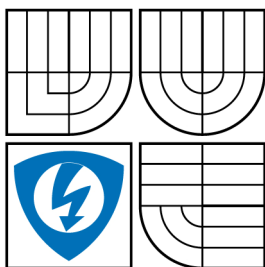


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝPOČET UZEMŇOVACÍ SOUSTAVY V ROZVODNÁCH VVN

DIMENSIONING OF EARTHING SYSTEM IN HV SWITCHGEAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

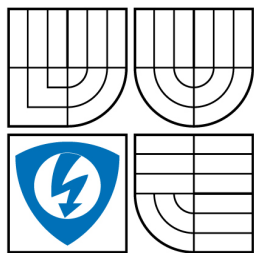
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ROMAN BURŠÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Roman Buršík

ID: 83884

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet uzemňovací soustavy v rozvodnách VVN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie a obecné principy návrhu uzemňovacích soustav v rozvodných zařízeních, porovnání návrhu uzemnění dle ČSN a PNE.
2. Výpočet proudové zatížitelnosti uzemňovacích svodů a zemničů, zemní odpor zemnicí sítě, dotyková a kroková napětí.
3. Praktický výpočet uzemňovací soustavy pomocí vytvořeného programu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Roman Buršík

Bytem: Národních hrdinů 47, Břeclav, 690 02

Narozen (datum a místo): 29.09.1984 ve Valticích

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☒ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Výpočet uzemňovací soustavy v rozvodnách VVN
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
Ústav: Ústav elektroenergetiky
Datum obhajoby VŠKP: 15.06.2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v *:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☒ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

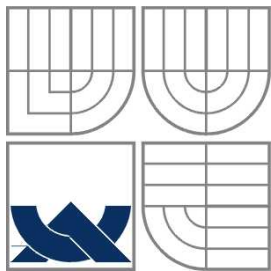
.....
Autor

Bibliografická citace práce:

BURŠÍK, R. Výpočet uzemňovací soustavy v rozvodnách VVN. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, 58 stran.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

Výpočet uzemňovací soustavy v rozvodnách VVN

Bc. Roman Buršík

vedoucí: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Dimensioning of Earthing System in HV Switchgear

by

Bc. Roman Buršík

Supervisor: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Brno University of Technology, 2009

Brno

ABSTRAKT

Ve své diplomové práci se zabývám problematikou uzemňování elektrických stanic VVN. Cílem této práce je vytvoření výpočetního programu sloužícího k dimenzování uzemňovacích sítí. Uzemňovací sítě jsou z hlediska účinného uzemnění a rozvedení potenciálu nejvýhodnější metodou. Jejich princip spočívá v tom, že se položí síť plochých vodičů a na tuto síť se připojí části zařízení. V úvodu práce je vysvětlena teorie uzemňování a jsou zde popsány požadavky, které musí správně navržená uzemňovací soustava splňovat (dimenzování uzemnění). V další části je popsán algoritmus výpočetního programu, který otestuje vhodnost zadané uzemňovací sítě pro konkrétní rozvodnu. Tato kapitola obsahuje také popis uživatelského rozhraní programu a vysvětlení všech funkcí, které program obsahuje. V poslední části je prezentováno použití programu na konkrétním číselném zadání.

KLÍČOVÁ SLOVA: uzemňování; uzemňovací síť; rozvodna; dimenzování uzemňovací soustavy

ABSTRACT

My master's thesis is focused on grounding of HV switchgear. The aim of this work is to create a computer program intended for dimensioning of earthing networks. The earthing networks are the most convenient alternative in term of effective grounding and distribution of ponential. They are based on latiny a flat conductor network cables and connection of appliance parts to network. Introduction of the thesis is dedicated to explanation of grounding theory and to description of requirements essential for properly designed earthing system (dimensioning of earthing system). Following chapter brings description of computer program algorithm testing propriety of an assigned earthing network for a particular switchgear. The chapter also contains description of an user interface and explanation of all features, included in the program. Last part provides presentation of program utilization to particular numerical assignment.

KEY WORDS: grounding; earthing network; switchgear; dimensioning of earthing system

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	12
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD	16
2 DŮLEŽITÉ TERMÍNY A DEFINICE.....	17
3 TEORIE UZEMŇOVÁNÍ	18
3.1 DIMENZOVÁNÍ UZEMNĚNÍ	18
3.1.1 DIMENZOVÁNÍ S OHLEDEM NA KOROZIVNÍ ODOLNOST A MECHANICKOU PEVNOST	18
3.1.2 DIMENZOVÁNÍ S OHLEDEM NA TEPELNOU ODOLNOST	19
3.1.3 DIMENZOVÁNÍ S OHLEDEM NA DOTYKOVÁ A KROKOVÁ NAPĚTÍ	23
3.1.4 MĚŘENÍ DOTYKOVÝCH NAPĚTÍ.....	27
3.2 POROVNÁNÍ NÁVRHU UZEMNĚNÍ DLE ČSN A PNE	33
4 PROGRAM PRO DIMENZOVÁNÍ UZEMŇOVACÍCH SÍTÍ.....	37
4.1 ALGORITMUS PROGRAMU PRO VÝPOČET UZEMNĚNÍ V ROZVODNÁCH VVN.....	37
4.1.1 POPIS UZNÁVANÝCH ZVLÁŠTNÍCH OPATŘENÍ M	40
4.1.2 STANOVENÍ DOVOLENÉHO DOTYKOVÉHO NAPĚTÍ PŘI POUŽITÍ PŘÍDAVNÉ REZISTANCE	42
4.2 POPIS FUNKCÍ VYTVOŘENÉHO PROGRAMU	43
4.2.1 FORMULÁŘ 1 – START	43
4.2.2 FORMULÁŘ 2 – VSTUPNÍ ÚDAJE.....	43
4.2.3 FORMULÁŘ 3 – ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY	44
4.2.4 FORMULÁŘ 4 – VÝSLEDKY DIMENZOVÁNÍ	45
4.2.5 FORMULÁŘ 5 – EDITACE PARAMETRŮ ZADÁNÍ.....	46
4.2.6 FORMULÁŘ 6 – DOVOLENÉ DOTYKOVÉ NAPĚTÍ.....	47
4.2.7 FORMULÁŘ 7 – PŘÍDAVNÁ REZISTANCE	48
4.2.8 FORMULÁŘ 8 – UZNÁVANÁ ZVLÁŠTNÍ OPATŘENÍ M	48
4.2.9 FORMULÁŘ 9 – UZNÁVANÁ ZVLÁŠTNÍ OPATŘENÍ M – NÁPOVĚDA.....	49
4.2.10 FORMULÁŘ 10 – KONEČNÉ VYHODNOCENÍ VÝPOČTU	50
4.2.11 TEXTOVÝ SOUBOR S VÝSLEDKY	51
4.3 POUŽITÍ PROGRAMU PRO VÝPOČET KONKRÉTNÍHO ZADÁNÍ.....	52
5 ZÁVĚR.....	55
POUŽITÁ LITERATURA	56
PŘÍLOHA A PŮDORYS ROZVODNY 110 KV	57
PŘÍLOHA B NAVRŽENÝ SITUAČNÍ PLÁN UZEMNĚNÍ	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 3-1: Dovolená dotyková napětí U_{Tp} pro omezené trvání průtoku proudu [3]</i>	24
<i>Obrázek 3-2: Návrh uzemňovací soustavy s ohledem na dovolené dotykové napětí U_{Tp} [3]</i>	25
<i>Obrázek 3-3: Měření předpokládaného dotykového napětí</i>	27
<i>Obrázek 3-4: Měření dotykového napětí</i>	28
<i>Obrázek 3-5: Rozmístění elektrod při měření rezistivity půdy Wennerovou metodou</i>	29
<i>Obrázek 3-6: Grafické zobrazení koeficientu K v závislosti na ročním období [5]</i>	30
<i>Obrázek 3-7: Křivky sestavené pro různé poměry rezistivit půdy v závislosti na rozestupu elektrod</i>	31
<i>Obrázek 4-1: Grafické zobrazení postupu výpočtu</i>	38
<i>Obrázek 4-2: Zobrazení algoritmu mezi operacemi 2-6</i>	39
<i>Obrázek 4-3: Formulář 1</i>	43
<i>Obrázek 4-4: Formulář 2</i>	44
<i>Obrázek 4-5: Formulář 3</i>	45
<i>Obrázek 4-6: Formulář 4</i>	46
<i>Obrázek 4-7: Formulář 6</i>	47
<i>Obrázek 4-8: Formulář 7</i>	48
<i>Obrázek 4-9: Formulář 8</i>	49
<i>Obrázek 4-10: Formulář 9</i>	50
<i>Obrázek 4-11: Formulář 10</i>	51
<i>Obrázek 4-12: Výsledný textový soubor</i>	52

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3-1: Hodnoty proudů I odtékajících zemničem do země v silových zařízeních s napětím nad 1000 V, na které se zemniče dimenzují [5].....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 3-2: Redukční činitel nejpoužívanějších zemních lan vedení VVN.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 3-3: Materiálové konstanty [4]</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 3-4: Dovolená dotyková napětí U_{Tp} pro omezené trvání průtoku proudu.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 3-5: Rezistivita půdy [3].....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 3-6: Tabulka konfiguračních konstant</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 3-7: Vzorce pro výpočet zemních odporů základních typů zemničů [4]:</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 4-1: Podmínky pro použití opatření M.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 4-2: Celková impedance lidského těla Z_B v závislosti na dovoleném dotykovém napětí U_{Tp} (platí pro proudovou dráhu ruka-ruka nebo ruka-noha):</i>	<i>42</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	vzdálenost mezi elektrodami	m
A	průřez	mm ²
A _{min}	minimální průřez	mm ²
B	převrácená hodnota teplotního součinitele rezistivity vodiče při 0 °C	°C
d	průměr zemniče	m
D	průměr kruhu zemniče	m
FeZn	ocelový pozinkovaný zemnič	
h	hloubka uložení zemniče	m
I	proud procházející zemničem	A
I _B	proud procházející lidským tělem	A
I _{Bp}	dovolený proud procházející lidským tělem	A
I _C	zemní kapacitní proud	A
I _E	zemní proud	A
I _{k1} ^{//}	počáteční symetrický zkratový proud jednopólového zkratu	A
I _{k2} ^{//}	proud dvojitého zemního spojení	A
I _L	součet jmenovitých proudů paralelních zhášecích tlumivek v příslušné transformovně	A
I _{Res}	zbytkový proud zemního spojení	A
k	konfigurační konstanta	
k _v	součinitel závislý na materiálu ochranného vodiče, na izolaci a na ostatních částech, na teplotě před zkratem a po zkratu	A. √s .mm ⁻²
K	konstanta závislá na materiálu vodiče	A. √s .mm ⁻²
K	koeficientu zohledňující roční období	
l	délka zemniče	m
Q _c	objemová tepelná kapacita materiálu vodiče	J/°C mm ³
r	redukční činitel	
R	elektrický odpor	Ω
R _{a1}	přídavná rezistance	Ω
R _{a2}	rezistance země vůči stanovišti	Ω
R _E	zemnicí odpor uzemňovací soustavy	Ω
S	rozloha zemnicí sítě	m ²

t_k	vypínací čas vypínacího přístroje	s
U_E	napětí na uzemňovací soustavě	V
U_{Tp}	dovolené dotykové napětí	V
U_{STp}	dovolené dotykové napětí při použití přídavné rezistance	V
VN	vysoké napětí	
VVN	velmi vysoké napětí	
w	součinitel pravděpodobnosti výskytu největšího zkratového proudu	
Z_B	celková impedance lidského těla	Ω
Z_E	impedance uzemnění	Ω
ρ	rezistivita půdy	$\Omega \cdot m$
ρ_s	rezistivita půdy v povrchové vrstvě u zařízení	Ωm
ρ_{20}	rezistivita materiálu vodiče při 20 °C	$\Omega \cdot mm$
v_i	počáteční teplota vodiče	°C
v_f	konečná teplota vodiče	°C

1 ÚVOD

Uzemňováním se rozumí vytvoření vodivého spojení mezi kovovou částí elektrického zařízení a zemí. Toto spojení se provádí ze dvou důvodů. Prvním z nich je zajištění ochrany člověka před úrazem elektrickým proudem – označováno jako *ochranné uzemnění*. V tomto případě se uzemní neživé části elektrického zařízení, čímž se má zabránit vzniku nebezpečného napětí na těchto částech. Druhým důvodem je úmyslné vytvoření vodivého spojení mezi částí elektrického zařízení a zemí, přičemž toto spojení má zabránit škodlivému vzrůstu napětí v daném místě obvodu a zajistit tak správnou funkci zařízení. Takovéto uzemnění označujeme jako *pracovní uzemnění*. Někdy mohou nastat situace, když jedno uzemnění může sloužit současně jako pracovní i ochranné.

Uzemňování je jako samostatná problematika řešena řadou technických norem. Obecně se problematikou uzemňování zabývá norma ČSN 33 2000-5-54 „Elektrická zařízení. Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení. Kapitola 54: Uzemnění a ochranné vodiče“. Dále je problematika řešena v normách ČSN 33 3201 „Elektrické instalace nad AC 1kV“, ČSN 33 2000-4-41 „Elektrická zařízení. Část 4: Bezpečnost. Kapitola 41: Ochrana před úrazem elektrickým proudem“ a PNE 33 0000-4 „Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny“.

2 DŮLEŽITÉ TERMÍNY A DEFINICE

V problematice uzemňování se vyskytuje několik specifických pojmů, jejichž definice (převzaty z [1]) byly přesně stanoveny a je nutné je pro pochopení celé problematiky znát. Jsou to:

- Uzemňovací soustava – všechny elektrické spoje a předměty, které jsou součástí uzemnění elektrické sítě, instalace a zařízení
- Uzemňovací síť – část uzemňovací soustavy, která obsahuje pouze zemniče a jejich vzájemné spojení
- Mřížová uzemňovací síť – je uzemňovací síť tvořená z pásků nebo drátů vedených ve dvou na sebe kolmých směrech a v místech křížování propojených
- Uzemnění – je provedení elektrického spojení mezi daným bodem v síti, v instalaci nebo v zařízení a lokální zemí. Spojení může být úmyslné, neúmyslné nebo náhodné
- Impedance uzemnění – impedance při daném kmitočtu mezi specifikovaným bodem v síti v instalaci nebo zařízením a referenční zemí
- Odpor uzemnění – reálná složka impedance uzemnění
- Rezistivita půdy – měrný elektrický odpor typického vzorku půdy
- Zemnič – vodivá část, která může být uložena v daném vodivém prostředí v elektrickém styku se zemí
- Strojený zemnič – zemnič záměrně zřízený pro uzemnění
- Náhodný zemnič – vodivý předmět trvale uložený v zemi, ve vodě, v betonu, který byl vybudován k jinému účelu než k uzemnění, ale je možno ho využít jako zemnič.
- Základový zemnič – zemnič uložený v betonových základech (budov, stožárů, nosných konstrukcí)
- Uzemňovací přívod – vodič, který zajistí vodivou dráhu, nebo část vodivé dráhy mezi daným bodem v síti, instalaci nebo v zařízení a zemničem
- Dotykové napětí – napětí mezi vodivými částmi, kterých se člověk nebo zvíře dotýká.
- Krokové napětí – napětí mezi dvěma body zemského povrchu vzdálenými od sebe 1 m, vzdálenost 1 m se považuje za délku kroku člověka.

