



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PRAVDĚPODOBNOSTNÍ PŘÍSTUP PRO HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍCÍCH SOUSTAV

PROBABILISTIC APPROACH FOR EVALUATION OF THE SAFETY OF EARTHING SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

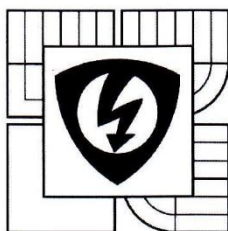
Tomáš Klíč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Topolánek, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Tomáš Klíč
Ročník: 3

ID: 164871
Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Pravděpodobnostní přístup pro hodnocení bezpečnosti zemních soustav

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis současně platného postupu pro hodnocení bezpečnosti zemních soustav.
2. Popis nového pravděpodobnostního přístupu pro hodnocení bezpečnosti zemních soustav a odlišností od stávajícího přístupu.
3. Definování a popis referenční testovací soustavy, která by byla uplatnitelná v celosvětovém kontextu pro prezentaci pravděpodobnostního přístupu.
4. Vyčíslení pravděpodobnosti úrazu elektrickým proudem v dané referenční soustavě pro vybrané provozní stavy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 24. 5. 2016

Vedoucí práce: Ing. David Topolánek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:



doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

KLÍČ, T. Pravděpodobnostní přístup pro hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2016, 64 stran.

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá zemními soustavami, konkrétně jejich hodnocením z hlediska bezpečnosti. V úvodu práce je popsána teorie zemnění, princip, důvod jejich využití a rozdíl mezi současným způsobem hodnocení zemních soustav z hlediska bezpečnosti před úrazem elektrickým proudem a novým přístupem. Další část práce je věnována popisu hodnocení zemních soustav z hlediska bezpečnosti resp. dovoleného dotykového a krokového napětí uplatňující se v současné době na základě norem ČSN a PNE. Další podstatnou částí je teoretický popis způsobu hodnocení bezpečnosti provozu zemních soustav z hlediska pravděpodobnosti, spočívající ve stanovení pravděpodobnosti úmrtí člověka, zahrnující pravděpodobnost poruchy a pravděpodobnost výskytu člověka v blízkosti hodnocené zemní soustavy v průběhu poruchy, a klasifikovat pravděpodobnost jako tolerovatelnou, středně tolerovatelnou nebo netolerovatelnou a je-li nutno, přidělit dané rizikové skupině odpovídající řešení pro zmírnění rizik. Součástí práce je samozřejmě praktická část. Pro navržený pravděpodobnostní přístup pak bude zpracován ukázkový příklad hodnocení vybrané zemní soustavy, který by byl podkladem pro jednání mezinárodní skupiny CIRED/CIGRE zaměřené na tuto problematiku.

KLÍČOVÁ SLOVA: zemní soustavy; hodnocení z hlediska bezpečnosti; pravděpodobnost výskytu poruchy; pravděpodobnost výskytu člověka v průběhu poruchy; nový přístup pro hodnocení bezpečnosti zemních soustav

ABSTRACT

This thesis deals with the grounding systems, namely their evaluation in terms of safety. The introduction describes the grounding theory, the principle reason for their use, and the difference between the current evaluation method of grounding systems in terms of security against electric shock and a new approach. Another part is devoted to describing the assessment of grounding systems in terms of safety, respectively. permissible touch and step voltages using currently based ČSN and PNE. Another essential part of the theoretical description of how to assess safety of grounding systems in terms of probabilities, consisting in determining the probability of death of a person, including the probability of failure and the probability of a man close to the rated grounding system during the disturbances, and classify the probability tolerable, moderately tolerable or intolerable and if necessary, assign the risk group appropriate solutions to mitigate the risks. The work, of course, the practical part. Designed for probabilistic approach will be processed illustrative example of evaluation chosen grounding system, which would be the basis for the negotiation of an international group CIRED / CIGRE focused on this issue.

KEY WORDS:

grounding system; evaluation of safety; probability of failure; the likelihood of a man during a disturbance; a new approach for assessing the safety of grounding systems

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ÚVOD	13
2 TEORIE ZEMNĚNÍ	14
2.1 TERMÍNY A DEFINICE	14
2.2 DRUHY ELEKTRICKÝCH SÍTÍ PODLE UZEMNĚNÍ	15
2.2.1 ŘEŠENÍ ZAPOJENÍ DTS	16
2.2.1.1 Rozdělená uzemnění.....	16
2.2.1.2 Spojená uzemnění.....	16
2.2.1.3 Minimální požadavky pro vzájemné propojení uzemňovacích soustav VN a NN	17
2.3 PROUDY A NAPĚTÍ V UZEMŇOVACÍ SOUSTAVĚ PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ	18
2.4 PROUDY ZEMNÍCH SPOJENÍ A ZKRATŮ V RŮZNÝCH ZAPOJENÍCH SÍTÍ	19
2.4.1 PROUD ZEMNÍHO SPOJENÍ V IZOLOVANÉ SÍTI.....	19
2.4.2 ZEMNÍ SPOJENÍ V NEÚČINNĚ UZEMNĚNÉ KOMPENZOVANÉ SÍTI.....	21
2.4.3 ZKRAT V SÍTI S NÍZKOIMPEDANČNÍM UZEMNĚNÍM STŘEDU	22
2.4.4 PORUCHOVÝ PROUD V KOMPENZOVANÉ SÍTI S DOČASNÝM PŘÍMÝM UZEMNĚNÍM UZLU	23
2.4.5 HODNOTY PROUDŮ ZEMNÍCH SPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ UZEMNĚNÍ	24
3 SOUČASNÝ PŘÍSTUP PRO HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍCH SOUSTAV	25
3.1 DOVOLENÉ DOTYKOVÉ NAPĚTÍ	25
3.2 NÁVRH UZEMŇOVACÍCH SOUSTAV Z HLEDISKA DOVOLENÉHO DOTYKOVÉHO NAPĚTÍ U_{Tp}	27
4 NOVÝ PŘÍSTUP PRO HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍCH SOUSTAV	28
4.1 RIZIKA	28
4.1.1 PŘEHLED PROCESŮ ŘÍDÍCÍCH RIZIKA	28
4.1.2 TYPY RIZIK.....	29
4.1.2.1 Dobrovolná a nedobrovolná rizika	29
4.1.2.2 Rizika a nenáhodná nebezpečí.....	29
4.1.2.3 Individuální a společenská rizika	30
4.1.2.4 Riziko poranění, poškození nebo úmrtí zvířat.....	30
4.1.3 HODNOCENÍ RIZIK.....	30
4.1.4 TOLERANCE INDIVIDUÁLNÍHO RIZIKA	30
4.2 NÁVRH	31
4.2.1 PŘEHLED POSTUPU PROCESU NÁVRHU	31
5 POROVNÁNÍ SOUČASNÉHO A NOVÉHO PŘÍSTUPU HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍCH SOUSTAV	36
6 ZPRACOVÁNÍ UKÁZKOVÉHO PŘÍKLADU HODNOCENÍ VYBRANÉ ZEMNÍ SOUSTAVY	37
6.1 OBECNÝ POSTUP ŘEŠENÍ PRAVDĚPODOBNOSTNÍHO PŘÍSTUPU HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍ SOUSTAVY	38
6.1.1 ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ	38
6.1.2 VÝPOČETNÍ ČÁST	38

6.1.3 VYHODNOCENÍ.....	38
6.2 PARAMETRY TESTOVACÍ SÍTĚ	39
6.2.1 POZNÁMKY KE KAPITOLE 6.2.....	40
6.3 STANOVENÍ HODNOTY ODPORU UZEMŇOVACÍ SOUSTAVY	41
6.4 VÝPOČTY PORUCHOVÝCH PROUDŮ V JEDNOTLIVÝCH TYPECH SÍTÍ, LIŠÍCÍCH SE UZEMNĚNÍM UZLU TRANSFORMÁTORU	44
6.4.1 VNITŘNÍ IMPEDANCE JEDNOTLIVÝCH ZAŘÍZENÍ SÍTĚ	44
6.4.2 CELKOVÁ IMPEDANCE A PORUCHOVÉ PROUDY V JEDNOTLIVÝCH SÍTÍCH, LIŠÍCÍCH SE UZEMNĚNÍM UZLU TRANSFORMÁTORU.....	46
6.4.2.1 Účinně uzemněná síť	47
6.4.2.2 Kompenzovaná síť.....	48
6.4.2.3 Síť kompenzovaná s dočasným přídavným rezistorem	49
6.4.2.4 Síť uzemněná přes rezistor	50
6.4.2.5 Síť izolovaná	51
6.5 VÝPOČET KOEFICIENTŮ Z VYPOČTENÝCH A ZADANÝCH HODNOT	53
6.6 VÝPOČET PRAVDĚPODOBNOTI ÚMRTÍ	55
7 ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ.....	60
7.1 OHODNOCENÍ UKÁZKOVÉHO PŘÍKLADU	60
7.2 PARAMETRY, KTERÉ MAJÍ MAJORITNÍ VLIV NA PRAVDĚPODOBNOT ÚMRTÍ.....	60
8 ZÁVĚR.....	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rozdělená uzemnění VN a NN stran [5]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2. Spojená uzemnění VN a NN stran [5]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3. Příklad pro proudy zemního spojení v transformovně [2].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4. Proud zemního spojení v síti IT [1]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 5. Jednoduchý případ pro výpočet poruchového proudu při dvojitém zemním spojení resp. zkratu.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 6. Zkrat v kompenzované síti [1].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 7. Zkrat v síti s nízkoimpedančním uzemněním středu [1].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 8. Zkrat v kompenzované síti s dočasným přímým uzemněním uzlu [1]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 9. Hodnota dovoleného dotykového napětí v závislosti na době působení [1]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 10. Návrh uzemňovacích soustav z hlediska dovoleného dotykového napětí U_{Tp}.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11. Řízení rizik</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 12. Návrh uzemňovací soustavy z hlediska dovoleného dotykového napětí [4]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 13. Návrh z hlediska pravděpodobnosti [4].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 14. Zjednodušený souhrn diagramů z Obr. 10. a Obr. 13.</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 15. Ilustrační schéma sítě</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 16. Schéma zděné kiosk trafostanice s betonovým podkladem</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 17. Koeficient využití v závislosti na počtu tyčí, kde L je délka jedné tyče, a je vzdálenost mezi tyčemi.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 18. Kompletní schéma sítě rozdělené do složek sousledné, zpětné a netočivé.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 19. Náhradní schéma netočivé složky impedance transformátoru se třemi vinutími</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 20. Netočivé schéma impedance s uvažováním výše popsaných podmínek.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 21. Schéma netočivé složky soustavy účinně uzemněné.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 22. Schéma netočivé složky kompenzované sítě.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 23. Schéma netočivé složky soustavy kompenzované s přidavným rezistorem</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 24. Schéma netočivé složky soustavy uzemněné přes odporník</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 25. Schéma netočivé složky izolované sítě</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 26. Hodnota dovoleného dotykového napětí v závislosti na době působení [1]</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 27. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na procentuálním přeneseném potenciálu z VN na NN</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 28. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na odporu poruchy.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 29. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na rezistivitě půdy</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 30. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na kombinacích ρ_e, R_F a U_{TNN}/U_{TVN}.....</i>	<i>62</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Tabulka požadavků pro spojení uzemňovacích soustav VN a NN [1]</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2. Hodnoty proudů zemních spojení jednotlivých typů uzemnění [1]</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 3. Dovolené dotykové napětí a proud tělem v závislosti na době trvání poruchy</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 4. Limity pravděpodobnostního individuálního úmrtí [4]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 5. Limity pravděpodobnosti individuálního úmrtí [4]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6. Statistika poruch v sítích s různým uzemněním uzlu transformátoru</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7. Výskyt poruchy na jedné DTS za rok respektující opětovné zapnutí</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 8. Hodnoty poruchových proudů jednotlivých typů uzemnění uzlu a jejich vypínací časy</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 9. Uvažované scénáře, při kterých by mohlo dojít k úrazu elektrickým proudem</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 10. Výsledky pravděpodobnosti úmrtí člověka v případě kompenzované sítě</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 11. Limity pravděpodobnosti individuálního úmrtí [4]</i>	<i>59</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ΔP	Celkové ztráty ve vinutí při jmenovitém proudu	(W)
π	Číslo $\pi = 3,14$	(-)
ρ_E	Rezistivita půdy	(Ωm^{-1})
BF	Dráha proudu ruka-noha	(-)
C_0	Kapacita vedení k zemi	(F)
CRF	Redukční faktor náhody	(-)
DTS	Distribuční transformační stanice	(-)
f	Frekvence	(Hz)
f_d	Délka trvání poruchy	(s)
f_n	Počet poruch za jeden rok	(-)
f_{noz}	Počet poruch za jeden rok respektující opětovné zapnutí	(-)
HF	Činitel proudu srdce	(-)
I_B	Proud tělem	(A)
I_C	Kapacitní proud	(A)
I_E	Proud do země	(A)
I_F	Proud zemního spojení	(A)
I_L	Kompenzační proud	(A)
$I_{Přid}$	Přídavný rezistor vyjádřený proudem	(A)
I_r	Proudové odlehčení uzemňovací soustavy	(A)
I_R	Činný proud	(A)
I_{RES}	Residuální proud	(A)
I_{k_3p}	Počáteční symetrický zkratový proud L-L-L	(A)
I'^{c}_{kEE}	Počáteční symetrický zkratový proud	(A)
I'^{c}_{k1}	Zkratový proud	(A)
K_n	Koeficient respektující součin f_{noz} a f_d	(-)
l	Délka poruchového přívodu	(km)
$l\%$	Pozice hodnocené DTS na poruchovém přívodu	(%)
L	Indukčnost tlumivky	(H)
OZ	Opětovné zapnutí	(-)
p_d	Délka výskytu člověka	(s)
p_n	Počet dotyků člověka za rok	(rok)

