

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická



Diplomová práce

2020

Bc. Ondřej Hladík

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

**Diagnostika uzemnění stožárů
VN a VVN**

**Diagnosis of Distribution and Transmission Lines Tower
Earthing**

Leden 2020

Diplomant: Bc. Ondřej Hladík

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Musil, Ph.D.

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.

Datum:

Podpis diplomanta:

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hladík** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **457213**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Diagnostika uzemnění stožárů vedení VN a VVN

Název diplomové práce anglicky:

Diagnosis of Distribution and Transmission Lines Towers Earthing

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teorií uzemňování
- 2) Seznamte se s metodami výpočtů a měření uzemnění stožárů VN
- 3) Nad změřenými daty uzemnění vedení V452 proveďte statistiku a zhodnoťte
- 4) Ve vybraném simulačním programu vedení namodelujte a zhodnoťte

Seznam doporučené literatury:

- 1) OSOLSOBĚ, Jan a Mirko ZAPLETAL. Zemnění a bezpečnost. Praha: ČSAV, 1964.
- 2) KOČVARA, Antonín. Uzemňování elektrických zařízení. Praha: IN-EL, 1995. Knižnice Elektro.
- 3) PNE 33 000-4
- 4) BUREŠ, Zdeněk, Petr ŠITINA a Jan VÁCLAVEK. Navrhování venkovních vedení vn a nn. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Praktické elektrotechnické příručky.
- 5) TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ladislav Musil, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **08.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Ladislav Musil, 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

SOUHLAS S POUŽITÍM DAT

EGU – HV Laboratory a.s.
Podnikatelská 267, Praha 9, Běchovice, PSČ 19011

Společnost je zapsána v obchodním rejstříku, vedeném MS v Praze, oddíl B, vložka 5128

Ing. Jiří Velek
ČEPS a.s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10 – Bohdalec

Věc: Poskytnutí dat z měření uzemnění pro účely diplomové práce Ondřeje Hladíka

Dobrý den,

Obracím se na Vás se zdvořilou prosbou o poskytnutí dat z měření uzemnění na vedení V4 za účelem publikování diplomové práce studenta 5. ročníku FEL-ČVUT . Student Ondřej Hladík je v problematice zběhlý, podílel se na měření těchto dat jako brigádník týmu měření uzemnění EGU - HV Laboratory a.s., který tato data v rámci úkolu pro ČEPS pořizoval, takže nehrozí, že data budou interpretována zkresleným (nevhodným) způsobem. Pro snížení možnosti zneužití dat navrhuji, aby vedení bylo v diplomové práci označeno jako vedení V4xx . Ondřej Hladík práci svoji zpracovává pod vedením Ing. Ladislava Musila Ph.D. a tato práce se zabývá problematikou automatického zpracovávání naměřených dat a jejich interpretací.

Děkuji předem za vyjádření stanoviska,

S pozdravem Ing. Martin Švancar

Velek
Digitálně
podepsal Velek
Datum:
2020.04.23
10:23:54 +02'00'

EGU HV-Laboratory a.s.
Podnikatelská 267
190 11 Praha 9-Běchovice
Czech Republic

Poděkování:

Chtěl bych velice poděkovat Ing. Ladislavu Musilovi, Ph. D., za neocenitelnou odbornou pomoc při tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti EGU-HV Laboratory za poskytnutí dat z měření a licence k software EMTP-RV, bez kterých by tato práce nebyla možná. Zároveň bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost při mém studiu a psaní diplomové práce.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá uzemněním stožárů vedení velmi vysokého napětí. Diplomové práci předcházelo měření na vedení velmi vysokého napětí 400 kV. Uzemnění je základní bezpečnostní prvek všech elektrických zařízení. Při poruše či zasažení bleskem svede velké nebezpečné proudy do země. Chrání osoby i majetek. Uzemňování je v práci nejprve popsáno obecně. Osvětleny jsou analytické výpočty základních typů zemničů. Popsány jsou metody měření zemnicích a měrných odporů. Na samotné měření byla použita metoda potenciálového spádu a metoda Wennerova. Prvním cílem práce je statistické zpracování naměřených dat. Teoreticky jsou popsány statistické metody. Mezi naměřenými daty byla primárně ověřována korelace. Korelace značí lineární závislosti mezi dvěma datovými soubory. Jelikož korelační koeficienty vyšly vysoké, lze odvodit silnou lineární závislost naměřených dat. Tato skutečnost odpovídá fyzikální teorii. Naměřených dat bylo velké množství. Navrhl jsem tedy program na automatizaci zpracování dat. Program je sepsán v prostředí Visual Basic for Applications pro Excel. Druhým cílem práce je vypracování modelu vedení vysokého napětí a výklad výsledků. Celé vedení vysokého napětí je modelováno v programu EMTP-RV. Simulovány jsou poruchové stavy na vedení. V dalším kroku jsou posouzeny dopady poruch na bezpečnost osob. Simulace nepotvrdila dostatečné uzemnění u několika kritických sloupů vedení. Automatizační program pomáhá ve zpracování dat dalších probíhajících měření. Statistika potvrdila fyzikální vztahy a závislosti měřených veličin. Hlavním výsledkem práce jsou poznatky vyvozené ze simulace. Závěry jsou důležité z hlediska bezpečnosti osob v okolí stožárů vedení.

Klíčová slova:

Uzemnění, vedení, statistika, model, simulace, EMTP, VBA

Abstract:

This master's thesis deals with grounding/earthing of high voltage power lines. Ahead of writing this thesis, data from 400 kV high voltage powerline were measured. Grounding is a fundamental security measure for all electrical devices. During a fault or when struck by lightning the grounding leads the dangerously high current to ground. Thus, protecting people and property. The first part describes grounding in general. Analytical calculation of basic grounding devices is highlighted. Methods of measurement of ground resistance and resistivity are listed. Potential slope method and Wenner method were used for the measurement. The first goal of this thesis is statistical treatment of the data. Statistical methods are described. Correlation between groups of data was primarily verified. A correlation suggests linear relationship between two data groups. The correlation coefficients turned out very high. From this we can judge high linear dependence. The quantity of measured data was very high. I have developed a compiling software for automatization of said data. The software was developed in Visual Basic for Applications for Excel. The second goal of this thesis is simulation of a high voltage powerline and interpretation of findings. The entirety of high voltage powerline is modelled and simulated in the EMTP-RV software. Short-circuit faults are simulated. Consequences for safety of people are deduced. The simulation has disproved sufficient grounding of several critical poles. The automatization software is still in use and helps compiling data from ongoing measurements. The statistical methods have confirmed physical theory of grounding. The main result of this thesis are the findings ensuing from the simulation. These conclusions are important from the security perspective around the high voltage poles.

Key words:

Grounding, earthing, powerline, statistics, model, simulation, EMTP, VBA

Obsah

1. ÚVOD	4
2. ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	6
2.1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA V ČR	6
2.2 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA	6
2.3 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA	7
3. PODPĚRNÉ BODY VEDENÍ VN A VVN	8
3.1 ELEKTRICKÉ VEDENÍ OBECNĚ	8
3.2 STOŽÁROVÁ KONSTRUKCE VENKOVNÍCH VEDENÍ	8
3.3 ZEMNÍCI LANA	9
3.4 ZÁKLADY A UZEMNĚNÍ STOŽÁRŮ	9
3.5 AKTIVNÍ OCHRANY VEDENÍ	10
4. UZEMŇOVÁNÍ	11
4.1 UZEMNĚNÍ OBECNĚ	11
4.2 UZEMNĚNÉ A NEUZEMNĚNÉ ELEKTRICKÉ SYSTÉMY	11
4.3 VÝPOČET UZEMNĚNÍ	12
4.3.1 Polokulová elektroda	13
4.3.2 Kulová elektroda	14
4.3.3 Válcová elektroda	14
4.3.4 Desková kruhová elektroda	14
4.3.5 Mřížová síť	14
4.4 MĚŘENÍ ODPORU UZEMNĚNÍ	15
4.4.1 Třípólová metoda	15
4.4.2 Metoda potenciálového spádu	15
4.4.3 Metoda 62 %	16
4.4.4 Proudová metoda	16
4.4.5 Clamp-on metoda	17
4.4.6 Taggova metoda strmosti křivky	17
4.5 REZISTIVITA PŮDY	18
4.6 METODY MĚŘENÍ MĚRNÉHO ODPORU (REZISTIVITY) PŮDY	19
4.6.1 Dvoupólová metoda	20
4.6.2 Čtyřpólová metoda – Wennerova metoda	20
4.6.3 Schlumbergerova metoda	21
4.6.4 Systém s pohyblivou elektrodou	21
4.6.5 Lee-ova dělicí metoda	22
4.6.6 Stanovení měrného odporu půdy tyčí	22
4.6.7 Měření dlouhou tyčí	22
4.6.8 Metoda R. J. Owense	22
5. UZEMŇOVÁNÍ PODPĚRNÝCH BODŮ DLE NOREM	23
5.1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ DLE PNE 33 0000-4	23
5.2 UZEMŇOVACÍ SOUSTAVY VEDENÍ DLE PNE 33 3301	23
5.3 POŽADAVKY NA DIMENZOVÁNÍ UZEMŇOVACÍ SOUSTAVY DLE PNE 33 3301	23
5.3.1 Mechanická pevnost a odolnost proti korozi	23
5.3.2 Tepelná odolnost	24
5.3.3 Bezpečnost osob	24
5.3.4 Základní návrh uzemňovacích soustav s ohledem na dovolené dotykové napětí	25
5.4 UZEMŇOVÁNÍ PRO OCHRANU PŘED ÚČINKY BLESKU DLE PNE 33 0000-1	26
5.5 VÝPOČET ODPORU UZEMNĚNÍ PODPĚRNÝCH BODŮ DLE PNE 33 0000-4	26
6. ZMĚŘENÁ DATA A STATISTIKA	28
6.1 PROVEDENÉ MĚŘENÍ OBECNĚ	28

6.2 POUŽITÉ METODY	28
6.2.1 Metoda měření zemního odporu	28
6.2.2 Metoda měření rezistivity půdy	28
6.2.3 Metoda výpočtu rezistivity.....	28
6.3 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	28
6.3.1 Chauvin Arnoux C.A. 6472	28
6.3.2 Chauvin Arnoux C.A. 6474 Pylon box	29
6.4 TEORIE STATISTICKÝCH METOD	29
6.4.1 Výběrový průměr	29
6.4.2 Výběrový rozptyl	29
6.4.3 Výběrová směrodatná odchylka	29
6.4.4 Výběrový medián	29
6.4.5 Korelace	30
6.4.6 Testování korelace	31
6.5 ZMĚŘENÁ A VYPOČTENÁ DATA, KORELACE.....	32
6.5.1 Vyřazení nestandardních případů	32
6.5.2 Základní statistické ukazatele – změřené hodnoty	34
6.5.3 Základní statistické ukazatele – spočtené hodnoty	34
6.5.4 Parametry podél vedení.....	34
6.5.5 Závěr: Parametry podél vedení.....	35
6.5.6 Korelace: Odpor uzemnění a rezistivita země (průměr vodivosti).....	36
6.5.7 Závěr: Korelace odporu uzemnění a rezistivity země (průměr vodivosti)	36
6.5.8 Korelace: Odpor uzemnění a rezistivita země (průměr rezistivit)	37
6.5.9 Závěr: Průměr vodivosti a průměr rezistivit.....	37
6.5.10 Korelace: Odpor uzemnění a dílčí rezistivita země při rozteči elektrod 1 m.....	38
6.5.11 Korelace: Odpor uzemnění a dílčí rezistivita země při rozteči elektrod 3 m.....	38
6.5.12 Korelace: Odpor uzemnění a dílčí rezistivita země při rozteči elektrod 5 m.....	39
6.5.13 Závěr: Korelace odporu uzemnění a rezistivity půdy	39
6.5.14 Korelace: Odpor uzemnění a impedance	40
6.5.15 Korelace: Impedance a rezistivita půdy	40
6.5.16 Závěr: Korelace impedance, rezistivity a odporu	40
7. PROGRAM PRO ZPRACOVÁNÍ DAT	41
7.1 POUŽITÝ SOFTWARE	41
7.2 VLASTNÍ KÓD	41
7.3 ZÁVĚR	42
8. SIMULACE VEDENÍ.....	43
8.1 MODELOVÁNÍ V ENERGETICE OBECNĚ	43
8.2 SLOŽKOVÉ SOUSTAVY.....	43
8.3 ZKRATY NA VEDENÍ.....	44
8.3.1 Zkratky obecně	45
8.3.2 Trojfázový symetrický zkrat	45
8.3.3 Jednofázový zkrat	46
8.3.4 Dvoufázový zkrat	46
8.3.5 Dvoufázový zemní zkrat.....	47
8.4 SIMULACE VEDENÍ.....	47
8.4.1 Použitý program	47
8.4.2 Parametry simulace	48
8.4.3 Zjednodušující předpoklady	49
8.4.4 Povolené dotykové a krokové napětí	50
8.4.4 Topologie modelu	50
8.5 SIMULACE ZKRATU	53
8.5.1 Příklad výpočtu proudového pole a rozdělení odporů pro dotykové napětí:	53
8.5.2 Výsledky simulace	54
8.5.3 Závěr simulace	54

9. ZÁVĚR	55
10. ZDROJE	57
11. SEZNAM ZKRATEK	58
12. SEZNAM OBRÁZKŮ	58
13. SEZNAM TABULEK	59
14. SEZNAM GRAFŮ	59
15. SEZNAM SYMBOLŮ	59
16. PŘÍLOHY	60
16.1 PŘÍLOHA Č.1 – DATASHEET K PŘÍSTROJI CHAUVIN ARNOUX C.A. 6472.....	60
16.2 PŘÍLOHA Č.2 – DATASHEET K PŘÍSTROJI CHAUVIN ARNOUX C.A. 6474.....	61

1. Úvod

Uzemnění je základní pasivní ochranný prvek elektrického zařízení. Při spojení části zařízení pod napětím se zemí vzniká elektrická porucha – takzvaný zkrat. Do zařízení může také uhořit blesk. V obou případech vzniká vysoký elektrický proud. Tento proud je nebezpečný jak osobám, tak majetku. Poruchový proud je potřeba svést do země. Zařízení, jenž svede poruchový proud do země, je právě uzemnění. Uzemnění se skládá z přírodních vodičů, spojek a samotného zemniče. Zemnič je zjednodušeně řečeno kus vodiče v zemi.

Diplomová práce se bude zabývat uzemněním vedení vysokého napětí. Vedení vysokého napětí se primárně skládá z vodičů a sloupů. V případě úderu blesku nebo zkratu na vedení je potřeba vysoký proud svést do země. Sloupy jsou uzemněny přes své betonové základy. Diagnostika uzemnění těchto sloupů je důležitá z hlediska bezpečnosti osob a majetku v okolí stožárů.

V první části diplomové práce se budu zabývat teorií uzemnění. Analytický výpočet odporu uzemnění je důležitá součást návrhu při výstavbě uzemnění. Základní výpočet se odvodí s pomocí polokulové elektrody zasazené do země. Všechny složitější tvary elektrod vycházejí z tohoto výpočtu. Jeho velikost nebude kvůli vnějším faktorům nikdy přesně odpovídat výpočtu. Po výstavbě vedení je odpor uzemnění potřeba změřit. Diplomová práce se dále bude věnovat metodám měření odporu uzemnění. Mezi hlavní metody patří proudová metoda a metoda potenciálového spádu.

Na velikosti odporu uzemnění závisí bezpečnost osob a majetku. Elektrický proud vede cestou nejmenšího odporu. Proto je potřeba snížit odpor uzemnění na minimum. V případě vysoké hodnoty odporu povede vysoký poruchový proud paralelní cestou. Touto paralelní cestou by mohla být nahodilá osoba.

Primární externí faktor ovlivňující velikost odporu uzemnění je rezistivita půdy. Rezistivitou se myslí měrný odpor půdy okolo zemniče. Měrný odpor je vlastnost půdy. Zjednodušeně řečeno je to schopnost půdy odporovat průchodu proudu. Rezistivita záleží hlavně na vlhkosti, velikosti částic a složení půdy. Měření měrného odporu se obvykle provádí Wennerovou metodou nebo Schlumbergovou metodou.

V druhé části se budu věnovat podnikovým normám energetiky. Podnikové normy energetiky jasně definují dovolené hodnoty odporu uzemnění sloupů vysokého napětí. V případě jejich překročení hrozí nebezpečí nahodilým osobám. Tato napětí se označují jako dotyková a kroková. Dotykové napětí způsobí úraz osobě, která se dotkne sloupu. Krokové napětí by ohrozilo rozkročenou osobu v blízké oblasti okolo sloupu.

Ve třetí části diplomové práce budu statisticky zpracovávat poskytnutá data. Na měření uzemnění jsem se podílel ve firmě EGU-HV Laboratory Běchovice. Vzhledem k průmyslově citlivé podstatě dat jsou názvy vedení a jednotlivé podpěrné body anonymizovány. Použité metody pro

měření jsou Wennerova metoda a metoda potenciálového spádu. Data bude potřeba posoudit z hlediska normativní literatury.

Cílem práce je pomocí korelace potvrdit závislosti fyzikálních veličin. Korelace je statistická metoda k určení lineární závislosti dvou souborů dat. Dalším cílem je vybrat nejlepší metodu výpočtu měrného odporu ze získaných dat.

Dalším úkolem bude napsat program na automatizaci dat. Dat z měření je velké množství. Jejich ruční přepisování z měřících protokolů je časově náročné. Účelem tohoto programu bude zrychlení a zjednodušení shromáždění naměřených dat do přehledné databáze.

V poslední části práce se budu věnovat simulaci vedení vysokého napětí. K simulaci využiji software EMTP-RV a naměřená data. Cílem práce bude simulace poruchových stavů. Budou diskutovány výsledky a bezpečnostní důsledky poruch na model člověka. Hlavním posuzovaným hlediskem bude bezpečnost nahodilých osob. Výsledky simulace by měly sloužit pouze orientačně. Výsledné hodnoty budou srovnány s normovanými hodnotami.

Téma bezpečnosti v elektroenergetice je a vždy bude aktuální. Spolehlivost a ekonomičnost elektrotechnického zařízení stojí vždy až za bezpečností lidí. Poruchové stavy se ve skutečnosti nedají dobře testovat. Simulace je jedinou možností, jak posoudit vyhovující stav zařízení.

2. Elektrizace soustava

2.1 Elektrizace soustava v ČR

Elektrizace soustava se u nás začala rozvíjet již před první světovou válkou. Jednalo se o roztržitou nesouvislou síť menších elektráren, které pokrývaly potřebu přibližně třetiny obyvatel českých zemí. K většímu rozvoji došlo až za samostatné Československé republiky. Elektrifikační zákony a rostoucí spotřeba pomohla k rozvoji v této oblasti. Velké systémové elektrárny začaly vznikat kvůli vysoké industrializaci československé republiky. Druhá světová válka znamenala zpomalení rozvoje tohoto odvětví. Komunistický důraz na těžký průmysl energetiku hluboce rozšířil. Krom výstavby velkých systémových elektráren (jednalo se hlavně o uhelné elektrárny) začalo propojování s okolními zeměmi komunistického bloku. Po pádu komunistického režimu došlo k unbundlingu (privatizace, částečná privatizace a rozdělení velkých národních společností na menší celky) energetických společností, modernizaci zařízení (hlavně v oblasti ekologizace uhelných elektráren) a propojení s ostatními zeměmi Evropské unie. [1]

Elektrizace soustava se dá rozdělit do podsouborů vzájemně propojených zařízení, sloužících pro bezpečnou výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektrické energie. Do elektrizace soustavy patří i pomocné prvky, jmenovitě se jedná o měřicí, zabezpečovací, komunikační, ochranná a další zařízení.

V České republice se tato soustava skládá ze tří hlavních podsouborů. Výroba, přenos a distribuce elektrické energie jsou spravovány nezávislými státními, polostátními či soukromými společnostmi.

2.2 Přenosová soustava

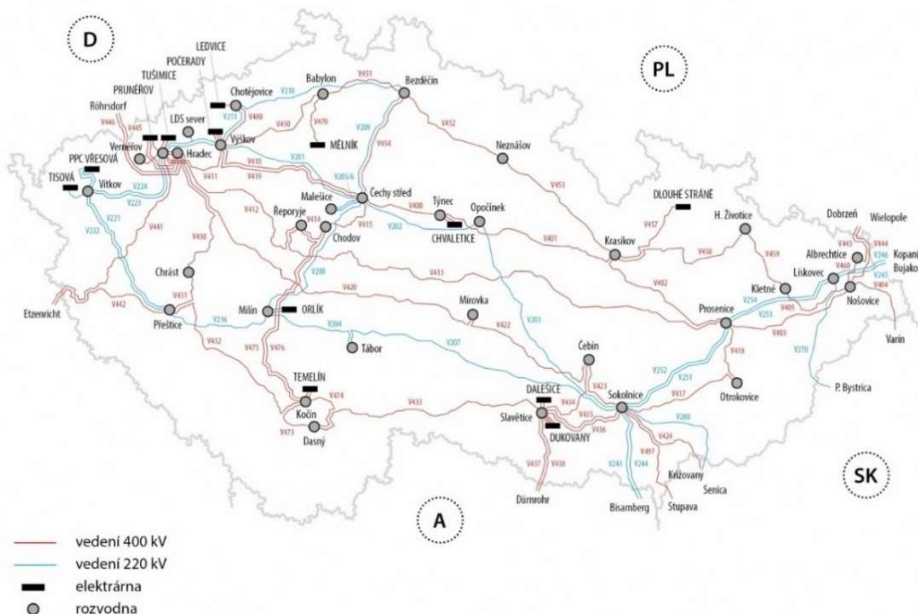
Přenosová soustava se skládá z páteřních linek 400 a 220 kV a rozveden/transformoven. Jejím základním účelem je vyvedení elektrického výkonu z velkých tzv. systémových elektráren a dodávka tohoto výkonu do hierarchicky nižších distribučních sítí na hladině 110 kV. Současně má za úkol propojit naši přenosovou soustavu s okolními partnerskými státy. Provozovatel přenosové soustavy je jen jeden a je jím státní společnost ČEPS a.s. Společnost ČEPS vlastní licenci udělenou Energetickým regulačním úřadem dle Energetického zákona. [2]

Do přenosové soustavy patří také mnoho prvků měření, řízení a regulace. Mnoho z těchto činností se provozuje na elektrických stanicích. Ty dělíme podle jejich účelu na transformovny, rozvodny a měřírny. Elektrická stanice se může skládat z několika rozveden různých napěťových hladin. Elektrické rozvodny jsou velice důležité uzly přenosové soustavy. Jejich účelem je propojení úseků vedení a propojení přenosové soustavy se soustavou distribuční. [2]

V České republice můžeme nalézt 33 elektrických stanic pro přenosovou soustavu. Čtyři z nich propojují síť 400 a 220 kV. Třicet dva propojuje přenosovou s distribuční soustavou. Deset vyvádí výkon z elektráren. Rozvodny jsou obvykle venkovního provedení, ale výjimečně jsou zapouzdřené v ochranném izolačním médiu SF₆. [2]

Soustava je provozována tak, aby splňovala kritérium N-1. Tento provozní stav znamená, že soustava dokáže pracovat v normálním stavu i po výpadku jakéhokoliv jednoho prvku soustavy. To může být část vedení, transformátor či rozvodna. ČEPS plánuje postupné rušení linek 220 kV a jejich nahrazení napěťovou hladinou 400 kV. [2]

Schéma sítí 400 kV a 220 kV



Obr. č. 1 – Přenosová soustava České republiky [10]

2.3 Distribuční soustava

Hlavním účelem distribuční soustavy je rozvod elektrické energie z přenosové soustavy ke koncovým zákazníkům. Skládá se z několika napěťových hladin. Najdeme zde linky VVN, VN i NN. Výše napětí hladiny VN se liší dle distributora a umístění linky. Raritou jsou kabelová vedení 110 kV používaná hlavně ve velkých městech. V České republice svoji činnost provozují tři distribuční společnosti a to PRE, a.s., E.ON SE a ČEZ Distribuce, a.s.. Distribuční soustavy jsou podrobovány největší modernizaci a nejrychleji reagují na technologický vývoj. V dalších letech budou pro distributory největší tématy rozvoj elektromobility, chytré měření, decentralizace výroby, akumulace a chytré sítě. [1]

3. Podpěrné body vedení VN a VVN

3.1 Elektrické vedení obecně

Elektrické vedení je základním prvkem všech distribučních a přenosových soustav. Skládá se z vodičů, izolátorů a nosných konstrukcí. Vedení spojuje dva uzly elektrické sítě, obvykle elektrické stanice. Elektrická vedení lze rozdělit na venkovní a kabelová. Kabelová vedení nejsou tak častá a používají se spíše v obydlených oblastech. Jejich umístění závisí na geografických a technických podmínkách. V poslední době se začíná dbát na ekologické a estetické stránky umístění elektrického vedení vysokého napětí. [3]

Venkovní vedení s holými vodiči se používá tam, kde je pro ně dostatek prostoru. Největší roli hrají při výstavbě nového vedení investiční náklady. U venkovního vedení jsou srovnatelně nižší než u kabelového vedení. Délky venkovního vedení může činit i několik desítek kilometrů. Vedení bývají většinou dvojitá. Holé vodiče jsou obvykle hliníkové slané s nosnou ocelovou duší takzvané AIFe lana. [3]

3.2 Stožárová konstrukce venkovních vedení

Jako podpěrné body venkovních vedení VN jsou používány betonové, příhradové, dřevěné nebo ocelové plechové sloupy. Za podpěrné body lze považovat konstrukce stožárových a zděných trafostanic, portály a budovy rozveden VVN/VN. Podle druhu použití musí podpěrné body vydržet zatížení, na která jsou dimenzovány. Krom výjimečných případů nelze dlouhodobě používat trvalé kotvení podpěrných bodů. [3]

Příhradové stožáry jsou určeny pro dvojnásobná a vícenásobná vedení holých vodičů. U jednoduchých vedení je použijeme v případě nutnosti vyššího podpěrného bodu nebo při vyšších vrcholových silách. Stožáry rozlišujeme jako rohové, odbočné, křížovatkové, výztužné a koncové. Betonové základy se obvykle budují monolitické blokové, v závislosti na typu příhradového sloupu a únosnosti zeminy. Součástí stožáru jsou konzoly pro upevnění vodičů. Další smontovatelné části jsou špičky zemnicích lan, pomocné konstrukce pro kabelové svody a konstrukce pro spínače. Všechny ocelové konstrukce by měly mít ochranu proti korozi žárovým pozinkováním.

