

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**KOMPLEXNÍ ROZBOR ELEKTRICKÝCH ZTRÁT
VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY**

Habilitační práce
v oboru Elektroenergetika

Ostrava 2009

Ing. Ladislav Rudolf, Ph.D.

ABSTRAKT

Habilitační práce se zabývá komplexním rozбором elektrických ztrát u vedení přenosové soustavy. Jedná se o technické ztráty, mezi které patří ztráty Jouleovy, korónou a svodem. Habilitační práce v některých pasážích volně navazuje na práci doktorskou, kde byla tato témata dříve řešena. Protože od té doby už uběhlo mnoho let a má autorská publikační a výzkumná činnost stále probíhala, vznikly nové poznatky a výsledky, které jsou zpracovány v rámci mé habilitační práce. Je v ní řešena problematika závislosti elektrických ztrát vedení přenosové soustavy na atmosférických vlivech a další nové poznatky. Jedná se o použití nových údajů a dat, naměřených v laboratoři, dále pak z řídicího systému dispečinku ČEPS, meteorologických údajů a parametrů vedení. Habilitační práce je rozdělena do několika tematických celků. První část se zabývá vybranými matematickými pojmy, které jsou použity pro vyhodnocení závislosti elektrických ztrát na venkovní teplotě. V druhé části je na vybraných ukázkách uvedeno řešení některých situací ve světě. Dále navazují výpočty jednotlivých druhů technických ztrát a testování těchto ztrát na atmosférických vlivech. Poslední část habilitační práce se zabývá dalšími metodami a novými poznatky k výpočtům ztrát korónou a svodem a také navržení pro využití v praxi.

Na základě komplexního rozboru problematiky technických ztrát na vedení přenosové soustavy a cílů habilitační práce bych chtěl dosáhnout těchto výsledků:

- provedení teoretického rozboru a rozčlenění elektrických ztrát u vedení přenosové soustavy na jednotlivé typy ztrát
- vypracování metodických postupů výpočtů ztrát Jouleových, korónou a svodem
- na základě měřených údajů z přenosů na vedeních přenosové soustavy v ČEPS a meteorologických údajů z ČHMÚ navržení postupů výpočtů elektrických ztrát s realizací testování na atmosférických vlivech, převážně venkovní teploty
- vhodné porovnání dosažených výsledků výpočtů a naměřených údajů z dispečinku ČEPS v Ostravě
- na základě vhodných matematických metod provedení testování závislosti jednotlivých elektrických ztrát na atmosférických vlivech (venkovní teploty)
- vyhodnocení všech dosažených výsledků a navržení opatření jejich dalšího využití v praxi

- definování obecných matematických vztahů pro simulaci v řídicím systému s možností předpovědi technických ztrát u vedení přenosové soustavy na energetickém dispečinku

ABSTRACT

The habilitation work is engaged in a comprehensive analysis of electric losses at the transmission network system line. There are technical losses-Joule's losses, losses of corona and leakage losses. In some parts the habilitation work follows the doctoral thesis, where this topic was solved for the first time. As since that time passes many years and my publishing and research work has been under way, there emerged new knowledge that is processed within my habilitation work. There is solved the issue of dependence of electric losses of transmission network system line on atmospheric influences and another new knowledge. It is using of new facts and data measured in a laboratory, in a control system of the power plant control room CEPS, meteorological facts and parameters of the line. The habilitation work is divided into a few thematic units. The first part is engaged in chosen mathematical terms that are used for evaluation of dependence of electrical losses on outdoor temperature. In the second part there is stated the solution of some situations in world at chosen demonstrations. Also there are calculations of particular kinds of technical losses and tests of these losses in atmospheric influences. The last part of the habilitation work is engaged in another methods and new knowledge for calculation of losses by corona and leakage and also suggestion for usage in practice.

On the basis of the comprehensive analysis of the issue of technical losses at the transmission network system line and the targets of the work I would like to reach these results:

- Realization of the theoretic analysis and segmentation of electric losses at the transmission network system line into particular types of losses
- Preparation of methodical procedure of calculations of Joule's losses, losses by corona and leakage
- An the basis of measured data of CHMU-suggestion of procedure for calculations of electric losses with realization of testing in atmospheric influences, mostly outdoor temperature
- Suitable comparison of reached results of calculations and measured data from the power plant control room CEPS in Ostrava

- On the basis of suitable mathematical methods-realization of tests of dependences of particular electric losses on atmospheric influences (outdoor temperature)
- Evaluation of all reached results and suggestion of measures for their next usage in practice
- Defining of general mathematical relations for simulation in control system with possibility to predict technical losses at the transmission network system line in power plant control room

OBSAH

1 CÍLE HABILITAČNÍ PRÁCE	8
2 ÚVOD K PROBLEMATICE	9
3 MATEMATICKÉ POJMY POUŽITÉ K TESTOVÁNÍ ZÁVISLOSTÍ ELEKTRICKÝCH ZTRÁT U VEDENÍ VVN A ZVN [10], [20]	10
3.1 KORELACE	10
3.2 KORELAČNÍ KOEFICIENT K_{XY}	11
3.3 REGRESNÍ ANALÝZA	11
3.3.1 Stanovení optimálních matematických závislostí.....	12
3.3.2 Hodnotící kritéria	14
4 ZPŮSOBY ŘEŠENÍ PROBLÉMU SVODU A KORÓNY VE SVĚTĚ.....	15
4.1 MĚŘENÍ TEPLoty SNÍMAČI NA VEDENÍ VVN A ZVN v USA [15], [26]	15
4.2 ZATÍŽITELNOST VEDENÍ S OHLEDEM NA TEPLotu VODIČE [15] [28]	17
4.3 MĚŘENÍ KORÓNOVÝCH VÝBOJŮ SPECIÁLNÍ KAMEROU [23]	18
4.4 MONITOROVÁNÍ SVODOVÉHO PROUDU NA 400 kV IZOLÁTOROVÉM ŘETĚZCI v ZNEČIŠTĚNÉ OBLASTI MEXIKA [29]	19
5 TEORIE ZTRÁT ELEKTRICKÉ ENERGIE [29].....	20
5.1 JOULEOVY ZTRÁTY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA VEDENÍCH	22
5.1.1 Teorie výpočtu trojfázových vedení VVN a ZVN	25
5.1.2 Odvození vzorce pro výpočet Jouleových ztrát na obecném vedení pomocí π (pí) článku.....	30
5.2 ZTRÁTY KORÓNOU NA VEDENÍ VVN A ZVN.....	33
5.2.1 Definice pojmu koróna.....	33
5.2.2 Základní údaje pro výpočet ztrát korónou.....	34
5.2.3 Atmosférické vlivy působící na ztráty korónou.....	34
5.2.4 Druhy výpočtů ztrát korónou na vedení VVN a ZVN.....	35
5.3 ZTRÁTY ZPŮSOBENÉ SVODEM [29].....	42
5.3.1 Teoretický úvod k výpočtům svodových proudů.....	43
5.3.2 Vodivá vrstva znečištění na povrchu izolátoru.....	44
5.3.3 Odpor (vodivost) povrchové vrstvy znečištění izolátoru.....	46
5.3.4 Povrch rotačně symetrického izolátoru	48
5.3.5 Příklad výpočtu tvarového „ f_{TV} “ faktoru hladkého izolátorového válce.....	50
5.3.6 Příklad výpočtu tvarového faktoru „ f_{TV} “ izolátoru typu L100BH 550.....	51
5.4 ŘEŠENÍ SVODOVÝCH PROUDŮ A ZTRÁT SVODEM NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY v OBECNÉM TVARU	52
5.4.1 Vstupní údaje k obecnému řešení svodových proudů	52
6 VÝPOČTY TECHNICKÝCH ZTRÁT NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY [29]	55
6.1 VÝPOČTY JOULEOVÝCH ZTRÁT NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Z MĚŘENÝCH ÚDAJŮ.....	56
6.1.1 Praktický výpočet Jouleových ztrát na vedení přenosové soustavy.....	57
6.1.2 Zhodnocení výpočtu Jouleových ztrát na vedení přenosové soustavy	59
6.2 VÝPOČTY SVODOVÝCH PROUDŮ A ZTRÁT SVODEM NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY .	60
6.2.1 Praktické výpočty svodových proudů na vedení přenosové soustavy	60
6.2.2 Ukázka výpočtu svodového proudu a ztrát svodem na vedení V253	68

6.2.3 Vyhodnocení výpočtu ztrát svodem.....	72
6.3 VÝPOČTY ZTRÁT KORÓNOU NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY.....	72
7 TESTOVÁNÍ ZÁVISLOSTI TECHNICKÝCH ZTRÁT NA VENKOVNÍ TEPLITĚ [29]	76
7.1 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ MATEMATICKÉ FUNKCE ZÁVISLOSTI TECHNICKÝCH ZTRÁT NA VENKOVNÍ TEPLITĚ	77
7.2 VÝSLEDKY ZÁVISLOSTÍ JOULEOVÝCH ZTRÁT NA VENKOVNÍ TEPLITĚ	81
7.3 TESTOVÁNÍ A VÝSLEDKY ZÁVISLOSTI ZTRÁT SVODEM NA VENKOVNÍ TEPLITĚ	92
7.4 TESTOVÁNÍ A VÝSLEDKY ZÁVISLOSTI ZTRÁT KORÓNOU NA VENKOVNÍ TEPLITĚ	98
7.5 SHRUTÍ VYBRANÝCH VÝSLEDKŮ TECHNICKÝCH ZTRÁT	109
7.6 APLIKACE VÝSLEDKŮ V PRAXI	109
8 DALŠÍ METODY ŘEŠENÍ ZTRÁT KORÓNOU U VEDENÍ VVN A ZVN.....	113
8.1 VYBRANÉ METODIKY VÝPOČTŮ ZTRÁT KORÓNOU [37]	113
8.1.1 Metodika výpočtu ztrát korónou [29], [37].....	113
8.1.2 Výpočet ztrát korónou ruskou metodou [41].....	117
8.1.3 Metodika výpočtu ztrát korónou za deště podle Muravady [30], [41].....	121
8.1.4 Metodika výpočtu ztrát korónou za deště podle Combera [31], [41]	122
8.1.5 Vyhodnocení metodik ztrát korónou	126
8.2 VÝSLEDKY VÝPOČTŮ ZTRÁT KORÓNOU U VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY	127
8.2.1 Vyhodnocení podílu ztrát korónou na celkových ztrátách.....	129
8.2.2 Vyhodnocení výsledků ztrát korónou	130
9 POZNATKY A TEORIE ŘEŠENÍ ZTRÁT SVODEM U VEDENÍ VVN A ZVN	131
9.1 POSTUP MĚŘENÍ SVODOVÝCH PROUDŮ [36], [41]	131
9.1.1 Naměřené výsledky svodových proudů	133
9.1.2 Výsledky ztrát svodem na izolátorových závěsech.....	140
9.1.3 Zhodnocení výsledků.....	141
9.2 VLIV SLOŽENÍ ISOLÁTOROVÉHO ZÁVĚSU NA VELIKOST SVODOVÝCH ZTRÁT [38]	141
9.3 VÝPOČET SVODU NA VYBRANÉM VEDENÍ V403 [39], [40]	145
9.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SVODU U VEDENÍ V403.....	148
10 VLIV SVODU NA VÝPOČTY CHODU SÍTĚ U VEDENÍ VVN A ZVN [35]	149
10.1 VYSVĚTLENÍ METODIKY VÝPOČTU	149
10.1.1 Modelové stavy pro výpočet ztrát svodem u vedení 220 kV V207 (Tábor – Sokolnice).....	150
10.1.2 Modelové stavy pro výpočet ztrát svodem u vedení 400 kV V413 (Řeporyje – Prosenice).....	153
10.2 VYHODNOCENÍ VLIVU „G“ NA SVODOVÉ ZTRÁTY	158
11 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ POZNATKŮ PRÁCE.....	160
PŘÍNOS HABILITAČNÍ PRÁCE	163
SUMMARY	164
LITERATURA	166
SEZNAM VYBRANÝCH PUBLIKOVANÝCH PRACÍ.....	169

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ε_i	odchylka skutečné hodnoty ztrát vedení přenosové soustavy od predikované [-]
P	ztráty činného výkonu [W]
E_{\max}	maximální povrchový gradient jedné fáze [$\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$]
$E_{\text{stř}}$	střední povrchový gradient stejné fáze [$\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$]
r	poloměr fázového vodiče [cm]
a	vzdálenost vodičů ve svazku [cm]
β	činitel závislý na počtu svazkových vodičů v jedné fázi [-]
U_f	provozované fázové napětí vedení [kV]
C	provozní kapacita uvažované fáze [$\text{pF}\cdot\text{km}^{-1}$]
g	konstrukční činitel vedení [-]
E	intenzita elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
J	proudová hustota [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]
f_{TV}	tvarový faktor konkrétního izolátoru [$\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$]
γ	měrná vodivost vrstvy znečištění [$\text{S}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}^{-2}$]
ρ	měrný odpor vrstvy znečištění [$\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1}$]
I_{svod}	svodový proud na vedení [A]
ΔP_{svod}	ztráty svodem na vedení [W]
$\Delta P_{\text{svod/km}}$	ztráty svodem na kilometr vedení [$\text{W}\cdot\text{km}^{-1}$]
R	odpor vedení [$\Omega\cdot\text{km}^{-1}$]
X	kapacitance vedení [$\Omega\cdot\text{km}^{-1}$]
B	susceptance vedení [$\mu\text{S}\cdot\text{km}^{-1}$]
G	svod vedení [$\mu\text{S}\cdot\text{km}^{-1}$]
S	zdánlivý výkon vedení [Mvar]
Q	jalový výkon vedení [Mvar]
Q_{nab}	nabíjecí výkon vedení [Mvar]
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
k_{xy}	koeficient korelace [-]
ZVN	zvlášť vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
ČEPS	Česká přenosová soustava
TRIS	Telemetrický řídicí a informační systém

1 CÍLE HABILITAČNÍ PRÁCE

Cílem habilitační práce je provést komplexní rozbor elektrických ztrát u vedení přenosové soustavy a zpracovat výsledky a poznatky, které vznikly za několik let mé publikační a vědecké činnosti. Jedná se o využití některých teorií a jejich rozšíření o nové poznatky. V práci uvedeno rozdělení technických ztrát na vedení přenosové soustavy na jednotlivé elektrické ztráty (Jouleovy, korónou a svodem). K tomu je vypracována vhodná metodika výpočtu k určení těchto ztrát. V habilitační práci jsou použita nová data a je zde provedeno v různých teplotních intervalech testování elektrických ztrát na atmosférických vlivů (venkovní teploty) s uvedením výsledků a možnosti dalšího využití. Cílem je potom doporučení, podle které aproximující křivky je nejvhodnější závislost jednotlivých technických ztrát. Na základě dosažených výsledků jednotlivých ztrát chci dle zpracovaných teorií navrhnout využití predikce technických ztrát u přenosových vedení v praxi. Uvedené metodiky výpočtu technických ztrát se musí opírat o matematické vztahy a fyzikální zákonitosti. Matematické závislosti chci použít pro dosazení naměřených hodnot do řídicího systému dispečinku a predikování závislostí v reálném čase. Pro dosazení do matematických modelů jsou použity měřené údaje z laboratoře VVN a ČHMÚ, které jsou vybrány a použity pro testování na atmosférických vlivech. Po správném zhodnocení všech výsledků chci navrhnout použití v praxi. Jako příklad může sloužit nadefinovaný matematický vztah v databázi řídicího systému energetického dispečinku s vazbou na měřená data s údaji o vedení. Následně by bylo možné tyto ztráty v rámci řídicího systému vyhodnocovat a mít je k nahlédnutí na monitoru dispečerovi v reálném čase. Dalším cílem by bylo využití znalosti aproximačních křivek a jejich rovnic při teplotách v různých ročních obdobích a teplotních intervalech. Znalost rovnic aproximovaných křivek chci využít k prognózám měnících se ztrát (Jouleových, korónou a svodem) v různých ročních obdobích. Metodiky výpočtu ztrát chci na základě svého výzkumu a publikační činnosti využít k rozšíření pohledu a využití v praxi.

Na základě své výzkumné činnosti jsem dosáhnul výsledků, jak v měření tak ve výpočtech. V rámci habilitační práce bych chtěl tyto výsledky prezentovat a vytýčit cíle, které bych chtěl dosáhnout. Jedná se o navázání na dosažené výsledky z předchozích let, jejich rozšíření a upřesnění v rámci měření a jejich zapracování do metodik výpočtů u jednotlivých druhů ztrát. K tomuto účelu chci použít nových dat a teorií z výzkumu a publikační činnosti. Jedná se o výpočty elektrických ztrát a jejich predikce v závislosti na atmosférických vlivech a

začlenění těchto poznatků do energetické praxe. Cílem habilitační práce bude směřování do oblasti rozšíření dalších metodických postupů výpočtů technických ztrát na vedení přenosové soustavy. Na základě dosažených výsledků ve výpočtech je důležitým cílem porovnání s naměřenými údaji, které byly dosaženy v reálném čase v řídicím systému TRIS na dispečinku ČEPS v Ostravě. Těchto zpřesněných výsledků chci použít pro testování závislosti elektrických ztrát na atmosférických vlivech pro různá teplotní spektra, která bývají v našich zeměpisných šířkách v průběhu celého kalendářního roku. Při prognózách pomocí aproximujících křivek a znalosti matematických funkcí lze pak v praxi předpovídat velikost ztrát v různých teplotních obdobích. Dále chci rozšířit mety výpočtu ztrát korónou a svodem. Tyto oblasti elektroenergetiky jsou méně publikované. Shrnutí cílů do jednotlivých bodů habilitační práce je uvedeno v abstraktu habilitační práce.

2 ÚVOD K PROBLEMATICE

Problematika elektrických ztrát na vedení přenosové soustavy má pro provoz a řízení elektrizační soustavy velký význam. Ztráty elektrické energie vznikají ve všech prvcích přenosové soustavy a nelze je úplně odstranit, ale dají se omezit. Náklady na snížení těchto ztrát nesmí překročit úspory.

Jednou z možností zohlednění elektrických ztrát na vedení přenosové soustavy je jejich komplexní rozbor a vyčíslení. V habilitační práci se zabývám ztrátami technickými. Technické ztráty se skládají z Jouleových ztrát, korónou a ztrát svodem. V dnešní době, kdy moderní energetické společnosti používají k řízení elektrizačních soustav kvalitní výpočetní techniku a řídicí systémy, není proto žádný problém měřit a dálkově přenášet velké množství dat a informací. Tato data jsou přenášena například po optických kabelech z energetických objektů (např. rozvodn a elektráren) na energetický dispečink. Přenášená data jsou měřena (napětí, proud, činný výkon, venkovní teplota), estimovaná a stavová (údaje o poloze odpojovače, vypínače, uzemňovače). V současnosti se mnoho dat přenáší po optických vláknech, které jsou umístěny uvnitř zemních lan na stožárech vedení VVN a ZVN, která tvoří kombinovaná zemní lana. Tato data jsou zpracována řídicím systémem energetického dispečinku a využívána pro další oblasti řízení. Moderní řízení elektrizační soustavy nám umožňuje na základě vstupních dat z objektů například dálkově ovládat rozvodny nebo najetí turbíny vodní elektrárny a další operace a funkce, potřebné k řízení elektrizační soustavy. V rámci měřených údajů jsou důležité hodnoty ztrát. Řídicí systém vyhodnocuje metodou

estimace pouze ztráty Jouleovy. Tyto Jouleovy ztráty jsou v podstatě vedlejším produktem estimace (P , Q , U , I jsou estimovány a Jouleovy ztráty z nich dopočteny). Tyto ztráty jsou zatíženy chybou do jednoho procenta, na které se v řetězci měření hlavně podílí měřící transformátor, převodník a systém pro přenos. Jouleovy ztráty, svodem a korónou jsou v rámci zadání předmětem testování na atmosférických vlivech (venkovní teploty). S mnoha prostudovaných materiálů mi není známo, zda existuje publikovaná práce, která se zabývá rozбором a výpočty technických ztrát na vedení VVN a ZVN a jejich testování na atmosférických vlivech (převážně venkovní teplotě).

3 MATEMATICKÉ POJMY POUŽITÉ K TESTOVÁNÍ ZÁVISLOSTÍ ELEKTRICKÝCH ZTRÁT U VEDENÍ VVN A ZVN [10], [20]

Pojmy, uvedené v této kapitole jsou vybrané pasáže z matematické statistiky. Jedná se o názorné objasnění uvedených teorií, použitých k řešení závislostí technických ztrát na atmosférických vlivech (venkovní teplotě). Potřebné jsou pro hledání závislostí mezi dvěma argumenty. V mém případě se jedná o hledání závislostí například mezi velikostí Jouleových ztrát, korónou a svodem u vedení přenosové soustavy na atmosférických vlivech (např. venkovní teploty). K tomuto účelu jsou vstupní data získána z archívu řídicího systému na dispečinku ČEPS, a meteorologické údaje z ČHMÚ v Ostravě-Porubě. Aby bylo možné přikročit k ověřování závislostí těchto různých druhů ztrát na vedení je třeba tyto ztráty od sebe oddělit a testovat samostatně.

3.1 KORELACE

Korelací rozumíme míru (intenzitu) závislosti statistických znaků (např. ztráty a venkovní teplota). V rámci řešení habilitační práce se bude korelace zabývat závislostmi dvou statistických znaků, u kterých budu nejvíce předpokládat určitou závislost. Protože mým úkolem v rámci zadání je rozdělit technické ztráty u vedení přenosové soustavy na jednotlivé dílčí ztráty, mezi které patří Jouleovy ztráty, korónou a svodové ztráty. Po vyčíslení těchto ztrát budu pro testování používat právě vybrané kapitoly z matematické statistiky teorii regrese a korelace, které jsou uvedeny v níže uvedených kapitolách.

3.2 KORELAČNÍ KOEFICIENT k_{xy}

Vyjadřuje míru závislosti mezi znaky statistického souboru. závislost znamená, nevysoké hodnoty v jedné sadě (např. ztráty Jouleovy, korónou nebo svodem) odpovídají vysokým hodnotám ve druhé sadě (venkovní teplota) nebo nízké hodnoty odpovídají nízkým hodnotám. Pokud jsou hodnoty obou sad (ztráty a venkovní teplota) nezávislé, bude korelace blízká nule, viz. koeficient korelace.

$$k_{xy} = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{\left[n \cdot \sum x_i^2 - \left(\sum x_i \right)^2 \right] \left[n \cdot \sum y_i^2 - \left(\sum y_i \right)^2 \right]}} \quad [3.1]$$

n počet testovaných vzorků (např. venkovní teploty, ztráty korónou, Jouleovy ztráty)

x_i i -tý testovaný argument x (např. venkovní teplota)

y_i i -tý testovaný argument y (např. ztráty elektrické energie)

Tabulka 3.1 Meze koeficientu korelace

Velikost k_{xy}	Koeficient korelace nabývá hodnot od -1 do $+1$ včetně
$k_{xy} = 0$	neexistuje závislost
$ k_{xy} < 0,5$	mluvíme o slabém stupni závislosti
$ k_{xy} > 0,5$	mluvíme o významném stupni závislosti
$0,5 < k_{xy} < 0,9$	mluvíme o vysokém stupni závislosti
$k_{xy} = \pm 1$	platí mezi hodnotami (např. ztráty, venkovní teplota) lineární závislost

3.3 REGRESNÍ ANALÝZA

Regresí rozumíme vystižení charakteru závislostí a určení její konkrétní formy. Úkolem regrese (tento pojem znamená vyrovnání) je získat odhady neznámých hodnot jednoho znaku (ztráty) na základě zjištěných hodnot druhého znaku (venkovní teplota).

Při náhradě statistického souboru vhodnou matematickou závislostí je nutno vyřešit dva problémy:

- volba vhodné matematické závislosti

- volba parametrů zvolené matematické závislosti tak, aby co nejlépe nahrazovala statistický soubor

Z matematických funkcí lze obecně k náhradě použít libovolnou funkční závislost. Volí se však zpravidla nejjednodušší funkce, např.:

- přímka $y = a + b \cdot x$ [3.2]

- kvadratická funkce $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$ [3.3]

- polynom 3. stupně $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3$ [3.4]

- obecný polynom $y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n$ [3.5]

- exponenciální funkce $y = a \cdot b^x$ [3.6]

Optimální určení parametrů zvolené matematické závislosti lze provést metodou nejmenších čtverců. Pomocí této metody lze nahradit statistický soubor vhodnou matematickou funkcí, která bude nejlépe vystihovat skutečný průběh zatížení.

3.3.1 Stanovení optimálních matematických závislostí

a) **Přímka** $y = a + b \cdot x$

$$n \cdot a + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad [3.7]$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad [3.8]$$

Řešením soustavy rovnic [3.7] a [3.8] získáme parametry a , b rovnice přímky

b) **Parabola** $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$

$$n \cdot a + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i \quad [3.9]$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad [3.10]$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \quad [3.11]$$

Řešením soustavy rovnic [3.9], [3.10] a [3.11] získáme parametry a , b , c rovnice paraboly.

c) **Polynom 3. stupně** $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3$

$$n \cdot a + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + d \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i \quad [3.12]$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + d \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad [3.13]$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 + d \cdot \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \quad [3.14]$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^5 + d \cdot \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n x_i^3 \cdot y_i \quad [3.15]$$

Řešením soustavy rovnic [3.12], [3.13], [3.14] a [3.15] získáme parametry a , b , c , d rovnice polynomu 3. stupně.

d) **Exponenciální funkce** $y = a \cdot b^x$

Přímé řešení je nevýhodné a složité, proto se rovnice exponenciály upravuje na tvar

$$\ln y = \ln a + x \cdot \ln b \quad [3.16]$$

Provedeme-li nyní substituci $Y = \ln y$, $A = \ln a$, $B = \ln b$, lze rovnici [3.16] upravit na tvar:

$$Y = A + B \cdot x \quad [3.17]$$

$$n \cdot \ln a + \ln b \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \ln y_i \quad [3.18]$$

$$\ln a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + \ln b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \ln y_i \quad [3.19]$$

Řešením soustavy rovnic [3.18] a [3.19] získáme parametry $\ln a$, $\ln b$ a z nich parametry a , b exponenciální funkce.

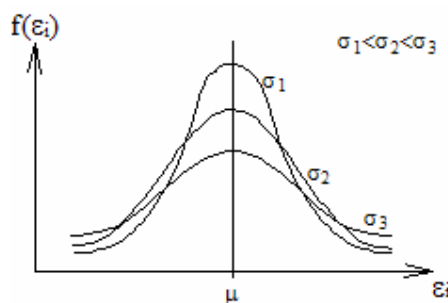
3.3.2 Hodnotící kritéria

Jak už bylo v této práci řečeno, Jouleovy ztráty vedení jsou závislé jednak na toku činného a jalového výkonu, napětí, parametrech vedení a na velikosti venkovní teploty. Se zvyšující se venkovní teplotou Jouleovy ztráty rostou. Bude samozřejmě platit i opačná závislost, tzn. že při snížení venkovní teploty budou činné ztráty klesat.

Ke srovnání výsledků jednotlivých funkčních závislostí se využívají následující statistické veličiny:

průměrná absolutní odchylka
$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|}{n} \quad [3.20]$$

Průměrná absolutní odchylka určuje průměrnou velikost odchylky „ ϵ “ mezi vypočtenou a skutečnou hodnotou y . Pomocí její velikosti lze velice lehce určit, jak jednotlivé matematické závislosti prokládají naměřené body. Její nevýhodou ovšem je, že z ní nelze určit, jak jsou jednotlivé chyby rozptýleny od střední hodnoty. Tzn. že jedna náhodně odchýlená hodnota může ovlivnit celý výsledek.



Obr. 3.1 Vliv směrodatné odchylky na tvar Gaussovy křivky

směrodatná odchylka
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|^2}{n}} \quad [3.21]$$

Směrodatná odchylka udává jak budou jednotlivé odchylky „ ϵ “ rozptýleny kolem střední hodnoty. Čím bude směrodatná odchylka menší, tím je příslušná Gaussova křivka „vyšší“ a „užší“ (obr. 3.1). Z toho vyplývá důležitý závěr, že pro malé hodnoty „ σ “ se odchylky budou s vysokou pravděpodobností pohybovat kolem střední hodnoty a nebudou

tedy rozptýleny. Směrodatná odchylka tedy slouží jako doplňkové kritérium k průměrné absolutní odchylce.

$$\text{variační koeficient} \quad v = \frac{\sigma}{\bar{y}_i} \cdot 100 \quad [\%] \quad [3.22]$$

$$\text{kde } \bar{y}_i \text{ je průměrná vypočtená hodnota: } \bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n y'_i}{n} \quad [3.23]$$

Variační koeficient patří mezi tzv. charakteristiky relativní variability. Uvedené předcházející dvě charakteristiky patřily mezi tzv. charakteristiky absolutní variability. Variační koeficient je definován jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru. Po vynásobení stem udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru \bar{y}_i . Z toho vyplývá, že variační koeficient zohledňuje nejen rozptýlení odchylky „ε“ kolem její střední hodnoty, ale i její relativní velikost vůči hodnotám statistického souboru.

4 ZPŮSOBY ŘEŠENÍ PROBLÉMU SVODU A KORÓNY VE SVĚTĚ

V habilitační práci je řešena problematika rozboru a výpočtu elektrických ztrát na vedení VVN a ZVN a jejich testování na atmosférických vlivech (venkovní teploty). Výsledkem je potom doporučení a možnost využití těchto poznatků v praxi. V této kapitole chci uvést některé možnosti provozu vedení VVN a ZVN v závislosti na venkovní teplotě a měření koróny v zahraničí. K tomuto účelu jsem vybral ze zahraničních pramenů oblasti problematiky blízké zadání habilitační práce. Z množství pramenů, ze kterých jsem vybíral uvádím ty poznatky, které se mi zdály zajímavé a v České republice méně známé.

4.1 MĚŘENÍ TEPLOTY SNÍMAČI NA VEDENÍ VVN A ZVN V USA

[15], [26]

Způsob měření teploty přímo na vedení byl zkoušen v USA. Měření teploty senzory na vedení dává přesný obraz o teplotě vodiče jak na povrchu tak uvnitř. Jedná se o využití těchto údajů k hospodárnému provozu vedení s menšími ztrátami. Metoda počítá s tím, že proudová zatížitelnost přenosového vedení se vypočte v počítači řídicího systému na základě vstupních

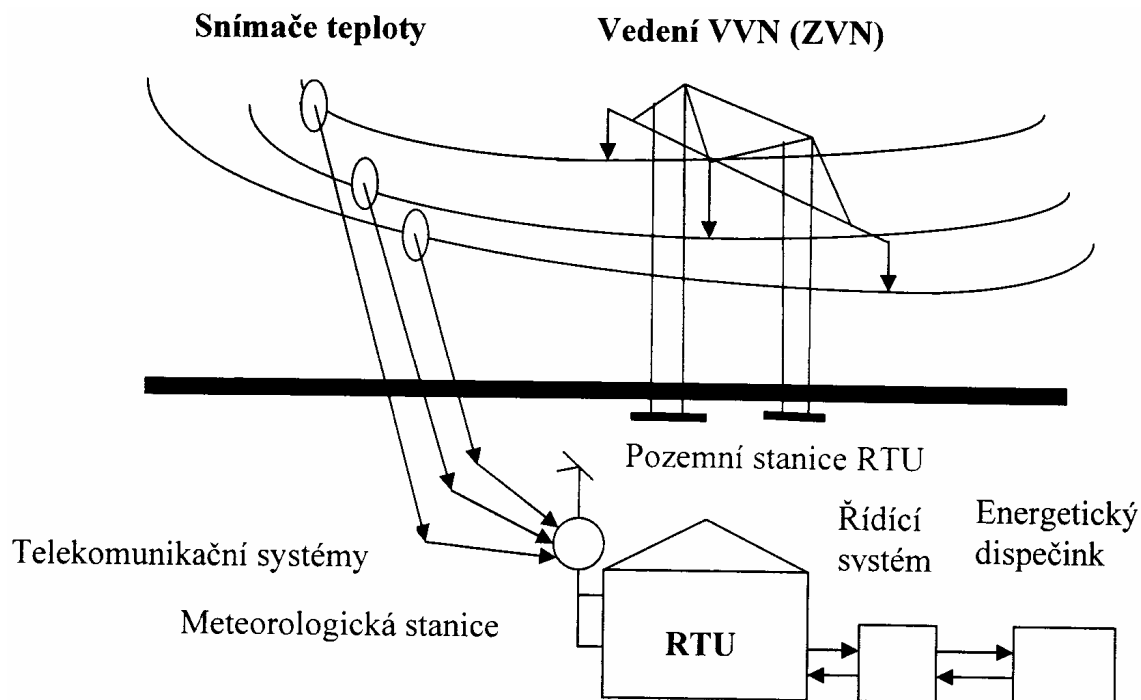
meteorologických dat a teploty vodičů vedení v reálném čase. Reálné údaje teploty jsou přenášeny přes telekomunikační síť do podstanice řídicího systému. Údaje teploty a povětrnostní data se měří na vedeních a povětrnostních stanicích v několika lokalitách podél příslušného vedení. K tomuto účelu se používá velké množství teplotních senzorů na vodičích vedení a také mnoho meteorologických stanic podél vedení. Na zpracování těchto dat se používá počítačový systém, který vyžaduje speciální hardware a software pro sběr dat ze vzdálených lokálních snímačů přes speciální telekomunikační síť. Na obr. 4.1 je zjednodušeně naznačen tok dat ze snímačů teploty umístěných na vedení do podstanice RTU, dále do řídicího systému a příslušného energetického dispečinku, který má venkovní vedení v řízení. Výhodou takového systému je, že zpracovává reálná data teploty vodiče (přesný údaj teploty uvnitř a na povrchu vodiče) a výstupem je možnost přesné předpovědi zatížitelnosti vedení VVN a ZVN s ohledem na oteplení vodiče v reálném čase. Tento stav dává možnost provozovat vedení v závislosti na teplotě. Nevýhodou jsou velké náklady a údržba celého systému.

Vzorec pro výpočet proudové zatížitelnosti vodiče [15]

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_{ac}}} \quad [A, W \cdot m^{-1}, W \cdot m^{-1}, W \cdot m^{-1}, \Omega \cdot m^{-1}] \quad [4.1]$$

I	$[A]$	dovolené proudové zatížení vodiče
P_r	$[W \cdot m^{-1}]$	tepelné ztráty vyzařené z vodiče radiací
P_c	$[W \cdot m^{-1}]$	tepelné ztráty odvedené z vodiče konvekci vlivem proudění vzduchu
P_s	$[W \cdot m^{-1}]$	tepelný zisk přijat vodičem ze slunečního záření
R_{ac}	$[\Omega \cdot m^{-1}]$	průměrný střídavý odpor vodiče

Hodnoty P_r , P_c , P_s a R_{ac} jsou funkcí teploty, kterou měříme senzory přímo na vedení



Obr. 4.1 Způsob měření teploty na vedení a její přenos do RTU (Remote Terminal Unit)

4.2 ZATÍŽITELNOST VEDENÍ S OHLEDEM NA TEPLITU VODIČE [15] [28]

Tato kapitola pojednává o možnosti využití reálných vstupních údajů teploty vodičů vedení a parametrů vodičů pro numerické zpracování, jehož výsledkem je možnost předpovídání zatěžování vedení VVN a ZVN v reálném čase. Jedná se dynamický model, který pracuje s daty v reálném čase. Opět je to metoda zkoušená v USA. Dynamický model slouží pro předpověď proudové zatížitelnosti vodičů vedení přesně na základě reálných dat dosazených do následující teplotní diferenciální rovnice [4.2], kde je výsledkem numerického řešení proudová zatížitelnost venkovního vedení v reálném čase dle [4.1].

Teplotní diferenciální rovnice dle literatury [15]

$$M \cdot c_p \cdot \frac{dT_{av}}{dt} = P_j + P_s + P_m - P_r - P_c \quad [4.2]$$

kde:

$$M = \gamma \cdot A \quad [kg \cdot m^{-1}] \quad \text{hmotnost vodiče}$$

A	$[m^2]$	průřez vodiče
T_{av}	$[^{\circ}C]$	průměrná teplota vodiče
γ	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota materiálu vodiče
c_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrné teplo materiálu vodiče
$T_{av} = \frac{T_c + T_s}{2}$		
		[4.3]
T_c	$[^{\circ}C]$	vnitřní teplota vodiče,
T_s	$[^{\circ}C]$	povrchová teplota vodiče, změřená teplotním senzorem,
P_j	$[W \cdot m^{-1}]$	Jouleovy ztráty ve vodiči,
P_s	$[W \cdot m^{-1}]$	tepelný zisk vodiče ze slunečního záření,
P_m	$[W \cdot m^{-1}]$	magnetické ztráty ve vodiči,
P_r	$[W \cdot m^{-1}]$	tepelné ztráty vyzařené z vodiče radiací,
P_c	$[W \cdot m^{-1}]$	tepelné ztráty odvedené z vodiče vlivem proudění vzduchu.

Tyto ukázky způsobu provozu vedení VVN a ZVN v zahraničí ukazují na možnosti získávání a zpracování atmosférických údajů v reálném čase a jejich využití s pomocí výpočetní techniky k optimálnímu provozu vedení s minimem ztrát.

4.3 MĚŘENÍ KORÓNOVÝCH VÝBOJŮ SPECIÁLNÍ KAMEROU [23]

Tato kapitola pojednává o způsobech měření korónových výbojů na poškozených izolátorech na vedení. K tomuto měření vyvinula firma OFIL Ltd. z Izraele korónovou denní kameru DayCorII. Princip měření a použití kamery je popsán v níže uvedeném odstavci. Korónové výboje způsobují poškození izolátorů na vedeních VVN a ZVN a zvyšují elektrické ztráty. Tyto výboje jsou speciálním druhem částečného výboje a jsou viditelné na povrchu elektrického materiálu ionizací okolního vzduchu. Mají velice nízkou intenzitu a lze je vnímat pouze očima v téměř absolutní tmě. Kvantitativně jsou dány pouze přibližně na základě vztahu k rozptylu ztrátového výkonu. Tento jev se běžně děje na venkovních energetických zařízeních (např. nadzemním vedením VVN a ZVN). Jsou závislé na změnách počasí a mohou

být dvakrát až čtyřikrát větší ve vlhkém prostředí. Způsobují radiové rušení, zvukové rušení a z dlouhodobého hlediska mohou nevratně poškodit pevné izolační materiály a součásti, stejně jako degradaci polymerických izolátorů. Záření korónových výbojů probíhá v UV – ultrafialovém pásmu a může být viditelné vhodným UV citlivým měřicím zařízením. Ve venkovním prostředí je možné korónové výboje vidět pouze v noci, jelikož sluneční záření obsahuje přes den značnou hodnotu UV zaslepujícího záření. Z důvodu odhalování míst s korónovými výboji vyvinula firma OFIL Ltd. z Izraele korónovou denní kameru DayCorII. Tato kamera využívá ultrafialové emisní spektrum korónového vzduchového výboje. Analýzu provádí pouze v tzv. okénku, ve vlnovém rozsahu od 240 do 280 nm. Citlivost zařízení je kvůli nízké intenzitě vyzařované energie korónou maximální. Korónová kamera je tak citlivá, že dokáže rozpoznat výboje hodnot několika pC ve vzdálenosti 10 m. Speciální filtr umožňuje použití kamery za plného denního světla. Lokalizace přesného místa UV výboje probíhá tak, že jsou kontinuálně snímány dva obrazy, jeden ve viditelném pásmu záření a druhý ve specifickém okénku UV pásma záření daný OFIL Ltd. selektivním solárním zaslepovacím filtrem. Po sloučení obou obrazů korónová kamera na monitoru přesně zobrazí zdrojové místo koróny na přehledném viditelném pozadí. Výhodou použití kamery je schopnost rozpoznat korónu ve všech etapách degradace a poškození součástí. Korónová kamera se používá v oblasti prediktivní údržby na jednotlivých prvcích a součástích přenosových, rozvodných a distribučních energetických systémů, dále kontrole energetických zařízení a dalších celků. Příklad použití korónové kamery je z USA, kdy během kontroly prováděné vrtulníkem došlo k lokalizaci korónového výboje izolátorového závěsu 345 kV, který se projevoval jako zdroj rušení. Závěrem je možné říci, že korónová kamera patří v dnešní době mezi moderní technologie. Neslouží sice přímo pro měření ztrát korónou ale k odhalování míst s výskytem korónových výbojů. Její správné použití chrání energetická zařízení a snižuje ztráty.

4.4 MONITOROVÁNÍ SVODOVÉHO PROUDU NA 400 KV IZOLÁTOROVÉM ŘETĚZCI V ZNEČIŠTĚNÉ OBLASTI MEXIKA [29]

Z důvodu řešení problematiky svodových proudů v rámci zadání disertační práce mne zaujaly postupy monitoringu a záznamu měření počtu špiček svodových proudů na znečištěném izolátoru ve stadiu před vznikem přeskoku na izolátorovém řetězci

v severovýchodní části Mexika. Tam se vyskytly problémy s akumulací (usazováním nečistot) znečištění na izolátorech u vedení 400 kV. Jedná se o vedení, které prochází znečištěnou oblastí s častým výskytem mlhy a dochází zde k přeskokům a velkým tokům svodových proudů na izolátorových řetězcích. Z těchto důvodů byl vyvinut měřicí systém, který měří a ukládá ve vzorcích do paměti systému (okamžité maxima) špičkové hodnoty svodového proudu. Z těchto špiček se vyhodnocuje zbytkový čas do vzniku přeskočků na izolátoru. Tento měřicí systém byl instalován na několika stožárech příslušného vedení 400 kV jako diagnostické zařízení, které monitoruje povrch a izolační schopnost znečištěných izolátorů. Systém tvoří senzor svodového proudu, který se skládá z proudového transformátoru (CT - current transformer) se speciální magnetizační charakteristikou (vysoká permeabilita), zařízením k získávání dat (DAS – data acquisition system), napájení pomocí solárního panelu (solar panel) a propojení koaxiálním kabelem (coaxial cable) s výstupem pro stažení naměřených údajů pro přenosný osobní počítač. Transformační převod proudového transformátoru je přizpůsoben s ohledem na vzdálenost mezi izolátorem a systémem k získávání dat (cca. 20 m). Princip spočívá v zapojení primárního vinutí proudového transformátoru mezi dvě stříšky izolátorového řetězce a spojení se zemí. Sekundární vinutí je spojeno koaxiálním kabelem k zařízení pro získávání dat, které je napájeno solárním panelem o napětí 12 V/18W. V případě zamračeného počasí je použit jako záložní zdroj baterie 105 Ah. Tento systém skládá data svodových proudů do tří stupňů, podle dosažených úrovní. Data špičkových naměřených hodnot svodového proudu (leakage current) jsou ukládána v paměti DAS, kde jsou stahována přes přenosný osobní počítač k dalšímu zpracování a vyhodnocování.

5 TEORIE ZTRÁT ELEKTRICKÉ ENERGIE [29]

Ztráty elektrické energie vznikají ve všech prvcích elektrizační soustavy. Ztráty představují část vyrobené energie, která je nevyužita a způsobuje dodatečné náklady. V rámci této disertační práce se zabývám technickými ztrátami na vedení ZVN a VVN. Mezi tyto elektrické ztráty patří Jouleovy ztráty, korónou a ztráty svodem. Pro správné rozčlenění těchto ztrát chci zpracovat vhodnou teorii, která správně vystihne velikost jednotlivých technických ztrát. K tomuto úkolu budu chtít využít údajů z provozu (ČEPS, a.s.), například data z řídicího systému dispečinku (činný výkon, jalový výkon, napětí, proud, měřené elektrické ztráty

metodou estimace a další údaje). Dále pro posouzení závislostí technických ztrát chci využít meteorologická data z ČHMÚ, které jsem pravidelně získával.

Z důvodu problematiky tématu habilitační práce se chci zaměřit hlavně na technické ztráty, které se významně podílí na velikosti ztrát na vedení ZVN a VVN.

Technické ztráty na vedení VVN a ZVN jsou způsobeny v těchto obvodech:

První, proudový obvod, tvoří vodiče v rozvodné soustavě VVN a ZVN, ve kterých dochází v důsledku činného odporu materiálu vodičů R (tj. el. odporu, který musí překonávat el. proud, protékající vodičem) k tepelným (Jouleovým) ztrátám činného výkonu ($\Delta P = R I^2$).

- *Jouleovy ztráty*

Druhý, magnetický obvod pro přenos el. energie vytváří magnetické pole, vznikající kolem vodiče protékaného el. proudem, jehož příslušný magnetický tok je přímo úměrný protékajícímu proudu ($\Phi = L I$), kde L představuje indukčnost vedení VVN a ZVN.

Třetí, dielektrický obvod pro přenos el. energie tvoří elektrické pole vznikající mezi vodiči, nacházejícími se pod el. napětím. Tento obvod je charakterizován elektrickým nábojem el. pole, úměrným provoznímu napětí ($Q = C U$), kde C představuje kapacitu vedení VVN a ZVN.

V důsledku nedokonalosti dielektrika dochází na vedení VVN a ZVN:

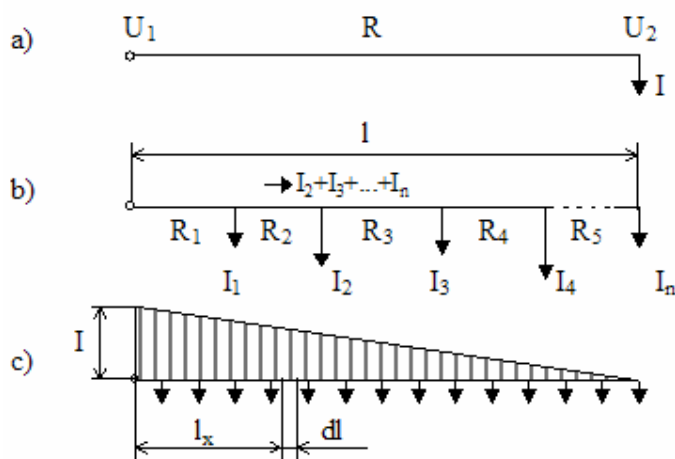
- *ke ztrátám sršením (korónou)*, způsobeným nedokonalou el. izolací mezi vodiči, kdy v důsledku určité omezené hodnoty el. pevnosti vzduchu dochází v některých nepříznivých provozních případech (atmosférické vlivy) k jeho ionizaci, přecházející v samostatný výboj, známý pod názvem *koróna*
- *ke ztrátám svodem* (tj. pronikavostí proudu, způsobeným nedokonalou elektrickou izolací vedení VVN a ZVN vůči zemi)

5.1 JOULEOVY ZTRÁTY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA VEDENÍCH

Hodnota ztrát elektrické energie je velmi důležitým ukazatelem hospodárnosti provozu. Činné ztráty způsobují oteplení vodičů. Činné ztráty způsobuje i jalová složka, i když nekoná práci.

V praxi existují tři druhy zapojení vedení:

- vedení zatížená na konci
- vedení zatížená odbočkami a na konci
- vedení zatížená rovnoměrně po celé délce



Obr. 5.1 Ukázka stavů zatížení vedení

První typ (obr. 5.1 a) jsou většinou vedení VVN a ZVN a také některá VN. Vedení VVN a ZVN jsou provozována v rámci přenosové soustavy a vzhledem k zadání disertační práce jsou i objektem dalšího řešení.

Druhý typ (obr. 5.1 b) jsou většinou vedení VN a třetí typ (obr. 5.1 c) jsou vedení NN. Oba dva typy provozu vedení nejsou předmětem zadaného úkolu disertační práce a jsou v rámci teorie uvedeny pro informaci.

Pro *vedení s několika odběry* (obr. 5.1 b), jsou celkové ztráty dány součtem ztrát v jednotlivých úsecích [9]:

$$\Delta P = 3 \cdot R_n I_n^2 + \dots + 3 \cdot R_3 \cdot (I_n + \dots + I_4 + I_3)^2 + 3 \cdot R_2 \cdot (I_n + \dots + I_4 + I_3 + I_2)^2 + 3 \cdot R_1 \cdot (I_n + \dots + I_4 + I_3 + I_2 + I_1)^2 \quad [5.1]$$

Obecně lze ztráty ve třech fázích s n různě rozloženými odběry vyjádřit vztahem:

$$\Delta P = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \Sigma(R_n \cdot I_n^2) \quad [\text{kW}; \Omega, \text{A}] \quad [5.2]$$

Pokud chceme počítat ztráty výkonu trojfázového vedení z proudu vtékajícího do vedení, můžeme použít následující obecný vztah, který je také popsán v literatuře [9]:

$$\Delta P = k \cdot R \cdot I^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}; \Omega, \text{A}] \quad [5.3]$$

kde: I ... proud procházející vedením

k ... činitel zatížení, vyjadřující rozložení zatížení na vedení. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí od „1“ (pro *vedení s rovnoměrně rozloženým zatížením*- obr. 5 c) až do „3“ (pro *vedení zatížené jedním odběrem na konci*- obr. 5 a)

Činné ztráty na vedení způsobuje nejenom činná, ale i jalová složka proudu. Jelikož platí, že: $I^2 = I_\varepsilon^2 + I_j^2$, můžeme rovnici [5.3] rozepsat na tvar:

$$\Delta P = k \cdot R \cdot I_\varepsilon^2 \cdot 10^{-3} + k \cdot R \cdot I_j^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}; \Omega, \text{A}] \quad [5.4]$$

kde první část rovnice představuje činné ztráty výkonu ΔP_ε způsobené činnou složkou proudu I_ε procházejícím činným odporem R a druhá část představuje činné ztráty výkonu ΔP_j způsobené průchodem jalové složky proudu I_j činným odporem R .

Činný odpor vedení [19]

Je teplotně závislý a s rostoucí teplotou jeho odpor roste a naopak. Tuto závislost zohledňuje teplotní součinitel odporu „ α “. Jeho hodnotu pro použitý materiál vodiče najdeme v materiálových tabulkách.

