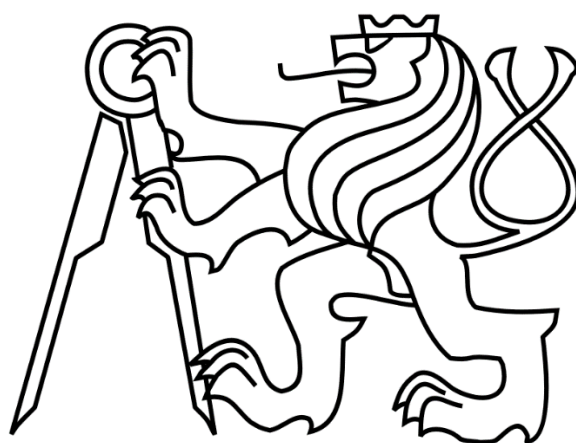


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Izolátorové závěsy na vedení přenosové soustavy

Diplomová práce

Bc. Lucia Susečko

Vedoucí práce: Vít Klein, Ph.D.

2021



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Susečková** Jméno: **Lucia** Osobní číslo: **461696**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Izolátorové závěsy na vedení přenosové soustavy

Název diplomové práce anglicky:

The transmission network insulator sets

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor problematiky izolátorových závěsů v přenosové soustavě – elektrické, mechanické a jiné požadavky.
2. Matematický popis výpočtu elektrostatických polí.
3. Výpočet elektrostatického pole vedení přenosové soustavy
4. Analýza použití a srovnání izolátorových závěsů používaných v přenosové soustavě

Seznam doporučené literatury:

1. Bohal, Ladislav, Erban, Pavel a Veselý, Jiří. Čtyřjazyčný slovník energetiky: čeština, angličtina, němčina, francouzština. Praha: Leda, 1999. ISBN 80-85927-68-3.
2. Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. Overhead Power Lines - Planning, Design, Construction. New York: Springer, 2003. ISBN 3540002979.
3. 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.
4. PNE 33 3300. Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.03.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **21.05.2021**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Anotace

Práce pojednává o problematice izolátorových závěsů používaných v přenosové soustavě. Popisuje jejich rozdělení, elektrické a mechanické požadavky. Představuje základní zákonitosti elektrostatického pole a limity dané nařízením vlády 291/2015 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. V dalších kapitolách práce byly provedeny simulace elektrostatických polí v okolí vedení přenosové soustavy s cílem potvrdit dodržení hygienických limitů daných výše zmíněným nařízením. V závěru práce byly vyhodnoceny zjištěné výsledky a rovněž srovnány izolátorové závěsy z hlediska praktického použití v přenosové soustavě.

Klíčová slova

Elektrostatické pole, intenzita elektrického pole, izolátory, izolátorové závěsy, přenosová soustava

Abstract

The thesis describes the problematic of insulator sets used in transmission lines. It describes different types of insulators, their electric and mechanic requirements. It presents basic laws of electrostatic field and also limits given by government regulation no. 291/20015 Sb. In next chapter, simulations of electrostatic fields near conductors were provided in order to confirm that limits given by above-mentioned regulation are compline. At the end of the thesis, the results of simulation were evaluated and insulator sets were compared.

Keywords

Electric field , electric field intensity, insulators, insulator sets, transmisson lines

Poděkování

Mé poděkování patří v první řadě vedoucímu této diplomové práce Ing. Mgr. Vítovi Kleinovi, Ph.D., za odborný dohled a cenné rady, které pro mě byly velkým přínosem při psaní této práce. Dále bych ráda poděkovala společnosti ČEPS Invest, a.s., zejména sekci Projektování vedení za poskytnuté podklady pro vypracování práce a v neposlední řadě Ing. Ivovi Pospíchalovi, Ing. Josefovi Veselému, Ing. Matějovi Valigovi a Ing. Petrovi Kúmmelovi za čas, který mi věnovali a neocenitelné rady.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Košicích, dne 20.5.2021

.....

Bc. Lucia Susečko

Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura rozvodu elektřiny (schematicky) (2).....	2
Obrázek 2: Přeshraniční spolupráce v rámci PS (4).....	3
Obrázek 3: Mapa přeshraničních vedení v soustavě ENTSO-E (3).....	4
Obrázek 4: Nejčastěji používané typy stožáru v PS (6).....	5
Obrázek 5: Čapkový izolátor. (14) 1 - čapka, 2 - talíř, 3 - palička.....	13
Obrázek 6: Talířový izolátor se spojením vidlice a oka (15).....	13
Obrázek 7: Tyčový izolátor (16).....	14
Obrázek 8: Provedení tyčových izolátorů. (17) 1 - vidlice-oko, 2 - čapka-palička.....	14
Obrázek 9: Nosná svorka výkyvná (19).....	15
Obrázek 10: Polokotevní izolátorový závěs typu A.....	16
Obrázek 11: Kotevní svorky. Zleva: lisovaná, klínová a kuželová (19).....	17
Obrázek 12: Model tyčového izolátorové závěsu se zobrazením armatur.....	18
Obrázek 13: Siločáry elektrického pole (24).....	33
Obrázek 14: Ekvipotenciální linie (25).....	37
Obrázek 15: Intenzita elektrického pole nabitého vodiče (23).....	40
Obrázek 16: Intenzita elektrického pole nabité koule (23).....	42
Obrázek 17: Intenzita elektrického pole nabitého prstence (23).....	43
Obrázek 18: Síť vygenerovaná programem Agros2D.....	49
Obrázek 19: Prostorové rozložení potenciálu pro jeden vodič.....	50
Obrázek 20: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro jeden vodič.....	51
Obrázek 21: Graf intenzity elektrického pole ve vodorovné ose vodiče.....	52
Obrázek 22: Prostorové rozložení potenciálu pro dvousvazek.....	54
Obrázek 23: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro dvousvazek.....	55
Obrázek 24: Prostorové rozložení potenciálu pro trojsvazek.....	56
Obrázek 25: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro trojsvazek.....	57
Obrázek 26: Graf porovnání intenzity elektrického pole s a bez použití zemnicích lan.....	61
Obrázek 27: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/12 T$	62
Obrázek 28: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/4 T$	63

Obrázek 29: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/3 T$	64
Obrázek 30: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=3/4 T$	65
Obrázek 31: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Mačka 1 x 400 kV v čase $t=1/12 T$	67
Obrázek 32: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/3 T$	68
Obrázek 33: Graf hodnot intenzity elektrického pole v 1,8 m od povrchu pro stožár typu Portál	71
Obrázek 34: Graf hodnot intenzity elektrického pole v 1,8 m od povrchu pro stožár typu Mačka	72
Obrázek 35: Přenosová soustava ČR	85
Obrázek 36: Nosný stožár typu Portál s dvojitými nosnými izolátorovými závěsy s jednobodovým uchycením	86
Obrázek 37: Detail dvojitého nosného izolátorového závěsu s jednobodovým uchycením	86
Obrázek 38: Nosný stožár typu Vertikál s nosnými V-závěsy.....	87
Obrázek 39: Kotevní stožár typu Portál s trojitými kotevními izolátorovými závěsy s trojbodovým uchycením	88

Seznam tabulek

Tabulka 1: Délky vedení PS.....	2
Tabulka 2: AlFe lano (8).....	7
Tabulka 3: Druhy keramických izolátorů (11).....	10
Tabulka 4: Druhy skleněných izolátorů.....	11
Tabulka 5: Požadovaná výdržná napětí izolátorových závěsů (21).....	20
Tabulka 6: Standardní elektrické požadavky pro sítě do 245 kV (21).....	21
Tabulka 7: Standardní elektrické požadavky pro sítě nad 245 kV (21).....	21
Tabulka 8: Maximální hladiny rušivého napětí (21).....	22
Tabulka 9: Hodnoty výdržných ekvivalentních hustot nánosů soli (21).....	23
Tabulka 10: Doporučené hodnoty zkušebních proudů pro zkratové zkoušky (21).....	24
Tabulka 11: Standardní zatěžovací stavy (21).....	27
Tabulka 12: Parametry fázového vodiče (29).....	47
Tabulka 13: Parametry stožáru (30).....	48
Tabulka 14: Parametry simulace.....	48
Tabulka 15: Hodnoty trojfázového napětí v různých částech periody pro simulaci elektrostatických polí na stožárech.....	58
Tabulka 16: Výšky umístění vodičů na stožáru typu Portál 1x400 kV.....	60
Tabulka 17: Výšky umístění vodičů na stožáru typu Mačka 1x400 kV.....	66
Tabulka 18: Hodnoty trojfázového napětí v různých částech periody pro simulaci elektrostatických polí na stožárech typu Mačka.....	66
Tabulka 19: Hodnoty trojfázového napětí v různých částech periody pro hodnocení hygienických limitů.....	70
Tabulka 20: Vzdálenost, ve které se dosáhne dodržení hygienických limitů pro stožár typu Portál.....	71
Tabulka 21: Vzdálenost, ve které se dosáhne dodržení hygienických limitů pro stožár typu Mačka.....	73
Tabulka 22: Předpokládaný střední čas do selhání pro různé typy izolátorů.....	76

Obsah

1	Úvod.....	1
1.1	Přenosová soustava České republiky.....	2
1.2	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny.....	3
1.3	Typizované stožáry v přenosové soustavě.....	5
1.4	Vodiče používané na vedení přenosové soustavy.....	7
2	Izolátory.....	8
2.1	Dělení izolátorů.....	9
2.1.1	Dělení dle použitých materiálů.....	10
2.1.1.1	Keramické izolátory.....	10
2.1.1.2	Skleněné izolátory.....	10
2.1.1.3	Kompozitní izolátory.....	11
2.1.2	Dělení dle konstrukce.....	13
2.1.2.1	Talířové izolátory.....	13
2.1.2.2	Tyčové izolátory.....	14
2.1.3	Dělení dle funkce.....	15
2.1.3.1	Podpěrné izolátory.....	15
2.1.3.2	Nosné izolátorové závěsy.....	15
2.1.3.3	Kotevní izolátorové závěsy.....	16
2.1.3.4	Polokotevní izolátorové závěsy.....	16
2.2	Příslušenství izolátorů a vodičů.....	17
3	Elektrické a mechanické požadavky na izolátorové závěsy.....	19
3.1	Standardní elektrické požadavky.....	20
3.2	Požadavky na rádiové rušení a zhášecí napětí koróny.....	22
3.3	Požadavky na chování při znečištění.....	23
3.4	Požadavky na obloukový zkrat.....	24

3.5	Požadavky na akustický hluk	25
3.6	Mechanické požadavky	26
3.6.1	Standardní zatěžovací stavy	27
3.7	Další požadavky	28
4	Matematický popis elektrostatického pole.....	29
4.1	Elektromagnetické pole	30
4.2	Elektrostatické pole	33
4.2.1	Gaussova věta elektrostatiky	34
4.2.2	Elektrické pole v materiálech	35
4.2.3	Definice napětí v elektrickém poli	36
4.2.4	Definice potenciálu v elektrickém poli	37
4.2.5	Definice kapacity v elektrickém poli.....	38
4.3	Elektrostatické pole jednoduchých objektů	39
4.3.1	Elektrické pole nabitého vodiče	40
4.3.2	Elektrické pole nabitě vodivé koule	42
4.3.3	Elektrické pole na ose nabitého prstence	43
4.4	Hodnoty intenzity elektrického pole stanovené nařízením vlády č. 291/2015 Sb.....	44
5	Elektrostatické pole vedení přenosové soustavy.....	45
5.1	Simulační program Agros2D.....	46
5.2	Numerické řešení elektrostatického pole jednoho vodiče	47
5.3	Numerické řešení elektrostatického pole vodičů jedné fáze ve svazku.....	53
5.4	Numerické řešení elektrostatického pole jednoduchého vedení.....	58
5.4.1	Numerické řešení elektrostatického pole vedení na stožáru typu 1 x 400 kV Portál – nosný 60	
5.4.2	Numerické řešení elektrostatického pole vedení na stožáru typu 1 x 400 kV Mačka – nosný	66
5.5	Porovnání výsledků simulací intenzity elektrického pole pro stožáry typu Portál a Mačka	69

5.6	Vyhodnocení elektrostatického pole jednoduchého vedení 1,8 m od zemského povrchu.....	70
6	Analýza použití a srovnání izolátorových závěsů používaných v přenosové soustavě	74
6.1	Srovnání izolátorů na základě mechanických a elektrických vlastností.....	75
6.2	Analýza použití izolátorových závěsů v návaznosti na provedené simulace	77
7	Závěr	78
8	Použitá literatura	80
	Příloha 1 – Mapa přenosové soustavy ČR	85
	Příloha 2 – Fotografie nosných izolátorových závěsů.....	86
	Příloha 3 – Fotografie kotevních izolátorových závěsů	88
	Příloha 4 – Distanční rozpěrky používané v přenosové soustavě	89

1 Úvod

V této kapitole bude ve zkratce popsána přenosová soustava České republiky a také její propojení s Evropskou sítí provozovatelů přenosových soustav elektřiny ENTSO-E. Dále popíšeme konstrukční části přenosové soustavy, a to stožáry a vodiče.

V dalších kapitolách pak budou podrobněji rozepsané informace o izolátorech používaných v přenosové soustavě a jejich příslušenství.

Úvodní část této práce tak bude tvořit základní soubor informací potřebných pro další zkoumání problematiky izolátorů a přenosové soustavě.

1.1 Přenosová soustava České republiky

Přenosovou soustavou České republiky tvoří vedení 400 kV, 220 kV a vybraná vedení 110 kV.

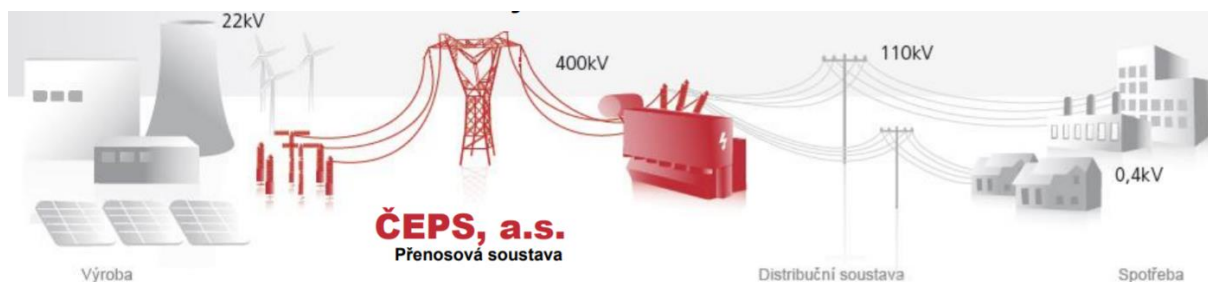
(1) Páteřní síť tvoří zejména vedení 400 kV, zatímco vedení 220 kV, jehož výstavba byla ukončena v 70. letech, tvoří převážně záložní vedení.

Vedení	Délka [km]
400 kV	3735
220 kV	1909
110 kV	84

Tabulka 1: Délky vedení PS

Páteřní síť přenosové soustavy slouží hlavně k rozvodu výkonu z míst výroby, elektráren, do rozvodu a transformoven, kde je předán do distribuční soustavy. Prostřednictvím distribuční soustavy je elektrická energie dále předaná až ke konečným spotřebitelům. K přenosové soustavě nyní patří 43 rozvodů a 78 transformoven. Na obrázku v příloze č. 1 lze vidět rozmístění vedení 400 a 220 kV a také rozvodny přenosové soustavy.

Provozovatelem přenosové soustavy České republiky je společnost ČEPS, a.s., společnost je držitelem licence na přenos elektrické energie dle zákona č. 458/2000 Sb..



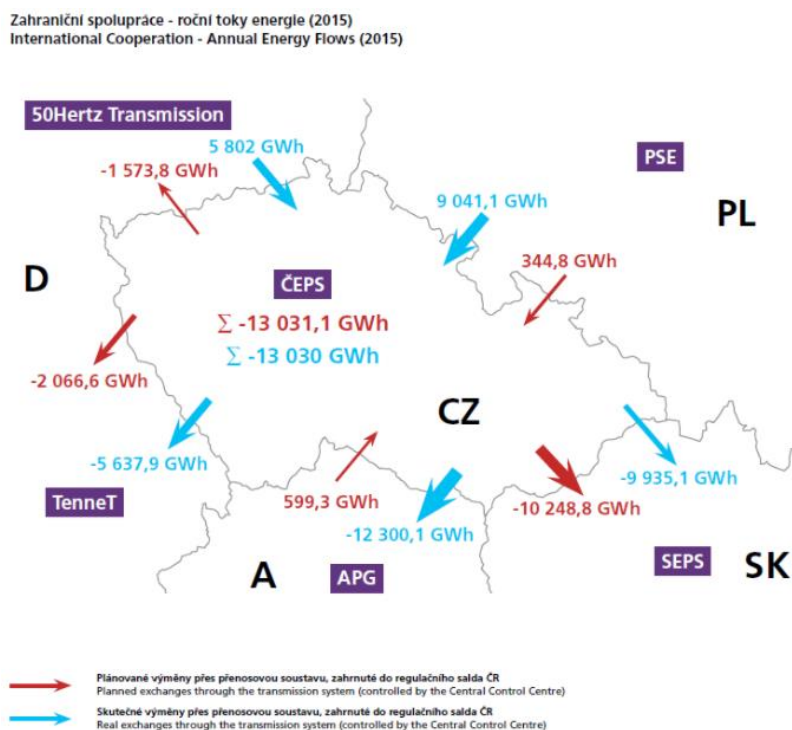
Obrázek 1: Struktura rozvodu elektřiny (schematicky) (2)

1.2 Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny

Přenosová soustava České republiky je napojena na Evropskou síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny, ENTSO-E, pomocí přeshraničních vedení. ENTSO-E je sdružení 36 zemí, potažmo 43 provozovatelů elektroenergetických soustav. ENTSO-E je dále rozdělená do pěti regionálních skupin, česká Republika patří do skupiny kontinentální Evropy¹. Toto propojení zabezpečuje synchronní spolupráci naší elektroenergetické soustavy s ostatními členskými státy. Přeshraniční vedení a členové ENTSO-E jsou přehledně zobrazeny na obr. 3.

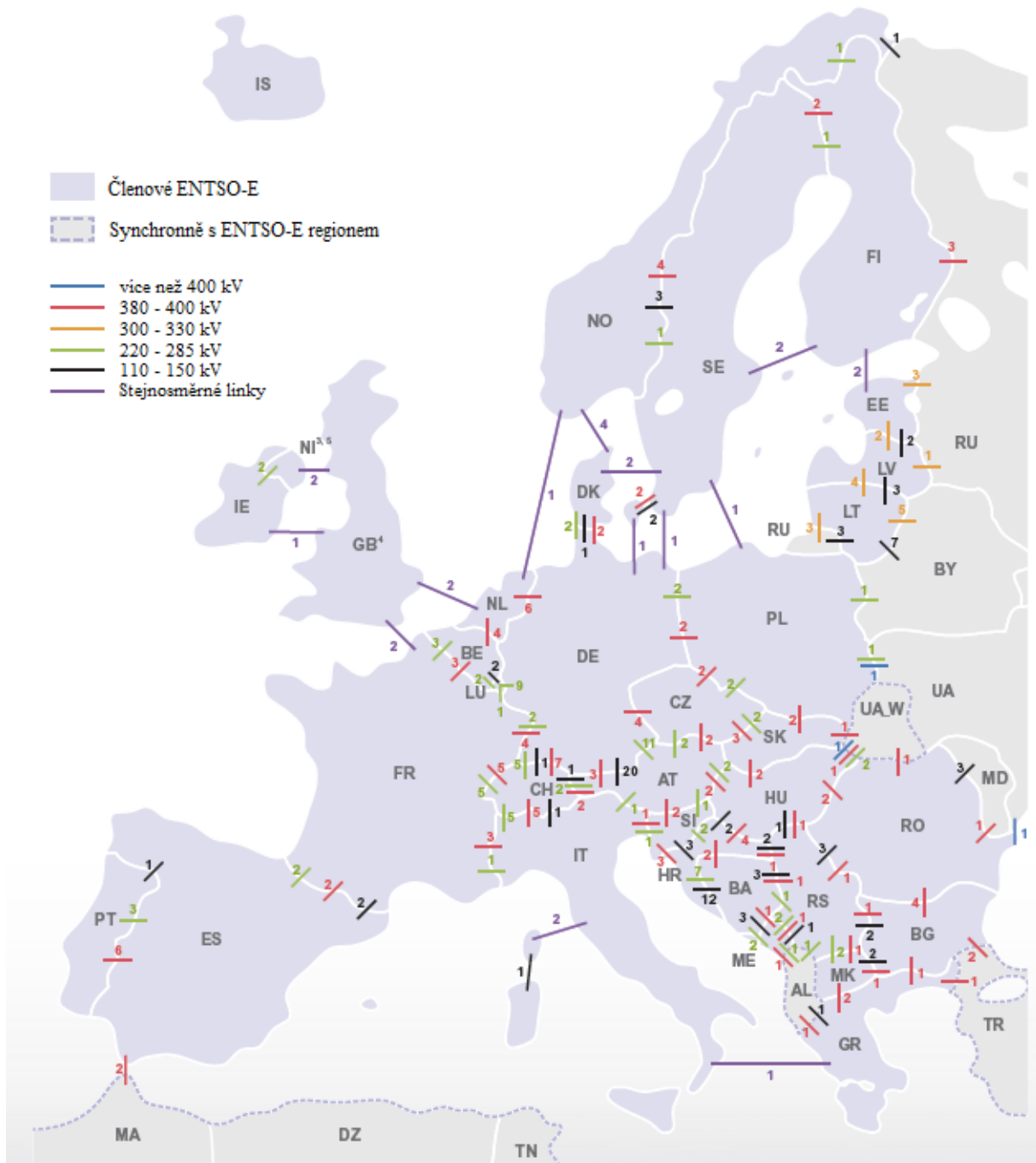
Evropskou síť tvoří kolem 300 tisíc kilometrů vedení, z toho zhruba 350 km vedení jsou přeshraniční. (3) Soustava ENTSO-E je dále propojená s dalšími zeměmi vně této soustavy.

Česká přenosová soustava je fyzicky propojena s pěti soustavami sousedních států. (1) Jsou to německí provozovatelé přenosové soustavy 50 Hertz Transmision a TenneT TSO, slovenský provozovatel SEPS, a.s., polský provozovatel PSE-Operator a rakouský provozovatel PS Verbund – Austrian Power Grid (známý pod zkratkou APG). Tyto propojení se kromě přeshraničního přenosu elektrické energie rovněž využívají pro mezinárodní obchod s elektrickou energií.



Obrázek 2: Přeshraniční spolupráce v rámci PS (4)

¹ Z angl. Regional group – Continental Europe



Obrázek 3: Mapa přeshraničních vedení v soustavě ENTSO-E (3)

1.3 Typizované stožáry v přenosové soustavě

Základní složku přenosové soustavy tvoří stožáry. Stožáry tvoří nosný prvek vedení přenosové soustavy. Rozměry stožárů jsou určeny zejména přenášeným výkonem, napěťovou hladinou², no také klimatickými podmínkami jako například vítr.

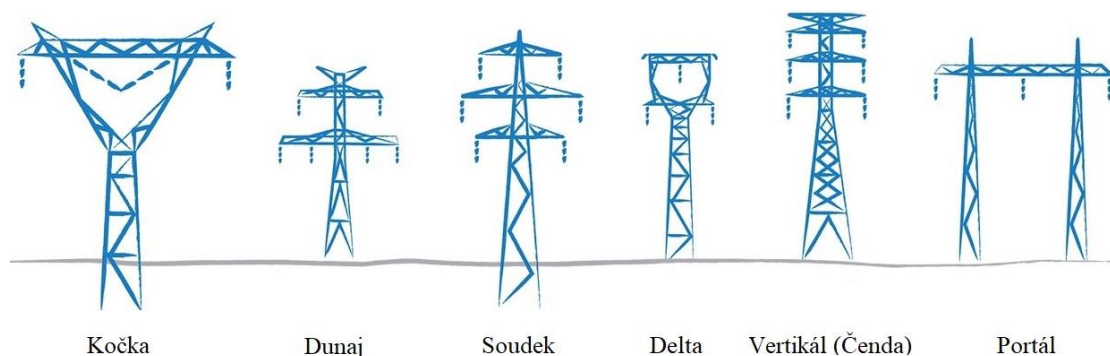
Základním rozdělením stožáru je dělení dle konstrukce. Takto můžeme rozdělit stožáry na příhradové, ohraňované a kompaktní. Kompaktní stožáry nalezneme v přenosové soustavě své místo v posledních letech. Jejich konstrukci tvoří pouze jeden dřík. Konzole tvoří vhodně umístěné izolátory. Nejvíce používané jsou stožáry příhradové, proto v následujících částech práce budou rozebírané právě tyto.

Druhým důležitým rozdělením stožárů je dělení na stožáry kotevní a nosné. Kotevní stožáry tvoří pevné body na vedení. Vodiče jsou na kotevních stožárech upevněny díky kotevním izolátorových závěsům. Kotevní stožáry jsou v trase rozmístěny ve vzdálenosti zhruba 3 až 5 km, v případě složitého terénu mohou být umístěny i v kratších intervalech.