$P_{náhoda}$	Pravděpodobnost úmrtí	(-)
r	Redukční faktor	(-)
R_0	Netočivá složka rezistence	(Ω)
R_1	Sousledná složka rezistence	(Ω)
R_{0K}	Netočivá složka rezistence přívodu na jeden kilometr	(Ω)
R_{1K}	Sousledná složka rezistence přívodu na jeden kilometr	(Ω)
R_d	Dodatečná hodnota odporu (obuv)	(Ω)
R_{EB}	Zemní rezistence základny zemnicího systému	(Ω)
R_{EK}	Hodnotu zemního odporu od vzoru kruhové zemnicí elektrody s D_{ekv}	(Ω)
R_F	Odpor poruchy	(Ω)
R_K	Rezistence přívodu na jeden kilometr	(Ω)
$R_{DTS+PEN}$	Rezistence společné uzemňovací soustavy, paralelní součet R_{DTS} a R_{PEN}	(Ω)
R_p	Odpor poruchy (R_{DTS} nebo $R_{DTS+PEN}$)	(Ω)
$R_{příd}$	Rezistence přídavného odporu	(Ω)
$R_{svod,tlum}$	Činný odpor svodu a zhášecí tlumivky	(Ω)
R_t	Rezistence jedné zemnicí tyče	(Ω)
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon	(VA)
t_1	Čas vypnutí zkratu	(s)
t_2	Čas vypnutí záložní ochrany	(s)
T	Doba, pro kterou je pravděpodobnost počítána	(1 rok)
t_f	Trvání poruchy	(s)
$u_{k\%}$	Procentuální napětí nakrátko	(%)
U_E	Nárůst potenciálu zemniče	(V)
U_f	Fázové napětí	(V)
U_{n1}	Jmenovité napětí primární strany	(V)
U_{n2}	Jmenovité napětí sekundární strany	(V)
U_s	Sdružené napětí	(V)
U_T	Dotykové napětí	(V)
U_{TNN}	Dotykové napětí na straně VN	(V)
U_{TNN0}	Procentuální dotykové napětí přenesené ze soustavy na nástroj doteku	(V)
U_{TVN}	Dotykové napětí na straně VN	(V)
U_{TP}	Dovolené dotykové napětí	(V)
X_0	Netočivá složka reaktance	(Ω)

X_1	Sousledná složka reaktance	(Ω)
X_{0K}	Netočivá složka reaktance přívodu na jeden kilometr	(Ω)
X_{0T}	Netočivá složka reaktance transformátoru	(Ω)
X_{1K}	Sousledná složka reaktance přívodu na jeden kilometr	(Ω)
X_{1T}	Sousledná složka reaktance transformátoru	(Ω)
X_K	Reaktance přívodu na jeden kilometr	(Ω)
Z_0	Netočivá impedance zkratového obvodu	(Ω)
Z_{0line}	Netočivá složka impedance kabelu	(Ω)
Z_{0SN}	Netočivá složka impedance síťového napaječe	(Ω)
Z_{0TR}	Netočivá složka impedance transformátoru	(Ω)
Z_1	Sousledná impedance zkratového obvodu	(Ω)
Z_{1line}	Sousledná složka impedance kabelu	(Ω)
Z_{1SN}	Sousledná složka impedance síťového napaječe	(Ω)
Z_{1TR}	Sousledná složka impedance transformátoru	(Ω)
X_C	Kapacitní reaktance vůči zemi	(Ω)
X_L	Induktivní reaktance tlumivky	(Ω)
Z_E	Impedance uzemnění	(Ω)
Z_T	Impedance těla	(Ω)
Z_{PEN}	Impedance zemničů PEN	(Ω)
Z_{DTS}	Impedance zemniče DTS	(Ω)

1 ÚVOD

Důležitost a kvalita návrhu uzemňovacích soustav je často opomíjena, ať už se jedná o uzemňování soustav do 1000V, nad 1000V nebo ochranu před bleskem. Uzemnění je jeden z nejdůležitějších ochranných prvků, chrání před úrazem elektrickým proudem, a to živých i neživých částí elektrizační soustavy. Jak jistě víme, tak elektrický proud má od určité minimální hodnoty, velmi negativní vliv na lidský organismus. Tato skutečnost nás pronásleduje od počátku vzniku teorie elektrické energie. Návrh zemnicí soustavy a její hodnocení z hlediska bezpečnosti resp. z hlediska dovoleného dotykového a krokového napětí, se počítá dle uvedených postupů v normách ČSN a PNE. Tato práce pojednává o současném přístupu hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav nízkého napětí napájených soustavou vysokého napětí, zaměřena na uzemnění DTS a novém přístupu, který bere pro posouzení kvality zemnicí soustavy v úvahu i posouzení pravděpodobnosti výskytu poruchy a s následným usmrcením lidské osoby při jejím porovnání s obecně přijatelným rizikem úmrtí. V práci se řeší druhy elektrických sítí podle uzemnění, kde každé uzemnění má specifické rozdělení poruchových proudů, tzn. jiné hodnoty skutečného dotykového napětí. Dalšími tématy, na kterých je práce založena, je současný a nový přístup pro hodnocení bezpečnostních soustav, které jsou popsány v kapitolách 3. a 4. a porovnány v kapitole 5. Poslední částí práce je vyhotovení ukázkového příkladu hodnocení zadané sítě. Tato část se nachází v kapitole 6.

2 TEORIE ZEMNĚNÍ

Tato kapitola se bude věnovat hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav distribučních sítí, co to zemnění znamená, jak funguje a proč se využívá.

Zemnění je provedení nutných spojení všech přístrojů, zařízení, živých i neživých částí se zemí, aby měly stejný potenciál, jako země. Smyslem zemnění je:

- udržovat všechna zařízení, živé i neživé části na stejném potenciálu země
- chránit všechna zařízení proti účinkům atmosférických proudů, resp. bleskům, zkratovým proudům, nadproudům a přepětím.
- chránit lidi, zvířata před úrazem elektrickým proudem a majetek před negativními vlivy elektrického proudu.

Zemnění dělíme na dva typy:

- Pracovní uzemnění je spojení obvodu vedení elektrického proudu se zemí, pro ochranu před vyššími napětími a přepětími.
- Ochranné uzemnění je spojení neživých částí se zemí. Neživými částmi se myslí např. kryty zařízení, kostry, nosné konstrukce atd. Neživé části se dostávají pod napětí při poruše. Ochranným uzemněním se zabráňuje vzniku napětí na neživých částech.

Návrh zemnicí soustavy vychází z parametrů, které jsou dány normami ČSN a PNE:

- požadovaný zemní odpor
- maximální napětí na uzemňovací soustavě
- maximální dotykové a krokové napětí
- mechanická a korozní odolnost

2.1 Termíny a definice

Elektrické zařízení – zařízení používané k výrobě, přeměně, přenosu, rozvodu nebo užití elektrické energie, jako jsou elektrické stroje, transformátory, spínací a řídicí zařízení, měřicí přístroje, ochrany, soustavy vedení, elektrické spotřebiče.

Referenční zem – část Země považována za vodivou mimo oblast vlivu uzemňovací soustavy, jejíž elektrický potenciál je považován za rovný nule.

Zemnič – vodivá část, která je ve vodivém styku se Zemí a která může být uložena v daném vodivém prostředí např. betonu nebo koksu.

Uzemňovací přívod – vodič, který zajistí vodivou dráhu nebo část vodivé dráhy mezi daným bodem v síti, v instalaci nebo zařízení a zemničem.

Vodič ochranného pospojování – ochranný vodič zajišťující vyrovnání potenciálu.

Uzemňovací soustava – soubor prvků a spojů, které je nutné pro samotné nebo společné uzemnění elektrických zařízení.

Elektrická rezistivita půdy ρ_E – specifický odpor typického vzorku země

Odpor zemniče k zemi R_E – reálná část impedance k zemi

Impedance uzemnění Z_E – impedance při daném kmitočtu mezi daným bodem soustavy nebo instalaci nebo v zařízení a referenční zemí.

Nárůst potenciálu zemniče U_E – napětí mezi uzemňovací soustavou a referenční zemí

Potenciál – napětí mezi bodem na povrchu země a referenční zemí

Dotykové napětí U_T – napětí mezi vodivými částmi, kterých se člověk nebo zvíře dotýká současně

Krokové napětí U_S – napětí mezi dvěma body zemského povrchu vzdálenými od sebe 1 m, vzdálenost 1 m je považována za délku kroku člověka.

Neživá část – vodivá část, která není součástí elektrické instalace a která může přivést elektrický potenciál, obvykle potenciál místní země.

Proud zemního spojení I_F – proud, který protéká z hlavního obvodu do země nebo do uzemňovací části v místě poruchy (místo zemního spojení)

Proud do země I_E – proud tekoucí do země přes impedanci k zemi

Redukční faktor r – rozsah odlehčení uzemňovací soustavy pomocí např. uzemňovacích lan

Vyrovňovací proud uzlu transformátoru – část proudu zemního spojení, která protéká zpátky do uzlu transformátoru kovovými částmi nebo uzemňovací soustavou bez výboje přes tlumivku. [1]

2.2 Druhy elektrických sítí podle uzemnění

Každá distribuční síť se rozlišuje podle způsobu uzemnění středu uzlu soustavy. Typ elektrické distribuční sítě je značený třemi až čtyřmi písmeny. Význam jednotlivých písmen v označení sítě:

První písmeno říká, zda je uzel zdroje uzemněn, či nikoliv

T – spojení uzlu zdroje sítě se zemí

I – uzel zdroje je izolován nebo uzemněn přes impedanci

Druhé písmeno souvisí se způsobem uzemnění neživých částí

T – neživé části jednotlivých zařízení zapojených v síti jsou uzemněny

N – neživé části všech zařízení připojených v síti jsou pospojovány ochranným vodičem který je vyveden do uzlu zdroje

Třetí, popřípadě čtvrté písmeno jsou písmena doplňková

S (separate) – v síti TN je ochranný vodič PE veden odděleně od nulového vodiče N

C (combine) – znamená, že ochranný PE a nulový vodič N v síti TN jsou zkombinovány, spojeny do jednoho vodiče PEN

C-S – druh sítě TN, ve kterém se objevují oba předešlé typy

V České republice se soustavy jednotlivých hladin napětí provozují následujícími způsoby uzemnění uzlu soustavy:

NN (400V) – většina distribučních sítí NN se provozuje jako síť TN-C-S.

VN (6-35kV) – izolovaná síť IT, neúčinně uzemněná- většinou kompenzovaná

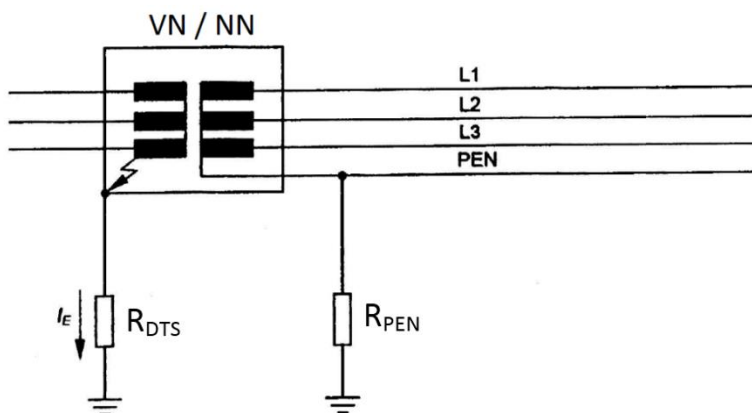
VVN (110-400kV) – účinně uzemněná síť

2.2.1 Řešení zapojení DTS

Distribuční transformační stanice (DTS) se zapojují buď se společnou, nebo oddělenou uzemňovací soustavou. Jedná se zkrátka o způsob uzemnění uzlu sekundární strany transformátoru. V bezporuchovém stavu se způsob uzemnění nijak neprojeví, avšak nastává zásadní rozdíl v případě vzniku poruchového proudu. Uvedeme si dva základní případy TN sítě.

