

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Analýza elektrického pole v okolí HVDC vedení**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch SCHOLZ**

Osobní číslo: **E15B0086P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Analýza elektrického pole v okolí HVDC vedení**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište možnosti přenosu elektrické energie na stejnosměrných vedeních.
2. Vyšetřete elektrické pole pro různá uspořádání vodičů s ohledem na polaritu v simulačním programu.
3. Proveďte posouzení vlivu koróny (rozložení prostorového náboje) na charakter elektrického pole.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Tomáš Nazarčík**

Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena analýzu elektrického pole v okolí HVDC vedení. V práci se řeší rozložení elektrického pole v okolí vodiče a vliv působení koróny. Velká část je také věnována zkoumání dodržování hygienických norem pod vodičem a vlivu koróny. V poslední kapitole se sleduje ovlivnění náboje na vodiči při přidání náboje do prostoru okolo vodiče a různé možnosti konfigurace vodičů.

## **Klíčová slova**

HVDC, vedení, analýza, elektrostatické pole, numerické řešení, simulace, koróna, prostorový náboj, okrajová úloha, kapacita, kapacitní vazby, přerozdělování náboje, hygienické normy, portálový stožár, konfigurace

## **Abstract**

The submitted bachelor thesis is focused on the analysis of the electric field around the HVDC line. The thesis deals with the distribution of the electric field around the conductors and the influence of the corona. A large part is also devoted to examining the observance of hygienic standards under the conductor as well as the impact of the corona. The last chapter deals with the influence of the charge on the conductor when the charge is added to the conductor area and the various wire configuration options.

## **Keywords**

HVDC, conduction, analysis, electrostatic field, numerical solution, simulation, corona, spatial charge, peripheral role, capacity, capacitance, charge redistribution, hygienic standards, portal mast, configuration

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2018

Vojtěch Scholz

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Tomáši Nazarčíkovi za cenné rady, obětovaný čas, skvělou komunikaci a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Zdeňce Benešové, CSc. za obsahovou korekci práce.

## Seznam symbolů a zkratek

HVDC.....	Vysoké stejnosměrné napětí
HVAC.....	Vysoké střídavé napětí
$U$ .....	Elektrické napětí (V)
$\Delta U$ .....	Úbytek (rozdíl) napětí (V)
$R$ .....	Elektrický odpor ( $\Omega$ )
$I$ .....	Elektrický proud (A)
$X$ .....	Reaktance ( $\Omega$ )
$\alpha$ .....	Fázový posun ( $^\circ$ )
DC.....	Stejnoseměrný proud (napětí)
$U_{ef}$ .....	Efektivní hodnota střídavého napětí (V)
AC.....	Střídavý proud (napětí)
$E$ .....	Vektor intenzity elektrického pole (V/m)
$D$ .....	Vektor elektrické indukce ( $C/m^2$ )
$Q$ .....	Náboj (C)
$\rho$ .....	Objemová hustota náboje ( $C/m^3$ )
$rot$ .....	Rotace
$\epsilon$ .....	Permitivita (F/m)
$grad$ .....	Gradient
$\varphi$ .....	Elektrický potenciál (V)
$div$ .....	Matematický operátor divergence
$d$ .....	Derivace
$\partial$ .....	Parciální derivace
$n$ .....	Normála (kolmý vektor)
$E_t$ .....	Tečná složka intenzity elektrického pole (V/m)
$D_n$ .....	Normálová složka elektrické indukce ( $C/m^2$ )
$r_e$ .....	Ekvivalentní poloměr (m)
$S$ .....	Plocha ( $m^2$ )
$\pi$ .....	Ludolfovo číslo (-)
$ln$ .....	Přirozený logaritmus
PN.....	Prostorový náboj
$\sigma$ .....	Plošná hustota náboje ( $C/m^2$ )



## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Plány na výstavbu HVDC linek v Německu [16] .....	2
Obrázek 2 – Motorgenerátor [22] .....	3
Obrázek 3 - Jednopolové uspořádání [7] .....	5
Obrázek 4 - Dvupolové uspořádání [7] .....	5
Obrázek 5 - Vedení nulové délky [7] .....	6
Obrázek 6 - Graf závislosti nákladů DC a AC vedení na jeho délce [5] .....	7
Obrázek 7 - Provozované HVDC linky v Číně [8] .....	9
Obrázek 8 - Vznik koróny při kladném napětí elektrody [11] .....	11
Obrázek 9 - Vznik při záporné polaritě napětí [11] .....	12
Obrázek 10 - Vektorové znázornění intenzit elektrického pole na rozhraní .....	14
Obrázek 11 - Vektorové znázornění elektrické indukce na rozhraní .....	15
Obrázek 12 - Znázornění okrajové úlohy .....	16
Obrázek 13 - Nákres úlohy s jednoduchým vodičem bez prostorového náboje .....	19
Obrázek 14 - Konvergence pro řád polynomu a počet zjemnění .....	20
Obrázek 15 - Konvergence pro velikost výpočetní oblasti .....	20
Obrázek 16 - Výpočetní síť simulačního programu .....	21
Obrázek 17 - Rozložení intenzity elektrického pole po obvodu vodiče .....	21
Obrázek 18 – Potenciál v okolí válcového vodiče .....	22
Obrázek 19 - Metoda zrcadlení .....	23
Obrázek 20 - Nákres úlohy s jednoduchým vodičem a rovnoměrným prostorovým nábojem .....	24
Obrázek 21 - Simulace s rovnoměrným prostorovým nábojem .....	25
Obrázek 22 - Nákres úlohy s jednoduchým vodičem s nerovnoměrným prostorovým nábojem .....	25
Obrázek 23 – Simulace s nerovnoměrným prostorovým nábojem .....	26
Obrázek 24 - Nákres úlohy s trojsvazkovým vodičem .....	28
Obrázek 25 - Intenzita elektrického pole v okolí trojsvazku .....	28
Obrázek 26 - Graf průběhu intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m pod trojsvazkem ..	29
Obrázek 27 - Nákres úlohy pro trojsvazek s rovnoměrným prostorovým nábojem .....	29
Obrázek 28 - Graf průběhu intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m nad zemí pod trojsvazkem s rovnoměrným prostorovým nábojem .....	30
Obrázek 29 – Rovnoměrný prostorový náboj v okolí trojsvazkového vodiče .....	30

Obrázek 30 - Nákres úlohy pro trojsvazek s nerovnoměrně rozloženým prostorovým nábojem.....	31
Obrázek 31 - Graf rozložení intenzit elektrického pole na jednotlivých vodičích .....	32
Obrázek 32 – Nerovnoměrný prostorový náboj v okolí trojsvazkového vodiče.....	32
Obrázek 33 - Graf průběhu intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m nad zemí pod trojsvazkem s nerovnoměrným prostorovým nábojem.....	33
Obrázek 34 - Graf porovnání průběhů intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m nad zemí pro různé varianty .....	34
Obrázek 35 - Portálový stožár .....	35
Obrázek 36 - Třípólové uspořádání var. 1 .....	36
Obrázek 37 - Třípólové uspořádání var. 2 .....	36
Obrázek 38 - Rozložení náboje v okolí živých vodičů při variantě 1 .....	37
Obrázek 39 - Rozložení náboje v okolí živých vodičů při variantě 2 .....	38
Obrázek 40 - Rovnoměrné rozložení náboje varianta 1 .....	39
Obrázek 41 - Rozložení náboje při rovnoměrně rozloženém PN varianta 1 .....	40
Obrázek 42 - Rozložení náboje při rovnoměrně rozloženém PN varianta 2 .....	40
Obrázek 43 - Rozložení náboje při nerovnoměrně rozloženém PN varianta 1 .....	41
Obrázek 44 - Rozložení náboje při nerovnoměrně rozloženém PN varianta 2 .....	41
Obrázek 45 - HVDC transformátor 1100kV [17].....	47
Obrázek 46 - HVDC střídač [17].....	47
Obrázek 47 - Portálový stožár .....	48
Obrázek 48 - Konvergence pro třípólové uspořádání.....	48

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přerozdělování náboje na trojsvazku při zavedení prostorového náboje .....	33
Tabulka 2 - Rozložení náboje na vodičích při variantě 1 .....	36
Tabulka 3 - Rozložení náboje na vodičích při variantě 2 .....	36
Tabulka 4 - Přerozdělování nábojů při uvažování rovnoměrně rozprostřeného PN var. 1 .	39
Tabulka 5 - Přerozdělování nábojů při uvažování rovnoměrně rozprostřeného PN var. 2 .	39
Tabulka 6 - Přerozdělování nábojů při uvažování nerovnoměrně rozprostřeného PN var. 1 .....	41

## Obsah

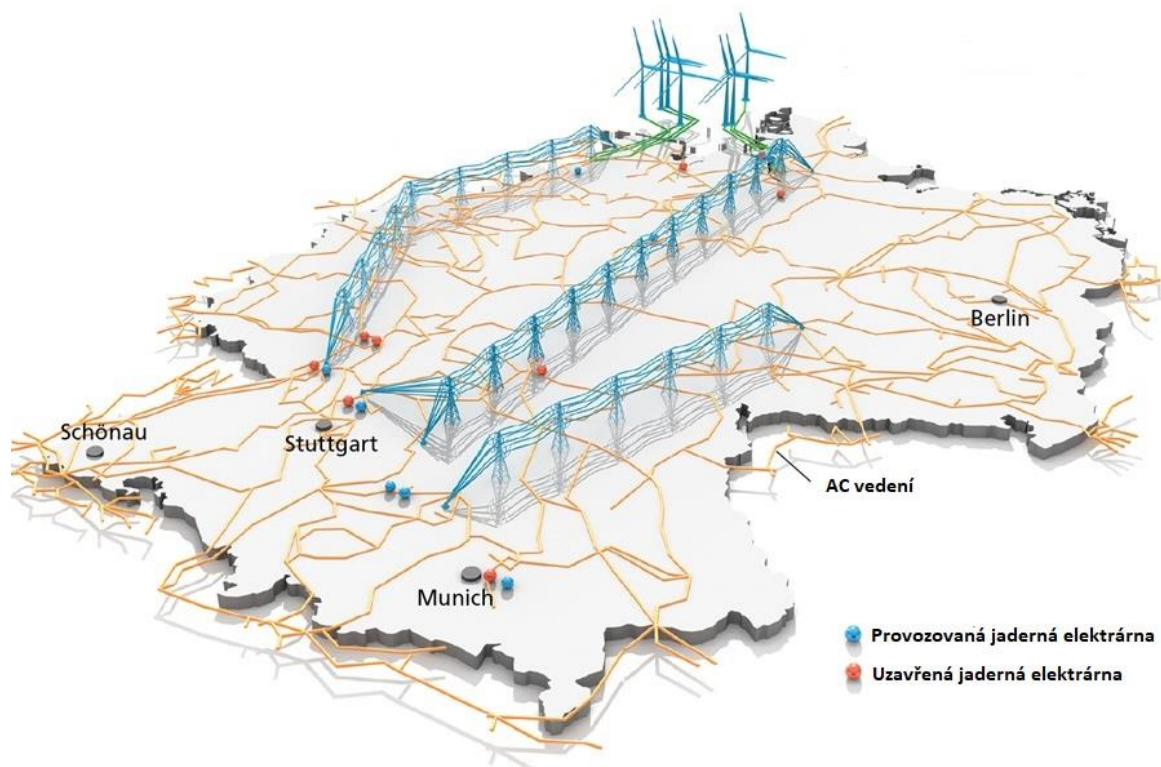
<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>HISTORIE PŘENOSU STEJNOSMĚRNÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>SOUČASNÉ VYUŽITÍ STEJNOSMĚRNÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE</b> .....	<b>4</b>
3.1	ELEKTRICKÁ TRAKCE .....	4
3.2	POČÁTKY HVDC VEDENÍ.....	4
<b>4</b>	<b>HVDC VEDENÍ</b> .....	<b>5</b>
4.1	ZPŮSOBY KONFIGURACE SÍTÍ.....	5
4.1.1	<i>Jednólové uspořádání</i> .....	5
4.1.2	<i>Dvoupólové uspořádání</i> .....	5
4.1.3	<i>Vedení nulové délky</i> .....	6
4.2	VÝHODY SÍTÍ HVDC.....	6
4.3	NEVÝHODY SÍTÍ HVDC.....	7
4.4	KRITICKÝ BOD POUŽITÍ HVDC NAMÍSTO HVAC .....	7
4.5	HYBRIDNÍ AC/DC VEDENÍ .....	8
4.6	REÁLNÉ HVDC PROJEKTY .....	9
<b>5</b>	<b>KORÓNA</b> .....	<b>10</b>
5.1	PRINCIP VZNIKU KORÓNY PŘI Kladné polaritě napětí .....	10
5.2	PRINCIP VZNIKU KORÓNY PŘI záporné polaritě napětí.....	12
5.3	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VZNIK KORÓNY .....	13
<b>6</b>	<b>ANALÝZA STACIONÁRNÍHO ELEKTRICKÉHO POLE</b> .....	<b>14</b>
6.1	ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ ELEKTRICKÉHO POLE .....	14
6.2	OKRAJOVÁ ÚLOHA .....	16
6.3	NUMERICKÉ ŘEŠENÍ OKRAJOVÉ ÚLOHY .....	17
<b>7</b>	<b>VÝPOČTY ELEKTRICKÉHO POLE PRO VYBRANÁ USPOŘÁDÁNÍ</b> .....	<b>18</b>
7.1	JEDNODUCHÝ VODIČ .....	19
7.1.1	<i>Bez prostorového náboje</i> .....	19
7.1.2	<i>Rovnoměrně rozložený prostorový náboj</i> .....	24
7.1.3	<i>Nerovnoměrně rozložený prostorový náboj</i> .....	25
7.1.4	<i>Porovnání výsledků</i> .....	26
7.2	SVAZKOVÝ VODIČ .....	27
7.2.1	<i>Bez prostorového náboje</i> .....	27
7.2.2	<i>Rovnoměrně rozložený prostorový náboj</i> .....	29
7.2.3	<i>Nerovnoměrně rozložený prostorový náboj</i> .....	31
7.2.4	<i>Porovnání výsledků</i> .....	33
7.3	TROJPÓLOVÉ USPOŘÁDÁNÍ .....	34
7.3.1	<i>Bez vlivu prostorového náboje</i> .....	36
7.3.2	<i>Rovnoměrně rozložený prostorový náboj</i> .....	38
7.3.3	<i>Nerovnoměrně rozložený prostorový náboj</i> .....	40
7.3.4	<i>Porovnání výsledků</i> .....	42
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>47</b>

# 1 Úvod

Stejnoseměrná vedení vysokého napětí (HVDC) se dnes stávají stále více atraktivní. Děje se tak hlavně v případě, že je zapotřebí přenášet vysoký výkon na dlouhé vzdálenosti. S ohledem na dispozice přenosové sítě bylo již několik HVDC linek postaveno v Číně a o dalších linkách se vážně uvažuje. Dalším příkladem může být např. Spolková republika Německo, kde je výroba z větrných parků situována v severní části země, spotřeba (rozsáhlé průmyslové podniky) je však umístěna na jihu země (Obrázek 1). Rozšíření stávajících vedení je velice obtížné a na velké vzdálenosti i velice ztrátové. Z tohoto důvodu se jeví výhodnější stejnosměrné vedení, které má v určitých směrech zásadní výhody oproti vedením střídavým. Při výstavbě nových linek nastává problém s výkupy pozemků a narušení krajiny. Proto se často přistupuje k nahrazení stávajících střídavých linek linkami stejnosměrnými, pomocí kterých je možné přenést větší výkon.

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat elektrické pole jak v těsné blízkosti, tak i dále od vodiče. Dosavadní studie na toto téma byly řešeny hlavně na namáhání kontrakčních prvků a dodržení hygienických norem, ale většinou se neřešil problém koróny, která u stejnosměrných vedení na povrchu vodiče často vzniká. Koróna je však děj, který je velmi složitý na popsání. Po zavedení několika zjednodušujících předpokladů (blíže popsanych v kapitole 7) je v této bakalářské práci provedeno první přiblížení, jak korónu zohlednit v analýze elektrického pole, a to pomocí statického prostorového náboje.

Výpočty se budou provádět v simulačním programu Agros2D, který je vyvíjen na katedře teoretické elektrotechniky Západočeské univerzity v Plzni. Pro jednoduché případy se provede verifikace výsledků pomocí analytického řešení. Výpočty se budou provádět pro jednoduchý vodič a pro svazkový vodič, kde u každého typu po simulaci všech návrhů bude následovat zhodnocení výsledků a posouzení vlivu prostorového náboje.



Obrázek 1 – Plány na výstavbu HVDC linek v Německu [16]

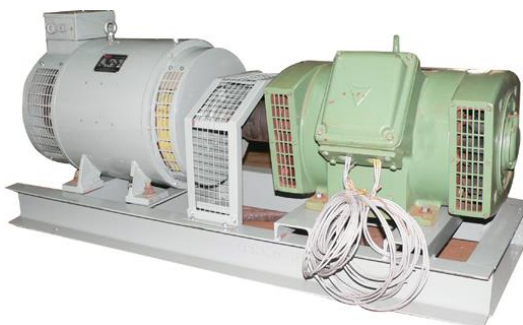
## 2 Historie přenosu stejnosměrné elektrické energie

Z historického hlediska se jedná o první způsob přenosu elektrické energie. Jako první elektrický zdroj byl totiž objeven roku 1800 galvanický článek. Tento zdroj sestrojil Alessandro Volta. Ovšem napětí 1V, které kombinace mědi a zinku v elektrolytu vytváří, nebylo vhodné pro širší použití. Elektrický proud začal být zajímavější až s vynálezem stejnosměrného generátoru s komutátorem. Ten zkonstruoval Hippolyte Pixii v roce 1831. O 36 let později bylo toto dynamo vylepšeno o elektromagnety namísto permanentních. Tím došlo k nárůstu výkonu a elektřinu bylo možné používat ve velkém. Nejprve byla využívána pro osvětlení měst, ale s přibývajícím výkonem začal být problém s úbytky napětí na vedeních [1].

Tento problém bylo možno vyřešit přechodem na střídavý elektrický proud. Ten totiž umožňoval snadnou změnu napětí pomocí transformátoru, což byla obrovská výhoda oproti stejnosměrnému. Zvýšením napětí se snížily proudy, které na vedeních způsobovaly úbytky napětí podle vzorce:

$$\Delta U = RI \cos(\alpha) + XI \sin(\alpha) \quad (1)$$

To umožnilo přenos na velké vzdálenosti a tím i veliké rozšíření elektrické energie. Stejnou směrný proud byl vytlačen i z důvodu jednoduchého vytvoření točivého magnetického pole pomocí třífázového vedení a použití asynchronního motoru (1891), který je oproti DC motoru s komutátorem jednoduchý, bezúdržbový a bezporuchový [1]. Převést střídavý proud zpět na stejnosměrný bylo možno v té době pouze pomocí rotačního měniče, kdy střídavý motor poháněl dynamo. Toto soustrojí mělo ovšem nevýhody v účinnosti a složitosti. To změnil vynález rtuťového usměrňovače v 30. letech 20. století.



Obrázek 2 – Motorgenerátor [22]

## 3 Současné využití stejnosměrné elektrické energie

### 3.1 Elektrická trakce

Dnes se stejnosměrná vedení uplatňují ve dvou oblastech. Jednou z nich je elektrická trakce, a to z důvodu využití sériového stejnosměrného motoru. Ten má totiž pro pohony ideální momentovou charakteristiku a jednoduchou odporovou regulaci. Motor v klidu nelze totiž připojit přímo na plné napájecí napětí z důvodu vysokých rázových proudů. Proto je třeba toto napětí snížit, čímž dojde ke snížení momentu. Sériový motor má však největší moment právě při co nejnižších otáčkách, takže mu regulace napětím tolik nevádí. Nevýhodou jsou ztráty na odporu, které se později vyřešily použitím pulzních měničů. Další nevýhodou je omezené napětí na komutátoru 1500V. To omezilo napěťovou hladinu na 3kV při zapojení dvou motorů do série. Omezení napěťové hladiny má však za následek omezení výkonů elektrických trakčních vozidel či nutnost častějšího výskytu měniren na trati [2]. V současnosti se s nástupem frekvenčních měničů začíná i na drahách provozovaných na DC vedení zavádět použití synchronních motorů s permanentními magnety, které se umístí přímo na hřídel kola, díky čemuž odpadá použití převodovky a momentová charakteristika se měničem vytvaruje přesně do ideálního tvaru [3].

