

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická

## **Projektování a měření přídatného uzemnění vedení VVN a ZVN**

Bc. Jan KOREL

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.  
2020



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Korel** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434927**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Projektování a měření přídatného uzemnění vedení VVN a ZVN**

Název diplomové práce anglicky:

**Design and measurement of additional earthing of HV and EHV power lines**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Srovnání přístupu Českých technických norem týkajících se návrhu vedení VVN a ZVN z hlediska zejména uzemňování vedení VVN a ZVN.
- 2) Problematika ochrany proti dotykovému a krokovému napětí na stožárové konstrukci a v její blízkosti v napěťových hladinách VVN a ZVN a její rozbor a zhodnocení.
- 3) Změřit měrný zemní odpor a odpor základu stožáru realizované stavby vedení 110 kV a porovnat naměřené hodnoty z teoretického modelu (EGÚ Běchovice) použitého v projektu pro provádění stavby včetně diskuze přesnosti teoretického modelu.
- 4) Vytvoření prakticky použitelného výpočetního nástroje v prostředí MS Office pro odhad odporu základu stožáru a případného strojeného zemniče, ověřit jeho přesnost vzhledem k získaným datům z měření a hodnotám navrženým v projektu. Navrhnout případná doplňující řešení při jejich rozporu.
- 5) Vytvořit přílohu projektové dokumentace „Výpočet přídatného uzemnění“ v rámci projektu pro provádění stavby a navrhnout doporučení do technické zprávy tohoto projektu.

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 50341-1 – Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45 kV – Část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace
2. ČSN EN 50341-3 Změna Z2 – Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45 kV – Část 3: Soubor Národních normativních aspektů
3. PNE 33 3300 – Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV
4. PNE 33 000-4 – Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny
5. PNE 33 3300-1 – Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn.
6. ČSN 33 3300 – Elektrotechnické předpisy. Stavba venkovních vedení.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **22.09.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **20.02.2021**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

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

V Praze dne 6. 1. 2020

Bc. Jan Korel



## Poděkování

Mé poděkování patří panu Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za jeho ochotu, vstřícnost a připomínky k této práci a za čas, který mi věnoval nejen při vedení diplomové práce, ale také za konzultace ohledně mého dalšího kariérního uplatnění a životního směřování. Dále děkuji panu Ing. Ondřeji Krejzovi za poskytnutí potřebných informací a materiálů a za jeho technické podněty vedoucí ke zdokonalení této práce. V neposlední řadě děkuji také své rodině a přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili.





## Abstrakt

Diplomová práce řeší uzemňování stožárů elektrických venkovních vedení velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Popisuje typy poruch, které mohou nastat na těchto napěťových hladinách a věnuje se problémům vzniklým těmito poruchami, dále řeší problematiku krokového a dotykového napětí.

Součástí diplomové práce je i jejím autorem vytvořený výpočetní program v prostředí MS Excel, který slouží k určení odporu základu stožáru s případným strojeným zemničem. Práce popisuje celý algoritmus výpočtu uzemnění a použití programu krok po kroku. Správnost funkce programu je ověřena na zrealizované stavbě vedení Hlinsko – Polička.

Na závěr je uveden obecný postup při uzemňování stožárů, a také jsou zde popsány typy dokumentace, které je nutné při realizaci nové stavby venkovního vedení vpracovat.

Součástí práce je i vyhodnocení ekonomického přínosu vytvořeného výpočetního programu pro projekční organizaci, která bude program používat.

## Klíčová slova

Zemnič, stožár, podpěrný bod, zkrat, rezistivita, uzemnění, krokové a dotykové napětí.



## **Abstract**

Diploma thesis deals with pylons grounding on high and extra high voltage power lines. This thesis describes some types of faults which can occur on these voltage levels and the thesis also devotes attention to the problems caused by these faults. Furthermore, this thesis analyses the issue of step and touch voltage.

The main part of the thesis is the computer program created by author of this thesis. The program is used for determination of the resistance of pylon base with possible additional foundation earthing. There is a detailed description of a program algorithm and its use step by step in the thesis. The accuracy of the computer program is verified on already completed construction of the Hlinsko – Polička power line.

Last part describes the general process during pylons grounding. This part also contains types of documentation that must be elaborated in realising a new power line.

Finally, the thesis also evaluates the economic benefit of the created computer program for design organisation which will use it.

## **Keywords**

Grounding, pylon, short-circuit, resistivity, earthing, step and touch voltage.



## Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. VENKOVNÍ VEDENÍ VVN A ZVN .....	3
2.1. Rozdělení dle hladiny napětí.....	3
2.2. Zapojení soustavy VVN a ZVN.....	3
2.3. Typy poruch .....	4
2.3.1. Složky trojfázové střídavé soustavy pro analýzu poruchy.....	6
2.3.2. Jednofázová porucha.....	8
2.3.3. Dvojfázová zemní porucha .....	10
2.3.4. Příčiny a následky zkratu .....	12
3. UZEMŇOVÁNÍ VENKOVNÍCH VEDENÍ .....	13
3.1. Účel uzemňování.....	13
3.2. Princip uzemňování.....	14
3.2.1. Rozložení potenciálu elektrického pole v okolí podpěrného bodu .....	15
3.2.2. Elektrické pole pod vedením .....	17
3.3. Zásady uzemňování.....	19
3.3.1. Dotykové napětí.....	20
3.3.2. Krokové napětí.....	22
3.3.3. Napětí na stožárové konstrukci.....	22
4. DIMENZOVÁNÍ ZEMNICÍCH SOUSTAV .....	25
4.1. Požadavky .....	25
4.2. Měření rezistivity .....	25
4.2.1. Měření rezistivity pomocí přístroje FLUKE 1625.....	27
4.3. Postup návrhu uzemňovací soustavy.....	32
5. PROBLEMATIKA ZEMNICÍCH LAN .....	37
5.1. Ochrana vedení před zpětnými přeskoky .....	37

5.2.	Ochrana vodičů před přímým úderem blesku.....	37
5.3.	Umístění zemnicích lan .....	38
5.4.	Redukční činitel.....	39
5.5.	Kombinované zemní lano .....	40
5.6.	Připojení ZL a KZL na stožárovou konstrukci .....	41
6.	UZEMNĚNÍ STOŽÁROVÉ KONSTRUKCE .....	45
6.1.	Používané zemniče a jejich instalace.....	45
6.2.	Tvary zemničů .....	48
6.3.	Příklady zemnicích soustav .....	49
6.4.	Dovolené hodnoty poruchových proudů .....	51
6.5.	Odpor uzemnění.....	53
7.	VÝPOČETNÍ NÁSTROJ .....	55
7.1.	O nástroji .....	55
7.2.	Praktické použití .....	55
7.2.1.	Karta: Wennerova metoda.....	56
7.2.2.	Karta: Základy.....	56
7.2.3.	Karta: Zkratové proudy .....	57
7.2.4.	Karta: Výpočet .....	58
7.2.5.	Karta: Tisk.....	63
7.3.	Algoritmus výpočtu .....	63
7.3.1.	Výpočet zemního odporu paty stožáru.....	64
7.3.2.	Algoritmus výpočtu paprskového zemniče .....	65
8.	OVĚŘENÍ VÝPOČETNÍHO NÁSTROJE.....	69
8.1.	Návrh uzemnění laboratoří EGU .....	69
8.2.	V1105/V1106/V1107: Hlinsko – Polička.....	70
8.3.	Porovnání tvaru uzemnění a hodnot jeho odporu .....	72
9.	VÝSTAVBA NOVÉHO VEDENÍ VVN A ZVN .....	77

9.1.	Typy dokumentace .....	77
9.1.1.	Územně plánovací dokumentace – ÚPD .....	77
9.1.2.	Dokumentace pro územní rozhodnutí – DÚR .....	78
9.1.3.	Dokumentace pro provedení stavby – DPS .....	79
9.1.4.	Dokumentace skutečného provedení stavby – DSPS .....	79
9.2.	Postup uzemnění stožárů VVN a ZVN .....	80
10.	ZÁVĚR .....	83
10.1.	Technický přínos .....	84
10.2.	Ekonomický přínos.....	85
10.3.	Závěrečné shrnutí .....	87
11.	SEZNAM LITERATURY .....	89
12.	SEZNAM PŘÍLOH.....	93





## Obrázky

Obr. 2.1: Zapojení soustavy TT .....	4
Obr. 2.2: Obecná příčná (vlevo) a podélná porucha (vpravo) v trojfázové soustavě .....	4
Obr. 2.3: Typy příčných poruch v 3f soustavě .....	5
Obr. 2.4: Znázornění dekompozice do systému symetrických složek .....	6
Obr. 2.5: Jednofázový zkrat .....	8
Obr. 2.6: Složkové schéma jednofázové poruchy .....	8
Obr. 2.7: Dvojfázový zemní zkrat .....	10
Obr. 2.8: Složkové schéma dvojfázové zemní poruchy .....	10
Obr. 3.1: Rozložení intenzity el. pole a el. indukce v okolí podpěrného bodu.....	16
Obr. 3.2: Vodič nad zemí .....	18
Obr. 3.3: Náhradní model pro výpočet .....	18
Obr. 3.4: Znázornění dotykového a krokového napětí poblíž stožáru vedení .....	20
Obr. 3.5: Příklady mezi dotykového napětí .....	21
Obr. 3.6: Příпустné napětí $U_D$ na patě PB v závislosti na rezistivitě půdy .....	21
Obr. 3.7: Vliv uzemnění ekvipotenciálními kruhy .....	22
Obr. 4.1: Schéma pro měření rezistivity půdy Wennerovou metodou .....	26
Obr. 4.2: Měřicí souprava FLUKE 1625 .....	27
Obr. 4.3: Zapojení přístroje FLUKE 1625 pro měření Wennerovou metodou .....	28
Obr. 4.4: Připojení elektrod k měřicímu zařízení v praxi .....	29
Obr. 4.5: Uzemnění stožáru č. 9 – varianta 2K3.....	29
Obr. 4.6: Situační výkres širších vztahů se zákresem směru měření rezistivity půdy .	31
Obr. 4.7: Vývojový diagram návrhu uzemňovací soustavy .....	32
Obr. 5.1: Návrh umístění zemního lana na vedení .....	38
Obr. 5.2: Průřez a informace KZL typu AL3/A20SA 64/30-8,0 .....	40
Obr. 5.3: Připojení KZL na kotevní stožár se spojkou .....	42
Obr. 5.4: Připojení KZL na nosný stožár .....	43
Obr. 6.1: Uzemnění stožáru FeZn páskem.....	47
Obr. 6.2: Přívod uzemňovacího pásku.....	47
Obr. 6.3: Čtyři varianty návrhu paprskového uzemnění stožáru .....	50
Obr. 6.4: Příklady atypických variant uzemňovací soustavy .....	50
Obr. 7.1: Náhled karty Wennerova metoda – zadání rezistivity půdy.....	56

Obr. 7.2: Náhled karty Základy – zadání rozměrů základu.....	57
Obr. 7.3: Náhled karty: Zkratové proudy – zadání kroku vzdálenosti .....	57
Obr. 7.4: Náhled karty: Zkratové proudy – příspěvky rozvoden .....	57
Obr. 7.5: Volba parametrů z výběru.....	58
Obr. 7.6: Náhled karty Výpočet (levá část).....	59
Obr. 7.7: Náhled karty Výpočet (pravá část).....	59
Obr. 7.8: Algoritmus výpočetního nástroje pro návrh uzemnění stožáru .....	61
Obr. 7.9: Schéma stožárové konstrukce včetně strojeného zemniče při dotyku osoby	64
Obr. 7.10: Koeficient $K_{11}$ .....	65
Obr. 7.11: Postup výpočtu pásků po ekvivalentní odpor $R_E$ .....	68
Obr. 8.1: Graf průběhů $3I_0$ podél vedení.....	70
Obr. 8.2: Stožár typu soudek (vlevo) a atyp soudek s konzolou pro vn (vpravo).....	71
Obr. 9.1: Postup při uzemňování stožáru .....	80

## Tabulky

Tab. 2.1: Význam zkratk elektrického napětí .....	3
Tab. 2.2: Hodnoty zkratových proudů a výkonů na hladinách VVN a ZVN .....	7
Tab. 4.1: Vypočtené rezistivity půdy z naměřených hodnot .....	30
Tab. 4.2: Výpočet zemního odporu paty stožáru $R_z$ .....	30
Tab. 4.3: Hodnoty přechodového zemního odporu z revizní zprávy .....	31
Tab. 4.4: Hodnoty impedance lidského těla v závislosti na dotykovém napětí .....	34
Tab. 4.5: Hodnoty dovoleného dotykového napětí jako funkce trvání poruchy .....	35
Tab. 5.1: Ochranné úhly zemnicích lan .....	37
Tab. 5.2: Legenda k Obr. 5.3 .....	42
Tab. 5.3: Legenda k Obr. 5.4 .....	43
Tab. 6.1: Minimální rozměry materiálů zemničů .....	48
Tab. 6.2 Materiálové konstanty pro výpočet proudové zatížitelnosti .....	52
Tab. 6.3: Dovolené proudy pro různé průřezy pásků FeZn .....	52
Tab. 6.4: Dovolený trvalý proud základních profilů zemničů FeZn .....	53
Tab. 6.5: Činitelé pro přepočet trvalé zatížitelnosti na jinou konečnou teplotu .....	53
Tab. 7.1: Zabarvení buněk dle jejich funkce.....	55
Tab. 7.2: Vstupní parametry pro výpočet návrhu uzemnění stožáru .....	58
Tab. 7.3: Celková délka pásku pro paprskový zemnič .....	62
Tab. 7.4: Náhled karty Tisk – Výstupní tabulka pro tisk.....	63
Tab. 7.5: Počet paprsků zemniče podle zjištěné délky ideálního paprsku.....	67
Tab. 7.6: Koeficient využití podle počtu paprsků.....	67
Tab. 8.1: Porovnání tvaru uzemnění a vypočtených hodnot odporu .....	75
Tab. 10.1: Výpočet hodinové sazby za projektanta .....	86



## Seznam zkratek

DPS	Dokumentace pro provedení stavby
DSPS	Dokumentace skutečného provedení stavby
DÚR	Dokumentace pro územní rozhodnutí
EIA	Posouzení vlivů na životní prostředí (Environmental Impact Assessment)
FV	Fázový vodič
IT	Zapojení sítě – živé části izolované od země (z franz.: isolé terre)
KZL (OPGW)	Kombinované zemní lano (Optical ground wire)
L	Fázový vodič
M1 - M5	Měření 1 až 5 (pořadové číslo)
MS	Microsoft (MS Excel)
N	Neutrální vodič
NN	Nízké napětí
PB	Podpěrný bod
PD	Projektová dokumentace
PE	Uzemnění sítě (Protective earth)
PEN	Společný vodič PE a N
TD	Technická dokumentace
TN	Zapojení sítě – chráněná část s PE/PEN (z franz.: terre neutre)
TR	Transformovna (rozvodna)
TT	Zapojení sítě – jeden bod přímo uzemněný (z franz.: terre terre)
U, V, W (a, b, c)	Označení fází ve třífázové soustavě
ÚPD	Územně plánovací dokumentace
ÚTS	Územně technické studie
V	Vedení (doplňené o číslo linky vedení, např.: V1105)
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZL (Z)	Zemní lano
ZVN	Zvlášť vysoké napětí



## Seznam použitých technických norem

- I. ČSN EN 50341-1 (listopad 2002) – Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV – Část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace
- II. PNE 33 3300 (2. vydání) – Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV
- III. PNE 33 0000-4 (3. vydání) – Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny
- IV. PNE 33 3300-1 (prosinec 2017) – Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn
- V. ČSN EN 50341-3 Změna Z2 (březen 2007) – Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45 kV – Část 3: Soubor Národních normativních aspektů
- VI. PNE 33 3301 (3. vydání) – Elektrická venkovní vedení s napětím nad 1 kV AC do 45 kV včetně





# 1. ÚVOD

Během posledních let se začal klást čím dál větší důraz na bezpečnost v širokém spektru různých odvětví, ať už jde například o bezpečnost kybernetickou, požární, energetickou, jadernou, ale především i o bezpečnost a ochranu zdraví při práci. Vždy, a za každých podmínek, nám jde o co nejvíce spolehlivou ochranu před nejrůznějšími hrozbami a riziky. Stejně je tomu i v případě venkovních vedení elektrického napětí, kde očekáváme bezpečný a spolehlivý provoz sítí bez ohrožení osob, zvířat i majetku.

V minulosti jsme byli svědky nešťastných událostí na území České republiky i mimo něj, kdy došlo k úhynu skotu v okolí podpěrného bodu. To vyvolalo u široké veřejnosti pobouření, zda jsou elektroenergetické sítě provozovány bezpečně a zda nemůže být ohrožen i lidský život, pokud je člověk přítomen v blízkosti linek vedení nebo elektrických zařízení. I tuto oblast tedy postihlo významné zpřísnění požadavků na bezpečnost a navrhování uzemňování linek venkovního vedení se stalo náročnějším.

Tato práce se věnuje popisu problematiky spojené s uzemňováním stožárů na nejvyšších napěťových hladinách na území naší republiky. Jejím cílem je především navrhnout funkční software pro výpočet odporu základu stožáru, který taktéž doporučuje příslušné vhodné opatření pro vyhovující návrh uzemnění. Diplomová práce i výpočetní software vycházejí z platných českých technických norem a podnikových norem energetiky uvedených v seznamu použitých technických norem.

Výpočetní program je vytvořen pro společnost ELEKTROTRANS a.s., mezi jejíž hlavní činnosti patří výstavba, projekce a inženýring především vedení VVN a ZVN, ale také na hladině VN a NN.



## 2. VENKOVNÍ VEDENÍ VVN A ZVN

### 2.1. Rozdělení dle hladiny napětí

Hodnoty napětí jsou rozděleny podle maximální efektivní hodnoty sdruženého napětí a jsou jim přiřazeny české zkratky podle Tab. 2.1. V ČR je nejvyšší provozovaná hladina napětí venkovního vedení 400 kV, která se řadí do zvláště vysokého napětí, a je jedinou napěťovou hladinou zařazenou do této kategorie. Na hladině velmi vysokého napětí jsou v ČR provozovány linky vedení 220 kV a 110 kV. Nižší napěťové hladiny zde blíže nepopisují, jelikož nejsou předmětem této práce.

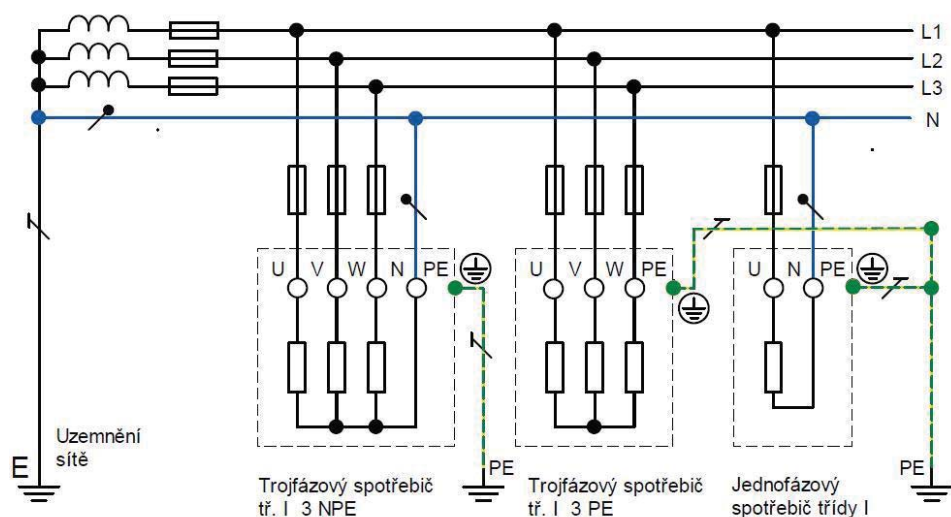
Zkratka	Význam zkratky	Hodnota sdruženého napětí
MN	malé napětí	do 50 V
NN	nízké napětí	do 1000 V
VN	vysoké napětí	do 52 kV
VVN	velmi vysoké napětí	do 300 kV
ZVN	zvláště vysoké napětí	do 800 kV
UVN	ultra vysoké napětí	nad 800 kV

Tab. 2.1: Význam zkratk elektrického napětí

### 2.2. Zapojení soustavy VVN a ZVN

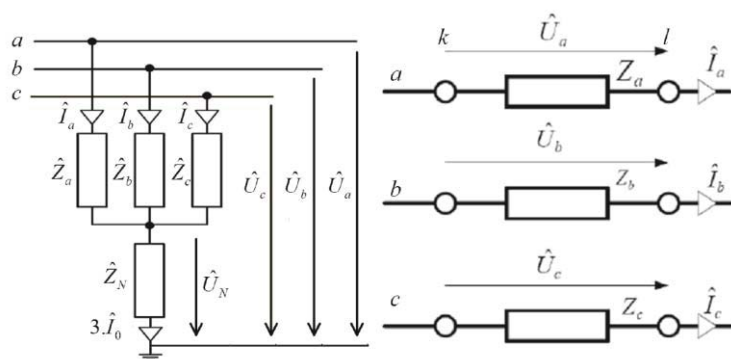
Linky vedení VVN a ZVN jsou provozovány jako soustava TT (Obr. 2.1), což určuje její charakter a způsob použité ochrany. Uzel sítě je přímo uzemněný (vinutí transformátoru zapojeno do uzemněné hvězdy) a neživé části jsou také přímo uzemněné.

Dalšími typy soustavy je síť IT (resp. ITr), jejíž uzel není účinně uzemněn (neuzemněno, nebo uzemněno přes tlumivku či odpor). Takovéto zapojení se využívá na hladině VN a má výhodu v tom, že při spojení jedné fáze se zemí nedochází ke zkratu, ale k takzvanému zemnímu spojení, a i při této poruše lze po omezenou dobu vedení provozovat. Na hladinách NN se pak jedná obecně o soustavu TN – jeden bod uzemněn a všechny neživé části připojeny k tomuto bodu – označovanou jako TN-C-S, dále dělenou na síť TN-C se společným vodičem PEN (vodič plní funkci středního i ochranného vodiče zároveň) a síť TN-S s rozdělenými vodiči PE (ochranný vodič) a N (střední vodič).


 Obr. 2.1: Zapojení soustavy TT <sup>1</sup>

### 2.3. Typy poruch

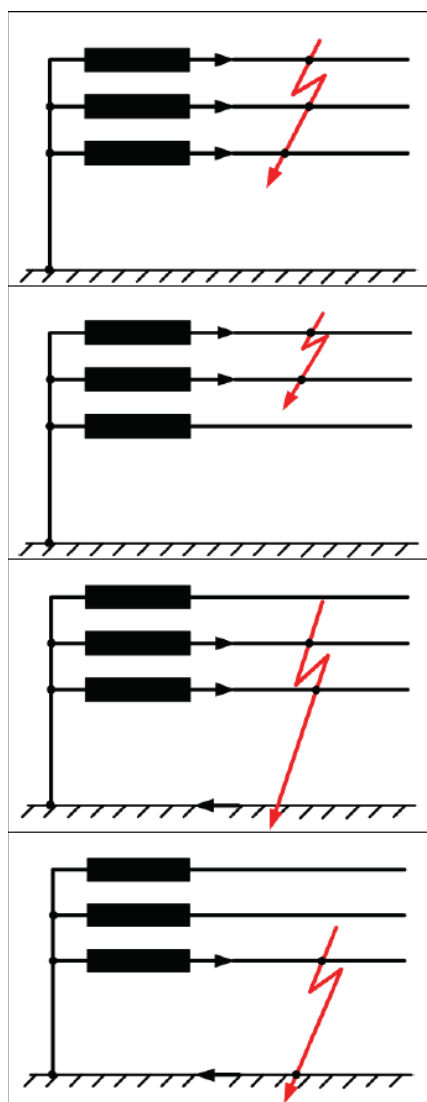
U venkovních vedení rozlišujeme poruchy podélné a příčné (Obr. 2.2). Zatímco poruchy podélné nastávají na jedné fázi a jsou příčinou nadměrného zatěžování zařízení, příčné poruchy mezi větvemi nebo zemí jsou poruchy zkratové a mohou znamenat velmi rychlou destrukci zařízení.


 Obr. 2.2: Obecná příčná (vlevo) a podélná porucha (vpravo) v trojfázové soustavě <sup>2</sup>

<sup>1</sup> KALÁB, Pavel a STEINBAUER, Miloslav: Bezpečnost v elektrotechnice. In: FEEC UTEE [online]. VUT Brno, 2011, [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: <http://www.utec.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/2016/10/BBZ.pdf>

<sup>2</sup> TLUSTÝ J., ŠVEC J., BANNERT P., BRETTSCHEIDER Z., KOCUR Z., MAREČEK P., MÜLLER Z., SÝKORA T.: *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*, České vysoké učení technické v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04939-6, str. 246.

Rozlišujeme čtyři základní druhy příčných poruch v třífázové soustavě (Obr. 2.3) a dělíme je na souměrné (pouze trojfázová symetrická porucha) a nesouměrné zkraty (ostatní typy poruch). Každá porucha vykazuje jiné parametry zkratových proudů a pro uzemňování je důležitá hodnota netočivé složky zkratového proudu  $I_0$ , která vzniká pouze u poruchy dvojfázové zemní a jednofázové.



#### **Trojfázová symetrická porucha:**

Spojení všech tří fází

Pravděpodobnost výskytu:

- hladina VVN < 1 %

#### **Dvojfázová porucha:**

Spojení libovolných dvou fází mezi sebou

Pravděpodobnost výskytu:

- 110 kV < 5 %
- 220 kV < 1 %

#### **Dvojfázová zemní porucha:**

Spojení libovolných dvou fází se zemí

Pravděpodobnost výskytu:

- 110 kV < 4 %
- 220 kV < 6 %

#### **Jednofázová porucha:**

Spojení kterékoliv jedné fáze se zemí

Nejtypičtější porucha

Pravděpodobnost výskytu:

- hladina VVN > 90 %

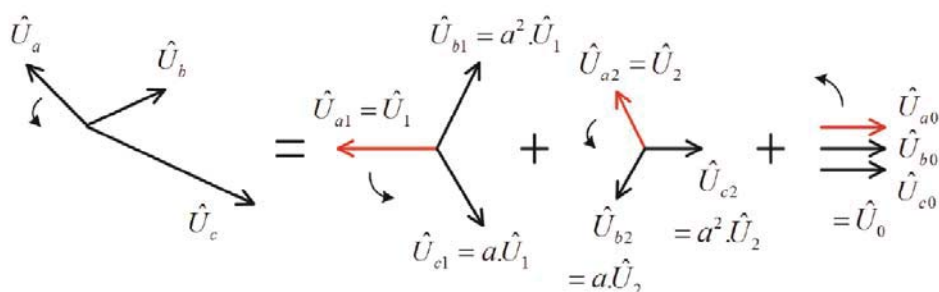
Obr. 2.3: Typy příčných poruch v 3f soustavě<sup>3</sup>

<sup>3</sup> ŠVEC, Jan: *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2 (A1B15EN2)*, FEL ČVUT v Praze, 2015.

### 2.3.1. Složky trojfázové střídavé soustavy pro analýzu poruchy

Pro vysvětlení netočivé složky a jejího uplatnění při zemní poruše postačí krátký náhled do problematiky složkového systému. Střídavou soustavu lze rozložit do tří souměrných složek označovaných číselnými indexy – sousledná (1), zpětná (2), netočivá (0).

Na Obr. 2.4 je znázorněn rozklad třífázové napěťové soustavy (a, b, c) do symetrických složek (1, 2, 0). Sousledná složka má význam symetrického třífázového zdroje s dohodou stanoveným sledem fází (roztáčející motor v kladném smyslu směru otáčení), zpětná složka má význam symetrického třífázového zdroje s opačným sledem fází (roztáčející motor v záporném smyslu) a netočivá složka má význam jednofázového zdroje zapojeného do všech fází (motor neroztáčející).<sup>4</sup>



Obr. 2.4: Znázornění dekompozice do systému symetrických složek<sup>5</sup>

Můžeme tedy psát napěťové rovnice souměrné složkové soustavy:

$$\hat{U}_a = \hat{U}_{a1} + \hat{U}_{a2} + \hat{U}_{a0} \quad (\text{V}) \quad (2.1)$$

$$\hat{U}_b = \hat{U}_{b1} + \hat{U}_{b2} + \hat{U}_{b0} \quad (\text{V}) \quad (2.2)$$

$$\hat{U}_c = \hat{U}_{c1} + \hat{U}_{c2} + \hat{U}_{c0} \quad (\text{V}) \quad (2.3)$$

Potom s využitím fázového posuvu pro referenční fázi  $a$ :

$$\hat{U}_a = \hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}) \quad (2.4)$$

$$\hat{U}_b = \hat{a}^2 \hat{U}_1 + \hat{a} \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}) \quad (2.5)$$

$$\hat{U}_c = \hat{a} \hat{U}_1 + \hat{a}^2 \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}) \quad (2.6)$$

<sup>4</sup> TLUSTÝ J., ŠVEC J., BANNERT P., BRETTSCHEIDER Z., KOCUR Z., MAREČEK P., MÜLLER Z., SÝKORA T.: *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*, České vysoké učení technické v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04939-6, str. 244.