Pro odpor vodiče při libovolné teplotě platí vztah:

$$R_v = R_{20} \cdot (1 + \alpha \Delta v) \quad [5.5]$$

kde

R_v činný odpor při teplotě „v“ [Ω]

R_{20} činný odpor při teplotě 20 °C [Ω]

α teplotní součinitel odporu [K^{-1}], např. pro AlFe vodiče je $\alpha = 3,87 \cdot 10^{-3} K^{-1}$

Δv teplotní rozdíl od 20 °C [K]

Činný odpor je také frekvenčně závislý (skinefekt). Skinefekt způsobuje nerovnoměrné rozdělení proudu v průřezu vodiče a tím i zvětšení odporu. Lze říci, že střídavý odpor je vyšší než stejnosměrný.

$$R_{stř} = k \cdot R_{ss} \quad [\Omega; -; \Omega] \quad [5.6]$$

Pro činitel „k“ platí pro hliník a měď tyto empirické vztahy.

$$k_{Al} = 1 + 1,04 \cdot f^2 \cdot S^2 \cdot 10^{-10} \quad [-; Hz; mm^2]$$

$$k_{Cu} = 1 + 0,405 \cdot f^2 \cdot S^2 \cdot 10^{-10} \quad [-; Hz; mm^2]$$

S průřez vodiče [mm^2]

f frekvence [Hz]

V praxi se používají lana (AlFe) a v katalogu bývá výrobcem stanovena hodnota činného odporu vztažená na jednotku délky (obvykle kilometr) „ R_K “.

$$R = R_K \cdot l \quad [\Omega; \Omega km^{-1}; km] \quad [5.7]$$

Poznámka:

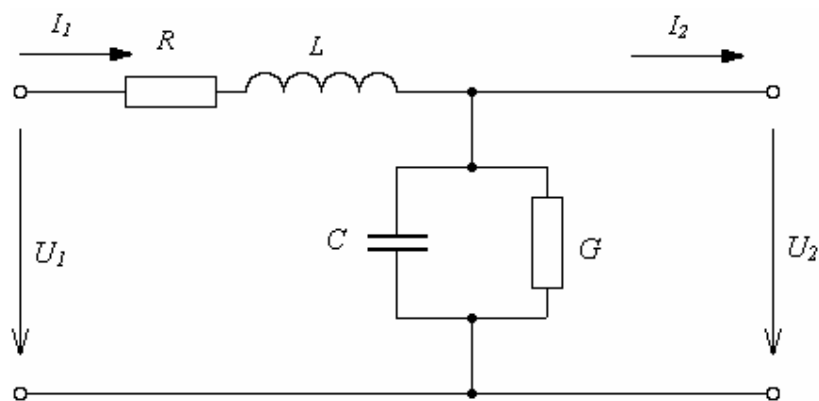
Pro testování Jouleových ztrát na venkovní teplotě jsou používány estimované hodnoty v 15 min. vzorcích z řídicího systému na dispečinku ČEPS v Ostravě. *Odpor vedení je v estimovaných hodnotách Jouleových ztrát již zahrnutý a je tímto podroben při testování vlivům venkovní teploty.*

5.1.1 Teorie výpočtu trojfázových vedení VVN a ZVN

Thomsonovy rovnice

Při řešení vedení VVN a ZVN (obecně při řešení střídavých vedení všech napěťových hladin) je nutno respektovat všechny čtyři parametry elektrických vedení, popsáno je v literatuře [24], jedná se o činný odpor, indukčnost, kapacitu a svodovou vodivost.

Tyto parametry při řešení elektrických sítí NN a VN zjednodušeně považujeme za prostorově soustředěné tj. výsledné hodnoty těchto parametrů nahradíme jedním fyzikálním prvkem. Samotný výpočet vedení se pak provádí podle náhradního schématu, které obsahuje prostorově soustředěné parametry.



Obr. 5.2 Náhradní schéma jedné fáze střídavého vedení

Pro řešení vedení můžeme využít teorii čtyřpólů, kdy vedení představuje pasivní, lineární, souměrný čtyřpól.

Základní rovnice čtyřpólu jsou následující:

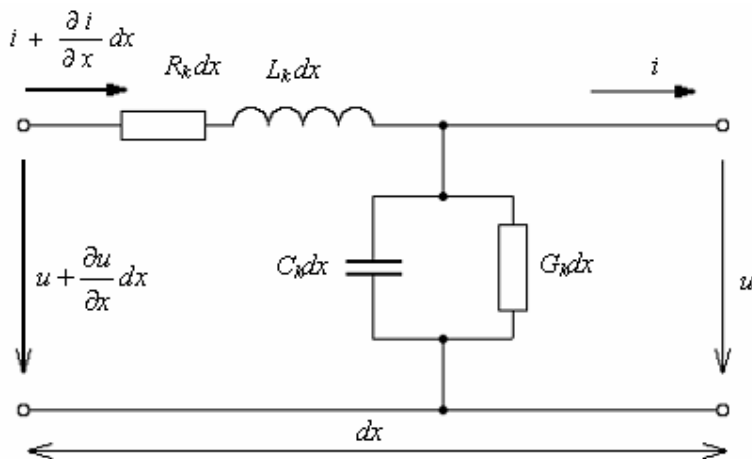
$$\bar{U}_1 = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \quad [5.8]$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \quad [5.9]$$

A, B, C, D jsou tzv. **Blondelovy konstanty**

Pro přesná řešení vedení (zvláště vedení VVN a ZVN) nelze ovšem zjednodušovat vedení na náhradní schéma s prostorově soustředěnými parametry, ale je nutno respektovat prostorově rozložené parametry vedení.

Vedení si je nutno představit jako kaskádní zapojení nekonečného počtu elementů vedení o délce dx . Jednofázové náhradní schéma takového elementu je obrázku (parametry vedení jsou uváděny s indexem K , protože jsou vztaženy na jednotku délky vedení).



Obr. 5.3 Jednofázové náhradní schéma nekonečného počtu elementů vedení o délce dx

Matematické vyjádření napětí a proudu na začátku elementu vychází z Taylorova rozvoje.

$$u(x + dx) = u(x) + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx^2 + \dots \quad [5.10]$$

Analogicky to platí pro proud. Členy dx s druhou a vyšší mocninou se zanedbávají.

Aplikujeme-li na element vedení druhý Kirchhoffův zákon, je výsledná rovnice následující:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u - R_K dx \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) - L_K dx \frac{\partial \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right)}{\partial t} = 0 \quad [5.11]$$

Úpravou vztahu včetně zanedbání členů s dx^2 dostaneme první Thomsonovu rovnici:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = R_K \cdot i + L_K \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad [5.12]$$

Bude-li pro uzel elementu aplikován 1. Kirchhoffův zákon, je výsledkem následující rovnice:

$$i + \frac{\partial i}{\partial x} dx - i - G_K u dx - C_K dx \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad [5.13]$$

Úpravou tohoto vztahu pak lze získat druhou Thomsonovu rovnici:

$$\frac{\partial i}{\partial x} = G_K \cdot u + C_K \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad [5.14]$$

Další úpravy první a druhé Thomsonovy rovnice spočívají v jejich derivacích podle dx a dt .

Úpravami pak lze napsat třetí a čtvrtou Thomsonovu rovnici:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R_K \cdot G_K \cdot u + (R_K \cdot C_K + L_K \cdot G_K) \frac{\partial u}{\partial t} + L_K \cdot C_K \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad [5.15]$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = R_K \cdot G_K \cdot i + (R_K \cdot C_K + L_K \cdot G_K) \frac{\partial i}{\partial t} + L_K \cdot C_K \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad [5.16]$$

Protože řešení Thomsonových rovnic pro střídavá vedení, kdy časový průběh napětí a proudu by byl obecný, jsou matematicky značně náročná, v rámci elektroenergetiky se tyto rovnice řeší pro sinusový (harmonický) průběh proudu a napětí. (Symboly označené pruhem nebo dvěma pruhy jsou komplexní čísla)

Pro časový průběh proudu a napětí lze napsat:

$$\overline{\overline{U}} = \sqrt{2} \cdot \overline{U} \cdot e^{j\omega t} \quad [5.17]$$

$$\overline{\overline{I}} = \sqrt{2} \cdot \overline{I} \cdot e^{j\omega t} \quad [5.18]$$

Pro parciální derivace těchto výrazů platí:

$$\frac{\partial \overline{\overline{U}}}{\partial x} = \sqrt{2} \cdot \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} \cdot e^{j\omega t} \quad [5.19]$$

$$\frac{\partial \overline{\overline{U}}}{\partial t} = \sqrt{2} \cdot \overline{U} \cdot j\omega \cdot e^{j\omega t} \quad [5.20]$$

Analogicky to platí pro proud. Dosazením vztahů [5.19] a [5.18] do první Thomsonovy rovnice a následnou úpravou vyjde následující vztah pro první derivaci napětí podle délky (x).

$$\frac{d\bar{U}}{dx} = (R_K + j\omega L_K) \cdot \bar{I} = \bar{Z}_K \cdot \bar{I} \quad [5.21]$$

Analogicky pro derivaci proudu:

$$\frac{d\bar{I}}{dx} = (G_K + j\omega C_K) \cdot \bar{U} = \bar{Y}_K \cdot \bar{U} \quad [5.22]$$

Z_K podélná impedance vedení (vztažená na jednotku délky) [$\Omega \cdot km^{-1}$]

Y_K příčná admitance vedení (vztažená na jednotku délky) [$S \cdot km^{-1}$]

Další derivací podle dx a úpravou lze odvodit následující rovnice pro napětí a proud (respektive pro jejich druhé derivace podle dx).

$$\frac{d^2\bar{U}}{dx^2} = \bar{Z}_K \cdot \frac{d\bar{I}}{dx} = \bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \bar{U} \quad [5.23]$$

$$\frac{d^2\bar{I}}{dx^2} = \bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \bar{I} \quad [5.24]$$

Řešení těchto diferenciálních rovnic s použitím stejných podmínek jako u stejnosměrného vedení (pro $x = 0$ jsou hodnoty proudu a napětí rovny hodnotám těchto veličin na konci vedení) je vyjádřeno vztahy:

$$\bar{U}_x = \bar{U}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot x) + \bar{Z}_V \cdot \bar{I}_2 \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot x) \quad [5.25]$$

$$\bar{I}_x = \bar{U}_2 \cdot \frac{1}{\bar{Z}_V} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot x) + \bar{I}_2 \cdot \cosh(\bar{\gamma} \cdot x) \quad [5.26]$$

Pro určení hodnoty proudu a napětí na začátku vedení do předchozích rovnic dosadit za x hodnotu délky vedení l .

$$\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K} \quad \text{činitel šíření [km}^{-1} \text{]}$$

$$\bar{Z}_V = \sqrt{\frac{\bar{Z}_K}{\bar{Y}_K}} \quad \text{vlnová (charakteristická) impedance vedení [Ω]}$$

Z uvedených rovnic lze také určit Blondelovy konstanty pro střídavé vedení:

$$\bar{A} = \bar{D} = \cosh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad [-]$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_V \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad [\Omega]$$

$$\bar{C} = \frac{1}{\bar{Z}_V} \cdot \sinh(\bar{\gamma} \cdot l) \quad [S]$$

činitel šíření „ γ “ je rovněž komplexní číslo, které má svou reálnou a imaginární hodnotu.

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_K + j\omega L_K)(G_K + j\omega C_K)} \quad [5.27]$$

$$\alpha \quad \text{činitel útlumu [Np · km}^{-1} \text{]}$$

$$\beta \quad \text{fázová konstanta [rad · km}^{-1} \text{]}$$

V případě, že je „ β “ rovno nule, jedná se o stejnosměrné vedení ($L_K = C_K = 0$). Je-li „ α “ rovno nule, jedná se o tzv. bezztrátové vedení ($R_K = G_K = 0$). Toto vedení je z fyzikálního hlediska neskutečné, ale protože v podélné impedanci převládá u vedení VVN a ZVN induktivní reaktance a v příčné admitanci převládá kapacitní vodivost, je z technického hlediska možno vedení VVN v mnoha případech nahradit vedením bezztrátovým.

Přirozený výkon

Je-li vedení zatíženo vlnovou impedancí, přenáší tzv. přirozený výkon, pro který platí vztah:

$$\bar{S}_P = \frac{\bar{U}_2^2}{\bar{Z}_V} \quad [MW, kV, \Omega] \quad [5.28]$$

$$U_2 \quad \text{sružená hodnota napětí na konci vedení [kV]}$$

$$Z_V \quad \text{vlnová impedance vedení [Ω]}$$

Vlnová impedance vedení charakterizuje přenosovou schopnost vedení. Je-li vedení provozováno pod přirozeným výkonem, má induktivní charakter.

Náhradní články v sítích VVN a ZVN

Protože přesné řešení poměrů na dlouhém vedení VVN a ZVN vyžaduje rozdělení vedení na velký počet jednotkových prvků a je třeba řešit průběh změn elektrických veličin podél vedení, je přesná exaktní metoda hodně zdlouhavá. Navíc při řešení se musí použít složitých matematických vztahů. Proto se v praxi stále používají pro výpočty vedení VVN a ZVN tzv. náhradních článků, hlavně „T“, „ Π “, „ Γ “ a Steimetzův článek.

Tyto články dávají další možnosti výpočtu vedení VVN a ZVN, oproti exaktní metodě.

Z důvodu dostatečného množství měřených dat (P ; Q ; U) a hodnot estimovaných Jouleových ztrát z řídicího systému energetického dispečinku ČEPS v Ostravě jsem hledal řešení pro výpočet Jouleových ztrát. Provedl jsem mnoho výpočtů, které jsem pro rozsáhlost zadání již neuváděl. Dostatečnou přesnost do 1 % oproti estimovaným hodnotám splnil nejlépe článek „ Π “. U tohoto článku se dají snadno využít pro výpočet Jouleových ztrát měřených hodnot.

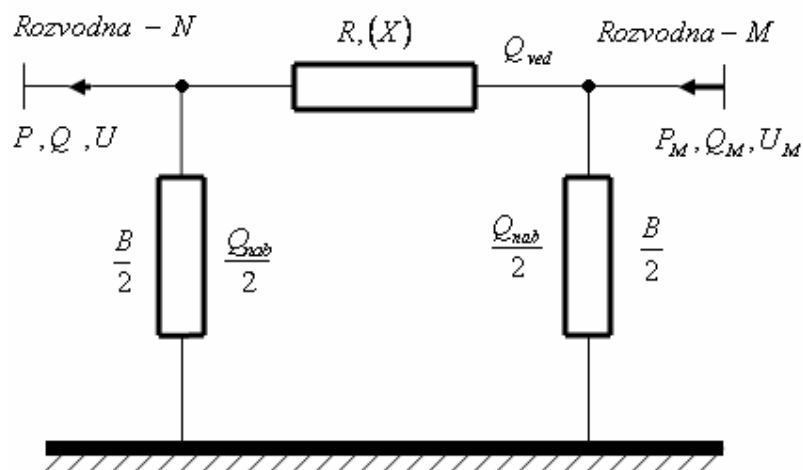
V následující kapitole jsem provedl pomocí „ Π “ článku odvození výpočtu Jouleových ztrát. Při odvození výpočtu Jouleových ztrát jsem potřeboval zanedbat svodovou vodivost neboť ztráty svodem jsou řešeny samostatně. Vzhledem k délkám vedení VVN a ZVN v České republice jsem mohl v příčné větvi svod zanedbat.

5.1.2 Odvození vzorce pro výpočet Jouleových ztrát na obecném vedení pomocí π (pí) článku

Výpočet velikosti Jouleových ztrát na vedení VVN a ZVN bude sloužit v následujících kapitolách pro porovnání se ztrátami vyhodnocenými metodou estimace v řídicím systému dispečinku ČEPS, a.s. v Ostravě. Pro odvození jsem použil „ π “ (pí) článek, který z hlediska vstupních hodnot měřených a katalogových mi nejvíce vyhovoval. Při odvození Jouleových ztrát jsem zanedbal svod, který je v rámci technických ztrát řešen samostatně. Odvodil jsem vzorec, který pro výpočet ztrát potřebuje data dostupná z měření na dispečinku. Odpor a susceptance vedení jsou základní parametry v katalogu vedení a velikosti

P , Q , U jsou měřeny. Pro výpočty používám 15 sekundové vzorky, ze kterých je možno graficky vytvořit vhodný průběh ztrát u vybraného vedení. Po přijatelném ověření přesnosti budou měřené ztráty (estimované) sloužit v dalších kapitolách pro testování závislosti na atmosférických vlivech (venkovní teploty).

(P1) π článkem nahrazené vedení přenosové soustavy se zanedbáním svodu:



Obr. 5.4 Ukázka náhradního π (pí) článku se zanedbáním svodu

Postup odvození vzorce pro výpočet Jouleových ztrát pomocí π (pí) článku se zanedbáním svodu:

Zdánlivý výkon vedení:

$$\bar{S} = P + jQ_{ved} = P + j\left(Q - \frac{Q_{nab}}{2}\right) \quad [\text{VA}, \text{W}, \text{var}] \quad [5.29]$$

Nabíjecí výkon vedení:

$$Q_{nab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{nab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{U}{\sqrt{3} \cdot X_b} = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{U \cdot B}{\sqrt{3}} = U^2 \cdot B \quad [\text{var}, \text{V}, \text{A}, \text{V}, \Omega, \text{V}, \text{S}] \quad [5.30]$$

Odvození vzorce pro výpočet Jouleových ztrát na obecném vedení přenosové soustavy se zanedbáním svodu:

$$\begin{aligned}\Delta P &= 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot R \cdot \left(\frac{\bar{S}}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 = 3 \cdot R \cdot \left[\frac{\sqrt{P^2 + \left(Q - \frac{Q_{nab}}{2} \right)^2}}{\sqrt{3} \cdot U} \right]^2 = \\ &= 3 \cdot R \cdot \left[\frac{\sqrt{P^2 + \left(Q - \frac{U^2 \cdot B}{2} \cdot 10^6 \right)^2}}{\sqrt{3} \cdot U} \right]^2 = \quad \quad \quad [\text{MW}, \Omega, \text{MW}, \text{Mvar}, \text{kV}, \mu\text{S}, \text{kV}] [5.31] \\ &= 3 \cdot R \cdot \frac{P^2 + \left(Q - \frac{U^2 \cdot B}{2} \cdot 10^6 \right)^2}{3 \cdot U^2} = R \cdot \frac{P^2 + \left(Q - \frac{U^2 \cdot B}{2} \cdot 10^6 \right)^2}{U^2}\end{aligned}$$

Vzorec [5.31] se dá pak rozepsat na:

Uvažovaný předpoklad: svodová vodivost $G = 0$

- činné ztráty způsobené tokem činného výkonu $\Delta P_\epsilon = \frac{R \cdot P^2}{U^2}$

- činné ztráty způsobené tokem jalového výkonu $\Delta P_j = \frac{R \cdot \left(Q - \frac{U^2 \cdot B}{2} \cdot 10^{-6} \right)^2}{U^2}$

Poznámka:

Koeficient 10^{-6} umožňuje používat hodnoty v $[\text{MW}]$, $[\text{Mvar}]$, $[\mu\text{S}]$ a $[\text{kV}]$. Hodnoty P , Q , U dosazujeme z příslušného uzlu přenosové soustavy, kde u konkrétního vedení počítáme ztráty. Velikosti P , Q , U se dají snadno odečíst v časových vzorcích z řídicího systému dispečinku přenosové soustavy a dosazovat do vzorce, který nám bude vyčíslovat činné ztráty na vedení.

Při výpočtu činných ztrát na vedení přenosové soustavy se zohledňují znaménka toku činného a jalového výkonu vzhledem k obecnému uzlu. Podle úmluvy je-li $P > 0$ pak činný výkon vtéká do uzlu a naopak. Znaménko jalového výkonu pak určuje, zda jde o výkon

induktivní či kapacitní. Pro $P > 0$ (zdroj výkonu) platí, že $Q > 0$ je induktivní jalový výkon a $Q < 0$ je kapacitní jalový výkon. Pro $P < 0$ (odběr výkonu) platí, že $Q < 0$ je induktivní jalový výkon a $Q > 0$ je kapacitní jalový výkon.

5.2 ZTRÁTY KORÓNOU NA VEDENÍ VVN A ZVN

Vzhledem k problematice řešení habilitační práce rozboru ztrát u vedení přenosové soustavy je nutno uvažovat o koróně. Koróna způsobuje část technických ztrát na vedení ZVN a VVN. Koróna je samostatný výboj, který vzniká na povrchu vodičů elektrických vedení. Má temně fialovou barvu a je provázena praskáním až bručivým zvukem. Výskyt koróny je provázen ztrátami elektrické energie. Na velikosti ztrát korónou mají podstatný vliv atmosférické podmínky.

5.2.1 Definice pojmu koróna

Korónou nazýváme neúplný samostatný výboj vznikající u elektrod, je-li vzdálenost mezi elektrodami poměrně velká a mají-li elektrody malý poloměr zakřivení. Pak je pole nehomogenní a u elektrod vzniká velká intenzita pole, kdežto v ostatním prostoru mezi elektrodami je intenzita pole dosti malá.

Zvyšujeme-li postupně napětí, dosáhne intenzita pole u elektrod nakonec takových hodnot, které již postačují k nárazové ionizaci. Tak se vytvoří podmínky pro vznik neúplného výboje, omezujícího se jen na tenkou vrstvu vzduchu, přiléhající k elektrodám. Elektrody se obklopí slabě svítící vrstvou, jejíž vzhled dal jevu název výboj korónou nebo prostě koróna.

Rozhodující vliv na počáteční stádia výboje korónou má stav povrchu elektrod, nepatrná znečištění se stávají ohnisky místních předběžných nestabilních výbojů s malou intenzitou. Tyto místní výboje mají ve svém počátečním stadiu nesamostatný charakter a jsou závislé na vnějších ionizačních činidlech. Proudění těchto místních výbojů jsou velmi malé a přetržité a pouze tehdy, je-li vodič dostatečně dlouhý a má-li poloměr, vytvářejí tyto výboje střední součtové, více nebo méně stálé, avšak vždy těžko reprodukovatelné proudy ztrát korónou. Určit počáteční intenzitu pole nebo počáteční napětí koróny, je za těchto okolností obtížné. Pouze při dobře vyleštěných a čistých elektrodách lze mluvit za daných podmínek (tvar pole, hustota a druh plynu, vlhkost) o určitém počátečním neboli kritickém napětí, při němž vzniká koróna. Při postupném zvyšování napětí se náhle zvětší nepatrný proud na

hodnotu, kterou lze měřit technickými přístroji. V tomto okamžiku se vodič obklopí slabě svítící vrstvou a lze slyšet i typické šumění a praskání. Další zvyšování napětí pak způsobuje rychlý růst proudu, svítící vrstva kolem elektrod září stále jasněji, jev se však stále omezuje jen na okolí elektrod. Pak se objevují trsy a jiskry a nastává přechod ve výboj úplný, jehož proud je v zásadě dán napětím a odporem zdroje.

5.2.2 Základní údaje pro výpočet ztrát korónou

Základním činitelem, ovlivňujícím jev koróny na vedení, je intenzita pole na povrchu fázových vodičů. Neuvažujeme-li hrubost a nerovnost povrchu lan, plyne i tak z prostorového uspořádání fází vedení a z jejich případného rozštěpení do svazku, že povrchová intenzita pole nemá ve všech bodech na obvodu fázového vodiče libovolné fáze konstantní hodnotu. Tento maximální gradient bude rozhodovat o vzniku koróny a bude rozhodující při posuzování vedení se zřetelem na vlivy rušení v radiovém přenosu. Protože wattové ztráty, způsobené korónou jsou dány součtem unikající energie po celém povrchu vodiče a proto se výpočty ztrát korónou vztahují ke střední hodnotě povrchové intenzity pole.

Na ztráty korónou má vliv stav povrchu vodičů a atmosférické vlivy, mezi které hlavně patří tlak, teplota, vlhkost, déšť, mlha, jinovatka. Na velikost ztrát má dále vliv povrch vodiče a mastnota. Pro udržení intenzity elektrického pole na povrchu vodiče při provozním napětí pod počáteční hodnotou vzniku koróny, je třeba průměr vodiče zvětšovat přibližně úměrně s napětím, například AlFe lana. Při napětí nad 220 kV se dává přednost svazkovým vodičům, při napětí 400 kV je používání svazkových vodičů nezbytné.

5.2.3 Atmosférické vlivy působící na ztráty korónou

Různé atmosférické podmínky mají na velikost ztrát korónou velký vliv. Při výpočtu je třeba rozlišovat tyto druhy počasí:

- pěkné počasí bez měřitelných srážek
- déšť, včetně mokrého sněhu
- suchý sníh
- jinovatka
- mlha při viditelnosti pod 1000 [m]

Mlha se uvažuje pouze při výpočtu ztrát korónou na vedení naprázdno nebo málo zatíženém, jsou-li vodiče neohřáté. Na provozovaném vedení VVN a ZVN je zapotřebí brát v úvahu klimatické poměry kolem trasy vedení. Z tohoto důvodu byly použita data z ČHMÚ v Ostravě-Porubě.

Tabulka 5.1 Ztráty korónou na km délky vedení o průřezu 400 [mm²] dle literatury [9]:

Napětí [kV]	Pěkné počasí [kW·km ⁻¹]	Děšť [kW·km ⁻¹]	Jinovatka [kW·km ⁻¹]
110	0	0	0,8
220	0,3	6	25
400	4	40	80

5.2.4 Druhy výpočtů ztrát korónou na vedení VVN a ZVN

Ztráty korónou tvoří jednu nezadatelnou část technických ztrát. Z hlediska zadání habilitační práce pro rozčlenění technických ztrát na jednotlivé druhy ztrát je důležité použít správnou a vhodnou teorii výpočtu. V literaturách jsou uváděny různé druhy výpočtů ztrát korónou. Pro objektivní posouzení ztrát korónou chci uvést dvě až tři metody pro posouzení. Základem použití správné teorie výpočtu ztrát korónou je návaznost na měřená data z řídicího systému dispečinku ČEPS v Ostravě.

Postup výpočtu ztrát korónou dle [12] a [21]

Výpočet relativní hustoty vzduchu:

$$\delta = \frac{p}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + v} \quad [-, \text{ kPa}, ^\circ\text{C}] \quad [5.32]$$

kde

δ [-] relativní hustota vzduchu vzhledem k teplotě 25 °C a tlaku 101,324 kPa

p tlak vzduchu [kPa]

v teplota vzduchu [°C]

Obecný vzorec výpočtu ekvivalentního poloměru pro n-svazek:

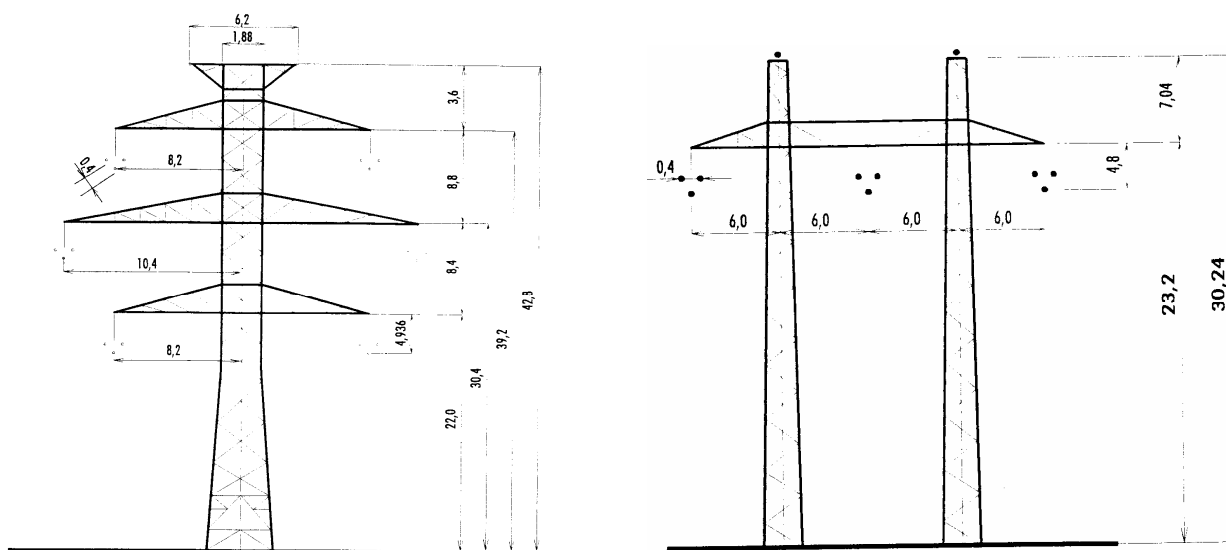
$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot a} \quad [\text{cm}, \text{cm}, \text{cm}] \quad [5.33]$$

r_e ekvivalentní poloměr svazkového vodiče [cm]

n počet vodičů ve svazku [-]

r poloměr vodičů [cm]

a vzdálenost vodičů ve svazku [cm]



Obr. 5.5 Střední geometrická vzdálenost pro vybrané stožáry typu SOUDEK a PORTÁL

Stožár SOUDEK:

$$d = \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \cdot \sqrt[3]{d_{15} \cdot d_{16} \cdot d_{26}}}{\sqrt[3]{d_{14} \cdot d_{25} \cdot d_{36}}} \quad [\text{m}] \quad [5.34]$$

Stožár PORTÁL:

$$d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13}} \quad [\text{m}] \quad [5.35]$$

Obecná střední geometrická vzdálenost u jakéhokoliv typu stožáru se vypočte na základě odvození vzorce z myšlených pravoúhlých trojúhelníků promítnutých v osách vzdálenosti mezi fázovými vodiči. Vzhledem k rozsáhlosti práce jsem uvedl odvozené vztahy jen pro dva typy stožárů hodně používaných.

Počáteční napětí koróny dle [12] :

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} \quad [\text{kV, cm}] \quad [5.36]$$

δ relativní hustota vzduchu [-]

m_1 a m_2 koeficienty respektující vliv povrchu vodiče a vliv počasí [-]

kde

m_1 koeficient vyjadřující kvalitu povrchu vodiče (závisí na konstrukci vodiče a jak se projevuje stárnutí vodiče)

$m_1 = 1$ hladké vodiče s kruhovým průřezem

$m_1 = 0,98 - 0,92$ špinavé a drsné vodiče

$m_1 = 0,98 - 0,82$ pro lana

m_2 koeficient respektující vliv počasí

$m_2 = 1$ suché počasí

$m_2 = 0,8$ deštivé a vlhké počasí

Ztráty korónou:

$$\Delta P_k = k \cdot (U - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{W} \cdot \text{km}^{-1}, \text{kV}] \quad [5.37]$$

U fázová hodnota napětí [kV]

kde

$$k = \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{d}} \quad [\text{Hz, m, m}] \quad [5.38]$$

Vzorec [5.37] a [5.38] je popisován v literatuře [21] jako Peekův.

Postup výpočtu ztrát korónou dle [3], [13] a [21]

Počáteční napětí koróny pro lana:

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} \quad [\text{kV, cm, cm, cm}] \quad [5.39]$$

$$F = \frac{U}{U_0} + 2 \cdot \ln \frac{U}{U_0} - 1 \quad [-] \quad [5.40]$$

Vzorec [5.41] je popisován v literatuře [12] jako Petersonův

$$\Delta P = \frac{112 \cdot f \cdot U^2 \cdot F \cdot 10^{-6}}{\left(\ln \frac{d}{r} \right)^2} \quad [\text{kW} \cdot \text{km}^{-1}] \quad [5.41]$$

d střední geometrická vzdálenost vodičů [cm]

f kmitočet [Hz]

U fázová hodnota napětí [kV]

U_0 počáteční napětí koróny [kV]

F koeficient dle [11]

δ relativní hustota vzduchu [-]

r poloměr vodiče [cm]

Postup výpočtu ztrát korónou dle literatury [13]

Činitel ovlivňující ztráty korónou na vedení VVN a ZVN je intenzita pole na povrchu fázových vodičů. Pokud neuvažujeme nerovnost povrchu lan, potom vzhledem k prostorovému uspořádání fázových vodičů plyne, že povrchová intenzita pole nemá ve všech bodech na obvodu libovolné fáze vodiče konstantní hodnotu. Důležitý faktor, který je rozhodující ke vzniku ztrát korónou je maximální povrchový gradient. Činné ztráty korónou jsou dány součtem unikající energie po celém povrchu vodiče a výpočty ztrát jsou vztaženy ke střední hodnotě povrchové intenzity pole.

Matematické vztahy pro výpočet ztrát korónou:

$$E_{\max} = E_{stř} \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{r}{a}\right) \quad [\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad [5.42]$$

kde

E_{\max} [kV·cm⁻¹] maximální povrchový gradient jedné fáze vedení

$E_{stř}$ [kV·cm⁻¹] střední povrchový gradient jedné fáze

r [cm] poloměr dílčího fázového vodiče v [cm]

a [cm] vzdálenost vodičů ve svazku (svazkový krok)

β [-] činitel závislý na počtu svazkových vodičů v jedné fázi

$$\beta = 2 \cdot (n - 1) \cdot \sin \frac{\pi}{n} \quad [5.43]$$

kde

n [-] počet vodičů ve svazku

$$E_{stř} = 0,018 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{C \cdot U_f}{n \cdot r} \quad [\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad [5.44]$$

$$C = \frac{1}{0,018} \cdot 10^3 \cdot g \quad [\text{pF} \cdot \text{km}^{-1}] \quad [5.45]$$

kde

U_f [kV] průměrné provozní fázové napětí vedení

C [pF·km⁻¹] provozní kapacita uvažované fáze

g [-] činitel konstrukce vedení, který je dán charakteristickými konstrukčními hodnotami vedení

Pro střední fázi vedení v horizontálním uspořádání je pro vedení VVN a ZVN a pro fáze uspořádané v rovnostranném trojúhelníku je činitel konstrukce vedení g_1 dán vztahem:

$$g_1 = \frac{1}{\ln \frac{d}{r_e} \cdot \frac{2 \cdot h}{\sqrt{4 \cdot h^2 + d^2}}} \quad [5.46]$$

Pro krajní fáze horizontálního uspořádání platí

$$g_2 = \frac{1}{\ln \frac{d}{r_e} \cdot \frac{2 \cdot h}{\sqrt[4]{(4 \cdot h^2 + d^2) \cdot (h^2 + d^2)}}} \quad [5.47]$$

kde

d střední osová vzdálenost vodičů [cm]

h střední výška vodiče nad zemí v [cm]

r_e náhradní poloměr svazkového vodiče v [cm]

Ve vzorcích se zanedbává vliv zemních lan.

Ztráty korónou závisejí dále na počátečním gradientu obalové koróny vodiče. U typu lana 350 – AlFe 4 je počáteční gradient $E_0=22,05$ [kV·cm⁻¹]

$$E_0 = 21,4 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0,299}{\sqrt{r}} \right) \quad [\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad [5.48]$$

Ve vzorci značí m koeficient drsnosti vodiče a pro běžná ocelohliníková lana se volí 0,82 dle literatury [13].

Tabulka 5.2 Počáteční gradienty E_0 pro vybraná AlFe lana VVN a ZVN dle [13]

Typ lana	185 – AlFe 6	185 – AlFe 4	185 – AlFe 3	350 – AlFe 4	350 – AlFe 6
Poloměr lana r (cm)	0,96	0,98	1,039	1,36	1,482
Počáteční gradient E_0 (kV·cm ⁻¹)	22,90	22,85	22,75	22,05	21,85

Pro posouzení vedení VVN a ZVN se zřetelem na korónu je důležitý poměr $\frac{E_{\max}}{E_0}$. Tento poměr se stanoví ze středního aritmetického průměru maximálního povrchového gradientu všech tří fází kontrolovaného vedení.

$$E_{\max} = \frac{1}{3} \cdot (E_{\max 1} + E_{\max 2} + E_{\max 3}) \quad [\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}] \quad [5.49]$$

Pokud poměr $\frac{E_{\max}}{E_0} \geq 0,9$, potom to svědčí o neekonomicky navrženém vedení s vysokými ztrátami korónou.

Pokud poměr $\frac{E_{\max}}{E_0} \leq 0,5$, jde o vedení, kde ztráty korónou nemusíme uvažovat.

V případě výpočtu ztrát korónou tímto postupem musím znát křivky jednotkových ztrát, stanovených na základě výsledků experimentálních prací, které jsou uvedeny v [13]. *Vzhledem k rozsáhlosti zadání habilitační práce je postup pro posouzení ztrát korónou zdlouhavý a nebude v práci dále používán. Postup uvádím pouze pro informaci.*

5.3 ZTRÁTY ZPŮSOBENÉ SVODEM [29]

Jsou jedním z charakteristických parametrů vedení VVN a ZVN. Protože žádný izolant nemá nekonečně velký izolační odpor, propouští každý izolant určitý proud vodivostí svého materiálu a to zejména po svém povrchu. Tento jev se nazývá svod.

Svodový proud je všeobecně daný vztahem:

$$I = \frac{U_f}{R_i} = U_f \cdot G \quad [A; V; \Omega; V; S] \quad [5.50]$$

kde

U_f [V] je napětí proti zemi

R_i [Ω] odpor izolace

G [S] vodivost izolace

$$G = \frac{1}{R_i} \quad [S; -; \Omega] \quad [5.51]$$

Svodový proud má charakter činného proudu. Ztráty svodem se těžko zjišťují výpočtem, proto se v praxi nejčastěji určují měřeními na vybudovaných vedeních.

Hodnoty naměřených ztrát jsou různé podle druhu počasí. Počasí ovlivňuje stav kdy je sucho, vlhko, déšť, mlha a jiné stavy. Zpětnou vazbou, která ovlivňuje druh počasí je roční období a venkovní teplota. Proto je v tomto příspěvku na základě získaných vstupních údajů zkoumána závislost jak může venkovní teplota ovlivňovat velikost ztrát. Venkovní teplota může ovlivňovat velikost svodového proudu a tudíž i ztráty.

Tabulka 5.3 Ztráty svodem na kilometr délky vedení dle literatury [19]

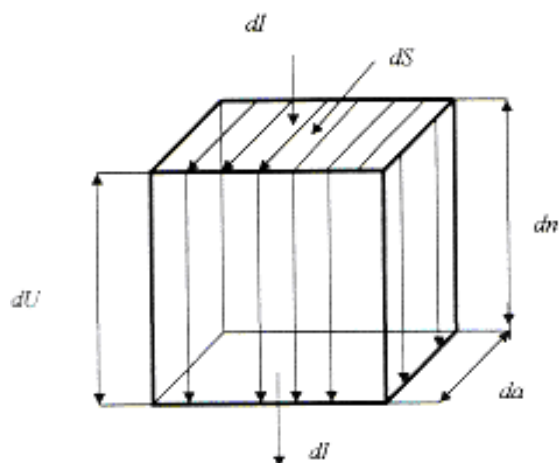
napětí [kV]	110	220	400
svodové ztráty [$W \cdot km^{-1}$]	70 - 3600	120 - 770	160 – 1400

5.3.1 Teoretický úvod k výpočtům svodových proudů

Svodové proudy na vedení VVN a ZVN způsobují nezanedbatelnou část technických ztrát. Tyto ztráty jsou způsobeny hlavně špatnou nebo nedokonalou izolací. Tato nedokonalá izolace je dána především tenkou vrstvou nečistot na izolátorových závěsech. Nečistoty se vytvářejí na izolátorech a způsobují tok svodových proudů a tím i zvýšení elektrických ztrát. Na vrstvu nečistot izolátoru mají velký vliv atmosférické vlivy a čistota ovzduší, která je zase ovlivněna průmyslovou činností v dané lokalitě.

Pro výpočet svodových proudů je nutné určit oblast znečištění, která je udána v normě ČSN 33 0405. Podle výběru oblasti znečištění je možné z normy určit měrnou povrchovou vodivost, která je důležitá pro výpočty. Tato veličina se dá také určit na základě měřených hodnot a přepočítat. Měření svodových proudů se v praxi provádějí v laboratořích VVN, ale tyto hodnoty nevyjadřují svodové proudy na celém vedení. Proto tato kapitola je zaměřena na výpočty svodových proudů a odvození vztahů a vzorců. Je zde odvozen Ohmův zákon v elementární formě, který je přímo k těmto výpočtům využíván. Odvození je vysvětleno na elementárním hranolku, který představuje elementární vrstvu znečištění na izolátoru. Dále jsou odvozeny a vysvětleny vztahy pro určení povrchové dráhy hladkého válce a rotačně symetrického tělesa, která představuje tok svodového proudu po povrchu izolátoru. K výpočtům svodových proudů je potom nutné znát tvarový faktor konkrétního izolátoru. Obecné odvození tvarového faktoru je uvedeno v následujících kapitolách. Při výpočtu tvarového faktoru izolátoru se chci zmínit o rozměru. V případě, že máme k dispozici výsledky laboratorních měření svodových proudů a přepočítáváme měrnou povrchovou vodivost, kterou byl izolátor znečištěn tak u výsledku tvarového faktoru musím počítat i s rozměrem vrstvy znečištění, která je ve výsledku zahrnuta.

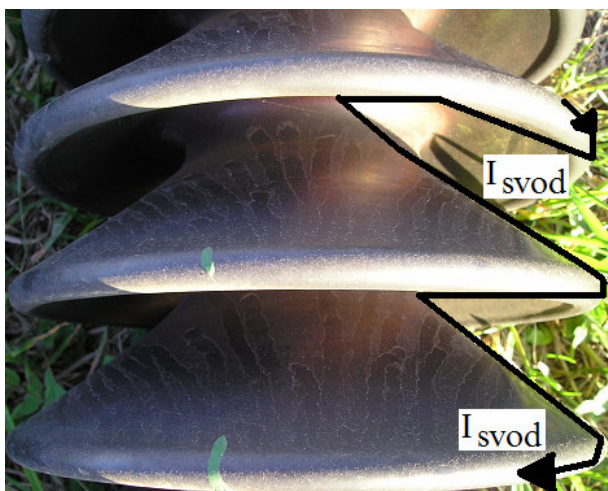
5.3.2 Vodivá vrstva znečištění na povrchu izolátoru



Obr. 5.6 Elementární hranolek vrstvy znečištění na izolátoru

kde

dU	[V]	elektrické napětí mezi čelními ploškami hranolku znečištění
dS	[mm ²]	normálová ploška kolmá ke směru protékajícího svodového proudu
dn	[m]	elementární výška hranolku vrstvy znečištění
da	[mm]	elementární šířka hranolku vrstvy znečištění
dI	[A]	elementární svodový proud



Obr. 5.7 Ukázka znečištění a toku svodového proudu po povrchu izolátoru

Na obr. 5.7 je viditelně znát znečištění povrchu izolátoru. Toto znečištění vzniká usazováním polétavého prachu z ovzduší na stříškách izolátoru. Při různých změnách atmosférických vlivů, zejména deště a mlhy, vznikají vhodné podmínky pro tok svodových proudů po povrchu izolátorů od vedení ke konstrukci uzemněných stožárů

Za předpokladu dostatečně malé plošky (dS) a malé výšky (dn) budou obě čelní plošky hranolku znečištění stejné a proudová hustota v hranolku znečištění se může pokládat za konstantní.

Potom můžeme odpor (vodivost) hranolku znečištění vypočítat jako odpor (vodivost) s elementárními rozměry.

$$dU = R \cdot dI = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dn}{dS} \cdot dI \quad [5.52]$$

$$\frac{dU}{dn} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dI}{dS} \quad [5.53]$$

$$E = \frac{1}{\gamma} \cdot J \quad [5.54]$$

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

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

$$\gamma \quad [S \cdot m \cdot mm^{-2}] \quad \text{měrná vodivost vrstvy znečištění}$$

V izotropickém prostředí je směr intenzity elektrického pole a proudové hustoty stejný, takže vektorově platí:

$$\bar{E} = \frac{1}{\gamma} \cdot \bar{J} = \rho \cdot \bar{J} \quad [5.55]$$

$$\rho \quad [\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}] \quad \text{měrný odpor vrstvy znečištění}$$

$$\gamma \quad [S \cdot m \cdot mm^{-2}] \quad \text{měrná vodivost vrstvy znečištění}$$

Vztah [5.55] je Ohmův zákon v elementární formě nebo analogicky můžeme napsat Ohmův zákon v praktickém tvaru viz. [5.56] :

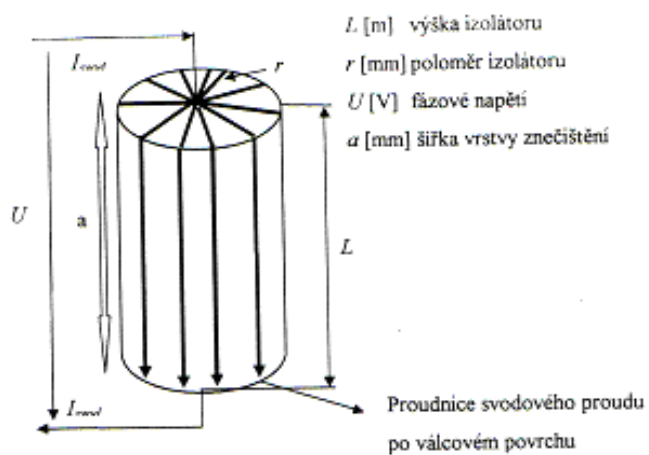
$$U = R \cdot I \quad [5.56]$$

U [V] elektrické napětí

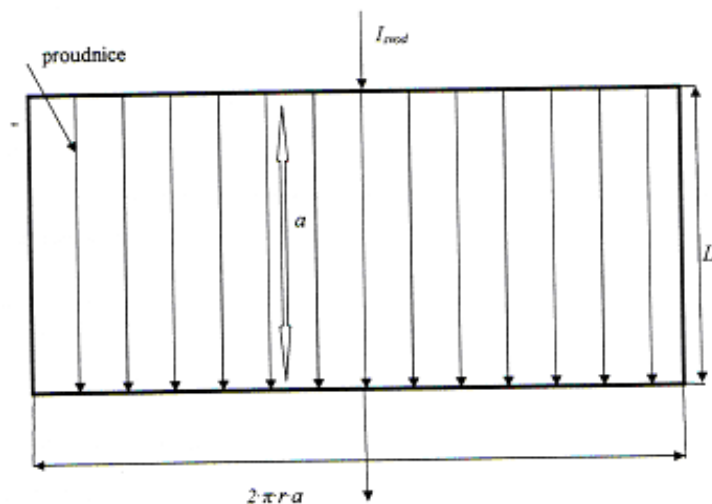
R [Ω] elektrický odpor

I [A] elektrický proud

5.3.3 Odpor (vodivost) povrchové vrstvy znečištění izolátoru



Obr. 5.8 Směr toku svodového proudu po povrchu izolátorového válce



Obr. 5.9 Rozvinutá válcová plocha izolátorového válce

Odpor válcové plochy:

$$R_{\text{VÁLCOVÁ-PLOCHA}} = \rho \cdot \frac{L}{S} = \rho \cdot \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot a}$$

[5.57]

ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$] měrný odpor vrstvy znečištění

L [m] výška válcové plochy

S [mm^2] průřez vrstvy znečištění

r [mm] poloměr izolátorového válce

a [mm] šířka vrstvy znečištění

Poznámka:

Šířka vrstvy znečištění je neznámá a značně neurčitá veličina, která může velmi významně ovlivnit výsledek při známé hodnotě měrného odporu „ ρ “.

Například když $a \rightarrow 0$, potom bude $R_{\text{VÁLCOVÁ-PLOCHA}} \rightarrow \infty$ pro libovolnou velikost „ ρ “ a nešlo by vystihnout vliv tvaru povrchu izolátoru na velikosti odporu válcové plochy

$R_{\text{VÁLCOVÁ-PLOCHA}}$

Proto předpokládáme, že známe měrný odpor „ ρ “ nebo měrnou vodivost „ γ “ vrstvy znečištění i se zahrnutím tloušťky vrstvy znečištění.

$$\begin{aligned} \text{Potom} \quad \rho &\rightarrow \rho' & \rho' &= \frac{\rho}{a} \\ \gamma &\rightarrow \gamma' & \gamma' &= \frac{1}{\rho'} = \frac{a}{\rho} \end{aligned}$$

Z těchto předpokladů můžeme napsat:

Odpor válcové plochy:

$$R_{\text{VÁLCOVÁ} \cdot \text{PLOCHA}} = \rho' \cdot \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r} = \rho \cdot \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot a} \quad [5.58]$$

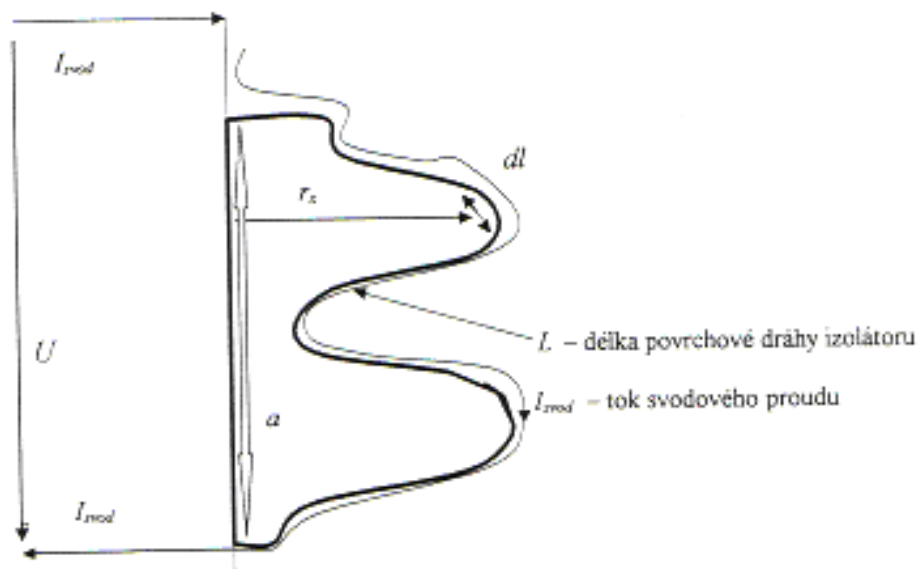
$$R_{\text{VÁLCOVÁ} \cdot \text{PLOCHA}} \quad [\Omega] \quad \text{odpor válcové plochy}$$

Admitance válcové plochy:

$$Y_{\text{VÁLCOVÁ} \cdot \text{PLOCHA}} = \gamma' \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{L} = \gamma \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot a}{L} \quad [5.59]$$

$$Y_{\text{VÁLCOVÁ} \cdot \text{PLOCHA}} \quad [S] \quad \text{admitance válcové plochy}$$

5.3.4 Povrch rotačně symetrického izolátoru



Obr. 5.10 Výřez části rotačního symetrického obecného izolátoru

Odpor povrchu symetrického izolátoru:

$\rho' = \frac{\rho}{a}$ kde „a“ je šířka vrstvy znečištění

$$R_{POVRCH \cdot IZOLÁTORU} = \rho' \cdot \int_0^L \frac{dl}{2 \cdot \pi \cdot r_x} \quad [5.60]$$

kde $f_{TV} = \int_0^L \frac{dl}{2 \cdot \pi \cdot r_x}$ je *odvozený tvarový činitel* povrchové dráhy izolátoru

Impedance povrchu symetrického izolátoru:

$$Y_{POVRCH \cdot IZOLÁTORU} = \frac{1}{R_{POVRCH \cdot IZOLÁTORU}} = \gamma' \cdot \int_0^L \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_x} \quad [5.61]$$

Svodový proud po povrchu izolátoru:

$$I_{svod} = \frac{U_f}{R_{POVRCH \cdot IZOLÁTORU}} = \frac{U_f}{\rho' \cdot \int_0^L \frac{dl}{2 \cdot \pi \cdot r_x}} \quad [5.62]$$

nebo

$$I_{svod} = U_f \cdot Y_{POVRCH \cdot IZOLÁTORU} = U_f \cdot \gamma' \cdot \int_0^L \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_x} \quad [5.63]$$

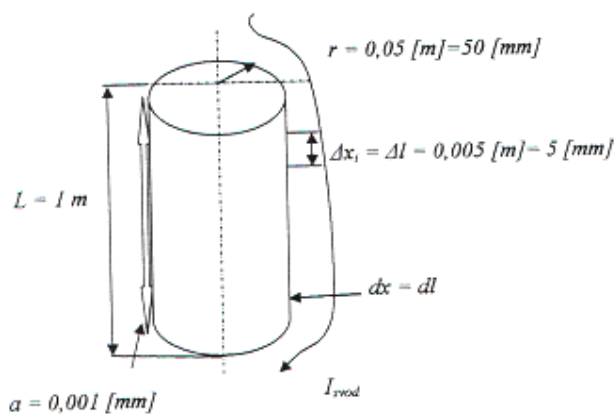
Čím je tvarový činitel f_{TV} povrchu izolátoru větší (potom je také povrchová dráha izolátoru větší) a svodový proud po povrchu izolátoru bude menší.