Nosné stožáry jsou rozmístěny vždy mezi dvěma kotevními stožáry. Jak jejich název napovídá, mají pouze nosnou funkci, tedy vodič uchycený na jejich izolátorových závěsech je pouze přidržován, nikoliv napínán. Tyto stožáry jsou umístěny v přímé trase vedení, a tedy jsou namáhány pouze svislou silou způsobenou hmotností lana.

Dalšími typy jsou stožáry rohové, umístěvané na místech, kde je potřeba změnit úhel lomu trasy, dále stožáry koncové, rozvodné, případně křižovatkové, podchodové nebo nadchodové.

Stožáry lze rozdělit dle konstrukce. Ve vedeních přenosové soustavy se používají následující stožáry. (5)



Obrázek 4: Nejčastěji používané typy stožáru v PS (6)

² Napěťová hladina a přenášený výkon rovněž určuje počet vodičů na jednu fázi vedení.

Pro vybrané vedení 110 kV provozované přenosovou soustavou se používá stožár typu Soudek. Pro vedení 220 kV a 400 kV se používají stožáry jak portálového, tak i jednodříkového typu.

Stožáry jednodříkové konstrukce používané na vedení PS jsou typu Delta, Mačka, Dunaj, Kočka, Soudek a stožár s vertikálním uspořádáním nazývaný Čenda. Jediným představitelem portálového typu stožáru používaný v PS je stožár typu Portál, zřídka se užívá také typu Třídřík, který patří pod typizaci Portál.

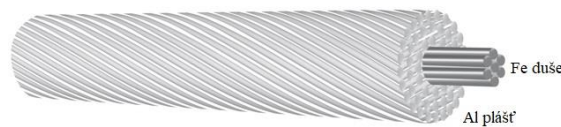
1.4 Vodiče používané na vedení přenosové soustavy

Každý stožár nese jedno, případně více vedení. Každé vedení je tvořeno vodiči všech tří fází. Stožáry jsou rovněž mezi sebou propojeny zemnicími lany, případně kombinovanými zemnicími lany, které ve své konstrukci obsahují rovněž optická vlákna.

Zemnicí lana chrání fázové vodiče proti atmosférickým nebezpečím, jako například zásah blesku. Jsou umístěna tak aby dokázala pokrýt všechny fáze. V dnešní době je běžné také používání kombinovaných zemnicích lan. Už bylo zmíněno, že kombinované zemnicí lano obsahuje ve své konstrukci několik optických vláken. Tato jsou využívána pro přenos dat, většinou pro interní účely provozovatele PS.

Fázové vodiče jsou na stožáru rozmístěny buď v jedné úrovni, což je typické pro Portály. Dále dvouúrovňově, vodiče jsou rozmístěny do trojúhelníku. A nakonec trojúrovňově. V tomto uspořádání jsou vodiče rozmístěny nesymetricky v případě stožáru s jednoduchým vedením, kdy dvě fáze jsou na jedné straně a jedna fáze na straně druhé, případně symetricky v případě dvojitého vedení. (7)

U vedení 400 kV jsou používány svazkové vodiče. Vodiče jedné fáze jsou standardně uspořádány ve vrcholech rovnostranného trojúhelníku, nebo n-úhelníku v případě více vodičů. Svazkové vodiče se používají zejména v případech, kdy je potřeba velkého průřezu vodiče protékajícího proudem. Je tak výhodné použít více vodičů se standardním průřezem než jednoho vodiče s velkým, netypizovaným průřezem.



Tabulka 2: AlFe lano (8)

Jako fázové vodiče i zemnicí lana jsou v praxi používány zejména AlFe lana. AlFe lano je tvořeno vlákny ze dvou různých materiálů, hliníku a oceli. Jádro lana tvoří ocel, také se nazývá duše. Plášť tvoří vlákna z hliníku. Jedná se tak o kombinaci materiálů, kdy jeden má výborné mechanické vlastnosti (nosný materiál) a druhý má dobré elektrické vlastnosti (elektrovedivý materiál). V našem případě je ocel využívána pro svoji mechanickou pevnost, zatímco hliník je efektivně protékán proudem díky skin efektu³.

³ Skin efekt je jev, při kterém je elektrický proud vytlačován k povrchu vodiče.

2 Izolátory

Izolátor je část nadzemního vedení, který se používá k oddělení vodičů a kovové uzemněné konstrukce stožárů. (9) Izolátor tak slouží k zamezení vodivého spojení živých vodičů a konstrukce. Velikost a tvar izolátorů závisí na velikosti rozdílu potenciálů na obou koncích izolátoru. Další vlastností izolátoru je schopnost přenosu mechanických sil mezi okolními konstrukčními částmi. V případě vedení VVN je výhodné seskupovat izolátory do řetězců, ten vykazuje lepší mechanické vlastnosti.

Třídy izolátorů lze rozdělit do tříd na základě délky průrazné dráhy izolačního materiálu. (10) První třídou je třída A. Tato třída se vztahuje na izolátory, kterých nejkratší délka průrazné dráhy izolačním materiálem je větší rovna polovině nejkratší vzdušné vzdálenosti. Nejkratší vzdušná vzdálenost odpovídá délce oblouku. Příkladem izolátoru třídy A je tyčový izolátor. Druhou třídou je třída B. Tato třída zastřešuje všechny izolátory, které nespádají do třídy A. Vztahuje se tedy na izolátory, jejichž nejkratší délka průrazné dráhy izolačního materiálu je menší než polovina nejkratší vzdušné vzdálenosti. Příklad této třídy izolátoru je talířový izolátor.

2.1 Dělení izolátorů

V následujících podkapitolách bude představeno dělení izolátorů, detailní popis jednotlivých druhů a jejich součástí a také vliv seskupování izolátorů do řetězců.

Existuje několik různých dělení izolátorů. V této kapitole bude uvedeno dělení podle použitých materiálů, dělení dle konstrukce a rozdělení dle umístění.

2.1.1 Dělení dle použitých materiálů

Dle použitých materiálů lze dělit izolátory na keramické, skleněné a kompozitní. V následujícím textu budou tyto druhy podrobně popsány.

2.1.1.1 Keramické izolátory

Keramické izolátory se vyrábí v několika provedeních. Nejčastější typy materiálu zobrazuje následující tabulka. (9)

Skupina	Podskupina	Typ materiálu
Alkalické hlinitokřemičitany	C-110	Křemičitý porcelán
	C-120	Hlinitý porcelán (pevnost v ohybu > 110 MPa)
	C-130	Hlinitý porcelán (pevnost v ohybu > 160 MPa)
Hořečnaté křemičitany	C-220	Steatit normální

Tabulka 3: Druhy keramických izolátorů (11)

U skupiny alkalických hlinitokřemičitanů lze jako hlavní využití uvést izolátory nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. (9) (11) Tento typ izolátorů se vyrábí s použitím kaolinu, živce a křemene v různém poměru. Všechny materiály ve skupině mají obdobné elektrické vlastnosti, jak je zřejmé z výše uvedené tabulky, liší se zejména svou mechanickou pevností. Materiál C-130 se také používá pro výrobu malých součástí izolátorů, u kterých se vyžaduje vysoká pevnost.

Hořečnaté křemičitany našly své uplatnění jako izolační materiály využívané tam, kde se vyžaduje vysoký kmitočet. (9) (11) Izolátory z této skupiny jsou vyrobené na bázi křemičitanu hořečnatého. Jsou charakterizované nízkými dielektrickými ztrátami.

Kromě materiálů uvedených v tabulce se pro výrobu izolátorů rovněž používá cristobalitový plasticky vytvářený porcelán, případně lithná keramika, která se speciálně využívá v aplikacích, kde je vyžadována vysoká odolnost vůči náhlým změnám teploty. (11)

Izolátory se v dnešní době vyrábí hlavně v provedení C-120 a C-130. (9) Vlastnosti izolátorů lze ovlivnit poměry surovin ve výsledném složení.

2.1.1.2 Skleněné izolátory

Materiál skleněných izolátorů lze primárně rozdělit na chlazené sklo a tvrzené sklo. (10) Chlazeným sklem rozumíme sklo, takové, u kterého bylo mechanické pnutí tepelným

zpracováním uvolněno, zatímco u tvrzeného skla bylo řízené mechanické pnutí tepelným zpracováním vyvoláno.

Pro bližší přiblížení lze izolační materiály ze skla rozdělit do skupin a podskupin na základě typu použitého materiálu. (11) Nejpoužívanější materiály zobrazuje následující tabulka. (9)

Skupina	Podskupina	Typ materiálu
Skla alkalicko-vápenato-křemičitá	G 110	Alkalicko-vápenato-křemičitý
	G 120	Alkalicko-vápenato-křemičitý
Boritokřemičitá skla	G 220	Chemicky odolné borito-křemičité sklo
	G 231	Borito-křemičité sklo
	G 232	Borito-křemičité sklo

Tabulka 4: Druhy skleněných izolátorů

Hlavní použití skupiny skel alkalicko-vápenato-křemičitých je použité pro izolátory pro střídavá vedení. Zatímco materiál z podskupiny G 110 patří mezi sklo chlazené, materiál z podskupiny G 120 se řadí mezi skla tvrzené.

Ve skupině boritokřemičitých skel lze nalézt materiály s různými výhodnými vlastnostmi. (9) Například materiál podskupiny G 220 je vysoce odolný proti korozi a má nízkou teplotní roztažnost, proto se s výhodou používá pro výrobu izolátorů odolných proti náhlým změnám teploty. Dále lze v této skupině nalézt materiály pro izolátory nízkoztrátové.

Skleněné izolátory se vyrábí v provedení talířových izolátorů (více v kapitole 2.1.2.1). Své uplatnění našly zejména v oblastech s vyšším stupněm znečištění.

2.1.1.3 Kompozitní izolátory

Poslední skupinou izolátorů v dělení dle použitých materiálů jsou kompozitní izolátory. (12) Těmi rozumíme takové izolátory, které jsou zhotoveny ze dvou izolačních částí. První částí je jádro izolátorů. Tato část zabezpečuje vhodné mechanické vlastnosti izolátoru. Jádro kompozitního izolátoru se většinou skládá buď ze skleněných vláken, zalitých v pryskyřici, nebo z homogenního materiálu, jako pryskyřice samotná, nebo porcelán. Plášť kompozitního izolátoru tvoří vnější část, tato část vytváří povrchovou cestu a rovněž chrání jádro izolátoru před vnějšími podmínkami.

Mezi izolační materiály běžně používané pro výrobu kompozitních izolátorů patří již vzpomínaná epoxidová pryskyřice, a to buď aromatická nebo alifatická, dále teflon a také silikonové pryže. (9) Zvláštní pozornost je potřeba věnovat vytvoření dostatečné odolnosti vůči UV záření, jelikož jsou tyto materiály na jeho působení značně citlivé.

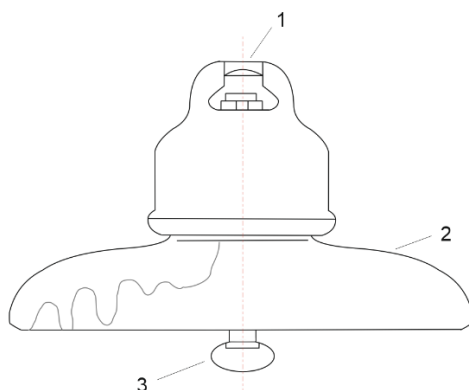
Použití kompozitních izolátorů představuje několik výhod. Jsou jimi zejména nízká hmotnost, vysoká mechanická pevnost, vysoká odolnost vůči znečištěnému prostředí a další.

2.1.2 Dělení dle konstrukce

Dalším důležitým dělením je dělení dle konstrukce. Rozeznávají se izolátory talířové (také nazývané čapkové) a izolátory tyčové.

2.1.2.1 Talířové izolátory

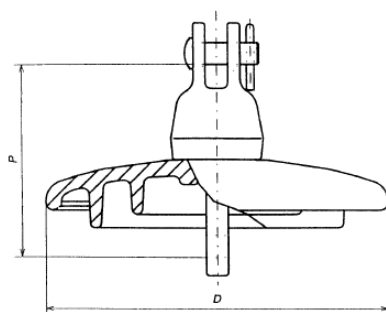
Základními konstrukčními částmi talířového izolátoru⁴ jsou dřík s talířem, který tvoří izolační část izolátorů, čapka a palička. (13) Konstrukci zobrazuje následující obrázek.



Obrázek 5: Čapkový izolátor. (14) 1 - čapka, 2 - talíř, 3 - palička

Přípevnění čapky a paličky ke dříku se provádí natmelením. Čapka a palička jsou elektrodami izolátoru. Palička se zasouvá do čapky a zajistí se závlačkou, čímž se vytváří izolátorový řetězec.

Talířové izolátory lze rovněž najít se spojením vidlice a oka, jak zobrazuje následující obrázek. (15)



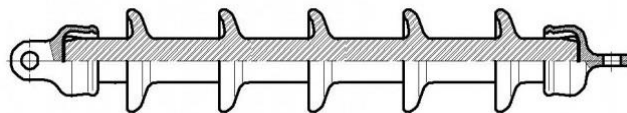
Obrázek 6: Talířový izolátor se spojením vidlice a oka (15)

Talířové izolátory lze najít v provedení porcelánovém a skleněném.

⁴ Z angl. cup and pin insulator

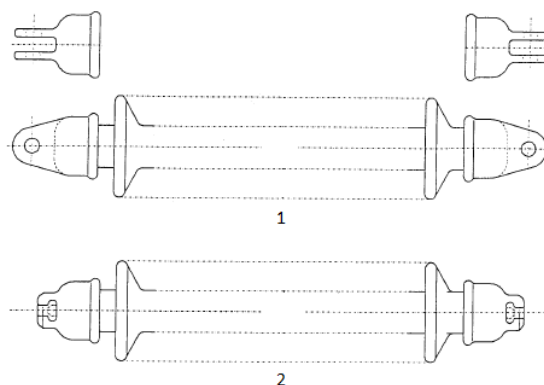
2.1.2.2 Tyčové izolátory

Tyčové izolátory⁵ jsou vyráběny ve stříškovém, případně spirálovém provedení. (13) Spirálové provedení prodlužuje dráhu svodového proudu.



Obrázek 7: Tyčový izolátor (16)

Tento typ izolátorů se rovněž propojuje do řetězců, pro dosažení požadované délky. Tyčové izolátory bývají kratší a lehčí v porovnání s čapkovými izolátory. Zakončení a spojování izolátorů se rovněž provádí buď jako spojení čapka-palička nebo jako spojení vidlice-oko. (17) Nevýhodou je dražší výroba a větší náchylnost k poškození. Tyčové izolátory lze najít v keramickém a kompozitním provedení.



Obrázek 8: Provedení tyčových izolátorů. (17) 1 - vidlice-oko, 2 - čapka-palička

⁵ Z angl. long rod insulator

2.1.3 Dělení dle funkce

Dle funkce lze rozeznávat izolátory podpěrné a závěsné.

Závěsnými izolátory rozumíme izolátorové závěsy. Tyto můžou být dále rozděleny na nosné a kotevní, nebo také dle počtu řetězců, na jednoduché nebo vícenásobné. V praxi se používají zejména dvojité a trojitě izolátorové závěsy.

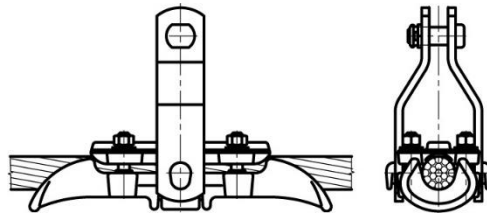
Dále se izolátorové závěsy liší také způsobem uchycení zemnicí části ke konstrukci. V tomto případě lze uvažovat uchycené jednobodové, dvoubodové, třibodové nebo čtyřbodové.

2.1.3.1 Podpěrné izolátory

Podpěrné izolátory se využívají u napěťových hladin 35 kV a nižších. Lze je tedy nalézt pouze u vedení distribučních soustav. V této práci se jim tedy dále nebudeme věnovat.

2.1.3.2 Nosné izolátorové závěsy

Jak již název napovídá, nosné izolátorové závěsy se používají pro uchycení vodiče k nosnému stožáru. (18) Jsou orientované kolmo k zemi. Lano v tomto případě svorkou pro lano prochází, jak zobrazuje následující obrázek.



Obrázek 9: Nosná svorka výkyvná (19)

Umístění nosného závěsu na stožáru a také detail nosného izolátorového závěsu lze nalézt v příloze 2.

K nosným izolátorovým závěsům lze řadit také pomocné nosné závěsy, zákrutové nosné závěsy, nosné V-závěsy a pomocné nosné V-závěsy. V-závěs lze nalézt na fotografii v příloze 2.

2.1.3.3 Kotevní izolátorové závěsy

Kotevní izolátorové závěsy se používají k ukotvení vodičů ke kotevním stožárům. (18) Izolátorové závěsy jsou umístěny ve spojnici konce lana a upevnění ke stožáru, přičemž odchylka úhlu závěsu od horizontální roviny je dána vlastnostmi řetězovky.

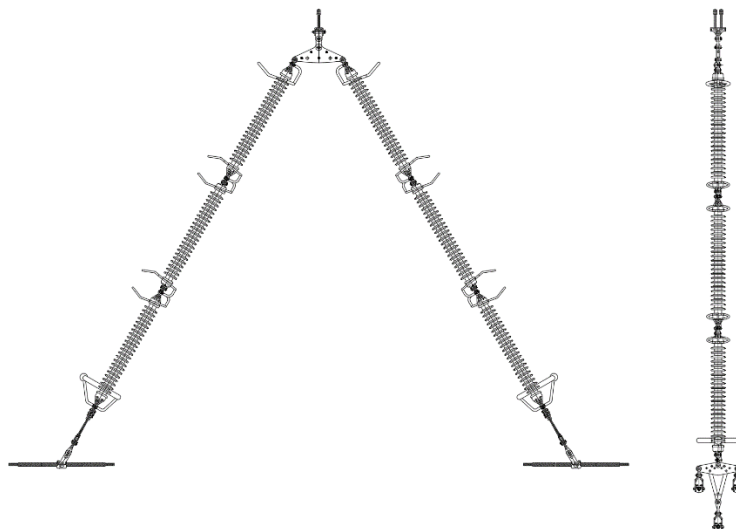
Dva kotevní stožáry tvoří tzv. kotevní úsek. V celém kotevním úseku je použitý pouze jeden vodič na fázi, ve speciálních případech lze použít spojky a spojit tak dva vodiče pro jednu fázi v kotevním úseku. Konce vodiče jsou upevněny k izolátorovému závěsu pomocí kotevních svorek. Různé druhy kotevních svorek jsou vyobrazeny v kapitole 2.2.

Pro přiblížení lze nalézt fotografii kotevního stožáru v příloze 3.

2.1.3.4 Polokotevní izolátorové závěsy

Polokotevní závěsy rozeznáváme tvaru T a tvaru A. (20) Používají se zejména v případě, kdy je potřeba vodič v blízkosti stožáru nadzvednout. Z uspořádání závěsu lze vidět, že vzdálenost od vodiče k zemi se zvětší v porovnání s nosným závěsem. Maximální úhel vychýlení od svislé osy je dán použitými armaturami (např. nosnými svorkami výkyvnými).

Na následujícím obrázku je zobrazen polokotevní závěs typu A.



Obrázek 10: Polokotevní izolátorový závěs typu A

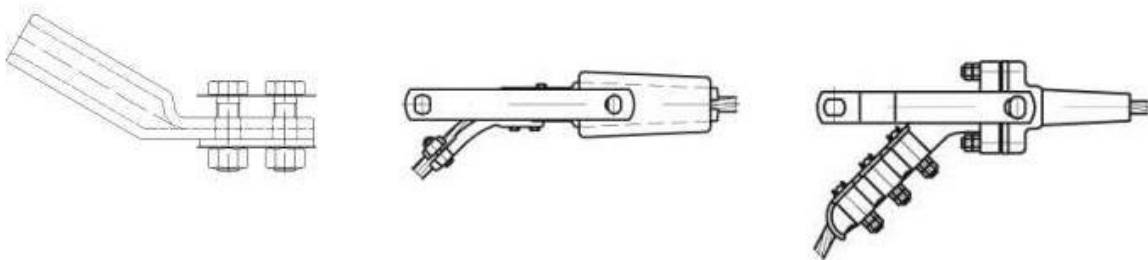
2.2 Příslušenství izolátorů a vodičů

Z hlediska následného zkoumání elektrostatických polí je nutné popsat také příslušenství izolátorů a vodičů. Příslušenstvím se v tomto textu rozumí součásti, pomocí kterých se izolátory upevňují na konzoly, případně kterými se fázové vodiče upevňují k izolátorům. Do této skupiny lze zahrnout taky součásti, které jsou nutné k sestavení izolátorových řetězců, případně ochranné součásti.

Armatury venkovních vedení lze rozdělit na proudové, bezproudové, ochranné a spojovací. (19)

Proudové armatury se používají zejména pro vodivé spojení dvou, případně více neizolovaných vodičů. K této skupině patří například kabelové spojky, kabelové oka nebo opravné svorky.

Bezproudové armatury jsou určeny k upevnění k izolátorovým závěsům, k udržení vzdálenosti mezi svazkovými vodiči, případně k tlumení vibrací. Bezproudové armatury se montují rovněž na neizolované vodiče. Mezi bezproudé armatury lze zařadit kotevní svorky, nosné svorky, distanční rozpěrky, tlumiče vibrací a také kotevní kladky a kotevní pánvičky.

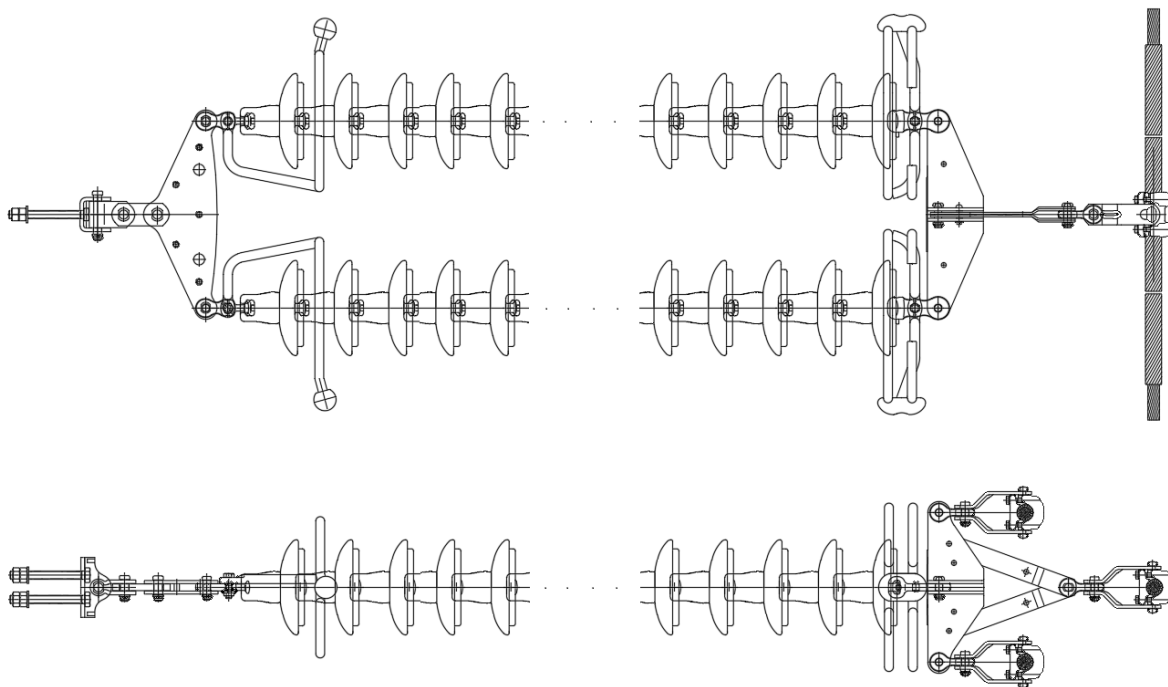


Obrázek 11: Kotevní svorky. Zleva: lisovaná, klínová a kuželová (19)

Ochranné armatury jsou určeny pro vyrovnávání elektrického potenciálu podél izolátorového závěsu, k vytvoření přeskokové vzdálenosti a také k ochraně izolátorů a vodičů před vlivem oblouku vzniklého při proražení ochranné vzdálenosti.

Poslední výše zmíněnou skupinou jsou spojovací armatury. Jak napovídá jejich název, spojovací armatury jsou určené k spojování izolátorů do řetězců, k spojení jednotlivých řetězců k sobě a také k uchycení izolátorových závěsů ke konstrukci stožárů. Mezi spojovací armatury lze zařadit paličky, vidlice, oka, pánvičky, klouby, rozpěrky a další.

Kromě výše uvedených armatur lze na vedení PS nalézt také další součásti, jako například závaží, ochranné tyče proti biologickému znečištění (ptákoplaše) a další.



