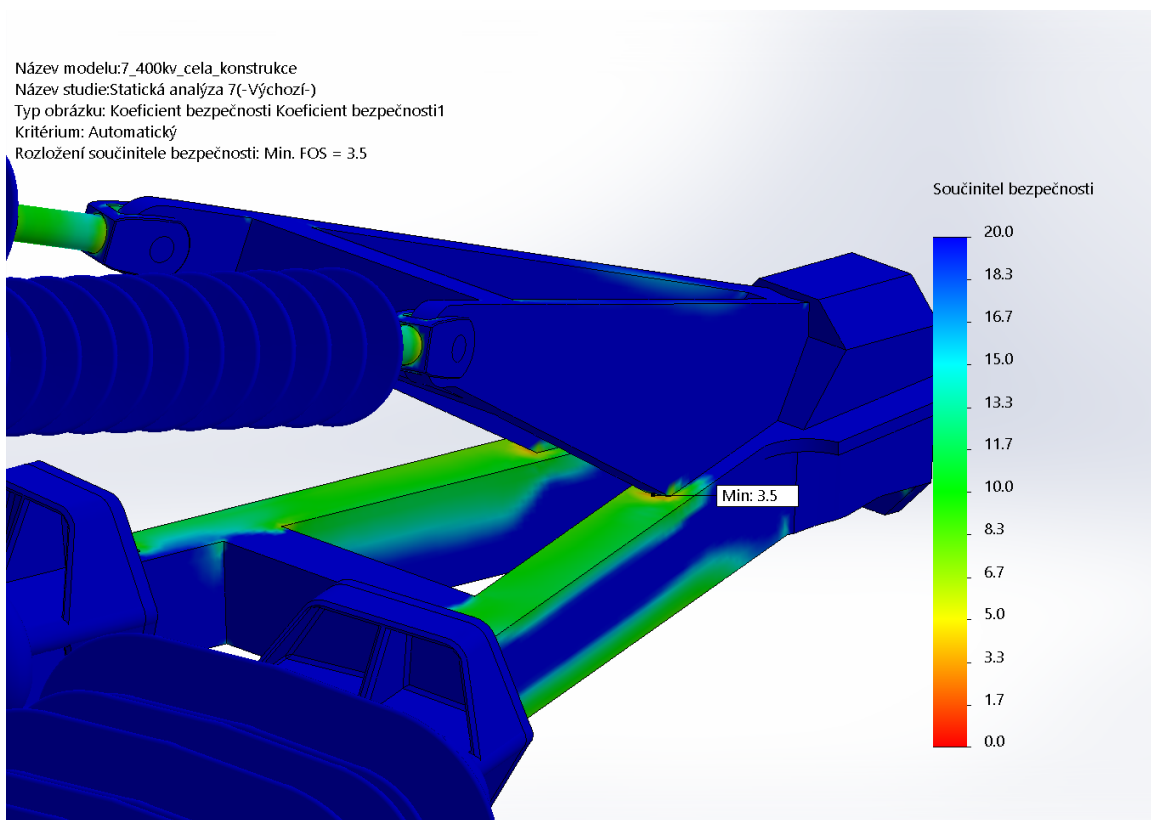
Obr. 3.32: Výsledné posunutí deformovaného stavu silnější nosné armatury od původního stavu

Poslední dva obrázky zobrazují rozložení koeficientu bezpečnosti FOS na povrchu 400kV izolační konstrukce. Obr. 3.33 znázorňuje rozložení FOS v izometrickém pohledu. Nejvíce namáhanými místy jsou koncové armatury tyčových izolátorů. Pro zvýšení hodnoty koeficientu FOS by bylo nutné osadit konstrukci většími tyčovými izolátory s většími koncovými armaturami.



Obr. 3.33: Rozložení koeficientu bezpečnosti na povrchu silnější nosné armatury

Nejmenší hodnota koeficientu bezpečnosti FOS je 3,5 v místech nosných prvků pro tyčový a kompresního izolátor, viz Obr. 3.34. Aby se izolační konstrukce stala více spolehlivou a došlo ke zvýšení koeficientu FOS, bylo by nutné dodatečně vyztužit oba nosné prvky dalším materiálem.



Obr. 3.34: Detailní pohled na rozložení koeficientu bezpečnosti na povrchu silné nosné armatury

Na základě výše zmíněných výsledků byla potvrzena mechanická odolnost 400kV kompozitní izolační konstrukce se silnější nosnou armaturou. Hlavní aplikační využití této konstrukce je při modernizaci vedení z napěťové hladiny 220 kV na 400 kV při využití stávajících 220 kV stožárů. V případě výstavby nového 400kV vedení lze při použití této konstrukce snížit velikost stožárů a celého systému, aniž by došlo ke zmenšení izolačních vzdáleností. Ovšem pokud by byla tato konstrukce určena do náročnějšího klimatického prostředí, bylo by nutné ji osadit silnějšími tyčovými izolátory pro zachování vysokého koeficientu bezpečnosti.

4 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala navrhováním počítačových modelů kompozitních izolačních konstrukcí, které mohou sloužit jako alternativní náhrada za ocelové konzolové konstrukce s izolátory na příhradových stožárech.