Při výpočtu určím z normy ČSN 330405 nebo dosadím přepočtené hodnoty na základě měření pro různé oblasti znečištění ρ' nebo γ' .

Velikost měrné vodivosti vrstvy znečištění γ' nebo měrného odporu ρ' zahrnuje také vrstvu znečištění „a“. V případě, že znám měřenou velikost svodového proudu přes izolátor použitý na konkrétním vedení (například z praktických měření na vedení v terénu nebo z měření na izolátorech v laboratoři VVN) mohu této znalosti využít pro výpočet měrné vodivosti vrstvy znečištění γ' nebo měrného odporu ρ' , kde již mám tuto měrnou vodivost zahrnutou. Potom můžu uvažovat, že znám γ nebo ρ . Této znalosti dále využiji pro

výpočty tvarových faktorů, kde je zahrnuta i vrstva znečištění. V mém případě jsem použil hodnoty svodových proudů naměřené v laboratoři VVN v Bratislavě-Trnávce. Velikosti svodových proudů takto naměřené jsou přesné a objektivní neboť jsou pro měření simulovány různé atmosférické vlivy v kratších časových úsecích než ve venkovním prostředí kde dochází ke změně atmosférických podmínek za podstatně delší dobu.

5.3.5 Příklad výpočtu tvarového „ f_{TV} “ faktoru hladkého izolátorového válce



Obr. 5.11 Model obecného izolátoru tvaru hladkého izolátorového válce

Zvolená vrstva znečištění $a = 1 \cdot 10^{-3} [mm]$ slouží pro názorný příklad výpočtu. Velikost „ a “ je volena pro ukázkou výpočtu tvarového faktoru.

$$f_{TV} = \int_0^L \frac{dl}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot a} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot a} \cdot [x]_0^L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 = \frac{1}{0,1 \cdot \pi} = \frac{10}{\pi} = \underline{\underline{3,18 m \cdot mm^{-2}}} \quad [5.64]$$

Výpočet f_{TV} faktoru hladkého izolátorového válce pomocí diferenciálu se zahrnutím vrstvy znečištění:

$$n = \frac{L}{\Delta l} = \frac{1000}{5} = 200 \quad [5.65]$$

$$f_{TV} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot a} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^{-3}} \cdot \sum_{i=1}^{200} 0,005 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,05} \cdot 200 \cdot (0,005) = \underline{\underline{3,18 m \cdot mm^{-2}}} \quad [5.66]$$

5.3.6 Příklad výpočtu tvarového faktoru „ f_{TV} “ izolátoru typu L100BH 550

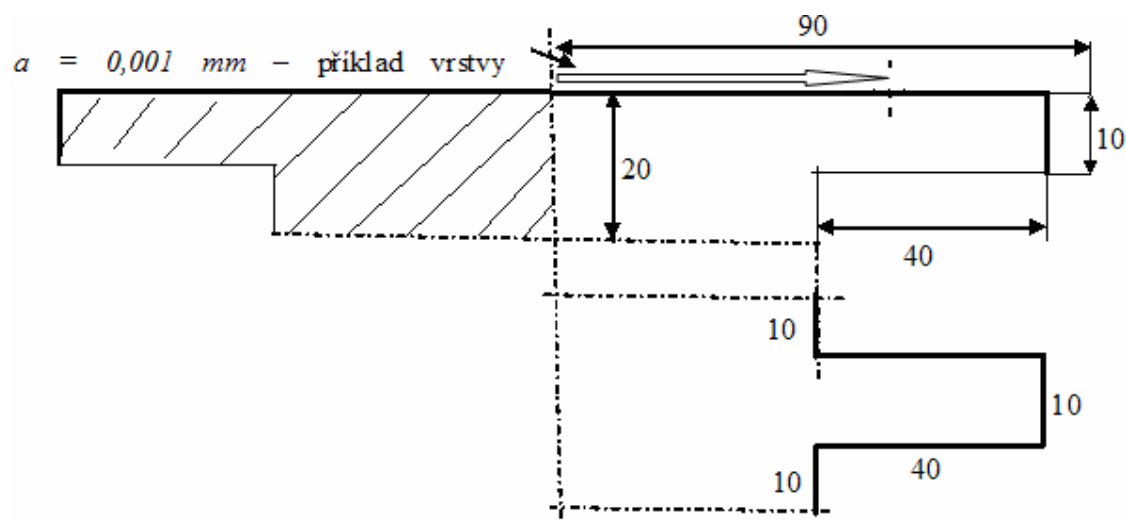
Tvarový faktor krajní stříšky:

$$f_{TV1} = \frac{10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{5}{r_{li}} = \frac{10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,001} \cdot \left(\frac{5}{5} + \frac{5}{10} + \frac{5}{15} + \frac{5}{20} + \frac{5}{25} + \frac{5}{30} + \frac{5}{35} + \frac{5}{40} + \frac{5}{45} + \right. \\ \left. + \frac{5}{50} + \frac{5}{55} + \frac{5}{60} + \frac{5}{65} + \frac{5}{70} + \frac{5}{75} + \frac{5}{80} + \frac{5}{85} + \frac{5}{90} + \frac{5}{95} + \frac{5}{100} \right) = \underline{\underline{0,5695 m \cdot mm^{-2}}}$$

Tvarový faktor vnitřní stříšky:

$$f_{TV2} = \frac{10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{5}{r_{li}} = \frac{10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 0,001} \cdot \left(\frac{5}{5} + \frac{5}{10} + \frac{5}{15} + \frac{5}{20} + \frac{5}{25} + \frac{5}{30} + \frac{5}{35} + \frac{5}{40} + \frac{5}{45} + \right. \\ \left. + \frac{5}{50} + \frac{5}{55} + \frac{5}{60} + \frac{5}{65} + \frac{5}{70} + \frac{5}{75} + \frac{5}{80} + \frac{5}{85} + \frac{5}{90} + \frac{5}{95} + \frac{5}{100} + \frac{5}{105} + \frac{5}{110} \right) = \underline{\underline{0,5843 m \cdot mm^{-2}}}$$

$$r_{l1} = r_{li} = r_{ln} = 5 mm = 5 \cdot 10^{-3} m - \text{jeden dílek povrchové dráhy izolátoru}$$



Obr. 5.12 Detail krajní a prostřední stříšky izolátoru L 100 BH 550 s rozměry

ÚDAJE PRO VÝPOČET TVAROVÉHO FAKTORU IZOLÁTORU *L 100 BH 550*:Výška izolátoru : *560 mm*Počet vnitřních stříšek : *28 ks*Povrchová dráha první a poslední stříšky: *90 + 10 = 100 mm*Povrchová dráha vnitřní stříšky: *10 + 40 + 10 + 40 + 10 = 110 mm***Celkový tvarový „ f_{TV} “ faktor:**

$$f_{TV} = (2 \cdot f_{TV1}) + (28 \cdot f_{TV2}) = (2 \cdot 0,5695) + (28 \cdot 0,5843) = \underline{\underline{17,49m \cdot mm^{-2}}} \quad [5.69]$$

**5.4 ŘEŠENÍ SVODOVÝCH PROUDŮ A ZTRÁT SVODEM NA VEDENÍ
PŘENOSOVÉ SOUSTAVY V OBECNÉM TVARU**

Svodové proudy nám způsobují na vedení (převážně VVN a ZVN) ztráty elektrické energie. V této kapitole bych chtěl využít podkladů znalosti měřených údajů svodových proudů z laboratoře VVN a konfigurace použitých izolátorů na konkrétním ukázkovém vedení k odvození vztahů pro výpočty svodových proudů. Z těchto podkladů bych chtěl naznačit originální obecný způsob řešení svodových proudů a ztrát svodem na vedení VVN a ZVN.

5.4.1 Vstupní údaje k obecnému řešení svodových proudů

Pro obecné řešení svodových proudů je třeba se zamyslet, které okolnosti a vlivy způsobují tok svodových proudů. V prvé řadě jsou to izolátory na vedení a jejich konfigurace v rámci složení izolátorového závěsu. Jedná se kolik izolátorů jedné fáze je spojeno ve větví v sérii a kolik je těchto větví spojeno paralelně. Například označení izolátoru *2II4L100BH550* znamená, že izolátorový závěs má 2 větve spojené paralelně a v každé větvi jsou 4 izolátory v sérii a typ jednoho izolátoru je *L100BH550*. Dále je třeba určit skupiny stožárů se stejnými izolátorovými závěsy. Na základě znalostí použitých izolátorů se musí vypočítat tzv. tvarový faktor, který prezentuje povrchovou dráhu příslušného izolátoru (dráha toku svodového proudu). Další důležitou veličinou pro výpočet je měrná povrchová vodivost, která udává znečištění izolátoru. Zahrnuje znečištění v dané oblasti. Tato veličina se dá vyhledat pro

danou oblast znečištění v normě [4], nebo na základě měření svodových proudů přes daný izolátor se dá vypočítat. Změřené hodnoty svodových proudů z laboratoře vysokého napětí v Bratislavě za různých meteorologických podmínek jsou uvedeny v tabulce 6.1. Výpočet měrné povrchové vodivosti na základě měřených svodových proudů je přesnější než hodnoty z normy. Měřené svodové proudy ukazují přesnější hodnoty, neboť měření těchto proudů po povrchu izolátoru probíhá simulovaně a izolátor je skutečně vystaven různým atmosférickým podmínkám. V neposlední řadě je třeba znát sdruženou či fázovou hodnotu napětí, která se dá přesně zjistit z řídicího systému na dispečinku. V praxi tuto hodnotu můžeme načítat v různých časových vzorcích (*např. 20 s, 30 s, 1 min, 15 min, 1 hod*). V dnešní době výpočetní techniky, kdy existují databáze všech prvků elektrizační soustavy není problém potřebné údaje pro výpočet svodových proudů zjistit. Pro určení svodových proudů a ztrát svodem je třeba pro výpočty navrhnout obecné vzorce, které by platily po nadefinování vstupních údajů.

Tabulka 5.4 Ukázka používaných typů izolátorů a složení izolátorových závěsů:

Typ izolátoru	Složení izolátorového závěsu
<i>LS75/21</i>	<i>2II2LS75/21</i>
<i>LS85/21</i>	<i>2II2LS85/21</i>
<i>L100BH550</i>	<i>2II4L100BH550</i>
<i>L100BH550</i>	<i>1II4L100BH550</i>
<i>LS75/21</i>	<i>1II2LS75/21</i>

Vysvětlení složeného izolátorového závěsu na příkladech:

<i>2II2LS75/21</i>	Izolátorový závěs má dvě větve s typem izolátoru <i>LS75/21</i> . V každé větvi jsou dva izolátory v sérii, větve jsou spojeny paralelně (celkem 4 izolátory v jedné fázi).
<i>2II2LS85/21</i>	Izolátorový závěs má dvě větve s typem izolátoru <i>LS85/21</i> . V každé větvi jsou dva izolátory v sérii, větve jsou spojeny paralelně (celkem 4 izolátory v jedné fázi).
<i>1II2LS75/21</i>	Izolátorový závěs má jednu větev s typem izolátoru <i>LS75/21</i> . Ve větvi jsou dva izolátory v sérii. (celkem 2 izolátory v jedné fázi).

<i>2II4L100BH550</i>	Izolátorový závěs má dvě větve s typem izolátoru <i>L100BH550</i> . V každé větvi jsou čtyři izolátory v sérii, větve jsou spojeny paralelně (celkem 8 izolátorů v jedné fázi).
<i>III4L100BH550</i>	Izolátorový závěs má jednu větev s typem izolátoru <i>L100BH550</i> . Ve větvi jsou čtyři izolátory v sérii. (celkem 4 izolátory v jedné fázi).

Vstupní údaje pro výpočet svodových proudů a ztrát svodem na obecném vedení:

l	počet skupin stožárů se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení [-]
k_n	počet stožárů n -té skupiny se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení [-]
i_n	počet paralelních větví v izolátorovém závěsu jedné fáze obecného vedení v n -té skupině stožárů [-]
j_n	počet izolátorů v jedné fázi v sérii jednoho izolátorového závěsu v n -té skupině stožárů obecného vedení [-]
f_{TVn}	tvarový faktor jednoho izolátoru v n -té skupině stožárů obecného vedení [$m \cdot mm^{-2}$]
γ_n	měrná povrchová vodivost typu izolátoru z n -té skupiny stožárů obecného vedení [$S \cdot m \cdot mm^{-2}$]
U_s	sdržené napětí obecného vedení [V]
I_{svod}	celkový svodový proud obecného vedení [A]
ΔP_{svod}	celkové ztráty svodem na obecném vedení [W]
L	celková délka obecného vedení [km]

Z definovaných údajů a veličin lze odvodit na základě teoretického rozboru v kapitole (5.3) tyto obecné vzorce [5.70], [5.71], [5.72] a [5.73] pro výpočty svodových proudů a ztrát svodem na obecném vedení VVN a ZVN.

Obecný vzorec pro výpočet svodového proudu na obecném vedení:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \quad [5.70]$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \left(k_1 \cdot i_1 \cdot \frac{\gamma_1}{j_1 \cdot f_{TV1}} + k_2 \cdot i_2 \cdot \frac{\gamma_2}{j_2 \cdot f_{TV2}} + \dots + k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot c$$

[A, V, -, -, S·mm²·m⁻¹, -, m·mm⁻², V, S]

$$\text{kde } c = \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \quad [\text{S, -, -, S·mm}^2\text{·m}^{-1}, -, \text{m·mm}^{-2}] \quad [5.71]$$

„c“ koeficient respektující vrstvu znečištění na izolátorech, typ, složení a počet izolátorových závěsů na vedení VVN a ZVN [jednotka v Siemensch - S]

Obecný vzorec pro výpočet ztrát svodem na obecném vedení:

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \left(\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = U_s^2 \cdot c \quad [5.72]$$

[W, V, -, -, S·mm²·m⁻¹, -, m·mm⁻², V, S]

Obecný vzorec pro výpočet ztrát svodem na kilometr vedení:

$$\Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} \quad [5.73]$$

[W·km⁻¹, V, -, -, S·mm²·m⁻¹, -, m·mm⁻², km, V, S, km]

6 VÝPOČTY TECHNICKÝCH ZTRÁT NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY [29]

Tato kapitola se zabývá výpočty jednotlivých technických ztrát na vedení přenosové soustavy. Jsou zde naznačeny postupy výpočtu ztrát Jouleových, korónou a svodem. Výpočet Jouleových ztrát se opírá o znalosti parametrů vedení (R a B) a měřených údajů (P , Q , U) v řídicím systému dispečinku ČEPS v Ostravě. Výpočtem chci ověřit, zda měřené údaje, které jsou vyhodnocovány metodou estimace jsou objektivní a mohou dále sloužit jako podklad pro

testování závislostí na atmosférických vlivech. Dalším druhem technických ztrát, kterým se ve výpočtech zabývám jsou výpočty svodových proudů. Výpočet svodových proudů a tím i ztrát svodem není v praxi obvyklý a ani jednoduchý. Většinou jde o experimentální měření. V mém případě jsem využil znalosti experimentálních měření a vhodných teorií k odvození vztahů, které umožní na základě potřebných vstupních údajů ztráty svodem vypočítat. Postup výpočtu svodových proudů je navržen jako originální na základě platných elektrotechnických teorií. Třetím typem technických ztrát jsou výpočty ztrát korónou. Ztráty korónou nám v praxi způsobují nezanedbatelnou část technických ztrát. V různých literaturách jsou uvedeny rozdílné postupy výpočtů ztrát korónou. Mám k dispozici obsáhlou databázi měřených veličin a meteorologických dat. Tato data jsem po dobu více jak jednoho roku získával z řídicího systému na dispečinku ČEPS v Ostravě a ČHMÚ v Ostravě-Porubě. Proto jsem se rozhodl vybrat teorii výpočtu ztrát korónou z více zdrojů literatur a posoudit, která teorie je pro výpočet nejlepší s objektivními výsledky. Vypočtené hodnoty ztrát korónou použiji pro testování závislostí na atmosférických vlivech.

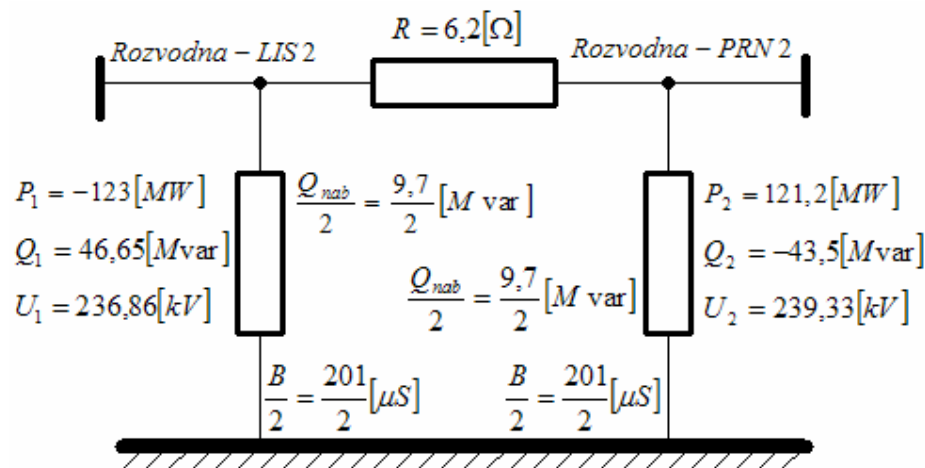
6.1 VÝPOČTY JOULEOVÝCH ZTRÁT NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY Z MĚŘENÝCH ÚDAJŮ

Pro další testování velikosti Jouleových ztrát (nejsou zahrnuty ztráty korónou a svodem) na venkovní teplotě je potřeba mít jasno v co nejpresnějším určení těchto ztrát. Napětí a proud jsou získávány měřením přímo pomocí měřících transformátorů proudu a napětí a dále přenášeny do řídicího systému na dispečinku, kde jsou vyhodnocovány a archivovány na serverech těchto systémů. Další hodnoty jako je činný výkon nebo jalový výkon jsou z těchto hodnot dopočítány. K určení Jouleových ztrát na vedení přenosové soustavy jsem odvodil vzorce, ze kterých se dají Jouleovy ztráty vypočítat. Dosazením potřebných hodnot (P , Q , U , R , B) z řídicího systému do níže uvedených vzorců vypočtu velikost ztrát na kterémkoliv vedení přenosové soustavy.

Vzorec pro vyhodnocení Jouleových ztrát vedení přenosové soustavy na dispečinku ČEPS v Ostravě vychází z předpokladu nulového svodu.

6.1.1 Praktický výpočet Jouleových ztrát na vedení přenosové soustavy

Vedení 220 kV //V253 Lískovec – Prosebnice, data jsou ze dne 12.3. 2002 v 15:00



Obr. 6.1 Ukázka výpočtu Jouleových ztrát na skutečném vedení přenosové soustavy pomocí „π“ článku

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot \left[\frac{\sqrt{P_1^2 + \left(Q_1 - \frac{U_1^2 \cdot B}{2} \cdot 10^{-6} \right)^2}}{\sqrt{3} \cdot U_1} \right]^2 \quad [MW, \Omega, MW, MVar, kV, \mu S, kV] \quad [6.1]$$

Příklad výpočtu Jouleových ztrát na vedení V253 vztažený k uzlu Lískovec 220 [kV]:

$$\Delta P = 3 \cdot 6,2 \cdot \left[\frac{\sqrt{-123^2 + \left(46,65 - \frac{236,86^2 \cdot 201}{2} \cdot 10^{-6} \right)^2}}{\sqrt{3} \cdot 236,86} \right]^2 = \underline{\underline{1,857 [MW]}} \quad [6.2]$$

Příklad výpočtu Jouleových ztrát na vedení V253 vztažený k uzlu Prosenice 220 [kV]:

$$\Delta P = 3 \cdot 6,2 \cdot \left[\frac{\sqrt{121,2^2 + \left(-43,5 - \frac{239,33^2 \cdot 201}{2} \cdot 10^{-6} \right)^2}}{\sqrt{3} \cdot 239,33} \right]^2 = \underline{\underline{1,852 [MW]}} \quad [6.3]$$

Tabulka 6.1 Ukázka měřených dat z řídicího systému TRIS dispečinku ČEPS v Ostravě

Datum	čas	V253: PZ	LIS2: V253: P	PRN2: V253: P	LIS2: V253:Q	PRN2: V253:Q	LIS2: V253:U	PRN2: V253:U
	[hod]	[MW]	[MW]	[MW]	[MVAr]	[MVAr]	[kV]	[kV]
12.3.2002	0:15:00	0,21	-28,35	28,65	38,85	-28,35	239,2	243,36
12.3.2002	0:30:00	0,24	-30,3	30,45	40,65	-30,15	238,94	243,23
12.3.2002	0:45:00	0,24	-29,85	29,85	41,1	-30,15	239,07	243,49
12.3.2002	1:00:00	0,18	-21,75	24	36,45	-25,65	238,55	242,58
12.3.2002	1:15:00	0,15	-22,05	21,9	36,45	-25,5	238,42	242,45
12.3.2002	1:45:00	0,17	-29,55	29,85	37,5	-27	238,68	242,58
12.3.2002	15:00:00	1,87	-123	121,2	46,65	-43,5	236,86	239,33

Hodnoty v tabulce 6.1 slouží pro ukázkou měřených hodnot (estimované hodnoty) z řídicího systému na dispečinku ČEPS v Ostravě a zároveň je zde vidět posouzení hodnot Jouleových ztrát (poslední řádek, šedé pozadí) s výpočtem dle „π“-člátku.

Příklad posouzení přesnosti vypočtené a estimované hodnoty:

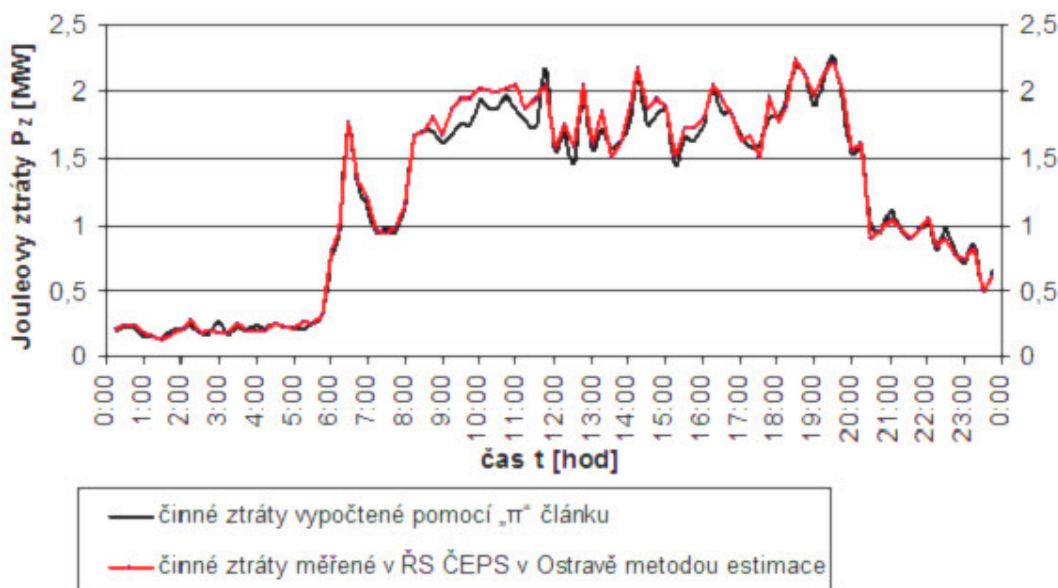
$$= 100 - \frac{1,857}{1,87} \cdot 100 = \underline{\underline{0,69\%}}$$

$$= 100 - \frac{1,852}{1,87} \cdot 100 = \underline{\underline{0,96\%}}$$

Chyba vypočtených hodnot k estimovaným vychází do 1 %.

Poznámka:

Data z roku 2002 byla pro kontrolu přesnosti vypočtených a estimovaných hodnot použita proto, že přesnost přenosu dat v řídicím systému na ČEPS zůstala stejná. Nebyl proto důvod tuto kontrolu přesnosti měnit novějšími hodnotami.



Graf 6.1 Průběhy vypočtených a měřených Jouleových ztrát u vedení V253

Graf 6.1 slouží pro srovnání estimovaných a vypočtených Jouleových ztrát na vybraném vedení V253. Data jsou ze dne 12.3. 2002 a byla získána z řídicího systému na ČEPS

6.1.2 Zhodnocení výpočtu Jouleových ztrát na vedení přenosové soustavy

Výpočet činných ztrát pomocí „ π “ člárku na vedení přenosové soustavy nám dává možnost tyto ztráty porovnat s velikostmi ztrát v řídicím systému dispečinku ČEPS, které jsou vyhodnocovány jako produkt estimace. Při porovnání velikostí činných ztrát vypočtených s údaji vyhodnocovanými řídicím systémem je rozdíl zanedbatelný (necelé 1%), což je pro další testování Jouleových ztrát na atmosférických vlivech velice přijatelné a není známo které hodnoty jsou přesnější. Grafické vyhodnocení činných ztrát pro porovnání a názornost je uvedeno v grafu 1. Při nižších hodnotách ztrát se vypočtené a měřené hodnoty shodují přesně, v době denních špiček jsou rozdíly do jednoho procenta. Závěrem této kapitoly je možné říci, že hodnoty činných ztrát jsou pro další řešení disertační práce věrohodné.

6.2 VÝPOČTY SVODOVÝCH PROUDŮ A ZTRÁT SVODEM NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY

Tabulka 6.2 Změřené údaje v laboratoři vysokého napětí v Bratislavě ze září 2002

typ izolátoru	Změřené hodnoty	meteorologické podmínky				
		slunečno, sucho	zamračeno, vlhko	mlha	děšť	sníh
porcelánový LANGSTAB izolátor	Vlhkost [%]	63 - 71	84 - 94	80-93	izolátor mokrý	izolátor zasněžený a mokrý
<i>LS 75/21 a 85/21</i>	I_{\min} [μA]	61	63-71	84-94	225	96
	I_{\max} [μA]	80	337	356,25	350	356,25
	$I_{\text{stř}}$ [μA]	68,33	223,02	258,21	300	214,19
<i>L100BH550</i>	Vlhkost [%]	45 - 65	80 - 94	72-94	izolátor mokrý	izolátor zasněžený a mokrý
	I_{\min} [μA]	57	80	80	80	100
	I_{\max} [μA]	135	275	250	225	225
	$I_{\text{stř}}$ [μA]	77,8	170,43	166,63	137	144,1

6.2.1 Praktické výpočty svodových proudů na vedení přenosové soustavy

Postup výpočtu svodových proudů na uvedeném příkladě se opírá o znalost těchto údajů:

- délku vedení
- počet stožárů
- typ izolátoru a sestavení izolátorového závěsu u každého stožáru
- měřenou velikost sdruženého napětí na vedení
- měrnou povrchovou vodivost vrstvy znečištění
- tvarový faktor u každého typu izolátoru
- velikost svodového proudu na použitých typech izolátoru z měření z praxe nebo laboratoři

První čtyři veličiny není problém v dnešních podmínkách získat. V mém případě se jedná o vedení VVN a ZVN, které spravuje ČEPS. Výpočetní technika umožňuje zřizovat kvalitní databáze všech prvků elektrizační soustavy a pro řešení svodových proudů jsem je získal a použil v následujícím výpočtu. Ostatní hodnoty se opírají o měření a výpočty. Pro ukázkou výpočtu jsem si vybral vedení přenosové soustavy 220 kV V253, kde jsem všechny potřebné údaje měl k dispozici. Nejdříve jsem musel provést rozdělení stožárů se stejným typem izolátorového závěsu. V uvedeném případě má vedení 231 stožárů, na těchto stožárech je použito 5 druhů izolátorových závěsů s typy izolátorů. Podle tohoto klíče jsem provedl rozdělení do 5 skupin stožárů, kde uvažuji stejné sestavení izolátorového závěsu. Pro další postup výpočtu svodových proudů potřebuji mít k dispozici velikost tvarového faktoru použitých izolátorů. V níže uvedeném výpočtu jsem provedl výpočet měrné svodové vodivosti vrstvy znečištění ze známých hodnot měřeného svodového proudu u konkrétního typu izolátoru. Z těchto hodnot jsem vypočítal střední hodnoty. Další postup výpočtu je uveden níže. Každá skupina stožárů představuje úsek vedení se stejným typem izolátoru a izolátorového závěsu. Výsledný svodový proud je pak součet všech úseků vedení. Níže uvedený postup jsem provedl pro ukázkou krok za krokem. V tomto případě se jeví výpočet dosti zdlouhavý.

UKÁZKA VÝPOČTU SVODOVÉHO PROUDU NA VEDENÍ V253 PO KROCÍCH:

Základní údaje vedení V253:	Délka vedení:	<i>71,332 km</i>
	Počet stožárů	<i>231</i>
	Typ stožárů	<i>soudek</i>
	Materiál stožárů	<i>ocel</i>
	Fázové vodiče:	<i>2x3x350AlFe4</i>
	Zemní lana:	<i>1xAlFe 38/32</i>

Tabulka 6.3 Použité izolátorové závěsy na vedení V253 s naměřenými svodovými proudy

Typ izolátoru	Složení izolátorového závěsu	Průměrná střední hodnota naměřeného svodového proudu I_{svod} [A]
<i>LS75/21</i>	<i>2II2LS75/21</i>	$21,275 \cdot 10^{-5}$
<i>LS85/21</i>	<i>2II2LS85/21</i>	$21,275 \cdot 10^{-5}$
<i>L100BH550</i>	<i>2II4L100BH550</i>	$13,919 \cdot 10^{-5}$
<i>L100BH550</i>	<i>1II4L100BH550</i>	$13,919 \cdot 10^{-5}$
<i>LS75/21</i>	<i>1II2LS75/21</i>	$21,275 \cdot 10^{-5}$

Velikost I_{svod} odpovídá průměrné střední velikosti svodového proudu měřeného v laboratoři VVN za různých atmosférických podmínek.

Tabulka 6.4 Tvarové faktory pro izolátory použité na vedení V253

Typ izolátotu	Tvarový faktor f_{TV} [m·mm ⁻²]
<i>LS75/21</i>	$f_{TVLS75/21} = 9,22$
<i>LS85/21</i>	$f_{TVLS85/21} = 10,30$
<i>L100BH550</i>	$f_{TVL100BH550} = 17,49$

$$\text{Hodnoty byly změřeny při fázovém napětí } U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{110}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{63,5kV}} \quad [6.4]$$

Vedení V253 jsem rozdělil na 5 úseků stožárů a každý úsek jsem spočítal samostatně. Předpokladem rozdělení je, že u každém úseku stožárů je použitý stejný izolátorový závěs.

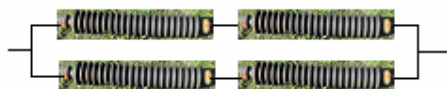
Tabulka 6.5 Údaje o prvním úseku skupiny stožárů vedení V253

Typ izolátoru	Sestavení izolátorového závěsu	Tvarový faktor f [m·mm ⁻²]	Počet stožárů
<i>LS75/21</i>	<i>2II2LS75/21</i>	$f_{LS75/21} = 9,22$	52

Rozměr tvarového faktoru izolátoru zahrnuje i vrstvu znečištění.

Sestavení izolátorového závěsu *2II2LS75/21* znamená, že v jedné fázi jsou dva a dva izolátory v sérii spojené paralelně.

Sestavení izolátorového závěsu 2II2LS75/21



Výpočet měrné svodové vodivosti izolátoru LS 75/21:

$$\gamma_{LS75/21} = f_{TVLS75/21} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 9,22 \cdot \frac{21,275 \cdot 10^{-5}}{63,5 \cdot 10^3} = 3,08 \cdot 10^{-8} [S] = \underline{\underline{3,08 \cdot 10^{-2} S \cdot m \cdot mm^{-2}}} \quad [6.5]$$

Přepočet svodového proudu pro $U_s = 240,825 kV$:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{240,825}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{139,2 kV}} \quad [6.6]$$

Hodnota $U_s = 240,825 kV$ je použita z databáze jako měřená hodnota.

I_{IS} je svodový proud přes 2 izolátory v sérii.

$$I_{IS} = U_f \cdot \frac{\gamma_{LS75/21}}{2 \cdot f_{TVLS75/21}} = 139,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,08 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 9,22} = 2,32 \cdot 10^{-4} A = \underline{\underline{232 \mu A}} \quad [6.7]$$

Svodový proud přes obě větve izolátorového řetězce:

$$I_{S1} = 2 \cdot I_{IS} = 2 \cdot 232 = \underline{\underline{464 \mu A}} \quad [6.8]$$

Svodový proud pro tři fáze jednoho stožáru:

$$I_{3S} = 3 \cdot I_{S1} = 3 \cdot 464 = \underline{\underline{1,392 mA}} \quad [6.9]$$

Celkový svodový proud prvního úseku skupiny 52 stožárů:

$${}^{1\text{ÚSEK}} I_{LS75/21} = 52 \cdot I_{3S} = 52 \cdot 1,392 = \underline{\underline{72,384 mA}} \quad [6.10]$$

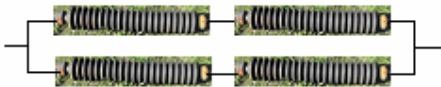
Tabulka 6.6 Údaje o druhém úseku skupiny stožárů vedení V253

Typ izolátoru	Sestavení izol.závěsu	Tvarový faktor $f_{TV} [m \cdot mm^{-2}]$	Počet stožárů
LS85/21	2II2LS85/21	$f_{TVLS85/21} = 10,30$	4

Rozměr tvarového faktoru izolátoru zahrnuje i vrstvu znečištění.

Sestavení izolátorového závěsu *2II2LS85/21* znamená, že v jedné fázi jsou dva a dva izolátory v sérii spojené paralelně.

Sestavení izolátorového závěsu *2II2LS85/21*



Výpočet měrné svodové vodivosti izolátoru LS 85/21

$$\gamma_{LS85/21} = f_{LS85/21} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 10,30 \cdot \frac{21,275 \cdot 10^{-5}}{63,5 \cdot 10^3} = 3,45 \cdot 10^{-8} S = \underline{\underline{3,45 \cdot 10^{-2} S \cdot m \cdot mm^{-2}}} \quad [6.11]$$

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{240,825}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{139,2 kV}} \quad [6.12]$$

I_{IS} je svodový proud přes 2 izolátory v sérii

$$I_{IS} = U_f \cdot \frac{\gamma_{LS85/21}}{2 \cdot f_{TVLS85/21}} = 139,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,45 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10,30} = 2,33 \cdot 10^{-4} A = \underline{\underline{233 \mu A}} \quad [6.13]$$

Svodový proud přes obě větve izolátorového řetězce:

$$I_{S1} = 2 \cdot I_{IS} = 2 \cdot 233 = \underline{\underline{466 \mu A}} \quad [6.14]$$

Svodový proud pro tři fáze jednoho stožáru:

$$I_{3S} = 3 \cdot I_{S1} = 3 \cdot 0,466 = 1,398 mA \quad [6.15]$$

Celkový svodový proud druhého úseku skupiny 4 stožárů:

$$^{2\text{ÚSEK}} I_{LS85/21} = 4 \cdot I_{3S} = 4 \cdot 1,398 = \underline{\underline{5,592 mA}} \quad [6.16]$$

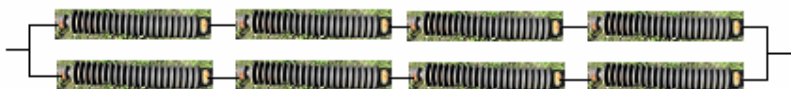
Tabulka 6.7 Údaje o třetím úseku skupiny stožárů vedení V253

Typ izolátoru	Sestavení izolátorového závěsu	Tvarový faktor $f_{TV} [m \cdot mm^{-2}]$	Počet stožárů
<i>L100BH550</i>	<i>2II4L100BH550</i>	$f_{L100BH550} = 17,49$	70

Rozměr tvarového faktoru izolátoru zahrnuje i vrstvu znečištění.

Sestavení izolátorového závěsu *2II4L100BH550* znamená, že v jedné fázi jsou čtyři a čtyři izolátory v sérii spojené paralelně.

Sestavení izolátorového závěsu *2II4L100BH550*



Výpočet měrné svodové vodivosti izolátoru L100BH550:

$$\gamma_{L100BH550} = f_{L100BH550} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 17,49 \cdot \frac{13919 \cdot 10^{-5}}{63,5 \cdot 10^3} = 3,83 \cdot 10^{-8} S = \underline{\underline{3,83 \cdot 10^{-2} S \cdot m \cdot mm^{-2}}} \quad [6.17]$$

Přepočet svodového proudu pro $U_s = 240,825 kV$,

$$\text{potom bude } U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{240,825}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{139,2 kV}} \quad [6.18]$$

I_{IS} je svodový proud přes 4 izolátory v sérii

$$I_{IS} = U_f \cdot \frac{\gamma_{L100BH550}}{4 \cdot f_{TVL100BH550}} = 139,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,83 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 17,49} = 7,62 \cdot 10^{-5} A = \underline{\underline{76,2 \mu A}} \quad [6.19]$$

Svodový proud přes obě větve izolátorového řetězce:

$$I_{S1} = 2 \cdot I_{IS} = 2 \cdot 76,2 = \underline{\underline{152,4 \mu A}} \quad [6.20]$$

Svodový proud pro tři fáze jednoho stožáru:

$$I_{3S} = 3 \cdot I_{S1} = 3 \cdot 152,4 = \underline{\underline{457,2 \mu A}} \quad [6.21]$$

Celkový svodový proud třetího úseku skupiny 70 stožárů:

$${}^{3\text{ÚSEK}} I_{LS85/21} = 70 \cdot I_{3S} = 70 \cdot 0,4572 = \underline{\underline{32,004 mA}} \quad [6.22]$$

Tabulka 6.8 Údaje o čtvrtém úseku skupiny stožárů vedení V253

Typ izolátoru	Sestavení izolátorového závěsu	Tvarový faktor $f_{TV} [m \cdot mm^{-2}]$	Počet stožárů
<i>L100BH550</i>	<i>II4L100BH550</i>	$f_{L100BH550} = 17,49$	99

Rozměr tvarového faktoru izolátoru zahrnuje i vrstvu znečištění.

Sestavení izolátorového závěsu *III4L100BH550* znamená, že v jedné fázi jsou čtyři izolátory v sérii.

Sestavení izolátorového závěsu *III4L100BH550*



Výpočet měrné svodové vodivosti izolátoru L100BH550:

$$\gamma_{L100BH550} = f_{TVL100BH550} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 17,49 \cdot \frac{13919 \cdot 10^{-5}}{635 \cdot 10^3} = 3,83 \cdot 10^{-8} S = \underline{\underline{3,83 \cdot 10^{-2} S \cdot m \cdot mm^{-2}}} \quad [6.23]$$

Přepočet svodového proudu pro $U_s = 240,825 kV$,

$$\text{potom bude } U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{240,825}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{139,2 kV}} \quad [6.24]$$

I_{IS} je svodový proud přes 4 izolátory v sérii

$$I_{IS} = U_f \cdot \frac{\gamma_{L100BH550}}{f_{L100BH550}} = 139,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,83 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 17,49} = 7,62 \cdot 10^{-5} A = \underline{\underline{7,62 \cdot 10^{-2} mA}} \quad [6.25]$$

Svodový proud přes větev izolátorového řetězce:

$$I_{S1} = I_{IS} = \underline{\underline{7,62 \cdot 10^{-2} mA}} \quad [6.26]$$

Svodový proud pro tři fáze jednoho stožáru:

$$I_{3S} = 3 \cdot I_{S1} = 3 \cdot 7,62 \cdot 10^{-2} = \underline{\underline{0,228 mA}} \quad [6.27]$$

Celkový svodový proud čtvrtého úseku skupiny 99 stožárů:

$$^{4\text{ÚSEK}} I_{L100BH550} = 99 \cdot I_{3S} = 99 \cdot 0,228 = \underline{\underline{22,63 mA}} \quad [6.28]$$

Tabulka 6.9 Údaje o pátém úseku skupiny stožárů vedení V253

Typ izolátoru	Sestavení izolátorového závěsu	Tvarový faktor $f_{TV} [m \cdot mm^{-2}]$	Počet stožárů
<i>LS75/21</i>	<i>III2LS75/21</i>	$f_{LS75/21} = 9,22$	6

Rozměr tvarového faktoru izolátoru zahrnuje i vrstvu znečištění.

Sestavení izolátorového závěsu *III2LS75/21* znamená, že v jedné fázi jsou dva izolátory v sérii.

Sestavení izolátorového závěsu *III2LS75/21*



Výpočet měrné svodové vodivosti izolátoru LS75/21:

$$\gamma_{LS75/21} = f_{TVLS75/21} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 9,22 \cdot \frac{21,275 \cdot 10^{-5}}{635 \cdot 10^3} = 3,08 \cdot 10^{-8} S = \underline{\underline{3,08 \cdot 10^{-2} S \cdot m \cdot mm^{-2}}} \quad [6.29]$$

Přepočet svodového proudu pro $U_s = 240,825 kV$,

$$\text{potom bude } U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{240,825}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{139,2 kV}} \quad [6.30]$$

I_{IS} je svodový proud přes 2 izolátory v sérii

$$I_{IS} = U_f \cdot \frac{\gamma_{LS75/21}}{f_{TVLS75/21}} = 139,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{3,08 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 9,22} = 2,32 \cdot 10^{-4} A = \underline{\underline{2,32 \cdot 10^{-1} mA}} \quad [6.31]$$

Svodový proud přes větev izolátorového řetězce:

$$I_{S1} = I_{IS} = \underline{\underline{2,32 \cdot 10^{-1} mA}} \quad [6.32]$$

Svodový proud pro tři fáze jednoho stožáru:

$$I_{3S} = 3 \cdot I_{S1} = 3 \cdot 2326 \cdot 10^{-1} = \underline{\underline{0,697 mA}} \quad [6.33]$$

Celkový svodový proud pátého úseku skupiny 6 stožárů:

$$^{5\text{ÚSEK}} I_{LS75/21} = 6 \cdot I_{3S} = 6 \cdot 0,697 = \underline{\underline{4,185 mA}} \quad [6.34]$$

Vypočtený celkový svodový proud na celém vedení V253:

$$\begin{aligned} I_{SVOD}^{CELKOVY} &= ^{1\text{ÚSEK}} I_{LS75/21} + ^{2\text{ÚSEK}} I_{LS85/21} + ^{3\text{ÚSEK}} I_{LS85/21} + ^{4\text{ÚSEK}} I_{L100BH550} \\ &+ ^{5\text{ÚSEK}} I_{L100BH550} = 72,384 + 5,592 + 32,004 + 22,63 + 4,185 = \underline{\underline{136,7 mA}} \end{aligned} \quad [6.35]$$

6.2.2 Ukázka výpočtu svodového proudu a ztrát svodem na vedení V253

Z důvodu ověření obecných vzorců pro výpočty svodových proudů a ztrát svodem jsem vybral vedení V253 pro dostupnost potřebných údajů pro výpočty. Na základě znalosti vstupních údajů, lze definovat 5 skupin stožárů se stejným izolátorovým závěsem. První a pátá skupina stožárů obsahuje izolátor *LS75/21*, druhá skupina obsahuje izolátor *LS85/21* a skupina tři a čtyři obsahuje typ izolátoru *L100BH550*. V tabulce 14 jsou seřazeny tyto skupiny podle definovaných vstupních údajů, které jsou potřebné pro výpočty. Tyto hodnoty jsou vloženy do odvozených obecných vzorců a vypočteny svodové proudy, ztráty svodem a ztráty svodem na kilometr délky vedení.

Vstupní údaje pro výpočty svodových proudů na vedení V253:

Počet stožárů se stejným izolátorovým závěsem: $l=5$,

Sdružené napětí na vedení: $U=240,825 \text{ [kV]}$,

Celková délka vedení: $L=71,332 \text{ [km]}$

i *III* *j* (TYP IZOLÁTORU) obecný typ izolátorového závěsu

Tabulka 6.10 Vstupní údaje o vedení 220 kV/V253

Počet stožárů se stejným izolátorovým závěsem	Typ izolátorového závěsu	Počet paralelních větví v izolátorovém závěsu	Počet izolátorů v sérii jednoho závěsu	Měrná povrchová vodivost na izolátoru	Tvarový faktor izolátoru
$[-]$	$[-]$	$[-]$	$[-]$	$[S \cdot mm^2 \cdot m^{-1}]$	$[m \cdot mm^{-2}]$
$k_1=52$	<i>2II2LS75/21</i>	$i_1=2$	$j_1=2$	$\gamma_1=3,08 \cdot 10^{-8}$	$f_{TV1}=9,22$
$k_2=4$	<i>2II2LS85/21</i>	$i_2=2$	$j_2=2$	$\gamma_2=3,45 \cdot 10^{-8}$	$f_{TV2}=10,30$
$k_3=70$	<i>2II4L100BH550</i>	$i_3=2$	$j_3=4$	$\gamma_3=3,83 \cdot 10^{-8}$	$f_{TV3}=17,49$
$k_4=99$	<i>1II4L100BH550</i>	$i_4=1$	$j_4=4$	$\gamma_4=3,83 \cdot 10^{-8}$	$f_{TV4}=17,49$
$k_5=6$	<i>1II2LS75/21</i>	$i_5=1$	$j_5=2$	$\gamma_5=3,08 \cdot 10^{-8}$	$f_{TV5}=9,22$

Výpočet svodového proudu na vybraném vedení č. V253:

$$\begin{aligned}
 I_{svod} &= 3 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \right) = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot c = \sqrt{3} \cdot 240825 \cdot \left(52 \cdot 2 \cdot \frac{3,08 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 9,22} + \right. \\
 &4 \cdot 2 \cdot \frac{3,45 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10,30} + 70 \cdot 2 \cdot \frac{3,83 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 17,49} + 99 \cdot 1 \cdot \frac{3,83 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 17,49} + 6 \cdot 1 \cdot \frac{3,08 \cdot 10^{-8}}{1 \cdot 9,22} \Big) = \\
 &= \sqrt{3} \cdot 240825 \cdot (3,277 \cdot 10^{-7}) = 0,1366 A = \underline{\underline{136,6 mA}}
 \end{aligned} \quad [6.36]$$

Velikost napětí je uvedena jako vybraná hodnota z databáze údajů řídicího systému dispečinku ČEPS v Ostravě.

$$\begin{aligned}
 c &= \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \\
 &= 10^{-8} \cdot \left(\frac{52 \cdot 3,08}{9,22} + \frac{4 \cdot 3,45}{10,30} + \frac{70 \cdot 3,83}{34,98} + \frac{99 \cdot 3,83}{4 \cdot 17,49} + \frac{6 \cdot 3,08}{2 \cdot 9,22} \right) = \underline{\underline{3,277 \cdot 10^{-7} S}}
 \end{aligned} \quad [6.37]$$

kde

„c“ koeficient respektující vrstvu znečištění na izolátorech, typ, složení a počet izolátorových závěsů na vedení VVN a ZVN [jednotka v Siemensech - S]

Výpočet ztrát svodem na vybraném vedení č. V253:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{svod} &= \frac{U_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \\
 &= U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \\
 &= U_s^2 \cdot c = 240825^2 \cdot (3,277 \cdot 10^{-7}) = 19005 W \approx \underline{\underline{19 kW}}
 \end{aligned} \quad [6.38]$$

Výpočet ztrát svodem na kilometr vybraného vedení V253:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{svod / km} &= \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \\
 &= \frac{240825^2 \cdot (3,277 \cdot 10^{-7})}{71,332} = \frac{19005}{71,332} = \underline{\underline{266 W \cdot km^{-1}}}
 \end{aligned} \quad [6.39]$$

výpočty zjednodušit. Důležitou hodnotou pro výpočet, který zahrnuje mnoho faktorů je velikost koeficientu „c“, který musím vhodně stanovit v rámci přijatelného zjednodušení.

Podmínky pro určení koeficientu „c“ k výpočtům svodových proudů a ztrát svodem:

- mám k dispozici objektivní velikost ztrát svodem u vybraného vedení VVN, ZVN
- pro danou napěťovou hladinu zvolím napětí
- 220 kV: $U_s = 230 \text{ kV}$
- 400 kV: $U_s = 415 \text{ kV}$
- ze znalostí těchto údajů vypočítám velikost koeficientu „c“ pro každou napěťovou hladinu

Výpočet koeficientu „c“ pro napětí 220 kV:

Poznámka:

$\Delta P_{svod} = 19005 \text{ W}$ (ΔP_{svod} zahrnuje průměrnou velikost vrstvy znečištění na izolátorech a z měření vybranou vyšší hodnotu sdruženého napětí na vybraném vedení, viz. vztah [6.38].

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot c_{220} \Rightarrow c_{220} = \frac{\Delta P_{svod}}{U_s^2} = \frac{19005}{(230 \cdot 10^3)^2} = \underline{\underline{3,592 \cdot 10^{-7} \text{ S}}}$$

Výpočet koeficientu „c“ pro napětí 400 kV:

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot c_{400} \Rightarrow c_{400} = \frac{\Delta P_{svod}}{U_s^2} = \frac{19005}{(415 \cdot 10^3)^2} = \underline{\underline{1,103 \cdot 10^{-7} \text{ S}}}$$

Na základě již známých koeficientů „c“ a měřené velikosti napětí v řídicím systému dispečinku lze jednoduchým způsobem a v časové závislosti určovat svodové proudy a ztráty svodem na kterémkoliv vedení VVN a ZVN.

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot c \quad [\text{A}, \text{V}, \text{S}] \quad [6.40]$$

$$\Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot c \quad [\text{W}, \text{V}, \text{S}] \quad [6.41]$$

$$\Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} \quad [\text{W} \cdot \text{km}^{-1}, \text{V}, \text{S}, \text{km}] \quad [6.42]$$

U_s sdružené napětí na vedení [V]

L délka vedení [km]

6.2.3 Vyhodnocení výpočtu ztrát svodem

Metodika výpočtu svodových proudů a ztrát svodem předvedená v této kapitole ukazuje, že v případě znalostí potřebných údajů je možné svodové proudy vypočítat. Tyto veličiny by neměl být problém získat např. na Provozních správách ČEPS. Velikost svodových proudů v porovnání s literaturou [19] vyšla jako průměrná hodnota, kde autor uvádí ztráty svodem u vedení 220 kV v rozmezí 120 - 770 ($W \cdot km^{-1}$) což vypočtená hodnota 266 ($kW \cdot km^{-1}$) vyšla v tomto rozmezí. Vypočtená velikost odpovídá i skutečnosti, že hodnoty svodových proudů u izolátorů měřených v laboratorních podmínkách byly spočítány jako průměrné hodnoty a použity pro přepočet měrné povrchové vodivosti, která vystihuje znečištění izolátorů. Pokud bych chtěl vystihnout velikost svodových proudů při různých atmosférických vlivech, musel bych vypočítat při různých klimatických vlivech jinou měrnou povrchovou vodivost. To by obnášelo znásobení výpočtů. Vypočtená střední hodnota vzhledem k velikosti svodových proudů se zdá být dostatečná a pro rychlé vyhodnocení dostačující.