Obrázek 12: Model tyčového izolátorové závěsu se zobrazením armatur

V této kapitole jsme se věnovali základnímu rozdělení izolátorů podle několika hledisek. Dále jsme popsali spojování izolátorů do větších celků a jejich rozdělení dle funkce. V závěru kapitoly jsme popsali příslušenství izolátorů a vodičů

3 Elektrické a mechanické požadavky na izolátorové závěsy

V této kapitole podrobně rozepíšeme informace o elektrických a mechanických požadavcích na izolátorové závěsy používané v přenosové soustavě dle platných norem.

Mezi tyto požadavky patří standardní elektrické požadavky, požadavky na rádiové rušení a zhášecí napětí korony, požadavky na chování při znečištění, požadavky na obloukový zkrat, požadavky na akustický hluk, mechanické požadavky a další.

3.1 Standardní elektrické požadavky

Základním požadavkem pro návrh izolátorů je, aby splňovaly parametry výdržného elektrického napětí při různých podmínkách. (21) Dle PNE 33 3300 Podnikové normy energetiky pro rozvod elektrické energie se stanovily výdržná napětí síťového kmitočtu při dešti, při atmosférickém impulzu za sucha, při spínaném impulzu za deště a průrazné výdržné napětí. Na izolátory různých napěťových hladin jsou kladeny různé požadavky, standardní elektrické požadavky jsou shrnuty v následující tabulce. Hodnoty výdržných napětí platí pro nadmořskou výšku do 1000 m.

U_S [kV]	U_{rw50Hz} za deště [kV]	U_{rwLI} za sucha [kV]		U_{rwSI} za deště [kV]	
		Minimálně	Maximálně	Minimálně	Maximálně
123	230	550	650	-	-
245	460	1050	1200	-	-
420	-	1425	1850	1050	1200
420s ⁶	-	1300	1700	950	< 1050

Tabulka 5: Požadovaná výdržná napětí izolátorových závěsů (21)

Stejně tak se liší množina požadavků, které je nutno splnit pro různé typy izolátorů. Následující dvě tabulky zobrazují, které požadavky musí splnit daná kategorie izolátorů, aby vyhověla z hlediska elektrických výdržných napětí.

⁶ Snížená izolační hladina, která vyžaduje pro snížení atmosférických a spínacích přepětí použití omezovačů přepětí na vedení.

Rozsah napětí	$1 \text{ kV} < U_S \leq 245 \text{ kV}$			
Typ izolátorů	Talířové izolátory	Tyčové izolátory	Kompozitní izolátory	Podpěrné izolátory pro vedení
Výdržné napětí síťového kmitočtu za deště	X	X	X	X
Výdržné napětí při atmosférickém impulzu za sucha	X	X	X	X
Výdržné napětí při spínacím impulzu za deště	-	-	-	-
Průrazné výdržné napětí (pro jednotlivý izolátor)	X	-	-	X ⁷

Tabulka 6: Standardní elektrické požadavky pro sítě do 245 kV (21)

Rozsah napětí	$U_S > 245 \text{ kV}$		
Typ izolátorů	Talířové izolátory	Tyčové izolátory	Kompozitní izolátory
Výdržné napětí síťového kmitočtu za deště	X	X	X
Výdržné napětí při atmosférickém impulzu za sucha	X	X	X
Výdržné napětí při spínacím impulzu za deště	-	-	-
Průrazné výdržné napětí (pro jednotlivý izolátor)	X	-	-

Tabulka 7: Standardní elektrické požadavky pro sítě nad 245 kV (21)

⁷ Platí pouze pro podpěrné izolátory, které jsou průrazné.

3.2 Požadavky na rádiové rušení a zhášecí napětí koróny

Rádiové rušení způsobované elektrickým vedením je způsobováno korónovými výboji na povrchu vodičů a armatur, výboji a jiskřením na namáhaných místech izolátorů a jiskřením v uvolněných nebo nedokonalých spojích. (21) Pro předpověď rušení se používají dvě metody, a to porovnávací a analytická. Bližší popsání těchto metod přesahuje možnosti této práce, informace o nich lze nalézt v ČSN CISPR 18-3 a v technické brožuře CIGRE č.20:1974.

Maximální hladiny rušivého napětí zobrazuje následující tabulka. Tyto hodnoty jsou měřené na impedanci 300 Ω a kmitočtu 0,5 MHz.

Nejvyšší provozní napětí sítě [kV]	123	245	420
Maximální hladina rušivého napětí [dB]	56	73	73

Tabulka 8: Maximální hladiny rušivého napětí⁸ (21)

Pokud není jinak stanoveno, pak zkušební napětí je rovno nejvyššímu fázovému provoznímu napětí dané sítě. Hladina rušivého napětí se musí dodržet při maximálním provozním fázovém napětí a při dalším zvyšování zkušebního napětí o 10 % nesmí nastat skokové zvýšení rušivého napětí.

⁸ Meze jsou stanoveny dle ČSN EN 61000-6-3 pro vedení 110 kV a dle ČSN EN 61000-6-4 pro vedení 245 kV a 420 kV.

3.3 Požadavky na chování při znečištění

Volbu izolátorů lze provádět dle několika parametrů. (21) Prvním z nich je volba izolátorů dle unifikované měrné povrchové cesty. Měrná unifikovaná povrchová cesta je délka povrchové cesty izolátoru v milimetrech dělená nejvyšším provozním fázovým napětím sítě v kilovoltech, pro kterou je izolátor určen. Povrchová cesta izolátoru musí být rovna nebo větší, než je součin hodnoty unifikované měrné povrchové cesty pro daný stupeň znečištění⁹ a nejvyššího provozního fázového napětí sítě, pro kterou je izolátor určen. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Stupeň znečištění	Unifikovaná měrná povrchová cesta [mm · kV ⁻¹]	Metoda pevné vrstvy znečištění	
		Výdržná ekvivalentní hustota nánosu soli [mg · cm ⁻²]	
		Tyčové izolátory	Talířové izolátory
I	27,7	0,005	0,01
II	34,6	0,02	0,1
III	43,3	0,08	0,25
IV	53,7	0,4	0,7

Tabulka 9: Hodnoty výdržných ekvivalentních hustot nánosů soli (21)

Výdržné napětí izolátoru případně izolátorového řetězce získané jako výsledek zkoušky při určených hodnotách výdržných ekvivalentních hustot nánosu soli při daném stupni znečištění, musí být větší, než je nejvyšší fázové střídavé napětí sítě, pro kterou je izolátor případně izolátorový závěs určen. Výjimku ve zkoušení tvoří kompozitní izolátory, které prozatím nemají určenou standardní metodu zkoušky s umělým znečištěním. Proto se volba kompozitních izolátorů provádí na základě předepsané unifikované měrné povrchové cesty.

⁹ Stupně znečištění lze nalézt v PNE 33 0405-1

3.4 Požadavky na obloukový zkrat

Povinnost splňovat požadavky na obloukový zkrat pro izolátory udává projektová specifikace.

(21) Podrobné informace lze nalézt v ČSN EN 61467. Nejhorší variantou uspořádání z hlediska účinků namáhání obloukovým zkratem je jednoduchý, případně dvojitý nosný závěs s jednostranně napájeným zkratem. Proto se typová zkouška provádí na tomto typu uspořádání. Každý izolátorový závěs musí vydržet tři následné zkratové zkoušky s předepsanou hodnotou proudu obloukového zkratu pro příslušné nejvyšší napětí sítě, dvě s dobou trvání 0,2 sekund a jednu s dobou trvání 0,5 sekund.

Doporučené hodnoty zkušebních proudů pro izolátorové závěsy různých napěťových hladin jsou uvedeny v následující tabulce.

Nejvyšší napětí sítě [kV]	Zkratový proud [kA]
123	25 (40) ¹⁰
245	25
420	35 (50) ¹¹

Tabulka 10: Doporučené hodnoty zkušebních proudů pro zkratové zkoušky (21)

Zkoušené izolátory musí vyhovět hodnotícím kritériím dle ČSN EN 61467. hodnota porušujícího mechanického zatížení izolátorů po zkoušce obloukovým zkratem musí být minimálně 70 % jejich předepsané minimální porušující síly.

¹⁰ U vedení, které vychází ze stanice 110 kV se zvýšenou zkratovou odolností 50 kA, se musí do vzdálenosti, kde nejvyšší celkový jednofázový ekvivalentní oteplovací zkratový proud přesahuje hodnotu 25 kA, použít izolátorové závěsy s odolností proti obloukovému zkratu rovnou hodnotě v závorce.

¹¹ U vedení, které vychází ze stanice kV se zvýšenou zkratovou odolností 63 kA, se musí do vzdálenosti, kde nejvyšší celkový jednofázový ekvivalentní oteplovací zkratový proud přesahuje hodnotu 35 kA, použít izolátorové závěsy s odolností proti obloukovému zkratu rovnou hodnotě v závorce.

3.5 Požadavky na akustický hluk

V okolí izolátoru na vedení je možný výskyt slyšitelného zvuku. (21) Ten může způsobovat korona při špatném počasí, případně při mlze. V případě hezkého počasí vzniká slyšitelný hluk v případě, že jsou vedení vystavena znečištění, nebo vlivem mechanického pohybu vodičů (tančení vodičů).

V případě špatného počasí jsou hlavním zdrojem hluku vodní kapky, jinovatka a námraza, které mohou způsobit různé druhy výbojů. Nejdůležitější vliv na úroveň akustického hluku, který vysokonapěťová vedení produkují, má elektrické pole těsně kolem vodičů (povrchový elektrický gradient). Toto pole závisí na napětí, počtu vodičů ve fázovém svazku, rozměru vodičů, vzdálenostech mezi fázemi a v menší míře na uspořádání vedení, sledu fází, výšce vedení a na vzdálenostech vedení od ostatních vedení nebo drátů. Úrovně slyšitelného hluku jsou také ovlivněny relativní hladkostí povrchu vodiče a armatur a znečištěním, způsobeným hydrofobními materiály.

Stanovení nejvyšší přípustné hladiny slyšitelného hluku se provádí na základě vážení hladiny hluku v dB nad hladinou hluku pozadí v předem určené vzdálenosti od vedení.

3.6 Mechanické požadavky

Hlavním kritériem ovlivňujícím mechanické požadavky je zatížení vedení, a to zejména klimatické. (21) Lze tedy uvažovat zatížení v důsledku teploty, zatížení větrem, námrazou a jejich kombinaci. Pro stanovení zatížení námrazou bylo území ČR rozděleno na námrazové oblasti.

Je nutné rovněž uvažovat tzv. stálá zatížení způsobená vlastní tíhou podpěrných bodů, izolátorových závěsů, tíhu vodičů nebo také tíhu leteckého výstražného značení.

3.6.1 Standardní zatěžovací stavy

Všechny výše uvedené klimatické vlivy jsou zohledněny v standardních zatěžovacích stavech. Tyto stavy zobrazuje následující tabulka.

Zatěžovací stav	Popis zatěžovacího stavu
1	Extrémní zatížení větrem
2a	Rovnoměrné extrémní zatížení námrazou
2b	Nerovnoměrné zatížení námrazou, příčný ohyb
2c	Nerovnoměrné zatížení námrazou, podélný ohyb
2d	Nerovnoměrné zatížení námrazou, kroucení
3a	Kombinované zatížení větrem a námrazou (rovnoměrné extrémní zatížení námrazou, zatížení větrem s rychlostí o vysoké pravděpodobnosti)
3b	Kombinované zatížení větrem a námrazou (rovnoměrné jmenovité zatížení námrazou, zatížení větrem o rychlosti s nízkou pravděpodobností)
4	Minimální teplota bez dalších klimatických zatížení
5a	Zabezpečovací zatížení, kroucení (uvolnění vodiče nebo dílčího vodiče svazku při zatížení sníženou námrazou)
5b	Zabezpečovací zatížení, podélný ohyb (nevyrovnané tahy všech vodičů, způsobené fiktivním pretížením, které je rovno vlastní tíze vodičů ve všech rozpětích v jednom směru od podpěrného bodu)
5c	Zabezpečovací zatížení, podélný ohyb (uvolnění všech vodičů v jednom směru od podpěrného bodu při zatížení vodičů sníženou námrazou)
6a	Bezpečnostní zatížení, montážní a údržbová zatížení
6b	Bezpečnostní zatížení, vztahující se k tíze montéru

Tabulka 11: Standardní zatěžovací stavy (21)

Nutno podotknout, že pro portálové stožáry je výše uvedená tabulka doplněna o zvláštní zatěžovací stavy plynoucí z konstrukce portálového stožáru. Podrobnosti k této problematice podrobně popisuje PNE 33 3300 Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie.

3.7 Další požadavky

Dalšími požadavky na izolátorové závěsy mohou být požadavky na trvanlivost, ochranu před vandalismem, ochranu železných materiálů před korozi a doplňkovou ochranou proti korozi.

(21)

4 Matematický popis elektrostatického pole

Pro správné pochopení simulací prováděných v další části této práce musíme nejdříve uvést základní předpoklady, fyzikální zákonitosti a matematické vyjádření, které jednoznačně určují vlastnosti elektrostatických polí.

V následující kapitole budou uvedeny vztahy v elektromagnetickém poli a jejich úprava pro pole elektrostatické, základní vztahy mezi veličinami elektrostatického pole, zjednodušený model rozložení napětí na izolátorovém řetězci a rovněž také odvození vztahů mezi veličinami elektrostatického pole pro základní jednoduché objekty.

4.1 Elektromagnetické pole

Pro detailní studium elektrostatického pole musíme nejdříve rozebrat teorii elektromagnetického pole, do kterého spadá rovněž pole elektrostatické. Zákonitosti elektromagnetického pole jsou shrnuty v Maxwellových rovnicích. (22)

První Maxwellovou rovnicí je zobecněný zákon celkového proudu. Následující rovnice představují tento zákon v integrálním a diferenciálním tvaru. (23)

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4.1.1)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (4.1.2)$$

kde:

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

ϕ magnetický tok, [Wb]

t čas, [s]

B magnetická indukce, [T]

Druhou Maxwellovou rovnicí je zobecněný zákon celkového proudu. Následující rovnice představují tento zákon v integrálním a diferenciálním tvaru.

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \vec{I} + \frac{d\psi}{dt} \quad (4.1.3)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (4.1.4)$$

kde:

H intenzita magnetického pole, [$A \cdot m^{-1}$]

I proud, [A]

ψ elektrický tok, [C]

t čas, [s]

J proudová hustota, [$A \cdot m^{-2}$]

D elektrická indukce, [$C \cdot m^{-2}$]

Člen $\frac{d\psi}{dt}$ v rovnici 4.1.3 představuje Maxwellův posuvný proud, člen $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ v rovnici 4.1.4 pak jeho plošnou hustotu.

Třetí Maxwellova rovnice popisuje charakter elektrického pole s ohledem na jeho zdroje. Následující rovnice představují tento zákon v integrálním a diferenciálním tvaru.

$$\oiint_S \vec{D} \cdot \vec{dS} = Q_0 \quad (4.1.5)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_0 \quad (4.1.6)$$

kde:

D elektrická indukce, [$C \cdot m^{-2}$]

Q_0 volný náboj, [C]

ρ_0 objemová hustota volného náboje [$C \cdot m^{-3}$]

Čtvrtou a zároveň poslední Maxwellovou rovnicí je rovnice popisující charakter magnetického pole s ohledem na jeho zdroje. Následující rovnice představují tento zákon v integrálním a diferenciálním tvaru.

$$\oiint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0 \quad (4.1.7)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4.1.8)$$

kde:

B magnetická indukce, [T]

V nejjednodušším případě, kdy budeme uvažovat statický stav, tedy, že žádná z uvedených veličin není závislá na čase, můžeme položit všechny časové derivace veličin rovné nule. Veličiny tedy považujeme buď jako statické v prostoru, nebo je považujeme za statický tok v obvodu. V tomto případě lze předchozí rovnice přepsat do tvaru:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (4.1.9)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (4.1.10)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_0 \quad (4.1.11)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4.1.12)$$

V tomto případě se rovnice 4.1.9 a rovnice 4.1.11 stávají rovnicemi elektrostatiky. Rovnice 4.1.10 a 4.1.12 se pak stávají rovnicemi magnetostatiky. Je důležité si povšimnout, že dle rovnic 4.1.9 až 4.1.12 jsou elektrické a magnetické pole vzájemně nepropojené. To platí za podmínky statického stavu. (22)

V lineárním prostředí se Maxwellovy rovnice doplňují o tzv. materiálové vztahy. Jmenovitě o rovnici popisující magnetizaci dielektrika: (23)

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (4.1.13)$$

kde:

D elektrická indukce, [$C \cdot m^{-2}$]

ε elektrická permitivita materiálu, [$F \cdot m^{-1}$]

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

Další je rovnice popisující magnetizaci magnetika:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (4.1.14)$$

kde:

B magnetická indukce, [T]

μ magnetická permeabilita, [$H \cdot m^{-1}$]

H intenzita magnetického pole, [$A \cdot m^{-1}$]

Poslední rovnicí z tzv. materiálových vztahů je Ohmův zákon:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (4.1.15)$$

kde:

J proudová hustota, [$A \cdot m^{-2}$]

σ měrná vodivost, [$S \cdot m^{-1}$]

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

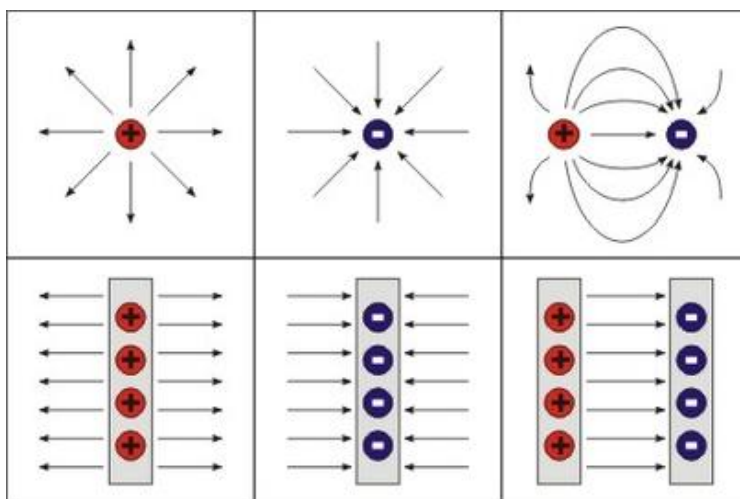
4.2 Elektrostatické pole

Elektrostatické pole je takové, které je buzené pouze nepohybujícími se volnými nosiči náboje. Jedná se tedy o časově neproměnné elektrické pole. (23)

Jelikož je magnetické pole buzené pouze pohybujícími se volnými nosiči náboje, v tomto případě k jeho vzniku nedojde.

Tento úhel pohledu však platí pouze z makroskopického hlediska. Uvnitř materiálu se totiž pohybující se nosiče vyskytují. Jejich magnetické účinky se však uvnitř tělesa vyrovnají a magnetické pole materiálu jako celku je tedy nulové.

Směr působící intenzity elektrického pole lze znázornit pomocí siločar elektrického pole. Vektor intenzity elektrického pole je k siločáře tečný. Tvar siločar v okolí různě nabitých částic zobrazuje následující obrázek.



Obrázek 13: Siločary elektrického pole (24)

4.2.1 Gaussova věta elektrostatiky

Gaussova věta elektrostatiky je jednou z nejdůležitějších vztahů v elektrickém poli. (23) Tuto větu popisuje následující integrální zápis:

$$\oiint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q}{\varepsilon_0} = \frac{\iiint_V \rho \cdot \vec{dV}}{\varepsilon_0} \quad (4.2.16)$$

kde:

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

Q velikost náboje, [C]

ε_0 permitivita vakua, [$8,854187 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$]

ρ objemová hustota náboje [$C \cdot m^{-3}$]

Tato rovnice popisuje stav, kdy v určitém objemu rozmístěn náboj s objemovou hustotou ρ (rozumíme celkový náboj, tj. volný i vázaný). Tento náboj vybudí elektrické pole. Pokud intenzitu vzniklého elektrického pole budeme integrovat po uzavřené ploše kolem výše zmíněného objemu, bude výsledek integrace roven podílu $\frac{Q}{\varepsilon_0}$. Jak vidíme, tento podíl nezávisí na rozmístění náboje uvnitř tělesa, závisí pouze na velikosti celkového náboje.

4.2.2 Elektrické pole v materiálech

Mezi základní vlastnosti elektrického pole patří chování materiálu, které jsou vystaveny vnějšímu elektrickému poli. (23)

Podívejme se nejdříve na dielektrika. V neutrálním stavu, tedy bez působení vnějšího elektrického pole dielektrikum nedisponuje žádnými volnými nosiči náboje. Kladný a záporný elektrický náboj je uvnitř tělesa vyvážen a těleso tedy nevykazuje žádné elektrické účinky. Přiložením vnějšího elektrického pole vznikají uvnitř tělesa elektrické dipóly. Pokud je těleso nehomogenní, tedy elektrické dipóly jsou uvnitř tělesa nerovnoměrně rozloženy, vzniká uvnitř tělesa nenulová objemová hustota vázaného náboje. Na hranici tělesa se vytváří povrchový vázaný náboj, vzniká elektrické pole v okolí dielektrika buzené vázaným nábojem tohoto tělesa.

Elektrické pole vázaného náboje vzniká přiložením vnějšího elektrického pole, tedy v důsledku elektrického pole volných nábojů. Orientace pole vázaných nábojů je taková, že oslabuje účinky vnějšího elektrického pole.

Pro úplnost je zde nutné uvést rovněž chování vodivých těles v elektrickém poli. V neutrálním stavu je uvnitř vodivého tělesa kladný a záporný náboj vyvážen a toto těleso se rovněž elektricky neprojevuje. Přiložením vnějšího elektrického pole se elektrony posunou proti směru intenzity tohoto vnějšího pole a na jedné straně vodivého tělesa se vytvoří záporný náboj. Na druhé straně se pak analogicky vytvoří místo s kladným nábojem. Uvnitř tělesa vzniká objem s nulovou intenzitou elektrického pole v důsledku rozmístění náboje v tělese. Tím se uvnitř tělesa eliminují účinky vnějšího elektrického pole.

4.2.3 Definice napětí v elektrickém poli

Napětí v elektrickém poli je definováno jako práce, již vykoná elektrické pole, definované intenzitou elektrického pole, při přenesení jednotkového náboje z bodu 1 do bodu 2. (23)

$$U = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (4.2.17)$$

kde:

U napětí, [V]

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

Náhrada síly intenzitou ve výše uvedeném vzorci je možná díky uvažování již zmíněného jednotkového náboje a plyne ze vzorce

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad \text{kde } Q = 1 \quad (4.2.18)$$

kde:

F síla, [N]

Q velikost náboje, [C]

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

4.2.4 Definice potenciálu v elektrickém poli

Definice potenciálu plyne z rovnice (4.2.17) doplněné o rozdíl potenciálu (23)

$$U = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l} = \varphi_A - \varphi_B \quad (4.2.19)$$

kde:

U napětí, [V]

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

φ potenciál, [V]

Práce vykonaná při přenesení jednotkového náboje se projeví změnou potenciální energie, to je charakterizováno rozdílem potenciálu φ_A v bodě A a potenciálu φ_B v bodě B. Rovnici (4.2.19) lze zapsat následujícími vztahy

$$-d\varphi = \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (4.2.20)$$

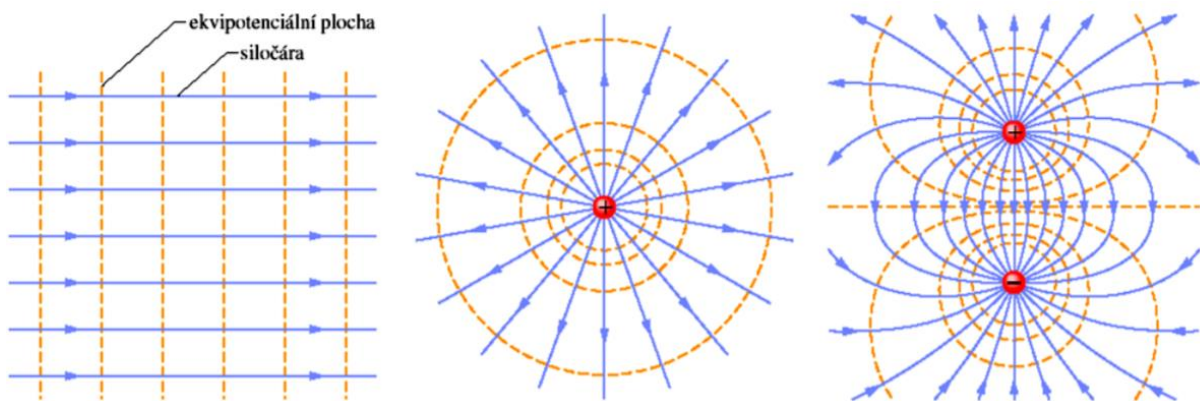
$$\vec{E} = -grad \varphi \quad (4.2.21)$$

kde:

φ potenciál, [V]

E intenzita elektrického pole, [$V \cdot m^{-1}$]

Linie, ve kterých je potenciál konstantní se nazývají ekvipotenciály. Vykonáváme-li práci po ekvipotenciální linii, nevykoná elektrické pole žádnou práci.