<sup>5</sup> Tamtéž.

kde pro komplexní konstantu platí:

$$\hat{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (-) \quad (2.7)$$

$$\hat{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (-) \quad (2.8)$$

Výpočty ve složkových soustavách významně zjednodušují analyzované obvody s poruchou a poskytují tak efektivní řešení symetrických i nesymetrických poruch. Při souměrně zatížené soustavě se uplatňuje pouze sousledná složka (zpětná a netočivá rovná nule), platí také při trojfázové symetrické poruše. Běžnějšími poruchami jsou však poruchy nesymetrické, a právě pro jejich analýzu nacházíme hlavní využití složek. Již při nesouměrné proudové zatíženosti soustavy (aniž by došlo k poruše) se uplatní mimo souslednou složku také zpětná složka. Pro dimenzování uzemnění je důležitá složka netočivá, kdy pro výpočet zkratového proudu tekoucího zemí v místě poruchy je uvažována právě trojnásobná hodnota netočivé složky proudu  $I_0$ .

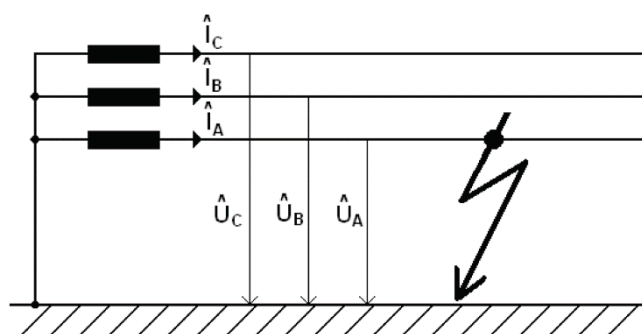
V této práci však není nutné se dále věnovat konkrétním výpočtům složkové soustavy. Řekněme si jen, že takovéto výpočty jsou už pro velkou nepřesnost vstupních hodnot jen velmi přibližné a výsledek můžeme považovat jen za blízký skutečnosti, avšak pro další potřeby plně postačující. Pro představu uvádím v Tab. 2.2 řádové hodnoty, kterých mohou dosahovat zkratové proudy, respektive zkratové výkony na konkrétních hladinách VVN a ZVN v ČR. Průběh zkratu má přechodný děj a rozlišujeme při jeho analýze mnoho hodnot, jako například počáteční rázový zkratový proud (výkon), jenž nabývá nejvyšších hodnot, nebo také ustálený zkratový proud, jehož efektivní hodnota je konstantní po odeznění přechodového děje. Mimo střídavé (symetrické) složky je součástí zkratu také složka stejnosměrná (aperiodická).

Napěťová hladina	Zkratový proud	Zkratový výkon
400 kV	9 - 45 kA*	6 000 - 30 000 MVA
220 kV	2 - 30 kA	2 000 - 12 000 MVA
110 kV	1 - 15 kA	100 - 3 000 MVA
* Až 60 kA u nově rekonstruovaných rozvodů		

Tab. 2.2: Hodnoty zkratových proudů a výkonů na hladinách VVN a ZVN

### 2.3.2. Jednofázová porucha

Nyní se zaměříme na nejčastější poruchu na hladině VVN a ZVN, kterou je jednofázový zkrat. Dochází k němu při spojení jedné fáze se zemí (Obr. 2.5). V tomto stavu si můžeme představit fázi A, na které je právě zkrat, jako uzeměnou, jelikož proud fází A vtéká do země. Odtud vycházejí tři charakteristické rovnice (2.9) pro tento stav.



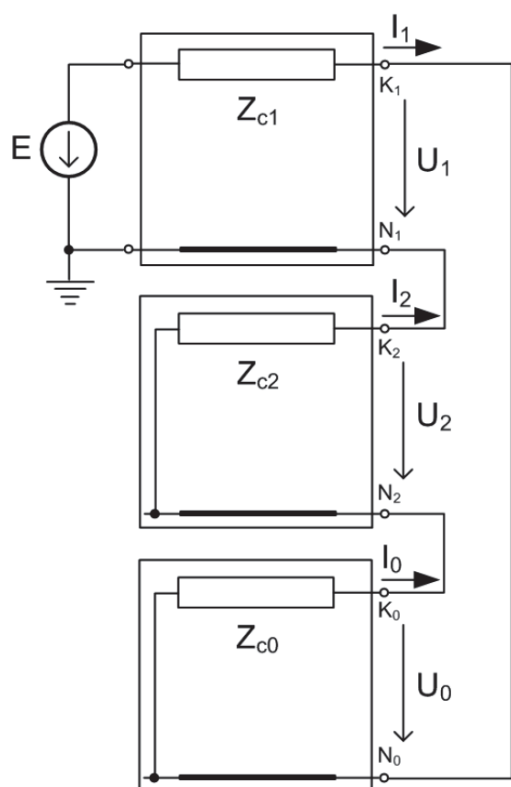
Charakteristické rovnice: (2.9)

$$\hat{U}_A = 0 \text{ V}$$

$$\hat{I}_B = 0 \text{ A}$$

$$\hat{I}_C = 0 \text{ A}$$

Obr. 2.5: Jednofázový zkrat <sup>6</sup>



Složkové schéma pro analýzu jednotlivých složek je na Obr. 2.6, kde E je náhrada zdroje napětí,  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$ ,  $Z_{c0}$  jsou jednotlivé impedance příslušné složky soustavy. Stejně platí pro indexy napětí  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_0$  a proudy  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$ .

Při jednofázové poruše jsou v náhradním schématu zapojeny všechny složky do série, odkud pak vychází další. Při této poruše se tedy uplatní všechny tři složky, z nichž nás zajímá pro zkoumání uzemnění již zmiňovaná složka netočivá, konkrétně proud  $I_0$ .

Obr. 2.6: Složkové schéma jednofázové poruchy <sup>7</sup>

<sup>6</sup> ŠVEC, Jan: *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2 (A1B15EN2)*, FEL ČVUT v Praze, 2015.

<sup>7</sup> Tamtéž.



Soustava rovnic popisujících jednofázový zkrat:

$$\hat{E} = \hat{Z}_1 \hat{I}_1 + \hat{U}_1 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{V}) \quad (2.10)$$

$$0 = \hat{Z}_2 \hat{I}_2 + \hat{U}_2 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{V}) \quad (2.11)$$

$$0 = \hat{Z}_0 \hat{I}_0 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{V}) \quad (2.12)$$

$$0 = \hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V}) \quad (2.13)$$

$$0 = \hat{a}^2 \hat{I}_1 + \hat{a} \hat{I}_2 + \hat{I}_0 \quad (\text{A}; -, \text{A}, -, \text{A}, \text{A}) \quad (2.14)$$

$$0 = \hat{a} \hat{I}_1 + \hat{a}^2 \hat{I}_2 + \hat{I}_0 \quad (\text{A}; -, \text{A}, -, \text{A}, \text{A}) \quad (2.15)$$

Můžeme počítat velikost složek proudu s využitím maticového zápisu:

$$(I_{120}) = (T^{-1})(I_{ABC}) = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_A \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_A \\ \hat{I}_A \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

A vzhledem k zapojení složek při jednofázovém zkratu do série platí:

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \hat{I}_0 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0} \quad (\text{A}; \text{V}, \Omega) \quad (2.17)$$

Velikost netočivé složky proudu při jednofázové poruše je závislá přímo úměrně na napěťové hladině a nepřímo úměrně na součtu impedancí všech tří složek (sousedné, zpětné i netočivé).

Z důvodu platnosti vztahu (2.17), že jednotlivé složky proudu jsou si rovny, můžeme psát rovnici pro proudy jednotlivých fází, kde za proudy jednotlivých složek dosadíme složku souslednou.

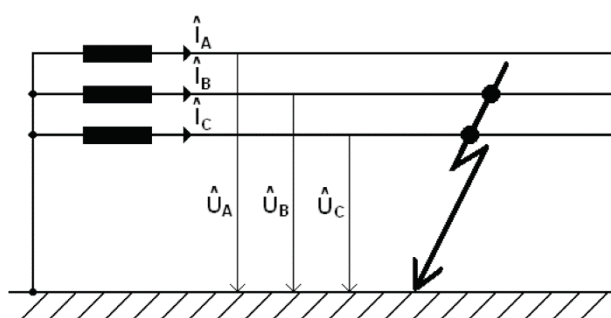
$$(I_{ABC}) = (T)(I_{120}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \\ \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3\hat{I}_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Pro velikost proudu fází A dostáváme:

$$\hat{I}_A = \frac{3\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0} \quad (\text{A}; \text{V}, \Omega) \quad (2.19)$$

### 2.3.3. Dvojfázová zemní porucha

Druhým typem poruchy, kdy se projeví vliv netočivé složky proudu  $I_0$ , je dvojfázový zemní zkrat (Obr. 2.7). Na tuto poruchu pohlížíme jako kdyby byly fáze B a C spojeny do série a uzemněny. Napětí na těchto fázích bude tedy nulové a pro tento typ poruchy platí tři charakteristické rovnice (2.20).



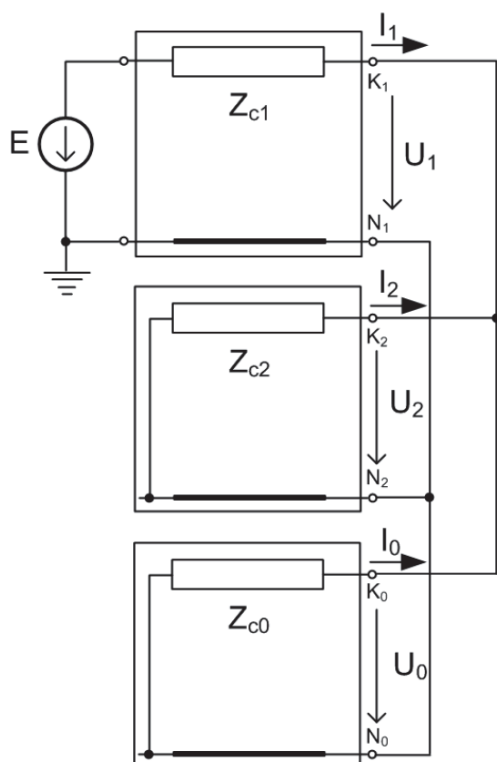
Charakteristické rovnice: (2.20)

$$\hat{U}_B = \hat{U}_C = 0 \text{ V}$$

$$\hat{I}_B = -\hat{I}_C \text{ (A)}$$

$$\hat{I}_A = 0 \text{ A}$$

Obr. 2.7: Dvojfázový zemní zkrat <sup>8</sup>



Složkové schéma soustavy při dvojfázové zemní poruše je na Obr. 2.8. Od předchozího případu (jednofázové poruše) se liší tak, že místo všech tří složek zapojených do série jsou všechny tři složky vůči sobě zapojeny paralelně.

Již odtud může být patrné, že jednotlivé složky proudu se nebudou rovnat, a budou tedy mít jinou velikost.

Obr. 2.8: Složkové schéma dvojfázové zemní poruchy <sup>9</sup>

<sup>8</sup> ŠVEC, Jan: *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2 (A1B15EN2)*, FEL ČVUT v Praze, 2015.

<sup>9</sup> Tamtéž.

Soustava rovnic popisujících dvojfázový zemní zkrat:

$$\hat{E} = \hat{Z}_1 \hat{I}_1 + \hat{U}_1 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{V}) \quad (2.21)$$

$$0 = \hat{Z}_2 \hat{I}_2 + \hat{U}_2 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{V}) \quad (2.22)$$

$$0 = \hat{Z}_0 \hat{I}_0 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{V}) \quad (2.23)$$

$$0 = \hat{a}^2 \hat{U}_1 + \hat{a} \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}; -, \text{V}, -, \text{V}, \text{V}) \quad (2.24)$$

$$0 = \hat{a} \hat{U}_1 + \hat{a}^2 \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \quad (\text{V}; -, \text{V}, -, \text{V}, \text{V}) \quad (2.25)$$

$$0 = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_0 \quad (\text{A}; \text{A}, \text{A}, \text{A}) \quad (2.26)$$

V tomto případě nám ke zjištění velikosti složkových proudů postačí jednoduchý pohled na složkové schéma s minimální znalostí teorie obvodů. S využitím rovnice (2.26), Ohmova zákona a Kirchhoffových zákonů se dopočítáme následujících složek poruchového proudu.

Sousledná složka proudu:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \frac{\hat{Z}_0 \hat{Z}_2}{\hat{Z}_0 + \hat{Z}_2}} \quad (\text{A}; \text{V}, \Omega) \quad (2.27)$$

Zpětná složka proudu:

$$\hat{I}_2 = -\hat{I}_1 \frac{\hat{Z}_0}{\hat{Z}_0 + \hat{Z}_2} \quad (\text{A}; \text{A}, \Omega, \Omega) \quad (2.28)$$

Netočivá složka proudu:

$$\hat{I}_0 = -\hat{I}_1 \frac{\hat{Z}_2}{\hat{Z}_0 + \hat{Z}_2} \quad (\text{A}; \text{A}, \Omega, \Omega) \quad (2.29)$$

Analýza velikosti poruchových proudů postižených fází by obnášela delší maticové počítání s jednotlivými složkami a dopracovali bychom se k následujícím hodnotám.

Velikost proudu postiženou fází B:

$$\hat{I}_B = \frac{\hat{E}(\hat{Z}_0(\hat{a}^2 - \hat{a}) + \hat{Z}_2(\hat{a}^2 - 1))}{\hat{Z}_1 \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 \hat{Z}_1 + \hat{Z}_0 \hat{Z}_2} \quad (\text{A}; \text{V}, \Omega) \quad (2.30)$$

Velikost proudu postiženou fází C:

$$\hat{I}_C = \frac{\hat{E}(\hat{Z}_0(\hat{a} - \hat{a}^2) + \hat{Z}_2(\hat{a} - 1))}{\hat{Z}_1 \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 \hat{Z}_1 + \hat{Z}_0 \hat{Z}_2} \quad (\text{A}; \text{V}, \Omega) \quad (2.31)$$

### 2.3.4. Příčiny a následky zkratu

Zkrat, neboli spojení nakrátko, je nežádoucím poruchovým stavem, kdy elektrický proud prochází mimo požadovanou cestu a nazýváme ho proudem poruchovým. Zkrat vzniká spojením fází navzájem nebo fáze (případně fází) se zemí v soustavě s uzemněným uzlem.

V případě venkovního vedení můžeme zkrat definovat jako příčnou poruchu, kdy dojde k prudké havarijní změně v elektrizační soustavě<sup>10</sup> (ES) a je provázena mnoha přechodnými jevy. V místě zkratu navíc vznikají přechodné odpory, které jsou dány součtem odporu vzniklého oblouku a odporu ostatních částí cesty zkratového proudu, kdy se navíc délka oblouku při zkratu mění, čímž se mění i odpor oblouku. Proto je přesné určení hodnoty přechodných odporů obtížné. Při výpočtech zkratového proudu  $I_k$  pro účely dimenzování elektrických zařízení se přechodné odpory zanedbávají a analyzují se tzv. dokonalé zkraty.<sup>11</sup>

#### Hlavní příčiny zkratu:

- poruchy izolace (způsobené především přepětím),
- přímé údery blesku,
- zestárnutí izolačních materiálů,
- přímé poškození vedení,
- extrémní povětrnostní podmínky.

#### Následky zkratu:

- snížení celkové impedance postižené části sítě,
- zvětšují se zkratové proudy  $I_k$ ,
- napětí v místech zkratu se sníží,
- účinky  $I_k$  způsobují oteplení zařízení a silové namáhání,
- problémy s vypínáním  $I_k$  (elektrický oblouk),
- porušení synchronismu paralelně spolupracujících ES,
- rušení sdělovacích vedení nacházejících se v oblasti ovlivněné poruchou,
- vznik poruchových dotykových napětí.

---

<sup>10</sup> Elektrizační soustava je vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení, a systémů měřicích, ochranných, řídicích, zabezpečovacích, informačních a telekomunikačních technik.

<sup>11</sup> ŠVEC, Jan: *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2 (A1B15EN2)*, FEL ČVUT v Praze, 2015.

## 3. UZEMŇOVÁNÍ VENKOVNÍCH VEDENÍ

### 3.1. Účel uzemňování

Veškerá elektronická zařízení, elektrické přístroje, stroje a jiná elektrická zařízení na jakékoliv hladině napětí musí být především bezpečná pro osoby, které provádí jejich obsluhu, ale také pro všechny ostatní osoby, které mohou s danými zařízeními manipulovat nebo se pohybovat v jejich blízkosti. Pro zařízení na nízkých napěťových hladinách do 1000 V jsou stanovena bezpečná napětí, rozdělená podle prostředí a dotyku živé, či neživé části. Také existují určité stupně ochrany, které známe z domácích spotřebičů. U venkovních vedení takovéto hodnoty nebo ochrany lze stanovit (resp. zrealizovat) jen velmi těžko. Problematika u vysokého napětí totiž nabírá nových rozměrů a to, s čím se zde můžeme setkat, u nízkého napětí nepozorujeme. Jde především o možnost přeskočení napětí na velké vzdálenosti, což může ohrozit osoby a zvířata na zdraví, v horších případech dokonce na životě. A proto je nutné dodržovat veškeré bezpečnostní předpisy, abychom ochránili to nejcennější – život.

Pro venkovní vedení můžeme při známé elektrické pevnosti vzduchu  $E_p$ <sup>12</sup> vypočítat přeskovkové vzdálenosti pro jednotlivé hladiny napětí. Navíc mohou vzdálenost mezi živou a neživou částí překlenout určité vnější vlivy, jako je například ptactvo nebo padlý strom. Pak může nastat situace, kdy dojde k přeskočení napětí na neživou část ať už krátkodobě, nebo dlouhodobě vytvořením elektrického oblouku a neživá část (v našem případě stožárová konstrukce) se stane částí živou a svede poruchový proud<sup>13</sup> do země a nastává tzv. zkrat. Pro ochranu majetku i osob a zvířat je nutné věnovat zvýšenou pozornost návrhu uzemňovacích soustav stožárů, aby byly poruchové proudy bezpečně svedeny do země.

---

<sup>12</sup> Za příznivých podmínek uvažujeme elektrickou pevnost vzduchu  $E_p = 3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , avšak hodnota je velmi závislá na prostředí (vlivu počasí), především na vlhkosti a teplotě vzduchu.

<sup>13</sup> Poruchový proud je proud, který vyvolá vodivé spojení mezi fázovým vodičem a zemí.

### 3.2. Princip uzemňování

Principem uzemňování je dosáhnout toho, aby byly všechny neživé části bezpečně odděleny od živých částí<sup>14</sup> a dosahovaly potenciálu země. Z definice elektrického potenciálu  $\varphi$  je patrné, že jeho velikost klesá se vzdáleností.

Elektrický potenciál:

$$\varphi = -\int \mathbf{E} \, d\mathbf{r} \quad (\text{V}; \text{V} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}) \quad (3.1)$$

kde:

$\mathbf{E}$ ...intenzita elektrického pole

$d\mathbf{r} = (dx, dy, dz)$ ...element dráhy  $r$  v určitém směru v prostoru

Elektrický potenciál je vždy rozložen spojitě. Kdyby tomu tak nebylo a docházelo ke skokové změně potenciálu, musela by v tomto bodě působit intenzita elektrického pole o nekonečné velikosti, což je nemožné.

Oblasti s konstantním potenciálem se nazývají ekvipotenciální. Pro tuto vlastnost elektrostatického pole můžeme využít matematický operátor gradient. Gradient skalární funkce v určitém bodě je definován jako vektor, který ukazuje směr největšího růstu (kladné změny) skalární funkce, a jeho velikost představuje velikost změny skalární funkce na jednotku délky při pohybu ve směru největšího spádu.

Znaménko mínus souvisí s definicí intenzity jako síly působící na kladný jednotkový náboj a potenciálu jako potenciální energie, kterou má jednotkový kladný náboj v elektrostatickém poli.

Obecný vztah mezi intenzitou elektrického pole a potenciálem:

$$\mathbf{E} = -\text{grad}(\varphi) \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}; \text{m}^{-1}, \text{V}) \quad (3.2)$$

kde vztahy pro gradient skalární funkce jsou závislé na volbě souřadné soustavy, přičemž rozměr gradientu je vždy  $\text{m}^{-1}$ .

---

<sup>14</sup> Živou částí rozumíme tu část, která je pod elektrickým napětím na určitém potenciálu a podílí se na přenosu elektrického proudu. Neživými částmi jsou pak ty prvky zařízení, které za bezporuchového stavu nejsou pod napětím, a právě takové části zpravidla připojujeme na nulový potenciál (potenciál země).

V kartézské soustavě:

$$\mathit{grad} \varphi = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (3.3)$$

Ve válcové soustavě:

$$\mathit{grad} \varphi = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \Phi}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (3.4)$$

Ve sférické soustavě:

$$\mathit{grad} \varphi = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial \varphi}{\partial \Phi}, \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} \right) \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (3.5)$$

### 3.2.1. Rozložení potenciálu elektrického pole v okolí podpěrného bodu

Pro znázornění rozložení potenciálu elektrického pole v okolí podpěrného bodu můžeme využít Gaussovu větu pro elektrickou indukci, která nám říká, že tok vektoru elektrické indukce uzavřenou plochou je roven pouze volnému náboji uvnitř plochy:

$$\oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_0 \quad (\text{C} \cdot \text{m}^{-2}, \text{m}^2; \text{C}) \quad (3.6)$$

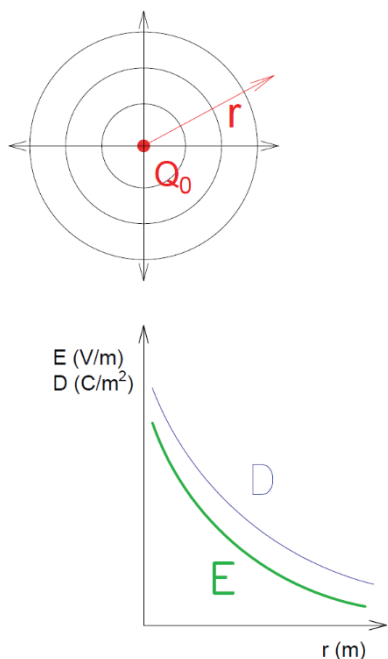
kde:

$\mathbf{D}$ ...elektrická indukce

$S$ ...plocha

$Q_0$  ...volný elektrický náboj

Uvažujeme zjednodušené podmínky, kterými jsou homogenita půdy a kruhový půdorys podpěrného bodu, na jehož pomyslném povrchu považujeme symetrické rozložení náboje a jehož plochu považujeme za jeden bod. S těmito podmínkami jsou plochy intenzity elektrického pole sférické se středem v bodě, kde je náboj umístěn, a můžeme tak počítat rozložení elektrického pole ve vzdálenosti  $r$  od podpěrného bodu (Obr. 3.1).



Ve vzdálenosti  $r$  je povrch obalové sférické plochy vyjádřen známým vzorcem pro obsah kruhu:

$$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (\text{m}^2; -, \text{m}) \quad (3.7)$$

Z Gaussovy věty po dosazení plochy vyplývá:

$$Q_0 = \mathbf{D}(r) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (\text{C}; \text{C} \cdot \text{m}^{-2}, -, \text{m}) \quad (3.8)$$

Pro elektrickou indukci platí:

$$\mathbf{D}(r) = \frac{Q_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{C} \cdot \text{m}^{-2}; \text{C}, \text{m}) \quad (3.9)$$

Obr. 3.1: Rozložení intenzity el. pole a el. indukce v okolí podpěrného bodu

A tedy pro intenzitu elektrického pole můžeme psát vztah:

$$\mathbf{E}(r) = \frac{\mathbf{D}(r)}{\varepsilon} = \frac{Q_0}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}; \text{C} \cdot \text{m}^{-2}, \text{F} \cdot \text{m}^{-1}; \text{C}, -, \text{F} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}) \quad (3.10)$$

kde:

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ...permitivita vakua

$\varepsilon_r$ ...relativní permitivita materiálu<sup>15</sup> (-)

Intenzita elektrického pole v místě bodového náboje je limitě rovna nekonečnu, protože náboj, který by byl umístěn v jednom bodě ve skutečnosti neexistuje:

$$\mathbf{E}(r = 0) \rightarrow \infty \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (3.11)$$

S rostoucí vzdáleností  $r$  od podpěrného bodu intenzita elektrického pole klesá a ve velké vzdálenosti vymizí:

$$\mathbf{E}(r = \infty) \rightarrow 0 \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (3.12)$$

<sup>15</sup> Relativní permitivita je bezrozměrná veličina vyjadřující podíl absolutní permitivity daného materiálu a vakua, například pro vzduch je  $\varepsilon_r = 1,00054$ .



### 3.2.2. Elektrické pole pod vedením

Pro dimenzování uzemnění není problematika elektrického pole pod vedením stěžejní a neovlivňuje přímo potřebu a rozsah zemnění. Nicméně jistou fyzikální souvislost zde v podobě šíření elektrického pole najít můžeme, a tak krátce přiblížím i toto téma. Myslet si totiž, že se nevystavujeme působení elektrického pole, i když se nacházíme pod elektrickým vedením (byť jsou vodiče vysoko nad námi), nebo jen v jeho blízkosti, by bylo velmi mylné.

Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením číslo 291/2015 Sb., ve znění pozdějších předpisů, pak stanovuje nejvyšší přípustné hodnoty neionizujícího záření. Neionizujícím zářením se v tomto případě považuje statická elektrická a magnetická a časově proměnná elektrická, magnetická a elektromagnetická pole a elektromagnetická záření z umělých zdrojů s frekvencemi od 0 Hz do  $1,7 \cdot 10^{15}$  Hz. Pro venkovní vedení ( $f = 50$  Hz) platí nejvyšší přípustné hodnoty modifikované intenzity elektrického pole  $E_{mod}^{16} = 1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  pro zaměstnance a  $E_{mod} = 0,2 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  pro fyzické osoby v komunálním prostředí. Tyto hodnoty nesmí být překročeny v žádném časovém okamžiku.<sup>17</sup>

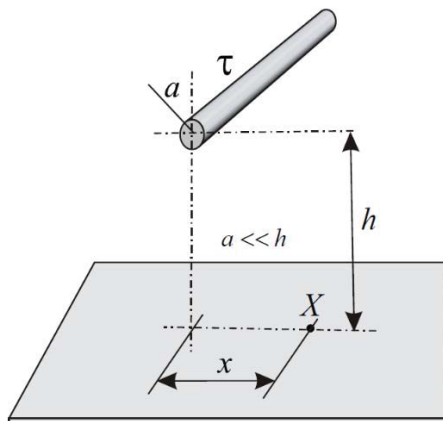
Podívejme se, jaký je vliv fázových vodičů (respektive jimi protékajícího proudu) na velikost intenzity elektrického pole na povrchu země. Pro výpočet využijeme tzv. metodu zrcadlení. Ta umožňuje řešit elektrické pole nabitých objektů, které se nacházejí nad elektricky vodivými rovinami, kam z hlediska chování řadíme i povrch země. Při metodě zrcadlení vycházíme z podmínky, že siločáry elektrického pole vstupují do vodivé roviny kolmo, nebo také můžeme říci, že povrch vodiče je ekvipotenciální plocha. Jedna podmínka vychází ze druhé a naopak. V matematickém modelu pak reprezentujeme vliv vodivé roviny stejně velkým a symetricky umístěným nábojem.

---

<sup>16</sup> Modifikovaná intenzita elektrického pole indukovaného v tkáni je intenzita elektrického pole indukovaného v tkáni modifikovaná lineárním filtrem s frekvenční charakteristikou.