Pomocí navrhovacího softwaru byly vytvořeny počítačové modely 110 kV a 400 kV kompozitní izolační konstrukce. Tyto modely byly podrobeny 2D a 3D simulacím na elektrická a mechanická namáhání. Celkem bylo vytvořeno šest topologií izolačních konstrukcí. Pro první dvě 110kV topologie byla navržena lehká nosná armatura s i bez klasických trubicovitých kapacitních kruhů, které kopírovaly tvary jader izolátorů. Na základě nevyhovujících výsledků mechanického namáhání u obou variant byla lehká konstrukce nosné armatury celkově upravena a zpevněna příčnými obdélníkovými profily (jekly), čímž vznikly další dvě varianty se silnější nosnou armaturou. Přidáním kapacitních kruhů k jedné z nich vznikla další varianta konstrukce. Výsledky elektrického namáhání však nebyly uspokojující v místě rozhraní (trojný bod) mezi koncovou armaturou a jádrem kompresního izolátoru. Proto byla poslední 110kV topologie tvořena silnější nosnou armaturou s kapacitními kruhy a opatřena tzv. silikonovým přechodem. Úpravou koncové armatury kompresního izolátoru a vložením silikonového materiálu mezi inkriminované části vznikl silikonový přechod. Intenzita elektrického pole se „přemístila“ z povrchu jádra izolátoru do místa přechodu a její velikost na povrchu byla snížena pod stanovený limit. 400kV model konstrukce vznikl prodloužením jednotlivých tyčových a kompresních izolátorů předchozí 110kV topologie. Dále byl model opatřen speciálními kapacitními „M-W“ kruhy, které kopírují tvar stříšek a obklopují nosnou armaturu, a speciální kovovou koulí na nosné armatuře, aby vyhověl elektrickému namáhání.

Nejvhodnějšími modely kompozitní izolační konstrukce splňujícími cíl práce se staly 110kV konstrukce se silnou nosnou armaturou, trubicovitými kapacitními kruhy a silikonovým přechodem a 400kV kompozitní izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou, speciálními kapacitními „M-W“ kruhy a silikonovým přechodem. 110kV izolační konstrukce bez problémů odolala účinkům elektrického namáhání, které se běžně vyskytují na této napěťové hladině. Klasické trubicovité kapacitní kruhy na sebe převzaly větší část intenzity elektrického pole. Tím došlo k výraznému snížení její hodnoty pod $3,5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ v trojných bodech jednotlivých izolátorů. Silikonový přechod se stal klíčovým prvkem při řešení elektrického namáhání u obou konstrukcí, protože zamezil

případnému vzniku lokálních výbojů v trojných bodech. Tato 110kV konstrukce také odolala základnímu mechanickému zatížení při běžném provozním stavu. Vzhledem k nízkým hodnotám ekvivalentního napětí a vysokým hodnotám koeficientu bezpečnosti FOS je navrhovaná konstrukce velmi spolehlivým zařízením. Dokáže odolat mnohem větším mechanickým zatížením, aniž by došlo k jejímu poškození. 400kV izolační konstrukce také odolala účinkům elektrického namáhání, především kvůli speciálním kapacitním „M-W“ kruhům. Ty převzaly většinu intenzity elektrického pole na svoji konstrukci. Aby nedocházelo k vysoké koncentraci intenzity elektrického pole na hranách přední strany nosné armatury, byla v těchto místech nainstalována kovová kulová armatura. Díky kulovému tvaru se elektrické pole lépe rozložilo na povrchu nosné armatury a intenzita elektrického pole se snížila pod $18 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Použití silikonového přechodu opět snížilo intenzitu elektrického pole pod $3,5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ v trojném bodě kompresního izolátoru, jako u 110kV varianty. Při simulaci mechanického namáhání také došlo k potvrzení mechanické odolnosti konstrukce, ale vyšší hodnoty ekvivalentního napětí a nižší hodnoty koeficientu bezpečnosti poukázaly na slabá místa konstrukce. Takovými místy byly hlavně koncové armatury tyčových izolátorů nebo oblast styku nosných prvků pro izolátory na nosné armatuře. Pokud by tato izolační konstrukce byla použita v náročném klimatickém prostředí, mohla by být narušena její spolehlivost. Řešením by bylo použití silnějších tyčových izolátorů a vyztužení nosné armatury pro zachování vysokého koeficientu bezpečnosti.