2.2.1.1 Rozdělená uzemnění

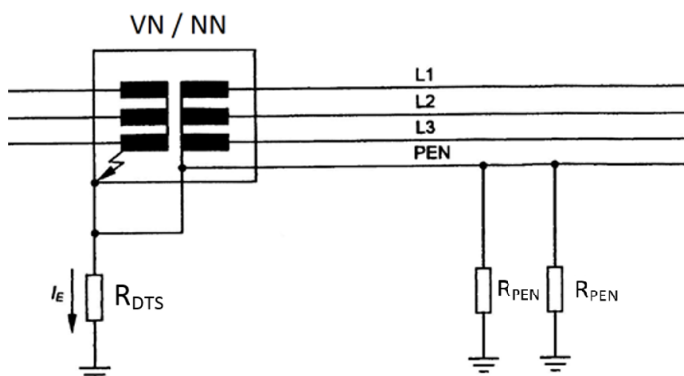
V prvním případě se jedná o rozdělená uzemnění VN a NN stran, kde PEN vodič je uzemněn nezávisle na uzemnění DTS. Jelikož je PEN vodič od tohoto uzemnění oddělen, tak v případě poruchy na VN straně neprochází stranou NN poruchový proud, tudíž je NN strana, co se dotykového napětí týče, bezpečná. V případě poruchy na NN straně protéká proud zemněním PEN vodiče i zemněním DTS. [2]



Obr. 1. Rozdělená uzemnění VN a NN stran [5]

2.2.1.2 Spojená uzemnění

Ve druhém případě se jedná o spojená uzemnění. Při vzniku poruchového proudu na VN straně protéká proud uzemněním DTS a všemi uzemněními PEN vodiče, což může způsobit vysoká dotyková a kroková napětí na NN straně. Při vzniku poruchového proudu na NN straně, se poruchový proud stává zkratem, který v DTS způsobí vypnutí pomocí pojistek. Jelikož nedochází k průchodu proudu uzemňovací soustavou, tak nedojde ke vzniku dotykového ani krokového napětí. [2]



Obr. 2. Spojená uzemnění VN a NN stran [5]

2.2.1.3 Minimální požadavky pro vzájemné propojení uzemňovacích soustav VN a NN

Pokud se uzemňovací soustavy VN a NN nachází ve vzájemné blízkosti, tak se to řeší dvěma způsoby, a to propojením, nebo oddělením uzemňovacích soustav. V případě oddělených soustav musí být od sebe vzdálené minimálně 20m. Tato hodnota závisí na struktuře půdy.

Požadavky na společnou uzemňovací soustavu jsou uvedeny v Tab. 1. V normálních případech platí $X=2$. Vyšší hodnota veličiny X se může použít v případě, je-li PEN vodič přizemněn. U určitých typů půdy může X dosahovat až hodnoty 5. V případě, kdy je PEN nebo nulový vodič sítě NN spojen se zemí pouze v uzemňovací soustavě VN, tak platí $X=1$. [1]

Tab. 1. Tabulka požadavků pro spojení uzemňovacích soustav VN a NN [1]

Typ sítě nn	Požadavky na meze nárůstu potenciálu zemniče (EPR)		
	Dotykové napětí	Napěťové namáhání	
		Doba trvání poruchy $t_r \leq 5 \text{ s}$	Doba trvání poruchy $t_r > 5 \text{ s}$
TT	Nemá význam	$EPR \leq 1\,200 \text{ V}$	$EPR \leq 250 \text{ V}$
TN	$EPR \leq X \cdot U_{Tp}$	$EPR \leq 1\,200 \text{ V}$	$EPR \leq 250 \text{ V}$

V každém případě musí být dodržena kritéria dovolených dotykových napětí a zavlečených potenciálů.

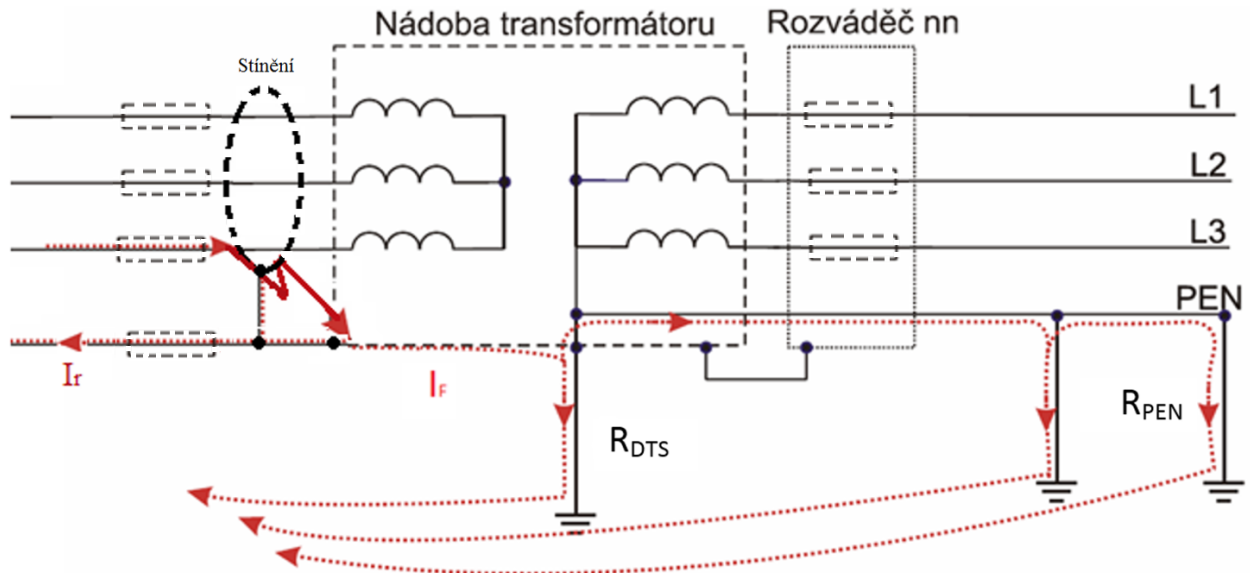
Při neuvažování činitele X se jedná o spojení PEN vodiče NN a uzemnění systému VN pouze v transformační stanici. Při uvažování činitele X jde o spojená PEN se zemí v několika místech, aby se snížilo napětí ovlivňující uzel.

Dalším kritériem je splnění napěťového namáhání. Pokud budou uzemnění VN a NN spojena, tak v případě poruchy dochází k vysokým proudům tekoucí uzemněním DTS a všemi PEN vodiči na straně NN, což má za následek vznik vysokého napětí, které by mohlo poškodit izolaci a zařízení. [1]

Další podmínkou je splnění maximálního dovoleného odporu uzemňovací soustavy. Musí platit, že odpor pro samotný uzel bude maximálně 5 Ω . V případě propojení uzemnění VN a NN strany musí být výsledný odpor maximálně 2 Ω .

2.3 Proudové rozdělení poruchového proudu při zemním spojení

Proudové rozdělení poruchového proudu je důležité pro posouzení rizika výskytu nebezpečného dotykového a krokového napětí. Na praktickém příkladu si ukážeme a vysvětlíme proudy a napětí při zemním spojení v transformovně, viz. Obr. 3. Jako praktický příklad jsem vybral DTS se společným zemněním, protože je to nejrozšířenější provedení DTS.



Obr. 3. Příklad pro proudy zemního spojení v transformovně [2]

Představme si, že na elektrizační soustavě vznikne poruchový proud, viz Obr. 3. Tento poruchový proud je reprezentován proudem označený ve schématu jako I_F . Poruchový proud vznikl na straně VN. Jelikož má elektrizační soustava společné uzemnění pro VN a NN stranu, tak poruchový proud I_F poteče do země přes zemnič s odporem R_{DTS} a také přes zemniče kabelu PEN reprezentovanými odpory R_{PEN} . Mohou nastat dva případy, a to uvažování redukčního činitele r , či neuvažování redukčního činitele r tzn. $r = 1$. Ve většině případů se činitel r uvažuje, kvůli omezení zatížení uzemňovací soustavy a omezení krokového a dotykového napětí, proto budeme uvažovat tento případ. Redukční činitel (faktor) r popisuje, do jaké míry je uzemňovací soustava od poruchového proudu odlehčena. U soustav ZVN a VVN se odlehčení dosáhne pomocí zemnicích lan, u VN a NN soustav se odlehčení dosáhne spojením místní zemnicí soustavy s dalšími uzemněními, např. stíněním vn kabelu.

Hodnota odlehčení se spočítá pomocí vzorce:

$$I_r = I_F * (1 - r) \quad (A; A, -) \quad (2.1)$$

Reálný proud tekoucí do země I_E se tedy vypočítá podle vztahu:

$$I_E = I_F - I_r = r * I_F \quad (A; A, A) \quad (2.2)$$

Proud tekoucí do země vyvolá rozdíly potenciálu mezi místní a referenční zemí. Velikost potenciálu zemniče se vypočítá podle vzorce:

$$U_E = I_E * Z_E \quad (V; A, \Omega) \quad (2.3)$$

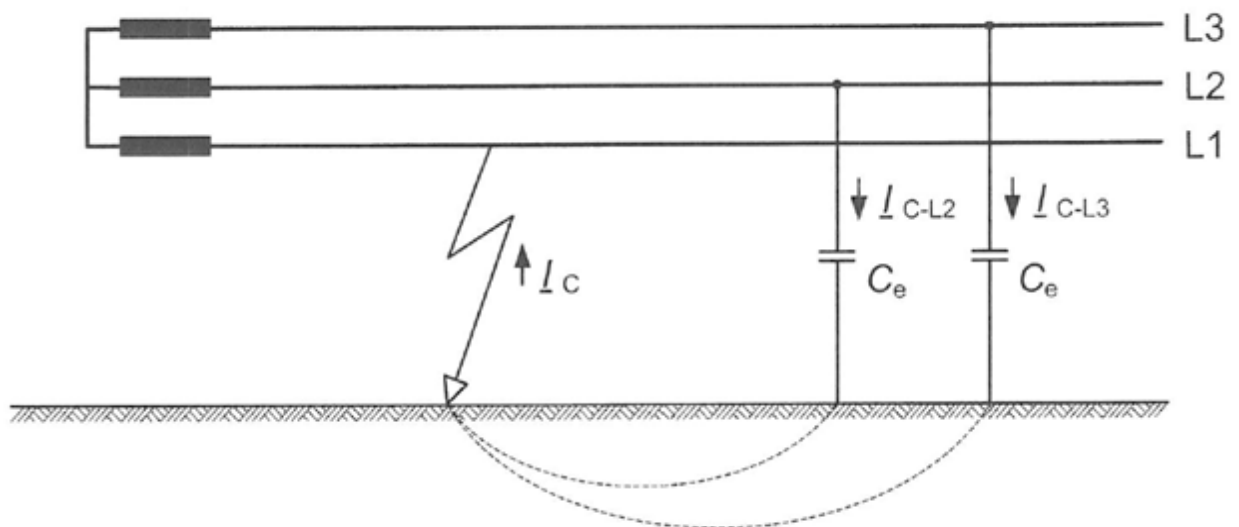
Nárůst potenciálu zemniče závisí na velikosti poruchového proudu I_E a impedanci Z_E . Impedance Z_E zahrnuje odpor všech zemničů a odpor půdy. Velikost poruchového proudu závisí na způsobu uzemnění a typu poruchy. Velikost celkové zemní impedance zemničů se počítá podle vzorce:

$$Z_E = \frac{1}{\frac{1}{Z_{DTS}} + n * \frac{1}{Z_{PEN}}} \quad (\Omega; \Omega, -, \Omega) \quad (2.4)$$

2.4 Proudů zemních spojení a zkratů v různých zapojeních sítí

Následující kapitola popisuje různé druhy uzemnění sítí. Každý druh uzemnění má jiné rozložení proudu zemního spojení či zkratu, tzn. i jiný nárůst potenciálu zemniče. Zemní spojení je jednofázová porucha v elektrizační soustavě, kde uzel sítě je izolován od země nebo nepřímo uzemněn přes impedanci. Zkrat je spojení mezi dvěma fázemi nebo fází se zemí v soustavě s uzemněným uzlem.

2.4.1 Proud zemního spojení v izolované síti



Obr. 4. Proud zemního spojení v síti IT [1]

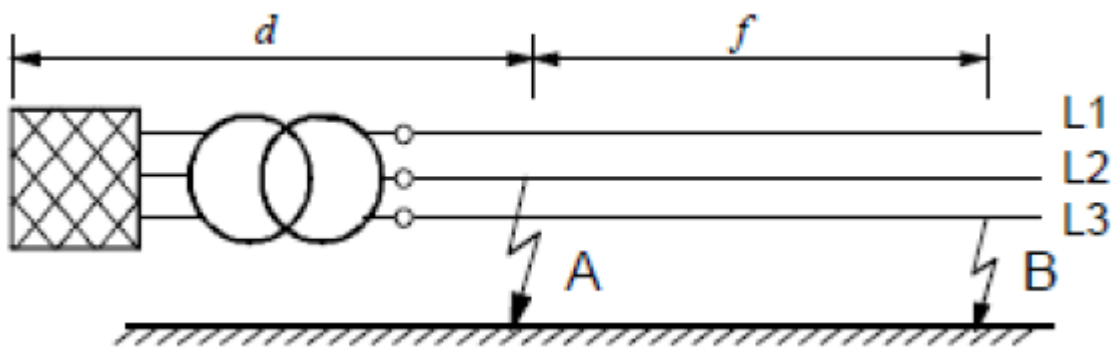
Uzel sítě je spojen čistě teoreticky, takže se uvažuje spojení se zemí přes nekonečně velkou impedanci. Všechny živé části obvodu jsou izolovány od země, nejsou uzemněny přímo ani přes impedanci a všechny neživé části jsou uzemněny. Při zemním spojení jedné fáze nenastává zkrat, nýbrž zemní proud tzv. proud kapacitní, protože mezi uzlem a zemí je kapacitní impedance. Kapacitní resp. zemní proud způsobuje přepětí v síti, jiskření, výboje, může dokonce dojít i k opálení vodičů a zničení izolace. V případě delšího působení zemního proudu může dojít k požárům nebo vznikům zkratů. Pokud mají zemniče uzemňovací soustavy vyšší zemní odpor, tak následkem vysokého zemního proudu může dojít ke snížení bezpečnosti před úrazem elektrickým proudem. Velikost poruchového proudu závisí na velikosti kapacity vedení k zemi. Velikost této kapacity je ovlivněna druhem vedení (kabelové, vzdušné) a délkou vedení. Pro eliminaci výše popsaných důsledků se soustava řeší následujícím způsobem viz. Obr. 6. [3] Vzorce pro výpočet zemního a zkratového proudu, popsané níže, byly převzaty z normy IEC 60909-3.