### 3.2 Počátky HVDC vedení

Návrat k použití stejnosměrného proudu v oblasti energetiky a přenosu elektrické energie umožnil až vynález rtuťových usměrňovačů, pomocí kterých bylo možno provést jednodušší a efektivnější přeměnu vysokého střídavého napětí na stejnosměrné, než pomocí dosud používaných rotačních měničů [1]. V roce 1954 byla firmou ABB spuštěna první HVDC linka určená pro komerční účely. Objednávka na tento projekt byla firmě předána o čtyři roky dříve, tedy roku 1950, Švédskou státní radou pro energetiku (Swedish State Power Board) kvůli rostoucí poptávce po elektrické energii. Podmořský kabel spojuje švédské pobřeží s ostrovem Gotland [1] [4].

Dalším důležitým objevem byl tyristorový měnič. Na jaře roku 1967 byl první měnič tohoto typu nainstalován opět na lince Gotland a nahradil původní rtuťový. To nastartovalo další vývoj měničů a podpořilo výstavbu nových linek HVDC [1].

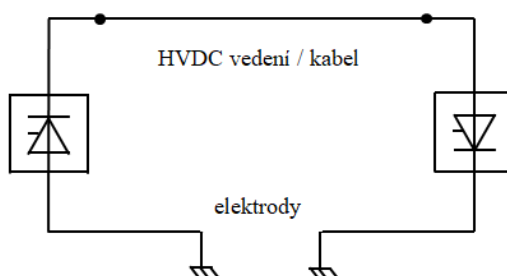


## 4 HVDC vedení

### 4.1 Způsoby konfigurace sítí

#### 4.1.1 Jednopolové uspořádání

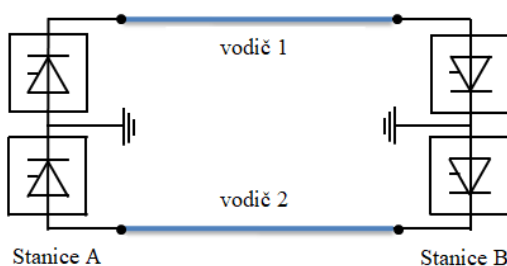
Přenos stejnosměrné energie lze provést různými způsoby s různými vlastnostmi. Jednou možností je použití jednoho vodiče, který slouží ke spojení měničů. Jako návratová cesta je použita zem, kde se obě měničky spojí pomocí elektrod. Občas, pokud není prostředí vhodné jako návratový vodič, se použije druhý vodič. Toto provedení však zvýší pořizovací náklady i ztráty [1].



Obrázek 3 - Jednopolové uspořádání [7]

#### 4.1.2 Dvoupólové uspořádání

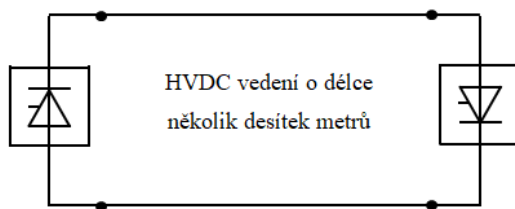
Linka je tvořena ze dvou dvanácti-pulzních měničů na obou stranách vedení a dvěma vodiči, kde každý má stejné napětí oproti zemi, ale opačnou polaritu. Zemí při normálním provozu teče pouze vyrovnávací proud, který je oproti provoznímu malý. Toto uspořádání má oproti jednopolovému uspořádání dvojnásobnou kapacitu. Pokud dojde k poruše jednoho z měničů, nebo kabelu, lze vedení provozovat jako jednopolové, tj. použít jako návratový vodič zem, avšak s polovičním výkonem oproti funkčnímu stavu [1].



Obrázek 4 - Dvoupólové uspořádání [7]

### 4.1.3 Vedení nulové délky

Použití tohoto uspořádání znamená, že usměrňovač a střídač se nachází velmi blízko sebe, často v jedné budově, a samotné HVDC vedení je velmi krátké. Výstavba krátkých stejnosměrných vedení není sice ekonomicky výhodná, avšak pro propojení nesynchronních soustav je to v současné době jediná možnost [1].



Obrázek 5 - Vedení nulové délky [7]

Protože je délka vedení krátká, vyplatí se použít silnější vodiče, které budou mít menší odpor. Jejich pořizovací cena bude vyšší, avšak ušetří se na nákladech na měnírny. Pro vedení nulové délky se totiž používá nižší napětí, čímž vznikne úspora jak na součástkách, tak na izolaci a izolačních vzdálenostech.

## 4.2 Výhody sítí HVDC

Hlavní výhodou stejnosměrného přenosu elektrické energie je, že v ustáleném stavu se neprojeví indukčnost a kapacita vedení. Nedochozí tak k úbytku napětí na podélné reaktanci a není nutné řešit přenos jalového výkonu, který je spojen se ztrátami.

U stejnosměrného vedení se ušetří také na vzájemné izolaci mezi pracovními vodiči. Efektivní hodnota napětí střídavého je dána jako hodnota napětí stejnosměrného, které stejné zátěži dodá za stejný čas stejnou energii. Z této definice vyplývá, že izolaci pro DC vedení stačí dimenzovat na efektivní hodnotu, ale napětí střídavé na maximální hodnotu, které je pro harmonický průběh  $\sqrt{2} * U_{ef}$ , čili přibližně 1,4 krát větší [1].

Stejnosemřná vedení mají také větší spolehlivost a zároveň méně potřebných vodičů. Třífázové AC vedení vyžaduje ke svému správnému fungování minimálně tři vodiče. Při poruše kteréhokoliv z nich je vedení nefunkční. HVDC vedení při dvoupólovém uspořádání potřebuje pouze dva vodiče a zemní spojení. Při poruše kteréhokoliv z vodičů lze přenášet sice jenom poloviční výkon, ale stále je zajištěna

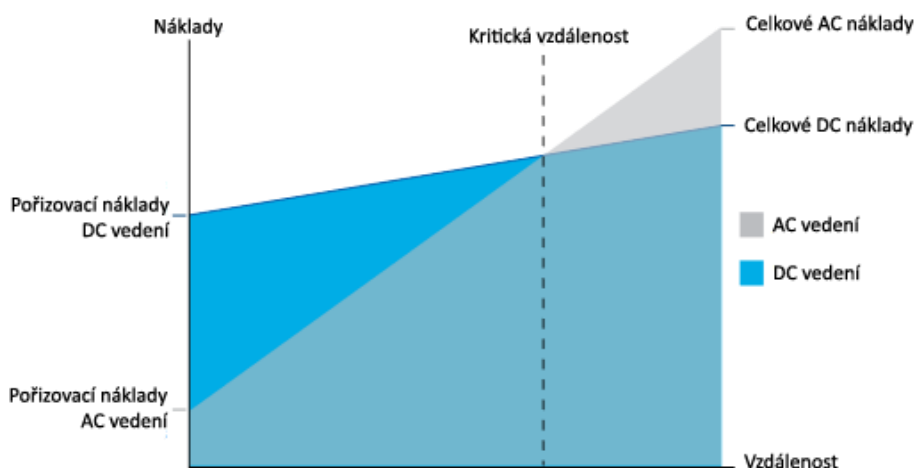
funkčnost. Při vedení jednopólovém je zapotřebí dokonce pouze jednoho vodiče, na kterém když dojde k poruše, je vedení mimo provoz [1]. HVDC vedení lze bez vyšších úprav aplikovat na stávající vedení, kdy dva vodiče jsou pracovní a jeden vodič může fungovat jako záloha pro ještě větší spolehlivost [1].

Dále lze u stejnosměrných vedení jednoduše řídit směr toku elektrické energie i její množství [1]. U vedení střídavých lze řídit pouze velikost přenášeného výkonu pomocí speciálních fázových transformátorů, které se v dnešní době začínají v přenosových sítích aplikovat z důvodu nárůstu obnovitelných zdrojů elektrické energie a problémy s nárazovými toky výkonu z určitých míst.

### 4.3 Nevýhody sítí HVDC

Použití HVDC vedení má smysl pouze pro spojení dvou míst. Pokud bychom měli udělat vývod kdekoli v průběhu vedení, znamená to výstavbu nové měřírny, což celou stavbu citelně prodraží. Každá měřirna také zapříčiní ztrátu na polovodičových součástkách, takže vedení bude nevýhodné z pohledu ztrát při kratších vzdálenostech [1] (více v 4.4). Další nevýhodou oproti střídavým linkám je větší projev koróny, která způsobuje ztráty nezávisle na zatížení. (více v 5).

### 4.4 Kritický bod použití HVDC namísto HVAC



Obrázek 6 - Graf závislosti nákladů DC a AC vedení na jeho délce [5]

Jak už jsem zmínil, HVDC vedení je nevýhodné pro krátké vzdálenosti. Jediným použitím je spojení dvou nesynchronních soustav – vedení nulové délky. Pro kabelové vedení AC je maximální vzdálenost mezi 50 až 100 km [5], poté je nutnost výstavby

kompenzační stanice [6]. Pokud chceme přenést energii na delší vzdálenost, jeví se jako výhodné použití napětí stejnosměrného. Lze tedy říct, že do určité vzdálenosti se vyplatí použít střídavé napětí, protože náklady na transformátory jsou menší než náklady na vybudování celé měřírny. AC vedení má však vlivem působení indukčnosti vedení vyšší ztráty napětí na kilometr než HVDC, které má sice pořizovací náklady vyšší, ale ztráty na kilometr menší (3% na 1000 km [1]). Proto nastává při určité vzdálenosti průsečík ztrátových přímek a značí se kritická vzdálenost [5].

#### 4.5 Hybridní AC/DC vedení

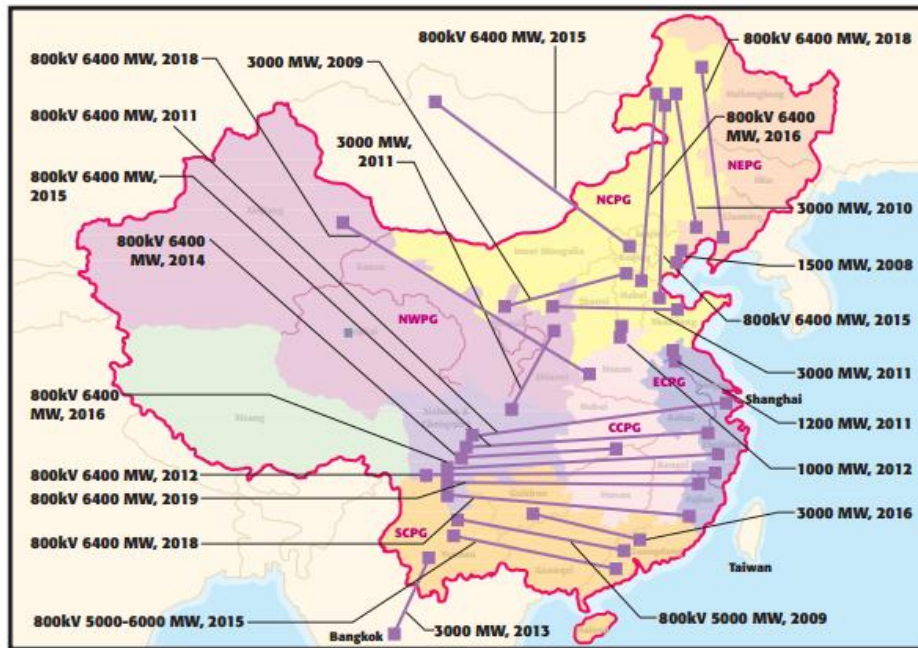
O hybridním vedení se v dnešní době uvažuje stále více, jelikož je třeba zvyšovat přenášené výkony mnohdy na velké vzdálenosti. Výstavba nových linek je však problém z důvodu výkupu pozemků, a stávající AC vedení jsou stále třeba. Proto se zrodil nápad na hybridní linky. Při této výstavbě však zanikne jedna stávající AC linka. Z toho důvodu se používá pouze při nutnosti rychlého navýšení výkonu. Příkladem by mohla být nutnost přenášet stále větší výkon z větrných parků na severu na jih Evropy [7].

Výstavba probíhá tak, že se zruší jeden potah střídavého vedení a nahradí se vedením stejnosměrným. Tím se splní to, že zůstane zachováno stávající vedení i když s menší kapacitou. Chybějící výkon nahradí HVDC vedení, které na dlouhé vzdálenosti zvládne přenést výkon větší [7]. Výhodou tohoto řešení je, že zůstanou zachovány stávající sloupy, pokud se jedná o typ Soudek nebo Donau, a vodiče, které jsou navíc pro HVDC dostupné tři, zajistí velkou spolehlivost, jelikož lze provést dvou vodičové vedení s jedním záložním vodičem. Systém také může pracovat na vyšším napětí a tím i menším proudem [7].

Nevýhodou tohoto provedení je vzájemné ovlivňování AC a DC soustavy. V HVDC vedení je působením střídavého pole indukována střídavá složka a ve střídavém složka stejnosměrná. Míra ovlivňování závisí na velikosti jednotlivých hladin, které je podle toho třeba zvolit. Velikost napětí je navíc omezená i aktuálním provedením stožárů a izolačních vzdáleností. Při překročení by bylo třeba stožáry předělávat či instalovat delší izolátory, což je velice nežádoucí hlavně z důvodu ceny [7].

## 4.6 Reálné HVDC projekty

HVDC linek je po celém světě několik, jejichž přehled je uveden ve zdroji [5]. V současné době je v oblasti projektů HVDC linek jasným leaderem Čína. V této části bakalářské práce zmíním pouze několik zajímavých projektů.



Obrázek 7 - Provozované HVDC linky v Číně [8]

Jako první bych uvedl linku, která je prozatím ve výstavbě, ale ukazuje vše, co je možné s dnešními technologiemi zvládnout. Vedení je taženo z města Changji do Guquan. Výstavbu si objednal provozovatel čínských sítí a tendr vyhrála firma ABB. Má být dokončena roku 2018 a bude provozována na napětí  $\pm 1100$  MV a na svou délku 3000 km má přenést výkon 12000 MW proudem 5454 A. Tyto čísla jsou téměř nepředstavitelná, ale jedná se pouze o jednu linku, která je provozována s těmito parametry [9]. Další linkou, je Xiangjiba-Shanghai uvedená do provozu roku 2010. Provozována je na napětí  $\pm 800$  kV a je schopná přenést výkon 6400 MW. Vedení je dlouhé 2071 km a zajímavé je to, že se na její výstavbě a vývoji podílely obě největší firmy, ABB i Siemens [9]. Dalším příkladem je Back-to-back (nulové délky) stanice v Rapid City v USA. Ta je se svým napětím  $\pm 13$  kV příkladem, že pokud je HVDC vedení provozované jako „regulační stanice“, používá se mnohem menší napětí než na vedení, které výkon přenáší na delší vzdálenosti. Tato stanice přenáší výkon pouze  $2 \cdot 100$  MW ale s proudem 3930 A [9]. V příloze jsou pro představu vloženy ukázkové fotografie z reálných měření.

## 5 Koróna

Koróna je neúplný samostatný výboj, který je omezen na úzký prostor kolem vodivých materiálů pod napětím. Vzniká na značně zakřivených místech, na kterých je dostatečná intenzita elektrického pole. Koróna je ve tmě viditelná pouhým okem, ale vysílá i v ultrafialové oblasti. Určit počáteční napětí koróny je velice obtížné, zvláště proto, že závisí na čistotě a členitosti povrchu. V praxi se to dá zjistit zvyšováním napětí, kdy při dosažení počáteční hodnoty začne okolí vodiče slabě svítit a v prostorech, kde je rušení okolním šumem velice malé, lze i slyšet šumění a praskání. Pokud budeme napětí zvyšovat dále, bude poměrně rychle narůstat proud a světelnost výbojů, které budou přecházet až k jiskření. [10]

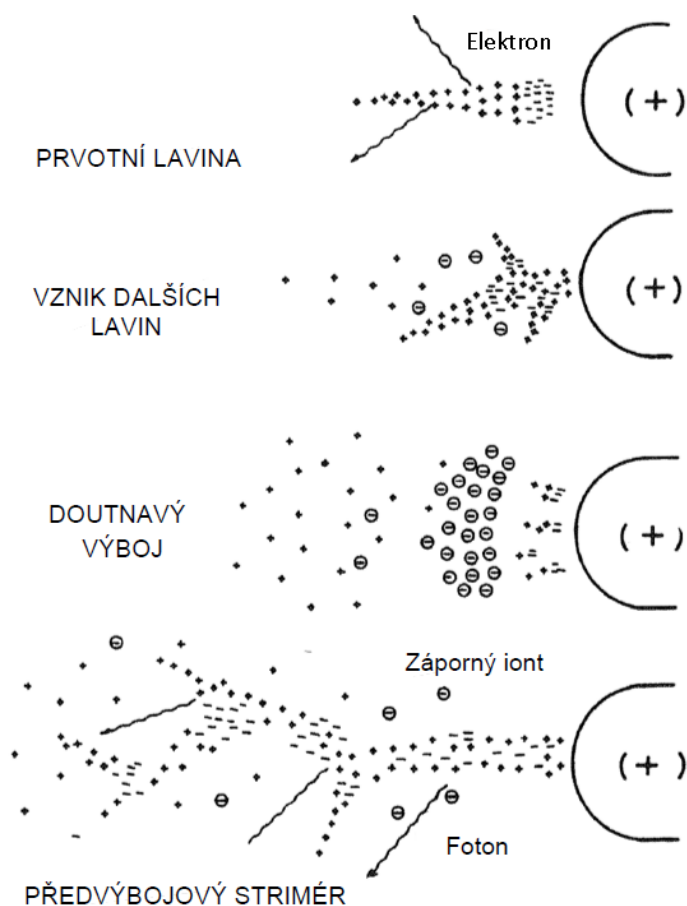
Vznik koróny je rozdílný na kladné a záporné elektrodě. U záporné elektrody míří výboje směrem od svítící vrstvy, u kladné je to naopak. V okolí vodičů se zvětšuje prostorový náboj. V okolí takového vodiče tedy není nulový náboj a neplatí zde Laplaceova rovnice (více v 6.2). Koróna je jev, který se řeší velice intenzivně. Způsobuje ztráty na vedení a je také zdrojem širokopásmového rušení, čímž zapříčiňuje zhoršení či zašumění signálu například rozhlasového vysílání, televize i mobilních vysílačů. Koróna je proto jedním z kritérií pro návrh průměru a vzdálenosti vodičů. Proto se v oblasti vysokého napětí volí svazkové vodiče, které způsobí přerozdělení elektrického náboje na jednotlivé vodiče a tím i snížení maximálních hodnot intenzity elektrického pole. Další problém je, že korónový výboj vytváří ozón a kysličníky dusíku, které v kombinaci s vlhkostí okolí vytvářejí kyselinu, která rozežírání kovové součásti, jako třeba úchyty lan k izolátoru. Koróna může rovněž vnikat v dutinách izolátorů. [10]

### 5.1 Princip vzniku koróny při kladné polaritě napětí

Vlivem radioaktivního záření ze země (radon,...) a záření kosmického, lze ve vzduchu nalézt určité množství elektronů. Tyto elektrony jsou přitahovány k vodiči s kladným potenciálem. Tyto elektrony narážejí do molekul atomů obsažených ve vzduchu, které obsahují prvky jako kyslík a dusík. Pokud je intenzita elektrického pole příliš nízká, je tato srážka pružná, to znamená, že se elektron odrazí a nepředá molekule žádnou energii. Pokud však intenzita přesáhne elektrickou pevnost, kterou lze poměrně těžce definovat, protože je závislá na mnoha faktorech, dochází zde ke srážce nepružné a elektron vyrazí

jeden elektron z valenční vrstvy některého z prvků a z molekuly se stává kladný iont. Tomuto jevu se říká ionizace. [11]