Obrázek 14: Ekvipotenciální linie (25)

4.2.5 Definice kapacity v elektrickém poli

Kapacita je definovaná jako konstanta úměrnosti mezi velikostí náboje na kondenzátoru a napětím. (22)

$$Q = C \cdot U \quad (4.2.22)$$

kde:

Q velikost náboje, [C]

C kapacita, [F]

U napětí, [V]

4.3 Elektrostatické pole jednoduchých objektů

V této kapitole uvedeme odvození intenzity elektrického pole za zjednodušených předpokladů pro různé tělesa. Podíváme se zejména na elektrické pole nabitého vodiče, dále také na elektrické pole nabitě koule, či prstence. Tyto zjednodušená odvození jsou zde uvedena pro lepší představu výpočtů prováděných simulačním programem, a tedy i pro lepší pochopení vykonaných simulací.

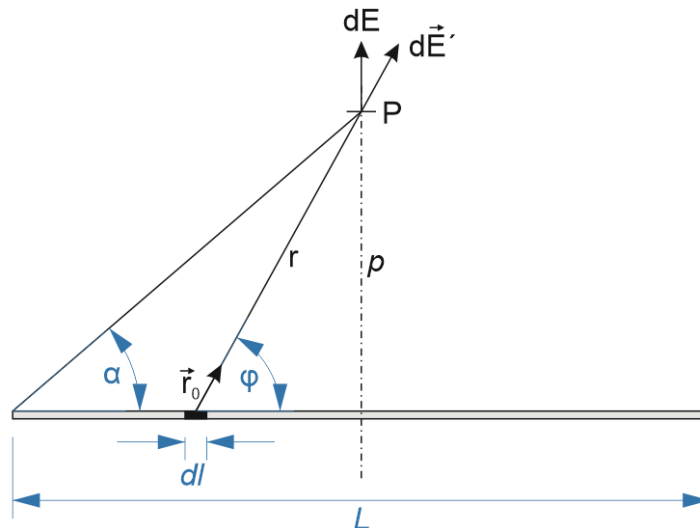
4.3.1 Elektrické pole nabitého vodiče

V této podkapitole se budeme věnovat vlastnostem elektrického pole v konečné vzdálenosti od rovnoměrně nabitého tenkého vodiče. Uvažujeme, že vodič o délce L je nabit nábojem s liniíovou hustotou τ . (23)

Uvažovaný vodič umístěný ve vakuu rozdělíme na elementy o délce dl , každý tento element pak bude představovat bodový elektrický náboj

$$dQ = \tau \cdot dl \quad (4.4.1)$$

Ve vzdálenosti p od osy vodiče je umístěn pozorovací bod P , ve kterém budeme zjišťovat velikost a směr hledaných veličin. Jako první budeme určovat velikost a směr intenzity elektrického pole.



Obrázek 15: Intenzita elektrického pole nabitého vodiče (23)

Směr intenzity elektrického pole je dán spojnici elementu dl a pozorovacího bodu P . Velikost intenzity elektrického pole budeme určovat na základě znalosti Coulombova zákona a vztahu pro intenzitu elektrického pole buzenou bodovým nábojem na konečném poloměru od bodového náboje.

$$d\vec{E}' = \frac{dQ}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \vec{r}_0 = \frac{\tau \cdot dl}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \vec{r}_0 \quad (4.4.2)$$

Jelikož určujeme velikost intenzity v bodě na ose vodiče, lze pokládat tento vodič za symetrický vůči této ose. Představíme-li si, že každý element vybudí intenzitu elektrického pole, jejíž směr je dán spojnici tohoto elementu s bodem P , Výsledný směr intenzity bude na nabitý vodič

kolmý, jelikož vzhledem na symetrii vodiče se všechny ostatní dílčí směry intenzity od sebe odečtou.

Velikost výsledné intenzity elektrického pole od elementu dl se určí pomocí úhlu, který svírají spojnice elementu s bodem P a samotný vodič, tento úhel označíme φ . Pak intenzita je dána jako

$$dE = |d\vec{E}^z| \cdot \sin \varphi = \frac{\tau \cdot dl}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} \cdot \sin \varphi \quad (4.4.3)$$

Celkovou intenzitu od všech elementů na vodiči určíme integrací.

$$E = \frac{\tau}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \int_{l=0}^{l=L} \frac{1}{r^2} \cdot \sin \varphi \cdot dl \quad (4.4.4)$$

Po složitějších úpravách, které lze nalézt v literatuře k této kapitole výsledný vztah bude

$$E = \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot p} \cdot \cos \alpha \quad (4.4.5)$$

kde dle Pythagorovy věty

$$\alpha = \frac{L/2}{\sqrt{(L/2)^2 + a^2}} \quad (4.4.6)$$

Pro naše výpočty je výhodné uvažovat také stav, kdy nabitý vodič je nekonečně dlouhý, pak délka $L \rightarrow \infty$ a tím pádem úhel $\alpha \rightarrow 0$.

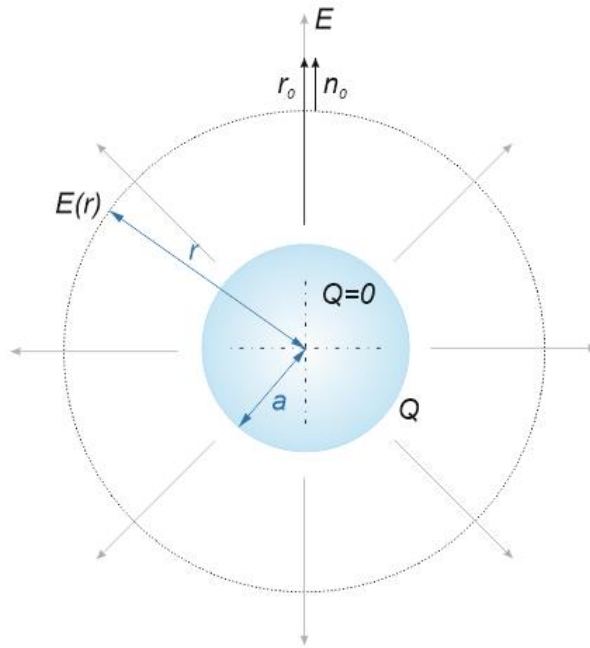
Pak bude platit následující vztah

$$E = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot p} \cdot \cos \alpha = \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot p} \quad (4.4.7)$$

Tato kapitola za použití uvedených zjednodušení přehledně uvádí příspěvek k elektrickému poli izolátoru od fázového vodiče. V našem případě jsou nabitě i různé armatury, pomocí kterých je fázový vodič upevněn. Tyto armatury nabývají různých tvarů, proto zde uvedu ještě několik příkladů určení elektrostatického pole jednoduchých objektů.

4.3.2 Elektrické pole nabitě vodivé koule

Uvažujeme rovnoměrně nabitou kouli s poloměrem a , která je umístěna ve vakuu. (23) Počítáme-li elektrické pole vně nabitě koule je výhodné zvolit kolem této koule rovněž sférickou obalovou plochu s konečným poloměrem, na které budeme intenzitu elektrického pole počítat.



Obrázek 16: Intenzita elektrického pole nabitě koule (23)

Pak s využitím Gaussovy věty můžeme psát pro $r \geq a$

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = E(r) \cdot S = E(r) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (4.4.8)$$

Pak

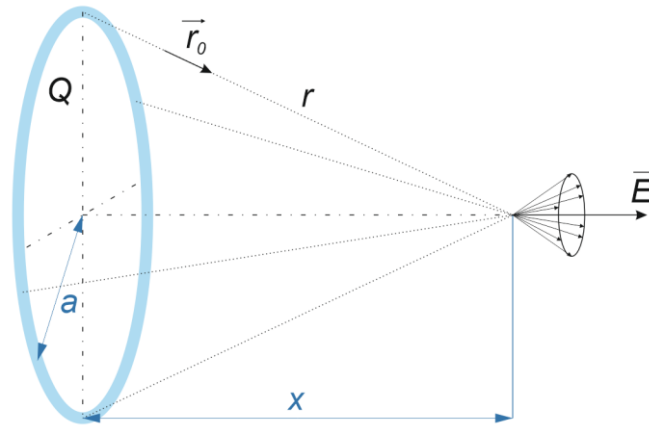
$$E(r) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (4.4.9)$$

Uvnitř koule je do sférické obalové plochy uzavřen nulový náboj, a tedy i intenzita elektrického pole je zde nulová.

4.3.3 Elektrické pole na ose nabitého prstence

Rovnoměrně nabitý prstenc má poloměr a , a je nabit nábojem Q . Prstenc je umístěn ve vakuu.

(23)



Obrázek 17: Intenzita elektrického pole nabitého prstence (23)

Pak vybudí tento náboj intenzitu elektrického pole se směrem shodným se spojnicí elementu délky a a místa P, ve kterém pole počítáme. Velikost tohoto elementu ve vzdálenosti x bude dána jako

$$d\vec{E}'(x) = \frac{dQ}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (4.4.12)$$

Pak po sečtení všech příspěvků od všech elementů získáme celkovou intenzitu elektrického pole v místě o vzdálenosti x . Při součtu se opět jako v případě dlouhého vodiče uplatní pouze složka ve směru osy prstence vzhledem na symetrii směru ostatních příspěvků. Výsledná intenzita je pak po úpravách dle (23) rovna

$$E(x) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{x}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \quad (4.4.13)$$

4.4 Hodnoty intenzity elektrického pole stanovené nařízením vlády č. 291/2015 Sb.

Nařízení vlády č. 291/2015 Sb., tedy Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, zapracovává do české legislativy směrnici Evropského parlamentu a Rady 2013/35/EU o minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců rizikům spojeným s fyzikálními činiteli (elektromagnetickými poli), směrnici Evropského parlamentu a Rady 2006/25/ES o minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců rizikům spojeným s fyzikálními činiteli (optickým zářením z umělých zdrojů). (26)

Nařízení upravuje kromě jiného rovněž hygienické limity neionizujícího záření. Pro účely tohoto nařízení se nejvyšší přípustná hodnota expozice neionizujícímu záření rozumí hygienický limit neionizujícího záření podle zákona o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci (Zákon 309/2006 Sb.). (27)

V příloze č. 1 k nařízení vlády č. 291/2015 Sb. v části Nejvyšší přípustné hodnoty a referenční hodnoty jsou uvedené referenční hodnoty pro intenzitu elektrického a magnetického pole (magnetickou indukci).

Pro frekvenci 50 Hz je referenční úroveň intenzity elektrického pole stanovena na $10\,000\text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ při nepřetržité expozici. (26)

5 Elektrostatické pole vedení přenosové soustavy

V této kapitole se budeme věnovat tvorbě modelů různých uskupení vodičů na stožárech v rámci přenosové soustavy a simulaci jejich parametrů v programu Agros2D. Tvorba simulací je nastíněna na modelu jednoho vodiče vedení o napětí 400 kV umístěného ve výšce od země odpovídající umístění vodiče na stožáru VVN. Je zkoumáno rozložení elektrostatického pole v okolí tohoto vodiče. Dále byly provedeny simulace použití svazkových vodičů, a to dvousvazku a trojsvazku., v případě svazkových vodičů byly zkoumány rovněž rozestupy mezi jednotlivými vodiči svazku jedné fáze.

Po důkladném rozboru elektrostatického pole v okolí vodičů vedení VVN byly provedeny simulace elektrostatického pole vodičů umístěných na různých typech stožárů. Elektrostatické pole pak bylo zkoumáno v pozorovací hladině 1,8 m od země pro určení vlivu tohoto pole ve výšce, ve které by toto pole mohlo ovlivnit organismy pohybující se v jeho blízkosti.

5.1 Simulační program Agros2D

Program Agros2D je volně dostupný program, který poskytuje numerická řešení fyzikálních polí ve 2D prostřednictvím metody konečných prvků. Program poskytuje možnost vytváření jednoduchých modelů v implementovaném grafickém editoru. Z vytvořeného modelu je možné generovat síť (angl. mesh) pomocí triangulace, kterou program využije pro vlastní simulaci zvoleného fyzikálního pole. S takto vytvořenou simulací je dále možno pracovat, vytvářet grafy a tabulky, zkoumat údaje v řezech a podobně.

Procesor je založený na knihovně Hermes a deal.II vytvořených vědeckým týmem Západočeské univerzity v Plzni. (28)

Kromě elektrostatického pole, které je náplní této práce, je program Agros2D uzpůsobený na simulace proudového pole, magnetického pole, přenosu tepla, strukturální mechaniky, akustiky, nestlačitelných kapalin, frekvencí rádiových vln a Richardsovy rovnice.

5.2 Numerické řešení elektrostatického pole jednoho vodiče

V této podkapitole řešíme rozložení elektrostatického pole jednoho vodiče umístěného ve výšce odpovídající umístění vodiče na stožáru vedení 400 kV typu Portál. Tento jednoduchý příklad byl zvolen pro nastínění postupu vytváření simulace v programu Agros2D.

Uvažujeme fázový vodič následujících parametrů:

Typ vodiče	490-AL1/64-ST1A	
Průřez	Al (Aluminium, Hliník)	490,3 mm ²
	St (Steel, Ocel)	63,6 mm ²
	Celkový	553,8 mm ²
Počet drátů	Al	12 + 18 + 24
	St	1 + 6
Průměr drátů	Al	3,4 mm
	St	3,4 mm
Průměr	Duše	10,2 mm
	Celkový	30,6 mm
Hmotnost na jednotku délky	1852,9 kg · km ⁻¹	
Hmotnost na jednotku délky (včetně maziva)	1865,5 kg · km ⁻¹	
Jmenovitá pevnost	150,81 kN	
DC odpor	0,059 Ω · km ⁻¹	
Konečný modul pružnosti	67 100 MPa	
Součinitel délkové roztažnosti	1,94 x 10 ⁵ K ⁻¹	

Tabulka 12: Parametry fázového vodiče (29)

Typ stožáru	Portál, nosný
Vedení	400 kV
Výška stožáru	29 869 mm
Výška portálu	23 240 mm
Délka izolátoru	5 240 mm
Výška umístění fázového vodiče	18 000 mm

Tabulka 13: Parametry stožáru (30)

Uvažujeme tedy fázový vodič typu 490-AL1/64-ST1A o průměru 30,6 mm na kterém je fázové napětí vedení 400 kV maximální hodnoty $(400/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ kV. Tento vodič je umístěn ve výšce 18 m od země.

Parametry simulace v programu Agros2D:

Pole	Elektrostatické
Analýza	Statický stav
Solver	Lineární
Zjemnění sítě	2
Stupeň polynomu	2

Tabulka 14: Parametry simulace

Parametr zjemnění sítě umožňuje uživateli manuální korekci sítě v rámci celého modelu, případně jeho části čímž se dosáhne zvětšení přesnosti řešení na úkor výpočetního času.

Parametr stupeň polynomu označuje, jakým stupněm polynomu je aproximováno rozložení skalárního potenciálu elektrického pole v modelu.

Tyto parametry byly zvoleny na základě několika provedených simulací s různě nastavenými parametry a analýzou výsledků těchto simulací pro optimalizaci zvolených parametrů.

Parametry Preprocessoru v programu Agros2D volíme následovně:

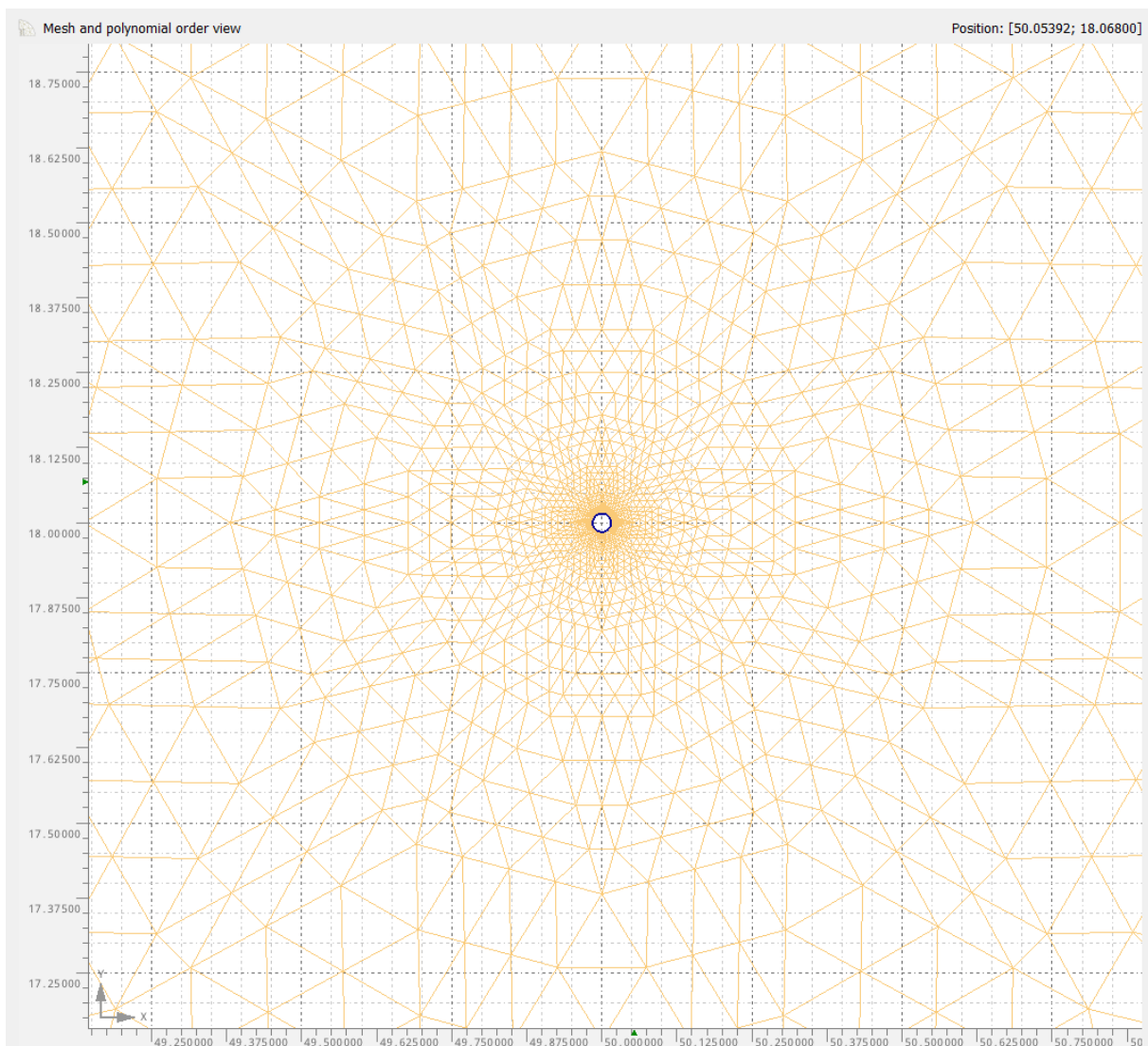
Okrajové podmínky

- Fázové napětí: typ proměnné: Napětí, Skalární potenciál: $(400/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ kV
- Napětí země: typ proměnné: Napětí, Skalární potenciál: 0 kV

Materiálové vlastnosti

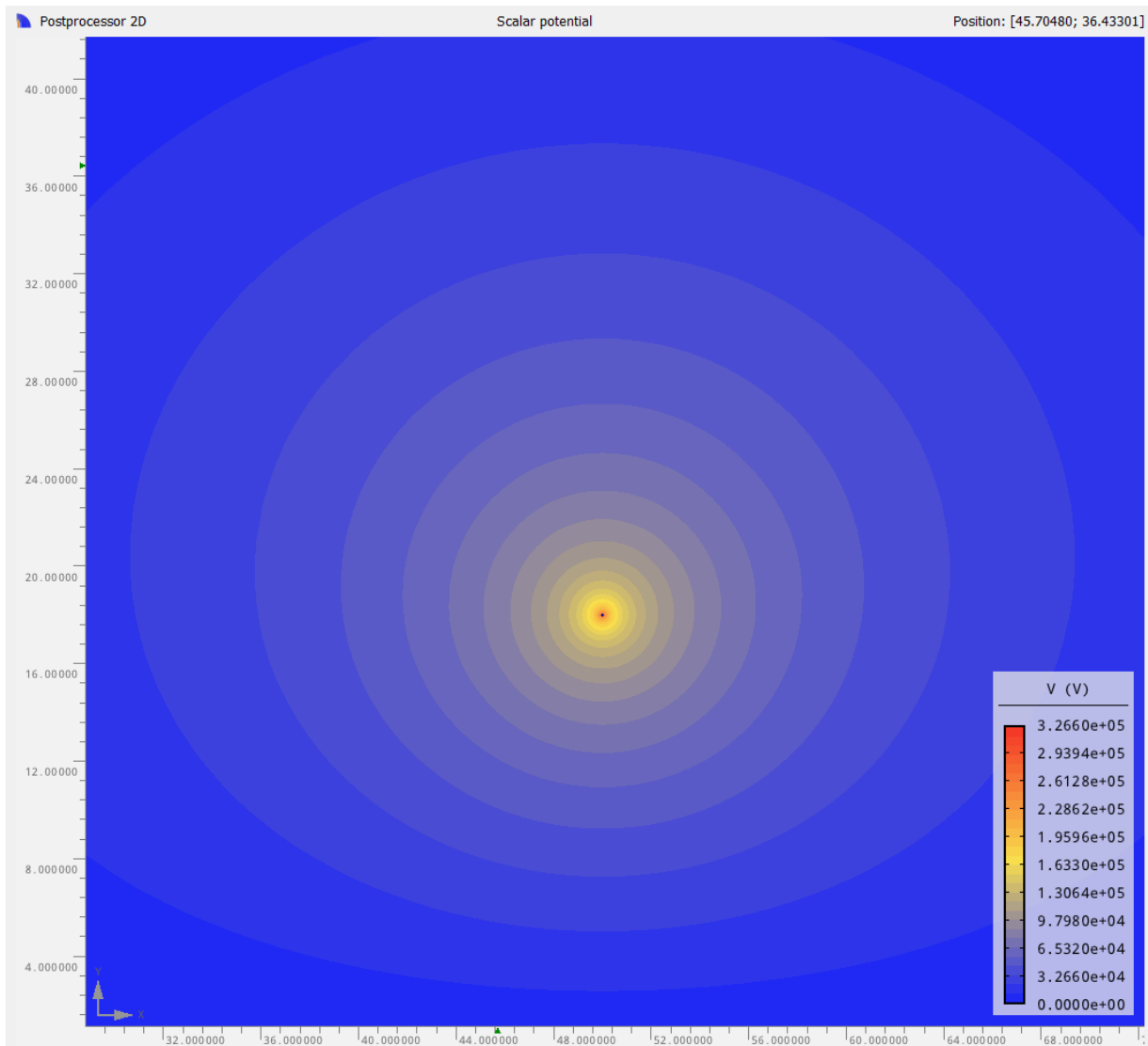
- Vzduch: $\epsilon_r = 1$

Výslední podobu sítě pro výše popsanou geometrii zobrazuje následující obrázek. Sít' je možné dále zjemňovat. Složitější sít' potřebuje pro svůj výpočet vyšší výpočetní čas. V případě jednoduchých modelů jako je jeden vodič ve vzdálenosti od země je změna výpočetního času zanedbatelná a zjemnění modelu nenabízí markantní změny ve výsledcích zkoumání. Lze říct, že zjemnění sítě je výhodné zejména ve složitější geometrii zkoumaného modelu, kdy je potřeba respektovat složitější tvary, případně pobrat i malé objekty či jejich části v poměru k velikosti modelu jako celku.



Obrázek 18: Sít' vygenerovaná programem Agros2D

Po vyřešení je možné sledovat rozmístění skalárního potenciálu a intenzity elektrického pole.