3 TEORIE UZEMŇOVÁNÍ

Uzemňování elektrických zařízení se dá také dle [2] definovat jako provedení nutných spojení, aby určité místo přístroje, zařízení nebo sítě bylo udržováno pokud možno na potenciálu země.

Účelem uzemnění je [2]:

- Udržovat na potenciálu země nějakou část elektrického obvodu
- Umožňovat funkci elektrických strojů, přístrojů a zařízení nebo jí napomáhat
- Chránit elektrické stroje a zařízení před účinky přepětí a velkých proudů
- Svést atmosférické proudy a omezit přepětí
- Chránit lidi a zvířata před úrazem elektrickým proudem při dotyku neživých částí, které mohou být v případě poruchy pod napětím, odpojením nebo snížením dotykového a krokového napětí na bezpečnou míru

3.1 Dimenzování uzemnění

Při návrhu uzemnění musíme zajistit, aby byly splněny čtyři základní požadavky:

1. Zajistit mechanickou pevnost a odolnost proti korozi
2. Odolat z hlediska oteplení nejvyššímu poruchovému proudu (obvykle získanému výpočtem)
3. Zamezit poškození majetku a zařízení
4. Zajistit bezpečnost osob s ohledem na napětí na uzemnění, která se objeví při nejvyšším poruchovém proudu

Při dimenzování uzemnění vycházíme ze tří rozhodujících parametrů jimiž jsou:

1. Velikost poruchového proudu
2. Trvání poruchy
3. Vlastnosti půdy

3.1.1 Dimenzování s ohledem na korozivní odolnost a mechanickou pevnost

Při korozi dochází k rozrušení materiálu vzájemným chemickým nebo elektrochemickým působením materiálu a prostředí. Proto je nutno chránit všechny spoje zemničů a podzemní spoje uzemňovacích přívodů pasivní ochranou (litými pryskyřicemi, plastovými smršťovacími hadicemi apod.). Nejdůležitější je co nejvíce omezit prostupy zemniče nebo uzemňovacích přívodů z jednoho prostředí do druhého. Tato místa jsou velmi kritická, protože vlivem

rozdílného prostředí vzniká elektrochemický článek způsobující v těchto místech korozi. Kde není možné těmto prostupům zabránit, je nutné použít pasivní protikorozní ochranu. Norma stanovuje v těchto místech požadované délky pasivní ochrany jak pro uzemňovací přívody (20 cm nad povrchem a 30 cm pod povrchem), tak i pro přívody od základových zemničů (při přechodu beton/země 30 cm v betonu a 100 cm v zemi; při přechodu beton/povrch 10 cm v betonu a 20 cm nad povrchem). Aby se zabránilo rozdílnému prostředí v okolí strojených zemničů, mají se výkopy, do kterých se zemniče uloží, vyplnit homogenní zeminou. Zemniče, které budou v přímém kontaktu se zemí, musí být z materiálu odolného proti korozi a musí odolávat mechanickým vlivům při instalaci stejně jako těm, které se objeví při normálním provozu. Aby zemniče elektrické instalace nad AC 1 kV splňovali požadavky na mechanickou pevnost a korozní odolnost, je v příloze A v [3] tabulka určující minimální rozměry zemničů. Pokud by byl užit jiný materiál než je v tabulce uveden, pak tento materiál a jeho rozměry musí splňovat požadavky 1. a 2. z kapitoly dimenzování uzemnění. Stejná norma v článku 9.2.2.2 pro tytéž instalace také stanovuje minimální průřezy uzemňovacích přívodů.

3.1.2 Dimenzování s ohledem na tepelnou odolnost

Průchodem poruchového proudu zemničem se zemnič i půda v jeho okolí zahřívá. Odvod tohoto tepla je závislý nejen na vlastnostech okolní půdy (vlhkost, vodivost, materiál) ale také na parametrech samotného zemniče (velikosti, tvaru, proudovém zatížení).

Konečná teplota nesmí překročit hodnotu, při níž by mohlo dojít k poškození jak okolních materiálů (betonu, izolace..), tak ani ke snížení pevnosti materiálu samotného zemniče. Ohřevem zemniče však stejně dochází k vysušování půdy kolem zemniče, jejímu zahřívání a tím stoupá její odpor a napětí kolem zemniče. Nejvyšší dovolené hustoty proudu jsou v [4] dány dvěma tabulkami. Tabulka 54 NK1 v této normě udává nejvyšší dovolené hustoty proudu pro zemniče uložené v půdě a tabulka 54 NK2 hodnoty pro zemniče uložené v betonu obklopeném zeminou. Parametry pro vyhledání příslušné dovolené hustoty proudu jsou v obou případech doba průchodu poruchového proudu a rezistivita půdy, která zemnič (případně betonový zákryt zemniče) obklopuje. Pro zemnič umístěný v betonovém zákrytu současně platí limitní hodnota hustoty rázového proudu, která je stanovena 50 kA/m². Při překročení této hodnoty by totiž mohlo dojít k poškození betonu. U zemničů uložených v půdě žádné takové omezení neexistuje. Zde je naopak vysoká hustota rázového proudu žádána, protože v okamžiku průchodu proudu ze zemniče do půdy vznikají vlivem vysoké intenzity pole na hranách zrněk půdy malé jiskry, které do určité míry překlenují přechodové odpory. Pokud by intenzita pole přesáhla tzv. průrazný gradient půdy, nastal by úplný průraz zeminy (v podstatě by došlo k „vyzkratování“ vrstvy zeminy v blízkosti zemniče). Zemnič by v tomto okamžiku byl obklopen dobře vodivou vrstvou, čímž by se celkový zemní odpor vodiče snížil.

Průřezy ochranných vodičů, u kterých doba průchodu proudu nepřesáhne 5 s, se určí:

$$A = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t_k}}{k_v} \quad (3.1)$$

Kde A je průřez zemniče [mm^2]

I poruchový proud procházející zemničem [A]

t_k vypínací čas vypínacího přístroje [s]

k_v součinitel závislý na materiálu ochranného vodiče, na izolaci a na ostatních částech, na teplotě před zkratem a po zkratu [$A \cdot \sqrt{s} \cdot \text{mm}^{-2}$].

Bližší vysvětlení jednotlivých parametrů je v následujícím textu.

Poruchový proud procházející zemničem:

Hodnotu poruchového proudu je nutno stanovit v závislosti na typu sítě a použitých zemnicích lan. Zohlednění druhu sítě je znázorněno v tabulce 3-1.

Tabulka 3-1: Hodnoty proudů I odtékajících zemničem do země v silových zařízeních s napětím nad 1000 V, na které se zemniče dimenzují [5]

Typ sítě nad 1 kV			Určující pro tepelné zatížení ¹⁾		Určující pro vzrůst potenciálu a dotyková napětí
Sítě s izolovaným uzlem			Zemnič	Uzemňovací přívod	
			- ⁶⁾	I_{k2E}'' ⁹⁾	$I_E = r \cdot I_C$ ⁷⁾
Sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů	Stanice se zhášecími tlumivkami		- ⁶⁾	I_{k2E}'' ^{3) 9)}	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{Re s}^2}$
	Stanice bez zhášecích tlumivek				$I_E = r \cdot I_{Re s}$
Sítě s nízkoohmovým uzemněním uzlu			I_{k1}'' ^{4) 5)}	I_{k1}'' ⁵⁾	$I_E = r \cdot w \cdot I_{k1}''$ ⁵⁾
Sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů a přechodně nízkoohmově uzemněným uzlem	Stanice ve kterých je uzel přechodně uzemňován		I_{k1}'' ⁴⁾	I_{k1}'' ⁸⁾	$I_E = r \cdot w \cdot I_{k1}''$ ⁵⁾
	Ve všech ostatních stanicích	Se zhášecími tlumivkami	- ⁶⁾	I_{k2E}'' ³⁾	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{Re s}^2}$ ²⁾
		Bez zhášecích tlumivek			$I_E = r \cdot I_{Re s}$

Legenda k tabulce 3-1:

I_C vypočtený nebo měřený zemní kapacitní proud

$I_{Re s}$ zbytkový proud zemního spojení. Pokud není známa přesná hodnota, může se uvažovat 10 % I_C .

I_L	součet jmenovitých proudů paralelních zhášecích tlumivek v příslušné transformovně
I_{k2E}''	proud dvojitého zemního spojení vypočtený podle ČSN 33 3022-1
I_{k1}''	počáteční symetrický zkratový proud jednopólového zkratu
I_E	zemní proud
r	redukční činitel
w	součinitel pravděpodobnosti (vyjadřuje pravděpodobnost výskytu největšího, teoreticky stanoveného zkratového proudu, jeho hodnota je 0,7, není-li výpočtem prokázána hodnota nižší)
1)	Je nutné uvažovat minimální průřez podle normativní přílohy A [3]
2)	Pouze u dobře vykompenzovaných sítí. U výrazně rozladěných je zapotřebí uvažovat přídatnou jalovou složku zbytkového proudu.
3)	Jmenovité proudy zhášecích tlumivek je zapotřebí uvažovat i při návrhu jejich uzemňovacích přívodů.
4)	Pokud je možných několik proudových drah, lze při návrhu elektrod uzemňovací soustavy uvažovat výsledné rozdělení proudů.
5)	Pokud je proud dvoupólového zemního zkratu vypočtený podle ČSN EN 60909-0 větší než I_{k1}'' , musí se uvažovat s touto vyšší hodnotou
6)	Postačuje minimální průřez zemniče
7)	U místních systémů VN, např. průmyslových závodů, kde zemní porucha může trvat delší dobu, např. několik hodin je zapotřebí uvažovat I_{k2E}''
8)	Pokud I_{k2E}'' je větší než I_{k1}'' musí se uvažovat s touto vyšší hodnotou
9)	Pokud je vypínací čas zemní poruchy kratší než 1s, může být užit I_C nebo I_{Res}

Zemnicí lana venkovních vedení a kovové pláště zemnicích kabelů se podílejí na přenosu poruchových proudů vracejících se zemí a přebírají tak část zemního proudu. Tímto je uzemňovací systém zařízení vysokého napětí postižený zemní poruchou účinně odlehčen od zemního poruchového proudu. Rozsah tohoto odlehčení je vyjádřen tzv. redukčním činitelem. Stanovením redukčních činitelů jednotlivých druhů zemnicích lan se zabývá příloha J v [3]. V tabulce 3-2 jsou z [4] uvedeny hodnoty redukčních činitelů nepoužívanějších zemnicích lan vedení VVN.

Tabulka 3-2: Redukční činitel nepoužívanějších zemních lan vedení VVN

Napětí	Typ vedení	Redukční činitel r pro lano	
		185 AlFe	70 Fe
110 kV	Jednoduché vedení 1 lano	0,58	0,93
	Dvojitý trojúhelník 1 lano	0,64	0,93
	Soudek 1 lano	0,60	0,93
220 kV	Dvojitý trojúhelník 1 lano	0,67	0,94
220 kV	Portál 2 lana	0,45	0,87
400 kV	Dvojitý trojúhelník 2 lana	0,42	0,90
	Portál 2 lana	0,40	0,88

Součinitel k_v

Určí se ze vzorce:

$$k_v = \sqrt{\frac{Q_c \cdot (B + 20)}{\rho_{20}} \cdot \ln\left(1 + \frac{\vartheta_f - \vartheta_i}{B + \vartheta_i}\right)} \quad (3.2)$$

Kde Q_c je objemová tepelná kapacita materiálu vodiče [$\text{J}^\circ\text{C mm}^3$]

B převrácená hodnota teplotního součinitele rezistivity vodiče při 0°C [$^\circ\text{C}$]

ρ_{20} rezistivita materiálu vodiče při 20°C [$\Omega\cdot\text{mm}$]

ϑ_i počáteční teplota vodiče [$^\circ\text{C}$]

ϑ_f konečná teplota vodiče [$^\circ\text{C}$]

Potřebné materiálové konstanty jsou pro základní materiály uvedeny v tabulce 3-3.