Z uvedených vzorců je zřejmé, že velikost ztrát svodem ovlivňuje sdružené napětí. Toto napětí se dá načíst z řídicího systému na dispečinku v reálném čase a po nadefinování vzorců je možné měřit ztráty svodem na vedení v reálném čase, které by bylo k nahlédnutí na monitoru dispečerovi.

Z důvodu zjednodušení výpočtů svodových proudů na základě uvedené teorie v kapitole (5.3) jsem provedl úpravy výpočtů v rámci přijatelných mezí. Vypočítal jsem ze známých měřených hodnot koeficient „c“, který zahrnuje průměrné znečištění izolátorových závěsů a jejich počet. K výpočtům svodových proudů mi potom stačí znát měřenou hodnotu sdruženého napětí na vedeních v časových vzorcích (*např. 15 min*) a v případě ztrát svodem je třeba ještě znát délku vedení.

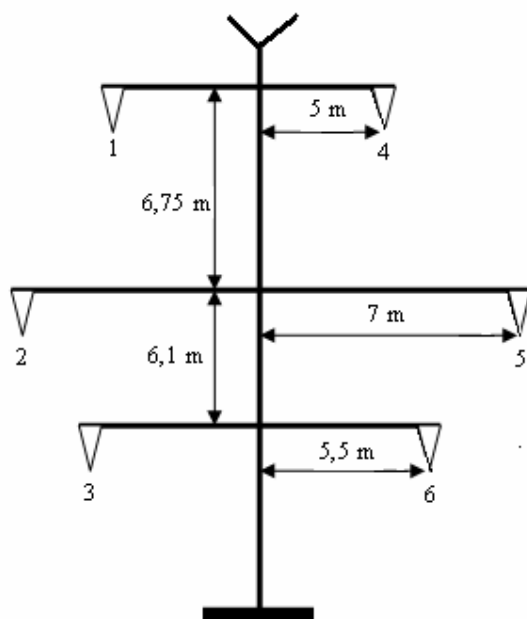
6.3 VÝPOČTY ZTRÁT KORÓNOU NA VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY

V této kapitole chci na ukázkou provést výpočty ztrát korónou na vybraném vedení přenosové soustavy. Ztráty korónou tvoří jednu nezanedbatelnou část technických ztrát. V různých literaturách jsou uváděny vzorce pro výpočty od různých autorů. K tomuto účelu jsem vybral pro výpočty vztahy z více pramenů literatur [3], [12], [13], [22]. a [25]. Literatura [3] a [12] popisuje mnoho experimentů a výpočtů ztrát korónou od různých autorů. Každý autor

popisuje svůj postup a vhodnost použití pro výpočty. Vypočtené hodnoty ztrát korónou chci použít pro testování závislostí na atmosférických vlivech. Z důvodu nutné znalosti střední geometrické vzdálenosti fázových vodičů na stožárech uvádím na ukázkou postup výpočtu této střední geometrické vzdálenosti. Tato veličina je potřebná u většiny výpočtů ztrát korónou. Střední geometrické vzdálenosti vodičů je závislá od rozměrů stožáru a u každého vedení musí se spočítat zvlášť, pokud je použitý jiný typ stožáru.

**Ukázka výpočtu střední geometrické vzdálenosti vodičů na příkladu stožáru typu
SOUDEK pro využití k výpočtům ztrát korónou.**

2 x 220 kV typu SOUDEK s vodiči 2x3x350 AlFe 4 + 1x70 Fe



Obr. 6.2 Rozměry stožáru typu SOUDEK

$$d = \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \cdot \sqrt[3]{d_{15} \cdot d_{16} \cdot d_{26}}}{\sqrt[3]{d_{14} \cdot d_{25} \cdot d_{36}}} \quad [\text{m}]$$

$$d_{12} = \sqrt{(7 - 5)^2 + 6,75^2} = 7,04 \text{ m}$$

$$d_{13} = \sqrt{(5,5 - 5)^2 + (6,75 + 6,1)^2} = 12,85 \text{ m}$$

$$d_{23} = \sqrt{(7 - 5,5)^2 + 6,1^2} = 6,28m$$

$$d_{15} = \sqrt{(7 + 5)^2 + 6,75^2} = 13,76m$$

$$d_{16} = \sqrt{(5,5 + 5)^2 + (6,75 + 6,1)^2} = 16,59m$$

$$d_{26} = \sqrt{(7 + 5,5)^2 + 6,1^2} = 13,9m$$

$$d_{14} = 10m, d_{25} = 14m, d_{36} = 11m$$

Výsledná střední geometrická vzdálenost vodičů:

$$d = \frac{\sqrt[3]{7,04 \cdot 12,85 \cdot 6,28 \cdot \sqrt[3]{13,76 \cdot 16,59 \cdot 13,9}}}{\sqrt[3]{10 \cdot 14 \cdot 11}} = \underline{\underline{10,54m}}$$

Postup výpočtu ztrát korónou [11], [21]

Postup výpočtu naznačuje metodiku. Vstupní měřené údaje pro výpočet jsem vybral z databáze řídicího systému dispečinku ČEPS. Pro testování velikosti ztrát korónou bude ve výpočtech nutné dosazovat např. 15 min.vzorky pro vynesení grafických výstupů. Grafické výstupy slouží pro testování na atmosférických vlivech v kapitole 7.

Vstupní údaje pro výpočty ztrát korónou:

Vodiče	2x3x350 AlFe 4,
střední geometrická vzdálenost vodičů	$d = 1054 \text{ cm},$
poloměr vodiče	$r = 1,34 \text{ cm},$
relativní hustota vzduchu	$\delta = 1,07,$
měřené sdružené napětí na vedení $U = 240,7 \text{ kV}$	\rightarrow přepočtené fázové $U_f = 138,9 \text{ kV},$
vliv povrchu vodiče	$m_1 = 0,98 - 0,81 \rightarrow$ pro ukázkou voleno $0,81,$
vliv počasí	$m_2 = 1 - 0,8 \rightarrow$ pro ukázkou voleno $0,82,$
venkovní teplota	$v = -5 \text{ }^\circ\text{C},$
tlak vzduchu	$p = 99,3 \text{ kPa}$

Výpočet relativní hustoty vzduchu:

$$\delta = \frac{p}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + v} = \frac{99,3}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + (-5)} = \underline{\underline{1,07}}$$

Počáteční napětí koróny:

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} = 21,1 \cdot 1,07 \cdot 0,81 \cdot 0,82 \cdot 1,34 \cdot \ln \frac{1054}{1,34} = \underline{\underline{133,8kV}}$$

Ztráty korónou na třífázovém vedení:

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= 3 \cdot \frac{241}{\delta} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{d}} \cdot (U_f - U_0) \cdot 10^{-5} = \\ &= 3 \cdot \frac{241}{1,07} \cdot 75 \cdot \sqrt{\frac{0,0134}{10,54}} \cdot (138,9 - 133,8)^2 \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{0,46kW \cdot km^{-1}}} \end{aligned}$$

Tento postup výpočtu se opírá o Peekův vzorec [11] a [21], který byl navržen na základě rozsáhlého experimentálního materiálu, získaného při pokusech s vodiči různých průměrů a konstrukcí, při různých hustotách vzduchu, různých kmitočtech a různém stavu povrchu vodičů. Vzhledem k problematice výpočtu ztrát korónou má tento vzorec řadu nedostatků. Při známých velikostech ztrát korónou na vedeních je možné vzorec pro výpočty použít. Výhodou je jednoduchost výpočtu s použitím základních veličin. Při použití vzorce je důležité na základě údajů o vodičích (například stáří vedení) a atmosférických vlivech správně stanovit velikost koeficientů m_1 a m_2 , které velikost ztrát významně ovlivňují.

Postup výpočtu ztrát korónou[3], [11]**Počáteční napětí koróny:**

$$U_0 = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} = 21,1 \cdot 1,07 \cdot 0,81 \cdot 0,82 \cdot 1,34 \cdot \ln \frac{1054}{1,34} = \underline{\underline{133,8kV}}$$

Koeficient F [11]

$$F = \frac{U_f}{U_0} + 2 \cdot \ln \frac{U_f}{U_0} - 1 = \frac{138,9}{133,8} + 2 \cdot \ln \frac{138,9}{133,8} - 1 = \underline{\underline{0,1}}$$

Ztráty korónou na třífázovém vedení:

$$\Delta P = 3 \cdot \frac{112 \cdot f \cdot U_f^2 \cdot F \cdot 10^{-6}}{\left(\ln \frac{d}{r}\right)^2} = 3 \cdot \frac{112 \cdot 50 \cdot 138,9^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{\left(\ln \frac{1054}{1,34}\right)^2} = 3 \cdot \frac{10,8}{44,45} = \underline{\underline{0,72 kW \cdot km^{-1}}}$$

Tento postup výpočtu se opírá o Petersonův vzorec [11], který vyhovuje při malých ztrátách a podmínkách jasného počasí. Je obtížné stanovit, který z uvedených vzorců (Peekův, Petersonův) pro ztráty korónou je nespolehlivější. Existují další vzorce [3] ale z hlediska rozsáhlosti zadání disertační práce není možné všechny vzorce ověřit.

7 TESTOVÁNÍ ZÁVISLOSTI TECHNICKÝCH ZTRÁT NA VENKOVNÍ TEPLITĚ [29]

Mezi technické ztráty patří Jouleovy, korónou a svodem. Z důvodu zadání habilitační práce a provedení komplexního rozboru technických ztrát, jsem provedl testování závislosti těchto ztrát na venkovní teplotě. Největší podíl technických ztrát na vedení mají Jouleovy ztráty, dále korónou a svodem. Jakou měrou se podílí velikost těchto dílčích ztrát v závislosti na venkovní teplotě je úkol řešený v této kapitole. Pro správné posouzení závislosti jsem nejdříve provedl výpočty Jouleových ztrát na základě měřených údajů. Ukázkový výpočet Jouleových ztrát je uveden v (6.1.1). Tyto vypočtené ztráty jsem následně porovnal s hodnotami vyhodnocenými řídicím systémem dispečinku ČEPS v Ostravě. Řídicí systém TRIS údaje vyhodnocuje na základě estimace. Po vyhodnocení výpočtů a estimovaných údajů jsem dospěl k závěru, že rozdíl mezi oběma hodnotami se pohybuje do jednoho procenta, což je výsledek přesvědčující. Grafické vyhodnocení Jouleových ztrát vypočtených a estimovaných je uvedeno v grafu 6.1, uvedený v kapitole (6.1.1). Z důvodu rozsáhlosti práce jsem v rámci zadaného úkolu další výpočty neuváděl. U ztrát svodem jsem metodicky postupoval dle kapitoly (6.2) na vybraném vedení. Takto vypočítané ztráty svodem jsem pro správnost porovnal s výsledky, naměřenými v laboratoři VVN. Tyto výsledky a nové poznatky

jsou uvedeny v kapitole (9). Vypočtené ztráty svodem jsem použil pro testování na venkovní teplotě. U ztrát korónou jde také o vypočítané hodnoty dle kapitoly (6) a (8).

Výběr údajů a dat pro testování

K řešení závislostí Jouleových ztrát na venkovní teplotě v širokém spektru teplot jsem potřeboval z velkého množství dat vybrat data u vedení přenosové soustavy, která by odpovídala rozložení teplot v průběhu kalendářního roku. K dispozici jsem měl data z průběhu celého roku 2008, které jsem získal z řídicího systému na dispečinku ČEPS v Ostravě a ČHMÚ v Ostravě – Porubě. Data jsem pravidelně získával z řídicího systému dispečinku ČEPS v Ostravě, někdy pro potvrzení výsledku jsem použil dalšího vedení. Z důvodu rozsáhlosti jsem vybral pro hladinu napětí 220 kV a 400 kV vždy po jednom vedení. Výběr vedení jsem provedl podle klíče, že musí celou délkou ležet v oblasti řízení dispečinku ČEPS v Ostravě a venkovní teplota v regionu odpovídá hodnotám, které jsem měl k dispozici. Pro napěťovou hladinu 220 kV jsem vybral vedení V253 z rozvodny Lískovec do rozvodny Prosenice. Pro napěťovou hladinu 400 kV jsem vybral vedení V460 z rozvodny Nošovice do rozvodny Albrechtice. Výběr dnů jsem provedl podle spektra pohybujících se teplot ve vybraném dni. Spektrum teplot jsem vybral od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zvolený rozsah venkovních teplot odpovídá pohybujícím se teplotám, které mohou být v České republice dosaženy v průběhu celého kalendářního roku. Rozložení venkovní teploty od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ splňoval den 5.1.2008, od $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ den 16.2.2008, od $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$ den 30.10.2008 a pro $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$ den 18.7.2008. U ztrát korónou a svodem šlo o vypočítané hodnoty, které jsou podloženy výsledky na základě měření. Metodika testování ztrát na venkovní teplotě je stejná jako u Jouleových ztrát.

7.1 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ MATEMATICKÉ FUNKCE ZÁVISLOSTI TECHNICKÝCH ZTRÁT NA VENKOVNÍ TEPLITĚ

Jak už bylo v práci řečeno, Jouleovy ztráty (korónou, svodem) na vedení mohou určitým způsobem být závislé na venkovní teplotě. O jakou závislost se jedná a která matematická funkce je neoptimálnější je předmětem výpočtů pomocí vybraných kapitol z matematické statistiky. Jedním z prvních kritérií pro prvotní určení druhu závislosti je výpočet koeficientu korelace. Ten vyjadřuje přiblížení k lineární závislosti mezi znaky statistického souboru viz kapitola (3).

Dalším ukazatelem pro zjištění závislosti je určení optimální matematické funkce, která by vyjadřovala závislost (např. Jouleovy ztráty, korónou, svodem na venkovní teplotě). Matematická funkce, která vyjadřuje funkční závislost je uvedena v kapitole (3), jedná se převážně o přímku, mocninnou funkci, exponenciálu a polynom 3. stupně. Míra závislosti u každé matematické funkce je vyjádřena pomocí hodnotících kritérií.

Otázku určení matematické funkce, která by optimálně prokládala hodnoty naměřených Jouleových ztrát jsem řešil pomocí tabulkového procesoru *MICROSOFT EXCEL*. Jde o využití určování regresních funkcí pomocí metody nejmenších čtverců.

Ukázka postup výpočtu pro stanovení predikované regresní funkce

Program z nabídky *MICROSOFT EXCEL* pro výpočet optimálních regresních křivek není univerzální, ale dá se použít pro předem stanovený počet naměřených hodnot. V tomto případě pro $n = 95$ (počet 15 min vzorků teploty a testovaných ztrát za 24 hodin). Pro řešení mé problematiky program dostatečně vyhovoval.

- Po spuštění tabulkového procesoru *MICROSOFT EXCEL* a následujícím otevření souboru se zmíněným výpočtovým programem (*Analýza dat – regrese nebo korelace*) dostaneme možnost zadávat jednotlivá data. Data se zadávají ve formě statistického souboru (tabulka 7.1), který je tvořen množinou 95 hodnot, která jsou definována vždy dvěma souřadnicemi (Y_i, X_i). V tomto ukázkovém příkladě se jedná o 15 minutové vzorky měřených Jouleových

Počet hodnot:	n = 95	
Spektrum teplot:	- 20°C	- 7°C
Vedení	V460	400 kV
Y_i	X_i	
Jouleovy ztráty	venkovní teplota	vybraný den
ΔP_z [MW]	T [°C]	d:měs:rok
0,1	-2,32	4.1.2002
0,12	-2,36	
⋮	⋮	
0,14	4,84	
0,19	5,88	
⋮	⋮	
0,28	-3,84	
0,35	-3,88	
suma Y_i	suma X_i	
25,91	-1519,3	

Tab. 7.1 Ukázka zadávání dat pro výpočet závislosti Jouleových ztrát na venkovní teplotě

ztrát a venkovních teplot. Souřadnice Y_i představuje hodnotu měřených Jouleových ztrát (v následujících testováních závislostí to jsou ztráty korónou a svodem, jejich určení je provedeno výpočtem. Souřadnice X_i určuje při jaké denní venkovní teplotě byly tyto ztráty dosaženy. Tato data jsou doplněna o informaci data, ve kterém dni bylo sledování provedeno. Jedná se však pouze o doplňující informaci, která nemá vliv na další výpočet.

Jedná se o data, která byla vyhodnocena řídicím systémem dispečinku ČEPS v Ostravě na daném vedení. V případě ztrát korónou a

svodem jsou tato data vypočtena na základě měřených údajů. Pro optimální určení regresních křivek by se měla zadávaná data pohybovat v širokém spektru venkovních teplot. Já jsem toto spektrum teplot rozdělil do čtyř rozsahů a z dat vybral dny, kde se rozsahy teplot vyskytovaly. Zvolil jsem rozsah teplot od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V tomto okamžiku je zadávání potřebných dat ukončeno. Nyní je možné provést samotný výpočet u vybraného dne. Program při výpočtu postupuje podle metodiky naznačené v kapitole (3). Jedná se o určení kořenů rovnic jednotlivých matematických funkcí tak, aby co nejlépe vystihovaly průběh naměřených nebo vypočítaných hodnot technických ztrát (Jouleových, korónou, svodem).

Postup výpočtu se pokusím ukázat na příkladu určení optimální **rovnice přímky**. Program používá pro výpočet soustavu rovnic [3.11] a [3.12]. V první fázi výpočtu program EXCEL (analýza dat-regrese) určí jednotlivé sumy:

$$\sum_{i=1}^n x_i = -1519,3; \sum_{i=1}^n x_i^2 = 25989,72; \sum_{i=1}^n y_i = 25,91; \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i = -397,15; \sum_{i=1}^n y_i^2 = 7,5403$$

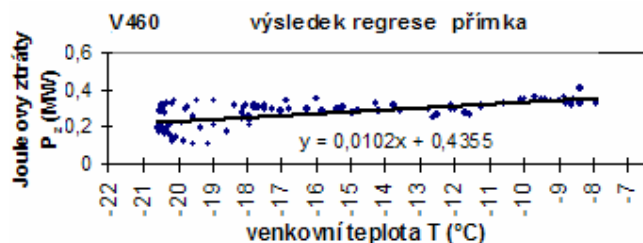
Tyto hodnoty dosadí do soustavy rovnic [3.11] a [3.12], viz kapitola (3.5.1):

Soustava rovnic po dosazení jednotlivých sum vypadá takto:

$$95 \cdot a - 1519,3 \cdot b = 25,91 \quad [7.1]$$

$$-1519,3 \cdot a + 25989,72 \cdot b = -397,15 \quad [7.2]$$

Následně pomocí maticové metody program EXCEL (analýza dat – regrese) vypočte koeficienty a , b rovnice přímky. Já jsem pro ukázkou výpočtu vybral řešení pomocí Cramerova pravidla z oblasti lineární algebry [20]. Výsledek vyjde stejně, pro názornou kontrolu uvádím graf 7.1, kde je výsledkem regresní křivka závislosti Jouleových ztrát vedení V460 ze dne 5.1.2008 na venkovní teplotě.



Graf 7.1 Regresní přímka závislosti Jouleových ztrát na venkovní teplotě

Ukázka výpočtu koeficientů vybrané funkce testování:

$$D = \begin{vmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 95 & -1519,3 \\ -1519,3 & 25989,72 \end{vmatrix} = \underline{\underline{160750,91}} \quad [7.3]$$

$$a = \frac{\begin{vmatrix} \sum y_i & \sum x_i \\ \sum x_i \cdot y_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix}}{D} = \frac{\begin{vmatrix} 25,91 & -1519,3 \\ -397,15 & 25989,72 \end{vmatrix}}{160750,91} = \underline{\underline{0,4355}} \quad [7.4]$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i \cdot y_i \end{vmatrix}}{D} = \frac{\begin{vmatrix} 95 & 25,91 \\ -1519,3 & -397,15 \end{vmatrix}}{160750,91} = \underline{\underline{0,0102}} \quad [7.5]$$

Výsledná rovnice přímky potom bude mít tvar:

$$y = 0,0102 \cdot x + 0,4355 \quad [7.6]$$

Dále jsem provedl statistickou analýzu takového průběhu, tzn. výpočet velikosti průměrné absolutní odchylky, směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro vybrané spektrum venkovních teplot, viz. kapitola (3). Tyto hodnotící kritéria potom slouží pro posouzení, která závislost (přímka, parabola, exponenciála, polynom 3.stupně) se nejvíce blíží ve zkoumaném spektru teplot skutečné závislosti technických ztrát (metodika testování je stejná pro ztráty korónou a svodem) na venkovní teplotě.

$$\text{průměrná absolutní odchylka} \quad d = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|}{n} = \frac{28,29}{95} = \underline{\underline{0,29}} \quad [7.7]$$

kde

y_i i –tá skutečná hodnota Jouleových ztrát (platí i pro výpočty ztrát korónou a svodem)

y'_i i –tá vypočtená hodnota Jouleových ztrát (platí i pro výpočty ztrát korónou a svodem)

n počet testovaných vzorků

$$\text{směrodatná odchylka} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|^2}{n}} = \sqrt{\frac{11,89}{95}} = \underline{\underline{0,35}} \quad [7.8]$$

$$\text{variační koeficient [\%]} \quad v = \frac{\sigma}{\bar{y}_i} \cdot 100 = \frac{0,35}{0,78} \cdot 100 = \underline{\underline{44,8\%}} \quad [7.9]$$

$$\text{kde } \bar{y}_i \text{ je průměrná vypočtená hodnota: } \bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n y'_i}{n} = \frac{74,26}{95} = \underline{\underline{0,78}} \quad [7.10]$$

Potvrzení závislostí dvou datových sad pomocí korelace

Dalším kritériem, které udává míru přiblížení k lineární závislosti mezi znaky statistického souboru je koeficient korelace. Příklad výpočtu, který vyhodnocuji v programu *EXCEL* (analýza dat-korelace) uvádím níže:

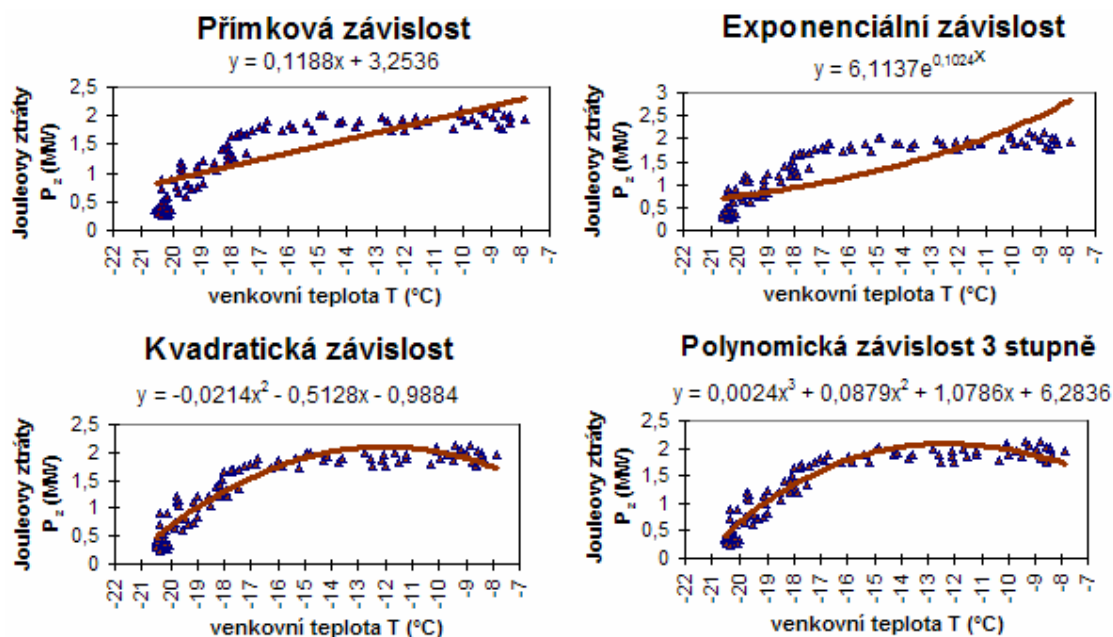
Ukázka výpočtu koeficientu korelace:

$$k_{xy} = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{\left[n \cdot \sum x_i^2 - \left(\sum x_i \right)^2 \right] \left[n \cdot \sum y_i^2 - \left(\sum y_i \right)^2 \right]}} = \quad [7.11]$$
$$= \frac{95 \cdot (-397,15) - ((-1519,3) \cdot (25,91))}{\sqrt{\left[(95 \cdot 25989,72) - (-1519,3)^2 \right] \cdot \left[(95 \cdot 7,54) - (25,91)^2 \right]}} = \underline{\underline{0,682}}$$

Je-li $0,5 < r_{xy} < 0,9$ mluvíme o vysokém stupni závislosti. V mém ukázkovém případě hodnota koeficientu korelace 0,682 znamená, že závislost Jouleových ztrát na venkovní teplotě je na vysokém stupni závislosti.

7.2 VÝSLEDKY ZÁVISLOSTÍ JOULEOVÝCH ZTRÁT NA VENKOVNÍ TEPLITĚ

V této kapitole jsou uvedeny výsledky testů Jouleových ztrát na venkovní teplotě. Testování je provedeno pomocí regresní a korelační analýzy. Konkrétní výsledky jsou uvedeny v rámci této kapitoly v níže uvedených tabulkách. Rozsah venkovní teploty jsem vybral $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$, což obsahovalo vybrané dny po celý rok.

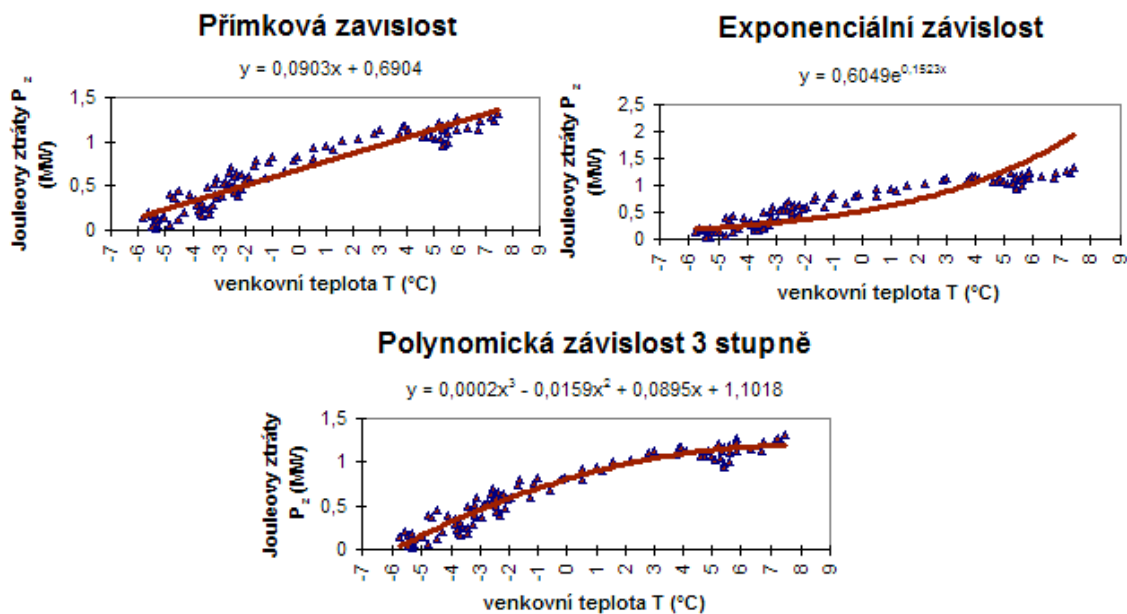


Graf 7.2 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV pro 5. leden 2008

Jouleovy ztráty jsou zatíženy chybou do jednoho procenta, na které se podílí třída přesnosti měřících transformátorů, určitá nepřesnost převodníků a další parazitní vlivy působící na metodu vyhodnocení. Mez odchylky měření – estimace je v řídicím systému energetického dispečinku ČEPS v Ostravě nastavena na 1 %. V případě větší odchylky se hodnota barevně označí jako chybná.

Tabulka 7.1 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

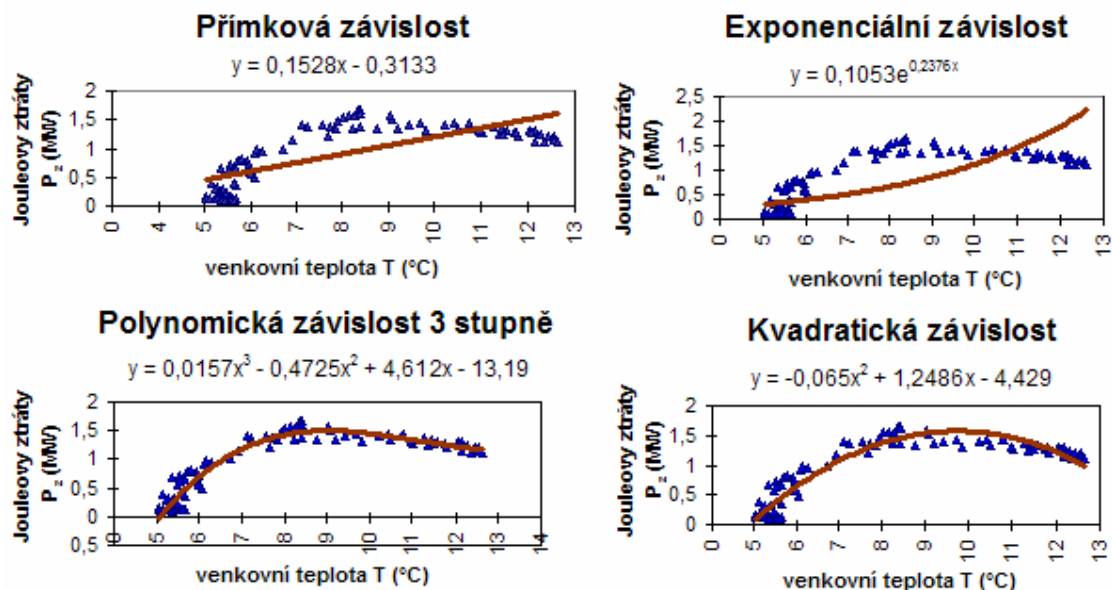
Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
5. leden 2008				od - 20 do - 7			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,47	0,49	34,2	0,67	0,56	0,59	41,5	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
0,31	0,42	33,91		-	-	-	



Graf 7.3 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV pro 16. únor 2008

Tabulka 7.2 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
16.únor 2008				od - 6 do + 7			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,39	0,38	45,8	0,68	0,49	0,45	54,05	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
0,29	0,26	35		-	-	-	

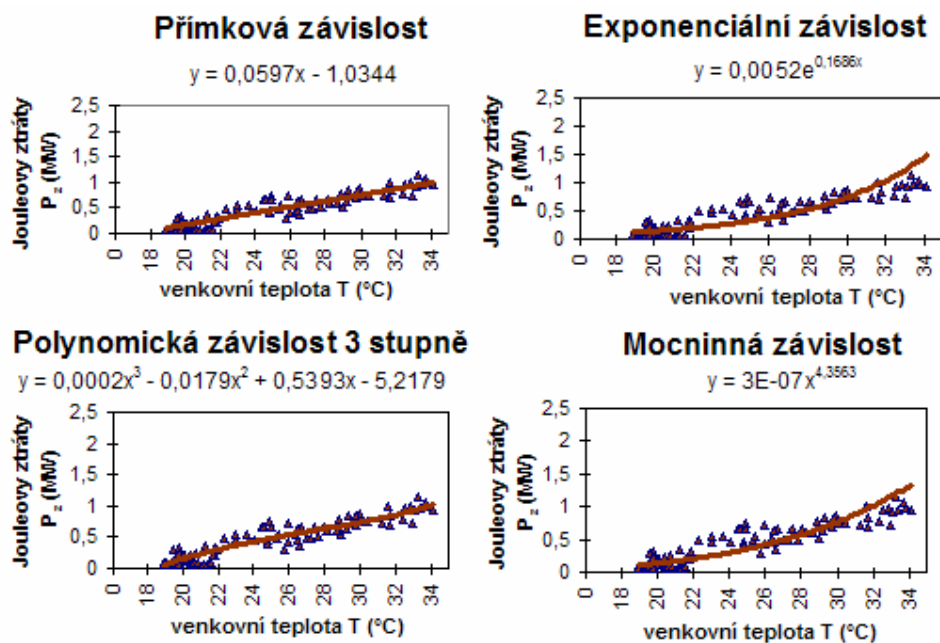


Graf 7.4 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV pro 30. říjen 2008

Tabulka 7.3 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
30. říjen 2008				od + 5 do + 13			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r_{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,38	0,44	45,9	0,67	0,47	0,57	59,43	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
0,18	0,28	30,28		0,46	0,54	56,3	

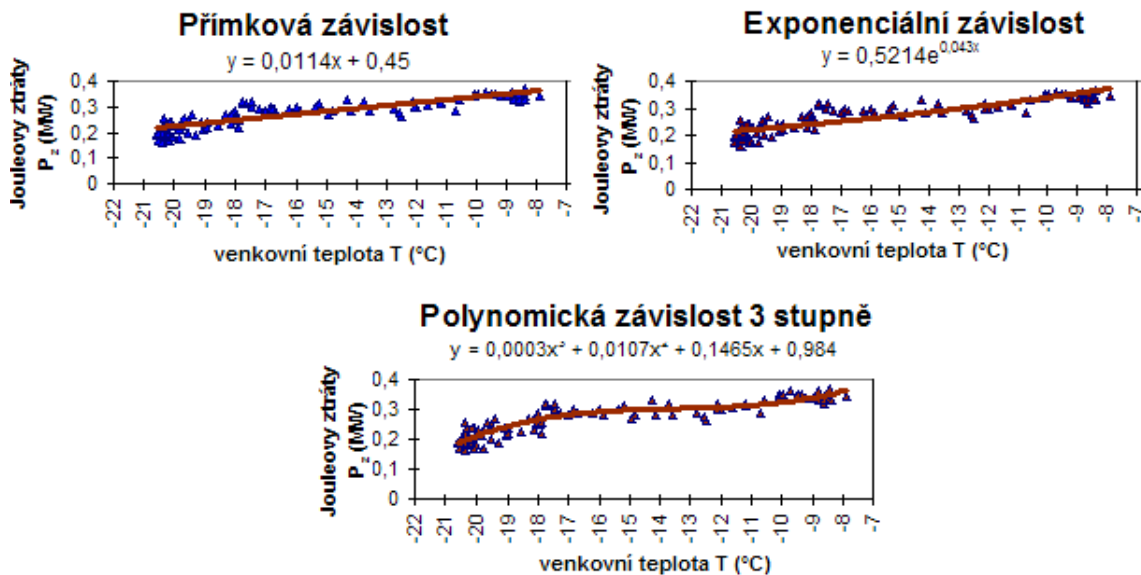
Výsledky testování Jouleových ztrát na venkovní teplotě v rozsahu teplot od -20 °C do $+13$ °C ukázaly, že závislost na venkovní teplotě existuje. Pro každou křivku vychází jinak. V případě testování a výsledků uvedených v tabulkách 7.1 až 7.3 je nejlépe prokládající funkce dle polynomu 3. stupně.



Graf 7.5 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV, data 18 červenec 2008

Tabulka 7.4 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

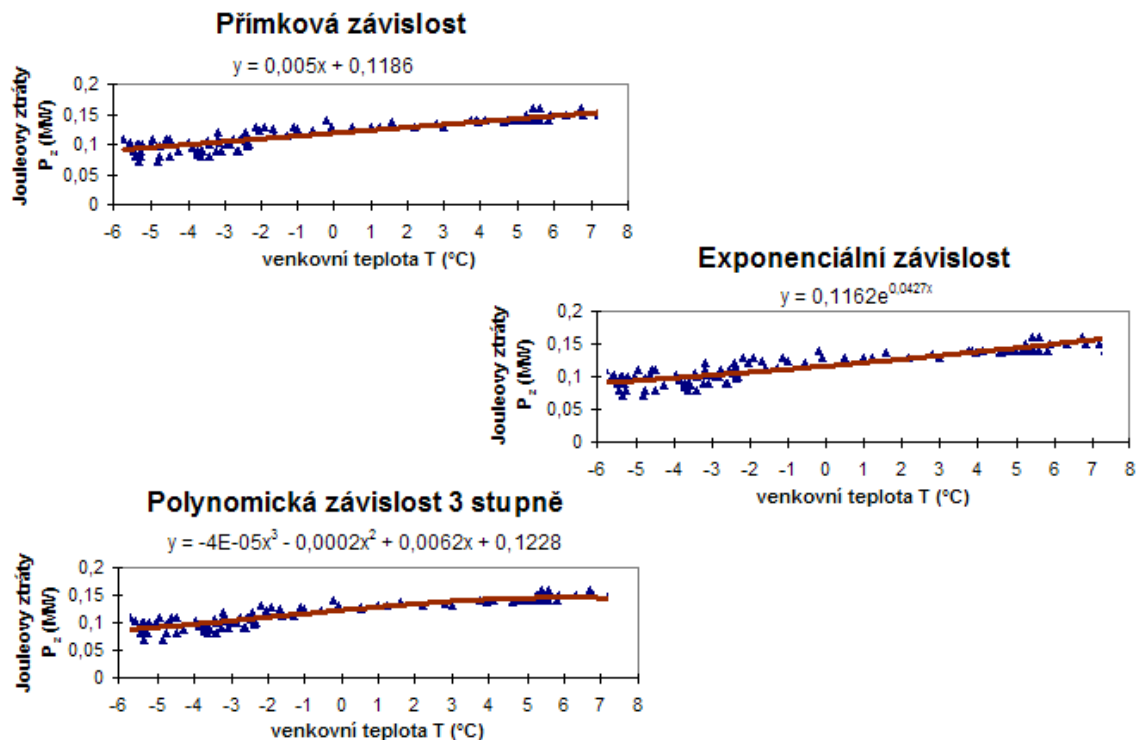
Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
18 červenec 2008				od + 18 do + 33			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,17	0,22	44,7	0,82	0,27	0,34	66,8	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
-	-	-		0,29	0,38	56,9	



Graf 7.6 Výsledky regrese u vedení V460/400 kV pro 5. leden 2008

Tabulka 7.5 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

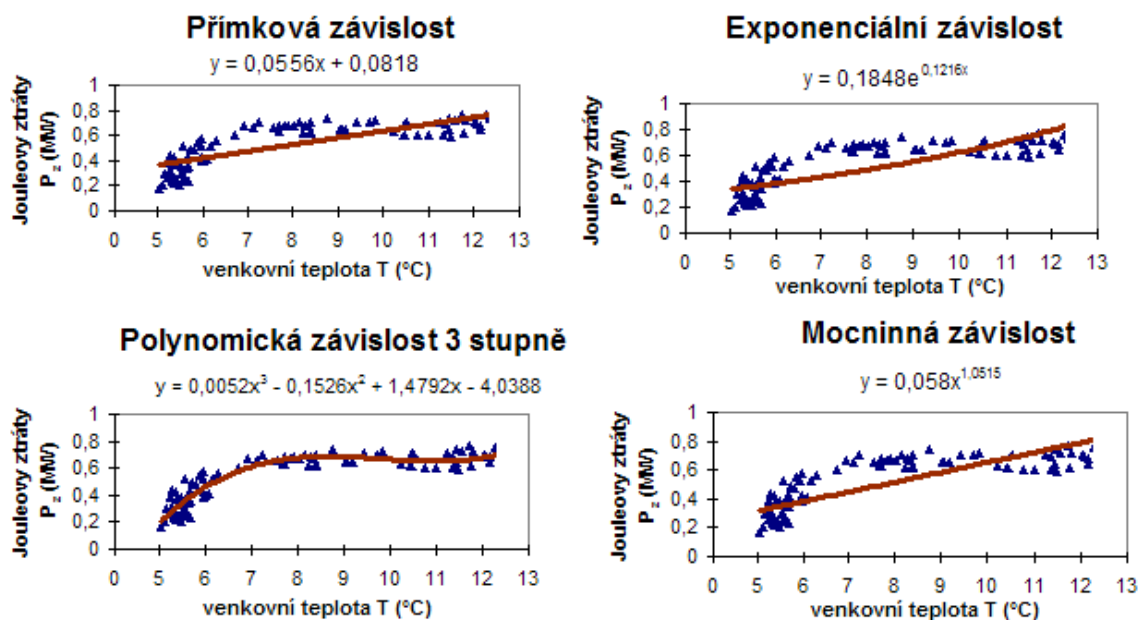
Napětí	400 kV	Vedení	V460	odkud	Nošovice	kam	Albrechtice
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
5. leden 2008				od - 20 do - 7			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,044	0,066	20,55	0,65	0,054	0,067	22	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
0.031	0.052	20.08		-	-	-	



Graf 7.7 Výsledky regrese u vedení VV460/400 kV pro 16. únor 2008

Tabulka 7.6 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

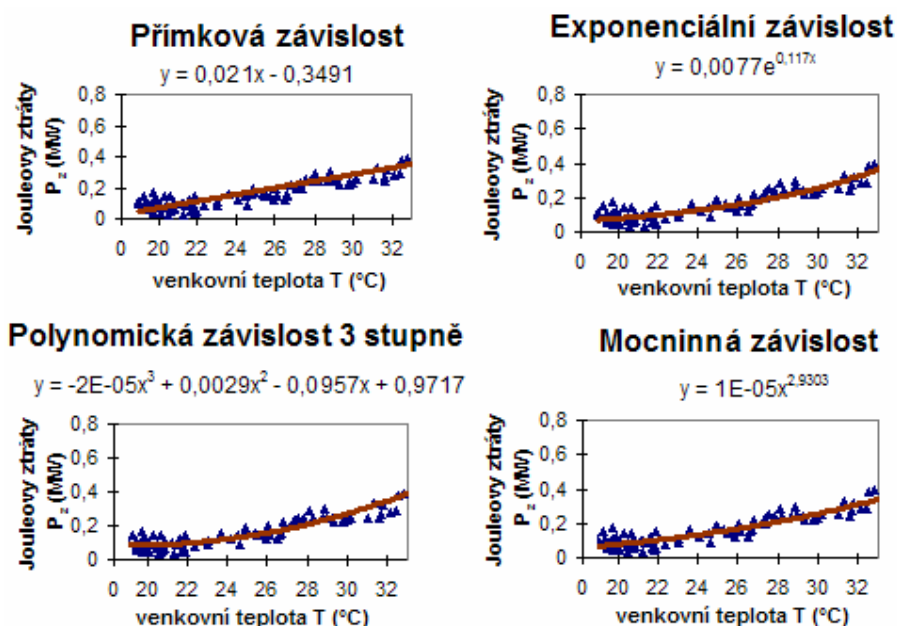
Napětí	400 kV	Vedení	V460	odkud	Nošovice	kam	Albrechtice
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
16.únor 2008				od - 6 do + 7			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,018	0,023	19,16	0,68	0,018	0,023	20,78	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
0,015	0,018	17,33		-	-	-	



Graf 7.8 Výsledky regrese u vedení V460/400 kV pro 30. říjen 2008

Tabulka 7.7 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

Napětí	400 kV	Vedení	V460	odkud	Nošovice	kam	Albrechtice
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
30.říjen 2008				od + 5 do + 13			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,118	0,138	25,65	0,67	0,129	0,17	29,86	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
0,090	0,111	20,49		0,131	0,153	26,68	



Graf 7.9 Výsledky regrese u vedení V403/400 kV pro 18 červenec 2008

Protože testování ve spektru venkovních teplot od + 18 °C do + 33 °C ukázalo u vedení 220 kV (V253), že nejlépe vystihující průběh skutečné hodnoty Jouleových ztrát v závislosti na venkovní teplotě je *přímka* (v jiných spektrech to byl polynom 3. stupně), provedl jsem testování pro potvrzení závislosti také u vedení 400 kV, a to na vybraném vedení V403. Výsledek je vidět na grafu 7.9, kde v celém rozmezí venkovních teplot je nejlépe aproximující funkce *přímková závislost*. Tuto závislost potvrzují i nejmenší hodnoty hodnotících kritérií a velikost korelačního koeficientu ($r_{xy} = 0,8$), viz. tabulka 7.8.

Tabulka 7.8 Výsledky testu Jouleových ztrát na venkovní teplotě

Napětí	400 kV	Vedení	V403	odkud	Nošovice	kam	Prosenice
Den				Venkovní rozsah teplot T (°C)			
18.červenec 2008				od + 18 do + 33			
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
0,070	0,1061	58,4	0,80	0,075	0,1090	71,56	
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
0,073	0,1081	72,92		0,0747	0,1073	65,59	

Shrnutí vybraných výsledků

Pro objektivní posouzení dosažených výsledků jsem vybral z každé napěťové hladiny jedno vedení přenosové soustavy. Výběr vedení z mnoha dat a ukázka výpočtu je uvedena na začátku této kapitoly. Provedl jsem testování pro čtyři rozsahy teplot, které zahrnují široké spektrum venkovních teplot ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$). Toto spektrum jsem rozdělil do čtyř teplotních úseků a vybral pro každý úsek skutečný den ve kterém se daná teplota vyskytovala. Pomocí regresní analýzy jsem vypočítal v programu tabulkového procesoru *MICROSOFT EXCEL* regresní funkci a regresní křivky, které jsou uvedeny v grafech 7.2 až 7.9. Následně jsem provedl u každé regresní křivky a funkce výpočet hodnotících kritérií. Všechny výsledky testování závislosti Jouleových ztrát na venkovní teplotě jsem přehledně uvedl v tabulkách 7.1 až 7.8.

Vyvozené závěry testování Jouleových ztrát na venkovní teplotě:

- koeficienty korelace ve všech případech se pohybovaly od $0,65 - 0,8$, což ukazuje významný stupeň závislosti Jouleových ztrát na venkovní teplotě viz tabulkách 7.1 až 7.8.
- koeficient korelace vyjadřuje přiblížení k lineární závislosti mezi znaky statistického souboru (např. venkovní teploty a Jouleovy ztráty (korónou nebo svodem) a proto je uváděn pouze u přímkové závislosti, viz ukázka výpočtu a tab. 7.1 až 7.8.
- ve spektru venkovních teplot od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ u vedení 220 kV (V253) je vidět, že nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty Jouleových ztrát v závislosti na venkovní teplotě *polynom 3. stupně*, jelikož hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, stejné závěry z výsledků jsou u vedení 400 kV (V460)
- ve spektru venkovních teplot od $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ u vedení 220 kV (V253) také nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty Jouleových ztrát v závislosti na venkovní teplotě *polynom 3. stupně*, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, stejné závěry z výsledků jsou u vedení 400 kV (V460)
- ve spektru venkovních teplot od $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$ u vedení 220 kV (V253) opět nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty Jouleových ztrát v závislosti na venkovní teplotě

polynom 3. stupně, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, stejné závěry z výsledků jsou u vedení 400 kV (V460)

- ve spektru venkovních teplot od + 18 °C do + 33 °C u vedení 220 kV (V253) nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty Jouleových ztrát v závislosti na venkovní teplotě *přímka*, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, z důvodu ověření přímkové závislosti jsem u vedení 400 kV provedl testování na vedení V403, hodnoty všech statistických znaků jsou také nejmenší

Výsledné rovnice regresních funkcí v oddělených spektrech venkovních teplot u testování závislostí Jouleových ztrát na venkovní teplotě jsou přehledně uvedeny v tabulce 7.9.

Tabulka 7.9 Predikce Jouleových ztrát v různých teplotních spektrech u V253

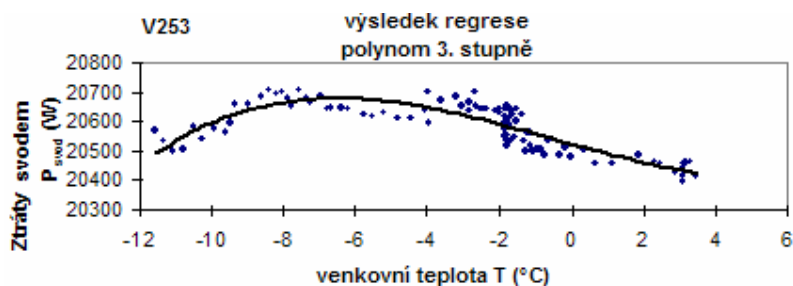
ZÁVISLOST JOULEOVÝCH ZTRÁT NA VENKOVNÍ TEPLITĚ (VEDENÍ V253)	
ROZMEZÍ VENKOVNÍCH TEPLIT	OPTIMÁLNÍ REGRESNÍ FUNKCE P_z [W], T [°C]
-20 °C do -7 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_z = 0,0024 \cdot T^3 + 0,0879 \cdot T^2 + 1,0786 \cdot T + 6,2836$
-6 °C do +7 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_z = 0,0002 \cdot T^3 - 0,0159 \cdot T^2 + 0,0895 \cdot T + 1,1018$
+5 °C do +13 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_z = 0,0157 \cdot T^3 - 0,4725 \cdot T^2 + 4,612 \cdot T - 13,19$
nad 13 °C	PŘÍMKA
	$P_z = 0,0597 - 1,0344$

Z dosažených výsledků testování závislostí Jouleových ztrát na venkovní teplotě vyplývá, že při rozdělení spektra teplot do čtyř intervalů dochází k nejvýhodnější závislosti polynomelem 3. stupně v rozsahu teplot od - 20 °C do + 13 °C, u vyšších teplot přechází závislost v přímkovou, viz tabulka 7.9. Z důvodu rozsáhlosti zadané problematiky jsem nemohl uvést všechny dosažené výsledky, které jsem při testování provedl. Výsledky uvedené v této kapitole však zahrnují vystižení vlivu venkovní teploty na velikost Jouleových ztrát. Z hlediska provozu vedení přenosové soustavy je možné tvrdit, že v letních měsících kdy venkovní teplota se pohybuje zpravidla nad + 13 °C Jouleovy ztráty rostou s růstem venkovní

teploty a u nižších teplot se závislost pohybuje dle polynomu 3. stupně, u vyšších teplot dle přímky.

7.3 TESTOVÁNÍ A VÝSLEDKY ZÁVISLOSTI ZTRÁT SVODEM NA VENKOVNÍ TEPLITĚ

V této kapitole uvádím výsledky testování ztrát svodem na venkovní teplotě. Výpočty ztrát svodem a hodnotících kritérií. Rozsah venkovní teploty jsem zvolil od $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto spektrum teplot je zahrnuto ve čtyřech vybraných dnech z průběhu roku 2008. Výsledky jsou přehledně uvedeny v tabulkách 7.10 až 7.14. Pro testování jsem opět použil vedení V253. Ve vybraném rozsahu teplot $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšla při testování ztrát svodem závislost nejlépe podle křivky polynomu 3. stupně, kde zároveň velikosti hodnotících kritérií vyšly nejmenší. V dalším vybraném rozsahu teplot $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšla při testování ztrát svodem závislost opět nejlépe podle křivky polynomu 3. stupně. Pro rozsah teplot $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšla nejlepší závislost ztrát svodem na venkovní teplotě dle polynomu 3. stupně. Poslední vybraný den, který reprezentuje rozsah nejvyšších teplot je letní den s rozsahem teplot $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. U tohoto dne v rámci testování ztrát svodem na venkovní teplotě vyšla nejlépe závislost dle polynomu 3. stupně, kdy velikosti hodnotících kritérií vyšly nejmenší.