Ohraňované stožáry jsou dražším, ale podle některých estetičtějším řešením. Na nižších napěťových hladinách se používají betonové, dřevěné a ocelové plechové sloupy. Všechny mají své výhody a nevýhody. Nejčastější typy stožárů na hladině 400 kV v České republice jsou Dunaj, Soudek, Delta, Jedle, Portál a Kočka.

3.3 Zemní lana

Zemní či zemní lana umísťujeme na vrchol podpěrných stožárů. Jejich hlavním účelem je ochrana silových vodičů před přímým úderem blesku. Stejně jako fázové vodiče jsou zemní lana tvořena kombinací železné duše a hliníkových lan na povrchu. Jejich průřez je však z ekonomických důvodů mnohem menší. Podobně jako u silových vodičů najdeme i u zemních lan tlumiče vibrací. Dle typu a parametrů vedení lze umístit na podpěrný stožár dvě zemní lana. Obvykle lze dvě zemní lana umístit na stožár typu portál nebo kočka, kde by jedno zemní lano nesplňovalo chránící funkci pro všechny tři fáze. V současnosti je populární na nová vedení umísťovat kombinované zemní lano. Ve středu takového lana vede optický kabel, který lze využívat k rychlé komunikaci v rámci energetických společností a jejich dispečinků. [7]

3.4 Základy a uzemnění stožárů

Hlubkové základy podpěrných bodů jsou obvykle z betonu. Dělíme je na blokové celistvé či dělené, vrtané armované základy a prefabrikované základy. Volba základů a betonu úzce souvisí s výsledným uzemněním stožáru. Z hlediska ekonomičnosti výstavby se nemůžou zemnit všechny stožáry strojenými zemniči a musí stačit uzemnění přes beton. Dle normy se nejprve změří měrný odpor půdy (metody výpočtu dále) a zvolí se, které stožáry na trase bude potřeba uzemnit strojenými zemniči. Po určité době se přeměří zemní odpor všech betonovaných základů stožárů. V případě překročení hodnoty zemního odporu, která je daná normou, je potřeba daný sloup dovybavit.

V současnosti se nejčastěji používá armovaná varianta základů. Uzemnění přes armovací síť je většinou dostatečné. Základ sloupu obvykle tvoří 1, 2 nebo 4 patky. Patky jsou v zemině odstupňovány, obvykle jsou dvoustupňové. V případě, že nestačí uzemnění přes betonový základ, sníží se odpor strojenými zemniči. Jedná se o jeden až čtyři pásy vedené do vzdálenosti až 25 metrů v hloubce 0,8 až 1 metr. Pokud nestačí pásy, použijí se uzemňovací tyče. Pro snížení dotykového a krokového napětí se kolem sloupu vytvoří ekvipotenciální prahy.

U vedení s přímo uzemněným uzlem sítě nelze dobře vodivými zemními lany snížit napětí u stožáru na bezpečnou hodnotu. Možností je zvláštní uložení zemniče, tak aby nedošlo v okolí stožáru k navýšení krokového napětí. Takové řešení u všech stožárů je však velice nevhodné. Vzhledem ke krátkým vypínacím časům, lze předpokládat nízkou pravděpodobnost výskytu člověka a poruchy u stožáru najednou. Speciální zemniče tedy ukládáme na více frekventovaných místech. U sloupů v menší vzdálenosti než 15 metrů od cesty je třeba pravidelně měřit kroková a dotyková napětí a odpor uzemnění. Možným řešením je izolace povrchu pomocí šterku či asfaltu. Nejnákladnější variantou je vyrovnání potenciálů pomocí prstencových zemničů. Posledním opatřením je zvýšení izolační hladiny sloupů, přidáním dalších izolátorů či použitím nevodivých konzol. [7]

Jako strojený základový zemnič se používá ocelový pásek nebo drát uložený nad dnem výkopu tak, aby byl obklopen betonem. Minimálně na dvou místech se přívod vyvede na povrch tak, aby neprocházel zemí. Pokud nelze tuto podmínku splnit, je nutno zemnič ochránit proti korozi. [3]

Ekvipotenciální prahy tvoří zemnič uložený v soustředných kruzích kolem uzemněného předmětu v předem vypočtené vzdálenosti a hloubce. Účelem tohoto uspořádání je ovlivnění průběhu potenciálu na povrchu země. Hlavním využitím je snížení dotykového a krokového napětí stožáru vysokého napětí. [3]

3.5 Aktivní ochrany vedení

Uzemnění je pasivní ochrana elektrického vedení. Aktivní elektrická ochrana je zařízení monitorující část elektrické sítě, které je schopno v požadované době spolehlivě a bezpečně eliminovat vliv poruchy. Ochrany jsou schopny chránit zařízení pouze před dočasnými účinky poruch. Cílem použití ochrany je izolace části elektrické sítě, kde vznikla porucha, aniž by musel být zbytek sítě obslužen. Mezi hlavní požadavky na ochrany patří spolehlivost, selektivita, rychlost působení, jednoduchost obsluhy a ekonomická návratnost. [16]

Nadproudová ochrana měří tři fázové proudy nebo zemní proud. Ochrana vybaví v určitém čase, pokud je jakýkoliv z naměřených proudů vyšší než nastavená hodnota. Nadproudové ochrany dělíme na časově nezávislé a časově závislé. Obvykle je potřeba, aby ochrana reagovala na různé typy nadproudů různě. Zkrat chceme obvykle vypnout ihned a nadproud až po určitém čase. Při návrhu je nutno dodržet zásady selektivity a správně vybrat časovou prodlevu. V neradiálních sítích je potřeba informace o směru toku poruchového proudu. Směrová nadproudová ochrana působí jen v předvolené fázové polorovině. Typickým využitím je chránění paralelního vedení. [16]

Rozdílová ochrana pracuje na předpokladu, že součet proudů vcházejících a vycházejících z chráněného objektu je za normálního stavu nulový. Pokud je rozdíl proudů nenulový, znamená to, že se někde nachází svodový proud, a tedy i porucha. V takovém případě ochrana vybaví a chráněný objekt odpojí. Za normálního stavu je vždy nějaký malý unikající proud. Dále musíme počítat s určitou chybou měření, a je tedy potřeba správně nastavit necitlivost přístroje. [16]

Pro chránění vedení nacházejí největší uplatnění distanční ochrany. Principem funkce distanční ochrany je sledování impedance sítě z daného místa v síti. Vysoká hodnota impedance znamená, že v chráněném úseku není porucha. Opakem je nízká hodnota impedance, která znamená poruchu. Hlavní výhodou oproti nadproudovým ochranám je velmi rychlé vybavení distanční ochrany. Při nastavení první zóny distančního vedení (80-90% vedení) je potřeba brát v úvahu několik chyb. Celková nejistota měření se pak může pohybovat kolem patnácti procent. Z tohoto důvodu nelze v první zóně chránit sto procent vedení. Vyšší zóny se nastavují podobně. Ochrana v nich však vybavuje se zpožděním. [16]

4. Uzemňování

4.1 Uzemnění obecně

Uzemnění je definováno jako spojení zařízení nebo jeho části s potenciálem země. Účelem uzemnění je udržovat potenciál země v části obvodu, umožnit funkci zařízení, chránit zařízení, svést blesk, a hlavně chránit lidi a zvířata před úrazem elektrickým proudem. [3]

Uzemnění je potřeba pro správnou funkci všeho elektrického vybavení včetně generátorů, transformátorů, podpěrných stožárů elektrického vedení a dalších. U zemních soustav je důležité studovat hodnoty odporu uzemnění, ať se jedná o rezidenční, průmyslovou, nebo komerční soustavu. Zemnění generačních, distribučních a přenosových zařízení je nezbytné. Podpěrné body vedení vysokého napětí jsou obvykle uzemněny přes vertikální zemniče. Rozvodny distribučních a přenosových soustav jsou zemněny soustavou sítí zemnění. [14]

Účelem uzemnění dle [14] je snížit úroveň izolace vybavení a tím pádem ušetřit. Dále je to bezpečnost osob v podobě dotykového a krokového napětí. Za třetí zemnění eliminuje elektrostatické poruchy a události na elektronických zařízeních. Redukce elektromagnetické interference a ochranného katodického proudu jsou dalšími schopnostmi uzemnění. Jako poslední lze zmínit detekci zemních poruch přes uzemňovací soustavu.

4.2 Uzemněné a neuzemněné elektrické systémy

Elektrické systémy lze rozdělit na systémy s uzemněným a neúčinně uzemněným uzlem (izolované systémy). Dále dělíme systémy na systémy uzemněné přes odpor, reaktanci, napěťový transformátor. [14]

Pokud v systémech s uzemněným uzlem dojde ke spojení fáze a země, dojde k takzvanému zkratu. Zkratový proud je velice vysoký. Může být nebezpečný osobám a způsobit velké škody na majetku. Ochranné prvky se snaží tento proud co nejrychleji vypnout nebo alespoň omezit. Na přenosové soustavě je nejvyšší vypínací čas do 20 milisekund. Bezpečnostní pracovníci se snaží pravděpodobnost úrazu elektrickým proudem snížit na minimum.

Izolované systémy skýtají několik výhod i nevýhod. Proud zemní poruchy je velice nízký, oproti případnému zkratovému proudu. Napětí nepoškozených fází vůči zemi může přesáhnout hodnotu sdruženého napětí. Izolovaný systém lépe odolává vnějším interferencím a vyšším harmonickým. [14]

Uzemnění přes odpor můžeme rozdělit podle velikosti odporu na nízké a vysoké odporové uzemnění. Odpor se zapojí mezi neutrální bod transformátoru a zemi. Vysoký odpor se používá v průmyslových aplikacích tam, kde je potřeba zajistit při poruše nepřerušovaný provoz. Velikost odporu se volí taková, aby proud nepřesahoval 10 A. Nízký odpor volíme pro systémy do 230 V, kde se chod

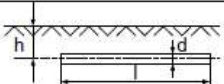
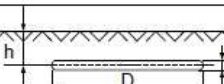
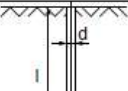
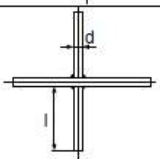
po poruše přeruší do 10 s. Výhodou takového systému je jednoduché nalezení poruchy, nízký poruchový proud a dobrá kontrola přepětí. [14]

Uzemnění přes napěťový transformátor v neutrálu se obvykle používá u generátoru. Primární vinutí představuje vysokou reaktanci, která se v neporuchovém stavu jeví jako neuzemněný bod. V případě poruchy se do sekundárního vinutí indukují vyšší napětí, které spouští ochranné prvky a přístroje. [14]

Uzemnění přes takzvanou Petersonovu tlumivku bylo poprvé použito roku 1916. Systém je navržen k potlačení zemních proudů v trojfázových systémech s neúčinně uzemněným uzlem. Vychází z myšlenky rezonance mezi kapacitou vedení a indukčností tlumivky. Petersonova tlumivka se zapojuje mezi neutrální uzel transformátoru a zemí. Tlumivka se musí naladit na správnou hodnotu. Fázory kapacitního a induktivního proudu musí být stejně velké. Petersonovu tlumivku obvykle tvoří laditelný reaktor. [14]

4.3 Výpočet uzemnění

Základem analytických výpočtů odporu uzemnění je výpočet proudového pole polokulové elektrody na povrchu země. Další typy elektrod vycházejí z tohoto výpočtu. Tvarů elektrod existuje velké množství. Tato kapitola se zabývá polokulovou, kulovou, válcovou a deskovou kruhovou elektrodou. Jednoduché zemniče se v praxi skládají do složitějších sítí. Nejčastěji se kombinují tyčové zemniče a kruhová síť. Ta potom vytváří ekvipotenciální prahy. Kromě analytických metod existují i numerické metody výpočtu. Numerické metody nejsou součástí této práce.

Typ zemniče	Uložení	Zemní odpor [Ω] (přesnější vzorec)	Podmínky použití	Zemní odpor [Ω] (přibližný vzorec)	Podmínky použití
Páskový nebo drátový vodič		$R = \frac{\rho}{2\pi l} (\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2h})$	$l \gg d$ $h \ll l/4$	$R = 2 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $h \ll l/4$ $l = 10-50\text{m}$
Páskový nebo drátový vodič v kruhu		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} (\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{\pi D}{2h})$	$D \gg d$ $h \ll D/4$	$R = 2,1 \frac{\rho}{l}$	$D \gg d$ $h \ll 2/d$ $D/h \gg 10$
Tyč		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l \gg d/2$	$R = 0,9 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d/2$ $l = 1-3\text{m}$
Páskový nebo drátový vodič paprskový		$R = \frac{\rho}{4\pi l} (\ln \frac{2l}{d} + 1)$	$l \gg d$	$R = 0,7 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $l \ll 30\text{m}$

Tabulka č.1 – Zemní odpor jednoduchých zemničů [3]

4.3.1 Polokulová elektroda

Proudová hustota σ ve vzdálenosti x od středu polokoule je: [3]

$$\sigma = \frac{I}{2\pi x^2}$$

Pokud má půda rezistivitu ρ tak se intenzita elektrického pole rovná:

$$E = \frac{\rho I}{2\pi x^2}$$

Z intenzity dále odvodíme napětí mezi povrchem r a místem ve vzdálenosti x :

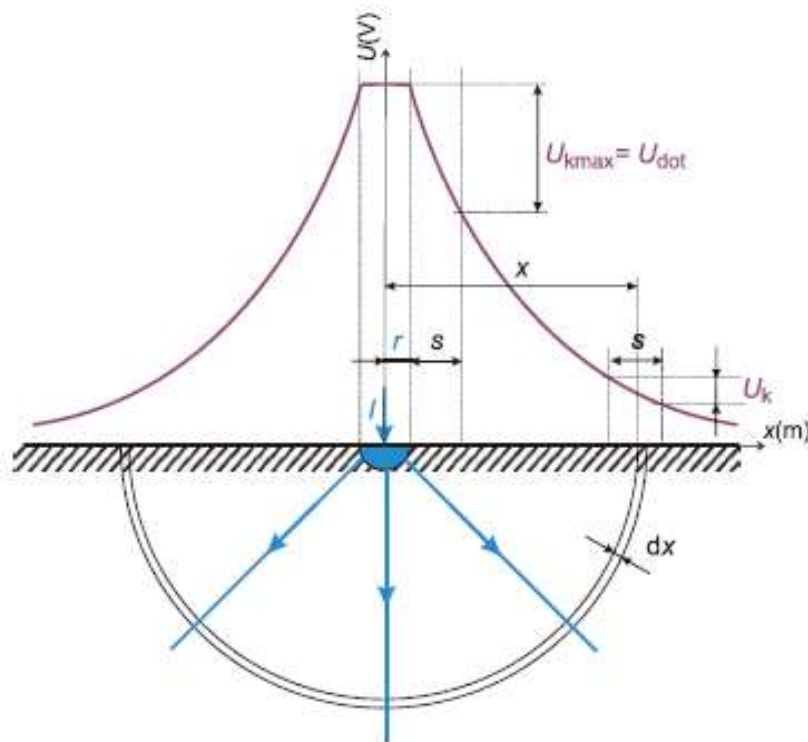
$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right)$$

A nakonec celkové napětí na zemniči U_0 :

$$U_0 = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Zemní odpor polokulové elektrody R je poté: [3]

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi r}$$



Obr. č. 2 – Polokulová elektroda [3]

Maximální krokové napětí U_{kmax} nalezneme ve vzdálenosti $x = r + s/2$, kde s je délka kroku. Pokud uvažujeme délku kroku 1 m, shoduje se toto napětí zároveň s definicí dotykového napětí: [3]

$$U_{kmax} = U_{dot} = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{s}{r^2 + sr}$$

4.3.2 Kulová elektroda

Zemní odpor kulové elektrody se dá vypočítat ze vzorce: [14]

$$R = \frac{\rho}{4\pi r}$$

kde r je poloměr koule a ρ je zemní měrný odpor.

4.3.3 Válcová elektroda

Zemní odpor válcové elektrody zasazené vertikálně do země: [14]

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r}$$

Za předpokladu, že délka válce je o hodně větší než jeho poloměr $l \gg r$.

4.3.4 Desková kruhová elektroda

Desková elektroda o poloměru r je zasazena vertikálně do země. Orientačně platí vztah: [14]

$$R = \frac{\rho}{4r}$$

Pro výpočet krokového napětí je tato hodnota zásadní. Pokud připodobníme chodidlo kruhové deskové elektrodě o ploše $A = 0,02 \text{ m}^2$, dostaneme pro zemní odpor jednoho chodidla vůči zemi: [14]

$$R = \frac{\rho}{4\sqrt{\frac{A}{\pi}}} = \frac{\rho}{4\sqrt{\frac{0,02}{\pi}}} \approx 3 * \rho$$

kde A je plocha chodidla a ρ je zemní měrný odpor.

Pro krokové napětí budeme uvažovat paralelní kombinaci dvou odporů chodidla vůči zemi se zanedbáním horní poloviny těla. Tedy:

$$R = \frac{R_{chodidla} * R_{chodidla}}{R_{chodidla} + R_{chodidla}} = 0,5 * R_{chodidla} = 1,5 * \rho$$

4.3.5 Mřížová síť

Zemní odpor rozsáhlé mřížové zemní sítě vodorovných zemničů lze vyjádřit zjednodušeným vztahem následovně: [3]

$$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l}$$

kde l je celková délka všech vodičů sítě a D je průměr kruhu daný zemní sítí.

4.4 Měření odporu uzemnění

Odpor zemní elektrody není jednoduché změřit. Část odporu se projevuje do několika metrů od elektrody. Tvoří jej půda kolem elektrody. Nelze tedy elektrodu osamostatnit. Zemní odpor měříme nepřímou. Používáme dvou pomocných elektrod. Elektrody jsou buď obě proudové nebo je jedna proudová a jedna napěťová. Externí zdroj do proudové elektrody pustí proud, který zpětně proteče přes zemní elektrodu. Napěťovou elektrodou se měří napětí. Pokud použijeme dvou proudových elektrod, je potřeba odpor zemniče dopočítat přes soustavu rovnic. V případě s jednou proudovou a jednou napěťovou elektrodou tomu není potřeba. [7]

Odpor uzemnění sloupů vysokého napětí je důležitou charakteristikou. Správce vedení jeho velikost měří z důvodu bezpečnosti osob v okolí sloupů. Odpor by měl být co nejmenší. Měřit se dá za sucha i za mokra. V létě se může odpor zvětšit vysycháním půdy a v zimě zmrznutím půdy. Měření hned po uložení zemniče je nevhodné. Půda si ještě sedá. [7]

Při měření zemničů podpěrných bodů obvykle nelze odpojit zemní lana, proto se měří pomocí vysokofrekvenčního měřiče. Aby nebyl zkreslen měřený zemní odpor, musí být frekvence napětí na proudových elektrodách dost vysoká. V tu chvíli se bude jevit impedance zemního lana a sousedních stožárů vysoká a neovlivní měření. [3]

Měřících metod je velké množství. Mezi nejpoužívanější patří metoda potenciálového spádu a proudová metoda. V práci jsou zmíněny i další méně používané metody.

4.4.1 Třípólová metoda

Třípólová metoda využívá externího zdroje, proudové a napěťové elektrody a samotného zemniče. Při této metodě musí být zemnič odpojen od systému. Obě elektrody musí být v jedné linii se zemničem. Testovací proud je injektován do proudové elektrody. Proud se vrací skrze zemnič. Rozdíl potenciálu je měřen mezi napěťovou elektrodou a zemničem. Poměr mezi změřeným napětím a testovacím proudem je zemní odpor. Proudová elektroda nesmí být moc blízko zemniče. V opačném případě by se překrývaly zóny proudové elektrody a zemniče. Kontrola se provede opakovaným přesunem napěťové sondy a měřením hodnoty odporu. Pokud se odpor neliší více než o 30%, nezasahují do sebe zóny zemniče a elektrody. [14]

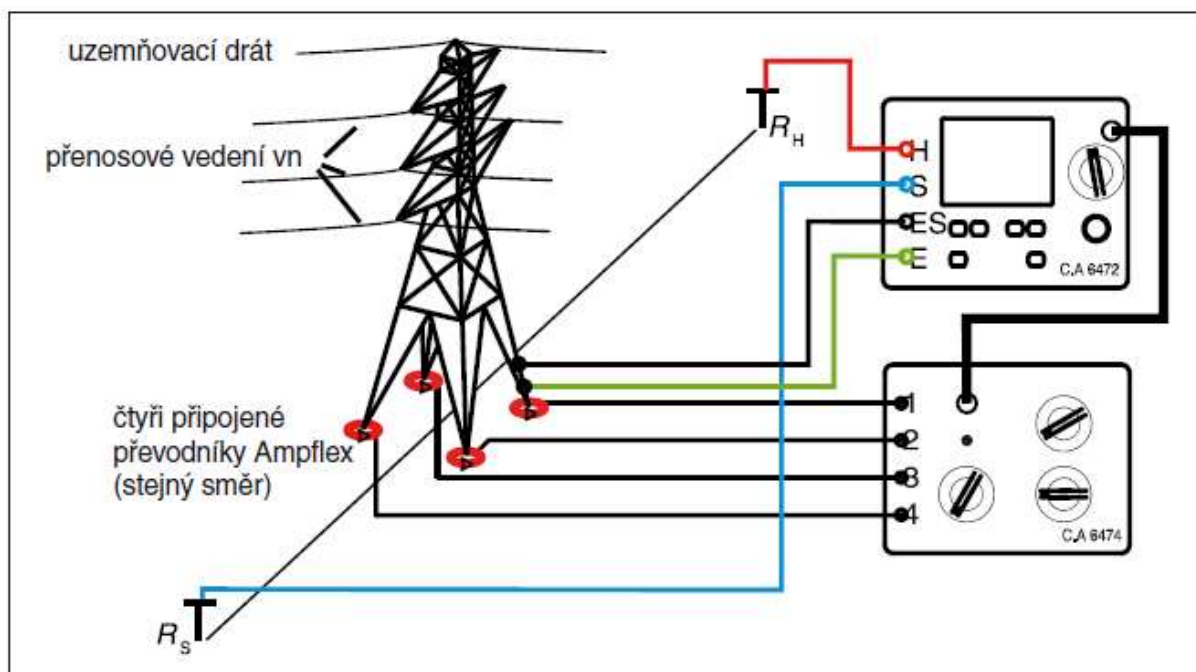
4.4.2 Metoda potenciálového spádu

Jedná se o nejčastěji používanou metodu pro zemniče menších až standardních rozměrů, s odporem větším než $0,5 \Omega$. Obvykle se používá pro jednotlivé tyčové nebo paprskové zemniče či zemniče stožárů. [3]

Metoda využívá dvou elektrod. Elektrody se značí jako potenciálová PE a proudová CE. Napětí se měří mezi napěťovou elektrodou a zemničem. V dalším kroku se napěťová elektroda přesune 10%

délky na obě strany a provede se měření. Pokud není rozdíl naměřeného odporu veliký, považuje se měření za správné. V případě velkého rozdílu naměřených hodnot je potřeba zvětšit vzdálenosti mezi elektrodami. [14]

Vzájemné uspořádání elektrod vůči středu měřeného uzemnění závisí na velikosti zemniče, poloze, lokaci a dalších externalitách. Vzdálenost proudové CE elektrody by měla být (pro standardní zemniče) alespoň 40 m od zemniče. Pro složitější zemniče by měla být vzdálenost alespoň čtyřnásobek nejdelšího rozměru zemniče. Vzájemná poloha PE a CE je také velice důležitá. Pokud leží střed zemniče na přímce mezi PE a CE, mělo by platit $I_{PE} = 0,625 * I_{CE}$. Elektrody nemusí být povinně v jedné rovině. V případě nedostatku prostoru pro měření, třeba v městské zástavbě, lze zasadit elektrody do trojúhelníkového rozmístění. V případě uspořádání do rovnoarmenného trojúhelníka by mělo platit $I_{PE} = I_{CE}$. Elektrody by měly ležet mimo vliv cizích zemničů a rušivých polí. [3]



Obr. č. 3 – Schématický náčrt měření na sloupu vedení vysokého napětí [20]

4.4.3 Metoda 62 %

Metoda 62% se používá u středně velkých zemničích systémů. Při této metodě je potenciálová elektroda zasazena v 62 % vzdálenosti z celkové vzdálenosti mezi zemničem a proudovou elektrodou. Znovu jsou provedena dvě měření v okolí původního měření. V případě shody je první měření považované za správné. Hlavním nedostatkem této metody je nehomogenost půdy. [14]

4.4.4 Proudová metoda

Proudová metoda je založena na vnucení proudu vnějším zdrojem do zemniče a následném změření úbytku napětí na tomto zemniči. Proudový zdroj zapojíme mezi měřený a vzdálený zemnič CE.

