

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Použití svazkových vodičů pro přenos elektrické energie  
na vedení vvn**

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

Jméno a příjmení: **Michal BRÚNA**  
Osobní číslo: **E14B0007P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Použití svazkových vodičů pro přenos elektrické energie na vedení vvn**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zhodnoňte výhody použití různých typů svazkových vodičů.
2. Popište vliv svazkových vodičů na pasivní parametry vedení.
3. Vyšetřete elektrické pole v okolí svazkových vodičů.
4. Proveďte analýzu Jouleových ztrát pro různé typy svazkových vodičů.
5. Diskutujte možnou úsporu nákladů.

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**

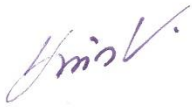
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rozborem problematiky svazkových vodičů a jejich přínosem pro přenos elektrické energie na vedení o napěťové úrovni vvn. V úvodu práce je popsáno samotné provedení a použití svazkových vodičů a z toho vyplývající výhody a nevýhody jejich aplikace. Dále je zde proveden popis a odvození pasivních parametrů vedení a jejich modifikace respektující nasazení svazkových vodičů. Pro odlišné konfigurace uspořádání a počty parciálních vodičů ve svazku je pomocí programu Agros 2D v jejich okolí vyšetřeno rozložení elektrostatického pole. S ohledem na rozdílné provozní náklady různých typů svazkových vodičů, respektive svazkových vodičů oproti klasickému třívodičovému provedení je na základě analýzy Jouleových ztrát posouzena efektivnost jejich použití na venkovním vedení o napěťové úrovni vvn a diskutována případná úspora finančních prostředků.

## Klíčová slova

svazkové vodiče, pasivní parametry vedení, elektrostatické pole, výpočet Jouleových ztrát, koróna, ekonomická efektivnost investic

# **Abstract**

Brůna, Michal. *Usage of the bundle conductors for the power transmission on the vhv overhead transmission line.*

This bachelor thesis deals with the analysis of the issue of bundle conductors and with its benefits for the power transmission on the vhv overhead transmission line. It is outlined the implementation and use of bundle conductors and the resulting advantages and disadvantages of their application in the introduction to the thesis. There are described and derived passive parameters of overhead lines and its modifications with respect to the deployment of bundle conductors. For different configurations of layout and number of subconductors in the bundle is examined the electrostatic field around them by using program Agros 2D. The effectiveness of bundle conductors deployment on the overhead vhv lines is evaluated by using analysis of Joule's losses for different types of bundle conductors with regard to the operating costs of various types of bundle conductors respectively of bundle conductors compared with a conventional three-conductors design.

## **Key words**

bundle conductors, parameters of transmission line, electrostatic field, evaluation of Joule's losses, corona, economic efficiency of investment

# Prohlášení

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

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

V Plzni dne 30.5.2017

Michal Brůna

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomášovi Nazarčíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Rovněž mu děkuji za poskytnutí materiálů a reálných parametrů z dokumentací společnosti ČEPS, a.s.

Dále děkuji paní Prof. Ing. Zdeňce Benešové, CSc. za poskytnuté materiály, konzultace, cenné profesionální rady a připomínky.

V neposlední řadě bych velice rád vyjádřil veliký dík a uznání celé mé rodině, jež mě podporovala během studia.

# Obsah

1. Úvod.....	1
2. Problematika svazkových vodičů.....	3
2.1 Popis.....	3
2.2 Konstrukce .....	4
2.3 Výhody.....	6
2.4 Nevýhody.....	7
3. Pasivní parametry venkovního vedení .....	9
3.1 Popis.....	9
3.2 Činný odpor .....	10
3.2.1 Činný odpor svazkového vedení .....	10
3.3 Indukčnost.....	11
3.3.1 Indukčnost vodiče .....	11
3.3.2 Indukčnost třífázového vedení .....	12
3.4 Kapacita .....	15
3.4.1 Kapacita třífázového svazkového vedení .....	17
3.5 Svod .....	18
3.5.1 Svod svazkového vedení .....	18
3.6 Vliv svazkových vodičů na parametry vedení .....	19
4. Elektrické pole v okolí svazkových vodičů.....	20
4.1 Popis elektrostatického pole .....	20
4.2 Numerické řešení elektrostatického pole .....	22
4.3 Modelování a simulace elektrostatického pole v okolí svazkových vodičů.....	23
4.3.1 Vytvoření matematického modelu .....	24
4.3.2 Ověření konvergence matematického modelu .....	26
4.3.3 Závislost velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na změně kroku .....	26
4.3.4 Závislost velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na jejich počtu .....	31



4.3.5 Zkoumání velikosti intenzity elektrického pole na povrchu vodiče na hladině 220 kV.....	34
4.3.6 Ověření platnosti vzorce pro výpočet ekvivalentního poloměru svazkového vodiče .....	37
5. Analýza Jouleových ztrát .....	39
5.1 Ztráty korónou .....	40
5.2 Ztráty na odporu fázových vodičů .....	43
5.3 Jouleovy ztráty .....	44
5.4 Rozbor a porovnání velikosti Jouleových ztrát.....	44
5.4.1 Vedení 400 kV .....	45
5.4.2 Vedení 220 kV .....	48
6. Možná úspora nákladů .....	52
Závěr.....	56
Použitá literatura.....	58
Přílohy .....	60
Příloha A.....	60
Příloha B .....	60

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 Kotevní stožár Kočka osazený trojsvazkem [4].....	3
Obr. 2.2 Typické uspořádání vodičů ve svazku [6].....	4
Obr. 2.3 Rozpěrka pro čtyřsvazkový vodič [5] .....	5
Obr. 2.4 Kotevní stožár Donau osazený trojsvazkem [4].....	6
Obr. 2.5 Zavěšení svazkových vodičů [4] .....	7
Obr. 3.1 Náhradní schéma venkovního vedení.....	9
Obr. 3.2 Odvození vztahů vlastní a vzájemné indukčnosti [12].....	11
Obr. 3.3 Třífázový systém [12] .....	12
Obr. 3.4 Uspořádání svazkových vodičů [12] .....	13
Obr. 3.5 Fiktivní vlastní a vzájemné indukčnosti [12] .....	14
Obr. 3.6 Kapacitní vazby [13] .....	15
Obr. 3.7 Metoda zrcadlení [13] .....	16
Obr. 4.1 Schématické znázornění matematického modelu.....	23
Obr. 4.2 Počáteční podoba matematického modelu systému ( $N=1, M=2, r_H=250$ m) .....	25
Obr. 4.3 Výsledná podoba matematického modelu systému ( $N=2, M=2, r_H=50$ m).....	25
Obr. 4.4 Detail počáteční podoby matematického modelu systému ( $N=1, M=2, r_H=250$ m) .....	25
Obr. 4.5 Detail výsledné podoby matematického modelu systému ( $N=2, M=2, r_H=50$ m)	25
Obr. 4.6 Označení a umístění bodů na povrchu parciálního vodiče.....	27
Obr. 4.7 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku při $s=0,3$ m .....	27
Obr. 4.8 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku při $s=0,4$ m .....	28
Obr. 4.9 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku při $s=0,5$ m .....	28
Obr. 4.10 Intenzita elektrického pole na levých vodičích .....	29
Obr. 4.11 Intenzita elektrického pole na středních vodičích .....	29
Obr. 4.12 Intenzita elektrického pole na pravých vodičích.....	30
Obr. 4.13 Označení a umístění bodů na povrchu parciálního vodiče.....	31
Obr. 4.14 Rozložení intenzity elektrického pole dvojsvazku.....	32
Obr. 4.15 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku .....	32
Obr. 4.16 Rozložení intenzity elektrického pole čtyřsvazku.....	33
Obr. 4.17 Rozložení intenzity elektrického pole šestisvazku.....	33

Obr. 4.18 Intenzita elektrického pole na povrchu levých, respektive levých dolních vodičů .....	34
Obr. 4.19 Označení a umístění bodů na povrchu jednoduchého, respektive parciálního vodiče .....	35
Obr. 4.20 Rozložení intenzity elektrického pole jednoduchého vodiče .....	35
Obr. 4.21 Rozložení intenzity elektrického pole dvojsvazku .....	36
Obr. 4.22 Intenzita elektrického pole na povrchu jednoduchého, respektive levého parciálního vodiče.....	36
Obr. 5.1 Schéma modelového stožáru Portál na 400 kV [23] .....	46
Obr. 5.2 Schéma modelového stožáru Portál na 220 kV [23] .....	49

## Seznam tabulek

Tab. 3.1 Přibližné hodnoty svodu [14] .....	18
Tab. 4.1 Zkoumání velikosti poloměru umělé hranice .....	24
Tab. 4.2 Zkoumání počtu zjemnění a stupně polynomu .....	24
Tab. 4.3 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu levých vodičů .....	29
Tab. 4.4 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu středních vodičů .....	29
Tab. 4.5 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu pravých vodičů .....	30
Tab. 4.6 Parametry variantních svazkových vodičů.....	31
Tab. 4.7 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu levých, respektive levých dolních vodičů .....	33
Tab. 4.8 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu jednoduchého, respektive levého parciálního vodiče.....	36
Tab. 4.9 Parametry variantních svazkových vodičů a vodičů ekvivalentních poloměrů ....	37
Tab. 4.10 Ověření platnosti vzorce pro výpočet ekvivalentního poloměru.....	38
Tab. 5.1 Velikost koeficientu $F$ [21] .....	43
Tab. 5.2 Atmosférické podmínky .....	45
Tab. 5.3 Výpočet ztrát korónou na 400 kV .....	46
Tab. 5.4 Hodnoty stejnosměrných odporů vodičů na 400 kV [24] .....	47
Tab. 5.5 Výpočet ztrát na odporu fázových vodičů na 400 kV .....	47
Tab. 5.6 Výpočet Jouleových ztrát na 400 kV .....	48
Tab. 5.7 Výpočet ztrát korónou na 220 kV .....	49
Tab. 5.8 Hodnoty stejnosměrných odporů vodičů na 220 kV [24] .....	50
Tab. 5.9 Výpočet ztrát na odporu fázových vodičů na 220 kV .....	50
Tab. 5.10 Výpočet Jouleových ztrát na 220 kV .....	51
Tab. 6.1 Analýza nákladů daných ztrátami korónou na vedení 400 kV .....	53
Tab. 6.2 Analýza nákladů daných ztrátami korónou na vedení 220 kV .....	53
Tab. 6.3 Analýza nákladů daných Jouleovými ztrátami na vedení 400 kV .....	53
Tab. 6.4 Analýza nákladů daných Jouleovými ztrátami na vedení 220 kV .....	54

## Seznam použitých zkratek a symbolů

MR	Maxwellova rovnice	
NPV	Net Present Value, metoda čistě současné hodnoty	
$O$	poloměr svazkového kruhu	(m)
$s$	vzdálenost parciálních vodičů ve svazku	(m)
$n$	počet parciálních vodičů ve svazku	(-)
$R$	činný odpor	( $\Omega$ )
$L$	indukčnost	(H)
$C$	kapacita	(F)
$G$	svod	(S)
$R_{SS}$	stejnoseměrný odpor vodiče	( $\Omega$ )
$\rho$	měrný odpor vodiče	( $\Omega\text{m}$ )
$l$	délka vodiče	(m)
$S$	průřez vodiče	( $\text{m}^2$ )
$k$	násobný opravný koeficient	(-)
$k_{\theta}$	činitel oteplení	(-)
$k_s$	činitel vlivu skin efektu	(-)
$k_z$	činitel prodloužení délky kroucením	(-)
$k_p$	činitel respektující průhyb vodiče	(-)
$R_{St}$	střídavý odpor vodiče	( $\Omega$ )
$R_{Svazku}$	činný odpor svazkového vodiče	( $\Omega$ )
$r$	poloměr vodiče	(m)
$i$	elektrický proud	(A)
$D$	vzájemná vzdálenost vodičů	(m)
$\mathbf{A}$	vektorový magnetický potenciál	(Wb/m)
$L_i$	vnitřní indukčnost vodiče	(H)
$L_e$	vnější indukčnost vodiče	(H)
$\mu_0$	permeabilita vakua	(H/m)
$L_{12}$	vzájemná indukčnost vodičů	(H)

$L$	matice indukčností vedení	(H)
$A$	matice potenciálových koeficientů	(V/C)
$q$	vektor elektrických nábojů na vodičích	(C)
$m$	počet vodičů v systému	(-)
$a_{ii}$	vlastní potenciálový koeficient	(V/C)
$a_{ij}$	vzájemný potenciálový koeficient	(V/C)
$\varepsilon_0$	permitivita vakua	(F/m)
$h$	výška vodiče nad zemí	(m)
$d_{ij}$	vzdálenost $i$ -tého vodiče od obrazu $j$ -tého vodiče	(m)
$B$	matice kapacitních koeficientů	(F)
$C_{ii}$	kapacita vodičů vůči zemi	(F)
$C_{ij}$	parciální kapacita mezi vodiči	(F)
$C_p$	provozní kapacita mezi vodičem a zemí	(F)
$r_n$	ekvivalentní poloměr svazkového vodiče	(m)
$\Delta P_S$	svodové ztráty	(W)
$U_f$	fázové napětí	(V)
$I_S$	svodový proud	(A)
$U$	sdržené napětí	(V)
$E$	vektor intenzity elektrického pole	(V/m)
$D$	vektor elektrické indukce	(C/m <sup>2</sup> )
$\varepsilon$	permitivita	(F/m)
$Q$	elektrický náboj	(C)
$\varphi$	skalární elektrický potenciál	(V)
$\rho$	objemová hustota náboje	(C/m <sup>3</sup> )
$r_H$	poloměr umělé hranice	(m)
$N$	počet zjemnění diskretizační sítě	(-)
$M$	stupeň aproximujícího polynomu	(-)
$Q_S$	náboj na povrchu parciálních vodičů	(C)
$Q_{HZ}$	náboj na povrchu umělé hranice a země	(C)

$E$	velikost intenzity elektrického pole	(V/m)
$Q_E$	náboj na povrchu ekvivalentního vodiče	(C)
$\Delta P_k$	ztráty korónou	(W)
$\delta$	poměrná hustota vzduchu	(-)
$m_1$	činitel respektující vliv povrchu vodiče	(-)
$m_2$	činitel respektující vliv počasí	(-)
$U_0$	kritické napětí koróny	(V)
$p$	atmosférický tlak	(Pa)
$t$	teplota	(°C)
$E_0$	kritická intenzita el. pole na povrchu vodiče	(V/m)
$F$	faktor koróny	(-)
$\alpha$	teplotní koeficient	(1/K)
$\Delta P_R$	ztráty na podélném odporu vodičů	(W)
$\Delta P_J$	Jouleovy ztráty	(W)
$P_S$	střední hodnota přenášeného výkonu	(W)
$\Delta W_k$	ztráty el. energie dané ztrátami korónou	(J)
$\Delta W_J$	ztráty el. energie dané Jouleovými ztrátami	(J)
$V$	celkové vynaložené náklady	(Kč)
$V_0$	náklady vynaložené v prvním roce	(Kč)
$T_{ZV}$	předpokládaná doba životnosti vedení	(roky)
$dm$	diskontní míra	(%)

# 1. Úvod

Celosvětová poptávka po elektrické energii neustále narůstá a v mnoha zemích dochází k jejímu zdvojnásobení i každých několik let. Zdroje elektrické energie, jež vyrábějí výkony v řádech desítek až stovek megawattů, jsou obvykle umístěny daleko od míst spotřeby, tudíž je nezbytný přenos značného množství elektrické energie na velké vzdálenosti. To může být ekonomicky realizováno s ohledem na vznikající ztráty vhodnou konstrukcí samotného vedení a jeho provozem na velmi vysokých úrovních napětí. Tímto způsobem je snížena velikost procházejícího proudu, vznikajících Jouleových ztrát, použitého průřezu vodiče i jejich celková váha, což umožní postavení stožárů v delších rozestupech. Toho se s výhodou využívá zejména při přenosu mezi elektrárnami a velkými rozvodnami. [1]

Velikost přenosového napětí u klasických třífázových vedení je však omezena a není jí možné neustále navyšovat, poněvadž značná hodnota napětí vytváří v jejich blízkosti silné elektrické pole. Na určité hladině napětí intenzita elektrického pole dosáhne kritické hodnoty, což má za následek vznik světla fialové záře, ozonu a mírně syčivého zvuku. Tento efekt je znám jako koróna a způsobuje řadu problémů, mezi něž patří zvýšení ztrát energie přeměňujících se na teplo, možné poškození povrchu vodičů díky vznikajícím horkým místům, koroze vodičů daná chemickými účinky, degradace izolačních systémů, generování vyšších harmonických v širokém frekvenčním spektru způsobující radiové rušení a slyšitelný hluk. [2]

Jedinou cestou jak omezit dopady koróny je snížit napěťový gradient na povrchu vodiče, což vyžaduje zvýšení povrchu na takovou úroveň, kdy je napětí rovnoměrně rozloženo. Toho lze elegantně dosáhnout použitím uskupení znatelně menších parciálních vodičů označovaných jako svazkové vodiče s celkovou plochou odpovídající ploše plného ekvivalentního vodiče. Tento koncept se rychle projevil jako efektivní nástroj pro kontrolu intenzity elektrického pole na povrchu vodiče a z toho plynoucích projevů koróny. Vedení provozovaná na napěťových hladinách 400kV a více jsou bezvýhradně osazena svazkovými vodiči. [2]

Vhodná konstrukce samotného přenosového vedení se projeví na hodnotách pasivních parametrů, které ovlivňují velikost procházejícího proudu a zejména s ním spjaté Jouleovy ztráty. Zde se opět do popředí dostává myšlenka nasazení svazkových vodičů, jejichž důmyslná konstrukce vyúsťuje z našeho pohledu v příznivější hodnoty pasivních parametrů ovlivňující velikost ztrát, nežli je tomu v případě klasických třífázových vedení.



Zejména v dnešní době se však musí zohlednit ekonomické aspekty použití svazkových vodičů. Z tohoto hlediska je klíčové znát finanční úspory dosažené snížením vznikajících ztrát a porovnat je s navýšením investičních nákladů na výstavbu daného vedení.

Cíl této bakalářské práce spočívá ve vyšetření rozložení elektrostatického pole v okolí svazkových vodičů pro odlišné konfigurace uspořádání a počty parciálních vodičů. Je zde zkoumána závislost velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na změně kroku pohybujícím se od 0,3 do 0,5 m a na změně počtu parciálních vodičů ve svazku postupně tvořeném dvěma, třemi, čtyřmi a šesti parciálními vodiči. Znalost rozložení elektrostatického pole v blízkosti vodičů je nezbytná pro určení kritického napětí koróny, při jehož překročení vznikají ztráty korónou podílející se na Jouleových ztrátách. Dále je ověřována platnost vzorce pro výpočet ekvivalentního poloměru svazkového vodiče.

Dalším úkolem je stanovení Jouleových ztrát na vysokonapětových vedeních při přenosu elektrické energie, konkrétně tedy ztrát vznikajících na podélném odporu vodičů při průchodu proudu a ztrát korónou. Výpočet je prováděn na modelovém transponovaném vedení třífázového vyváženého systému o délce 100 km zatíženém symetrickou čistě odporovou zátěží ukotveném na stožárech typu Portál respektujících reálné konstrukční parametry. Podstata spočívá ve vyčíslení Jouleových ztrát dvou v úvahu připadajících konfigurací počtů vodičů na vybraných napětových hladinách 220 kV a 400 kV, na nichž je využíváno svazkových vodičů. Jejich určení je realizováno za předem definovaných atmosférických podmínek a velikostí přenášených výkonů.

Náplň poslední části práce je založena na stanovení nezbytných výdajů k uhrazení kvantifikovaných ztrát, jednak pro samotné ztráty korónou a jednak pro Jouleovy ztráty, při přenosu elektrické energie pomocí zkoumaných konfigurací počtu vodičů při uvažovaných hodnotách přenášených výkonů po dobu jednoho kalendářního roku definovaného z hlediska atmosférických podmínek. Na základě celkových finančních úspor získaných provozem konfigurací vykazujících nejnižší ztráty elektrické energie po dobu předpokládané životnosti vedení je provedena diskuze, jejímž cílem je zhodnocení ekonomické efektivnosti investic do realizace oněch konfigurací.

## 2. Problematika svazkových vodičů

### 2.1 Popis

Analýza vedení se svazkovými vodiči je specifickým případem problematiky zabývající se všeobecným mnohavodičovým uspořádáním vodičů pro přenos elektrické energie. [3]

Svazkový vodič je vytvořený ze dvou, nebo více parciálních paralelních vodičů v jednotném geometrickém uspořádání umístěných ve vzájemné vzdálenosti nazývané svazkový krok, zkráceně označované jako krok. Takto vzniklý celek představuje jednu fázi nebo jeden pól vedení.

Základní rozdíl mezi svazkovým a lanovým vodičem spočívá v tom, že parciální vodiče ve svazku jsou od sebe zafixovány pomocí rozpěrek v konstantní vzdálenosti pohybující se od 0,2 do 0,6 metrů, jež je závislá na délce vedení, zatímco segmenty lanového vodiče se navzájem dotýkají. Jednotlivé parciální vodiče mají mezi sebou vzduchovou mezeru, takže se jejich celkový účinný průměr zvětší. [1]

Svazky používané na velmi vysokém napětí mívají obvykle dva, tři, nebo čtyři parciální vodiče, na úrovni zvláště vysokého napětí mohou mít osm, dvanáct a dokonce i šestnáct parciálních vodičů.



**Obr. 2.1 Kotevní stožár Kočka osazený trojsvazkem [4]**

Svazkové vodiče jsou rovněž nazývány jako dvojsvazek, trojsvazek atd., což odkazuje na počet parciálních vodičů ve svazku. V některých případech se lze setkat s označením seskupené, nebo násobné vodiče. [5]

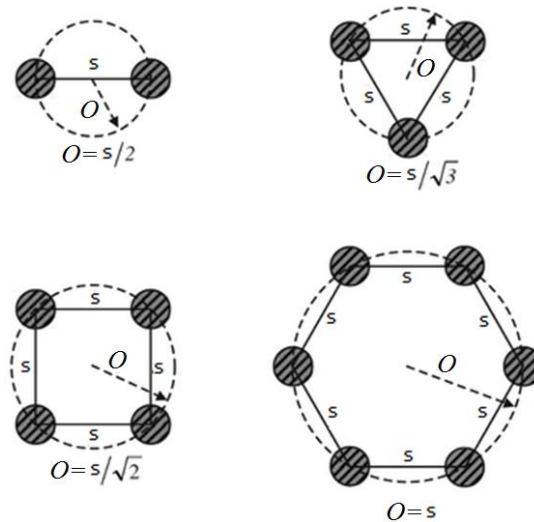
Svazkové vodiče jsou preferovány na vedení, zatímco běžně v rozvodnách jsou nasazovány duté vodiče.