Po této srážce mají původní elektron a elektron vyražený malou rychlost, ale jelikož jsou urychlovány elektrickým polem vodiče, za krátký čas dochází ke srážce znovu. Ale tentokrát dojde ke dvěma srážkám a tudíž i ke dvěma vyražením elektronům. V součtu máme tedy již čtyři volné elektrony. Tento proces se neustále opakuje a vzniká takzvaný lavinový efekt. Po několika srážkách se kolem vodiče nachází mnoho volných elektronů. Těžké ionty, které mají nižší rychlost než elektrony, vytvářejí kladný prostorový náboj, který vytváří pomyslné hroty (vodivé kanálky) na povrchu vodiče, čímž fiktivně zvětšuje jeho průměr. Na těchto hrotech také roste intenzita elektrického pole a tím vzniká další množství lavin a dalších iontů. Postupně tak narůstá vrstva kladného prostorového náboje v okolí vodiče. Pokud se nahromadí velké množství kladného prostorového náboje, přechází lavinový efekt v tzv. strimér. Ten se projevuje jako doutnavý výboj na povrchu vodiče, který vyzařuje slabé světlo. [11]

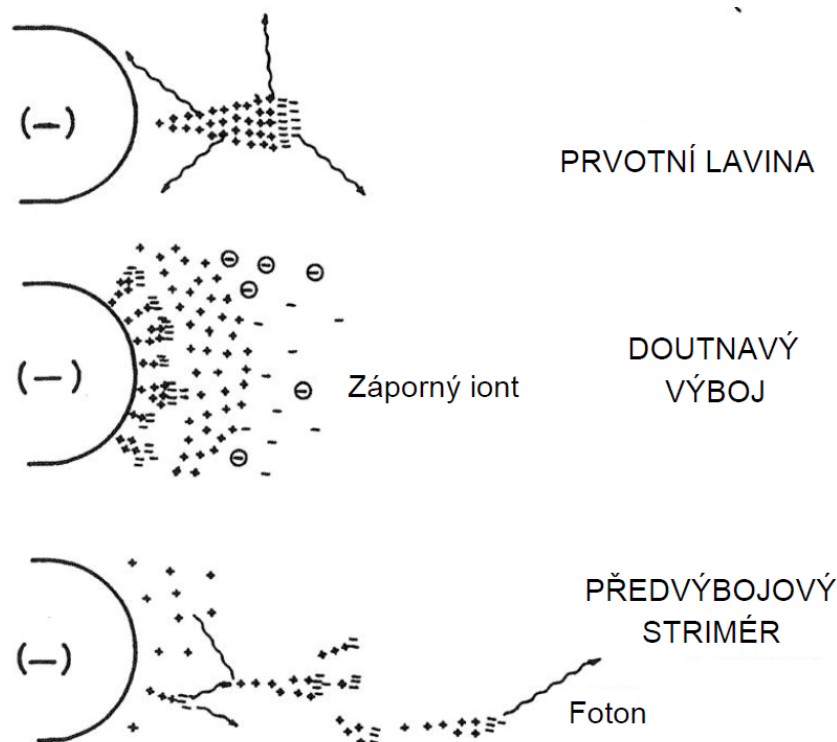


**Obrázek 8 - Vznik koróny při kladném napětí elektrody [11]**

## 5.2 Princip vzniku koróny při záporné polaritě napětí

Po překročení elektrické pevnosti vzduchu je koróna na vodiči pulzující, kde každý pulz je způsoben jednou elektronovou lavinou. Tyto laviny vznikají u vodiče a postupně se rozšiřují až do míst, kde je již intenzita natolik malá, že další výboj nedovolí. Za touto hranicí se čím dál více elektronů, které vznikly při lavinovém efektu, váže na molekuly vzduchu a vytvářejí záporné ionty, které se pohybují směrem ke kladnému vodiči. [11]

Pokud napětí ještě více zvětšíme, zvýší se frekvence výbojů na takovou hodnotu, že výboj probíhá pořád a vzniká tak záporný doutnavý výboj a záporný prostorový náboj se začne rozšiřovat do větší vzdálenosti od vodiče. Tento proces způsobuje výboj, který nazýváme tryskovým. Výboj lze pozorovat po celém obvodu vodiče a doprovází ho zvukový efekt, kterému se obvykle říká sršení. Při vzniku koróny má na intenzitu elektrického pole u vodiče vliv kladný prostorový náboj v jeho blízkosti a také záporný prostorový náboj ležící ve větší vzdálenosti. V těsné blízkosti vodiče je tak vyšší intenzita elektrického pole, a tak je zápalné napětí na záporné elektrodě nižší než na elektrodě kladné. [11]



Obrázek 9 - Vznik při záporné polaritě napětí [11]



Jinak je tomu u koróny na střídavém vedení, kde se střídá kladná a záporná polarita napětí, což se projeví i na koróně. Zde je utlumená hlavně kladná koróna zbytkovým nábojem ze záporné koróny a může tedy probíhat jen velice krátce v omezeném úseku půlperiody [11].

### **5.3 Faktory ovlivňující vznik koróny**

Korónu ovlivňují dva hlavní aspekty. Prvním jsou klimatické podmínky, kdy se uvažuje teplota, tlak a vlhkost. Změna těchto parametrů má vliv na velikost korónových ztrát. Dalším aspektem je povrch vodiče. Veškeré nečistoty způsobují nerovnosti, tím narůstá intenzita elektrického pole a ztráty korónou. Starší vodiče mají menší ztráty korónou než nové, a to kvůli mastnotě povrchu, která vytvoří povrch hladší. [11]

## 6 Analýza stacionárního elektrického pole

### 6.1 Analytické řešení elektrického pole

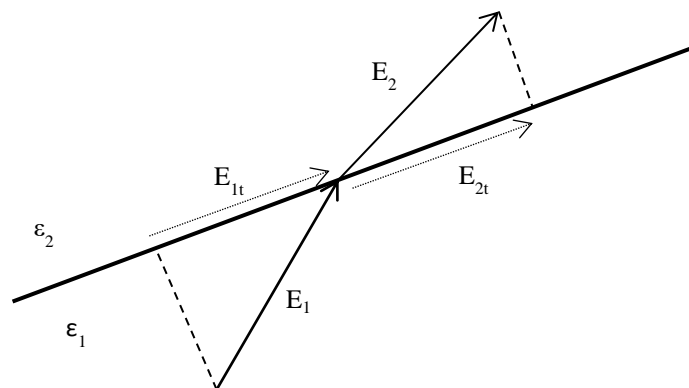
Elektrostatické pole je možné popsat druhou a třetí Maxwellovou rovnicí. Lze použít jejich integrální tvar:

$$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0; \oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q \quad (2), (3)$$

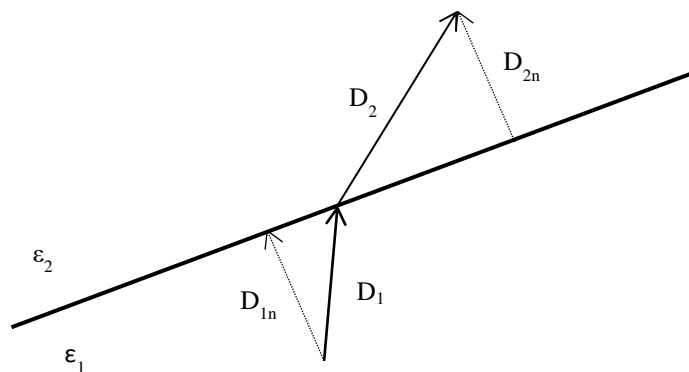
nebo jejich diferenciální tvar:

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0; \text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (4), (5)$$

Těmito rovnicemi v integrálním tvaru, které jsou svou interpretací velice jednoduché, lze však vyřešit pouze jednoduché případy typu rovinný kondenzátor, atd., tedy v případech 1D pole. Na složitější uspořádání je možno použít Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru. Jejich nevýhodou je to, že platí pouze v regulárních bodech (mimo rozhraní). Na rozhraní je nutné aplikovat podmínky na rozhraní, které vychází z rovnosti tečných resp. normálových složek intenzity elektrického pole resp. elektrické indukce  $\rightarrow E_{t1} = E_{t2}$  a  $D_{n1} = D_{n2}$  (pokud je na rozhraní  $\sigma = 0$ ).



**Obrázek 10** - Vektorové znázornění intenzit elektrického pole na rozhraní



**Obrázek 11** - Vektorové znázornění elektrické indukce na rozhraní

V praxi se volí spíše analýza pole pomocí potenciálu, který má tu výhodu, že je spojitý a pro elektrostatické pole skalární. Rovnici pro potenciál lze jednoduše odvodit z diferenciálního tvaru třetí Maxwellovy rovnice a vyjádření elektrické indukce pomocí permitivity prostředí:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \mathbf{E}) = \rho \quad (6)$$

Pokud je  $\varepsilon$  po částech konstantní, je možné ji vytknout před divergenci. Intenzita elektrického pole může být vyjádřena pomocí potenciálu – viz rovnice (7). Dosazením vztahu (7) do rovnice (6) je možné získat rovnici (8).

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

$$\operatorname{div}(-\operatorname{grad} \varphi) = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (8)$$

Jelikož platí, že  $\operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi) = \Delta \varphi$ , lze dospět ke vztahu:

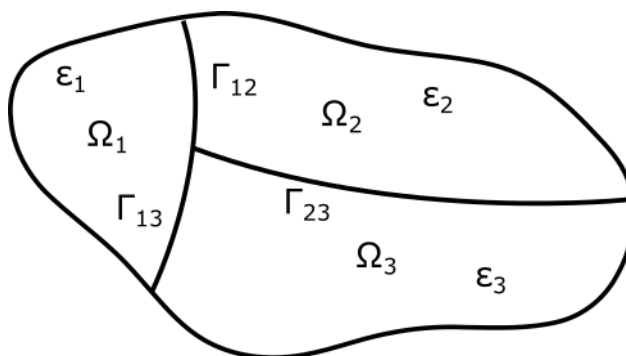
$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (9)$$

Tato rovnice se nazývá Poissonova. Pro mnoho úloh se hustota náboje  $\rho$  rovná 0. Potom se této rovnici říká Laplaceova:

$$\Delta \varphi = 0 \quad (10)$$

## 6.2 Okrajová úloha

Využívá analýzu problematiky pole pomocí potenciálu za použití rovnic (9, 10). Vektory elektrického pole pak lze zpětně dopočítat z hodnot potenciálu. Analyticky se okrajová úloha dá efektivně použít zpravidla jen pro 1D pole. Složitější prostorová uspořádání jsou řešena numericky, a to v simulačních programech. Okrajovou úlohu můžeme popsat pomocí obrázku (Obrázek 12). Na něm jsou znázorněné tři suboblasti  $\Omega_i$ . Každá z oblastí má jinou permitivitu  $\varepsilon$ , kterou budeme uvažovat konstantní. Z toho důvodu zde vznikají tři rozhraní  $\Gamma$ . Pokud je okrajová úloha řešena pomocí simulačního programu využívajícího metodu konečných prvků, není třeba definovat podmínky na rozhraní (jsou splněny automaticky).



Obrázek 12 - Znázornění okrajové úlohy

Formulace okrajových podmínek slouží k výběru takového řešení, které odpovídá zadaným fyzikálním podmínkám. Okrajových podmínek existuje více druhů a jsou dále popsány.

- **Dirichletova okrajová podmínka**

Tato podmínka definuje hodnotu potenciálu na hranici oblastí. Pokud se jedná o předmět dokonale vodivý, je na jeho povrchu daný potenciál všude stejný. Dost často ovšem neznáme potenciál, ale napětí, a je proto nutné zvolit si referenční bod (neboli zem), který definuje nulový potenciál. Takto lze určit potenciály ostatních vodivých ploch. Této podmínce se říká okrajová podmínka 1. druhu. [12]

- **Neumannova okrajová podmínka**

Tato podmínka je definována pomocí derivace potenciálu podle vnější normály  $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ . Pokud se bude jednat o derivaci potenciálu ve směru siločar, bude tato derivace rovna nule. Této podmínce se říká okrajová podmínka 2. druhu. [12]

- **Smíšená okrajová podmínka**

Pokud je část hranice popsána Dirichletovou okrajovou podmínkou a část Neumanovou, pak se tato podmínka nazývá smíšenou okrajovou podmínkou. [12]

### 6.3 Numerické řešení okrajové úlohy

Úloha, která se nedá řešit pouze v 1D souřadném systému, nebo je velice složitá, bývá řešena v simulačním programu. Pro následující simulace bude využíván program ze Západočeské univerzity v Plzni Agros2D, vyvíjený na katedře teoretické elektrotechniky. Ten při svých výpočtech používá knihovnu Hermes, vyvíjenou na univerzitě Reno v USA, která úlohu řeší metodou konečných prvků [13]. Analýza elektrického pole v okolí vodiče nad zemí je vnější okrajovou úlohou (prostorově neohraničená oblast). Pro simulaci je ale nutné zvolit konečnou výpočetní oblast a do ní zakreslit geometrii vodičů. Pomocí simulačního programu je zvolena vhodná výpočetní mřížka a úlohy jsou vyřešeny.

## 7 Výpočty elektrického pole pro vybraná uspořádání

Elektrické pole v okolí AC linek bylo již v minulosti úspěšně analyzováno a získané výsledky byly použity například pro ověření dodržování hygienických limitů. Základní metodika vyšetření elektrického pole HVDC linek je podobná. V kapitole (5.2) je popsáno, že jednou z negativních vlastností HVDC linek je významnější výskyt koróny. Zohlednění koróny v analýze elektrického pole nebylo dosud obvyklé a tato práce se právě tímto problémem zabývá. Koróna ovšem pro analýzu elektrického pole představuje velikou komplikaci. Fyzikální podstata koróny je sice dobře prozkoumaná, je však velice těžké ji relevantně popsat rovnicemi. V první řadě je velmi obtížné přesně určit oblast v okolí vodiče, kde koróna vzniká. Dále není známa velikost prostorového náboje samotné koróny. Dalším problematickým faktem je, že tento prostorový náboj se ve skutečnosti pohybuje. Jelikož se nejedná o symetrickou úlohu, lze navíc očekávat, že rozložení prostorového náboje okolo vodiče nebude rovnoměrné. Pro respektování koróny ve výpočtech této práce je tak zapotřebí zavést zjednodušující předpoklady. Oblast v okolí vodiče, kde se vyskytuje koróna, bude určena na základě výpočtu bez prostorového náboje z hodnot intenzity elektrického pole. Pro výpočty bude prostorový náboj považován za statický a jeho hodnota bude v závislosti na dalších parametrech zvolena.

Nejprve se provede simulace pro jednoduchý vodič, kde se zjistí základní chování elektrického pole a konvergence vytvořeného numerického modelu. Okolo tohoto jednoduchého vodiče se následně určí prostor, ve kterém pravděpodobně vznikne koróna. Do této oblasti se v dalším kroku umístí rovnoměrný prostorový náboj. V další simulaci se tento prstenec rozdělí na více dílů a velikost náboje se definuje pro každý element rozdílně (nerovnoměrně rozložený prostorový náboj). Stejně kroky se provedou i pro trojsvazek, kde bude ovšem geometrie mnohem složitější, zejména pak u nerovnoměrně rozloženého náboje. Na závěr se provede simulace elektrického pole pro trojpólové uspořádání s nulovým vodičem.

## 7.1 Jednoduchý vodič

V následujících výpočtech se bude řešit vodič ve výšce 10 m nad zemí pod napětím 400 kV stejnosměrných. Zem má nulový potenciál.

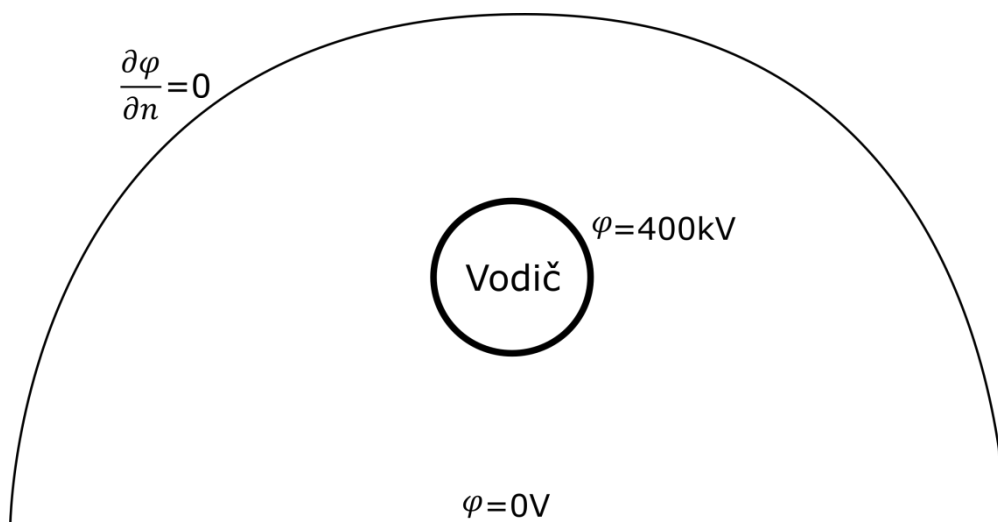
### 7.1.1 Bez prostorového náboje

#### 7.1.1.1 Výpočet v simulačním programu

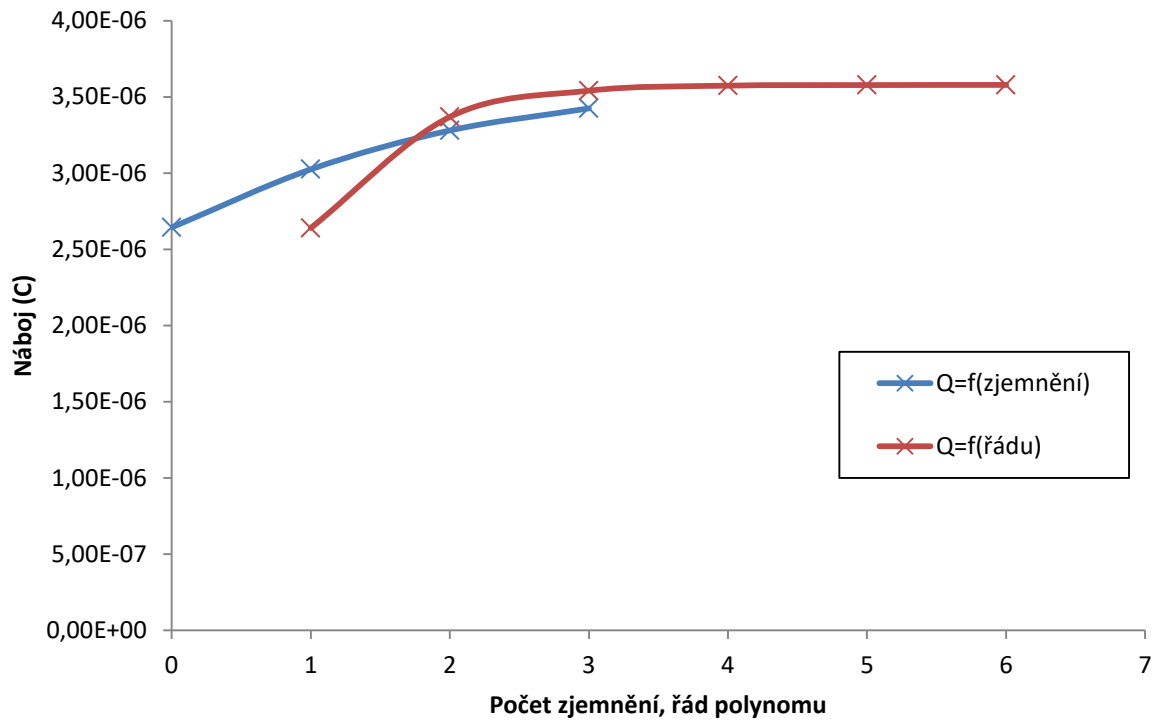
Jelikož jsou linky 400 kV u nás vedeny trojsvazkovým vodičem, je potřeba pro simulaci jednoduchého vodiče definovat tzv. ekvivalentní poloměr, který se spočítá jako: [14]