Zemní lana se tudíž nemusí odpojovat. Úbytek napětí se změří voltmetrem zapojeným mezi potenciálovou elektrodou PE a měřeným uzemněním. Následný výpočet je jednoduchý:

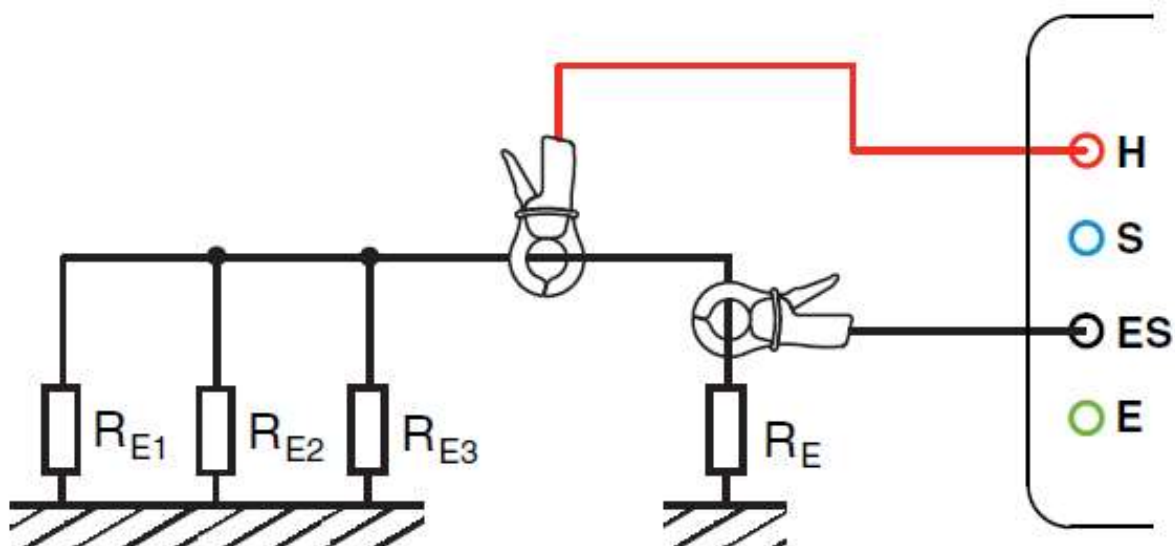
$$R_z = \frac{U_m}{r * I_m}$$

kde U_m je změřené napětí, I_m je měřicí proud a r je redukční činitel vedení použitého k elektrodě CE.

[3]

4.4.5 Clamp-on metoda

Pro měření odporu uzemnění v elektrických stanicích je vhodná metoda Clamp-on. Žádné pomocné elektrody nemusí být vráženy do země a uzemňovací systém nemusí být odpojen. Metoda je postavena na dvou svorkách. Jedna do vodiče vnutí vysokofrekvenční proud a druhá tento proud měří. Metoda si žádá návratové cesty pro zemní proud a je často používána v budovách. V případě několika zemničů je potřeba vypočítat jejich paralelní kombinaci. [14]



Obr. č. 4 – Schématický nákres Clamp-on metody[19]

4.4.6 Taggova metoda strmosti křivky

Taggova metoda vychází z opakovaného měření a grafického prokladu naměřených dat. Obvykle se používá pro rozsáhlé zemniční soustavy například rozvoden. Často se překrývají efektní zóny zemniče a proudové elektrody. Proudová elektroda se umístí 100 metrů od zemniče. Potenciálová elektroda se umístí 10 metrů od zemniče. Po každém měření se napěťová elektroda posune o 10 metrů dál od zemniče. Data jsou vynesena do grafu a lineárně proložena. Pro koeficient strmosti se v tabulce najde odpovídající hodnota vzdálenosti, ve které je potřeba změřit odpor. [14]

4.5 Rezistivita půdy

Půda je definována jako nejhornější vrstva pokrývající povrch Zeměkoule. Obvykle se skládá z minerálů (kamení, písek, jíl a bahno), vzduchu, vody a organických materiálů. Organický materiál je složen z mrtvých živočichů a rostlin. Půda má mnoho parametrů. Pro elektroenergetické společnosti je nejzajímavější právě rezistivita a odpor půdy. Měrný odpor půdy je nejpodstatnějším parametrem při výpočtu zemního odporu uzemnění. Suchá půda složená z menších částic je považována za špatný vodič elektrického proudu. Půdní odpor se snižuje se zvyšující se vlhkostí. Půdu je potřeba studovat ve vertikálním i horizontálním směru a pozorovat nehomogenity v rezistivitě půdy. Prakticky se pro měření používá stejnosměrný proud nebo střídavý proud nízké frekvence. [14]

Odpor lze definovat jako schopnost materiálu bránit se průchodu elektrického proudu. Matematicky lze odpor vyjádřit následovně:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

kde l značí délku a A povrch plochy. Řecký symbol ρ značí specifický nebo měrný odpor materiálu. Odpor materiálu primárně závisí na geometrii vzorku a jeho složení. Jednotkou rezistivity je Ohm*metr [$\Omega \cdot m$]. [14]

Typ půdy	Rezistivita půdy ρ_E v Ωm
Močál	5 až 40
jíl, humus	20 až 200
písek	200 až 2500
štěrkopísek	2000 až 3000
zvětralá skála	většinou do 1000
pískovec	2000 až 3000
žula	až do 50000
moréna	až do 30000

Tabulka č.2 - Ilustrační hodnoty rezistivity různých druhů půdy [6]

Dělení půdních typů se odvíjí primárně od textury a poddajnosti půdy. Textura závisí na velikosti a tvarech obsažených částic. Štěrkky jsou částice větší než 2 mm. Mezi 2 a 0,6 mm řadíme písky. Písky a štěrky mají mezi částicemi velké mezery a nedokáží tedy efektivně zadržet vodu. Jsou to tedy špatné vodiče a nejsou pro uzemňování doporučovány. Bahenní půdy jsou složené z částic mezi 0,06 a 0,002 mm. Stále však udrží méně vody než jílovité půdy. Jíl je složen z částic menších než 0,002 mm. Ty jsou velice kompaktní a udrží dost vody. Splňují tedy podmínky pro kvalitní uzemnění. [14]

Permeabilita je vlastnost půdy popisující schopnost materiálu propustit vodu a vzduch. Pokud je permeabilita půdy vysoká, voda se vyčerpá rychle. Opačně to platí pro nízkou permeabilitu. Permittivita je vlastnost materiálu neutralizovat elektrické pole. Závisí na frekvenci, teplotě, vlhkosti a složení materiálu. V případě půdy obsahují různé minerály lokální náboje schopné polarizace. [14]

Relativní permittivita jílovité půdy se pohybuje kolem 2,5. Štěrk a písky mají hodnotu kolem 5. Zajímavá hodnota je betonu, který se pohybuje kolem 5,5. Zalesněná půda má relativní permittivitu kolem 12. Pro permittivitu platí následující vztahy: [14]

$$D = \varepsilon * E \qquad \varepsilon = \varepsilon_0 * \varepsilon_r$$

Rezistivita půdy závisí primárně na obsahu vody a rezistivitě samotné vody. Mezi další důležité faktory patří teplota, velikost částic a jejich distribuce, soli obsažené v půdě a blízkost minerálů. Vlhkost půdy se mění s ročním obdobím a různou hloubkou. S hloubkou se obvykle vlhkost zvyšuje. Nízká vlhkost znamená vysokou rezistivitu půdy. Stejný efekt má nízké procento solí obsažené v půdě. Nicméně různé druhy solí mají různé efekty na rezistivitu půdy. Čím jemnější jsou částice půdy, tím nižší je její rezistivita. Pokud klesne teplota půdy na nižší hodnotu než 0 °C, dojde ke zmrznutí obsažené vody a následnému strmému nárůstu rezistivity. Při kladných teplotách rezistivita půdy mírně klesá. [14]

4.6 Metody měření měrného odporu (rezistivity) půdy

Určení rezistivity půdy je důležitým faktorem pro správné navržení uzemňovací soustavy. Na základě měření měrného odporu půdy jsou zkonstruovány zemní soustavy pro transformovny, rozvodny, stožáry přenosové a distribuční sítě, průmyslové areály, komerční a obytné budovy. [14]

V současné době je kvůli ekonomickým úsporám vyvíjen tlak na stavbu inženýrských sítí do sdružených koridorů. Do vodního a plynového potrubí mohou být indukované proudy. Na podzemní potrubí působí korozní efekty. S nižší rezistivitou se zvýší průchozí proud, který korozi zapříčiňuje. [14]

Obecným pravidlem je volit rozstup elektrod odpovídající hloubce uložení elektrod. Základem je změřit rezistivitu půdy v hloubce, ve které jsou uloženy samotné zemniče. Změřená hodnota nemusí být odpovídající, pokud se liší jednotlivé vrstvy půdy. V případě rozsáhlých zemních soustav je potřeba určit střední rezistivitu půdy v hloubce srovnatelné s rozměry zemní soustavy. [8]

Pro svislé zemniče je potřeba provést několik měření s rozlišnými rozestupy. Různé výpočty výsledné hodnoty rezistivity nesou rozdílné výsledky. Cílem diplomové práce je zjistit nejlepší typ výpočtu. Výsledná rezistivita se dá vypočítat z průměru rezistivit či vodivostí. Vodivost je obrácená hodnota rezistivity. Korelace mezi výslednou rezistivitou a změřeným zemním odporem napoví, která hodnota odpovídá nejlépe skutečnosti.

Měření rezistivity půdy může sloužit i k celkovému geologickému obrazu podloží. Geologové měření odporu používají v praxi. Tato metoda však není předmětem této diplomové práce.

Pokud se zemní síť skládá z velkého počtu elektrod, je potřeba měření rezistivity provádět kombinací několika metod. V této diplomové práci jsou zmíněny dvoupólová, Wennerova, Schlumbergova a další jednodušší a méně používané metody.

4.6.1 Dvoupólová metoda

Při použití této metody je zapojen zdroj napětí mezi kulovou zemní elektrodou a pomocnou sondou. Do série ke zdroji napětí je zapojen ampérmetr. Odpor obvodu, odpor zemní kulové elektrody a měrný odpor pak budou:

$$R = \frac{U}{I} \qquad R = \frac{\rho}{2\pi r} \qquad \rho = 2 * \pi * r * R$$

Tato metoda je velice jednoduchá a lze jí změřit orientační hodnotu zemního měrného odporu. [14]

4.6.2 Čtyřpólová metoda – Wennerova metoda

Nejpoužívanější metoda pro měření rezistivity půdy se nazývá Wennerova metoda. Toto geoelektrické měření používá 4 elektrody. Principiálně je metoda velice jednoduchá. Čtyři elektrody o průměru do 20 mm se zaradí v řadě do hloubky přibližně 20 centimetrů. Vnitřní dvě svorky slouží jako napěťové (potenciálové) a vnější dvě jako proudové. Rozestupy se postupně zvětšují/zmenšují, až je dosažena požadovaná přesnost měření. Rezistivitu půdy lze následně vypočítat ze vztahu: [8]

$$\rho = 2 * \pi * a * R$$

kde R je naměřený odpor a a je vzdálenost mezi elektrodami. Vztah platí, pokud je hloubka h elektrod mnohem menší než jejich rozestup. Musíme-li zarazit elektrody do mnohem větší hloubky (v případě půdy s vysokou rezistivitou), je nutné vynásobit výslednou hodnotu konfigurační konstantou k . Výsledná rezistivita odpovídá střední rezistivitě do hloubky rovné rozestupu. [8]

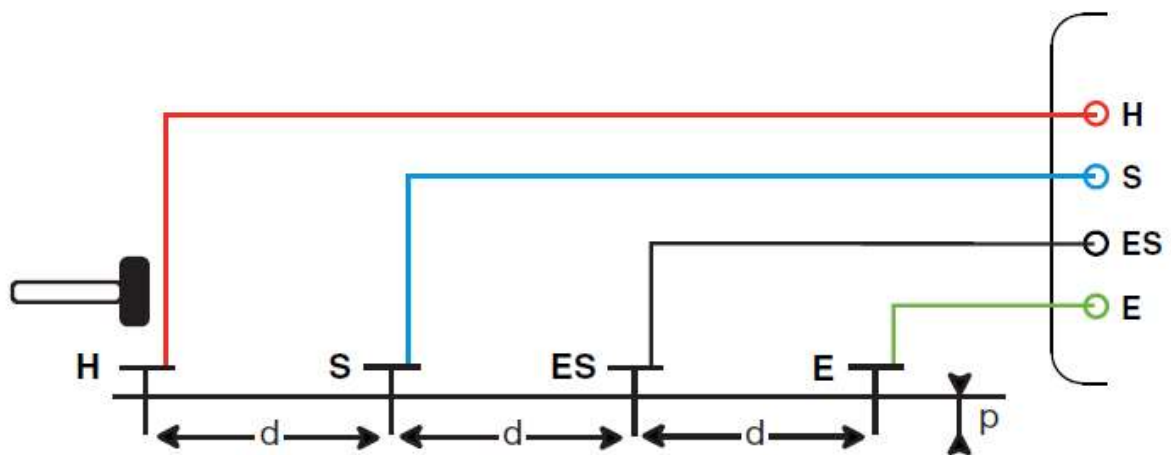
a/h	1/4	1/2	1	2	4	6	8	10	20	>20
k	2	1,9	1,7	1,3	1,1	1,05	1,03	1,02	1,01	1

Tabulka č.3 – Hodnoty konfigurační konstanty [8]

V případě, že není splněna podmínka čtyřnásobně větší hloubky sondy ku vzdálenosti sond, je možné použít tento zjednodušující vzorec: [14]

$$\rho = \frac{4 * \pi * a * R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{2a}{\sqrt{2a^2 + 4h^2}}}$$

Je-li hloubka vniku sondy mnohem menší než vzdálenost sond, lze vzorec jednoduchými kroky upravit na předchozí variantu. [14]



Obr. č. 5 – Schématický náčrt měření Wennerovou metodou [19]

4.6.3 Schlumbergerova metoda

Tato metoda byla v Evropě nejpůvodnější mezi lety 1960 a 1990. Rozmístění se shoduje s Wennerovou metodou, tedy dvě proudové elektrody vně dvou potenciálových elektrod. Avšak prostřední dvě elektrody tentokrát vůbec nepřesouváme. Aby tato metoda fungovala, musí platit, že vzdálenost proudových elektrod je pětikrát větší než vzdálenost potenciálových. Výsledný vztah se vyjádří takto: [14]

$$\rho = 4 * \pi * a * R$$

kde a je vzdálenost potenciálové sondy od středu.

4.6.4 Systém s pohyblivou elektrodou

Wennerova metoda je velice pracná. Při každém měření je potřeba přesunout vždy všechny čtyři elektrody. U systému s pohyblivou elektrodou je třeba u každého měření přesunout jen dvě elektrody. Jedna z proudových elektrod by měla být dále ve vzdálenosti c , tak abychom mohli zanedbat rozdíl potenciálu mezi prostředními elektrodami. Potenciálové elektrody jsou ve vzdálenosti b a první a druhá elektroda jsou od sebe vzdáleny a metrů. Podmínkou pro toto měření je desetinásobná velikost vzdálenosti c vůči vzdálenosti a . Hlavní nevýhodou této metody je její prostorová náročnost. Matematicky lze pak vyjádřit měrný odpor následovně: [14]

$$\rho = 2 * \pi * a * \frac{a+b}{b} * R \quad \text{nebo} \quad \rho = 2 * \pi * c * \frac{c+b}{b} * R$$

4.6.5 Lee-ova dělicí metoda

Lee-ova dělicí metoda používá oproti Wennerově metodě 5 elektrod. Funkci dvou prostředních potenciálových elektrod rozdělí třem elektrodám. Princip zůstává stejný. Krajní elektrody jsou proudové. Vzdálenost mezi potenciálovými elektrodami je poloviční oproti vzdálenosti proudových a potenciálových elektrod. Při každém měření jsou však použity pouze čtyři elektrody. Pokud je půdní rezistivita z obou měření stejná, lze pokládat půdu za homogenní. [14]

4.6.6 Stanovení měrného odporu půdy tyčí

Zemní odpor tyče o délce l a průměru d zaražené svisle do země o měrném odporu půdy ρ je dán vztahem:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

Změříme-li R tyče o známých rozměrech l a d , můžeme ze vztahu vypočítat měrný odpor půdy ρ . [7]

4.6.7 Měření dlouhou tyčí

Dlouhou tyč zarážíme po určitých intervalech do větší hloubky l . Pro každou hloubku změříme zemní odpor a stanoví se gradient odporu dR/dl . Malé gradienty se naměří ve vrstvách s velkým odporem půdy. Získáváme dobré informace o vodivosti jednotlivých vrstev. Je-li a poloměr tyče, lze měrný odpor v určité hloubce l vypočítat ze vztahu: [7]

$$\rho = \frac{2\pi}{\ln \frac{2l}{a}} * \frac{R^2}{- \frac{dR}{dl}}$$

4.6.8 Metoda R. J. Owense

V půdě se vyvrtá díra o hloubce přibližné délky zemních elektrod. Do díry se zasune speciální dvojité elektrody. Trnem se rozevřou dotykové plochy a pořádně přitlačí ke stěnám díry. Ke zkušebním elektrodám jsou připojeny kabely a vyvedeny na povrch. Měrný odpor se zjistí přímým měřením odporu půdy v rozličných hloubkách mezi protějšími místy na stěnách díry. Osvědčený způsob je pomocí úbytku napětí s pomocným článkem a miliampérmetrem. [7]

5. Uzemňování podpěrných bodů dle norem

5.1 Definice základních pojmů dle PNE 33 0000-4

Norma PNE 33 0000-4 definuje několik nejdůležitějších pojmů a uvádí základní příklady výpočtů uzemňovacích soustav v DS a PS. Uzemňovací soustava je definována jako soubor prvků, které jsou nutné pro uzemnění elektrických zařízení. Uzemnit podle normy znamená elektricky spojit dané místo v síti s místní zemí. [4]

Pro tuto diplomovou práci jsou nejzajímavější definice impedance uzemnění, odporu uzemnění a rezistivity půdy. Impedance uzemnění je impedance při určitém kmitočtu mezi bodem v síti a referenční zemí. Impedance uzemnění je dána zemniči, zemnicími lany a vodiči venkovních vedení v zemi, kabely s účinkem zemniče a jinými prvky. Odpor uzemnění je reálná složka impedance uzemnění. Rezistivita půdy je podle normy rezistivita typického vzorku půdy. [4]

Dále je důležitá definice základového zemniče. Je to kovová část s přímým elektrickým kontaktem se zemí nebo prostřednictvím betonu, jejíž původní účel není zemnění, ale splňuje požadavky na zemnič. Další důležitou veličinou je proud zemního spojení, který protéká z obvodu do země. Dotykové napětí definuje norma jako napětí mezi vodivými částmi, kterých se člověk nebo zvíře dotýká současně. Krokové napětí je napětí mezi dvěma body zemského povrchu vzdálenými jeden metr. Jeden metr se považuje za délku kroku. [4]

5.2 Uzemňovací soustavy vedení dle PNE 33 3301

Dle PNE 33 3301 jsou podpěrné body z vodivého materiálu zemněny svými částmi v zemi, případně dodatečně zemněny dalšími prvky. Podpěrné body z nevodivého materiálu není třeba zemnit. Uzemňovací soustavy podpěrných bodů musí být navrženy tak, aby byly dodrženy dovolené hodnoty krokových a dotykových napětí. U silových vedení se zemnicími lany musí být stanovena zemní impedance včetně vlivu zemnicích lan dle ČSN EN 50 341-1. [5]

5.3 Požadavky na dimenzování uzemňovací soustavy dle PNE 33 3301

5.3.1 Mechanická pevnost a odolnost proti korozi

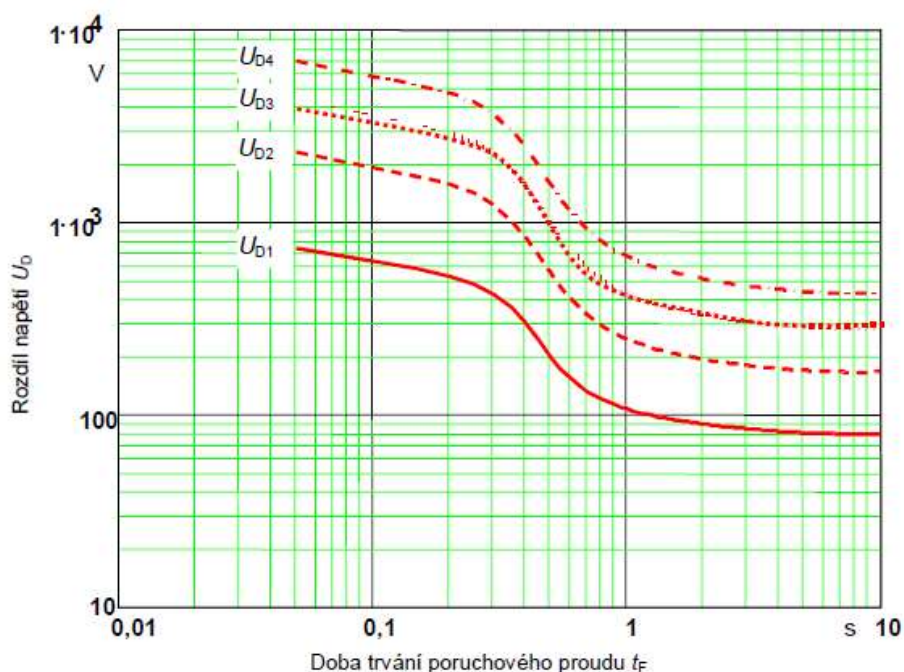
Materiál zemničů musí odolat chemickému nebo biologickému napadení, oxidaci, tvorbě elektrolytických článků, elektrolýze a dalším korozním mechanismům. Použití hliníku pod zemí není dovoleno. Pro zemniče se osvědčila žárově pozinkovaná ocel. Dále se jako zemniče používají ocelové piloty jak v zemi, tak v základovém betonu. Minimální průřezy uzemňovacích přívodů a vodičů pospojování se liší podle materiálu zemniče. Pro Cu je to 16 mm^2 , pro Al 35 mm^2 a pro ocel 50 mm^2 . [5]