## 2.2 Konstrukce

Svazkové vodiče se skládají z parciálních paralelních vodičů umístěných po obvodu kruhu nazývaného jako svazkový kruh, které jsou v pravidelných vzdálenostech propojeny spojkami a drženy v konstantním vzájemném odstupu kovovými rozpěrkami rozmístěnými v 50 až 60 metrových vzdálenostech. Poloměr kruhu  $O$ , na kterém leží středy parciálních vodičů je dán vztahem: [6]

$$O = \frac{s}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (1)$$

kde  $s$  je vzdálenost mezi středy dvou sousedních parciálních vodičů,  
 $n$  je počet parciálních vodičů ve svazku.



Obr. 2.2 Typické uspořádání vodičů ve svazku [6]

Takto vzniklý vodič je pomocí izolátorových řetězců zavěšen ke stožárům venkovního vedení. Přibližně lze říci, že vzdálenost středů parciálních vodičů by měla být osmkrát až desetkrát větší než průměr vodiče a to bez ohledu na jejich počet. [3]

Při zkratu a náporu větru může vzniklé mechanické napětí uvnitř vodičů vyústit ve zkrácení vzájemných roztečí. Samotná konstrukce svazkových vodičů se při zkratu vyznačuje jednou nevýhodou, poněvadž vodiče protékané proudem ve shodném směru se vzájemně přitahují silou, která závisí na druhé mocnině procházejícího proudu. Parciální vodiče tedy vykazují zvýšenou snahu se srazit. Zejména v těchto případech zastávají svou funkci rozpěrky vyrobené z ocelových, nebo hliníkových tyčí. Rozpěrky a jejich způsoby uchycení musí tudíž tyto síly vzít v úvahu a být navrženy takovým způsobem, aby nepoškodily vodiče nebo rozpěrky samotné. Z tohoto důvodu se doporučuje používat rozpěrky se svorkami lemovanými plastem. [7]



**Obr. 2.3 Rozpěrka pro čtyřsvazkový vodič [5]**

Počet parciálních vodičů ve svazku je dán hladinou napětí, na které je dané vedení provozováno. Platí, že se zvyšujícím se napětím roste i jejich četnost. Jednotlivé svazky jsou v převážné většině případů seskupeny z počtu  $n$  AlFe lan umístěných ve vzájemné vzdálenosti  $s$  ve vrcholech rovnostranného  $n$ -úhelníku. [8]

Svazkové vodiče jsou na 110 kV používány pouze při požadavku velké přenosové kapacity, obecně však na této úrovni velmi sporadicky. [8]

Na 220 kV jsou svazkové vodiče obvykle jako alternativa k jednomu vodiči s velkým průměrem. Nejčastěji se v tomto případě používá dvojsvazek ve dvojí konfiguraci, a to v horizontálním, nebo vertikálním provedení. Horizontální uspořádání napomáhá vedení vodičů a vyskytují se u něj menší větrem zapříčiněné vibrace. Vertikální uspořádání je méně náchylné proti prověšení a odlišnému prodloužení jednotlivých vodičů. Dolní vodič je oproti hornímu poté o trochu méně vystavován mechanickému napětí. [8]

V případě 400 kV se lze setkat se trojí konfigurací, jejíž podoba se odvíjí dle lokality provozu vedení. Využívá se již zmíněného dvojsvazku, dále trojsvazku s parciálními vodiči umístěnými ve vrcholech rovnostranného trojúhelníku a čtyřsvazku s parciálními vodiči v rozích čtverce.

U 500 kV linek se troj a čtyřsvazky rozšířily celosvětově. Na 800 kV se používají pěti a šestisvazky. Pro napětí nad 1000 kV byly navrženy osmi, dvanácti a šestnáctisvazkové vodiče umístěné po obvodu svazkového kruhu. [8]

Svazkové vodiče instalované v Evropě jsou obvykle s krokem 0,4 m. Tato vzdálenost byla stanovena na základě zkoumání závislosti kritického napětí pro vznik koróny na velikosti kroku. Extrém dané funkce se nachází přibližně při hodnotě kroku 0,385 m.

V případě dvoj a trojsvazku se volí krok 0,4 m. U čtyřsvazku se tato vzdálenost pohybuje okolo 0,448 m. Pětisvazek se vyznačuje krokem 0,508 m a pro šestisvazek je charakteristická hodnota 0,56 m.



**Obr. 2.4 Kotevní stožár Donau osazený trojsvazkem [4]**

Při volbě vhodné konfigurace svazkových vodičů je vzhledem k velkému počtu realizovatelných variant nezbytné zohlednit celou řadu faktorů. Jak již bylo uvedeno, počet parciálních vodičů se může pohybovat od 2 do 16 (s průřezy danými potřebnou mechanickou pevností) s kroky od 0,3 m (v některých opodstatněných případech od 0,1 m) do 0,6 m, aby výsledné vlastnosti vyhověly z hlediska požadavků na ztráty dané podélným odporem vodičů a ztráty korónou. Množství vhodných variant je omezeno výrobními a provozními zkušenostmi a také detailními technickými a ekonomickými studiemi. [9]

## 2.3 Výhody

Hlavní výhodou použití svazkových vodičů oproti jednoduchým vodičům je schopnost omezení maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů. Dochází tedy ke zvýšení kritického napětí pro vznik koróných výbojů, z čehož vyplývají podstatně nižší ztráty energie, redukce slyšitelného šumu a omezení generování rádiového rušení narušujícího chod telekomunikací.

Při použití svazkových vodičů mohou mít jednotlivé vodiče menší průměr a hmotnost nežli jeden ekvivalentní vodič, což umožňuje snazší manipulaci a montáž.

Použití svazkových vodičů má rovněž příznivý vliv na nerovnoměrné rozložení napětí na izolátorových řetězcích. Dochází ke zvětšení spodní elektrody, čímž se zmenší napětí na přetížených izolátorech umístěných blíže k vodičům.

Díky větší chladicí ploše a prokazatelně daleko menším ztrátám skin efektem v porovnání s jedním vodičem se stejným celkovým průřezem umožňují svazkové vodiče větší proudové zatížení.

Svazkové vodiče jsou z hlediska vzniku větrem zapříčiněných buzených oscilací při srovnatelném způsobu ochrany odolnější oproti jednoduchým vodičům. Amplitudy vibrační jsou nižší a tím pádem pravděpodobnost vytržení vodičů z uchycení k izolátorům klesá, což umožňuje při konstrukci volit vyšší tahy. Vibrace způsobené větrem jsou obecně méně výrazné u svazkových vodičů s distančními mezerami a rozpěrkami umístěnými v poměrně blízkých intervalech. [7]

## 2.4 Nevýhody

Nevýhody svazkových vodičů lze pozorovat v jejich konstrukčním provedení, při instalaci, i během samotného provozu.

Jak již bylo uvedeno, konstrukční nevýhoda svazkových vodičů se projevuje zejména při průchodu zkratového proudu zvýšenou vzájemnou přitažlivostí parciálních vodičů, čemuž mimo jiné musí zabránit instalované rozpěrky.

Kvůli vyššímu počtu parciálních vodičů a jejich příslušenství narůstá celková hmotnost svazku, což klade větší požadavky na nosnost, popřípadě počet izolátorových řetězců. Rovněž samotné zavěšení svazků je komplikovanější a může vyžadovat dvojité nebo trojitě izolátorové řetězce. [10]



Obr. 2.5 Zavěšení svazkových vodičů [4]

Záměrným vytvořením roztečí mezi jednotlivými parciálními vodiči je navýšena potřebná vzdálenost mezi jednotlivými fázemi a okolními objekty a rovněž minimální výška nad terénem.

Tyto konstrukční požadavky se projeví v nárocích na mohutnost stožárů, což si vyžádá rozlehlejší volný prostor, jenž je dnes velmi ceněný a mnohdy nedostupný.

Dochází tedy k podstatnému navýšení celkových investičních nákladů a montážní náročnosti.

Dále do popředí vystupuje problematika klimatických vlivů, konkrétně zvětšení přídatného zatížení námrazou díky většímu celkovému průřezu. S rostoucím počtem parciálních vodičů ve svazku (se srovnatelným podílem hliníku jako u jednoduchého vodiče) se měřitelně zvětšuje množství námrazy. Parciální vodiče s menším průměrem nárůstu hmotnosti vzdorují obtížněji, což vyústí v jejich větší průhyb. [7]

### 3. Pasivní parametry venkovního vedení

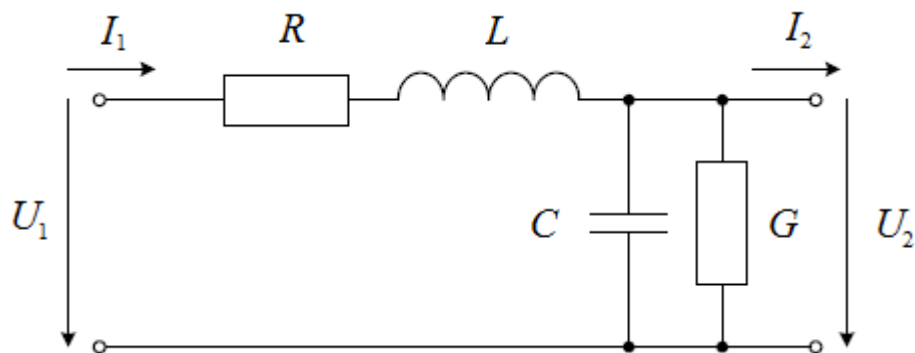
#### 3.1 Popis

Pro určení provozních stavů venkovního vedení je zcela nezbytné znát tzv. základní (primární) elektrické parametry včetně indukčních a kapacitních vazeb mezi jednotlivými vodiči vztažené na jednu fázi. Míra jejich vlivu je dána druhem vedení, jeho délkou a provozním napětím.

Mezi pasivní parametry vedení se obecně řadí činný odpor  $R$ , indukčnost  $L$ , kapacita  $C$  a svod  $G$ .

Zohlednění, popřípadě zanedbání, jednotlivých pasivních parametrů je závislé jednak na záměru prováděný výpočtů a jednak na charakteru zkoumaného problému. V souladu s náplní této práce, jež zahrnuje analýzu Jouleových ztrát, pro níž je nezbytná znalost velikosti činného odporu a svodu, jsou uvažovány veškeré zmíněné pasivní parametry.

K řešení vedení při průmyslové frekvenci na úrovni vvn o délkách vyskytujících se na území našeho státu se využívá jeho modelování dvojbrany se soustřednými parametry. Vedení je reprezentováno článkem  $\Gamma$  s příčnou admitancí na výstupu, jež se používá u kratších venkovních vedení do délky 100 km.



Obr. 3.1 Náhradní schéma venkovního vedení

Dále provedené odvození vztahů pro výpočet pasivních parametrů vedení je provedeno pro dvojbran, jež je zobrazen na Obr. 3.1.



## 3.2 Činný odpor

Vznikají na něm Jouleovy ztráty činného výkonu. Činný odpor vodiče při teplotě 20 °C protékaný stejnosměrným proudem  $R_{ss}$  je zpravidla znám a k dispozici od výrobce, pro jeho výpočet platí vztah:

$$R_{ss} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2)$$

kde  $\rho$  je měrný odpor vodiče při teplotě  $\vartheta = 20$  °C,

$l$  je délka vodiče,

$S$  je průřez vodiče.

Je-li vodič protékán střídavým proudem, musí se uvážit vliv povrchového jevu – skinefektu. Dále se pak respektuje řada dalších faktorů, jež ovlivňují jeho výslednou hodnotu, mezi ně patří teplota, nerovnoměrnost průřezu, vliv spojek, průhyb, prodloužení délky kroucením vodičů atd. zohledněné dílčími činiteli utvářejícími násobný opravný koeficient  $k$ . Nerovnoměrnost průřezu a vliv spojek nelze přesně matematicky postihnout, z tohoto důvodu nejsou dále zohledněny.

$$k = k_{\vartheta} \cdot k_s \cdot k_z \cdot k_p \quad (3)$$

kde  $k_{\vartheta}$  je činitel respektující oteplení,

$k_s$  je činitel respektující vliv skinefektu,

$k_z$  je činitel respektující prodloužení délky kroucením,

$k_p$  je činitel respektující průhyb vodiče.

Ve většině případů se bere v potaz jen vliv teploty a skinefektu. Celkový činný odpor vodiče protékaný střídavým proudem je tedy dán jako:

$$R_{st} = k \cdot R_{ss} \quad (4)$$

### 3.2.1 Činný odpor svazkového vedení

Za předpokladu, že je svazek tvořen paralelní kombinací  $n$  parciálních vodičů o stejné hodnotě odporu  $R_{st}$ , celkový činný odpor svazkového vodiče  $R_{svazku}$  při průchodu střídavého proudu nepřímo úměrně klesá s počtem parciálních vodičů a je dán jako [11]:

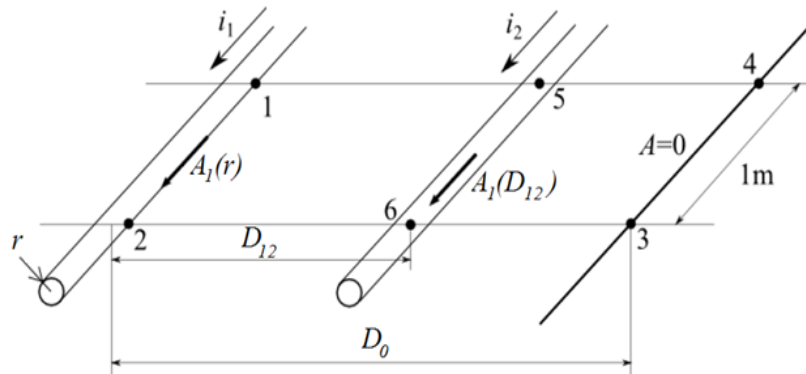
$$R_{svazku} = \frac{R_{st}}{n} \quad (5)$$

### 3.3 Indukčnost

Dále uvedené odvození vztahů zabývajících se problematikou indukčnosti vychází z algoritmu publikovaném v [12].

#### 3.3.1 Indukčnost vodiče

Pro následující odvození jsou uvažovány dva paralelní vodiče délky jednoho metru o poloměru  $r$  protékane proudy  $i_1$  a  $i_2$ , ve vzájemné vzdálenosti  $D_{12}$  a fiktivní vodič v místě s nulovým magnetickým vektorovým potenciálem ve vzdálenosti označené jako  $D_0$  (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Odvození vztahů vlastní a vzájemné indukčnosti [12]

Vlastní indukčnost prvního vodiče  $L_1$  představuje zápis:

$$L_1 = L_i + L_e \quad (6)$$

kde  $L_i$  je vnitřní indukčnost prvního vodiče vycházející z energetické definice daná jako:

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (7)$$

a  $L_e$  je vnější indukčnost prvního vodiče charakterizovaná předpisem:

$$L_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{r}\right) \quad (8)$$

Výsledný vztah pro vlastní indukčnost vodiče  $L$  se získá dosazením rovnic (7) a (8) do rovnice (6):

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D_0}{r}\right)\right) \quad (9)$$

Vzájemná indukčnost  $L_{12}$  vodičů 1 a 2 se pak definuje jako:

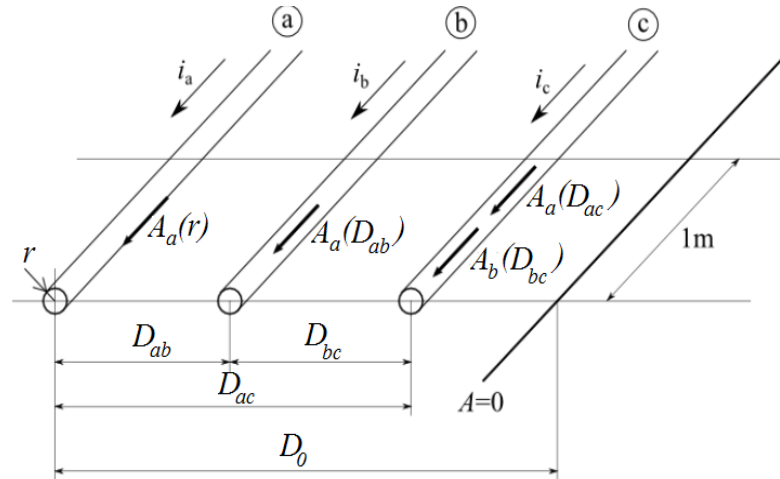
$$L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_{12}}\right) \quad (10)$$

Shodným způsobem se formuluje i vzájemná indukčnost  $L_{21}$ , platí tedy že  $L_{12} = L_{21}$ .

### 3.3.2 Indukčnost třífázového vedení

Při následujícím odvození se uvažuje transponované vedení a vyvážený třífázový systém (Obr. 3.3), což se zapíše vztahem:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (11)$$



Obr. 3.3 Třífázový systém [12]

Vyjádřením napětí na indukčnosti  $i$ -tého vodiče vztahované na délkovou jednotku se obdrží matice napětí na indukčnostech příslušných fází:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

kde  $L$  je matice indukčností vedení respektující veškeré induktivní vazby.

Umístí-li se vodič s nulovým magnetickým vektorovým potenciálem od ostatních vodičů do takové vzdálenosti  $D_0$ , že se splní podmínka:

$$D_0 \gg D_{ij} \gg r, \quad ij = a, b, c, \quad i \neq j \quad (13)$$

poté se může za předpokladu shodného poloměru vodičů vyjádřit vztah pro vlastní indukčnost fázových vodičů na délkovou jednotku jako:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{D_0}{r} \right) \right) \quad (14)$$

a předpis pro vzájemné indukčnosti fázových vodičů na délkovou jednotku ve tvaru:

$$L_{ab} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{D_0}{D_{ab}} \right) \quad (15)$$

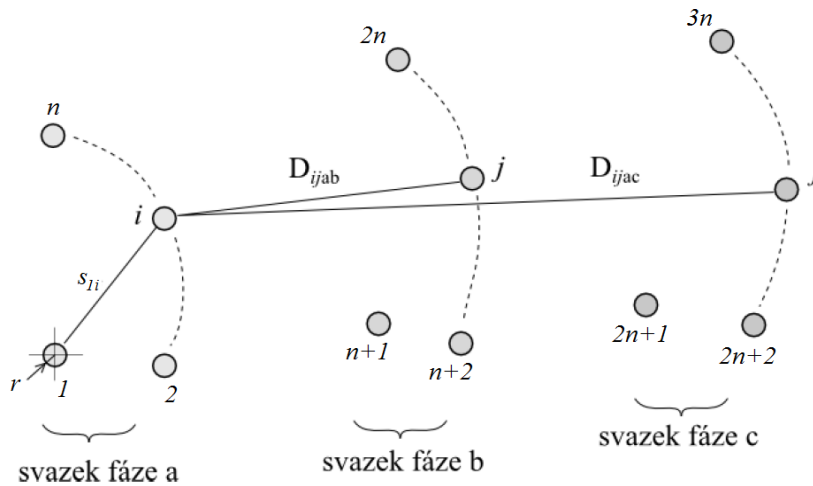
analogicky pro indukčnosti  $L_{ac}$  a  $L_{bc}$ .

Využitím předpokladu třífázového vyváženého systému a převedením vztahu pro indukčnost třífázového vedení do maticového zápisu (16) se získá diagonální matice indukčností.

$$L_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4} + \ln \left( \frac{\sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}}}{r} \right) \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3.3.2.1 Indukčnost třífázového svazkového vedení

Základní uspořádání, ze kterého se bude dále vycházet, je znázorněno na Obr. 3.4. Jednotlivé fáze jsou tvořeny svazky o  $n$  paralelních parciálních vodičích. Parciální vodiče číslované jako 1, 2, ...,  $n$ ;  $n+1$ ,  $n+2$ , ...,  $2n$ ;  $2n+1$ ,  $2n+2$ , ...,  $3n$  mají shodný poloměr  $r$ . Jednotlivé fázové proudy se tedy rovnoměrně rozdělí mezi parciální vodiče příslušného svazku dle vztahu  $i/n$ .



Obr. 3.4 Uspořádání svazkových vodičů [12]

Z důvodu usnadnění následného odvození se zavádějí tzv. střední geometrické vzdálenosti:

- vzdálenost všech vodičů ve fázi  $a$

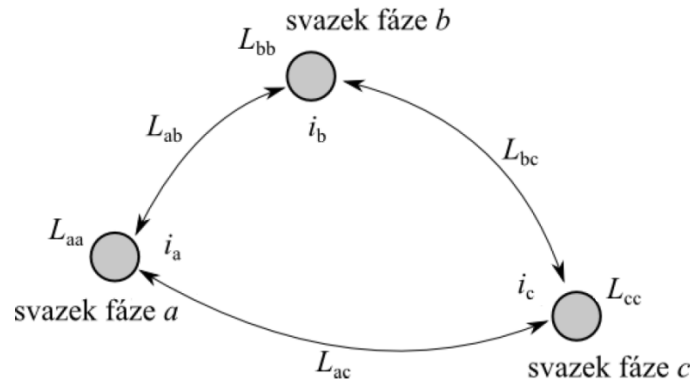
$$S_{ga} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n S_{gia}} \quad (17)$$

- vzdálenost všech vodičů ve fázi  $a$  od fáze  $b$

$$D_{gab} = \sqrt[n]{\prod_{j=n+1}^{2n} D_{giab}} \quad (18)$$

analogicky pro fáze  $b$  a  $c$ .

a fiktivní vlastní a vzájemné indukčnosti uvažující svazkový vodič jako celek naznačené na Obr. 3.5.



**Obr. 3.5** Fiktivní vlastní a vzájemné indukčnosti [12]

Za předpokladu shodných umístění parciálních vodičů ve všech fázích lze psát:

$$s_{ga} = s_{gb} = s_{gc} = s_g \quad (19)$$

Pro vlastní indukčnosti svazkových vodičů při využití rovnice (19) platí:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4n} + \ln \left( \frac{1}{s_g} \right) \right) \quad (20)$$

a pro vzájemné indukčnosti:

$$L_{ab} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{1}{D_{gab}} \right), L_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{1}{D_{gac}} \right), L_{bc} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{1}{D_{gbc}} \right) \quad (21)$$

Převedením vztahu pro indukčnost třífázového svazkového vedení do maticového zápisu se získá výsledná diagonální matice indukčností:

$$\mathbf{L}_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \frac{1}{4n} + \ln \left( \frac{\sqrt[3]{D_{gab} \cdot D_{gbc} \cdot D_{gac}}}{s_g} \right) \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

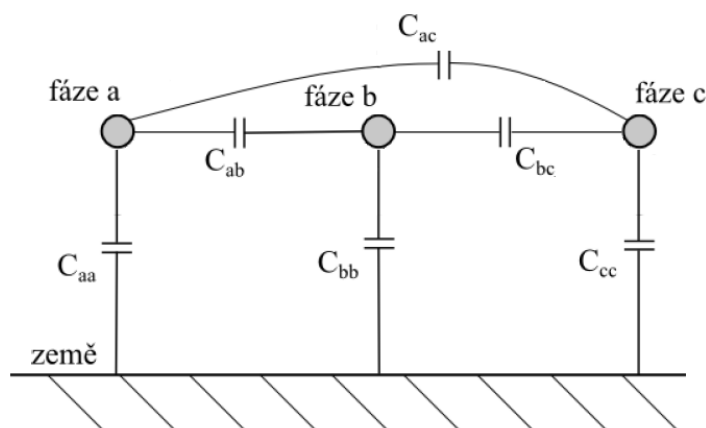
Při porovnání vzorců (16) a (22) je zřejmé, že použití svazkové konfigurace má vliv na zmenšení indukčnosti vedení. Dosáhne se tedy snížení podélné induktivní reaktance, což zlepší napěťovou regulaci, jelikož se zredukuje velikost úbytku napětí na vodičích. Obvyklá hodnota indukčnosti svazkového vedení se pohybuje okolo 1 mH/km.