Pro výpočet poruchového proudu vzniklého spojením jedné fáze se zemí v třífázové síti IT:

$$I_C = j3 * U_f * \omega * C_0 = 3 * U_f * 2 * f * \pi * C_0 \quad (A; V, Hz, F) \quad (2.5)$$

Pro výpočet poruchového proudu vzniklého spojením dvou fází se zemí v třífázové síti IT:

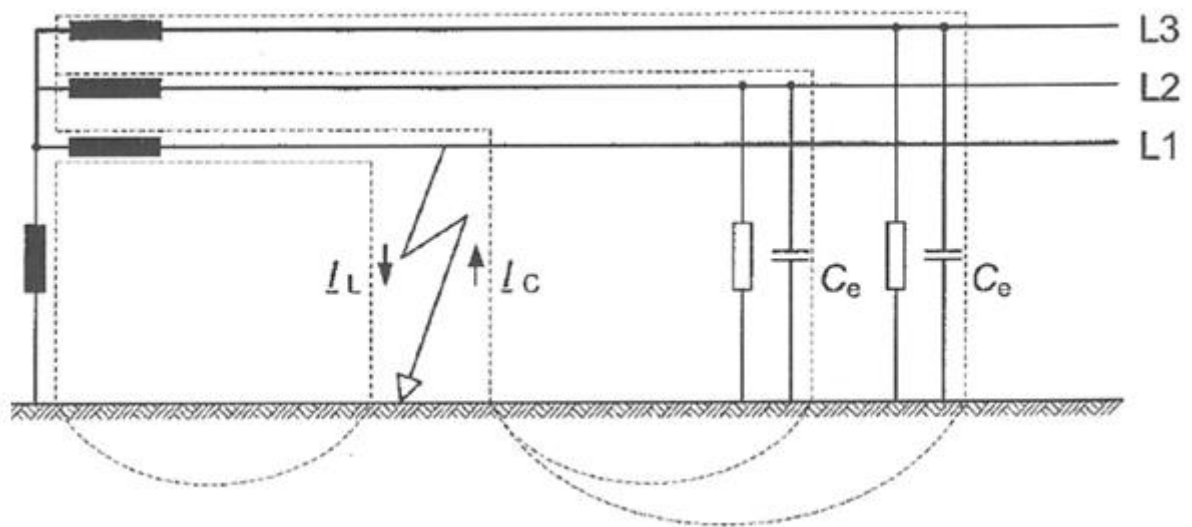
$$I_F = I''_{KEE} = \frac{c * 3 * U_f}{|(6\bar{Z}_{(1)d} + 2\bar{Z}_{(1)f} + \bar{Z}_{(0)f})|} \quad (A; -, V, \Omega, \Omega, \Omega) \quad (2.6)$$



Obr. 5. Jednoduchý případ pro výpočet poruchového proudu při dvojitém zemním spojení resp. zkratu

Kde I''_{KEE} je počáteční symetrický zkratový proud tekoucí do země v uzemňovací soustavě při dvojitém zemním spojení, což v izolované soustavě představuje kovový zkrat. Dvojité zemní spojení představuje v tomto typu uzemnění nejhorší možný případ poruchového proudu, který může nastat. Bod A v Obr. 5. označuje napájecí stanici a bod B místo, kde se nachází hodnocená uzemňovací soustava.

2.4.2 Zemní spojení v neúčinně uzemněné kompenzované síti



Obr. 6. Zkrat v kompenzované síti [1]

V sítích, viz. Obr. 6., kde nastane zemní spojení o velikosti větší, než 5A, se doporučuje jeho kompenzace. Nejčastějším způsobem kompenzace je zhášecí tlumivka, která se připojuje mezi uzel transformátoru a zem. Princip zhášecí tlumivky je patrný z Obr. 6. Vlivem fázového napětí mezi uzlem a zemí vznikne proud. Tento proud procházející zhášecí tlumivkou I_L je v protifázi s kapacitním proudem, takže se většina nebo celý kapacitní proud vykompenzuje. Poruchový proud se skládá z činné a jalové složky proudu, takže po kompenzaci stále zůstává reziduální proud, který se skládá buď čistě z činné složky proudu, nebo částečně z jalové složky, v případě neideální kompenzace. Tento typ uzemnění se používá v případech, kde nesmí dojít k odstavení dodávky elektrické energie. Zemní spojení v kompenzované síti může trvat tak dlouhou dobu, která je potřebná pro odstranění poruchy.

Pro výpočet poruchového proudu vzniklého spojením jedné fáze se zemí v třífázové síti IT:

$$I_C = j3 * U_f * \omega * C_0 = 3 * U_f * 2 * f * \pi * C_0 \quad (A; V, Hz, F) \quad (2.7)$$

Při uvažování činné složky zemního proudu, se výsledná velikost počítá podle vztahu:

$$I_F = I_R + j(I_C - I_L) \quad (A; A, A, A) \quad (2.8)$$

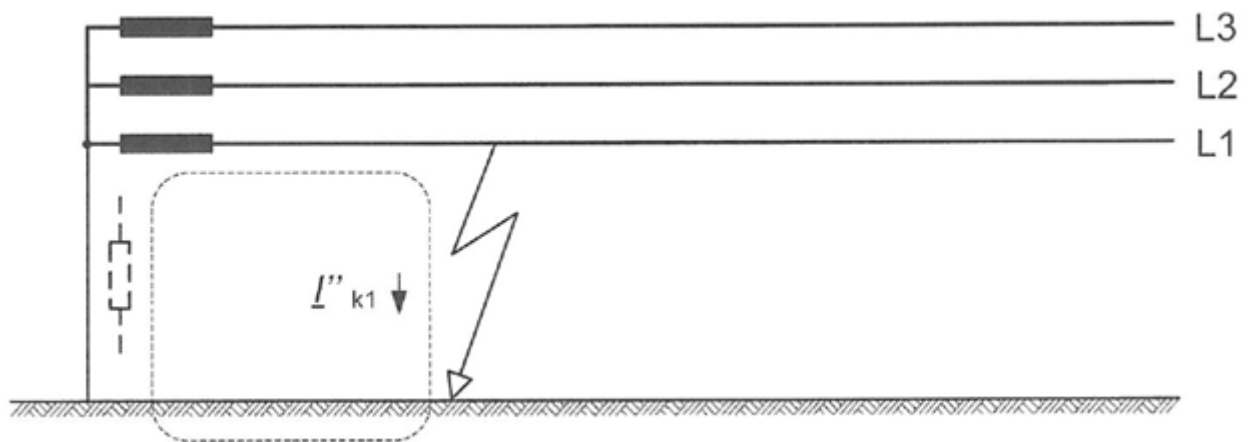
Pro výpočet proudu zemního spojení v solidně kompenzované síti (kde $I_C = I_L$) platí vztah:

$$I_F \cong I_C * 0,1 \quad (A; A) \quad (2.9)$$

V případě dvojitě zemní poruchy se hodnota poruchového proudu počítá stejným způsobem, jako v izolované síti bez kompenzace viz. kapitola 2.4.1

$$I_F = I''_{KEE} = \frac{c * \sqrt{3} * U_s}{(6\bar{Z}_{(1)d} + \bar{Z}_{(0)f} + \bar{Z}_{(0)f})} \quad (A; -, V, \Omega, \Omega, \Omega) \quad (2.10)$$

2.4.3 Zkrat v síti s nízkoimpedančním uzemněním středu



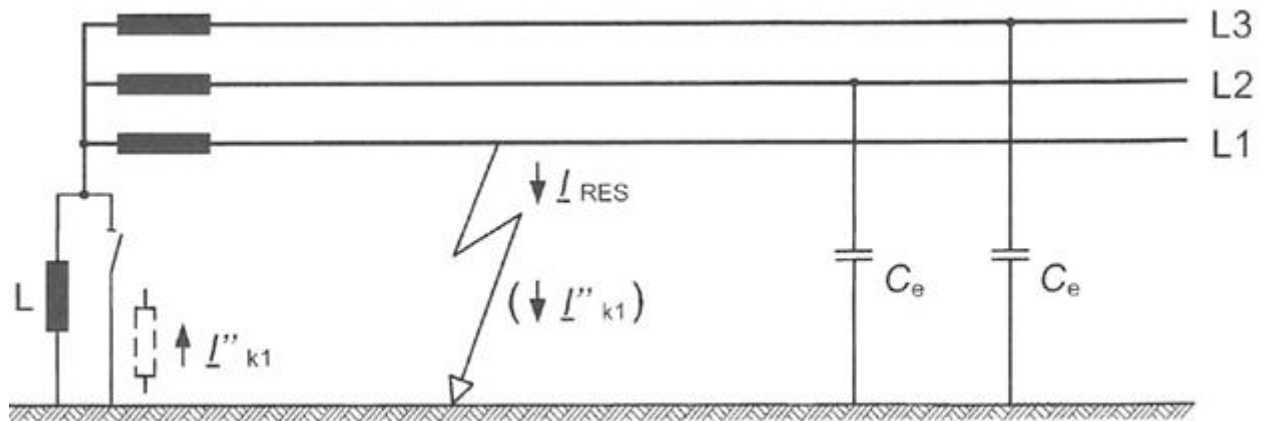
Obr. 7. Zkrat v síti s nízkoimpedančním uzemněním středu [1]

Jedná se o přímé uzemnění uzlu se zemí resp. účinně uzemněnou soustavu. V přímo uzemněných sítích mají poruchy jiný charakter, než v sítích izolovaných a neúčinně, resp. nepřímo uzemněných, projevují se zde jako zkraty. Kapacitní impedance mezi fází a zemí nemá na zkratový proud žádný vliv. Při vzniku zkratového proudu se zemí prochází proud přes zem a uzemňovací soustavu zpět do středu uzlu a následně dochází k automatickému odpojení od zdroje pomocí ochranných prvků. Při zkratu se v postižené fázi snižuje napětí a zvyšuje proud tzn., že v soustavách uzemněných tímto způsobem můžeme snadno zjistit vznik a místo poruchy. Velkou výhodou tohoto typu uzemnění jsou menší nároky na dimenzování izolace. Nevýhodou tohoto uzemnění jsou velké zkratové proudy, které mohou způsobit velká dotyková a kroková napětí. Zkratové proudy dosahují v případě ZVN a VVN až desítky kA.

Hodnota poruchového proudu při zkratu se vypočítá ze vztahu:

$$I_F = I''_{k1} = \frac{c * \sqrt{3} * U_s}{(2\bar{Z}_1 + \bar{Z}_0)} \quad (A; -, V, \Omega) \quad (2.11)$$

2.4.4 Poruchový proud v kompenzované síti s dočasným přímým uzemněním uzlu



Obr. 8. Zkrat v kompenzované síti s dočasným přímým uzemněním uzlu [1]

Výše uvedené zapojení Obr. 8., je kombinací kompenzované soustavy pomocí zhášecí tlumivky a soustavy přímo uzemněné přes odporník. U kompenzovaných sítí je obtížná detekce poruchy na postiženém vývodu. Pro snadnější detekci poruchy slouží automatické připojení nízké impedance, která po připojení zvýší činnou složku zkratového proudu. K automatickému připojení dojde po zjištění vzniku zkratového stavu. Pokud nedojde vlivem indukčního proudu ke kompenzaci kapacitního proudu na takovou hodnotu, aby uhasl, dojde k vyhledání postiženého vývodu, poruchy a k její nápravě. Níže uvedené vzorce popisují hodnotu proudu při poruše se sepnutým odporníkem, kdy do netočivé složky impedance musí být započteny nejen svody, ale i impedance odporníku a tlumivky. V ostatních případech je to klasická kompenzovaná síť.

Pro výpočet poruchového proudu vzniklého spojením jedné fáze se zemí:

$$I_F = \frac{c * \sqrt{3} * U_s}{(2\bar{Z}_1 + \bar{Z}_0)} \quad (A; -, V, \Omega) \quad (2.12)$$

Pro výpočet poruchového proudu vzniklého spojením dvou fází se zemí:

$$I_F = \frac{c * \sqrt{3} * U_s}{(6\bar{Z}_{(1)d} + \bar{Z}_{(0)f} + \bar{Z}_{(0)f})} \quad (A; -, V, \Omega, \Omega, \Omega) \quad (2.13)$$

Impedance tlumivky a odporníku:

$$X_{L0} = \frac{U_{vz}}{\sqrt{3} * (v + I_c)} \quad (\Omega; V, -A) \quad (2.14)$$

$$R_{příd0} = \frac{U_{vz}}{\sqrt{3} * I_R} \quad (\Omega; V, -A) \quad (2.15)$$

2.4.5 Hodnoty proudů zemních spojení jednotlivých typů uzemnění

Následující tabulka, Tab. 2., uvádí vzorce pro výpočet hodnot proudů a potenciálů zemniců zemních spojení a zkratů pro jednotlivé typy uzemnění.