5.3.2 Tepelná odolnost

Při dimenzování s ohledem na tepelnou odolnost se uvažuje oteplení poruchovými proudy. Jako poruchový proud lze vzít maximální hodnotu jednofázového zkratového proudu, hodnotu proudu dvoufázového zemního zkratu nebo velikost proudu zemního spojení. Konečná teplota nesmí překročit takovou hodnotu, při níž by došlo ke snížení pevnosti materiálu a zároveň by došlo k poškození okolních materiálů. Výpočet průřezu přívodů a zemničů v závislosti na velikosti a době trvání poruchového proudu je uveden v PNE 33 0000-4. Rozlišujeme mezi dobou poruchy kratší než 5 sekund a delší než 5 sekund. [5]

5.3.3 Bezpečnost osob

Mez dovoleného dotykového napětí vyzorujeme z obrázku č.6. Křivka U_{D1} představuje napětí na lidském těle při dotyku holou rukou proti bosé noze. Je povoleno používat i vyšší křivky, které představují dodatečné odpory, například obuv. Při překročení dotykového napětí je doporučen výpočet a měření krokového napětí. Dovolené hodnoty krokových napětí jsou obvykle o něco nižší než dovolené hodnoty dotykových napětí. [5]

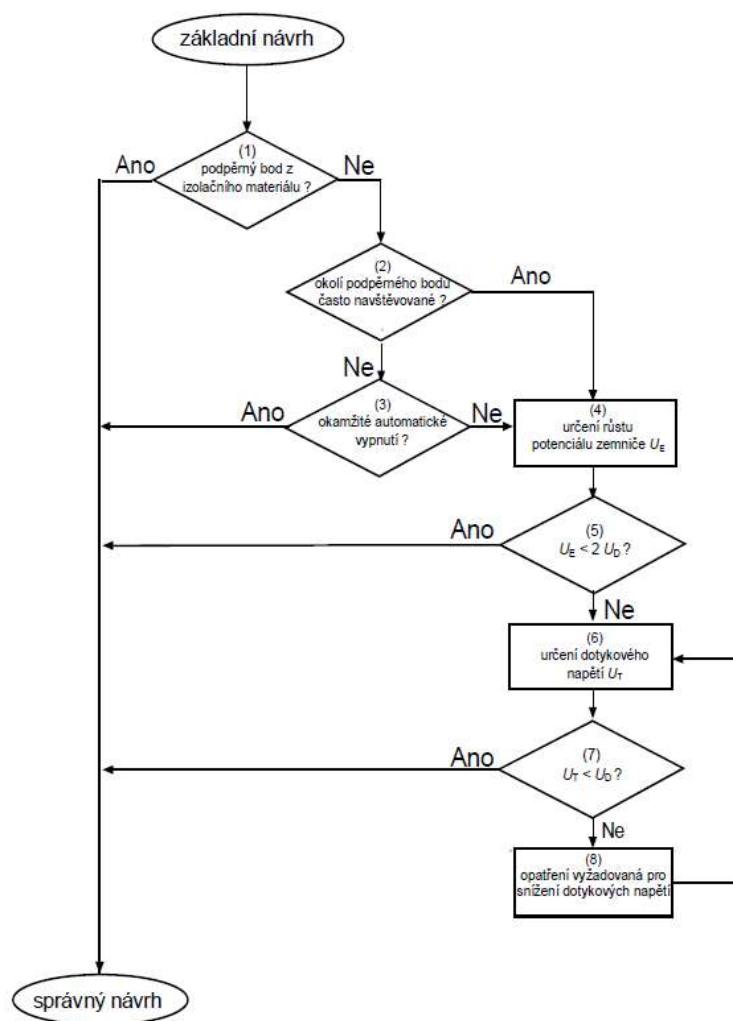


Obr. č. 6 – Závislost mezi dotykového napětí na době trvání poruchového proudu [5]

Typické oblasti, které odpovídají jednotlivým křivkám, jsou závislé na přídavných odporech. První křivce U_{D1} odpovídají místa jako hřiště, bazény, kempy nebo rekreační místa. Obecně jsou to místa se zvýšenou pravděpodobností výskytu bosých lidí. Druhá křivka U_{D2} předpokládá, že jsou lidé obuti. Mezi tyto oblasti řadíme chodníky, veřejné cesty, parkoviště a podobně. Křivky U_{D3} a U_{D4} předpokládají obuté lidi a vysokou nebo velmi vysokou rezistivitu půdy. Dotykové napětí 80 V je považováno za dovolené při poruše delší než 10 s. [5]

5.3.4 Základní návrh uzemňovacích soustav s ohledem na dovolené dotykové napětí

Podpěrné body a jejich okolí, které není často navštěvováno lidmi, nazýváme místa odlehlá. To jsou místa nejčastěji v nezastavěných prostorách (pole) dále než 10 metrů od silnice. Dále místa vzdálenější než 50 metrů od zástavby, vzdálenější 25 metrů od osamělých budov, vzdálenější než 50 metrů od kraje volných rekreačních ploch. Pokud je vedení vybaveno rychlým automatickým odpojením v odlehlých místech, nemusí se kontrolovat dotykové napětí v případě, že zemniče nesahají dále než 15 metrů od podpěrného bodu. [5]



Obr. č. 7 – Postup při navrhování uzemňovací soustavy s ohledem na dovolené dotykové napětí [5]

Blokový diagram na obrázku č.7 popisuje postup při návrhu uzemňovací soustavy podpěrného bodu. Pokud je podpěrný bod z izolačního nebo nevodivého materiálu, nemusíme se uzemněním zabývat. Pokud je okolí podpěrného bodu často navštěvováno, je potřeba uzemňovací soustavu podrobně prošetřit. V místech odlehlých, s omezeným přístupem nebo s automatickou ochranou vypnutím, se dotyková napětí nemusí řešit. Podrobnějším určením růstu potenciálu se zabývá článek ČSN EN 50341-1 příloha H.4.4. V případě, že je vzrůst potenciálu nižší než $2U_D$, je možno návrh považovat za vyhovující. V místech s nepředvídatelnými půdními podmínkami se musí U_D ověřit

měření. Nevyhoví-li uzemňovací soustava poslední podmínce, musí se přejít k nápravným opatřením. Mezi nápravná opatření patří ekvipotenciální kruhy pro rozložení potenciálu, odizolování podpěrného bodu, zvýšení odporu vrchní vrstvy zeminy a další. [5]

Jestliže je vedení vybaveno rychlým odpojením od zdroje a podpěrný bod se nachází v místě častého výskytu lidí, nemusí se kontrolovat hodnota dotykového napětí, pokud je splněna alespoň jedna z následujících podmínek. Buď je povrch terénu izolován od kovové konstrukce 1,5 metru silnou izolační vrstvou, nebo je provedeno ohrazení nevodivým plotem. [5]

5.4 Uzemňování pro ochranu před účinky blesku dle PNE 33 0000-1

Odpor uzemnění podpěrného bodu ovlivňuje četnost zpětných přeskoků vedení. Zemnicí odpor je tedy důležitým parametrem při výpočtu spolehlivosti vedení. Zpětné přeskoky lze omezit uzemněním zemnicích lan a celokovových podpěrných bodů. Pokud je celokovový podpěrný bod s betonovým základem v místě s rezistivitou půdy do $150 \Omega \cdot m$, stačí jako uzemnění základová patka a není potřeba strojeného zemniče. Do vzdálenosti 800 metrů od rozvodny by neměla rezistivita půdy přesáhnout $100 \Omega \cdot m$. Zemní odpory uzemnění podpěrných bodů by při odpojených zemnicích lanech neměly překročit následující hodnoty. [6]

U vedení 220 kV a 400 kV nebo u vedení 110 kV v oblastech s nižším výskytem blesků by zemní odpor podpěrných bodů v běžné trase neměl přesáhnout 15Ω . Do vzdálenosti 800 metrů od rozvodny by hodnota neměla přesáhnout 10Ω . U vedení 110 kV v oblastech s vyšším výskytem blesků nebo u vedení s požadavkem na vyšší spolehlivost by hodnota zemního odporu zemničů neměla přesáhnout 10Ω nebo 7Ω do 800 metrů od rozvodny. [6]

Vyšší než tyto hodnoty lze připustit v oblastech s vysokou rezistivitou půdy. Pro rozsah rezistivity od 500 do $1000 \Omega \cdot m$ by odpor neměl přesáhnout 20Ω . Pro rozsah od 1000 do $2000 \Omega \cdot m$ by neměl být odpor vyšší než 30Ω . V nejhorším případě mohou mít tři po sobě jdoucí podpěrné body odpor až 50Ω , pokud se okolní podpěrné body vejdou do nižších rozsahů. [6]

Pro podpěrné body do 45 kV v půdách s rezistivitou do $500 \Omega \cdot m$ může být provedeno uzemnění páskovým zemničem o maximální délce 25 m. V půdách s vyšší rezistivitou je postačující uzemnění páskovým zemničem o délce 50 m. Využit lze i paprskové uspořádání. [6]

5.5 Výpočet odporu uzemnění podpěrných bodů dle PNE 33 0000-4

Dle normy PNE 33 0000-4 lze zemní odpor základu železobetonového stožáru o průměru D_p a délce podzemní části L_p určit dle vztahu:

$$R_{st} = 1,1 * K_{11} * \frac{\rho_e}{L_p}$$

kde K_{11} odpovídá koeficientu, který lze určit z obrázku č. 8 a ρ_e odpovídá ekvivalentní rezistivitě půdy. [4]

Pro zemní odpor paprskového zemniče platí vztah:

$$R_{EB} = \frac{\rho_E}{2 * \pi * L} \left(\ln \frac{2 * L}{d} + \ln \frac{L}{2 * z} \right)$$

kde L je délka paprskového zemniče, d je polovina šířky paprskového zemniče. [4]

Pro zemniče sestávající se u n stejných paprsků platí:

$$R_{Epn} = \frac{R_{Ep}}{n} * \frac{1}{\eta_{pn}}$$

kde R_{Ep} je zemní odpor jednoho paprsku a koeficient η_{pn} má následující velikost. [4]

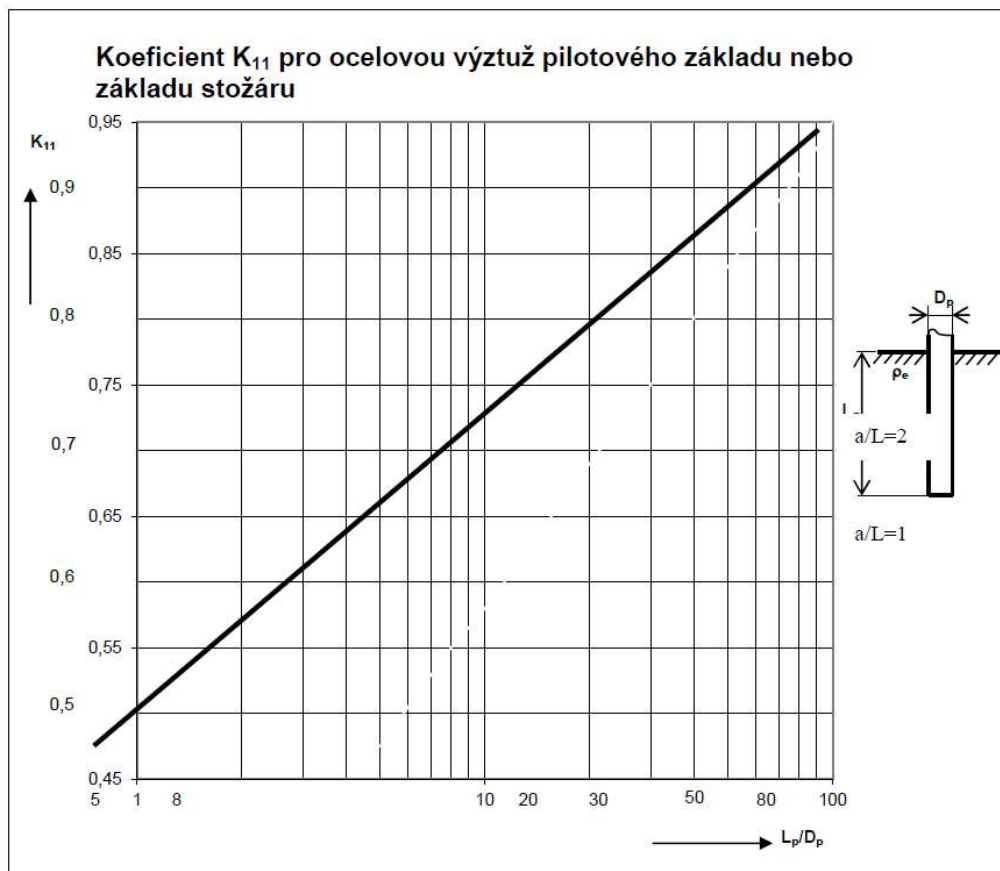
počet paprsků	koeficient využití	poznámka
$n = 1$	$\eta_{pn} = 1$	
$n = 2$	$\eta_{pn} = 0,87$	úhel mezi paprsky je 180°
$n = 3$	$\eta_{pn} = 0,78$	úhel mezi 1. a 2. paprskem je 135° , mezi 2. a 3. je 90° .
$n = 4$	$\eta_{pn} = 0,71$	úhel mezi paprsky je 90° .

Tabulka č.4 – Hodnoty koeficientu η [4]

V případě, že zkombinujeme železobetonový základ s paprskovými zemniči, určíme odpor následovně:

$$R_E = \frac{R_z * R_p}{R_z + R_p} * \frac{1}{\eta_{zp}}$$

kde $\eta_{zp} = 0,78$ je koeficient využití. [4]



a – vzdálenost mezi tyčemi
 L – délka tvče

a/L

Obr. č. 8 – Graf pro zjištění koeficientu K_{11} [3]

6. Změřená data a statistika

6.1 Provedené měření obecně

Změřená data byla z popudu zadavatele pilotního projektu měření uzemnění anonymizována. Statistické metody byly použity na všechna změřená data. Zveřejněné výsledky tedy odpovídají skutečnosti. Zveřejněná data jsou však jen výběrem z celku, aby byla splněna podmínka ČEPS, a.s.

U každého podpěrného bodu (stožáru, dále jen PB) byly změřeny hodnoty těchto parametrů: pasivní odpor, odpor uzemnění, impedance při 41 Hz a 73 Hz, rezistivita země při rozteči 1,3 a 5 metrů. Z naměřených dat byla spočtena impedance při průmyslové hodnotě 50 Hz (lineární interpolace) a byla dopočtena hodnota průměrné zemní rezistivity v okolí PB. Dále byly zaznamenány vedlejší informace jako umístění PB, klasifikace okolí, vlhkost půdy a teplota okolního vzduchu.

6.2 Použité metody

6.2.1 Metoda měření zemního odporu

Zemní odpor podpěrných bodů byl měřen potenciálovou metodou. Proud protékající do zemničů byl měřen čtyřmi Rogovského cívkami Ampflex. Proudová a potenciálová elektroda byly vždy umístěny kolmo k vedení v dálce nejméně 50 metrů pro potlačení rušení a interferencí z vedení.

6.2.2 Metoda měření rezistivity půdy

Rezistivita půdy byla měřena pomocí Wennerovy metody. Kromě přístrojů Chauvin Arnoux byly použity čtyři elektrody z nerezové oceli. Elektrody byly 30 cm dlouhé o průměru 3 cm.

6.2.3 Metoda výpočtu rezistivity

Při výpočtu rezistivity byly použity dvě metody. Rezistivita byla vypočtena průměrem rezistivit a průměrem vodivostí. Vodivost je obrácenou hodnotou rezistivity.

6.3 Použité přístroje

6.3.1 Chauvin Arnoux C.A. 6472

Chauvin Arnoux C.A. 6472 je multifunkční tester uzemnění a rezistivity. Dokáže změřit zemní odpor, impedanci a rezistivitu půdy. Pro měření na sloupech VN a VVN je potřeba doplňující přístroj Chauvin Arnoux C.A. 6474. Samotný přístroj dokáže měřit uzemnění pomocí 1 nebo 2 kleští. Půdní rezistivitu dokáže měřit Wennerovou nebo Schlumbergovou metodou. Přístroj má proudové rozlišení 0,01 mA. Důležitou vlastností přístroje je sweep – frekvenční analýza od 61 Hz do 5078 Hz. Přístroj je chráněn úrovní IP53. Odpor je měřen pomocí čtyř cívek. Přesnost je $\pm 3\%$ z číselné hodnoty plus dva digity.

6.3.2 Chauvin Arnoux C.A. 6474 Pylon box

Chauvin Arnoux C.A. 6474 Pylon box je doplňujícím přístrojem pro Chauvin Arnoux C.A. 6472. Přístroj je určen pro měření na sloupech VN a VVN. Umožňuje na nich měřit zemní odpor. Má proudové převodníky a rozlišení 0,1 mA. Má možnost volby použitých převodníků a možnost volby počtu otáček kabelu kolem stožáru. Přesnost má přístroj $\pm 5\%$ z číselné hodnoty plus jeden digit.

6.4 Teorie statistických metod

6.4.1 Výběrový průměr

Výběrový průměr z náhodného výběru $X = (X_1 \text{ až } X_n)$ značíme \bar{X} . Realizace se značí malým písmenem. Výběrový průměr je nestranný konzistentní odhad střední hodnoty. [11]

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

6.4.2 Výběrový rozptyl

Výběrový rozptyl se značí S_x^2 nebo S^2 . Dvojka neznamena kvadrát. Výběrový rozptyl je nestranný konzistentní odhad rozptylu. [11]

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2$$

6.4.3 Výběrová směrodatná odchylka

Výběrová směrodatná odchylka se značí S_x nebo alternativně S . Realizace je značena malým písmenem. Není to nestranný odhad směrodatné odchylky. [11]

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}$$

6.4.4 Výběrový medián

Je medián empirického rozdělení $q_{\text{Emp}(x)(1/2)}$. Poskytuje robustnější (užitečnější) informaci než průměr. Oproti průměru není medián ovlivněn extrémními hodnotami na krajích spektra. Výhodou mediánu je jeho použití u souboru nečíselných hodnot, kde nelze využít klasického průměru (nečíselné hodnoty nelze sečíst). Nevýhodou je jeho vyšší výpočtová náročnost než průměru. Lze ho definovat jako 50% kvantil. Seřadí-li se hodnoty souboru a rozdělí se řada v půli, bude medián hodnota uprostřed řady. V případě sudého počtu prvků máme prostřední prvky dva. Mediánem je průměr prostředních dvou prvků. [11]

6.4.5 Korelace

Korelace značíme $\rho_{X,Y}$. Korelace náhodných veličin X a Y je střední hodnota součinu odpovídajících normovaných veličin. Nulová hodnota je pro nezávislé a nekorelované veličiny. Korelační koeficient je měřítkem lineárního vztahu, a tedy hodnota $\rho = 0$ neznamená, že mezi proměnnými není žádný vztah. [11] [12]

$$\rho_{X,Y} = \frac{E((X - EX)(Y - EY))}{\sigma_X \sigma_Y} \in (-1,1)$$

Korelaci lze odhadnout pomocí výběrového koeficientu korelace: Ze zákona velkých čísel plyne, že se jedná o konzistentní a nestranný odhad skutečné kovariance. [13]

$$R_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (X_j - \bar{X})^2)(\sum_{i=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2)}}$$

Korelace je míra souvislosti, a tak je možné sílu korelace popsat i verbálně. [12]

0,00 - 0,19 „velmi slabá“

0,20 - 0,39 „slabá“

0,40 - 0,59 „střední“

0,60 - 0,79 „silná“

0,80 - 1,00 „velmi silná“

Pro porovnávání vztahu mezi ordinálními proměnnými, daty s odlehlými hodnotami a daty, která nemají normální rozdělení, používáme neparametrický Spearmanův korelační koeficient ρ . Např. závislost počtu dioptrií a vzdělání. [15]

Pokud hledáme lineární závislost dvou číselných proměnných (např. výška dítěte ve dvou letech a v dospělosti), můžeme použít parametrický Pearsonův korelační koeficient r , jehož použití má následující předpoklady:

- 1) lineární vztah mezi proměnnými,
- 2) neexistence odlehlých hodnot,
- 3) normální rozdělení dat (pro proměnné rozdělené pomocí grupovací proměnné je nutný předpoklad normality v jednotlivých skupinách, např. výška žen, výška mužů).

Tyto předpoklady ověřujeme zpravidla pomocí bodového grafu. Všechny body by měly ležet uvnitř pomyslné elipsy, bez odlehlých hodnot. [15]

V našem případě se tedy nabízí dvě možnosti. Buď data zmenšit o extrémní hodnoty a použít Pearsonův korelační koeficient r , nebo hodnoty nemazat a použít Spearmanův korelační koeficient ρ . Vzhledem k použití odlehlých hodnot a nenormálnímu rozložení hodnot (ověřeno testem normality rozložení v software Mathematica) je nutno použít Spearmanův korelační koeficient ρ a Spearmanův test významnosti. Dle prof. Navary lze Pearsonův korelační koeficient použít orientačně.

6.4.6 Testování korelace

Chceme určit, zda je korelace mezi veličinami statisticky významná. [13] Předpokládáme dvojrozměrnou náhodnou veličinu s normálním rozdělením. Pro testovací kritérium pak platí:

$$T = \frac{R_{X,Y}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R_{X,Y}^2}}$$

Test korelačního koeficientu zjistí, zdali se korelační koeficient populace nerovná nule, nebo zdali vypočtený korelační koeficient odpovídá skutečnosti. Pokud je spočtená p-hodnota (výsledek) vysoká, korelační koeficient se výrazně liší od nuly.

Pearsonův korelační test zjistí závislost mezi zadanými vektory. Pokud je spočtená p-hodnota nízká, je dokázána závislost mezi vektory.