Tabulka 3-3: Materiálové konstanty [4]

Materiál	B [$^\circ\text{C}$]	Q_c [$\text{J}^\circ\text{C mm}^3$]	ρ_{20} [$\Omega\cdot\text{mm}$]	$\sqrt{\frac{Q_c \cdot (B + 20)}{\rho_{20}}}$
Měď	234,5	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$17,241 \cdot 10^{-6}$	226
Hliník	228,0	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$28,264 \cdot 10^{-6}$	148
Olovo	230,0	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$214,00 \cdot 10^{-6}$	42
Ocel	202,0	$3,80 \cdot 10^{-3}$	$138,00 \cdot 10^{-6}$	78

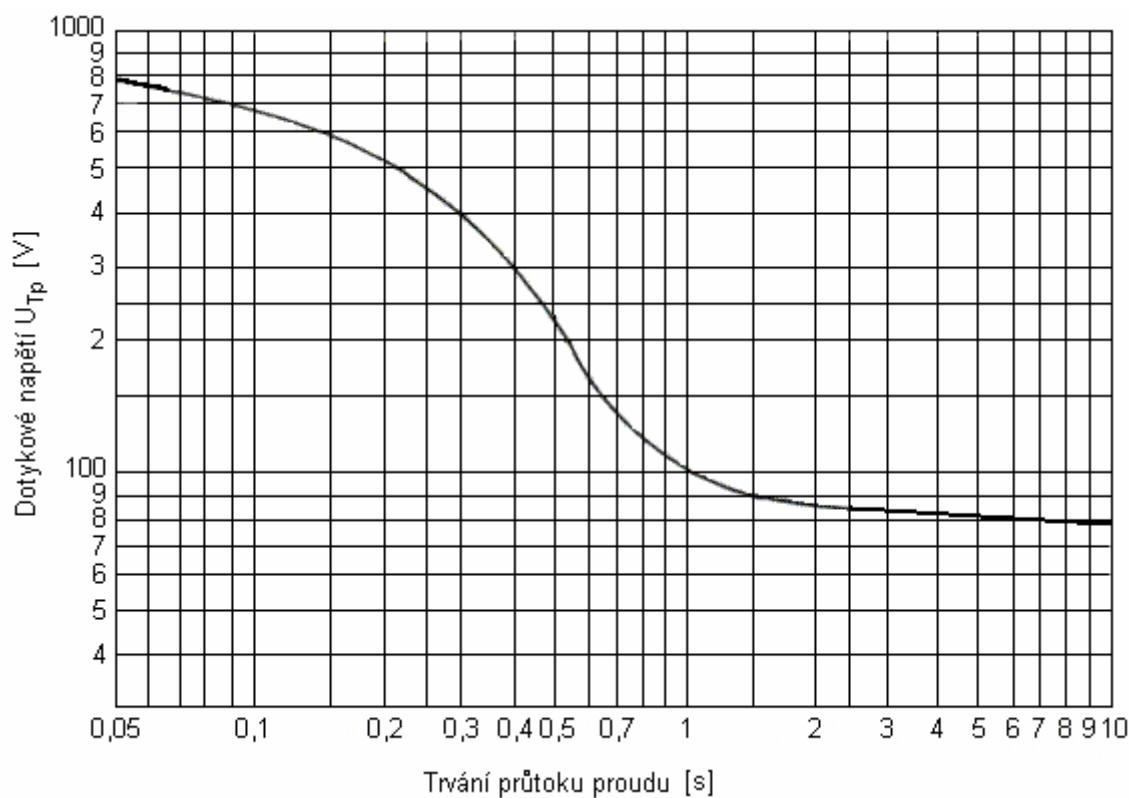
Trvání poruchového proudu

Při stanovení trvání poruchy se u sítí s rychlým vypínáním poruch uvažují vypínací časy ochrany a spínačů při jejich správné činnosti. U sítí VN se předpokládá za všeobecně reálný vypínací čas poruch 0,4 až 0,5 s. U sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů, ve kterých je přípustný provoz se zemním spojením se uvažuje doba provozu do jedné hodiny. Pro další typy sítí jsou orientační požadované doby vypnutí zkratu následující:

- na přenosových vedeních 400 kV – 0,1 s
- v sítích 110 a 220 kV napájených energetickými bloky velkých výkonů do 0,15 až 0,20 s
- v sítích 110 a 220 kV napájených energetickými bloky starších konstrukcí do 0,30 až 0,40 s
- v rozvodných zařízeních VN do 0,50 až 0,60 s

3.1.3 Dimenzování s ohledem na dotyková a kroková napětí

Základní návrh uzemňovací soustavy, vyhovující předešlým podmínkám (kapitola 3.1.1. - Dimenzování s ohledem na korozivní odolnost a mechanickou pevnost a kapitola 3.1.2 - Dimenzování s ohledem na tepelnou odolnost) je nutno ještě posoudit z hlediska dotykových napětí. Důvodem je ohrožení života proudem procházejícím lidským tělem. V praxi se při výpočtu řídíme podle hodnot dotykových napětí, protože dovolené hodnoty dotykových napětí jsou nižší než dovolené hodnoty krokových napětí. Splní-li tedy uzemňovací soustava podmínku na dovolenou hodnotu dotykového napětí, dá se očekávat, že se nevyskytnou žádná nebezpečná kroková napětí. Meze dotykových napětí proti zemi jsou uvedeny na obrázku 3-1. Křivka v tomto obrázku představuje napětí, která se mohou objevit na lidském těle při dotyku rukou proti bosé noze. Nebyly tedy uvažovány žádné přídatné odpory (odpor obuvi, rukavic apod.).

Obrázek 3-1: Dovolená dotyková napětí U_{Tp} pro omezené trvání průtoku proudu [3]

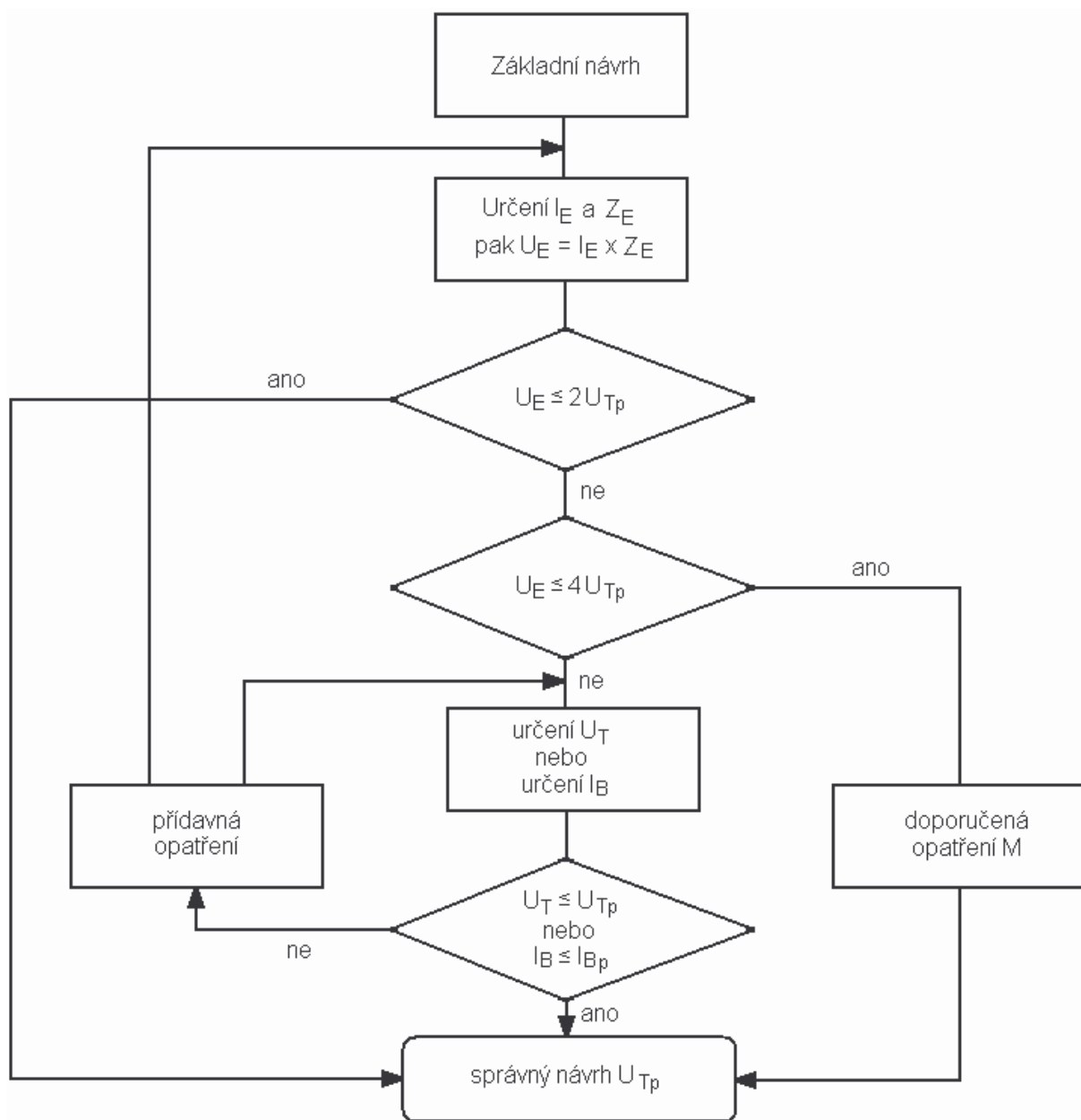
Pro přesnější určení dovolených dotykových napětí v oblasti 0,1 až 1 s jsou tyto hodnoty uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 3-4: Dovolená dotyková napětí U_{Tp} pro omezené trvání průtoku proudu

t_k [s]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
U_{Tp} [V]	650	510	400	300	220	170	140	125	115	100

Dle [5] lze pro trvání průtoku proudu delší než 5 s použít pro U_{Tp} hodnotu 75 V.

Postup při dimenzování uzemňovací soustavy s ohledem na dovolená dotyková napětí zobrazuje obrázek 3-2.

Obrázek 3-2: Návrh uzemňovací soustavy s ohledem na dovolené dotykové napětí U_{Tp} [3]

Legenda k obrázku 3-2:

U_E - napětí na uzemňovací soustavě

I_E - zemní proud (jeho hodnota je v silových zařízeních s napětím nad 1000 V dána dle tabulky 3-1)

Z_E - impedance uzemnění, pro výpočty se používají vztahy pro R_E

U_{Tp} - dovolené dotykové napětí

I_{Bp} - dovolený proud tělem

I_B - proud procházející lidským tělem

U_T - dotykové napětí

Doporučená opatření M – zvláštní uznávaná opatření k zajištění dovolených dotykových napětí U_{Tp} (více viz kapitola 4.1.1 *Popis uznávaných zvláštních opatření M*)

Napětí na uzemňovací soustavě U_E se dá určit dvěma způsoby. Buď je to změřením jeho hodnoty a jejím následným přepočtem na zkratový proud, nebo výpočtem (jak je to zakresleno v obrázku 3-2):

$$U_E = R_E \cdot I_E \quad (3.3)$$

kde R_E je zemní odpor soustavy [Ω]

I_E je zemní proud [A]

Dimenzování uzemňovací soustavy s ohledem na dovolená dotyková napětí se považuje za splněné, pokud je splněna některá z následujících podmínek:

1. Uvažovaná instalace se stane součástí jiné nadřazené uzemňovací soustavy
2. Nárůst potenciálu zemniče, určený měřením nebo výpočtem nepřekročí dvojnásobek hodnot dovoleného dotykového napětí U_{Tp} podle obrázku 3-1.

$$U_E \leq 2 \cdot U_{Tp} \quad (3.4)$$

3. Provede se zjištění podmínky, jestli je:

$$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp} \quad (3.5)$$

Pokud je tato podmínka splněna, provede se některé z příslušných opatření M v souladu s velikostí vzrůstu zemního potenciálu a trvání poruchy.

Dle [3] je možno v místech přístupných pouze obsluze zařízení uvažovat s přidavnými odpory podle přílohy C [3]. V tomto případě se potom nahrazuje U_E hodnotou U_{STp} , která představuje dovolené dotykové napětí při použití přidavné rezistance (např. obuvi).

Pokud není splněna ani jedna z těchto podmínek, je nutno ověřit dodržení dovolených dotykových napětí U_{Tp} , což se provádí zpravidla měřením.

3.1.4 Měření dotkových napětí

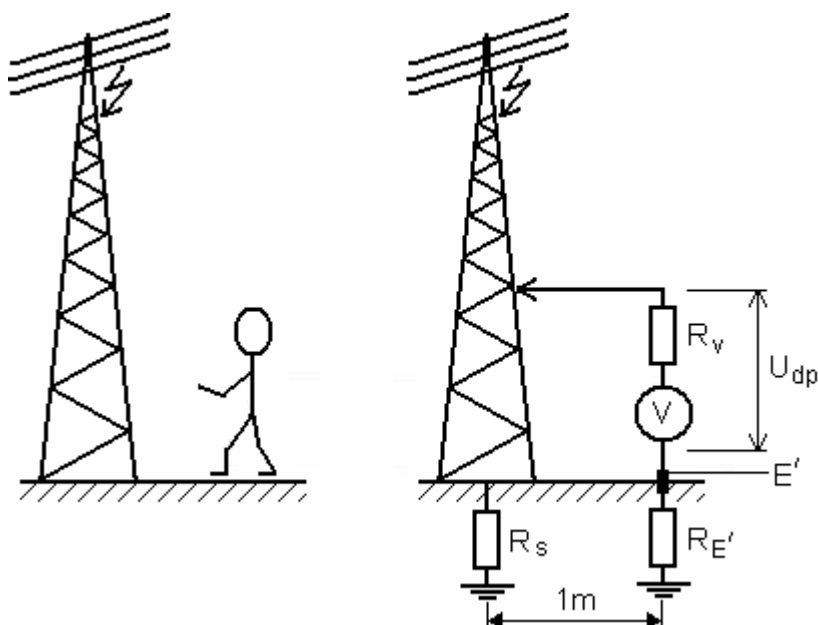
3.1.4.1 Zkratová metoda

Tato metoda spočívá v úmyslném vytvoření zemního zkratu. Průtok zkratového proudu mezi uzemněním měřené stanice a uzemněním sousedních stanic, které zkrat napájí, odpovídá skutečnosti. Tato metoda se však z provozních a ekonomických důvodů prakticky nepoužívá, protože dotková napětí se musí registrovat ve vybraných místech současně oscilografy anebo vrcholovými voltmetry.

3.1.4.2 Metoda velkým proudem

Tato metoda spočívá ve vytvoření měřicího obvodu tak, aby se napodobily poměry jako při skutečném zkratu. Potom zkušební proud tekoucí tímto obvodem vyvolá na měřeném uzemnění úbytky napětí, které se v požadovaných místech proti zemi měří. Hodnota proudu se volí dle rozsahu měřené uzemňovací soustavy. Při měření se postupuje tak, že se nejprve změřívá tzv. předpokládané dotkové napětí U_{dp} . To je definováno jako nejvyšší dotkové napětí, které se může vyskytnout v případě poruchy o zanedbatelné impedanci. Měření této hodnoty je zobrazeno na obrázku 3-3. Měřicí přístroj je zde zapojen mezi měřenou konstrukci a elektrodu, vzdálenou od měřeného objektu 1m. Odpor elektrody R_E v tomto případě můžeme zanedbat, protože vůči velkému vnitřnímu odporu přístroje R_V (norma předepisuje minimálně 100 k Ω) je tato hodnota mnohem menší. V obrázku symbol E' označuje umístění libovolné elektrody a R_s odpor uzemňovací soustavy.