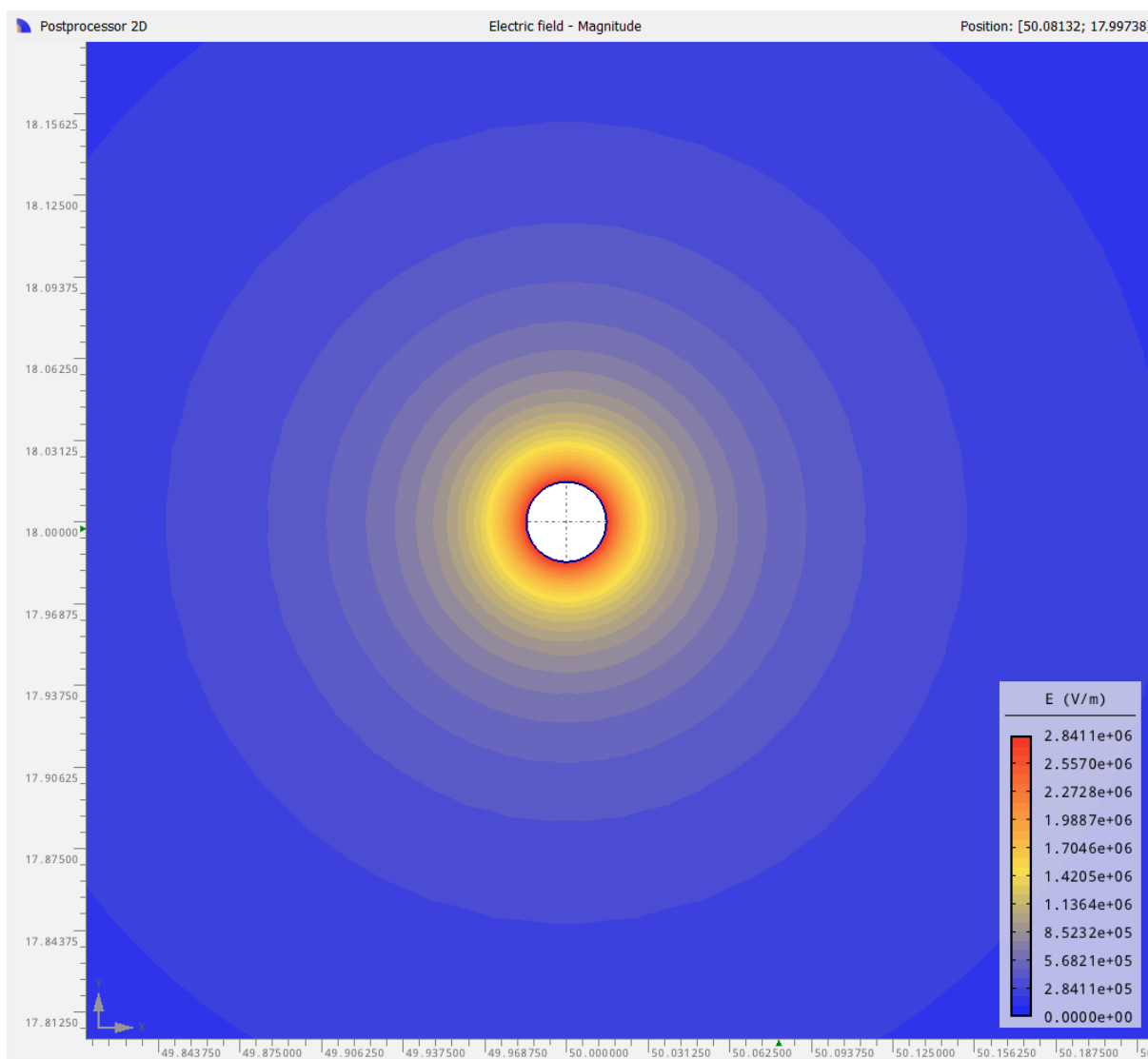
Obrázek 19: Prostorové rozložení potenciálu pro jeden vodič

Na následujícím grafu je možné vidět rozložení intenzity elektrického pole v bezprostředním okolí vodiče v x-ové ose průřezu vodiče. Z grafu je zřejmé, že uvnitř vodiče je intenzita elektrického pole

$$E_{d < r} = 0 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5.2.1)$$

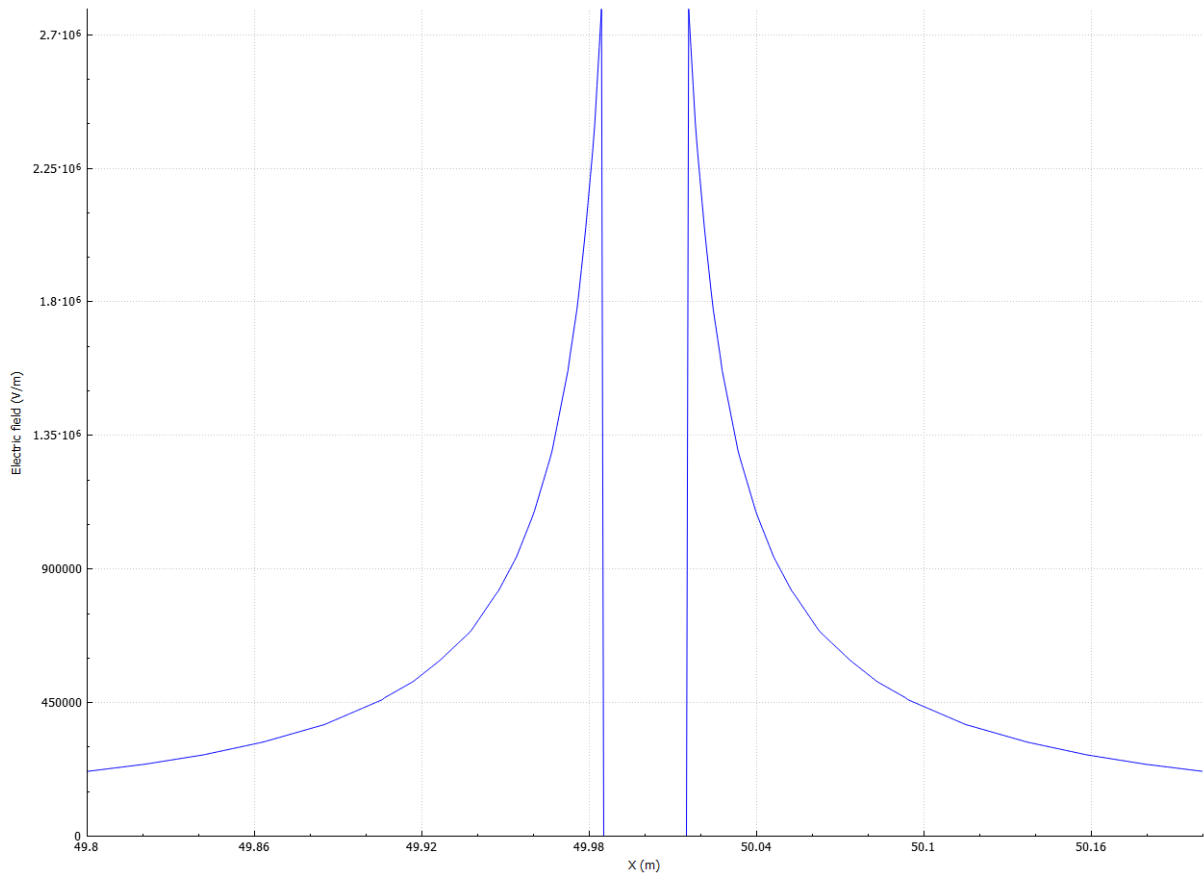
kde r je poloměr vodiče a d je vzdálenost od středu průřezu vodiče.

Na povrchu vodiče je maximální intenzita elektrického pole E_{max} a s rostoucí vzdáleností intenzita elektrického pole klesá k nule. Rozložení intenzity elektrického pole v ose x je rovnoměrné.



Obrázek 20: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro jeden vodič

Graf je vytvořen proložení pětiset hodnot získaných z grafu prostorového rozložení intenzity elektrického pole v ose x fázového vodiče, což je maximální hodnota nabízená v rámci programu. Případná chyba vznikla nedostatkem odečtených bodů, ze kterých byl průběh aproximován.



Obrázek 21: Graf intenzity elektrického pole ve vodorovné ose vodiče

Rovněž je možné sledovat rozložení intenzity elektrického pole na svislé y-ové ose průřezu vodiče. Z grafu je opět zřejmé, že uvnitř vodiče je intenzita elektrického pole

$$E_{d < r} = 0 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5.2.2)$$

kde r je poloměr vodiče a d je vzdálenost od středu průřezu vodiče.

Na povrchu vodiče je maximální intenzita elektrického pole E_{max} a s rostoucí vzdáleností intenzita elektrického pole klesá k nule.

Na příkladu jednoho fázového vodiče jsme demonstrovali práci se simulačním programem Agros2D. V Dalšíh kapitolách se budeme věnovat podrobnějšímu zkoumání elektrostatických polí na složitějšíh modeleh vedení VVN.

5.3 Numerické řešení elektrostatického pole vodičů jedné fáze ve svazku

Jelikož je na vedení VVN používáno zejména vodičů ve svazku, nejčastěji trojsvazku, budeme tuto podkapitulu věnovat zkoumání elektrostatického pole takového uskupení fázových vodičů. Pro simulaci budeme používat stejných nastavení a parametrů, jako v případě jednoho vodiče.

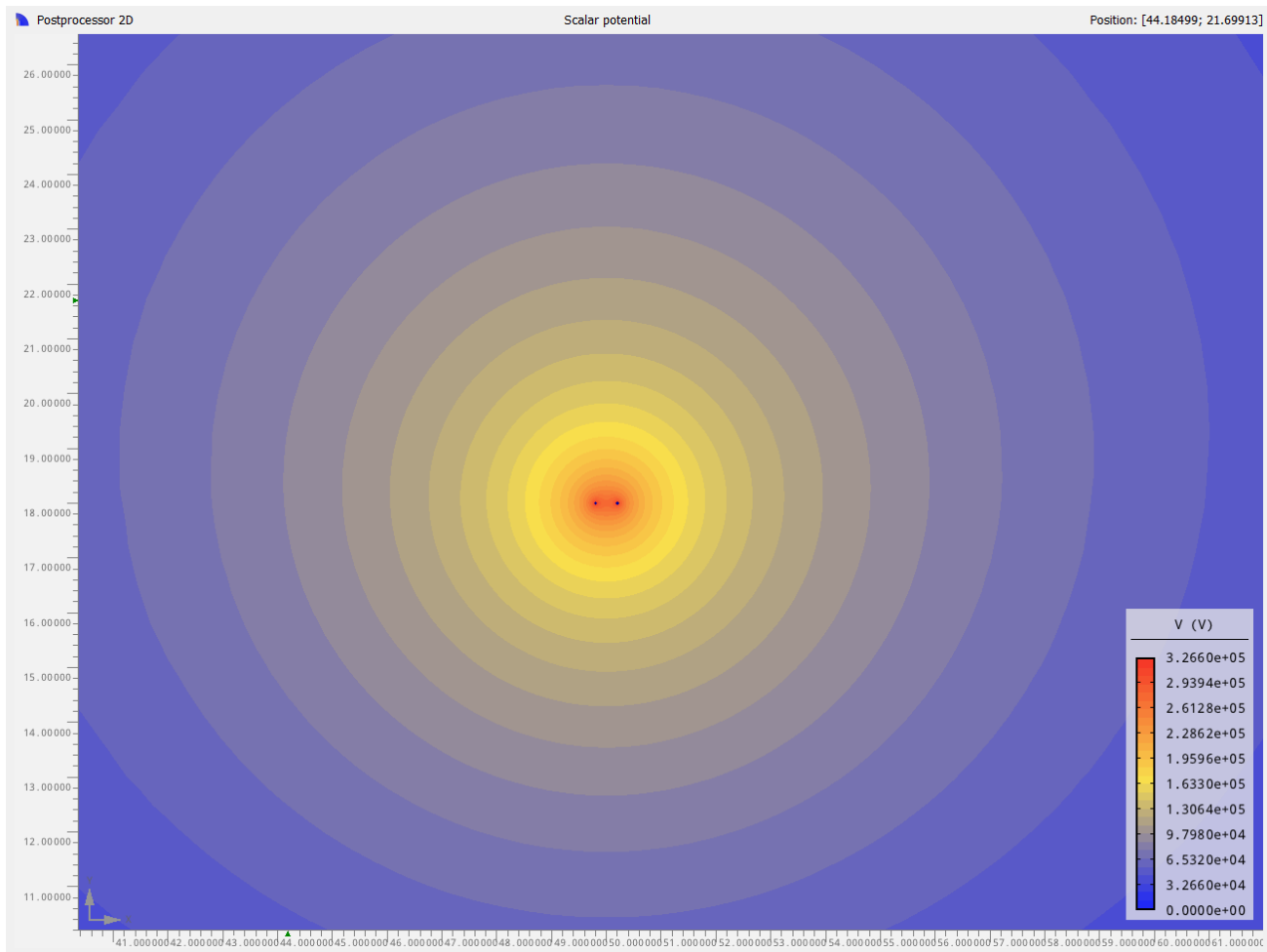
Dalším důležitým parametrem je vzdálenost vodičů jedné fáze ve svazku. Při určení této vzdálenosti jsme se řídili dle parametrů normovaných armatur vyráběných společnostmi ELBA, a.s. Kremnica, která je jedním z hlavních dodavatelů armatur pro vedení VVN v České republice. Na základě katalogu byly vybrány armatury:

- Distanční rozpěrka 237384.5 pro uchycení vodičů v trojsvazku.
- Distanční rozpěrka 237403 pro uchycení vodičů v trojsvazku.
- Distanční rozpěrka 237212 pro uchycení vodičů ve dvousvazku.

Katalogové listy výše zmíněných rozpěrek je možné nalézt v příloze č.4. Z katalogových listů je zřejmé, že vzdálenost vodičů ve svazku používaná v české přenosové soustavě je 400 mm. Do simulací použijeme tuto vzdálenost.

V této kapitole budeme zkoumat rozložení intenzity elektrického pole dvousvazku, trojsvazku a čtyřsvazku a vysvětlíme, proč je na vedeních přenosové soustavy používáno právě uspořádání vodičů v trojsvazku.

V následujících dvou grafech vidíme rozložení skalárního potenciálu a intenzity elektrického pole dvousvazku.



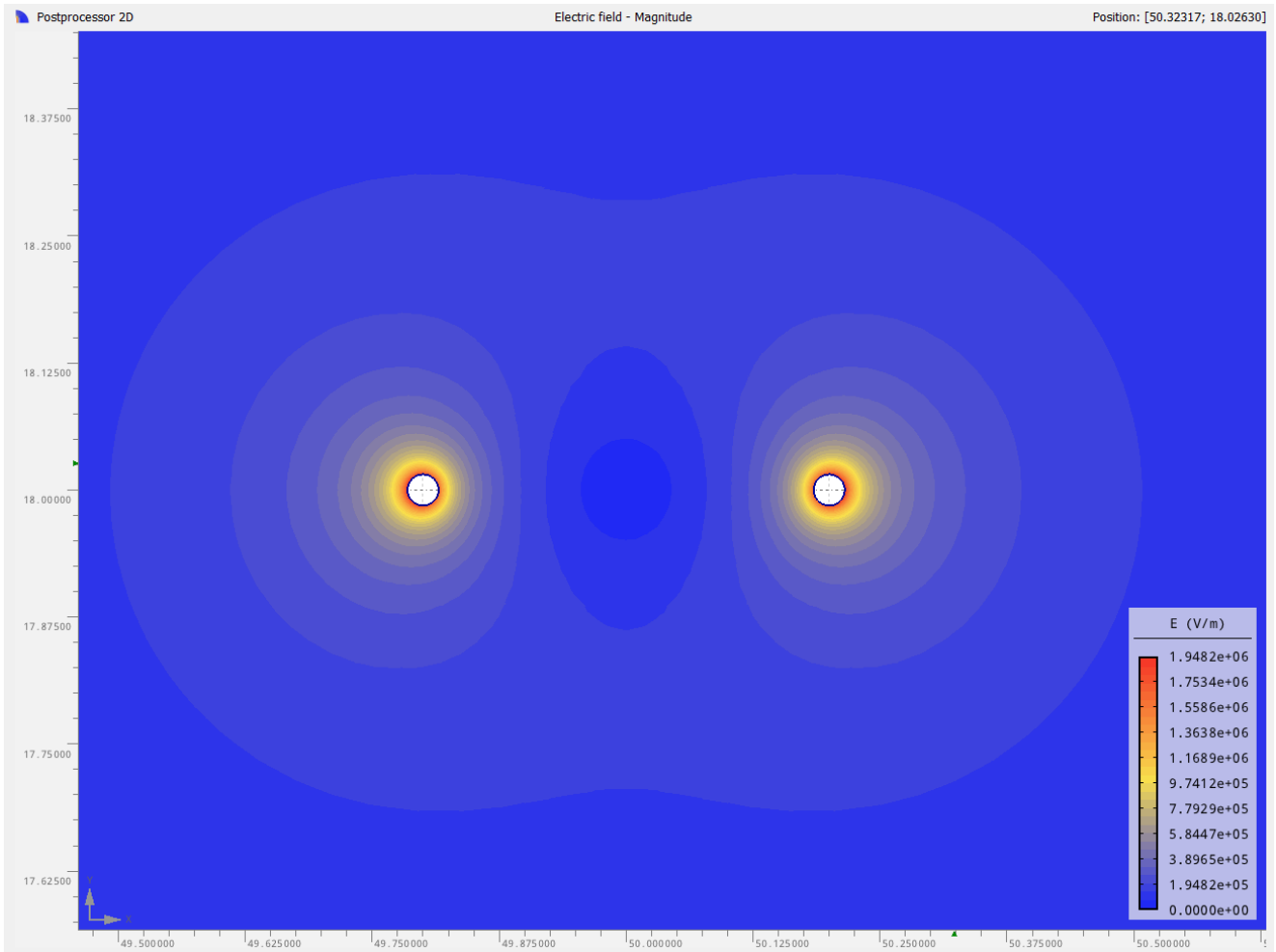
Obrázek 22: Prostorové rozložení potenciálu pro dvousvazek

Opět se podíváme na rozložení intenzity elektrického pole na x-ové ose průřezů vodičů dvousvazku. Uvnitř vodičů zůstala zachovaná předpokládaná nulová intenzita elektrického pole. Od okraje vodičů pak intenzita klesá k nule. Mezi vodiči pak intenzita dosáhne minimální hodnoty

$$E_{min} \geq 0 \text{ V/m} \quad (5.3.1)$$

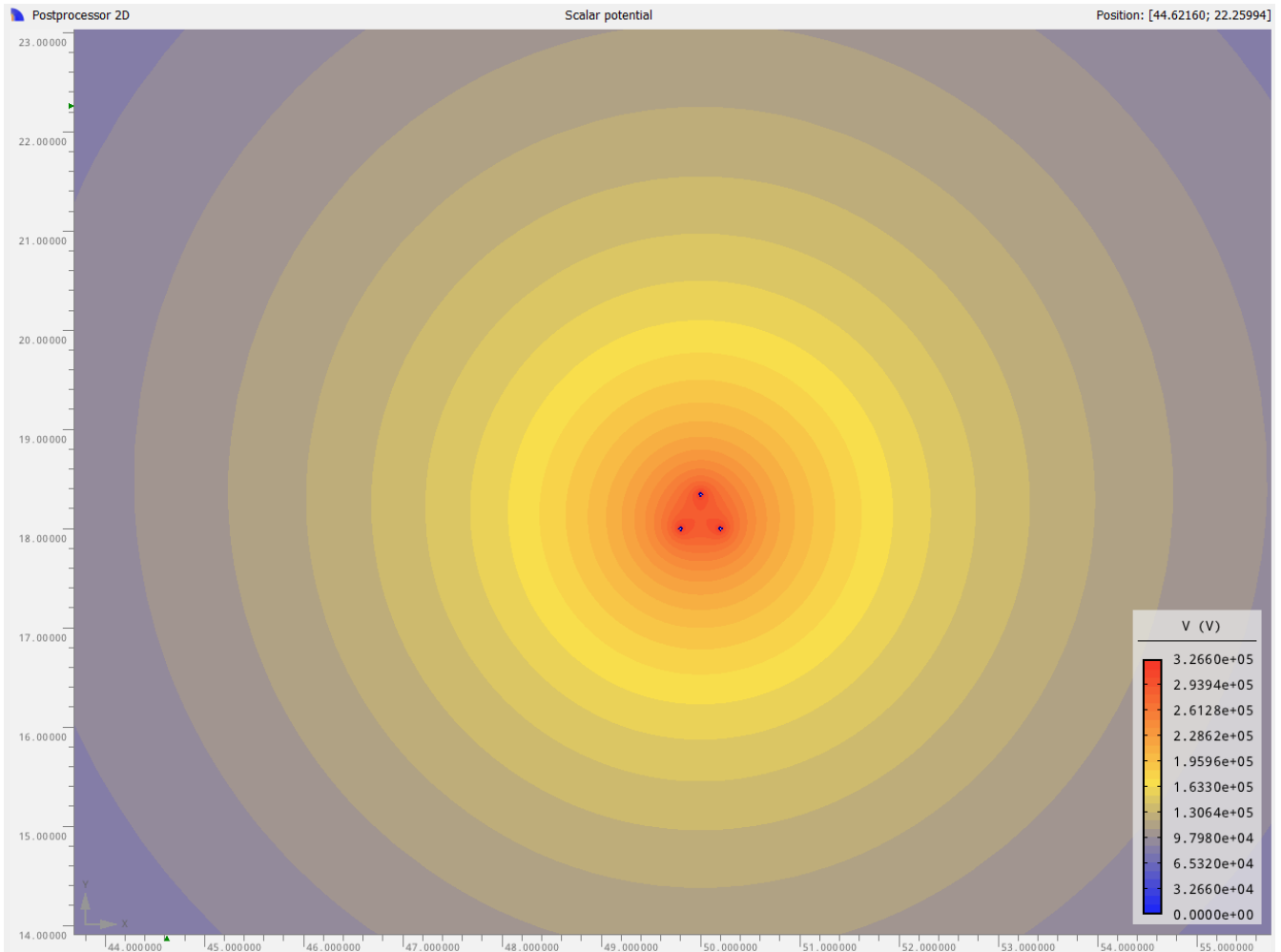
Která je dána jak přírůstkem od prvního, tak i druhého vodiče ve svazku.

Pro další porovnání se nyní podíváme na výsledky řešení trojsvazku fázových vodičů jedné fáze. Vodiče v trojsvazku jsou uspořádány tak aby jejich vzájemná vzdálenost byla 400 mm a fázové vodiče byly tedy umístěny ve vrcholech rovnostranného trojúhelníku. Toto rozložení je možné dobře demonstrovat na pozici úchytnů pro fázový vodič na distanční trojrozpěřce.



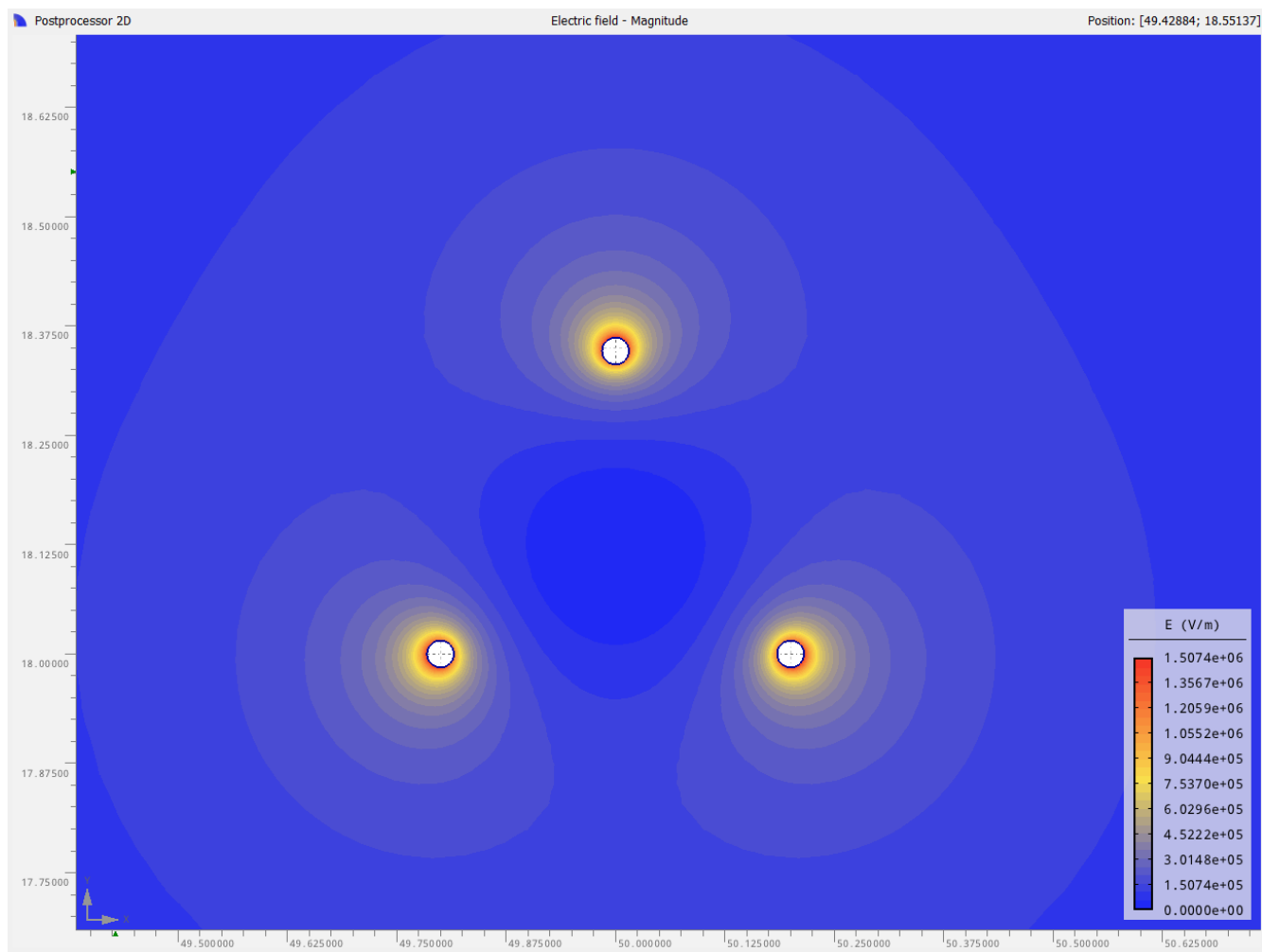
Obrázek 23: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro dvousvazek

Nyní se podíváme na rozložení skalárního potenciálu a intenzity elektrického pole v bezprostředním okolí vodičů v trojsvazku.