Tab. 2. Hodnoty proudů zemních spojení jednotlivých typů uzemnění [1]

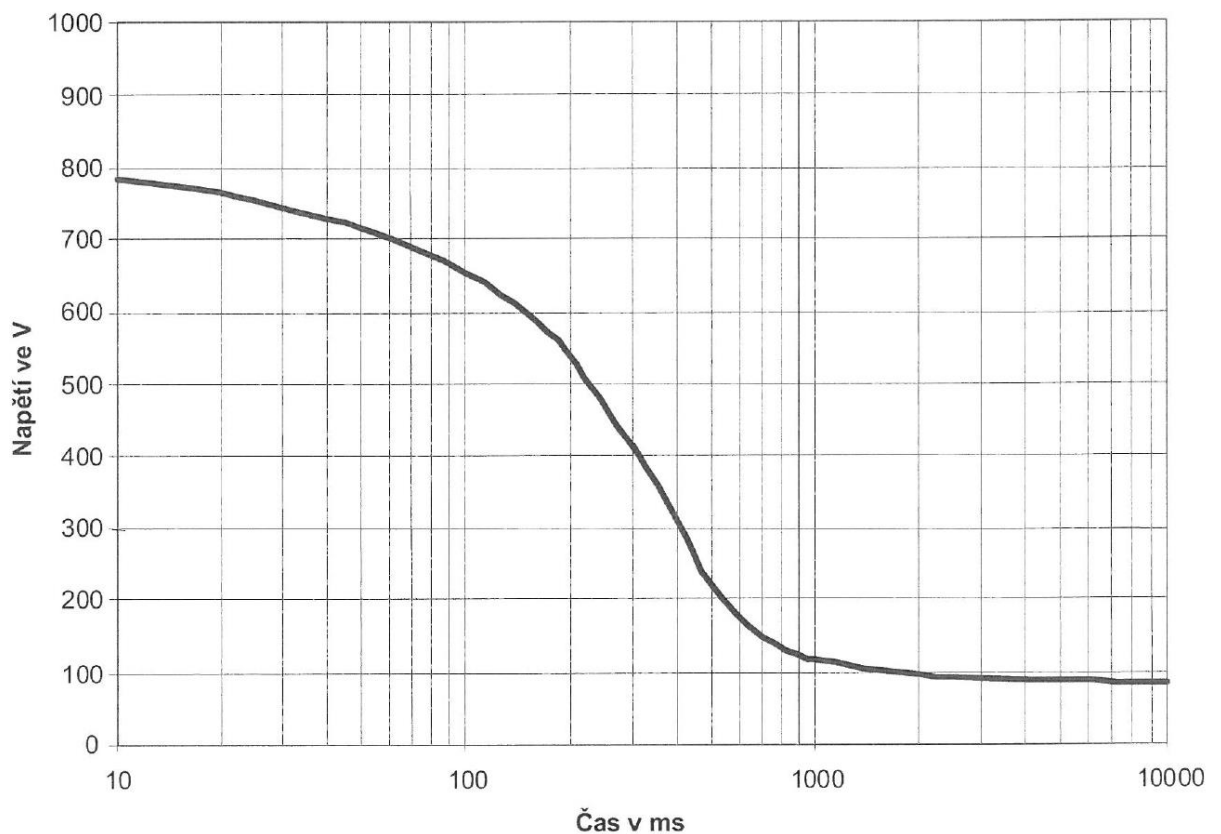
Typ sítě nad 1 kV		Určující pro tepelné zatížení		Určující pro nárůst potenciálu a dotyková napětí
		Zemnič	Uzemňovací přívod	
Sítě s izolovaným uzlem				
Vypnutí do 5sec		I_C	I_C	$I_E = r \cdot I_C$
	Provoz se zemním spojením	I_{kEE}''	I_{kEE}''	$I_E = r \cdot I_{kEE}''$
Sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů				
Vypnutí do 5sec	Stanice bez zhášecích tlumivek	I_{res}	I_{res}	$I_E = r \cdot I_{res}$
	Stanice se zhášecími tlumivkami	I_{res}	I_{res}	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$
	Provoz se zemním spojením včetně krátkodobého přizemnění pro detekci	I_{kEE}''	I_{kEE}''	$I_E = r \cdot I_{kEE}''$
Sítě s nízkoimpedančním uzemněním uzlu včetně krátkodobého přizemnění pro vypnutí				
	Stanice bez uzemnění uzlu	I_{k1}''	I_{k1}''	$I_E = r \cdot I_{k1}''$
	Stanice s uzemněním uzlu	I_{k1}''	I_{k1}''	$I_E = r \cdot (I_{k1}'' - I_N)$

3 SOUČASNÝ PŘÍSTUP PRO HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍCH SOUSTAV

Tato kapitola pojednává o standardním, současném přístupu k návrhu a hodnocení bezpečnosti zemních soustav, kde se vychází z primárních parametrů, a to proudu tekoucího do země a jeho úměrnému dotykovému napětí. Při tomto postupu návrhu musí být splněna kritéria bezpečnosti nehledě na cenu.

3.1 Dovolené dotykové napětí

Dotykové napětí vzniká na lidském těle po dotyku s živou částí resp. s částí pod napětím. Hodnota dovoleného dotykového napětí závisí na době trvání poruchy. Při delším působení je hodnota dovoleného dotykového napětí menší a naopak, při kratším působení je dovolená hodnota dotykového napětí vyšší. V/t závislost na Obr. 9. byla odvozena z Tab. 3.



Obr. 9. Hodnota dovoleného dotykového napětí v závislosti na době působení [1]

Dodržení maximální hodnoty dovoleného dotykového napětí U_{Tp} je jeden ze základních požadavků při návrhu uzemňovacích soustav.

Dovolené dotykové napětí se vypočítá podle vzorce:

$$U_{Tp} = I_B(t_f) * \frac{1}{HF} * Z_T(U_T) * BF \quad (V; A, -, \Omega, -) \quad (3.1)$$

Mez proudu tělem I_B závisí na době působení poruchy t_f . HF je činitel proudu srdcem, jehož hodnota je stanovena na 1 pro proud tekoucí ruka-noha, 0,8 pro pravá ruka-noha a 0,4 pro ruka-ruka. Hodnota impedance těla Z_T závisí na hodnotě dotykového napětí. Činitel těla BF je stanoven 0,75 pro ruka-obě nohy a 0,5 pro obě ruce k noze.

Při výpočtu dovolených dotykových napětí u zařízení nad 1kV se vychází z následujících předpokladů:

- Dráha proudu z jedné ruky do nohy
- 50% pravděpodobnostní impedance těla
- 5% pravděpodobnost fibrilace srdce
- Neuvažují se žádné přídavné resistance

Tab. 3. Dovolené dotykové napětí a proud tělem v závislosti na době trvání poruchy

Trvání poruchy t_f	Proud tělem I_B	Dovolené dotykové napětí U_{tp}
(s)	(mA)	(V)
0,05	900	716
0,1	750	654
0,2	600	537
0,5	200	220
1	80	117
2	60	96
5	51	86
10	50	85

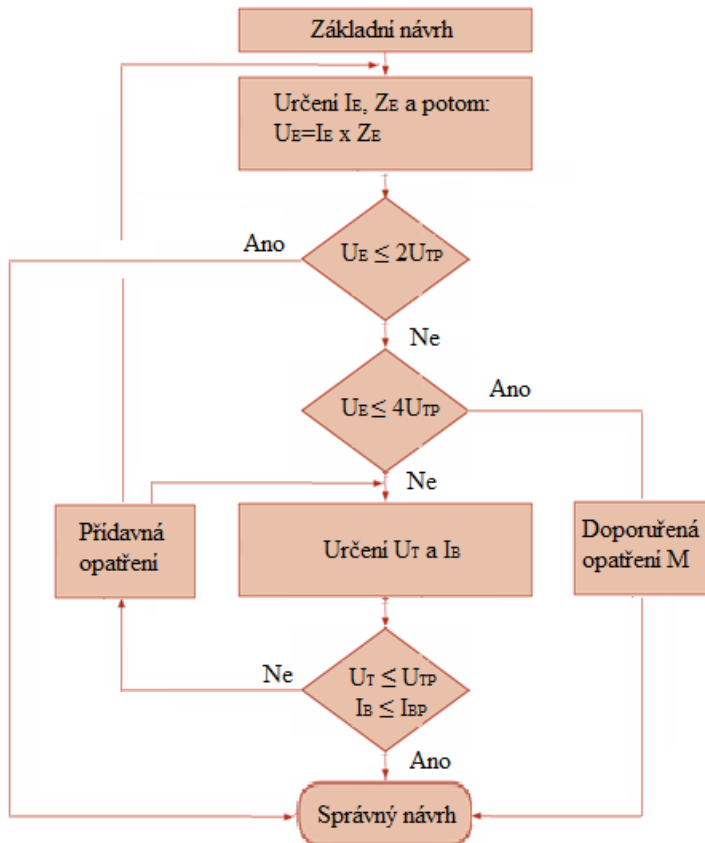
Pro stanovení dovoleného proudu tělem I_B byla uvažována dovolená mez pro proud z hlediska pravděpodobnosti srdeční fibrilace menší než 5% a proudová dráha z levé ruky do obou noh. Postup výpočtu dovoleného proudu je uveden v IEC/TS 60479-1. Výsledné hodnoty proudu jsou v Tab. 3.

Hodnoty dovoleného dotykového napětí byly vypočteny z průměrné impedance těla. Tato impedance závisí na proudové dráze a hodnotě dotykového napětí. Hodnoty impedance lidského těla pro proudové dráhy ruka-ruka nebo ruka-noha jsou uvedeny v IEC/TS 60479-1. Pravděpodobnost, že impedance těla je menší nebo rovna udané hodnotě je 50%.

Pokud vezmeme v úvahu proudovou dráhu ruka-noha, tak je potřeba použít činitel těla BF 0,75. Za použití hodnot proudu, impedance těla a uvažování činitele těla můžeme vypočítat hodnoty dovoleného dotykového napětí pro všechny doby trvání poruchy. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 3. Postup výpočtu je uveden v IEC/TS 60479-1. [1]

3.2 Návrh uzemňovacích soustav z hlediska dovoleného dotykového napětí U_{Tp}

Níže můžete vidět Obr. 10. obecné schéma pro postup při návrhu uzemňovacích soustav z hlediska dovoleného dotykového napětí U_{Tp} respektive hodnocení návrhu uzemňovací soustavy z hlediska bezpečnosti. V tomto způsobu návrhu musí být splněny podmínky bezpečnosti neohledně na cenu.



Obr. 10. Návrh uzemňovacích soustav z hlediska dovoleného dotykového napětí U_{Tp}

Prvním krokem je zjištění navýšení potenciálu zemniče, který závisí na proudu procházejícím zemí a impedancí k zemi. Hodnota potenciálu zemniče nesmí být více, jak dvojnásobně větší, jako dovolené dotykové napětí, které závisí na době trvání poruchy.

V případě, že je podmínka splněna, je uzemňovací soustava správně navržena z hlediska bezpečnosti. Pokud tato podmínka splněna není, pak se uvažuje podmínka, při které hodnota potenciálu zemniče nesmí být větší, jako čtyřnásobek dotykového dovoleného napětí. Při splnění této podmínky se musí dodávat zvláštní opatření M. Zvláštní opatření M jsou pro vnější zdi a plotů kolem instalací nebo uvnitř vnitřních nebo vnějších instalací. Mezi tyto opatření patří například izolace stanoviště, užití oplocení z nevodivého materiálu atp.

Pokud není splněna ani tato podmínka, pak se určuje skutečné dotykové napětí U_T nebo skutečný proud tělem. Pokud jsou zjištěné hodnoty menší nebo stejné, jako dovolené, pak je uzemňovací soustava správně navržena z hlediska bezpečnosti.

Pokud není splněna ani jedna z podmínek, pak se musí provést nový návrh uzemňovací soustavy tak, aby všechny podmínky byly splněny.

4 NOVÝ PŘÍSTUP PRO HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍCÍCH SOUSTAV

Nyní se budeme zabývat novým přístupem pro hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav. Tento postup zahrnuje všechny podmínky návrhu i hodnocení, jako současné hodnocení s tím rozdílem, že do nového hodnocení je zahrnuta tolerance, případně netolerance pravděpodobnosti úmrtí lidské osoby. Tato tolerance se počítá v případě, kdy je skutečné dotykové napětí nebo proud tělem větší, jako dovolené hodnoty. Při výpočtu je brána v úvahu pravděpodobnost, náhoda výskytu člověka v době poruchy a pravděpodobnost výskytu poruchy. Následným a posledním krokem je porovnat výnosy a náklady na snížení rizik tzn. porovnat, zda se snížení rizik vyplatí.