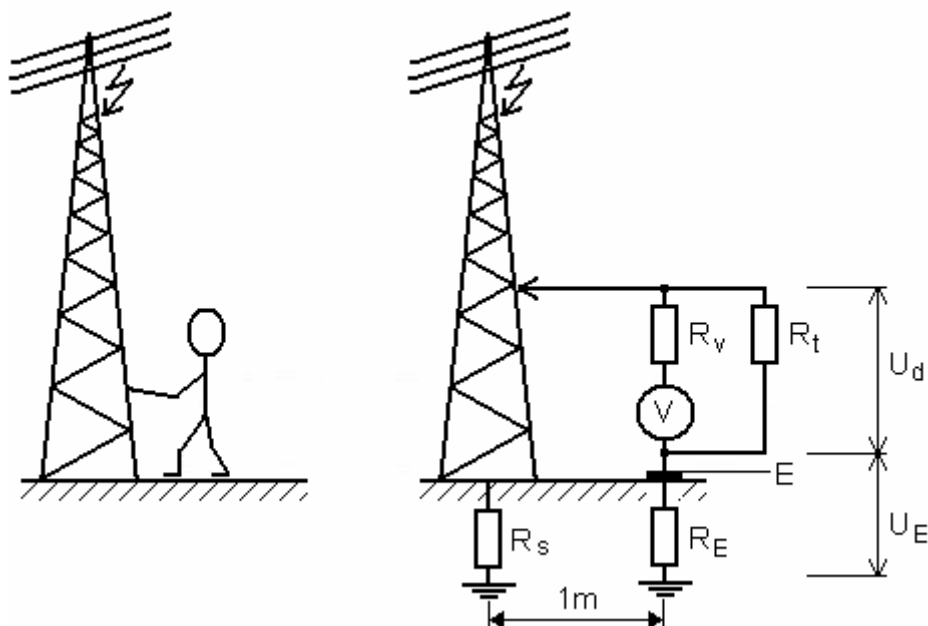
Obrázek 3-3: Měření předpokládaného dotkového napětí



Je-li po přepočtu na zkratový proud naměřené napětí vyšší než připouští norma, přistoupí se k měření hodnoty dotkového napětí U_d . Ta je definována jako část napětí uzemňovací soustavy proti zemi, vzniklá mezi dvěma body lidského těla, jimiž člověk v době zasažení tuto soustavu překlene. Princip měření dotkového napětí je zobrazen na obrázku 3-4. Postupuje se tak, že se

měřicí přístroj přemostí odporem R_t (1,5 k Ω), který představuje odpor těla člověka a měří se proti ploché elektrodě, jež má rozměry 200x200 mm. Umístění ploché elektrody je v obrázku označeno písmenem E . Touto elektrodou je simulováno, jakoby člověk stál bosý na zemi. Aby byl zajištěn dobrý styk elektrody s povrchem, bývá někdy podložena mokrou tkaninou nebo vodivou gumou. Při měření se musí napodobit nepříznivé klimatické podmínky (mokrý povrch pod elektrodou).

Obrázek 3-4: Měření dotykového napětí



Zemní odpor R_E

Základním údajem pro výpočet zemního odporu zemničů je rezistivita (měrný odpor) půdy.

Tuto hodnotu můžeme zjistit dvěma způsoby. Buď měřením, nebo odečtením příslušné hodnoty z tabulky 3-5. Používání hodnot z tabulek se ale nedoporučuje pro značné rozmezí krajních hodnot, což by mohlo vést k neekonomickým návrhům soustav. Dále zemní odpor závisí na parametrech samotného zemniče (na rozměrech a uspořádání).

Tabulka 3-5: Rezistivita půdy [3]

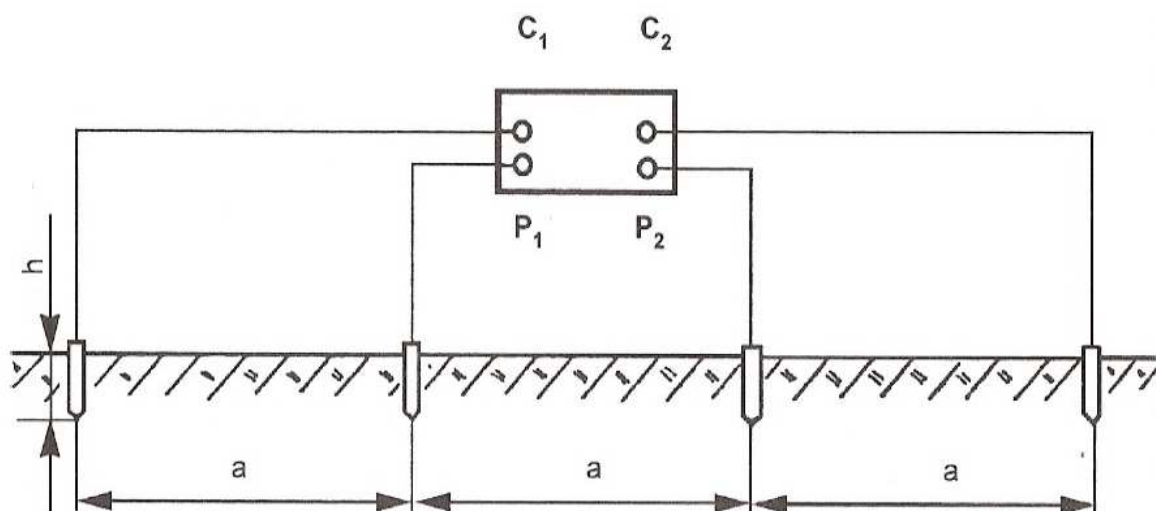
Typ půdy	Rezistivita půdy ρ_E [$\Omega \cdot m$]
Močál	5 až 40
Hlína, jíl, humus	20 až 200
Písek	200 až 2500
Štěrkopísek	2000 až 3000
Zvětralá skála	většinou do 1000
Pískovec	2000 až 3000
Žula	až do 50 000
Moréna	až do 30 000

Pokud se rezistivita půdy určuje měřením, je nutno ji měřit v hloubce, ve které bude zemnič uložen. Pokud jde o návrh rozsáhlých uzemňovacích sítí (např. uzemnění venkovních rozvodů), může se vodivost jednotlivých vrstev půdy značně lišit. Protože z takového zemniče proud odtéká široce do země jako z mohutného tělesa, má významný vliv i vodivost hluboko položených vrstev. V takovémto případě je nutno určit tzv. střední rezistivitu půdy do hloubky srovnatelné s celkovými rozměry zemniče, což většinou znamená až do hloubky několika desítek metrů.

Geoelektrická měření rezistivity půdy

Metoda měření rezistivity půdy je popsána v [4]. Jde o tzv. geoelektrické měření, kdy se k měření použije čtyř elektrod. Obecně se geoelektrické měření označuje také jako Schlumbergerova nebo Wennerova metoda (liší se od sebe jen vzájemnou konfigurací elektrod a z toho plynoucího odlišného vyhodnocení). V dalším textu je uvedena jen Wennerova metoda, která je používanější a je právě obsažena v ČSN. Její princip je zobrazen na obrázku 3-5.

Obrázek 3-5: Rozmístění elektrod při měření rezistivity půdy Wennerovou metodou



Jako elektrody se zpravidla používají tyče o průměru 12 až 20 mm, zaražené v jedné přímce do hloubky 20 cm, v rozestupu a . Proudové elektrody (vnější) se připojí na svorky C_1 a C_2 a potenciálové (vnitřní) na svorky P_1 a P_2 . Rozstup elektrod a se postupně zvětšuje podle požadované hloubky měření a měření se provede na několika místech. Rezistivita ρ v Ωm se vypočítá ze vztahu:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (3.6)$$

kde – a je vzdálenost mezi elektrodami [m]

– R je naměřený odpor [Ω]

Tento vztah platí za předpokladu, že hloubka elektrod h je mnohem menší než rozstup elektrod a . Je-li nutné elektrody zarazit do větší hloubky, aby byl dosažen požadovaný zemní

odpor elektrod (zpravidla v půdách s velkou rezistivitou), je třeba vynásobit výslednou hodnotu konfigurační konstantou k podle následující tabulky:

Tabulka 3-6: Tabulka konfiguračních konstant

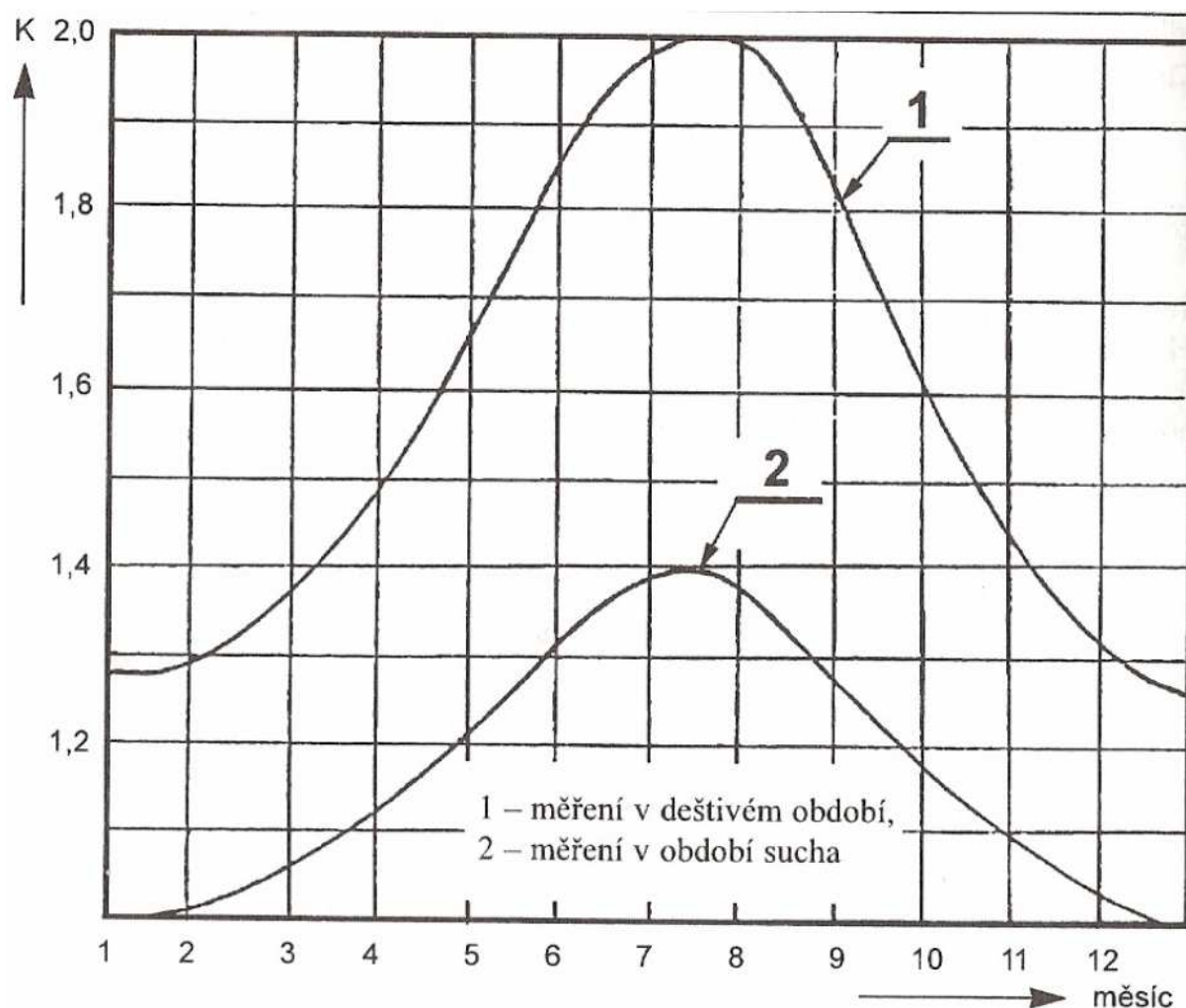
a/h	1/4	1/2	1	2	4	6	8	10	20	> 20
k	2,00	1,90	1,70	1,30	1,10	1,05	1,03	1,02	1,01	1,00

Takto stanovenou rezistivitu považujeme za střední rezistivitu půdy do hloubky rovné přibližně rozestupu elektrod a .

Pro navrhování jednoduchých zemničů postačuje určit rezistivitu půdy tak, že se změří zemní odpor tyče nebo trubky o průměru 20 mm zaražené do hloubky 0,8 m. Tento naměřený zemní odpor se rovná číselně přímo rezistivitě půdy.

Vliv kolísání rezistivity v závislosti na ročním období se eliminuje tak, že se naměřené hodnoty vynásobí koeficientem K podle obrázku 3-6.

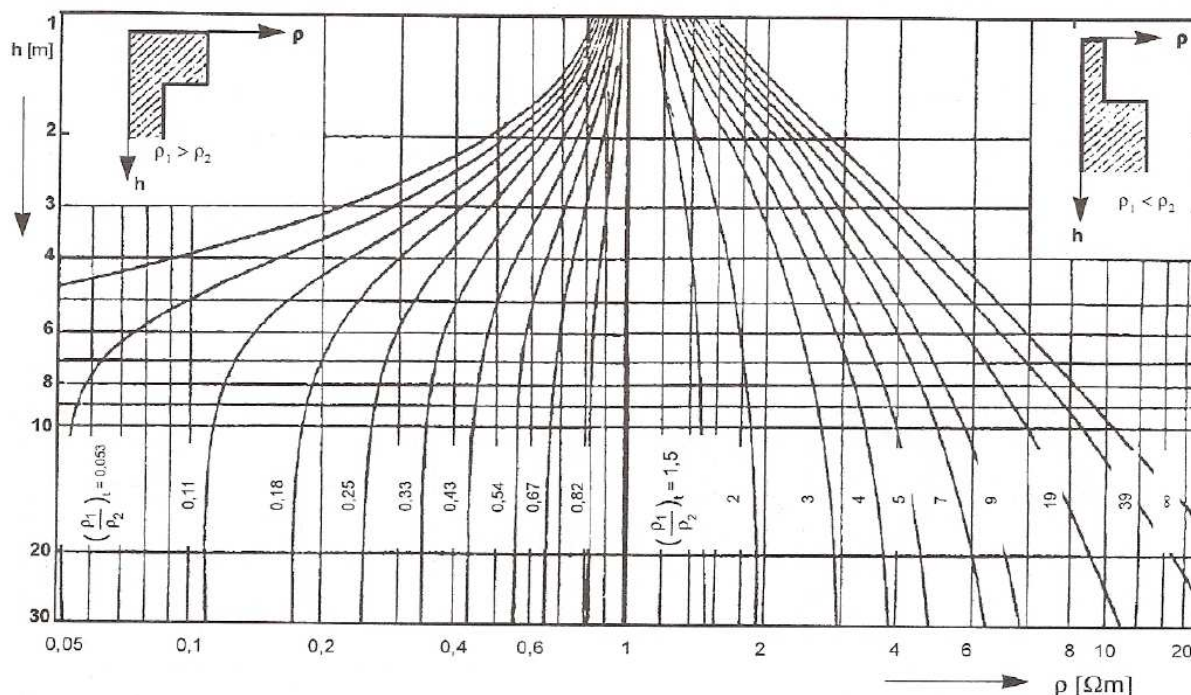
Obrázek 3-6: Grafické zobrazení koeficientu K v závislosti na ročním období [5]



Vyhodnocení rezistivity vícevrstvé půdy

Je-li třeba znát údaje o vodivosti jednotlivých půdních vrstev a jejich mohutnosti, je třeba zpracovat podrobné vyhodnocení. Dle [2] to lze provést pomocí křivek sestavených teoreticky pro různé poměry $(\rho_2/\rho_1)_t$ a různé tloušťky horní vrstvy půdy. Tyto křivky v závislosti na rozestupu elektrod pro dvouvrstvou půdu jsou uvedeny na obrázku 3-7.