Obrázek 24: Prostorové rozložení potenciálu pro trojsvazek

Porovnáme-li grafy pro prostorové rozložení intenzity elektrického pole fázového vodiče, fázových vodičů ve dvousvazku a trojsvazku, je možné konstatovat, že intenzita elektrického pole na povrchu fázového vodiče s rostoucím počtem vodičů ve svazku klesá. To představuje zásadní výhodu a demonstruje skutečnost, že u vedení velmi vysokého napětí je umístění fázových vodičů do svazku preferované. Nižší intenzita elektrického pole na povrchu vodičů je předpokladem pro nižší ztráty korunou, nižší hluchost vedení, potažmo nižší ztráty přenosového vedení. Ve svazcích je pro stejný přenášený výkon možné použít menšího průřezu vodiče.



Obrázek 25: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro trojsvazek

Závěrem porovnání použití samostatných vodičů a vodičů ve svazcích je možné konstatovat fakt, že použitím svazkových vodičů dosáhneme menší intenzity elektrického pole na jejich povrchu, což, jak již bylo popsáno, je z hlediska provozních ztrát na vedení a minimalizace nepříznivých vlivů výhodné.

5.4 Numerické řešení elektrostatického pole jednoduchého vedení

V této kapitole se podíváme na rozložení elektrostatického pole v okolí vodičů vedení 400 kV v uspořádání podle různých typů stožárů. Konkrétně budeme sledovat intenzitu elektrického pole na vodičích v uspořádání na stožáru typu Portál, Kočka a Dunaj typizovaných jako nosné stožáry.

Po prozkoumání elektrostatického pole na stožárech VVN můžeme s výhodou použít vytvořené modely a s pomocí několika úprav sledovat rozložení intenzity elektrického pole vodičů v minimální přípustné výšce 8 metrů od zemského povrchu a výsledky porovnat s maximální hladinou intenzity elektrostatického pole danou nařízením vlády č. 291/2015 Sb., Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením (26), která pojednává o maximálních hodnotách intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m od povrchu při nepřetržité expozici. Tato hodnota je $10\,000\text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ pro frekvenci 50 Hz.

Jelikož vedením prochází elektrický trojfázový elektrický proud a je na nich napětí rovněž trojfázové, budeme intenzitu elektrostatického pole zkoumat ve čtyřech bodech jedné periody průběhu trojfázového napětí. Pro vyhodnocení hodnot ve výšce 8 metrů od povrchu bude použit stejný postup. Dále pak vyhodnotíme průběh průměrných hodnot intenzit elektrického pole získaných ze simulací.

$$U_m = 326,598\text{ kV} \quad (5.4.1)$$

Z toho pak vyplývající hodnoty v částech periody:

	$U_1[\text{kV}]$	$U_2[\text{kV}]$	$U_3[\text{kV}]$
$t = 1/12 \cdot T$	$1/2 \cdot U_m$	$-U_m$	$1/2 \cdot U_m$
$t = 1/4 \cdot T$	U_m	$-1/2 \cdot U_m$	$-1/2 \cdot U_m$
$t = 1/3 \cdot T$	$1/2 \cdot U_m$	$1/2 \cdot U_m$	$-U_m$
$t = 3/4 \cdot T$	$-U_m$	$1/2 \cdot U_m$	$1/2 \cdot U_m$

Tabulka 15: Hodnoty trojfázového napětí v různých částech periody pro simulaci elektrostatických polí na stožárech

Okrajové podmínky simulace

- Fázové napětí: typ proměnné: Napětí, Skalární potenciál: $(400/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ kV
- Záporné fázové napětí: typ proměnné: Napětí, Skalární potenciál: $-(400/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ kV
- Polovina fázového napětí: typ proměnné: Napětí, Skalární potenciál: $\frac{(400/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}}{2}$ kV
- Polovina záporného fázového napětí: typ proměnné: Napětí,
Skalární potenciál: $-\frac{(400/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}}{2}$ kV
- Napětí země: typ proměnné: Napětí, Skalární potenciál: 0 kV

V poslední podkapitole se zaměříme na změny těchto hodnot při použití polokotevních stožárů, které se používají zejména v případech, kdy z nějakého důvodu potřebujeme zvednou vodiče do vyšší výšky, než se nám nabízí při zavěšení na nosných izolátorových závěsech. Jedním z těchto důvodů tedy může být i omezení hodnot intenzity elektrického pole ve stanovené výšce.

5.4.1 Numerické řešení elektrostatického pole vedení na stožáru typu 1 x 400 kV Portál – nosný

V této podkapitole budeme pozorovat prostorové rozmístění intenzity elektrického pole vodičů na stožáru typu Portál – nosný. Pro simulaci použijeme stejné parametry jako v předchozích kapitolách. Výšky umístění vodičů na stožáru zobrazuje následující tabulka.

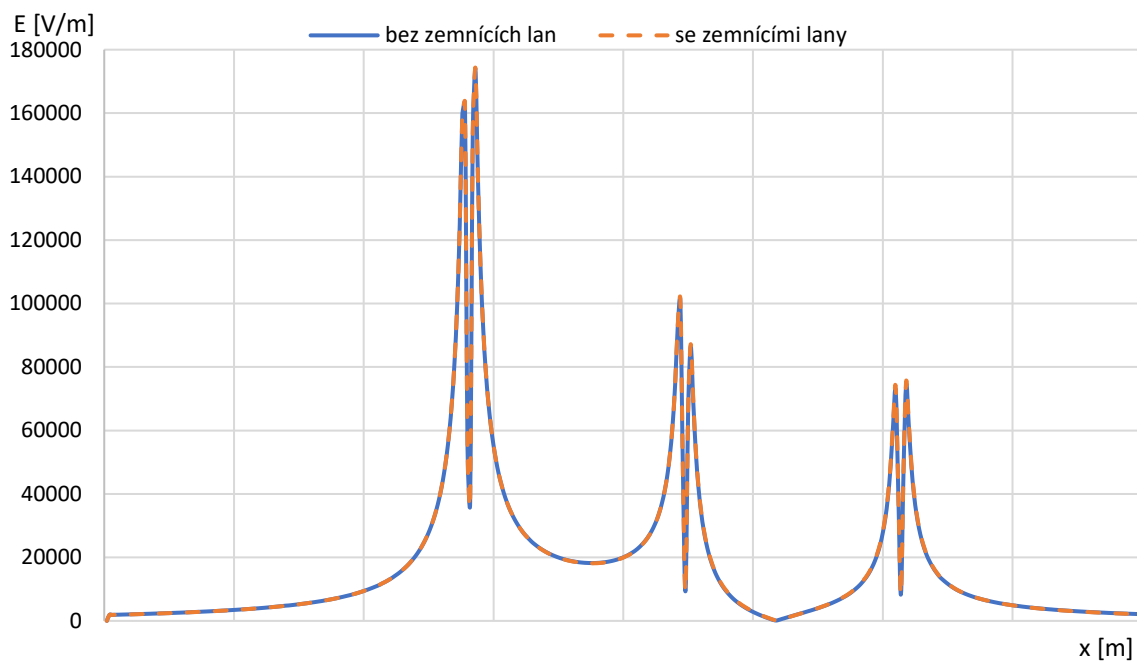
Typ vodiče	Vzdálenost vodiče od země
Fázový vodič	18 m
Zemní lano	29,87 m

Tabulka 16: Výšky umístění vodičů na stožáru typu Portál 1 x 400 kV

Fázové vodiče jsou na stožáru typu Portál umístěné v jedné rovině, potažmo vzdálenosti od země. Uvažujeme-li dvě zemní lana, budou taktéž umístěné v jedné rovině ve svislé vzdálenosti 11,87 m od fázových vodičů. Zemní lana uvažujeme jako jednoduchý vodič, zatímco fázové vodiče uvažujeme umístěné v trojsvazku pro každou fázi. Dále budeme uvažovat rovnoměrné zatížení všech třech fází vedení. Hodnoty intenzity elektrického pole jsou zjednodušené. Zjednodušení simulací spočívá ve dvou základních bodech. Vzduch v okolí vedení uvažujeme jako homogenní, izotropní prostředí s konstantní relativní permitivitou. Dalším zjednodušujícím faktorem je zanedbání vlivu vlhkosti vzduchu v okolí vedení, potažmo jejího vlivu na elektrické vlastnosti vedení.

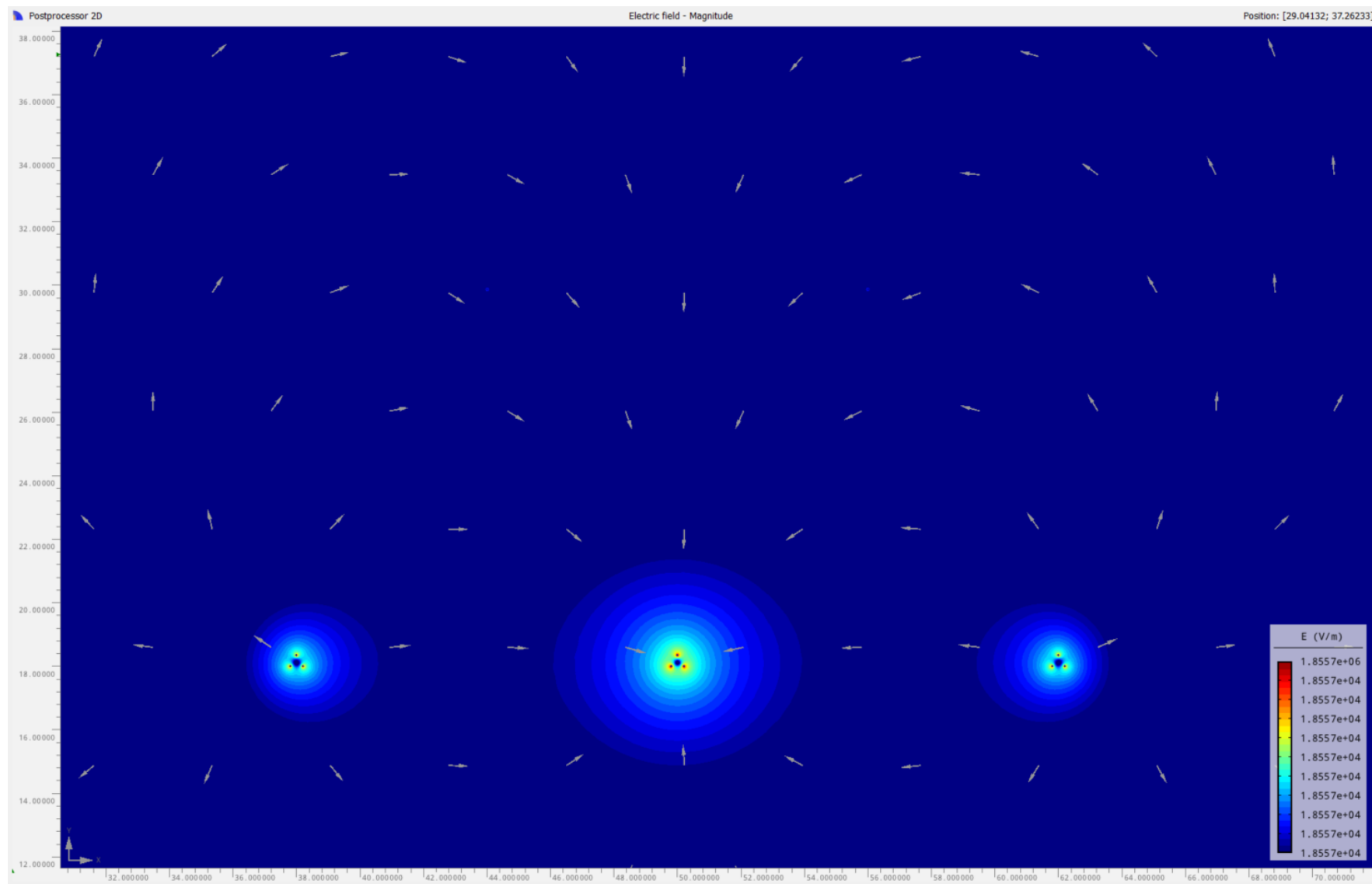
Prostorové rozložení intenzity elektrického pole v částech periody podle tabulky č. 15 je zobrazeno na následujících grafech.

Z grafů je zřejmé, že v okolí vodičů s největší okamžitou hodnotou napětí v daném čase jsou hodnoty intenzity elektrického pole rovněž největší. V grafech jsou rovněž zobrazené vektory intenzity elektrického pole. Na grafu číslo 28 a číslo 30 je možné sledovat změnu směru vektorů v návaznosti na kladnou, resp. zápornou okamžitou hodnotou napětí na levé fázi vedení.

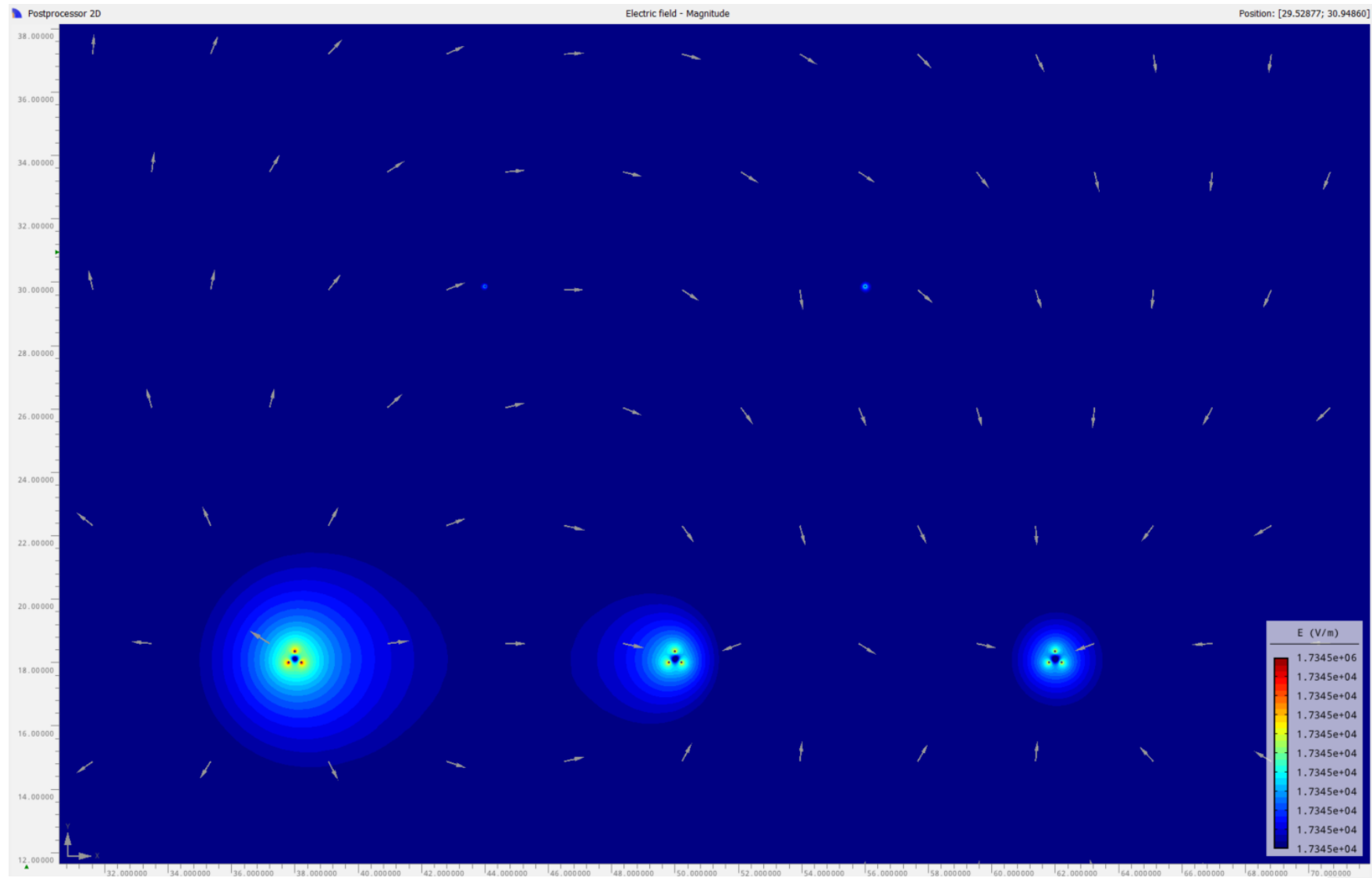


Obrázek 26: Graf porovnání intenzity elektrického pole s a bez použití zemnicích lan

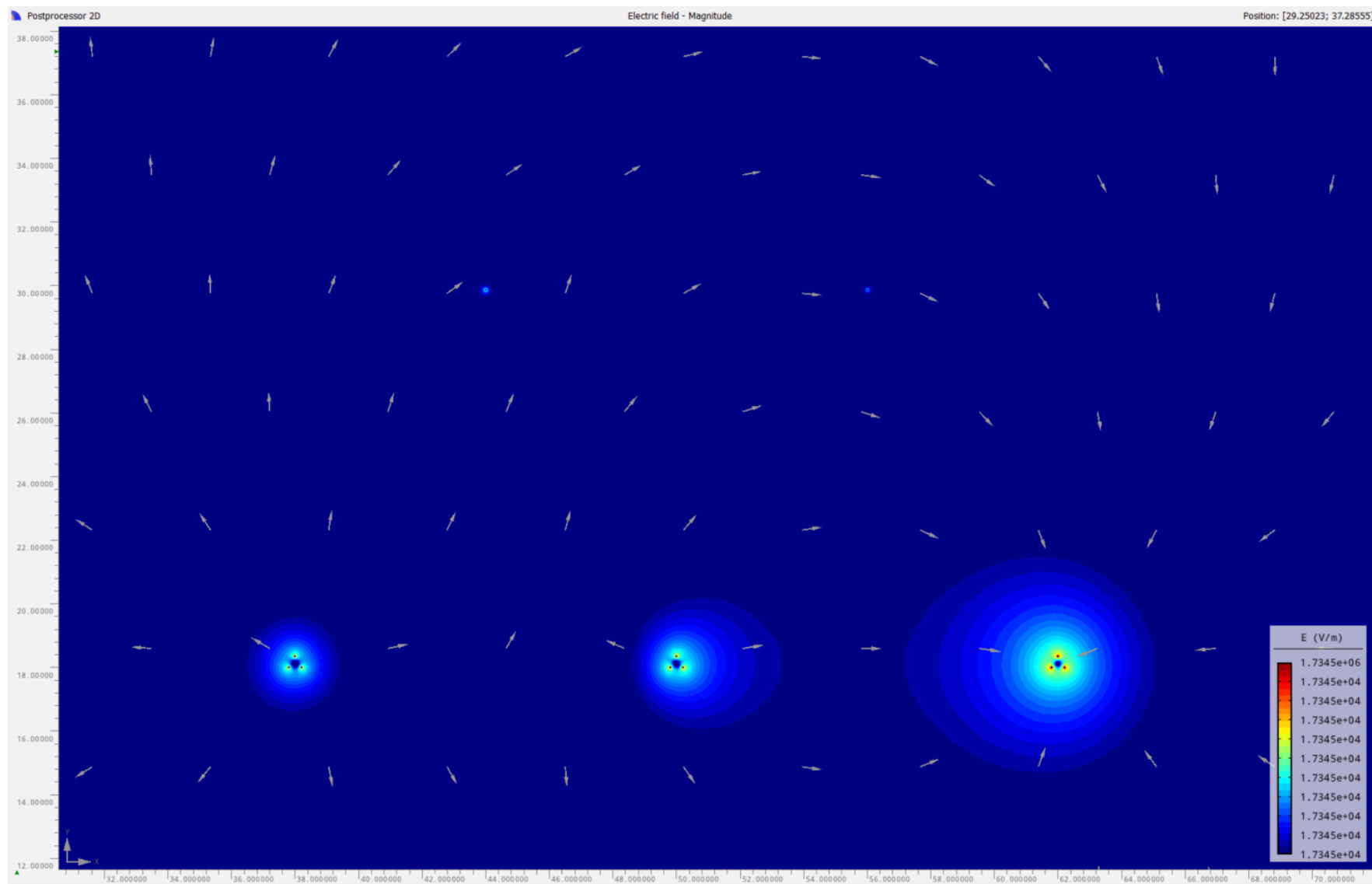
V grafu č. 26 jsou porovnané hodnoty ve svislé ose vedení s použitím zemnicích lan a bez použití zemnicích lan. Hodnoty byly do grafu odečteny ze simulace v čase $t = \frac{3}{4} \cdot T$. Z grafu je zřejmé, že používání zemnicích lan má pouze velmi malý účinek na změnu intenzity elektrického pole v okolí vedení. Hodnoty intenzity v případě použití zemnicích lan jsou menší pouze nepatrně. Z grafu tedy není možno změny odečíst.



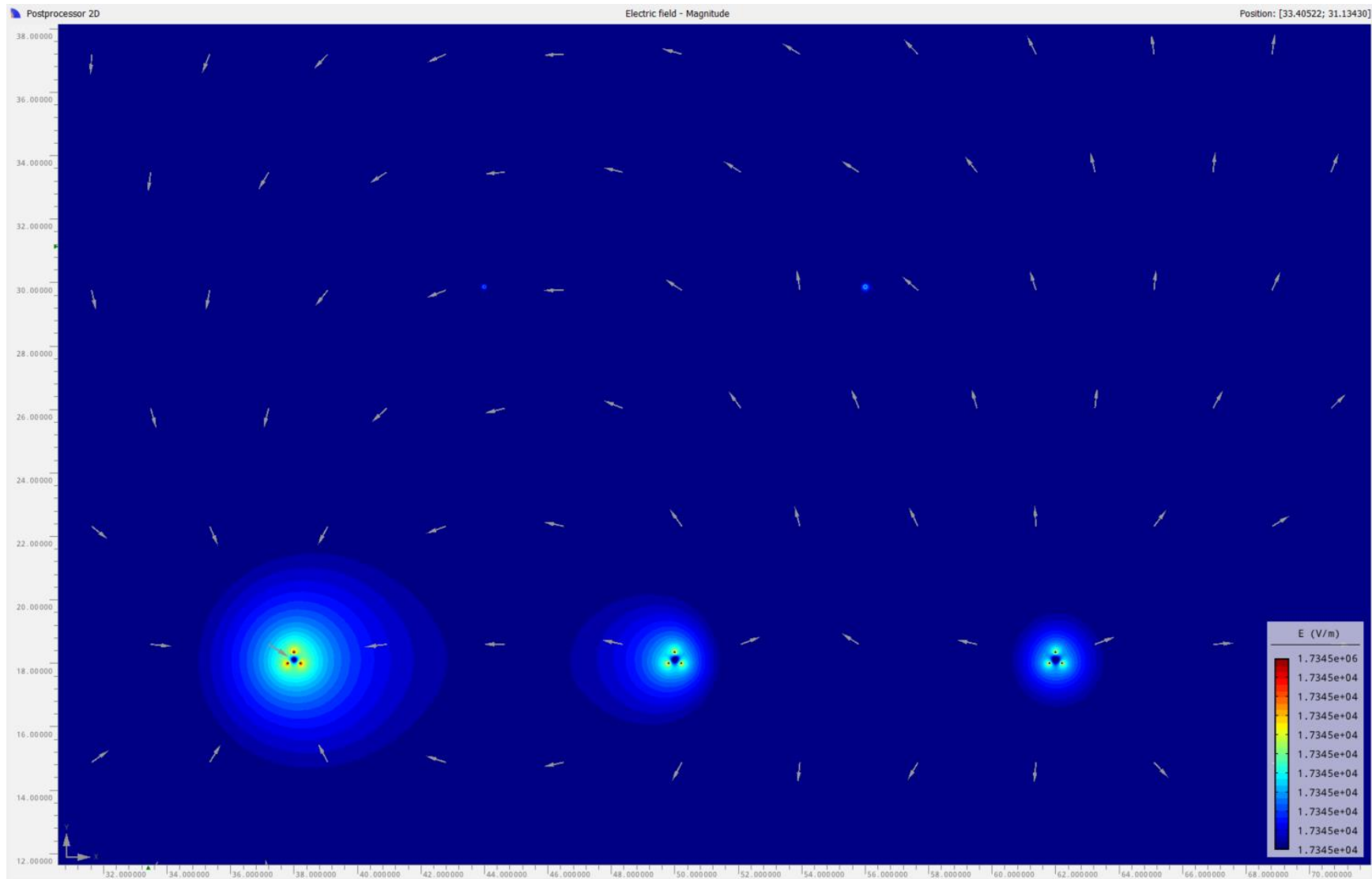
Obrázek 27: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/12 T$



Obrázek 28: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/4 T$



Obrázek 29: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/3 T$



Obrázek 30: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=3/4 T$

5.4.2 Numerické řešení elektrostatičkého pole vedení na stožáru typu 1 x 400 kV

Mačka – nosný

Stejně jako v předchozí podkapitole budeme v této simulovat rozložení intenzity elektrického pole vedení, tentokrát na stožáru typu Mačka – nosný. Výšky umístění vodičů na stožáru zobrazuje následující tabulka.