$$r_e = \sqrt[3]{R_V * d_{12} * d_{13}} \quad (11)$$

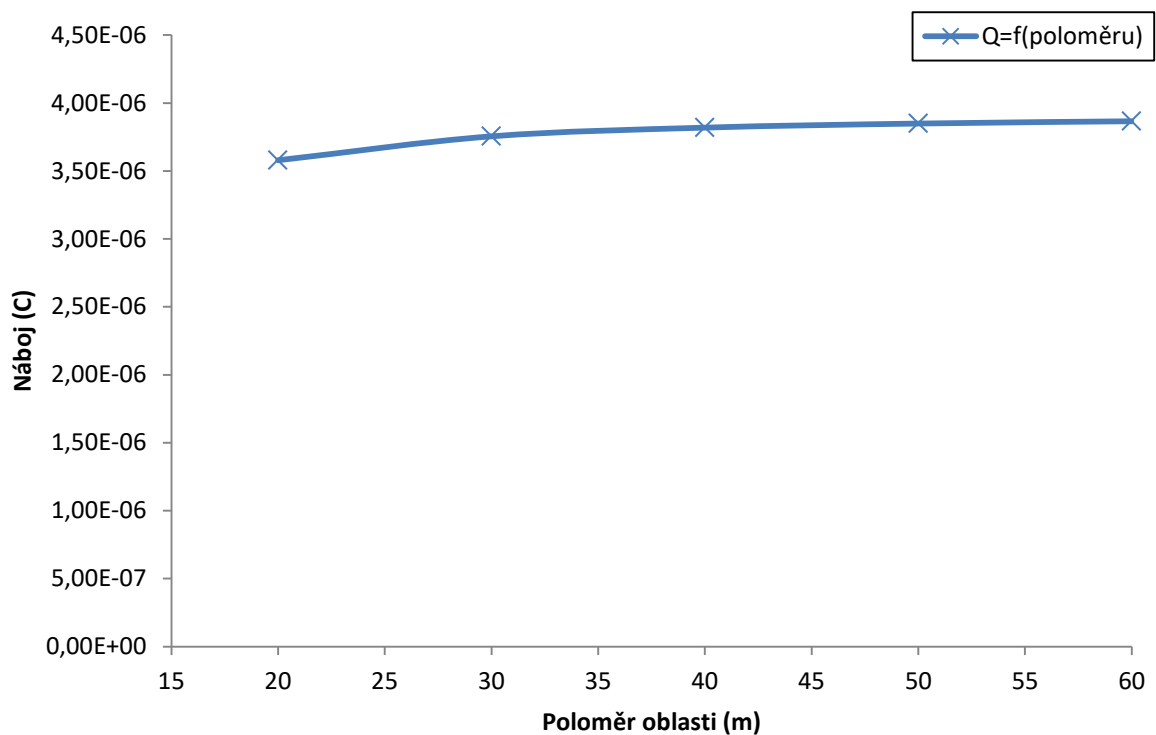
Kde  $R_V$  je poloměr vodiče a  $d$  je vzdálenost vodičů ve svazku. Pro výpočet je uvažován  $R_V = 0,0153$  m a  $d_{12} = d_{13} = 0,4$  m. Výsledný ekvivalentní poloměr je tedy 0,1348 m. Při znalosti těchto údajů lze sestavit simulační model. Abychom však mohli výsledek prohlásit za korektní, je třeba provést test konvergence. Ten se provede tak, že se bude nejprve měnit stupeň polynomu a zjemnění síť. Tento postup se opakuje pro změnu velikosti výpočetní oblasti, kdy se pozoruje změna náboje na povrchu vodiče.



Obrázek 13 - Nákres úlohy s jednoduchým vodičem bez prostorového náboje



Obrázek 14 - Konvergence pro řád polynomu a počet zjemnění

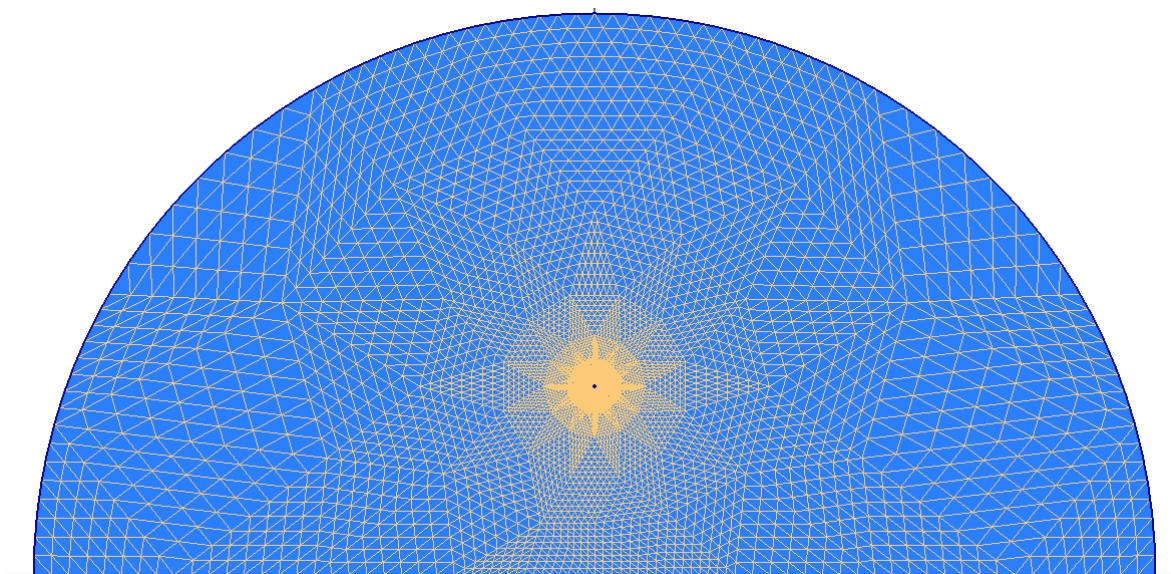


Obrázek 15 - Konvergence pro velikost výpočetní oblasti

Z vytvořených grafů (Obrázek 14, Obrázek 15) lze odečíst, jaká konfigurace výpočetního programu bude pro danou úlohu korektní. Je zjevné, že pro výpočetní oblast bude stačit poloměr 30 m. Řád polynomu nastavíme na hodnotu tři a počet zjemnění na

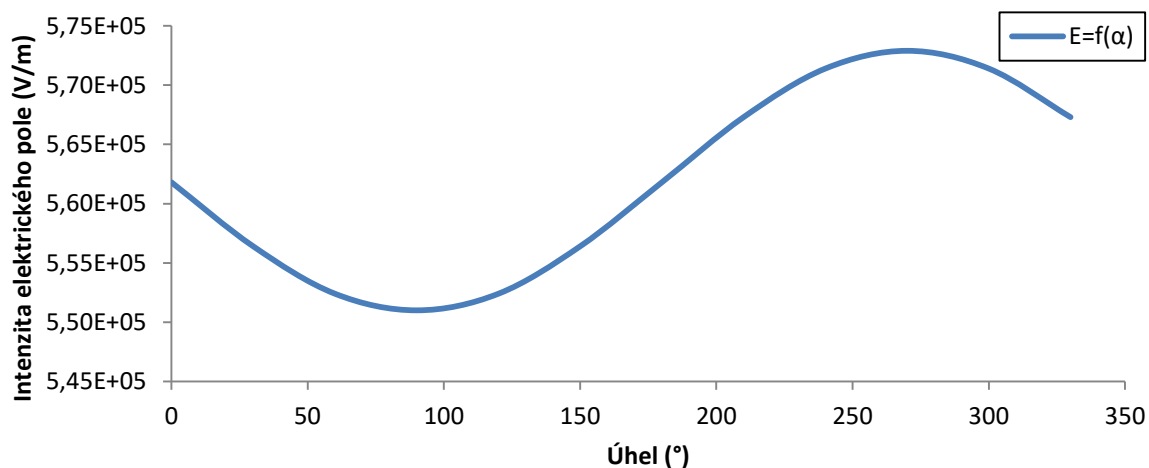


hodnotu dva. Při použití těchto parametrů si simulační program vytvoří následující výpočetní síť.



Obrázek 16 - Výpočetní síť simulačního programu

Jelikož se nejedná o symetrickou úlohu, protože vodič je válcový a zem rovina pod ním, je jasné, že bude rozdílná intenzita elektrického pole po obvodu vodiče. Z toho důvodu se odečte 12 bodů po obvodu ve vzdálenosti 1 mm od vodiče.



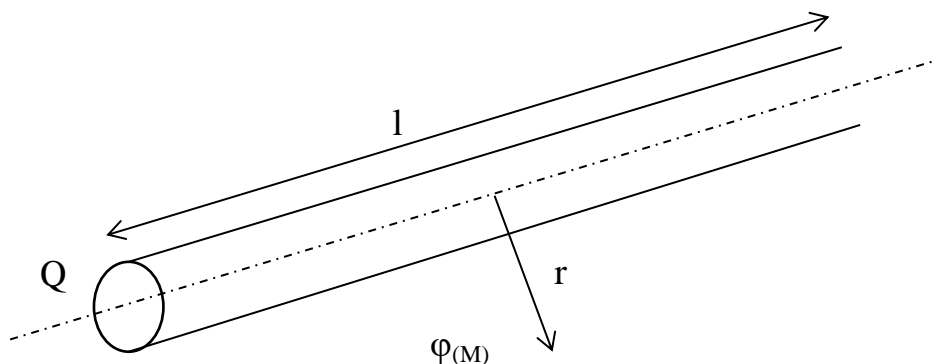
Obrázek 17 - Rozložení intenzity elektrického pole po obvodu vodiče

Z obrázku (Obrázek 17) je vidět, že elektrická pevnost vzduchu při normálních podmínkách nebyla nikde překročena. Může se však uvažovat, že při větším znečištění či větší vlhkosti může nastat koróna. Také se jedná o ekvivalentní průměr, který nahrazuje svazek jednoduchým vodičem spíše z pohledu indukčnosti. Proto se stejný postup aplikuje na vodič o stejném průřezu, jako je součet průřezů jednotlivých vodičů ve svazku. Poloměr je tedy 2,65 cm.

Z této simulace je patrné, že maximální intenzita elektrického pole je 2,21 MV/m, což by pravděpodobně zapříčinilo vznik koróny. Zatím se však jedná o modely s jedním vodičem. Chování trojsvazku bude pravděpodobně jiné, protože omezení koróny je hlavní důvod používání svazkových vodičů.

### 7.1.1.2 Analytické řešení

Ověření přesnosti výsledků ze simulačního programu lze odvodit pomocí analytické rovnice jak pro vodič ve volném prostoru, tak pro vodič nad zemí. Pokud je vodič o vlastním poloměru  $R$  a délce  $l$  ve volném prostoru a je na něm náboj  $Q$  – viz Obrázek 18, pak pro potenciál v bodě  $M$  v libovolné vzdálenosti  $r$  od vodiče platí vztah (12) pro potenciál [12]:

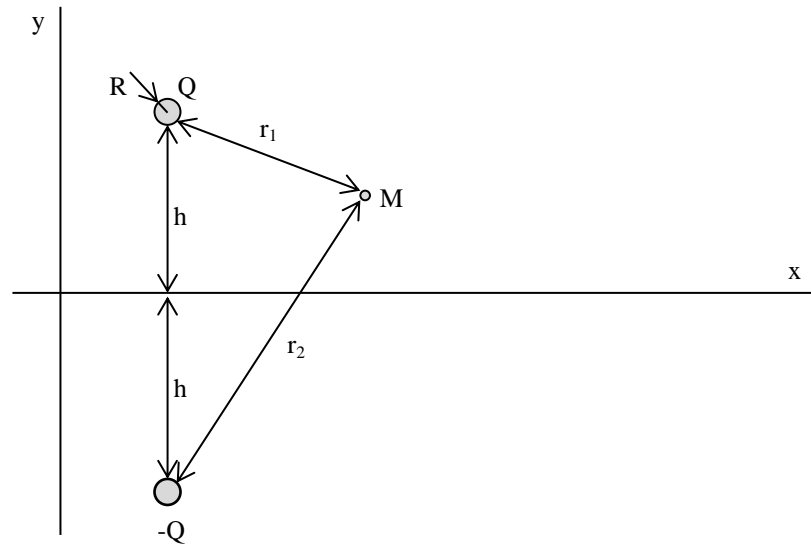


**Obrázek 18** – Potenciál v okolí válcového vodiče

$$\varphi(M) = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_0}{r} \quad (12)$$

kde  $r_0$  ... je vzdálenost k místu s nulovým potenciálem (m)

Zkoumaným objektem však není vodič ve volném prostoru, ale vodič nad zemí, proto se analyticky odvodí ještě vztah pro intenzitu u tohoto typu úlohy a vyjde se z metody zrcadlení (Obrázek 19).



Obrázek 19 - Metoda zrcadlení

Pro bod v prostoru M je možné určit potenciál pomocí superpozice potenciálů od vodiče a jeho obrazu:

$$\varphi(M) = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (13)$$

Pokud se umístí bod M na povrch vodiče směrem k zemi, tak pro tento bod je potenciál dán vztahem (14), za předpokladu  $R \ll h$ .

$$\varphi(M) = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{2h}{R} \quad (14)$$

Pokud je známo napětí vodiče vůči zemi U, jejíž potenciál je uvažován jako nulový, pak je možné vyjádřit náboj Q na vodiči jako:

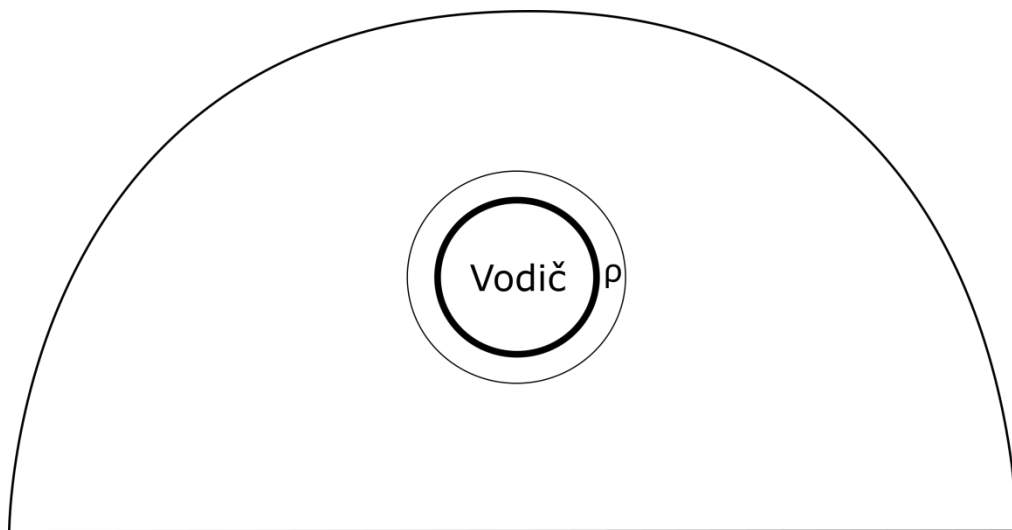
$$Q = \frac{U2\pi\epsilon l}{\ln \frac{2h}{R}} \quad (15)$$

Tímto analytickým vztahem je možné ověřit korektnost numerického modelu, protože nepočítá s omezenou oblastí. Po dosazení hodnot, které odpovídají našemu

modelu, při uvažování jednotkové délky dostáváme hodnotu  $4,4508 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , což je přijatelná chyba numerického řešení.

### 7.1.2 Rovnoměrně rozložený prostorový náboj

Nejprve je třeba definovat oblast v okolí vodiče, kde bude umístěn prostorový náboj. Pro určení této oblasti se zjišťuje, do jaké vzdálenosti od vodiče o poloměru 2,65 cm a napětí 400 kV přesahuje intenzita elektrického pole elektrickou pevnost vzduchu. Kvůli výskytu nečistot ve vzduchu okolo venkovního vedení zvolíme spodní hranici pevnosti 2 MV/m. Odečtením ze simulačního programu je patrné, že se jedná o vzdálenost 2,5 mm. Pro tuto vzdálenost se vytvoří okolo vodiče prstec s prostorovým nábojem  $\rho$ .

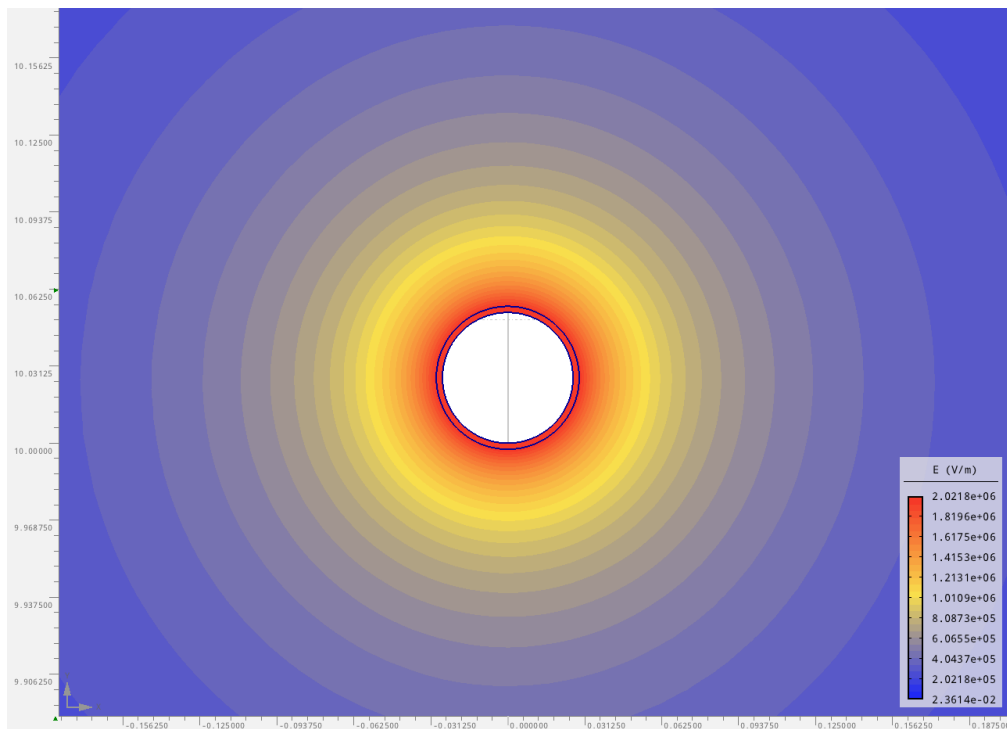


Obrázek 20 - Návrh úlohy s jednoduchým vodičem a rovnoměrným prostorovým nábojem

Prostorový náboj určíme nejprve jako 10 % náboje na povrchu samotného vodiče bez vlivu prostorového náboje – viz kapitola 7.1.1. Hodnota náboje na vodiči činí  $3,247 \mu\text{C}$  a 10 % z této hodnoty je  $324,7 \text{ nC}$ . Do programu Agros2D je třeba zadat hustotu prostorového náboje, a proto je třeba tento náboj vztáhnout na objem zakresleného prstence. Protože simulační program počítá souřadnici „z“ jako 1m, stačí náboj podělit plochou prstence v  $\text{m}^2$ . Plocha prstence se spočítá jako:

$$S = \pi * (r_2^2 - r_1^2) = \pi * (0,029^2 - 0,0265^2) = 0,000435896 \text{ m}^2 \quad (16)$$

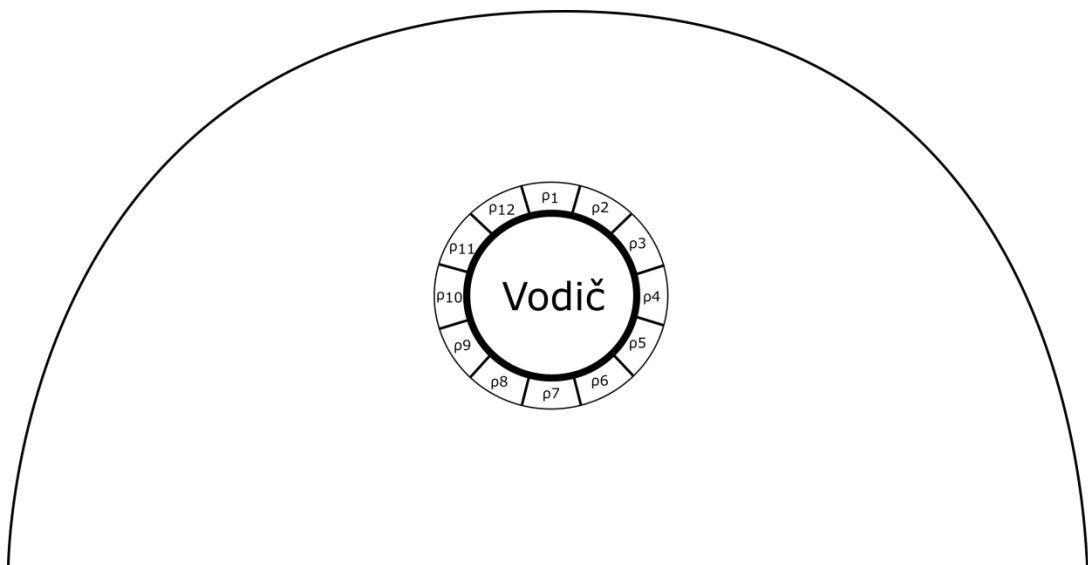
Po vydělení dostáváme hustotu prostorového náboje  $\rho = 0,000744902 \text{ C/m}^3$  nebo lépe  $7,44902 \cdot 10^{-4} \text{ C/m}^3$ .