Obrázek 3-7: Křivky sestavené pro různé poměry rezistivit půdy v závislosti na rozestupu elektrod



Obdobné křivky, uváděné v odborné literatuře, jsou vypracovány pro Schlumbergerovo i Wennerovo uspořádání elektrod. Některé jsou sestaveny v závislosti na rozestupu elektrod a , obdobně jako křivky uvedené v obrázku 3-7, některé v závislosti na poloviční vzdálenosti krajních, tj. proudových elektrod $(1,5 \cdot a)$. Protože všechny křivky jsou na první pohled velmi podobné, je třeba při jejich používání tyto odlišnosti brát v úvahu. Podobně jsou vypracovány křivky i pro třívrstvé vodivostní složení půdy. Práce s nimi je však náročnější.

Postup při vyhodnocování

Hodnoty rezistivity půdy, přepočítané z naměřených hodnot, se vynesou do grafu na průsvitku s logaritmickými stupnicemi ve stejném měřítku, v jakém jsou zakresleny teoretické srovnávací křivky.

Průsvitka se zakreslenou křivkou se posouvá po grafu teoretických křivek a porovnává se s nimi, až se naměřená křivka pokud možno v celém průběhu kryje s některou z teoretických křivek. Souřadnicové osy obou grafů přitom musí zůstat rovnoběžné. Pokud se překrytí nedosáhne, je možné provést interpolaci mezi dvěma křivkami. Ze vzájemné polohy obou grafů odečítáme hodnoty rezistivity horní vrstvy půdy ρ_1 a jeho tloušťku h_1 , a to tak, že vzdálenost os pořadnic (y) se číselně rovná rezistivitě ρ_1 a vzdálenost os úseček (x) tloušťce horní vrstvy h_1 .

Vodivost spodní vrstvy zeminy vypočítáme ze vztahu:

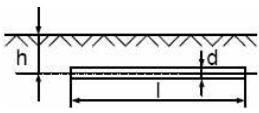
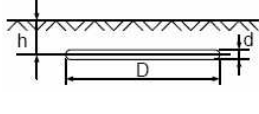
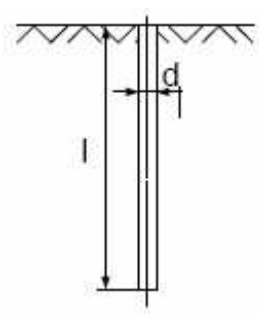
$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)_t \quad (3.7)$$

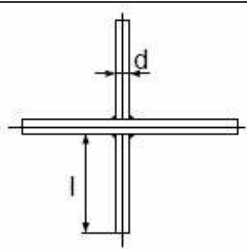
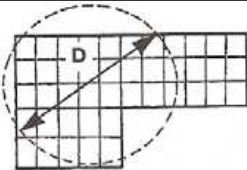
Závěrem je třeba upozornit na to, že uvedený způsob vyhodnocování vyžaduje určité zkušenosti a pečlivé zpracování, jinak by výsledek mohl být zatížen značnou chybou.

Stanovení zemního odporu R_E

Jak již bylo uvedeno výše, rezistivita půdy je jen jedním z faktorů ovlivňujících výslednou hodnotu zemního odporu. Druhým významným faktorem je tvar samotného zemniče (rozměry a uspořádání). Pro některé základní tvary zemničů byly stanoveny vzorce pro výpočet jejich zemního odporu. Tyto vzorce jsou uvedeny v tabulce 3-7. Při návrzích uzemňovacích soustav se často používají pouze přibližné výpočty. Pro jejich použití však musí být splněny podmínky, které jsou opět pro dané zemniče uvedeny v tabulce. Není-li zajištěno splnění těchto podmínek, provádí se výpočet dle exaktních vzorců.

Tabulka 3-7: Vzorce pro výpočet zemních odporů základních typů zemničů [4]:

Typ zemniče	Uložení	Zemní odpor $[\Omega]$ (exaktní vzorec)	Podmínky použití	Zemní odpor $[\Omega]$ (přibližný vzorec)	Podmínky použití
Páskový nebo drátový vodič		$R_E = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2h} \right)$	$l \gg d$ $h \ll \frac{l}{4}$	$R_E = 2 \cdot \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $h \ll \frac{l}{4}$ $l = 10 \div 50m$
Páskový nebo drátový vodič v kruhu		$R_E = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{\pi D}{2h} \right)$	$D \gg d$ $h \ll \frac{D}{4}$	$R_E = 2,1 \cdot \frac{\rho}{l}$	$D \gg d$ $h \ll \frac{2}{d}$ $\frac{D}{h} \gg 10$
Tyč		$R_E = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{d}$	$l \gg \frac{d}{2}$	$R_E = 0,9 \cdot \frac{\rho}{l}$	$l \gg \frac{d}{2}$ $l = 1 \div 3m$

Typ zemniče	Uložení	Zemní odpor [Ω] (exaktní vzorec)	Podmínky použití	Zemní odpor [Ω] (přibližný vzorec)	Podmínky použití
Páskový nebo drátový vodič paprskový		$R_E = \frac{\rho}{4\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + 1 \right)$	$l \gg d$	$R_E = 0,7 \cdot \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $l \ll 30m$
Mřížová sít'				$R_E = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l}$	

Poznámka: U mřížové sítě se předpokládá, že jde o síť nekruhového tvaru o ploše S , potom se určí D jako: $D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}$.

Legenda k tabulce 3-7:

R_E - výsledná hodnota zemního odporu [Ω]

d - průměr zemniče [m]

h - hloubka uložení zemniče [m]

ρ - rezistivita půdy [Ωm]

l - délka vyznačené části zemniče (v případě zemnicí mříže celková délka zemniče) [m]

D - průměr kruhu zemniče [m]

3.2 Porovnání návrhu uzemnění dle ČSN a PNE

Jak z předchozího textu vyplývá, je problematika uzemňování natolik komplexní a obsáhlou problematikou, že se jí zabývá celá řada technických norem. Dříve se uzemňování provádělo převážně podle normy ČSN 33 2000-5-54, která je však v současné době v mnoha bodech nahrazována normou ČSN 33 3201 (týká se to především částí dimenzování uzemnění elektrických zařízení nad AC 1kV). V některých bodech dokonce zůstávají v platnosti obě tyto normy. Což se týká např. vzorců pro výpočet zemního odporu. V aktualizaci z listopadu 2002 k ČSN 2000-5-54 je řečeno, že výpočet zemního odporu zemniců se provádí dle přílohy NL (normy ČSN 2000-5-54), nebo alespoň stejně přesnou metodou (jako je např. podle přílohy

K normy ČSN 33 3201). Porovnáním zde uvedených výpočtů dojdeme ke zjištění, že zatímco dle ČSN 2000-5-54 se zemní odpor mřížové sítě určí ze vzorce (viz tabulka 3-7):

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot D} + \frac{\rho}{l} \quad (3.8)$$

kde R – zemní odpor mřížové sítě [Ω]

ρ - rezistivita půdy [Ωm]

D - průměr kruhu zemniče [m]

l - celková délka zemniče [m]

Dle ČSN 33 3201 se zemní odpor mřížové sítě určí ze vzorce:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot D} \quad (3.9)$$

kde R - zemní odpor mřížové sítě [Ω]

ρ - rezistivita půdy [Ωm]

D - průměr kruhu zemniče [m]

Porovnáním těchto dvou vzorců, zjistíme, že v novější normě ČSN 33 3201 se již nevyskytuje člen $\frac{\rho}{l}$, který ve výpočtu zohledňoval celkovou délku použitého zemniče a vztah byl tedy zjednodušen na pouhé uvažování rezistivity půdy a plochy, kterou zemní mříž zaujímá.

Dalším bodem, ve kterém se tyto normy liší je postup popisující stanovení minimálního průřezu zemniče (potažmo uzemňovacího přívodu). Dle normy ČSN 33 2000-5-54 se tato hodnota určí (viz vzorec 3.1):

$$S = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{k}$$

kde S - průřez [mm^2]

I - efektivní hodnota střídavého proudu procházejícího v důsledku poruchy
o zanedbatelné impedanci ochranným prvkem [A]

t - vypínací čas vypínacího přístroje [s]

k - součinitel závislý na materiálu ochranného vodiče, na izolaci a na ostatních částech,
na teplotě před zkratem a po zkratu [$\text{A} \cdot \sqrt{s} \cdot \text{mm}^{-2}$] (jeho stanovení viz vzorec 3.2)

Dle ČSN 33 3201 se minimální průřez zemniče (potažmo uzemňovacího přívodu) určí:

$$S = \frac{I}{K} \cdot \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\vartheta_f + \beta}{\vartheta_i + \beta}}} \quad (3.10)$$

kde S - průřez [mm^2]

I - efektivní hodnota proudu procházejícího vodičem [A]

t - trvání poruchového proudu [s]

K - konstanta závislá na materiálu vodiče (uvedena v tabulce B.1 v normě

ČSN 33 3201 pro většinu obvyklých materiálů) [$\text{A} \cdot \sqrt{s} \cdot \text{mm}^{-2}$]

β - převrácená hodnota teplotního součinitele odporu vodiče při 0 °C [°C]

ϑ_f - konečná teplota [°C]

ϑ_i - počáteční teplota [°C]

Nevýhodou druhé metody je, že v normě není uveden výpočet konstanty K , takže výpočet lze použít pouze pro materiály, které mají tuto hodnotu uvedenu. Pokud použijeme těchto dvou vzorců pro výpočet téhož zadání, zjistíme, že výsledný průřez vyjde stejný. Matematickým vyjádřením tedy lze odvodit, že mezi konstantou K a součinitelem k je následující vztah:

$$K = \frac{k}{\sqrt{\ln \frac{\vartheta_f + \beta}{\vartheta_i + \beta}}} \quad (3.11)$$

Z předchozího vyplývá, že vhodnější postup nabízí norma ČSN 33 2000-5-54, která uvádí výpočet součinitele k pro libovolný materiál, kdežto norma ČSN 33 3201 výpočet jí používané konstanty K neuvádí.

Porovnáním ČSN 33 3201 a PNE 33 0000-1 vyplývá, že návrh uzemňovacích soustav dle těchto norem je v podstatě totožný. Norma PNE 33 0000-1 se v mnoha bodech návrhu na ČSN 33 3201 dokonce přímo odkazuje. Tyto normy se však liší v tabulce udávající poruchový proud procházející zemničem při dimenzování zemniče na dovolené dotykové napětí. Tabulka 3-1 uvedená v tomto textu je v souladu s hodnotami uvedenými v PNE 33 0000-1.

Odchylka se týká sítí s nízkoohmovým uzemněním uzlu a stanic, ve kterých je uzel přechodně uzemňován. Dle PNE 33 0000-1 je hodnota proudu v těchto případech rovna:

$$I_E = r \cdot w \cdot I_{k1}'' \quad (3.12)$$

kde I_E - zemní proud [A]

r - redukční činitel

w - součinitel pravděpodobnosti ((vyjadřuje pravděpodobnost výskytu největšího, teoreticky stanoveného zkratového proudu, jeho hodnota je 0,7, není-li výpočtem

prokázána hodnota nižší)

I''_{k1} - počáteční symetrický zkratový proud jednopólového zkratu [A]

Dle tabulky 5 v ČSN 33 3201 je však pro tyto dva případy uvedena poznámka, že k dispozici není žádný obecný vztah.

Výpočtový program popsany v následující kapitole je celý vypracován ve shodě s platnou PNE 33 0000-1.

4 PROGRAM PRO DIMENZOVÁNÍ UZEMŇOVACÍCH SÍTÍ

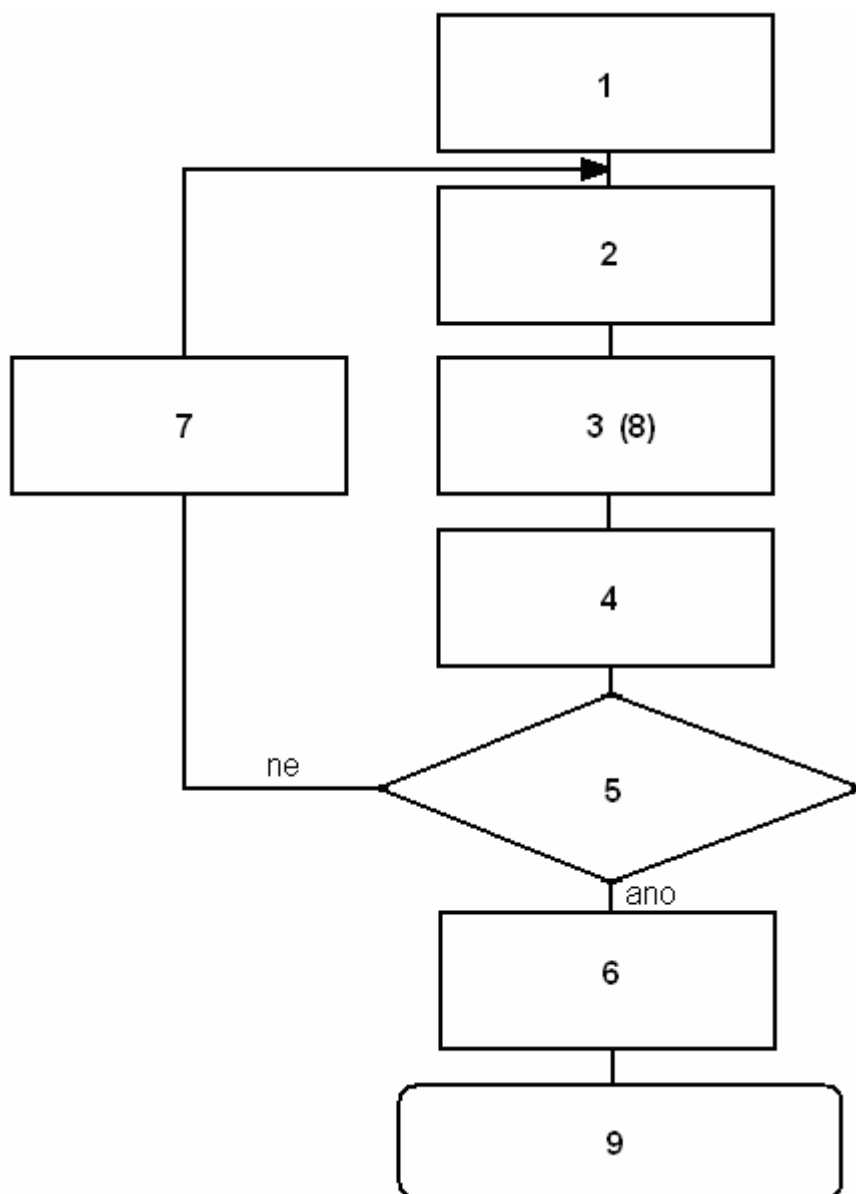
4.1 Algoritmus programu pro výpočet uzemnění v rozvodnách VVN

Algoritmus programu je vytvořen tak, aby byly splněny všechny podmínky dimenzování dle [5] a požadavky zadané společností JM-montáže s.r.o. Výsledkem je následujících 9 bodů, které popisují základní postup programu:

1. Zadání základních údajů o projektu (název stavby, umístění stavby..)
2. Zadání základních technických parametrů (plocha zemnicí mříže, rezistivita půdy, parametry zemniče, doba průchodu poruchového proudu..); v případě koeficientů možnost jejich výběru pro daný případ
3. Provedení výpočtu programem
4. Zobrazení výstupních hodnot (minimální průřez zemniče, zemní odpor, velikost dotykového napětí..)
5. Porovnání výstupních hodnot s hodnotami danými normou
6. V případě kladného výsledku konečné zobrazení výsledků výpočtu včetně zadávaných hodnot a výpisu veličin s jednotkami a přechod na bod 9.
7. V případě záporného výsledku zobrazení nabídky možných řešení vedoucí k opravě + možnost volby
8. Po zvolené opravě opětovné provedení výpočtu programem (viz bod 3.)
9. Možnost exportu celého výpočtu včetně zadávaných hodnot a výpisu veličin s jednotkami do dokumentu s koncovkou .txt ve formě výpočtové zprávy.