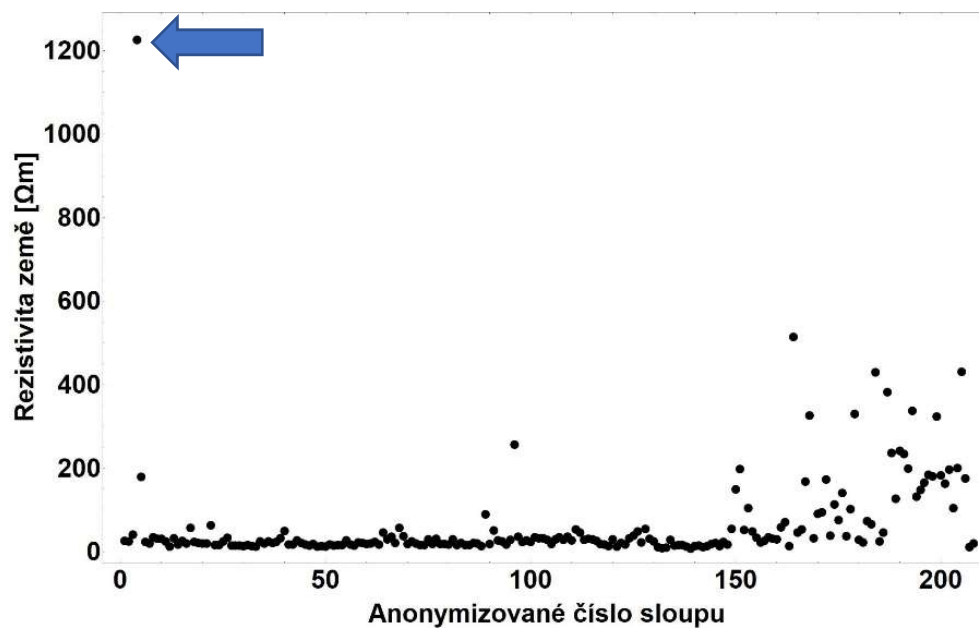
Pro posouzení úrovně statistické významnosti Pearsonova i Spearmanova korelačního koeficientu používáme tzv. p-hodnotu, která je zobrazena či naznačena ve výstupech statistických programů. Jedná se o p-hodnotu testu, který testuje nulovou hypotézu „Korelační koeficient je nulový“. Pokud je $p > 0,05$, je korelační koeficient statisticky nevýznamný a je nutné jej považovat za nulový. [15]

Je potřeba zdůraznit, že p-hodnota neukazuje na intenzitu závislosti mezi proměnnými (ta je dána přímo korelačním koeficientem), ale říká nám, zda je korelační koeficient možné považovat za nenulový. Statistická významnost korelačního koeficientu je kromě vlastního lineárního vztahu mezi proměnnými také ovlivněná velikostí vzorku, např. pro malé vzorky ($n < 30$) nemusí být korelační koeficient 0,4 (středně silná závislost) statisticky významný (nepotvrdili jsme, že mezi proměnnými je nějaký vztah) a naopak pro velké vzorky (např. $n > 100$) může být statisticky významná i slabá závislost, kdy je korelační koeficient např. 0,2. [15]

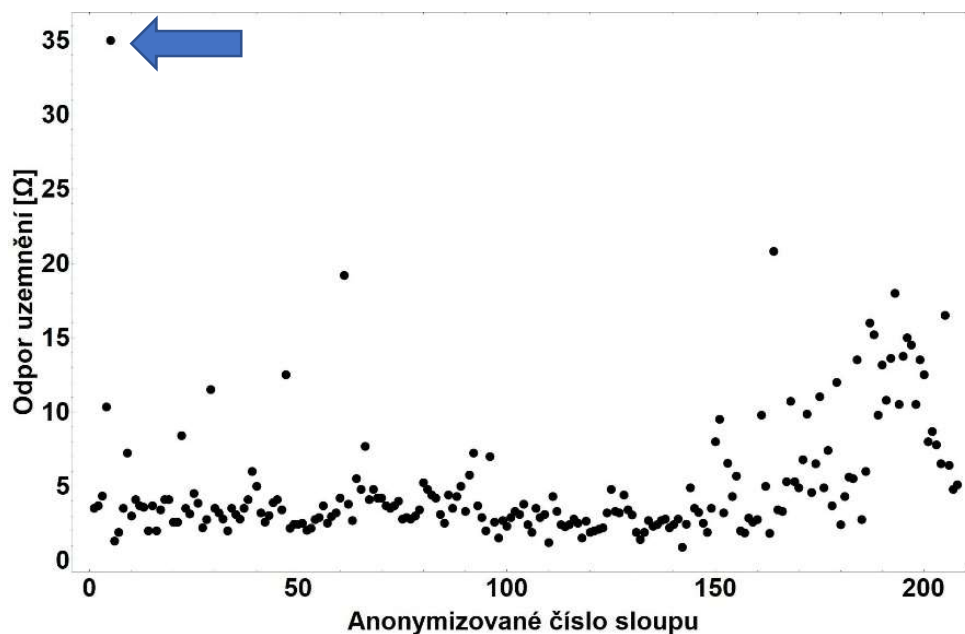
6.5 Změřená a vypočtená data, korelace

6.5.1 Vyřazení nestandardních případů

Po důkladném prozkoumání souboru změřených dat je jasné, že se dva sloupky vymykají zbytku souboru. Svým nestandardním umístěním v lesním průseku hodnoty rezistivity a odporu neúměrně narůstají vůči zbytku souboru. Z tohoto důvodu je u těchto dvou sloupů zřízeno nestandardní opatření pomocí strojených zemničů. Ku prospěchu vyhodnocení korelací a závislostí jsem se rozhodl tyto dva sloupky z celkového souboru vyloučit. V budoucích měřeních je důležité zaměřit se na PB v podobných podmínkách.



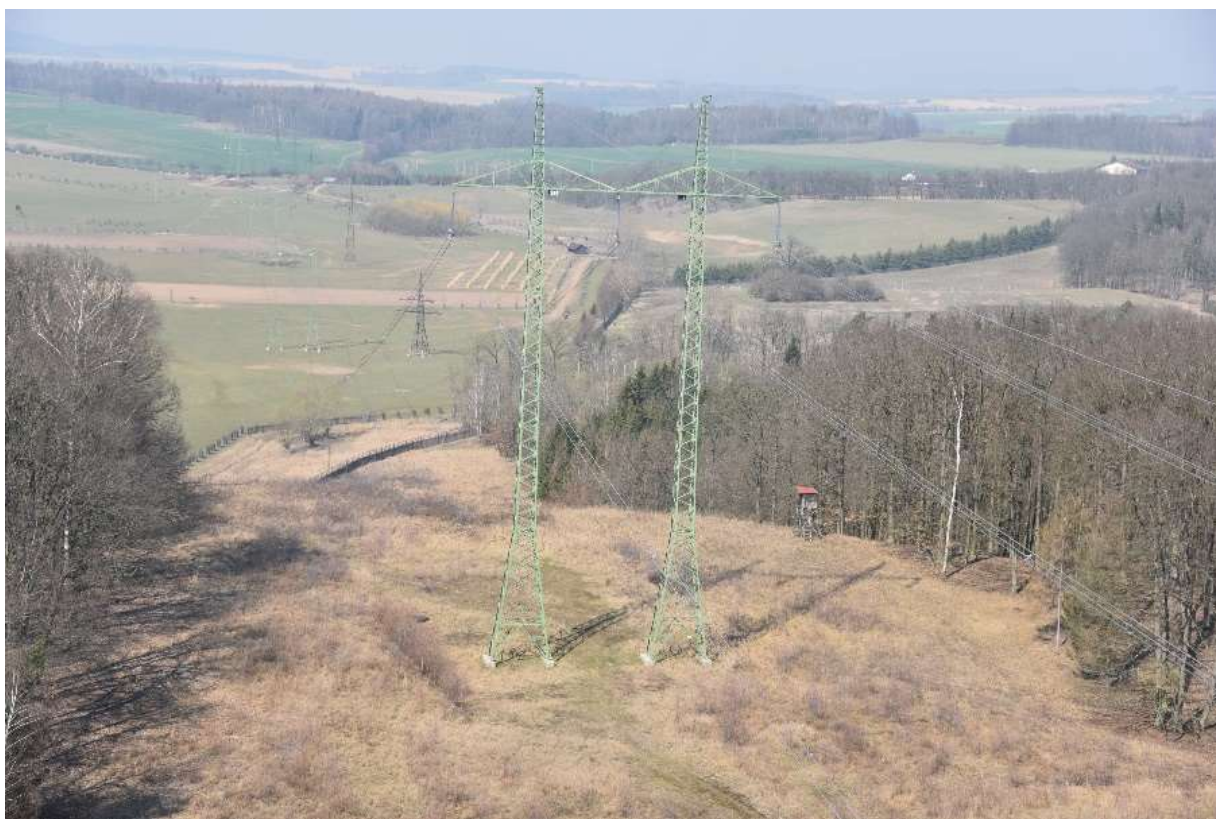
Graf č.1 – Velikost rezistivity země podél vedení (všechny PB)



Graf č.2 – Velikost odporu uzemnění podél vedení (všechny PB)



Obr. č.9 – První vyřazený sloup v lesním průseku



Obr. č.10 – Druhý vyřazený sloup v lesním průseku

6.5.2 Základní statistické ukazatele – změřené hodnoty

	PRŮMĚR	SMĚR. ODCHYLKA	MAXIMUM	MINIMUM	MEDIÁN	ROZPĚTÍ
R_t [Ω]	4,84	3,66	20,80	0,88	3,50	19,92
R_{pass} [Ω]	5,94	7,45	53,00	0,39	3,26	52,61
$Z_{E 41 Hz}$ [Ω]	0,38	0,12	1,12	0,07	0,35	1,05
$Z_{E 73 Hz}$ [Ω]	0,47	0,14	1,20	0,09	0,44	1,11
$\rho_{E 1 m}$ [Ωm]	90,96	174,40	1307,00	9,00	36,00	1298,00
$\rho_{E 3 m}$ [Ωm]	57,62	83,03	590,00	5,74	25,11	584,26
$\rho_{E 5 m}$ [Ωm]	53,88	73,29	423,00	7,65	22,00	415,35

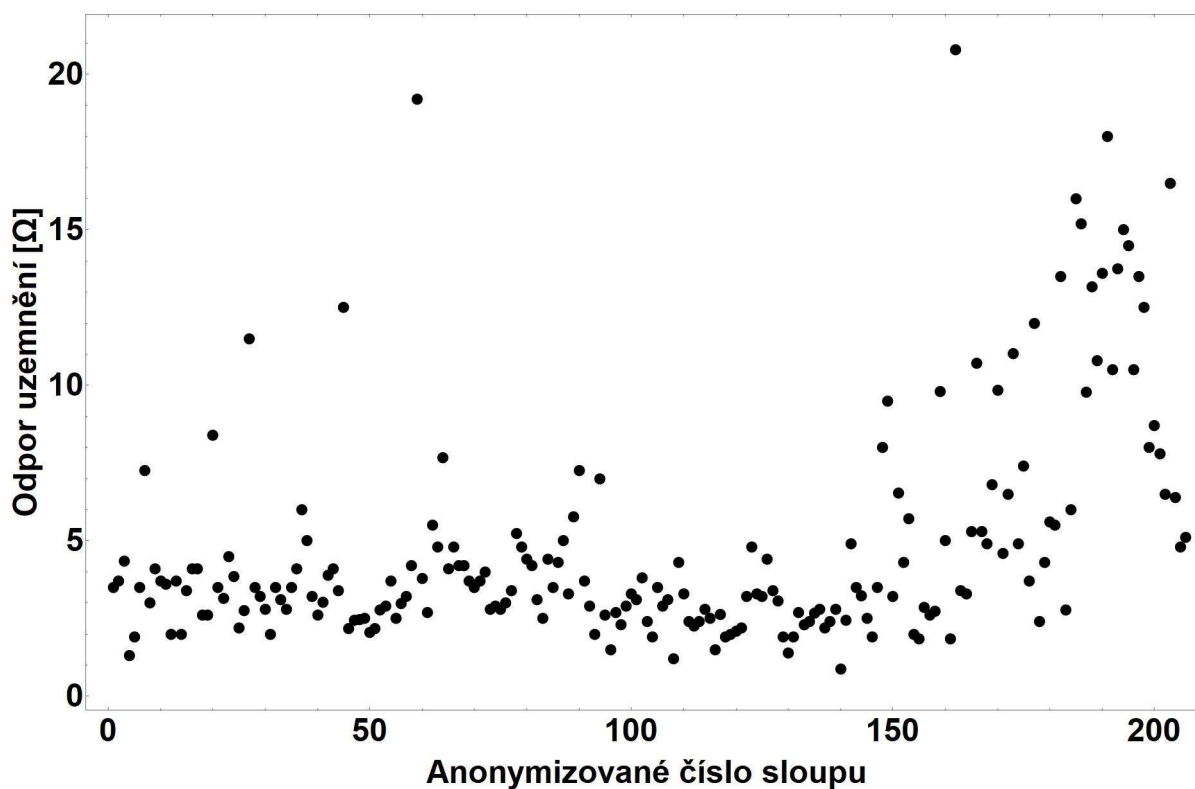
Tabulka č.5 – Vypočtené statistické hodnoty ze změřených údajů (bez vyřazených hodnot)

6.5.3 Základní statistické ukazatele – spočtené hodnoty

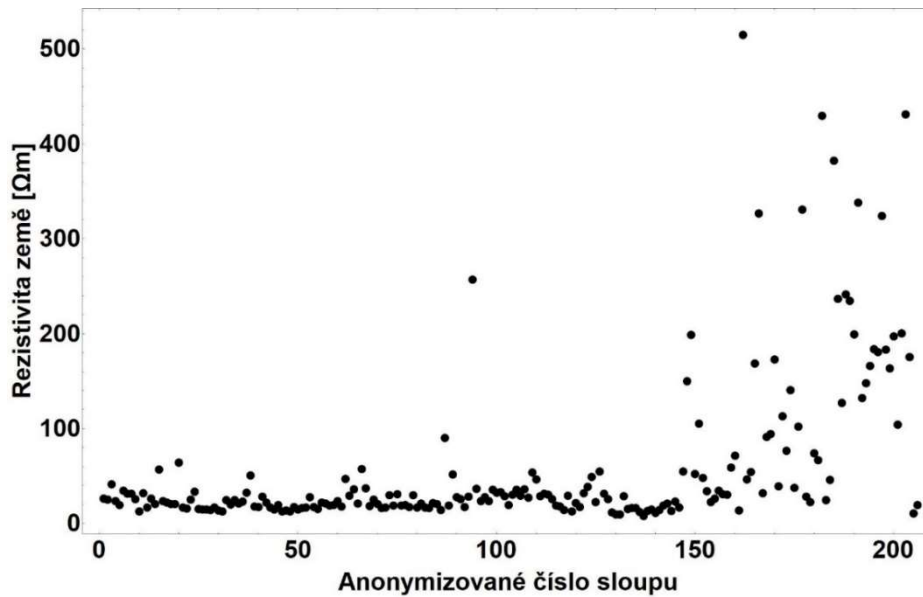
	PRŮMĚR	SMĚR. ODCHYLKA	MAXIMUM	MINIMUM	MEDIÁN	ROZPĚTÍ
$Z_{E 50 Hz}$ [Ω]	0,40	0,12	1,14	0,07	0,38	1,07
ρ_E [Ωm]	59,02	84,25	514,84	7,91	25,98	506,93

Tabulka č.6 – Vypočtené statistické hodnoty z vypočtených údajů (bez vyřazených hodnot)

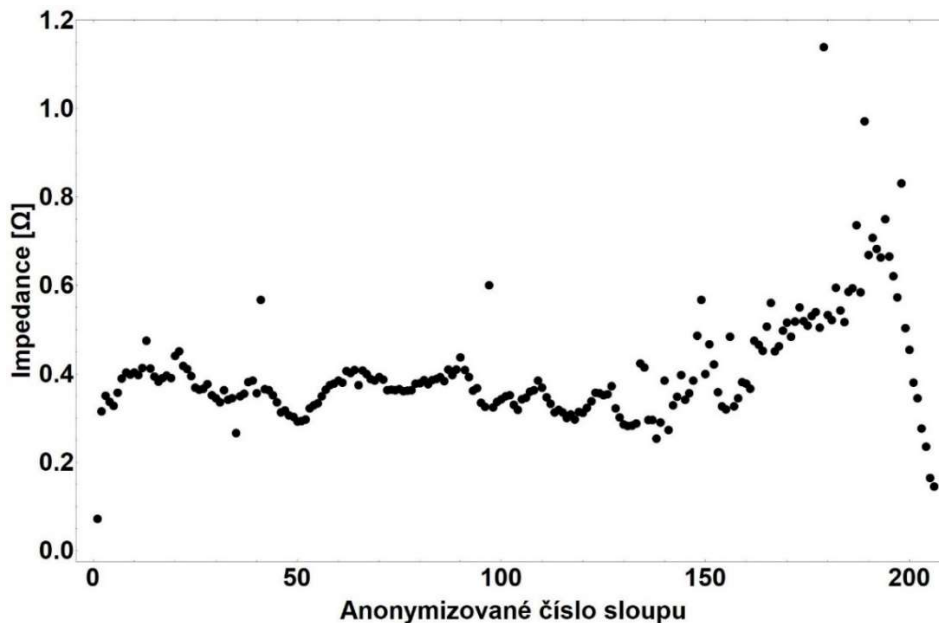
6.5.4 Parametry podél vedení



Graf č.3 – Velikost odporu uzemnění podél vedení (bez vyřazených PB)



Graf č.4 – Velikost rezistivity půdy podél vedení (bez vyřazených PB)

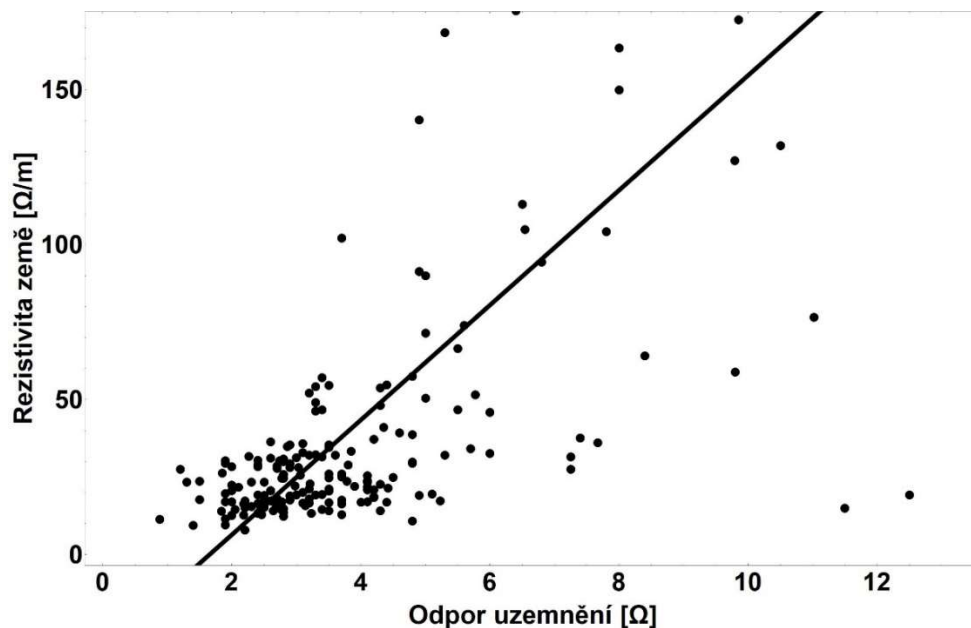


Graf č.5 – Velikost impedance podél vedení (bez vyřazených PB)

6.5.5 Závěr: Parametry podél vedení

Vyšší rozptyl parametrů rezistivity a odporu je dán jejich závislostí na klimatických podmínkách. V případě, že je mokro či zima, naměří se mírně odlišná hodnota od objektivní skutečnosti. Impedance je méně závislá na vnějších faktorech a graf naměřených bodů tomu plně odpovídá. Zároveň u všech parametrů pozorujeme zvýšený rozptyl v poslední třetině grafu (mezi sloupy č. 150 až č. 200). Pravděpodobně se jedná o měření v období se zvýšenou vlhkostí nebo o měření v geograficky nehomogenním prostředí. Impedance je daná jak samotným uzemněním, tak délkou zemnicích lan. Čím blíže jsme tedy k rozvodně, tím více impedance klesá.

6.5.6 Korelace: Odpor uzemnění a rezistivita země (průměr vodivostí)



Graf č.6 – Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (průměr vodivostí)

Pearsonův korelační koeficient r : 0,804217 (silná pozitivní korelace [12])

Nulová hypotéza: $1,01 \cdot 10^{-28}$ (P-hodnota nízká, korelace nenulová)

Spearmanův korelační koeficient ρ : 0,652935 (silná pozitivní korelace [12])

Spearmanův korelační test: $2,05 \cdot 10^{-26}$ (P-hodnota nízká, vektory jsou závislé)
(p -hodnota je menší než 0,05, korelace je tedy statisticky významná)

6.5.7 Závěr: Korelace odporu uzemnění a rezistivity země (průměr vodivostí)

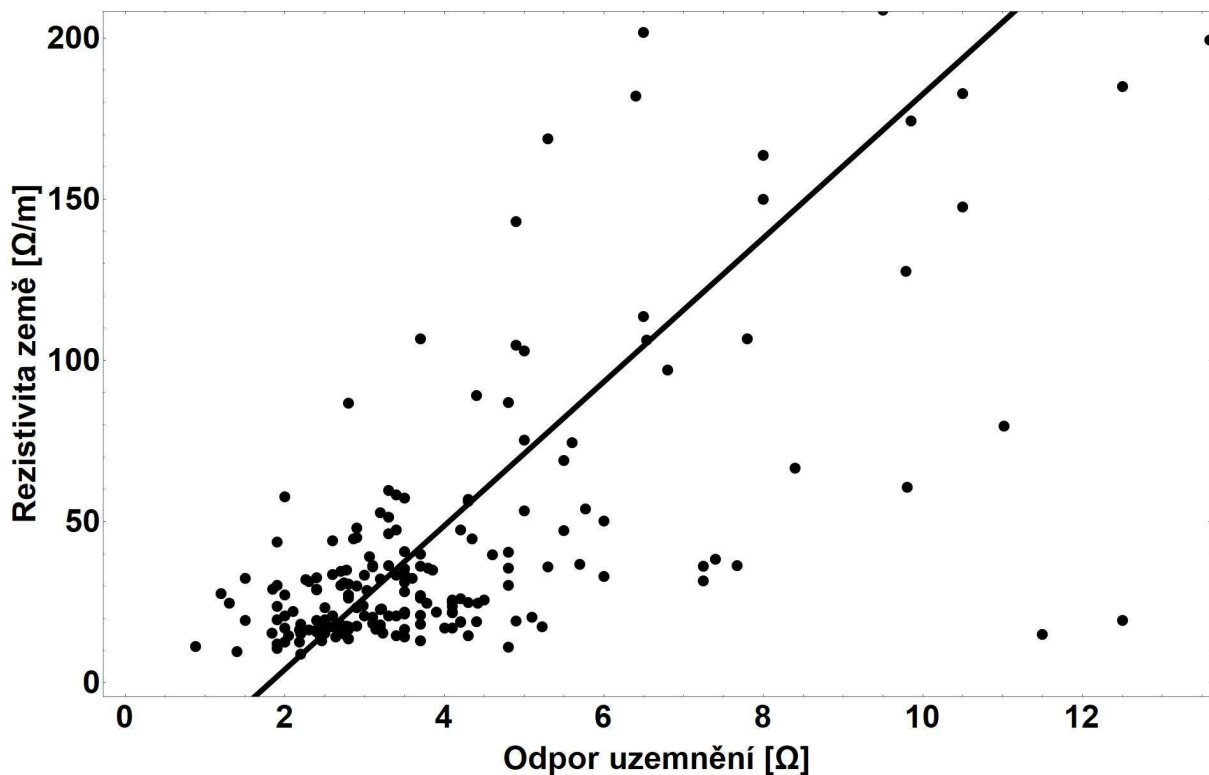
Dle [14] se zemní odpor dá definovat jako poměr napětí na zemniči a proudu protékajícím zemničem. Hodnota zemního odporu je součtem odporu zemniče, odporu kontaktu zemniče a půdy a samotného odporu okolní půdy. Odpor půdy je závislý na tvaru zemniče, složení půdy a momentální vlhkosti půdy. Ze složek zemního odporu je odpor půdy jistě největší. Při zjednodušení problému můžeme uvažovat zemnič jako půlkouli zasazenou v zemi.

Pak se zemní odpor rovná:

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Zemní odpor je tedy přímo lineárně závislý na rezistivitě půdy ρ . Logicky je tedy zemní odpor (odpor uzemnění) také lineárně závislý na rezistivitě půdy. Korelaci umenšují klimatické podmínky při měření (vlhkost, teplota), dále odpor přechodu zemnič-půda (na poli rozhrabaná půda), kvalita zemniče (vodivost betonu sloužícího k uzemnění PB). Tuto logickou úvahu potvrzuje silná pozitivní korelace spočtená výše.

6.5.8 Korelace: Odpor uzemnění a rezistivita země (průměr rezistivit)



Graf č.7 – Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (průměr rezistivit)

Pearsonův korelační koeficient r : 0,784239 (silná pozitivní korelace [12])

Nulová hypotéza: $1,18 \cdot 10^{-26}$ (P-hodnota nízká, korelace nenulová)

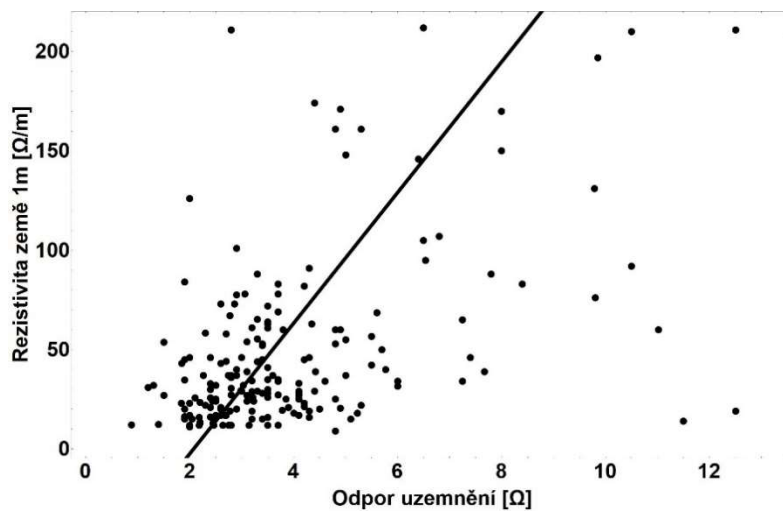
Spearmanův korelační koeficient ρ : 0,635155 (silná pozitivní korelace [12])

Spearmanův korelační test: $1,14 \cdot 10^{-24}$ (P-hodnota nízká, vektory jsou závislé)
(p-hodnota je menší než 0,05, korelace je tedy statisticky významná)

6.5.9 Závěr: Průměr vodivostí a průměr rezistivit

Srovnání výpočtu rezistivity pomocí průměru vodivostí a průměrů rezistivit přináší jasný výsledek. Korelace vychází pozitivněji v případě průměru vodivostí. Tento rozdíl se dá považovat za statisticky významný.