Obrázek 21 - Simulace s rovnoměrným prostorovým nábojem

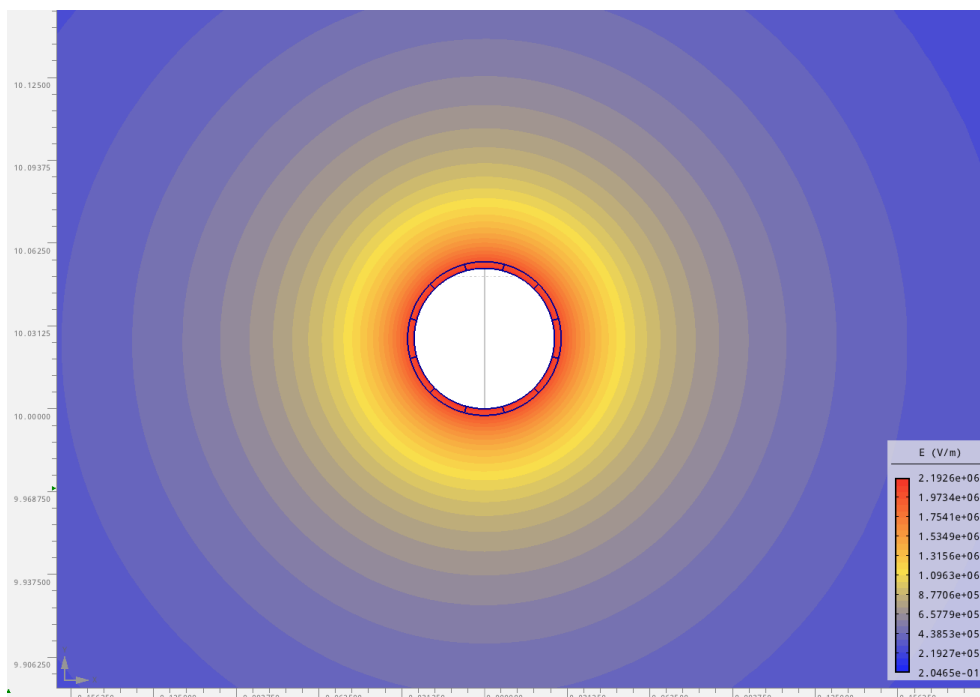
### 7.1.3 Nerovnoměrně rozložený prostorový náboj

Jak je vidět z obrázku (Obrázek 17), intenzita elektrického pole není po obvodu vodiče rovnoměrná. Proto lze předpokládat, že i koróna nebude po obvodu rovnoměrná. Proto se prstenec rozdělí na 12 dílů a upraví se hodnota prostorového náboje podle toho, jak se mění intenzita.



Obrázek 22 - Nákres úlohy s jednoduchým vodičem s nerovnoměrným prostorovým nábojem

Zjištěný prostorový náboj se vydělí počtem oblastí, tedy dvanácti. Vznikne hodnota prostorového náboje na dvanáctinu plochy rovna  $6,2075 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^3$ . Tato hodnota se nachází v místech, kde se intenzita elektrického pole rovná střední hodnotě, což je  $2,19425 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ . Ze simulace je vidět, že se nejvyšší hodnota intenzity zvedne o  $0,171 \text{ MV/m}$  (7,8 %) oproti modelu s uvažováním rovnoměrně rozloženého prostorového náboje, což rozhodně není zanedbatelná hodnota.



**Obrázek 23** – Simulace s nerovnoměrným prostorovým nábojem

Další možností simulace je vytvořit okolo vodiče ještě jeden prstenec s nižší hustotou prostorového náboje. Pro simulaci se bude uvažovat tento prstenec 1 mm široký a s polovičním nábojem oproti předchozímu prstenci.

Hodnotu náboje  $324,7 \text{ nC}$  vydělíme dvěma na hodnotu  $162,35 \text{ nC}$ . Dále je třeba zjistit plochu nového prstence podle vzorce (19). Hodnota této plochy je  $0,000185354 \text{ m}^2$ . Velikost prostorového náboje je po vydělení  $8,7589 \cdot 10^{-4} \text{ C/m}^3$ .

#### 7.1.4 Porovnání výsledků

Při pohledu na elektrické pole těsně u vodiče je zřejmé, že přidáním prostorového náboje se zvýší celkové množství náboje v oblasti vodiče. Tento prstenec však zajistí zmenšení nejvyšší dosažené intenzity elektrického pole. Bez něho byl veškerý náboj na

povrchu vodiče a jeho přidáním se tento ostrý přechod zmírní. Ovšem při zpětném pohledu na náboj na vodiči je patrné, že jeho hodnota poklesla přibližně o hodnotu prostorového náboje.

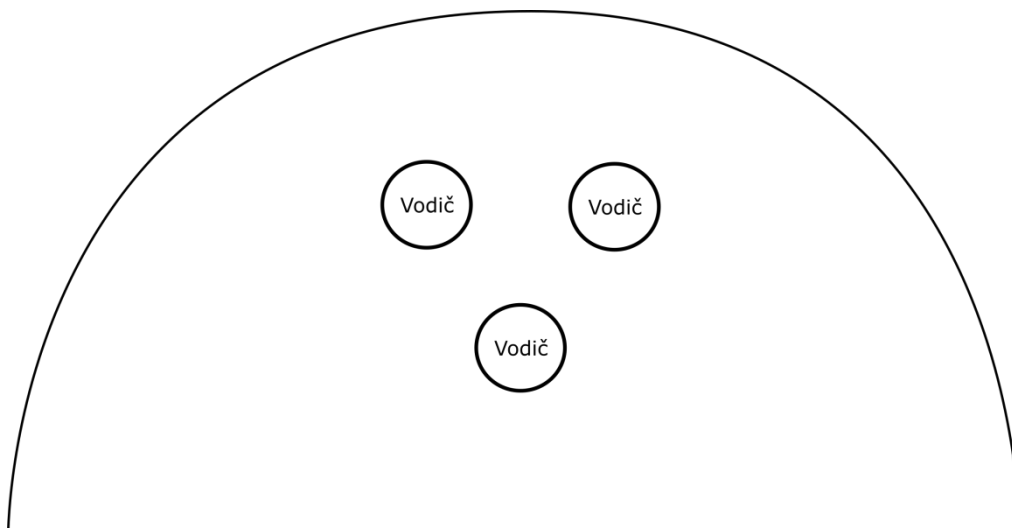
Elektrické pole ve větší vzdálenosti od vodiče se nějak výrazně nemění, což je způsobeno výše zmíněným jevem, kdy se hodnota náboje z vodiče pouze přesunula do prstence s prostorovým nábojem, který má tloušťku 2,5 mm, což je z pohledu místa vzdáleného 8,2 m od vodiče zanedbatelná vzdálenost. Ovšem při zavedení rovnoměrného prostorového náboje došlo ve vzdálenosti 1 m od vodiče ke zvýšení z 0,6124 MV/m na 0,6127 MV/m. Rozdělením prstence s prostorovým nábojem se intenzita v tomto bodě vrátila na hodnotu původní. Celkový náboj zůstal sice stejný jako při rovnoměrném prostorovém náboji, ale pole se v dolní oblasti vodiče zploštilo z důvodu přesunutí náboje z horní oblasti.

## 7.2 Svazkový vodič

Pro následující simulace budou vodiče uspořádány v trojsvazku ve výšce 10 m nad zemí. Trojsvazek bude orientován podle obrázku (Obrázek 24), tedy jeden vodič blíže zemi a dva vzdáleněji. Vzdálenost mezi jednotlivými vodiči bude 40 cm, vodiče mají průměr 1,53 cm a jsou pod napětím 400 kV stejnosměrných.

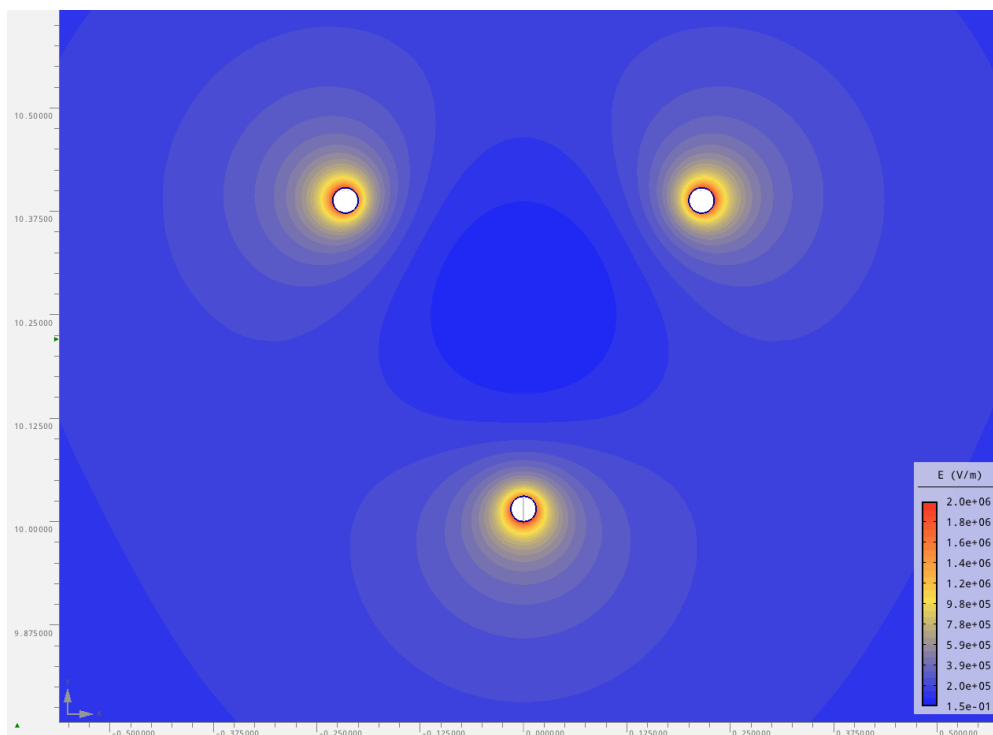
### 7.2.1 Bez prostorového náboje

Zavádění HVDC probíhá hlavně z důvodu nárůstu výkonu na stávajícím vedení bez jakéhokoliv zásahu. Proto jsou reálná vedení v trojsvazku. Z toho důvodu bude v následujícím kroku uvažován namísto jednoduchého vodiče vedení trojsvazkem, nejprve však pouze jeden svazkový vodič nad zemí.



Obrázek 24 - Náskres úlohy s trojsvazkovým vodičem

Simulace se provede pro již výše zmíněné parametry, tedy průměr vodiče 1,53 cm se vzdáleností od sebe 40 cm. Z této simulace je vidět, že intenzita nepřekročí nikde hodnotu 2 MV/m, tedy za běžných podmínek nevznikne koróna. Takto by tomu bylo pouze v případě jednopólového uspořádání. Ovšem jedna linka vedení je tvořena třemi vodiči, nabízí se spíše možnost trojpólového uspořádání, tedy vedení kladného, záporného a středního vodiče.

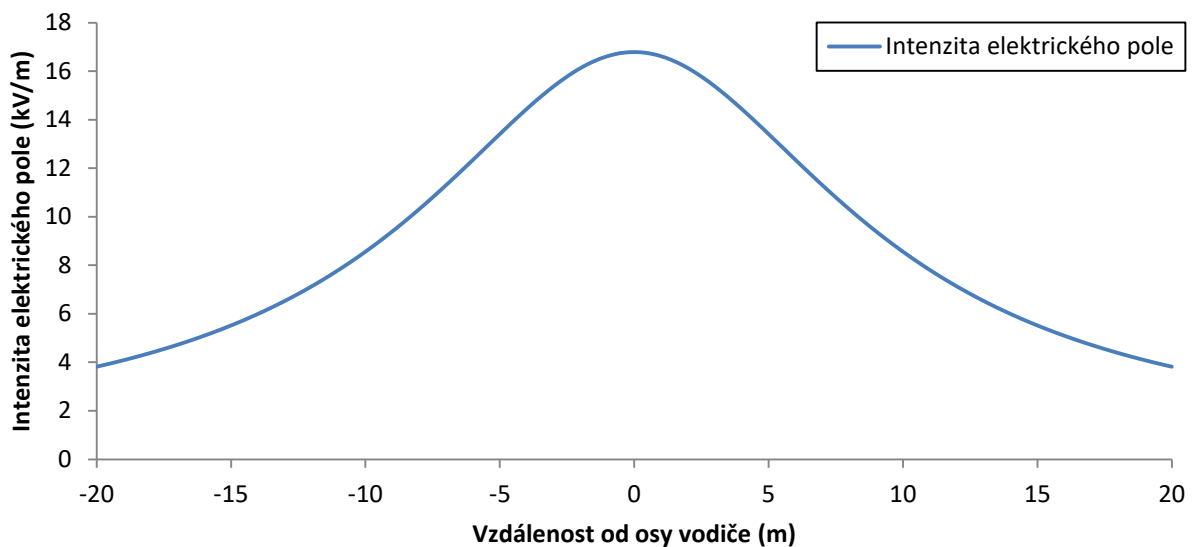


Obrázek 25 - Intenzita elektrického pole v okolí trojsvazku



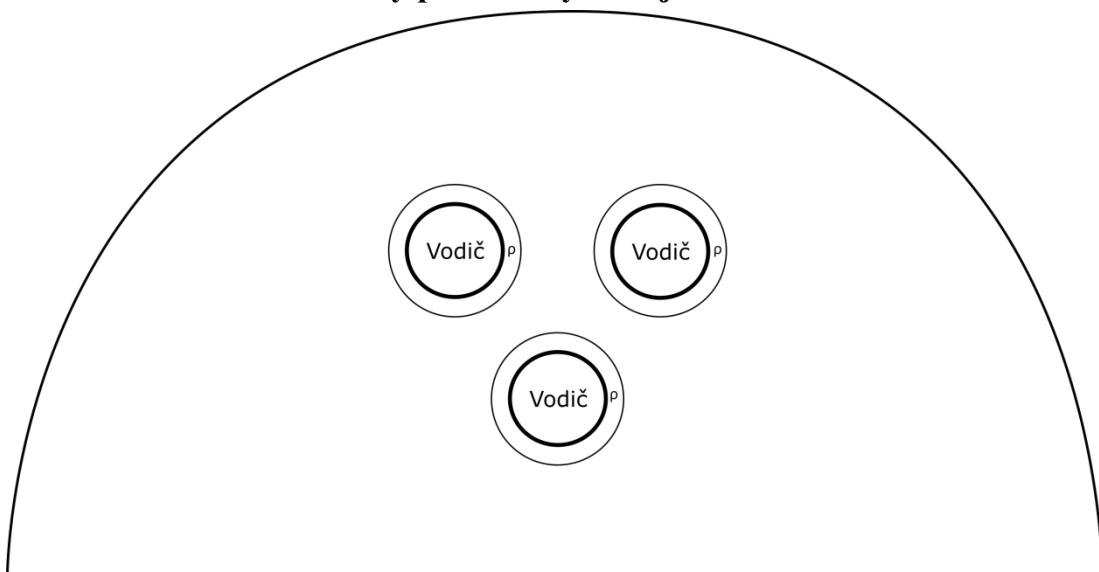
Jelikož na vodič působí mnoho faktorů a není nikdy geometricky dokonalý, bude se uvažovat zhoršení klimatických podmínek a tím i snížení elektrické pevnosti vzduchu na hodnotu 1,6 MV/m. Je zřejmé, že intenzita není po obvodu vodiče rovnoměrná. Proto se odečte několik vzdáleností po obvodu a následně provede jejich zprůměrování. Tím se dojde k hodnotě 1,7 mm.