Návrh izolační konstrukce je založen pouze na teoretické rovině. Pro využití návrhů v praxi a získání dalších poznatků o chování konstrukce v různých podmínkách je nutné vytvořit reálný prototyp a ten následně podrobit laboratorním vysokonapěťovým a mechanickým zkouškám dle českých ČSN norem.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MISHRA, A. P., R. S. GORUR a S. VENKATARAMAN. Evaluation of porcelain and toughened glass suspension insulators removed from service. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2008, **15**(2), 467–475. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2008.4483466
- [2] ČSN EN 62223. *Izolátory - Termíny a definice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [3] MOROCUTTI, T., T. BERG, M. MUHR a G. GODEL. Developments of high voltage porcelain post-insulators. *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation* [online]. 2012, 395–398. ISSN 01642006. Dostupné z: doi:10.1109/ELINSL.2012.6251497
- [4] HARID, Noureddine, A. NEKEB, H. GRIFFITHS a A. HADDAD. Flashover characteristics of polluted silicone rubber insulators exposed to artificial UV irradiation. In: *EIC 2014 - Proceedings of the 32nd Electrical Insulation Conference* [online]. B.m.: IEEE Computer Society, 2014, s. 440–444. ISBN 9781479927876. Dostupné z: doi:10.1109/EIC.2014.6869426
- [5] SONES, William a Sze Mei WONG. Overview on transient overvoltages and insulation design for a high voltage transmission system. *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2010* [online]. 2010, 12–17. Dostupné z: doi:10.1109/ICHVE.2010.5640875
- [6] *Types of Insulators in Transmission Lines | Electrical4u* [online]. [vid. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/types-of-electrical-insulator-overhead-insulator/>
- [7] ČSN IEC 120. *Rozměry spojení paličky a pánvičky součástí izolátorového řetězce*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.
- [8] ČSN IEC 471. *Rozměry spojení vidlice a oka součástí izolátorového řetězce*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1996.
- [9] ČSN EN 60305. *Izolátory pro venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 1 kV. Keramické nebo skleněné závěsné izolátory pro AC sítě. Charakteristiky talířových*

- izolátorů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997.
- [10] *Overhead Transmission Line Insulators - your electrical guide* [online]. [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.yourelectricalguide.com/2017/01/insulators-used-in-overhead.html>
- [11] EEE GUIDE. *Types of Insulators in Transmission Lines* [online]. 2020 [vid. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.eeeguide.com/types-of-insulators-in-transmission-lines/>
- [12] TAG CORPORATION. *Hardware Fittings* [online]. [vid. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://tagcorporation.net/products/hardware-fittings/>
- [13] BAYLISS, C.R. *Transmission and Distribution Electrical Engineering*. Ed. 2. 1999. ISBN 978-0-7506-4059-6.
- [14] HADAD A., Warne D.F. *Advances in High Voltage Engineering*. 2004. ISBN 978-0-85296-158-2.
- [15] ČSN EN 62217 ED.2. *Polymerové izolátory vysokého napětí pro vnitřní a venkovní použití - Obecné definice, zkušební metody a přejímací podmínky*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [16] KYASAGER, Shrikanth B a N D PRASANNA. Development of optimum slip ratio for high voltage porcelain insulator manufacturing. *International Research Journal of Engineering and Technology* [online]. 2016, **03**(02), 522–527 [vid. 2020-01-28]. ISSN 2395-0072. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/DEVELOPMENT-OF-OPTIMUM-SLIP-RATIO-FOR-HIGH-VOLTAGE-Kyasager-Siddaraju/58ad07cc455bbcf937d26eb70589586dea2996b3#references>
- [17] WIKIMEDIA COMMONS. *Insulator (electricity)* [online]. 2009 [vid. 2019-11-29]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Insulator_\(electricity\)#/media/File:Insulator_railways.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Insulator_(electricity)#/media/File:Insulator_railways.jpg)

- [18] ČSN EN 60672-1. *Keramické a skleněné izolační materiály - Část 1: Definice a třídění*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997.
- [19] EDVARD CSANYI. *Ceramic (Porcelain and Glass) Insulators* [online]. 2012. Dostupné z: <https://electrical-engineering-portal.com/ceramic-porcelain-and-glass-insulators>
- [20] PRIAMBODO, S.D.A. Brian Bramantyo Harsono ; Handrea Bernando Tambunan; Buyung Sofiarto Munir; Nur Widi. The Evaluation of Ceramic Insulator Performance around Thermal Power Plant in Indonesia. *2018 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)* [online]. 2018, 7. Dostupné z: doi:10.1109/ICSGTEIS.2018.8709112
- [21] GLAZETTE. *Annealed Glass | Toughened Glass | Heat Strengthened Glass* [online]. [vid. 2019-11-29]. Dostupné z: <http://www.glazette.com/Glass-Knowledge-Bank-79/Annealed-Glass.html>
- [22] SUWARNO a Fari PRATOMOSIWI. Application of RTV silicone rubber coating for improving performances of ceramic outdoor insulator under polluted condition. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI 2009* [online]. 2009, s. 581–587. ISBN 9781424449132. Dostupné z: doi:10.1109/ICEEI.2009.5254749
- [23] ELECTRICAL EASY. *Electrical Insulators - insulating materials and different types* [online]. [vid. 2019-11-29]. Dostupné z: <https://www.electriceasy.com/2016/11/electrical-insulators.html>
- [24] INDIGO POWER FZC. *Introduction to High Voltage Insulator Coating (HVIC)* [online]. [vid. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://www.indigo-power.com/HVIC-Introduction/>
- [25] ČSN IEC 383-1. *Izolátory venkovních vedení se jmenovitým napětím nad 1000 V. Část 1: Keramické nebo skleněné izolátory pro soustavy se střídavým napětím. Definice, zkušební metody a přejímací kritéria*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1996.