6.5.10 Korelace: Odpor uzemnění a dílčí rezistivita země při rozteči elektrod 1 m



Graf č.8 – Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (rozteč elektrod 1 m)

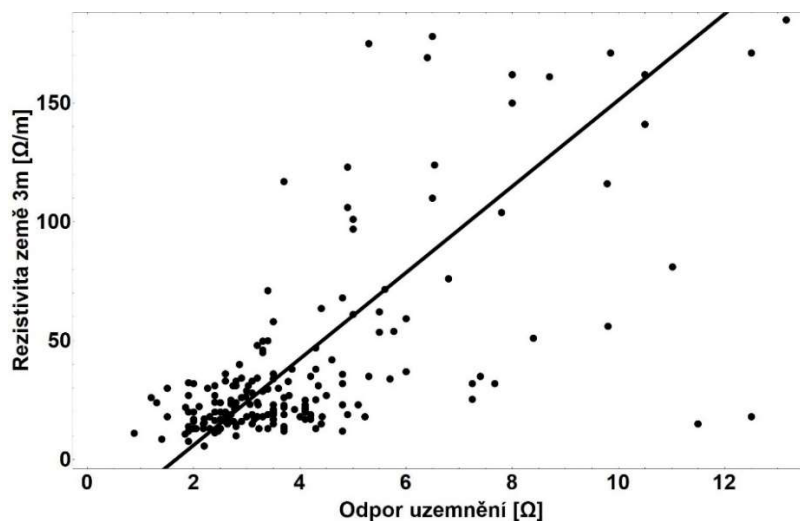
Pearsonův korelační koeficient r : 0,689296 (silná pozitivní korelace [12])

Nulová hypotéza: $1,44 \cdot 10^{-17}$ (P-hodnota nízká, korelace nenulová)

Spearmanův korelační koeficient ρ : 0,536206 (středně silná pozitivní korelace [12])

Spearmanův korelační test: $9,88 \cdot 10^{-17}$ (P-hodnota nízká, vektory jsou závislé) (p-hodnota je menší než 0,05, korelace je tedy statisticky významná)

6.5.11 Korelace: Odpor uzemnění a dílčí rezistivita země při rozteči elektrod 3 m



Graf č.9 – Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (rozteč elektrod 3 m)

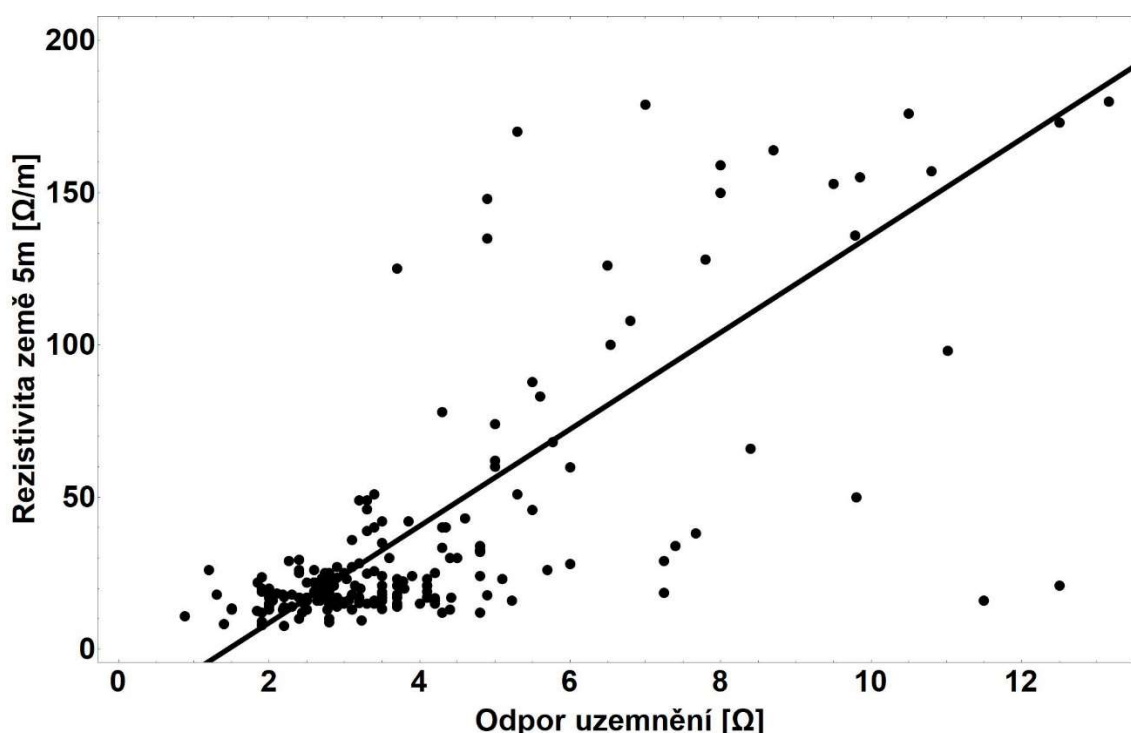
Pearsonův korelační koeficient r : 0,798877 (silná pozitivní korelace [12])

Nulová hypotéza: $8,20 \cdot 10^{-28}$ (P-hodnota nízká, korelace nenulová)

Spearmanův korelační koeficient ρ : 0,645258 (silná pozitivní korelace [12])

Spearmanův korelační test: $1,20 \cdot 10^{-25}$ (P-hodnota nízká, vektory jsou závislé) (p-hodnota je menší než 0,05, korelace je tedy statisticky významná)

6.5.12 Korelace: Odpor uzemnění a dílčí rezistivita země při rozteči elektrod 5 m



Graf č.10 – Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (rozteč elektrod 5 m)

Pearsonův korelační koeficient r : 0,793185 (silná pozitivní korelace [12])

Nulová hypotéza: $1,72 \cdot 10^{-30}$ (P-hodnota nízká, korelace nenulová)

Spearmanův korelační koeficient ρ : 0,667102 (silná pozitivní korelace [12])

Spearmanův korelační test: $6,85 \cdot 10^{-28}$ (P-hodnota nízká, vektory jsou závislé) (p-hodnota je menší než 0,05, korelace je tedy statisticky významná)

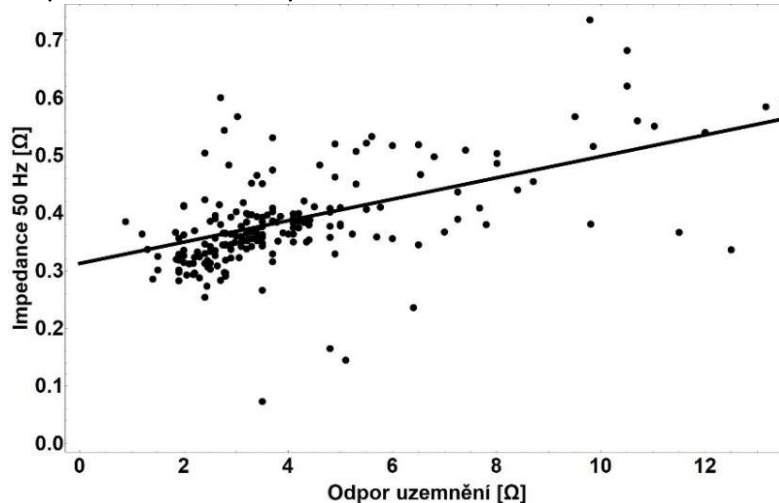
6.5.13 Závěr: Korelace odporu uzemnění a rezistivity půdy

	Pearsonův k. k.	Spearmanův k. k.	Test nulové hypotézy	Spearmanův test
Průměr vodivosti	0,80	0,65	$1,01 \cdot 10^{-28}$	$2,05 \cdot 10^{-26}$
Průměr rezistivit	0,78	0,63	$1,18 \cdot 10^{-26}$	$1,14 \cdot 10^{-24}$
Rozteč 1 m	0,69	0,54	$1,44 \cdot 10^{-17}$	$9,88 \cdot 10^{-17}$
Rozteč 3 m	0,80	0,64	$8,20 \cdot 10^{-28}$	$1,20 \cdot 10^{-25}$
Rozteč 5 m	0,79	0,67	$1,72 \cdot 10^{-30}$	$6,85 \cdot 10^{-28}$

Tabulka č.7 – Vypočtené hodnoty korelací a jejich testů

Pearsonův korelační koeficient lze vzít v potaz jen orientačně. Hlavním srovnávacím kritériem je Spearmanův korelační koeficient. Ten nejlépe vyšel pro korelaci zemního odporu a rezistivity půdy měřené při rozteči elektrod 5 m. P-hodnoty nulového testu a Spearmanova testu vycházejí ve všech případech dostatečně malé. Jedině v případě rozteče 1 metru pozorujeme pokles všech parametrů, tudíž lze tento způsob výpočtu rezistivity vyřadit jako statisticky nejslabší/nejméně významný. Správný výpočet rezistivity půdy je zásadní pro návrh a následné projektování uzemnění PB.

6.5.14 Korelace: Odpor uzemnění a impedance



Graf č.11 – Závislost impedance a odporu uzemnění

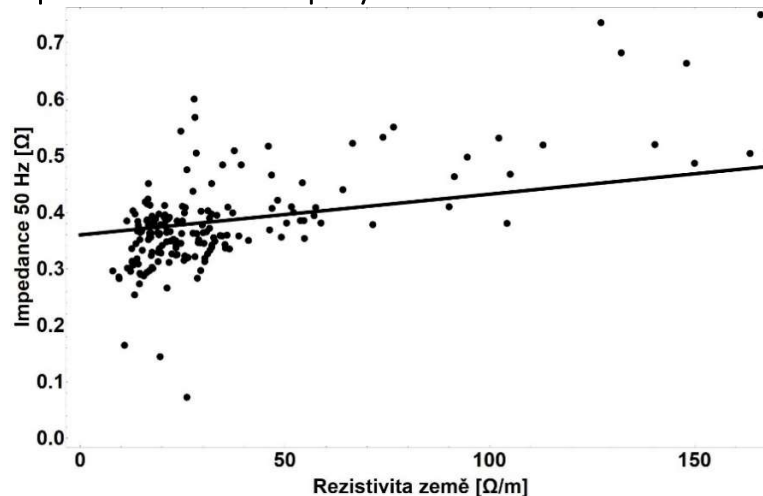
Pearsonův korelační koeficient r : 0,555019 (silná pozitivní korelace [12])

Nulová hypotéza: $6,27 \cdot 10^{-23}$ (P-hodnota nízká, korelace nenulová)

Spearmanův korelační koeficient ρ : 0,599237 (středně silná pozitivní korelace [12])

Spearmanův korelační test: $1,81 \cdot 10^{-21}$ (P-hodnota nízká, vektory jsou závislé) (p-hodnota je menší než 0,05, korelace je tedy statisticky významná)

6.5.15 Korelace: Impedance a rezistivita půdy



Graf č.12 – Závislost impedance a rezistivity půdy

Pearsonův korelační koeficient r : 0,495474 (silná pozitivní korelace [12])

Nulová hypotéza: $2,37 \cdot 10^{-18}$ (P-hodnota nízká, korelace nenulová)

Spearmanův korelační koeficient ρ : 0,546432 (středně silná pozitivní korelace [12])

Spearmanův korelační test: $1,96 \cdot 10^{-17}$ (P-hodnota nízká, vektory jsou závislé) (p-hodnota je menší než 0,05, korelace je tedy statisticky významná)

6.5.16 Závěr: Korelace impedance, rezistivity a odporu

Ze základního vzorce $Z = R + jX$ lze vypočítat lineární závislost změřené impedance na odporu uzemnění a následně i na rezistivitě půdy. Korelace impedance a rezistivity je logicky nižší než korelace impedance a odporu, protože do jejich vzájemného vztahu zasahuje více proměnných.

7. Program pro zpracování dat

7.1 Použitý software

Vzhledem k datovému výstupu měřícího přístroje (soubor Microsoft Office Excel datového typu .xls) byl na zpracování dat určen programovací jazyk Visual Basic for Application.

Visual Basic for Application, dále jen VBA, vychází z programovacího jazyka Visual Basic, dále jen VB. VBA od VB převzal syntaxi, ale chybí mu některé metody, události a vlastnosti. VBA je jako nadstavba přítomná ve všech složkách Microsoft Office, a tudíž všechny tyto aplikace propojuje. VBA je plnohodnotným procedurálním/objektovým programovacím prostředím. Nelze v něm však vytvářet samostatné .exe spustitelné aplikace/programy. Objektem je ve VBA skoro vše, například samotný soubor .xlsx, jednotlivé sešity a buňky. VBA je výborným nástrojem pro automatizaci zpracování dat.

7.2 Vlastní kód

Samotný kód byl tvořen přímo pro výstupy měřícího přístroje poskytnutého firmou EGU HV Laboratory Běchovice, a není tudíž použitelný pro výstupy jiných formátů. Hlavním důvodem zpracování tohoto programu byla potřeba automatizace zpracování dat. Počet měření uzemnění sloupů vysokého napětí se navyšuje. Manuální opisování dat je časově nepřiměřeně náročné.

Při otevření souboru s automatizací se objeví rozhraní pro zápis externích dat dle obrázku č.7. Uživatel vyplní jméno datového souboru, ze kterého chce data vyextrahovat. Po stisknutí tlačítka „Načíst soubor“ načte program automaticky počet změřených podpěrných bodů/sloupů. Ten nabídne jen takový počet textových oken na vyplnění čísel sloupů, který byl doopravdy změřen. Uživatel dále zvolí, zda chce zadat den měření automaticky z paměti přístroje nebo sám ručně. Jednoduchým zaškrtnutím poté uživatel navolí geografické podmínky okolí měřených podpěrných bodů a vyplní povětrnostní podmínky. Vše uživatel zakončí stiskem tlačítka „NAČÍST DATA“, který provede všechny výpočty a zápisy dat.

Program sám najde správný řádek dle čísla podpěrného bodu a vyplní tyto parametry: místo a datum měření, uzemňovací a pasivní odpor, impedanci při 41 a 73 Hz, půdní rezistivitu při rozteči 1,3 a 5 metrů, vlhkost a teplotu okolí a klasifikaci přístupnosti PB. Přes průměr vodivosti dále program dopočte celkovou rezistivitu půdy a přes lineární interpolaci impedanci při 50 Hz. Pro kotevní sloupy je výpočet zemního odporu o něco složitější. Přes sedm paralelních kombinací dopočte program celkový zemní odpor.

UserForm1 ×

Informace o proběhlém měření

Jméno datového souboru

Číslo podpěrného bodu

<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Den měření Automaticky Ručně

Teplota

Vlhkost sucho mokro

Typ půdy pole louka les průsek
 bažina pastvina obora sad

Klasifikace 1-nepřístupný 2-intravilán 3-odlehlý 4-oplocená pastvina

Obr. č. 11 – Uživatelské rozhraní programu

7.3 Závěr

Program na zpracování dat má přes tisíc řádků kódu a prošel již několikátou iterací. V tuto chvíli slouží svému účelu a podrobuje se dalšímu vývoji. Program předpokládá obeznámeného uživatele a neobsahuje plné ošetření proti nesprávnému zadání dat.

8. Simulace vedení

8.1 Modelování v energetice obecně

Modelování v elektroenergetice je zásadním nástrojem při vývoji, výstavbě i provozu elektrizačních soustav. Pomocí modelů lze předcházet předpokládaným i skutečným poruchovým stavům. Model je reprezentací reálného systému. Je možno upravovat na něm parametry, změny konfigurace systému a vyzkoušet poruchové stavy, jež by byly ve skutečnosti neproveditelné. [2]

Pod pojmem model si můžeme představit soustavu rovnic popisující daný obvod. Nepřesnosti budou v modelu vždy. Pro analytický výpočet musíme některé části systému zjednodušit nebo zanedbat a vneseme do systému další chybu výpočtu. Numerický model vychází ze stejných rovnic, ale obvykle jej používáme v nelineárních nebo analyticky obtížně řešitelných situacích.

Modelů je celá řada. Možné dělení je na univerzální a speciální, stejnosměrné a střídavé, statické a dynamické. Speciální model reprezentuje část nebo prvek soustavy. Speciální modely používají dispečeri. Síť řídí podle změny konfigurace či parametrů soustavy. Univerzální model má nastavitelné parametry tak, aby mohl představovat libovolnou soustavu. Statické modely řeší ustálené stavy ať už normální, či poruchové. Dynamické modely reprezentují stavy přechodné. [2]

8.2 Složkové soustavy

Poruchy v energetických systémech je možné počítat ve složkovém systému. Tento systém zjednoduší za určitých podmínek analyzovaný obvod. Používáme jej například při výpočtu symetrických, nesymetrických, jednofázových i vícefázových poruch. Základní transformace ze složkového systému 0-1-2 do fázového systému a-b-c pro napětí je definována následovně: [17]

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{kde } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Zpětná transformace pak vypadá následovně: [17]

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix}$$

Systém se skládá ze tří složek. Sousedná má význam symetrického třífázového zdroje se sledem fází v kladném smyslu (proti hodinovým ručičkám). Zpětná složka má význam třífázového zdroje s opačným sledem fází (motor roztáčí v záporném smyslu). Poslední netočivá složka má význam jednofázového zdroje zapojeného ve všech fázích (motor neroztáčí). Za předpokladu linearit prvků lze

transformovat celý obvod a ve složkových soustavách ho vyřešit. Zpětnou transformací získáme řešení pro fázové veličiny. [17]

Za předpokladu mezifázové symetrie lze obecný podélný člunek popsat následovně: [17]

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z} & \hat{Z}' & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z} & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z}' & \hat{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix}$$

Postupnou úpravou pak získáme: [17]

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Z}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix}$$

Pokud je impedanční matice cyklicky symetrická, můžeme rozložit trojfázový obvod do tří nezávislých jednofázových obvodů. Jedná o se o takzvaná složková schémata. Impedance se nazývají složkové impedance. Podélné rozpojení vytvoří nesymetrie, které může vést k přetížení zařízení. Příčná porucha může vést až k destrukci zařízení. [17]

8.3 Zkratky na vedení

Zkrat je definován jako elektromagnetický přechodový jev, při kterém dojde k vodivému spojení dvou či více bodů obvodu. Tyto body mají v normálním stavu rozdílné hladiny napětí. Zkratové proudy obvykle několikanásobně převyšují provozní velikosti proudů. Postupným navyšování výkonů dodávaného a spotřebovávaného v síti, stejně tak navyšování výkonu přenositelného sítí, se zvyšují i potenciální zkratové proudy. Růst těchto proudů je negativní vliv. Pro správné dimenzování a ochranu všech elektroenergetických zařízení je nutné znát velikost a časový průběh možných zkratů. Při projektování je nutné předpokládat i životnost a opotřebení zařízení. V současné chvíli se to řeší zvýšením zkratové odolnosti při návrhu. [3]

Příčin vzniku zkratu je celá řada. Mezi nejčastější příčiny řadíme vady zařízení (nedokonalá izolace), špatnou montáž, zhoršení kvality přetěžování nebo stárnutí. Mezi externí příčiny patří přepětí (atmosférické nebo provozní) a cizí zásahy (lidské nebo přírodní). Vlivy, kterým se dá častěji předejít, jsou nedostatečná zkratová odolnost při projektování či selhání lidského faktoru při nesprávné manipulaci. [3]

Při zkratu dochází k několika nebezpečným dějům. Nejvíce nebezpečné je asi tepelné působení zkratu jmenovitě tepelné působení elektrického oblouku. Vysoká teplota může způsobit stárnutí izolace, snížení mechanické pevnosti vodičů či spojů. Velké nebezpečí též hrozí cestou mechanického působení zkratů. Vlivem elektromagnetického působení vznikají dynamické rázy na celou soustavu vodičů, vinutí strojů, spojů a izolátorů. Z hlediska kvality elektrické energie pozorujeme při zkratu v celé soustavě úbytky napětí, které mohou mít negativní důsledky na chod některých spotřebičů. Velké zkratové proudy indukují do okolních vedení napětí, které může na sdělovacích zařízení působit

problémy. U vypínání se musí pozorovat hladina přepětí (negativní vliv na izolaci) a zotaveného napětí, které může zapříčinit opětovné zapálení oblouku mezi kontakty vypínače. [3]

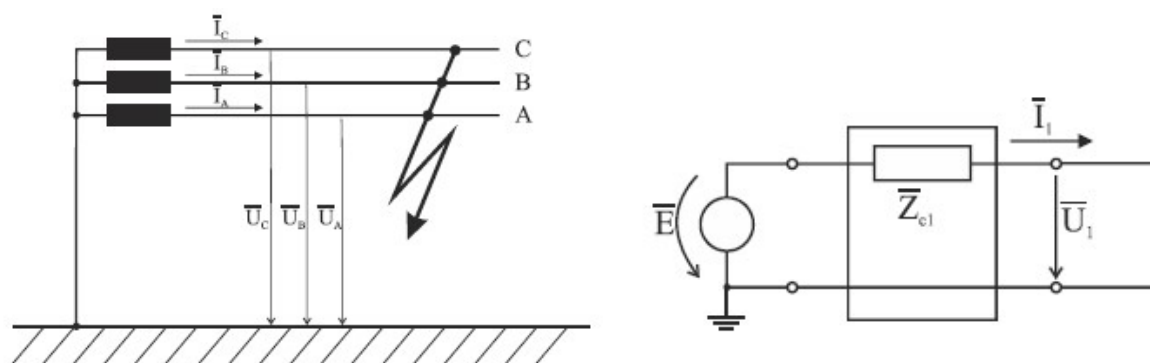
Při zkratových dějích se náhle mění impedance systému. To vede k přechodnému ději na většině prvků. Energie magnetického pole se nesmí měnit skokově. Zkratový proud má proto neharmonický průběh. Nejvyšší hodnoty dosahuje zkratový proud v prvních okamžicích po zkratu. Postupně zkratový proud klesá a ustaluje se na harmonickém průběhu. Průběh zkratového proudu se skládá z těchto složek: rázová, přechodná, ustálená a stejnosměrná. Norma definuje důležité hodnoty zkratového proudu, které slouží k zjednodušení přechodového jevu. Patří mezi ně počáteční souměrný rázový zkratový proud, nárazový zkratový proud, souměrný zkratový vypínací proud, ustálený zkratový proud, ekvivalentní oteplovací zkratový proud a doba trvání zkratu. [3]

8.3.1 Zkraty obecně

Zkraty se rozdělují podle způsobu spojení živých částí a země na jednofázové, dvoufázové, dvoufázové zemní, trojfázové a trojfázové zemní. Většina zkratů je jedno nebo dvoufázová porucha. Jedná se tedy o nesouměrné zkraty. Trojfázový zkrat se vyskytuje zřídka, ale jelikož je proud při něm nejvyšší, je potřeba se jím také zabývat. U kabelových vedení je naopak trojfázový zkrat nejčastější, protože jsou fáze blíže u sebe. Norma výpočet předepisuje přes metodu souměrných složek. [3]

8.3.2 Trojfázový symetrický zkrat

Ze schématického vyobrazení lze určit napětí v místě zkratu jako nulová. Před zkratem je soustavu naprázdno. Schéma pro souslednou složku je vyzkratováno a pro zpětnou a netočivou je naprázdno. [3]



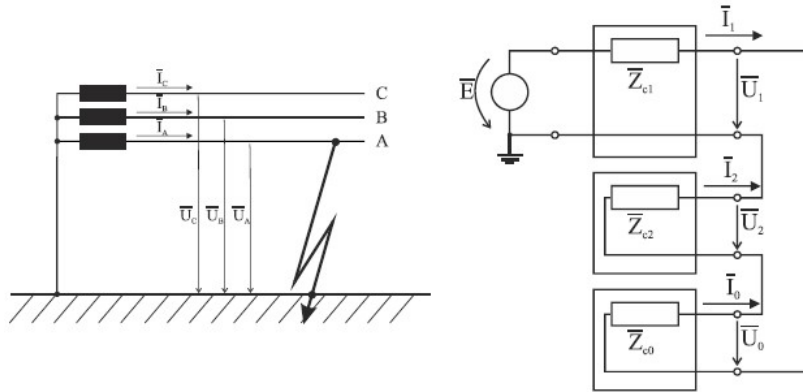
Obr. č. 12 a obr. č. 13 – Schématické zobrazení a schéma trojfázového souměrného zkratu [3]