4.1 Rizika

Všechny lidské činnosti zahrnují nějakou formu rizika. Rozsah zranění nebo smrti člověka je tedy závislá na několika faktorech

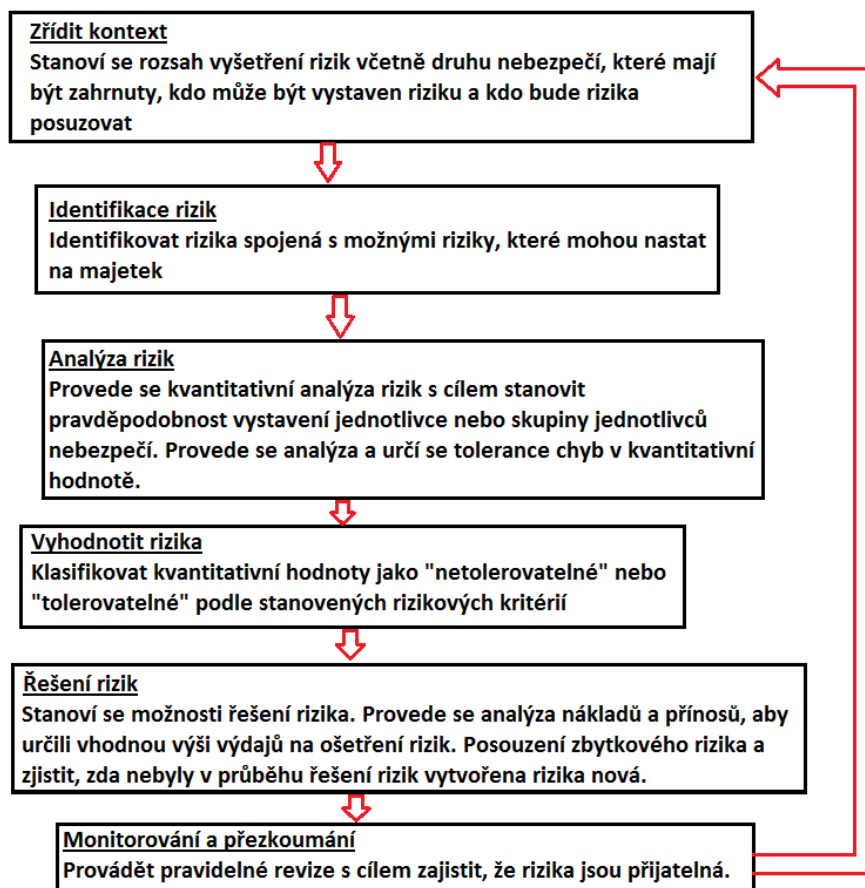
- typ rizika
- četnost výskytů
- pravděpodobnost účinků na jednotlivce a s tím související důsledky

Riziko v tomto kontextu je definováno jako šance, že se něco stane a bude to mít určité důsledky. Riziko spojené s nebezpečím se určuje pomocí postupu pro posuzování rizik, ve kterém jsou identifikovaná nebezpečí analyzována pomocí kvantitativních metod a kvalitativně hodnoceny určitými kritérii. Poté, co se zhodnotí rizika, musí být provedené potřebné účinné řízení rizik. [4]

4.1.1 Přehled procesů řídicích rizika

Součástí procesu řešení rizik je proces identifikace, analýzy, hodnocení a snižování rizika v závislosti na související úrovni rizika. Každé vytvořené nebezpečí musí být identifikováno, posuzováno a kontrolováno dle postupů pro řízení rizik v Obr. 11.

Proces řešení rizik je logický a systematický způsob, jak zajistit, aby rizika byla efektivně řešena. [4]



Obr. 11. Řízení rizik

4.1.2 Typy rizik

Každé riziko se klasifikuje určitým způsobem, který je úzce spjat s tolerancí veřejnosti k riziku úmrtí lidské osoby.

4.1.2.1 Dobrovolná a nedobrovolná rizika

Určité činnosti v životě jsou považovány za nebezpečné, ale i přes vysokou pravděpodobnost úrazu nebo smrti tyto činnosti vykonáváme a tolerujeme možné důsledky, protože máme za to, že činnost za možný fatální důsledek zkrátka stojí. Takovým způsobem jsou klasifikována dobrovolná rizika.

Aktivita, které neumožňují individuální volbu v účasti, jsou tolerovány v mnohem menší míře a musí být pečlivě analyzovány. Tato rizika se nazývají nedobrovolná (např. teroristický útok, autonehoda atp.) Rizika spojená s uzemňovacími soustavami, úrazem elektrickým proudem jsou obvykle kategorizována jako nedobrovolná a odpovědnost přebírá majitel zdroje nebezpečí. [4]

4.1.2.2 Rizika a nenáhodná nebezpečí

Přijatelnost zranění či úmrtí jednotlivce se významně liší podle toho, zda událost rizika byla způsobena lidskou chybou nebo k ní došlo v nepředvídatelné události. Majitelé zdrojů potenciálních rizik mají povinnost poskytnout péči pro členy veřejnosti a zaměstnanců, avšak veřejnost i zaměstnanci musí jednat tak, aby udrželi osobní bezpečnost. Z centrální podstaty řešení rizik vyplývá, že žádná osoba by neměla být vystavena úrovni rizika, které nebylo přijato společností jako „rozumné“. Tato „rozumná“ rizika musí být zachována i v distribučních,

přenosových i uzemňovacích soustavách. Dosažením tohoto cíle je jedním z hlavních faktorů motivujících k odvození procesu kritérií. [4]

4.1.2.3 Individuální a společenská rizika

Tolerance společnosti vůči riziku je také závislá na počtu a věkové skupině jednotlivců vystavených riziku. Jakákoliv porucha bude riziko úrazu elektrickým proudem jednoho nebo více lidí na různých místech.

Individuální riziko je roční riziko úmrtí jedince. Riziko spojené s jednotlivcem se obvykle počítá pro jednu hypotetickou osobu.

Společenské riziko může být rozhodujícím faktorem v přijatelnosti rizika spojeného s nebezpečím pro oblasti, kde se vyskytuje mnoho lidí. [4]

4.1.2.4 Riziko poranění, poškození nebo úmrtí zvířat

Nebezpečné činnosti mohou vést k poškození zařízení, zranění nebo k úmrtí zvířat nebo člověka. Běžnou praxí je vhodné stanovení úrovně rizika v závislosti na možné škodě na člověka. Při řešení rizika je nutné provést analýzu nákladů a přínosu a brát v úvahu možné poškození zařízení, majetku, zranění či úmrtí zvířat nebo člověka. [4]

4.1.3 Hodnocení rizik

Hodnocení rizik je celkový proces identifikace, analýzy a hodnocení rizik. Analýza rizik je systematický proces, u kterého je potřeba pochopit podstatu a vyvodit úroveň rizika. Rizika mohou být analyzována pomocí kvantitativní, kvalitativní nebo kombinace těchto dvou metod. Pravděpodobnostní model, který je běžnou přijímanou metodou hodnocení rizik je:

$$\text{Riziko} = f(\text{nebezpečí, náhoda})$$

“Náhoda“ představuje frekvenci lidí vystavených riziku a “nebezpečí“ představuje následky. Riziko je v tomto kontextu funkcí nebezpečí a působení. [4]

4.1.4 Tolerance individuálního rizika

Zvýšené riziko, kterému může být jednatel neúmyslně vystaven, může být vypočten na základě roční pravděpodobnosti úmrtí.

Tab. 4. Limity pravděpodobnostního individuálního úmrtí [4]

Pravděpodobnost úmrtí jednotlivce	Klasifikace rizika veřejností	Výsledné řešení rizika
$\geq 10^{-4}$	Velké nebo netolerovatelné riziko	Musí zabránit riziku bez ohledu na náklady
$10^{-4} - 10^{-6}$	Střední riziko	Je třeba minimalizovat výskyt, pokud náklady nepřevyšují hodnotu získané bezpečnosti
$\leq 10^{-6}$	Malé nebo tolerovatelné riziko	Riziko je obecně přijatelné

S ohledem na Tab. 4. se provádí návrh z hlediska pravděpodobnosti pomocí diagramu na Obr. 13. V případě návrhu, jehož výsledkem pravděpodobnosti bude hodnota větší jako 10^{-4} se musí zabránit riziku nehledě na náklady s tím související. [4]

4.2 Návrh

Standardně byl zemnicí systém s nízkým celkovým odporem považován za bezpečný. Nicméně neexistuje žádný jednoduchý vztah mezi odporem uzemnění a možností vzniku úmrtí v jakékoliv konkrétní situaci. Proto je zapotřebí vhodná analýza, která bere v úvahu všechny nezbytné faktory a obsahuje realistické posouzení rizik. Návrh by měl být navrhnout z hlediska praktičnosti, nákladnosti a schopností řešení rizik. Mezi procesy návrhu, které musí být splněny patří:

- Soulad s bezpečnostními kritérii
- Splnění provozních požadavků
- Nákladová efektivnost
- Praktická realizace
- Spolehlivost po celou dobu životnosti

4.2.1 Přehled postupu procesu návrhu

Následující postup procesu návrhu je doporučený postup pro návrhy uzemňovacích soustav. S tímto způsobem návrhu se předpokládá, že rizika spojená s provozem uzemňovací soustavy jsou řešena z hlediska nákladů efektivně a prakticky. Diagram postupu je na Obr. 12 a jeho slovní popis je uveden níže.

Krok 1. Sběr dat

Platnost všech provedení je závislá na přesnosti použitých údajů.

Krok 2. Počáteční koncepce návrhu

Určit systém uzemnění, který bude pravděpodobně splňovat funkční požadavky. Návrh je nutné zajistit tak, aby všechny neživé části byly uzemněny. Jakékoliv strukturální zemniče spojené s instalací by měly být spojeny.

Krok 3. Vytvořit návrh EPR (U_{tp})

Závisí na charakteristice půdy a hodnotě proudu jdoucí do země. Určení očekávaného nárůstu potenciálu země (EPR).

Krok 4. Návrh typu a rozmístění uzemňovacích vodičů ke splnění funkčních požadavků. Identifikujte místa, kde mohou být zaměstnanci nebo veřejnost vystaveni úrazu elektrickým proudem. K takovým nebezpečím může dojít dotykem, krokem. Pro každé takové místo spočítat napětí.

Krok 5. Standardní V/t kritéria použitelná na místech, kde hrozí nebezpečí

Návrh musí splňovat podmínku, kritérium V/t, což je dovolené napětí v závislosti na době působení. Lze použít V/t křivku.

Krok 6. Provést návrh pravděpodobnosti

Pro každé riziko úrazu elektrickým proudem určit místo poruchy, pravděpodobnost přítomnosti a proud tělem závislý na impedanci (obuv, asfalt) a pravděpodobnost fibrilace. Pro každé rizikové místo určit napětí (Krok 4.) a zda je menší nebo rovno dovolenému napětí (Krok 5.). Napětí bude spadat do jedné ze tří kategorií:

- Nepřijatelné riziko- nutnost zmírnění rizika.

- Střední riziko – snižte riziko, jak nejvíce je to dosažitelné. Potřeba analýza přínosů a nákladů, aby byly posouzeny náklady na ošetření rizik proti řadě kritérií.
- Přijatelné – v případě, že nárůst potenciálu země je dostatečně malý

Krok 7. Zlepšení návrhu

Zlepšit návrh, aplikovat vhodná opatření rizik.

Krok 8. Návrh opatření proti blesku a přechodným jevům

Zvážit potřebu zavedení zvláštního konstrukčního opatření ke zvládnutí dopadu blesku a dalších přechodových jevů.

Krok 9. Nosná konstrukce

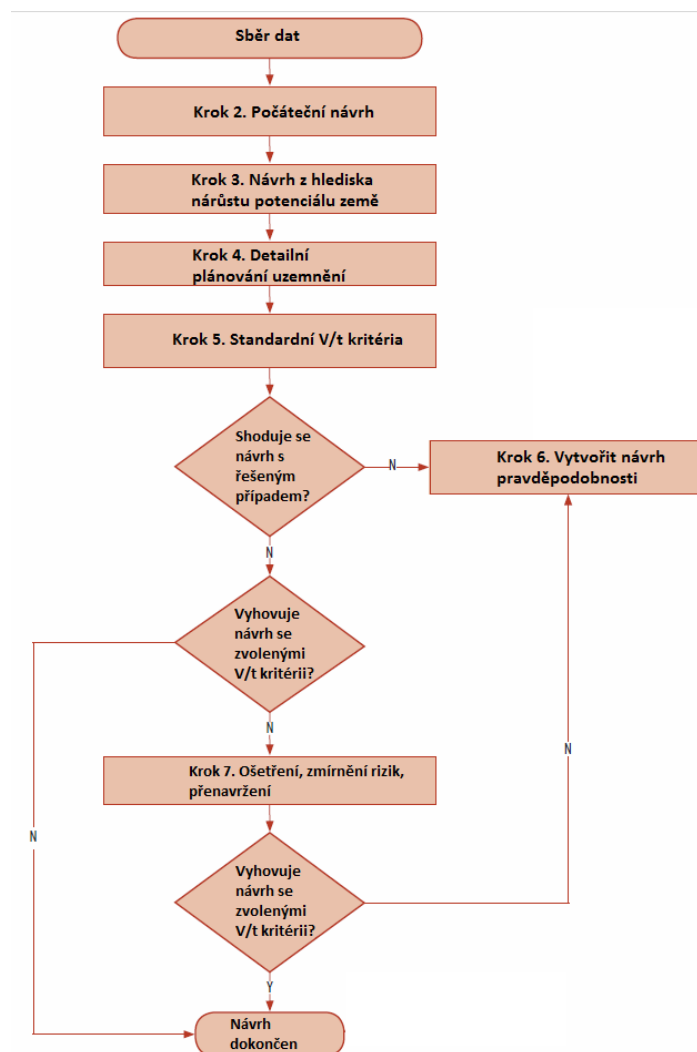
Nosná konstrukce musí být navržena tak, aby splňovala funkční požadavky k zajištění bezpečnosti personálu

Krok 10. Uvedení do provozu a dodržování bezpečnostní zprávy

Zkontrolovat instalaci po výstavbě z hlediska fyzikálních a bezpečnostních požadavků. Ujistit se, že instalace odpovídá projektové dokumentaci.