- [26] JAMALUDIN, Farah Adilah, Mohd Zainal ABIDIN AB-KADIR, Mahdi IZADI, Norhafiz AZIS, Jasronita JASNI a Muhammad Syahmi ABD-RAHMAN. Effects of RTV coating on the electrical performance of polymer insulator under lightning impulse voltage condition. *PLoS ONE* [online]. 2017, **12**(11), 1–14. ISSN 19326203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0187892
- [27] HALL, James F. History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 1993, **8**(1), 376–385. ISSN 19374208. Dostupné z: doi:10.1109/61.180359
- [28] FUJIAN RUISEN NEW MATERIALS CO., Ltd. *Composite Polymer Insulator, Silicone Rubber Insulator Manufacturer* [online]. [vid. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.cnruisen.com/product/composite-insulator.html>
- [29] ARMENTROUT, Daniel L., Maciej KUMOSA a Terry S. MCQUARRIE. Boron-free fibers for prevention of acid induced brittle fracture of composite insulator GRP rods. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2003, **18**(3), 684–693. ISSN 08858977. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRD.2003.813599
- [30] ZOGHI, Manoochehr. *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering* [online]. 2014. ISBN 978-1-4200-0374-1. Dostupné z: doi:10.1111/j.1574-6941.2007.00310.x
- [31] KAYSER, T., G. LINK, T. SEITZ, V. NUSS, J. DITTRICH, J. JELONNEK, F. HEIDBRINK a R. GHOMESHI. An applicator for microwave assisted pultrusion of carbon fiber reinforced plastic. In: *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* [online]. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. ISBN 9781479938698. Dostupné z: doi:10.1109/MWSYM.2014.6848325
- [32] NASRAT, L. S. a R. M. SHARKAWY. An investigation into the electrical properties of rubber blends for insulators. In: *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, EEIC 2007* [online]. 2007, s. 146–149. ISBN 1424404460. Dostupné z: doi:10.1109/EEIC.2007.4562607
- [33] SIMA, W., F. P. ESPINO-CORTES, Edward A. CHERNEY a Shesha H. JAYARAM. Optimization of corona ring design for long-rod insulators using FEM

- based computational analysis. In: *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation* [online]. 2004, s. 480–483. ISSN 01642006. Dostupné z: doi:10.1109/elinsl.2004.1380655
- [34] M'HAMDI, B., M. TEGUAR a A. MEKHALDI. Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2016, **23**(2), 1048–1057. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2015.005383
- [35] PHILLIPS, Andrew, John KUFFEL, Anthony BAKER, Jeffery BURNHAM, Anthony CARREIRA, Edward CHERNEY, William CHISHOLM, Masoud FARZANEH, Robert GEMIGNANI, Anthony GILLESPIE, Thomas GRISHAM, Robert HILL, Tapan SAHA, Bogdan VANCIA a Jennifer YU. Electric fields on AC composite transmission line insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2008, **23**(2), 823–830. ISSN 08858977. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRD.2007.911127
- [36] ZACHARIADES, C. *Development of an Insulating Cross-arm for Overhead Lines* [online]. B.m., 2014 [vid. 2020-04-22]. The University of Manchester. Dostupné z: [https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/theses/development-of-an-insulating-crossarm-for-overhead-lines\(dee98d28-229c-46c0-a8a8-2c8a93aa6078\).html](https://www.research.manchester.ac.uk/portal/en/theses/development-of-an-insulating-crossarm-for-overhead-lines(dee98d28-229c-46c0-a8a8-2c8a93aa6078).html)
- [37] AGENTURA ČAS. *Současné možnosti využití technických norem lícování* [online]. 2018 [vid. 2020-05-01]. Dostupné z: http://www.agentura-cas.cz/sites/default/files/public/download/PRTN/příručka_licovani.pdf
- [38] YANG, Xi, Naiyi LI, Zongren PENG, Jintao LIAO a Qingyu WANG. Potential distribution computation and structure optimization for composite cross-arms in 750 kV AC transmission line. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2014, **21**(4), 1660–1669. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2014.004130
- [39] LI, Yao Qin, Feng HUO a Jing NAN. Test and Simulation Analysis on the Electric Field Distribution Characteristics of UHVAC Composite Cross-arm Fittings. In: *iSPEC 2019 - 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Grid*