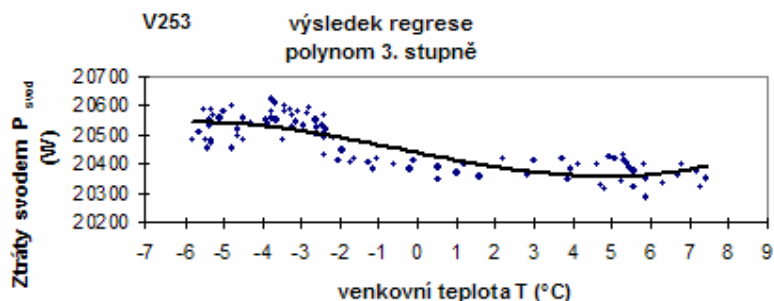


Graf 7.10 Predikce svodových ztrát v rozmezí teplot $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro vedení V253

Výsledek regresní analýzy v rozmezí teplot - 12 °C až + 4 °C ukazuje graf 7.10 a tabulka 7.11, že rozptyl teplot kolem aproximující funkce polynomu 3. stupně je ve většině teplotního spektra rovnoměrný. Vzhledem k dosaženým výsledkům, je patrné že polynom 3. stupně v intervalu venkovní teploty -12 °C až + 4 °C dosahuje nejlepších hodnot (velikosti hodnotících kritérií jsou nejmenší).

Tabulka 7.10 Výsledky testu ztrát svodem na venkovní teplotě od- 12 °C do + 4 °C

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r_{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
106,15	129,67	0,62	0,48	106,14	129,73	0,63	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{\text{svod}} = -12,256 \cdot T + 20541$				$P_{\text{svod}} = 20541 \cdot e^{-0,0006 \cdot T}$			
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
90,27	111,1	0,53		-	-	-	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{\text{svod}} = 0,315 \cdot T^3 + 0,4613 \cdot T^2 - 33,966 \cdot T + 20524$				Nevhodná aproximace			

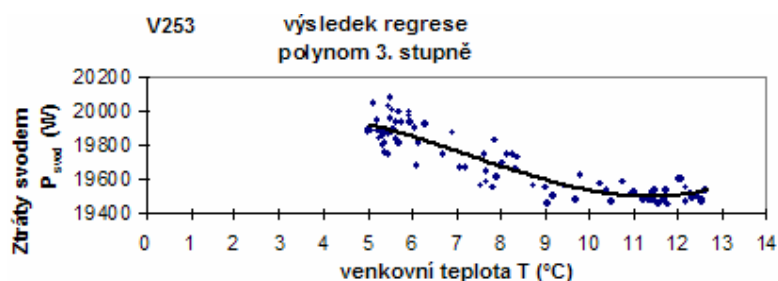


Graf 7.11 Predikce svodových ztrát v rozmezí teplot -6 °C až +8 °C pro vedení V253

Z grafu 7.11 se dá vypořádat, že rozptyl teplot je v celém intervalu mezi $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximující funkce je s malým rozptylem rovnoměrný. Z hlediska výsledků můžu tvrdit, že charakter závislosti ztrát svodem na venkovní teplotě nejpřesvědčivěji vystihuje právě polynom 3. stupně.

Tabulka 7.11 Výsledky testu ztrát svodem na venkovní teplotě $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r_{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
115,09	135,67	0,66	0,37	115,71	135,71	0,66	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{\text{svod}} = -16,869 \cdot T + 20454$				$P_{\text{svod}} = 20454 \cdot e^{-0,0008 \cdot T}$			
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
114,7	134,3	0,65		-	-	-	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{\text{svod}} = 0,326 \cdot T^3 + 0,3683 \cdot T^2 - 26,538 \cdot T + 20438$				Nevhodná aproximace			

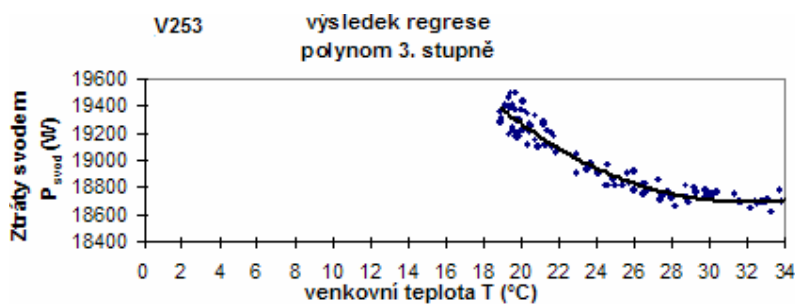


Graf 7.12 Predikce svodových ztrát v rozmezí teplot $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro vedení V253

Z grafu 7.12 je vidět, že největší rozptyl teplot je v první polovině intervalu mezi + 5 °C až + 10 °C, naopak na konci spektra mezi + 10,5 °C až + 13 °C je rozptyl skutečných hodnot od polynomicke křivky malý. Z hlediska výsledků můžu tvrdit, že charakter závislosti ztrát svodem na venkovní teplotě nejpřesvědčivěji vystihuje právě polynom 3.stupně.

Tabulka 7.12 Výsledky testu ztrát svodem na venkovní teplotě od + 5 °C do + 13 °C

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r_{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
111,55	155,5	0,78	0,7	111,37	155,42	0,78	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{svod} = -59,525 \cdot T + 20184$				$P_{svod} = 20215 \cdot e^{-0,0031 \cdot T}$			
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
107,2	150,2	0,76		108,7	152,44	0,77	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{svod} = 1,791 \cdot T^3 - 39,326 \cdot T^2 + 199,13 \cdot T + 19684$				$P_{svod} = 20731 \cdot T^{-0,025}$			



Graf 7.13 Predikce svodových ztrát v rozmezí teplot + 19 °C až + 34 °C pro vedení V253

Z grafu 7.13 je vidět, že rozptyl teplot je v celém intervalu od skutečných hodnot přibližně stejný a lemuje polynomicke křivku. Z hlediska výsledků můžu tvrdit, že charakter závislosti ztrát svodem na venkovní teplotě v celém rozmezí teplot nejpřesvědčivěji vystihuje polynom 3.stupně.

Poznámka:

Pro testování svodových ztrát v teplotních spektrech byla použita data z roku 2008, což výsledky neovlivňuje, neboť teploty okolí se každoročně mění málo.

Tabulka 7.13 Výsledky testu ztrát svodem na venkovní teplotě od + 18 °C do + 34 °C

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r_{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
143,58	176,18	0,92	0,81	142,36	175,96	0,92	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{svod} = -50,394 \cdot T + 20238$				$P_{svod} = 20278 \cdot e^{-0,0027 \cdot T}$			
polynom 3. stupně				mocinná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
137,61	167,95	0,88		189,2	215,7	1,12	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
$P_{svod} = -0,0299 \cdot T^3 + 6,5731 \cdot T^2 - 328,43 \cdot T + 23448$				$P_{svod} = 23604 \cdot T^{-0,0682}$			

Vyvozené závěry testování ztrát svodem na venkovní teplotě:

- koeficienty korelace ve všech případech se pohybovaly od 0,37 – 0,88, což ukazuje přiblížení k lineární křivce (přímce) od slabého až po významný stupeň závislosti ztrát svodem na venkovní teplotě. Z tohoto důvodu je uváděn koeficient korelace pouze u přímkové závislosti.
- ve spektru venkovních teplot od – 12 °C do + 4 °C u vybraného vedení 220 kV (V253) je vidět, že nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát svodem v závislosti na venkovní teplotě *polynom 3. stupně*, jelikož hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší
- ve spektru venkovních teplot od – 6 °C do + 7 °C u vedení 220 kV (V253) také nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát svodem v závislosti na venkovní teplotě *polynom 3. stupně*, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší

- ve spektru venkovních teplot od + 5 °C do + 13 °C u vedení 220 kV (V253) opět nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát svodem v závislosti na venkovní teplotě *polynom 3. stupně*, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší
- ve spektru venkovních teplot od + 18 °C do + 34 °C u vedení 220 kV (V253) nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát svodem v závislosti na venkovní teplotě opět *polynom 3. stupně*, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, stejné závěry z výsledků jsou i u vedení 400 kV

Tabulka 7.14 Predikce svodových ztrát v různých teplotních spektrech u V253

ZÁVISLOST ZTRÁT SVODEM NA VENKOVNÍ TEPLITĚ (VEDENÍ V253)	
INTERVAL VENKOVNÍCH TEPLIT	OPTIMÁLNÍ REGRESNÍ FUNKCE P_{svod} [W], T [°C]
-20 °C do -7 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_{svod} = 0,315 \cdot T^3 + 0,4613 \cdot T^2 - 33,966 \cdot T + 20524$
-6 °C do +7 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_{svod} = 0,326 \cdot T^3 + 0,3683 \cdot T^2 - 26,538 \cdot T + 20438$
+5 °C do +13 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_{svod} = 1,791 \cdot T^3 - 39,326 \cdot T^2 + 199,13 \cdot T + 19684$
nad 13 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_{svod} = -0,0299 \cdot T^3 + 6,5731 \cdot T^2 - 328,43 \cdot T + 23448$

Z dosažených výsledků testování závislostí ztrát svodem na venkovní teplotě vyplývá, že při rozdělení spektra teplot do čtyř intervalů dochází k nejvýhodnější závislosti ztrát svodem na venkovní teplotě aproximací polynomem 3. stupně v celém rozsahu spektra teplot, viz tabulka 7.14.

Z důvodu rozsáhlosti zadané problematiky jsem nemohl uvést všechny dosažené výsledky, které jsem při testování provedl. Výsledky uvedené v této kapitole však zahrnují vystižení vlivu venkovní teploty na velikosti ztrát svodem. Z hlediska provozu vedení přenosové soustavy je možné tvrdit, že vliv venkovní teploty na velikost ztrát svodem se pohybuje dle závislosti aproximujících křivek polynomu 3. stupně.

7.4 TESTOVÁNÍ A VÝSLEDKY ZÁVISLOSTI ZTRÁT KORÓNOU NA VENKOVNÍ TEPLITĚ

ÚVOD K VÝPOČTŮM ZTRÁT KORÓNOU

Na základě prostudování různých pramenů v literaturách, uvedených v habilitační práci jsem v rámci řešení zadání práce vybral metodiku výpočtů ztrát korónou u vedení VVN a ZVN, která splňuje požadavky jednoduchého a efektivního výpočtu ztrát korónou. Výpočet zahrnuje působení atmosférických vlivů, uspořádání a poloměr vodičů a fázové napětí. Uvedl jsem postup výpočtu ztrát korónou dle známého Peekova vzorce. Výpočet podle Peekova vzorce jsem nevybral, neboť se mi jeví jako zastaralý a nevyhovuje teoretickým požadavkům při přechodu k vyšším napětím a tím i větším průměrům vodičů a proto se nehodí pro výpočet malých ztrát korónou. Další postup výpočtu ztrát korónou, který jsem uvedl, je výpočet dle [12]. Pro výpočty a testování ztrát korónou jsem vybral právě tento postup výpočtu pro jeho jednoduchost a zadávání vstupních údajů. Výpočet se opírá o Petersonův vzorec, který vyhovuje velikosti malých ztrát při pěkném počasí. Třetí postup výpočtu ztrát korónou dle [13] jsem uvedl jen pro ukázkou. Výpočet tímto způsobem je zdlouhavý, vyžaduje mnoho údajů a pomocných výpočtů a jeho výsledkem je kontrola, zda vedení není poddimenzováno a je nutno ztráty korónou uvažovat, zároveň řeší roční průměrné ztráty korónou na vedení VVN a ZVN, které pro testování nevyžadují. Zároveň chci upozornit, že vzorce různých autorů se ve větší nebo menší míře hodí pro ten nebo onen rozsah parametrů vedení a druhu počasí a mají-li vyhovovat v širokém rozsahu podmínek, musí se vhodně měnit činitele m_1 a m_2 . Já jsem velikost těchto koeficientů volil tímto způsobem: U vybraného testovaného vedení jsem velikost koeficientu m_1 respektující konstrukci a stárnutí vodiče určil dle údajů katalogového listu vedení (rok uvedení do provozu nebo výměna vodičů – respektuje stárnutí). Koeficient m_2 jsem určoval na základě podkladů dat ČHMU. Jedná se o vhodně zvolené hodnoty koeficientů ze známého rozmezí. Výsledky výpočtu ztrát korónou ukázaly, že součin koeficientů m_1 a m_2 , významně ovlivňují výsledné hodnoty ztrát korónou. V rámci konečných výsledků pro testování jsem provedl ještě kontrolu, zda vypočtené ztráty se pohybují v mezích popsaných v nezávislých tuzemských a zahraničních literaturách. Rozšiřující kapitola (8), která řeší další výpočty ztrát korónou je s uvedením výsledků a příkladů součástí této habilitační práce. Zde jsou uvedeny různé metodiky výpočtu ztrát korónou, jsou také provedeny praktické výpočty na konkrétních vedeních a jednotlivé metodiky mezi sebou jsou porovnány.

Příklad výpočtu prvního kroku ztrát korónou na vedení VVN a ZVN*Vybrané vedení:*

Vedení 220 kV/V253 (z rozvodny Lískovec do rozvodny Prosenice),

tlak vzduchu $99,07 - 99,19 \text{ kPa}$,rozsah denní teploty $+ 3 \text{ }^{\circ}\text{C} - + 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$,vlhkost ovzduší $55 \% - 96 \%$,typ stožáru *SOUDEK*,fázové vodiče $3 \times 350 \text{ AlFe4}$,délka vedení $71,332 \text{ km}$,rok uvedení do provozu 1947 **Vstupní vybrané parametry pro ukázkou výpočtu ztrát korónou:**

Výpočet jsem provedl s daty v rozsahu teplot $+3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+ 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ostatní výpočty pro testování ztrát korónou na venkovní teplotě jsou provedeny v časové závislosti, vzhledem k odečtům atmosférických vlivů a provozovaného napětí na vedení. Časové výsledky jsou následně uvedeny v grafech 7.14 až 7.17 jejich vyhodnocení v tabulkách 7.16 až 7.20. Zhodnocení výsledků testování bude provedeno v závěru kapitoly.

$$p = 99 \text{ kPa}, v = 3,8 \text{ }^{\circ}\text{C}, d = 1054 \text{ cm}, l, 34 \text{ cm}, m_1 = 0,82, m_2 = 0,84, U_f = 136,8 \text{ kV}$$

Relativní hustota vzduchu

$$\delta = \frac{p}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + v} = \frac{99,17}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + 3,8} = \underline{\underline{1,03}}$$

kde

δ [-] relativní hustota vzduchu vzhledem k teplotě 25 °C a tlaku 101,324 kPa

p tlak vzduchu [kPa]

v teplota vzduchu [°C]

U_0 napětí kdy vznikne na povrchu vodiče efektivní intenzita pole E [kV]

U_f průměrné fázové provozované napětí [kV]

L délka vedení [km]

m_1 koeficient vyjadřující kvalitu povrchu vodiče (závisí na konstrukci vodiče a jak se projevuje stárnutí vodiče)

$m_1 = 1$ hladké vodiče s kruhovým průřezem

$m_1 = 0,98 - 0,92$ špinavé a drsné vodiče

$m_1 = 0,98 - 0,82$ pro lana

m_2 koeficient respektující vliv počasí

$m_2 = 1$ suché počasí

$m_2 = 0,8$ deštivé a vlhké počasí

kde

$$E = 21,1 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 = 21,1 \cdot 1,03 \cdot 0,82 \cdot 0,84 = \underline{\underline{14,96 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}}}$$

$$U_0 = E \cdot r \cdot \ln \frac{d}{r} = 14,96 \cdot 1,34 \cdot \ln \frac{1054}{1,34} = \underline{\underline{133,5 \text{ kV}}}$$

Koeficient F dle lit. [11]

$$F = \frac{U_f}{U_0} + 2 \cdot \ln \frac{U_f}{U_0} - 1 = \frac{136,8}{133,5} + 2 \cdot \ln \frac{136,8}{133,5} - 1 = 1,02 - 0,95 = \underline{\underline{0,07}}$$

Nebo koeficient F se dá na základě experimentálního materiálu určit z grafu, který v literatuře [23] publikoval W. S. Peterson. Na základě pokusů Peterson graficky sestavil závislost koeficientu F na poměru napětí U_f / U_0 , kterou proložil křivkou. Pro zjednodušení výpočtu ztrát korónou jsem z Petersonova grafu provedl odečty koeficientů F pro různé poměry napětí U_f / U_0 a sestavil tabulku, kde jsem velikosti koeficientů „ F “ uvedl.

Tabulka 7.15 Velikost koeficientu F pro různé poměry U_f / U_0

U_f/U_0	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	3	4	5
F	0,004	0,0016	0,04	0,09	0,4	2	6	8	9	10	14	18	20

Ztráty korónou na kilometr třífázového vedení:

$$\Delta P_{k/km} = 3 \cdot \frac{112 \cdot f \cdot U_f^2 \cdot F \cdot 10^{-6}}{\left(\ln \frac{d}{r}\right)^2} = 3 \cdot \frac{112 \cdot 50 \cdot 136,8^2 \cdot 0,07 \cdot 10^{-6}}{\left(\ln \frac{1054}{1,34}\right)^2} = 3 \cdot \frac{7,33}{44,45} = \underline{\underline{0,5 kW \cdot km^{-1}}}$$

Ztráty korónou na celém úseku vedení:

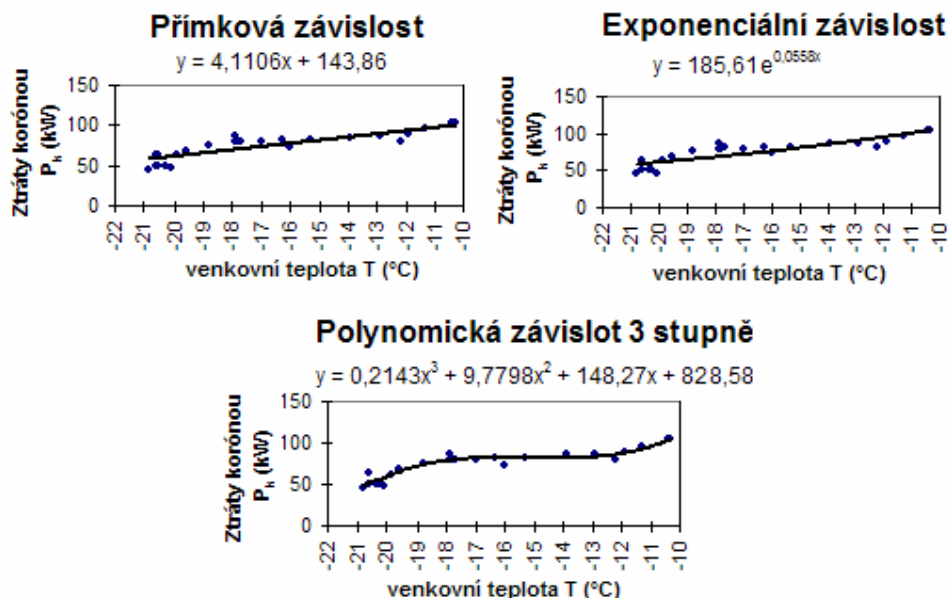
$$\Delta P_k = L \cdot \Delta P_{k/km} = 71,332 \cdot 0,5 = \underline{\underline{35,6 kW}} \approx \underline{\underline{36 kW}}$$

Upravený vzorec pro výpočet ztrát korónou na vedení VVN a ZVN:

$$\Delta P_{k/km} = \frac{0,0168 \cdot U_f^2 \cdot L \cdot F}{\left(\ln \frac{d}{r}\right)^2} [kW \cdot km^{-1}]$$

Koeficient F získám z tabulky 30 na základě poměru U_f / U_0 .

Výsledky testování ztrát korónou na venkovní teplotě



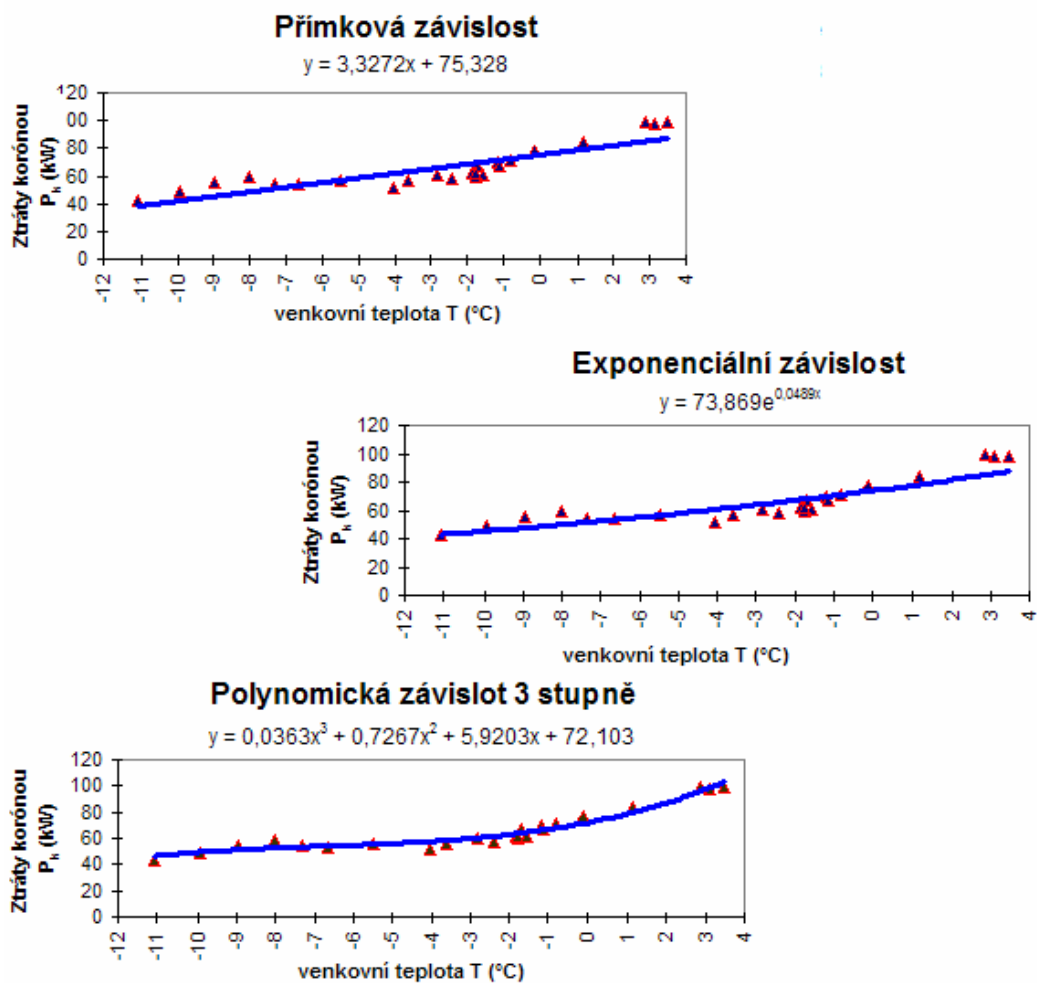
Graf 7.14 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV pro 5. leden 2008

Na počátku nejnižších teplot je vidět nejvyšší rozptyl od regresní křivky, na konci testovaného spektra teplot je rozptyl menší. Velikost koeficientu korelace $r_{xy} = 0,81$, tabulka 7.16 ukazuje dosti významný stupeň lineární závislosti. Regresní analýza dle exponenciály, ukazuje největší rozptyl od $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, což z hlediska aproximující funkce není výstižné.

Výsledek proložení závislosti ztrát korónou ve spektru teplot od $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ polynomem 3. stupně ukázal, že právě polynom 3. stupně nejlépe aproximuje závislost ztrát korónou na venkovní teplotě (při výpočtech je zahrnut také tlak a vlhkost vzduchu). V celém testovaném spektru nízkých teplot polynom 3. stupně prokládá přesvědčivě ztráty korónou na venkovní teplotě.

Tabulka 7.16 Výsledky testu ztrát korónou na venkovní teplotě od- 21 °C do + 10 °C

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Venkovní teploty (°C)				Ztráty korónou na venkovní teplotě			
od - 21 °C do - 10 °C							
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
2,71	6,53	34,98	0,8	3,56	6,92	37,82	
polynom 3. stupně				mocnnná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
1,45	4,15	21,96		-	-	-	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
P _k = 0,2143·T ³ + 9,7798·T ² + 148,27·T + 828,58				Nevhodná aproximace			



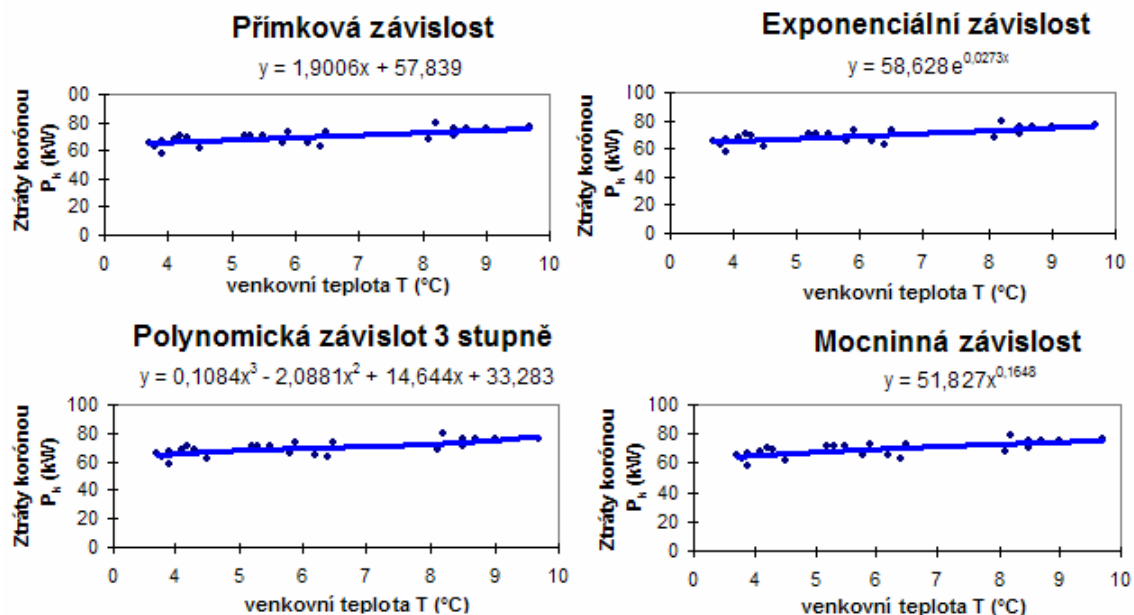
Graf 7.15 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV, data 30. prosinec 2008

V celém testovaném rozsahu teplot $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ je vidět rozptyl od regresní křivky v celém testovaném spektru teplot. Velikost koeficientu korelace vyšla $r_{xy} = 0,82$, viz.tab. 7.17 ukazuje dosti významný stupeň lineární závislosti, ale s rozptylem kolem regresní přímky ve většině testovaného spektra teplot. Regresní analýza dle exponenciální závislosti, ukazuje opět velký rozptyl bodů závislosti ztrát korónou na venkovní teplotě od aproximující funkce.

Výsledek proložení závislosti ztrát korónou ve spektru teplot od $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ polynomem 3. stupně ukázal, že polynom 3. stupně nejlépe aproximuje závislost ztrát korónou na venkovní teplotě viz. graf 7.15 (při výpočtech je zahrnut také tlak a vlhkost vzduchu). V celém testovaném spektru teplot polynom 3. stupně prokládá ztráty korónou na venkovní teplotě viz.graf 7.15. Při podrobném náhledu na graf 7.15 je vidět, že některé body jsou více vzdáleny od regresní křivky. To může být zaviněno jednak chybou odečtu měření z řídicího systému na dispečinku ČEPS v Ostravě, tak i matematickou chybou výpočtu regresní funkce metodou nejmenších čtverců. Výsledky testování jsou uvedeny v tabulce 7.17.

Tabulka 7.17 Výsledky testu ztrát korónou na venkovní teplotě od- $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Venkovní teplota T (°C)				Ztráty korónou na venkovní teplotě			
od - 12 °C do + 3 °C							
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
1,9	4,55	27,36	0,82	1,7	4,14	25,11	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
P _k = 3,3568·T + 75,896				P _k =74,182·e ^{0,0749·T}			
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
1,19	3,00	18,03		-	-	-	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
P _k = 0,0319·T ³ + 0,6927·T ² + 6,0292·T + 72,932				Nevhodná aproximace			



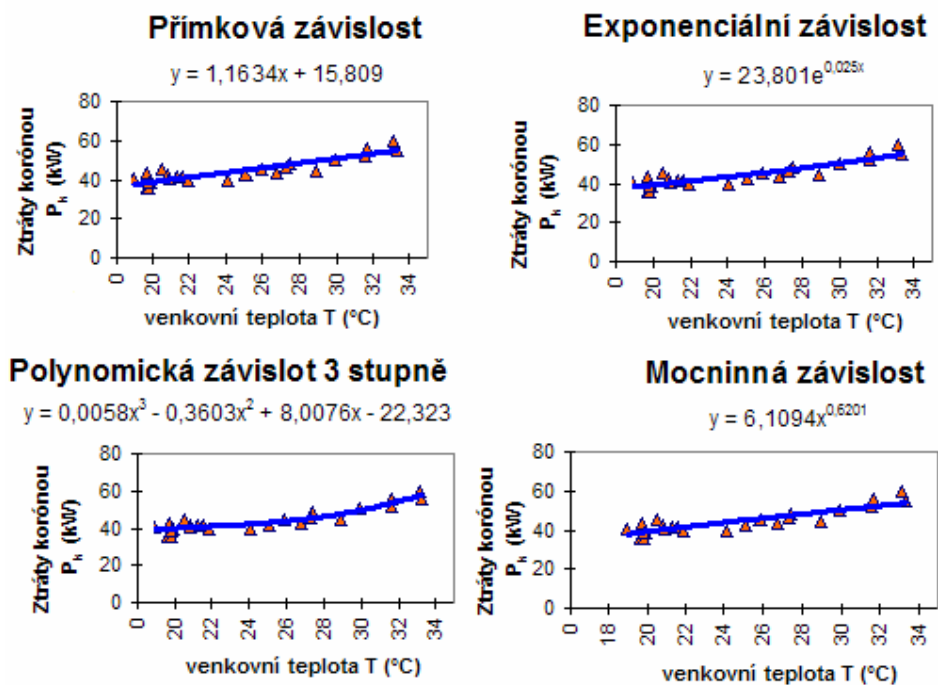
Graf 7.16 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV pro 30. říjen 2008

V testovaném rozsahu teplot od +3 °C do +10 °C je vidět největší rozptyl od regresní křivky v testovaném spektru teplot od +4 °C do +6 °C. Velikost koeficientu korelace $r_{xy} = 0,41$, ukazuje malý stupeň lineární závislosti. Regrese dle exponenciální závislosti ukazuje opět velký rozptyl bodů závislosti ztrát korónou na venkovní teplotě od aproximující exponenciální funkce v rozsahu teplot +4 °C až +6 °C. Výsledky v tomto rozsahu teplot ukázaly, že závislost ztrát korónou na venkovní teplotě ve spektru teplot +3 °C až +10 °C jde matematicky proložit ještě funkcí mocninnou. Největší rozptyl u mocninné funkce je ve spektru teplot od +5 °C až +7 °C, což ukazuje, že mocninná funkce není vhodnou aproximující funkcí.

Opět nejlépe vystihuje závislost ztrát korónou na venkovní teplotě ve spektru teplot +3 °C až +10 °C polynom 3. stupně. Testované hodnoty se nejvíce přibližují regresní funkci polynomu 3. stupně. Odchyly od regresní křivky jsou minimální a mohou být způsobeny jednak chybou vypočtené regresní funkce metodou nejmenších čtverců, tak i hodnotami měření, dosazenými ve výpočtech. Vzhledem k přesvědčivé závislosti aproximující křivky, můžeme tyto chyby zanedbat. Výsledky testování jsou uvedeny v tabulce 7.18.

Tabulka 7.18 Výsledky testu ztrát korónou na venkovní teplotě od + 3 °C do + 10 °C

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Venkovní teplota T (°C)				Ztráty korónou na venkovní teplotě			
od +3 °C do + 10 °C							
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
1,82	5,03	28,58	0,41	1,92	5,12	29,89	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
P _k = 2,354·T + 55,55				P _k =54,969·e ^{0,0373·T}			
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
1,87	4,64	26,37		1,9	4,98	28,63	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
P _k = 0,6169·T ³ - 12,932·T ² + 88,399·T - 123,61				P _k =45,144·T ^{0,2417}			



Graf 7.17 Výsledky regrese u vedení V253/220 kV pro 19. červenec 2008

V testovaném rozsahu teplot od +18 °C do + 33 °C (v našich zeměpisných šířkách patří mezi vysoké venkovní teploty) je vidět rozptyl od regresní křivky v celém spektru teplot. Velikost koeficientu korelace $r_{xy} = 0,42$, ukazuje malý stupeň lineární závislosti. Regrese dle

exponenciální závislosti ukazuje opět rozptyl bodů závislosti ztrát korónou na venkovní teplotě od aproximující exponenciální funkce. V tomto rozsahu teplot závislost ztrát korónou na venkovní teplotě se dala matematicky proložit ještě funkcí mocninnou. Také u mocninné funkce byl rozptyl v celém spektru teplot od + 18 °C do + 33 °C, což ukazuje, že mocninná funkce není vhodnou aproximující funkcí.

Nejlépe vystihuje závislost ztrát korónou na venkovní teplotě ve spektru teplot od + 18 °C do + 33 °C polynom 3. stupně. Testované hodnoty se nejvíce přibližují regresní funkci polynomu 3. stupně. Odchytky od regresní křivky jsou však oproti předchozím testovaným teplotám vyšší. To může být způsobeno jednak chybou vypočtené regresní funkce metodou nejmenších čtverců a hodnotami měření, dosazenými ve výpočtech, tak jinou závislostí ztrát korónou při vyšších teplotách. Vzhledem k výsledkům závislosti aproximující křivky, můžeme vzít závislost ztrát korónou dle polynomu 3. stupně ve spektru teplot od + 18 °C do + 33 °C na venkovní teplotě z regresních křivek za nejvýhodnější. Výsledky testování jsou uvedeny v tabulce 7.20.

Tabulka 7.19 Výsledky testu ztrát korónou na venkovní teplotě od + 18 °C do + 33 °C

Napětí	220 kV	Vedení	V253	odkud	Prosenice	kam	Lískovec
Venkovní teplota T (°C)				Ztráty korónou na venkovní teplotě			
od +18 °C do + 33 °C							
přímka				exponenciála			
d (-)	σ (-)	v (%)	r _{xy} (-)	d (-)	σ (-)	v (%)	
2,02	5,4	46,49	0,42	2,3	5,42	48,15	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
P _k = 1,1522·T + 16,389				P _k =24,4·e ^{0,0241·T}			
polynom 3. stupně				mocninná funkce			
d (-)	σ (-)	v (%)		d (-)	σ (-)	v (%)	
2,02	4,99	42,38		2,06	5,42	48,78	
Výsledná rovnice regrese				Výsledná rovnice regrese			
P _k = 0,0061·T ³ + 0,6664·T ² - 20,916·T+241,41				P _k =6,9274·T ^{0,5812}			

Tabulka 7.20 Predikce ztrát korónou v různých teplotních spektrech u V253

ZÁVISLOST ZTRÁT KORÓNOU NA VENKOVNÍ TEPLITĚ (VEDENÍ V253)	
INTERVAL VENKOVNÍCH TEPLIT	OPTIMÁLNÍ REGRESNÍ FUNKCE P_k [KW], T [°C]
-20 °C do -7 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_k = 0,2851 \cdot T^3 + 12,927 \cdot T^2 + 193,98 \cdot T + 1044,1$
-6 °C do +7 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_k = 0,0319 \cdot T^3 + 0,6927 \cdot T^2 + 6,0292 \cdot T + 72,932$
+5 °C do +13 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_k = 0,6169 \cdot T^3 - 12,932 \cdot T^2 + 88,399 \cdot T - 123,61$
nad 13 °C	POLYNOM 3.STUPNĚ
	$P_k = 0,0061 \cdot T^3 + 0,6664 \cdot T^2 - 20,916 \cdot T + 241,41$

Vyvozené závěry testování ztrát korónou na venkovní teplotě:

- koeficienty korelace ve všech případech se pohybovaly od 0,41 – 0,82, což ukazuje přiblížení k lineární křivce (přímce) od slabého až po významný stupeň závislosti ztrát korónou na venkovní teplotě. Z důvodu přiblížení k lineární závislosti je uváděn koeficient korelace pouze u přímkové funkce
- ve spektru venkovních teplot od – 21 °C až – 10 °C u vybraného vedení 220 kV (V253) je vidět, že nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát korónou v závislosti na venkovní teplotě *polynom 3. stupně*, jelikož hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, stejné závěry mohu konstatovat i u vedení 400 kV, kde z důvodu rozsáhlosti práce jsem výsledky nedokládal
- ve spektru venkovních teplot od – 12 °C do + 3 °C u vedení 220 kV (V253) také nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát korónou v závislosti na venkovní teplotě *polynom 3. stupně*, hodnoty všech statistických znaků jsou opět nejmenší, stejné závěry z výsledků jsou u vedení 400 kV
- ve spektru venkovních teplot od + 3 °C do + 10 °C u vedení 220 kV (V253) opět nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát korónou v závislosti na venkovní teplotě

polynom 3. stupně, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, stejné závěry z výsledků jsou u také vedení 400 kV

- ve spektru venkovních teplot od + 18 °C do + 33 °C u vedení 220 kV (V253) nejlépe vystihuje průběh skutečné hodnoty ztrát korónou v závislosti na venkovní teplotě opět *polynom 3. stupně*, hodnoty všech statistických znaků jsou nejmenší, stejné závěry z výsledků jsou u také vedení 400 kV

Výsledky aproximujících funkcí, zohledňujících závislost ztrát korónou na venkovní teplotě v širokém spektru venkovních teplot, hodnotících kritérií a grafických závislostí jsou uvedeny v tabulkách 7.16 až 7.20 a grafech 7.15 až 7.17.

7.5 SHRUTÍ VYBRANÝCH VÝSLEDKŮ TECHNICKÝCH ZTRÁT

Úvod

Technické ztráty tvoří ztráty Jouleovy, korónou a svodem. Na dispečinku ČEPS v Ostravě jsou vyhodnocovány v řídicím systému TRIS Jouleovy ztráty metodou estimace. V kapitole (6, 8 a 9) jsem provedl výpočty jednotlivých druhů ztrát. Pro porovnání dílčích ztrát chci v této kapitole provést vyhodnocení vybraných výsledků a stanovit závěry. Pro objektivní posouzení jednotlivých ztrát jsem vybral vedení přenosové soustavy, kde jsem měl k dispozici měřené hodnoty Jouleových ztrát a vypočtené hodnoty ztrát korónou a svodem.

7.6 APLIKACE VÝSLEDKŮ V PRAXI

Z výsledků testování a komplexního rozboru technických ztrát na venkovní teplotě jsem dosáhl mnoha výsledků a závislostí. Ukázalo se, že ztráty korónou se stoupající teplotou klesají a Jouleovy ztráty stoupají (neobsahují svodové ztráty, $G = 0$). V rámci habilitační práce je problematika svodové vodivosti zahrnuta ve výpočtu s uvedením závěrů a výsledků. Velikost ztrát svodem se výrazně se změnou teploty nemění. Dosažených výsledků se dá v praxi využít například pro monitorování a predikci jednotlivých ztrát v reálném čase. Při zadání konkrétních vztahů pro výpočty svodových proudů do programu řídicího systému s vazbou na měřené napětím v reálném čase, lze monitorovat svodové proudy na jakémkoliv

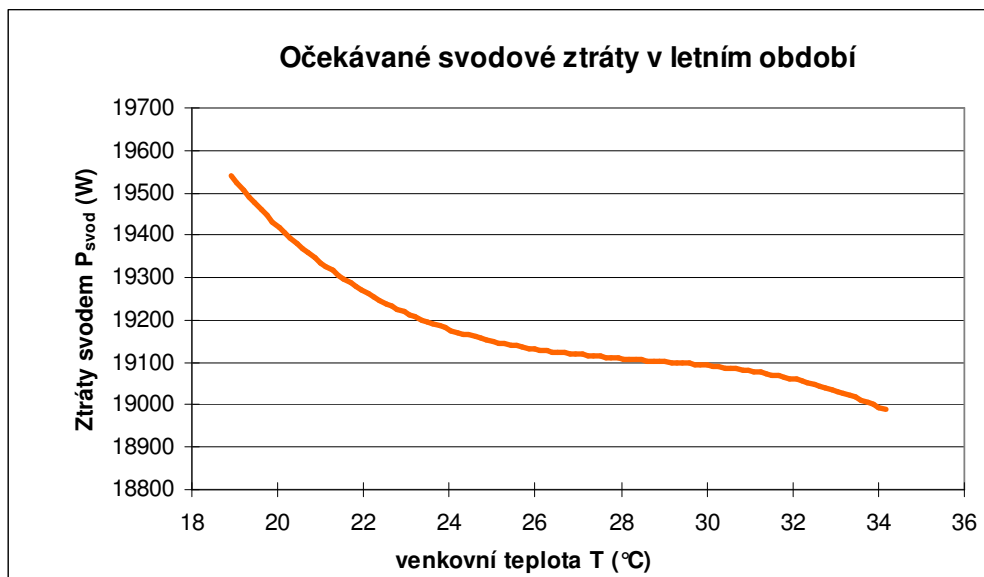
vedení VVN a ZVN. Dosažené hodnoty svodových proudů a ztrát svodem v rámci řídicího systému lze pomocí serverů archivovat a dále využívat pro hodnocení a další výpočty. Jouleovy ztráty lze stejným způsobem vyhodnocovat v reálném čase. Stejná metodika, pokud jde o nadefinování vztahů platí i pro ztráty korónou. Všechny uvedené vztahy pro monitorování a výpočty technických ztrát jsou v rámci přijatelných podmínek zjednodušeny, aby v praxi byly použitelné. Všechny postupy výpočtů technických ztrát jsou odvozeny s použitím fyzikálních zákonitostí. Dalším využitím dosažených výsledků a metodik výpočtů je možnost predikovat jednotlivé technické ztráty na základě vypočtené aproximující funkce. Potom například na základě měřené velikosti teploty v energetického objektu v reálném čase lze po nadefinování příslušné rovnice do řídicího systému získat hodnotu požadovaných technických ztrát s vazbou na měnící se venkovní teplotu, což může být pro dispečera z hlediska provozu přenosové soustavy zajímavé. Ukázka možnosti předikovat ztráty, například svodové v teplotních spektrech u vybraného vedení V253 je uvedena 7.18 a 7.19, případně 7.20 a 7.21. Jednalo by se o nadefinování příslušné rovnice do řídicího systému TRIS, měřený údaj v reálném čase by byla teplota a dopočtený údaj by byly ztráty.

Příklad 1: Predikce svodového proudu v praxi pro stanovený teplotní rozsah u vedení 220 kV V253:

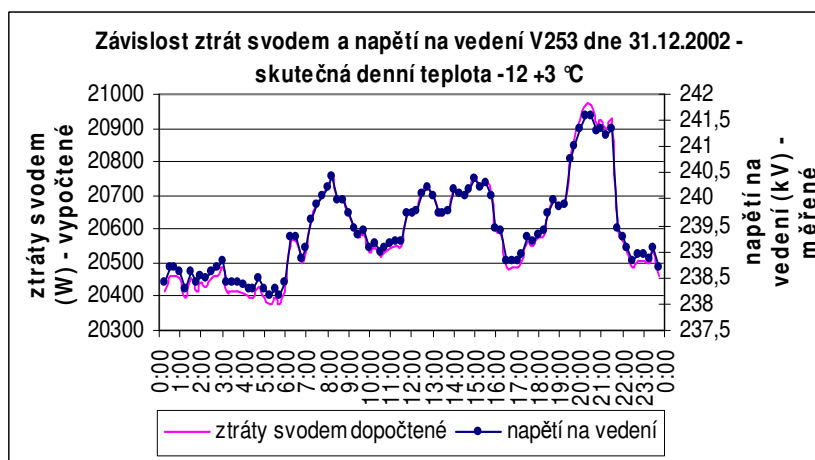


Graf 7.18 Rovnice prognózy: $y = 0,315 T^3 + 0,4613 T^2 - 33,966x + 20524$

Příklad 2: Predikce svodového proudu v praxi pro stanovený teplotní rozsah u vedení 400 kV V403



Graf 7.19 Rovnice prognózy: $y = -0,4073 T^3 + 34,819 T^2 - 1000x + 28753$



Graf 7.20 Příklad monitorování svodového proudu a napětí u vedení V253, možný výstup rámci řídicího systému dispečinku TRIS

Příklad měření svodového proudu a ztrát svodem v reálném čase:

Vypočtené koeficienty „c“ pro napětí 220 kV a 400 kV:

$$c_{220} = \underline{\underline{3,592 \cdot 10^{-7} S}}$$

$$c_{400} = \underline{\underline{1,103 \cdot 10^{-7} S}}$$

Na základě již známých koeficientů „c“ a měřené velikosti napětí z řídicího systému energetického dispečinku lze jednoduchým způsobem a v časové závislosti určovat svodové proudy a ztráty svodem na kterémkoliv vedení VVN a ZVN.

Zobecněné vztahy pro výpočty svodových proudů a ztrát svodem:

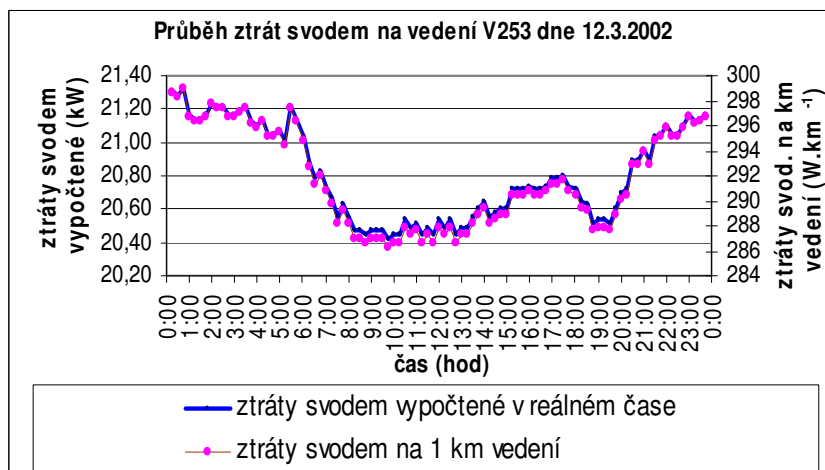
$$\circ I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot c \quad [A, V, S]$$

$$\circ \Delta P_{svod} = U_s^2 \cdot c \quad [W, V, S]$$

$$\circ \Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} \quad [W \cdot km^{-1}, V, S, km]$$

U_s sdružené měřené napětí na vedení [V]

L délka vedení [km]



Graf 7.21 Možný výstupní produkt z řídicího systému energetického dispečinku

Graf 7.21 ukazuje možnost výstupu měření ztrát svodem a ztrát svodem na kilometr délky vybraného vedení v reálném čase, který by mohl v praxi být výstupním produktem řídicího systému energetického dispečinku. Vstupními parametry jsou pouze sdružené napětí na vedení (měřeno v rozvodnách), délka vedení (katalogový údaj) a koeficient „c“ pro příslušnou napěťovou hladinu.

Teorii výpočtu a prognózy technických ztrát je možné v praxi využít pro monitorování a hodnocení u jakéhokoliv vedení VVN a ZVN.

8 DALŠÍ METODY ŘEŠENÍ ZTRÁT KORÓNOU U VEDENÍ VVN A ZVN

Tato kapitola navazuje na problematiku řešení ztrát korónou a svodem, která je uvedena v předchozích kapitolách. Některé pasáže byly v určitém rozsahu řešeny v rámci doktorské práce. Rozšíření o další poznatky a metody je součástí této habilitační práce. Jedná se o nové naměřené hodnoty, výpočty a praktické dopady.

8.1 VYBRANÉ METODIKY VÝPOČTŮ ZTRÁT KORÓNOU [37]

Tato kapitola se zabývá výpočty ztrát korónou u vedení přenosové soustavy. Protože existuje v různých literaturách mnoho metodik výpočtů ztrát korónou, rozhodl jsem se v příspěvku některé metodiky vybrat a provést ukázkové výpočty a tyto porovnat mezi sebou. K tomuto účelu jsem použil vstupní data vedení přenosové soustavy, které vlastní společnost ČEPS, a.s.. Výsledky jsou zpracovány ve formě výpočtů, tabulek a grafů. V závěru je z výsledků dosažených hodnot provedeno vyhodnocení jednotlivých metodik výpočtů ztrát korónou mezi sebou. Výsledkem je potom návrh pořadí metodik výpočtů ztrát korónou. Za kritérium jsem zvolil jednoduchost a dosažení reálných výsledků. Vybrané výsledky ztrát korónou u vedení přenosové soustavy jsou v uvedeny na ukázkových příkladech.

8.1.1 Metodika výpočtu ztrát korónou [29], [37]

Základním činitelem, ovlivňujícím jev koróny na vedení, je intenzita pole na povrchu fázových vodičů. Neuvažujeme-li hrubost a nerovnost povrchu lan a z jejich případného rozštěpení do svazku, že povrchová intenzita pole nemá ve všech bodech na obvodu fázového vodiče libovolné fáze konstantní hodnotu. Maximální povrchový gradient bude mít například při horizontální uspořádání fází fáze střední, a to v bodech přivrácených ke krajním fázím. Tento maximální gradient bude rozhodovat o vzniku koróny a bude rozhodující při posuzování vedení se zřetelem na jeho rádiovou rušivost.