### 3.4 Kapacita

Dále uvedené odvození vztahů zabývajících se problematikou kapacity vychází z algoritmu publikovaném v [13].

Je uvažován transponovaný napěťově vyvážený systém. Při řešení systému tvořeného z více vodičů, jež se nachází nad povrchem země, se musí pro stanovení výsledné kapacity uvažovat dílčí kapacitní vazby mezi jednotlivými vodiči a mezi vodiči a zemí, které mají spolu s napětím na jednotlivých vodičích vliv na rozložení elektrického náboje v systému.

V případě námi zkoumaného třívodičového systému jsou respektovány 3 dílčí kapacity proti zemi a 3 dílčí kapacity mezi jednotlivými vodiči (Obr. 3.6).



Obr. 3.6 Kapacitní vazby [13]

Vztah mezi napětími a náboji vodičů může být popsán použitím potenciálových koeficientů (23), jejichž hodnoty závisí na geometrickém uspořádání vedení. Vztahy pro jejich výpočet jsou odvozeny z metody zrcadlení. Ta se využívá pro vyšetření rozložení elektrostatického pole vícevodičových soustav nacházejících se nad rovinou země. Metoda zobrazí jednotlivé vodiče do opačné poloroviny v osové souměrnosti dle zemní roviny a přiřadí jim stejně veliký, ale opačně orientovaný náboj (Obr. 3.7).

Výsledný potenciál je pak dán součtem dílčích potenciálů.

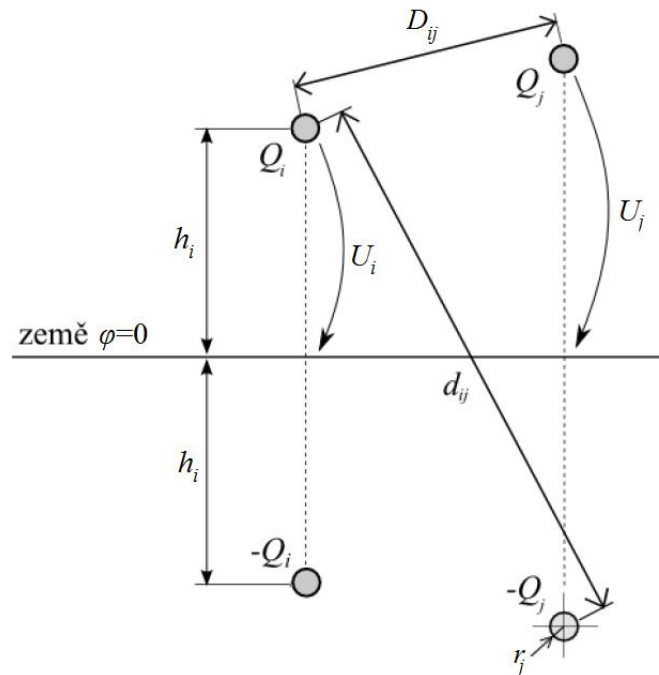
$$U = A \cdot q \quad (23)$$

kde  $U$  je vektor napětí vodičů,

$A$  je matice potenciálových koeficientů,

$q$  je vektor nábojů na vodičích.

Rozměr matice potenciálových koeficientů v systému  $s$  vodiči je  $A(m, m) = \{a_{ij}\}$ .



Obr. 3.7 Metoda zrcadlení [13]

Předpisy pro dílčí potenciálové koeficienty pak nabývají tvaru:

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (24)$$

- kde  $a_{ii}$  je vlastní potenciálový koeficient,  
 $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  
 $h_i$  je výška  $i$ -tého vodiče nad zemí,  
 $r_i$  je vlastní poloměr  $i$ -tého vodiče.

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{d_{ij}}{D_{ij}}\right) \quad (25)$$

- kde  $a_{ij}$  je vzájemný potenciálový koeficient,  
 $d_{ij}$  je vzdálenost  $i$ -tého vodiče od obrazu  $j$ -tého vodiče,  
 $D_{ij}$  je vzdálenost  $i$ -tého vodiče od  $j$ -tého vodiče.

Řešením rovnice (23) pro náboje na vodičích se dospěje ke tvaru:

$$\mathbf{q} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (26)$$

Provedením inverze k matici potenciálních koeficientů se získá matice kapacitních koeficientů  $\mathbf{B}$ , pro níž platí výraz:

$$\mathbf{B} = \{\beta_{ij}\} = \mathbf{A}^{-1} \quad (27)$$

- kde  $\beta_{ij}$  je kapacitní koeficient.

Pomocí kapacitních koeficientů se definuje kapacita vodičů vůči zemi a parciální kapacita mezi dvěma vodiči:

$$C_{ii} = \sum_{j=1}^m \beta_{ij} \quad (28)$$

kde  $C_{ii}$  je kapacita vodičů vůči zemi.

$$C_{ij} = -\beta_{ij} \quad (29)$$

$C_{ij}$  je parciální kapacita mezi vodiči.

V energetice se definuje u třífázového systému provozní (efektivní) kapacita mezi vodičem a zemí (30) respektující vlastní a vzájemné kapacity. Využívá se rovněž k určení kapacitního nabíjecího proudu vedení při připojení nezatíženého vedení ke zdroji napětí.

$$C_p = C_{ii} + 3C_{ij} \quad (30)$$

kde  $C_p$  je provozní kapacita mezi vodičem a zemí.

### 3.4.1 Kapacita třífázového svazkového vedení

Jsou-li jednotlivé fáze vedení tvořeny svazkovými vodiči, pro výpočet provozní kapacity se používá výše uvedený vzorec (30) pouze s jedním rozdílem, který spočívá v záměně vlastního poloměru vodiče  $r$  tzv. ekvivalentním poloměrem svazku  $r_n$ . Tato skutečnost je dána tím, že svazkový vodič vykazuje shodné vlastnosti jako jednoduchý vodič o poloměru rovném ekvivalentnímu poloměru svazkového vodiče.

Ekvivalentní poloměr svazkového vodiče je definován jako:

$$r_n = \sqrt[n]{r \cdot s^{n-1}} \quad (31)$$

Z výsledného vzorce je zřejmé, že použití svazkovové konfigurace má vliv na kapacitu vedení. Jakákoliv konstrukční změna, která zapříčiní nárůst ekvivalentního poloměru, vede k nárůstu kapacity proti zemi, tedy příčné kapacitní susceptance přenosového vedení, čímž má v porovnání s jednoduchým vedením vyšší nabíjecí proud. Obvyklá hodnota kapacity svazkového vedení se pohybuje okolo 10 nF/km.



## 3.5 Svod

Jeho velikost je dána nedokonalostí izolačního odporu použitých izolátorů a v největší míře projevy koróny.

Přibližné hodnoty svodu pro příslušné napěťové úrovně venkovních vedení jsou uvedeny v Tab. 3.1. Svod se vyznačuje velikostí řádově  $10^{-8}$  S/km, zatímco kapacitní susceptance nabývá hodnoty  $10^{-6}$  S/km. [14]

**Tab. 3.1 Přibližné hodnoty svodu [14]**

$U$ (kV)	110	220	400
$G$ (nS/km)	36÷50	25÷36	14÷20

Na vedení zapříčiňuje vznik přidavných činných ztrát, jejichž velikost závisí na druhu použitých vodičů a stavu jejich povrchu, hodnotě napětí a panujících atmosférických podmínkách, zejména na tlaku, teplotě a vlhkosti.

Velikost svodových ztrát třífázového venkovního vedení lze početně určit jako:

$$\Delta P_S = 3 \cdot U_f \cdot I_S = 3 \cdot U_f^2 \cdot G = U^2 \cdot G \quad (32)$$

kde  $U_f$  je fázové napětí,  
 $I_S$  je svodový proud,  
 $U$  je sdružené napětí.

Před tímto způsobem se však zpravidla upřednostňuje jejich stanovení na základě údajů získaných z měření na stávajícím vedení.

### 3.5.1 Svod svazkového vedení

Jak již bylo v práci uvedeno, díky použití svazkových vodičů dochází k podstatnému omezení maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů, což má za následek zvýšení hodnoty kritického napětí pro vznik korónových výbojů z čehož vyplývají podstatně nižší projevy koróny a především nižší ztráty korónou, respektive svodem, nežli u vedení s jednoduchými vodiči.

Problematika koróny, respektive ztrát korónou je v této práci podrobněji popsána v kapitole 5, respektive podkapitole 5.1.

### 3.6 Vliv svazkových vodičů na parametry vedení

Při použití svazkových vodičů na přenosovém vedení se volí počet parciálních vodičů a velikost kroku s ohledem na požadovanou velikost přenosové kapacity vedení. Ve vyjíměčných případech tuto volbu může ovlivnit i požadovaná velikost indukčnosti, kapacity a vlnové impedance. [15]

Jelikož na vedení vvn platí relace, že  $X_L \gg R$  a  $X_C \gg G$ , můžeme toto vedení při výpočtu vlnové impedance označit jako bezeztrátové. Vlnová impedance svazkového vedení nabývá menší hodnoty díky nižší indukčnosti a vyšší kapacitě v porovnání s jednoduchým vedením. Použitím svazkových vodičů dochází k navýšení velikosti přirozeného výkonu vedení, poněvadž je jeho hodnota dána právě velikostí vlnové impedance, což má za následek posílení přenosové kapacity vedení.

V případě velmi dlouhých vedení a zejména na hladinách zvlášť vysokého napětí má značný význam snížení indukčnosti a navýšení kapacity zvětšením kroku svazku z obvykle používané hodnoty 0,4 m až na nejvyšší možnou vzdálenost limitovanou korónou činící 0,6 m. Tato konstrukční úprava má znatelný ekonomický dopad daný nárůstem statických a dynamických limitů vedení. [9]

## 4. Elektrické pole v okolí svazkových vodičů

### 4.1 Popis elektrostatického pole

Tato kapitola se zabývá vyšetřováním jedné části stacionárního elektromagnetického pole, konkrétně dvojdimenzionálního rovinného elektrostatického pole. Jedná se tedy o pole časově neproměnné charakterizované veličinami, jež jsou funkcí dvou geometrických souřadnic. Lze tedy zkoumat elektrické pole bez uvážení vlivu pole magnetického a omezit se na projevy nepohybujících se nábojů v dielektriku. Při tvorbě dále uvedeného popisu elektrostatického pole bylo čerpáno z publikace [16].

Základní veličinou charakterizující elektrostatické pole ve vakuu je intenzita elektrického pole  $\mathbf{E}$ . V látkovém prostředí je dále definována elektrická indukce  $\mathbf{D}$ , která je s intenzitou elektrického pole svázána pomocí materiálové charakteristiky  $\varepsilon$  vztahem:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad (33)$$

Tyto veličiny slouží k lokálnímu popisu pole.

K popisu elektrostatického pole se v zásadě používá druhá a třetí Maxwellova rovnice (dále jen MR). MR lze formulovat v integrálním, nebo diferenciálním tvaru. MR v integrálním tvaru postihují elektrostatické pole v určité prostorové oblasti, zatímco v případě popisu konkrétního bodu v této oblasti se využívá diferenciální tvar, což je výhodné při provádění výpočtů. Na rozhraní dvou prostředí diferenciální tvary MR pozbývají platnosti, jelikož platí pouze v regulárních bodech.

Diferenciální tvary MR:

2. MR

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (34)$$

3. MR

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (35)$$

Ze vztahu (34) vyplývá, že se jedná o nevírové, čili potenciální pole. Rovnice (35) poukazuje na zřídlovost elektrostatického pole.

Při řešení elektrostatického pole se využívá postup za použití skalárního elektrického potenciálu  $\varphi$ , z něhož lze následně určit vektory  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{D}$  pomocí vztahů (36), respektive (33). Tímto se dosáhne náhrady vektorového pole skalárním polem, z čehož plyne o poznání snazší řešitelnost analytickými, nebo numerickými metodami.

Skalární elektrický potenciál  $\varphi$  je definován jako:

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi \quad (36)$$

Takto zavedený tvar respektuje směr vektoru  $\mathbf{E}$  od místa s vyšší hodnotou skalárního elektrického potenciálu k místu s nižší hodnotou.

Dosazením vztahu (33) do 3. MR (35) se obdrží zápis:

$$\text{div } \varepsilon \cdot \mathbf{E} = \rho \quad (37)$$

při uvážení lineárního izotropního dielektrika platí že  $\varepsilon = \text{konst.}$  a lze tedy psát:

$$\varepsilon \cdot \text{div } \mathbf{E} = \rho \quad (38)$$

po dosazení vztahu (36) do předchozího předpisu (38) se získá:

$$\varepsilon \cdot \text{div } (-\text{grad}\varphi) = \rho \quad (39)$$

úpravou této rovnice se dospěje k výrazu:

$$\text{div } \text{grad}\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (40)$$

který lze dále přepsat do obvykle používaného tvaru Poissonovy rovnice:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (41)$$

se kterou se pracuje v regulárních bodech a která v místech bez elektrického náboje přechází v rovnici Laplaceovu:

$$\Delta\varphi = 0 \quad (42)$$

Na rozhraní mezi dvěma dielektriky o permitivitách  $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$  platí spojitost potenciálu, tedy:

$$\varphi_2 = \varphi_1 \quad (43)$$

a pro  $\sigma = 0$  dále platí:

$$\varepsilon_2 \cdot \frac{\partial\varphi_2}{\partial n} - \varepsilon_1 \cdot \frac{\partial\varphi_1}{\partial n} = 0 \quad (44)$$

Určení skalárního elektrického potenciálu vychází z popisu prostřednictvím parciálních diferenciálních rovnic. Jednoznačnosti řešení se dosáhne doplněním konkrétních údajů o velikosti hledaného potenciálu, respektive o jeho derivaci v jistých bodech definiční oblasti. Těmi jsou převážně samotné okraje definičních oblastí, čímž se naformulují tzv. okrajové podmínky, ve kterých je zahrnut geometrický charakter řešeného pole. Rozeznávají se v zásadě tři případy okrajových podmínek. Při znalosti hodnoty potenciálu na hranici se hovoří o Dirichletově okrajové podmínce. V případě známé hodnoty derivace potenciálu ve směru vnější normály se jedná

o Neumannovu podmínku. Při jejich vzájemné kombinaci se definuje smíšená okrajová podmínka.

## 4.2 Numerické řešení elektrostatického pole

Během tvorby této podkapitoly pojednávající o numerickém řešení elektrostatického pole bylo čerpáno z publikace [16].

Kvůli praktickým aspektům uspořádání přenosového vedení, jako je např. průhyb vodičů, blízkost stožárů, nerovnost povrchu země atd., je vyšetřování elektrostatického pole v okolí svazkových vodičů komplexním problémem. Jeho šetření se s několika předpoklady (vodiče jsou považovány za ekvipotenciální plochy, zemní rovina je udržována na nulovém potenciálu atd.) provádí na zjednodušeném modelu. Ten se vytvoří z fyzikálně reálného systému omezením se pouze na jeho vlastnosti, které zkoumaný jev přímo ovlivňují. Po jeho popisu pomocí zákonů teorie elektromagnetického pole se obdrží spojitý matematický model, jenž se vzhledem ke složitosti analyzuje numerickým řešením. Přechází se tedy k diskrétnímu matematickému modelu, jež je v našem případě vytvořen pomocí počítačového programu Agros 2D. Takto vzniklým programem se simuluje řešený reálný systém.

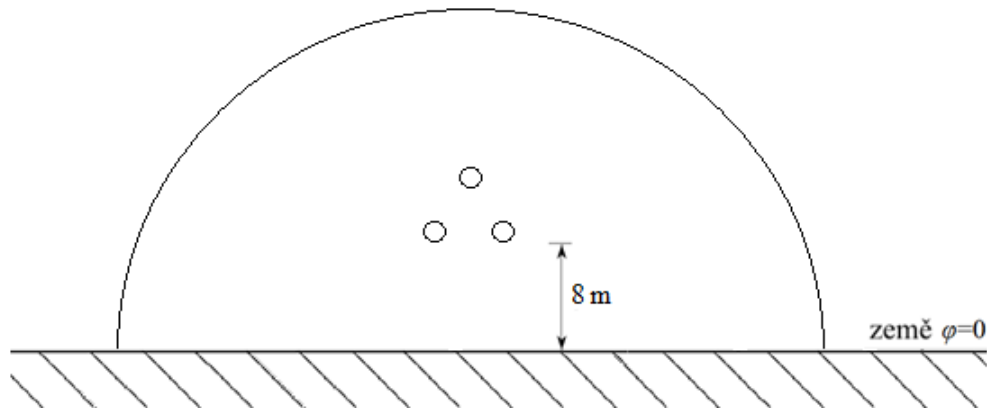
Do matematického modelu se implementují geometrické parametry a rozměry vyšetřovaných oblastí, jímž se následně přidělí hodnoty materiálových charakteristik, permitivit, které popisují vlastnosti dílčích prostředí.

Použitý program Agros 2D pro řešení využívá numerickou metodu označovanou jako metoda konečných prvků. V prvním kroku je provedena diskretizace, tzv. „meshování“, vyšetřovaných oblastí trojúhelníkovou sítí, jež je vygenerována automaticky, označovaná jako triangulace. Uživateli je umožněno nastavit počet zjemnění sítě v rámci celé řešené oblasti, nebo se ve stěžejních oblastech provádí ruční korigování sítě, čímž se dosáhne zvětšení přesnosti obdrženého řešení. Aproximace oblasti je provedena konečným počtem trojúhelníků, jež se označují jako konečné prvky a vrcholy, ve kterých se stýkají, se nazývají uzly. Následně se aproximuje rozložení potenciálu uvnitř konečného prvku zvoleným stupněm polynomu.

Na základě výsledků a následně dopočtených veličin je provedena jejich grafická interpretace v tzv. Post 2D, která umožňuje mimo jiné zobrazení průběhů siločar, ekvipotenciál a příslušných vektorů.

## 4.3 Modelování a simulace elektrostatického pole v okolí svazkových vodičů

Náplní této podkapitoly je vyšetřování elektrostatického pole v okolí svazkových vodičů. To je prováděno na matematickém modelu jedné fáze venkovního vedení. Takto vzniklý objekt je umístěn ve výšce 8 m nad zemským povrchem a ohraničen umělou hranicí (Obr. 4.1).



**Obr. 4.1 Schématické znázornění matematického modelu**

V subkapitole 4.3.1 je nastíněn postup při tvorbě zmíněného matematického modelu a v následující subkapitole (4.3.2) je ověřena jeho konvergence.

Na základě vlastních simulací je zkoumána závislost velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na změně kroku (subkapitola 4.3.3) a na změně počtu parciálních vodičů ve svazku (subkapitola 4.3.4). V subkapitole 4.3.5 je vyšetřována velikost intenzity elektrického pole na povrchu jednoduchého a dvojsvazkového vodiče. Závěrem je ověřována platnost vzorce pro výpočet ekvivalentního poloměru svazkového vodiče (subkapitola 4.3.6).

Při jednotlivých simulacích bylo elektrostatické pole vyšetřováno pro vrcholovou hodnotu fázového napětí (tj. 326,6 kV pro hladinu 400 kV a 179,6 kV pro úroveň 220 kV).

### 4.3.1 Vytvoření matematického modelu

Předmětem výchozího zkoumání byl trojsvazek představující jednu fázi venkovního vedení s krokem 0,4 m tvořený třemi vodiči nesoucí označení 490-AL1/64-ST1A o průměru 30,6 mm. Tento systém byl namodelován v počítačovém programu Agros 2D.

Počáteční počet zjemnění sítě  $N$  v rámci celé řešené oblasti byl zvolen 1, rozložení skalárního potenciálu elektrického pole uvnitř konečného prvku bylo aproximováno 2. stupněm polynomu  $M$  a poloměr umělé hranice  $r_H$  byl zvolen 250 m (Obr. 4.2, Obr. 4.4).

Na základě zkoumání vlivu těchto proměnných ve smyslu zmenšování velikosti poloměru (Tab. 4.1) a zvyšování počtu zjemnění sítě a stupně polynomu (Tab. 4.2) na přesnost výsledků řešení nepřesahující chybu 1 % byly při sledování elektrických nábojů na povrchu parciálních vodičů  $Q_S$  a na povrchu umělé hranice a země  $Q_{HZ}$  stanoveny parametry výsledného dále simulovaného systému.

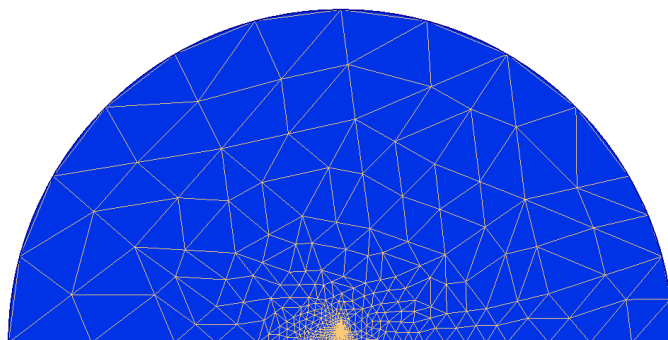
**Tab. 4.1 Zkoumání velikosti poloměru umělé hranice**

$r_H$ (m)	$N$ (-)	$M$ (-)	$Q_S$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_{HZ}$ ( $\mu\text{C}$ )	Chyba vůči * (%)
250*	1	2	3,720	3,807	
200	1	2	3,719	3,815	0,027
150	1	2	3,718	3,813	0,054
100	1	2	3,712	3,807	0,215
60	1	2	3,694	3,783	0,699
55	1	2	3,688	3,773	0,860
50	1	2	3,681	3,759	1,048
45	1	2	3,672	3,764	1,290
40	1	2	3,659	3,740	1,640
30	1	2	3,611	3,692	2,930
20	1	2	3,480	3,554	6,452
10	1	2	2,799	2,859	24,758

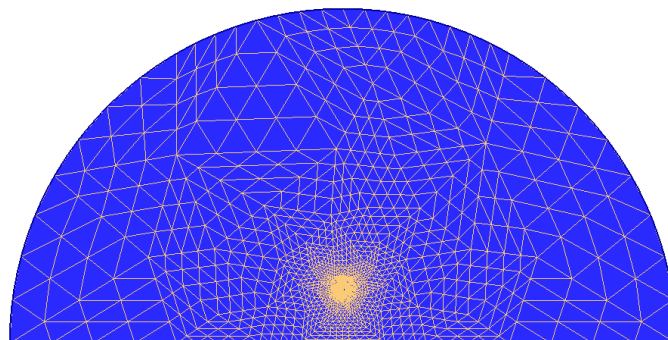
**Tab. 4.2 Zkoumání počtu zjemnění a stupně polynomu**

$r_H$ (m)	250*	50	50**	50***	50****
$N$ (-)	1	1	2	2	3
$M$ (-)	2	2	2	3	2
$Q_S$ ( $\mu\text{C}$ )	3,720	3,681	3,751	3,752	3,747
$Q_{HZ}$ ( $\mu\text{C}$ )	3,807	3,759	3,752	3,751	3,753
Chyba vůči * (%)		1,048	-0,833	-0,860	-0,726
Chyba vůči ** (%)		1,866		-0,027	0,107
Chyba vůči *** (%)		1,892	0,027		0,133
Chyba vůči **** (%)		1,761	-0,107	-0,133	

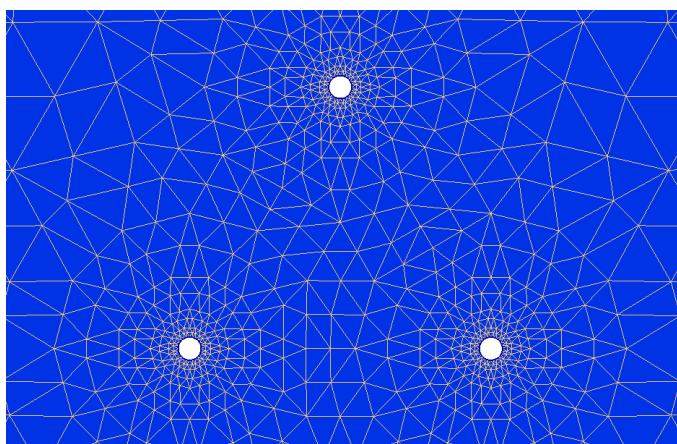
Z provedených simulací byl stanoven poloměr umělé hranice 50 m a počet zjemnění sítě v rámci celé řešené oblasti 2. Rozložení skalárního potenciálu elektrického pole uvnitř konečného prvku bylo aproximováno 2. stupněm polynomu (Obr. 4.3, Obr. 4.5).