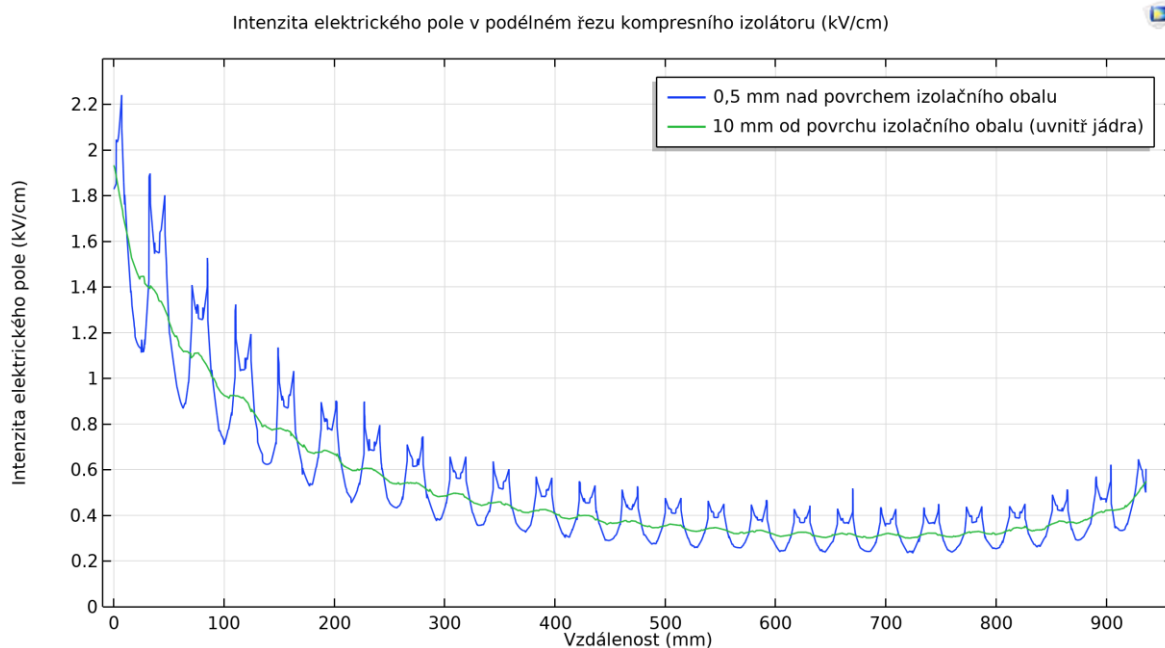
- Modernization for Energy Revolution, Proceedings* [online]. B.m.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019, s. 2905–2910. ISBN 9781728149301. Dostupné z: doi:10.1109/iSPEC48194.2019.8975212
- [40] ERGON ENERGY CORPORATION LIMITED. *Technical Specification for Composite Fibre Crossarms* [online]. [vid. 2020-05-02]. Dostupné z: https://www.ergon.com.au/__data/assets/pdf_file/0009/62001/ETS07-02-03.pdf
- [41] SHAKESPEARE COMPOSITE STRUCTURES. *Shakespeare power transmission and distribution poles, products* [online]. [vid. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.skp-cs.com/products/utility-poles-and-accessories>
- [42] SHAKESPEARE COMPOSITE STRUCTURES. *Composite Poles and Products for Power Transmission and Distribution* [online]. [vid. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://az276019.vo.msecnd.net/valmontstaging/docs/librariesprovider33/utility-product-literature/2017-t-d-catalog/shakespeare-utility-catalog-web-lr-bro1066.pdf?sfvrsn=2>
- [43] TZB INFO. *Stožáry VVN (III)* [online]. 2007 [vid. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4192-stozary-vvn-iii>
- [44] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd. 2001. ISBN 80-708-2826-9.
- [45] IVÁNEK, Lubomír. *Elektromagnetismus - učební text*. Vyd. 1. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1486-5.
- [46] THOUGHTCO. *Table of Electrical Resistivity and Conductivity* [online]. 2019 [vid. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>
- [47] LI, W., U. W. GEDDE a H. HILLBORG. Structure and electrical properties of silicone rubber filled with thermally reduced graphene oxide. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2016, **23**(2), 1156–1163. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2015.005485

- [48] MATWEB. *E-Glass Fiber, Generic* [online]. [vid. 2020-05-11]. Dostupné z: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=d9c18047c49147a2a7c0b0bb1743e812
- [49] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Permeability* [online]. 2016 [vid. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/permeability-d_1923.html
- [50] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Relative Permittivity - the Dielectric Constant* [online]. 2010 [vid. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d_1660.html
- [51] NOHÁČ, Karel. *Energetika* [online]. [vid. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Energetika.pdf>
- [52] FABRYKA KABLI ELPAR SP. Z O.O. *Produkty AFL-6, AFL-8, AFL-1,7* [online]. [vid. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.elpar.pl/produkt/afl-8>
- [53] *Nápověda: Součinitel bezpečnosti* [online]. [vid. 2020-06-13]. Dostupné z: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2014/CSY/?guid=GUID-D541AE00-F9FB-4B7E-A595-402219353010>
- [54] AZO MATERIALS. *Properties: E-Glass Fibre* [online]. [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>
- [55] AGY. *High Strength Glass Fibers* [online]. 2006 [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: https://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf
- [56] MATWEB. *E-Glass Fiber, Generic* [online]. [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=d9c18047c49147a2a7c0b0bb1743e812&ckck=1>
- [57] EL-WAZERY, M.S., M.I. EL-ELAMY a Said ZOALFAKAR. *Mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites* [online]. 2017 [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318599258_Mechanical_properties_of_glass_fiber_reinforced_polyester_composites