<sup>17</sup> Nařízení vlády č. 291/2015 Sb. – *Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.*

Ukažme si na zjednodušeném příkladu pouze jednoho vodiče (Obr. 3.2), jaká bude intenzita elektrického pole v bodě  $X$  na zemi v blízkosti  $x$  pod vodičem nabitým na lineovou hustotu náboje  $\tau$ . Vodič má poloměr  $a$ , přičemž předpokládáme, že velikost  $a$  je daleko menší, než výška vodiče nad zemí  $h$ .



Obr. 3.2: Vodič nad zemí<sup>18</sup>

Liniová hustota náboje je obdoba bodového náboje, která je však rozložena do délky:

$$\tau = \frac{Q}{l} \quad (\text{C} \cdot \text{m}^{-1}; \text{C}, \text{m}) \quad (3.13)$$

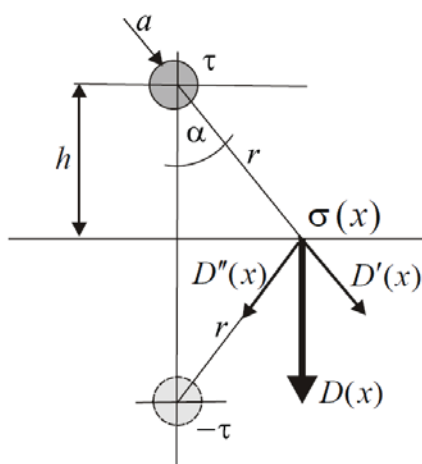
kde:

$\tau$ ...liniová hustota náboje,  
 $Q$ ...elektrický náboj vodiče,  
 $l$ ...délka vodiče.

Pro výpočet využijeme náhradní model metody zrcadlení (Obr. 3.3). Vliv roviny je zde respektován fiktivním vodičem umístěným na druhé straně roviny (zrcadlově), který je nabit stejně velkým nábojem.

Vzdálenost fázového vodiče k místu  $X$  vyjádříme z obrázku:

$$r = \sqrt{h^2 + x^2} \quad (\text{m}; \text{m}, \text{m}) \quad (3.14)$$



Elektrická indukce vyvolaná fázovým vodičem má velikost:

$$D'(x) = \frac{\tau}{2\pi r} \quad (\text{C} \cdot \text{m}^{-2}; \text{C} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}) \quad (3.15)$$

Elektrická indukce vyvolaná obrazem vodiče má velikost:

$$D''(x) = \frac{\tau}{2\pi r} \quad (\text{C} \cdot \text{m}^{-2}; \text{C} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}) \quad (3.16)$$

Obr. 3.3: Náhradní model pro výpočet<sup>19</sup>

<sup>18</sup> PANKRÁC, Vítězslav: *Přednášky z předmětu Elektromagnetické pole (A1B17EMP)*, ČVUT FEL v Praze, 2015.

<sup>19</sup> Tamtéž.

Výsledná indukce je vektorový součet dílčích indukcí  $\mathbf{D}(x) = \mathbf{D}'(x) + \mathbf{D}''(x)$  a tedy:

$$\mathbf{D}(x) = 2 \frac{\tau}{2\pi r} \cos(\alpha) \quad (\text{C}\cdot\text{m}^{-2}; \text{C}\cdot\text{m}^{-1}, -, \text{m}, -) \quad (3.17)$$

Po úpravě, přičemž  $\cos(\alpha) = \frac{h}{r}$ , dostáváme:

$$\mathbf{D}(x) = \frac{\tau h}{\pi(x^2+h^2)} \quad (\text{C}\cdot\text{m}^{-2}; \text{C}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}, -, \text{m}, \text{m}) \quad (3.18)$$

Přímo pod vodičem je hustota náboje:

$$\mathbf{D}(x = 0) = \frac{\tau}{\pi h} \quad (\text{C}\cdot\text{m}^{-2}; \text{C}\cdot\text{m}^{-1}, -, \text{m}) \quad (3.19)$$

Intenzita elektrického pole je závislá na permitivitě. Pro intenzitu na povrchu země ve vzdálenosti  $x$  od fázového vodiče platí:

$$\mathbf{E}(x) = \frac{\mathbf{D}(x)}{\varepsilon_0} \quad (\text{V}\cdot\text{m}^{-1}; \text{C}\cdot\text{m}^{-2}, \text{F}\cdot\text{m}^{-1}) \quad (3.20)$$

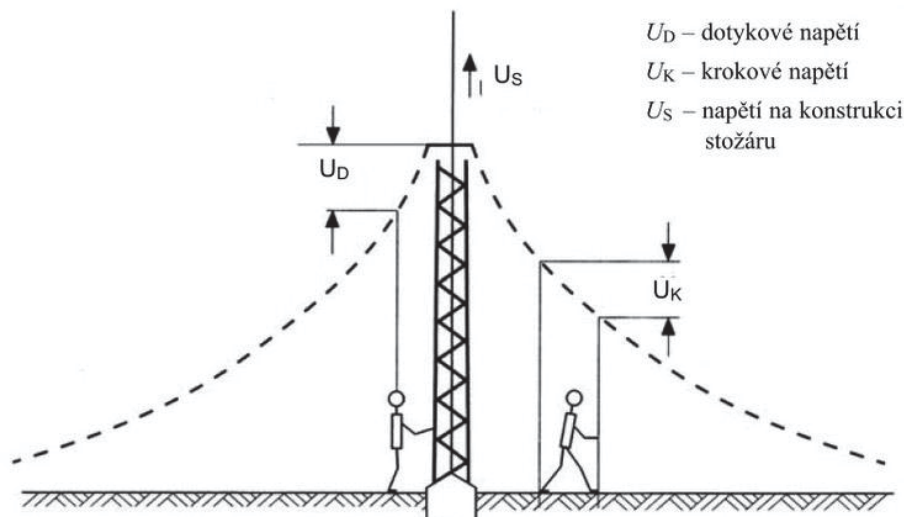
Obdobně bychom postupovali při výpočtu pod vedením se třemi fázovými vodiči, přičemž bychom na závěr sečetli dílčí příspěvky každého z vodičů.

### 3.3. Zásady uzemňování

V posledních letech se přístup k zásadám uzemňování změnil, což se promítlo i do technických norem. Dříve se normy zaměřovaly na technické podmínky styku venkovních vedení s pozemními komunikacemi, dalšími vedeními, vodami, vodohospodářskými díly a zařízeními, veřejnými plochami a jinými objekty, jak popisuje dnes již neplatná norma ČSN 33 3300 – *Stavba venkovních silových vedení* z roku 1983. Technické podmínky neřešily kompletní problematiku ochrany osob a věcí před účinky elektrostatické indukce, elektromagnetické indukce a dlouhodobého působení elektrického pole. Ochrana před nebezpečným dotykovým napětím se pak věnovala zvláštní norma. Kládla se tedy důraz především na bezpečné vzdálenosti při nepřízni počasí (vítr, námrazek). Dnes se však na uzemňování pohlíží v první řadě z hlediska bezpečnosti.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> ČSN 33 3300 – *Elektrotechnické předpisy. Stavba venkovních silových vedení*, str. 52 - 53, 1986.

Normy říkají, že každý podpěrný bod, který je z vodivého materiálu, je nutné uzemňovat, a to především z důvodu bezpečnosti osob, zvířat, ale také aby nedocházelo ke hmotným škodám na majetku. Proto je nutné dodržet dovolené hodnoty dotykových a krokových napětí (Obr. 3.4), které vyplývají z poruchových proudů. Při posuzování rozlišujeme dva typy nebezpečného napětí – dotykové a krokové.



Obr. 3.4: Znárodnění dotykového a krokového napětí poblíž stožáru vedení <sup>21</sup>

### 3.3.1. Dotykové napětí

Dotykové napětí, je takové napětí, které můžeme naměřit na stožárové konstrukci vůči zemi vodorovně ve vzdálenosti 1 m. Tato délka je odvozena z průměrně výšky dospělé osoby, která si stoupne ke stožárové konstrukci a natáhne paži ke stožáru tak, aby se jej dotkla. Na Obr. 3.5 jsou uvedeny příklady mezi dotykového napětí (rozdílu napětí  $U_D$ ) jako funkce trvání poruchového proudu  $t_F$ . Křivka  $U_{D1}$  představuje napětí, které se může při dotyku objevit na lidském těle mezi holou rukou a bosou nohou – k odporu těla není uvažován žádný přídavný odpor. Další křivky ( $U_{D2}$ ,  $U_{D3}$ ,  $U_{D4}$ ) pak představují meze dotykového napětí pro vyšší hodnoty odporu ( $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ), kdy je k odporu lidského těla připočítáván ještě odpor přídavný. Přídavným odporem uvažujeme například obuv nebo různé povrchy země (s vyšší rezistivitou).

<sup>21</sup> KŘÍŽ, Michal: *Příručka pro zkoušky elektrotechniků: požadavky na základní odbornou způsobilost* [online]. 10., aktualiz. vyd. Praha: IN-EL, 2014 [cit. 2019-06-25]. Elektro (IN-EL). ISBN 978-80-87942-01-7. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/360>

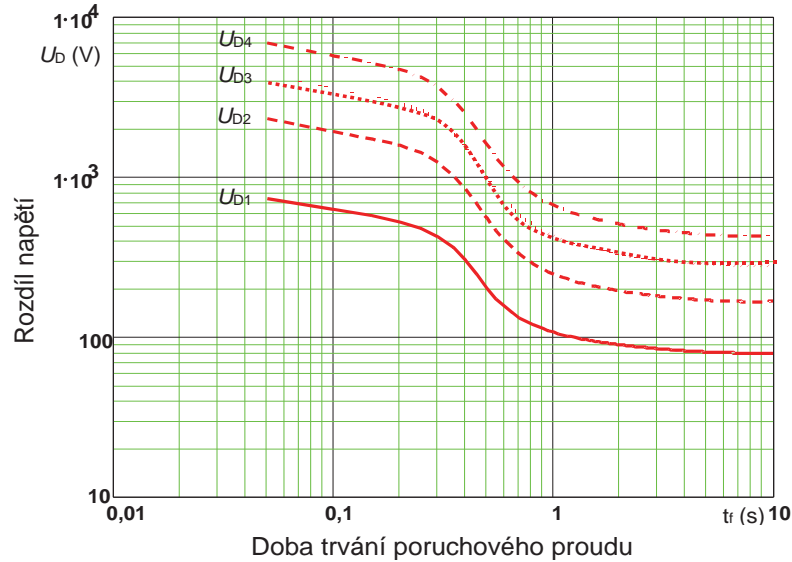
Celkové uvažované přídatné odpory:

$R_1 = 0 \Omega$  - holá ruka, bosá noha,

$R_2 = 1\,750 \Omega$  - lidé v obuvi, povrch jako je např. chodník, dlažba, parkoviště apod.,

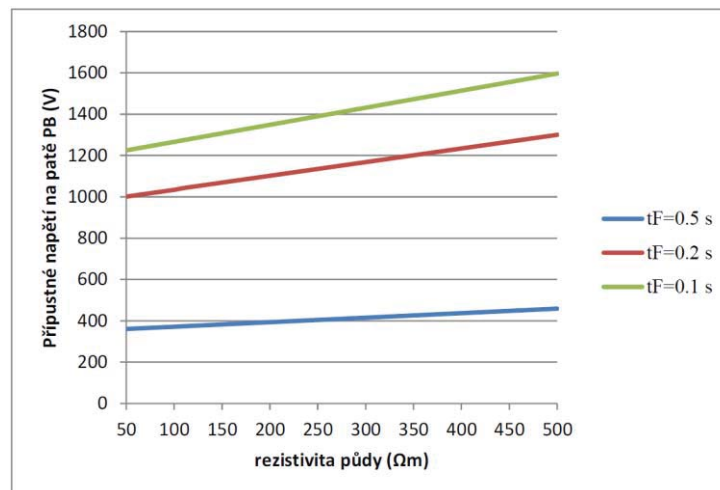
$R_3 = 4\,000 \Omega$  - lidé v obuvi na povrchu s vysokou rezistivitou půdy,

$R_4 = 7\,000 \Omega$  - lidé v obuvi a velmi vysoká rezistivita půdy.



Obr. 3.5: Příklady mezi dotykového napětí <sup>22</sup>

Dovolené dotykové napětí na patě stožáru také závisí na době trvání poruchy  $t_F$ . Pro tři různé doby trvání poruchy je zde uveden Obr. 3.6, na kterém je znázorněno přípustné dotykové napětí  $U_D$  podle normy PNE 33 3300-1 – *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn*.



Obr. 3.6: Přípustné napětí  $U_D$  na patě PB v závislosti na rezistivitě půdy <sup>23</sup>

<sup>22</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 117.

<sup>23</sup> PNE 33 3300-1 (prosinec 2017) – *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn*, str. 15.

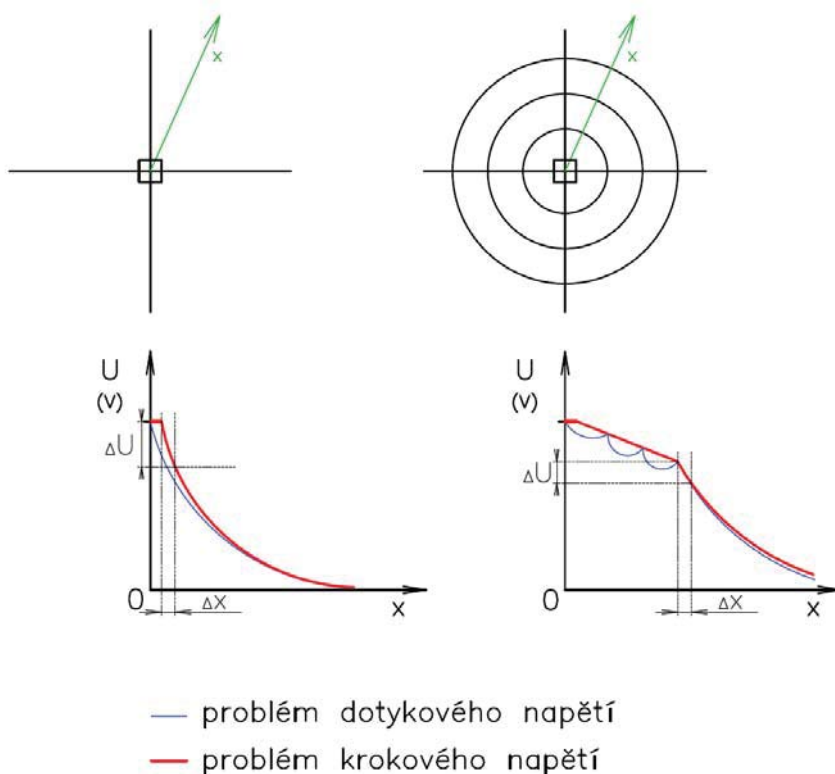
### 3.3.2. Krokové napětí

Krokové napětí, jak už sám název napovídá, souvisí s délkou jednoho kroku člověka při chůzi. Vzdálenost 1 m se považuje za délku kroku člověka. Jedná se tedy o napětí mezi dvěma body zemského povrchu vzdálenými od sebe 1 m.

Dovolené hodnoty krokových napětí jsou poněkud vyšší ve srovnání s dotykovými napětími. Proto pokud nějaká uzemňovací soustava splňuje z pohledu technické normy požadavky na dotyková napětí, lze předpokládat, že se obecně nevyskytnou žádná nebezpečná kroková napětí.<sup>24</sup>

### 3.3.3. Napětí na stožárové konstrukci

Pokud budeme obecně sledovat napětí na stožárové konstrukci, musíme opět rozlišit dva typy sledovaného napětí – dotykové a krokové. Právě vhodným způsobem uzemnění můžeme snížit strmý nárůst především krokového napětí v blízkosti stožáru, jak znázorňuje Obr. 3.7.



Obr. 3.7: Vliv uzemnění ekvipotenciálními kruhy

<sup>24</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 112.

Vlevo na obrázku je znázorněno jednoduché uzemnění paprskovým zemničem bez ekvipotenciálních kruhů. Vpravo pak soustava s kruhy propojenými pásky, kde právě vzniká ekvipotenciální pole v místě kruhů. V dolní části obrázku jsou grafy s obecně znázorněnou hodnotou napětí vůči stožárové konstrukci ve vzdálenosti  $x$ , ve směru, jak ukazuje zelená šipka.

Následkem ekvipotenciálních kruhů sice nevyřešíme dotykové napětí, avšak jeho strmost se sníží. Výraznější a přínosnější vliv zaznamenáme u krokového napětí. Jeho velikost teoreticky téměř lineárně klesá až po vzdálenost vnějšího ekvipotenciálního kruhu a od tohoto bodu dále už nevykazuje takovou strmost v průběhu. Zaměříme-li se na nejstrmější nárůst obou případů uzemnění, vidíme, že na stejné délce  $\Delta x$  se v případě uzemnění bez ekvipotenciálních kruhů objevuje mnohem vyšší napětí  $\Delta U$ , než v případě ekvipotenciálních kruhů (znázorňují kóty v obrázku).

Právě na tomto principu je založeno uzemňování, především pak ve variantě s ekvipotenciálními kruhy, které je obrovským přínosem pro bezpečnost osob a zvířat. Právě zvířata (koně, krávy) jsou na krokové napětí velmi citlivá. Smrtelné totiž pro ně může být již napětí 25 – 30 V (asi  $16 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ), zejména kvůli velké překlenuté vzdálenosti, dobrému spojení se zemí (podkovy) a toku proudu skrz tělo. <sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> EGU – HV Laboratory a.s., MUSIL L., ŠVANCAR M.: *Návrh opatření pro uzemnění stožárů vedení 110 kV Hlinsko-Polička*, září 2016.





## 4. DIMENZOVÁNÍ ZEMNICÍCH SOUSTAV

### 4.1. Požadavky

Návrh uzemňovacích soustav musí splnit současně tři následující podmínky:<sup>26</sup>

- a) Zajistit mechanickou pevnost a odolnost proti korozi.
- b) Zajistit odolnost z hlediska oteplení vůči nejvyššímu poruchovému proudu.
- c) Zajistit bezpečnost osob s ohledem na kroková a dotyková napětí, která se vyskytují při zemních poruchách.

Pro dimenzování uzemňovacích soustav se uvažují následující poruchové proudy:<sup>27</sup>

- Hodnoty maximálního jednofázového zkratového proudu.
- Velikost proudu zemního spojení v kompenzované soustavě.

Vodiče pro ochranné pospojování se dimenzují dle ČSN 33 2000-5-54 – *Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5-54: Výběr a stavba elektrických zařízení – Uzemnění a ochranné vodiče*.

### 4.2. Měření rezistivity

Nejpoužívanější metodou měření uzemnění je Wennerova metoda (Obr. 4.1), která využívá čtyř elektrod (A, B, C, D) na povrchu země rozmístěných v řadě rovnoměrně s konstantním rozestupem  $a$ . Tento rozestup se volí s ohledem na hloubky vrstvy půdy. K vnějším elektrodám se připojí zdroj střídavého proudu a na vnitřních elektrodách se měří napětí  $U$ . Aby byl výsledek měření co nejpřesnější, používá se standardně frekvence zdroje jiná než síťových 50 Hz a přístroj pro měření napětí je vybaven selektivním filtrem pro měření pouze příslušného kmitočtu. V případě ideálních bodových elektrod a homogenosti země lze využít zjednodušeného vzorce pro rezistivitu půdy. Aby se pokryla rezistivita půdy v různých hloubkách, je nutné provést měření několikrát s různou roztečí elektrod (obvykle se volí rozteč 1 m, 3 m, 5 m, příp. 10 m), přičemž první

---

<sup>26</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 113.

<sup>27</sup> Tamtéž.

elektroda musí být od paty stožáru minimálně ve vzdálenosti rozteče elektrod. Rezistivitu půdy lze stanovit z jednoho dílčího měření pro rozteč elektrod minimálně 3 m.<sup>28</sup>

Vzorec pro výpočet rezistivity půdy:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{U}{I} \quad (\Omega\text{m}; -, \text{m}, \text{V}, \text{A}) \quad (4.1)$$

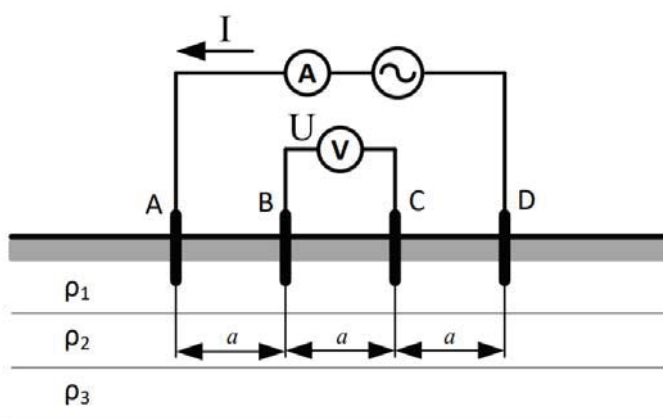
kde:

$\rho$ ...rezistivita půdy

$a$ ...vzdálenost mezi elektrodami

$U$ ...napětí

$I$ ...proud



Obr. 4.1: Schéma pro měření rezistivity půdy Wennerovou metodou<sup>29</sup>

Výsledná rezistivita půdy  $\rho_E$  dle dílčích rezistivit:

$$\rho_E = \frac{3}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3}} \quad (\text{vše v } \Omega\text{m}) \quad (4.2)$$

kde:

$\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ...dílčí rezistivity změřené pomocí Wennerovy metody

K technické zprávě projektu je zapotřebí přiložit protokol o měření, který obsahuje jak výslednou rezistivitu půdy  $\rho_E$ , tak i dílčí rezistivity  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ . Rozdíl mezi dílčími rezistivitami může být vypovídající o složení půdy pod zemněným objektem. Dále se uvádí

<sup>28</sup> PNE 33 3300-1 (prosinec 2017) – Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn, str. 8, 9.

<sup>29</sup> Tamtéž, str. 8

podmínky, za kterých bylo měření provedeno, jako je např. roční období a vlhkost. Výsledná hodnota se následně koriguje dle postupu popsáném v normě PNE 33 0000-1 – Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn. Je důležité dbát na podmínku, že rezistivita půdy se nesmí měřit v období zmrzlé půdy.<sup>30</sup>

Existuje mnoho dalších metod pro měření rezistivity půdy, kterými je například Schlumbergerovo uspořádání elektrod, nebo 4-pólová, 3-pólová a pasivní metoda. Těmito metodami se zde nezabývám, jelikož výpočetní nástroj je navrhnut pro měření dílčích rezistivit půdy právě Wennerovou metodou.

#### 4.2.1. Měření rezistivity pomocí přístroje FLUKE 1625

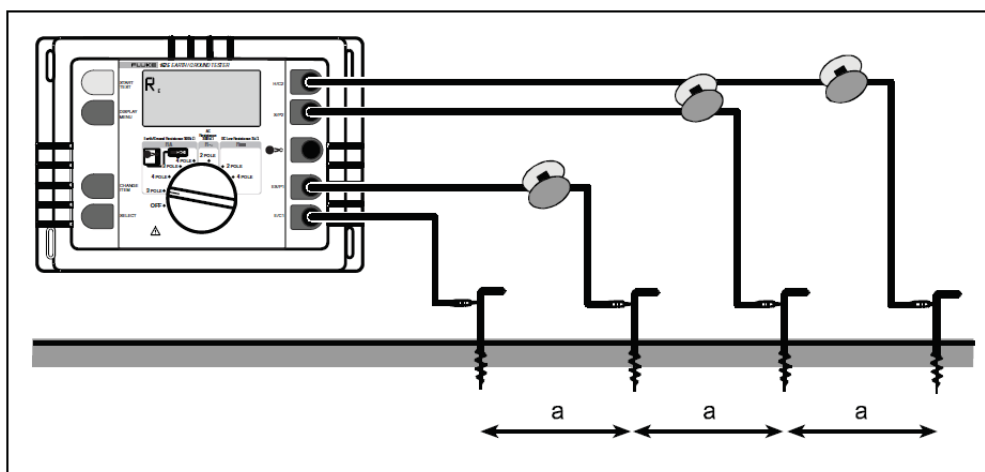
K měření rezistivity existuje mnoho typů přístrojů od různých výrobců. Jedním z nich je také přístroj FLUKE 1625 ADVANCED EARTH/GROUND TESTER (Obr. 4.2), který jsem využil při měření rezistivity u nově realizované stavby 110 kV „V343/V344 přeložka PB č. 9-12“. Naměřené hodnoty a porovnání hodnot s revizní zprávou popisují dále.



Obr. 4.2: Měřicí souprava FLUKE 1625

<sup>30</sup> PNE 33 3300-1 (prosinec 2017) – Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn, str. 9.

Sada mimo samotný měřicí přístroj obsahuje vodiče a svorky pro připojení k měřicím elektrodám, dále také proudové kleště a další příslušenství potřebné pro jiná měření, například měření odporu stožáru bez odepnutí zemnicích lan metodou tzv. selektivní svorky. Zapojení s přístrojem při měření rezistivity vypadá obdobně jako teoretické schéma pro měření rezistivity (Obr. 4.1) s tím, že funkci ampérmetru, voltmetru a zdroje měřicího proudu zajišťuje měřicí přístroj FLUKE (Obr. 4.3).



Obr. 4.3: Zapojení přístroje FLUKE 1625 pro měření Wennerovou metodou <sup>31</sup>

Měřicí přístroj neměří přímo rezistivitu půdy, ale odpor půdy  $R_E$ . Samotnou rezistivitu je nutno dopočítat, přičemž do vzorce 4.1 přímo vstupuje podíl napětí a proudu a vztah se zjednoduší na rovnici 4.3. Vzdálenost mezi dvěma elektrodami od sebe musí být mezi 2 m a 30 m. Na Obr. 4.4 je pak vidět, jak vypadá zapojení a měření v praxi. Výsledky měření jsou často zkreslené a narušené výskytem drobných částí kovu pod zemí nebo zvodně<sup>32</sup>, a proto je vhodné pro eliminaci nepřesností vlivem nehomogenity půdy provést druhé měření při pootočení úhlu osy elektrod o  $90^\circ$ , tedy v kolmém směru na předchozí měření.

$$\rho_E = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_E \quad (\Omega\text{m}; -, \text{m}, \Omega) \quad (4.3)$$

Kde:

$\rho_E$ ...rezistivita půdy,

$a$ ...vzdálenost elektrod,

$R_E$ ...odpor naměřený přístrojem.

<sup>31</sup> FLUKE Corporation: *Users manual FLUKE 1625 Earth/Ground Tester*, January 2006, str. 45.

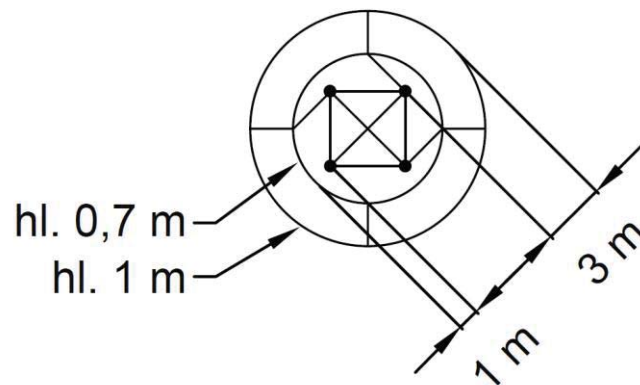
<sup>32</sup> Zvodeň je hydraulicky jednotná a souvislá akumulace gravitačních podzemních vod v hornině.



Obr. 4.4: Připojení elektrod k měřicímu zařízení v praxi

### MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY V PRAXI:

Pomocí přístroje FLUKE 1625 jsem ověřil vyhovující uzemnění dvou stožárů na nově realizované stavbě, která se nachází na katastrálním území Kralupy nad Vltavou. Konkrétně se jedná o podpěrné body č. 9 a č. 10. Z revizní zprávy mám k dispozici údaje přechodového zemního odporu obou stožárů. Stožár číslo 9 je uzemněn přídavným uzemněním formou ekvipotenciálních kruhů, konkrétně ve variantě 2K3 (Obr. 4.5). Stožár číslo 10 je pak bez dodatečného uzemňovacího opatření, jelikož vyhovuje jeho přechodový zemní odpor (odpor paty stožáru  $R_z$ ).



Obr. 4.5: Uzemnění stožáru č. 9 – varianta 2K3

Pro zjištění rezistivity půdy  $\rho_E$  u těchto podpěrných bodů jsem provedl více měření. Jednak jsem měřil odpor půdy ve dvou směrech kolmých na sebe, tak jak uvádí a doporučuje manuál měřicího přístroje, a za další jsem provedl měření pro dvě různé vzdálenosti elektrod –  $a$ . První délku mezi elektrodami jsem si zvolil na 11,6 m, druhou jsem pak zkrátil na polovinu, tedy na délku 5,8 m. Výpočtem podle vzorce 4.3 jsem následně vypočetl příslušnou rezistivitu půdy (Tab. 4.1).