Počáteční gradient obalové koróny základního vodiče:

$$E_0 = 21,4 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{0,299}{\sqrt{r}}\right) \quad (\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$$

kde

m koeficient drsnosti povrchu vodiče, kde pro AlFe lana platí $m = 0,82$

r poloměr dílčího vodiče fáze (cm)

Pro jednotlivé fázové vodiče se určí poměr $E_{stř}/E_0$, na základě tohoto poměru se z diagramu na obrázku 8.1 odečtou pro jednotlivá počasí (pěkné, sníh, déšť a jinovatka) jednotkové hodnoty ztrát korónou $N/(n^2 \cdot r^2)$ jako D , platí:

$$F \left[\frac{E_{stř}}{E_0} \right] = \frac{N_i}{r^2 \cdot n^2} = D$$

$$N_i = D \cdot r^2 \cdot n^2$$

N_i ztráty korónou na jedné fázi za daného počasí ($\text{kW} \cdot \text{km}^{-1}$)

E_0 počáteční gradient koróny ($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)

$E_{stř}$ střední gradient pole na povrchu vodičů ($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)

n počet vodičů ve svazku

r poloměr dílčího vodiče (cm)

Průběhy na obrázku 8.1 je možné vyjádřit matematicky jako $\log D = y$, přičemž křivky „y“ jsou pro jednotlivá počasí popsány následujícími rovnicemi:

Pěkné počasí: $y_{pekne} = -32,13k^4 + 100,37k^3 - 111,67k^2 + 56,87k - 13,262$

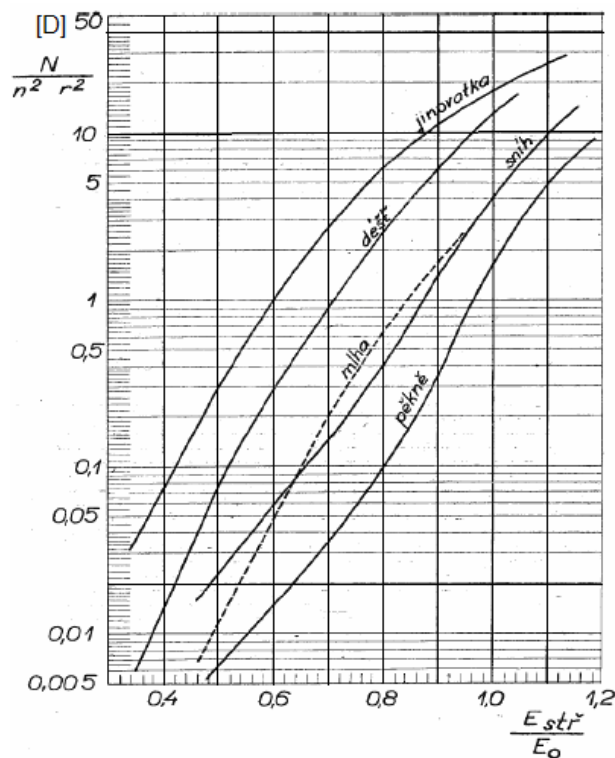
Sníh: $y_{snih} = -9,17k^4 + 24,35k^3 - 21,85k^2 + 11,87k - 4,57$

Déšť: $y_{dest} = -32,13k^4 + 100,37k^3 - 111,67k^2 + 56,87k - 13,26$

Námraza: $y_{namraza} = -3,86k^2 + 9,37k - 4,24$

kde $k = \frac{E_{stř}}{E_0}$

Celkové ztráty jsou dány jako součet ztrát na jednotlivých fázích $P = \sum N_i$.



Obr. 8.1 Závislost jednotkových ztrát korónou na poměrném povrchovém gradientu

Ukázka metodiky výpočtu ztrát korónou dle [41]

Příklad 1:

Máme počítat vedení 400 kV, typ stožáru PORTÁL, střední výška vodičů 13,5 m, fázový vodič 3x450 AlFe6, poloměr dílčího vodiče $r = 1,485$ cm, $a = 400$ mm, zemnicí lana AlFe 185.

Vodič 1	$E_{stř} = 11,58 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$	$E_{max} = 13,07 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
Vodič 2	$E_{stř} = 12,45 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$	$E_{max} = 14,05 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
Vodič 3	$E_{stř} = 11,58 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$	$E_{max} = 13,07 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$

$$E_0 = 21,4 \cdot 0,82 \cdot \left(1 + \frac{0,299}{\sqrt{1,485}} \right) = \underline{\underline{21,85 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}}}$$

$$\frac{E_{stř1}}{E_0} = \frac{11,58}{21,85} = \underline{\underline{0,53}}$$

$$\frac{E_{stř2}}{E_0} = \frac{12,45}{21,85} = \underline{\underline{0,57}}$$

$$\frac{E_{stř3}}{E_0} = \frac{11,58}{21,85} = \underline{\underline{0,53}}$$

Z grafu na obrázku 8.1 určíme pro jednotlivé fáze hodnoty „D“ jednotkových ztrát za různého počasí (pěkné, sníh, déšť, námraza). Součtem se určí celková hodnota „D“ jednotkových ztrát.

Pěkné počasí:

$$D_{pěkné1} = 0,0083 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{pěkné2} = 0,0117 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{pěkné3} = 0,0083 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové D pro pěkné počasí:

$$D_{pěkné} = 0,0083 + 0,0117 + 0,0083 = 0,0283$$

Sníh:

$$D_{sníh1} = 0,03 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{sníh2} = 0,04 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{sníh3} = 0,03 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové D pro sníh:

$$D_{sníh} = 0,03 + 0,04 + 0,03 = 0,10$$

Déšť:

$$D_{déšť1} = 0,03 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{déšť2} = 0,04 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{déšť3} = 0,03 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové D pro déšť:

$$D_{déšť} = 0,11 + 0,2 + 0,11 = 0,42$$

Námraza (jinovatka):

$$D_{\text{námraza1}} = 0,03 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{\text{námraza2}} = 0,04 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{\text{námraza3}} = 0,03 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové D pro námrazu:

$$D_{\text{námraza}} = 0,42 + 0,74 + 0,42 = 1,58$$

Z vypočtených hodnot jednotlivých druhů počasí určíme ztráty na jeden kilometr vedení:

$$P = \sum N_i.$$

Pěkné počasí:

$$P_{\text{pěkné}} = D \cdot n^2 \cdot r^2 = 0,0283 \cdot 3^2 \cdot 1,485^2 = \quad \quad \quad \mathbf{0,56 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}$$

Sníh:

$$P_{\text{sníh}} = D \cdot n^2 \cdot r^2 = 0,10 \cdot 3^2 \cdot 1,485^2 = \quad \quad \quad \mathbf{2,05 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}$$

Děšť:

$$P_{\text{děšť}} = D \cdot n^2 \cdot r^2 = 0,42 \cdot 3^2 \cdot 1,485^2 = \quad \quad \quad \mathbf{8,36 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}$$

Námraza:

$$P_{\text{námraza}} = D \cdot n^2 \cdot r^2 = 1,58 \cdot 3^2 \cdot 1,485^2 = \quad \quad \quad \mathbf{31,35 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}$$

8.1.2 Výpočet ztrát korónou ruskou metodou [41]

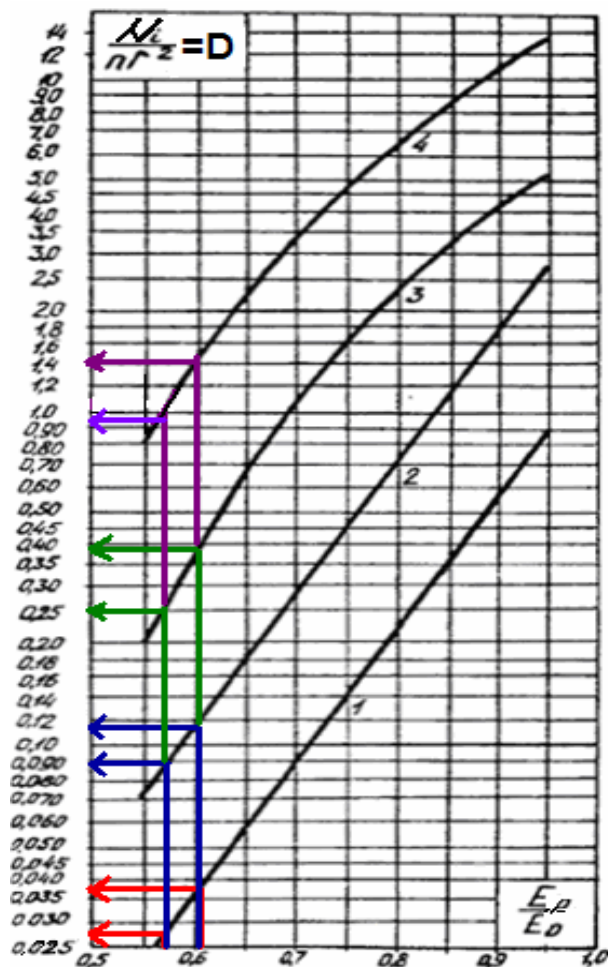
U ruské metodiky je proti české metodice kromě středního gradientu $E_{\text{stř}}$ na jednotlivých fázích nutno ještě vypočítat maximální gradient E_{max} . Pak se určí průměrná hodnota intenzity elektrického pole na povrchu jednotlivých vodičů jako:

$$E_p = \frac{E_{\text{max}} + E_{\text{stř}}}{2} \quad (\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$$

Další postup je stejný jako u české metodiky, pro jednotlivé fáze se určí poměry E_p/E_0 . Potom se na základě poměrů z diagramu na obrázku 8.2 odečtou pro jednotlivá počasí hodnoty D , kde potom platí:

$$\frac{N_i}{n \cdot r^2} = D$$

$$N_i = D \cdot n \cdot r^2$$



Obr. 8.2 Závislost jednotkových ztrát korónou na poměrném povrchovém gradientu

- 1 pěkné počasí
- 2 sníh
- 3 déšť
- 4 jinovatka

Křivky z obrázku 8.2 lze nahradit rovnicemi pro různé počasí:

Pěkné počasí: $y_{pekne} = 3,956 k - 3,818$

Sníh: $y_{snih} = 3,972 k - 3,323$

Déšť: $y_{dest} = -5,35 k^2 + 11,56 k - 5,43$

Námraza: $y_{namraza} = -3,77 k^2 + 8,64 k - 3,69$

Kde
$$k = \frac{E_p}{E_0}$$

Celkové ztráty korónou jsou dány jako součet ztrát na jednotlivých fázích

$$P = \sum N_i.$$

Ukázka výpočtu ztrát korónou pomocí ruské metodiky

Příklad 2:

Máme počítat vedení 400 kV, typ stožáru PORTÁL, střední výška vodičů 13,5 m, fázový vodič 3x450 AlFe6, poloměr dílčího vodiče $r = 1,485$ cm, $a = 400$ mm, zemní lana AlFe 185.

Vodič 1	$E_{stř} = 11,58 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$	$E_{max} = 13,07 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
Vodič 2	$E_{stř} = 12,45 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$	$E_{max} = 14,05 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
Vodič 3	$E_{stř} = 11,58 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$	$E_{max} = 13,07 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$

Postup výpočtu:

$$E_p = \frac{E_{max} + E_{stř}}{2}$$

$$E_{p1} = \frac{13,07 + 11,58}{2} = \underline{\underline{12,33 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}}}$$

$$E_{p2} = \frac{14,05 + 12,45}{2} = \underline{\underline{13,25 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}}},$$

$$E_{p3} = \frac{13,07 + 11,58}{2} = \underline{\underline{12,33 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}}}$$

$$\frac{E_{p1}}{E_0} = \frac{12,33}{21,85} = 0,56$$

$$\frac{E_{p2}}{E_0} = \frac{13,25}{21,85} = 0,61$$

$$\frac{E_{p3}}{E_0} = \frac{12,33}{21,85} = 0,56$$

Z grafu na obrázku 8.2 určíme pro jednotlivé fáze hodnoty „D“ jednotkových ztrát za různého počasí (pěkné, sníh, déšť, námraza). Jejich součtem se určí celková hodnota „D“ jednotkových ztrát.

Pěkné počasí:

$$D_{\text{pěkné}1} = 0,0259 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{\text{pěkné}2} = 0,0381 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{\text{pěkné}3} = 0,0259 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové D pro pěkné počasí

$$D_{\text{pěkné}} = 0,0259 + 0,0381 + 0,0259 = 0,0899$$

Sníh:

$$D_{\text{sníh}1} = 0,09 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{\text{sníh}2} = 0,11 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{\text{sníh}3} = 0,09 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové „ D “ pro sníh:

$$D_{\text{sníh}} = 0,09 + 0,11 + 0,09 = 0,29$$

Děšť:

$$D_{\text{děšť}1} = 0,26 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{\text{děšť}2} = 0,38 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{\text{děšť}3} = 0,26 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové D pro děšť:

$$D_{\text{děšť}} = 0,26 + 0,38 + 0,26 = 0,90$$

Námraza (jinovatka):

$$D_{\text{námraza}1} = 0,99 \quad \text{Vodič 1}$$

$$D_{\text{námraza}2} = 1,40 \quad \text{Vodič 2}$$

$$D_{\text{námraza}3} = 0,99 \quad \text{Vodič 3}$$

Celkové D pro námrazu:

$$D_{\text{námraza}} = 0,99 + 1,40 + 0,99 = 3,38$$

Následně se určí ztráty na 1 km vedení pro různé druhy počasí:

Pěkné počasí:

$$P_{\text{pěkné}} = D \cdot n \cdot r^2 = 0,0899 \cdot 3 \cdot 1,485^2 = 0,6 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$

Sníh:

$$P_{\text{sníh}} = D \cdot n \cdot r^2 = 0,29 \cdot 3 \cdot 1,485^2 = 1,9 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$

Děšť:

$$P_{\text{děšť}} = D \cdot n \cdot r^2 = 0,90 \cdot 3 \cdot 1,485^2 = 5,95 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$

Námraza (jinovatka):

$$P_{\text{námraza}} = D \cdot n \cdot r^2 = 3,38 \cdot 3 \cdot 1,485^2 = 22,38 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}$$

8.1.3 Metodika výpočtu ztrát korónou za deště podle Muravady [30], [41]

Dle uvedené literatury se pro výpočet ztrát korónou v dB na $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ používá vztah:

$$P(\text{dB}) = E_{\text{stř}} + 65 \log \frac{E}{18,8} + 40 \log \frac{d}{3,51} + K_1 \cdot \log \frac{n}{4} + K_2 + \frac{A}{300}$$

kde

E intenzita elektrického pole na povrchu vodiče ($\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$)

$E_{\text{stř}}$ střední gradient pole na povrchu vodičů

n počet vodičů ve svazku

d průměr vodiče v (cm)

$K_1 = 13$ pro počet vodičů ve svazku, $n \leq 4$

$K_1 = 19$ pro počet vodičů ve svazku, $n > 4$

K_2 koeficient je závislý na intenzitě srážek

I intenzita srážek v ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

A nadmořská výška v (m)

$$\text{pro } I \leq 3,6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \text{ je: } K_2 = 10 \log \frac{I}{1,676} \quad \text{pěkné počasí}$$

$$\text{pro } I > 3,6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \text{ je: } K_2 = 3,3 + 3,5 \log \frac{I}{3,6} \quad \text{děšť}$$

Vztah pro převod ztrát z dB na $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$:

$$P(\text{W} \cdot \text{m}^{-1}) = 10^{\frac{P(\text{dB})}{10}}$$

Ukázka výpočtu ztrát korónou podle Muravady**Příklad 3:**

Máme počítat vedení 400 kV, typ stožáru PORTÁL, střední výška vodičů 13,5 m, fázový vodič 3x450 AlFe6, poloměr dílčího vodiče $r = 1,485$ cm, $a = 400$ mm, zemní lana AlFe 185.

$$d = 2,97 \text{ cm}, K_1 = 13, n = 3, K_2 = 2,53, I = 3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1},$$

$$E = 14,1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}, A = 300 \text{ m}, E_{\text{stř1}} = E_{\text{stř3}} = 11,58 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1},$$

$$E_{\text{stř2}} = 12,45 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Postup výpočtu:

$$\begin{aligned} P_1(\text{dB}) = P_3(\text{dB}) = E_{\text{stř}} + 65 \log \frac{E}{18,8} + 40 \log \frac{d}{3,51} + K_1 \cdot \log \frac{n}{4} + K_2 + \frac{A}{300} &= 11,58 + 65 \log \frac{14,1}{18,8} \\ + 40 \log \frac{2,97}{3,51} + 13 \cdot \log \frac{3}{4} + 2,53 + \frac{300}{300} &= \underline{\underline{-0,48 \text{ dB}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2(\text{dB}) = E_{\text{stř}} + 65 \log \frac{E}{18,8} + 40 \log \frac{d}{3,51} + K_1 \cdot \log \frac{n}{4} + K_2 + \frac{A}{300} &= 12,45 + 65 \log \frac{14,1}{18,8} \\ + 40 \log \frac{2,97}{3,51} + 13 \cdot \log \frac{3}{4} + 2,53 + \frac{300}{300} &= \underline{\underline{1,57 \text{ dB}}} \end{aligned}$$

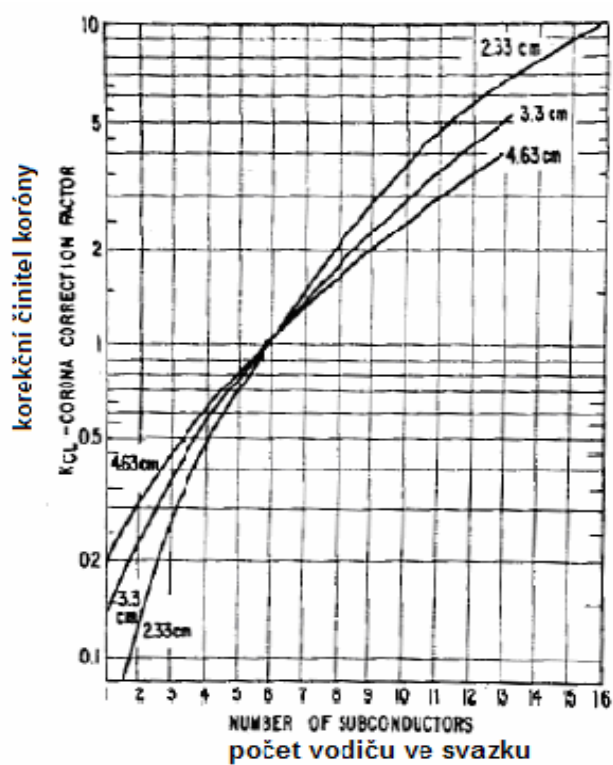
$$P_1(W \cdot m^{-1}) = P_3(W \cdot m^{-1}) = 10^{\frac{P(\text{dB})}{10}} = 10^{\frac{-0,48}{10}} = \underline{\underline{0,9 W \cdot m^{-1}}}$$

$$P_2(W \cdot m^{-1}) = 10^{\frac{1,57}{10}} = \underline{\underline{1,42 W \cdot m^{-1}}}$$

$$P_{\text{celk}}(W \cdot m^{-1}) = P_1 + P_2 + P_3 = \underline{\underline{3,22 W \cdot m^{-1}}}$$

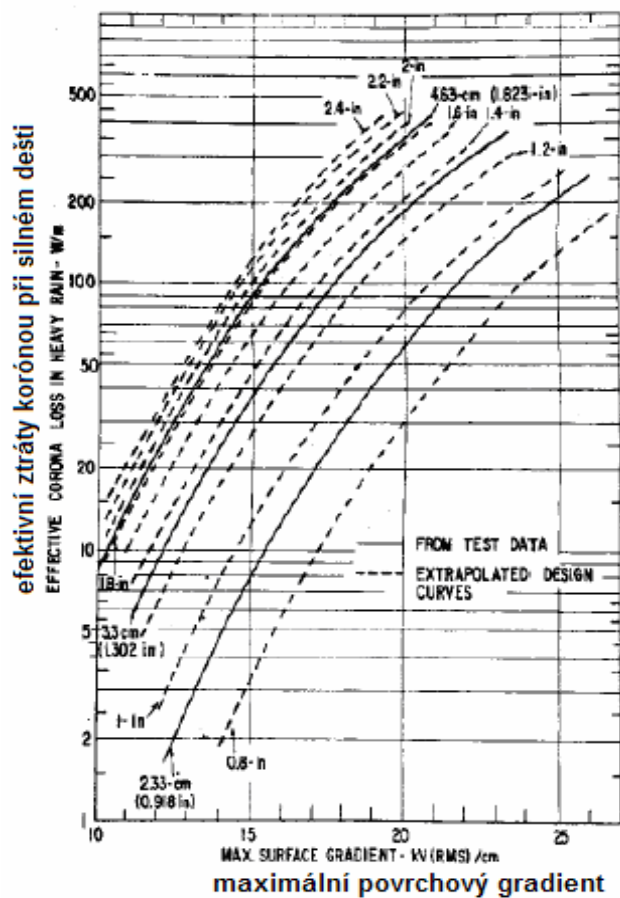
8.1.4 Metodika výpočtu ztrát korónou za deště podle Combera [31], [41]

Metoda vychází z početního určení maximální hodnoty gradientu elektrického pole na povrchu jednotlivých vodičů. Na základě těchto hodnot se z grafu na obrázku 8.4 odečtou efektivní hodnoty ztrát korónou P_{DEF} při silném dešti.

Obr. 8.3 Graf pro určení korekční činitele K_{CL}

Tabulka 8.1 Koeficient vlhkosti „K“ intenzity deště

napětí (kV)	počet vodičů ve svazku	koeficient K
362	1	1,57
	2	1,4
400	1-3	1,3
550	1	1,54
	2	1,38
	3	1,29

Obr. 8.4 Graf pro určení činných ztrát korónou P_{DK}

Vztah pro určení celkových ztrát korónou za silného deště:

$$P_{SD} = K \cdot K_{CL} \cdot \sum P_{DK} \quad (\text{kW} \cdot \text{km}^{-1})$$

kde:

K je koeficient vlhkosti, viz tabulka 8.1

K_{CL} je korekční činitel, viz obrázek 8.3

Ukázka výpočtu ztrát korónou podle Combera

Příklad 4:

Máme počítat ztráty korónou u vedení 400 kV, typ stožáru PORTÁL, střední výška vodičů 13,5 m, fázový vodič 3x450 AlFe6, poloměr dílčího vodiče $r = 1,485$ cm, $a = 400$ mm, zemnicí lana AlFe 185.

Koeficient vlhkosti: $K = 1,3$, korekční činitel pro silný déšť $K_{CL} = 0,4$, korekční činitel pro slabý déšť $K_{CL} = 0,75$, $E_{stř1} = E_{stř3} = 11,58$ kV·cm⁻¹, $E_{stř2} = 12,45$ kV·cm⁻¹

Výpočet ztrát korónou za silného deště:

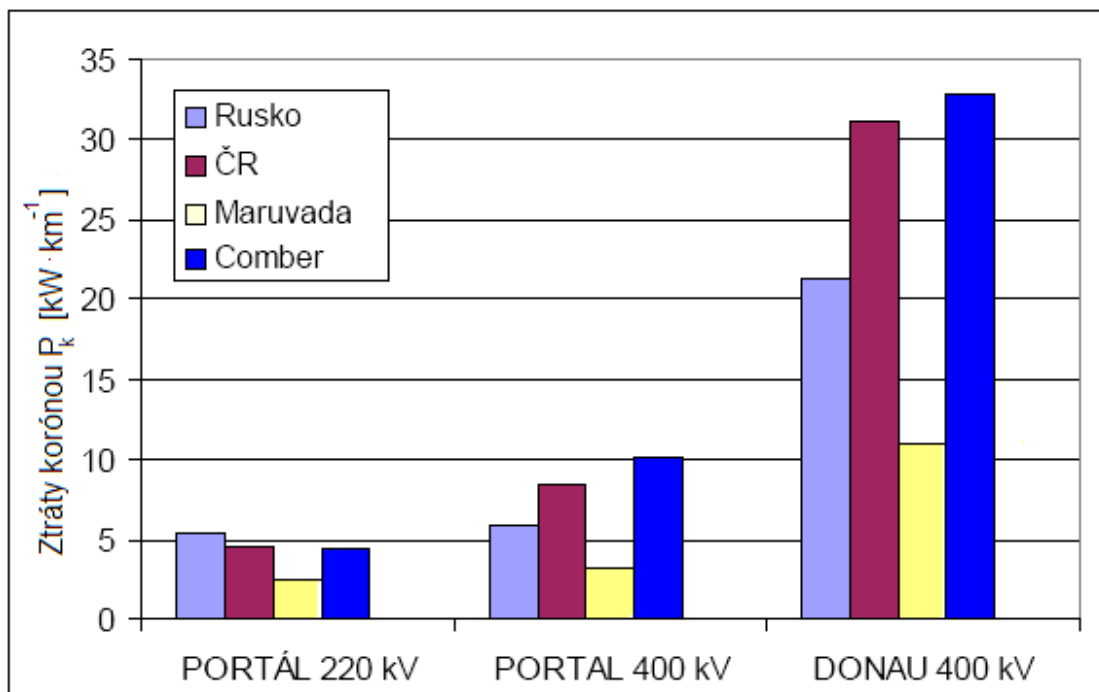
Na základě obrázku z grafu 3 určíme pro:

$E_{stř1} = E_{stř3} = 11,58$ kV·cm⁻¹ hodnoty $P_{DK1} = P_{DK3} = 7$ kW·km⁻¹, $E_{stř2} = 12,45$ kV·cm⁻¹ hodnota $P_{DK2} = 12$ kW·km⁻¹

$$P_{SD} = K \cdot K_{CL} \cdot \sum_1^3 P_{DK} = 1,3 \cdot 0,4 \cdot (7 + 12 + 7) = \underline{\underline{13,52 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Pro slabý déšť se používá obrázku 8.4 korekční činitel $K_{CL} = 0,75$

$$P_D = K_{CL} \cdot P_{SD} = 0,75 \cdot 13,52 = \underline{\underline{10,14 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}}$$



Obr. 8.5 Porovnání ztrát korónou za deště u výše uvedených metodik

8.1.5 Vyhodnocení metodik ztrát korónou

Hlavně ve starších literaturách je uvedeno mnoho metodik pro výpočty ztrát korónou. V habilitační práci uvádím vybrané čtyři metodiky, které se jeví jako srozumitelné a vedou k reálným výsledkům. Jedná se o metodiku českou, ruskou, Muravady a Combera. U každé metodiky je uvedena krátká teorie a je proveden ukázkový výpočet. Vzájemné porovnání výsledků je uvedeno v tabulce 8.2 a obrázku 8.5. *Česká metodika* umožňuje výpočty při pěkném počasí, dešti, sněhu i námraze. Vypočtené hodnoty ztrát korónou vycházejí vyšší. *Ruská metodika* je univerzálnější a umožňuje výpočty ztrát korónou při pěkném počasí, dešti, sněhu a námraze. Metoda výpočtu *podle Muravady* umožňuje výpočty ztrát korónou při pěkném počasí a dešti. Vypočítané ztráty za deště jsou ale nižší. Čtvrtá metodika, která je v příspěvku uvedena, je *podle Combera*. Ta umožňuje výpočty ztrát korónou při pěkném počasí, dešti, sněhu a námraze. Ztráty korónou za deště vycházejí nejvyšší.

Grafické porovnání výsledků ztrát korónou za deště u výše uvedených metodik je uvedeno na obrázku 8.5.

Tabulka 8.2 Porovnání metodik výpočtu ztrát korónou za deště u tří typů vedení

Metodiky	PORTÁL 220 kV P [kW·km ⁻¹]	Odchylka od průměru	PORTÁL 400 kV P [kW·km ⁻¹]	Odchylka od průměru	DONAU 400 kV P [kW·km ⁻¹]	Odchylka od průměru
ruská	5,37	1,17	5,95	-0,96	21,23	-2,79
česká	4,5	0,3	8,36	1,45	31,12	7,1
Muravada	2,52	-1,68	3,22	-3,69	10,97	-13,05
Comber	4,44	0,24	10,14	3,23	32,76	8,74
průměr	4,2		6,91		24,02	

Na základě dosažených výsledků, které jsou v kapitole uvedeny lze stanovit tyto předpoklady. Pro reálné výpočty je vhodná ruská metodika, protože umožňuje výpočty ztrát korónou při pěkném počasí, dešti, sněhu a námraze. Přesnost hodnot ztrát korónou u ruské metodiky je na základě dlouhodobých měření nejvyšší. Výsledky jsou porovnány v tabulce 8.2 a obrázku 8.5. Vzhledem k tomu, že ztráty korónou za pěkného počasí jsou nízké, proto jsou srovnány výsledky ztrát korónou za deště, které mají větší podíl na celkových ztrátách.

Z uvedených metodik lze vyvodit, že ztráty korónou na vedení VVN a ZVN jsou stále aktuální a umět reálně vyčíslit jejich velikost vede ke zlepšování jejich ekonomického provozu.

8.2 VÝSLEDKY VÝPOČTŮ ZTRÁT KORÓNOU U VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY

Na základě poznatků o vedeních přenosové soustavy, které jsou ve vlastnictví firmy ČEPS uvádím v tabulce 8.3 a 8.4, seznam vedení 220 kV a 400 kV. Jsou zde uvedeny čísla a zkratky rozveden, odkud a kam je dané vedení zaústěno. Následně jsou u každého vedení uvedeny hodnoty ztrát korónou podle ruské metodiky, a to za pěkného počasí, sněhu, deště a námrazy. Protože mým zadáním v doktorské práci [29] bylo určit podíl velikosti ztrát korónou na technických ztrátách, tak jsem v rámci habilitační práce chtěl zahrnout výsledky výpočtu podle jiné metodiky a vyhodnotit, jakým procentem se ztráty korónou podílejí na celkových ztrátách. Výsledky jsou potom vyhodnoceny a uvedeny. Pro další posouzení z hlediska podílu ztrát korónou na celkových ztrátách u vedení 220 kV a 400 kV, došlo k vyhodnocení těchto ztrát na základě sběru dat z období roku 2004 a 2005. Tyto ztráty byly staženy z řídicího systému na záložním pracovišti dispečinku ČEPS v Ostravě. V rámci vyhodnocení určitého vzorku došlo k separaci vedení přenosové soustavy, a to jen na část z oblasti Moravy. Velikost technických ztrát u všech vedení 220 kV z oblasti Moravy se pohybovaly v rozmezí 10 až 25 MW. U vedení 400 kV se technické ztráty v oblasti Moravy pohybují v rozmezí 15 až 57 MW. V kapitole 8.2.1 uvádím hodnoty vypočtených ztrát korónou podle ruské metodiky a podílu těchto ztrát na celkových ztrátách. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 8.5 a 8.6.

Tabulka 8.3 Ztráty korónou na vedení 220 kV ČEPS z oblasti Moravy, vypočtené podle ruské metodiky

vedení	odkud-kam	délka (km)	Ztráty korónou (kW)			
			pěkně	sníh	děšť	námraza
V203	OPO-SOK	136,08	59,8	191,6	728,3	2181,9
V207	TAB-SOK	169,68	58,9	188,5	681,2	2231,4
V243	SOK-BIS	50,57	25,9	83,2	318,0	928,1
V244	SOK-BIS	50,57	25,9	83,2	318,0	928,1
V245	LIS-BUJ	23,38	13,9	44,7	170,9	487,9
V246	LIS-KPA	23,38	13,9	44,7	170,9	487,9
V251	PRN-SOK	83,84	43,0	137,9	527,2	1538,7
V252	PRN-SOK	83,84	43,0	137,9	527,2	1538,7
V253	LIS-PRN	71,33	43,8	140,8	537,2	1522,1
V254	LIS-PRN	71,33	43,8	140,8	537,2	1522,1
V270	LIS-PBY	61,37	27,0	86,7	329,4	987,3
V280	SOK-SEN	66,21	22,4	71,6	257,6	850,3
Ni220 (MW)			0,4213	1,3516	5,1031	15,2045

Tabulka 8.4 Ztráty korónou na vedení 400 kV ČEPS z oblasti Moravy, vypočtené podle ruské metodiky

vedení	odkud-kam	délka (km)	Ztráty korónou (kW)			
			pěkně	Sníh	děšť	námraza
V402	KRA-PRN	87,67	71,8	229,9	824,1	2716,0
V403	PRN-NOS	79,42	62,7	200,9	716,6	2385,3
V404	NOS-VAR	40,40	32,8	104,9	375,6	1241,7
V413	REP-PRN	284,90	590,4	2253,3	8213,2	25556,1
V417	SOK-OTR	74,10	64,9	207,7	755,1	2438,7
V418	OTR-PRN	37,64	34,4	110,1	402,1	1284,9
V422	HBM-CEB	82,30	75,2	240,6	867,8	2836,9
V423	CEB-SOK	38,40	32,3	103,5	370,4	1221,9
V424	SOK-KRI	54,38	45,4	145,2	525,3	1717,9
V433	DAS-SLV	142,69	106,4	340,3	1161,7	4037,6
V434	SLV-CEB	50,72	40,7	130,1	448,8	1535,0
V435	SLV-SOK	55,67	56,4	180,8	657,0	2110,7
V436	SLV-SOK	55,44	51,5	164,8	586,1	1037,6
V437	SLV-DRN	42,53	41,4	132,7	480,0	1564,2
V443	ALB-WIE	24,44	29,8	95,6	357,5	1074,2
V444	NOS-WIE	38,83	93,4	299,6	1122,4	3360,5
V457	KRA-DST	59,79	46,4	148,4	506,8	1762,4
V459	HZI-NOS	95,50	63,8	203,9	667,9	2422,6
V460	NOS-ALB	16,61	13,9	44,3	160,4	524,7
V481	DAL-SLV	2,29	2,3	7,4	27,1	86,9
V482	DAL-SLV	2,29	2,3	7,4	27,1	86,9
V483	DUK-SLV	3,31	2,3	7,4	24,8	87,9
V484	DUK-SLV	3,26	2,3	7,3	24,4	86,7
V485	DUK-SLV	3,45	2,4	7,7	25,9	91,8
V486	DUK-SLV	3,71	2,6	8,3	27,8	98,6
V497	SOK-STU	56,55	43,0	137,6	467,1	1643,9
N _i (MW)			1,6108	5,5197	19,823	63,0116

8.2.1 Vyhodnocení podílu ztrát korónou na celkových ztrátách

V této části bych se chtěl zmínit o způsobu vyhodnocení podílu ztrát korónou na technických ztrátách u vedení přenosové soustavy. Ukázka technických ztrát vyhodnocených v řídicím systému na záložním dispečinku ČEPS v Ostravě je uvedena na obrázku 8.6.

ČEPS a.s., záložní dispečerské pracoviště Ostrava			ESTIMOVANÉ ZTRÁTY			Datum: 14. 3. 2006 Čas: 8:21:46	
ALB :T401 0.000 :T402 0.128 BAB :T401 0.211 :T403 0.000 BEZ :T401 0.230 :T402 0.136 :T201 0.000 CEB :T401 0.170 :T402 0.034 :T403 0.000 CHD :T401 0.189 :T402 0.079 CHR :T401 0.068 :T402 0.000 CHT :T201 0.012 :T202 0.014 CST :T401 0.012 :T402 0.246 :T403 0.221 :T201 0.000 DAS :T401 0.096 :T402 0.096 HBM :T401 0.108 :T403 0.071 HRA :T402 0.001 HZI :T401 0.091 :T402 0.077 KOC :T401 0.036 :T402 0.040 KRA :T401 0.128 :T402 0.124 :T403 0.070 LIS :T202 0.087 :T203 0.001 MAL :T201 0.040 :T202 0.088	MIL :T201 0.048 NEZ :T401 0.047 :T402 0.047 NOS :T401 0.004 :T402 0.077 OPO :T201 0.001 :T202 0.000 OTR :T401 0.166 :T402 0.062 :T403 0.190 PRE :T401 0.100 :T202 0.126 PRN :T401 0.001 :T201 0.148 :T202 0.148 REP :T401 0.140 :T403 0.110 :T404 0.090 SLV :T401 0.048 :T402 0.010 SOK :T401 0.024 :T402 0.337 SOK :T202 0.093 :T203 0.000 TAB :T201 0.075 TYN :T401 0.432 :T201 0.000 :T202 0.012 VYS :T401 0.099 :T201 0.044	V051 0.297 V052 0.303 V400 0.447 V401 0.498 V402 2.076 V403 3.730 V410 0.309 V411 0.036 V412 0.614 V413 0.273 V414 0.002 V415 0.098 V417 1.340 V418 0.052 V420 0.037 V422 0.647 V423 0.065 V430 0.335	V431 0.029 V432 9.812 V433 0.183 V434 1.323 V435 0.827 V436 0.926 V438 0.000 V450 1.479 V451 0.565 V452 0.031 V453 0.683 V457 0.000 V459 0.440 V460 0.193 V462 0.064 V463 0.100 V464 0.102 V465 0.638	V466 0.398 V467 0.024 V468 0.000 V469 0.107 V470 0.000 V471 0.109 V472 0.191 V473 0.016 V474 0.013 V475 2.829 V476 2.810 V481 0.003 V482 0.003 V483 0.122 V484 0.091 V485 0.000 V486 0.899	hraniční (naše): V441 13.435 V442 7.887 V437 0.109 V444 4.969 V404 0.693 hraniční (ostatní): V424 0.268 V443 0.719 V445 2.726 V446 2.693 V497 0.001	VEDENÍ 400 kV CE4VED 45.215 MOR4VED 17.403 CR4VED 62.618	
TRANSFORMATORY CETRIF: 3.153 MORTIRF: 2.379 CRTRF:PZ 5.532			V001 0.008 V002 0.039 V011 0.000 V017 0.306 V018 0.286 V201 0.000 V202 0.161 V203 0.684 V204 0.040 V206 0.078 V206 0.134 V207 0.686 V208 0.047 V209 0.004 V210 0.006	V211 0.284 V216 0.160 V221 0.436 V222 0.436 V223 0.679 V224 0.679 V225 0.245 V226:1 0.126 V226:2 0.080 V226:3 0.115 V226 0.241 V251 0.086 V252 0.086 V253 1.400 V254 1.400	VEDENÍ 220 kV hraniční (naše): V243 0.911 V244 0.075 V276 0.302 V280 0.228	hraniční (ostatní): V246 2.715 V248 4.135 CE2VED 4.645 MOR2VED 5.819 CR2VED 10.464	CECELK 53.01 MORCELK 25.60 CRCELK 78.61 :PZ :EZ :EZ24 CRVNSVED 43.76 15.237 985.2 CRNHSVED 29.32 10.245 680.1 CROHSVED 13.13 4.165 201.3 CRTRF 1.973 110.1

Obr. 8.6 Ukázka vyhodnocení technických ztrát u vedení 220 kV a 400 kV na pracovišti dispečinku ČEPS v Ostravě

Způsob, jakým jsem chtěl určit, podíl ztrát korónou na celkových ztrátách je uveden v tabulkách 8.5 a 8.6. V těchto tabulkách jsou uvedeny výsledky výpočtu ztrát korónou za pěkného počasí, sněhu, deště a námrazy. K výpočtům byla použita ruská metoda, která umožňuje výpočet ztrát korónou pro všechny typy počasí.

Ukázka příkladu procentního určení ztrát korónou, uvedený v tabulkách 8.5 a 8.6:

$$N_{i220} = 0,4213 \text{ MW}, \quad N_{i\min} = 10 \text{ MW}$$

Pěkné počasí:

$$N_i = \frac{N_{i220}}{N_{\min}} \cdot 100 = \frac{0,4213}{10} \cdot 100 = \underline{\underline{4,213\%}}$$

Jak je uvedeno v tabulkách 8.5 a 8.6, tak na základě výpočtů ztrát korónou za deště a námrazy je možné tvrdit, tyto ztráty nebyly v praktickém provozu dosaženy. Výsledky ukazují vysoké procento ztrát korónou, což dle vyhodnocených celkových ztrát z řídicího systému není možno dosáhnout

Tabulka 8.5 Výsledky podílu ztrát korónou na celkových ztrátách u vedení 220 kV

Celkové technické ztráty u vedení 220 kV se v moravské části přenosové soustavy za období 2004 až 2005 pohybovaly od 10 do 25 MW					
Vypočtené ztrát korónou podle ruské metodiky v (MW) pro různé počasí		Procentní podíl ztrát korónou na celkových technických ztrátách pro min. hodnotu 10 MW (%)		Procentní podíl ztrát korónou na celkových technických ztrátách pro max. hodnotu 25 MW (%)	
Pěkně	0,4213	4,213 %		2,8 %	
Sníh	1,3516	13,516 %		5,4 %	
Děšť	5,1031	51,03 %	nereálné	20,41 %	
Námraza	15,2045	152,04 %	nereálné	60,81 %	nereálné

Tabulka 8.6 Výsledky podílu ztrát korónou na celkových ztrátách u vedení 400 kV

Celkové technické ztráty u vedení 400 kV se v moravské části přenosové soustavy za období 2004 až 2005 pohybovaly od 15 do 57 MW					
Součet vypočtených ztrát korónou podle ruské metodiky v (MW) pro různé druhy počasí		Procentní podíl ztrát korónou na celkových technických ztrátách pro min. hodnotu 15 MW (%)		Procentní podíl ztrát korónou na celkových technických ztrátách pro max. hodnotu 57 MW (%)	
Pěkně	1,6108	10,73 %		2,82 %	
Sníh	5,5197	36,79 %		9,68 %	
Děšť	19,823	132,15 %	nereálné	34,77 %	
Námraza	63,0116	420,00 %	nereálné	110,54	nereálné

8.2.2 Vyhodnocení výsledků ztrát korónou

V závěru bych chtěl zhodnotit dosažené výsledky, které jsou v příspěvku uvedeny. Z důvodu krátkého rozsahu příspěvku není možné všechny výsledky objasnit a vysvětlit. Ztráty korónou jsou jedny z částí technických ztrát. V úvodu příspěvku jsou uvedeny náznaky výpočtů ztrát korónou pomocí vybraných čtyř metodik. Pro další výpočty byla zvolena ruská metodika, protože umožňuje výpočty ztrát korónou při pěkném počasí, dešti, sněhu a námraze. Přesnost hodnot ztrát korónou u ruské metodiky je na základě dlouhodobých měření nejvyšší. Výsledky ztrát korónou u vedení VVN a ZVN v moravské části jsou uvedeny v tabulkách 8.3 a 8.4. Pro vyhodnocení celkových ztrát jsem postupoval tak, že jsem udělal u jednotlivých

ztrát korónou součet za různého počasí. Z výsledků hodnot celkových technických ztrát jsem za období let 2004 a 2005 stanovil minimální a maximální hodnotu technických ztrát, jak byla dosažena. U vedení 220 kV se technické ztráty pohybovaly v rozmezí 10 až 25 MW. U vedení 400 kV to bylo mezi 15 a 57 MW. Ze znalosti vypočtených hodnot ztrát korónou u vedení VVN a ZVN jsem provedl výpočet procentního podílu ztrát korónou na celkových ztrátách. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 8.5 a 8.6. Z výsledků se dá určit, že vysoké procento ztrát korónou za deště a námrazy nebylo v daném období dosaženo. Z výsledků pro pěkné počasí a sněh z tabulek 8.5 a 8.6 se dá usoudit, že dle rozmezí technických ztrát z řídicího systému v období 2004 až 2005 jsou procentní hodnoty ztrát korónou reálné.

9 POZNATKY A TEORIE ŘEŠENÍ ZTRÁT SVODEM U VEDENÍ VVN A ZVN

Tato kapitola volně navazuje na problematiku řešení svodových proudů a ztrát svodem, která je předmětem výše uvedených kapitol. Jsou zde uvedeny nové poznatky, které uvádím v rámci mé habilitační práce. Jedná se o výsledky podložené měřením a výpočty z praxe. Svodové proudy na vedení VVN a ZVN způsobují jednu část technických ztrát. Tyto ztráty jsou způsobeny hlavně nedokonalou izolací. Tato nedokonalá izolace je dána především nečistotami na izolátorových závěsech. Nečistoty se vytvářejí na izolátorech a způsobují tok svodových proudů a tím i zvýšení elektrických ztrát. Na vrstvu nečistot izolátoru mají velký vliv atmosférické vlivy a čistota ovzduší, která je zase ovlivněna průmyslovou činností v dané lokalitě. Měření svodových proudů se v praxi provádí v laboratořích VVN, ale tyto hodnoty nevyjadřují svodové proudy na celém vedení. V tomto příspěvku bych chtěl uvést některé výsledky, které byly naměřeny na zkoušených izolátorových závěsech. Měření bylo provedeno v laboratořích velmi vysokého napětí v Praze-Běchovicích. Jedná se o tyčové izolátory DN 2 x 3 LS 75/21, skleněné izolátory DN 2 x 24 U120 a kompozitní izolátor JN 1 x FURUKAWA.

9.1 POSTUP MĚŘENÍ SVODOVÝCH PROUDŮ [36], [41]

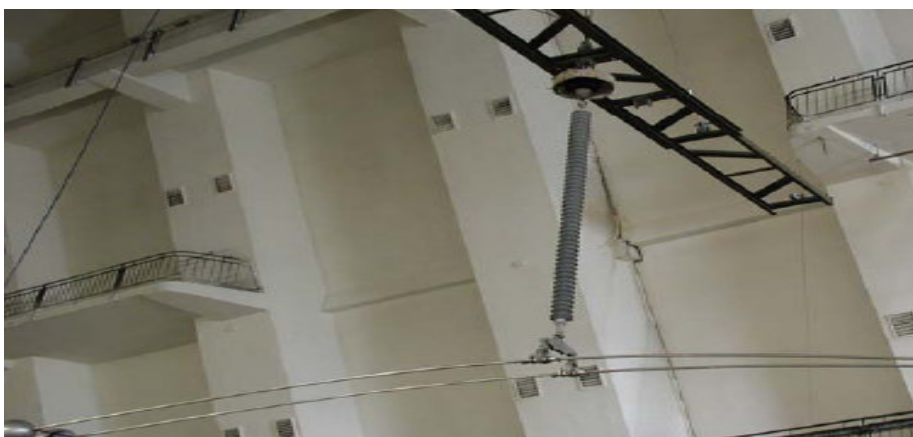
V této kapitole je popsán způsob měření svodových proudů na tří typech izolátorových závěsů. Ukázky vybraných typů izolátorových závěsů je uvedeno na obrázcích 9.1 až 9.3. Měření bylo provedeno v laboratoři vysokého napětí v Praze – Běchovicích. Zkušební napětí bylo použito 242 kV.



Obr. 9.1 Měření svodových proudů v laboratoři na izolátorovém závěsu LS75/21 [41]



Obr. 9.2 Měření svodových proudů v laboratoři na izolátorovém závěsu 24 U120 [41]



Obr. 9.3 Měření svodových proudů na kompozitním izolátoru FURUKAWA [41]

Měření svodového proudu se provádělo v pěti režimech:

- za sucha
- slabý déšť s vodivostí $97 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, intenzita srážek menší než $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
- silný déšť s vodivostí $97 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, intenzita srážek větší než $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
- slabý déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, intenzita srážek menší než $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
- silný déšť s vodivostí $498 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, intenzita srážek větší než $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

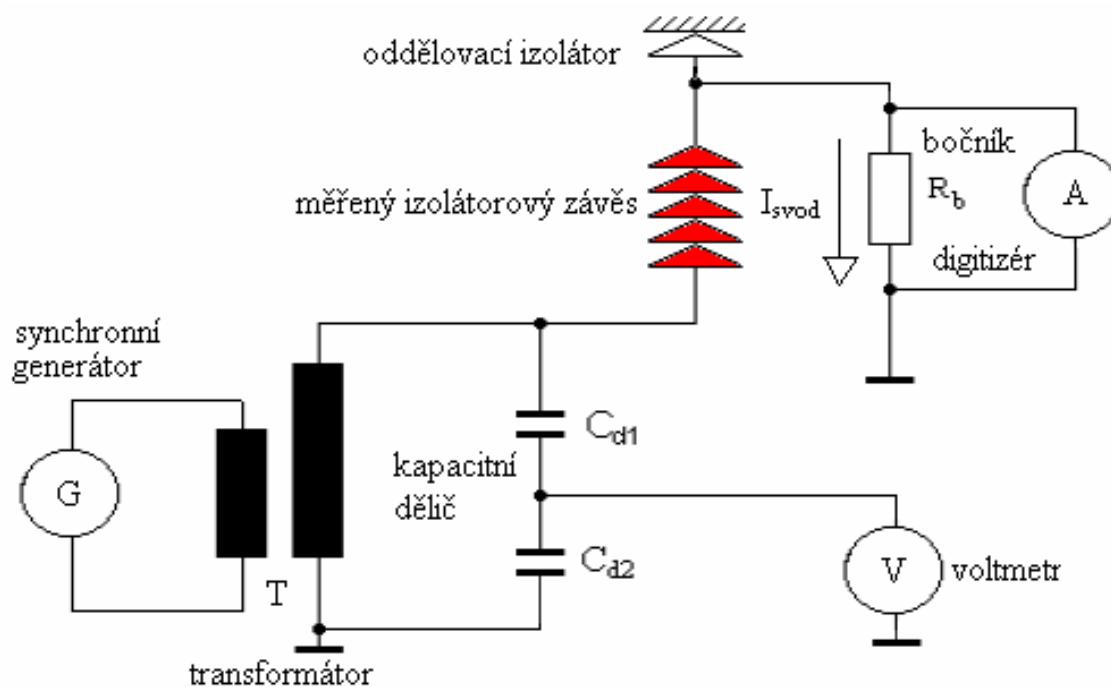
Měření svodových proudů na izolátorových závěsech vede ke zjištění, jakou má v praxi izolační schopnost použitý izolátorový závěs. V přírodních podmínkách na tyto izolátory působí nejrůznější vlivy počasí a nečistot. To pak vede k tomu, že po povrchu stříšek izolátoru tečou svodové proudy a dochází ke ztrátám svodem. Abychom si tyto vlivy mohli uměle nasimulovat, používáme k tomuto účelu laboratoře velmi vysokého napětí, kde tyto podmínky můžeme částečně vytvořit a svodové proudy následně změřit pomocí potřebné techniky a přístrojů. Schéma takového zapojení je uvedeno na obrázku 9.4. Hodnoty použitých bočníků R_b pro měření svodových proudů na jednotlivých izolátorových závěsech jsou uvedeny v tabulce 9.1.