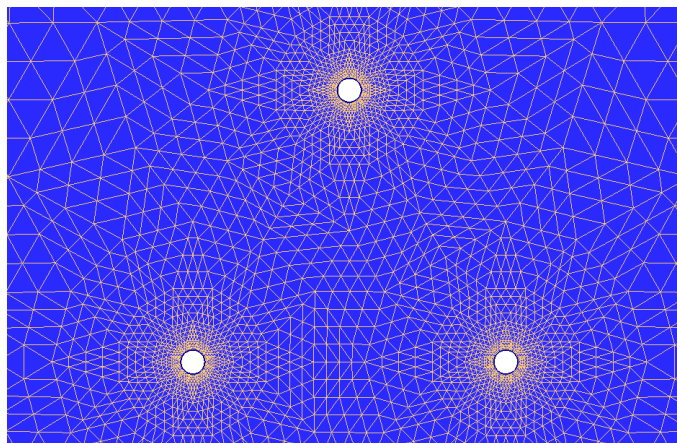
Obr. 4.2 Počáteční podoba matematického modelu systému ( $N=1, M=2, r_H=250$  m)



Obr. 4.3 Výsledná podoba matematického modelu systému ( $N=2, M=2, r_H=50$  m)



Obr. 4.4 Detail počáteční podoby matematického modelu systému ( $N=1, M=2, r_H=250$  m)



Obr. 4.5 Detail výsledné podoby matematického modelu systému ( $N=2, M=2, r_H=50$  m)



### 4.3.2 Ověření konvergence matematického modelu

U takto vytvořeného matematického modelu v počítačovém programu se musí před jeho využíváním k simulaci námi řešeného reálného systému a užitím získaných výsledků pro další aplikace ověřit jeho korektnost provedením testu konvergence. Ten lze obecně provést dvěma dále popsányými způsoby.

V prvním případě je za konstantní parametr uvažován zvolený stupeň polynomu aproximující rozložení skalárního potenciálu elektrického pole uvnitř konečného prvku a počet zjemnění sítě v rámci celé řešené oblasti. Proměnou veličinou, na níž sledujeme velikost elektrických nábojů na povrchu parciálních vodičů a na povrchu umělé hranice a země, je poloměr umělé hranice. Při jeho zvětšování dochází v případě správné funkce programu k poklesu velikosti chyby vzhledem ke skutečnému řešení.

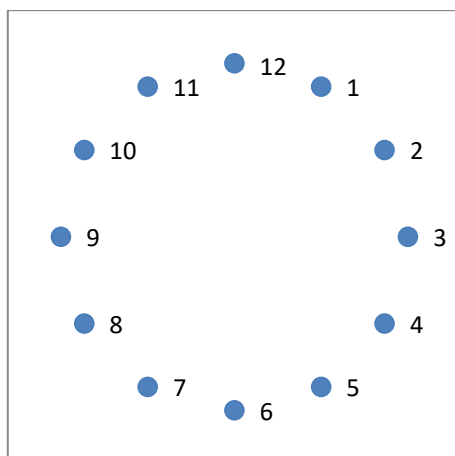
Ve druhém případě jsou parametry matematického modelu uvažovány v opačném sledu. Velikost poloměru umělé hranice je fixní a variabilními hodnotami jsou stupeň polynomu a počet zjemnění sítě. Při jejich navyšování se konvergence projevuje v nárůstu přesnosti sledované veličiny, již je opět velikost elektrických nábojů na povrchu parciálních vodičů a na povrchu umělé hranice a země.

Test konvergence výsledného matematického modelu byl nepřímo proveden v souvislosti se stanovením jeho parametrů v předcházející subkapitole 4.3.1. Na základě údajů z Tab. 4.1 a Tab. 4.2 byla ověřena jeho konvergence.

Výsledný matematický model byl dále dle potřeby modifikován v různé varianty popsané v následujících subkapitolách.

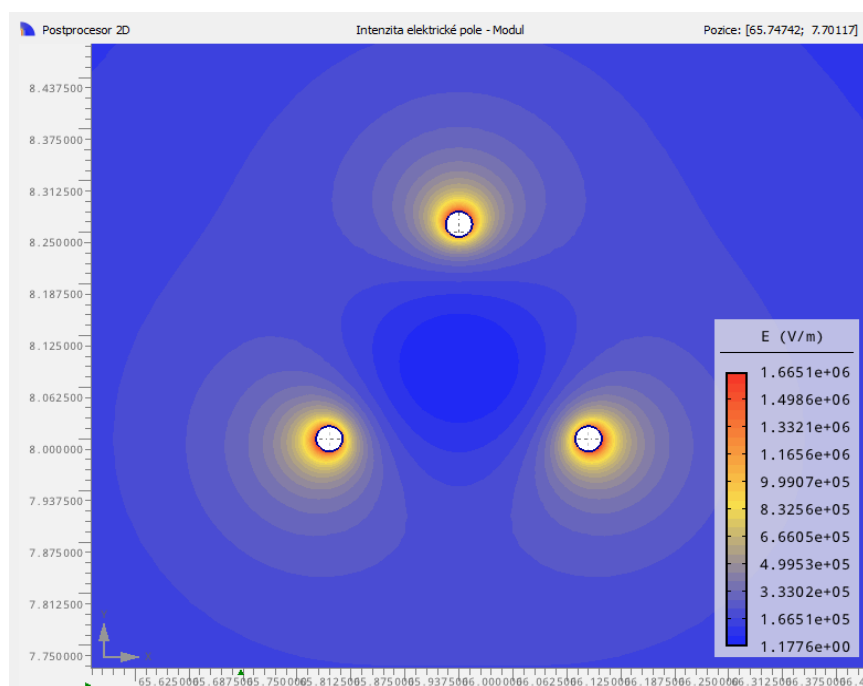
### 4.3.3 Závislost velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na změně kroku

V této subkapitole je zkoumána závislost velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na změně kroku. Byly zvoleny tři kroky 0,3 m; 0,4 m a 0,5 m. Pro každou z těchto variant byla provedena simulace, která určila hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů ve 12 definovaných bodech schematicky znázorněných na Obr. 4.6.

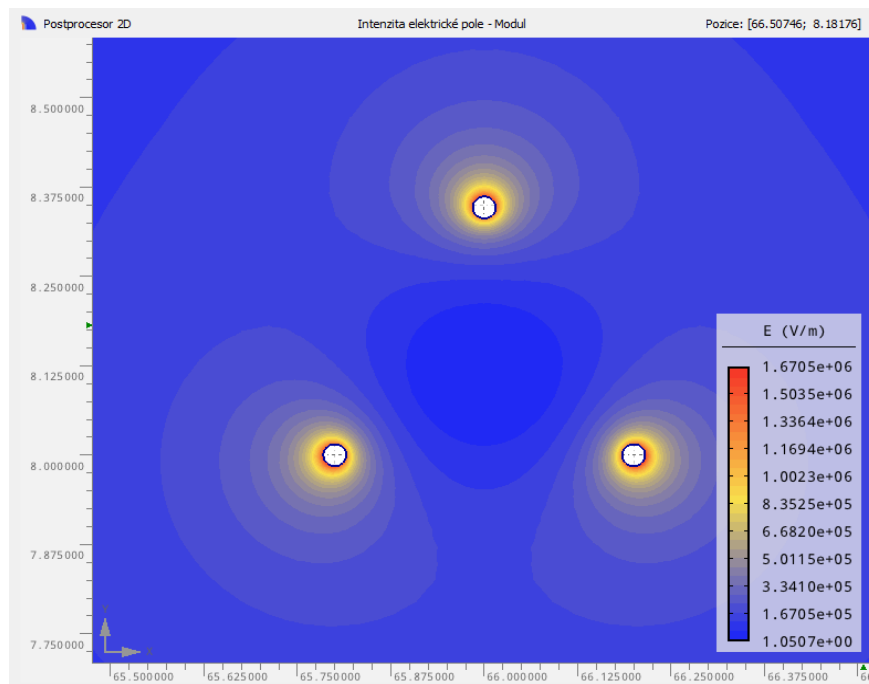


**Obr. 4.6 Označení a umístění bodů na povrchu parciálního vodiče**

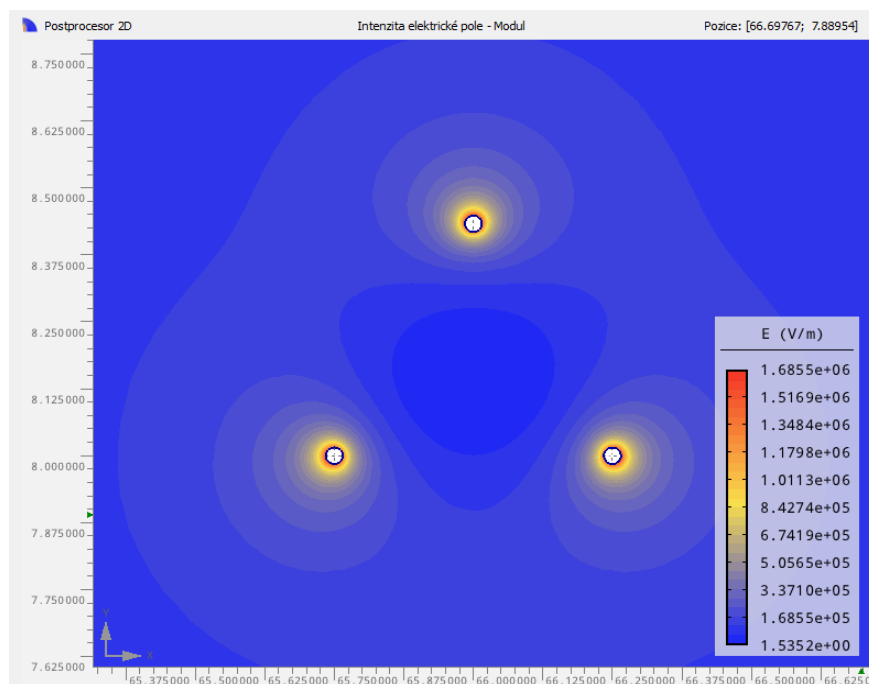
Výstupy z provedené počítačové simulace jsou zobrazeny na Obr. 4.7, Obr. 4.8 a Obr. 4.9. Získané údaje pro jednotlivé parciální vodiče jsou dle jejich umístění uvedeny v Tab. 4.3, Tab. 4.4 a Tab. 4.5. Grafické znázornění těchto hodnot je provedeno na Obr. 4.10, Obr. 4.11 a Obr. 4.12.



**Obr. 4.7 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku při  $s=0,3$  m**



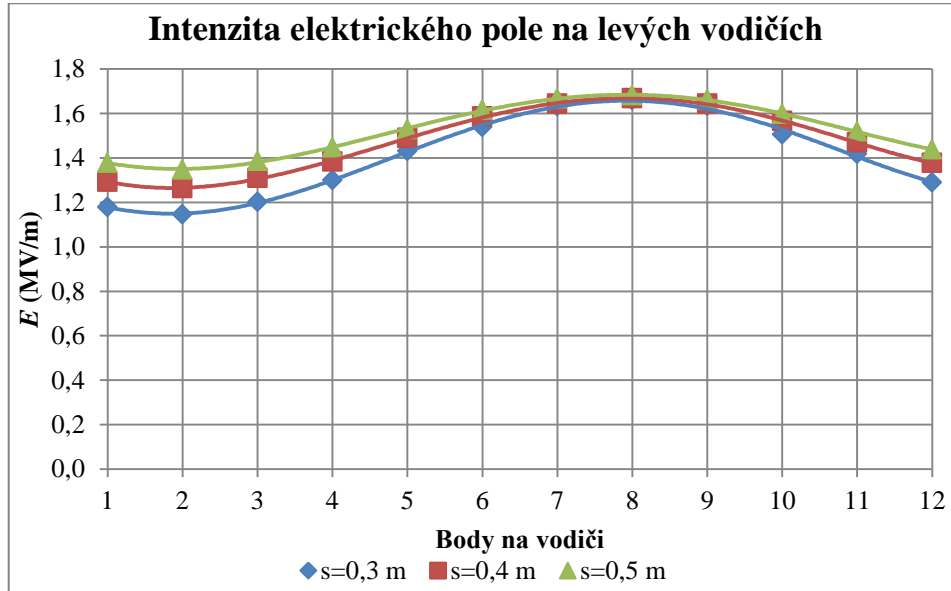
Obr. 4.8 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku při  $s=0,4$  m



Obr. 4.9 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku při  $s=0,5$  m

**Tab. 4.3 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu levých vodičů**

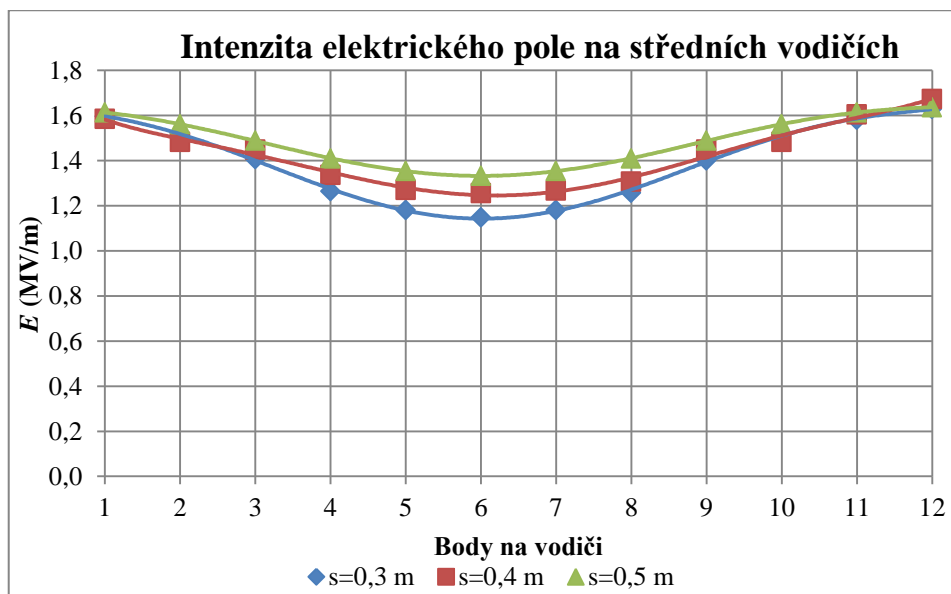
s (m)	E (MV/m)	Označení bodů na povrchu levých vodičů											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,3		1,179	1,146	1,201	1,300	1,430	1,538	1,632	1,659	1,633	1,506	1,418	1,290
0,4		1,293	1,264	1,309	1,383	1,489	1,586	1,643	1,668	1,644	1,566	1,469	1,377
0,5		1,378	1,347	1,386	1,446	1,529	1,616	1,667	1,681	1,662	1,598	1,518	1,438



**Obr. 4.10 Intenzita elektrického pole na levých vodičích**

**Tab. 4.4 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu středních vodičů**

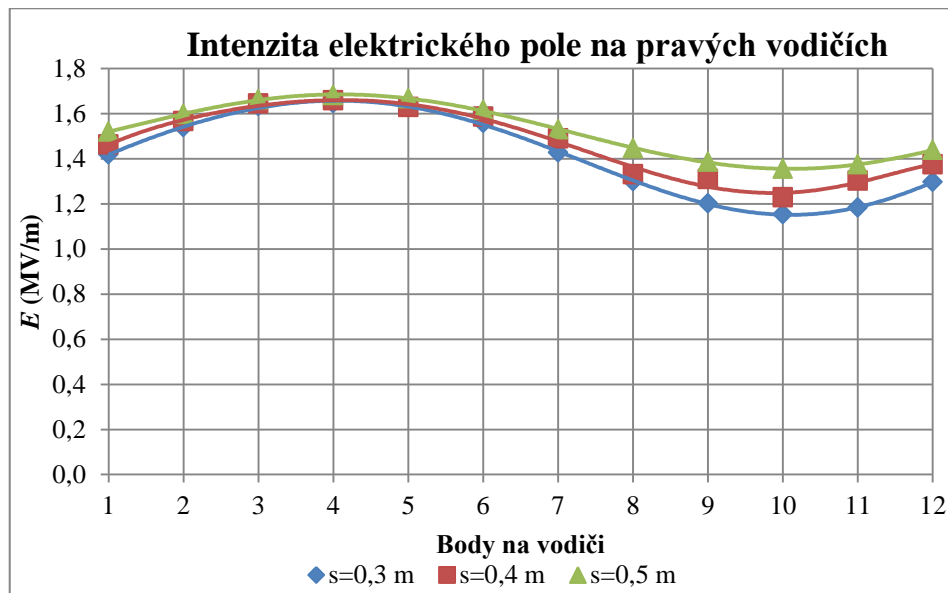
s (m)	E (MV/m)	Označení bodů na povrchu středních vodičů											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,3		1,596	1,516	1,406	1,264	1,181	1,148	1,180	1,257	1,400	1,515	1,581	1,629
0,4		1,584	1,482	1,448	1,337	1,270	1,256	1,267	1,306	1,448	1,482	1,604	1,672
0,5		1,613	1,560	1,488	1,409	1,353	1,332	1,353	1,409	1,488	1,560	1,613	1,636



**Obr. 4.11 Intenzita elektrického pole na středních vodičích**

**Tab. 4.5 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu pravých vodičů**

s (m)		Označení bodů na povrchu pravých vodičů											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,3	$E$ (MV/m)	1,418	1,539	1,633	1,645	1,635	1,558	1,427	1,300	1,202	1,153	1,183	1,296
0,4		1,463	1,566	1,644	1,658	1,629	1,586	1,489	1,331	1,309	1,228	1,302	1,375
0,5		1,520	1,598	1,662	1,681	1,667	1,616	1,529	1,446	1,386	1,355	1,374	1,438

**Obr. 4.12 Intenzita elektrického pole na pravých vodičích**

Veškeré odečtené hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů u námi zkoumaných variant splňují její nejvyšší stanovený limit, u kterého je efektivní hodnota omezena na 13,6 kV/cm, respektive maximální na 19,23 kV/cm.

Na základě výsledků lze vyvodit několik závěrů o vlivu změny kroku na velikost intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů. Je zřejmé, že nedochází ke změně maximální hodnoty se zmenšujícím se krokem, lze však pozorovat pokles minima, čímž dochází k nárůstu rozdílu mezi těmito dvěma krajními hodnotami. Tím dochází k vytváření gradientů, které mohou vyústit ve vznik koróny.

Dále je možno pozorovat, že na spodních vodičích dosahuje maximální intenzita elektrického pole vyšší hodnoty, nežli je tomu v případě horních vodičů, což je způsobeno vlivem elektrického náboje zemní roviny vzniklého elektostatickou indukcí. Během volby uspořádání svazkového vodiče je tedy nezbytné dbát zvýšenou pozornost na provedení a umístění nejspodnějšího parciálního vodiče.

Předpoklad analogie chování svazkového vodiče malého kroku jednoduchému vodiči je rovněž potvrzen. Lze si povšimnout, že se zmenšujícím se krokem dochází na přilehlých stranách parciálních vodičů k poklesu intenzity elektrického pole, která by při jejich splnutí nabyla nulové hodnoty.

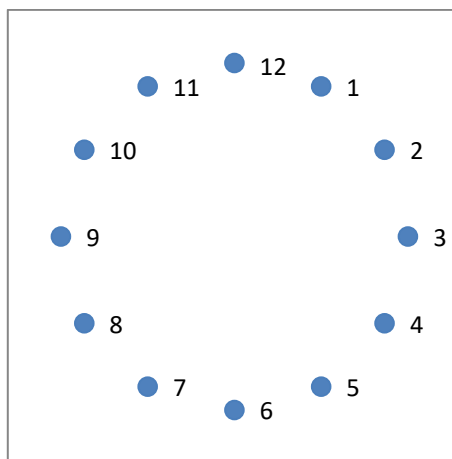
### 4.3.4 Závislost velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na jejich počtu

Náplní této subkapitoly je analyzování velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů v závislosti na jejich počtu. Jako výchozí model byl použit již zmíněný trojsvazek, který byl dále modifikován v různé varianty. Pro možnost vzájemného porovnání byl zachován neměnný průřez, daný dovolenou proudovou zatížitelností odpovídající požadavku na přenášený výkon, a konstantní poloměr svazkového kruhu. Při neměnnosti těchto parametrů byly vytvořeny modely dvojsvazku, čtyřsvazku a šestisvazku, jejichž parametry jsou včetně rozměrů trojsvazku uvedeny v Tab. 4.6.