	Stožár č. 9			Stožár č. 10	
	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5
<b>a (m)</b>	11,6	11,6	5,8	5,8	5,8
<b>R<sub>E</sub> (Ω)</b>	4,53	6,67	12,02	2,65	4,01
<b>ρ<sub>E</sub> (Ωm)</b>	330,2	486,1	438,0	96,6	146,1

Tab. 4.1: Vypočtené rezistivity půdy z naměřených hodnot

V Tab. 4.2 vyhodnocuji, zda vyhovuje zemní odpor paty stožáru  $R_z$ , podle čehož lze jednoduše usoudit, zda je třeba dodatečného opatření. Stožáry č. 9 a č. 10 se nacházejí dále od rozvodny, a platí pro ně tedy maximální dovolený odpor 15 Ω. K výpočtu zemního odporu paty stožáru využívám část mnou navrženého výpočetního softwaru (viz kapitola 7). Vstupní hodnotou je zde rezistivita půdy  $\rho_E$ , kde uvažuji maximální naměřenou hodnotu příslušného stožáru z důvodu faktoru bezpečnosti (Tab. 4.1).

Č. PB	ρ <sub>E</sub> (Ωm)	R <sub>dov</sub> (Ω)	R <sub>z</sub> (Ω)	R <sub>z</sub> < R <sub>dov</sub> (A/N)
9	486,1	15	30,72	NE
10	146,1	15	5,82	ANO

Tab. 4.2: Výpočet zemního odporu paty stožáru  $R_z$ 

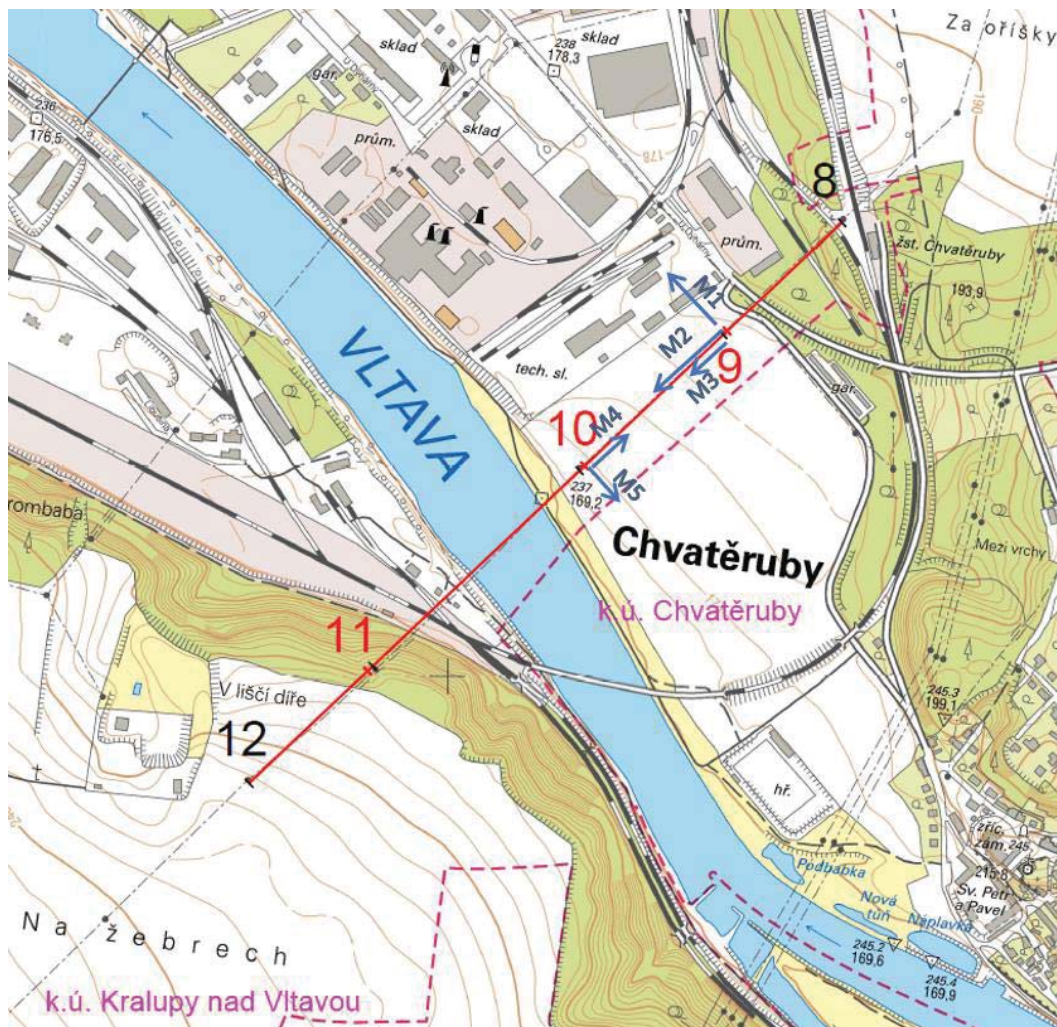
Vidíme, že pro stožár číslo 10 vyhovuje zemní odpor paty stožáru  $R_z$ , a jelikož se stožár nenachází na místě často navštěvovaném lidmi, není potřeba dodatečného opatření. Naopak pro stožár číslo 9 zemní odpor paty stožáru je větší než maximální dovolený, a již z této podstaty je jasné, že je potřeba pro tento stožár dodatečného opatření. Vzhledem k blízkosti pozemní komunikace u tohoto stožáru byla navrženo právě varianta uzemnění 2K3, která je znázorněna na Obr. 4.5.

S takto provedeným uzemněním stožáru č. 9 klesne hodnota ekvivalentního odporu základu stožáru se strojeným zemničem  $R_z$  na 12,4 Ω, jak uvádí revizní zpráva této stavby (Tab. 4.3). Pro stožár č. 10 je v revizní zprávě odlišná hodnota přechodového zemního odporu, než uvádím v Tab. 4.2. Stejně jak jsem vysvětloval výše, i zde je mírná odchylka způsobena nehomogenitami půdy, a také možným jiným směrem měření a vzdáleností elektrod, případně i použitím jiného měřicího přístroje.

ČÍSLO STOŽÁRU	9	10
Přechodový zemní odpor $R_z$ ( $\Omega$ )	12,4	5,35

Tab. 4.3: Hodnoty přechodového zemního odporu z revizní zprávy<sup>33</sup>

Pro upřesnění, kterým směrem byly hodnoty naměřeny, uvádím situační výkres širších vztahů (Obr. 4.6). Zde jsem znázornil směr jednotlivých měření modrými šipkami a popisem M1 až M5, kde písmeno M znamená měření, za kterým následuje pořadové číslo, jak je uvedeno v Tab. 4.1. V mapě je červeně vyznačena nová trasa vedení včetně nových stožárů, černě jsou pak vyznačeny stožáry stávající (stožár č. 8 a č. 12), na které je nové vedení napojeno.

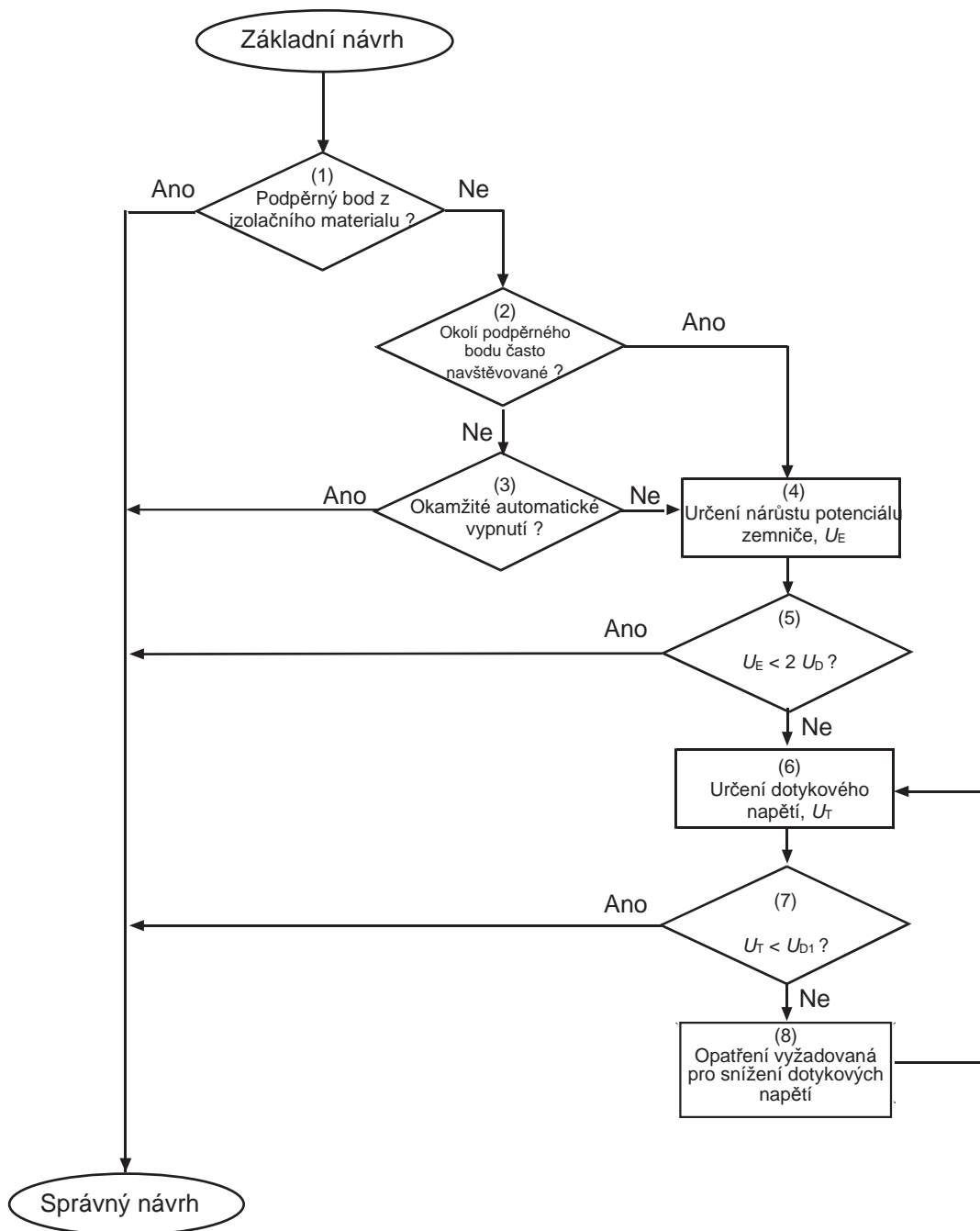
Obr. 4.6: Situační výkres širších vztahů se zákresem směru měření rezistivity půdy<sup>34</sup>

<sup>33</sup> PIBYL, P.: Zpráva o revizi elektrického zařízení – Vd 110kV V343/V344 přeložka PB č. 9-12, říjen 2019

<sup>34</sup> ELEKTROTRANS a.s., Ing. Krejza: Situační výkres širších vztahů (zak. č.: 1935, výkres: 4 ET 18 007).

### 4.3. Postup návrhu uzemňovací soustavy

Postup návrhu uzemňovací soustavy je znázorněn na vývojovém diagramu (Obr. 4.7), jehož jednotlivé kroky popisují dále.



Obr. 4.7: Vývojový diagram návrhu uzemňovací soustavy <sup>35</sup>

<sup>35</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 118.



Popis jednotlivých kroků:

- (1) Podpěrné body mohou být realizované dřevěnými sloupy, betonovými sloupy, ocelovými sloupy, nebo příhradovými stožáry. V případě, že je podpěrný bod z nevodivého materiálu, není nutné jej dále uzemňovat. To však není reálný případ na vedení VVN a ZVN, kde jsou použity příhradové stožáry z vodivého materiálu, typicky z konstrukční oceli pro její dostatečnou pevnost, nosnost a životnost.
- (2) V dalším kroku se zohledňuje, zda je místo podpěrného bodu často navštěvované lidmi. Jedná se tedy o podpěrné body například poblíž obytných oblastí a hřišť (okolí 50 m), osamělých budov a továrních objektů (okolí 25 m), či u dálnice, silnice nebo místní komunikace (okolí 10 m). Komunikace určené pro obhospodařování polních a lesních pozemků se nepočítají za místa často navštěvovaná. Vzdálenosti jsou dány normou PNE 33 3300.
- (3) V případě, že se nejedná o prostor se zvýšeným pohybem lidí, zohledňuje se, zda je na vedení nainstalovaný systém okamžitého automatického vypnutí. Za rychlé automatické odpojení od zdroje se pokládá automatické odpojení od zdroje hlavní ochranou v čase do 1 s a záložní ochranou v čase do 5 s. V případě, že podmínka ochranných časů vyhovuje, není zapotřebí dalších opatření.
- (4) U chybějícího systému okamžitého automatického vypnutí je potřeba určit nárůst potenciálu zemniče  $U_E$ . Jeho určení dle normy PNE 33 3300 je následující:

$$U_E = Z_E \cdot I_E \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}) \quad (4.4)$$

kde:

$I_E$ ...proud do země během poruchy

$Z_E$ ...impedance uzemnění, např. získaná měřením nebo výpočtem

$$Z_E = 0,25 \cdot (Z_S + \sqrt{Z_S \cdot (4 \cdot R_t + Z_S)}) \quad (\Omega) \quad (4.5)$$

kde:

$Z_S$ ...impedance zemních lan v jednom rozpětí

$R_t$ ...zemní odpory pat stožárů

$$I_E = r \cdot 3 \cdot I_0 \cdot w \quad (\text{A}; -, \text{A}, -) \quad (4.6)$$

kde:

$r$ ...redukční činitel zemních lan;

$I_0$ ...nulová složka proudu během poruchy;

$w$ ...součinitel pravděpodobnosti nebo současnosti

(dle normy se počítá s hodnotou 0,7, pokud není výpočtem prokázána nižší).

- (5) Porovnání hodnoty nárůstu potenciálu zemniče  $U_E$  s hodnotou  $2 \cdot U_D$ , ve vztahu k příslušným křivkám  $U_{D2}$ ,  $U_{D3}$ ,  $U_{D4}$  na Obr. 3.5. V případě, že je hodnota  $U_E$  dvakrát menší než hodnota  $U_D$ , není zapotřebí další ochranné opatření.
- (6) Pokud předchozí bod nevyhovuje, je zapotřebí určit dotykové napětí  $U_T$ , se kterým se dále počítá. Pro získání příslušného dotykového napětí je zapotřebí vypočítat celkovou impedanci lidského těla  $Z_B$ , na které je hodnota dotykového napětí závislá. Celkovou impedanci  $Z_B$  pro vybrané hodnoty dotykového napětí  $U_T$  pro proudovou dráhu ruka-ruka nebo ruka-noha udává Tab. 4.4.

Dotykové napětí $U_T$ (V)	Celková impedance lidského těla $Z_B$ ( $\Omega$ )
25	3 250
50	2 625
75	2 200
100	1 875
125	1 625
220	1 350
700	1 100
1 000	1 050

Tab. 4.4: Hodnoty impedance lidského těla v závislosti na dotykovém napětí<sup>36</sup>

- (7) Porovnáme dotykové napětí  $U_T$  s  $U_{DI}$ , kdy je uvažován nulový odpor lidského těla. Napětí  $U_{DI}$  je stejné jako dovolené dotykové napětí  $U_{Tp}$  (Tab. 4.5). Pokud je  $U_T$  menší než  $U_{DI}$ , není dále potřeba dalších ochranných opatření a návrh je správný. V případě, že tomu tak není, postupuje se k bodu (8).

<sup>36</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV, str. 191.

Trvání poruchy $t_F$ (s)	Dovolené dotykové napětí $U_{Tp}$ (V)
0,05	735
0,10	633
0,20	528
0,50	204
1,00	107
2,00	90
5,00	81
10,00	80

Tab. 4.5: Hodnoty dovoleného dotykového napětí jako funkce trvání poruchy <sup>37</sup>

(8) Při nevyhovující podmínce, kdy  $U_T$  je menší než  $U_{DI}$ , je nutné provést další ochranná opatření pro snížení dotykových napětí, vrátit se k bodu (6), znovu určit dotykové napětí  $U_T$  a postupovat dále překontrolováním podmínky (7). Toto činit, dokud podmínka (7) nebude splněna. Jedině poté lze návrh považovat za správný.

Opatření pro snížení dotykového napětí mohou být například ekvipotenciální kruhy pro rozložení potenciálu, odizolování stožáru, zvýšení odporu vrchní vrstvy zeminy atd. <sup>38</sup>

<sup>37</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 191.

<sup>38</sup> Tamtéž, str. 119.



## 5. PROBLEMATIKA ZEMNICÍCH LAN

### 5.1. Ochrana vedení před zpětnými přeskoky

Před zpětnými přeskoky se vedení chrání uzemněním zemnicích lan a všech celokovových podpěrných bodů. Pro vedení VVN a ZVN v oblastech s nižší hustotou úderů blesku do země (menší než 3 blesky za rok na km<sup>2</sup>) je max. hodnota uzemnění 15 Ω u podpěrných bodů v běžné trase a 10 Ω u podpěrných bodů do vzdálenosti 800 m před rozvodnou. Vyšší hodnoty odporu je možno připustit jen při nepříznivých půdních podmínkách, přičemž může být hodnota odporu uzemnění tří za sebou následujících podpěrných bodů až 50 Ω.<sup>39</sup>

### 5.2. Ochrana vodičů před přímým úderem blesku

Vedení je potřeba chránit před přímými údery blesku do fázových vodičů, který by způsobil nebezpečné přepětí v síti a mohl by ji poškodit. Z hlediska bezpečnosti stanovuje norma minimální ochranné úhly zemnicího lana pro dané napěťové hladiny (Tab. 5.1), přičemž ochranný úhel se uvažuje od krajního vodiče. Následně se vypočte ochranná vzdálenost dle vzorce (5.1). Pro představu je tato vzdálenost znázorněna na Obr. 5.1.

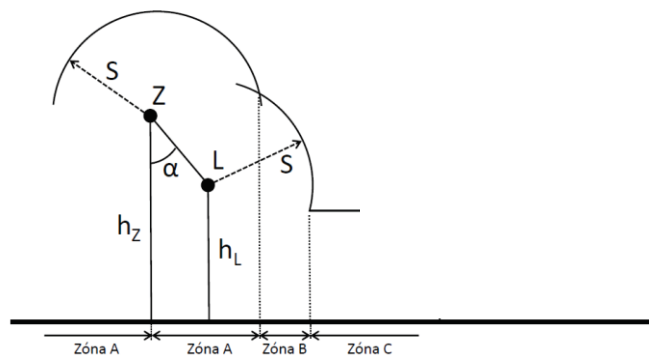
Vedení	Maximální ochranný úhel ve stupních
Vedení 110 kV - jednoduché	30
Vedení 110 kV - dvojité	30
Vedení 220 kV - jednoduché	30
Vedení 220 kV - dvojité	20
Vedení 400 kV - jednoduché	20
Vedení 400 kV - dvojité	20

POZNÁMKA U dvojitých vedení 220 kV a 400 kV na podpěrných bodech vyšších než 40 m se doporučuje chránit vodiče dvěma zemnicími lany s ochranným úhlem 16° a méně. PS může stanovit jinou hodnotu ochranného úhlu.

Tab. 5.1: Ochranné úhly zemnicích lan<sup>40</sup>

<sup>39</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 114-115.

<sup>40</sup> Tamtéž, str. 114.



Obr. 5.1: Návrh umístění zemního lana na vedení <sup>41</sup>

Legenda:

Zóna A – blesk pravděpodobně zasáhne zemní lano

Zóna B – blesk pravděpodobně zasáhne fázový vodič

Zóna C – blesk pravděpodobně vedení nezasáhne

Z – zemní lano

L – fázový vodič

h<sub>Z</sub> – výška zemního lana nad terénem

h<sub>L</sub> – výška fázového vodiče nad terénem

α... ochranný úhel – určuje polohu zemního lana nad fázovým vodičem

s... ochranná vzdálenost – stanoví se na základě vztahu (5.1)

Ochranná vzdálenost:

$$s = 10 \cdot I^{\frac{2}{3}} \quad (\text{m; kA}) \quad (5.1)$$

kde:

s... ochranná vzdálenost

I... efektivní hodnota proudu protékajícího fázovým vodičem

### 5.3. Umístění zemnicích lan

Zemnicí lano (ZL) se vždy umísťuje na samý vrchol stožárové konstrukce, kde se upevňuje speciálními držáky ZL. Zemnicí lana jsou stejně jako fázové vodiče obvykle tvořena lany z hliníku s ocelovou duší, tzv. AlFe lany. Minimální průřez ZL je 25 mm<sup>2</sup>.

---

<sup>41</sup> PROCHÁZKA, Radek: *Přednášky z předmětu Technika vysokých napětí (B1M15TVN)*, ČVUT FEL v Praze, 2018, upraveno.

Při zhoršených povětrnostních podmínkách dochází k vibracím lan, což může vyústit až v mechanické poškození buď samotného lana nebo i armatur spojených s lanem. Z tohoto důvodu se za účelem snížení mechanického namáhání montují na lana tlumiče vibrací.

Podle typu stožáru a počtu provozovaných systémů se na stožár umísťuje jedno ZL, nebo dvě ZL. Dvě ZL se umísťují na širokých stožárech, kde konstrukce nevyhovuje tomu, aby byla zajištěna ochranná vzdálenost pro všechny fázové vodiče při umístění jednoho ZL (např. stožáry typu portál a kočka). Dále také na stožárech s větším počtem provozovaných systémů (typicky 3 a více systémů), které jsou taktéž umísťovány na mohutné stožáry (např. donau, nebo vícenásobný soudek, který je používán pro více systémů na napěťové hladině 110 kV).

## 5.4. Redukční činitel

Protože se zemnicí lano podílí na přenosu poruchového proudu vracejícího se zemí, zavádí se tzv. redukční činitel  $r$ . Tento činitel hraje určitou roli při parametrech zkratu a ovlivňuje velikost zkratového proudu tekoucího do země. Proto je hodnota redukčního činitele také zahrnuta ve výpočetním nástroji pro uzemnění.

Poruchový proud se rozdělí do proudu tekoucího zemí a proudu přenášeného zemnicím lanem, čímž se zvýší účinnost odvádění proudu zemního spojení. Rozsah odlehčení uzemňovací soustavy je vyjádřen právě parametrem  $r$ , který je pro třífázové venkovní vedení definován jako poměr velikosti zpětného proudu zemí k velikosti součtu nulových složek proudu třífázového obvodu.

S hodnotou redukčního činitele se počítá při návrhu uzemnění. Ta se obvykle pohybuje v rozsahu 0,2 až 1 a závisí na mnoha parametrech, jako např. geometrii vedení, rezistivitě půdy, odporu ZL atd. Čím je hodnota redukčního činitele nižší, tím více zemnicí lano napomáhá soustavě uzemnění. Vedení bez ZL má hodnotu  $r = 1$ .<sup>42</sup>

---

<sup>42</sup> ČSN EN 50341-1 (listopad 2002) – *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV – Část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace*, str. 154.

Vztah pro redukční činitel:

$$r = \frac{I_E}{3I_0} = \frac{3I_0 - I_{EW}}{3I_0} \quad (-; A, A) \quad (5.2)$$

kde:

$I_{EW}$ ...proud zemnicím lanem (v ustáleném stavu)

$I_E$ ...zpětný proud zemí

$3I_0$ ...součet nulových složek proudu

## 5.5. Kombinované zemní lano

Jedná se o speciální zemní lano, uvnitř kterého je umístěna ocelová trubička s optickými vlákny s vysokou přenosovou rychlostí. Datová optická spojení slouží pro účely rychlé a nezávislé komunikace energetických společností zejména dispečinku přenosové soustavy, distribučních soustav a elektráren. Tyto spoje je však také možno využít i pro komerční účely.

V případě, že na lince vedení jsou umístěny dvě zemní lana, pak je z pravidla pouze jedno z nich kombinované. Výjimku můžou tvořit linky vedení, kde KZL v určitém místě trasy odbočuje na jinou linku a optická trasa nekopíruje trasu elektrického vedení.

Způsoby provedení kombinovaných zemnicích lan jsou různé. Jeden z nich uvádím na Obr. 5.2, jedná se konkrétně o lano ASLH-D(S)bb 2x12 SMF. U tohoto konkrétního typu je jádro tvořeno jedním drátem. V první vrstvě jsou čtyři dráty, které doplňují dvě ocelové trubičky s dvanácti optickými vlákny. Vnější (druhá) vrstva je nakonec obtočena třinácti hliníkovými dráty.

**OPGW – KZL**

**dle EN 60679-4**



- vnější vrstva pravotočivá (směr stáčení – Z)
- mazivo dle EN 50182 A.1 / mazání dle EN 50326, typ B
- mazivem je opatřen středový prvek a první vrstva
- dráty dle EN 50183 / EN 61232
- maximální možný počet vláken v ocelové trubičce – 30
- barevná vlákna dle kódovacího systému 048 F IEC
- optická vlákna podle G.652.D
- dřevěný buben s bedněním mezi čely bubnu

Obr. 5.2: Průřez a informace KZL typu AL3/A20SA 64/30-8,0<sup>43</sup>

<sup>43</sup> ČEZ Distribuce, a.s.: *Katalogový list 2012 – Materiálový standard: Kombinovaná zemnicí lana (302.4)*.



Obrázek doplňuje několik informací, jako je směr stáčení, použité mazivo nebo standardy, podle kterých jsou značena optická vlákna. Je zde také uvedeno, jak je lano dodáváno – tedy na dřevěném bubnu, přičemž mohu jen doplnit, že standardní délka KZL navinutého na dřevěném bubnu je kolem 4 000 m.

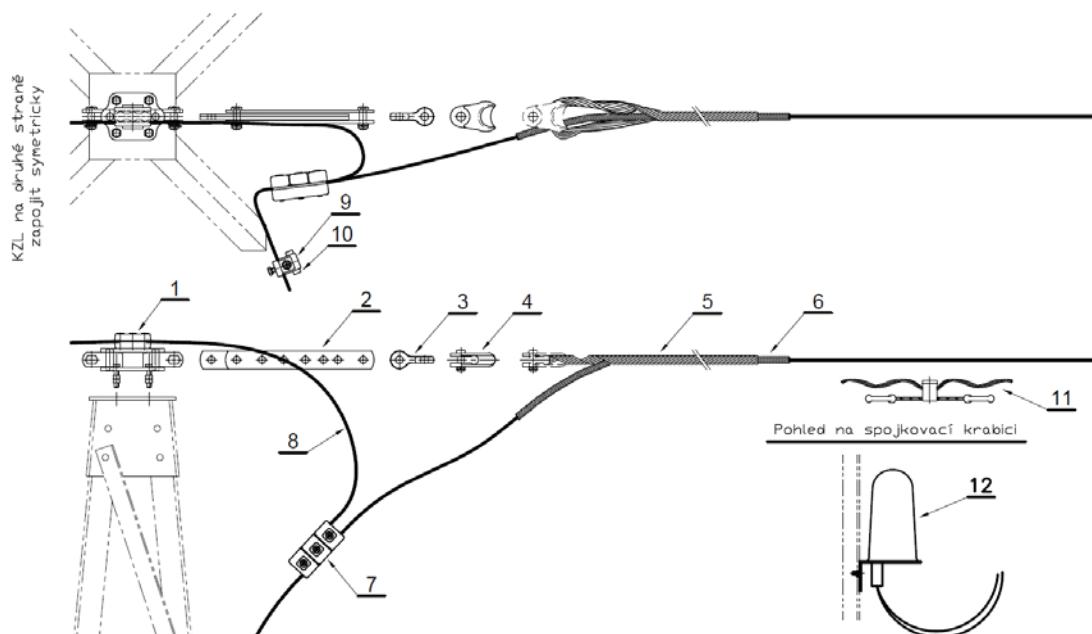
Je logické, že každé zemnicí lano, ať už kombinované nebo klasické, vykazuje určité parametry. Ostatně stejně tomu tak je i u fázových vodičů. Sledovanými parametry jsou průměr lana, jeho hmotnost, nosný průřez, vypočtená pevnost v tahu, modul pružnosti, koeficient délkové roztažnosti, stejnosměrný odpor, vodivost a další. Všechny tyto údaje může projektant k danému konkrétnímu typu lana dohledat v katalogovém listu.