Dosazením do základních rovnic získáme pro trojfázový souměrný zkrat tyto výsledné vztahy: [3]

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 = \hat{U}_2 = \hat{U}_0 = 0 & & \hat{I}_2 = \hat{I}_0 = 0 & & \hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{Z_1} \\ \hat{I}_A = \frac{\hat{E}}{Z_1} & & \hat{I}_B = \hat{a}^2 \frac{\hat{E}}{Z_1} & & \hat{I}_C = \hat{a} \frac{\hat{E}}{Z_1} \end{aligned}$$

8.3.3 Jednofázový zkrat

Předpoklad pro tento typ zkratu jsou nulové napětí na zkratované fázi a nulové proudy ve fázích naprázdno. Před zkratem je soustava naprázdno. Ve schématu jsou všechny tři složkové soustavy v sérii. [3]



Obr. č. 14 a obr. č. 15 – Schématické zobrazení a schéma jednofázového zkratu [3]

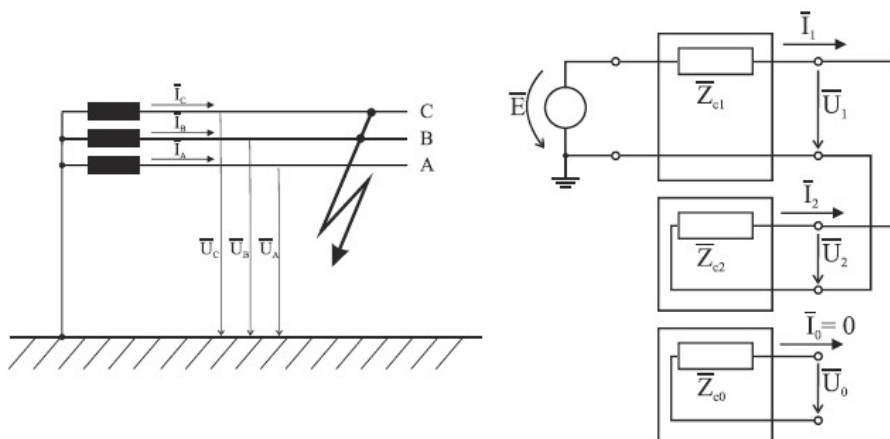
Výsledné vztahy: [3]

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \hat{I}_0 = \frac{\hat{E}}{(\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)} \quad \hat{I}_A = \frac{3 * \hat{E}}{(\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)} \quad \hat{I}_B = \hat{I}_C = 0$$

$$\hat{U}_1 = \hat{E} \frac{(\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)}{(\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)} \quad \hat{U}_2 = -\hat{E} \frac{\hat{Z}_2}{(\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)} \quad \hat{U}_0 = -\hat{E} \frac{\hat{Z}_0}{(\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)}$$

8.3.4 Dvoufázový zkrat

Tentokrát je předpoklad souhlasné napětí na fázi B a C, opačné proudy ve fázích B a C a nulový proud fází A. Před zkratem je soustava naprázdno. Ve schématu jsou první dva obvody paralelně a poslední netočivý je naprázdno. [3]



Obr. č. 16 a obr. č. 17 – Schématické zobrazení a schéma dvoufázového zkratu [3]

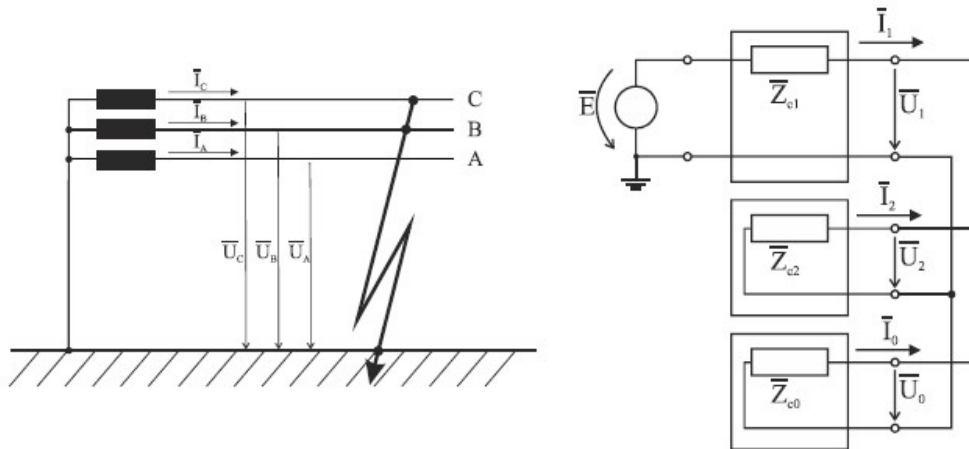
Výsledné vztahy pak: [3]

$$\hat{I}_0 = 0 \quad \hat{I}_1 = j * \frac{\sqrt{3}}{3} \hat{I}_B \quad \hat{I}_2 = -j * \frac{\sqrt{3}}{3} \hat{I}_B$$

$$\hat{U}_1 = \hat{U}_2 \quad \hat{I}_1 = -\hat{I}_2 \quad \hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{(\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2)}$$

8.3.5 Dvoufázový zemní zkrat

Vycházíme z předpokladu, že napětí na fázi B a C je nulové a že fázi A neprochází žádný proud. Před zkratem byla soustava naprázdno. Ve schématu jsou všechny tři obvody paralelně. [3]



Obr. č. 18 a obr. č. 19 – Schématické zobrazení a schéma dvoufázového zemního zkratu [3]

Výsledné vztahy: [3]

$$\begin{aligned} \hat{I}_1 &= -(\hat{I}_0 + \hat{I}_2) & \hat{U}_1 &= \hat{U}_2 = \hat{U}_0 = \frac{1}{3}\hat{U}_A & \hat{U}_1 &= \hat{I}_1 * \frac{\hat{Z}_2 * \hat{Z}_0}{(\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)} \\ \hat{I}_1 &= \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \frac{\hat{Z}_2 * \hat{Z}_0}{(\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0)}} & \hat{U}_B &= \hat{U}_C = 0 & \hat{U}_A &= 3 * \hat{E} * \frac{\hat{Z}_2 * \hat{Z}_0}{(\hat{Z}_2 * \hat{Z}_0 + \hat{Z}_2 * \hat{Z}_1 + \hat{Z}_1 * \hat{Z}_0)} \end{aligned}$$

8.4 Simulace vedení

8.4.1 Použitý program

Pro simulaci vedení byl zvolen program EMTP-RV licencován u EGU-HV Laboratory Běchovice. EMTP je zkratkou pro Electromagnetic Transients Program – Program pro elektromagnetické přechodné jevy. EMTP má několik různých iterací distribuovaných několika firmami. EMTP pochází z habilitační práce Dr. Hermanna Dommel z poloviny šedesátých let. EMTP-RV je z alternativní větve vývoje, který stojí na nových numerických metodách a je schopný dodat vyšší výpočetní možnosti. EMTP-RV v současnosti vyvíjí firma PGSTech, která sídlí v Kanadě, Montrealu.

Vnitřní systém je založený na Jakobiho nelineárním řešiči obvodových rovnic. Systém eliminuje všechny topologické restriktce. Program má obsáhlou knihovnu elektrických a elektronických silových prvků. V případě, že knihovna neobsahuje složitější prvek, vždy existuje možnost složit ho z jednodušších ideálních prvků. Celý systém EMTP-RV stojí na objektovém kódu v jazyce C++. Program má integrovanou funkci propojení s programem MATLAB Simulink. S EMTP-RV je zároveň distribuován vizualizační program průběhů ScopeView.

8.4.2 Parametry simulace

Parametry elektrických stanic:

Sdružené jmenovité napětí	$U = 400 \text{ kV}$
Zkratový vypínací/dynamický proud	$I_k = 30 \text{ kA}$
Zkratový výkon	$S_k = 34\,641 \text{ MVA}$

$$S_k = \sqrt{3} * U_r * I_k'' = \sqrt{3} * 400 * 10^3 * 30 * 10^3 = 20784 \text{ MVA}$$

Výpočet zkratových impedancí dle normy IEN 60909-0

Impedanci sítě (síťových napáječů) určíme ze známých parametrů dané sítě podle vztahu:

$$Z = \frac{c * U_r}{\sqrt{3} * I_k''}$$

Ur...jmenovité napětí soustavy

c...napěťový součinitel

I ...počáteční souměrný zkratový proud

V případě, že neznáme poměr RQ/XQ, ani nejsou k dispozici žádné přesné hodnoty pro určení RQ, udává norma: RQ = 0,1 XQ a XQ = 0,995 ZQ. Můžeme tedy zanedbat R.

$$2 * \pi * f * L = \frac{c * U_r}{\sqrt{3} * I_k''}$$

$$L = \frac{c * U_r}{2 * \pi * f * \sqrt{3} * I_k''} = \frac{1,1 * 400 * 10^3}{2 * 3,14 * 50 * \sqrt{3} * 20 * 10^3} = 0,026 \text{ H} = 26 \text{ mH}$$

Parametry vedení:

DC odpor fázových vodičů	$R = 0,06658 \text{ } \Omega/\text{km}$
DC odpor zemního lana č. 1	$R = 0,15759 \text{ } \Omega/\text{km}$
DC odpor zemního lana č. 2	$R = 0,19 \text{ } \Omega/\text{km}$
Průměr fázových vodičů	$d = 2,88 \text{ cm}$
Průměr zemního lana č. 1	$d = 1,953 \text{ cm}$
Průměr zemního lana č. 2	$d = 1,75 \text{ cm}$

Geometrie podpěrných bodů dle obr. č. 16

Nejnižší výška řetězovky (nejhorší případ) $h = 10 \text{ m}$

Conductor Data						
Number of conductors (wires) <input type="text" value="5"/>						
Wire	Phase Number	DC resistance [Ohm/km]	Outside diameter [cm]	Horizontal distance [m]	Vertical Height at tower [m]	Vertical Height at Midspan [m]
1	1	0.06658	2.88	0	30.28	10
2	2	0.06658	2.88	11	30.28	10
3	3	0.06658	2.88	22	30.28	10
4	4	0.15759	1.953	5.5	42.36	22
5	5	0.19	1.75	16.5	42.36	22

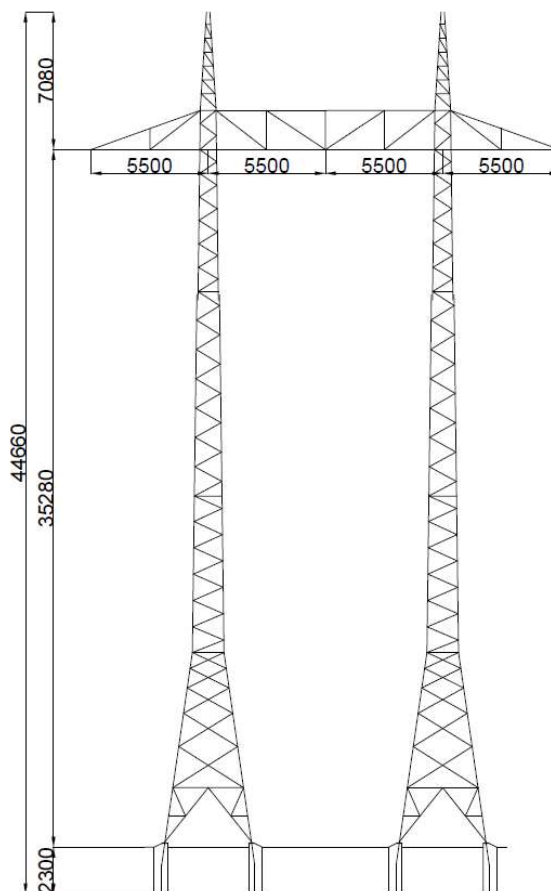
Obr. č. 20 – Nastavení modelu vedení v programu EMTP-RV

8.4.3 Zjednodušující předpoklady

Měrný odpor půdy po celé délce trasy: $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$

Vzdálenost mezi sloupy po celé délce trasy: $l = 200 \text{ m}$

Geometrie podpěrných sloupů: (zanedbání kotevnic a speciálních typů podpěrných bodů)



Obr. č. 21 – Orientační nákres sloupu typu portál

8.4.4 Povolené dotykové a krokové napětí

Povolený proud protékající lidským tělem hmotnosti 50 a 70 kilogramů dle [14] je:

$$I_{b50k} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \qquad I_{b70kg} = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}}$$

Kde t_s je čas v sekundách, po který se lidské tělo dotýká zkratu. Přes zjednodušující obvody zjistíme impedance, kterými nahradíme lidské tělo. Impedance pro napětí dotykové a krokové: [14]

$$Z_{ThT} = \frac{R_f}{2} \qquad Z_{ThS} = 2 * R_f$$

Kde R_f je odpor chodidel člověka. Tento odpor lze definovat přes měrný odpor půdy jako $R_f = 3 * \rho$.

$$Z_{ThT} = 1,5 * \rho \qquad Z_{ThS} = 6 * \rho$$

Dle IEEE Standardu 80-2000 pro dotykové a krokové napětí na tělo o odporu 1000 Ω platí:

$$U_{dotykové} = I_b \left(1000 + \frac{R_f}{2}\right) \qquad U_{krokové} = I_b (1000 + 2 * R_f)$$

$$U_{dotykové} = I_b (1000 + 1,5 * \rho) \qquad U_{krokové} = I_b (1000 + 6 * \rho)$$

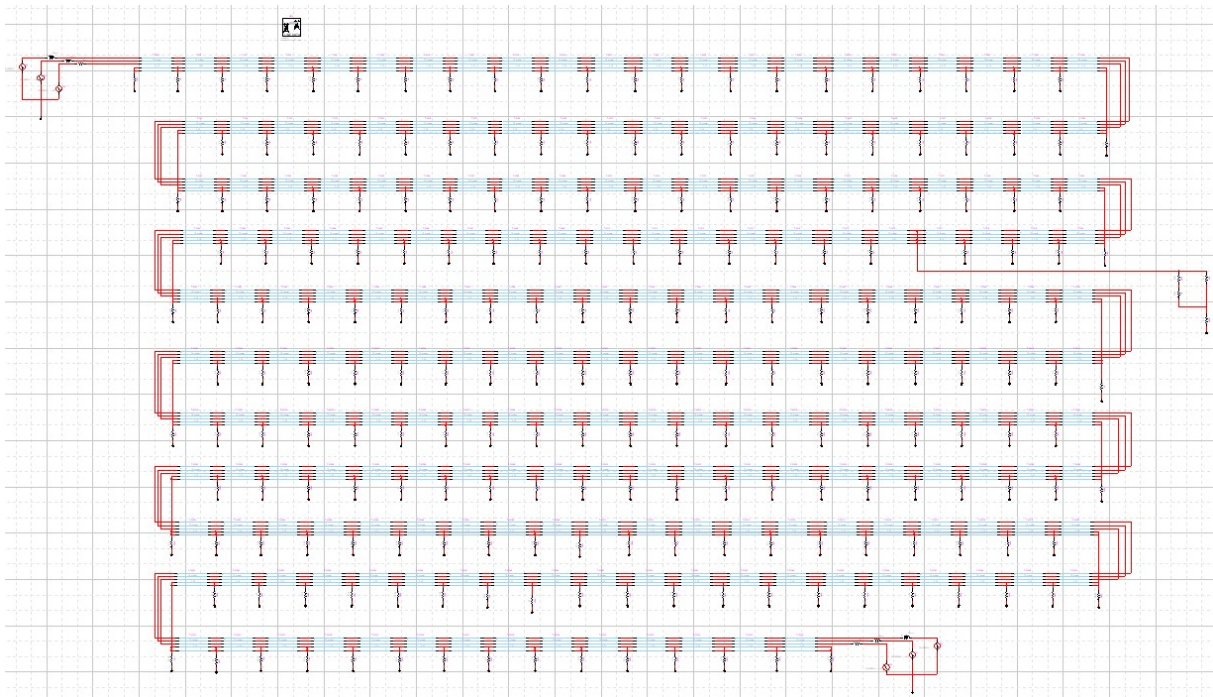
Pro dotyk po dobu 0,5 sekundy člověka vážícího 70 kilogramů a rezistivitě půdy 100 $\Omega * m$ pak platí:

$$U_{dotykové} = \frac{0,156}{\sqrt{0,5}} (1000 + 1,5 * 100) = 253 V$$

$$U_{krokové} = \frac{0,156}{\sqrt{0,5}} (1000 + 6 * 100) = 352 V$$

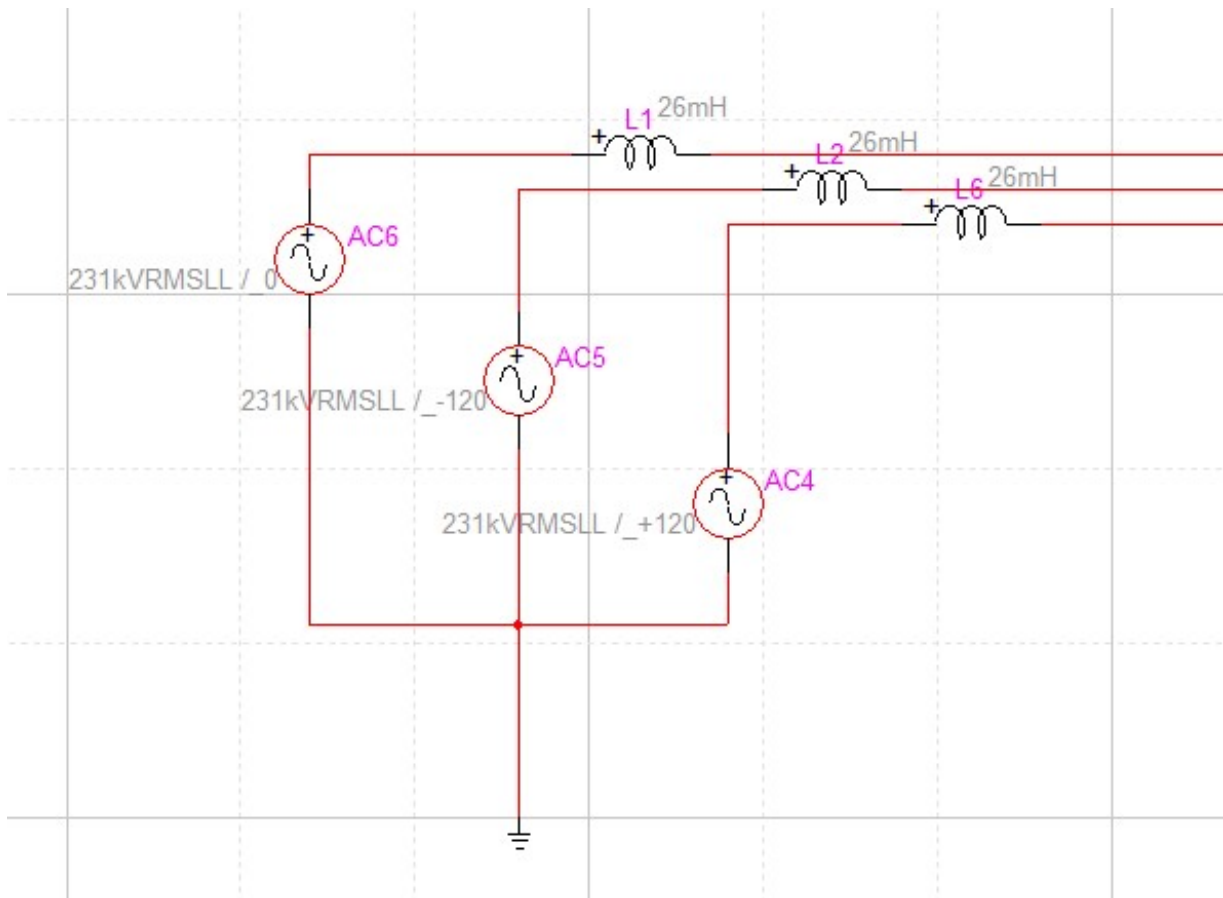
8.4.4 Topologie modelu

Linka je složena z 213 částí vedení. Každá část je 200 metrů dlouhá a každý podpěrný bod je uzemněn dle změřených dat. Linie spojující části vedení se chovají jako ideální bez odporové vodiče.



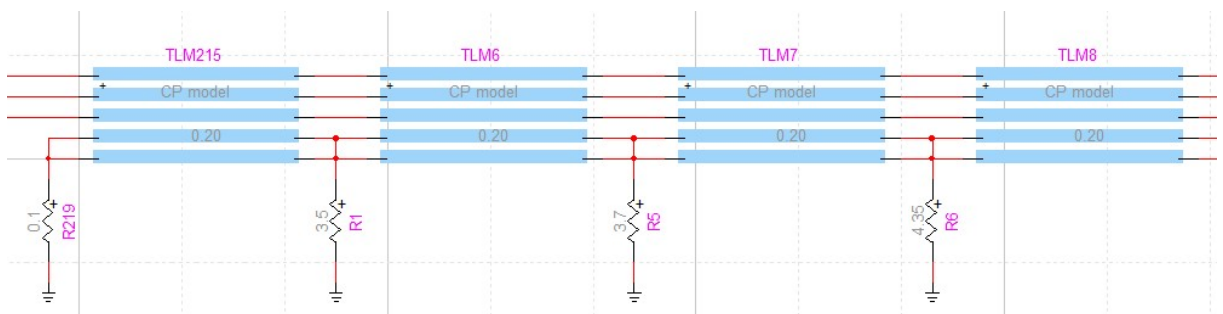
Obr. č. 22 – Topologie celkového modelu

Zdroje napětí představují rozvodné stanice 400 kV na obou stranách vedení. Vedení je tudíž oboustranně napájeno. Výpočet indukčnosti představující zkratový výkon je v předchozí části textu. Jednotlivé zdroje jsou jednofázové a jsou vůči sobě fázově posunuty o 120° elektrických.

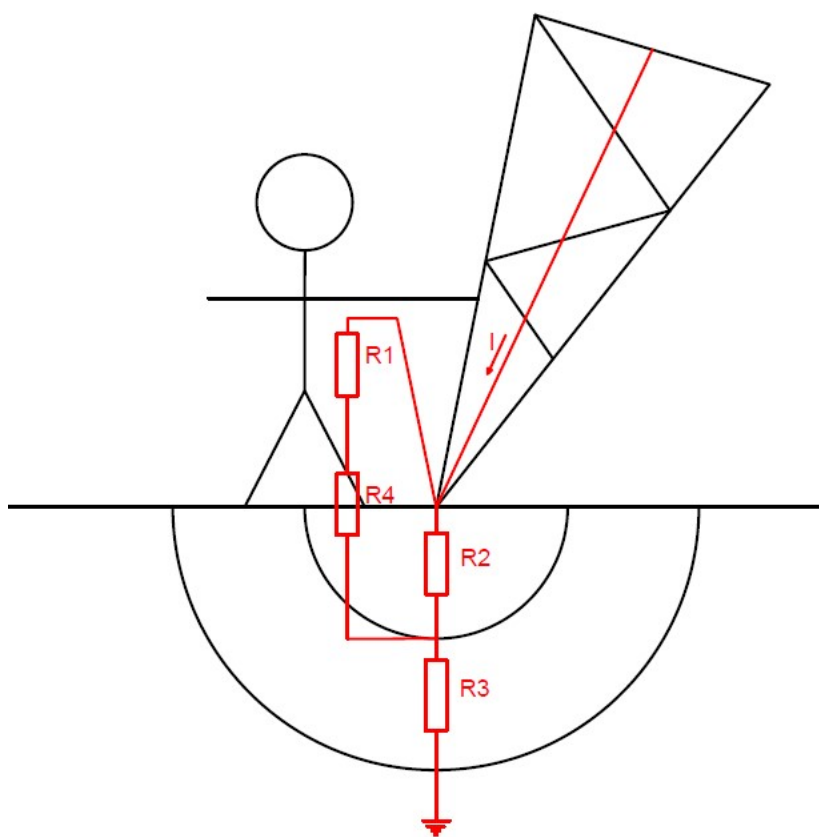


Obr. č. 23 – Trojfázový zdroj napětí

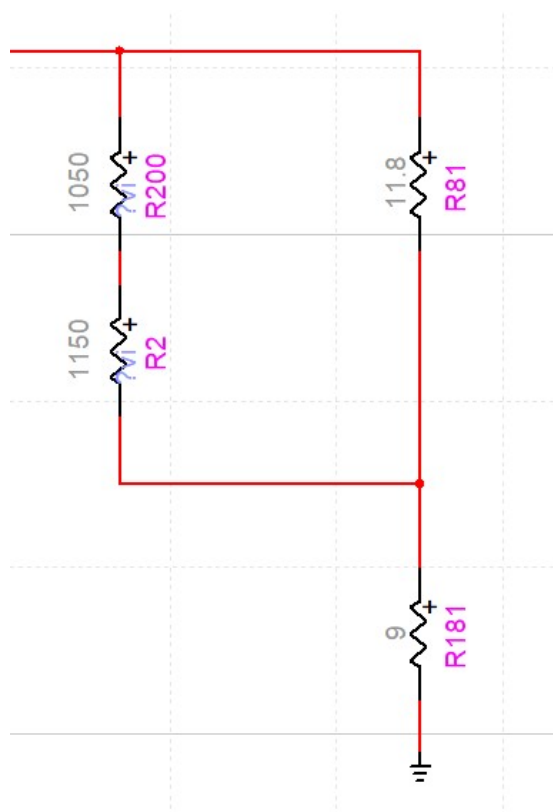
Na uzemnění jsou připojeny jen dva spodní vodiče, představující zemnicí lana. Zemní ochranné vodiče zároveň nejsou připojeny na zdroje napětí a jsou na obou stranách zakončeny uzemněním v rozvodně o velikosti 0,1 Ohmů.