**Tab. 4.6** Parametry variantních svazkových vodičů

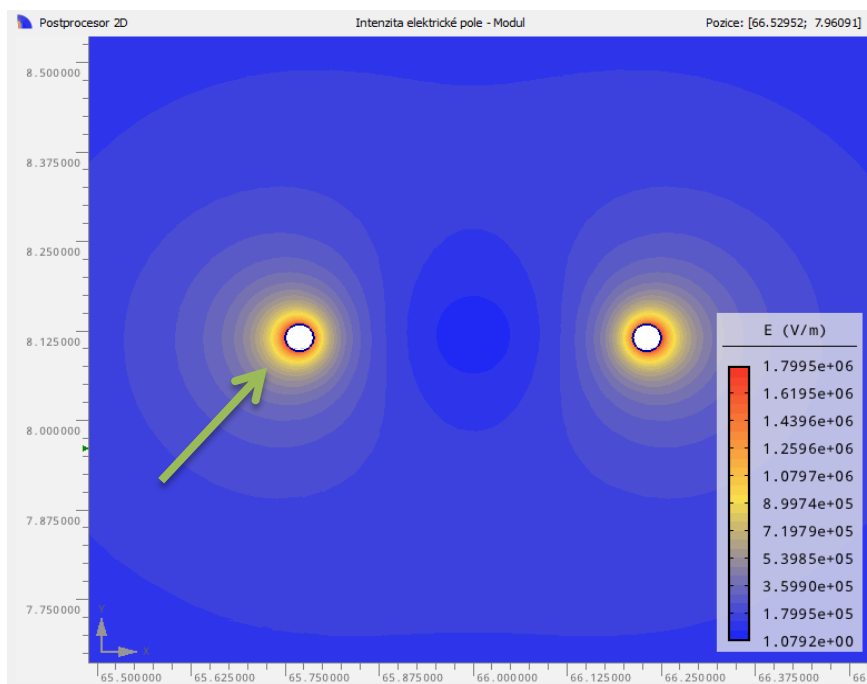
$n$ (-)	$s$ (m)	$r$ (m)
2	0,462	0,019
3	0,400	0,015
4	0,327	0,013
6	0,231	0,011

Pro každou z těchto variant byla provedena simulace, která určila hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu levých, respektive levých dolních parciálních vodičů ve 12 definovaných bodech schematicky znázorněných na Obr. 4.13.

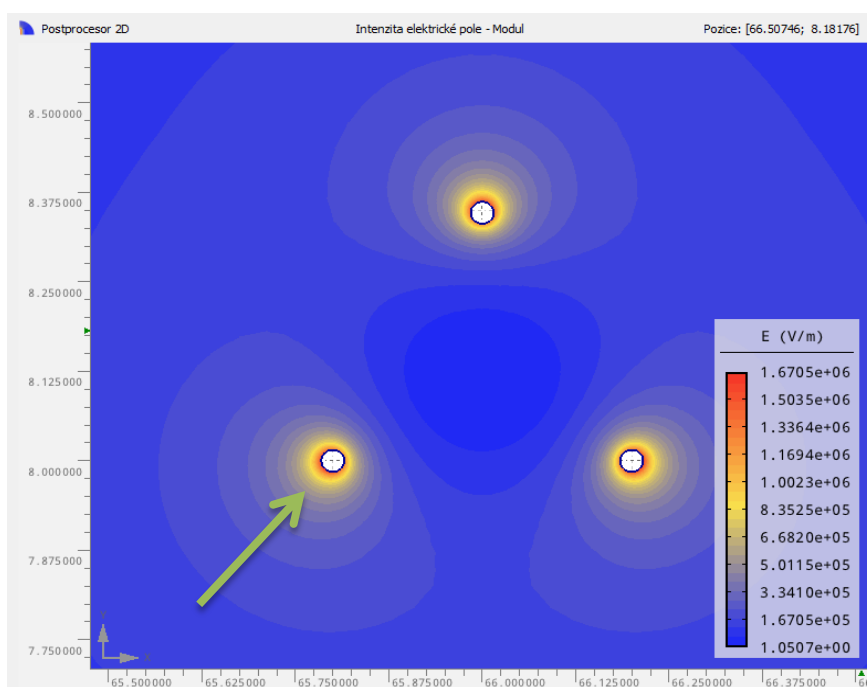


**Obr. 4.13** Označení a umístění bodů na povrchu parciálního vodiče

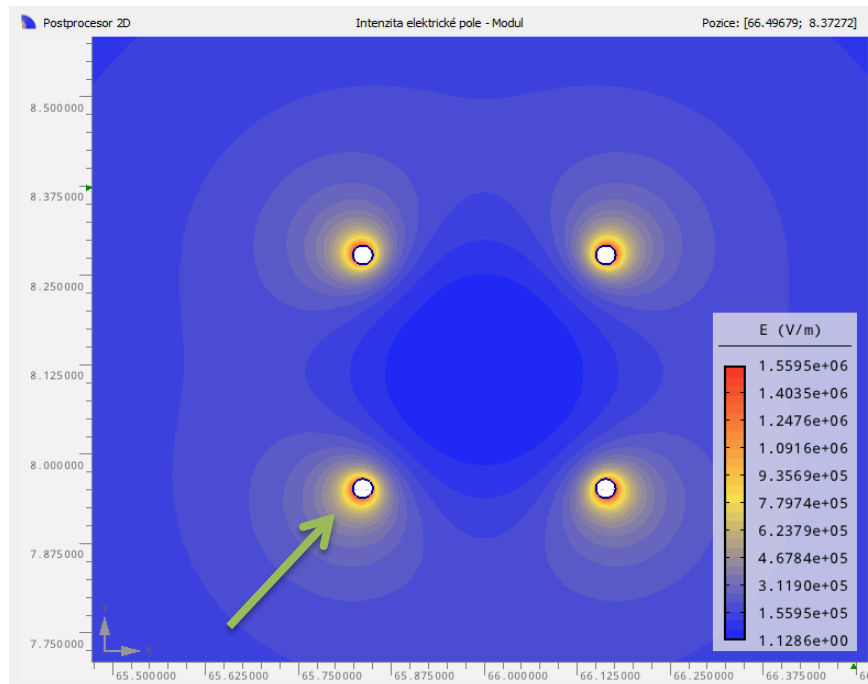
Výstupy z provedené počítačové simulace (spolu s označením zkoumaných parciálních vodičů) jsou zobrazeny na Obr. 4.14, Obr. 4.15, Obr. 4.16 a Obr. 4.17. Získané údaje pro jednotlivé parciální vodiče zkoumaných modifikací jsou dle jejich umístění uvedeny v Tab. 4.7. Grafické znázornění těchto hodnot je provedeno na Obr. 4.18.



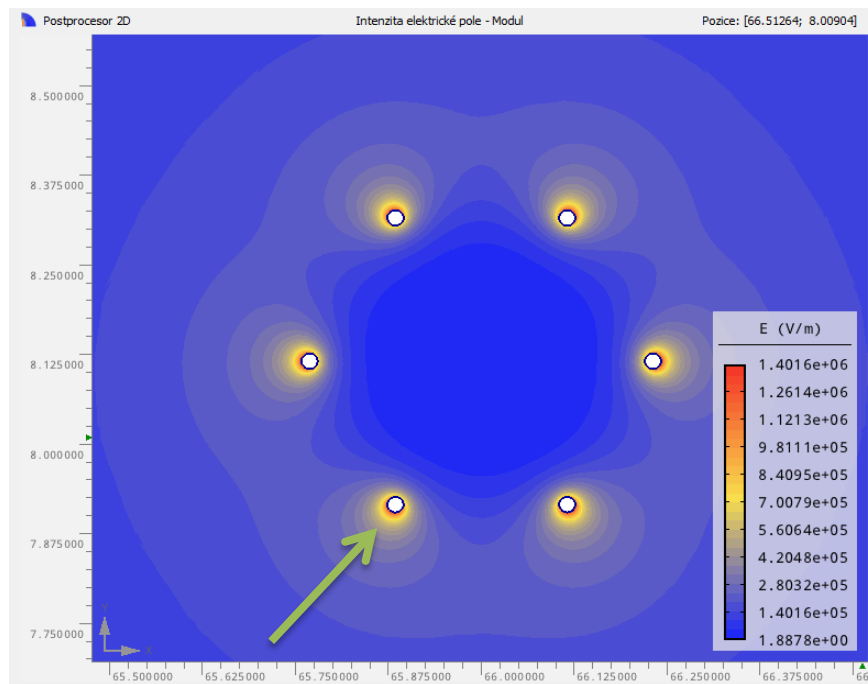
Obr. 4.14 Rozložení intenzity elektrického pole dvojsvazku



Obr. 4.15 Rozložení intenzity elektrického pole trojsvazku



Obr. 4.16 Rozložení intenzity elektrického pole čtyřsvazku

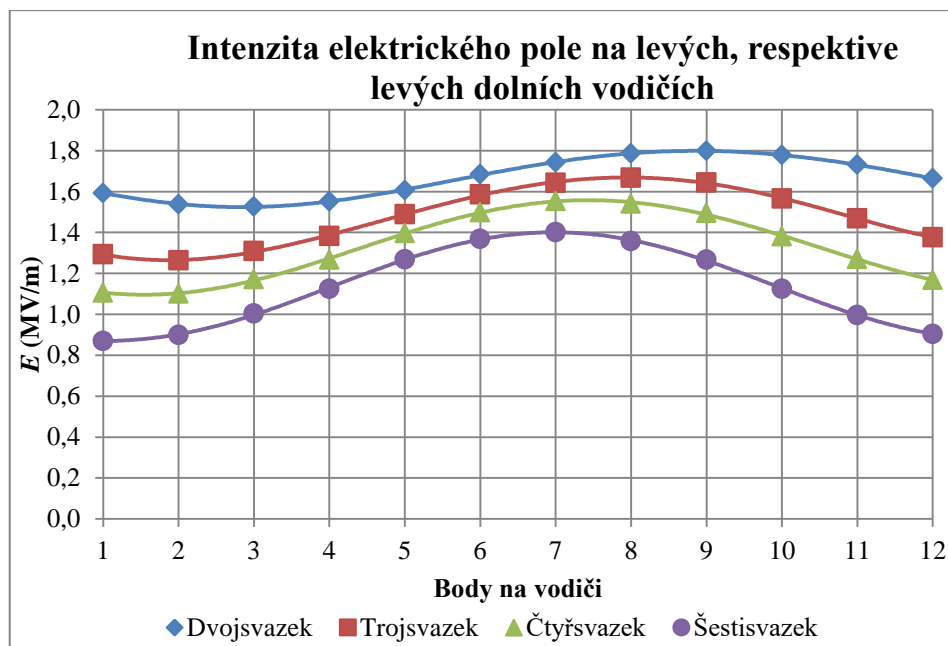


Obr. 4.17 Rozložení intenzity elektrického pole šestisvazku

Tab. 4.7 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu levých, respektive levých dolních vodičů

$n$ (-)	$E$ (MV/m)	Označení bodů na povrchu levého, respektive levého dolního vodiče											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2		1,593	1,538	1,527	1,552	1,606	1,684	1,743	1,787	1,799	1,778	1,731	1,664
3		1,293	1,264	1,309	1,383	1,489	1,586	1,643	1,668	1,644	1,566	1,469	1,377
4		1,106	1,101	1,171	1,267	1,397	1,499	1,553	1,541	1,495	1,381	1,270	1,168
6		0,870	0,900	1,004	1,125	1,268	1,368	1,402	1,358	1,267	1,125	0,997	0,904





Obr. 4.18 Intenzita elektrického pole na povrchu levých, respektive levých dolních vodičů

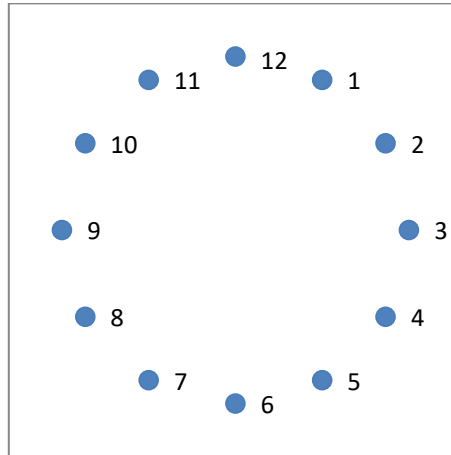
Na základě výsledků je možno konstatovat, že při vyšším počtu parciálních vodičů ve svazku klesá velikost intenzity elektrického pole po celém povrchu parciálních vodičů. Tím se snižuje pravděpodobnost vzniku koróny a potvrzuje se předpoklad analogie chování svazkového vodiče s větším počtem parciálních vodičů jednoduchému vodiči většího poloměru. S četností parciálních vodičů ve svazku však lze pozorovat nárůst diference mezi maximálními a minimálními hodnotami.

### 4.3.5 Zkoumání velikosti intenzity elektrického pole na povrchu vodiče na hladině 220 kV

V této subkapitole je zkoumána velikost intenzity elektrického pole na povrchu jednoduchého vodiče nesoucího označení TACSR/ACS 380/50 o průměru 27 mm, respektive na povrchu parciálního vodiče dvojsvazku s krokem 0,462 m realizovaném dvěma vodiči označenými 212-AL1/49-ST1 o průměru 21 mm na napěťové hladině 220 kV.

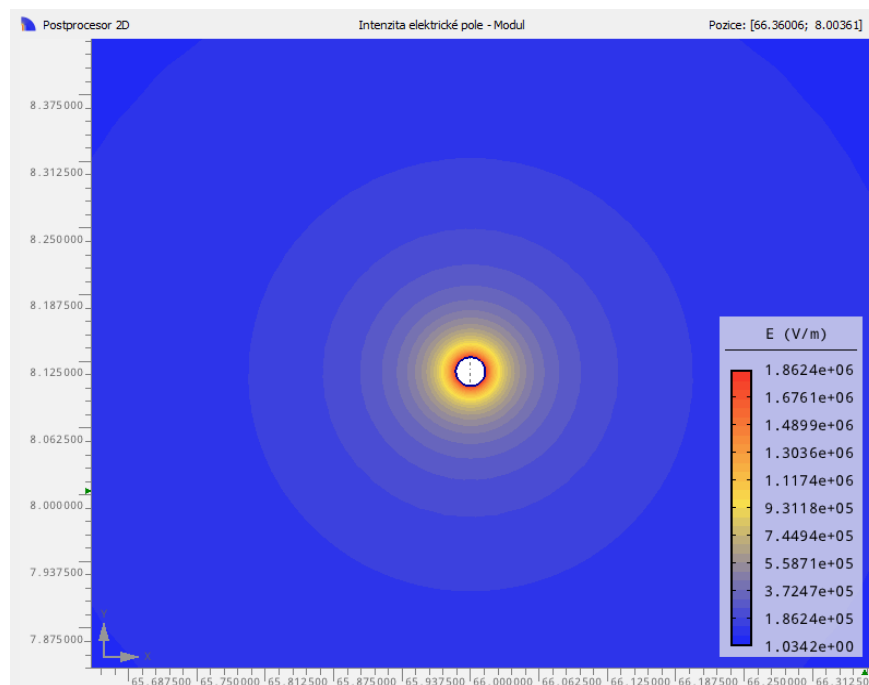
Cílem je porovnání dvou možných konfigurací vyznačujících se obdobnou proudovou zatížitelností danou požadavkem na velikost přenášeného výkonu, což umožňuje jejich případnou zaměnitelnost. Dále byl u dvojsvazku zachován shodný poloměr svazkového kruhu s variantami řešenými na hladině 400 kV, z čehož vyplývá příslušná velikost kroku.

Pro obě konfigurace byla provedena simulace, která určila hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu jednoduchého, respektive levého parciálního vodiče dvojsvazku ve 12 definovaných bodech schematicky znázorněných na Obr. 4.19.

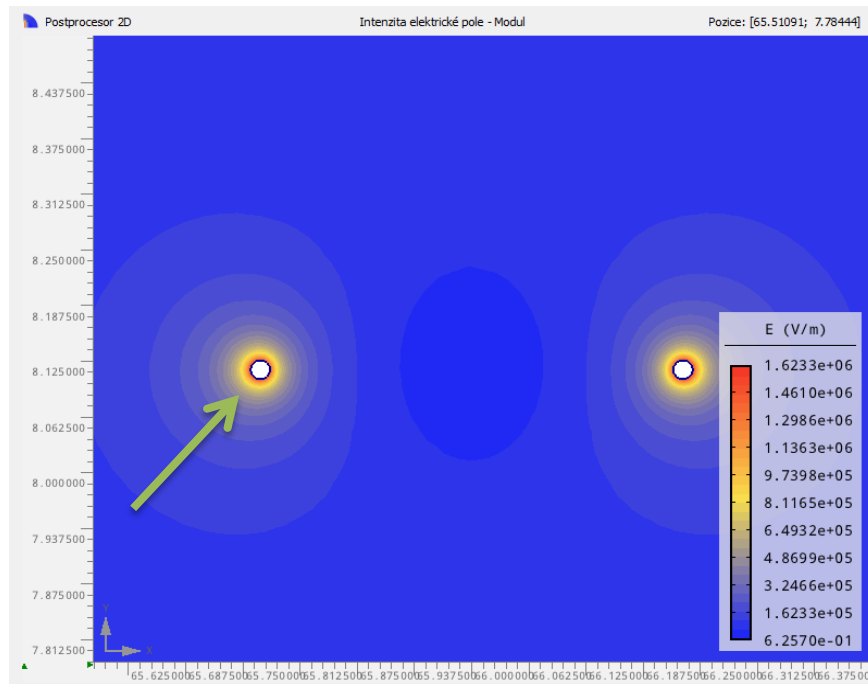


**Obr. 4.19** Označení a umístění bodů na povrchu jednoduchého, respektive parciálního vodiče

Výstupy z provedené počítačové simulace (spolu s označením zkoumaného parciálního vodiče) jsou zobrazeny na Obr. 4.20 a Obr. 4.21. Získané údaje pro jednoduchý, respektive levý parciální vodič jsou dle jejich umístění uvedeny v Tab. 4.8. Grafické znázornění těchto hodnot je provedeno na Obr. 4.22.



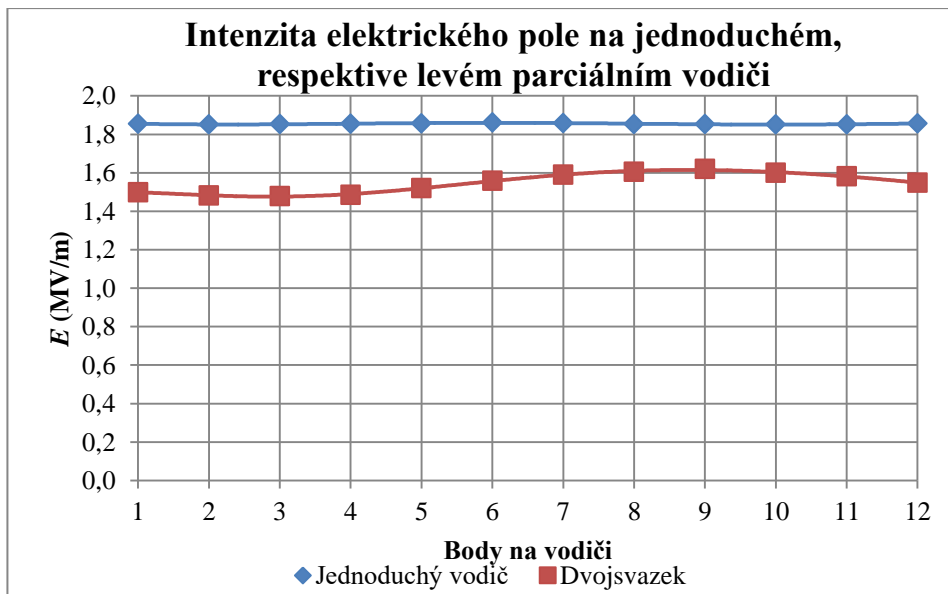
**Obr. 4.20** Rozložení intenzity elektrického pole jednoduchého vodiče



Obr. 4.21 Rozložení intenzity elektrického pole dvojsvazku

Tab. 4.8 Velikost intenzity elektrického pole na povrchu jednoduchého, respektive levého parciálního vodiče

n (-)		Označení bodů na povrchu jednoduchého, respektive levého parciálního vodiče											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$E$	1,855	1,851	1,853	1,855	1,857	1,862	1,858	1,854	1,853	1,851	1,852	1,856
2	(MV/m)	1,498	1,482	1,479	1,486	1,521	1,558	1,590	1,606	1,620	1,600	1,582	1,548



Obr. 4.22 Intenzita elektrického pole na povrchu jednoduchého, respektive levého parciálního vodiče

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že velikost intenzity elektrického pole na povrchu jednoduchého vodiče vykazuje téměř konstantní průběh s nepatrným nárůstem v oblasti nejbližší zemní rovině, což je způsobeno jejím elektrickým nábojem vzniklým elektostatickou indukcí.

Dále je možno pozorovat, že v každém definovaném bodě na povrchu jednoduchého vodiče nabývá intenzita elektrického pole větší hodnoty v porovnání s dvojsvazkovým vodičem. Kritické napětí pro vznik koróných výbojů bude tedy u dvojsvazku vyšší.

U dvojsvazkového vodiče je patrná vyšší hodnota intenzity elektrického pole na odvrácených stranách parciálních vodičů. Naopak je tomu na stranách přilehlých.

### 4.3.6 Ověření platnosti vzorce pro výpočet ekvivalentního poloměru svazkového vodiče

V této subkapitole je ověřována přesnost náhrady svazkového vodiče jednoduchým vodičem ekvivalentního poloměru. Pro toto zkoumání byly využity modely dvojsvazku, trojsvazku, čtyřsvazku a šestisvazku vytvořené v subkapitole 4.3.4. Pro každou z těchto variant byla pomocí vztahu (31) určena hodnota ekvivalentního poloměru, jež je spolu s rozměry svazkových vodičů uvedena v Tab. 4.9.

**Tab. 4.9 Parametry variantních svazkových vodičů a vodičů ekvivalentních poloměrů**

$n$ (-)	$s$ (m)	$r$ (m)	$r_n$ (m)
2	0,462	0,019	0,093
3	0,400	0,015	0,135
4	0,327	0,013	0,146
6	0,231	0,011	0,139

Lze si povšimnout, že se zvyšujícím se počtem parciálních vodičů ve svazku definovaného kroku narůstá velikost ekvivalentního poloměru svazkového vodiče, avšak se zmenšujícími se diferencemi. Tento trend v případě šestisvazku již neplatí a dochází naopak k poklesu jeho hodnoty.

Po provedených simulacích byly odečteny hodnoty náboje na povrchu parciálních vodičů, respektive na povrchu vodičů o ekvivalentním poloměru, které jsou při neměnné velikosti skalárního elektrického potenciálu úměrné kapacitě proti zemi. Získané údaje jsou uvedeny v Tab. 4.10.

**Tab. 4.10** Ověření platnosti vzorce pro výpočet ekvivalentního poloměru

$n$ (-)	$Q_S$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_E$ ( $\mu\text{C}$ )	$\Delta Q$ (nC)	$\Delta Q$ (%)
2	3,467	3,466	1,000	0,029
3	3,733	3,732	1,000	0,027
4	3,869	3,797	72,000	1,861
6	4,004	3,754	250,000	6,244

Na základě získaných údajů lze konstatovat, že v případě dvojsvazku a trojsvazku se s přírůstkem parciálního vodiče ve svazku neprojevuje výrazná tendence ve změně přesnosti náhrady svazkového vodiče jednoduchým vodičem ekvivalentního poloměru. Dochází pouze k jejímu nepatrnému navýšení. U čtyřsvazku a šestisvazku je naopak na první pohled patrný rapidní pokles přesnosti náhrady s rostoucím počtem parciálních vodičů, což bude s největší pravděpodobností způsobeno výše uvedenými zjištěními o velikosti ekvivalentního poloměru svazkového vodiče.