## 5.6. Připojení ZL a KZL na stožárovou konstrukci

Stejně jako fázové vodiče, je nutno ke stožáru připevnit i zemnicí lano, ať už jde o klasické nebo kombinované, tedy s optickými vlákny. Rozlišujeme připojení zemnicích lan na nosných a na kotevních stožárech, kde je zapojení trochu složitější. Ukotvení ZL se provádí pomocí spirálového uchycení, na nosném stožáru je pak v místě uchycení neoprenová vložka. Nejsložitější připojení zemnicího lana můžeme pak registrovat v jeho kombinované variantě, kdy je potřeba napojit optickou trasu z jednoho KZL do druhého KZL. Toto napojení se provádí v tzv. spojovací krabici. Ke krabici se vede KZL vnitřkem stožáru pomocí stožárových příchyttek. Minimální vzdálenost svodů KZL do krabice je 6 m od povrchu terénu.

Na zemnicí lana (ostatně i na fázové vodiče) se umísťují tlumiče vibrací, které zamezují rezonančnímu kmitání lana, a tak zabraňují jeho poškození. Tlumiče vibrací se montují na místa dle montážního předpisu výrobce.

Schéma jednoho konkrétního připojení kombinovaného zemního lana na kotevní stožár se spojkou je na Obr. 5.3. Na tomto obrázku dobře vidíme, kolik armatur je potřeba k uchycení KZL na kotevní stožár. V tomto případě se navíc jedná o stožár, na kterém se provádí spojování kombinovaných zemnicích lan ve spojovací krabici. Popis jednotlivých prvků označených čísly na obrázku je v Tab. 5.2.



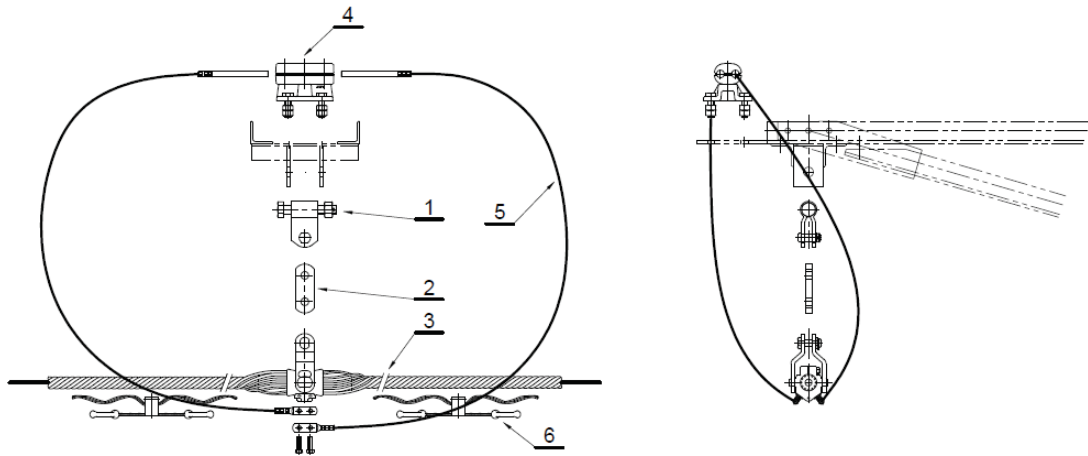
Obr. 5.3: Připojení KZL na kotevní stožár se spojkou <sup>44</sup>

POZICE	NÁZEV POLOŽKY
1	Kotevní svorka zemnicí
2	Vidlice s okem nastavitelná
3	Dvojité oko křížové
4	Kotevní očnice
5	Kotevní spirála
6	Ochranná spirála
7	Proudová svorka rozebíratelná
8	Lano
9	Stožárová příchytka
10	Vložka Al do příchytky
11	Tlumič vibrací
12	Spojovací optická krabice

Tab. 5.2: Legenda k Obr. 5.3

Možný způsob připojení KZL na nosný stožár znázorňuje Obr. 5.4 a položky popisuje Tab. 5.3. Vidíme, že oproti kotevnímu stožáru je potřeba daleko méně armatur a celkové připojení ke stožáru je jednodušší, nehledě na absenci spojovací krabici, která se vyskytuje jen na vybraných kotevních stožárech nesoucích KZL.

<sup>44</sup> ELEKTROTRANS a.s., Ing. Krba: Připojení KZL na kotevní stožár se spojkou (zakázka č.: 1130, výkres č.: 3 ET 16 089a, list 2).



Obr. 5.4: Připojení KZL na nosný stožár <sup>45</sup>

POZICE	NÁZEV POLOŽKY
1	Závěsný kloub
2	Dvojité oko přímé
3	Nosná svorka spirálová
4	Zemní svorka pevná
5	Propojovací lano Cu
6	Tlumič vibrací

Tab. 5.3: Legenda k Obr. 5.4

<sup>45</sup> ELEKTROTRANS a.s., Ing. Krejza: *Výkres připojení KZL na nosný stožár* (zakázka č.: 1130, výkres č.: 3 ET 16 089a, list 8).



## 6. UZEMNĚNÍ STOŽÁROVÉ KONSTRUKCE

### 6.1. Používané zemniče a jejich instalace

Nejprve si vysvětleme pojmy náhodný a strojený zemnič. V dalším textu, pokud nebude uvedeno jinak, se za zemnič považuje vždy zemnič strojený.

**Náhodný zemnič** – vodivý předmět trvale uložený v zemi, který byl vybudován k jinému účelu než k uzemnění, ale je možno jej využít jako zemnič.

**Strojený zemnič** – zemnič záměrně zřízený pro uzemnění.

Jako uzemnění je do půdy zakázáno vkládat vodiče z materiálů, které by v půdě podléhaly chemickým reakcím jako tomu je například u hliníku. Dalším požadavkem na zemniče je jejich odolnost vůči mechanickým vlivům při instalaci i provozu. Proto se využívá zemničů vyrobených ze žárově pozinkovaného železa, které se stalo nejrozšířeněji používaným materiálem v této oblasti. Dalším používaným materiálem je například ne-rezová ocel, případně měď.

Zemniče mohou být v uspořádání horizontálním, vertikálním, nebo šikmém a jsou do země uloženy, nebo zaraženy. Vodorovné zemniče se ukládají pod zámraznou hloubku, kde budou dostatečně chráněné proti mechanickým vlivům. Obvyklá hloubka uložení zemničů je 0,5 m až 1 m. ČEZ Distribuce, a.s., ve svojí metodice<sup>46</sup> dokonce požaduje uložení zemniče do hloubky minimálně 70 cm pod úroveň terénu. Výhodou hlouběji uloženého pásku je především eliminace rizika poškození uzemnění stožárů nacházejících se na zemědělsky obdělávané půdě (např. orbou). U svisle zaražených zemničů se horní konec nachází obvykle pod úrovní povrchu země. Svislé nebo šikmé tyče jsou výhodné především tam, kde odpor půdy klesá s její hloubkou.

Pásek FeZn se ukládá do země naplocho a je natažena vcelku. Prodlužování pásků se dovoluje pouze ve výjimečných případech, jako je např. oprava stávajících uzemňovacích přívodů za podmínky, že minimální délka nastavení je větší než 3 m.

---

<sup>46</sup> ČEZ Distribuce, a.s. (RAJSKÝ František, ŠEDIVÝ Tomáš): *METODIKA – Koncepce uzemňování* (ČEZd\_ME\_0148r00), 2017.

Provedení uzemnění musí splňovat požadavky na mechanickou pevnost a odolnost proti korozi a vykazovat odolnost vůči oteplení nejvyšším poruchovým proudem. Platí i pro spojky použité pro připojení vodivých částí soustavy zemniců k zemnicí síti, které za žádných okolností nesmějí snižovat elektrickou vodivost. K odolnosti proti korozi napomáhají různé nátěry (např. gumoasfalt) používané především v místech s největší náchylností ke korozi, což je například právě v místech již zmíněných spojů nebo v místě přechodu zemniče z nadzemní části pod zem. Ochranné uzemnění (pásek) musí být u stožáru označen jako ochranný vodič – zelenožlutě, respektive nátěrem zelenými a žlutými příčnými pruhy. Pro vzájemné spojování pásků slouží křížová svorka. V neposlední řadě musí být také zajištěna správná funkce přepět'ových ochran.

Uzemňovací přívod se připojuje na příhradový stožár na místa k tomu určená (dáno konstrukcí podpěrného bodu), minimálně však 0,5 m nad definitivně upraveným terénem s minimální výškou 15 cm nad betonovým základem. Pásek je pak veden po povrchu betonového základu (betonové patky) do země. V posledních letech se do betonového základu vytváří drážka pro FeZn pásek tak, aby nepřecházel nad rozměr základu.<sup>47</sup>

Na Obr. 6.1 je fotografie nově realizovaného uzemnění ve variantě 2K3, kde je dobře vidět výše popsané připojení pásku ke stožárové konstrukci, pospojování pásků FeZn, i provedení ochranného nátěru v místě přechodu pásku pod zem. Připojení uzemňovací soustavy je provedeno na všech čtyřech nohách stožáru pomocí dvou šroubů a následně je pásek veden po betonovém zhlaví základu (o rozměrech 2,95 x 2,95 m) do podzemní části, kde je zkonstruována soustava dvou ekvipotenciálních kruhů. Vidíme zde i podzemní část betonového základu, která nabývá obrovských rozměrů (9,2 x 9,2 m), a tak soustava uzemnění (v této ne příliš rozsáhlé variantě kruhů) leží největší plochou právě na betonovém základu. Celá tato odkopaná plocha přijde zasypat zeminou z dočasné deponie (lze vidět v pozadí snímku) do úrovně cca 50 cm od vršku zhlaví základu. Následně bude potřeba natřít uzemňovací přívody připojené ke stožáru zeleně se žlutými pruhy (zelenožlutě), stejně jako přijde natřít i samotná stožárová konstrukce (obvykle na zeleno). Výsledek po nátěru pak může vypadat jako na Obr. 6.2, kde však vidíme chybu v podobě nenatření šroubového připojení. Další snímky jsou k nahlédnutí v příloze 3.

---

<sup>47</sup> ČEZ Distribuce, a.s. (RAJSKÝ František, ŠEDIVÝ Tomáš): METODIKA – Koncepce uzemňování (ČEZd\_ME\_0148r00), 2017.



Obr. 6.1: Uzemnění stožáru FeZn páskem



Obr. 6.2: Přívod uzemňovacího pásku

Spojky používané pro spojování zemnicích tyčí musí mít stejnou mechanickou pevnost jako vlastní tyče a musí odolávat mechanickému namáhání při zatlačování do půdy. Pokud musí být spojovány různé materiály tvořící galvanické články, které mohou vyvolat elektrochemickou korozi, pak musí být spoje trvanlivým způsobem chráněny proti styku s okolním elektrolytem. <sup>48</sup>

Podle aplikace, na kterou jsou zemniče použity, se volí tvar, materiál a průřez zemniče.

<sup>48</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV, str. 197 - 198.

## 6.2. Tvary zemničů

Nejběžněji používaným typem jsou pásy nebo tyče. Dále se jako zemniče používají dráty, trubky nebo jiné profily. Mechanická pevnost a koroze určují minimální rozměry zemničů uvedené v Tab. 6.1. Stožáry jsou v běžné trase na většině stožárů uzemněny kovovými pásy. Uzemňovací příводы mají normou ČSN EN 50341-1 – *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV – Část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace* stanoveny minimální průřezy s ohledem na mechanické a elektrické vlastnosti.

Materiál	Typ zemniče	Minimální rozměry					
		Jádro			Povlak / plášť		
		Průměr (mm)	Průřez (mm <sup>2</sup> )	Tloušťka (mm)	Jedna hodnota (μm)	Průměrná hodnota (μm)	
Ocel	pásek <sup>b</sup>		90	3	63	70	
	profily (včetně desek)		90	3	63	70	
	žárově pozinkovaná s olověným povlakem <sup>a</sup>	trubka	5		2	47	55
	tyč	16			63	70	
	drát pro vodorovný zemnič	10				50	
	drát pro vodorovný zemnič	8			1 000		
	s vytlačovaným Cu pláštěm	tyčový zemnič	15			2 000	
s elektrolytickým Cu povlakem	tyčový zemnič	14,2			90	100	
Měď	holá	pásek		50	2		
		drát pro vodorovný zemnič		25 <sup>c</sup>			
		lano	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>			
		trubka	20		2		
	pocínovaná	lano	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1	5
	galvanická	pásek <sup>b</sup>		50	2	20	40
	s olověným povlakem <sup>a</sup>	lano	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1 000	
		drát		25 <sup>c</sup>		1 000	

<sup>a</sup> Nevhodné pro přímé uložení do betonu.  
<sup>b</sup> Pásek válcovaný nebo stříhaný se zaoblenými hranami.  
<sup>c</sup> V extrémních podmínkách, kde podle zkušeností je riziko koroze a mechanického namáhání velmi nízké, může být užito 16 mm<sup>2</sup>.  
<sup>d</sup> Průměr jednoho drátu.

Tab. 6.1: Minimální rozměry materiálů zemničů <sup>49</sup>

<sup>49</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 188.



Minimální průřezy uzemňovacích přívodů pro různé materiály jsou:

- měď        16 mm<sup>2</sup>,
- hliník     35 mm<sup>2</sup>,
- ocel        50 mm<sup>2</sup>.

Uzemňovací přívody a vodiče pospojování z oceli vyžadují ochranu proti korozi. U hliníkových vodičů nutno uvažovat účinky koroze. Použití holých vodičů z hliníku a jeho slitin pro uzemňovací přívody a vodiče pospojování pod úrovní země není dovoleno.<sup>50</sup>

### 6.3. Příklady zemnicích soustav

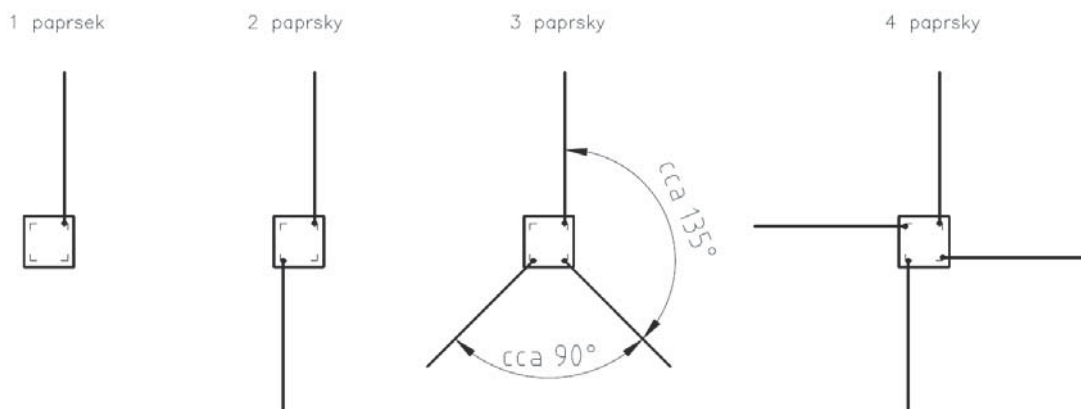
Pro uzemnění stožárové konstrukce se používá mnoho tvarů zemniců, jak jsem uvedl v předchozí kapitole. V praxi nejběžněji užívaným je pásek FeZn 30 x 4 mm. Pásek se ukládá do hloubky cca 1 m a k noze stožáru je připojen zpravidla dvěma šrouby, nebo svorkou, a v těsné blízkosti betonového zhlaví je sveden kolmo do země (Obr. 6.2).

Jak uvádím v následující kapitole v popisu karty 4. *Výpočet*, maximální počet pásků jsou čtyři. Proto jsou i čtyři typické varianty pro položení pásků, podle toho, zda se pokládá jeden, dva, tři, nebo čtyři, jak znázorňuje obrázek (Obr. 6.3). V případě jednoho nebo dvou paprsků jsou pásy položeny rovnoběžně s vedením. Pro tři pásy se dva z nich rozbíhají do stran s orientačním úhlem cca 90° svírajícím mezi nimi. U čtyř paprsků jsou paprsky taženy do všech stran kolmo k sousedním. Takto je zemnění navrhováno především s ohledem na celkovou zabranou plochu, přičemž je výhodné, když se paprsky uzemnění vejdou pod svislý průmět krajních vodičů, nebo alespoň nepřesahují ochranné pásmo<sup>51</sup> vedení.

---

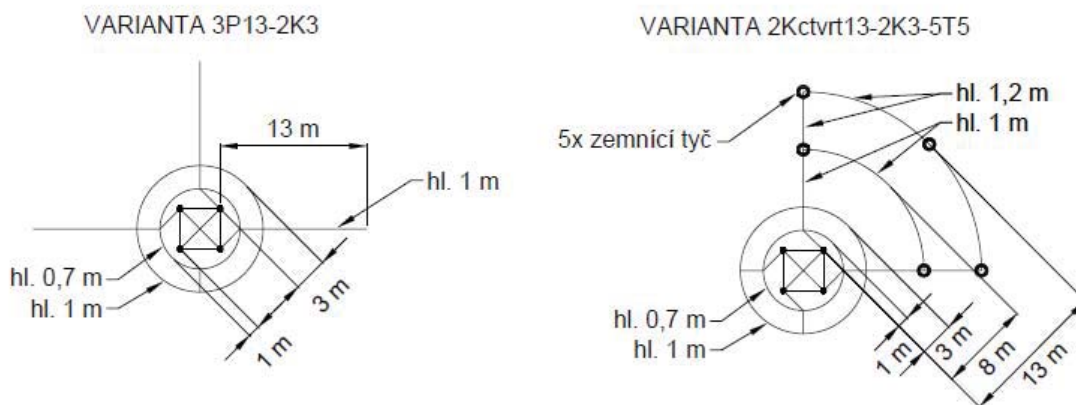
<sup>50</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 115.

<sup>51</sup> Ochranné pásmo vedení udává Zákon č. 458/2000 Sb. (energetický zákon) a podle § 46 jsou vzdálenosti od krajního vodiče pro napěťové hladiny vvn a zvn následující: 110 kV – 12 m, 220 kV – 15 m, 400 kV - 20 m.



Obr. 6.3: Čtyři varianty návrhu paprskového uzemnění stožáru

V případě blízkosti osob, kdy je nutno navrhnout uzemnění s ekvipotenciálními kruhy – nejvýhodnější z pohledu rovnoměrného rozložení elektrického potenciálu, existuje nespočet variant, které projektant přizpůsobuje konkrétnímu stožáru vzhledem k jeho umístění a možnostem umístit zemnič v jeho okolí. Omezení může být tvořeno jinými stavbami jako např. silnice, železniční trať, potrubní systémy, podzemní kabelové linky telekomunikací apod. V takových případech se přistupuje k netypickým návrhům uzemňovací soustavy (několik příkladů uvádím na Obr. 6.4). Zemnicí soustava se umísťuje vždy směrem od inženýrských sítí nebo nepříznivého terénu, proto nemusí být ekvipotenciální kruhy uzavřenými kruhy. Navrhují se půl nebo i čtvrtkruhy, dále kruhy s paprsky do vybraných směrů, nebo se uzemnění doplňuje například tyčovým zemničem.

Obr. 6.4: Příklady atypických variant uzemňovací soustavy <sup>52</sup>

<sup>52</sup> ELEKTROTRANS a.s., Ing. Krejza: *Návrh uzemňovacích soustav* (zak. č.: 1130, výkres: 3 ET 16 490a), dle návrhu EGU – HV Laboratory a.s.

Atypické varianty soustav pak nesou speciální označení, které vyjadřuje konkrétní typ a rozsah (rozměry) uzemnění. Varianta 3P13-2K3 je kombinací ekvipotenciálních kruhů a paprskových zemničů. Varianta 2Kčtvrť13-2K3-5T5 je pak kombinací ekvipotenciálních kruhů a tyčových zemničů.

Význam označení varianty:

3P13-2K3 – 3 x pásek s délkou 13 m, 2 x kruh s poloměrem 3 m (vzdálenost od stožáru).  
2Kčtvrť13-2K3-5T5 – 2 x kruh + čtvrtkruh s poloměrem 13 m + 2 x kruh s poloměrem 3 m + 5 x zemnicí tyč.

## 6.4. Dovolené hodnoty poruchových proudů

Protože velikosti poruchových proudů jsou určovány spíše elektrickou sítí než venkovním vedením, jejich hodnoty musejí být poskytnuty rozvodnou společností, tedy provozovatelem distribuční, nebo přenosové soustavy. Je nutné brát ohledy na budoucí možnost nárůstu poruchových proudů. Proudů se v soustavě zemničů dále dělí a je tedy možné dimenzovat zemnič pouze na část poruchového proudu.

Výpočet proudové zatížitelnosti:

Pro poruchové proudy s trváním kratším než 5 s může být průřez uzemňovacího svodu nebo zemniče vypočten z následujícího vztahu:<sup>53</sup>

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_F}{\ln \frac{\Theta_f + \beta}{\Theta_i + \beta}}}$$

kde:

A...průřez v mm<sup>2</sup>

I...proud vodičem v A (efektivní hodnota)

t<sub>F</sub>...trvání poruchového proudu v sekundách

K...konstanta, závislá na materiálu vodiče (-)

β...převrácená hodnota teplotního součinitele odporu vodiče při 0 °C

Θ<sub>i</sub>...počáteční teplota (°C). Teplotu okolní půdy v hloubce 1 m lze uvažovat 20 °C

Θ<sub>f</sub>...konečná teplota (°C)

<sup>53</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV, str. 188.

Materiálovou konstantu  $K$  a převrácenou hodnotu teplotního součinitele  $\beta$  pro výpočet proudové zatížitelnosti uvádí tabulka Tab. 6.2.

Materiál	$\beta$ (°C)	$K$ ( $\sqrt{(A.s)}/mm^2$ )
Měď	234,5	226
Hliník	228	148
Ocel	202	78

Tab. 6.2 Materiálové konstanty pro výpočet proudové zatížitelnosti <sup>54</sup>

Dovolené proudy pro nejčastěji používané průřezy pásků FeZn jsou uvedeny pro počáteční teplotu 20 °C a konečnou teplotu 300 °C v Tab. 6.3. Dovolené hodnoty trvalého poruchového proudu nejčastěji užívaných profilů pro zemnění jsou uvedeny v Tab. 6.4. Uvedené hodnoty jsou pro konečnou teplotu 300 °C, pro jiné teploty se přepočítávají koeficientem dle Tab. 6.5.

Doba trvání poruchového proudu $t_F$ (s)	Dovolený proud (A)		
	Profil pásku 30 x 4 mm	Profil pásku 40 x 4 mm	Profil pásku 20 x 5 mm
0,1	26700	35600	22200
0,2	18900	25200	15700
0,3	15400	20500	12800
0,4	13300	17800	11100
0,5	11900	15900	9960
0,6	10900	14500	9090
0,7	10100	13400	8420
0,8	9450	12600	7870
0,9	8910	11800	7420
1	8450	11200	7040

Tab. 6.3: Dovolené proudy pro různé průřezy pásků FeZn <sup>55</sup>

<sup>54</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*, str. 189, upraveno.

<sup>55</sup> Tamtéž, upraveno.

Profil	Dovolený trvalý proud (A)
pásek 30 x 4 mm	420
pásek 40 x 4 mm	540
pásek 20 x 5 mm	330
drát průměr 10 mm	220

Tab. 6.4: Dovolený trvalý proud základních profilů zemničů FeZn <sup>56</sup>

Konečná teplota ve °C	Přepočítací činitel
400	1,2
350	1,1
300	1
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

Tab. 6.5: Činitelé pro přepočet trvalé zatížitelnosti na jinou konečnou teplotu <sup>57</sup>

## 6.5. Odpor uzemnění

Zemní odpor zemniče  $R_E$  závisí na rezistivitě půdy  $\rho_E$  i na rozměrech a uspořádání zemniče.

Odpor podpovrchového zemniče se vypočte dle vztahu: <sup>58</sup>

$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{d} \quad (\Omega; \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}) \quad (6.1)$$

kde:

$\rho_E$ ... rezistivita půdy ( $\Omega\text{m}$ ),

$L$ ... délka přímého nebo kruhového zemniče (prstence) z pásku, drátu nebo slaněného vodiče (m), pro kruhový zemnič platí  $L = \pi D$  ( $D$ ... průměr kruhového zemniče),

$d$ ... polovina šířky zemničího pásku nebo průměr drátu nebo slaněného vodiče (m).

<sup>56</sup> PNE 33 0000-4 (3. vydání) – Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny, str. 9.

<sup>57</sup> Tamtéž, str. 8.

<sup>58</sup> PNE 33 3300 (2. vydání) – Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV, str. 195.



# 7. VÝPOČETNÍ NÁSTROJ

## 7.1. O nástroji

Nástroj pro odhad odporu základu stožáru s případným navržením typu uzemnění stožárů venkovního vedení VVN a ZVN slouží pro projekční účely ve společnosti ELEKTROTRANS a.s., pro kterou jsem program zpracoval. Celý nástroj jsem vyhotovil v prostředí *MS Excel*. Tuto variantu jsem zvolil vzhledem k jednoduchosti a přehlednosti celé aplikace, a také s přihlédnutím k faktu, že v projekci firmy je Excel hojně využívaným nástrojem. Tento fakt přikládá na výhodnosti tohoto řešení, protože v budoucnu bude výpočetní nástroj zahrnut do nástrojů používaných pro návrh, a usnadní tak práci projektanta, který bude navrhovat nové uzemnění na linkách venkovního vedení.

## 7.2. Praktické použití

Výpočetní nástroj obsahuje pro uživatele čtyři základní a jeden výstupní list (kartu) s následujícím označením:

1. *Wennerova metoda*
2. *Základy*
3. *Zkratové proudy*
4. *Výpočet*
5. *Tisk*

Projektant tak bude postupně vyplňovat požadované údaje v jednotlivých listech tak, jak popisují v následujících podkapitolách. Pro přehlednost tabulek a jednoduché znázornění funkce buněk je využíváno barevného rozlišení viz Tab. 7.1, která je zobrazena na každém listu v Excelu.

Zadávané hodnoty	
zadat hodnoty	vyber z nabídky
výpočet = vzorec	konstantní hodnota

Tab. 7.1: Zabarvení buněk dle jejich funkce

### 7.2.1. Karta: Wennerova metoda

První záložka slouží pouze k určení rezistivity půdy v místě plánovaného vybudování stožáru. Náhled karty je na Obr. 7.1. V prvním sloupci projektant zadá čísla podpěrných bodů, a do dalších sloupců k nim vepíše příslušné naměřené dílčí rezistivity půdy, případně přímo ekvivalentní rezistivitu půdy, pokud je známa. Tyto hodnoty je možné získat již při geologickém průzkumu. Výstupní hodnotou z tohoto listu pro samotnou funkci programu je vypočtená ekvivalentní rezistivita půdy  $\rho_E$ . Jsou odtud načítány také čísla podpěrných bodů na kartu 4. *Výpočet.*

Číslo podpěrného bodu	Zadání dílčích rezistivit půdy (zadává se, pokud není známa ekvivalentní rezistivita půdy $\rho_i$ )			Známa ekvivalentní rezistivita půdy	Vypočtená ekvivalentní rezistivita půdy
Č. PB	$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_3$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_{Ez}$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_E$ ( $\Omega\text{m}$ )
1	64,15	75,11	68,89		69,10
2	267,11	307,55	284,26		285,36
3	189,44	168,67	170,31		175,65
4				114,88	114,88
5				51,4	51,40
6				374,53	374,53
7				375,76	375,76
8				864,22	864,22

Obr. 7.1: Náhled karty Wennerova metoda – zadání rezistivity půdy

### 7.2.2. Karta: Základy

Druhá záložka programu obsahuje již více sloupců a je zde vypočítána výstupní hodnota, kterou je ekvivalentní průměr základu stožáru  $D_{ekv}$ . Ten je získán ze zadaných hodnot pro blokový, nebo patkový základ stožáru. V případě blokového základu je nutno zadat délku i šířku nadzemní části základu, v případě patkového pak buď průměr kruhového zhlaví, nebo šířku čtvercového zhlaví. Všechny správné a možné varianty zadání rozměrů základu do tabulky zobrazuje Obr. 7.2. Pokud uživatel zadá příliš mnoho dat do tabulky, příslušná buňka  $D_{ekv}$  se zabarví červeně, a upozorní tak na příliš mnoho hodnot v konkrétním řádku tabulky. I přesto ale bude počítán ekvivalentní průměr s prioritou pro blokový základ, a následně pro průměr kruhového zhlaví. Další vstupní hodnotou je hloubka základu, která je společně s  $D_{ekv}$  výstupním údajem pro další výpočty.