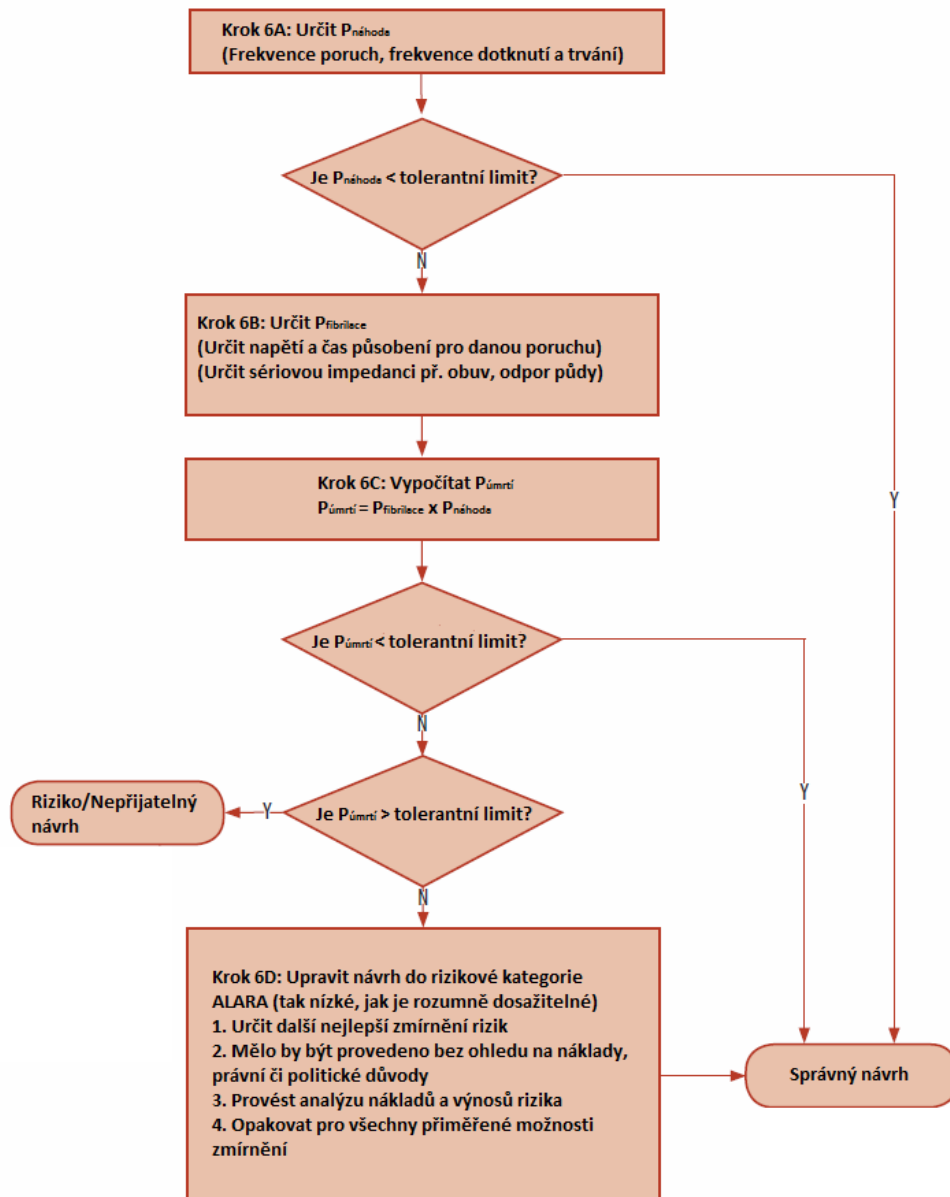
Krok 11. Dokumentace

Dokumentace zahrnuje jak fyzikální, tak i elektrické podklady, rozhodnutí o návrhu a požadavky na monitorování a údržbu. [4]



Obr. 12. Návrh uzemňovací soustavy z hlediska dovoleného dotykového napětí [4]

Následující diagram se vztahuje k předešlému diagramu z Obr. 12, kde je zastoupen 6. krokem, což je provedení návrhu pravděpodobnosti.



Obr. 13. Návrh z hlediska pravděpodobnosti [4]

Prvním krokem procesu návrhu z hlediska pravděpodobnosti z diagramu Obr. 13., je určit pravděpodobnost náhody $P_{náhoda}$. Tato veličina popisuje pravděpodobnost výskytu osoby v zóně uzemňovací soustavy během poruchy. Tato pravděpodobnost se počítá podle vzorce:

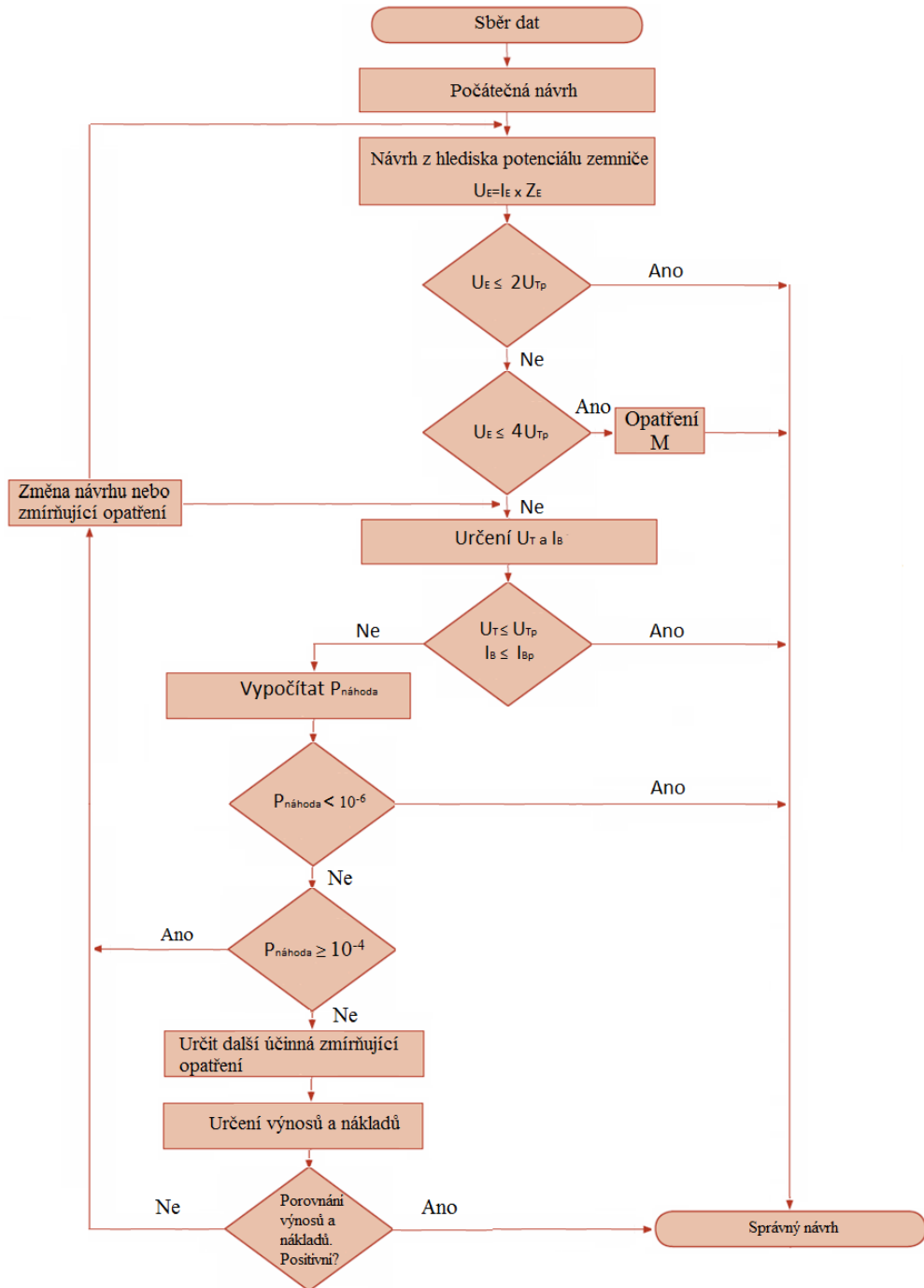
$$P_{náhoda} = \frac{f_n * p_n * (f_d + p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60} \quad (-; -, -, s, s, rok, -) \quad (4.1)$$

f_n	počet poruch za jeden rok
p_n	počet výskytů člověka v blízkosti uzemňovací soustavy za jeden rok
f_d	délka trvání poruchy (s)
p_d	délka výskytu člověka (s)
T	doba, pro kterou je pravděpodobnost počítána (roky) = 1 rok
CRF	redukční faktor náhody, jehož velikost závisí na povědomí lidí o nebezpečí vyskytujících se v blízkosti uzemňovací soustavy (výstražnými tabulemi, značkami)

Vzorec uvedený výše, je základním vzorcem pro řešení této problematiky. Ze vzorce vyplývá, že pravděpodobnost závisí zejména na průměrné četnosti výskytu poruchy za celý rok a jejich době trvání, počtu vyskytujících se lidí za celý rok a jejich průměrné době působení v blízkosti uzemňovací soustavy. [4]

Jak jistě vidíte v návrhu, který se vyskytuje na Obr. 13, tak součástí návrhu je i výpočet pravděpodobnosti fibrilace a následně úmrtí. Pro náš případ si toto řešení zjednodušíme neuvažováním pravděpodobnosti fibrilace $P_{fibrilace}$, kvůli problematickému výpočtu zahrnujících mnoho proměnných. Pokud tak učiníme, tak bude platit $P_{náhoda} = P_{úmrtí}$. Pokud vás zajímá, jak probíhá návrh z hlediska pravděpodobnosti s uvažováním všech činitelů $P_{náhoda}$, $P_{fibrilace}$, $P_{úmrtí}$, tak řešení naleznete v dokumentu Power System Earthing Guide publikované Ena Energy Eetworks Association.

Při shrnutí diagramů v Obr. 10. a v Obr. 13 a zjednodušení výpočtu neuvažováním pravděpodobnosti fibrilace dostaneme následující diagram Obr. 14. Na první pohled je patrné, že diagram je tvořen jak standardním návrhem z hlediska dovoleného dotykového napětí, tak z hlediska pravděpodobnosti. Pravděpodobnost je počítána v případě, že není možné dodržet hodnotu maximálního dovoleného dotykového napětí. Pokud je pravděpodobnost menší, jak 10^{-6} , tak soustava splňuje podmínky pro realizaci. Pokud se pravděpodobnost nachází v intervalu $10^{-4} - 10^{-6}$, tak se určí možnosti zmírňujících opatření, jejich náklady a porovnají se s cenou lidského života resp. odškodnění. Pokud bude platit, že cena lidského života bude větší, jako cena zmírňujících opatření, tak se tato opatření zrealizují.



Obr. 14. Zjednodušený souhrn diagramů z Obr. 10. a Obr. 13.

5 POROVNÁNÍ SOUČASNÉHO A NOVÉHO PŘÍSTUPU HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI ZEMNÍCÍCH SOUSTAV

Pro posouzení rozdílu mezi oběma přístupy, je v této kapitole provedeno porovnání současného přístupu návrhu a hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav a způsobu nového.

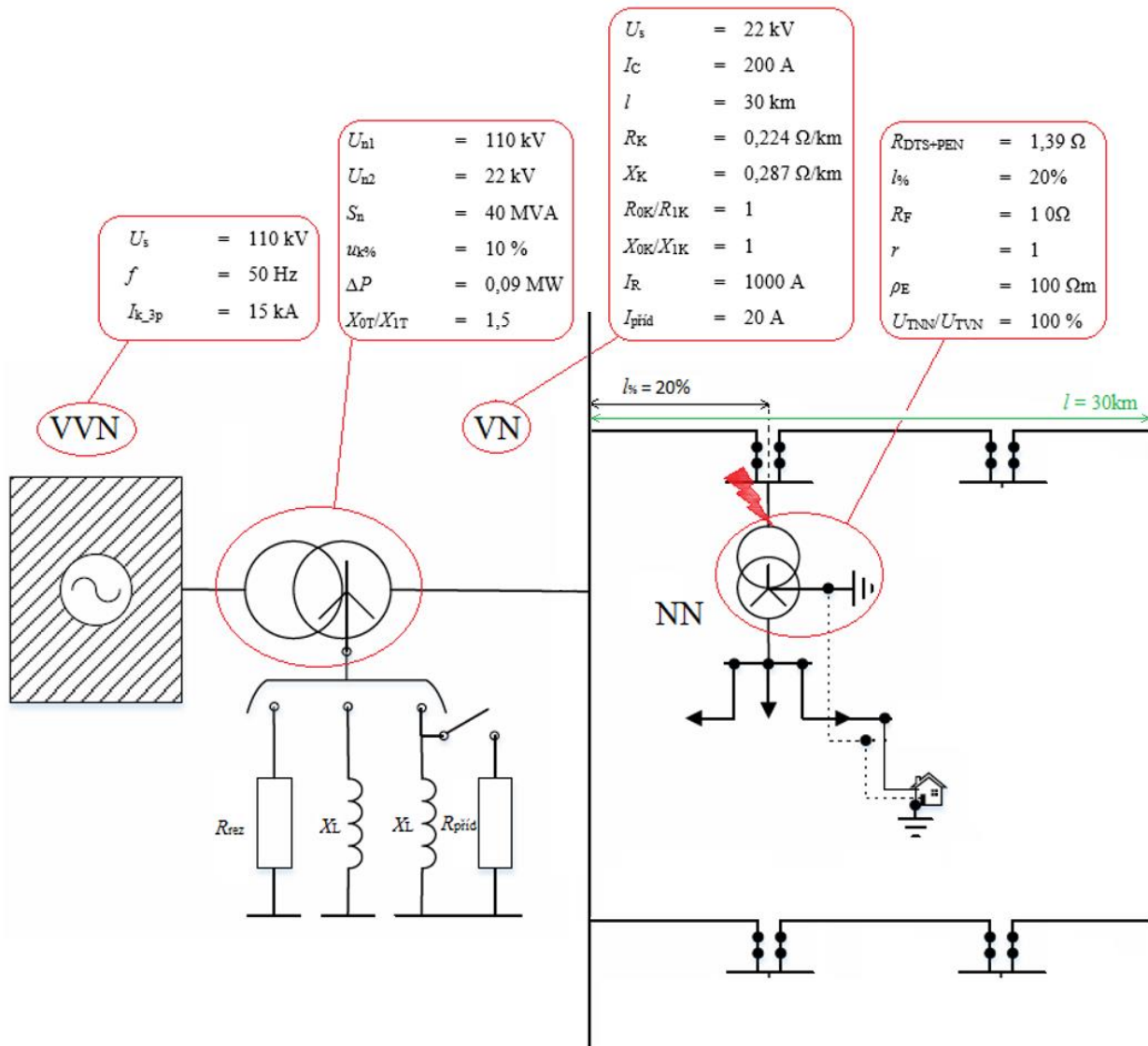
Určitá část řešení současného a nového přístupu hodnocení, je stejná. Touto částí se myslí stanovení skutečného dotykového napětí a porovnání s dovoleným dotykovým napětím.