Z tohoto zkoumání lze tedy vyvodit závěr, že v případě náhrady dvojsvazkového a trojsvazkového vodiče vodičem o ekvivalentním poloměru bude dosaženo velmi dobré přesnosti. Náhrada čtyřsvazkového vodiče se jeví jako postačující v situacích, kdy nejsou kladeny velmi vysoké nároky. Od počtu šesti parciálních vodičů musí být náhrada již důkladně zvážena, jelikož její aplikací může dojít ke značnému ovlivnění výsledného řešení.

## 5. Analýza Jouleových ztrát

Tato kapitola se zabývá kvantifikováním dvou zdrojů Jouleových ztrát na vysokonapěťových přenosových vedeních, do kterých se zahrnují ztráty vzniklé na podélném odporu vodičů při průchodu proudu a ztráty korónou vznikající při překročení kritického napětí koróny. Znalost velikosti vznikajících ztrát je nezbytná, jelikož snižují účinnost přenosu a proto hrají důležitou roli při volbě použitých vodičů.

Při výběru typu a průřezu vodičů je jejich pořizovací cena porovnávána s analyzovanými náklady vynaloženými na pokrytí ztrát elektrické energie během předpokládané doby životnosti vedení. Při zanedbání ztrát korónou jsou ztráty elektrické energie na vodičích dány ztrátami na jejich odporu. Ty při zvětšení průměru vodiče klesají, ale rostou investiční náklady, které jsou přímo úměrné jeho průřezu. [17]

Ztráty korónou všeobecně nehrají důležitou roli v celkovém návrhu přenosového vedení. Mnoho počítačových programů zabývajících se touto problematikou uvažuje pouze ztráty vznikající na činném odporu. Ale vyskytují se i situace, za kterých ztráty korónou mohou ovlivnit ekonomickou volbu použitých vodičů u přenosových vedení na velmi vysokých hladinách napětí a výskyt zhoršeného počasí může být jednou z nich. [17]

Díky rostoucím cenám elektrické energie byly v několika zemích provedeny studie, které prokázaly, že při volbě vodičů je důležité v ekonomické rozvaze zohlednit finanční náklady vynaložené na pokrytí ztrát korónou, a to zejména u vedení částečně zatížených, přenosových vedení na hladinách v rozmezí 230 ÷ 400 kV, vedení křižujících extrémně znečištěné oblasti, nebo nacházející se ve vysoké nadmořské výšce a také u normálně zatížených vedení nad 750 kV. [17]

Průměrné ztráty korónou na vysokonapěťových vedeních jsou obvykle řádově nižší než ztráty na činném odporu, nicméně v extrémních případech mohou být stejného řádu. Přesné stanovení jejich velikosti je velmi obtížné vzhledem k různorodosti a proměnlivosti panujících atmosférických podmínek. Ztráty korónou klesají s rostoucím průměrem vodiče jako v případě ztrát na činných odporech. Při zohlednění koróny jsou vznikající ztráty zahrnuty do celkových činných ztrát. [17]

## 5.1 Ztráty korónou

Z hlediska jejich analýzy je klíčové znát hodnotu ztrát za podmínek průměrného počasí panujícího v místě provozu zkoumaného vedení a v nejhorších možných podmínkách. Získané údaje se využívají jak ke kontrole stanoveného limitu absolutní hodnoty průměrných ztrát korónou na jednotku délky vedení, tak k porovnání se ztrátami na odporu vodičů. Všeobecně by měly být ztráty korónou u plně zatíženého vedení menší nežli 10 % hodnoty ztrát na odporu vodičů. [18]

Průměrné ztráty korónou se za normálního počasí pohybují od 1 do 20 kW/km. V extrémních atmosférických podmínkách mohou přesáhnout až 300 kW/km. [19]

Ztráty korónou jsou ovlivněny zejména stavem povrchu použitých vodičů a aktuálními atmosférickými podmínkami. Významnou roli hraje tlak, teplota a vlhkost, popřípadě přítomnost deště, mlhy, nebo jinovatky. Vodiče s hrubým mastným povrchem vykazují několikanásobně vyšší ztráty, k jejichž znatelnému poklesu dochází vlivem stárnutí oněch povrchů. [20]

Doposud není definován univerzální vztah pro výpočet ztrát korónou, který by poskytoval přesné výsledky bez ohledu na lokalitu jeho použití. Od doby, kdy Peek sestavil první empirický vzorec pro výpočet ztrát korónou, bylo formulováno spousta dalších předpisů jak na základě experimentů, tak i teoretických výzkumů. Problém vzorce odvozeného z měření provedených na modelu vedení ve venkovních podmínkách spočívá v tom, že výsledky odpovídají pouze místnímu klimatu. Z tohoto důvodu je obtížné říci, který předpis pro výpočet ztrát bude v naší řešené oblasti poskytovat relevantní výsledky. [19]

Stanovit hodnotu napětí, při níž se začíná projevovat koróna, je rovněž velmi nelehký úkol. Pouze u hladkých a čistých elektrod lze konkrétně hovořit o počátečním napětí koróny, při jehož překročení rostou nadměrně ztráty, a to jen za určitých podmínek charakterizovaných tvarem pole, druhem a hustotou plynu a vlhkostí. K udržení intenzity elektrického pole na povrchu vodiče při provozním napětí pod kritickou hodnotou vzniku koróny je třeba zvětšovat průměr vodiče přibližně úměrně s napětím. [20]

Z důvodu značných odlišností mezi výsledky získanými pomocí všech v odborné literatuře dostupných vzorců pro určení ztrát korónou a naměřenými hodnotami se v praxi ztráty korónou určují měřeními na pokusném vedení osazeném používanými typy vodičů při různých intenzitách elektrického pole na jejich povrchu. Tyto reálné hodnoty se následně používají pro stanovení velikosti ztrát zkoumaných vedení. [20]

Nejčastěji se ke kvantifikování ztrát korónou na přenosových vedeních používají dva vztahy, a to Peekův (45) a Petersonův (50).

Peekův vzorec poskytuje lepší výsledky v případě, je-li poloměr vodiče větší než 0,25 cm, frekvence se pohybuje mezi 25÷120 Hz a poměr  $U_f/U_0$  převyšuje hodnotu 1,8. Všeobecně je však vhodnější počítat ztráty korónou pomocí Petersonova vzorce. [21]

Podle Peeka jsou ztráty jednoho vodiče  $\Delta P_k$  (kW/km) dány vztahem:

$$\Delta P_k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot (U_f - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \quad (45)$$

kde  $\delta$  je poměrná hustota vzduchu,

$m_1$  je činitel respektující vliv povrchu vodiče (0,81 ÷ 0,98),

$m_2$  je činitel respektující vliv počasí (pro sucho 1,00; pro déšť, mlhu a sníh 0,80),

$U_0$  je efektivní hodnota kritického napětí koróny (kV), při němž vznikne na povrchu vodiče efektivní hodnota kritické intenzity el. pole  $E_0$  (kV/cm).

Pro poměrnou hustotu vzduchu platí relace:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (46)$$

kde  $p$  je atmosférický tlak (kPa),

$p_0$  je referenční atmosférický tlak (101,3 kPa),

$t_0$  je referenční teplota (20 °C),

$t$  je aktuální teplota (°C).

Kritická intenzita elektrického pole  $E_0$ , respektive kritické napětí koróny  $U_0$  je podle Peeka dáno:

$$E_0 = 21,2 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \quad (47)$$

$$U_0 = 21,2 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (48)$$

kde  $r$  a  $D$  je dosazováno v centimetrech.

Vztah (48) platí pouze do efektivní hodnoty fázového napětí a za předpokladu reálných hodnot poloměrů vodičů a jejich vzájemných vzdáleností. Pokud je efektivní hodnota fázového napětí menší nežli kritické napětí, koróna se neprojeví. Všeobecně se předpokládá, že při extrémních atmosferických podmínkách se velikost kritického napětí snižuje na 80 % hodnoty za normálního počasí. [22]



Rozborem vztahu (45) lze vyvodit následující závěry. Čím větší je  $\delta$ , respektive čím vyšší je tlak a nižší teplota, tím více  $U_0$  dle (48) narůstá a tím nižší jsou projevy koróny a ztráty. Dále vyplývá, že s rostoucí frekvencí roste i velikost ztrát. Závislost na poloměru vodiče je přímo úměrná jeho druhé odmocnině. Pokud je tedy poloměr větší, jsou větší i ztráty. Vzdálenost mezi vodiči vystupuje ve jmenovateli pod odmocninou, při její velké hodnotě lze tedy ztráty potlačit.

Dále ze vztahu (48) vidíme, že  $U_0$  je přibližně přímo úměrné poloměru vodiče. Čím větší je průměr vodiče, tím vyšší je hodnota kritického napětí a tím menší bude rozdíl mezi provozním a kritickým napětím, což značně omezí velikost ztrát.

Vzorec (45) je použitelný v případě viditelných projevů koróny, ale ztráty vznikají i pod  $U_0$ , z tohoto důvodu a z několika dále uvedených není zcela korektní. Při jeho stanovení byl učiněn předpoklad nezávislosti  $E_0$  na poloměru vodiče, viz (47), což neodpovídá skutečnosti a tím pádem hodnota  $U_0$  není kritickým napětím koróny. [20]

Na základě dalších výzkumů byl vztah pro výpočet kritického napětí modifikován do následujícího tvaru:

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (49)$$

Pro stanovení ztrát vznikajících pod počátečním napětím koróny, se osvědčil Petersonův vzorec:

$$\Delta P_k = \frac{112 \cdot f}{\left(\ln\left(\frac{D}{r}\right)\right)^2} \cdot U_f^2 \cdot F \cdot 10^{-6} \quad (50)$$

kde  $F$  je faktor koróny.

Přesná velikost koeficientu  $F$  je dána funkčními závislostmi uvedenými v příloze A. Pro nejčastěji se vyskytující rozsah podílu efektivní hodnoty fázového napětí a kritického napětí koróny je koeficient  $F$  vyčíslen v Tab. 5.1.

**Tab. 5.1 Velikost koeficientu  $F$  [21]**

$U/U_0$ (-)	$F$ (-)	$U/U_0$ (-)	$F$ (-)	$U/U_0$ (-)	$F$ (-)	$U/U_0$ (-)	$F$ (-)
1,00	0,037	1,26	0,120	1,52	1,100	1,78	4,720
1,02	0,039	1,28	0,136	1,54	1,330	1,80	4,950
1,04	0,042	1,30	0,154	1,56	1,590	1,82	5,170
1,06	0,045	1,32	0,176	1,58	1,880	1,84	5,390
1,08	0,048	1,34	0,200	1,60	2,200	1,86	5,600
1,10	0,052	1,36	0,228	1,62	2,520	1,88	5,810
1,12	0,057	1,38	0,260	1,64	2,830	1,90	6,010
1,14	0,063	1,40	0,300	1,66	3,130	1,92	6,210
1,16	0,069	1,42	0,380	1,68	3,420	1,94	6,410
1,18	0,075	1,44	0,480	1,70	3,700	1,96	6,610
1,20	0,082	1,46	0,600	1,72	3,970	1,98	6,810
1,22	0,092	1,48	0,740	1,74	4,230	2,00	7,000
1,24	0,105	1,50	0,900	1,76	4,480		

V případě použití svazkových vodičů je efekt omezení intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů matematicky postihnout v modifikaci dílčích vzorců pro jednoduchý vodič určených k výpočtu jednotlivých veličin při vyčíslení ztrát korónou, popřípadě byly odvozeny další vztahy, s jejichž nejčastěji se vyskytujícími podobami se lze seznámit v příloze B, kde jsou využity k testovacímu výpočtu, viz dále.

Pro výpočet ztrát korónou byl v této práci použit Petersonův vzorec (50). Opodstatněnost volby tohoto vztahu je podložena výsledky získanými z testovacích výpočtů, viz příloha B, kde byly analyzovány velmi často se v technické literatuře objevující předpisy zabývající se problematikou ztrát korónou na definovaném modelovém vedení za účelem nalezení vhodných vzorců, jež v námi řešených podmínkách poskytují relevantní výsledky. Přínos této analýzy je jednak pro účely dále v této práci prováděných výpočtů a jednak pro další potenciální výzkumy této problematiky v našich podmínkách.

## 5.2 Ztráty na odporu fázových vodičů

Jejich velikost je v zásadě určena samotnou konstrukcí vedení, ale značný vliv má i zatížení, kdy při jeho výrazné hodnotě tvoří dominantní část celkových ztrát.

Odpor použitých vodičů má reálně velmi malou hodnotu, ta se ale s rostoucí teplotou zvyšuje. Provozní teplota vodiče se nejčastěji pohybuje v rozsahu od 0 °C do 60 °C. S přihlédnutím k provozní teplotě vodiče pohybující se hluboce bod bodem tání použitého materiálu, lze tedy závislost odporu na teplotě vyjádřit předpisem:

$$R_{\vartheta_1} = R_{\vartheta_0} \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0)) \quad (51)$$

kde  $R_{\vartheta_1}$ ,  $R_{\vartheta_0}$  jsou hodnoty odporů příslušející teplotám  $\vartheta_1$ , repektive  $\vartheta_0$ ,  
 $\alpha$  je teplotní koeficient (pro Al vodič  $\alpha=0,0039 \text{ K}^{-1}$ ).

V následujících výpočtech kvantifikujících ztráty na odporu vodičů byla z veškerých uvedených závislostí činného odporu (podkapitola 3.2) uvažována pouze lineární závislost na teplotě (51).

Ztráty vznikající na odporu vodiče průchodem střídavého proudu  $\Delta P_R$  jsou dány vztahem:

$$\Delta P_R = R_{st} \cdot I^2 \quad (52)$$

kde  $R_{st}$  je hodnota střídavého odporu vodiče při provozní teplotě,  
 $I$  je efektivní hodnota procházejícího proudu.

Ze vztahu (52) je patrné, že velikost vznikajících ztrát může být omezena snížením odporu vodiče, na kterém ztráty závisí lineárně, nebo zmenšením procházejícího proudu vystupujícím ve druhé mocnině. Velikost průchozích fázových proudů je při daném přenášeném výkonu v největší míře ovlivněna parametry zátěže. Rovněž svou roli hraje i podélná impedance vedení, jež nabývá na významu s rostoucí délkou.

### 5.3 Jouleovy ztráty

Celkové Jouleovy ztráty vznikající na třífázovém přenosovém vedení získáme součtem příslušných ztrát korónou a ztrát vznikajících na odporu vodičů:

$$\Delta P_J = 3 \cdot (\Delta P_K + \Delta P_R) \quad (53)$$

### 5.4 Rozbor a porovnání velikosti Jouleových ztrát

V této podkapitole je vyčíslena velikost Jouleových ztrát v případě dvou v úvahu připadajících konfigurací počtu vodičů pro přenos elektrické energie na vybraných napětěových úrovních 220 kV a 400 kV.

V případě obou analyzovaných konfigurací jsou zkoumány vodiče, jež se vyznačují obdobnou proudovou zatížitelností danou požadavkem na velikost přenášeného výkonu, což umožňuje jejich případnou zaměnitelnost.

Účel prvního zkoumání (subkapitola 5.4.1), jež je prováděno na hladině 400 kV, spočívá v posouzení možnosti nahrazení u nás běžně používaného trojsvazkového vodiče vodičem čtyřsvazkovým, jak je tomu např. ve Spolkové republice Německo.

Ve druhém případě je analyzována situace na napětěové hladině 220 kV (subkapitola 5.4.2), na které je možno se setkat buď s jednoduchým vodičem, nebo s dvojsvazkem.

Získané údaje velikosti Jouleových ztrát vznikajících u obou zkoumaných variant na modelovém transponovaném vedení vyváženého třífázového systému o délce 100 km ukotveném na stožárech definovaného typu poslouží k jejich rozboru a porovnání za účelem posouzení, která konfigurace je na dané napěťové hladině z ekonomického hlediska výhodnější.

Stanovení velikosti ztrát korónou je provedeno za předpokladu normálních atmosférických podmínek a průměrného stavu povrchu vodičů pro dva případy počasí, což je zohledněno rozdílným činitelem  $m_2$ , jehož velikost se pohybuje v intervalu od hodnoty 1,0 pro sucho až do velikosti 0,8 pro extrémní déšť, mlhu, nebo sních.

První zkoumaný případ je za sucha, druhý se vyznačuje průměrným deštěm. Hodnoty parametrů a příslušných koeficientů jsou uvedeny v Tab. 5.2.

**Tab. 5.2 Atmosférické podmínky**

	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro
$t$ (°C)	20,0	20,0
$p$ (kPa)	101,3	101,3
$\delta$ (-)	1,035	1,035
$m_1$ (-)	0,92	0,92
$m_2$ (-)	1,00	0,90

Výpočet ztrát na odporu vodičů je realizován v případě hladiny 400 kV pro tři hodnoty přenášeného výkonu, jež zohledňují různorodost zatížení přenosových vedení, respektive pro dvě hodnoty na úrovni 220 kV.

Ztráty vznikající na odporu zemnicích lan jsou u transponovaného vedení napájeného ze symetrického zdroje zanedbatelné, a proto je v této práci provedeno pouze kvantifikování ztrát vznikajících na fázových vodičích.

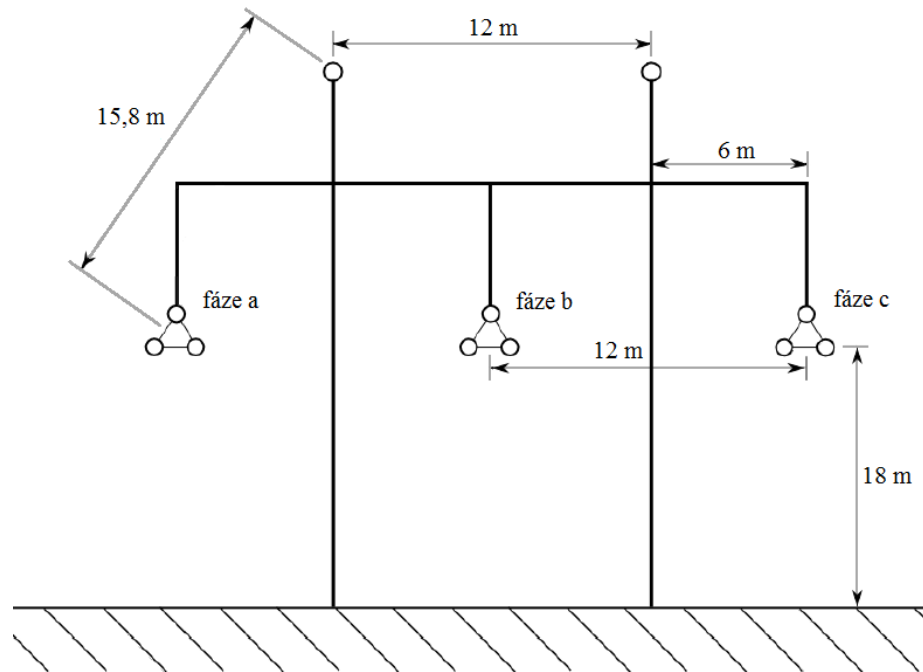
Při výpočtech je uvažováno zatížení modelového vedení symetrickou čistě odporovou zátěží.

### 5.4.1 Vedení 400 kV

V prvním případě je vedení osazeno trojsvazekem s krokem 0,4 m tvořeném třemi vodiči nesoucí označení 490-AL1/64-ST1A o průměru 30,6 mm ukotveném na stožárech typu Portál schematicky znázorněnými na Obr. 5.1. Takto vytvořený model respektující reálné konstrukční parametry představuje přenosové vedení vyskytující se na našem území.

Ve druhém případě je vedení tvořeno čtyřsvazekem s krokem 0,327 m realizovaném čtyřmi vodiči označenými 362-AL1/59-ST1A o průměru 26,7 mm.

Pro možnost vzájemného porovnání byl kromě již zmíněné obdobné dovolené proudové zatížitelnosti dále zachován konstantní poloměr svazkového kruhu, z čehož vyplývá příslušná velikost kroku čtyřsvazkového vodiče.



Obr. 5.1 Schéma modelového stožáru Portál na 400 kV [23]

Pro obě výše definované atmosférické podmínky (Tab. 5.2) je provedeno kvantifikování velikosti ztrát korónou jak pro trojsvazek, tak i pro čtyřsvazek. Výsledky provedených výpočtů jsou v Tab. 5.3.

Tab. 5.3 Výpočet ztrát korónou na 400 kV

Varianta vodiče	Trojsvazek		Čtyřsvazek	
	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro
$E_0$ (kV/cm)	19,140	17,226	24,370	21,933
$U_0$ (kV)	190,34	171,30	220,95	198,85
$U_f/U_0$ (-)	1,213	1,348	1,045	1,161
$F$ (-)	0,089	0,211	0,043	0,069
$\Delta P_k$ (kW/km)	8,841	21,099	4,107	6,657
$\Delta P_k$ (kW)	<b>884,109</b>	<b>2 109,875</b>	<b>410,671</b>	<b>665,719</b>

Na základě výsledků lze konstatovat, že vliv počasí má podstatný dopad na velikost vznikajících ztrát. U trojsvazku jsou ztráty za podmínek 2 - mokro téměř 2,5 násobné nežli v případě za podmínek 1 - sucho. U čtyřsvazku je tento poměr o poznání nižší, ale přesto převyšuje 1,5 násobek. Z tohoto zjištění lze vyvodit závěr, že při návrhu vedení v oblastech s vyšším ročním zastoupením dnů se zhoršeným počasím by měly být ztráty korónou respektovány a zahrnuty do celkových Jouleových ztrát.

Dále můžeme pozorovat, že při použití čtyřsvazkového vodiče namísto trojsvazku vznikají za podmínek 1 - sucho méně než poloviční ztráty a za podmínek 2 - mokro jsou méně než třetinové. Tento poznatek tedy opodstatňuje použití čtyřsvazkového vodiče v oblastech, ve kterých se častěji vyskytuje zhoršené počasí, nebo ve kterých panují extrémní klimatické podmínky.

Při výpočtu ztrát na podélném odporu fázových vodičů jsou použity reálné hodnoty odporů vodičů vztažené 1 km délky poskytnuté společností ČEPS, a.s. uvedené v Tab. 5.4.

**Tab. 5.4 Hodnoty stejnosměrných odporů vodičů na 400 kV [24]**

Typ vodiče	$R_{ss}$ ( $\Omega/\text{km}$ )
490-AL1/64-ST1A	0,0590
362-AL1/59-ST1A	0,0798

Ty jsou dále pro potřeby vyčíslení velikosti ztrát přepočteny na uvažovanou provozní teplotu 40 °C a délku modelového vedení 100 km.

Vzhledem k různorodosti zatížení přenosových vedení jsou vybrány 3 střední hodnoty přenášených výkonů  $P_S$  k vytvoření komplexnějšího náhledu na danou problematiku. Více zatížené vedení je zastoupeno přenášeným výkonem 800 MW, málo zatížené představuje přenos 400 MW a 600 MW demonstruje středně zatížené.

Pro každou zmíněnou hodnotu přenášeného výkonu je provedeno kvantifikování velikosti ztrát na odporu fázových vodičů a to jak pro trojsvazek, tak pro čtyřsvazek. Výsledky provedených výpočtů jsou uvedeny v Tab. 5.5.