Typ vodiče	Vzdálenost vodiče od země
Fázový vodič 1 a 2	18,36 m
Fázový vodič 3	26,60 m
Zemnicí lano	32,30 m

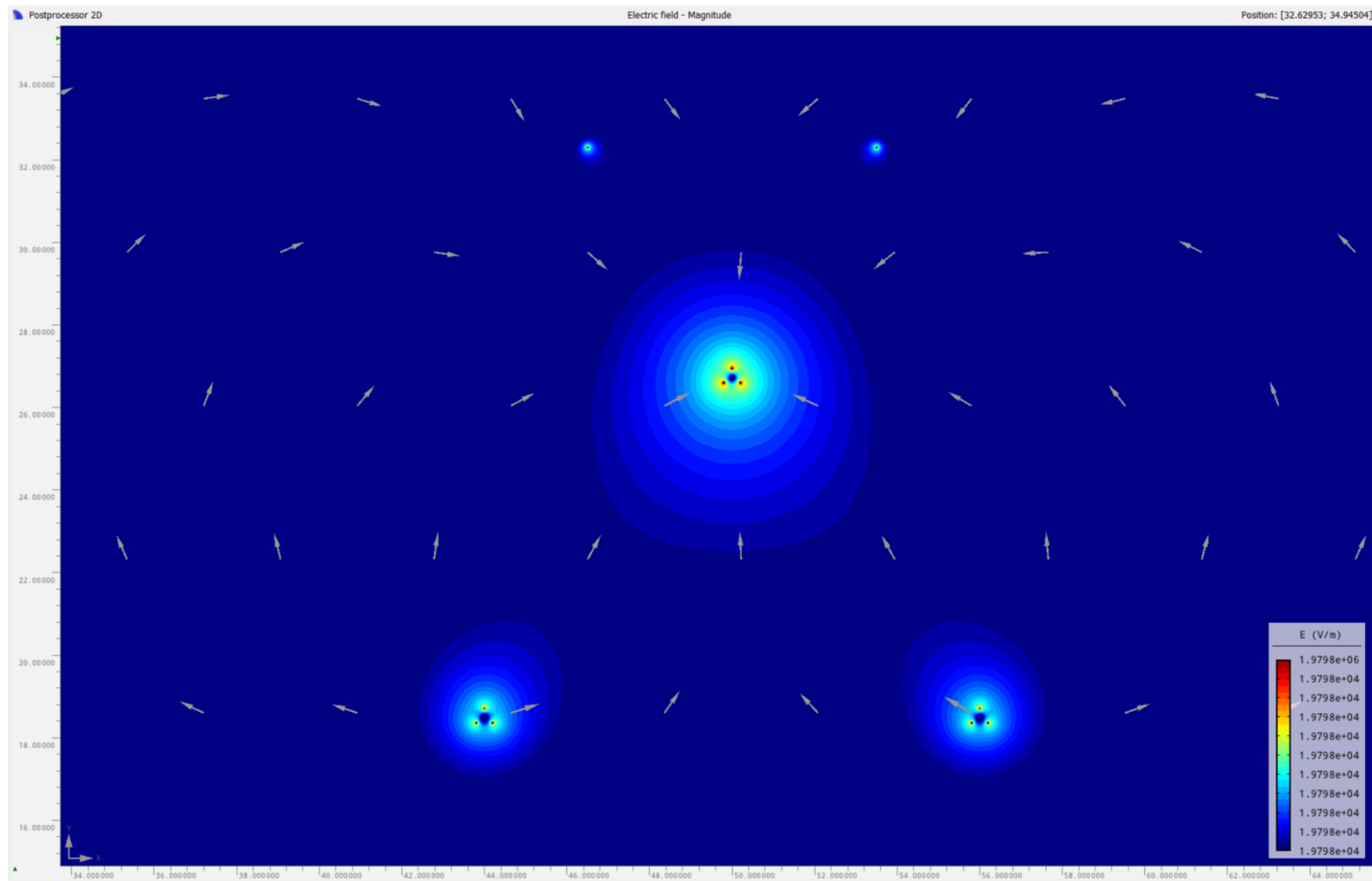
Tabulka 17: Výšky umístění vodičů na stožáru typu Mačka 1 x 400 kV

Fázové vodiče jsou na stožáru typu Mačka umístěné ve dvou rovinách, a to ve vzdálenostech 18,36 a 26,60 m od povrchu země. Zemnicí lana jsou umístěná v jedné rovině ve výšce 32,30 m. Zemnicí lana uvažujeme jako jednoduchý vodič, zatímco fázové vodiče uvažujeme umístěné v trojsvazku pro každou fázi. Zatížení fází stejně tak i zjednodušení modelu jsou stejné jako v případě simulací na stožáru typu Portál – nosný.

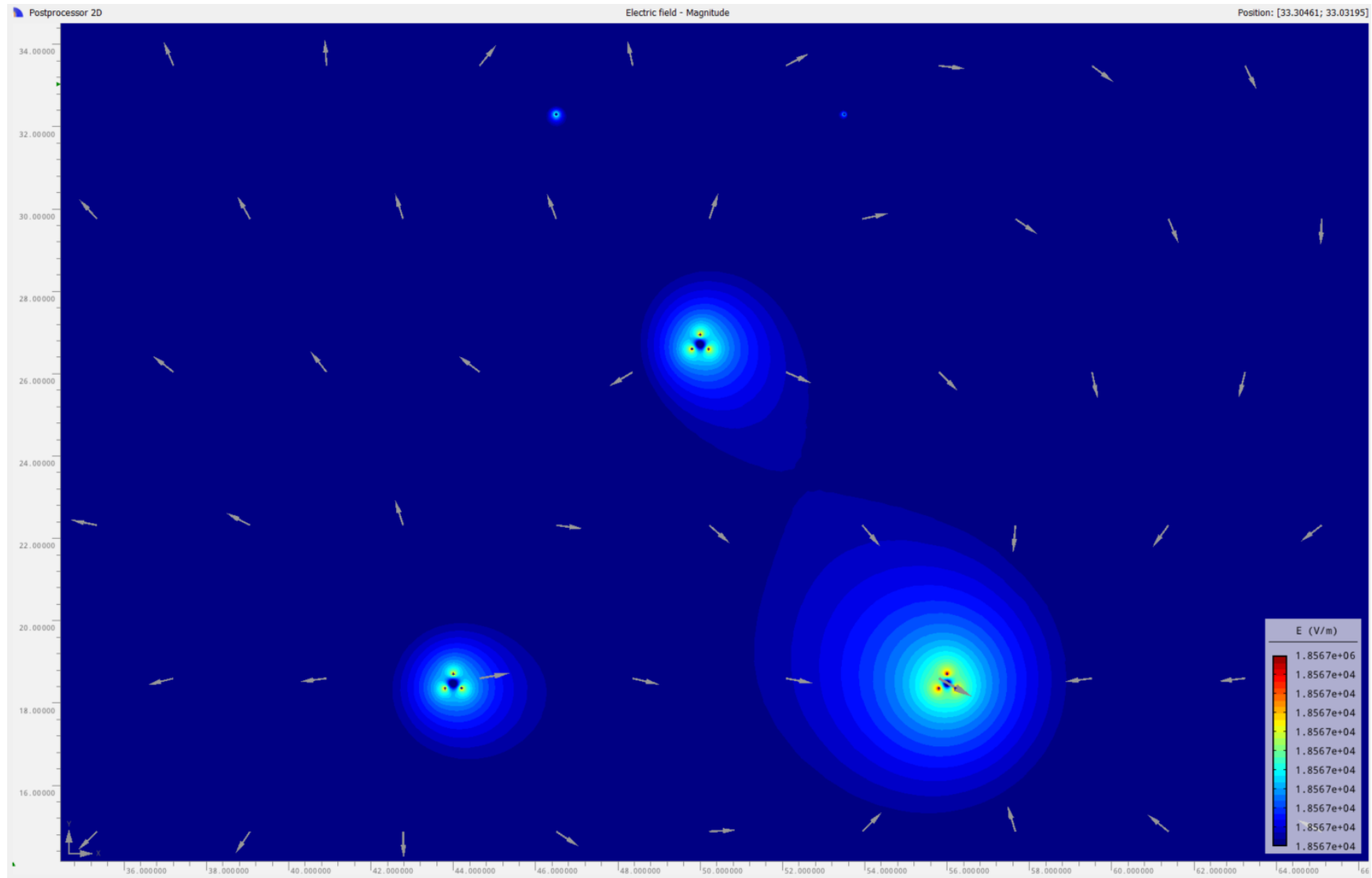
Prostorové rozložení intenzity elektrického pole v částech periody podle tabulky č. 18 je zobrazeno na následujících grafech.

	$U_1[kV]$	$U_2[kV]$	$U_3[kV]$
$t = 1/12 \cdot T$	$1/2 \cdot U_m$	$-U_m$	$1/2 \cdot U_m$
$t = 1/3 \cdot T$	$1/2 \cdot U_m$	$1/2 \cdot U_m$	$-U_m$

Tabulka 18: Hodnoty trojfázového napětí v různých částech periody pro simulaci elektrostatičkých polí na stožárech typu Mačka



Obrázek 31: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Mačka 1 x 400 kV v čase $t=1/12 T$



Obrázek 32: Prostorové rozložení intenzity elektrického pole pro stožár typu Portál 1 x 400 kV v čase $t=1/3 T$

5.5 Porovnání výsledků simulací intenzity elektrického pole pro stožáry typu Portál a Mačka

V předcházejících podkapitolách jsme se věnovali simulacím elektrostatického pole v okolí vedení 400 kV, a to na nosných stožárech typu Portál a Mačka. Z výsledků simulací je možné konstatovat několik závěrů.

V případě stožáru typu Portál, kde byly vodiče střední fáze výrazně ovlivněné krajními vodiči a krajní vodiče byly ovlivněny elektrostatickým polem zejména střední fáze a pouze minoritně se ovlivňovaly vodiče krajních fází vzájemně. V případě rozložení fází v uspořádání na stožáru typu Mačka se vodiče všech fází ovlivňovaly vzájemně.

Rozložení intenzity elektrického pole na hranici vodičů je nerovnoměrné a v případě velkých rozdílů mohou vznikat nepříznivé jevy, zejména vznik korónových výbojů. Tyto případy jsou již vyřešeny právě použitím svazkových vodičů, což jsme již demonstrovali v předchozích kapitolách.

Dalším důležitým hodnocením je hodnocení z hlediska hygienických limitů pro osoby pohybující se v blízkosti vedení. Protože je toto hledisko důležité, bude mu věnována celá následující podkapitola této práce.

5.6 Vyhodnocení elektrostatického pole jednoduchého vedení 1,8 m od zemského povrchu

V této podkapitole budeme vyhodnocovat simulace elektrostatického pole pro nejhorší možný případ vzdálenosti vedení od zemského povrchu, která stanovena na 8 metrů. Umístění vodičů tedy bude řešeno tak, že nejnižší položená fáze bude umístěna ve vzdálenosti 8 metrů od země. Rozložení intenzity elektrického pole bude následně zkoumáno ve vzdálenosti 1,8 metru od země. Určovat budeme, zda hodnoty intenzity elektrického pole v této rovině jsou vyhovující podle nařízení vlády č. 291/2015 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením (26), kde jsou maximální hodnoty stanoveny na $10\,000\text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ pro osoby, které se mohou pohybovat v okolí vedení.

Hodnoty budou získávané ze simulací dle následující tabulky.

$$U_m = 326,598\text{ kV} \quad (5.6.1)$$

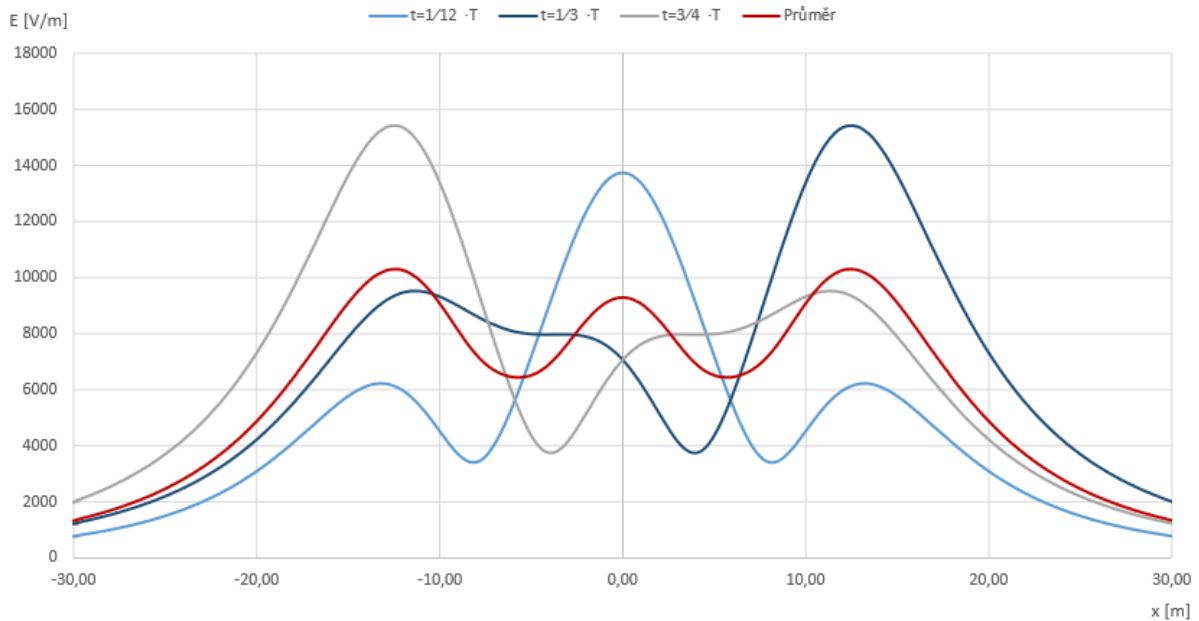
Z toho pak vyplývající hodnoty v částech periody:

	$U_1[\text{kV}]$	$U_2[\text{kV}]$	$U_3[\text{kV}]$
$t = 1/12 \cdot T$	$1/2 \cdot U_m$	$-U_m$	$1/2 \cdot U_m$
$t = 1/3 \cdot T$	$1/2 \cdot U_m$	$1/2 \cdot U_m$	$-U_m$
$t = 3/4 \cdot T$	$-U_m$	$1/2 \cdot U_m$	$1/2 \cdot U_m$

Tabulka 19: Hodnoty trojfázového napětí v různých částech periody pro hodnocení hygienických limitů

Následně budou hodnoty průměrované a budou získány průměrné hodnoty intenzity elektrického pole, s kterými budeme následně pracovat a vyhodnocovat je na základě platného nařízení vlády.

V následujícím grafu jsou zobrazeny hodnoty intenzity elektrického pole pro umístění fázových vodičů v jedné rovině, což odpovídá umístění na stožáru typu Portál. Dvě zemnicí lana uvažujeme jednoduchá, fázové vodiče jsou umístěné v trojsvazku.



Obrázek 33: Graf hodnot intenzity elektrického pole v 1,8 m od povrchu pro stožár typu Portál

V grafu č. 33 jsou červenou barvou označené průměrné hodnoty intenzity elektrického pole. Ze zkoumání tohoto průběhu je možné určit vzdálenosti od osy stožáru, kdy hodnoty intenzity klesnou pod stanovené maximální meze. Pro toto rozložení fázových vodičů jsou hodnoty popsány v tabulce. V tabulce je rovněž uvedené ochranné pásmo vedení 400 kV, a to jako hodnota měřená od krajního vodiče a hodnota přepočtená na vzdálenost od osy stožáru. Zákon definuje jako ochranné pásmo prostor v bezprostřední blízkosti vedení určený k zajištění jeho spolehlivého provozu a k ochraně života, zdraví a majetku osob.

Maximální hodnota intenzity elektrického pole *	Vzdálenost od osy stožáru	Ochranné pásmo vedení 400 kV **
10 000 V/m	14 m	20 m / 32 m

* dle nařízení vlády č. 291/2015 Sb.

** měřeno od krajního vodiče / přepočteno na vzdálenost od osy stožáru

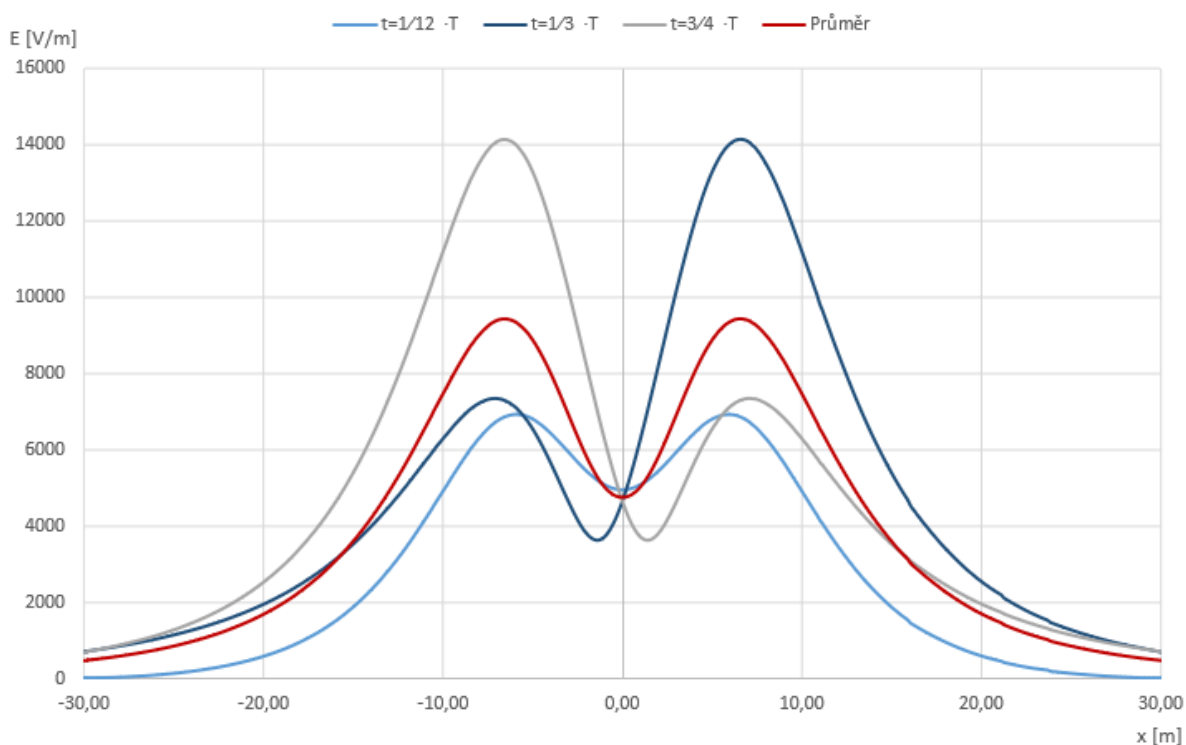
Tabulka 20: Vzdálenost, ve které se dosáhne dodržení hygienických limitů pro stožár typu Portál

Hodnoty menší, než jsou stanovené meze je možné odečíst z grafu rovněž mezi vodiči krajních fází, kde se přírůstky intenzity elektrického pole od všech tří fází vzájemně ovlivňují.

Vzdálenost, ve které intenzita elektrického pole klesne pod hodnotu 10 000 V/m je menší, než je ochranné pásmo vedení 400 kV. Můžeme tedy říct, že v oblasti mimo ochranného pásma vedení jsou dodrženy limity pro intenzitu elektrického pole dle nařízení vlády č. 291/2015 Sb.

V následujícím grafu jsou zobrazeny hodnoty intenzity elektrického pole pro umístění fázových vodičů ve dvou rovinách, což odpovídá umístění na stožáru typu Mačka. Dvě zemnicí lana uvažujeme jednoduchá, fázové vodiče jsou umístěné v trojsvazku.

Průběh hodnot intenzit elektrického pole zobrazuje následující graf.



Obrázek 34: Graf hodnot intenzity elektrického pole v 1,8 m od povrchu pro stožár typu Mačka

Na rozdíl od grafu pro stožár typu Portál, kde se vodiče v jedné rovině rovnoměrně podíleli na celkovém rozložení intenzity elektrického pole v pozorovací rovině, v případě tohoto stožáru příspěvek od vodiče umístěného ve vyšší rovině nepodílí na celkové intenzitě elektrického pole v pozorovací rovině. V grafu jsou tím pádem viditelné pouze dva vrcholy, a to od vodičů v nižší pozorovací rovině. Z vyhodnocení průměrné hodnoty intenzity elektrického pole jsme sestavili následující tabulku hodnocení vzdáleností, kdy intenzita dosáhne maximální povolené hodnoty.

Maximální hodnota intenzity elektrického pole *	Vzdálenost od osy stožáru	Ochranné pásmo vedení 400 kV **
10 000 V/m	0 m	20 m / 26 m

* dle nařízení vlády č. 291/2015 Sb.

** měřeno od krajního vodiče / přepočteno na vzdálenost od osy stožáru

Tabulka 21: Vzdálenost, ve které se dosáhne dodržení hygienických limitů pro stožár typu Mačka

Maximální hodnota je dodržena v celém prostoru pod stožárem. Za hranicí ochranného pásma je tedy tato hodnota rovněž dodržena.

Výsledky simulací budou zhodnoceny v následující kapitole.

6 Analýza použití a srovnání izolátorových závěsů používaných v přenosové soustavě

V následující kapitole uvedeme srovnání izolátorových závěsů na základě různých parametrů, jako jsou mechanické a elektrické vlastnosti, ale také použitelnosti z hlediska ceny.

V další části budeme analyzovat použití izolátorových závěsů, a to zejména použití polokotevních závěsů a kompozitních závěsů v návaznosti na kapitolu 5.6.

6.1 Srovnání izolátorů na základě mechanických a elektrických vlastností

V této podkapitole uvedeme stručné srovnání izolátorů na základě mechanických a elektrických vlastností. Porovnávat budeme izolátoru dělené dle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny a konstrukce (talířové, případně tyčové).

Jako první shrneme vlastnosti kompozitních izolátorů. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, kompozitní izolátory se vyrábějí v provedení tyčovém.

Kompozitní izolátory dokážou poskytnou izolační vlastnosti srovnatelné s keramickými či skleněnými izolátory, a to při menších rozměrech. (9) Náhradou keramických či skleněných izolátorů kompozitními je možné dosáhnout kratších délek izolátorových závěsů a zároveň snížení hmotnosti konstrukce závěsů, potažmo snížení namáhání konstrukce stožáru izolátorovým závěsem. Tato vlastnost je výhodná zejména v případě, kdy potřebujeme zvednou výšku vodičů vzhledem k zemi bez stavebních úprav základu, případně úpravám stožárové konstrukce. Tyto případy mohou nastat například v návaznosti na dodržení hygienických limitů dle kapitoly 4.5 nebo v oblastech křížení vedení s pozemními komunikacemi nebo jiným vedením, nebo také v zastavěných oblastech.

Další zásadní výhodou je odolnost izolátorů vzhledem k materiálům, ze kterých jsou vyrobeny. Tento fakt poskytuje zásadní výhodu zejména při manipulaci s izolátorovým závěsem, při instalaci nebo také v případech vandalismu nebo neúmyslného ohrožení konstrukce (například při lovu ptactva).

V neposlední řadě můžeme jako výhodu vytknout také hydrofobní povrch, odolnost materiálu zejména ve znečištěném prostředí nebo vysokou mechanickou pevnost.

Nabízí se tedy otázka, proč jsou v přenosové soustavě kompozitní izolátory používány jen zřídka. (9) Hlavním důvodem může být výrobní cena kompozitního izolátoru. Ta bývá vysoká ve srovnání s výrobní cenou keramických, případně skleněných izolátorů obdobných vlastností. Hlavní cenově náročnou složkou kompozitních izolátorů je křemík. Dalším faktorem je stárnutí izolačního materiálu, zatímco u keramických a skleněných izolátorů je možné vzhledem na dlouhou dobu jejich používání v přenosové soustavě možné dobře odhadovat chování materiálů vystavených venkovním podmínkám (jako UV záření, vítr, vlhkost, déšť nebo také kroupy a námraza) i po několik desetiletí, pro kompozitní izolátory zatím nemáme validní srovnání.

V kratších časových intervalech, případně z testů prováděných v laboratorních podmínkách je možné říct, že kompozitní izolátory jsou více citlivé na změny vzniklé stárnutím materiálů.