Další věc, kterou lze sledovat, je intenzita ve výšce 1,8 m nad zemí, kde hygienické normy uvádějí, že by neměla překročit hodnotu 5 kV/m pro obyvatelstvo a 10 kV/m pro profesionální pracovníky. Ovšem z níže uvedeného grafu lze vidět, že intenzita je překročena pro obě skupiny. [15]



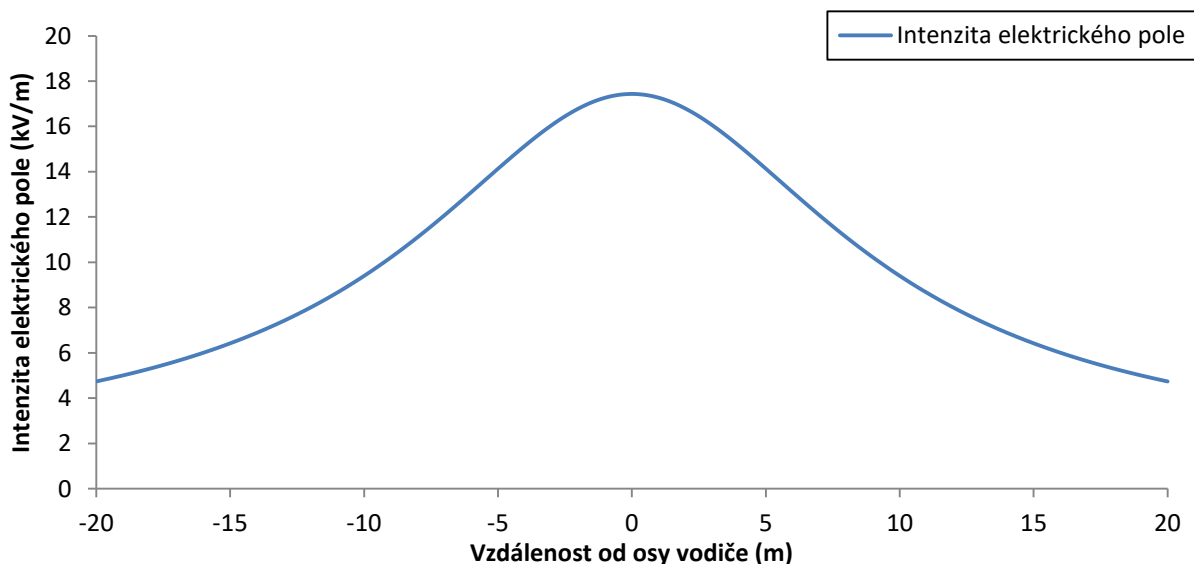
Obrázek 26 - Graf průběhu intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m pod trojsvazkem

## 7.2.2 Rovnoměrně rozložený prostorový náboj

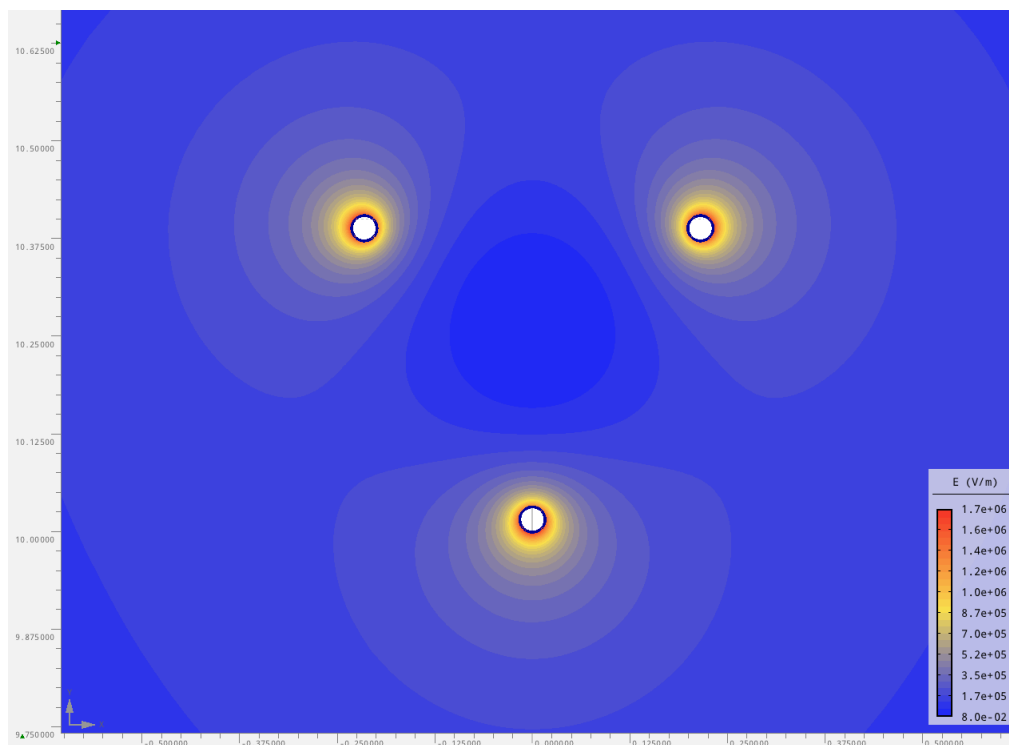


Obrázek 27 - Nákres úlohy pro trojsvazek s rovnoměrným prostorovým nábojem

Okolo vodičů se tedy vytvoří prstence ve vzdálenosti 1,7mm od vodiče a umístí se do nich náboj, který bude roven třetině z deseti procent součtu nábojů na povrchu vodičů. Tento náboj je z předešlé simulace roven  $4,397 \mu\text{C}$  a 10 % z něj je rovno  $0,4397 \mu\text{C}$ . Na jeden vodič připadá  $0,146567 \mu\text{C}$ , což při ploše prstence  $1,725 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$  dává hodnotu  $849,661836 \mu\text{C}/\text{m}^3$ .



Obrázek 28 - Graf průběhu intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m nad zemí pod trojsvazkem s rovnoměrným prostorovým nábojem

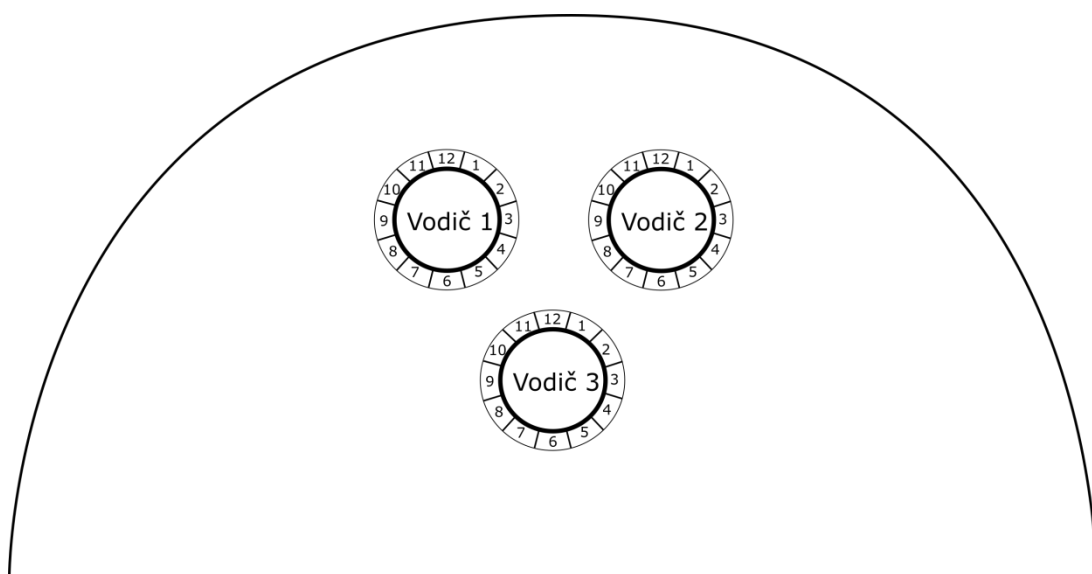


Obrázek 29 – Rovnoměrný prostorový náboj v okolí trojsvazkového vodiče

Ze simulace následně vyplýne, že zavedený rovnoměrný prostorový náboj maximální intenzitu elektrického pole snížil podobně jako u jednoduchého vodiče z důvodu rozložení náboje do větší oblasti a tím i zmírnění přechodů mezi prostředními s různým nábojem.

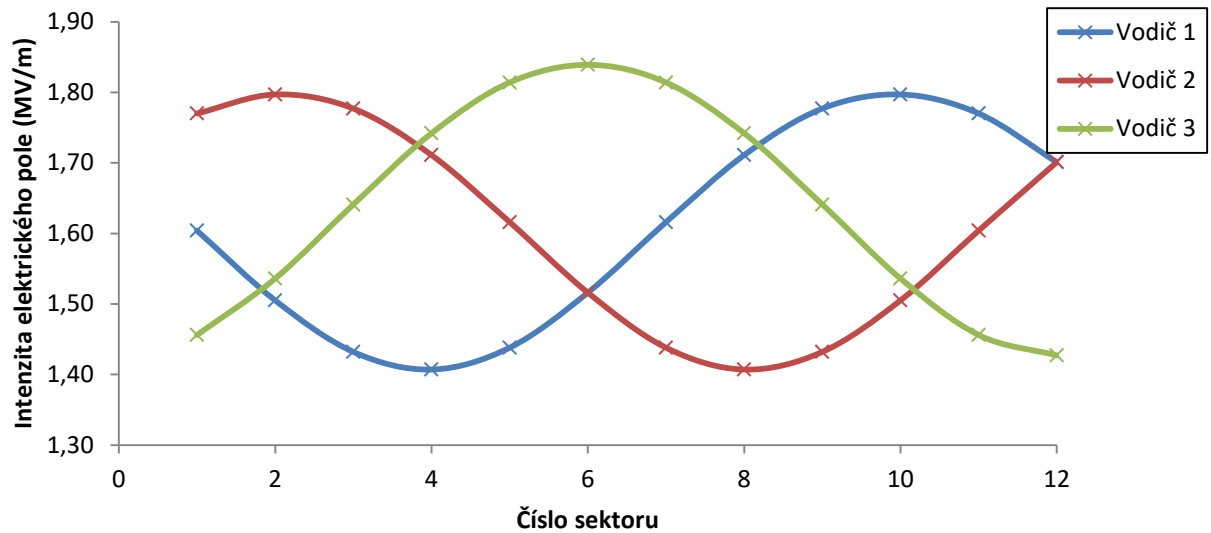
### 7.2.3 Nerovnoměrně rozložený prostorový náboj

Protože rozložení intenzity elektrického pole je u trojsvazku ještě méně rovnoměrné než u jednoduchého vodiče, provede se následně také rozdělení korónového prstence na 12 dílů.



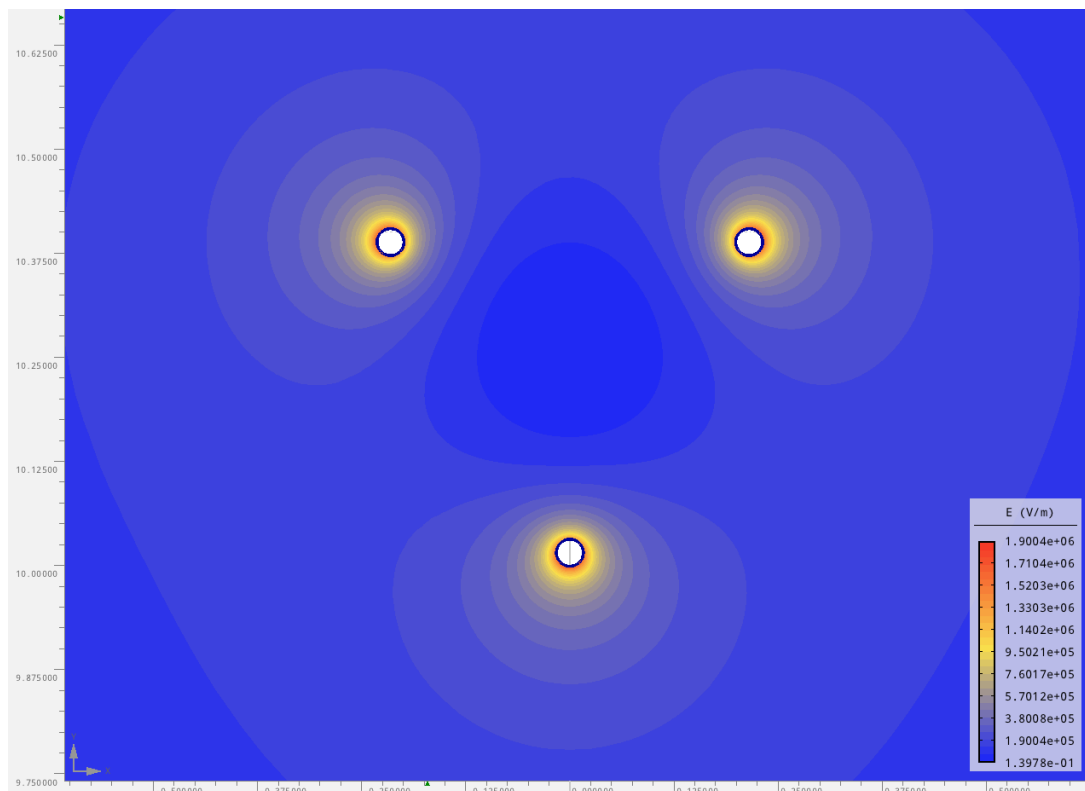
**Obrázek 30** - Nákres úlohy pro trojsvazek s nerovnoměrně rozloženým prostorovým nábojem

Pro výpočet náboje v jednotlivých oblastech bude uvažováno vždy 10 % náboje na konkrétním vodiči a tento se náboj rozdělí v poměru intenzit v okolí každého vodiče, měřených 1 mm nad povrchem. Plocha prstence bude pro všechny vodiče stejná a to jako v případě rovnoměrně rozložené koróny  $1,725 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Hodnota náboje na prvním vodiči je  $1,45 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , což odpovídá prostorovému náboji na jednu dvanáctinu prstence  $7,01 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^3$ .



Obrázek 31 - Graf rozložení intenzit elektrického pole na jednotlivých vodičích

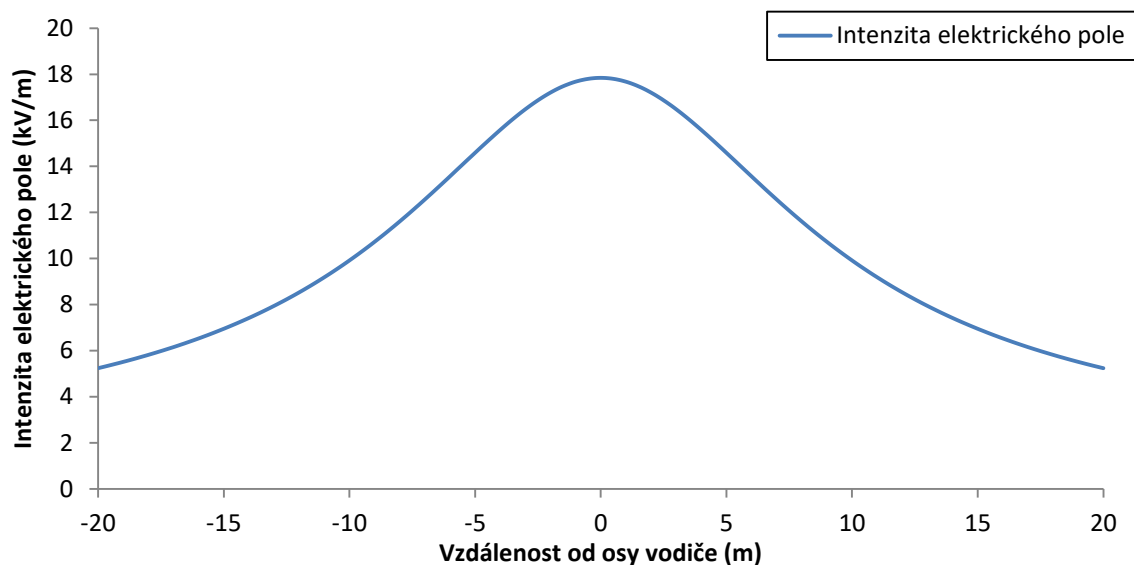
Z obrázku (Obrázek 31) je vidět, že maxima intenzit jsou mezi vodiči posunuty o  $120^\circ$ , což odpovídá i jejich rozmístění v prostoru. Dále je patrné, že okolo obou horních vodičů je intenzita nejnižší, protože je větší jejich vzdálenost od země.



Obrázek 32 – Nerovnoměrný prostorový náboj v okolí trojsvazkového vodiče

Co se týče intenzity elektrického pole v okolí vodičů s nerovnoměrným prostorovým nábojem, je vidět, že oproti rovnoměrně rozloženému prostorovému náboji je

citelně vyšší. Maximum dosahuje 1,8834 MV/m. Ve výšce 1,8 m nad zemí však rozdíl téměř nelze pozorovat.



**Obrázek 33** - Graf průběhu intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m nad zemí pod trojsvazkem s nerovnoměrným prostorovým nábojem

Zde se však lze podívat, jak se celkový náboj systému přerozdělil mezi oblast prostorového náboje a na náboj na samotném vodiči. Hodnoty nábojů je třeba odečíst nejprve ze simulace bez uvažování prostorového náboje a poté ze simulací s uvažováním rovnoměrného a nerovnoměrného prostorového náboje v okolí trojsvazku. Odečtené údaje jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 1** - Přerozdělování náboje na trojsvazku při zavedení prostorového náboje

	Bez uvažování PN	S rovnoměrně rozloženým PN	S nerovnoměrně rozloženým PN
Náboj na vodiči	4,397 $\mu\text{C}$	3,833 $\mu\text{C}$	4,235 $\mu\text{C}$
Náboj v okolí vodiče	0 C	0,4397 $\mu\text{C}$	0,4397 $\mu\text{C}$
Suma	4,397 $\mu\text{C}$	4,2727 $\mu\text{C}$	4,6747 $\mu\text{C}$

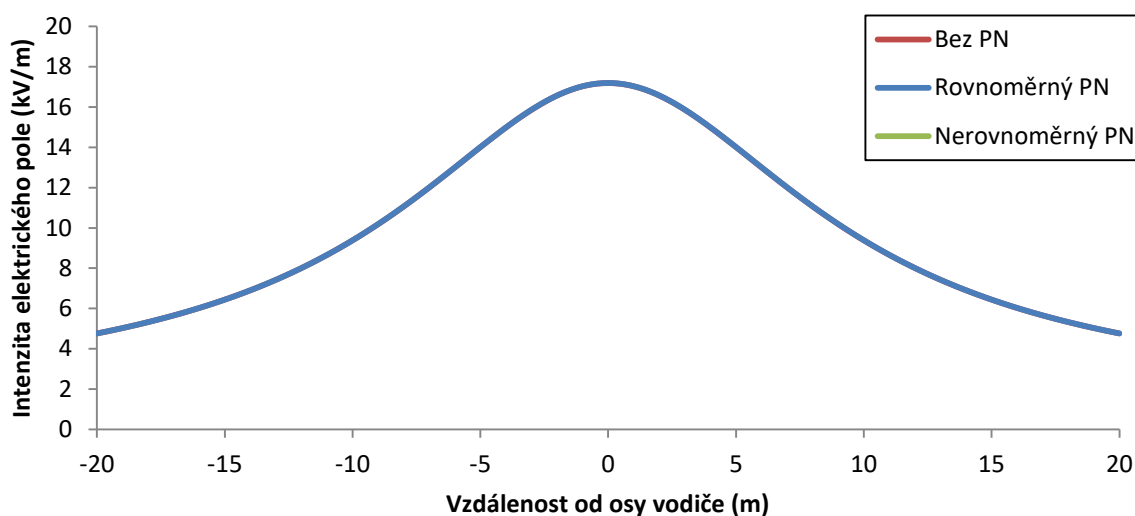
Z následující tabulky je patrné, že při zavedení prostorového náboje se náboj na vodiči sníží. Celkové množství náboje u nerovnoměrně rozloženého prostorového náboje nepatrně vzroste. U rovnoměrně rozloženého prostorového náboje celková hodnota náboje nepatrně poklesne.

#### 7.2.4 Porovnání výsledků

U trojsvazku je vidět, že ovlivnění intenzity elektrického pole je na povrchu vodiče při uvažování rovnoměrně rozloženého prostorového náboje značné, ovšem při zavedení nerovnoměrně rozloženého prostorového náboje již nehraje velký vliv, a to proto, že se

začne respektovat jeho reálné rozložení. U vodičů v trojsvazku je totiž rozdíl mezi hodnotami intenzity elektrického pole po obvodu větší než u jednoduchého vodiče. Nerozdělením prstence s prostorovým nábojem se toto pole chybně stává rovnoměrným.