**Tab. 5.5 Výpočet ztrát na odporu fázových vodičů na 400 kV**

Varianta vodiče	Trojsvazek			Čtyřsvazek		
	400	600	800	400	600	800
$P_S$ (MW)	400	600	800	400	600	800
$\Delta P_R$ (kW/km)	21,20	47,70	84,80	21,51	48,39	86,02
$\Delta P_R$ (MW)	<b>2,120</b>	<b>4,770</b>	<b>8,480</b>	<b>2,151</b>	<b>4,839</b>	<b>8,602</b>

Z provedených výpočtů vyplývá, že ztráty na činných odporech jsou v případě čtyřsvazku u všech sledovaných variant téměř o 2 % vyšší nežli v případě trojsvazku, poněvadž velikost činného odporu parciálního vodiče čtyřsvazku je oproti trojsvazku rovněž přibližně o 2 % vyšší.

Hodnoty Jouleových ztrát modelového vedení osazeného trojsvazkem, respektive čtyřsvazkem odpovídající jednotlivým kombinacím zatížení vedení pro určení ztrát na odporu fázových vodičů a uvažovaných atmosférických podmínek pro výpočet ztrát korónou jsou uvedeny v Tab. 5.6. Je zde rovněž uveden procentní podíl dvou zdrojů Jouleových ztrát.

**Tab. 5.6 Výpočet Jouleových ztrát na 400 kV**

$P_S$ (MW)	Atmosférické podmínky	Varianta vodiče	$\Delta P_J$ (MW)	$\Delta P_k$ (%)	$\Delta P_R$ (%)
400	Podmínky 1 - sucho	Trojsvazek	3,004	29,4	70,6
		Čtyřsvazek	2,561	16,0	84,0
	Podmínky 2 - mokro	Trojsvazek	4,230	49,9	50,1
		Čtyřsvazek	2,816	23,6	76,4
600	Podmínky 1 - sucho	Trojsvazek	5,654	15,6	84,4
		Čtyřsvazek	5,250	7,8	92,2
	Podmínky 2 - mokro	Trojsvazek	6,880	30,7	69,3
		Čtyřsvazek	5,505	12,1	87,9
800	Podmínky 1 - sucho	Trojsvazek	9,364	9,4	90,6
		Čtyřsvazek	9,013	4,6	95,4
	Podmínky 2 - mokro	Trojsvazek	10,590	19,9	80,1
		Čtyřsvazek	9,268	7,2	92,8

Ze zjištěných údajů lze vyvodit závěr, že při téměř shodných ztrátách na podélném odporu trojsvazku a čtyřsvazku, je rozdíl ve velikosti vznikajících Jouleových ztrát dán právě v odlišných ztrátách korónou.

Velikost Jouleových ztrát čtyřsvazku se za podmínek 1 - sucho pohybuje v rozmezí od 85,3 % ztrát trojsvazku pro méně zatížené vedení do 96,2 % u více zatíženého vedení.

Opět je zde patrný značný rozdíl ve vznikajících Jouleových ztrátách za zhoršeného počasí. U varianty méně zatíženého vedení jsou ztráty čtyřsvazkového vodiče oproti trojsvazku dvoutřetinové, v případě velkého zatížení jsou přibližně 88 %. Tento poznatek pouze umocňuje dříve uvedené konstatování o opodstatněnosti použití čtyřsvazku v oblastech s vyšším ročním zastoupením dnů se zhoršeným počasím.

Lze pozorovat, že s nárůstem přenášeného výkonu získávají na svém významu ztráty na podélném odporu a tudíž rozdíl ve velikosti ztrát korónou hraje v celkovém měřítku menší roli. To jen potvrzuje předpoklad významu ztrát korónou zejména u méně zatížených vedení.

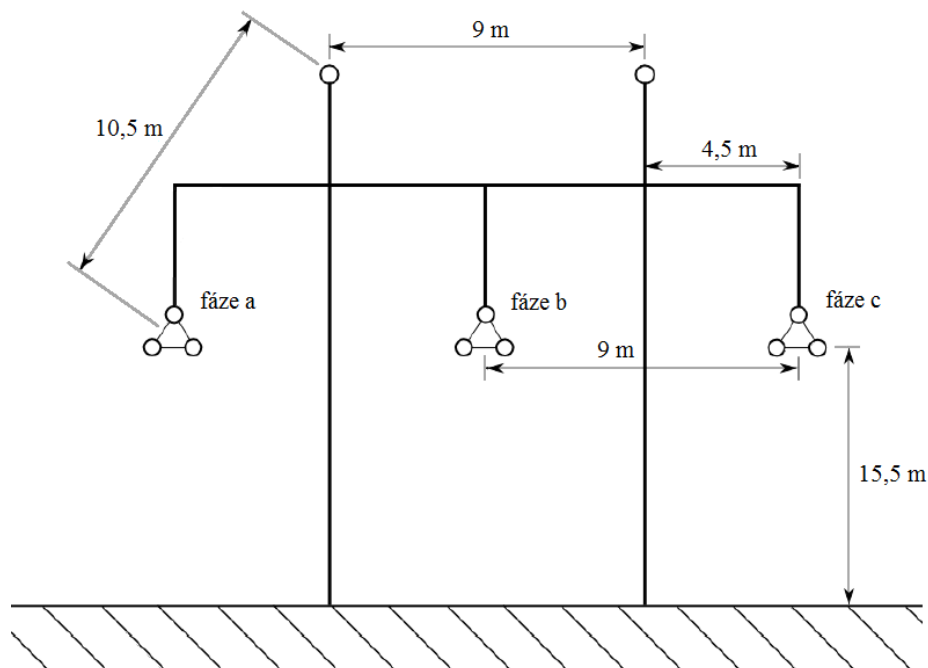
## 5.4.2 Vedení 220 kV

U první varianty vedení jsou jednotlivé fáze tvořeny jednoduchými vodiči nesoucími označení TACSR/ACS 380/50 o průměrech 27 mm ukotvenými na stožárech typu Portál schematicky znázorněnými na Obr. 5.2.

Ve druhém případě tvořícím alternativu k jednoduchému vodiči je vedení osazeno dvojsvazkem s krokem 0,462 m realizovaném dvěma vodiči označenými 212-AL1/49-ST1 o průměru 21 mm.

Pro možnost vzájemného porovnání byl kromě již zmíněné obdobné dovolené proudové zatížitelnosti obou sledovaných koncepcí dále u dvojsvazku zachován shodný

poloměr svazkového kruhu s variantami řešenými na hladině 400 kV, z čehož vyplývá příslušná velikost kroku u dvojsvazkového vodiče.



**Obr. 5.2 Schéma modelového stožáru Portál na 220 kV [23]**

Výpočet Jouleových ztrát, respektive ztrát korónou a ztrát na podélném odporu fázových vodičů, je proveden shodným způsobem, jako tomu bylo v případě hladiny 400 kV ( subkapitola 5.4.1).

Vyčíslení ztrát korónou jednoduchého a dvojsvazkového vodiče pro každou z výše definovaných atmosférických podmínek (Tab. 5.2) je uvedeno v Tab. 5.7.

**Tab. 5.7 Výpočet ztrát korónou na 220 kV**

Varianta vodiče	Jednoduchý vodič		Dvojsvazek	
	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro
$E_0$ (kV/cm)	24,555	22,100	18,464	16,617
$U_0$ (kV)	96,42	86,78	112,91	101,62
$U_{\text{f}}/U_0$ (-)	1,317	1,464	1,125	1,250
$F$ (-)	0,173	0,628	0,059	0,113
$\Delta P_k$ (kW/km)	5,474	19,905	1,723	3,314
$\Delta P_k$ (kW)	<b>547,389</b>	<b>1 990,506</b>	<b>172,318</b>	<b>331,381</b>

Jako v předchozím zkoumání, i v případě hladiny 220 kV, má na velikost vznikajících ztrát značný vliv počasí. U jednoduchého vodiče jsou ztráty za podmínek 2 - mokro téměř 3,2 krát větší, nežli je tomu v případě za podmínek 1 - sucho. U dvojsvazku se tento poměr rapidně snižuje, ale přesto ztráty za podmínek 2 - mokro přesahují 1,9 násobek ztrát za podmínek 1 - sucho. Na základě tohoto rozboru lze



konstatovat, že při návrhu vedení s dvojsvazkovými vodiči a zejména s jednoduchými vodiči v oblastech s vyšším ročním zastoupením dnů se zhoršeným počasím by měly být ztráty korónou uvažovány a zahrnuty do celkových Jouleových ztrát.

Dále lze vyzorovat, že při použití dvojsvazku jsou za podmínek 1 - sucho vznikající ztráty oproti jednoduchému vodiči méně než třetinové a za podmínek 2 - mokro se blíží hranici 17 %. Tyto výsledky jednoznačně hovoří ve prospěch nasazení dvojsvazkového vodiče v oblastech se zvýšenou frekvencí výskytu zhoršeného počasí, nebo s přítomností extrémních atmosférických podmínek.

Při výpočtu ztrát na odporu fázových vodičů jsou opět použity reálné hodnoty odporů vodičů vztažené 1 km délky poskytnuté společností ČEPS, a.s. uvedené v Tab. 5.8.

**Tab. 5.8 Hodnoty stejnosměrných odporů vodičů na 220 kV [24]**

Typ vodiče	$R_{ss}$ ( $\Omega/\text{km}$ )
TACSR/ACS 380/50	0,074
212-AL1/49-ST1	0,136

Ty jsou opět dále pro potřeby vyčíslení velikosti ztrát přepočteny na uvažovanou provozní teplotu 40 °C a délku modelového vedení 100 km.

Z důvodu postihnutí různorodého zatížení přenosových vedení jsou vybrány 2 střední hodnoty přenášených výkonů  $P_S$  k opětovnému vytvoření komplexnějšího náhledu na danou problematiku. Více zatížené vedení je reprezentováno přenášeným výkonem 200 MW, málo zatížené představuje přenos 100 MW.

Pro obě uvedené hodnoty přenášeného výkonu je provedeno vyčíslení velikosti ztrát na odporu fázových vodičů a to jak v případě jednoduchého vodiče, tak i dvojsvazku. Výsledky provedených výpočtů jsou uvedeny v Tab. 5.9.

**Tab. 5.9 Výpočet ztrát na odporu fázových vodičů na 220 kV**

Varianta vodiče	Jednoduchý vodič		Dvojsvazek	
	100	200	100	200
$P_S$ (MW)	100	200	100	200
$\Delta P_R$ (kW/km)	16,48	65,93	15,15	60,58
$\Delta P_R$ (MW)	<b>1,648</b>	<b>6,593</b>	<b>1,515</b>	<b>6,058</b>

Lze pozorovat, že u obou sledovaných variant zatížení vedení činí ztráty na činných odporech dvojsvazkového vodiče téměř 92 % ztrát jednoduchého vodiče. Toto je opět dáno velikostí činného odporu parciálního vodiče, který v případě dvojsvazku nabývá rovněž přibližně 92 % velikosti činného odporu jednoduchého vodiče.

Jouleovy ztráty modelového vedení tvořeného jednoduchým vodičem, respektive dvojsvazkem odpovídající jednotlivým kombinacím zatížení vedení pro určení ztrát na odporu fázových vodičů a uvažovaných atmosférických podmínek pro výpočet ztrát korónou jsou uvedeny v Tab. 5.10. Je zde rovněž uveden procentní podíl dvou zdrojů Jouleových ztrát.

**Tab. 5.10 Výpočet Jouleových ztrát na 220 kV**

$P_S$ (MW)	Atmosférické podmínky	Varianta vodiče	$\Delta P_J$ (MW)	$\Delta P_K$ (%)	$\Delta P_R$ (%)
100	Podmínky 1 - sucho	Jednoduchý	2,196	24,9	75,1
		Dvojsvazek	1,687	10,2	89,8
	Podmínky 2 - mokro	Jednoduchý	3,639	54,7	45,3
		Dvojsvazek	1,846	18,0	82,1
200	Podmínky 1 - sucho	Jednoduchý	7,140	7,7	92,3
		Dvojsvazek	6,231	2,8	97,2
	Podmínky 2 - mokro	Jednoduchý	8,583	23,2	76,8
		Dvojsvazek	6,390	5,2	94,8

Vzhledem k 8 % diferenci mezi ztrátami na podélném odporu jednoduchého a dvojsvazkového vodiče lze usoudit, že je rozdíl v Jouleových ztrátách dán zejména v odlišných hodnotách ztrát korónou, jako tomu bylo v předchozí analýze.

Na výsledcích u obou variant zatížení vedení si lze povšimnout patrných rozdílů mezi jednoduchým vodičem a dvojsvazkem jak za podmínek 1 - sucho, tak i velmi zásadních odlišností za podmínek 2 - mokro.

Procentuální podíl ztrát dvojsvazkového vodiče oproti jednoduchému vodiči u varianty méně zatíženého vedení atakuje za podmínek 1 - sucho hranici 77 % a v případě podmínek 2 - mokro, což vyžaduje zdůraznění, nedosahuje ani 51 %.

Opět lze se zvyšující se hodnotou přenášeného výkonu pozorovat nárůst významu ztrát na podélném odporu na úkor ztrát korónou. Přesto i za stavu představujícího více zatížené vedení činí za podmínek 1 - sucho ztráty dvojsvazkového vodiče cca 87 % ztrát jednoduchého vodiče a 74 % za podmínek 2 - mokro. Znovu byl potvrzen význam ztrát korónou zejména u méně zatížených vedení, ale tentokrát i v případě vedení více zatížených.

Analýzou získaných údajů byl již poněkolkáté potvrzen přínos použití svazkové konfigurace k přenosu elektrické energie na vysokonapětových přenosových vedeních a to obzvláště v kombinaci zhoršených atmosférických podmínek s přenosem nižší střední hodnoty výkonu.

## 6. Možná úspora nákladů

Tato kapitola se zabývá vyčíslením nákladů vynaložených na pokrytí jednak samotných ztrát korónou a jednak výsledných Jouleových ztrát vznikajících na dvou modelových přenosových vedeních provozovaných na hladinách 400 kV a 220 kV osazených dvěma možnými konfiguracemi vodičů. Tyto ztráty byly předmětem zkoumání podkapitoly 5.4 a byly kvantifikovány v subkapitolách 5.4.1, respektive 5.4.2.

Podstata úspory nákladů spočívá v porovnání výdajů na uhrazení vzniklých ztrát při přenosu elektrické energie po celou dobu předpokládané životnosti zkoumaného modelového vedení osazeného jednoduchými vodiči, respektive různými typy svazkových vodičů pro jednotlivé kombinace uvažovaných atmosférických podmínek a přenášených výkonů. Na základě tohoto porovnání je stanovena velikost uspořených finančních prostředků při nasazení konfigurace vykazující menší ztráty.

Závěrem je provedena diskuze, jejímž cílem je doporučení optimální varianty vodičů k přenosu elektrické energie na vedeních o napěťových hladinách 400 kV a 220 kV a zhodnocena ekonomická efektivnost investic do realizace oněch konfigurací.

Velikost ztracené elektrické energie je stanovena za předpokladu konstantního zatížení modelového vedení po dobu jednoho kalendářního roku vyjádřeného v počtu 8760 hodin. Částka na uhrazení ztrát modelového vedení je uvažována dle vítězné ceny výběrového řízení na pokrytí ztrát v naší přenosové soustavě uvedené na stránkách společnosti ČEPS, a.s. a to ve velikosti 855 Kč/MWh. [25]

Proměnnost atmosférických podmínek v průběhu roku, respektive ročních období je zohledněna nadefinováním příslušné doby trvání jednotlivých uvažovaných atmosférických podmínek, pro něž byly ztráty kvantifikovány (Tab. 5.2). Pro účely vyčíslení nákladů vynaložených na pokrytí vznikajících ztrát je v této práci učiněn předpoklad panování průměrného deště (podmínky 2 - mokro) pod dobu 3 měsíců kalendářního roku (2160 hodin) a po jeho zbývající část (6600 hodin) průměrného počasí (podmínky 1 - sucho).

V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny hodnoty ztracené elektrické energie dané ztrátami korónou  $\Delta W_k$  za dobu trvání výše charakterizovaného kalendářního roku a náklady na jejich uhrazení v obou případech zkoumaných konfigurací na vedeních o napěťových hladinách 400 kV (Tab. 6.1) a 220 kV (Tab. 6.2).

**Tab. 6.1 Analýza nákladů daných ztrátami korónou na vedení 400 kV**

Varianta vodiče	Trojsvazek		Čtyřsvazek	
	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro
Doba trvání (h)	6 600	2 160	6 600	2 160
$\Delta P_k$ (MW)	0,884	2,110	0,411	0,666
$\Delta W_k$ (MWh)	5 835,12	4 557,33	2 710,43	1 437,95
$\sum \Delta W_k$ (MWh)	<b>10 392,45</b>		<b>4 148,38</b>	
Náklady (mil. Kč)	<b>8,886</b>		<b>3,547</b>	

Z výsledků lze pozorovat, že při použití čtyřsvazku namísto trojsvazku jsou ztráty elektrické energie způsobené korónou za definovaný kalendářní rok nižší o 6,244 GWh, čímž se ušetří 5,339 mil. Kč.

**Tab. 6.2 Analýza nákladů daných ztrátami korónou na vedení 220 kV**

Varianta vodiče	Jednoduchý vodič		Dvojsvazek	
	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - mokro
Doba trvání (h)	6 600	2 160	6 600	2 160
$\Delta P_k$ (MW)	0,547	1,991	0,172	0,331
$\Delta W_k$ (MWh)	3 612,77	4 299,49	1 137,30	715,78
$\sum \Delta W_k$ (MWh)	<b>7 912,26</b>		<b>1 853,08</b>	
Náklady (mil. Kč)	<b>6,765</b>		<b>1,584</b>	

V případě provozování dvojsvazkového vodiče po dobu definovaného kalendářního roku nabývají ztráty elektrické energie způsobené korónou o 6,059 GWh nižší hodnoty, což znamená úsporu 5,181 mil. Kč oproti variantě s jednoduchým vodičem.

Ztracená elektrická energie způsobená Jouleovými ztrátami  $\Delta W_j$  za dobu jednoho nedefinovaného kalendářního roku pro 3 uvažované míry zatížení vedení zkoumaných konfigurací na napěťových hladinách 400 kV a 220 kV je spolu s náklady na její uhrazení uvedena v Tab. 6.3, respektive Tab. 6.4.

**Tab. 6.3 Analýza nákladů daných Jouleovými ztrátami na vedení 400 kV**

$P_S$ (MW)	Varianta vodiče	$\Delta W_j$ (MWh)	Náklady (mil. Kč)
400	Trojsvazek	28 964,236	24,764
	Čtyřsvazek	22 987,723	19,655
600	Trojsvazek	52 178,966	44,613
	Čtyřsvazek	46 536,903	39,789
800	Trojsvazek	84 679,588	72,401
	Čtyřsvazek	79 505,754	67,977

Při použití čtyřsvazkové konfigurace namísto trojsvazkové lze konstatovat dále uvedené rozdíly ve ztracené elektrické energii, respektive v nákladech na jejich uhrazení za dobu definovaného kalendářního roku. Úspora ztrát elektrické energie dosahuje u méně

zatíženého vedení hodnoty 5,977 GWh, což znamená snížení nákladů o 5,110 mil. Kč. U středně zatíženého vedení se ztráty elektrické energie sníží o 5,642 GWh, čímž se ušetří 4,824 mil. Kč a u více zatíženého vedení se předejde vynaložení 4,424 mil. Kč eliminací 5,174 GWh ztrát elektrické energie.

**Tab. 6.4 Analýza nákladů daných Jouleovými ztrátami na vedení 220 kV**

$P_s$ (MW)	Varianta vodiče	$\Delta W_J$ (MWh)	Náklady (mil. Kč)
100	Jednoduchý vodič	22 350,333	19,110
	Dvojsvazek	15 120,500	12,928
200	Jednoduchý vodič	65 664,551	56,143
	Dvojsvazek	54 922,755	46,959

Po analýze údajů lze prohlásit, že nasazením dvojsvazkového vodiče na dobu definovaného kalendářního roku se v případě méně zatíženého vedení dosáhne snížení ztrát elektrické energie o 7,230 GWh, což přinese úsporu 6,182 mil. Kč. U více zatíženého vedení se tímto zamezí 10,742 GWh ztracené elektrické energie, což po převedení na vynaložené náklady činí 9,184 mil. Kč.

Pro vynesení doporučujícího stanoviska je potřeba do finanční rozvahy zahrnout celkové finanční úspory na ztrátách elektrické energie, při jejichž kvantifikování je nutné přihlídnout k faktu, že se efekt snížení nákladů vynakládaných na uhrazení vznikajících ztrát elektrické energie projevuje po celou dobu předpokládané životnosti zkoumaného vedení. Za tímto účelem je v této práci použita metoda čistě současné hodnoty (dále jen NPV), v anglickém jazyce známá pod pojmem Net Present Value, o níž je pojednáno v [26], která navíc kromě samotného vlivu času zohlední měnící se hodnotu peněz v námi zkoumaném časovém horizontu pomocí proměnné označované jako diskontace, jež je uvažována jako roční.

Vztah pro výpočet celkového uspořené finančního obnosu pomocí NPV je v obecné podobě dán součtem geometrické řady. Při přijmutí zjednodušujícího předpokladu, že jsou náklady na uhrazení vznikajících ztrát neměnné po dobu předpokládané životnosti vedení, lze tento předpis vyjádřit pomocí následujícího zápisu:

$$V = V_0 \cdot \left( 1 + \frac{(1 + dm)^{T_{zv}} - 1}{(1 + dm)^{T_{zv}} \cdot dm} \right) \quad (54)$$

kde  $V$  jsou celkové vynaložené náklady na uhrazení ztrát elektrické energie,

$V_0$  jsou vynaložené náklady na uhrazení ztrát elektrické energie v prvním roce,

$T_{zv}$  je předpokládaná doba životnosti vedení,

$dm$  je diskontní míra.

Touto metodou jsou dále vyčísleny celkové finanční úspory dosažené nasazením čtyřsvazkového vodiče namísto trojsvazku na hladině 400 kV pro všechny tři sledované případy zatížení vedení. Dále je NPV použita k posouzení efektivnosti záměny jednoduchého vodiče dvojsvazkem na napěťové úrovni 220 kV a to pro obě varianty zatížení vedení. U obou zkoumání je analýza nákladů na pokrytí ztrát elektrické energie provedena jak z celkového hlediska příčin Jouleových ztrát, tak i z omezení se pouze na ztráty korónou.

Při výpočtech je předpokládána životnost vedení v délce trvání 50 let, cena za elektrickou energii je opět uvažována ve výši 855 Kč/MWh a velikost diskontace je stanovena na všeobecně používaná 4 %.

Při využití NPV pro stanovení celkových úspor získaných na hladině 400 kV obdržíme, že při analyzování samotných ztrát korónou celkový ušetřený obnos za předpokládanou životnost vedení činí 120,025 mil. Kč. Při uvážení Jouleových ztrát se během provozování méně zatíženého vedení předejde vynaložení 114,882 mil. Kč. U středně zatíženého vedení úspory činí 108,453 mil. Kč a u více zatíženého vedení tato suma dosahuje 99,453 mil. Kč.