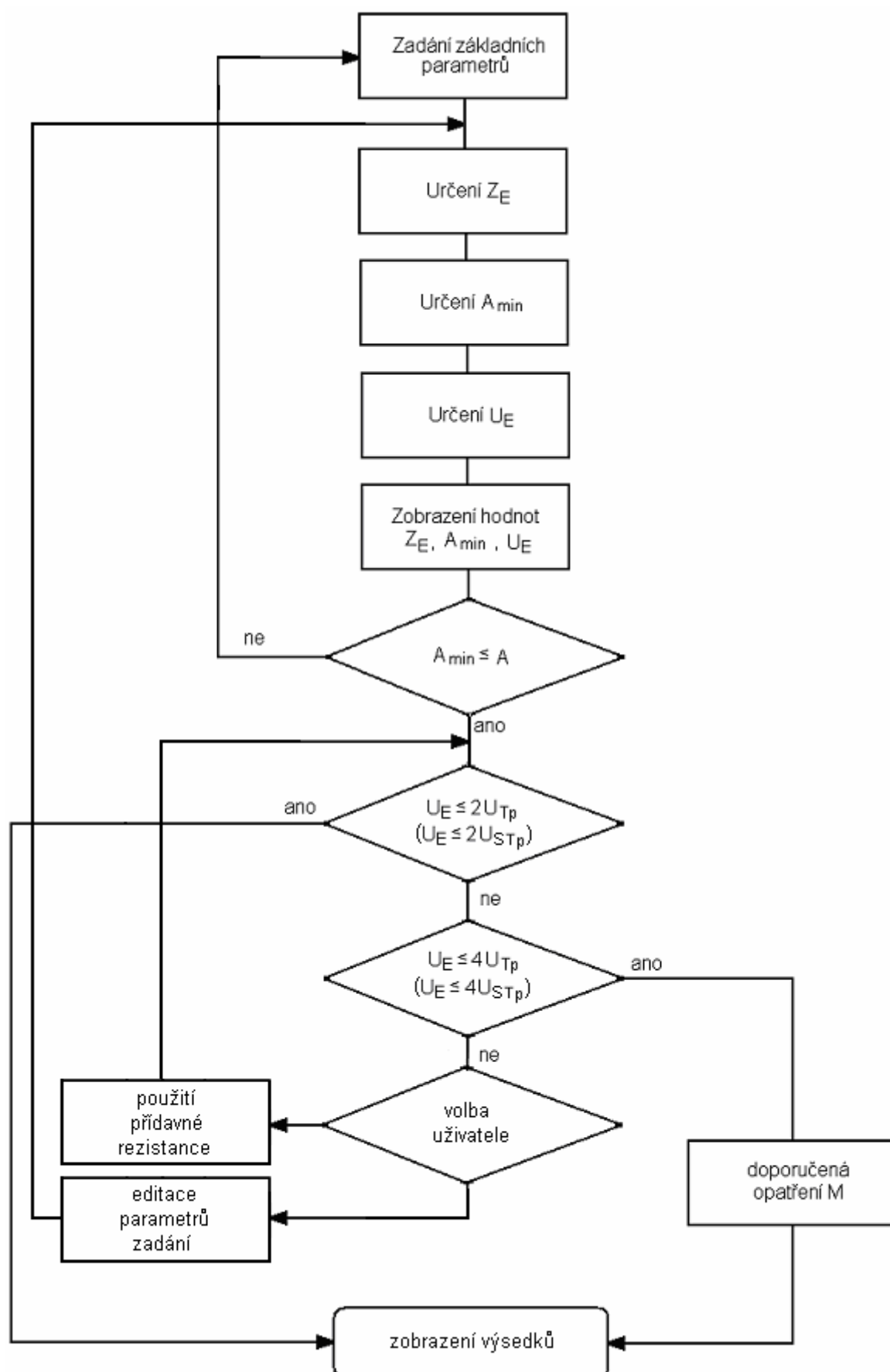
Tento algoritmus je graficky zobrazen na obrázku 4-1.

Obrázek 4-1: Grafické zobrazení postupu výpočtu



Algoritmus programu mezi kroky 2-6 je detailněji popsán na obrázku 4-2.

Obrázek 4-2: Zobrazení algoritmu mezi operacemi 2-6



Legenda k obrázku 4-2:

$A_{\min}$ - minimální průřez zemniče [mm²]

A - zvolený průřez zemniče [mm²]

U_E - napětí na uzemňovací soustavě [V]

Z_E - impedance uzemnění, pro výpočty se používají vztahy pro R_E [Ω] (viz tabulka 3-7)

U_{Tp} - dovolené dotykové napětí [V]

U_{STp} - dovolené dotykové napětí při použití přídavné rezistance (např. obuvi)

Doporučená opatření M – zvláštní opatření k zajištění dovolených dotykových napětí U_{Tp}

4.1.1 Popis uznávaných zvláštních opatření M

Dle [3] je dána tabulka, udávající, kdy a jaká zvláštní opatření mohou být použita.

Tabulka 4-1: Podmínky pro použití opatření M

Trvání poruchy t_F [s]	Vzrůst zemního potenciálu U_E	U vnějších zdí a plotů kolem zařízení	Uvnitř instalací	
			Vnitřní instalace	Venkovní instalace
$t_F > 5$	$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp}$	M1 nebo M2	M3	M4.1 nebo M4.2
	$U_E > 4 \cdot U_{Tp}$	Ověřit $U_T \leq 4 \cdot U_{Tp}$	M3	M4.2
$t_F \leq 5$	$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp}$	M1 nebo M2	M3	M4.2
	$U_E > 4 \cdot U_{Tp}$	Ověřit $U_T \leq 4 \cdot U_{Tp}$		

Dle tabulky se vždy požaduje splnění alespoň jednoho způsobu opatření M :

M1 – opatření pro vnější stěny budov s vnitřní instalací

M 1.1: Použití nevodivého materiálu pro vnější stěny (například zdivo nebo dřevo) a zamezení dotyku uzemněných kovových částí z vnějšku.

M 1.2: Řízení potenciálu vodorovnými zemniči spojenými s uzemňovací soustavou ve vzdálenosti přibližně 1m od vnější stěny a v maximální hloubce 0,5m.

M 1.3: Izolace stanoviště obsluhy: vrstva izolačního materiálu má mít dostatečnou velikost k tomu, aby nebyl možný dotyk uzemněné vodivé části rukou z místa vně izolačního materiálu.

M2 – opatření pro vnější oplocení venkovních zařízení

M 2.1: Užití oplocení z nevodivých materiálů nebo plastem pokrytý drátěný plot

M 2.2: Při užití vodivého oplocení řízení potenciálu vodorovnými zemniči, spojenými s oplocením ve vzdálenosti cca 1m vně oplocení a v maximální hloubce 0,5m.

M 2.3: Izolace stanoviště obsluhy v souladu s uznávaným zvláštním opatřením M 1.3 a uzemněním oplocení buď v souladu s přílohou F [3] nebo spojením uzemňovací soustavou.

M 2.4: Pokud jsou vrata oplocení spojena přímo s uzemňovacím systémem nebo uzemňovacími svody nebo kovovým stíněním kabelů pro systém hlásičů obsluhy apod., pak musí být v oblasti otevření vrat řízen potenciál nebo izolováno stanoviště obsluhy v souladu s opatřením M 1.3. Když mají být vrata zvlášť uzemněného oplocení spojena s hlavním uzemňovacím systémem, mají být izolována od vodivých částí oplocení způsobem zajišťujícím elektrickou vzdálenost alespoň 2,5m. To může být dosaženo užitím části oplocení z nevodivého materiálu nebo užitím vodivého oplocení s izolačními vložkami na konci. Elektrické oddělení musí být zajištěno i při plném otevření vrat.

M3 – opatření u vnitřních instalací

M 3.1: Vyrovnání potenciálu vnořením mříže zemničů do základů budovy (například s minimálním průřezem 50 mm² a maximální šířkou sítě 10 m nebo stavební ocelovou rohoží) a spojením k uzemňovací soustavě alespoň ve dvou různých místech. Pokud je pro odvod poruchového proudu užita též výztuž železobetonu, je zapotřebí výpočty přezkoušet její schopnost. Pokud jsou užity ocelové stavební rohože, pak sousední rohože musí být propojeny alespoň jednou a všechny rohože společně musí být připojeny k uzemňovací soustavě alespoň ve dvou místech. U stávajících budov mohou být použity horizontální zemniče, uložené v zemi blízko vnějších stěn a spojené s uzemňovací soustavou.

M 3.2: Kovové konstrukce stanovišť obsluhy (například kovová mříž nebo kovová deska) a spojení s jakoukoliv kovovou částí, která musí být zemněna a které se lze z místa obsluhy dotknout.

M 3.3: Izolace stanovišť obsluhy od vzrůstu zemního potenciálu ve shodě se zvláštním opatřením M 1.3. Pro vyrovnání potenciálu musí být propojeny kovové části, které musí být zemněny s kovovými částmi, na které lze dosáhnout ze stanoviště obsluhy.

M4 – opatření u venkovních instalací

M 4.1: Na stanovištích obsluhy: Buď odstupňování potenciálu pomocí horizontálního zemniče v hloubce přibližně 0,2 m a ve vzdálenosti cca 1 m od místa, ze kterého je zařízení obsluhováno. Tento horizontální zemnič musí být spojen se všemi kovovými částmi, které musí být zemněny a na které lze dosáhnout ze stanoviště obsluhy. Nebo kovové konstrukce stanovišť obsluhy (např. kovová deska nebo kovová mříž) a spojení s jakoukoliv kovovou částí, která musí být zemněna a které se lze z místa obsluhy dotknout. Nebo izolace stanovišť obsluhy od vzrůstu zemního potenciálu ve shodě s uznávaným zvláštním opatřením M 1.3. Pro vyrovnání potenciálu musí být propojeny kovové části, které musí být zemněny s kovovými částmi, na které lze dosáhnout ze stanoviště obsluhy.

M 4.2: Uložením horizontálního zemniče obklopujícího zemnicí soustavu ve tvaru uzavřeného kruhu. Uvnitř tohoto kruhu musí být uložena zemnicí mříž, jejíž jednotlivá

oka mají maximální rozměry 10m x 50m. V jednotlivých částech zařízení, které jsou umístěny vně kruhu a které jsou spojeny s uzemňovací soustavou je zapotřebí umístit zemnič pro odstupňování potenciálu ve vzdálenosti cca 1m a hloubce cca 0,2 m (např. u stožárů osvětlení, které jsou spojeny s uzemňovací soustavou ochrannými vodiči).

4.1.2 Stanovení dovoleného dotykového napětí při použití přídavné rezistance

Dle [3] se hodnota dovoleného dotykového napětí při použití přídavné rezistance stanoví:

$$U_{STp} = U_{Tp} + (R_{a1} + R_{a2}) \cdot I_B = U_{Tp} + (R_{a1} + 1,5 m^{-1} \cdot \rho_s) \cdot I_B \quad (4.1)$$

kde je R_{a1} přídavná rezistance (např. obuvi) [Ω]

R_{a2} rezistance země vůči stanovišti [Ω]

ρ_s rezistivita půdy v povrchové vrstvě u zařízení [Ωm]

I_B proud procházející lidským tělem [A]

Proud procházející lidským tělem se určí ze vztahu:

$$I_B = \frac{U_{Tp}}{Z_B} \quad (4.2)$$

kde je U_{Tp} hodnota dovoleného dotykového napětí, určená z obrázku 1 podle doby trvání průtoku proudu [V]

Z_B celková impedance lidského těla. Určená z tabulky 4-2. podle hodnoty U_{Tp} [Ω]

Tabulka 4-2: Celková impedance lidského těla Z_B v závislosti na dovoleném dotykovém napětí U_{Tp} (platí pro proudovou dráhu ruka-ruka nebo ruka-noha):

Dotykové napětí U_{Tp} [V]	Celková impedance lidského těla Z_B [Ω]
25	3250
50	2625
75	2200
100	1875
125	1625
220	1350
700	1100
1000	1050

4.2 Popis funkcí vytvořeného programu

Program byl vytvořen v programu Microsoft Visual Studio 2005 a ke svému spuštění potřebuje mít v počítači nainstalovány knihovny Microsoft .NET Framework v minimální verzi 2.0. Výsledná verze programu obsahuje celkem 10 formulářů, jejichž funkce je vysvětlena v následujícím textu.

4.2.1 Formulář 1 – Start

Jedná se o úvodní obrazovku obsahující dvě tlačítka. První tlačítko (Spustit) odkazuje na druhý formulář. Druhé tlačítko (Konec) ukončuje spuštěný program. Vzhled 1. formuláře je na obrázku 4-3.