A konečně i zde se v prvním sloupci opět zadávají čísla podpěrných bodů (PB). Přestože by se mohlo zdát, že tento krok je zbytečný, jelikož se čísla PB vyplňovaly již v předchozím kroku, lze této funkci příjemně využít. Základy stožárů se totiž může zabývat



jiný projektant a bez ohledu na řazení číslování na předchozím listu může tabulku vyplnit v libovolném pořadí (třeba i na přeskáčku). Pro výpočet odporu základu na příslušné kartě 4. *Výpočet* si vzorec dohledá odpovídající označení stožáru z karty 2. *Základy* ke stožáru z karty 1. *Wennerova metoda*.

Číslo podpěrného bodu	V případě blokového základu zadej délku a šířku nadzemní části základu		V případě kruhového patkového základu zadej průměr patkového zhlaví, v případě patkového čtvercového základu zadej jeho šířku		Hloubka blokového nebo patkového základu	Ekvivalentní průměr
Č. PB	Blokový základ		Patkový základ		Hloubka (m)	D <sub>ekv</sub> (m)
	Délka nadzemní části (m)	Šířka nadzemní části (m)	Průměr kruhového zhlaví (m)	Šířka čtvercového zhlaví (m)		
1			2,1		2,5	4,2
2			1,8		2,5	3,6
3				2,1	3	4,73
4				1,8	2,05	4,06
5	2,15	2,15			2,05	2,73
6	2,45	2,45			3	3,11
7	2,15	2,15			3	2,73
8	3,35	3,35			3	4,26

Obr. 7.2: Náhled karty Základy – zadání rozměrů základu

### 7.2.3. Karta: Zkratové proudy

I ve třetí záložce je počítána pouze jedna výstupní hodnota. Tou je proud jedнопólového zkratu  $3I_0$  (uplatnění netočivé složky vysvětleno v kapitole 2.3.1) v různých vzdálenostech od rozvodny označené jako *Rozvodna A*. Projektant zde vyplní k příslušným vzdálenostem jednotlivé příspěvky zkratového proudu od rozvodny A i rozvodny B. Nakonec zadá ještě krok vzdálenosti po vedení pro upřesnění zkratového proudu na jednotlivých stožárech pro další výpočty na kartě 4. *Výpočet*.

Krok vzdálenosti po vedení pro upřesnění zkratového proudu na jednotlivých stožárech		
<b>Krok vzdálenosti po:</b>	1,76	<b>km</b>

Obr. 7.3: Náhled karty: Zkratové proudy – zadání kroku vzdálenosti

Vzdálenost od rozvodny A	Příspěvek zkrat. proudu od rozvodny A	Příspěvek zkrat. proudu od rozvodny B	Proud jedнопólového zkratu
L <sub>A</sub> (km)	Rozvodna A (kA)	Rozvodna B (kA)	3I <sub>0</sub> (kA)
0,00	5,75	4,77	10,52
1,76	5,62	4,88	10,50
3,52	5,49	5,00	10,49
5,28	5,36	5,12	10,48
7,04	5,23	5,24	10,47
8,80	5,11	5,37	10,48
10,56	4,99	5,49	10,48
12,32	4,88	5,63	10,51
14,08	4,77	5,76	10,53

Obr. 7.4: Náhled karty: Zkratové proudy – příspěvky rozvoden

### 7.2.4. Karta: Výpočet

Konečně na čtvrté kartě probíhá celý výpočet návrhu uzemnění. Karta je poměrně rozsáhlá, avšak údajů, které je třeba vyplnit, již není mnoho. Napravo od výpočetní tabulky je sloupec, který obsahuje devět buněk, z nichž je nutno zvolit z výběru pouze první tři (Tab. 7.2). Jedná se o dobu trvání poruchy, typ vedení a typ páskového zemniče, jak je znázorněno na Obr. 7.5: Volba parametrů z výběru. Dále jsou v tabulce uvedeny tři konstantní hodnoty, které udává norma (v případě potřeby je lze jednoduše přepsat) a poslední tři řádky zobrazují tabulkové hodnoty příslušných proměnných podle prvních třech zvolených možností. Tyto hodnoty spolu s dalšími, jež jsou tabulkovými hodnotami (uvedenými v normě PNE 33 3300) využívanými pro jednotlivé kroky výpočtu, se nacházejí ve skryté pomocné kartě *Data*.

Doba trvání poruchy (čas vypnutí) - $t_F$ (s)	0,2
Typ vedení	400 kV - dvě zemnicí lana (Delta)
Typ páskového zemniče	FeZn 30 x 4 mm
Činitel pravd. souč. působení - $w$ (-)	0,7
Přídavná imp. obuvi - $R_{a1}$ ( $\Omega$ )	1000
Konstanta $k$ (-) - pravděp. (pro 50 kg)	0,067
Impedance těla - $Z_B$ ( $\Omega$ )	1190
Dovolené dotykové napětí - $U_{Tp}$ (V)	528
Polovina šířky páskového zemniče - $d$ (m)	0,015

Tab. 7.2: Vstupní parametry pro výpočet návrhu uzemnění stožáru

The image shows a software interface with three dropdown menus. The first menu is titled 'Doba trvání poruchy (čas vypnutí) -  $t_F$  (s)' and has a list of values: 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10. The second menu is titled 'Typ vedení' and has a list of options: 110 kV - dvě zemnicí lana, 110 kV - jedno zemnicí lano, 220 kV - dvě zemnicí lana, 220 kV - jedno zemnicí lano, 400 kV - dvě zemnicí lana (Delta), 400 kV - dvě zemnicí lana (ostatní typy st.), 400 kV - jedno zemnicí lano. The third menu is titled 'Typ páskového zemniče' and has a list of options: FeZn 30x4 mm, FeZn 40x4 mm, FeZn 20x5 mm.

Obr. 7.5: Volba parametrů z výběru

Nyní se zaměříme na samotnou výpočetní tabulku, kde jsou zvýrazněny zakroužkováním buňky, na které se zaměřuji v dalším textu podrobněji. Pro širokou rozsáhlou tabulku je náhled rozdělen na levou a pravou část - Obr. 7.6 a Obr. 7.7. Levý sloupec tvoří seznam podpěrných bodů, který je vyplněn dle první karty *1. Wennerova metoda*. K němu je třeba vyplnit jen jeho vzdálenost od rozvodny A, a zvolit, zda se

jedná o místo často navštěvované lidmi, jak je definováno v PNE 33 3300 – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*. Všimněme si také, že dovolený odpor uzemnění stožáru závisí na vzdálenosti od rozvodny, kdy do vzdálenosti 800 m je maximální dovolená hodnota 10  $\Omega$ , dále už je to 15  $\Omega$ .

Číslo podpěrného bodu (stožáru)	Vzdálenost od rozvodny A	Blížkost osob dle PNE 33 3300	Rezistivita půdy	Zkratový proud	Impedance celého systému uzemnění	Redukční čísel vedení	Dovoleno zemní odpor stožáru	Zemní odpor paty stožáru	Porovnání $R_z$ a $R_{dov}$
Č. PB	Vzdálenost od rozvodny A (km)	Blížkost osob (ANO/NE)	$\rho_E$ ( $\Omega m$ )	$I_k$ (kA)	$Z_E$ ( $\Omega$ )	$r$ (-)	$R_{dov}$ ( $\Omega$ )	$R_z$ ( $\Omega$ )	$R_z < R_{dov}$ (A/N)
1	0,109	ANO	69,1	10,52	0,65	0,4619	10	1,65	ANO
2	0,282	ANO	285,4	10,52	0,80	0,4201	10	10,19	NE
3	0,502	ANO	175,7	10,51	0,75	0,4340	10	4,15	ANO
4	0,784	NE	114,9	10,51	0,65	0,4465	10	1,97	ANO
5	1,001	ANO	51,4	10,51	0,65	0,4711	15	2,69	ANO
6	1,280	ANO	374,5	10,51	0,80	0,4125	15	22,78	NE
7	1,564	NE	375,8	10,50	0,80	0,4124	15	29,34	NE
8	1,840	NE	864,2	10,50	1,00	0,3899	15	26,60	NE

Obr. 7.6: Náhled karty Výpočet (levá část)

Porovnání $R_z$ a $R_{dov}$	Počet paprsků strojeného zemniče	Délka jednoho paprsku zemniče	Ekvivalentní odpor základu se strojeným zemničem	Proud procházející stožárovou konstrukcí do země	Napětí na uzemnění stožáru proti referenční zemi	Napětí na patě stožáru	Dotykové napětí	Dovolené krokové napětí	Návrh uzemnění stožáru, nebo případný typ dodatečného opatření, pokud je třeba
$R_z < R_{dov}$ (A/N)	Paprsků (ks)	$L_1$ (m)	$R_E$ ( $\Omega$ )	$I_t$ (kA)	$U_E$ (V)	$U_D$ (V)	$U_T$ (V)	$U_{ST}$ (V)	Návrh uzemnění /Dodatečné opatření/
ANO	-	-	1,65	1,34	2211	1163,5	343,6	390,2	Vyhovuje ( $U_E < 2UD$ )
NE	1	8,3	9,99	0,24	2474	358,6	392,2	584,6	Pásky 1 x 10,3 m
ANO	-	-	4,15	0,58	2396	520,8	367,6	486,0	Ekvipotenciální kruhy
ANO	-	-	1,97	1,08	2135	790,9	353,9	431,4	Vyhovuje
ANO	-	-	2,69	0,84	2252	1185,4	339,6	374,3	Vyhovuje ( $U_E < 2UD$ )
NE	2	15,0	14,97	0,11	2427	351,7	412,3	664,8	Pásky 2 x 17 m
NE	3	15,3	14,98	0,08	2426	351,5	412,5	665,9	Pásky 3 x 17,3 m
NE	4	20,0	17,27	0,11	2866	325,6	522,3	1104,9	Pásky 4 x 22 m

Obr. 7.7: Náhled karty Výpočet (pravá část)

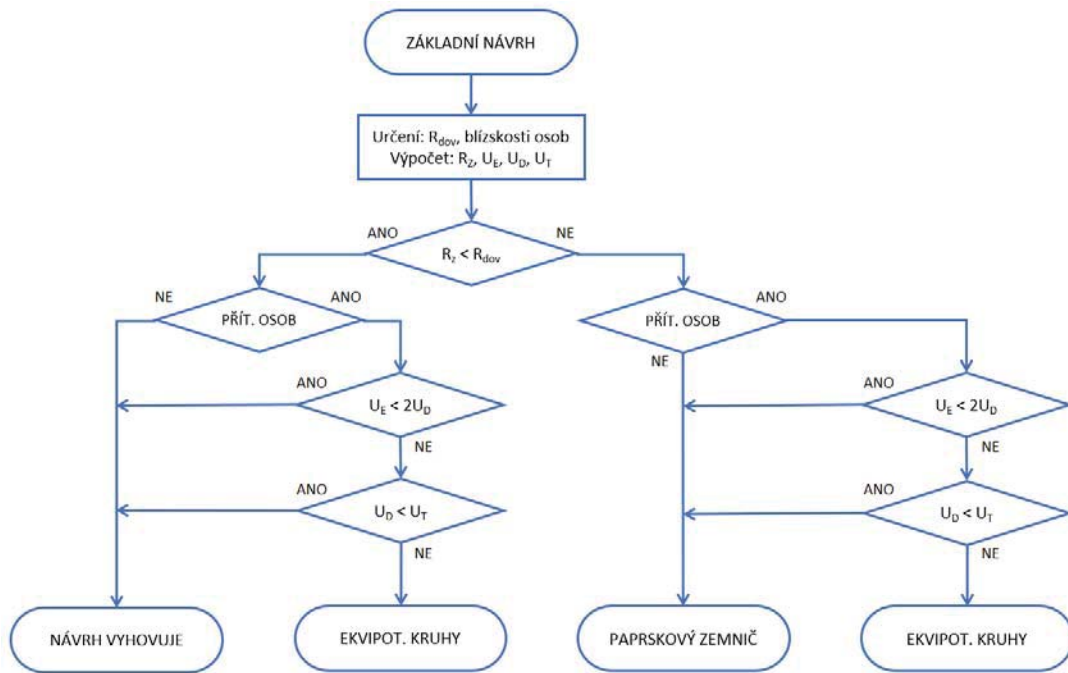
Zbytek tabulky je vyplněn vzorci, a tak vypočítá ke každému stožáru jeho zemní odpor a s přihlédnutím na blízkost osob určí, zda je nutné provést dodatečné opatření uzemnění. V případě přítomnosti osob, kdy návrh uzemnění vyhovuje, se projektantovi zobrazí, která z podmínek algoritmu výpočetního nástroje (Obr. 7.8) vyhovuje.

Pokud je potřeba dodatečného opatření, program zvolí typ uzemnění ze dvou variant. První variantou jsou paprskové zemniče, které jsou navrženy v případě, kdy vyhovují podmínky pro dotykové napětí.

Algoritmus výpočtu pro délku a počet paprsků (postup krok po kroku popsán v kapitole 7.3 Algoritmus výpočtu) je navržen tak, aby byla využita maximální délka jednoho pásku 20 metrů. Až při potřebě delšího pásku je navržena varianta se dvěma paprsky a tak dále, až do maximálního počtu 4 paprsků. Více paprsků se nenavrhuje, a pokud hodnota odporu uzemnění stožáru dostatečně neklesne ani při položení čtyř paprskových zemničů, vztahuje se na podpěrný bod výjimka uvedená v normě PNE 33 3300 (a v kapitole 5.1), která stanovuje podmínku, kdy může nabývat odpor uzemnění až  $50 \Omega$ .

Dále můžeme vidět rozdílné hodnoty ekvivalentního odporu  $R_E$ , které musí být menší než maximální přípustná hodnota  $R_{dov}$ . Ve druhém řádku pro stožár č. 2 platí maximální dovolená hodnota  $10 \Omega$ , ekvivalentní odpor s použitím pásku o délce 10,3 m klesne na  $9,99 \Omega$ . Pro stožár č. 6 už je přípustná hodnota  $15 \Omega$ , zde za použití pásků klesne hodnota na  $14,97 \Omega$ . Při nejpřesnějším návrhu bychom dospěli k hodnotě  $14,99 \Omega$ , avšak tato drobná odchylka je dána algoritmem softwaru, konkrétně jeho 10 centimetrovým krokem přidávání na délce pásku. Jedná se o určité zjednodušení, které však vzhledem k přesnosti měření rezistivity půdy a předběžného výpočtu hodnoty odporů nemá reálný význam a bylo by zbytečné tvořit program tak, aby byl zcela přesný.

Na posledním řádku u stožáru č. 8 si pak všimněme, že hodnota ekvivalentního odporu neklesá pod požadovanou hodnotu  $15 \Omega$ . To je dáno návrhem, kdy je maximální délka pásku 20 m a maximální počet pásků jsou čtyři. S touto kombinací tedy nedosáhneme lepšího výsledku a program navrhuje maximální rozsah paprskového uzemnění. Zde také vidíme ve sloupci  $L_l$  délku jednoho pásku 20 m, přesto v buňce dodatečné opatření je navrženo „Pásky 4 x 22 m“. Tyto dva metry navíc ke každému pásku jsou jako dostatečná rezerva pro potřebné přichycení zemniče ke stožárové konstrukci.



Obr. 7.8: Algoritmus výpočetního nástroje pro návrh uzemnění stožáru

Nyní si popíšeme vývojový diagram na Obr. 7.8. Všechny vstupní parametry pro potřebné výpočty již máme. V prvním kroku je nutné určit dovolenou hodnotu zemního odporu podpěrného bodu (automaticky vyhodnotí program), kterou stanovuje PNE 33 3300 (viz kap. 5.1), a blízkost osob (zadáva projektant pro jednotlivé podpěrné body – stožáry). V tomto kroku program také vypočte zemní odpor paty podpěrného bodu  $R_z$ , napětí na uzemnění podpěrného bodu proti referenční zemi  $U_E$ , napětí na patě stožáru  $U_D$  a dotykové napětí  $U_T$ . Poté následuje první podmínka, která určí, zda je zemní odpor paty stožáru nižší, než dovolený ( $R_z < R_{dov}$ ), po které v obou větvích diagramu následuje podmínka blízkosti osob.

V případě, že  $R_z < R_{dov}$  a jedná se o odlehlé místo, návrh vyhovuje bez dodatečného opatření. Pokud se však v okolí stožáru mohou vyskytovat osoby, je nutné zkontrolovat podmínku  $U_E < 2U_D$ , která pokud vyhoví, není třeba dodatečného opatření. Pokud tato podmínka nevyhoví, přistoupí se k poslední podmínce  $U_D < U_T$ , která v případě, že není splněna, rozhodne o dodatečném opatření v podobě ekvipotenciálních kruhů.

V případě, kdy  $R_z > R_{dov}$  a jedná se o odlehlé místo, program přistoupí k návrhu dodatečného uzemnění v podobě paprskových zemničů. Pokud se ale v okolí stožáru

mohou vyskytovat osoby, jsou postupně kontrolovány obě podmínky jako v předchozím případě ( $U_E < 2U_D$  a následně  $U_D < U_T$ ), avšak pokud tyto podmínky vyhoví, přistoupí se k opatření s paprskovými zemniči.

Program tedy určuje tři konečné stavy. Prvním je, že návrh vyhovuje bez dodatečného opatření, druhým stavem je návrh ekvipotenciálních kruhů a posledním je návrh paprskových zemničů. V případě ekvipotenciálních kruhů doporučí projektantovi pouze toto řešení, a projektant musí navrhnout vhodné řešení tohoto typu zemniče dle doporučení provozovatele distribuční, nebo přenosové soustavy s ohledem na jejich metodiku a technické normy. Výsledkem pak mohou být složitější soustavy kruhů doplněné o zemniče páskové nebo tyčové. Toto řešení také zohledňuje okolní inženýrské sítě (potrubí, silnice) a jiné překážky (vodní plochy a toky), které mohou omezit pokládku uzemnění v určitém směru od stožáru.

Pokud však postačí navrhnout paprskový zemnič, program vypočte počet pásků a jejich potřebnou délku k dosažení požadovaného zemního odporu  $R_{dov}$ . V buňce návrhu dodatečného opatření se pak objeví text „*Pásky [počet pásků] x [délka jednoho pásku]*“ (např.: Pásky 2 x 17,2 m), kde délka pásku zahrnuje rezervní 2 m navíc pro dostatečnou rezervu k připojení pásku ke stožárové konstrukci.

<b>Celková délka pásku FeZn 30 x 4 mm pro paprskový zemnič je:</b>
1225,8 m

Tab. 7.3: Celková délka pásku pro paprskový zemnič

Na závěr je zde také vypočtena potřebná délka zvoleného rozměru pásku FeZn pro paprskové zemniče. Pro ekvipotenciální kruhy není délka pásku vypočtena, jelikož program tento návrh nepočítá, nýbrž pouze doporučuje, a nezná tedy výsledné rozměry uzemnění, ani jeho konkrétní uspořádání.

V případě, kdy nejsou tabulky vyplněny správně, zobrazí se na této kartě upozornění v podobě: „TABULKY NEJSOU VYPLNĚNY SPRÁVNĚ!“. Tímto způsobem je uživatel upozorněn na chybné vyplnění požadovaných údajů na některé z předchozích karet. Konkrétní chybu však již musí uživatel vyhledat sám, ale pomocí výzev požadovaných hodnot v buňkách a případného červeného zbarvení buňky bude na chybný řádek jednoduše a rychle upozorněn.

### 7.2.5. Karta: Tisk

Poslední kartou je výstupní list určený pro tisk. Na něm jsou uvedeny už pouze nejn nutnější údaje jako je číslo stožáru, odpor základu, dovolené a vypočtené napětí na patě stožáru. Dále je zde uvedena blízkost osob u stožáru a dodatečné opatření, případně jeho typ (tvar zemnicí soustavy), jak je vidět v Tab. 7.4. V hlavičce listu, která zde není znázorněna, jsou pak uvedeny informační údaje k dané zakázce (viz příloha 1 – list 6). Tento list pak může být přímo přílohou projektové dokumentace.

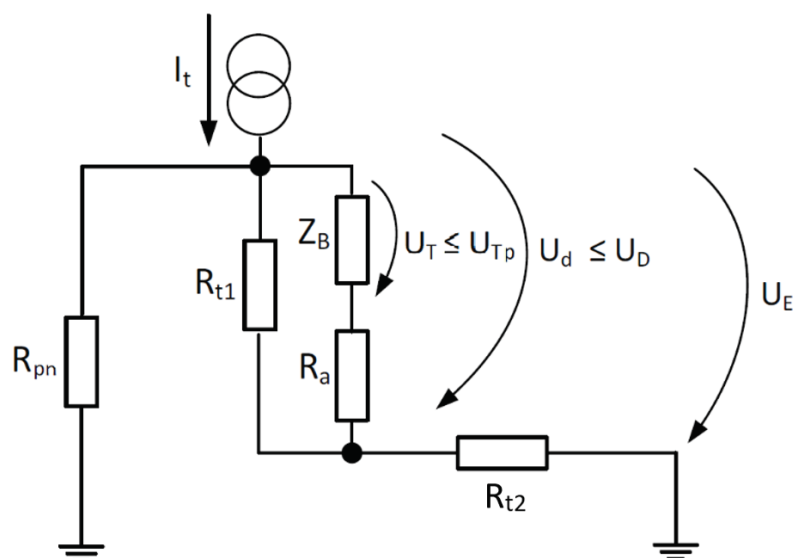
St. č.	$R_i$ základ ( $\Omega$ )	$U_D$ (V) - dovolené	$U_a$ (V) - vypočtené	Blízkost osob	Dodatečné opatření	Tvar zemnicí soustavy
1	1,6	344	1163	ANO	NE	-
2	10,0	392	359	ANO	ANO	Pásky 1 x 10,3 m
3	4,2	368	521	ANO	ANO	Ekvipotenciální kruhy
4	2,0	354	791	NE	NE	-
5	2,7	340	1185	ANO	NE	-
6	15,0	412	352	ANO	ANO	Pásky 2 x 17 m
7	15,0	413	352	NE	ANO	Pásky 3 x 17,3 m
8	17,3	522	326	NE	ANO	Pásky 4 x 22 m

Tab. 7.4: Náhled karty Tisk – Výstupní tabulka pro tisk

### 7.3. Algoritmus výpočtu

V této podkapitole se věnuji problematice samotného programu, který je z naprosté většiny na kartě 4. *Výpočet*. Tam jsem se musel vypořádat s několika úskalími, jejichž řešení, které jsem zvolil, popisují dále.

Hlavní myšlenkou přídavného uzemnění je rozdělení proudu procházejícího stožárovou konstrukcí do další větve, tedy aby poruchový proud procházel především strojeným zemničem. Pro lepší vysvětlení zde uvádím Obr. 7.9, na kterém jsou vymezeny příslušné pojmy. Z obrázku lze dobře pochopit vliv přídavného uzemnění (větve  $R_{pn}$ ), a také následující použité vztahy pro algoritmus. Právě větví  $R_{pn}$  snižujeme množství (velikost) proudu, který by mohl protékat lidským tělem (větví  $Z_B + R_a$ ).



Obr. 7.9: Schéma stožárové konstrukce včetně strojeného zemniče při dotyku osoby <sup>59</sup>

#### Legenda:

$I_t$ ... proud procházející stožárovou konstrukcí (A)

$R_{t1}$ ... reálná část impedance části uzemnění v prostoru paty podpěrného bodu ( $\Omega$ )

$R_{t2}$ ... odpor uzemnění v místě s nulovým potenciálem (podzemní část stožáru) ( $\Omega$ )

$Z_B$ ... impedance těla ( $\Omega$ )

$R_a$ ... přídavná impedance (např. obuv) ( $\Omega$ )

$R_{pn}$ ... odpor soustavy paprsků ( $\Omega$ )

$U_{Tp}$ ... dovolené dotykové napětí (V)

$U_T$ ... dotykové napětí (V)

$U_d$ ... napětí, které se vyskytuje na  $R_{t1}$  (V)

$U_D$ ... napětí na patě stožáru (V)

$U_E$ ... napětí na uzemnění stožáru proti referenční zemi (V)

### 7.3.1. Výpočet zemního odporu paty stožáru

Vzorec pro zemní odpor železobetonového stožáru udává *PNE 33 0000-4 – Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*, ve které se také nachází graf pro odhad koeficientu  $K_{I1}$  pro ocelovou výztuž pilotového základu nebo základu stožáru. Nutno dodat, že hodnoty na ose  $x$  jsou v normě uvedeny chybně, a proto přikládám svůj graf již se správnými hodnotami

<sup>59</sup> PNE 33 3300-1 (prosinec 2017) – *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vln a zvn*, str. 4, upraveno.



na osách. Na ose  $x$  je poměr hloubky ku šířce základu ( $L_p/D_p$ ) a na ose  $y$  pak hodnota koeficientu  $K_{11}$ . Z tohoto grafu jsem následně získal směrnici funkce pro koeficient.

Zemní odpor paty stožáru:

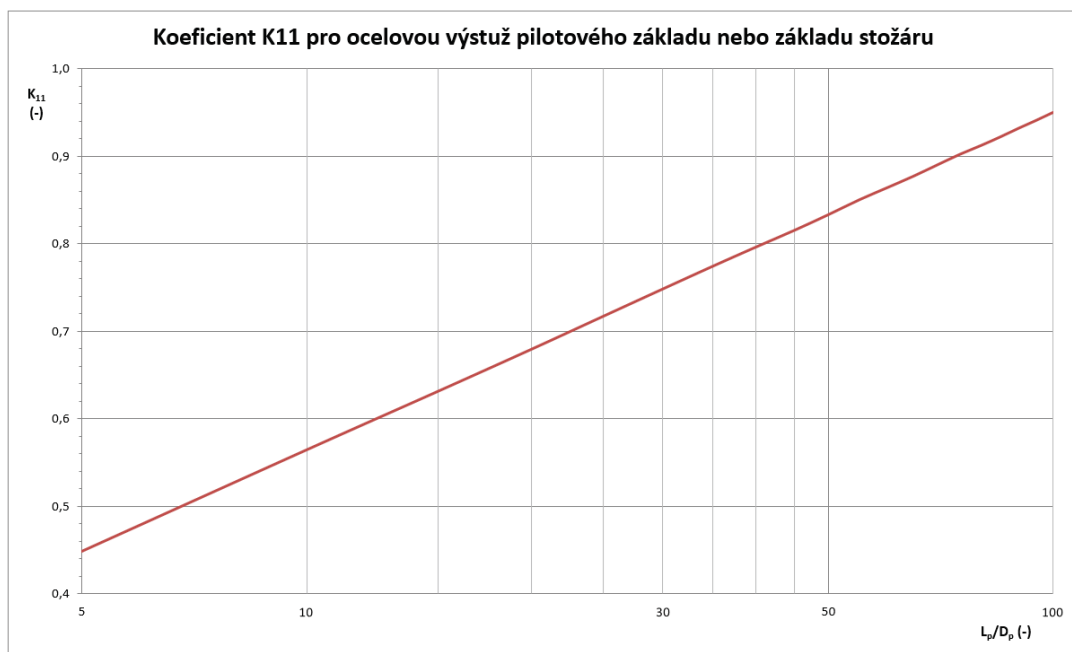
$$R_z = 1,1 \cdot K_{11} \cdot \frac{\rho_E}{L_p} \quad (\Omega; -, \Omega\text{m}, \text{m}) \quad (7.1)$$

kde:

$K_{11}$ ...koeficient pro ocelovou výztuž základu stožáru

$\rho_E$ ...rezistivita půdy

$L_p$ ...hloubka základu



Obr. 7.10: Koeficient  $K_{11}$

### 7.3.2. Algoritmus výpočtu paprskového zemniče

Pro výpočet počtu a délky pásků paprskového zemniče (dále jen „pásky“ nebo „paprsky“) jsem musel přistoupit k problematice popsané v normách PNE 33 0000-4 – *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele* a PNE 33 3300-1 – *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn* poněkud netradičně a pomocí zpětné analýzy dílčích kroků se dopracovat k požadovaným neznámým. Dle algoritmu návrhu přistupuji k výpočtům

pásků jen v případě, že platí  $R_Z > R_{dov}$ . Jelikož je nutné využít vzorec pro odpor povrchového zemniče  $R_E$  (6.1), přičemž hledáme délku zemniče  $L$ , kterou nelze vyjádřit ze vztahu analyticky, musel jsem využít jinou alternativní metodu.