Tabulka 9.1 Hodnoty použitých bočníků pro měření svodových proudů u jednotlivých izolátorových závěsů 400 kV

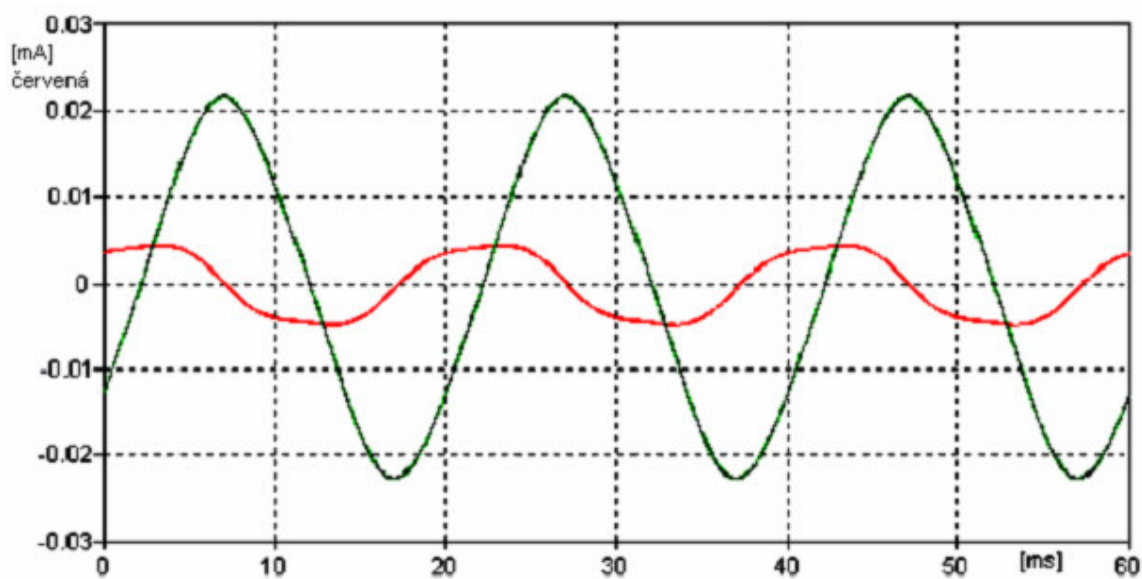
zkouška	za sucha	déšť $0,0097 [\text{S}\cdot\text{m}^{-1}]$	déšť $0,0498 [\text{S}\cdot\text{m}^{-1}]$
typ závěsu 400 kV	velikost bočníku R_b v $[\text{k}\Omega]$		
DN 2 x 3 LS 75/21	10,15	10,15	1,031
DN 2 x 24 U120	99,5	99,5	99,5
JN 1 x FURUKAWA	99,5	99,5	99,5

9.1.1 Naměřené výsledky svodových proudů

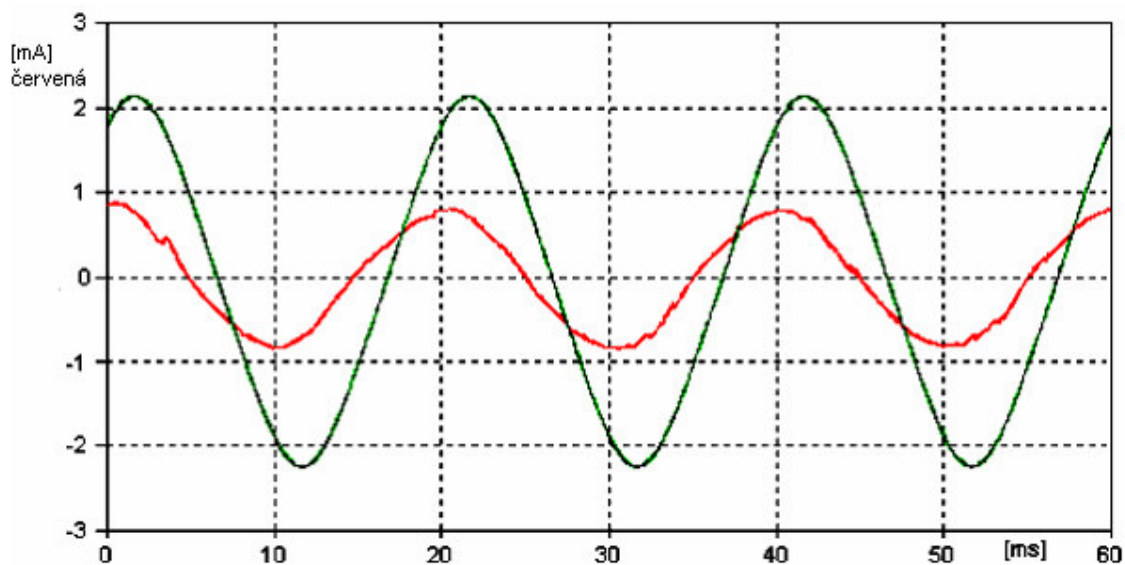
Na základě jednotlivých měření byly jednotlivé hodnoty svodových proudů zaznamenány na oscilogramech. Stupnice odpovídala hodnotě svodového proudu v miliampérech. Tyto oscilogramy jsou uvedeny na obrázcích 9.5-9.12. Výsledky svodových proudů pro jednotlivé izolátory za různých stavů vodivosti jsou následně uvedeny v tabulkách 9.2 až 9.4.



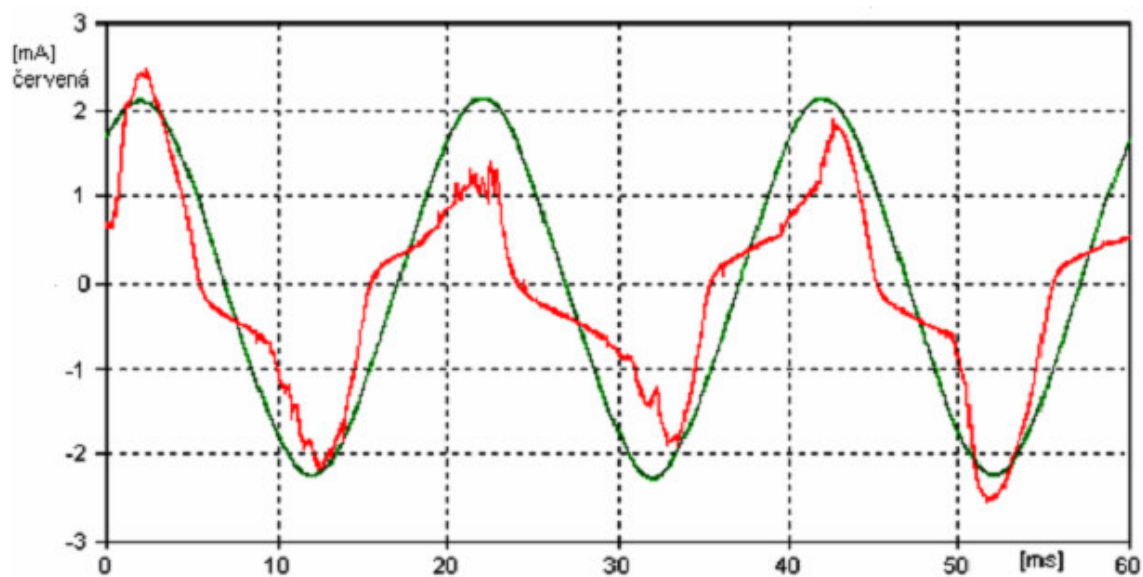
Obr. 9.4 Zapojení pro měření svodových proudů na vybraných izolátorových závěsech



Obr. 9.5 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV 2II3LS75/21,
zkouška za sucha



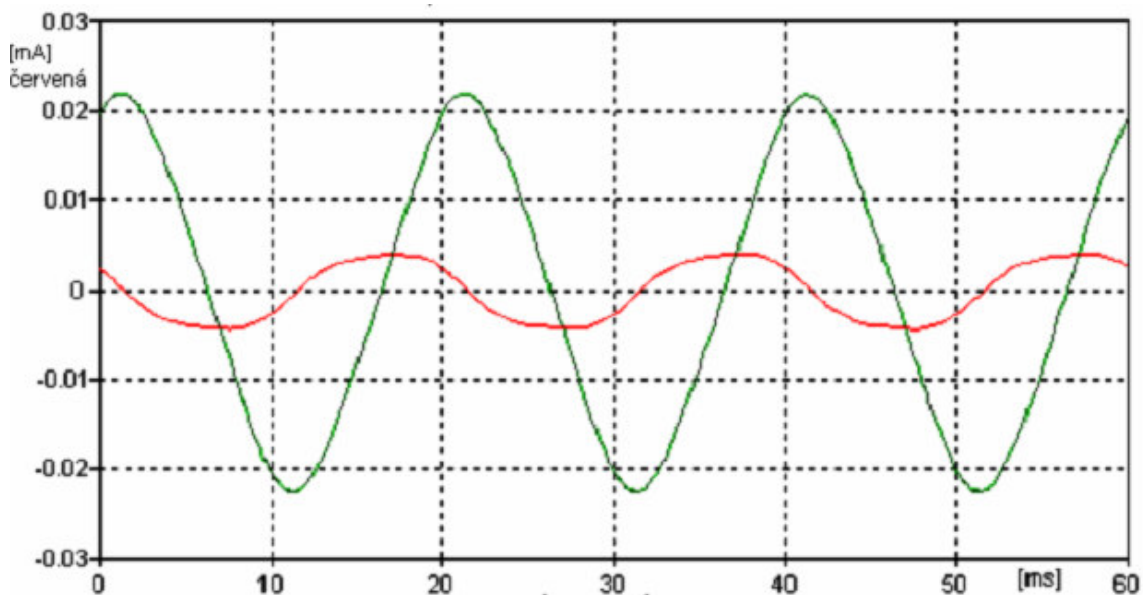
Obr. 9.6 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV 2II3LS75/21,
zkouška za silného deště $0,0097 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$



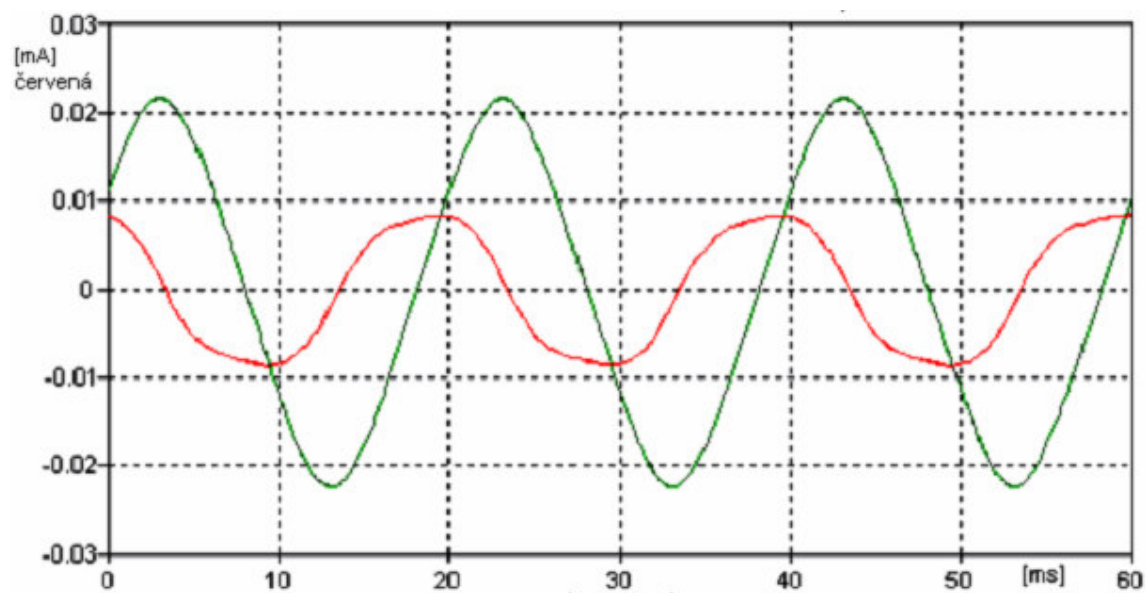
Obr. 9.7 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV 2II3LS75/21,
zkouška za silného deště $0,0498 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$

Dle obrázků 9.5 až 9.7 jsou na oscilogramech uvedeny průběhy svodových proudů na měřeném izolátoru 2 x 3 LS75/21. Ukazují nám, že měřené svodové proudy se hodně mění

v závislosti na vytváření spojitých cest při stékání vody po stříškách. Stékající voda tvoří vodivou cestu pro svodový proud.

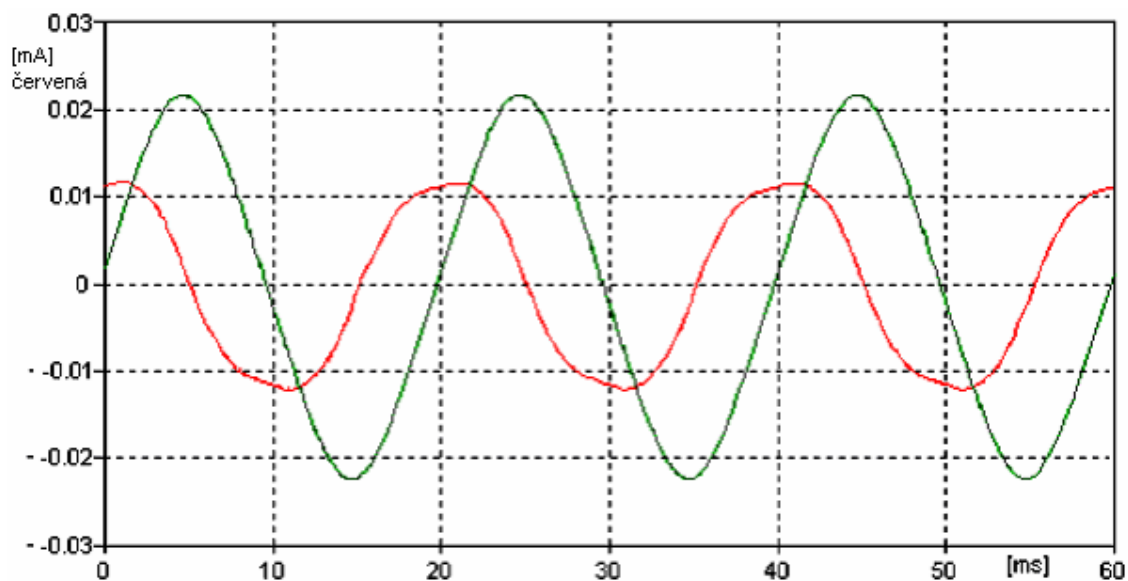


Obr. 9.8 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV 2III24U120,
zkouška za sucha



Obr. 9.9 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV 2III24U120,

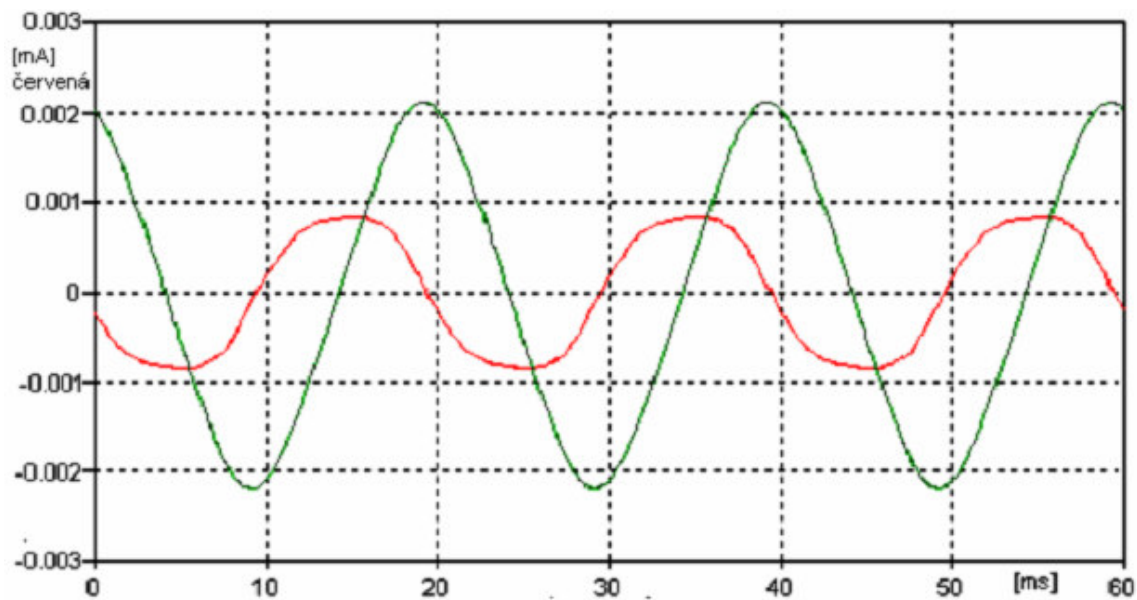
zkouška za silného deště $0,0097 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$



Obr. 9.10 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV 2III24U120,

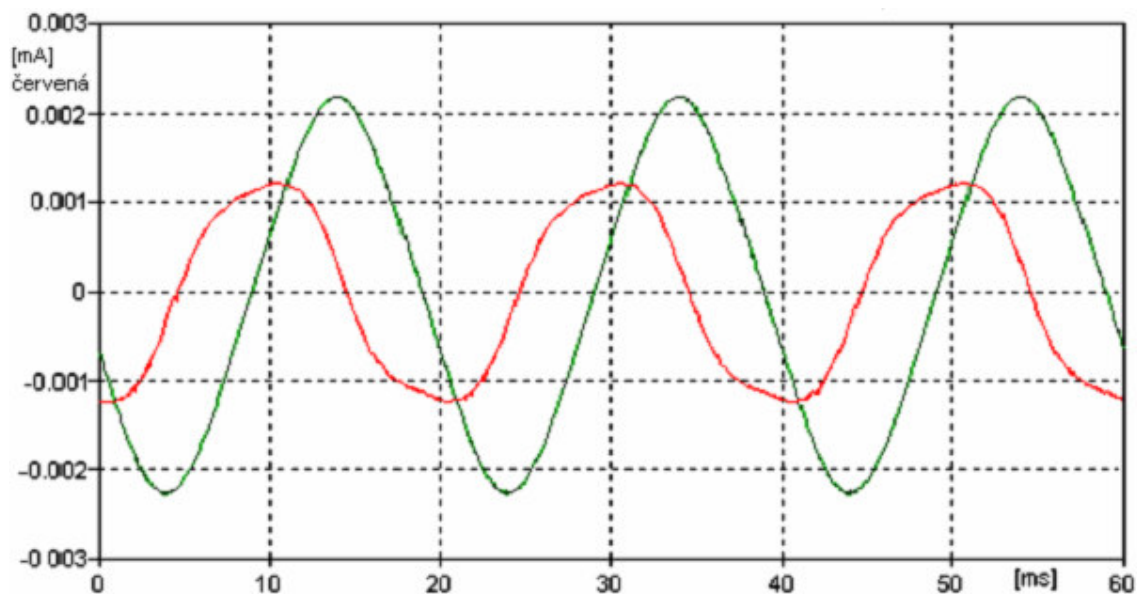
zkouška za silného deště $0,0498 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$

Na obrázku 9.8 při zkoušce za sucha vidíme, jakou hodnotu má kapacitní proud při průchodu napětí nulou (červená sinusovka je proud, zelená je napětí).



Obr. 9.11 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV 1IIIFURUKAWA,

zkouška za sucha



Obr. 9.12 Oscilogram svodového proudu u izolátorového závěsu 400 kV III FURUKAWA,

zkouška za silného deště $0,0498 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$

Při zkoušce za deště se jedná o proud činný (při průchodu napětí vrcholovou hodnotou).
Sdružené napětí: $U = 242 \text{ kV}$, při kterém se měření svodových proudů provádělo.

$$P_{zaves} = \frac{U}{\sqrt{2}} \cdot I_{svod \max} \quad (\text{kW}, \text{kV}, \text{mA}) \quad [9.1]$$

V případě, že uvažuje 12 izolátorových závěsů na 1 km, můžeme napsat vzorec pro výpočet ztrát svodem na kilometr.

$$P_{1km} = \frac{P_{zaves}}{1000} \cdot 12 \quad (\text{kW}\cdot\text{km}^{-1}; \text{kW}, \text{km}) \quad [9.2]$$

Tab. 9.2 Výsledky svodových proudů u tyčového izolátorového závěsu 400 kV DN 2 x 3 LS 75/21

Svodový proud maximální I_{svodmax} (mA)					
Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Slabý déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		97	97	498	498
Svodový proud (mA)	0,004	0,278	0,812	1,914	2,568

Tabulka 9.3 Výsledky svodových proudů u skleněného izolátorového závěsu 400 kV DN 2 x 24 U120

Svodový proud maximální I_{svodmax} (μA)				
Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		97	97	498
Svodový proud (μA)	3,4	10,1	8,8	11,4

Tabulka 9.4 Výsl. svodových proudů u kompozitního izolátorového závěsu 400 kV JN 1 x FURUKAWA

Svodový proud maximální I_{svodmax} (μA)		
Stav izolátoru	Za sucha	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		498
Svodový proud (μA)	0,84	2,04

Oscilogramy proudu a napětí, viz. obrázek 9.5 až 9.12, jsou jen ukázkou pro vyhodnocení svodových proudů. Stupnice na oscilogramech odpovídala přímo hodnotě svodových proudů v miliampérech. Stav povrchu izolátoru, kterému byl vystaven, odpovídají mokré zóny na stříškách, představující vodivost v ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Poznámka:

Červená křivka na oscilogramu svodový proud
Zelená křivka na oscilogramu napětí

9.1.2 Výsledky ztrát svodem na izolátorových závěsech

Ztráty svodem tvoří jednu část technických ztrát na vedeních VVN a ZVN. Tyto ztráty jsou ovlivněny skladbou a typem izolátorových závěsů. Důležitou složku tvoří nečistoty na povrchu izolátoru. V praxi na zapnutých vedeních je dosti obtížné provést měření za různého počasí. Jednak je problém vystihnout atmosférické vlivy a znečištění izolátoru. Proto se dělají modelové situace v laboratořích velmi vysokého napětí, v České republice v Praze - Běchovicích a na Slovensku v Bratislavě – Trnávce, případně v dalších zemích. Dosažené výsledky jsou pak dosti přesné a dají se použít při návrhu metodik výpočtu ztrát svodem. Pomocí metodik výpočtu svodových ztrát u jednotlivých vedeních VVN a ZVN a také u všech vedení přenosové soustavy tyto ztráty vyčíslit. Výsledky uvedené v habilitační práci jsou rozšířením uvedené problematiky výpočtů a měření svodových proudů. V tabulkách 9.5 až 9.7 jsou uvedeny hodnoty ztrát svodem u jednotlivých typů izolátorových závěsů za různých modelových situací. Ukázka výpočtu jedné hodnoty ztrát svodem je uvedena v rámci této podkapitoly.

Tabulka 9.5 Výsledky ztrát svodem u tyčového izolátorového závěsu 400 kV DN 2 x 3
LS 75/21

Izolátorový závěs typu 2 x 3 LS 75/21			
Stav izolátoru	Vodivost deště	Ztráty na 1 závěsu	Ztráty na 1 km vedení N_{iz}
	$\mu S \cdot cm^{-1}$	W	$kW \cdot km^{-1}$
Za sucha		0,69^{*)}	0,008^{*)}
Slabý déšť	97	58,9	0,57
Silný déšť	97	139	1,67
Slabý déšť	498	328	3,93
Silný déšť	498	440	5,27

Tabulka 9.6 Výsledky ztrát svodemu skleněného izolátorového závěsu 400 kV DN 2 x
24 U120

Izolátorový závěs typu 2 x 24 U 120			
Stav izolátoru	Vodivost deště	Ztráty na 1 závěsu	Ztráty na 1 km vedení N_{iz}
	$\mu S \cdot cm^{-1}$	W	$kW \cdot km^{-1}$
Za sucha		0,59^{*)}	0,007^{*)}
Slabý déšť	97	1,77	0,021
Silný déšť	97	1,50	0,018
Silný déšť	498	1,82	0,022

Tabulka 9.7 Výsledky ztrát svodem u kompozitního izolátorového závěsu 400 kV JN 1 x
FURUKAWA

Izolátorový závěs typu JN 1 x FURUKAWA			
Stav izolátoru	Vodivost deště $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Ztráty na 1 závěsu W	Ztráty na 1 km vedení N_{iz} $\text{kW}\cdot\text{km}^{-1}$
Za sucha		0,14^{*)}	0,0017^{*)}
Silný déšť	498	0,35	0,0042

^{*)} kapacitní proud a jalové ztráty

Ukázka výpočtu ztrát svodem dle vzorce [9.1] na jednom izolátorovém závěsu LS 75/21, kde pro porovnání je tato hodnota uvedena v tabulce 9.5 a svodový proud v tabulce 9.2.

$$P_{zaves} = \frac{U}{\sqrt{2}} \cdot I_{svod\ max} = \frac{242}{\sqrt{2}} \cdot 0,278 = \underline{\underline{58,9W}}$$

9.1.3 Zhodnocení výsledků

Na základě porovnání výsledků, jak byly naměřeny hodnoty svodových proudů při různých modelech znečištění izolátorových závěsů, jsou nejvyšší ztráty za deště u tyčových izolátorů typu LS75/21. Tyto závěsy se však v současnosti hodně používají a proto se musí se ztrátami svodem u nich počítat. Naopak u skleněných a kompozitních izolátorových závěsů jsou ztráty svodem malé. Z vypočtených hodnot ztrát svodem, můžeme tvrdit, že u tyčových izolátorů jsou ztráty vyšší a při výpočtu celkových technických ztrát s nimi musíme počítat. Závěrem je možné říci, že do budoucna může výměna izolátorů u vedení VVN a ZVN za skleněné nebo kompozitní, snížit ztráty svodem. Tím by došlo ke snížení nákladů za přenos elektrické energie.

9.2 VLIV SLOŽENÍ IZOLÁTOROVÉHO ZÁVĚSU NA VELIKOST SVODOVÝCH ZTRÁT [38]

Složení izolátorového závěsu u vedení VVN a ZVN velkou měrou ovlivňuje tok svodového proudu. Izolátor představuje válec, který svým povrchem a složením tvoří sériový nebo sérioparalelní obvod. Tento článek má za úkol omezovat tok svodového proudu, a tím i ztrát svodem. Svod je jedním z mnoha činitelů, které způsobují přídatné ztráty na vedeních VVN a ZVN. Svodový proud, který teče po povrchu izolátorového závěsu příslušného vedení,

je ovlivněn jeho složením. Příspěvek se zabývá výpočty a měřením svodových proudů na izolátorových závěsech u vedení 220 kV a 400 kV s ohledem na jejich složení.

Vstupní údaje k obecnému řešení svodových proudů

Pro obecné řešení svodových proudů je třeba se zamyslet, které okolnosti a vlivy způsobují tok svodových proudů. V první řadě jsou to izolátory na vedení a jejich konfigurace v rámci složení izolátorového závěsu. Jedná se, kolik izolátorů jedné fáze je spojeno ve větví v sérii a kolik je těchto větví spojeno paralelně. Například označení izolátoru 2||4L100BH550 znamená, že izolátorový závěs má 2 větve spojené paralelně a v každé větví jsou 4 izolátory v sérii a typ jednoho izolátoru je *L100BH550*. Dále je třeba určit skupiny stožárů se stejnými izolátorovými závěsy. Na základě znalostí použitých izolátorů se musí vypočítat tzv. tvarový faktor, který prezentuje povrchovou dráhu příslušného izolátoru (dráha toku svodového proudu). Postup výpočtu je uveden v [29]. Další důležitou veličinou pro výpočet, je měrná povrchová vodivost, která udává znečištění izolátoru. Zahrnuje znečištění v dané oblasti. Tato veličina se dá vyhledat pro danou oblast znečištění v normě ČSN 330405, nebo na základě měření svodových proudů přes daný izolátor se dá vypočítat. Přepočet měrné povrchové vodivosti je uveden v [29]. Změřené hodnoty svodových proudů z EGÚ - Laboratoře vysokého napětí v Praze - Běchovicích za různých podmínek (zkouška za sucha, za silného a slabého deště), jsou uvedeny v tabulkách 9.2 až 9.4. Výpočet měrné povrchové vodivosti na základě měřených svodových proudů je přesnější, než hodnoty z normy. Měřené svodové proudy vykazují přesnější hodnoty, neboť měření těchto proudů po povrchu izolátoru probíhá simulovaně a izolátor je skutečně vystaven různým atmosférickým podmínkám. V neposlední řadě je třeba znát sdruženou či fázovou hodnotu napětí. Pro určení svodových proudů a ztrát svodem, je třeba pro výpočty navrhnout obecné vzorce, které by platily po nadefinování vstupních údajů.

Tabulka 9.8 Ukázka používaných typů izolátorů a složení izolátorových závěsů

Typ izolátoru	Typ izolátorového závěsu
LS75/21	2 2LS75/21
LS85/21	2 2LS85/21
L100BH550	2 4L100BH550
L100BH550	1 4L100BH550
LS75/21	1 2LS75/21
2 x 3 LS 75/21	2 3LS75/21
2 x 24 U120	2 1/24 U120
1 x FURUKAWA	1 1/FURUKAWA

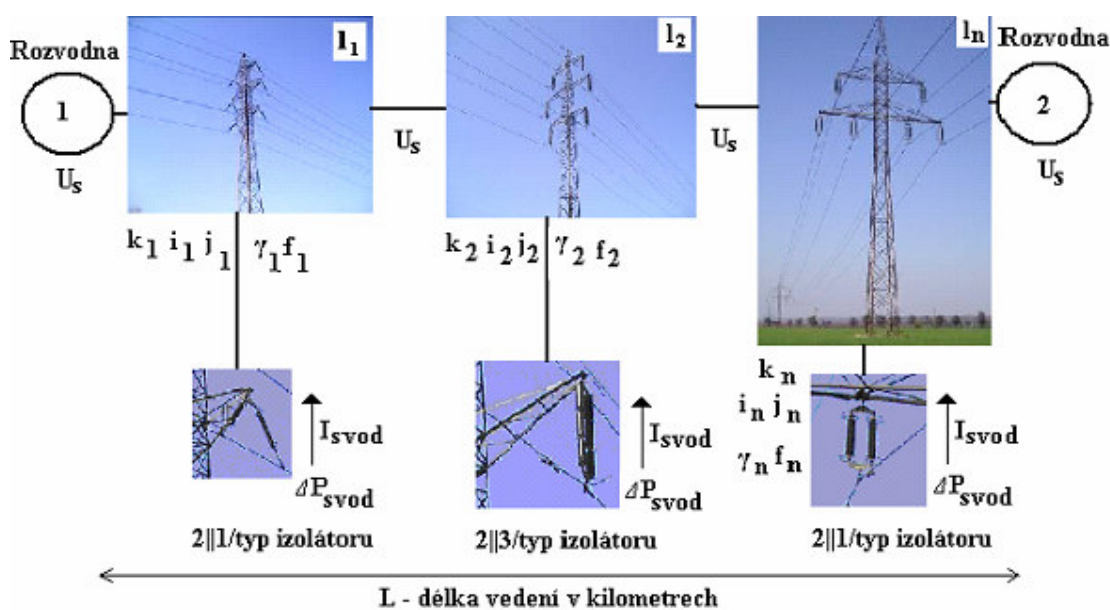
Příklady vysvětlení složeného izolátorového závěsu:

2||1/24 U120

Izolátorový závěs má dvě větve s typem izolátoru 24 U120. V každé větvi je jeden izolátor, větve jsou spojeny paralelně (celkem 2 izolátory v jedné fázi).

1||1/FURUKAWA

Izolátorový závěs má jednu větev s typem izolátoru FURUKAWA. Ve větvi je jeden izolátor (celkem 1 izolátor v jedné fázi).



Obr. 9.13 Obecný model vedení VVN a ZVN s různými typy stožárů a izolátorových závěsů

Legenda údajů pro výpočet svodových proudů a ztrát svodem na obecném vedení:

- l_n počet skupin stožárů se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení [-]
- k_n počet stožárů n -té skupiny se stejným izolátorovým závěsem na obecném vedení [-]
- i_n počet paralelních větví v izolátorovém závěsu jedné fáze obecného vedení v n -té skupině stožárů [-]
- j_n počet izolátorů v jedné fázi v sérii jednoho izolátorového závěsu v n -té skupině stožárů obecného vedení [-]

f_{TVn} tvarový faktor jednoho izolátoru v n-té skupině stožárů obecného vedení [$m \cdot mm^{-2}$]

γ_n měrná povrchová vodivost typu izolátoru z n-té skupiny stožárů obecného vedení [$S \cdot m \cdot mm^{-2}$]

U_s sdružené napětí obecného vedení [V]

I_{svod} celkový svodový proud obecného vedení [A]

ΔP_{svod} celkové ztráty svodem na obecném vedení [W]

L celková délka obecného vedení [km]

Na základě definovaných údajů a veličin lze odvodit, dle teoretického rozboru v literatuře [29], tyto obecné vzorce [9.3], [9.4], [9.5] a [9.6] pro výpočty svodových proudů a ztrát svodem na obecném vedení VVN a ZVN. Vysvětlení je patrné z obrázku 9.13 definovaných veličin.

Obecný vzorec pro výpočet svodového proudu na obecném vedení:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_n} \right) \quad [9.3]$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \left(k_1 \cdot i_1 \cdot \frac{\gamma_1}{j_1 \cdot f_1} + k_2 \cdot i_2 \cdot \frac{\gamma_2}{j_2 \cdot f_2} + \dots + k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_n} \right) = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot c$$

[A, V, -, -, $S \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$, -, $m \cdot mm^{-2}$, V, S]

kde

$$c = \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_n} \right) [S, -, -, S \cdot mm^2 \cdot m^{-1}, -, m \cdot mm^{-2}] \quad [9.4]$$

„c“ koeficient respektující vrstvu znečištění na izolátorech, typ, složení a počet izolátorových závěsů na vedení VVN a ZVN [jednotka v Siemensch - S]

Obecný vzorec pro výpočet ztrát svodem na obecném vedení:

$$\Delta P_{svod} = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \left(\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_n} \right) = U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_n} \right) = U_s^2 \cdot c \quad [9.5]$$

[W, V, -, -, $S \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$, -, $m \cdot mm^{-2}$, V, S]

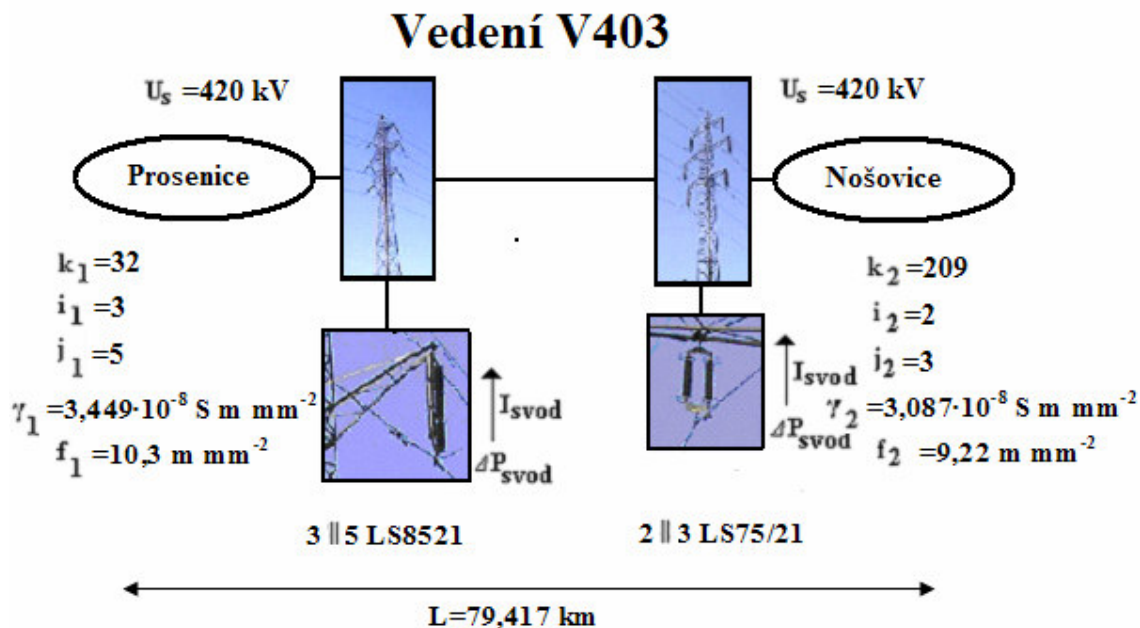
Obecný vzorec pro výpočet ztrát svodem na 1 km obecném vedení:

$$\Delta P_{\text{svod} / \text{km}} = \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_n} \right) \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} \quad [9.6]$$

[W·km⁻¹, V, -, -, S·mm²·m⁻¹, -, m·mm⁻², km, V, S, km]

9.3 VÝPOČET SVODU NA VYBRANÉM VEDENÍ V403 [39], [40]

V této kapitole je uveden na příkladě postup výpočtu, jak se projeví velikost svodového proudu a ztrát svodem u vybraného vedení 400 kV mezi rozvodnami Nošovice a Prosenice V403 při zahrnutí vlivu počasí za sucha, slabého a silného deště. K tomuto účelu je potřebné znát u vedení VVN a ZVN počet a typy stožárů, složení izolátorových závěsů a délku vedení. Model takového vedení je uveden na níže uvedeném obr. 9.14. Z důvodu větší přesnosti výpočtu svodu je důležité znát měrnou povrchovou vodivost, která zohledňuje atmosférické vlivy počasí. Proto byly použity hodnoty naměřených svodových proudů v laboratoři VVN v Praze-Běchovicích. Hodnoty naměřených svodových proudů pro výpočty jsou uvedeny v tab. 9.9 a 9.10.



Obr. 9.14 Model vedení V403 s parametry pro výpočet svodu

Údaje o vedení 400 kV Nošovice, Prosenice, V403:

Délka vedení: 79,417 km

Počet stožárů: 241

Typ stožárů: PORTÁL

Fázové vodiče: 3 x 3 350 AlFe 4

Zemní lano: 1 x 70 FeZn

32 stožárů typu PORTÁL s izolátorovým závěsem LS85/21 s jeho složením 3II5

209 stožárů typu PORTÁL s izolátorovým závěsem LS75/21 s jeho složením 2II3LS75/21

Provozní sdružené napětí: $U_s = 420 \text{ kV}$, $U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242,48 \text{ kV}$

Ukázka výpočtu měrné povrchové vodivosti γ ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$) pro silný déšť:

$$\gamma_{LS85/21} = f_{TVLS85/21} \cdot \frac{I_{svod}}{U_f} = 10,3 \cdot \frac{0,812 \cdot 10^{-3}}{242,48} = \underline{\underline{3,449 \cdot 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}}}$$

Tabulka 9.9 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor LS85/21

Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Slabý déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)		97	97	498	498
Svodový proud (mA)	0,004	0,278	0,812	1,914	2,568
Tvarový faktor f_{TV} ($\text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$)/ LS85/21	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$1,69 \cdot 10^{-10}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$	$3,449 \cdot 10^{-8}$	$8,13 \cdot 10^{-8}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$

Tabulka 9.10 Hodnoty vypočtených γ pro izolátor LS75/21

Stav izolátoru	Za sucha	Slabý déšť	Silný déšť	Slabý déšť	Silný déšť
Vodivost ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)		97	97	498	498
Svodový proud (mA)	0,004	0,278	0,812	1,914	2,568
Tvarový faktor f_{TV} ($\text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$)/ LS75/21	9,22	9,22	9,22	9,22	9,22
Měrná povrchová vodivost γ ($\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$1,52 \cdot 10^{-10}$	$1,057 \cdot 10^{-8}$	$3,087 \cdot 10^{-8}$	$7,27 \cdot 10^{-8}$	$9,76 \cdot 10^{-8}$

Výpočty svodových proudů a ztrát svodem u vedení V403:

Za sucha:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_n} \right) = \sqrt{3} \cdot 420000 \cdot \left(32 \cdot 3 \cdot \frac{1,69 \cdot 10^{-10}}{5 \cdot 10,3} + 209 \cdot 2 \cdot \frac{1,52 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 9,22} \right) =$$

$$= 1,9 \cdot 10^{-3} A = \underline{\underline{1,9mA}}$$

$$\Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,612 \cdot 10^{-9}}{79,417} = \underline{\underline{5,8W \cdot km^{-1}}}$$

Pro slabý déšť s vodivostí 97 μS·cm⁻¹:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420000 \cdot \left(32 \cdot 3 \cdot \frac{1,18 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10,3} + 209 \cdot 2 \cdot \frac{1,057 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 9,22} \right) =$$

$$= 1,32 \cdot 10^{-1} A = \underline{\underline{132mA}}$$

$$\Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,817 \cdot 10^{-7}}{79,417} = \underline{\underline{403,58W \cdot km^{-1}}}$$

Pro silný déšť s vodivostí 97 μS·cm⁻¹:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420000 \cdot \left(32 \cdot 3 \cdot \frac{3,449 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10,3} + 209 \cdot 2 \cdot \frac{3,087 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 9,22} \right) =$$

$$= 0,3861A = \underline{\underline{386,1mA}}$$

$$\Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 5,3 \cdot 10^{-7}}{79,417} = \underline{\underline{1,179kW \cdot km^{-1}}}$$

Pro slabý déšť s vodivostí 498 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420000 \cdot \left(32 \cdot 3 \cdot \frac{8,13 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10,3} + 209 \cdot 2 \cdot \frac{7,27 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 9,22} \right) =$$

$$= 9,08 \cdot 10^{-1} \text{ A} = \underline{\underline{908 \text{ mA}}}$$

$$\Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}}{79,417} = \underline{\underline{2,776 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Pro silný déšť s vodivostí 498 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$:

$$I_{svod} = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot \sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) = \sqrt{3} \cdot 420000 \cdot \left(32 \cdot 3 \cdot \frac{1,09 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10,3} + 209 \cdot 2 \cdot \frac{9,76 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 9,22} \right) =$$

$$= \underline{\underline{1,219 \text{ A}}}$$

$$\Delta P_{svod / km} = \frac{U_s^2 \cdot \left(\sum_{n=1}^l \left(k_n \cdot i_n \cdot \frac{\gamma_n}{j_n \cdot f_{TVn}} \right) \right)}{L} = \frac{U_s^2 \cdot c}{L} = \frac{(420 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,678 \cdot 10^{-6}}{79,417} = \underline{\underline{3,727 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

9.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SVODU U VEDENÍ V403

Na základě vypočtených hodnot svodových proudů a ztrát svodem na vybraném vedení 400 kV, číslo V403 mezi rozvodnami Nošovice a Prosenice za různých stavů atmosférických vlivů, bych chtěl stanovit tyto závěry:

Pro vybraný výpočet jsem použil skutečný model vedení s konkrétním počtem a typem stožárů s použitými izolátorovými závěsy. Výpočty byly provedeny pro stav izolátorů za sucha, slabého a silného deště s různou vodivostí. Měrná povrchová vodivost za různých stavů byla vypočtena z naměřených výsledků svodových proudů v laboratoři VVN v Praze-Běchovicích. Výsledky měrných povrchových vodivostí jsou uvedeny v tabulkách.

Při zkoumání výsledků svodových proudů a ztrát svodem za různých stavů atmosférických vlivů jasně vyplynulo, že ztráty svodem se vzrůstající vlhkostí izolátorů výrazně rostou. Dále při vzrůstající vodivosti vody, představující v praxi částičky nečistot, je vidět, že usazené nečistoty na izolátorových závěsech hodně zvýšení svodové ztrát na vedeních přenosové soustavy.

Následující kapitola se zabývá modelovými výpočty svodových ztrát na vybraných vedeních a představuje modely vedení, kde je výpočet proveden se zahrnutím parametru svodové vodivosti a bez ní.

10 VLIV SVODU NA VÝPOČTY CHODU SÍTĚ U VEDENÍ VVN A ZVN

[35]

Kapitola se zabývá výpočtem chodu sítě na dvou vybraných vedeních přenosové soustavy. Jedná se o několik modelovaných přenosů reálných toků za účelem zjištění velikosti ztrát způsobených modelováním svodové vodivosti G . K tomuto účelu byly zvoleny vedení 220 kV V207 (Sokolnice-Tábor) a 400 kV V413 (Prosenice-Řeporyje). Výpočty ztrát byly provedeny na modelech vedení se svodovou vodivostí a bez ní. Na základě rozdílu vypočtených ztrát je provedeno vyhodnocení, jaký vliv má svod na velikost ztrát u vedení VVN a ZVN.

10.1 VYSVĚTLENÍ METODIKY VÝPOČTU

Výpočet byl proveden v programu LINE PROPERTIES, který je součástí balíku programů PSS^{TME} od firmy Siemens PTI. Nejdříve bylo nutné vypočítat parametry vedení. Jedná se o činný odpor (R), reaktanci (X), susceptanci (B) a svod vedení (G). Náhradní schéma jedné fáze vedení, kde tyto parametry jsou uvedeny je na obr. 10.5. Pro výpočet činného odporu bylo nutné zadat použité lano u konkrétního vedení. Výpočet parametrů reaktance a susceptance byl vypočten na základě rozmístění vodičů na stožárech, které jsou na daném vedení použity. Jedná se o stožáry 220 kV a 400 kV typu PORTÁL a dvojitý stožár 400 kV typu DONAU. Model rozmístění vodičů je u vedení V207 uveden na obr. 10.4 a stožárová konstrukce je na obr. 10.3. Výpočet zohledňuje druh a délku vodiče, rozložení vodičů (trojsvazek), výšku a rozpětí stožárů. Posledním parametrem vedení VVN a ZVN je

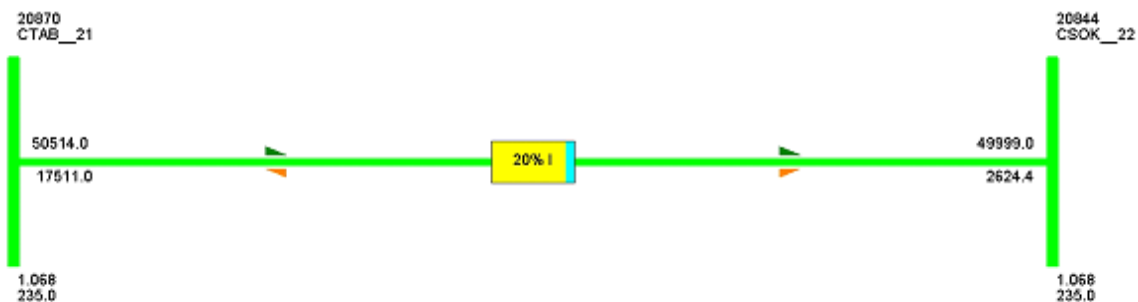
svodová vodivost. Pro její výpočet bylo nutné zadat průhyb vodičů u vedení 220 kV a 400 kV. Průhyb byl u vedení 220 kV zadán 3,5 m a u vedení 400 kV zadán 6 m. Protože svodový proud přechází po povrchu izolátorů od vodičů proti zemi, má program ve výpočtech zahrnutou konstantu, která při výpočtu parametru svodové vodivosti zohledňuje počet stožárů a izolátorů na řešeném vedení. Nakonec byl proveden výpočet střídavého chodu celé sítě s vyhodnocením svodových ztrát u vybraných vedení 220 kV V207 mezi rozvodnami Tábor a Sokolnice a u vedení 400 kV V413 mezi rozvodnami Řeporyje a Prosenice. Výpočet využívá Newton-Raphsonovu metodu. Modelové stavy pro výpočty ztrát svodem jsou uvedeny v následujících kapitolách.

10.1.1 Modelové stavy pro výpočet ztrát svodem u vedení 220 kV V207 (Tábor – Sokolnice)

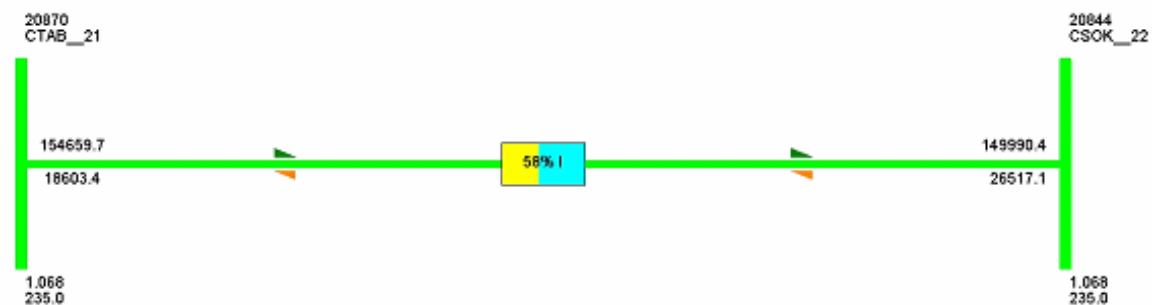
Na základě vypočtených hodnot parametrů vedení R , X , B , G u vedení V207 byl proveden výpočet chodu sítě s vyhodnocením ztrát svodem se zahrnutím svodové vodivosti a bez ní. Byly modelovány případy reálných toků u daného vedení v přenosové soustavě. Jedná se o několik případů zatížení vedení V207 při změně napětí. Tyto stavy jsou uvedeny v tabulce 1. Modely vedení jsou vygenerovány z výpočetního programu LINE PROPERTIES a znázorněny na obrázcích (10.1 až 10.3). Výsledky ztrát svodem jsou svou velikostí celkové ztráty svodem na celém vedení. V případě jejich určení na kilometr vedení, bychom museli podělit tyto ztráty celkovou délkou vedení. Délka vedení je známý parametr. Jak z uvedených výsledků vyplývá, tak ztráty svodem jsou velmi malé a z hlediska přesnosti a vyčíslení jejich velikosti je dobré jejich hodnotu znát.

Výstupy a předpoklady pro výpočty

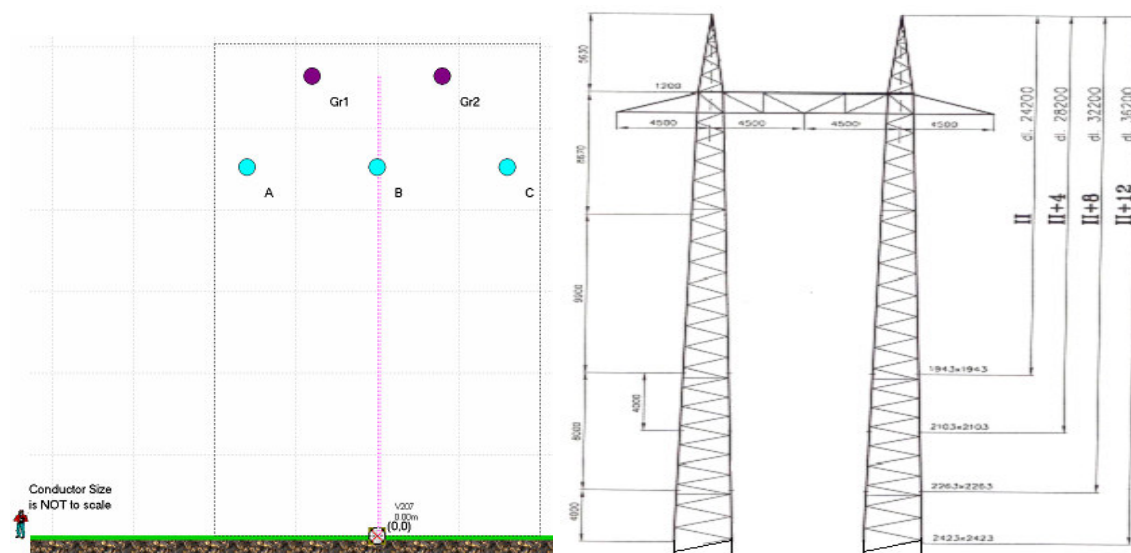
Na uvedených obrázcích (10.1 až 10.3) jsou zobrazeny případy modelovaných reálných toků u vedení V207. Obrázky představují modely, které jsou výstupem výpočetního programu chodu sítě, užívaných v ČEPS, a. s. v Ostravě. Obrázky obsahují uzly (rozvodny), kde je dané vedení zaústěno, dále obsahují napětí v uzlech, proudové zatížení v procentech a velikosti a směry činného a jalového výkonu. Ukázka vedení V207 a V413 z pohledu v řídicím systému TRIS je uvedena na obr. 10.6 a 10.10.