Obrázek 4-3: Formulář 1



4.2.2 Formulář 2 – Vstupní údaje

V tomto formuláři se nacházejí 4 pole, která je nutno vyplnit. Jsou to základní vstupní údaje, podle kterých se identifikuje zakázka, ke které výpočet patří a déle kdo a kdy výpočet provedl. Tato pole jsou nadepsány *Název stavby*, *Umístění stavby*, *Projektant a Datum*. Program neumožní pokračovat ve výpočtu dále, dokud nebudou všechna tato 4 pole vyplněna. Po vyplnění polí a stisknutí tlačítka *Dál>>* program pokračuje na 3. formulář. Vzhled 2. formuláře je na obrázku 4-4.

Obrázek 4-4: Formulář 2

The image shows a screenshot of a software window titled "Vstupní údaje" (Input data). The window has a standard Windows-style title bar with minimize, maximize, and close buttons. The main area of the window is a light gray color. It contains four text input fields, each preceded by a label: "Název stavby" (Building name), "Umístění stavby" (Building location), "Projektant" (Designer), and "Datum" (Date). The input fields are white with a thin gray border. Below these fields is a large, light gray button with the text "Dál >>" (Next >>).

4.2.3 Formulář 3 – Základní technické parametry

Tento formulář obsahuje řadu polí, jejichž vyplněním je definováno zadání pro následující výpočty. Všechna pole jsou vybavena popisem, která veličina a v jakých hodnotách má být v daném poli uvedena. Položky *Zemnič* a *Vedení* jsou vytvořeny pomocí ComboBoxů, tzn. že se při kliknutí na jednu z těchto položek objeví nabídka již předdefinovaných prvků, ze kterých si stačí kliknutím zvolit ten, který zadání nejlépe vyhovuje. Pokud se požadovaný prvek v nabídce nenachází, dojde po stisknutí prvku *..jiný..*, k zpřístupnění okna pro zadání nového prvku. Zvolením prvku z nabídky se vyplní i příslušné materiálové konstanty, které je ovšem možné uživatelem přepsat.

Na formuláři jsou ještě umístěna dvě tlačítka. První z nich (tlačítko *Zobrazit graf $U_d = f(t)$*) odkazuje program na formulář číslo 6. Druhé tlačítko (*Počítej>>*) slouží k provedení výpočtu zemního odporu uzemňovací sítě (viz vzorec 3.9), dimenzování zemniče na tepelnou odolnost a dimenzování uzemňovací soustavy z hlediska dovoleného dotykového napětí. Vzhled 3. formuláře je na obrázku 4-5.

Obrázek 4-5: Formulář 3

Základní technické parametry

3360	Plocha zemnicí mříže S [m ²]	18400	Počáteční symetrický zkratový proud jednopólového zkratu [A]
0,5	Doba zkratu t [s]		
60	Rezistivita půdy [Ω.m]	225	Dovolené dotykové napětí Ud [V]
Zobrazit graf Ud = f(t)			
Ocel žárově pozinkovaná - pásek Zemnič <i>Minimální rozměry zemniče (zajišťující mechanickou pevnost a odolnost proti korozi):</i> <i>Průřez [mm²]: 90 Tloušťka [mm]: 3</i>			
120	Průřez zemniče [mm ²]		
0,0038	Objemová tepelná kapacita materiálu zemniče Qc [J/°C.mm ³]		
0,000138	Rezistivita materiálu zemniče při 20 °C [Ω.mm]		
202	Převrácená hodnota teplotního součinitele odporu zemniče při 0 °C [°C]		
20	Počáteční teplota zemniče [°C]		
300	Konečná teplota zemniče [°C]		
110 kV - 185 AlFe - soudek - 1 lano Vedení			
0,60	Redukční činitel		Počítej >>

4.2.4 Formulář 4 – Výsledky dimenzování

V tomto formuláři je zobrazena vypočtená hodnota zemního odporu zemnicí sítě, výsledky dimenzování zemniče z hlediska tepelné odolnosti a výsledky dimenzování uzemňovací soustavy z hlediska dovoleného dotykového napětí. Dimenzování zemniče na tepelnou odolnost se provádí jednak podle vzorce 3.1, kdy se nepředpokládá rozdělení procházejícího proudu do více větví, a současně i podle vzorce 4.3, který se používá při rozdělení proudu do dvou větví (zemnicí síť je provedena ze dvou zemnicích pásků, které jsou paralelně spojeny).

$$A = \frac{\sqrt{I^2 \cdot 0,6^2 \cdot t_k}}{k_v} \quad (4.3)$$

Kde A je průřez zemniče [mm²]

I poruchový proud procházející zemničem [A]

t_k vypínací čas vypínacího přístroje [s]

k_v součinitel závislý na materiálu ochranného vodiče, na izolaci a na ostatních částech, na teplotě před zkratem a po zkratu [A.√s .mm⁻²]

Podle dosažených výsledků dimenzování formulář nabízí další možné cesty pokračování. Buď se mohou editovat parametry zadání (tlačítko << *Upravit vstupní parametry*) a tak pokračovat na formulář 5, nebo se dá připočíst hodnota přídatné rezistance (tlačítko *Použití přídatné rezistance*)

>>) a pokračovat tak na formulář 7, nebo se mohou použít uznávaná zvláštní opatření *M* (tlačítko *Použití přídatných opatření M >>*) a pokračovat tak na formulář 8. Poslední možností, která může být dostupná, je možnost *Dál* (tlačítko *Dál >>*), kterou program pokračuje na formulář 10. Tato možnost je přístupná jen pokud jsou přímo splněny všechny podmínky dimenzování. Vzhled 4. formuláře je na obrázku 4-6.

Obrázek 4-6: Formulář 4

Vypočtený zemní odpor, dimenzování na tepelnou odolnost, dimenzování na dovolené dotykové napětí

Zemní odpor uzemňovací soustavy: 0,459 Ω

Minimální průřez zemniče [mm²] při uvažování celkového proudu:
Minimální průřez zemniče: 184,225 mm² > Zvolený průřez zemniče: 120 mm²

Minimální průřez zemniče [mm²] při rozdělení proudu do dvou větví:
Minimální průřez zemniče: 110,535 mm² ≤ Zvolený průřez zemniče: 120 mm²

Podmínka dimenzování na tepelnou odolnost je splněna pokud se použije rozdělení proudu do dvou větví

Vzrůst potenciálu země: 3544,571 V > 4 * Dovolené dotykové napětí: 225 V

Není splněna podmínka dimenzování na dovolené dotykové napětí, je nutno upravit parametry zadání, anebo výpočet opakovat s použitím přídatné rezistance

<< Upravit vstupní parametry

Použití přídatné rezistance >>

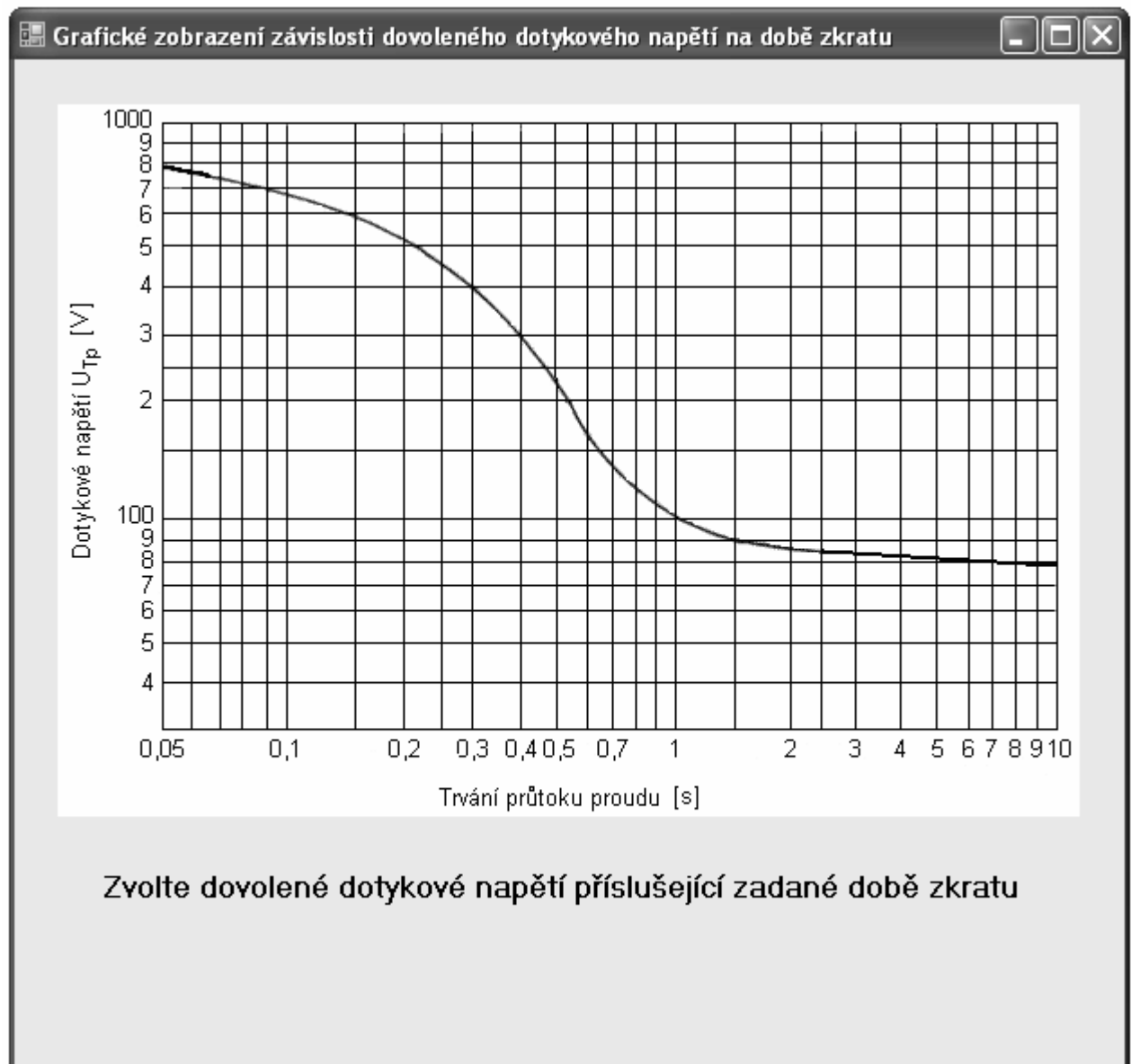
4.2.5 Formulář 5 – Editace parametrů zadání

Tento formulář slouží pro změnu parametrů zadání. Obsahuje stejná pole, jako jsou umístěna na formuláři 3 a stejný je také celkový vzhled těchto dvou formulářů (viz obrázek 4-5). Liší se od sebe pouze tím, že zatímco ve 3. formuláři jsou pole zprvu prázdná a hodnoty, které se do těchto polí napíší se následně uloží do příslušných proměnných v paměti, v 5. formuláři jsou naopak načítány hodnoty příslušných proměnných z paměti a pole jsou tedy hned po zobrazení tohoto formuláře vyplněna. Příslušná změna hodnot v polích v 5. formuláři tedy slouží k úpravě parametrů zadání z původního vstupního 3. formuláře (případně samotného 5. formuláře, je-li funkce editace parametrů použita více než jedenkrát). Funkce tlačítek umístěných v 5. formuláři je stejná, jako funkce tlačítek umístěných ve formuláři 3.

4.2.6 Formulář 6 – Dovolené dotykové napětí

Tento formulář slouží k pouhému zobrazení grafické závislosti dovoleného dotykového napětí na době průtoku poruchového proudu. Vzhled tohoto formuláře je na obrázku 4-7.

Obrázek 4-7: Formulář 6



4.2.7 Formulář 7 – Přídavná rezistance

Tento formulář se zobrazí, pokud je splněna podmínka dimenzování zemniče na tepelnou odolnost a není splněna podmínka dimenzování zemnicí sítě na dovolené dotykové napětí a uživatel zvolí možnost *Použití přídavné rezistance* (viz formulář 4). V tomto formuláři se nachází jedno pole, které slouží k zadání hodnoty použité přídavné rezistance. Po jeho vyplnění a následném stisknutí tlačítka *Výpočet* se ověří podmínka dimenzování na dovolené dotykové napětí při použití přídavné rezistance (viz kapitola 4.1.2). Podle dosaženého výsledku je možno dále pokračovat několika cestami, buď editací parametrů zadání na formulář 5 (tlačítko << *Editace parametrů zadání*), nebo použitím uznávaných zvláštních opatření *M* na formulář 8 (tlačítko *Použití přídavných opatření M* >>), nebo ukončením úspěšného dimenzování použitím tlačítka *Konec* >> a pokračováním na formulář 10, a nebo použitím poslední možnosti, kterou je opakování výpočtu s jinou hodnotou přídavné rezistance. Vzhled 7. formuláře je na obrázku 4-8.

Obrázek 4-8: Formulář 7

4.2.8 Formulář 8 – Uznávaná zvláštní opatření *M*

Tento formulář je vybaven 12 CheckBoxy, přičemž každý z nich představuje jedno z uznávaných zvláštních opatření *M* (viz kapitola 4.1.1). Použití příslušného opatření se provede jednoduchým zatržením CheckBoxu, který dané opatření představuje. Označení jednotlivých opatření je ve shodě s [3]. Použití jednotlivých opatření je na volbě projektanta, avšak pro jejich bližší popis a vysvětlení podmínek použití je možné vyvolat si podrobnou nápovědu (tlačítko *Nápověda*). Toto tlačítko odkáže program na formulář 9. Použitím tlačítka << *Editace parametrů*

zadání bude program pokračovat formulářem číslo 5 a stornuje se tak použití zvláštních opatření *M*. Poslední tlačítko *Konec >>* spouští formulář číslo 10. Volba zvláštních opatření *M* je plně v kompetenci projektanta a je na jeho zodpovědnosti vyhovět požadavkům daných normou. Tato část programu není řešena žádnými podmínkami, protože podmínky použití přídatných opatření dané normou se musí navíc ještě řídit i podle možností samotné budované elektroinstalace (podle toho, které části vůbec obsahuje). Vzhled 8. formuláře je na obrázku 4-9.

Obrázek 4-9: Formulář 8

4.2.9 Formulář 9 – Uznávaná zvláštní opatření *M* – nápověda

Tento formulář obsahuje text, ve kterém je vysvětlen princip a podmínky použití jednotlivých uznávaných zvláštních opatření *M*. Vzhled 9. formuláře je na obrázku 4-10.