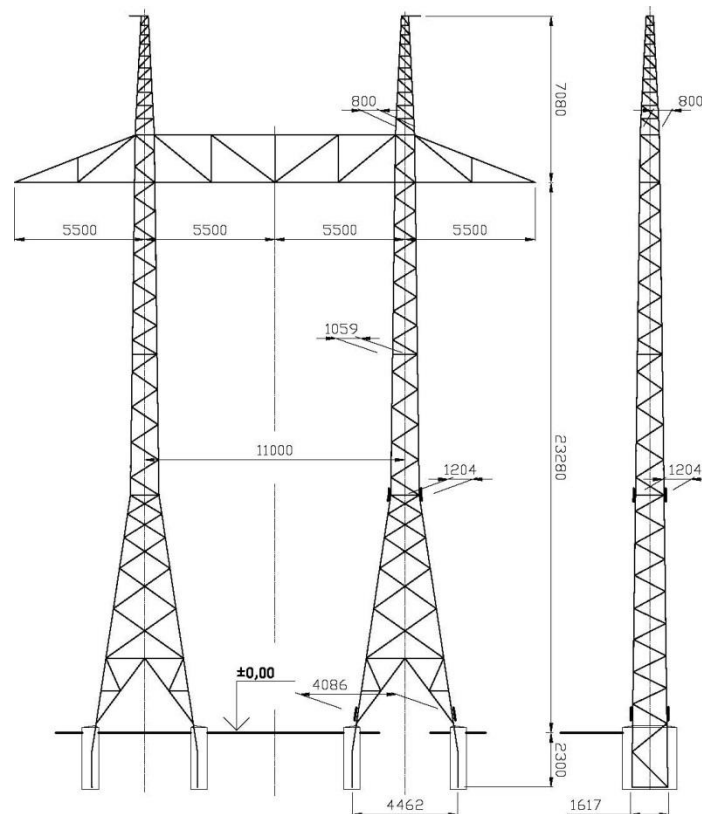
Při pohledu na rozložení elektrického pole nad zemí zavedení prostorového náboje nemá významný vliv, což je vidět z obrázku (Obrázek 34), kde se jednotlivé grafy překrývají. To je opět způsobeno přemístěním části náboje z vodiče do prstence s prostorovým nábojem, kde ovšem tato změna rozměrů je vůči 8,2 m zanedbatelná. Z toho plyne, že uvažovat korónu z hlediska hygienických norem není zapotřebí. Opět může být tento vliv jiný při třípólovém uspořádání.



Obrázek 34 - Graf porovnání průběhů intenzity elektrického pole ve výšce 1,8 m nad zemí pro různé varianty

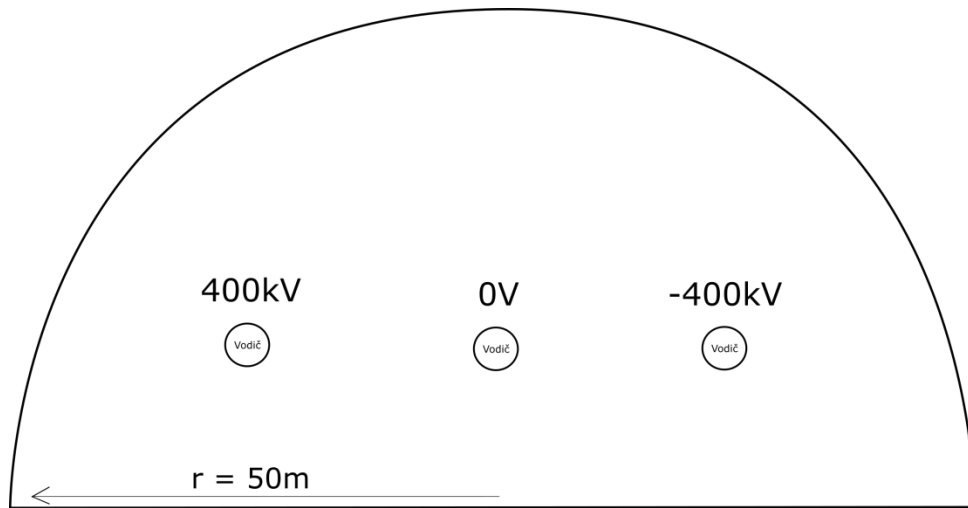
### 7.3 Trojpólové uspořádání

HVDC vedení se v dnešní době často využívá jako možnost navýšení maximálního výkonu bez změny konfigurace vedení. Při zrušení střídavé linky jsou k dispozici 3 vodiče, proto se jeví nejlogičtější použití dvoupólového uspořádání s nulovým vodičem. Nákres uvažovaného stožáru typ Portál je na obrázku (Obrázek 35) nebo (Obrázek 47).

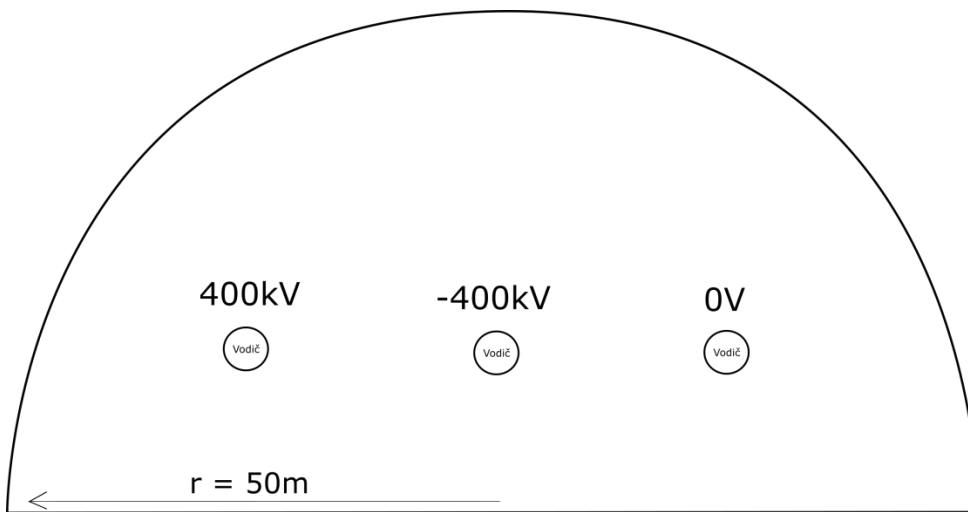


Obrázek 35 - Portálový stožár

Výsledky v kapitole 7.2 ukázaly, že umístěním prostorového náboje do okolí vodiče dochází k přerozdělení náboje v systému. Tento jev bude v následujících simulacích dále sledován. U trojpólového uspořádání lze očekávat i vzájemné ovlivňování mezi jednotlivými vodiči, které je způsobené kapacitními vazbami mezi nimi [16]. Tyto vazby způsobují indukované náboje mezi vodiči a podílejí se tak na celkovém přerozdělení náboje v systému. Jelikož jsou vzdálenosti parciálních vodičů svazkového vodiče výrazně nižší než vzdálenost k vedlejšímu svazkovému vodiči, je pro jednoduchost úloha řešena pro jednoduché vodiče podle parametrů v kapitole 7.1. Jelikož jsou k dispozici tři vodiče, nabízí se celkem 6 možností konfigurace, kde ovšem pouze dvě poskytují odlišné výsledky. Zbývající konfigurace zbylé pouze jejich modifikace vzniklé cyklickou záměnou. Pro další zkoumání budou uvažovány 2 varianty znázorněné na obrázku (Obrázek 36) a (Obrázek 37). Protože se geometrická konfigurace výrazně změnila oproti jednopólovým uspořádáním, je třeba znovu provést test konvergence. Ten z důvodu nedostatku výpočetního výkonu nelze provádět pro větší zjemnění sítě a vyšší řád polynomu. Jediné, co lze měnit, je velikost výpočetní oblasti. Z několika výpočtů vyplynulo, že postačí poloměr 50 m. Podrobněji je test konvergence uveden v příloze na obrázku (Obrázek 48).



Obrázek 36 - Třípólové uspořádání var. 1



Obrázek 37 - Třípólové uspořádání var. 2

### 7.3.1 Bez vlivu prostorového náboje

V následující části se provede simulace bez vlivu prostorového náboje pro obě varianty konfigurací. V nich se bude odečítat hodnota náboje v jednotlivých sektorech vodičů a zapisovat do tabulky pro možné porovnání.

Tabulka 2 - Rozložení náboje na vodičích při variantě 1

Sektory	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Řád
Náboj +	2,95	2,93	2,97	2,94	2,95	2,96	2,94	2,93	2,97	2,93	2,93	2,96	$10^{-7}$
Náboj N	1,25	2,16	2,49	2,16	1,25	2,68	-1,25	-2,16	-2,49	-2,16	-1,25	2,35	$10^{-9}$
Náboj -	-2,93	-2,93	-2,97	-2,93	-2,94	-2,96	-2,95	-2,94	-2,97	-2,93	-2,95	-2,96	$10^{-7}$

Tabulka 3 - Rozložení náboje na vodičích při variantě 2

Sektory	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Řád
Náboj +	3,18	3,17	3,21	3,17	3,18	3,19	3,15	3,15	3,18	3,15	3,15	3,18	$10^{-7}$
Náboj -	-3,21	-3,20	-3,20	-3,20	-3,21	-3,22	-3,22	-3,22	-3,23	-3,22	-3,22	-3,21	$10^{-7}$
Náboj N	2,21	2,17	2,18	2,15	2,18	2,24	2,28	2,31	2,36	2,33	2,32	2,28	$10^{-8}$

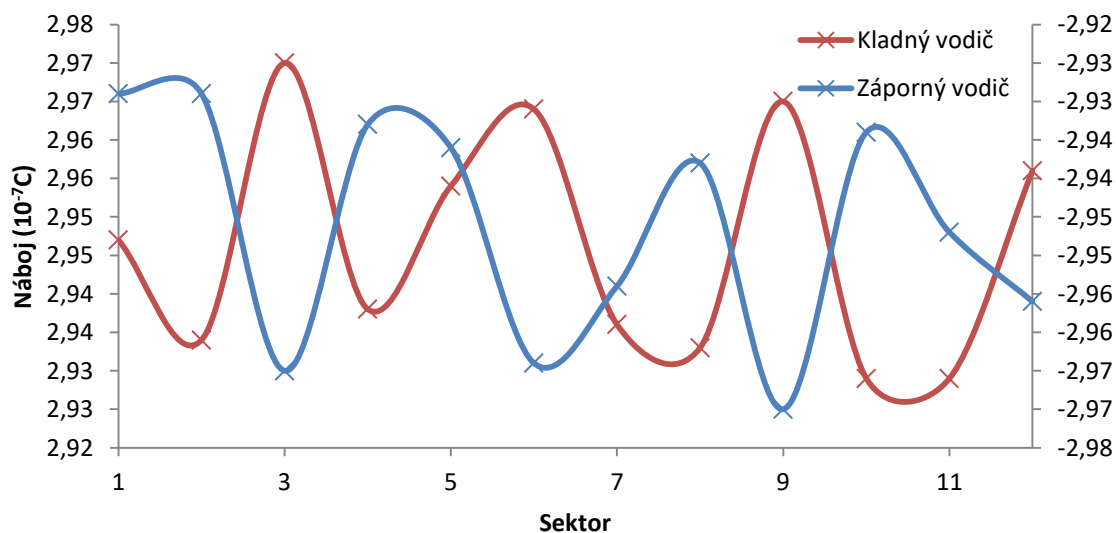


Ze získaných výsledků výpočtů je vidět, že množství náboje na vodiči při variantě 2 je vyšší než u varianty 1. To znamená i vyšší hodnotu normálové složky intenzity elektrického pole vůči povrchu vodiče podle vzorce:

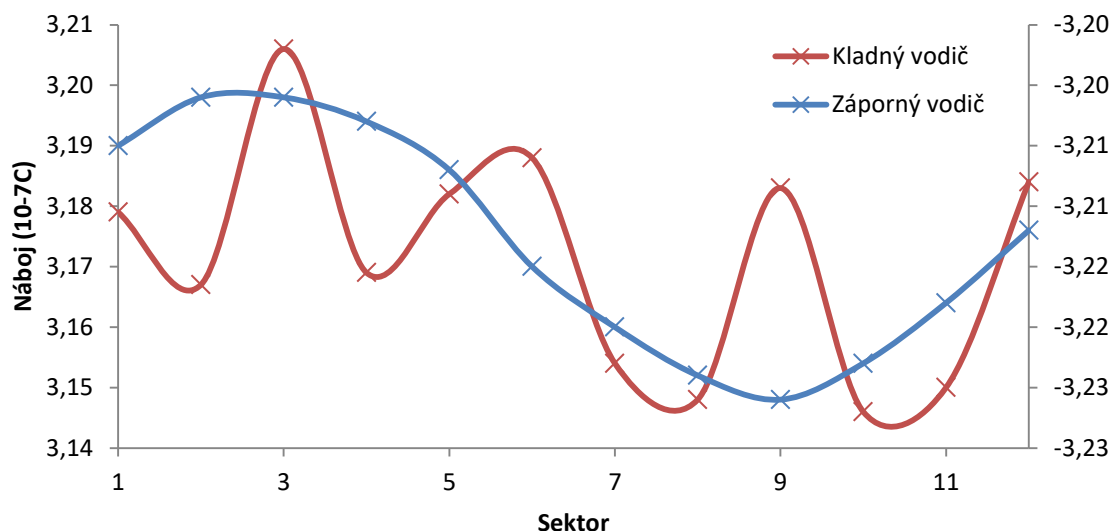
$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Q}{\varepsilon * S} \quad (17)$$

kde S je odpovídající plocha povrchu vodiče, která při vztažené délce vodiče na 1m odpovídá jedné dvanáctině obvodu vodiče.

Tento fakt značí, že u varianty 2 bude vyšší pravděpodobnost vzniku koróny. Zároveň je možné vidět, že na nulovém vodiči je hodnota náboje oproti napět'ovým vodičům řádově menší. Dle očekávání je dosahovaná intenzita elektrického pole u nulového vodiče výrazně nižší, a tak i pravděpodobnost vzniku koróny. Také je vidět, že nejvyšší hodnota náboje, tedy i intenzity na povrchu vodiče, už není jako u jednoho vodiče ve spodní části, ale v části směřující k protějšnému vodiči. Tento jev je u varianty 2 pochopitelně větší. Rozložení náboje po obvodu vodiče je znázorněno následujícím grafem (Obrázek 38).



Obrázek 38 - Rozložení náboje v okolí živých vodičů při variantě 1

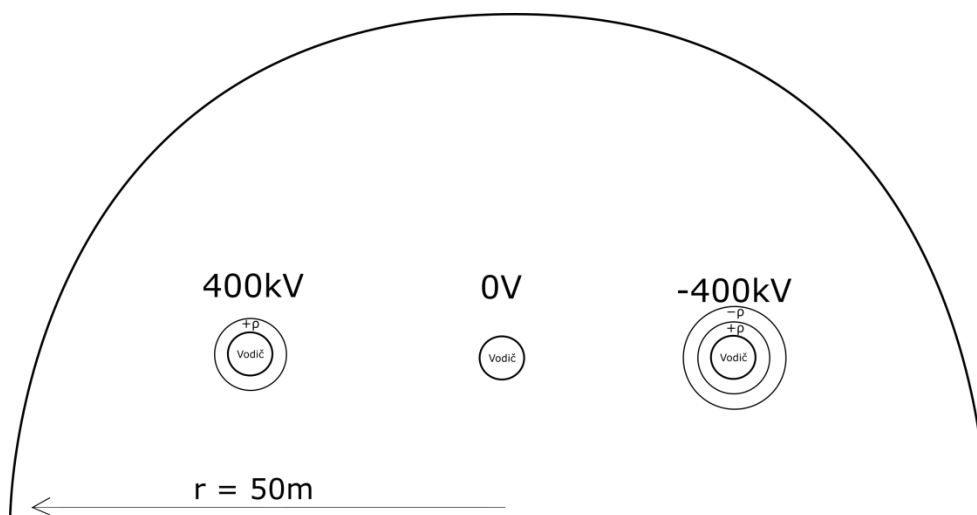


Obrázek 39 - Rozložení náboje v okolí živých vodičů při variantě 2

Z těchto průběhů je vidět, že rozložení je poměrně chaotické. Výjimkou je záporný vodič u varianty 2, který se nachází mezi kladným a nulovým. Tam se průběh blíží funkci sinus, jako při výpočtech s jedním vodičem. Celkově však změna náboje není tak značná.

### 7.3.2 Rovnoměrně rozložený prostorový náboj

V této části se již bude zkoumat, jak se přerozdělí náboj při zavedení prozatím rovnoměrně rozloženého náboje v okolí vodiče. Jako elektrickou pevnost vzduchu budeme uvažovat hodnotu 2MV/m, tedy zhoršené klimatické podmínky. Při analýze simulace je patrné, že prstenec s prostorovým nábojem bude široký 4mm. Jako hodnotu náboje opět zvolíme 10 % náboje na vodiči, což je  $3,536 \cdot 10^{-7}$  C na kladném vodiči a  $-3,536 \cdot 10^{-7}$  C na vodiči záporném. Plocha prstence je podle vzorce (16) rovna  $7,16 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>, což odpovídá hodnotě prostorového náboje  $4,94 \cdot 10^{-4}$  C/m<sup>3</sup>. U záporného vodiče budeme ale uvažovat prstence dva, kde blíže k vodiči bude kladný prostorový náboj a dále prostorový náboj záporný, což respektuje obrázek (Obrázek 9). Toto je pro variantu 1 znázorněno na obrázku (Obrázek 40).



Obrázek 40 - Rovnoměrné rozložení náboje varianta 1

Rozdíl hodnoty nábojů je uveden v následující tabulce, kde jsou veškeré hodnoty v coulombech (C):

Tabulka 4 - Přerozdělování nábojů při uvažování rovnoměrně rozprostřeného PN var. 1

	+400kV	-400kV
<b>Náboj vodiče bez PN</b>	3,540.10-6	-3,540.10-6
<b>Náboj vodiče s PN</b>	3,183.10-6	-3,549.10-6
<b>Hodnota kladného PN</b>	3,540.10-7	-3,540.10-7
<b>Hodnota záporného PN</b>	0	3,540.10-7
<b>Suma s PN</b>	<b>3,537.10-6</b>	<b>-3,549.10-6</b>

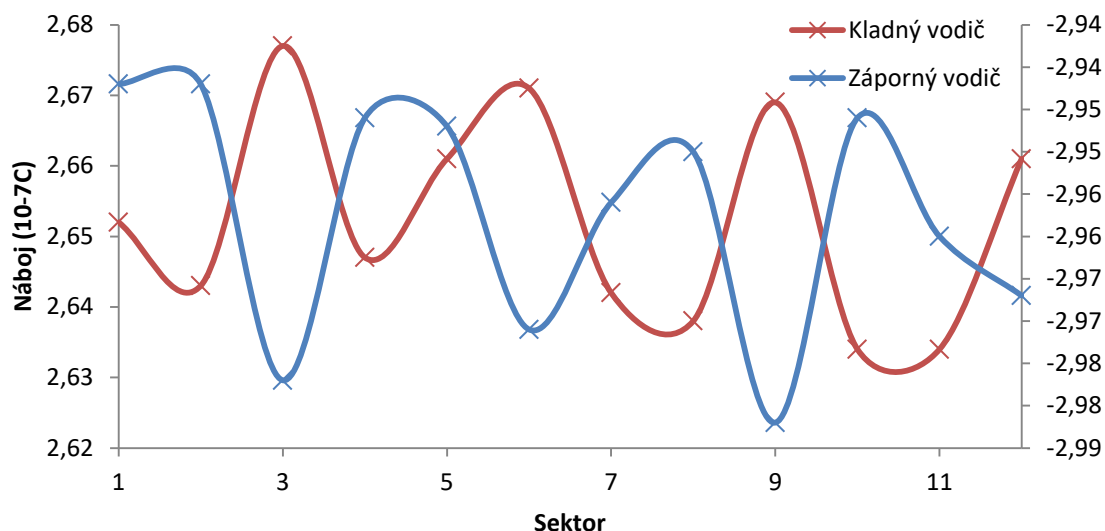
Z této tabulky je patrné, že hodnota náboje, který byl přidán do oblasti okolo vodiče, je při zanedbání nepatrných odchylek stejná jako hodnota, o kterou poklesne náboj na vodiči. To dokazuje platnost vzorce (18), protože kapacita (tedy geometrické uspořádání) a napětí se nemění.

$$Q = C * U \quad (18)$$

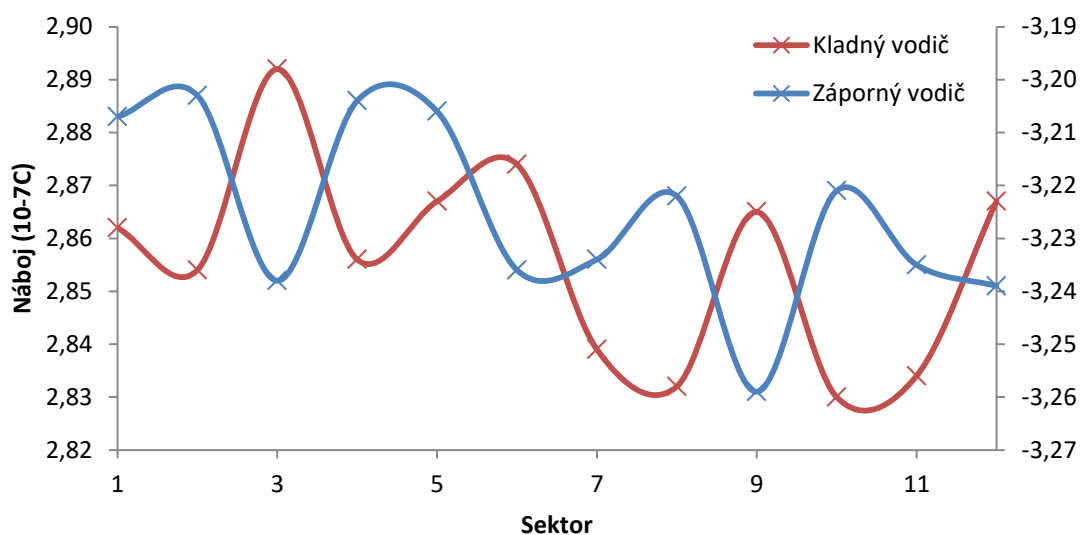
Tabulka 5 - Přerozdělování nábojů při uvažování rovnoměrně rozprostřeného PN var. 2

	+400kV	-400kV
<b>Náboj vodiče bez PN</b>	3,806.10-6	-3,856.10-6
<b>Náboj vodiče s PN</b>	3,427.10-6	-3,870.10-6
<b>Hodnota kladného PN</b>	3,806.10-7	-3,856.10-7
<b>Hodnota záporného PN</b>	0	3,856.10-7
<b>Suma s PN</b>	<b>3,808.10-6</b>	<b>-3,870.10-6</b>

U varianty 2 můžeme vidět úplně stejný jev jako u varianty 1. Vzorec (18) tedy platí i pro toto geometrické uspořádání.