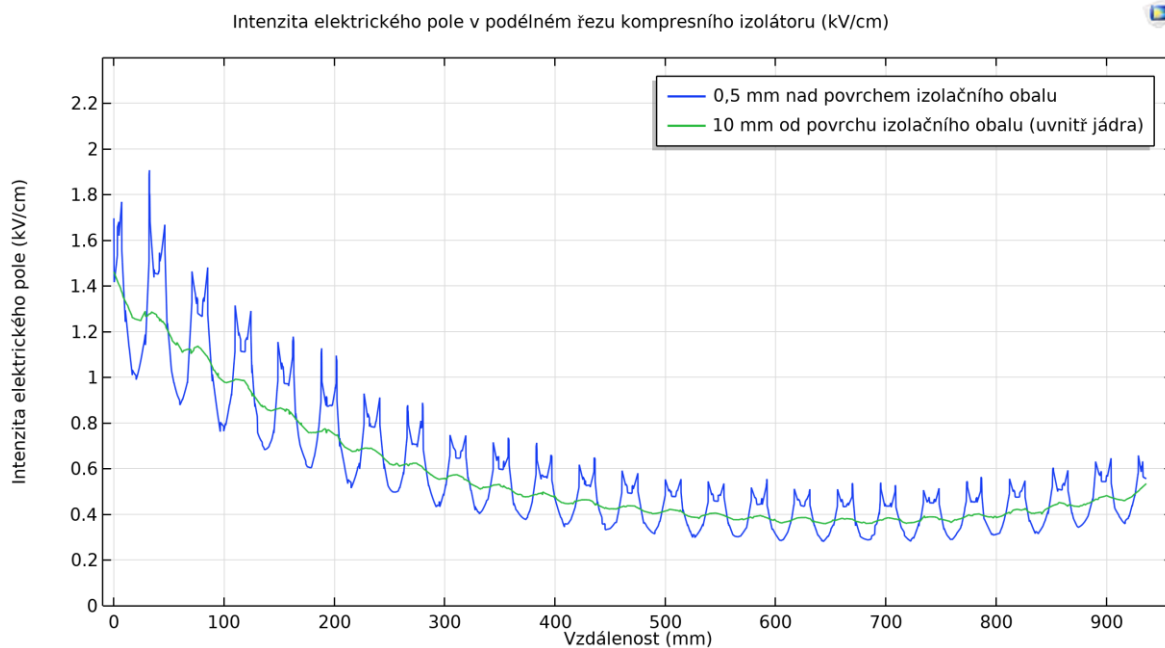
- [58] AZO MATERIALS. *Properties: Silicone Rubber* [online]. [vid. 2020-06-02].
Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=920>
- [59] *Overview of materials for Silicone Rubber* [online]. [vid. 2020-06-07]. Dostupné
z: [http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=cbe7a469897a47e
da563816c86a73520](http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=cbe7a469897a47e
da563816c86a73520)

Přílohy

Příloha A – 110kV kompozitní izolační konstrukce s lehkou nosnou armaturou

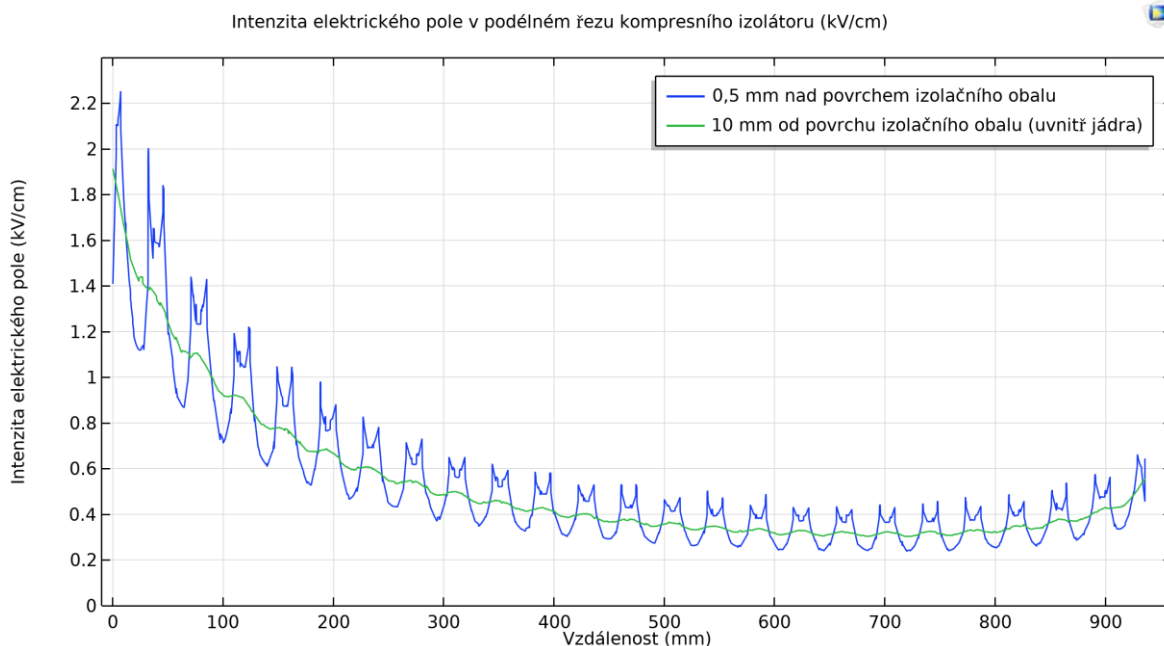


Obr. A1: Rozložení intenzity elektrického pole na stříškách kompresního izolátoru v podélném řezu bez kapacitních kruhů