Na hladině 220 kV lze takto určit, že při omezení se na ztráty korónou jsou celkové výdaje na uhrazení ztrát nižší o 116,471 mil. Kč. Při zahrnutí ztrát vzniklých na odporu fázových vodičů do celkové rozvahy pak vychází, že u méně zatíženého vedení se dosáhne úspory 138,974 mil. Kč, která u více zatíženého vedení skýtá 206,482 mil. Kč.

Na základě zkoumání ztrát elektrické energie se zcela jednoznačně prokázal přínos většího počtu parciálních vodičů na úrovni 400 kV, což hovoří ve prospěch čtyřsvazkového vodiče, respektive nasazení dvojsvazkové konfigurace na hladině 220 kV. Takto uspořené finanční prostředky dosahují velmi podstatných obnosů.

Je však nutné podotknout, že při zhodnocení ekonomické efektivnosti investic do realizace oněch konfigurací je nezbytné přihlídnout rovněž k nákladům, jež vyžaduje samotná realizace vedení. Jak již bylo uvedeno, uspořádání a celková vyšší hmotnost vodičů a jejich příslušenství klade specifické požadavky na jejich uchycení, zavěšení pomocí izolátorových řetězců i na konstrukci samotných stožárů, nemluvě o potřebě záboru většího, dnes tak velmi ceněného, území k dodržení předepsaného ochranného pásma.

Komplexnost a náročnost tohoto posouzení vyžaduje provedení velkého množství analýz a závisí na mnoha faktorech vycházejících z konkrétní řešené situace.

## Závěr

V první části této práce jsem vyšetřoval rozložení elektrostatického pole v okolí svazkových vodičů na modelu jedné fáze venkovního vedení na napět'ové hladině 400 kV a 220 kV vytvořeném v počítačovém programu Agros 2D s respektováním reálných konstrukčních parametrů. Dílčí simulace na 400 kV jsem realizoval pro odlišné konfigurace uspořádání trojsvazkového vodiče a různé počty parciálních vodičů ve svazku. Na 220 kV jsem se zabýval jednoduchým a dvojsvazkovým vodičem.

Při zkoumání závislosti velikosti intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů na změně kroku jsem při jeho zmenšování dospěl k závěru, že nedochází ke změně její maximální hodnoty, ale pouze k poklesu minima. S růstem tohoto rozdílu dochází k vytváření míst se značnými hodnotami intenzity elektrického pole, které mohou vyústit ve vznik koróny.

Při analýze vlivu počtu parciálních vodičů ve svazku na velikost intenzity elektrického pole na jejich povrchu jsem pro možnost vzájemného porovnání zachovával neměnný průřez, daný dovolenou proudovou zatížitelností odpovídající požadavku na přenášený výkon, a konstantní poloměr svazkového kruhu. Vyvodil jsem, že při jejich vyšším počtu klesá velikost intenzity elektrického pole po celém jejich povrchu, což snižuje pravděpodobnost vzniku koróny a potvrzuje předpoklad analogie chování početnějšího svazkového vodiče jednoduchému vodiči většího poloměru.

V další části jsem se věnoval stanovení Jouleových ztrát jednak troj a čtyřsvazkového vodiče na napět'ové úrovni 400 kV a jednak jednoduchého a dvojsvazkového vodiče na 220 kV. V případě obou analyzovaných konfigurací jsem zkoumal vodiče vyznačující se obdobnou proudovou zatížitelností, což má demonstrovat jejich případnou zaměnitelnost.

Při jejich analýze jsem zohlednil kromě ztrát vznikajících na podélném odporu vodičů při průchodu proudu rovněž i ztráty korónou. Výpočet jsem prováděl na modelovém vedení definovaných parametrů specifikovaných v podkapitole 5.4.

Při vyčíslení ztrát korónou jsem se potýkal s velmi nelehkým úkolem pramenícího jednak z jejich značné závislosti na stavu povrchu použitých vodičů a aktuálních atmosférických podmínkách a jednak z neexistence univerzálního výpočtového vztahu nepodléhajícího lokalitě použití. Za účelem nalezení vhodných vzorců z nejčastěji se v technické literatuře objevujících předpisů jsem provedl testovací výpočty, jejichž přínos shledávám nejen pro účely mnou prováděných výpočtů, ale i pro další

potenciální výzkumy této problematiky v našich podmínkách. Samotný výpočet ztrát korónou jsem uskutečnil za vymezených atmosférických podmínek uvedených v podkapitole 5.4.

Na základě výsledků jsem dospěl k závěru, že se zhoršujícími se atmosférickými podmínkami dochází k jejich podstatnému nárůstu, což by mělo být zohledněno jejich zahrnutím do celkových Jouleových ztrát při návrhu vedení v oblastech s extrémními klimatickými podmínkami, nebo s vyšším ročním zastoupením dnů se zhoršeným počasím. Dále se prokázala opodstatněnost použití vícevodičové konfigurace jak za normálních, tak zejména za zhoršených atmosférických podmínek.

Při výpočtech kvantifikujících ztráty na odporu vodičů jsem za přijetí předpokladů blíže popsaných v podkapitole 5.4 prokázal jejich vzrůstající význam s nárůstem přenášeného výkonu, čímž se v celkovém měřítku eliminuje rozdíl ve velikosti ztrát korónou, u kterých se tímto potvrdil jejich význam zejména u méně zatížených vedení.

V poslední části práce jsem v souladu s premisami učiněnými v kapitole 6 stanovil velikost uspořené finanční prostředků při nasazení konfigurace vykazující menší ztráty z rozdílu v celkových nákladech vzniklých ztrátami elektrické energie při jejím přenosu po celou dobu předpokládané životnosti zkoumaného modelového vedení s respektováním její reálné ceny na pokrytí ztrát v naší přenosové soustavě z příčiny jak samotných ztrát korónou, tak výsledných Jouleových ztrát. K tomuto jsem využil metodu čistě současné hodnoty (NPV) zohledňující kromě samotného vlivu času i měnící se hodnotu peněz v námi zkoumaném časovém horizontu.

Použitím čtyřsvazkového vodiče namísto trojsvazkového na hladině 400 kV se při omezení se na samotné ztráty korónou ušetří finanční obnos ve výši 120,025 mil. Kč. Při uvážení celkových Jouleových ztrát se dle hodnoty přenášeného výkonu sníží náklady o částku pohybující se v rozmezí od 99,453 mil. Kč do 114,882 mil. Kč.

Na 220 kV jsem takto určil, že provozováním dvojsvazkové konfigurace jsou celkové výdaje na uhrazení ztrát zapříčiněných korónou nižší o 116,471 mil. Kč. Při zahrnutí ztrát vzniklých na odporu fázových vodičů pak dle přenášeného výkonu vychází úspory v rozmezí od 138,974 mil. Kč do 206,482 mil. Kč.



## Použitá literatura

- [1] Sadhu, P. K., Das, S.: *Elements of Power Systems*. USA: CRC Press, 2015. ISBN 97-8149-873-446-2.
- [2] Deo, P. P.: *Power System Analysis*. India: Technical Publications, 2007. ISBN 81-8431-124-9.
- [3] Deshpande, M. V.: *Electrical Power System Design*. India: Tata McGraw-Hill Education, 2001. ISBN 97-8007-451-575-4.
- [4] *Soukromý foto archiv autora této bakalářské práce.*
- [5] Schavemaker, P., Sluis L.: *Electrical Power System Essentials*. USA: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 97-8047-098-768-1.
- [6] Tleis, N.: *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*. UK: Newnes, 2007. ISBN 97-8008-055-427-3.
- [7] Bryant, D.: *Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC Conductor*. USA: CTC Global, 2011. ISBN 978-0-615-57959-7.
- [8] Kiessling, P., Nefzger, P., Nolasco J. P., Kaintzyk, U.: *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. SRN: Springer, 2014. ISBN 97-8364-297-879-1.
- [9] Kutuzova, N. B., Tikhodeev, N. N.: *UHV AC Power transmission Lines Conductors Bundle Features*. Beijing, China: International Workshop on UHV AC Transmission Technology, 2005.
- [10] Gonen, T.: *Modern Power System Analysis, Second Edition*. USA: CRC Press, 2013. ISBN 97-8146-657-081-8.
- [11] Grigsby, L. L.: *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution, Third Edition*. USA: CRC Press, 2012. ISBN 97-8143-985-628-4.
- [12] Benešová, Z., Mayer, D.: *Algorithm for computation of inductances of three-phase overhead lines*, AMTEE'03 Plzeň: ZČU v Plzni 2003.
- [13] Benešová, Z., Šroubová, L.: *Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines*, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Žilina 2004.
- [14] Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00065-3.

- [15] Deshpande, M. V.: *Electrical Power System Design*. USA: Tata McGraw-Hill Education, 2001. ISBN 978-00-7451-575-4.
- [16] Mayer, D.: *Aplikovaný elektromagnetismus*. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-424-8.
- [17] Krasniqi, I., Komoni, V., Alidemaj, A., Kabashi, G.: *Corona Losses Dependence from the Conductor Diameter*. Faculty of Electrical and Computer Engineering , University of Prishtina, Kosovo, 2011.
- [18] Anguan, W., Baoshan, N.: *Line Loss Analysis and Calculation of Electric Power Systems*. Singapore: John Wiley, 2016. ISBN 978-11-1886-709-9.
- [19] Das Begamudre, R.: *Extra High Voltage AC Transmission Engineering. Third Edition*. New Delphi: New Age International Publisher, 2006. ISBN 978-81-224-2481-2.
- [20] Veverka, A.: *Technika vysokých napětí. Třetí, přepracované vydání*. Praha: SNTL, 1982. ISBN 04-527-82.
- [21] Noman Ud Din, S.: *Understanding of Power Loss due to Corona*. In: *Help 2 Educate* [online]. 2015 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.help2educate.com/power-loss-due-to-corona/>.
- [22] Dawood, M. A., Narejo, G. B.: *Modeling of Corona Effect in AC Transmission Systems. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6*. 2015, January-2016(Volume 6). ISSN 2229-5518.
- [23] Nazarčík, T.: *Výpočet činných ztrát na transponovaném a netransponovaném vedení*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [24] *Provozní dokumentace vedení, ČEPS, a.s. – technická část*.
- [25] *Tisková zpráva: ČEPS, a.s. , našla dodavatele elektřiny pro krytí ztrát v přenosové soustavě*. In: *ČEPS, a.s.* [online]. Praha: ČEPS, 2017 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: [http://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-zpravy/Documents/17\\_03\\_07\\_aukce\\_ztr%c3%a1t\\_y%c3%banor\\_konec.pdf](http://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-zpravy/Documents/17_03_07_aukce_ztr%c3%a1t_y%c3%banor_konec.pdf).
- [26] Synek, M. a kolektiv: *Manažerská ekonomika. 4. aktualizované a rozšířené vydání*. Praha: Grada Publishing a.s., 2007. ISBN 978-80-247-199-24.

## Přílohy

### Příloha A

Pro přesné určení velikosti koeficientu  $F$ , jež figuruje v Petersonovo vztahu pro výpočet ztrát korónou (50) slouží níže uvedené vztahy převzaté z [20]:

$$F = \left(\frac{U_f}{U'_0}\right)^2 + 2 \cdot \ln\left(\frac{U_f}{U'_0}\right) - 1 \quad (\text{A.1})$$

Napětí  $U'_0$  má v tomto vztahu početní význam a pro lana se stanoví jako:

$$U'_0 = \frac{21,1 \cdot \delta^{2/3} \cdot \left[ \ln\left(\frac{D}{c \cdot r_L}\right) + (x-1) \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot D}{2 \cdot r_L - c \cdot r_L}\right) \right]}{\frac{1}{c \cdot r_L} + \frac{x-1}{2 \cdot r_L - c \cdot r_L}} \quad (\text{A.2})$$

kde  $r_L$  je poloměr opsané kružnice lana (cm),

$x$  je počet drátů ve vrchní poloze lana,

$c$  je koeficient stanovený dle vztahu:

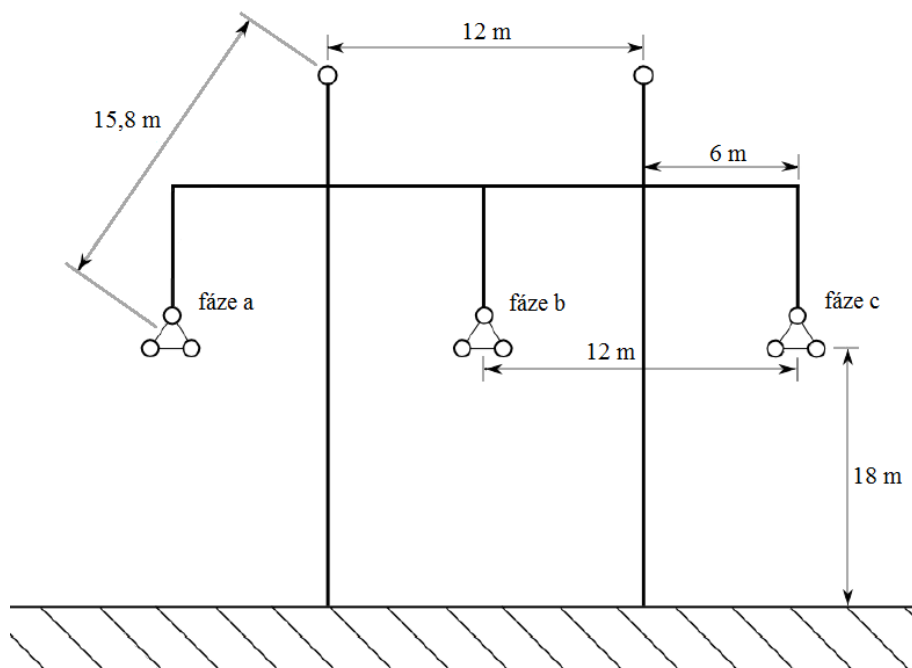
$$c = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{x}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{x}} \quad (\text{A.3})$$

### Příloha B

Testovací výpočty, jejichž úkol spočívá ve stanovení předpisů pro výpočet ztrát korónou, jež v námi řešených podmínkách poskytují relevantní výsledky, jsou provedeny na modelovém transponovaném vedení vyváženého třífázového systému o délce 100 km ukotveném na stožárech typu Portál schematicky znázorněném na Obr. B.1 provozovaném na napěťové hladině 400 kV.

Ve výchozím uspořádání je každá fáze osazena trojsvazkem s krokem 0,4 m tvořeném třemi vodiči nesoucí označení 490-AL1/64-ST1A o průměru 30,6 mm. Takto vytvořený model respektující reálné konstrukční parametry představuje přenosové vedení vyskytující se na našem území.

Pro účely porovnání velikosti vznikajících ztrát je trojsvazek modifikován ve dvojsvazek a čtyřsvazek při zachování neměnného průřezu, daného dovolenou proudovou zatížitelností odpovídající požadavku na přenášený výkon, a konstantního poloměru svazkového kruhu. Parametry uvažovaných svazkových vodičů jsou uvedeny v Tab. B.1.



Obr. B.1 Schéma modelového stožáru Portál na 400 kV [23]

Tab. B.1 Parametry uvažovaných svazkových vodičů

$n$ (-)	$s$ (m)	$r$ (m)
2	0,462	0,019
3	0,400	0,015
4	0,327	0,013

Stanovení velikosti ztrát je provedeno za předpokladu normálních atmosférických podmínek a průměrného stavu povrchu vodičů pro dva případy počasí, což je zohledněno rozdílným činitelem  $m_2$ , jehož velikost se pohybuje v intervalu od hodnoty 1,0 pro sucho až do velikosti 0,8 pro extrémní déšť, mlhu, nebo sněh.

První zkoumaný případ je za sucha, druhý se vyznačuje extrémním deštěm. Hodnoty parametrů a příslušných koeficientů jsou uvedeny v Tab. B.2.

Tab. B.2 Atmosférické podmínky

	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro
$t$ (°C)	20,0	20,0
$p$ (kPa)	101,3	101,3
$\delta$ (-)	1,035	1,035
$m_1$ (-)	0,92	0,92
$m_2$ (-)	1,00	0,80

Struktura provedených testovacích výpočtů je členěna do tří na sebe navazujících částí, jejichž výsledky jsou vždy samostatně vyhodnoceny a v případě jejich relevantnosti

následně dále využity. V každé z jednotlivých částí jsou nejprve uvedeny velmi často se v technické literatuře objevující předpisy pro určení příslušné veličiny. Výsledky, jež byly vypočteny pomocí těchto vztahů při uvážení výše definovaných parametrů vedení se svazkovými vodiči a atmosférických podmínek, jsou zobrazeny formou přehledných tabulek. Následně je provedeno jejich avizované zhodnocení dle teoretických předpokladů a označení nejvhodnější kandidátů.

První úkol spočívá ve volbě vhodného vzorce určujícího kritickou intenzitu elektrického pole. Druhá část se zabývá otázkou stanovení předpisu pro hodnotu kritického napětí. V posledním zkoumání je vybrán samotný vzorec pro výpočet ztrát korunou.

## B1 Kritická intenzita elektrického pole

$$E_{01} = \frac{30 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{n}}{1 + \frac{n-1}{2} \cdot \frac{r}{O}} \quad (\text{B.1})$$

$$E_{02} = \frac{30 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 + (n-1) \cdot r}{2 \cdot O \cdot \sqrt{n}} \quad (\text{B.2})$$

$$E_{03a} = m_1 \cdot m_2 \cdot \frac{U \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r}{s}\right)}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt{r \cdot s}}\right)} \quad (\text{B.3a})$$

$$E_{03b} = m_1 \cdot m_2 \cdot \frac{U \cdot \left(1 + \frac{3\sqrt{3} \cdot r}{s}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt[3]{r \cdot s^2}}\right)} \quad (\text{B.3b})$$

$$E_{03c} = m_1 \cdot m_2 \cdot \frac{U \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot \sqrt{3} \cdot r}{s}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r \cdot s^3}}\right)} \quad (\text{B.3c})$$

$$E_{04} = m_1 \cdot m_2 \cdot \frac{U \cdot \left(1 + \frac{(n-1) \cdot r}{O}\right)}{n \cdot r \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{\left(O \cdot \sqrt[n]{n \cdot \frac{r}{O}}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot h}{D}\right)^2 + 1}}\right)} \quad (\text{B.4})$$

**Tab. B.3** Hodnoty kritické intenzity elektrického pole

	Vztah	Dvojsvazek		Trojsvazek		Čtyřsvazek	
		Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro
$E_0$ (kV/cm)	<b>B.1</b>	<b>31,350</b>	<b>25,080</b>	<b>37,537</b>	<b>30,030</b>	<b>42,565</b>	<b>34,052</b>
	<b>B.2</b>	<b>23,750</b>	<b>19,000</b>	<b>23,945</b>	<b>19,156</b>	<b>24,053</b>	<b>19,243</b>
	<b>B.3</b>	<b>19,380</b>	<b>15,504</b>	<b>19,433</b>	<b>15,546</b>	<b>24,846</b>	<b>19,876</b>
	B.4	27,852	22,282	26,443	21,154	24,585	19,668

Vzhledem k teoretickému předpokladu nárůstu hodnoty kritické intenzity elektrického pole na povrchu parciálních vodičů s jejich zvyšujícím se počtem lze označit vztah B4 jako nevyhovující. V ostatních třech případech (B.1, B.2, B.3) je tento fakt splněn a mohou být tedy dále použity.

## B2 Kritické napětí

$$U_{01} = E_{01} \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (\text{B.5})$$

$$U_{02} = E_{02} \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (\text{B.6})$$

$$U_{03a} = \frac{30 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt{r \cdot s}}\right)}{\left(1 + \frac{2 \cdot r}{s}\right)} \quad (\text{B.7a})$$

$$U_{03b} = \frac{30 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{3 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt[3]{r \cdot s^2}}\right)}{\left(1 + \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot r}{s}\right)} \quad (\text{B.7b})$$

$$U_{03c} = \frac{30 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r \cdot s^3}}\right)}{\left(1 + \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot r}{s}\right)} \quad (\text{B.7c})$$

**Tab. B.4** Hodnoty kritického napětí

	Vztah	Dvojsvazek		Trojsvazek		Čtyřsvazek	
		Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro
$U_0$ (kV)	<b>B.5</b>	172,783	138,227	169,110	135,288	169,634	135,707
	<b>B.6</b>	130,900	104,720	107,874	86,299	95,859	76,687
	<b>B.7</b>	<b>184,219</b>	<b>147,375</b>	<b>187,839</b>	<b>150,272</b>	<b>216,903</b>	<b>173,523</b>

Ze tří analyzovaných vztahů vyhověl predikci nárůstu kritického napětí s rostoucím počtem parciálních vodičů ve svazku pouze jediný předpis vystupující pod označením B.7. Hodnoty jež poskytl tedy poslouží ke stanovení relevantního vztahu pro výpočet ztrát korónou.

### B3Vzorec pro výpočet ztrát korónou

$$\Delta P_k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot (U_f - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \quad (\text{B.8})$$

$$\Delta P_k = 5,16 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot h}} \cdot (U_f - U_0)^2 \cdot 10^{-3} \quad (\text{B.9})$$

$$\Delta P_k = \frac{112 \cdot f}{\left(\ln\left(\frac{D}{r}\right)\right)^2} \cdot U_f^2 \cdot F \cdot 10^{-6} \quad (\text{B.10})$$

**Tab. B.5 Hodnoty ztrát korónou**

	Vztah	Dvojsvazek		Trojsvazek		Čtyřsvazek	
		Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro	Podmínky 1 - sucho	Podmínky 2 - extrémní mokro
$\Delta P_k$ (kW/km)	B.8	13,987	44,745	10,576	37,048	1,044	17,473
	B.9	12,938	41,390	9,783	34,271	0,966	16,163
	<b>B.10</b>	<b>2,237</b>	<b>14,553</b>	<b>1,879</b>	<b>9,933</b>	<b>1,077</b>	<b>2,797</b>
$U_f/U_0$ (-)	/	1,254	1,567	1,229	1,537	1,065	1,331
$F$ (-)	/	0,063	0,410	0,057	0,300	0,034	0,088

Dosadí-li se přibližná hodnota svodu třífázového venkovního vedení pro napěťovou úroveň 400 kV z Tab. 3.1 do vztahu (32), pohybuje se velikost svodových ztrát v rozmezí od 2,24 kW/km do 3,2 kW/km. Tomuto rozpětí odpovídají hodnoty získané pomocí vztahu B.10, což je zmíněný Petersonův vztah, v textu této práce vystupující pod označením (50). Vhodnost použití tohoto vzorce navíc opodstatňuje v práci provedené konstatování doporučující volbu Petersonova vztahu při splnění podmínky velikosti poměru  $U_f/U_0$  nepřesahujícím velikost 1,8.

Na základě provedených výpočtů s ohledem na praxí prověřená doporučení lze konstatovat, že z námi testovaných vzorců k výpočtu kritické intenzity elektrického pole, respektive kritického napětí poskytují relevantní výsledky vztahy B.3, respektive B.7. Pro kvantifikování ztrát korónou se jako nejvhodnější ukázal předpis B.10, tedy Petersonův vztah.