Výpočtem jsem si vyhledal nejprve potřebný odpor paprskového zemniče  $R_{phl}$  (7.4), vyjádřený ze vzorce pro kombinaci železobetonového základu a paprskových zemničů  $R_E$  (7.2), kde jsem jako  $R_E$  uvažoval dovolený zemní odpor  $R_{dov}$  (7.3).

Kombinace železobetonového základu a paprskových zemničů: <sup>60</sup>

$$R_E = \frac{R_Z \cdot R_{pn}}{R_Z + R_{pn}} \cdot \frac{1}{0,9} \quad \rightarrow \quad R_{dov} = \frac{R_Z \cdot R_{phl}}{R_Z + R_{phl}} \cdot \frac{1}{0,9} \quad (\text{vše v } \Omega) \quad (7.2, 7.3)$$

kde:

$R_Z$ ...zemní odpor paty stožáru,

$R_{pn}$ ...odpor soustavy paprsků,

$R_{phl}$ ...hledaný odpor paprskového zemniče.

Odkud je hledaný odpor paprskového zemniče:

$$R_{phl} = \frac{0,9 \cdot R_{dov}}{1 - \left(\frac{0,9 \cdot R_{dov}}{R_Z}\right)} \quad (\Omega) \quad (7.4)$$

kde:

$R_{dov}$ ...dovolený zemní odpor,

$R_Z$ ...zemní odpor paty stožáru.

Pomocí již známé hodnoty  $R_{phl}$  jsem dále hledal požadovanou délku pásku  $L$ . Pomohl jsem si k tomu metodou půlení intervalu, kterou jsem si naprogramoval v nástroji *Microsoft Visual Basic for Applications* (VBA) dostupném přímo v *MS Excel*.

Vzorec využitý pro metodu půlení intervalu při hledání délky pásku:

$$R_{phl} = \frac{\rho_E}{\pi L_{id}} \ln \frac{2L_{id}}{d} \quad (\Omega; \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}, \text{m}) \quad (7.5)$$

kde:

$\rho_E$ ...rezistivita půdy,

$L_{id}$ ...délka jednoho ideálního pásku,

$d$ ...poloviny šířky pásku zemniče.

---

<sup>60</sup> PNE 33 0000-4 (3.vydání) – *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele*, str. 14.

Pro výrazné zjednodušení výpočtu jsem hledal délku jednoho ideálního paprsku  $L_{id}$  a následně ji použil jednoduše pro vyjádření počtu paprsků podle následující tabulky, kdy max. délka jednoho paprsku je 20 m a max. počet paprsků jsou čtyři. Označení  $L_{id}$  jsem volil proto, jelikož při výpočtu může délka teoreticky nabývat libovolné kladné hodnoty, mnou omezenou na 10 000 m, jakožto horní krajní mez pro metodu půlení intervalu.

Délka ideálního paprsku - $L_{id}$	Počet paprsků
< 20 m	1
20 - 40 m	2
40 - 60 m	3
> 60 m	4

Tab. 7.5: Počet paprsků zemniče podle zjištěné délky ideálního paprsku

V dalším kroku určuji délku jednoho paprsku zemniče  $L_I$ . Pro zjištění této délky je opět využita metoda půlení intervalu, kde je oproti předchozímu již zahrnut počet paprsků (Rov. 7.6) a jejich koeficientem využití (Tab. 7.6).

Paprskové zemniče sestávající z  $n$  stejných paprsků:

$$R_{pn} = \frac{R_p}{n} \cdot \frac{1}{\eta_{pn}} \quad (\Omega; \Omega, ks, -) \quad (7.6)$$

kde:

$R_p$ ...zemní odpor jednoho paprsku

$\eta_{pn}$ ...koeficient využití paprsků

Počet paprsků	Koeficient využití
$n = 1, 2$	$\eta_{pn} = 1$
$n = 3$	$\eta_{pn} = 0,9$
$n = 4$	$\eta_{pn} = 0,836$

Tab. 7.6: Koeficient využití podle počtu paprsků

Nyní již znám počet paprsků a jejich délku, a tak mohu vypočítat ekvivalentní odpor základu stožáru se strojeným paprskovým zemničem  $R_E$  podle vzorce 7.2.

Postup pro výpočet paprskového zemniče (včetně skrytých sloupců) je na Obr. 7.11. Hodnoty buněk vstupují do vzorců následujících buněk pouze směrem doprava, a jdou tak kontinuálně a logicky za sebou, jak znázorňují šipky následníků. Sloupce buněk se světle šedým záhlavím slouží k pomocným výpočtům, které jsou popsány výše. Jsou jimi hledaný odpor paprskového zemniče  $R_{phi}$  a délka ideálního paprsku  $L_{id}$ , které slouží

k určení počtu paprsků, a nakonec celkový odpor soustavy paprsků  $R_{pn}$  sloužící pro výpočet ekvivalentního odporu základu se strojeným zemničem  $R_E$ .

Dovolený zemní odpor stožáru	Zemní odpor paty stožáru	Porovnání $R_z$ a $R_{dov}$	Hledaný odpor paprskového zemniče	Pom. výpočet pro určení počtu paprsků	Počet paprsků strojeného zemniče	Délka jednoho paprsku zemniče	Odpor soustavy paprsků	Ekvivalentní odpor základu se strojeným zemničem
$R_{dov}$ ( $\Omega$ )	$R_z$ ( $\Omega$ )	$R_z < R_{dov}$ (A/N)	$R_{phl}$ ( $\Omega$ )	$L_{id}$ (m)	Paprsků (ks)	$L_1$ (m)	$R_{pn}$ ( $\Omega$ )	$R_E$ ( $\Omega$ )
10	1,65	ANO	-	-	-	-	-	1,65
10	10,19	NE	77,13	8,3	1	8,3	76,7	9,99
10	4,15	ANO	-	-	-	-	-	4,15
10	1,97	ANO	-	-	-	-	-	1,97
15	2,69	ANO	-	-	-	-	-	2,69
15	22,78	NE	33,14	29,9	2	15,0	33,0	14,97
15	29,34	NE	25,00	41,2	3	15,3	24,9	14,98
15	26,60	NE	27,41	94,8	4	20,0	57,4	17,27

Obr. 7.11: Postup výpočtu pásků po ekvivalentní odpor  $R_E$

Vidíme, že s použitím pásků se odpor  $R_E$  sníží na požadovaný  $R_{dov}$ . Pouze v případě, kdy je navržen max. počet pásků, tedy čtyři, nemusí hodnota ekvivalentního odporu uzemnění dostatečně klesnout. Další už program neřeší a je na projektantovi, aby navrhnul jiné dodatečné opatření jako je například kombinace paprskového zemniče s tyčovým zemničem, nebo může udělit danému stožáru výjimku dle normy PNE 33 3300 – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV* (viz kapitola 5.1.).

## 8. OVĚŘENÍ VÝPOČETNÍHO NÁSTROJE

Výpočetní nástroj pro výpočet odporu základu stožáru a návržení případného dodatečného opatření jsem ověřil na zrealizované stavbě „Hlinsko – Polička, vedení 110 kV“. Pro tuto stavbu byl připraven návrh uzemnění laboratoří EGU – HV Laboratory a.s. (dále jen „EGU“), ve kterém se počítá se speciálními typy zemního uspořádání (dva z nich uvádím na Obr. 6.4). Právě s výsledky tohoto velmi specifického návrhu porovnávám výpočet dle mnou navrženého programu.

### 8.1. Návrh uzemnění laboratoří EGU

Jak uvádí zpráva laboratoře EGU „Návrh opatření pro uzemnění stožárů vedení 110 kV Hlinsko-Polička“, pro výpočet byly vstupními údaji naměřené hodnoty rezistivity v místech podpěrných bodů, rozměrové náčrtky stožárů, možné zkratové poměry v soustavě a přehledný soupis vedení.

Pro návrh byly navíc vytvořeny 3D modely nízkofrekvenčního proudového pole zvažovaných uzemnění a počítány hodnoty odporu při předpokládané homogenní půdě v okolí daného podpěrného bodu. Na základě těchto výpočtů byly pro vybrané rezistivity navrženy uzemňovací soustavy tak, aby zemní odpor vyhověl požadavkům normy ČSN EN 50341-1 – *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1 kV - Část 1: Obecné požadavky - Společné specifikace*. Následně byly spočteny předpokládané zemní odpory s těmito uzemňovacími soustavami.<sup>61</sup>

Důvodem, proč bylo potřeba speciálního návrhu uzemnění laboratoře je to, že velká část stožárů se nachází na místech s velmi velkou hodnotou rezistivity půdy, což do jisté míry ztěžuje správný návrh uzemnění.

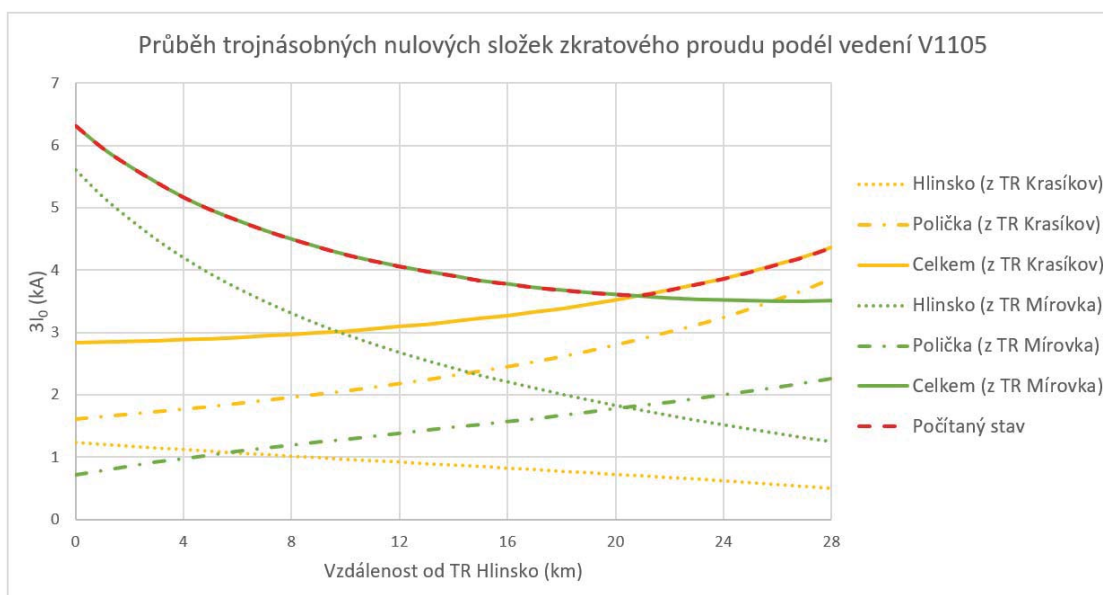
---

<sup>61</sup> EGU – HV Laboratory a.s., MUSIL L., ŠVANCAR M.: *Návrh opatření pro uzemnění stožárů vedení 110 kV Hlinsko-Polička*, září 2016.

## 8.2. V1105/V1106/V1107: Hlinsko – Polička

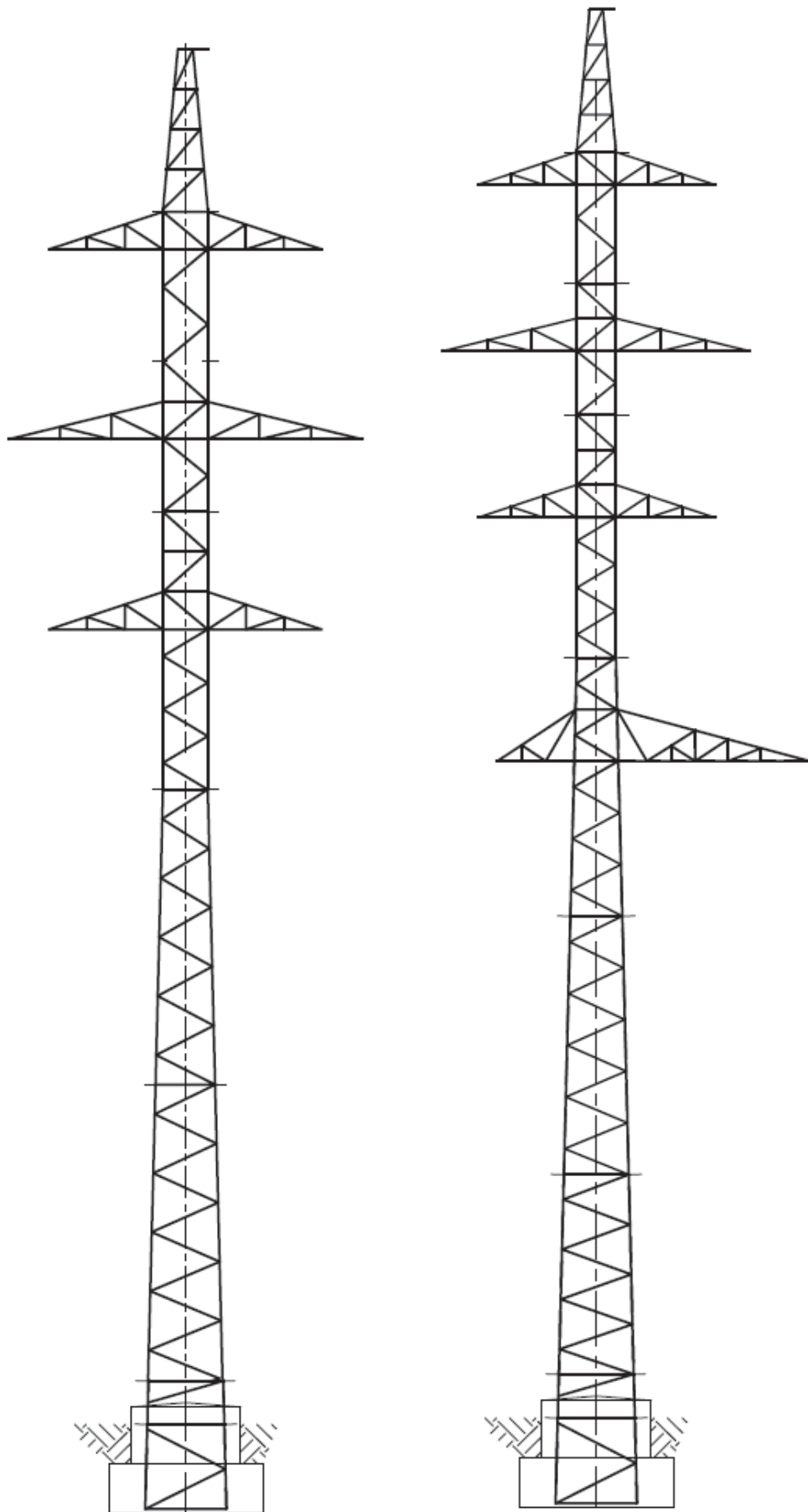
Stavba linky vedení V1105/V1106/V1107 je specifická tím, že na části vedení je souběh linky VVN a linky VN, pro něž jsou zkonstruovány speciální stožárové konstrukce vycházející ze stožáru typu soudek. Tyto stožáry nesou obě napěťové hladiny, tedy na jednom stožáru je zároveň vedení VVN i VN (Obr. 8.2 vpravo). Týká se to části trasy od stožáru č. 73 po stožár č. 185. Ostatní stožáry jsou typu soudek (Obr. 8.2 vlevo).

Důležitou informací je technický fakt, že vedení V1105 je možno napájet ze dvou směrů. První možností je napájet rozvodnu Polička (Svitavy) z TR Krasíkov, druhou možností pak rozvodnu Hlinsko z TR Mírovka. Na základě napájecí cesty jsou na vedení dvě varianty zkratových poměrů (Obr. 8.1).



Obr. 8.1: Graf průběhů  $3I_0$  podél vedení

Pro výpočet uzemnění však uvažují tu nejnepříznivější variantu, kdy do určité vzdálenosti vedení uvažují napájení z rozvodny Mírovka, dále pak z rozvodny Krasíkov. Průběh trojnásobných nulových složek zkratového proudu pak uvádím na Obr. 8.1, kde je vidět složení zkratových proudů (příspěvky jednotlivých transformoven včetně součtu těchto příspěvků pro obě cesty napájení), a také nejméně příznivý uvažovaný stav. Tímto způsobem zanesu do výpočtu maximální zkratové proudy a dimenzování uzemnění vyhoví libovolné variantě směru napájení.



Obr. 8.2: Stožár typu soudek (vlevo) a atyp soudek s konzolou pro vn (vpravo)

### 8.3. Porovnání tvaru uzemnění a hodnot jeho odporu

Na nové trase vedení 110 kV z Hlinska do Poličky jsem měl k dispozici naměřené hodnoty rezistivity půdy u několika desítek stožárových míst. Pro tyto stožáry jsem ověřil funkčnost výpočetního programu. V Tab. 8.1 uvádím k jednotlivým stožárům zrealizovaný typ uzemnění navržený laboratoří EGU a k nim vypočtené hodnoty odporu uzemnění, a dále také vypočtené hodnoty ekvivalentního odporu uzemnění při daných návrzích tvaru uzemnění výpočetním programem. Navíc je v tabulce i informace o tom, zda se jedná o stožár v blízkosti osob, či nikoli. Nyní se pojd'me věnovat jednotlivým stožárům a dílčím návrhům jejich uzemnění.

V případě stožáru č. 1 vidíme, že návrh EGU je sice ve variantě s ekvipotenciálními kruhy, avšak i dle návrhu s pásy můžeme dosáhnout přibližně stejné hodnoty odporu uzemnění. Blízkost osob zde však není očekávána, a tak se zdá být návrh s pásy dostačující, avšak jistou roli zde mohou hrát inženýrské sítě nacházející se poblíž stožáru, a tak může být omezeno tažení pásu v určitém směru, ostatně jak vidíme na návrhu EGU, kdy je navrhnut půlkruh (Kpul11) zřejmě právě z tohoto důvodu.

U stožárů č. 23 a č. 157 je patrné, že s paprskovým zemničem nemůže (z důvodu velmi vysoké rezistivity půdy) odpor uzemnění klesnout ani zdaleka na požadovanou hodnotu, a tak se zde (přestože se nejedná o místo s častým výskytem osob) přistoupilo zcela logicky k velmi robustní variantě uzemnění v podobě ekvipotenciálních kruhů navíc i s tyčovými zemniči (4K11-8T5).

Pro stožár č. 41 by pak dle programu vyhověly pouze dva pásy, avšak EGU i zde navrhuje opatření s ekvipotenciálními kruhy (1P15-2K3). Je to zřejmě proto, že se jedná o místo často navštěvované lidmi, a tak použití kruhů zde může být na místě. Přesto nejde o variantu čistě s kruhy, ale pro zlepšení hodnoty odporu uzemnění je doplněna jedním paprskem o délce 15 m. I u stožáru č. 54 a č. 153 by mělo postačit paprskové uzemnění, ale EGU navrhlo totéž řešení, jako dokonce i pro stožár č. 120, kde program nenavrhuje žádné přídatné uzemnění. Obdobně je tomu i u stožáru č. 73 (3P13-2K3), kde program navrhuje dva pásy.

Ani u stožáru č. 53 nedochází ke shodě návrhu uzemnění programem s návrhem EGU, které nenavrhuje žádné dodatečné opatření. Vidíme však, že jimi vypočtená hodnota odporu uzemnění dosahuje 16  $\Omega$ , což převyšuje maximální dovolenou hodnotu (zřejmě



byla udělena výjimka tomuto stožáru). Tuto hodnotu pak lze snížit právě použitím jednoho paprsku.

U stožáru č. 89 nám může být otázkou, proč EGU navrhlo dodatečné opatření uzemnění, přestože, jak je vidět, i bez dodatečného opatření je hodnota odporu uzemnění  $14 \Omega$ . Tento stožár se již nachází v části trasy, kde jsou stožáry kombinované (atyp soudku s VN), a jelikož se na tomto stožáru nachází odpojovač, bylo navrženo dodatečné opatření.

Konečně u stožáru č. 90 nacházíme soulad návrhů. Hodnota odporu uzemnění sice vyhovuje, ale z důvodu blízkosti osob a vysoké hodnoty dotykového napětí je zde nutné vybudovat uzemnění s ekvipotenciálními kruhy. Postačí nám však poměrně minimalistická varianta (2K3), jak navrhuje EGU. Obdobně platí i pro stožáry č. 108, 110, 113, 144, 154 a 156, u kterých se hodnoty odporu uzemnění mezi výpočtem EGU a výpočtem programu liší jen minimálně.

U stožárů 104, 107 a 115 program uvádí, že postačuje základní návrh a dodatečného opatření netřeba, což je vidět na nízkých hodnotách odporu uzemnění. Nicméně zde vidíme opět návrh EGU méně rozsáhlé uzemňovací soustavy s ekvipotenciálními kruhy (2K3) stejně jako v předchozím případě pravděpodobně z důvodu blízkosti osob.

Pro stožáry č. 100 až 103, 111 a 114 navrhlo EGU rozsáhlé uzemnění (Kpul13-3K7) z důvodu vysokých hodnot rezistivity půdy, nikoli však z důvodu potřeby provést ekvipotenciální kruhy. To je vidět na tom, že výpočetní program navrhuje v těchto případech vždy nejrozsáhlejší variantu paprskových zemničů (4 x 22 m), což ani z daleka nepostačuje ke snížení hodnot odporu uzemnění, a právě proto je navrženo EGU již zmíněné uzemnění. Obdobně platí pro stožáry č. 112, 117 a 122 (Kctvrt13-2K3-5T5) a pro stožáry č. 118 (Kctvrt13-1K1) a č. 119 (3K11).

V případě stožárů č. 105 a 106 jsou v obou případech navrženy varianty čtyř pásků, kde EGU navíc počítá s čtyřmi 5 m dlouhými tyčemi o průměru 5 cm na konci každého z pásků délky 15 m (4Pz15-4T5). Shodu ve variantě uzemnění najdeme také v případě stožárů č. 109 a 143, kde jsou navrženy EGU čtyři paprsky s délkou 7 m (4Pz7). Výpočetní program pak pro stožár č. 109 navrhuje 4 pásy s délkou 22 m, kde je poněkud zvláštní rozpor mezi hodnotami odporu uzemnění, který lze jen těžko vysvětlit. U stožáru č. 143 pak program navrhuje pouze dva pásy s délkou 12,9 m. Obdobně také u stožáru č. 142, kde EGU navrhuje dva pásy (2P15) a program pásek pouze jeden.

A nakonec se dostáváme ke stožárům, kde nacházíme shodu v obou návrzích. Pro stožáry č. 121, 155, 180, 185, 186 a 190 není potřeba dodatečného opatření uzemnění. Více pak lze vyčíst z přílohy 1 – list 5.

Přestože se dílčí návrhy uzemnění stožárů uvedených v Tab. 8.1 ne vždy shodují, je nutné si uvědomit, že mnou navržený výpočetní program poskytuje rychlý a jednoduchý návrh řešení. Návrh uzemnění stožárů od EGU je pak vyladěným řešením s ohledem na okolí daného stožárového místa (inženýrské sítě apod.).

Program vychází z normy PNE 33 3300-1 – *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění vedení vvn a zvn*, která byla připravena až na základě studie EGU a dalších zkušeností z praxe. Je také důležité, aby projektant vždy, a především pak v případě, kdy dochází k návrhu uzemnění ve tvaru „Pásky 4 x 22 m“, zkontroloval hodnotu ekvivalentního odporu základu stožáru se strojeným zemničem  $R_E$ , a v případě potřeby rozšířil návrh opatření, nebo doporučil jiné dle metodiky.

Veškeré typy uzemňovacích soustav stožárů na lince Hlinsko – Polička jsou pak k nahlédnutí v příloze 2. V příloze 3 jsou pak fotografie přímo z této stavby. Přílohou projektové dokumentace stupně DPS „Výpočet přídatného uzemnění“ by pak mohl být přímo výstupní list Excelu „Návrh zemnicí soustavy“ (karta 5.*Tisk*). Tento výstupní list výpočetního programu je uveden v příloze 1 – list 7.

Číslo stožáru	Blízkost osob	Navržený typ uzemnění EGU – HV Laboratory	Vypočtený odpor uzemnění $R_g$ ( $\Omega$ )	Navržený tvar uzemnění výpočetním programem	Ekvivalentní odpor uzemnění $R_E$ ( $\Omega$ )
1	NE	36,1Kpul11-2K3/O90	16	Pásy 4 x 22 m	15,5
23	NE	53,3/4K11-8T5	41	Pásy 4 x 22 m	73,0
41	ANO	23,4/1P15-2K3	13	Pásy 2 x 18,9 m	15,0
53	NE	-	16	Pásy 1 x 20,5 m	15,0
54	ANO	23,4/1P15-2K3	17	Pásy 2 x 13,4 m	15,0
73	ANO	28,3/3P13-2K3/O90	18	Pásy 2 x 20,5 m	15,0
89	NE	16,6/1P15	14	-	14,0
90	ANO	18,5/2K3	8	Ekvipotenciální kruhy	8,3
100	ANO	52/1Kpul13-3K7	17	Pásy 4 x 22 m	24,8
101	ANO	52/1Kpul13-3K7	27	Pásy 4 x 22 m	70,8
102	ANO	52/1Kpul13-3K7	43	Pásy 4 x 22 m	105,4
103	ANO	52/1Kpul13-3K7	32	Pásy 4 x 22 m	62,7
104	ANO	18,5/2K3	4	-	3,5
105	ANO	40,4/4Pz15-4T5	17	Pásy 4 x 22 m	24,2
106	ANO	40,4/4Pz15-4T5	19	Pásy 4 x 22 m	24,6
107	ANO	18,5/2K3	5	-	4,8
108	ANO	18,5/2K3	10	Ekvipotenciální kruhy	8,3
109	ANO	32,7/4Pz7	15	Pásy 4 x 22 m	28,9
110	ANO	18,5/2K3	7	Ekvipotenciální kruhy	6,1
111	ANO	52/1Kpul13-3K7	94	Pásy 4 x 22 m	159,0
112	ANO	38,6/2Kctvrt13-2K3-5T5	63	Pásy 4 x 22 m	93,7
113	ANO	18,5/2K3	10	Ekvipotenciální kruhy	7,0
114	ANO	52/1Kpul13-3K7	19	Pásy 4 x 22 m	28,8
115	ANO	18,5/2K3	12	-	12,9
117	ANO	38,6/2Kctvrt13-2K3-5T5	59	Pásy 4 x 22 m	58,5
118	NE	36,4/2Kctvrt13-1K1	43	Pásy 4 x 22 m	55,6
119	ANO	47/3K11	15	Pásy 4 x 22 m	20,7
120	ANO	23,4/1P15-2K3	14	-	14,6
121	NE	-	15	-	5,4
122	ANO	38,6/2Kctvrt13-2K3-5T5	31	Pásy 4 x 22 m	32,2
142	NE	23/2P15	12	Pásy 1 x 10,7 m	15,0
143	NE	32,7/4Pz7	13	Pásy 2 x 12,9 m	15,0
144	ANO	18,5/2K3	10	Ekvipotenciální kruhy	10,3
153	ANO	23,4/1P15-2K3	14	Pásy 2 x 16,7 m	15,0
154	ANO	18,5/2K3	11	Ekvipotenciální kruhy	10,2
155	NE	-	14	-	5,1
156	ANO	18,5/2K3	9	Ekvipotenciální kruhy	9,1
157	NE	53,3/4K11-8T5	63	Pásy 4 x 22 m	96,6
180	NE	-	6	-	0,9
185	NE	-	7	-	1,3
186	NE	-	7	-	1,6
190	NE	-	8	-	1,6

Tab. 8.1: Porovnání tvaru uzemnění a vypočtených hodnot odporu



## 9. VÝSTAVBA NOVÉHO VEDENÍ VVN A ZVN

Při potřebě postavit nové distribuční nebo přenosové vedení podá investor zadávací návrh. Investorem je provozovatel přenosové, resp. distribuční soustavy, který má podle § 24 a § 25 energetického zákona<sup>62</sup> povinnost zajišťovat spolehlivé provozování a rozvoj přenosové soustavy, resp. distribuční soustavy na území vymezeném licenci.

Investor (taktéž objednatel) stanoví podmínky stavby, počet stupňů realizace, a zda se bude celé stavbě věnovat pouze jedna firma, nebo bude projekt rozdělen na více částí. Následuje vypsání výběrového řízení a přihlášení zájemců, z nichž je, nebo jsou vybráni zhotovitelé.