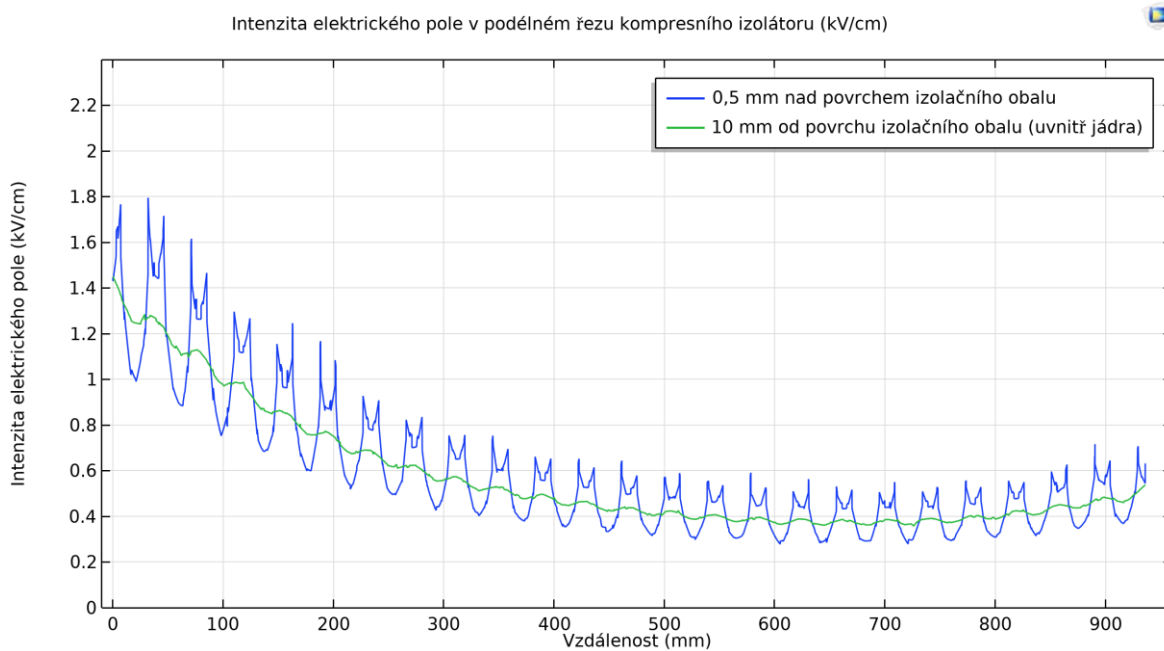


Obr. A2: Rozložení intenzity elektrického pole na stříškách kompresního izolátoru v podélném řezu s kapacitními kruhy

Příloha B – 110kV kompozitní izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou bez silikonového přechodu

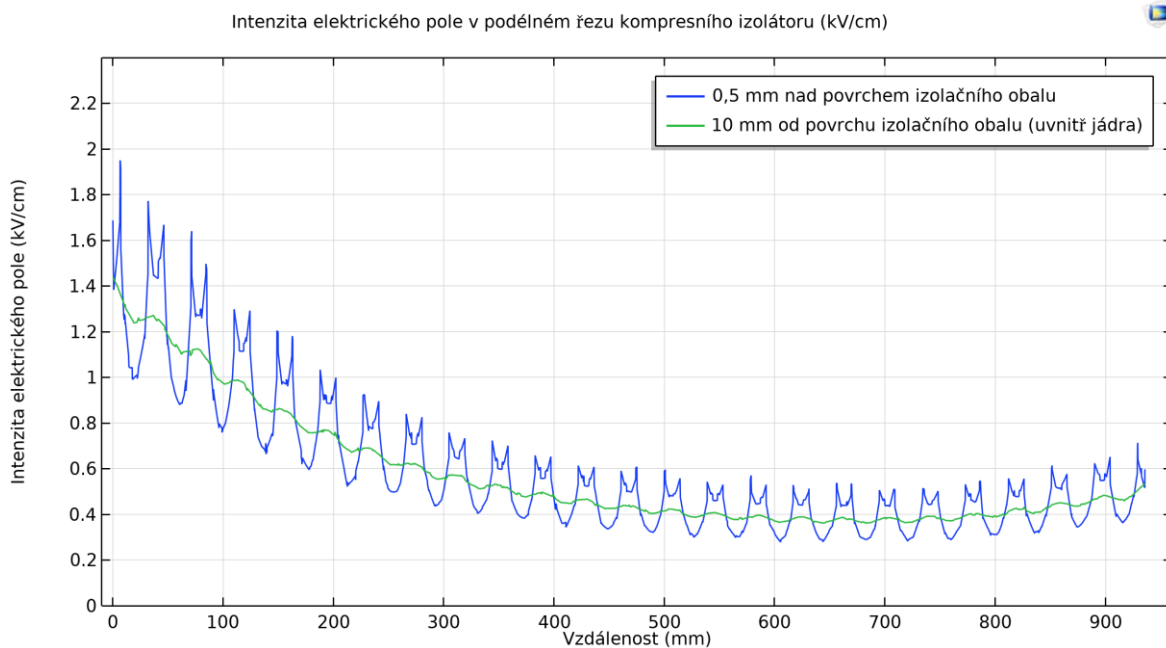


Obr. B1: Rozložení intenzity elektrického pole na stříškách kompresního izolátoru v podélném řezu bez kapacitních kruhů