V případě talířových izolátorů jako hlavní výhodu lze uvést možnost výměny pouze poškozených talířů, není tedy nutné ve všech případech nahradit celý izolátorový řetězec. To představuje velkou výhodu zejména z hlediska provozních nákladů a nákladů na údržbu. Rovněž jsou zachovány mechanické vlastnosti izolátorového závěsu i v případě poškození jednoho či několika mála talířů.

Naopak zásadní nevýhodou je hmotnost celého izolátorového závěsu zejména při použití skleněných talířových izolátorů. Další nevýhodou bývá koroze kovových částí izolátorů jako je palička nebo čapka, které tvoří elektrody izolátoru.

Poslední často používanou skupinou jsou keramické tyčové izolátory. Ty jsou v přenosové soustavě výhodné zejména díky vysoké mechanické a elektrické spolehlivosti, ale také díky velmi nízkým nákladům na údržbu vzhledem na jejich mechanickou odolnost. V porovnání s talířovými izolátory nabízí keramické tyčové izolátory nižší hmotnost izolátorového řetězce.

Nevýhodou těchto izolátorů bývá složitější proces výroby a vyšší pořizovací náklady. Rovněž jsou tyto izolátory více náchylné na mechanické poškození. (9)

Podle statistik, které byly vykonány na základě studie, kterou prezentoval T. Johansson byly stanoveny předpokládané střední časy do selhání (z ang. Mean times between failure – MTBF). (31) V této studii bylo studováno fiktivní vedení 400 kV s 10 000 izolátorovými závěsy. Výsledky lze vidět v tabulce.

Druh izolátoru	Předpokládaný střední čas do selhání (MTBF)
Porcelánový talířový izolátor	10 hodin
Skleněný talířový izolátor	144 hodin (6 dní)
Kompozitní izolátor	420 hodin (2,5 týdne)
Porcelánový tyčový izolátor	157 788 hodin (18 let)

Tabulka 22: Předpokládaný střední čas do selhání pro různé typy izolátorů

Ze studie je zřejmé, že tyčové izolátory, jak kompozitní, tak i porcelánové, představují velkou výhodu z hlediska odolnosti proti zbylým dvěma studovaným typům. (31)

6.2 Analýza použití izolátorových závěsů v návaznosti na provedené simulace

V předchozích kapitolách byly provedeny simulace, pomocí kterých byly hodnoceny hygienické limity stanovené nařízením vlády a jejich dodržení. V obou případech byly limitní hodnoty dodrženy v rozsahu ochranného pásma vedení. Nicméně se nabízí otázka, jak řešit situaci, kdy tyto hodnoty není možné s použitím standardních prvků vedení splnit.

Dle zásad projektování vedení přenosové soustavy by taková možnost nastat neměla. Při navrhování vedení musí být dodrženy všechny parametry a limity, a to i v případě hodnot intenzity elektrického pole dle nařízení vlády 291/2015 Sb. (26)

V případě, že použitím standardních izolátorových závěsů není při projektování možné dosáhnout dodržení hodnot intenzity elektrického pole, nabízí se dvě možnosti. První možností je použití polokotevních závěsů. (20) Pomocí polokotevních závěsů, nejčastěji typu pk_A , je možné vedení nadzvednout. Zatímco použití polokotevních závěsů by se mohlo jevit jako jednoduché a rychlé řešení má i jednu zásadní nevýhodu, použitím pk_A závěsů jsou více namáhány konzoly stožáru. Další možností úpravy výšky vodičů je náhrada nejčastěji používaných skleněných a keramických izolátorů kompozitními, které, jak bylo řečeno v kapitole 6.1, dokážou poskytnout izolační vlastnosti srovnatelné s keramickými či skleněnými izolátory, a to při menších rozměrech.

Hodnocení výsledků simulací tedy potvrzuje, že při projektování vedení přenosové soustavy jsou dodrženy požadavky dané nařízením vlády 291/2015 Sb. a hodnoty intenzity elektrického pole jsou ve vzdálenosti větší, než je ochranné pásmo vedení splněny v obou simulovaných případech. V dalším studiu dané problematiky je vhodné pokračovat ověřením parametrů u dalších stožárů používaných v přenosové soustavě.

7 Závěr

V práci byl zpracován podrobný rozbor problematiky izolátorových závěsů v přenosové soustavě. V prvních kapitolách byla popsána přenosová soustava České republiky a její začlenění do Evropské sítě provozovatelů přenosových soustav. Dále byly popsány části přenosové soustavy, tedy stožáry, vodiče, armatury a v neposlední řadě izolátory.

V kapitolách věnovaných izolátorům bylo popsáno spojování izolátorů do větších celků, jako jsou izolátorové řetězce a izolátorové závěsy. Dále byla provedena jejich kategorizace dle konstrukce, materiálu, ze kterého jsou vyrobeny a dále také dle účelu.

Důležitým aspektem pro hodnocení izolátorů jsou jejich elektrické a mechanické požadavky, které jsou rovněž podrobně popsány v této práci. Problematika elektrických požadavků v sobě zahrnuje standardní elektrické požadavky, požadavky na rádiové rušení a zhašecí napětí korony, požadavky na chování při znečištění a obloukovém zkratu a požadavky na akustický hluk. Mechanické požadavky byly popsány prostřednictvím standardních zatěžovacích stavů.

Jako příprava pro další kapitoly byl vypracován rozbor problematiky elektrostatických polí obsahující základní vztahy a příklady výpočtů pro objekty s jednoduchou geometrií. V závěru teoretického rozboru byly rovněž popsány limitní hodnoty elektrické intenzity dané nařízením vlády 291/2015 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

Vlastním přínosem této práce je vytvoření numerických modelů rozložení intenzity elektrického pole v okolí jednoho vodiče a vodičů ve svazku. Tyto modely byly porovnány. Porovnáním použití samostatných vodičů a vodičů ve svazcích je možné konstatovat, že použitím svazkových vodičů dosáhneme menší intenzity elektrického pole na jejich povrchu. Z hlediska provozních ztrát je tedy výhodné jejich použití. Dalším důležitým závěrem je, že použitím svazkových vodičů lze rovněž minimalizovat nepříznivé vlivy, jako je vznik korony.

V práci byly rovněž prezentovány výsledky simulací elektrického pole vedení v bezprostředním okolí stožárů typu 1 x 400 kV Portál a 1 x 400 kV Mačka. U stožáru typu Portál byly vodiče střední fáze výrazně ovlivněné krajními vodiči a krajní vodiče byly ovlivněny elektrostatickým polem zejména střední fáze a pouze minoritně se ovlivňovaly vodiče krajních fází vzájemně. V případě rozložení fází v uspořádání na stožáru typu Mačka se vodiče všech fází ovlivňovaly vzájemně.

Hlavním přínosem práce je analýza intenzity elektrického pole daného nařízením vlády 291/2015 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Pro stožáry typu Portál a Mačka byly v obou případech limity intenzity elektrického pole dodrženy a lze tedy konstatovat, že požadavkům nařízení vlády bylo u projektování vyhověno. V případě, že by limity nebyly dodrženy, je možné upravit výšku vodičů použitím polokotevních izolátorových závěsů, nebo použitím kompozitních závěsů, které poskytují srovnatelné mechanické vlastnosti jako keramické nebo skleněné izolátory, avšak při menších délkách řetězců.

Práce nabízí zejména nový kompletní pohled na příspěvek k celkové intenzitě elektrického pole na stožárech od vodičů a rovněž poskytuje kontrolu dodržení limitních hodnot elektrické intenzity, jak již bylo popsáno v předchozích odstavcích. V práci byl rovněž potvrzen předpoklad, že použití svazkových vodičů je na vedení o napětí 400 kV výhodou.

Obsah práce splnil všechny body zadání a v co největším možném rozsahu daném požadavky na vypracování diplomové práce a možnostmi simulačního programu vyčerpal danou problematiku.

Tato diplomová práce byla pro mě přínosem. Jejím vypracováním jsem získala podrobný přehled v problematice izolátorových závěsů a rovněž v oblasti vytváření simulací elektrostatických polí, kde jsem využila vědomosti získané po dobu studia.

Práce bude rovněž přínosem pro společnost ČEPS Invest, a.s., kde bude použita jako studijní materiál pro nově přijaté projektanty a poskytne jim základní úvod do dané problematiky. Spolu s Podnikovou normou energetiky pro rozvod energie PNE 33 3300 pak tvoří kompletní balík informací potřebných pro projektování vedení přenosové soustavy.

Na práci je v dalším studiu, případně ve společnosti ČEPS Invest, a.s., možné navázat simulacemi celkové intenzity elektrického pole dané příspěvkem od všech dílčích částí vedení přenosové soustavy. Simulační modely pro výpočet limitních hodnot intenzity elektrického pole je možné dále využívat pro sekundární kontrolu hodnot vypočtených v procesu projektování vedení a zaručit tak jejich dodržení.

8 Použitá literatura

1. [www.ceps.cz](https://www.ceps.cz/cs/technicka-infrastruktura). [Online] [Citace: 17. 10 2019.] <https://www.ceps.cz/cs/technicka-infrastruktura>.
2. <http://home.zcu.cz/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.] http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Dispecerske_rizeni_CEPS_ZCU-ProStudenty.pdf.
3. www.oenergetice.cz. [Online] [Citace: 17. 10 2019.] <https://oenergetice.cz/elektrina/evropska-sit-provozovatel-u-prenosovych-soustav-elektriny-entso-e/>.
4. <https://www.informacni-portal.cz/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.] <https://www.informacni-portal.cz/clanek/prenosova-soustava#article-top>.
5. *Základní typy stožárových konstrukcí*. ČEPS, a.s. Praha : ČEPS, a.s., 2018.
6. www.ceps.cz/zajimavosti. [Online] [Citace: 17. 10 2019.] <https://www.ceps.cz/zajimavosti/#nejcastejsi-stozary-ceps>.
7. www.oenergetice.cz/elektrina/. [Online] [Citace: 19. 10 2019.] <https://oenergetice.cz/elektrina/elektricke-stozary-aneb-poznas-kocku-na-poli>.
8. <https://online.sse.sk/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.] https://online.sse.sk/pls/kpfc/kpfc_web.detail?meno=&idk=1&ids=3&csap=26605.
9. Kiessling, Friedrich. *Overhead power lines: planning, design, construction*. New York : Springer, 2003. ISBN 3540002979.
10. ČSN IEC 383-1(348052). *Izolátory pro venkovní 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 : Český normalizační institut, 1996.
11. ČSN EN 60672-1. *Keramické a skleněné izolační materiály - Část 1: Definice a třídění*. Praha : Český normalizační institut, 1996.
12. ČSN EN 61109 (34 8120). *Izolátory pro venkovní vedení - Kompozitní závěsné a kotevní izolátory pro systémy střídavého napětí se jmenovitým napětím vyšším než 1000 V - Definice, zkušební metody a přejímací kritéria*. Praha : Český normalizační institut, 2009.

13. Mach, Veleslav. *Technika vysokého napětí*. Ostrava : autor neznámý, 2006. ISBN 80 - 248 - 1161 - 8.
14. www.chinainsulators.com. [Online] [Citace: 30. 06 2019.]
http://chinainsulators.com/insulators/archives/2012/products/cap_pin_suspension_insulators.htm.
15. 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 : Český normalizační institut, 1997.
16. www.worldofinsulators.com. [Online] [Citace: 30. 06 2019.]
<http://www.worldofinsulators.com/p/283/izolator-zavesny-ls-455600>.
17. ČSN EN 60433. *Izolátory pro venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 1 kV: Keramické izolátory pro sítě se střídavým napětím. Charakteristiky tyčových závěsných izolátorů*. Praha : Český normalizační institut, 2000.
18. Interní norma TN/48/2017. *Typizované a schválené izolátorové závěsy pro vedení přenosové soustavy ČEPS, a.s.* Praha : 18233, ČEPS, a.s., 2017.
19. ELBA, a.s. *Armatury vonkajších elektrických vedení*. Kremnica : ELBA, a.s., 2018.
20. Ing. Matěj Valiga. <https://www.powerwiki.cz/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.]
<https://www.powerwiki.cz/attach/PRE/projektovani.pdf>.
21. PNE 33 3300. *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Sv. 2. vydání.
22. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands. *Feynman Lectures on Physics: Mainly Electromagnetism and Matter*. Boston : Addison-Wesley, 1964.
23. Pankrác, Vítězslav. *Základy teorie elektromagnetického pole. Výukový materiál k předmětu Teorie elektromagnetického pole*. Praha : ČVUT, 2013.
24. <https://edu.techmania.cz/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.]
<https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/elektricke-pole>.
25. <https://is.muni.cz/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.]
https://is.muni.cz/el/1431/jaro2012/F2070/um/EM03_potencial_naf2l.pdf.

-
26. Nařízení vlády č. 291/2015 Sb. *Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením*. Praha : Sběrka zákonů, 2015.
27. Zákon č. 309/2006 Sb. *Zákon, kterým se upravují další požadavky bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v pracovněprávních vztazích a o zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při činnosti nebo poskytování služeb mimo pracovněprávní vztahy (zákon o zajištění dalších podmínek bez*. Praha : Sběrka zákonů, 2006.
28. <http://www.agros2d.org/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.] <http://www.agros2d.org/>.
29. <http://vbconsulting.cz/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.] http://vbconsulting.cz/lana/wp-content/uploads/Lana_Katalog_2016.pdf.
30. <https://elektro.tzb-info.cz/>. [Online] [Citace: 10. 05 2021.] <https://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4192-stozary-vvn-iii>.
31. Johansson, T. et al. A comparative study for transmission insulators. *Insulators news & market report*. 5, 1997.
32. www.ceps.cz. [Online] [Citace: 17. 10 2019.] <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>.

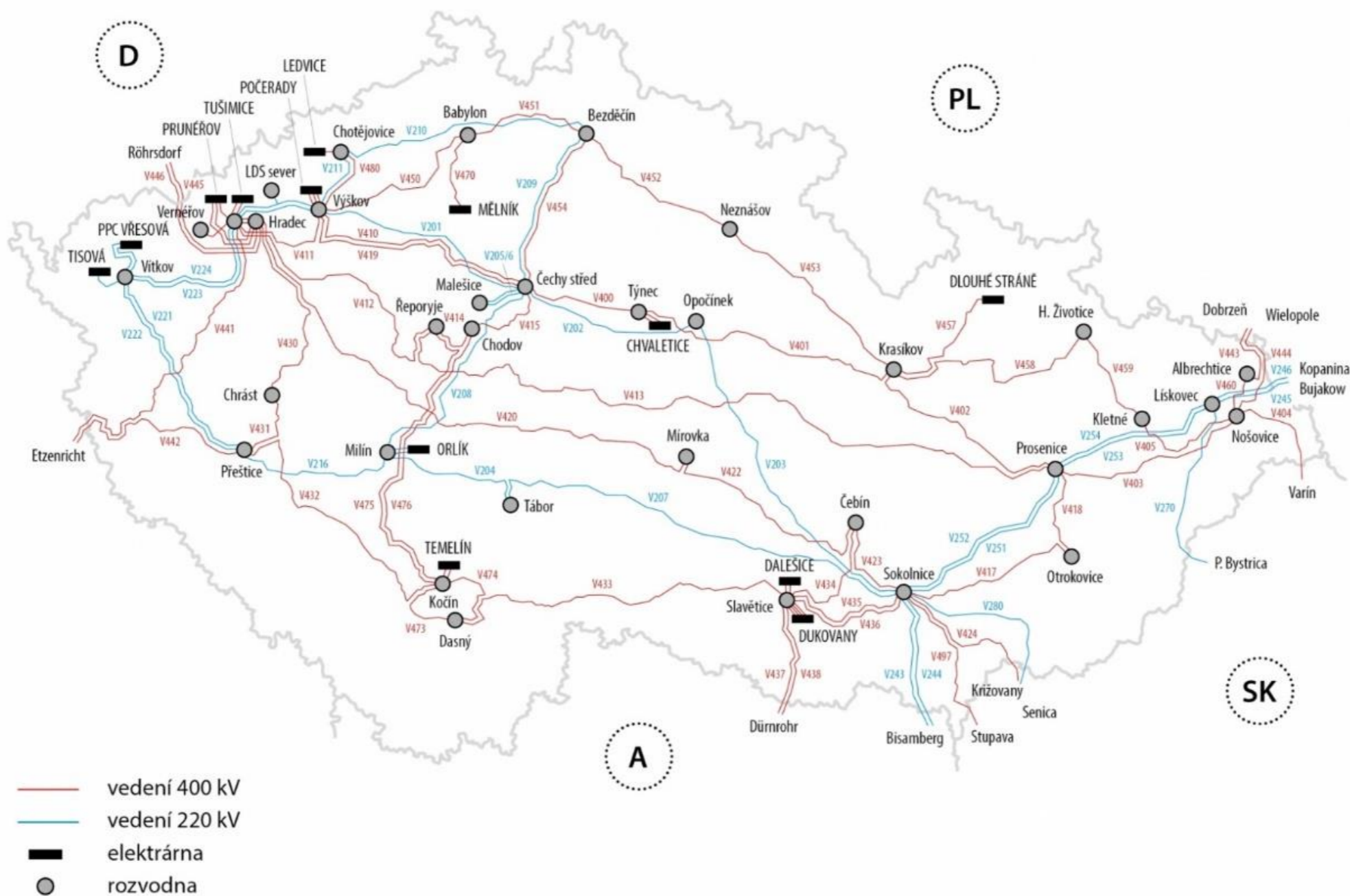
Seznam příloh

Příloha č.1	Mapa přenosové soustavy ČR
Příloha č.2	Fotografie nosných izolátorových závěsů
Příloha č.3	Fotografie kotevních izolátorových závěsů
Příloha č.4	Distanční rozpěrky používané v přenosové soustavě



Příloha 1 – Mapa přenosové soustavy ČR

Schéma sítí 400 kV a 220 kV



Obrázek 35: Přenosová soustava ČR

Příloha 2 – Fotografie nosných izolátorových závěsů



Obrázek 36: Nosný stožár typu Portál s dvojitými nosnými izolátorovými závěsy s jednobodovým uchycením



Obrázek 37: Detail dvojitého nosného izolátorového závěsu s jednobodovým uchycením



Obrázek 38: Nosný stožár typu Vertikál s nosnými V-závěsy

Fotografie v této příloze jsou součástí fotoarchivu autora.

Příloha 3 – Fotografie kotevních izolátorových závěsů



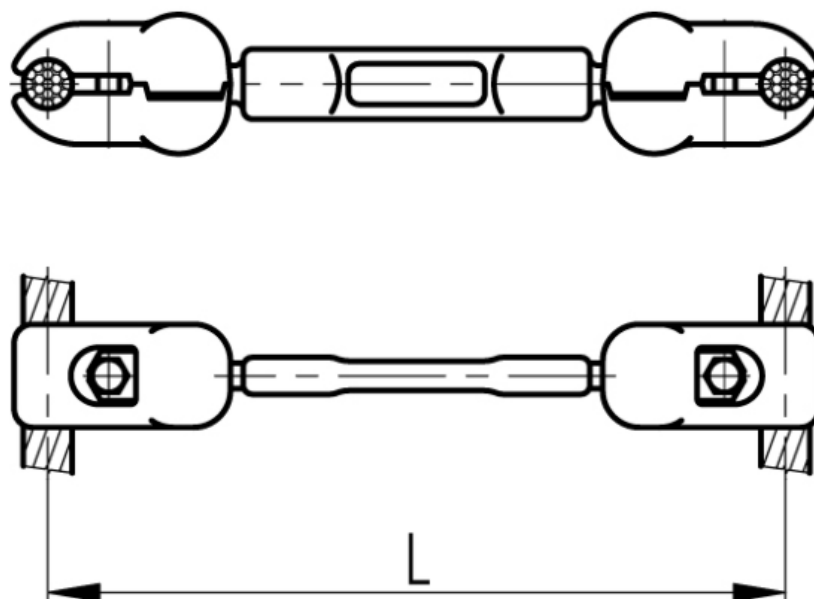
Obrázek 39: Kotevní stožár typu Portál s trojitými kotevními izolátorovými závěsy s trojbodovým uchycením

Fotografie v této příloze jsou součástí fotoarchivu autora.

Příloha 4 – Distanční rozperky používané v přenosové soustavě



Dištančné rozperky



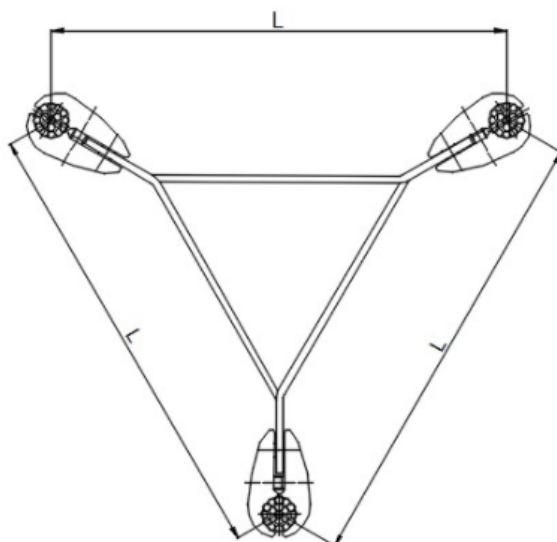
B 14 Dištančné rozperky

Typ	Priemer vodiča [mm]	L [mm]	Hmotnosť [kg]
237212	18.3 - 20.4	400	2.0
237235	26.5 - 26.8	400	1.9
237245	28.7 - 29.8	400	1.9
237267	35.8 - 36.5	400	1.9
237212.1	20.4 - 22.4	400	2.0
237425	41.2 - 42.2	500	1.68
237426	41.2 - 42.2	400	1.5
237427	28.0 - 31.0	400	1.2

Materiál	Zliatina hliníka, nehrdzavejúca oceľ, technická guma
Povrchová ochrana	Oceľ žiarovo zinkovaná
Použitie	Na uchytenie vodičov v dvojväzku na vonkajšom vedení vvn s tlmiacim účinkom.



Dištančné rozperky

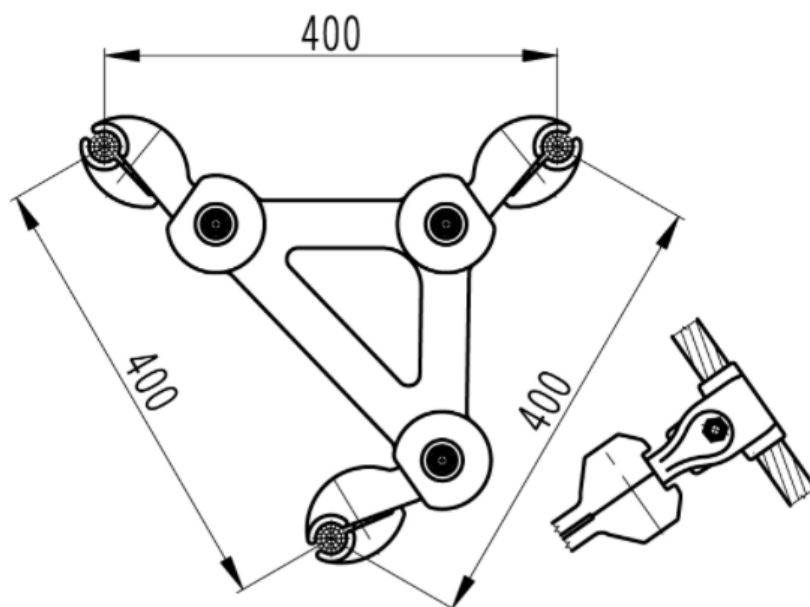


B 14 Dištančné rozperky

Typ	Priemer vodiča [mm]	L [mm]	Hmotnosť [kg]
237403	28.0 - 31.0	400	4.0
237403.2	25.1 - 28.0	400	2.60
237403.5	31.7	450	4.12
237403.6	25.5 - 26.5	400	3.85

Materiál	Zliatina hliníka, oceľ, nehrdzavejúca oceľ
Povrchová ochrana	Oceľ žiarovo zinkovaná
Použitie	Na uchytenie vodičov v trojväzku na vonkajšom vedení vvn. Typ 237 403 slúži na uchytenie zväzkových vodičov v preponke spolu so závažím 2×20 kg typ 229 503

Dištančné rozperky



B 14 Dištančné rozperky

Typ	Náhrada za typ	Priemer vodiča [mm]	Hmotnosť [kg]
237384.5	237384.1*	22.7 - 24.2	4.00
237386.5	237386.1*	25.7 - 27.1	3.99
237387.5	237387.1*	27.2 - 28.6	3.98
237388.6	237388.1*	28.7 - 30.1	4.04
237388.7	237388.5*	40.9 - 42.4	4.50
237389.5	237389.1*	30.2 - 31.6	4.03
237393.5	237393.1*	35.9 - 37.2	4.45

Materiál	Zliatina hliníka, oceľ, nehrdzavejúca oceľ, technická guma
Povrchová ochrana	Oceľ žiarovo zinkovaná
Použitie	Na uchytenie vodičov v trojväzku na vonkajšom vedení vvn s tlmiacim účinkom.
Poznámka	*antikoróznny spojovací materiál