Obrázek 4-10: Formulář 9

Popis uznávaných zvláštních opatření M

Podmínky použití uznávaných zvláštních opatření M

Trvání poruchy t_F [s]	Vzrůst zemního potenciálu U_g	U vnějších zdí a plotů kolem zařízení	Uvnitř instalací	
			Vnitřní instalace	Venkovní instalace
$t_F > 5$	$U_g \leq 4 \cdot U_{Tg}$	M1 nebo M2	M3	M4.1 nebo M4.2
$t_F \leq 5$	$U_g \leq 4 \cdot U_{Tg}$	M1 nebo M2	M3	M4.2

Dle tabulky se pro každou uvedenou část instalace vždy požaduje využití alespoň jednoho zvláštního opatření M:

M1 - opatření pro vnější stěny budov s vnitřní instalací
M 1.1: Použití nevodivého materiálu pro vnější stěny (například zdivo nebo dřevo) a zamezení dotyku uzemněných kovových částí z vnějšku.
M 1.2: Řízení potenciálu vodorovnými zemniči spojenými s uzemňovací soustavou ve vzdálenosti přibližně 1m od vnější stěny a v maximální hloubce 0,5m.
M 1.3: Izolace stanoviště obsluhy: vrstva izolačního materiálu má mít dostatečnou velikost k tomu, aby nebyl možný dotyk uzemněné vodivé části rukou z místa vně izolačního materiálu.

M2 - opatření pro vnější oplocení venkovních zařízení
M 2.1: Užití oplocení z nevodivých materiálů nebo plastem pokrytý drátěný plot
M 2.2: Při užití vodivého oplocení řízení potenciálu vodorovnými zemniči, spojenými s oplocením, ve vzdálenosti cca 1m vně oplocení a v maximální hloubce 0,5m.
M 2.3: Izolace stanoviště obsluhy v souladu s uznávaným zvláštním opatřením M 1.3

4.2.10 Formulář 10 – Konečné vyhodnocení výpočtu

V tomto formuláři jsou vypsány všechny důležité údaje, které s řešeným projektem souvisí. V horní části obrazovky jsou to vstupní údaje (Název stavby, projektant..), které byly vyplněny ve 2. formuláři. Pod nimi jsou základní technické údaje, popisující zadání celého projektu (plocha zemnicí mříže, průměr zemniče apod..), které byly zadány ve 3. formuláři (případně editovány v 5. formuláři). Ve spodní části obrazovky jsou vypsány výsledky, kterých bylo dosaženo během dimenzování soustavy (dovolené dotykové napětí při použití přídavné rezistance atd..). Pod výpisem všech těchto hodnot a informací je umístěno tlačítko *Uložit výsledky a ukončit aplikaci*, po jehož stisknutí budou tyto výsledky uloženy do textového dokumentu s názvem *Výsledky.txt* (viz obrázek 4-12), který je umístěn ve stejné složce jako .exe soubor tohoto programu. Vzhled 10. formuláře je na obrázku 4-11.

Obrázek 4-11: Formulář 10

Zadané a výsledné hodnoty

Název stavby: xxx
Umístění stavby: xxx
Projektant: xxx
Datum: xxx

Plocha zemnicí mříže: 3360 m²
Doba zkratu: 0,5 s
Zemnič: Ocel žárově pozinkovaná - pásek
Průřez zemniče: 120 mm²
- zvolený průřez vyhovuje jen při rozdělení proudu do dvou větví

Počáteční rázový zkratový proud: 18400 A
Rezistivita půdy: 60 Ω.m

Objemová tepelná kapacita materiálu zemniče Qc: 0,0038 J/°C.mm³
Rezistivita materiálu zemniče při 20 °C: 0,000138 Ω.mm
Převrácená hodnota teplotního součinitele rezistivity zemniče při 0 °C: 202 °C
Počáteční teplota vodiče: 20 °C
Dovolené dotykové napětí: 225 V
Vedení: 110 kV - 185 AlFe - soudek - 1 lano
Redukční činitel vedení: 0,6
Přidavná rezistance: 8000 Ω

Konečná teplota vodiče: 300 °C

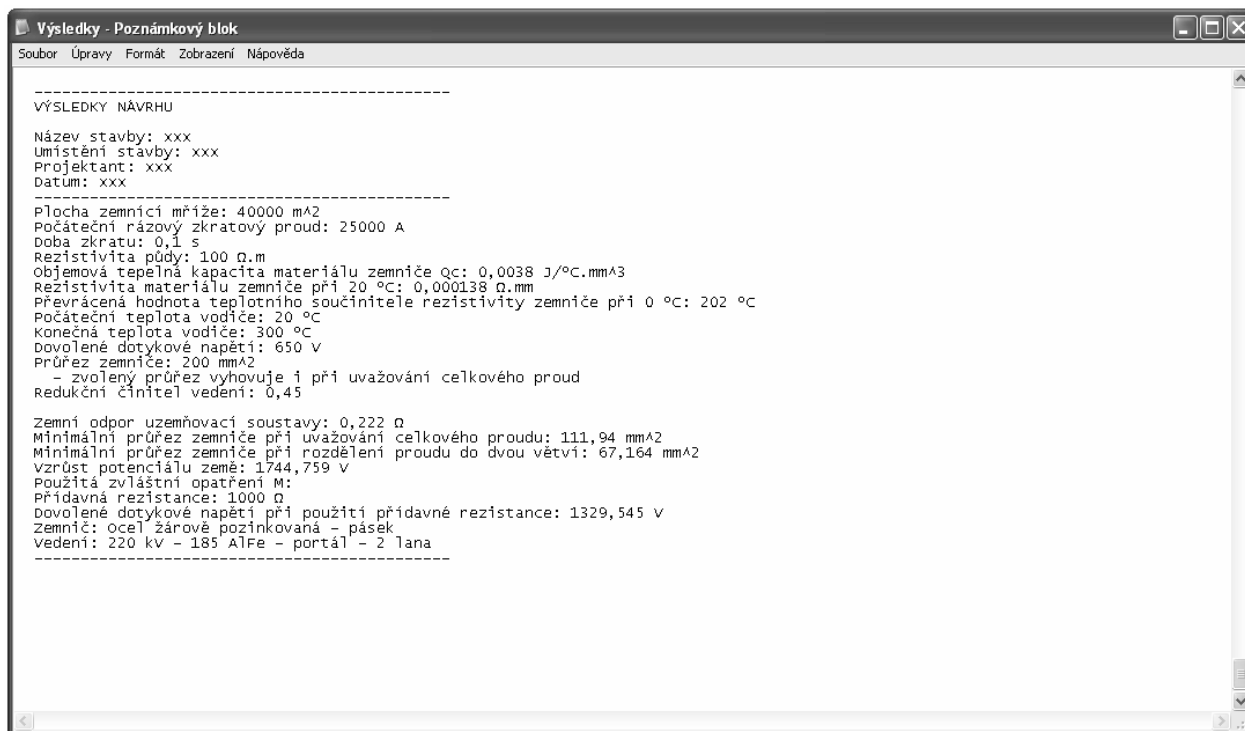
Dovolené dotykové napětí při použití přidavné rezistance: 1879,773 V
Použitá zvláštní opatření M:
Zemní odpor uzemňovací soustavy: 0,459 Ω
Minimální průřez zemniče při uvažování celkového proudu: 184,225 mm²
Minimální průřez zemniče při rozdělení proudu do dvou větví: 110,535 mm²

Uložit výsledky a ukončit aplikaci

4.2.11 Textový soubor s výsledky

Tento textový soubor se jmenuje *Výsledky.txt* a je umístěn ve stejné složce jako *.exe* soubor samotného programu. Stejně jako formulář 10 obsahuje výpis všech zadaných parametrů a dosažených výsledků. Dokument je proveden tak, že se při používání programu výsledky z jednotlivých projektů nepřepisují, ale řadí se za sebe. Jednotlivé projekty jsou však od sebe zřetelně odděleny a obsahují i potřebné identifikační údaje, takže je zajištěn dostatečný přehled a snadné vyhledávání v uložených hodnotách. Příklad takto vzniklého dokumentu je na obrázku 4-12.

Obrázek 4-12: Výsledný textový soubor



4.3 Použití programu pro výpočet konkrétního zadání

Parametry rozvodny

Následující návrh uzemňovací soustavy se týká transformovny 110/22 kV. Půdorys této stanice je zobrazen v příloze A. Oblast této rozvodny je ohraničena oplocením o stranách 56 x 60 m. Z důvodu co nejlepší účinnosti uzemnění se tato plocha co nejvíce využije pro umístění zemnicí mřížové sítě. Mřížovou sítí se průběžně podélně a příčně propojí základy nosných ocelových konstrukcí a podpěr. Situační schéma takto vzniklé zemnicí mříže je zobrazeno v příloze B. Celková rozloha zemnicí mříže je tedy 3360 m². Sít' je provedena se základními oky 4 x 8 m. V oblastech, kde je prozatím tzv. prostorová rezerva, jsou oka ještě větší. K zahuštění sítě dochází až při instalaci nových zařízení v těchto oblastech. K uzemnění má být použito ocelového pozinkovaného pásu FeZn s profilem 30 x 4 mm. Sít' bude instalována v hloubce 0,8 m, přičemž hodnota zde naměřené rezistivity půdy je 60 Ω.m. Další známé parametry týkající se rozvodny jsou frekvence napětí $f = 50$ Hz; zkratový výkon $S = 3500$ MVA; počáteční symetrický zkratový proud jednopólového zkratu $I_{k1}'' = 18,4$ kA; čas vybavení ochrany $t_k = 0,5$ s a vedení 110 kV je umístěno na stožáru do tvaru soudku s jedním zemnicím lanem AlFe o průřezu 185 mm².

Zápis technických parametrů rozvodny do programu

Zadání potřebných parametrů z předchozího odstavce se provádí do příslušných polí ve 3. formuláři. Jednotlivým polím přísluší následující hodnoty:

Plocha zemnicí mříže [m^2]: 3360

Počáteční symetrický zkratový proud jednopólového zkratu [A]: 18400

Doba zkratu [s]: 0,5

Rezistivita půdy [$\Omega \cdot \text{m}$]: 60

Zemnič: Ocel žárově pozinkovaná – drát pro vodorovný zemnič

Vedení: 110 kV – 185 AlFe – soudek – 1 lano

Dále je nutno zadat následující hodnoty:

Počáteční teplota zemniče [$^{\circ}\text{C}$]: 20

Konečná teplota zemniče [$^{\circ}\text{C}$]: 300

Dovolené dotykové napětí [V]: 225

Následující pole se vyplnila automaticky v závislosti na zvoleném zemniči a vedení:

Objemová tepelná kapacita materiálu zemniče [$\text{J}/^{\circ}\text{C mm}^3$]: 0,0038

Rezistivita materiálu zemniče při 20 $^{\circ}\text{C}$ [$\Omega \cdot \text{mm}$]: 0,000138

Převrácená hodnota teplotního součinitele odporu zemniče při 0 $^{\circ}\text{C}$ [$^{\circ}\text{C}$]: 202

Redukční činitel: 0,6

Formulář č.3 vyplněný hodnotami z předchozího textu je zobrazen na obrázku 4-5.

Výpočet

Po stisknutí tlačítka *Počítej*>> se provede výpočet a zobrazí se následující výsledky dimenzování (grafické zobrazení je na obrázku 4-6):

Zemní odpor uzemňovací soustavy: 0,459 Ω

Minimální průřez zemniče při uvažování celkového proudu: 215,955 mm^2

Minimální průřez zemniče při rozdělení proudu do dvou větví: 110,535 mm^2

- Podmínka dimenzování na tepelnou odolnost je splněna pokud se použije rozdělení proudu do dvou větví

Vzrůst potenciálu země: 3544,751 V

- Protože tato hodnota je větší než 4 x dovolené dotykové napětí (225 V), není splněna podmínka dimenzování na dovolené dotykové napětí a k dispozici jsou dvě možnosti. Buď upravit vstupní parametry (parametry zemnicí sítě), nebo připočíst použití přídatné

rezistance. V tomto případě se uplatní 2. možnost a použije se přídavná rezistance o hodnotě $8000\ \Omega$ (z čehož přibližně $1000\ \Omega$ připadá na započítání vlivu obuvi a zbytek na použití vrstvy asfaltu). V tomto případě již soustava splňuje podmínku dimenzování na dovolené dotykové napětí.

Výsledky

Výsledky dimenzování spolu s výpisem vstupních parametrů jsou vyneseny ve formuláři č.10 (pro toto zadání je výsledný formulář zobrazen na obrázku. 4-11). Závěrečným zhodnocením tedy je, že je možné zadanou zemnicí síť použít. Musí však být splněny podmínky na použití přídavné rezistance a použití rozdělení zkratového proudu do dvou větví (tzn. že bude použito paralelního spojení dvou zemnicích pásků FeZn 30 x 4 mm, které jsou spolu spojeny po metru speciální spojkou).

5 ZÁVĚR

Uzemňování je jako samostatná problematika řešena řadou technických norem. V diplomové práci jsou popsány základní parametry, které je nutno při navrhování uzemňovacích soustav znát, a jejich vliv na výsledný návrh. Těchto parametrů se využije při tzv. dimenzování uzemňovacích soustav (tj. ověření vhodnosti navrženého systému z hlediska tepelné odolnosti, dodržení dovolených hodnot dotykových napětí, zajištění dostatečné korozivní odolnosti a mechanické pevnosti zemniče). Samotný postup dimenzování uzemňovacích soustav je v práci popsán v samostatné kapitole. Hlavním úkolem této práce bylo vytvořit počítačový program sloužící právě k dimenzování zemnicích sítí používaných v rozvodnách VVN. Algoritmus programu byl vytvořen dle postupu dimenzování uzemňovacích soustav uvedeného v [5]. Uživatelské rozhraní a všechny možnosti, které program nabízí, jsou popsány ve čtvrté kapitole. Tato kapitola také obsahuje popis použití programu při návrhu zemnicí sítě pro konkrétní rozvodnu, jejíž parametry jsou popsány v příslušné kapitole a příloze. Program samotný je umístěn na CD s elektronickou verzí této diplomové práce.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PNE 33 0000-4: Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny, 1.8.2003
- [2] Kočvara A.: Uzemňování elektrických zařízení, IN-EL Praha 1995
- [3] ČSN 33 3201: Elektrické instalace nad AC 1 kV, Český normalizační institut, Praha 2002
- [4] ČSN 33 2000-5-54: Elektrotechnické předpisy – Elektrická zařízení – Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení; Kapitola 54: Uzemnění a ochranné vodiče, Český normalizační institut, Praha 1995
- [5] PNE 33 0000-1: Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě, Čtvrté vydání, 1.1.2008
- [6] Orságová J.: Elektrické stanice a vedení, VUT Brno, 2006

Příloha A Půdorys rozvodny 110 kV

Viz soubor: Příloha A – Půdorys rozvodny 110 kV.dwg

Příloha B Navržený situační plán uzemnění