### 9.1. Typy dokumentace

Každá stavba musí být postavena či rekonstruována na základě projektové dokumentace (PD). Zpracování PD je vždy tzv. vybranou činností ve výstavbě<sup>63</sup> a smějí ji zpracovávat jen a pouze autorizované osoby<sup>64</sup>. Pokud jde o kompletně novou stavbu, je nutno zajistit všechny následující typy (stupně) dokumentace. Jejich podobu stanovuje mimo jiné i vyhláška o dokumentaci staveb č. 499/2006 Sb.

#### 9.1.1. Územně plánovací dokumentace – ÚPD

Na samém prvopočátku myšlenky výstavby nové linky vedení je zapotřebí provést územně technické studie (ÚTS). Tyto studie stanovují odkud a kam povede vedení a navrhnou se různé varianty trasy linky, přičemž je zohledněno geografické rozložení (jako

---

<sup>62</sup> Zákon č. 458/2000 Sb. – Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů; § 24. Provozovatel přenosové soustavy, § 25. Provozovatel distribuční soustavy.

<sup>63</sup> Zákon č. 183/2006 Sb. – Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů; § 168. Projektová činnost ve výstavbě.

<sup>64</sup> Způsobilost autorizovaných osob ověřují a jejich seznamy vedou Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě a Česká komora architektů.

například řeky, hory a další přírodní překážky). Dále je vhodné vyhnout se legislativnímu konfliktu, kdy hrají jistou roli koridory jiných sítí, územní plány<sup>65</sup> nebo zásady územního rozvoje<sup>66</sup> (např. plánovaná dálnice).

Takovým prvotním návrhem může být jednoduše přímka spojující potřebné body, jenže budovat vedení na našem území s ohledem na výše uvedené je prakticky nemožné, a tak se v průběhu návrhu trasy postupně odklání na různé strany a trasa se tvaruje až do konečné možné podoby.

Investorovi jsou pak předloženy všechny návrhy zhodnocené technicky, ekonomicky i legislativně, ze kterých si investor (obvykle s přihlédnutím na doporučení projektanta nebo realizační firmy) vybere variantu pro něj nejvhodnější. Pro ni je následně zpracována územně plánovací dokumentace, která musí být v souladu s ÚTS. Blíže vymezuje koridor vedení s určitou přesností a jejím cílem je umožnit zanesení stavby do územního plánu.

### 9.1.2. Dokumentace pro územní rozhodnutí – DÚR

Zahajuje se jednání s vlastníky pozemků dotčených stavbou přímo i nepřímo. K tomu napomáhá tzv. věčné břemeno (dle občanského zákoníku „služebnost“), které je ze zákona<sup>67</sup> povinen provozovatel přenosové (resp. distribuční) soustavy zřídit, a umožňuje mu tak zřizovat a provozovat na cizích nemovitostech zařízení přenosové (distribuční) soustavy, přetínat tyto nemovitosti vodiči a umísťovat v nich vedení.

Dochází k vymezení stožárových míst, určení konkrétních typů stožárů (např. soudek, delta...), jejich funkce (kotevní, nosný) a jejich celkové výšky. S tím souvisí následný proces EIA (Environmental Impact Assessment)<sup>68</sup>, který je veden krajským úřadem (v případě staveb nadzemních vedení elektrické energie o napětí od 110 kV s délkou

---

<sup>65</sup> Územní plány (ÚP) jsou základním nástrojem územního plánování, který je závazným podkladem pro rozhodování v území, tj. závazný poklad pro vydání územního rozhodnutí a stavebního povolení.

<sup>66</sup> Zásady územního rozvoje (ZÚR) jsou součástí územně plánovací dokumentace, kterou kromě nich tvoří územní plán a regulační plán. ZÚR se pořizují a vydávají pro území celého kraje.

<sup>67</sup> Zákon č. 458/2000 Sb. – Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů; § 24. Provozovatel přenosové soustavy, § 25. Provozovatel distribuční soustavy.

<sup>68</sup> Cílem EIA je získat představu o výsledném vlivu stavby na životní prostředí. Na základě této studie se rozhoduje, zda je možné stavbu realizovat a za jakých podmínek. Řídí se Zákonem o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů č. 100/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů.

od 2 km), nebo Ministerstvem životního prostředí (v případě staveb nadzemních vedení elektrické energie o napětí od 220 kV s délkou od 15 km).<sup>69</sup>

Dokumentace pro územní rozhodnutí je nejrozsáhlejší, co se týče majetkově-právních a ekologicko-právních náležitostí. Obsahuje umístění stavby v konkrétní podobě včetně studie EIA vyhodnocující dopad stavby vedení na krajinný ráz.

### 9.1.3. Dokumentace pro provedení stavby – DPS

Jedná se o tzv. realizační dokumentaci, tedy podklad pro realizaci stavby. DPS oproti předcházejícím dokumentacím již obsahuje zcela konkrétní technické řešení (konkrétní použité prvky od konkrétních výrobců). V této fázi je také potřeba dořešit a vyrovnat veškeré majetkově-právní vztahy s vlastníky pozemků. Jde o poslední stupeň dokumentace před samotným zhotovením výstavby nového vedení.

V případě, že není plánována výstavba vedení stejnou firmou, která vytváří dokumentaci pro provedení stavby, je také připravena dokumentace pro výběr zhotovitele.

### 9.1.4. Dokumentace skutečného provedení stavby – DSPS

Závěrečným dokumentem k realizované stavbě je dokumentace skutečného provedení stavby, ve které je zachycen konečný stav stavby. DSPS se může od DPS více, či méně lišit podle toho, jak moc se změnila podmínky, technické okolnosti nebo byly zjištěny jiné důvody k potřebě realizovat nějakou část odlišně od DPS. Jakékoliv nutné změny jsou během výstavby konzultovány se zodpovědným projektantem stavby. Realizátor stavby následně předá veškeré provedené změny oproti DPS projektantovi jako podklady pro DSPS, a ten je zanesl do této dokumentace.

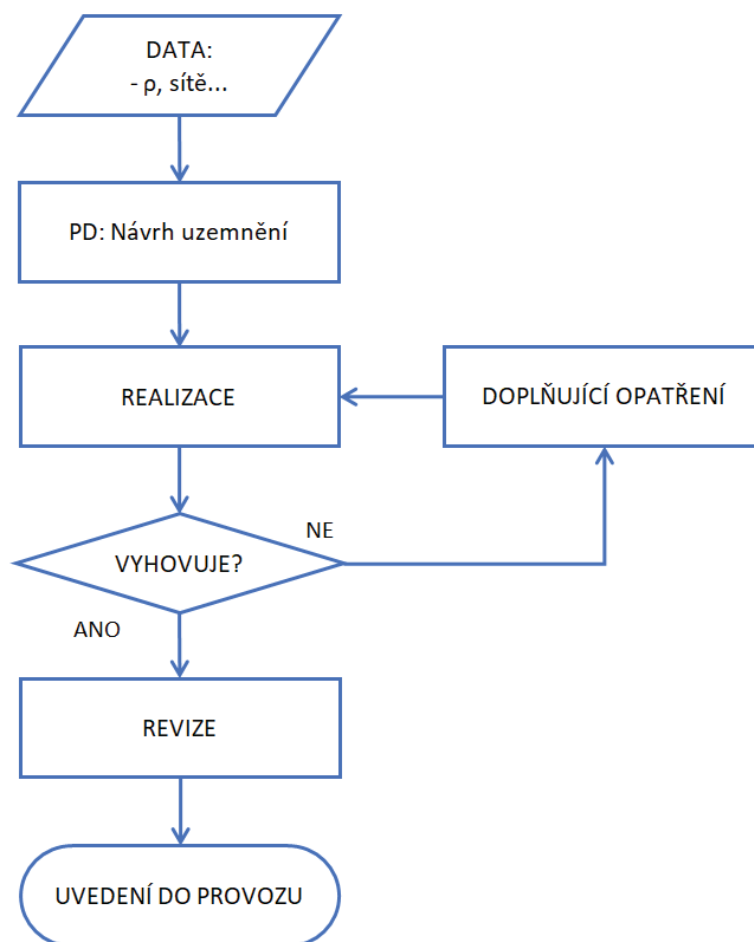
Zhotovitel nakonec předává celé dílo včetně dokumentace skutečného provedení stavby a příslušných revizních zpráv.

---

<sup>69</sup> Příloha č. 1 k Zákonu o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí) č. 100/2001 Sb ve znění pozdějších předpisů.

## 9.2. Postup uzemnění stožárů VVN a ZVN

Celý proces, kterým je nutné projít u každého navrženého a zrealizovaného nového podpěrného bodu je znázorněn na vývojovém diagramu na Obr. 9.1. Pod tímto diagramem pak blíže popisují jednotlivé kroky.



Obr. 9.1: Postup při uzemňování stožáru

### Postup uzemnění stožárů:

#### 1. Získání podkladů a dat

Nejprve je nutno získat veškerá potřebná data pro výpočet potřeby uzemnění stožáru, případně jeho rozsahu. Tyto podklady se zajistí provedením geologického průzkumu. Při něm se změří rezistivita půdy v trase linky vedení a zmapují se veškeré inženýrské sítě jejím okolí, aby se vyhnulo možné kolizi s nimi.



## 2. Projektová dokumentace

V tomto kroku se ze získaných dat vytváří projektová dokumentace DPS, ve které se určí ke každému stožárovému místu způsob jeho uzemnění (bez přídavného uzemnění, nebo konkrétní typ přídavného uzemnění).

## 3. Realizace

Podle DPS se stavba zrealizuje a přeměří se skutečné provedení základu nebo uzemnění. Získané hodnoty se porovnají s hodnotami v projektové dokumentaci a vyhodnotí se skutečný stav jako horší, nebo lepší než předpokládaný navrhovaný, případně stejný. Pokud výsledek je horší a nevyhovuje, je nutné vrátit se k předchozímu bodu a provést další opatření.

Během realizace probíhají kontrolní dny, kde se řeší změny v rámci stavby. Pro tuto činnost figuruje zodpovědný projektant jako autorský dozor nad stavbou.

## 4. Revize podpěrných bodů (obecně celého vedení)

Po finální realizaci stavby následuje revize vedení a podpěrných bodů (včetně uzemnění) a revizní technik<sup>70</sup> sepíše výchozí revizní zprávu elektrického zařízení.

## 5. Spuštění do provozu

Na základě platné revizní zprávy s kladným závěrem, že vedení je možné uvést bezpečně do provozu, se stavba včetně dokumentace skutečného provedení stavby předá investorovi – provozovateli. Ten pak uvede novou linku distribučního/přenosového vedení do provozu.

---

<sup>70</sup> Revizním technikem je pracovník znalý s vyšší kvalifikací, který splňuje požadavky stanovené v § 9 Vyhlášky Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu o odborné způsobilosti v elektrotechnice č. 50/1978 Sb., ve znění pozdějších předpisů.



## 10. ZÁVĚR

Problematika uzemňování venkovního na vedení hladinách velmi vysokého napětí (VVN) a zvláště vysokého napětí (ZVN) je velice rozsáhlá, zabývá se jí mnoho technických norem, jejichž hlavní body jsou shrnuty především v podnikové normě PNE 33 3300 – *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*. Uzemňování se obecně provádí především za účelem ochrany lidského zdraví a bezpečnosti práce, z čehož také vyplývají základní požadavky na provedení uzemnění.

Neexistuje však žádná technická norma, která by stanovovala postup, podle kterého by mělo být uzemnění stožárů navrhováno. Existují ale technické normy, určující podmínky vyhovujícího uzemnění včetně maximálních přípustných hodnot odporu uzemnění stožáru, dovoleného krokového a dotykového napětí a dalších hodnot. Při návrhu uzemnění stožáru je proto nutné brát ohled na požadavky, které jsou zahrnuty v platných českých technických normách. Důležité je pak to, zda uzemnění stožárů vyhoví podmínkám stanoveným v technických normách. Nové, nebo zrekonstruované venkovní vedení je možné uvést do provozu jen na základě revizní zprávy, která konstatuje, že vyhovují veškeré bezpečnostní požadavky nejen na samotné uzemnění, ale na celé vedení jako elektrické zařízení.

Největším přínosem diplomové práce je mnou navržený výpočetní program pro odhad odporu základu stožáru, který je určen pro návrh uzemnění linek vedení VVN a ZVN. Výpočetní program je vytvořen pro projekční společnost ELEKTROTRANS a.s. Program ulehčuje práci projektantovi, šetří jeho čas, a tím i náklady projekční organizace. Celá diplomová práce vychází z platných českých technických norem uvedených v seznamu použitých technických norem.

Práci jsem navíc doplnil i o kapitolu věnovanou postupu při výstavbě nového vedení VVN a ZVN. V ní jsou popsány jednotlivé stupně projektové dokumentace a také celý postup návrhu uzemnění až po jeho konečné zhotovení. Při projektování a samotném návrhu uzemnění právě i pomocí výpočetního programu se v diagramu postupu návrhu uzemnění (str. 80) pohybujeme na rozmezí prvního a druhého kroku, kdy ze získaných podkladů a dat vytváříme projektovou dokumentaci stavby elektrického vedení.

## 10.1. Technický přínos

V diplomové práci jsem shrnul a objasnil veškeré nutné požadavky na vyhovující uzemnění stožárů na linkách nejvyšších napěťových hladin používaných na území České republiky, tedy na hladinách VVN a ZVN. Popsal jsem vznik a účinky dotykového a krokového napětí, což je hlavní důvod, proč při výstavbě elektrického vedení realizujeme také uzemňovací soustavy podpěrných bodů elektrického vedení. Věnoval jsem se možným tvarům uzemňovacích soustav stožárů, používaným zemničům a jejich montáži.

Z teoretické části diplomové práce pak vychází samotný výpočetní program. Program počítá hodnotu odporu uzemnění a přípustná dotyková a kroková napětí na jednotlivých zkoumaných stožárových místech. Mimo jiné podává program důležitou informaci o tom, zda je potřeba ještě navrhnout dodatečné uzemnění. Vyhodnotí-li program potřebu výstavby dodatečného uzemnění, pak navrhne konkrétní přídatné uzemnění v podobě paprskového zemniče, nebo upozorní na nutnost návrhu ekvipotenciálních kruhů. V případě potřeby pak projektant může (díky hodnotám přístupným v Excelu, jako je například zemní odpor paty stožáru, ekvivalentní zemní odpor stožáru se strojeným zemničem, přípustné dotykové a krokové napětí, vypočtené skutečné napětí na patě stožáru a dalším hodnotám) přizpůsobit konečný návrh uzemnění stožáru podle metodiky právě tak, aby vyhovělo.

Správnost chodu výpočetního programu jsem následně ověřil na zrealizované stavbě „Hlinsko - Polička, vedení 110 kV“, kde porovnávám svůj návrh s návrhem laboratoře EGU – HV Laboratory a.s. Praha – Běchovice.

Výpočetní program je určitou automatizací výpočtu uzemnění, jelikož dosud projektant musel sám, bez jakéhokoli pomocného programu, posuzovat každý stožár samostatně. To bylo časově náročné a neefektivní, nehledě na to, že byly vždy posuzovány jen stožáry na odlehlých místech vedení. Problematické stožáry a stožárová místa s častým výskytem osob byly nechávány k posouzení specializovanou laboratoří, která využívá 3D modely nízkofrekvenčního proudového pole. Takové posouzení sice program neumožňuje, ale snižuje potřebu přepočítání problematických stožárů externí laboratoří zhruba o 30 – 60 % oproti původnímu stavu, kdy nebyl k dispozici mnou vytvořený výpočetní program.

Díky technickému přínosu výpočetního programu lze následně určit ekonomický přínos. Výpočetní program navíc nešetří jen čas projektanta, ale i zpřesňuje návrh uzemnění. Na zrealizované stavbě totiž v některých případech dochází k nutnosti změny uzemnění z důvodu nevyhovujících skutečných naměřených hodnot uzemnění. I procento nutnosti rozšíření uzemňovací soustavy se sníží. Konkrétní údaje k tomu však ještě nejsou k dispozici.

## 10.2. Ekonomický přínos

Z praxe vím, že projektant věnuje samotnému uzemňování asi 10 % pracovního času z celkového času stráveného projektováním vedení. To je zhruba 60 pracovních hodin věnovaných uzemňování stožárů na lince vedení o 150 stožárových místech, což je v průměru 24 minut potřeby pracovního času na jeden stožár. Díky výpočetnímu programu se uspoří čas projektanta zhruba o 50 % pracovního času věnovanému samotnému uzemňování. To zkrátí průměrný čas práce strávený nad návrhem uzemňování jednoho stožáru na 12 minut.

Projekční společnost ELEKTROTRANS a.s. Praha, ve které jsem problematiku této diplomové práce řešil, v uplynulém roce vyprojektovala uzemnění na linkách vedení VVN a ZVN v celkovém počtu na více než 450 stožárových místech. Obecně je však počet navrhovaných stožárů za rok velmi proměnný, a každý rok se může diametrálně lišit. Uplynulý rok považuji za výjimku, a tak počítám s průměrným počtem vyprojektovaných uzemnění na 250 stožárových místech za rok. Dle odhadu počítám s průměrnou úsporou času projektanta právě díky výpočetnímu programu ve výši 50 hodin za rok.

Z toho pak lze vyčíslit úsporu nákladů projekční společnosti na čas projektanta. Z veřejně dostupných informací průměrné měsíční hrubé mzdy, kterou poskytuje informační systém o průměrném výdělků (ISPV)<sup>71</sup>, počítám následující:

Dle ISPV činila v prvním pololetí roku 2019 hrubá měsíční mzda energetika projektanta<sup>72</sup> v průměru 52 526 Kč. Dále je nutné přičíst zákonné zdravotní (9 %) a sociální (25 %) pojištění, náklady na výrobní a správní režii (uvažuji ve výši 50 % mzdových

---

<sup>71</sup> Dostupné na: <https://ispv.cz/cz/Vysledky-setreni/Archiv/2019.aspx>

<sup>72</sup> Kategorie zaměstnání CZ-ISCO: 21512 – Inženýři elektrotechnici a energetici projektanti, konstruktéři.

nákladů na projektanta), a v neposlední řadě také zisk společnosti (obvykle 15 % z celkových nákladů). Při 7,5 hodinové denní pracovní době je průměrný měsíční fond pracovní doby 158 hodin, a konečně dostáváme hodinovou sazbu za projektanta 771 Kč. Výpočet je znázorněn v Tab. 10.1.

Hrubá měsíční mzda projektanta	52 526 Kč
Zákonné zdravotní a sociální pojištění	34 %
Mzdové náklady na projektanta	70 385 Kč
Správní režie	50 %
Celkové náklady	105 578 Kč
Zisk	15 %
Měsíční cena projektanta	121 415 Kč
Měsíční fond hodin	158 h
<b>Hodinová sazba za projektanta</b>	<b>771 Kč</b>

Tab. 10.1: Výpočet hodinové sazby za projektanta

Z ceny hodinové práce projektanta mohou odhadnout úsporu projekční společnosti na nákladech na 38 500 Kč ročně jen díky využití programu. Tato částka však není konečná, jelikož je nutné uvažovat také úsporu za nutnost přepočítat a vyhodnotit potřebu uzemnění specializovanou laboratoří, jakožto externích nákladů na nakupovanou subdodávku (službu).

Konkrétně pro stavbu trasy Hlinsko – Polička, která, nutno podotknout, je velmi komplikovaná, byl využit přepočet uzemnění specializovanou laboratoří na celé trase linky. Tato studie byla vytvořena pro všech 190 stožárů za cenu cca 200 tis. Kč bez DPH. Studie by pak po analýze stožárových míst bez využití mého programu byla potřeba asi u 70 % případů. To by ale nesnížilo cenu za studii ve stejném poměru, vezmeme-li v úvahu, že v jiném projektu, kde bylo potřeba posoudit pouze tři stožáry, byla cena studie téměř 50 tis. Kč bez DPH. Věnovat čas projektanta na vyhodnocení, které stožáry bude potřeba nechat přepočítat, by vedlo jen k minimálnímu snížení ceny za studii. Proto bylo v případě linky Hlinsko – Polička bezpochyby cenově výhodnější nechat přezkoumat laboratoří všechna stožárová místa.

Pokud by však již byl k dispozici můj výpočetní program (a byl-li by využit), bylo by potřeba na lince Hlinsko – Polička nechat přepočítat laboratoří jen asi 40 % stožárů, tedy zhruba 76 z původních 190 stožárů. Cena za studii by jistě nebyla ani poloviční (vzhledem k výše zmíněnému), ale jistou úsporu nákladů by to zajistilo. Tuto úsporu odhaduji na 20 – 30 % z ceny studie, tedy na 40 – 60 tis. Kč na tomto projektu. Bylo by však nutno věnovat čas projektanta na vyplnění tabulek v programu a rozhodnutí, které

stožáry nechat překontrolovat laboratoří. Absolutní úspora těchto nákladů by pak byla nižší zhruba o 30 %, zde tedy asi 30 – 50 tis. Kč.

Celková úspora nákladů společnosti ELEKTROTRANS a.s. pak díky využívání výpočetního programu může dosáhnout 60 až 100 tis. Kč ročně, v závislosti na počtu projektovaných uzemnění stožárů. Vzhledem k tomuto faktu není plně funkční výpočetní program přílohou diplomové práce, protože není z obchodních důvodů k dispozici souhlas se zveřejněním zdrojové části výpočetního programu. Jeho zveřejněním by totiž projektovní společnost byla poškozena a přišla by o konkurenční výhodu, kterou díky této práci získává.

### 10.3. Závěrečné shrnutí

Hlavním přínosem diplomové práce je vytvořený výpočetní program pro návrh uzemnění stožárů na linkách velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Program jsem vytvořil tak, aby výsledný návrh uzemnění vyhověl platným českým technickým normám. Diplomová práce také shrnuje základní problematiku uzemňování stožárů VVN a ZVN. Čtenář z textu pochopí, proč a jak se uzemňují stožáry elektrického vedení. Získá také představu nejen o navrhování uzemnění venkovního vedení, ale i o postupu při výstavbě nového elektrického vedení. Člověk, který není znalý praxe projektování uzemnění vedení, se v práci dočte to, co v běžně dostupné literatuře nenajde, a pomůže mu to učinit si celkový obraz o této oblasti.





## 11. SEZNAM LITERATURY

- [1] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č. 291/2015 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2015, ročník 2015, částka 120. Dostupné také z: [https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=291/2015&typeLaw=zakon&what=Cislo\\_zakona\\_smlouvy](https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=291/2015&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy)
- [2] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2001, ročník 2001, částka 40. Dostupné také z: [https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=100/2001&typeLaw=zakon&what=Cislo\\_zakona\\_smlouvy](https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=100/2001&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy)
- [3] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2006, ročník 2006, částka 63. Dostupné také z: [https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=183/2006&typeLaw=zakon&what=Cislo\\_zakona\\_smlouvy](https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=183/2006&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy)
- [4] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 458/2000 Sb., Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 2000, ročník 2000, částka 131. Dostupné také z: [https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=458/2000&typeLaw=zakon&what=Cislo\\_zakona\\_smlouvy](https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=458/2000&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy)
- [5] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon České národní rady č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČR, 1992, ročník 1992, částka 117. Dostupné také z: [https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=586/1992&typeLaw=zakon&what=Cislo\\_zakona\\_smlouvy](https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=586/1992&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy)

- [6] ČESKOSLOVENSKÁ SOCIALISTICKÁ REPUBLIKA. Vyhláška Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu č. 50/1978 Sb., o odborné způsobilosti v elektrotechnice. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Ministerstvo vnitra ČSSR, 1978, ročník 1978, částka 11. Dostupné také z: [https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=50/1978&typeLaw=zakon&what=Cislo\\_zakona\\_smlouvy](https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=50/1978&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy)
- [7] ČEZ Distribuce, a.s. *Katalogový list 2012 – Materiálový standard*. Praha, 2012.
- [8] ČEZ Distribuce, a.s., RAJSKÝ František, ŠEDIVÝ Tomáš. *METODIKA – Koncepce uzemňování (ČEZd\_ME\_0148r00)*. Praha, 2017.
- [9] ČSN 33 3300. *Elektrotechnické předpisy. Stavba venkovních silových vedení*. Praha: ÚNM, 1986.
- [10] ČSN EN 50341-1. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV – Část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace*. Listopad 2002. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.
- [11] ČSN EN 50341-3 ZMĚNA Z2. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45 kV – Část 3: Soubor Národních normativních aspektů*. Březen 2007. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [12] EGU – HV Laboratory a.s., MUISL L., ŠVANCAR M. *Návrh opatření pro uzemnění stožárů vedení 110 kV Hlinsko-Polička*. Praha, září 2016.
- [13] ELEKTROTRANS a.s.: *Podklady ke stavbě „Hlinsko – Polička, vedení 110 kV“*. Zakázka ET č. 1130. Praha, 2019.
- [14] ELEKTROTRANS a.s.: *Podklady ke stavbě „Linie VVN V343/344 přeložka PB č. 9-12“*. Zakázka ET č. 1935. Praha, 2019.
- [15] FLUKE. *Users manual Earth/Ground tester FLUKE 1625*. USA, January 2006.

- [16] Informační systém o průměrném výdělku: Výsledky šetření: Mzdová sféra ČR - 1. pololetí 2019 [online]. Praha: TREXIMA, 2019 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://ispyv.cz/cz/Vysledky-setreni/Archiv/2019.aspx>
- [17] Ing. Mečislav HUDECZEK, Ph.D., HUDECZEK SERVICE, s.r.o., Albrechtice u Českého Těšína. *Odpor uzemnění, dotykové napětí a kompaktnost rozsáhlé zemnicí soustavy*. [online, cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/19206451-Odpor-uzemneni-dotykovye-napeti-a-kompaktnost-rozsahle-zemnici-soustavy.html>
- [18] PANKRÁČ, Vítězslav. *Přednášky z předmětu Elektromagnetické pole (A1B17EMP)*. ČVUT FEL v Praze, 2015.
- [19] PIBYL, P.: *Zpráva o revizi elektrického zařízení – Vd 110kV V343/V344 přeložka PB č. 9-12*, říjen 2019.
- [20] PNE 33 0000-3. *Revize a kontroly elektrických zařízení přenosové a distribuční soustavy*. 4. vydání. Praha: ČENES, Ing. Jaroslav Bárta, Ing. Pavel Kraják, Ing. Václav Schamberger, 2017.
- [21] PNE 33 0000-4. *Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny*. 3. vydání. ÚJV Řež, a.s. divize Energoprojekt Praha, Ing. Jaroslav Bárta, 2011.
- [22] PNE 33 3300. *Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV*. 2. vydání. Praha: EGU-HV Laboratory a.s., Ing. Václav Sklenička, CSc.; ČEPS Invest, a.s., Ing. Petr Brousil, Ing. Pavel Froněk, Ing. Čeněk Laub; EGÚ Brno, a.s., Ing. Petr Lehký; ELEKTROTRANS a.s., Ing. Luděk Krba; OMEXOM GA ENERGO s.r.o., Ing. Josef Perk; 2019.
- [23] PNE 33 3300-1. *Metodika měření a vyhodnocování uzemnění venkovních vedení vvn a zvn*. Prosinec 2017. Praha: ČEPS, a.s., ČEZ Distribuce, a.s., PRE Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s., E.ON Česká republika, 2017.

- [24] PNE 33 3301. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad 1 kV AC do 45 kV včetně*. 3. vydání. Brno: EGÚ Brno, a.s., Ing. Petr Lehký, 2016.
- [25] PROCHÁZKA, Radek. *Přednášky z předmětu Technika vysokých napětí (B1M15TVN)*. ČVUT FEL v Praze, 2018.
- [26] ŠVEC, Jan. *Přednášky z předmětu Elektroenergetika 2 (A1B15EN2)*. FEL ČVUT v Praze, 2015.
- [27] TLUSTÝ J., ŠVEC J., BANNERT P., BRETTSCHEIDER Z., KOCUR Z., MAREČEK P., MÜLLER Z., SÝKORA T. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [28] VOKÁL, Josef. *Přednáška: Výpočty zkratů v technické praxi*. FEL ČVUT v Praze, 2012. [online, cit. 2019-09-04.]. Dostupné také z: [https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok\\_%20zkraty\\_%20prednaskaFEL.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok_%20zkraty_%20prednaskaFEL.pdf)

## 12. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výpočetní program

Příloha 2: Návrh uzemňovacích soustav

Příloha 3: Fotogalerie snímků ze stavby vedení Hlinsko – Polička