Obr. č. 24 – Model vedení a uzemnění



Obr. č. 25 – Náhradní schéma rozdělení odporu při dotyku osoby



Obr. č. 26 – Model měření dotykového napětí a proudu

8.5 Simulace zkratu

Simulace začíná z harmonického ustáleného stavu. Na podpěrném bodě je simulován jednofázový zkrat. Simulováno je 20 milisekund průběhu. Z hlediska časové náročnosti výpočtu simulace, byly simulovány pouze zkraty na sloupech se zemním odporem vyšším než 15 Ohmů. Tyto sloupy jsou podle normy rizikové.

8.5.1 Příklad výpočtu proudového pole a rozdělení odporů pro dotykové napětí:

Normou daná hodnota odporu lidského těla pro dotykové napětí:

$$R_1 = 1050 \Omega$$

Normou ČSN EN 50 341-1 daná hodnota přídatného odporu podrážek a přechodu člověk-země:

$$R_4 = 1150 \Omega$$

Naměřený zemní odpor sloupu $R = 15 \Omega$

$$R_2 + R_3 = 15 \Omega$$

Zjednodušení: měrný zemní odpor $\rho = 100 \Omega \cdot m$

Zjednodušení: zemnič se nahradí polokulovou elektrodou

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * r}$$

Z toho pro plyne

$$r = \frac{\rho}{2 * \pi * R} = \frac{100}{2 * \pi * 15} = 1,06 \text{ m}$$

Pro R_3 platí $r_3 = r + 1 = 2,06 \text{ m}$ (pro dotykové napětí se přičte 1 metr)

$$R_3 = \frac{\rho}{2 * \pi * r_3} = \frac{100}{2 * \pi * 2,06} = 7,72 \Omega$$

Pro R_2 potom platí $R_2 = R - R_3 = 7,27 \Omega$

An. Č. PB	R [Ω]	r [m]	R3 [Ω]	R2 [Ω]
5	35,0	0,45	10,9	24,1
56	19,2	0,83	8,7	10,5
163	20,8	0,77	9,0	11,8
186	16,0	0,99	8,0	8,0
187	15,2	1,05	7,8	7,4
192	18,0	0,88	8,4	9,6
195	15,0	1,06	7,7	7,3
204	16,5	0,96	8,1	8,4

Tabulka č.8 – Výsledné odpory pro náhradní schéma

8.5.2 Výsledky simulace

číslo PB	R [Ω]	I _{dotyk} [A]	U _{dotyk} [V]
5	35,0	0,94	991
56	19,2	0,64	687
163	20,8	0,72	760
186	16,0	0,99	1040
187	15,2	1,03	1087
192	18,0	1,27	1335
195	15,0	1,18	1240
204	16,5	0,85	895

Tabulka č.9 – Výsledná dotyková napětí a proudy

8.5.3 Závěr simulace

Dotyková napětí a proudy na sloupech blízko rozvodny jsou obecně nižší. Důvodem je velmi kvalitní a rozsáhlé uzemnění rozvodny. V modelu byla pro uzemnění rozvodny použita hodnota 0,1 Ω . Zkratový proud vede cestou nejmenšího odporu. Přes propojená zemnicí lana tedy projde do uzemnění v rozvodně.

Na sloupech středně vzdálených od rozvodny bylo vypočteno vyšší dotykové napětí. Dále od rozvodny nepůsobí její dobrá uzemňovací charakteristika a většina proudu odchází přes vlastní uzemnění sloupů. Sloupy ve středu vedení nebo ještě dále od rozvodny měly dotykové napětí nižší. Důvodem je podélná impedance vedení, která omezí zkratový proud tekoucí z rozvodny po delším úseku vedení. Vysoká dotyková napětí a proudy na konci vedení lze přisoudit obecně horším půdním podmínkám. S nimi koreluje vyšší rezistivita a obecně vyšší zemní odpor uzemnění sloupů vedení.

Dle PNE 33 3301 je pro poruchový proud trvající 50 ms dovolené dotykové napětí až 1300 V. Dle ČSN EN 50 341-1 je pro poruchu trvající 50 ms maximální dovolený proud tělem 900 mA.

Sloupy, které splňují normou dané maximální hodnoty, jsou: č. 56, č. 163 a č. 204. Ostatní sloupy překračují maximální hodnotu proudu, který může procházet tělem. Nepříznivým výsledkům na sloupech na konci vedení nahrává obecně vyšší hodnota zemního odporu sloupů v oblasti. Nejvyšší četnost sloupů se zemním odporem nad 15 Ohmů je právě zde.

Výsledná simulace je od reálného výpočtu odlišná. Musela být použita četná zjednodušení. Chybějící údaje jsou know how správce vedení. Model je tedy ilustračním příkladem, ze kterého lze vyvodit obecné výsledky. Mohou orientačně stanovit, které pozice sloupů vůči rozvodnám budou obecně náchylnější na vysoká dotyková napětí.

9. Závěr

Tématem mojí diplomové práce byla diagnostika uzemnění vedení velmi vysokého napětí. Poruchy – zkratky a údery bleskem jsou hlavním nebezpečím pro stožáry vedení VVN a jejich okolí. Zkratové proudy mají velmi vysoké hodnoty. Tyto proudy jsou do země svedeny přes uzemňovací soustavu. Správně naměřená hodnota odporu uzemnění a zemního měrného odporu vede k přesnější simulaci poruchových stavů. Simulací těchto stavů lze předejít úrazu či újmě na majetku.

Před samotnou diplomovou prací jsem v rámci brigády měřil zemnicí a měrný odpor na sloupech vedení 400 kV. Naměřená data mi byla poskytnuta firmou EGU-HV Laboratory. Použití dat bylo schváleno zastupitelem společnosti ČEPS a.s. s podmínkou anonymizace vedení a podpěrných bodů.

Cíle práce byly dva. Prvním cílem bylo statistické zpracování naměřených dat. Druhým cílem bylo nasimulovat poruchu na vedení. Oba cíle se mi podařilo splnit.

První kapitola práce se zabývala teorií uzemnění. Analytický výpočet proudového pole polokulové elektrody je základem teorie. Z výpočtu polokulové elektrody vychází ostatní výpočty pro složitější tvary elektrod. Při simulaci zemniče jsem tento analytický postup sám použil. Zároveň byly popsány metody měření zemního odporu zemniče a měrného odporu půdy. Pro měření dat byla použita metoda potenciálového spádu a Wennerova metoda.

Druhá část práce se věnovala podnikovým normám energetiky. Podnikové normy energetiky, dále jen PNE, stanovují bezpečná dotyková napětí při úderu bleskem nebo poruše na vedení. Odpor uzemnění musí být dostatečně nízký. V případě vysokého zemního odporu zemniče poruchový proud proteče paralelním obvodem. V nejhorší situaci to může být nahodilá osoba či zvíře. Z tohoto důvodu normativní literatura definuje maximální odpory zemnicí soustavy. Pro horší půdní typy jsou maximální dovolené hodnoty benevolentnější. Obecně by zemní odpor sloupů neměl překročit hodnotu 15 ohmů, v nejhorším případě 50 ohmů. Vyšší zemní odpor zemniče než 15 Ω má na měřeném vedení hned 8 sloupů. Z tohoto důvodu byla simulace zkratu provedena právě na nich.

Třetí část práce se zabývala statistickými metodami a jejich použitím. Hlavní použitou metodou byla korelace. Korelace stanoví, zda je mezi dvěma soubory dat lineární závislost. Korelace byla stanovena mezi zemním odporem zemniče a měrným odporem půdy. Pro určení rezistivity bylo použito několika metod výpočtů/měření. Jedním z cílů diplomové práce bylo najít nejlepší metodu výpočtu/měření měrného odporu půdy. Nejvyšší korelační koeficient vyšel u metody s pětimetrovou roztečí pomocných elektrod. Rozdíl korelačního koeficientu byl však jen o dvě setiny, jenž bohužel nelze považovat za statisticky významný.

V další části jsem zpracoval a popsal program na zpracování dat. Změřených dat bylo velké množství. Ruční přepisování dat do přehledné databáze je časově zbytečně náročné. Program jsem

sepsal v prostředí Visual Basic for Applications. Program umí přečíst zápis z měření a dynamicky upravit uživatelské prostředí podle změřeného počtu sloupů. Program je vhodný pro výstup z měřicího přístroje Chauvin Arnoux C.A. 6472.

V poslední části jsem se věnoval simulaci vedení. Vedení bylo namodelováno v programu EMTP-RV, který je programem pro průmyslové využití v elektroenergetice. Jeho hlavním použitím jsou elektromagnetické přechodové jevy v elektrické soustavě.

Posledním z cílů diplomové práce bylo nasimulovat zkrat na sloupu vysokého napětí. Na model uzemnění vedení jsem použil naměřená data. Elektrické vedení bylo oboustranně napájeno. Poskytnutý zkratový výkon byl nejvyšší možný, na který jsou rozvodny projektovány. Jednofázový zkrat byl simulován na osmi sloupech vedení. Všechny sloupy měly zemní odpor vyšší než 15 Ohmů, tedy vyšší, než norma udává jako maximální. Paralelně k zemniči byl připojen odpor simulující člověka. Na výsledném modelu bylo simulováno dotykové napětí. Maximální dovolené dotykové napětí a proud převyšovalo pět sloupů z osmi. Strojené zemniče a potenciálové prahy jsou jedním z řešení této situace. Model je zjednodušením a nepostihuje celou skutečnost. Pro usnadnění byly určité geografické a topologické aspekty vedení zanedbány. Model je pouze ilustrační a lze z něj odvodit obecné výsledky. Pro použití vytvořeného modelu pro návrh technického řešení, by bylo nutné vstupní data i model doplnit a zpřesnit. Jako celek by se však dal použít v rozsáhlejší model části nebo celku přenosové soustavy České republiky.

Model lze použít na odhalení potenciálních míst s nedostatky v uzemnění sloupů vedení velmi vysokého napětí. Předmětem dalšího zkoumání by mohla být ekonomičnost opatření nápravy. Výsledky simulace značí, na které sloupy se má z hlediska kontroly uzemnění správce vedení zaměřit. Byly stanoveny obecné předpoklady o lepších a horších pozicích sloupů vzhledem k rozvodně.

Program na automatické zpracování dat dále slouží ve společnosti EGU-HV Laboratory. Měření uzemnění pokračuje na dalších vedeních. Program se bude podrobovat dalšímu vývoji.

Statistická analýza dat ukázala na správnost měření a výpočtu měrného odporu půdy. Vysoké korelační koeficienty jasně potvrdily lineární závislost zemního odporu a rezistivity. Byly tak potvrzeny teoretické základy uzemnění.

Bezpečnost v elektroenergetice bude vždy na prvním místě. Pokračující měření uzemnění zvýší přesnost energetických modelů a zlepší předpoklady pro bezpečnost osob a majetku. Výstavba dalších ochranných prvků bude záležet na kompromisu mezi ekonomičností a pravděpodobností výskytu osob.

10. Zdroje

- [1] <https://www.eon-distribuce.cz/clanek/prenosova-distribucni-soustava-1-cast>
- [2] Modelování PST transformátoru, bakalářská práce, Hladík Ondřej
- [3] TOMAN, Petr a kol. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] PNE 33 0000-4 Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny
- [5] PNE 33 3301 Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV
- [6] PNE 33 0000-1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě
- [7] OSOLSOBĚ, Jan a Mirko ZAPLETAL. Zemnění a bezpečnost. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1964.
- [8] KOČVARA, Antonín. Uzemňování elektrických zařízení. Praha: IN-EL, 1995. Knižnice Elektro.
- [9] BUREŠ, Zdeněk, Petr ŠITINA a Jan VÁCLAVEK. Navrhování venkovních vedení vn a nn. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Praktické elektrotechnické příručky.
- [10] www.ceps.cz
- [11] NAVARA, Mirko. Pravděpodobnost a matematická statistika [online]. Praha, 2007. Dostupné také z: http://cmp.felk.cvut.cz/~navara/stat/PMS_ebook.pdf. Skriptum. ČVUT FEL.
- [12] Pearsonův korelační koeficient, Math and Stats Support Centre, Masarykova Univerzita Dostupné také z: https://mathstat.econ.muni.cz/media/12657/pear_cor.pdf
- [13] NOVÁK, Petr. Pravděpodobnost a statistika, Přednáška 12: Lineární regrese, Katedra aplikované matematiky, FIT ČVUT
- [14] SALAM, Abdus a Quazi M. RAHMAN. Power systems grounding. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-981-10-0444-5.
- [15] Borůvková a kol. Statistika v SPSS, Vysoká škola polytechnická Jihlava
- [16] TLUSTÝ, Josef a kol. Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [17] TLUSTÝ, Josef a kol. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [18] PNE 33 3300
- [19] Chauvin Arnoux C.A. 6472 User's manual – uživatelský manuál přístroje
- [20] ONDŘÍK, Jiří. Měření uzemnění přístroje C.A 6472 a C.A 6474, ELEKTRO 4/2008, str. 50-52

11. Seznam zkratek

ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ČSN EN	Česká technická norma – evropská norma
PNE	Podniková norma energetiky
PB	Podpěrný bod
RMS	Root mean square – Efektivní hodnota
HV	High voltage
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
EMTP	Electromagnetic Transients Program

12. Seznam obrázků

Obr. č. 1	Přenosová soustava České republiky	[10]
Obr. č. 2	Polokulová elektroda	[3]
Obr. č. 3	Schématický náčrt měření na sloupu vedení vysokého napětí	[20]
Obr. č. 4	Schématický náčrt Clamp-on metody	[19]
Obr. č. 5	Schématický náčrt měření Wennerovou metodou	[19]
Obr. č. 6	Závislost mezi dotykového napětí na době trvání poruchového proudu	[5]
Obr. č. 7	Postup při navrhování uzemňovací soustavy	[5]
Obr. č. 8	Graf pro zjištění koeficientu K11	[3]
Obr. č. 9	První vyřazený sloup v lesním průseku	
Obr. č. 10	Druhý vyřazený sloup v lesním průseku	
Obr. č. 11	Uživatelské rozhraní programu	
Obr. č. 12	Schématické zobrazení trojfázového souměrného zkratu	[3]
Obr. č. 13	Schéma trojfázového souměrného zkratu	[3]
Obr. č. 14	Schématické zobrazení jednofázového zkratu	[3]
Obr. č. 15	Schéma jednofázového zkratu	[3]
Obr. č. 16	Schématické zobrazení dvoufázového zkratu	[3]
Obr. č. 17	Schéma dvoufázového zkratu	[3]
Obr. č. 18	Schématické zobrazení dvoufázového zemního zkratu	[3]
Obr. č. 19	Schéma dvoufázového zemního zkratu	[3]
Obr. č. 20	Nastavení modelu vedení v programu EMTP-RV	
Obr. č. 21	Orientační náčrt sloupu typu portál	
Obr. č. 22	Topologie celkového modelu	
Obr. č. 23	Trojfázový zdroj napětí	
Obr. č. 24	Model vedení a uzemnění	
Obr. č. 25	Náhradní schéma rozdělení odporu při dotyku osoby	
Obr. č. 26	Model měření dotykového napětí a proudu	

13. Seznam tabulek

Tabulka č.1	Zemní odpor jednoduchých zemničů	[3]
Tabulka č.2	Ilustrační hodnoty rezistivity různých druhů půdy	[6]
Tabulka č.3	Hodnoty konfigurační konstanty	[8]
Tabulka č.4	Hodnoty koeficientu η	[4]
Tabulka č.5	Vypočtené statistické hodnoty ze změřených údajů (bez vyřazených hodnot)	
Tabulka č.6	Vypočtené statistické hodnoty z vypočtených údajů (bez vyřazených hodnot)	
Tabulka č.7	Vypočtené hodnoty korelací a jejich testů	
Tabulka č.8	Výsledné odpory pro náhradní schéma	
Tabulka č.9	Výsledná dotyková napětí a proudy	

14. Seznam grafů

Graf č.1	Velikost rezistivity země podél vedení (všechny PB)
Graf č.2	Velikost odporu uzemnění podél vedení (všechny PB)
Graf č.3	Velikost odporu uzemnění podél vedení (bez vyřazených PB)
Graf č.4	Velikost rezistivity půdy podél vedení (bez vyřazených PB)
Graf č.5	Velikost impedance podél vedení (bez vyřazených PB)
Graf č.6	Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (průměr vodivosti)
Graf č.7	Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (průměr rezistivit)
Graf č.8	Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (rozteč elektrod 1 m)
Graf č.9	Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (rozteč elektrod 3 m)
Graf č.10	Závislost odporu uzemnění a rezistivity půdy (rozteč elektrod 5 m)
Graf č.11	Závislost impedance a odporu uzemnění
Graf č.12	Závislost impedance a rezistivity půdy

15. Seznam symbolů

σ	elektrická vodivost	[S]
I	elektrický proud	[A]
E	elektrický potenciál	[V]
ρ	elektrická rezistivita	[$\Omega \cdot m$]
U	elektrické napětí	[V]
r	poloměr	[m]
R	elektrický odpor	[Ω]
U_d	dotykové napětí	[V]
U_k	krokové napětí	[V]
S _{ks}	Trojfázový zkratový výkon soustavy	[VA]
L	Indukčnost	[H]
f	Frekvence	[Hz]
X	Reaktance	[Ω]
S	Zdánlivý výkon	[VA]
Z	Impedance	[Ω]

16. Přílohy

16.1 Příloha č.1 – Datasheet k přístroji Chauvin Arnoux C.A. 6472

C.A 6472



C.A 6472

Charakteristika

- Multifunkční tester uzemnění a rezistivity
- Umožňuje rychle a přesně změřit zemní odpor a propojení, zemní potenciál a specifický odpor půdy
- Doplnující přístroj C.A 6474 pro měření na sloupech VN a VVN
- Měření uzemnění všemi metodami
- Selektivní měření uzemnění pomocí 1 nebo 2 kleští
- Měření rezistivity Wennerovou nebo Schlumbergerovou metodou
- Proudové převodníky C182 (Ø 52 mm) pro proudy do 40 A
- Proudové převodníky MN82 (Ø 23mm) pro proudy do 10 A
- Proudové rozlišení až 0,01 mA (proudové převodníky C182, MN82)
- Funkce SCAN pro měření s kmitočty do 5 kHz
- Frekvenční analýza SWEEP (od 61 Hz do 5078 Hz)
- Automatický a expertní režim
- Indikace správného zapojení přístroje
- Paměť na 512 záznamů
- Software DataExport
- IP53, CAT IV

Technická data

Zobrazení	Podsvícený LCD, 107 x 84 mm se 3 nezávislými zobrazeními 1999 dig., + symboly
Měření odporu uzemnění	4-vodičové měření, střídavě
Rozsah	0,001 ... 9,990 Ω 10,00 ... 99,90 Ω 100,0 ... 999,0 Ω 1,000 ... 9,999 kΩ 10,00 ... 99,99 kΩ
Přesnost	±(3 % z č.h. + 2 dig.)
Měřicí kmitočet	nastavitelný v rozmezí 41 ... 5078 Hz (dle tabulky)
Napětí naprázdno	16 V nebo 32 V
Proud nakrátko	> 200 mA AC
Měření napětí	
Rozsah	0,01 ... 65 V
Přesnost	±(5 % z č.h. + 1 dig.)
Frekvence	DC/15 ... 440 Hz
Měření proudu	proudové převodníky
C182	
Rozsah	0,01 mA ... 40 A
Frekvence	16 ... 400 Hz
Přesnost	±(3 % z č.h. + 2 dig.) pro 100 ... 400 Hz
MN85	
Rozsah	0,01 mA ... 10 A
Frekvence	100 ... 400 Hz
Přesnost	±(5 % z č.h. + 2 dig.) pro 100 ... 400 Hz
Napájení	15 ... 20 V DC, 1,5 A
Provozní teplota	0 °C ... 35 °C
Skladovací teplota	-40 °C ... +70 °C
Stupeň krytí	IP 53 dle EN 60 529
Rozměry	272 x 250 x 128 mm
Hmotnost	cca. 3,2 kg

Údaje pro objednávku:

C.A 6472	P01.1265.04
Sada pro měření rezistivity a uzemnění 100m	
P01.1020.24	
Sada pro měření rezistivity a uzemnění 150m	
P01.1020.25	
Sada pro měření Malých odporů C.A 647X (m2)	
P01.1020.37	
Proudové kleště MN82 (Ø 20 mm, pro C.A 6472)	P01.1204.52
Auto-adapter 12 V DC	P01.1020.36
DataView Software	P01.1020.06
Kabel pro počítač	P01.2952.52

Součást dodávky:

Měřic uzemnění C.A 6472	1 ks
Proudové kleškové převodníky C182	2 ks
Síťový adapter	1 ks
Napájecí kabel	1 ks
DataExport Software	1 ks
Optický USB kabel	1 ks
Návod k použití (CD)	1 ks

16.2 Příloha č.2 – Datasheet k přístroji Chauvin Arnoux C.A. 6474

C.A 6474 PYLON BOX



C.A 6474 PYLON BOX



Příslušenství

Součást dodávky:

Měřic uzemnění C.A 6474	1 ks
Brašna na příslušenství	1 ks
Kabel pro propojení s C.A 6472	1 ks
Kabel BNC/BNC, 15 m	6 ks
Proudový převodník AmpFlex, 5 m	4 ks
Barevné identifikační kroužky	12 ks
Dva kabely délky 5 m	2 ks
Adaptér vidlice/4 mm banánek	5 ks
Přichytávací svorky	3 ks
Kalibrační smyčka	1 ks
Návod k použití	1 ks

Charakteristika

- Doplnující přístroj **C.A 6474 PYLON BOX** je určen pro měření na sloupech VN a VVN se zemním kabelem
- Ve spojení se základním přístrojem C.A 6472 umožňuje měřit zemní odpor sloupů VN, přesto že jsou součástí paralelní země
- Pružné proudové převodníky AmpFlex délky 5 m pro měření stožárů
- Převodníky lze použít na různé geometrie sloupů
- Proudové rozlišení až 0,1 mA
- Možnost volby počtu použitých převodníků
- Možnost volby počtu otáček převodníku kolem stožáru
- Nastavení citlivosti podle aktuální rezistivity
- Možnost napájení pomocí napájecího adaptéru ze zapalovače v autě
- IP53, CAT IV

Technická data

Měření odporu uzemnění

Rozsah	0,001 ... 9,990 Ω 10,00 ... 99,90 Ω 100,0 ... 999,0 Ω 1,000 ... 9,999 k Ω 10,00 ... 99,99 k Ω
Přesnost	$\pm(5\% \text{ z č.h.} + 1 \text{ dig.})$
Testovací frekvence	nastavitelná v rozmezí 41 ... 5078 Hz (dle tabulky)
Napětí naprázdno	16 V nebo 32 V
Proud nakrátko	> 200 mA AC

Měření proudu

AmpFLEX	proudové převodníky
Rozsah	0,1 mA ... 99,9 A

Napájení	15 ... 20 V DC, 1,5 A
-----------------	-----------------------

Provozní teplota	0 °C ... 50 °C
-------------------------	----------------

Skladovací teplota	-40 °C ... +70 °C (bez baterie)
---------------------------	---------------------------------

Stupeň krytí	IP 53 dle EN 60 529
---------------------	---------------------

Rozměry	273 x 247 x 128 mm
----------------	--------------------

Hmotnost	cca. 2,3 kg
-----------------	-------------