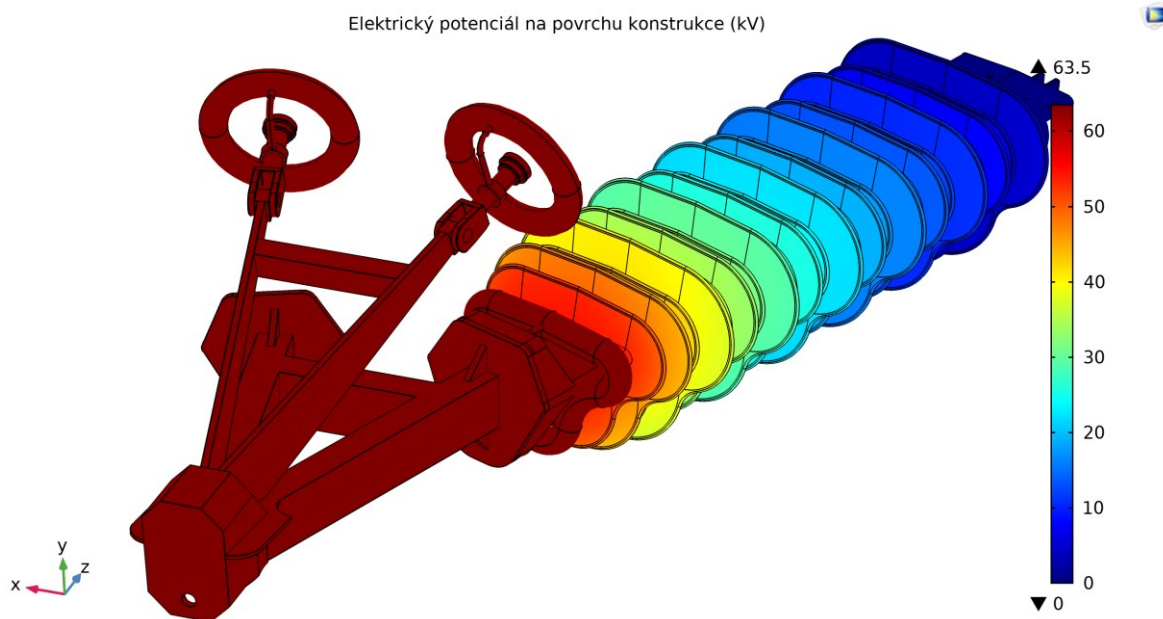


Obr. B2: Rozložení intenzity elektrického pole na stříškách kompresního izolátoru v podélném řezu s kapacitními kruhy

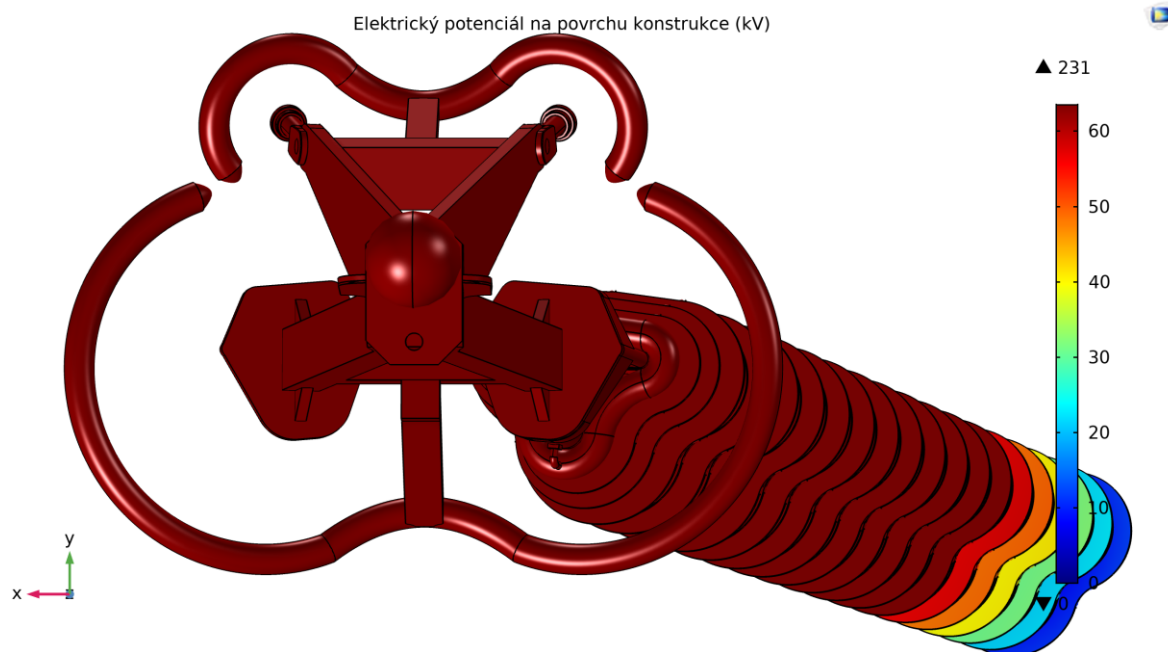
Příloha C – 110kV kompozitní izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou se silikonovým přechodem



Obr. C1: Rozložení intenzity elektrického pole na stříškách kompresního izolátoru v podélném řezu s kapacitními kruhy



Obr. C2: Rozložení elektrického potenciálu na 110kV izolační konstrukci se silikonovým přechodem a kapacitními kruhy

Příloha D – 400kV kompozitní izolační konstrukce se silnou nosnou armaturou se silikonovým přechodem

Obr. D1: Rozložení elektrického potenciálu na 400kV izolační konstrukci se silikonovým přechodem a kapacitními kruhy