Obrázek 41 - Rozložení náboje při rovnoměrně rozloženém PN varianta 1



Obrázek 42 - Rozložení náboje při rovnoměrně rozloženém PN varianta 2

Při pohledu na rozložení náboje po obvodu vodiče je patrné, že u varianty 1 nedošlo k téměř žádné změně. Zato u varianty 2 je znát, že zavedením prostorového náboje došlo k výrazné změně u záporného vodiče. Nyní totiž není respektováno reálné rozložení.

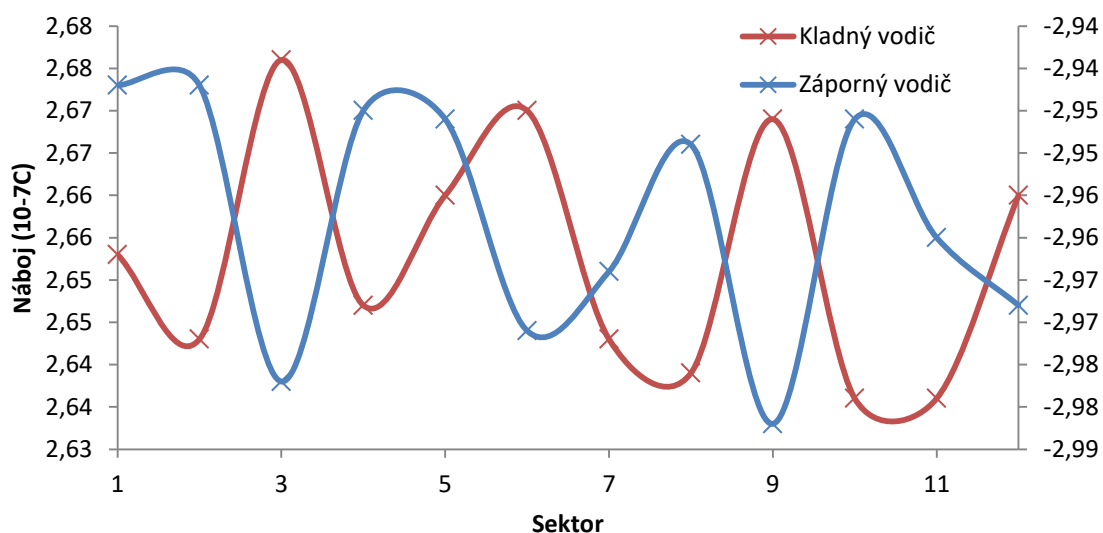
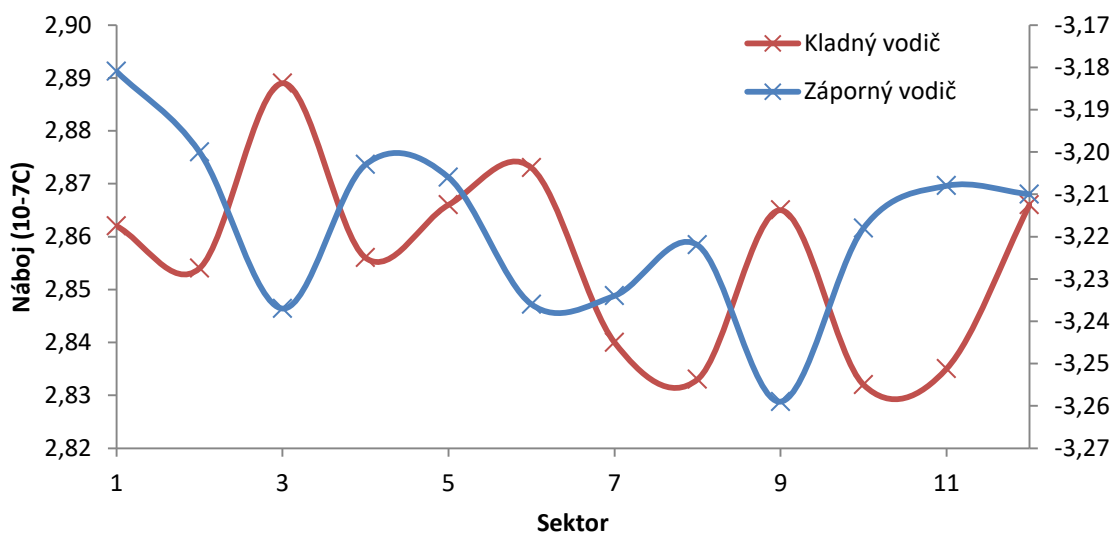
### 7.3.3 Nerovnoměrně rozložený prostorový náboj

Předchozí postup se aplikuje i na model s nerovnoměrně rozloženým prostorovým nábojem, kde se prstec rozdělí na 12 dílů a každému připadne 10 % náboje na vodiči v tomto sektoru. Tento model lépe respektuje reálné rozložení tohoto náboje a nebude ho fiktivně homogenizovat.

**Tabulka 6** - Přerozdělování nábojů při uvažování nerovnoměrně rozprostřeného PN var. 1

	+400kV	-400kV
<b>Náboj vodiče bez PN</b>	3,540.10-6	-3,540.10-6
<b>Náboj vodiče s PN</b>	3,183.10-6	-3,549.10-6
<b>Hodnota kladného PN</b>	3,540.10-7	-3,540.10-7
<b>Hodnota záporného PN</b>	0	3,540.10-7
<b>Suma s PN</b>	<b>3,537.10-6</b>	<b>-3,549.10-6</b>

Z výše uvedené tabulky je patrné, že na přerozdělování celkového náboje na vodiči nemá nerovnoměrné rozložení prostorového náboje vliv, jelikož jsou odečtená čísla stejná jako u vodiče s rovnoměrně rozloženým prostorovým nábojem. Stejná situace je i u druhé varianty. Pro zajímavost se lze podívat, jak se změnilo pole po obvodu vodiče.

**Obrázek 43** - Rozložení náboje při nerovnoměrně rozloženém PN varianta 1**Obrázek 44** - Rozložení náboje při nerovnoměrně rozloženém PN varianta 2

Zde je vidět, že pole se ani tak výrazně nezměnilo. Jen záporný vodič u druhé varianty nemá takové rozdíly, jako u rovnoměrně rozloženého prostorového náboje, ale tvar zůstává přibližně stejný.

### 7.3.4 Porovnání výsledků

Z těchto simulací je patrné, že náboj se na vodiči skutečně přerozděluje, což odůvodňuje, proč se pole daleko pod svazkovým vodičem téměř neměnilo při přidání prostorového náboje. U záporného vodiče se celkový náboj na vodiči nezmění vůbec z důvodu přidání prostorového náboje obou polarit a stejné hodnoty. Dále tyto výsledky ukazují, že pole v okolí vodiče už nemá jednoznačný a předvídatelný průběh. To je zapříčiněno tím, že se zde projevují kapacitní vazby nejen mezi vodičem a zemí, ale také mezi jednotlivými vodiči.

## 8 Závěr

Na začátku práce byly uvedeny počátky stejnosměrné elektrické energie a její důležitý vliv na další zkoumání tohoto fyzikálního jevu, ale také na elektrifikaci planety. Také byly uvedeny výhody střídavého přenosu energie, kvůli kterým byl stejnosměrný proud v oblasti energetiky vytlačen pouze do elektrické trakce. Co se týče HVDC vedení, byly uvedeny možné způsoby konfigurace této sítě, její výhody a parametry.

Hlavní část této práce je věnována analýze elektrického pole, která byla prováděna simulací v programu Agros2D. Motivací bylo do těchto výpočtů zahrnout korónu, která se v okolí vodičů vyskytuje. Po zavedení zjednodušujících předpokladů popsaných v kapitole 7 byla koróna ve výpočtech respektována pomocí statického prostorového náboje, který je rozložen v prstenci v blízkosti samotného vodiče. Pro získání základní informace o chování výpočetního modelu byla simulace nejprve provedena pro jednoduchý vodič. Pro vodič bez prostorového náboje byl proveden analytický výpočet, který sloužil také pro ověření korektnosti výsledků ze simulačního programu. Výsledky výpočtů elektrického pole byly porovnávány pro varianty bez prostorového náboje a následně s rovnoměrně a nerovnoměrně rozloženým prostorovým nábojem. Bylo zjištěno, že zavedením prostorového náboje se intenzita v těsné blízkosti vodiče nepatrně zmenšila z důvodu rozložení náboje do větší plochy. Ve větší vzdálenosti od vodiče byla změna hodnot intenzity elektrického pole pouze minimální.

U trojsvazku probíhaly výpočty analogicky jako u jednoduchého vodiče. Z výsledků výpočtů vyplynulo, že zavedením rovnoměrně rozloženého prostorového náboje se do výpočtu vnáší chyba. U vodičů v trojsvazku je totiž rozdíl mezi hodnotami intenzity elektrického pole po obvodu větší než u jednoduchého vodiče. Nerozdělením korónového prstence se toto pole ale chybně stává rovnoměrným. Při pohledu na pole dále od vodiče, přesněji 1,8m nad zemí, lze pozorovat, že na tuto vzdálenost nemá vložený prostorový náboj vliv. Dochází zde k procesu přerozdělování nábojů mezi vodič a jeho okolí, celková hodnota náboje se v oblasti vodiče totiž téměř nezměnila.

U třípólového uspořádání se zaměřila pozornost hlavně na jev přerozdělování nábojů, který se projevil v předchozích úlohách. Sledován byl rozdíl mezi dvěma možnými

variantami uspořádání vodičů. Z výsledků simulace pro vodiče bez prostorového náboje už bylo možné určit, které uspořádání je lepší z důvodu minimalizace pravděpodobnosti vzniku koróny. Dále bylo možné pozorovat projevy kapacity nejen mezi vodičem a zemí, ale také vzájemných kapacit mezi vodiči. Z důvodu těchto kapacit bylo značně ovlivněno rozložení náboje po obvodu vodiče. Rozdíly v rozložení náboje na vodiči z důvodu typů uspořádání prostorového náboje nebyly nijak značné, a to z důvodu, že ani rozdíly v rozložení u základní varianty nebyly nijak velké jako třeba u trojsvazku. Co se týče přerozdělování nábojů, tak bylo dokázáno, že náboj, který se umístí do oblasti okolo vodiče, způsobí snížení náboje na vodiči o přibližně stejnou hodnotu.

Vyhodnocování nábojů na povrchu jednotlivých vodičů tak může být efektivním nástrojem pro posuzování optimální konfigurace vodičů HVDC linek i pro složitější stožárové konstrukce a vícenásobná vedení. Kritériem této analýzy je rovnoměrnost rozložení celkových nábojů na jednotlivé vodiče a jejich rozložení podél povrchu, které je vlivem kapacitních vazeb k ostatním vodičům a zemi nerovnoměrné. Cílem této analýzy by měla být minimalizace pravděpodobnosti vzniku koróny.



## 9 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Majling, Eduard.** HVDC - stejnosměrný přenos elektrické energie. *O energetice*. [Online] [Citace: 26. 9 2017.] <http://oenergetice.cz/technologie/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie/>.
- [2] **Pavlíček, Jiří.** Elektrická trakce - Úvod do elektrické trakce. *EDUCON*. [Online] 2005. [Citace: 3. 10 2017.] <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015013101>.
- [3] Technologie. *Škoda Transportation a.s.* [Online] [Citace: 3. 10 2017.] <https://www.skoda.cz/technologie/>.
- [4] PT - 50 years HVDC Part one. [Online] 4 2003. [Citace: 3. 10 2017.] <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PT200414EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [5] Introducing HVDC. [Online] 2015. [Citace: 3. 10 2017.] <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=POW0078&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [6] HVDC Special Report. [Online] [Citace: 4. 10 2017.] <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AAK10103A3043&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [7] **Kononov, Martin.** *Nové trendy v budování přenosových sítí*. [Bakalářská práce] Plzeň : autor neznámý, 2017.
- [8] ELECTRIFYING TIBET. *Rukor*. [Online] 23. 5 2016. [Citace: 11. 5 2018.] <http://rukor.org/electrifying-tibet/>.
- [9] Reference list: HVDC Classic. [Online] [Citace: 3. 10 2017.] <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=POW0013&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [10] **Veverka, Akademik Antonín.** *Technika vysokých napětí*. Praha : SNL, 1978. L26-C3-111-41f/58 397.
- [11] **Klier, Bc. Milan.** *Výzkum korony na přenosových vedeních*. [Bakalářská práce] Plzeň : autor neznámý, 2017.
- [12] **Prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc.** *Aplikovaný elektromagnetismus*. České Budějovice : KOPP, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [13] **doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.** Agros2D – aplikace pro řešení fyzikálních polí. *ABC Linuxu*. [Online] 31. 3 2010. [Citace: 11. 7 2017.]

- <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>.
- [14] **Kostka, Ing. Tomáš.** PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE. [Online] 5 2009. [Citace: 20. 2 2018.] [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/ee/prenos\\_ee.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ee/prenos_ee.pdf).
- [15] **Novák, Ing. Jaroslav.** Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (I). *TBZ-info*. [Online] 28. 1 2004. [Citace: 13. 3 2018.] <http://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/1801-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-i>.
- [16] **Benešová, Zdeňka a Šroubová, Lenka.** *Capacitive coupling in double-circuit transmission lines*. Žilina : autor neznámý, 2004.
- [17] Press Pictures - Siemens Global Website. *Siemens*. [Online] [Citace: 24. 4 2018.] <https://www.siemens.com/press/en/presspicture/index.php>.
- [18] **Prof. Giovanni Mazzanti.** Extruded Cable Systems for HVDC Transmission. *Supergen HubNet*. [Online] 7. 12 2016. [Citace: 10. 10 2017.] [http://www.hubnet.org.uk/filebyid/1037/Mazzanti\\_Part1.pdf](http://www.hubnet.org.uk/filebyid/1037/Mazzanti_Part1.pdf).
- [19] Submarine Power Cables. *Professor Robert B. Laughlin, Department of Physics*. [Online] 11. 5 2006. [Citace: 10. 10 2017.] <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/mccall2/docs/subcable-abb-2006.pdf>.
- [20] Technologie ABB, které změnily svět. *ABB Group*. [Online] [Citace: 16. 10 2017.] <http://www.abb.cz/cawp/seitp202/a17c0e2d65105853c12575de00417af7.aspx>.
- [21] ABB transmission technology. *ABB Group*. [Online] [Citace: 16. 10 2017.] <http://new.abb.com/future/uhvdc>.
- [22] HVDC Classic. *Siemens Global Website*. [Online] [Citace: 17. 10 2017.] <https://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/hvdc-classic.htm>.
- [23] HVDC PLUS (VSC Technology). *Siemens Global Website*. [Online] [Citace: 17. 10 2017.] <https://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/hvdc-plus.htm>.
- [24] **Procházka, Ing. Radek.** Stožáry VVN (III) - TZB-info. *TZB-info*. [Online] 18. 6 2007. [Citace: 7. 3 2018.] <http://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4192-stozary-vvn-iii>.
- [25] ANAND ENGG CORPORATION. [Online] [Citace: 17. 4 2018.] <http://www.anandengg.com/>.
- [26] **Design, Bryan Christie.** Germany's Bright Idea. *DiscoverMagazine.com*. [Online] [Citace: 6. 5 2018.] <http://discovermagazine.com/2015/july-aug/18-germany-bright-idea>.

## 10 Přílohy



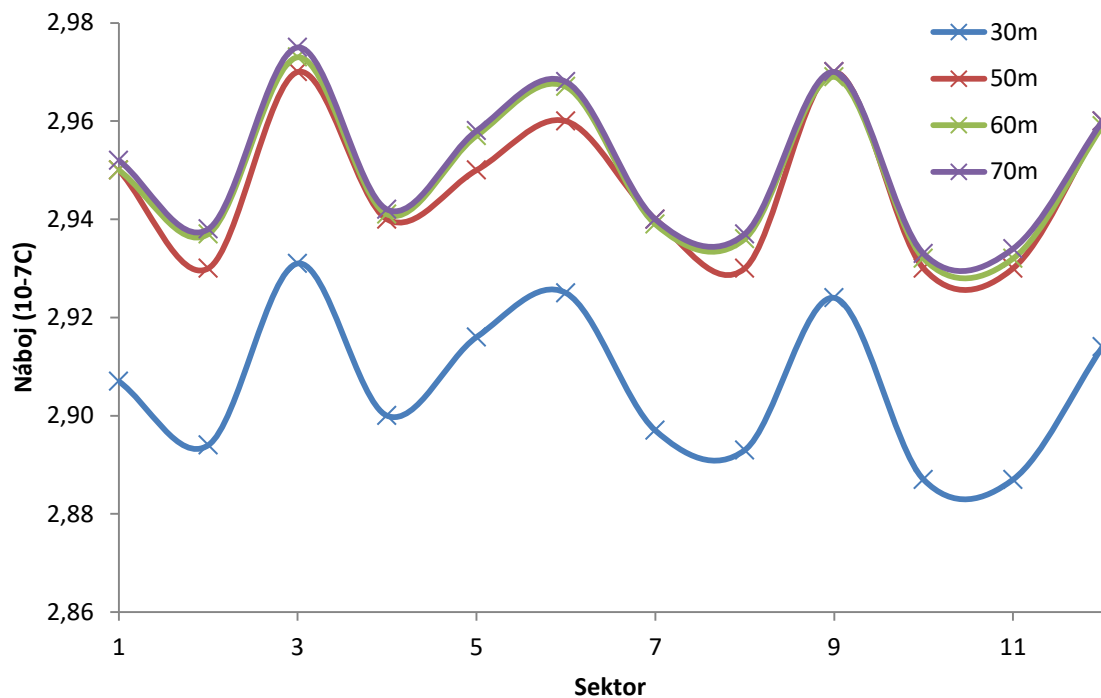
Obrázek 45 - HVDC transformátor 1100kV [17]



Obrázek 46 - HVDC střídač [17]



Obrázek 47 - Portálový stožár



Obrázek 48 - Konvergence pro třípólové uspořádání