Obr. 10.1 Model vedení V207 při 20 % proudovém zatížení

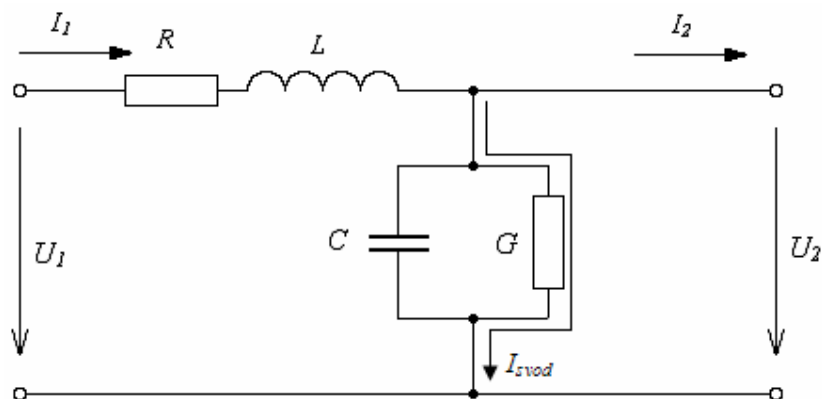


Obr. 10.2 Model vedení V207 při 58 % proudovém zatížení



Obr. 10.3 Rozvržení vodičů podle stožárové konstrukce u vedení V207

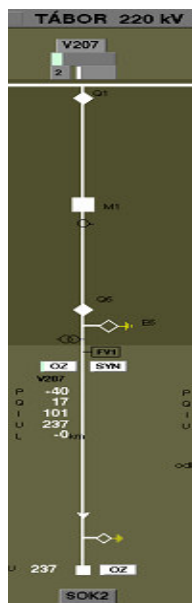
Obr. 10.4 Ukázka stožárové konstrukce typu PORTÁL 220 kV u vedení V207, vodič 3x450 AlFe 6+2x70 Fe



Obr. 10.5 Náhradní schéma jedné fáze střídavého vedení se zahrnutím svodu

Vypočtené parametry vedení V207:

R	$= 13,495692225$	Ω
X	$= 71,981082764$	Ω
B	$= 452,964287045$	μS
G	$= 0,234184683$	μS
l	$= 169,836$	km



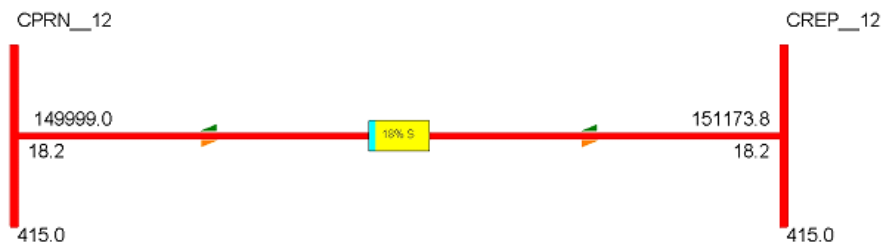
Obr. 10.6 Ukázka zobrazení vedení V207 v řídicím systému TRIS (telemetrický řídicí a informační systém)

Tabulka 10.1 Výsledky vypočtených hodnot ztrát svodem u vedení V207

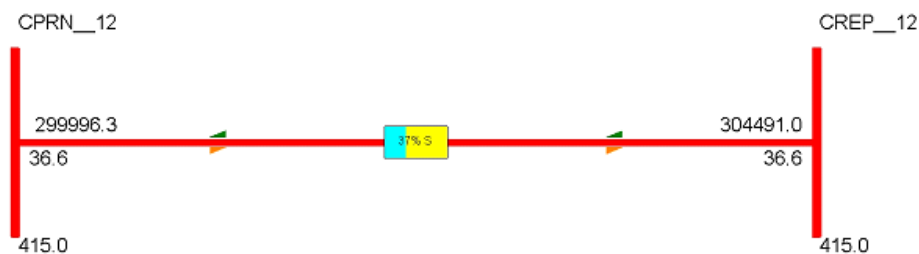
Vedení 220 kV		V207 (Tábor - Sokolnice)		
P (MW) zatížení vedení	U (kV) napětí v uzlech	dP ₁ (kW) vypočtené el. ztráty s parametrem svodové vodivosti G	dP ₂ (kW) vypočtené elektrické. ztráty bez par. svodové vodivosti G	dP _{svod} (kW) výsledné ztráty svodem dP ₁ - dP ₂
50	220	573,9	573,8	0,1
	225	548,3	548,2	0,1
	230	524,4	524,3	0,1
	235	502,1	502	0,1
	240	481,1	481	0,1
100	220	2333,1	2332,8	0,3
	225	2227,1	2226,8	0,3
	230	2128,1	2127,9	0,2
	235	2035,7	2035,4	0,3
	240	1949,2	1948,9	0,3
150	220	5355,4	5355	0,4
	225	5105,7	5105,2	0,5
	230	4873,1	4872,7	0,4
	235	4656,3	4655,9	0,4
	240	4453,8	4453,4	0,4

10.1.2 Modelové stavy pro výpočet ztrát svodem u vedení 400 kV V413 (Řeporyje – Prosenice)

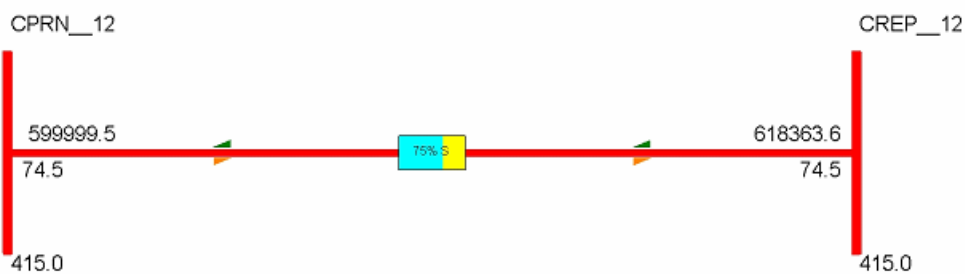
Vedení V413 mezi rozvodnami 400 kV Prosenice a Řeporyje bylo záměrně vybráno, protože je nejdelším vedením v české přenosové soustavě. Má nejvyšší počet stožárů a izolátorových závěsů. Předpokládáme u tohoto vedení větší svodové ztráty. Větší část vedení je zavěšeno na stožárech typu portál a menší část je na dvojitém stožáru typu DONAU spolu s vedením V412. Modely stožárových konstrukcí jsou uvedeny na obrázcích 10.12 a 10.13. V tabulce 10.2 jsou uvedeny hodnoty napětí a zatížení vedení. Zároveň jsou zde výsledky ztrát svodem při výpočtu se zahrnutím svodové vodivosti G a bez ní.



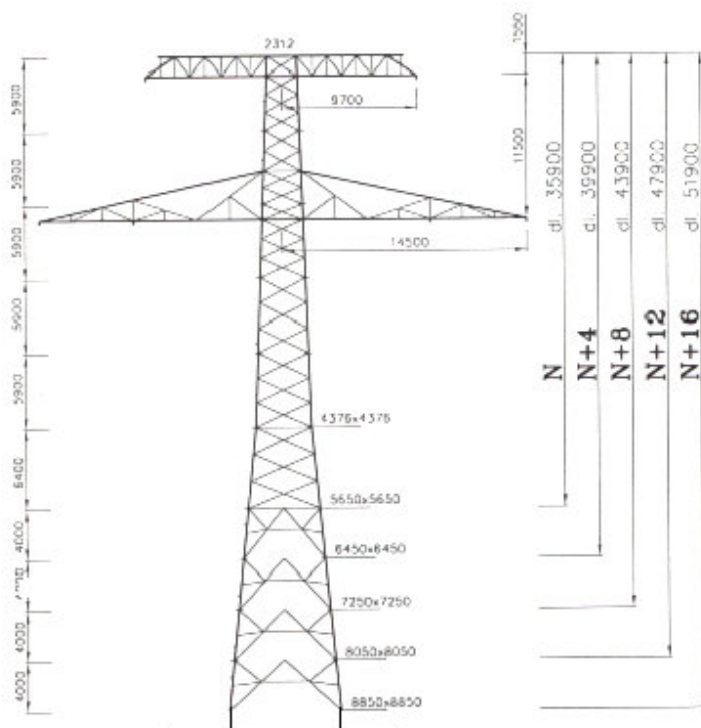
Obr. 10.7 Model vedení V413 při 18 % proudovém zatížení



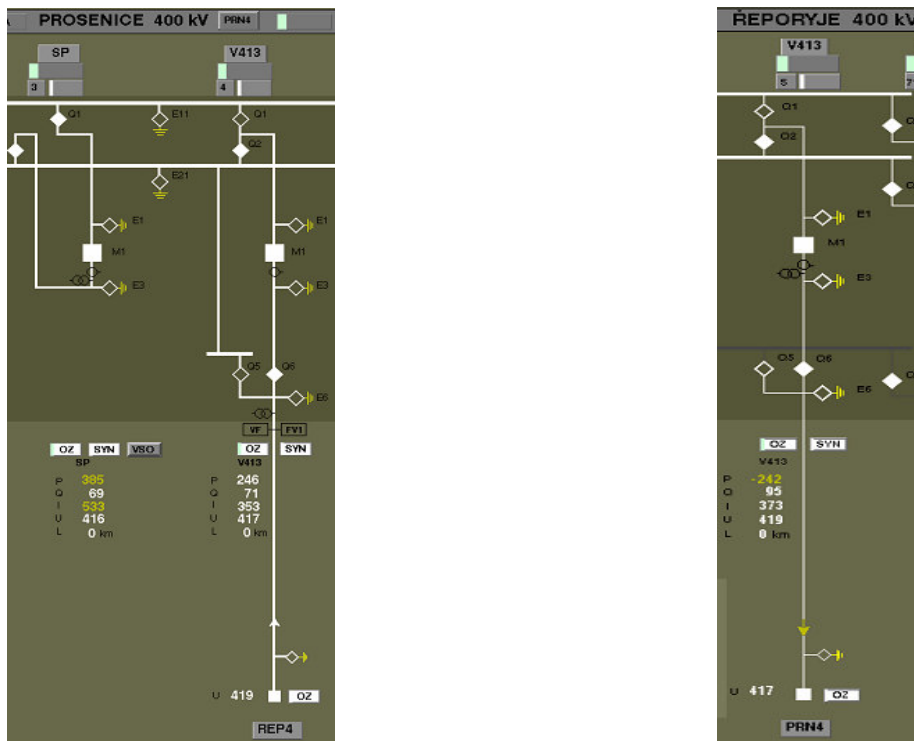
Obr. 10.8 Model vedení V413 při 37 % proudovém zatížení



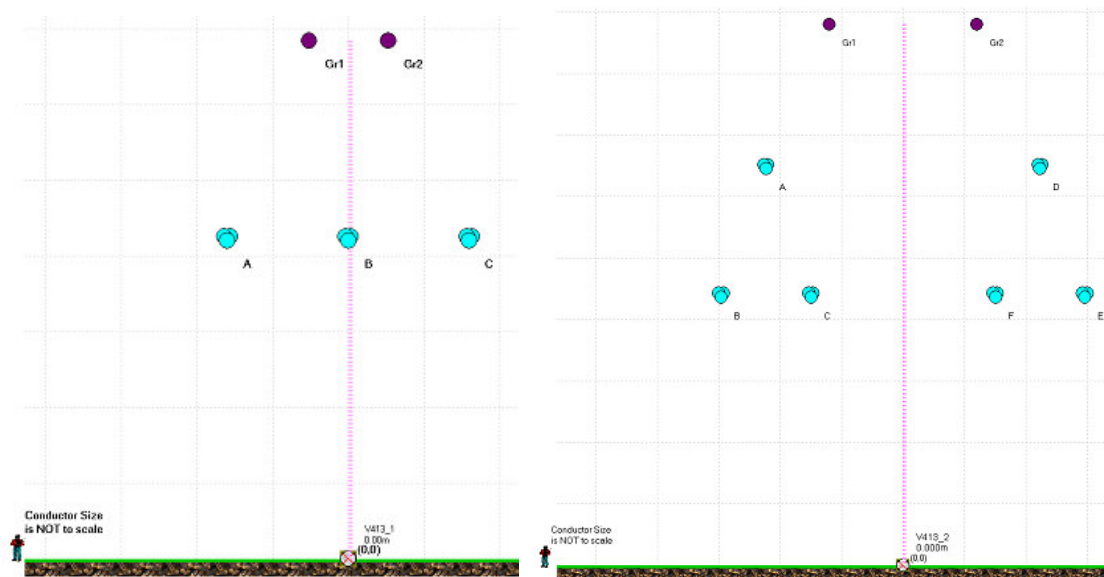
Obr.10.9 Model vedení V413 při 75 % proudovém zatížení



Obr. 10.10 Stožárová konstrukce typu DONAU 2x 400 kV u společné části vedení V413



Obr. 10.11 Ukázka zobrazení vedení V413 v řídicím systému rozvodny TRIS



Obr. 10.12 Rozvržení vodičů podle stožárové konstrukce u vedení V413

Obr. 10.13 Rozvržení vodičů souběžné části podle stožárové konstrukce u vedení V413 a V 412

Tabulka 10.2 Výsledky vypočtených hodnot ztrát svodem u vedení V413

Vedení 400 kV		V413 (Řeporyje – Prosenice)		
P (MW) zatížení vedení	U (kV) napětí v uzlech	dP ₁ (kW) vypočtené el. ztráty s parametrem svodové vodivosti G	dP ₂ (kW) vypočtené el. ztráty bez parametru svodové vodivosti G	dP _{svod} (kW) výsledné ztráty svodem dP ₁ - dP ₂
150	400	1173,5	1172,8	0,7
	405	1144,4	1143,7	0,7
	410	1116,3	1115,7	0,6
	415	1089,3	1088,7	0,6
	420	1063,3	1062,7	0,6
300	400	4756,6	4755,3	1,3
	405	4636,4	4635,2	1,2
	410	4520,8	4519,5	1,3
	415	4409,4	4408,1	1,3
	420	4302,1	4300,8	1,3
600	400	19809,7	19806,9	2,8
	405	19278,3	19275,6	2,7
	410	18768,4	18765,7	2,7
	415	18278,8	18276,1	2,7
	420	17808,4	17805,7	2,7

Parametry vedení: V413 - 1 část samostatná stožár PORTÁL

R ₁	=	4.959119450	Ω
X ₁	=	74.434400139	Ω
B ₁	=	1072.172735199	μS
G₁	=	0.495681085	μS
l ₁	=	264,904	km

Parametry vedení: V413 - 2 část souběh s V412 (Hradec – Řeporyje) stožár DONAU

R ₂	=	0.366466152	Ω
X ₂	=	5.889164063	Ω
B ₂	=	70.312335457	μS
G₂	=	0.000154466	μS
l ₂	=	18,738	km

Tabulka 10.3 Výsledky podílu svodových ztrát k celkovým ztrátám u vedení V207

P (MW) zatížení vedení	U (kV) napětí v uzlech	P _z (kW) elektrické ztráty celkové	P _{svod} (kW) ztráty svodem	Podíl svodových ztrát k celkovým ztrátám P _{svod} (%) v procentech a promilích	
50	220	573,9	0,1	0,0174 %	17,4 ‰
	240	481,1	0,1	0,0020 %	02,0 ‰
100	220	2333,1	0,3	0,0128 %	12,8 ‰
	240	1949,2	0,3	0,0153 %	15,3 ‰
150	220	5355,4	0,4	0,0074 %	07,4 ‰
	240	4453,8	0,4	0,0090 %	09,0 ‰

Tabulka 10.4 Výsledky podílu svodových ztrát k celkovým ztrátám u vedení V413

P (MW) zatížení vedení	U (kV) napětí v uzlech	P _z (kW) elektrické ztráty celkové	P _{svod} (kW) ztráty svodem	Podíl svodových ztrát k celkovým ztrátám P _{svod} (%) v procentech a promilích	
150	400	1173,5	0,7	0,0596	59,6 ‰
	420	1063,3	0,6	0,0564	56,4 ‰
300	400	4756,6	1,3	0,0273	27,3 ‰
	420	4302,1	1,3	0,0302	30,2 ‰
600	400	19809,7	2,8	0,0141	14,1 ‰
	420	17808,4	2,7	0,0151	15,1 ‰

Ukázka výpočtu podílu svodových ztrát k celkovým ztrátám v procentech a promilích:

$$P_{svod\%} = \frac{P_{svod}}{P_z} \cdot 100 = \frac{0,3}{1949,2} \cdot 100 = \underline{\underline{0,0153\%}} = \underline{\underline{15,3\text{‰}}} \quad (\%, \text{ kW}, \text{ kW})$$

kde

P_{svod%} (%) svodové ztráty na vedení v procentech

P_z (kW) celkové ztráty na vedení

P_{svod} (kW) celkové svodové ztráty na vedení

Na výše uvedeném vztahu je proveden ukázkový výpočet procentního podílu svodových ztrát k celkovým ztrátám. Ukázka výpočtu je představena u vedení 220 kV V207 pro zatížení 100 MW a provozním napětím 240 kV, uvedeným v tab. 10.3. Ostatní hodnoty procentního podílu svodových ztrát k celkovým ztrátám P_{svod} (%) byly vypočteny podle stejného vzorce a jsou uvedeny v tabulkách 10.3 a 10.4. Ostatní hodnoty v tabulkách 10.1 až 10.4 jsou buď nastaveny ve výpočetních modelech nebo jsou vypočteny programem LINE PROPERTIES.

Ukázka výpočtu ztrát svodem na kilometr délky u vedení V207: $l=169,836\text{km}$

$$\text{Zatížení vedení 50 MW: } P_{\text{svod} / \text{km}} = \frac{\Delta P_{\text{svod}}}{l} = \frac{100}{169,836} = \underline{\underline{0,588\text{W} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$\text{Zatížení vedení 100 MW: } P_{\text{svod} / \text{km}} = \frac{\Delta P_{\text{svod}}}{l} = \frac{300}{169,836} = \underline{\underline{1,766\text{W} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$\text{Zatížení vedení 150 MW: } P_{\text{svod} / \text{km}} = \frac{\Delta P_{\text{svod}}}{l} = \frac{500}{169,836} = \underline{\underline{2,944\text{W} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Ukázka výpočtu ztrát svodem na kilometr délky u vedení V413: $l=283,642\text{km}$

$$\text{Zatížení vedení 150 MW: } P_{\text{svod} / \text{km}} = \frac{\Delta P_{\text{svod}}}{l} = \frac{700}{283,642} = \underline{\underline{2,467\text{W} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$\text{Zatížení vedení 300 MW: } P_{\text{svod} / \text{km}} = \frac{\Delta P_{\text{svod}}}{l} = \frac{1300}{283,642} = \underline{\underline{4,5837\text{W} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$\text{Zatížení vedení 600 MW: } P_{\text{svod} / \text{km}} = \frac{\Delta P_{\text{svod}}}{l} = \frac{2800}{283,642} = \underline{\underline{9,8714\text{W} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Na základě výpočtů ztrát svodem na kilometr vedení u V207 a V413, které jsou výše uvedeny vyplývá, že při porovnání hodnot ztrát svodem došlo výpočtem k zpřesnění těchto ztrát. Hodnotově se velikost svodových ztrát ve výpočtu v rámci této kapitoly pohybuje v oblasti pěkného počasí a suchých izolátorových závěsů. Dosazené hodnoty svodových ztrát jsou vybrány z tabulek 10.1 a 10.2. a délka je katalogový údaj vedení. Při každém zatížení je brána v úvahu vyšší hodnota svodových ztrát, která zahrnuje svodovou vodivost.

10.2 VYHODNOCENÍ VLIVU „G“ NA SVODOVÉ ZTRÁTY

V rámci této kapitoly jsem chtěl představit výsledky a závěry, které vyplynuly z výpočtů chodu sítě s modelováním svodu u vedení VVN a ZVN a s jeho zanedbáním. Jednalo se o výpočty chodu sítě s vyhodnocením elektrických ztrát u dvou vybraných vedení přenosové soustavy. Tyto modely s přenosy reálných toků jsou uvedeny na příložených obrázcích a výsledky výpočtů jsou v tabulkách. U napěťové úrovně 220 kV bylo zkoumáno vedení V207 mezi rozvodnami Sokolnice a Tábořem. U hladiny napětí 400 kV bylo vybráno vedení V413 spojující rozvodny Prosenice a Řeporyje. Modely představovaly výpočty chodu sítě u dvou výše uvedených vedení, kde u nich byla zahrnuta svodová vodivost G a modely, kde svodová

vodivost nebyla modelována. Byly simulovány stavy tří různých reálných toků při pěti změnách provozního napětí s vyhodnocením ztrát u vybraných vedení s parametrem svodové vodivosti a bez ní. V tabulkách 10.1 až 10.4 jsou uvedeny výsledky všech modelových situací u vedení V207 a V413. Při pohledu na výsledky v tabulkách je zřejmé, že při vyšších reálných tocích jsou u vedení ztráty vyšší. Při změně napětí se ztráty mění málo. Při hodnocení výsledků chodu elektrické sítě u dvou vybraných vedení je patrné, že svodová vodivost G ztráty zvyšuje pouze minimálně.

V praxi to znamená, že ztráty svodem jsou ovlivněny usazenými nečistotami na povrchu izolátorových řetězců a atmosférickými vlivy.

Porovnání podílu ztrát svodem u zkoumaných vedení k celkovým elektrickým ztrátám je uvedeno v tabulkách 3 a 4. Výsledky podílu ztrát svodem k celkovým ztrátám jsou uvedeny procentech. Protože hodnotově jsou velmi malé (do 1 %), tak jsou uvedeny ještě v promilích.

Závěrem je možné říci, že výsledky výpočtů chodu elektrických sítí s parametrem svodové vodivosti G u vybraných vedení ukazují, že ztráty na vedení při modelování svodu jsou vyšší než bez ní. Hodnoty ztrát způsobených svodem jsou sice velmi malé ale když by jsme vzali v úvahu elektrizační soustavu jako celek, tak jejich velikost pro provozovatele přenosové soustavy by mohla být zajímavější. Jak je již uvedeno v názvu příspěvku, zda svod u vedení VVN a ZVN ovlivňuje chod sítě, tak z výsledků je patrné že velmi málo.

11 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ POZNATKŮ PRÁCE

Habilitační práce se zabývá komplexním rozбором a výpočty technických ztrát na vedení přenosové soustavy. Řeší teorie a metodiky výpočtu jednotlivých technických ztrát. Výsledky ztrát jsou rozčleněny a testovány na atmosférických vlivech v různých teplotních intervalech. Jsou pak navrženy opatření pro využití v praxi na energetickém dispečinku ČEPS v Ostravě. V habilitační práci je kladen důraz, aby uvedené teorie jednotlivých technických ztrát (Jouleovy, korónou a svodem) splňovaly požadavky na využití těchto poznatků, zpřesnění výsledků s uplatněním v praxi. Práce je rozdělena do několika kapitol, ve kterých jsou řešeny stanovené cíle v rámci zadání habilitační práce.

Kapitola (3) se zabývá vybranými pojmy a teoriemi z oblasti matematické statistiky, které jsou potřebné pro testování závislostí technických ztrát na atmosférických vlivech v teplotních intervalech. Výsledkem je nejlépe prokládající funkce s křivkou skutečné závislosti technických ztrát na venkovní teplotě. K tomuto účelu je uvedena teorie regrese a korelace. Korelační koeficient určuje míru přiblížení k lineární závislosti, čím více se blíží k „1“, tím je větší lineární závislost. Regresní křivka stanovuje proložení závislosti jednotlivých technických ztrát na venkovní teplotě (např. přímka, exponenciála, polynom 3. stupně a mocninná funkce) a k ní příslušné rovnice. Pro optimální stanovení matematické závislosti je využívána metoda nejmenších čtverců. Z důvodu testování jednotlivých technických ztrát v různých teplotních spektrech (vybrané dny v roce 2008, rozsah venkovní teploty od -20 do +33 °C) bylo pro výběr nejlépe prokládajících regresních křivek použito hodnotících kritérií (průměrná absolutní odchylka „ d “, směrodatná odchylka „ σ “ a variační koeficient „ v “).

Kapitola (4) pojednává o některých vybraných řešeních stavu problému ve světě. Například měření teploty senzory přímo na vodičích vedení VVN a ZVN s možností předpovědi zatížitelnosti, dále způsob monitorování a měření špiček svodových proudů na izolátorech 400 kV v Mexiku v oblasti znečištění nebo měření korónových výbojů speciální kamerou. Pomocí těchto opatření vlastně snižujeme technické ztráty na vedení.

Kapitola (5) se zabývá rozбором a výpočty jednotlivých technických ztrát. Velikost Jouleových ztrát je na dispečinku ČEPS v Ostravě vyhodnocována jako estimovaná hodnota. Z důvodu ověření správné velikosti estimovaných Jouleových ztrát je v kapitole (5.1.2) upraven vzorec pro výpočet těchto ztrát na vedení VVN a ZVN. Vzorec je upraven na modelu „ π “ článku se zanedbáním svodu, neboť ztráty svodem jsou řešeny v rámci technických ztrát

samostatně. Z důvodu délek vedení VVN a ZVN v České republice je zanedbání svodu přijatelné. Vzorec je univerzální pro jakékoliv vedení VVN a ZVN Uplatnění svodu s vlivem podílu svodu k celkovým ztrátám u vedení přenosové soustavy řeší kapitola 10.

V kapitole (5.2) a (8) je proveden rozbor vybraných metod výpočtu ztrát korónou. Tři vybrané postupy výpočtu jsou uvedeny na základě uvážení a prostudování pramenů domácí a zahraniční literatury. Existuje mnoho autorů, kteří uvádějí své experimentální vzorce a postupy výpočtu ztrát korónou.

V kapitole (5.3) je popsán způsob výpočtu svodových proudů na vedení VVN a ZVN. Tento postup výpočtu byl volen tak, aby platil na obecném vedení VVN a ZVN. Teorie výpočtu svodových proudů vychází z naměřených hodnot z laboratoře vysokého napětí a dle a na základě těchto údajů pak stanovení měrné povrchové vrstvy v různých podmínkách na vybraných a používaných typech izolátorů. Uvedené postupy řešení platí a jsou použitelné pro jakýkoliv typ izolátoru. Všechny dosažené výsledky, uvedené v kapitole (5.3) jsou zobecněny pro výpočty svodových proudů a ztrát svodem na obecném vedení VVN a ZVN. Toto zobecnění je přehledně uvedeno v kapitole (5.4). Dalším vybraným řešením výpočtů ztrát svodem je uvedeno v kapitole (9.2), kde je provedeno zobecnění výpočtů ztrát svodem a na ukázkou je zde u vedení V403 aplikován výpočet ztrát svodem a jsou uvedeny konkrétní výsledky.

Kapitola (6) se zabývá výpočty technických ztrát na vedení přenosové soustavy. Výpočty jsou provedeny na základě nových teorií a postupů. Jedním z cílů habilitační práce je vytvoření nových a jednoduchých teorií výpočtu technických ztrát na vedení přenosové soustavy. Dalším cílem pro použití v praxi byla jednoduchosti a využitelnost, například na energetickém dispečinku. Výpočty Jouleových ztrát ukázaly, že přesnost estimovaných hodnot z řídicího systému dispečinku ČEPS v Ostravě je využitelná pro potřeby testování v teplotním spektru a pro hodnocení a monitorování v reálném čase. Vybrané výsledky Jouleových ztrát jsou v kapitole (7.2) testovány v závislosti na venkovní teplotě v různých teplotních spektrech. Výpočty jsou provedeny na vybraných vedeních VVN a ZVN. Nejvíce testování je počítáno na vedení V253 mezi rozvodnami 220 kV Prosenice a Lískovec. Důvodem výběru vedení bylo aby pro testování jednotlivých ztrát na venkovní teplotě ve vybraných teplotních spektrech se mohlo využít stejných vstupních údajů (např. venkovní teplota, estimované Jouleovy ztráty, sdružené napětí).

V kapitole (6.2) je proveden ukázkový praktický výpočet svodových proudů na vybraném vedení V253. U vedení jsem měl k dispozici všechny údaje o použitých stožárech a izolátorových závěsech. Pro názornost je výpočet uveden krok po kroku. Postup výpočtu svodových proudů ukazuje použití nové teorie odvozené v kapitole (5.3). Pro použití výpočtu v praxi (např. energetickém dispečinku ČEPS v Ostravě) jsem provedl v rámci zadaného úkolu přijatelné zjednodušení výpočtu svodových proudů (kap. 6.2.2). Důležitou veličinou pro výpočet je odvození koeficientu „ c “ pro napěťovou hladinu 220 kV a 400 kV. Tento koeficient respektuje povrchovou vrstvu znečištění na izolátorech, která byla simulována v laboratoři VVN na nejvíce používaných typech izolátorů. Praktické využití výpočtu svodových proudů a ztrát svodem je v současné době testováno v řídicím systému na dispečinku ČEPS v Ostravě. Vstupní veličinou je měřené sdružené napětí na vedení, délka vedení a příslušný odvozený koeficient „ c “.

V kapitole (6.3) jsou na ukázkovém příkladě vypočteny ztráty korónou na vybraném vedení V253. Na ukázkovém příkladě je zde proveden výpočet ztrát korónou, který z hlediska různých empirických vztahů od různých autorů jsem v rámci přijatelného zjednodušení vybral a upravil.

V kapitole (7) je provedeno testování jednotlivých technických ztrát u vybraných vedení na venkovní teplotě metodou nejmenších čtverců při různých teplotních spektrech. Dále je v kapitole provedeno shrnutí dosažených výsledků a aplikace v praxi.

V rámci habilitační práce jsem v kapitole (9) a (10) provedl výpočty dalších metodik ztrát korónou a svodem a vyhodnotil získané výsledky. U výpočtu svodu jsem se zaměřil na výpočet svodu se zahrnutím svodové vodivosti a bez ní. Výpočty jsem provedl u dvou vybraných vedení přenosové soustavy. Vyhodnocení a výsledky jsou uvedeny v kapitole (10).

Na závěr bych chtěl zdůraznit, že problematika technických ztrát na vedení VVN a ZVN, jejich správné určení a ověření jak se podílí na velikosti těchto ztrát atmosférické vlivy (venkovní teplota) má své opodstatnění. Navržené výsledky a postupy dosažené v této práci jsou řešeny způsobem, respektujícím fyzikální zákonitosti. Zobecněných a dosažených výsledků se dá využít pro další výpočty, monitorování a vyhodnocování jednotlivých technických ztrát v reálném čase s vazbou na venkovní teplotu například na energetickém dispečinku ČEPS v Ostravě.

PŘÍNOS HABILITAČNÍ PRÁCE

Habilitační práce se zabývá komplexním rozбором a výpočty technických ztrát na vedení přenosové soustavy. Řeší teorie a metodiky výpočtu jednotlivých technických ztrát. Výsledky ztrát jsou podrobeny testování na atmosférických vlivech v různých teplotních intervalech a jsou navrženy možnosti využití v praxi na energetickém dispečinku, např. řídicím systému. V habilitační práci je kladen důraz, aby uvedené teorie jednotlivých technických ztrát (Jouleovy, korónou a svodem) splňovaly požadavky na využití těchto poznatků a výsledků s uplatněním v praxi. Práce je rozdělena do několika kapitol, ve kterých jsou řešeny stanovené cíle v rámci zadání habilitační práce. Tato práce řeší v praxi méně publikovanou oblast elektroenergetiky. Některé výsledky habilitační práce uvádím v následujících bodech.

Vybrané poznatky vyplývající z výsledků habilitační práce:

- komplexní rozbor technických ztrát na vedení přenosové soustavy
 - odvození obecných teorií výpočtů elektrických ztrát na vedení VVN a ZVN
 - odvození vztahů a výpočty technických ztrát
 - rozšíření výpočtů ztrát korónou
 - rozšíření výpočtů ztrát svodem
 - aplikace výpočtu ztrát svodem a korónou na skutečných vedeních
 - shrnutí vybraných výsledků a jejich vyhodnocení
 - navržení aplikace výsledků ztrát do praxe
 - testování elektrických ztrát v závislosti na venkovní teplotě
 - možnosti využití nadefinovaných vztahů k prognózám změn velikosti technických ztrát v teplotních spektrech
 - vytvoření univerzálního modelu obecného vedení pro výpočty ztrát svodem
- výpočty měrných povrchových vodivostí pro různé stavy atmosférických vlivů

Poznámka:

Všechny uvedené teorie výpočtu technických ztrát jsou provedeny tak, aby vytvořily nové poznatky a jejich aplikace v praxi byly v rámci určitého zjednodušení.

SUMMARY

Habilitation work is engaged in a comprehensive analysis and calculation of technical losses on transmission network system line. It solves theories and calculation methods of particular technical losses. Results of losses are tested in atmospheric influences in various temperature intervals and there are offered possibilities for using in practise in a power plant control room, i.e. control system. In the habilitation work there is laid emphasis in order to stated theories of particular technical losses (Joule's Theory, by corona, leakage) met the requirements for using this knowledge and results in practice. The work is divided into several chapters where are solved stated targets under the terms of assignment of the habilitation work. This work solves less published area of electro-energetics. I state some results of the habilitation work in following points.

Chosen chapters followed from results of the habilitation work:

- Comprehensive analysis of technical losses on transmission network system line
- Derivation of general theories of calculations of electric losses on Extra High Voltage line
- Derivation of relations and calculations of technical losses
- Extension of calculation of leakage losses
- Application of calculations of leakage losses and corona losses on real lines
- Summary of chosen results and their evaluation
- Suggestion for application of results of losses into practice
- Tests of electric losses depended on outdoor temperature
- Possibilities for using the defined relations for prognosis of technical losses quantity changes in temperature spectrum
- Formation of universal model of general line for calculations of leakage losses

- Calculation of specific surficial conductivity for various conditions of atmospheric influences

LITERATURA

- [1] RUSEK S.: *Řízení elektrizačních soustav, učební texty*, VŠB- TU Ostrava
- [2] SANTARIUS, P.: *Elektrické stanice a vedení*, skriptum VŠB- TU Ostrava 1993
- [3] AKOPJAN A. A. a kol.: *Technika vysokých naprjženij*, Gosenergoizdat, Moskva a Leningrad 1956
- [4] ČSN 330405: *Navrhování venkovní elektrické izolace podle stupně znečištění*, Praha 1989
- [5] ČEPS, a.s.: *Podklady a technická dokumentace*
- [6] ČHMÚ Ostrava: *Meteorologická data*
- [7] RUDOLF L.: *Vlivy venkovní teploty na ztráty v přenosové soustavě*, sborník odborného semináře Poděbrady 2002, Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, 7. ročník
- [8] RUDOLF L.: *Výpočet svodových proudů vedení VVN a jejich závislost na atmosférických vlivech*, sborník přednášek z 5. Mezinárodní vědecké konference VŠB – TU Elektroenergetika 2003, Visalaje, leden 2003
- [9] PAVLOVSKÝ B.: *Ztráty v přenosu a rozvodu elektrické energie*, SNTL Praha 1958
- [10] LIKEŠ J., MACHEK J.: *Matematická statistika*, SNTL 1983
- [11] FECKO Š. : *Elektroenergetika*, vydavatel'stvo Alfa, Bratislava 1991
- [12] VEVERKA A.: *Technika vysokých napětí*, SNTL 1966
- [13] KOHOUTOVÁ D.a kol.: *Směrnice MPE pro výpočet průměrných ztrát korónou na vedení VVN*, Výzkumný ústav energetický, Praha 1961
- [14] SANTARIUS P.: *Elektroenergetika I.*, skripta VŠB-TU Ostrava, 1984
- [15] ANJAN K. DEB: *Powerline Ampacity System, Theory, Modeling and Applications*, Washington, New York, U.S.A., CRC PRESS, LLC 2000
- [16] CZÓKA J., HRUBEŠ V.: *Metodika rozboru ztrát elektrické energie na úrovni rozvodné společnosti*, SME Ostrava 1999
- [17] LaFOREST J. J., ANDERSON J. G.: *Corona Phenomena on A-C Lines*, U.S.A. 1970
- [18] BARETSKY M., ANDERSON J. G.: *Corona Loss*, U.S.A. 1970

- [19] KUČERA D.: *Přenos a rozvod elektrické energie*, SNTL, Praha 1982
- [20] PAVELKA L., DOLEŽALOVÁ J.: *Pravděpodobnost a statistika*, skriptum VŠB – TU Ostrava 1997
- [21] MACH V.: *Technika vysokého napětí*, skriptum VŠB – TU Ostrava 2001
- [22] OFIL LTD, *DayCorII, The most advanced daytime corona imager*, OFIL Ltd. Izrael, 2002
- [23] Peterson W. S., Cozzens B., Carroll J. S.: *Desert Measurements of Corona Loss*, Electrical Engineering 1969
- [24] RUSEK S.: *Teoretická elektroenergetika*, skripta VŠB – TU Ostrava 1999
- [25] SANTARIUS P.: *Elektroenergetika I.*, skripta VŠB – TU Ostrava 1984
- [26] RUDOLF L.: *Způsoby předpovědí zatížitelnosti venkovního vedení na základě meteorologických údajů*, Časopis EE, 9, 2003, č. 3 - Odborný časopis pro elektrotechniku a energetiku, Bratislava, Slovensko
- [27] J. L. FIERRO-CHAVEZ, I. RAMIREZ-VAZQUEZ: „*On - line leakage current monitoring of 400 kV insulator strings in polluted areas*“, IEE Proc. - Gener. Transmission, 1996
- [28] KOHOUTOVÁ, D. Směrnice ministerstva paliv a energetiky. *Výpočet průměrných ročních ztrát na vedení VVN*, Výzkumný ústav energetický, 1961
- [29] RUDOLF, L. *Závislost elektrických ztrát vedení přenosové soustavy na atmosférických vlivech*, disertační práce na VŠB-TU, FEI, katedra elektroenergetiky, 2003
- [30] MURAVADA, P. S. *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*, 2000
- [31] COMBER, M. G. *Transmission line reference book 345 kV, kap. 7, Corona loss*, 1975
- [32] *Směrnice pro výpočet ztrát korónou a radiového rušení při volbě vodičů venkovních elektrických vedení střídavého napětí 330 – 750 kV a stejnosměrných napětí 800 – 1500 kV*, 1975
- [33] KUBÍN M. *Přenosy elektrické energie ČR v kontextu evropského vývoje*. Praha. 2007, ČEPS, a.s. Praha

- [34] HABERLE G A KOL.: *Elektrotechnické tabulky pro školu i praxi*, Praha 2006, EUROPA SOBOTÁLES, ISBN 80-86706-16-8
- [35] RUDOLF L.: *Vliv svodu na výpočty chodu sítě u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze Mezinárodní vědecké konference, Electric Power Engineering 2009, ISBN 978-80-248-1391-2, EPE 2009, pořádané VŠB-TU Ostrava
- [36] RUDOLF L.: *Měření svodových proudů na vybraných izolátorových závěsech s ohledem na jejich znečištění*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze 9. Mezinárodní vědecké konference Electric Power Engineering 2008, ISBN 978-80-214-3650-3, EPE 2008, pořádané FEKT VUT v Brno
- [37] RUDOLF L.: *Vybrané metodiky výpočtů ztrát korónou*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze 9. Mezinárodní vědecké konference Electric Power Engineering 2008, ISBN 978-80-214-3650-3, EPE 2008, pořádané FEKT VUT v Brno
- [38] RUDOLF L.: *Vliv složení izolátorového závěsu na velikost svodového proudu u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze Mezinárodní vědecké konference, Electric Power Engineering 2007, ISBN 978-80-248-1391-2, EPE 2007, pořádané VŠB-TU Ostrava
- [39] RUDOLF L.: *Leakage currents and power losses on outdoor insulators under artificial rains*, Časopis JTIE - Journal of Technology and Information Education, Issue 2/2009, ISSN 1803 – 537X
- [40] Rudolf L.: *Vliv znečištění izolátorů na velikost svodu u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze Mezinárodní vědecké konference, Electric Power Engineering 2007, ISBN 978-80-248-1391-2, EPE 2007, pořádané VŠB-TU Ostrava
- [41] EGÚ-Laboratoř VVN a.s. Praha – Běchovice *Vyhodnocení ztrát korónou a ztrát na izolátorových závěsech v přenosové soustavě ČEPS, a.s.*, 2005
- [42] MAYER D.: *Elektrodynamika v energetice*, Praha 2005, BEN, ISBN 80-7300-164-0

SEZNAM VYBRANÝCH PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

- RUDOLF L.: *Vybrané problémy z provozu řízení elektrizační soustavy Moravy*, CD-ROM a sborník přednášek z Mezinárodní vědecké konference 12.2. 2002, ISBN 80-248-0060-2, Mezinárodní vědecká konference VŠB–TU Ostrava, 2002
- RUDOLF L.: *Výpočet svodových proudů vedení VVN a jejich závislost na atmosférických vlivech*, CD-ROM a sborník anotací přednášek z 5. Mezinárodní vědecké konference Elektroenergetika 2003, ISBN 80-248-225-2
- RUDOLF L.: *Funkce přenosové soustavy a zdrojů elektrické energie v rámci výuky didaktiky technické výchovy*, sborník I. příspěvků z mezinárodní konference, ISSN 1214-0554, ISBN 80 – 7041 – 318 – 2, Mezinárodní konference na Univerzitě v Hradci Králové: Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů, Hradec Králové, 2004
- RUDOLF L.: *Vlivy venkovní teploty na ztráty v přenosové soustavě*, CD-ROM a sborník anotací přednášek odborného semináře Poděbrady 2002, Odborný seminář: Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, Poděbrady, 2002, 7. ročník
- RUDOLF L.: *Metodika výpočtu svodových proudů a ztrát svodem na vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek odborného semináře Poděbrady 2003, Odborný seminář: Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, Poděbrady, 2003, 8. ročník
- RUDOLF L., LAGO J.: *Vliv tvaru povrchové dráhy izolátorů na velikost svodového proudu*, CD-ROM a sborník anotací přednášek odborného semináře Poděbrady 2004, Odborný seminář: Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, Poděbrady, 2004, 9. ročník
- RUDOLF L.: *Řízení elektrizační soustavy z Moravského energetického dispečinku v Ostravě v období legislativních změn*, Elektrotechnika v praxi, číslo V-VI, ročník 12/2002, ISSN 0862 – 9730
- RUDOLF L.: *Způsoby předpovědi zatížitelnosti venkovního vedení na základě meteorologických údajů*, EE-časopis pro elektrotechniku a energetiku, č.3, ročník 9/2003, ISSN 1335 – 2547, Bratislava, Slovensko
- RUDOLF L., MATĚJNÝ J.: *Poruchové odpojení přenosové sítě Itálie (ITALIAN BLACKOUT) od mezinárodní sítě UCTE*, Odborný časopis Česká energetika, číslo I, ročník 14/2004, ISSN 1213 – 4171
- RUDOLF L., MATĚJNÝ J.: *Problémy propojené UCTE v rámci poruchového odpojení energetické sítě Itálie (ITALIAN BLACKOUT)*, Elektrotechnika v praxi, číslo V-VI, ročník 14/2004, ISSN 0862 – 9730

- RUDOLF L.: *Vliv změny velikosti napětí a úhlu na ztráty u vedení přenosové soustavy*, CD-ROM a sborník anotací přednášek odborného semináře Poděbrady 2005, Odborný seminář: Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, Poděbrady, 2005, 10. ročník
- RUDOLF L.: *Využití problematiky poruch v elektrizační soustavě ve výuce elektrotechniky v oboru technická výchova*, sborník příspěvků z mezinárodní vědecko – odborné konference, ISBN 80 – 7220 – 182 – 4, Mezinárodní vědecko - odborná konference na Univerzitě Palackého v Olomouci: Trendy technického vzdělávání, technická a informační výchova, Olomouc, 2004
- RUDOLF L.: *Počítačové modelování elektrických sítí a jejich využití ve výuce elektrotechniky*, sborník I. příspěvků z mezinárodní konference, ISSN 1214-0554, ISBN 80-7041-954-7, Mezinárodní konference na Univerzitě v Hradci Králové: Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů, Hradec Králové, 2005
- RUDOLF L.: *Vyhodnocení vlivu kolísání napětí na velikost ztrát u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek z 6. Mezinárodní vědecké konference Electric Power Engineering 2005, ISBN 80-248-0842-0, EPE 2005, pořádaná VŠB – TU Ostrava, FEI, katedra elektroenergetiky, 2005
- RUDOLF L.: *Využití videoklipů z provozu elektrizační soustavy ve výuce elektroenergetiky*, sborník příspěvků z mezinárodní vědecko – odborné konference, ISBN 80 – 7220 – 182 – 8, Mezinárodní vědecko - odborná konference na Univerzitě Palackého v Olomouci: Trendy technického vzdělávání, technická a informační výchova, Olomouc, 2005
- RUDOLF L.: *Nové trendy rozvoje větrných elektráren v tématickém celku elektrotechniky*, sborník přednášek z mezinárodní konference - Technické vzdelávanie ako súčasť všeobecného vzdelávania, ISBN 80 – 8083 – 151 – 3, 2005, Velká Lomnica, Slovensko
- RUDOLF L.: *Elektronická stavebnice RC2000 ve výuce technologických praktik*, sborník přednášek z mezinárodní konference – Učitel přírodovědných předmětů na začátku 21. století, Prešovská univerzita v Prešově, ISBN 80 – 8068 – 462 – 6, 2006, Prešov, Slovensko
- RUDOLF L.: *Větrné elektrárny a jejich rozvoj v novém předmětu elektroenergetika*, sborník I. příspěvků z mezinárodní konference, ISSN 1214-0554, ISBN 80-7041-835-4, Mezinárodní konference na Univerzitě v Hradci Králové: Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů, Hradec Králové, 2006
- RUDOLF L.: *Podíl vlivu koróny na technických ztrátách u vedení přenosové soustavy*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze 7. Mezinárodní vědecké konference Electric Power Engineering 2006, ISBN 80-214-3180-6, EPE 2006, pořádané FEKT VUT v Brně, 2006

- RUDOLF L.: *Svod a jeho velikost u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze 7. Mezinárodní vědecké konference Electric Power Engineering 2006, ISBN 80-214-3180-6, EPE 2006, pořádané FEKT VUT v Brně, 2006
- RUDOLF L., TVARŮŽKA V.: *Elektrotechnické stavebnice a jejich využití ve výuce odborných předmětů*, sborník příspěvků z mezinárodní vědecko-odborné konference, ISBN 80 – 7220 – 260 – X, Mezinárodní konference na Univerzitě Palackého v Olomouci: Trendy ve vzdělávání, Olomouc, 2006
- TVARŮŽKA V., RUDOLF L.: *Systémový pohled na digitální vizuální záznam v technologické edukaci*, sborník příspěvků z mezinárodní vědecko – odborné konference, ISBN 80 – 7220 – 260 – X, Mezinárodní konference na Univerzitě Palackého v Olomouci: Trendy ve vzdělávání, Olomouc, 2006
- RUDOLF L., TVARŮŽKA V.: *Slunce jako zdroj energie, využití tématu v předmětu elektroenergetika*, sborník I. příspěvků z mezinárodní konference, ISSN 1214-0554, ISBN 978-80-7041-752-2, Mezinárodní konference na Univerzitě v Hradci Králové: Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů, Hradec Králové, 2007
- TVARŮŽKA V., RUDOLF L.: *Praktické činnosti a mediovaná komunikace*, sborník II. příspěvků z mezinárodní konference, ISSN 1214-0554, ISBN 978-80-7041-764-5. Mezinárodní konference na Univerzitě v Hradci Králové: Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů, Hradec Králové, 2007
- RUDOLF L., DOSTÁL P., SLOVÁK S.: *Transformace oboru Technická výchova na Ostravské univerzitě*, sborník příspěvků z mezinárodní konference, ISBN 978-80-8068-624-6, Mezinárodní videokonference III. InEduTech 2007 na Prešovské univerzitě: Klíčové kompetence a technické vzdělávání, Prešov, 2007, Slovensko
- RUDOLF L., TVARŮŽKA V.: *Vizualizace provozu přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně a její využití ve výuce*, sborník příspěvků z mezinárodní vědecko - odborné konference, ISBN 80 – 7220 – 296 – 0, Mezinárodní konference na Univerzitě Palackého v Olomouci: XX. DIDMATTECH 2007, Olomouc, 2007
- TVARŮŽKA V., RUDOLF L.: *Digitální vizuální záznam a diagnostika technického myšlení*, sborník příspěvků z mezinárodní vědecko - odborné konference, ISBN 80 – 7220 – 296 – 0, Mezinárodní konference na Univerzitě Palackého v Olomouci: XX. DIDMATTECH 2007, Olomouc, 2007
- RUDOLF L.: *Vliv složení izolátorového závěsu na velikost svodového proudu u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze Mezinárodní vědecké konference, Electric Power Engineering 2007, ISBN 978-80-248-1391-2, EPE 2007, pořádané VŠB-TU v Ostravě, 2007
- RUDOLF L.: *Vliv znečištění izolátorů na velikost svodu u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze Mezinárodní vědecké konference, Electric Power Engineering 2007, ISBN 978-80-248-1391-2, EPE 2007, pořádané VŠB-TU v Ostravě, 2007

- RUDOLF L., TVARŮŽKA V.: *Využití digitálních záznamů ve výuce odborných předmětů*, sborník příspěvků z mezinárodní vědecko - odborné konference, ISBN 978-80-7220-301-7, Mezinárodní konference na Univerzitě Palackého v Olomouci: INFOTECH 2007, Olomouc, 2007
- RUDOLF L., TVARŮŽKA V.: *Problematika izolátorových závěsů u vedení přenosové soustavy v tématickém celku předmětu Elektroenergetika*, sborník I. příspěvků z mezinárodní konference, ISSN 1214-0554, ISBN 978-80-7041-142-1. Mezinárodní konference na Univerzitě v Hradci Králové: Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů, Hradec Králové, 2008
- TVARŮŽKA V. RUDOLF L.: *Digitální vizuální klip jako prostředek pojmové a konceptuální prezentace učiva technologické edukaci*, sborník II. příspěvků z mezinárodní konference, ISSN 1214-0554, ISBN 978-80-7041-154-4. Mezinárodní konference na Univerzitě v Hradci Králové: Modernizace vysokoškolské výuky technických předmětů, Hradec Králové, 2008
- RUDOLF L.: *Vybrané metodiky výpočtů ztrát korónou*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze 9. Mezinárodní vědecké konference Electric Power Engineering 2008, ISBN 978-80-214-3650-3, EPE 2008, pořádané FEKT VUT v Brně, 2008
- RUDOLF L.: *Měření svodových proudů na vybraných izolátorových závěsech s ohledem na jejich znečištění*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze 9. Mezinárodní vědecké konference Electric Power Engineering 2008, ISBN 978-80-214-3650-3, EPE 2008, pořádané FEKT VUT v Brně, 2008
- RUDOLF L.: *Působení teploty a vlhkosti na povrch izolátorového závěsu a jejich vliv na velikost svodového proudu*, CD-ROM a sborník anotací přednášek z Mezinárodní odborné konference ELEN 2008, ISBN 978-80-254-2293-9, pořádané ČVUT v Praze, Masarykova kolej, Thákurova 1, Praha 6 - Dejvice, 2008
- RUDOLF L.: *Leakage currents and power losses on outdoor insulators under artificial rains*, Časopis JTIE - Journal of Technology and Information Education, Issue 2/2009, ISSN 1803 – 537X
- RUDOLF L.: *Vliv svodu na výpočty chodu sítě u vedení VVN a ZVN*, CD-ROM a sborník anotací přednášek ze Mezinárodní vědecké konference, Electric Power Engineering 2009, ISBN 978-80-248-1391-2, EPE 2009, pořádané VŠB-TU v Ostravě, 2009