U současného přístupu, podle návrhu v Obr. 10., se v případě, kdy je $U_T > U_{Tp}$ nebo $I_B > I_{Bp}$, řeší změnou návrhu nebo řešením přidavnými opatřeními. Zkrátka se musí zabránit možnosti ohrožení lidské osoby, vyskytující se v blízkosti zemnicí soustavy během poruchy, za každých okolností nehledě na náklady s tím spojenými.

U nového přístupu hodnocení, dle návrhu v Obr. 14, se v případě, kdy je $U_T > U_{Tp}$ nebo $I_B > I_{Bp}$, vypočítá pravděpodobnost úmrtí lidské osoby, která zahrnuje pravděpodobnost výskytu člověka, nebo skupiny lidí v období probíhající poruchy, ať už se jedná o zkrat nebo zemní spojení. Výsledek pravděpodobnosti úmrtí je rozdělen do tří skupin, a to tolerovatelné, střední a netolerovatelné. Každé skupině náleží určitá hodnota, či interval pravděpodobnosti, viz Tab. 4., která vychází z průměrné roční úmrtnosti, a je dále upravena na hodnotu pravděpodobnosti, která je tolerovatelná společností. Pokud je pravděpodobnost klasifikována jako tolerovatelná, tak návrh splňuje potřebné požadavky. Je-li pravděpodobnost v rozmezí intervalu 10^{-4} - 10^{-6} , tak se jedná o střední riziko, a musí být řešeno přidavnými opatřeními, pokud náklady za zmírnění rizik nepřevyšují náklady lidského života resp. odškodnění. Poslední skupina, netolerovatelná rizika, jsou všechna rizika převyšující pravděpodobnost úmrtí 10^{-4} , která musí být řešena buď změnou návrhu, nebo přidavnými opatřeními. V tomto případě se náklady na ošetření rizik neberou v úvahu, musí být aplikovány v každém případě, pokud se nerozhodneme pro změnu návrhu uzemňovací soustavy.

6 ZPRACOVÁNÍ UKÁZKOVÉHO PŘÍKLADU HODNOCENÍ VYBRANÉ ZEMNÍČÍ SOUSTAVY

Cílem této kapitoly bude prezentovat postup výpočtu hodnocení bezpečnosti „testovací“ sítě. Obecný náčrt takové sítě je na Obr. 15.



Obr. 15. Ilustrační schéma sítě

Obr. 15. ilustruje schéma naší počítané sítě včetně uvedených parametrů z kapitoly 6.2. Jak již bylo zmíněno, jedná se pouze o ilustrační obrázek sloužící našemu účelu, tzn., že další vývody k NN DTS jsou jen naznačeny a nenaleznete zde ani odpojovače, vypínače atp.

6.1 Obecný postup řešení pravděpodobnostního přístupu hodnocení bezpečnosti zemní soustavy

6.1.1 Zjištění parametrů

1. Zjištění parametrů soustavy a vypínací časy ochranných prvků. Informace poskytne provozovatel soustavy.
2. Zjištění počtu DTS dané sítě, počet poruch na DTS za rok (v případě venkovního vedení) nebo počtu poruch na DTS a vedení za rok (v případě kabelového vedení). Poskytne provozovatel sítě z provedených ročních statistik, pokud jej provozovatel provádí. V opačném případě je nutné dané hodnoty odhadnout na základě praktických zkušeností.

6.1.2 Výpočetní část

3. Výpočet impedanční smyčky ze zadaných parametrů sítě a následný výpočet poruchových proudů (L-N, L-L-N, L-L).
4. Výpočet koeficientu f_n jako podíl poruch a počtu DTS. Dostaneme počet poruch na jednu DTS za rok.
5. Zvolíme hodnotu p_n , což je počet dotyků člověka za jeden rok.
6. Délka trvání poruchy f_d je závislá na způsobu uzemnění uzlu transformátoru, kde jsou jiná nastavení vypínacích časů ochranných prvků.
7. Zvolíme hodnotu p_d , což je délka dotyku člověka.
8. Nyní známe všechny potřebné veličiny k aplikování vztahu (4.1).

$$P_{náhoda} = \frac{f_n * p_n * (f_d + p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60} \quad (-; -, -, s, s, rok, -)$$

9. Veličiny T a CRF budeme uvažovat rovny jedné.

6.1.3 Vyhodnocení

Výsledek z předešlé části se porovná s následujícími tabelovanými hodnotami.

Tab. 5. Limity pravděpodobnosti individuálního úmrtí [4]

Pravděpodobnost úmrtí jednotlivce	Klasifikace rizika veřejností	Výsledné řešení rizika
$\geq 10^{-4}$	Velké nebo netolerovatelné riziko	Musí zabránit riziku bez ohledu na náklady
$10^{-4} - 10^{-6}$	Střední riziko	Je třeba minimalizovat výskyt, pokud náklady nepřevyšují hodnotu získané bezpečnosti
$\leq 10^{-6}$	Malé nebo tolerovatelné riziko	Riziko je obecně přijatelné

6.2 Parametry testovací sítě

Sít' velmi vysokého napětí:

Jmenovité napětí:	U_s	110	kV
Jmenovitá frekvence:	f	50	Hz
Počáteční symetrický zkratový proud L-L-L:	I_{k_3p}	15	kA

Sít' vysokého napětí:

Jmenovité napětí:	U_s	22	kV
Poruchový kapacitní proud:	I_C	200	A
Délka poruchového přívodu:	l	30	km
Impedance přívodu na km:	R_K	0,224	Ω/km
	X_K	0,287	Ω/km
Poměr sousledné a netočivé složky impedance:	R_{0K}/R_{1K}	1	-
	X_{0K}/X_{1K}	1	-
Rezistor připojený uzel-zem vyjádřený proudem:	I_R	1000	A
Přídavný rezistor vyjádřený proudem:	$I_{přid}$	20	A

Výskyt poruchy:

Počet opětovných zapnutí	OZ	1	-
--------------------------	------	---	---

Distribuční transformační stanice:

Zemní impedance společné uzemňovací soustavy:	$R_{DTS+PEN}$	1,39	Ω
Pozice hodnocené DTS na poruchovém přívodu:	$l\%$	20	%
Odpor poruchy	R_F	10	Ω
Redukční faktor	r	1	-
Rezistivita půdy	ρ_E	100	Ωm
Ovlivnění EPR z VN na NN	U_{TNN}/U_{TVN}	100	%

Transformátor VVN/VN:

Jmenovité napětí primární strany:	U_{n1}	110	kV
Jmenovité napětí sekundární strany:	U_{n2}	22	kV
Jmenovitý zdánlivý výkon:	S_n	40	MVA
Procentuální napětí nakrátko:	$u_{k\%}$	10	%
Celkové ztráty ve vinutí při jmenovitém proudu:	ΔP	0,09	MW
Poměr sousledné a netočivé složky reaktance	X_{0T}/X_{1T}	1,5	-

Ochrana VVN přívodu:

Čas vypnutí zkratu	$t_1(f_{d1})$	0,3	s
Čas vypnutí záložní ochrany	$t_2(f_{d2})$	0,5	s
Čas vypnutí zemního spojení (komp. sít')	$t_1(f_{d1})$	1200	s
Čas vypnutí zemní poruchy (izolovaná sít')	$t_1(f_{d1})$	1	s
Doba připojení přídavného rezistoru	t_1	1	s
Dodatečná hodnota odporu (obuv)	R_d	1000	Ω

6.2.1 Poznámky ke kapitole 6.2

Bližší charakterizované a vysvětlené parametry z kapitoly 6.2

- $I_{k_{3p}}$ - Počáteční symetrický zkratový proud sítě. Tuto informaci poskytne provozovatel sítě.
- I_C - Poruchový kapacitní proud. Hodnota byla odhadnuta na základě praktických zkušeností. Závisí na délce vedení. Tato veličina byla použita u výpočtu sítě kompenzované, kompenzované s přídavným rezistorem a izolované, kdežto u sítě izolované je naše zvolená hodnota v praxi nereálná, protože je normou omezená na cca 30A. Pokud překračuje tuto hodnotu, musí být provozována jako kompenzovaná.
- $I_{přid}$ - Přídavný rezistor vyjádřený proudem. Použití u sítě kompenzované s přídavným odporníkem. V případě poruchy bude pomocí rezistoru injektován činný proud o velikosti 20A, ke snazší detekci poruchy.
- I_R - Rezistor připojený uzel-zem vyjádřený proudem. V případě poruchy bude injektován činný proud o velikosti 1000A, kvůli rychlejší a spolehlivější reakci ochranných prvků.
- OZ - Počet opětovných zapnutí. Dojde-li v průběhu zkratu k vypnutí, v případě nastavení automatického opětovného zapnutí, dojde k opětovnému zapnutí. Je možné nastavení opětovného zapnutí od 0 – 3 zapnutí. Šance úspěšného opětovného zapnutí se pohybuje v rozmezí 50% - 100%.
- $R_{DTS+PEN}$ - Zemní impedance společné uzemňovací soustavy. Výpočet impedance společné uzemňovací soustavy VN a NN. Paralelní součet impedancí R_{DTS} a R_{PEN} .
- $l\%$ - Pozice hodnocené DTS na poruchovém přívodu. Umístění DTS ve vzdálenosti 20% délky přívodu.
- R_F - Odpor poruchy. Volitelná veličina respektující vliv odporu poruchy v případě dalších zemnicích soustav, které jsou uzavřeny v poruchové smyčce. V ostatních případech rovna nule.
- r - Redukční faktor. Hodnota, která reprezentuje, do jaké míry je daná zemnicí soustava odlehčena např. zemními lany nebo stíněním kabelu.
- U_{TNN}/U_{TVN} - Ovlivnění EPR z VN na NN. Procentuálně charakterizuje, do jaké míry bude strana VN ovlivňovat stranu NN. Mohou nastat dvě možnosti zapojení uzemňovacích soustav:
- rozpojené uzemňovací soustavy VN a NN, viz Obr. 1, kde parametr U_{TNN}/U_{TVN} nabývá hodnot $100\% > \text{ resp. } 1 >$ a platí následující vzorec

$$U_{EPR} = R_P * I_F * \left(\frac{U_{TNN}}{U_{TVN}} \right) \quad (6.1)$$

,kde $R_P = R_{DTS}$

- spojené uzemňovací soustavy VN a NN, viz Obr. 2, kde parametr U_{TNN}/U_{TVN} má fixní hodnotu 100% resp. 1 a platí následující vzorec

$$U_{EPR} = R_P * I_F * 1 \quad (6.2)$$

,kde $R_P = R_{DTS+PEN}$, což je paralelní spojení odporů R_{DTS} a R_{PEN} .

$S_n, u_k\%, \Delta P, R_{OK}/R_{IK}, X_{OT}/X_{IT}$ – Jmenovité hodnoty zařízení poskytnuté výrobcem.

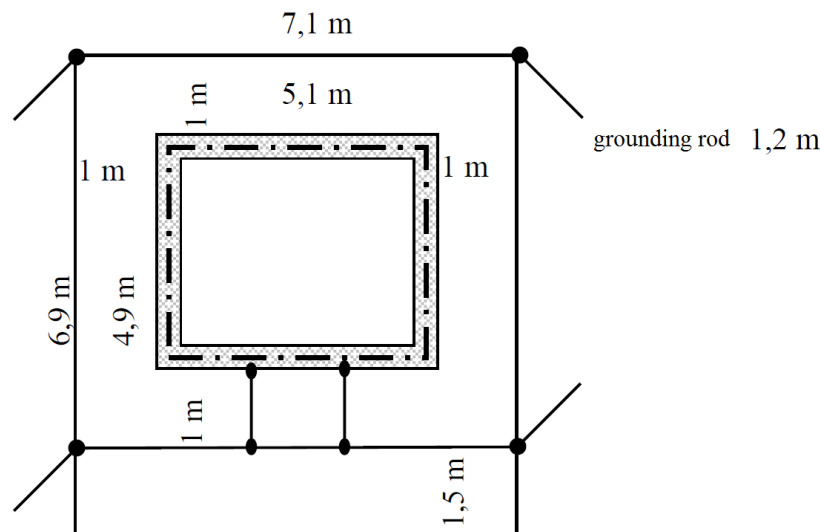
t_1 - Čas vypnutí zkratu

t_2 - Čas vypnutí záložní ochrany. Záložní ochrana vybavuje, pokud první ochrana selže.

6.3 Stanovení hodnoty odporu uzemňovací soustavy

Pro stanovení hodnoty dotykového napětí, je nutné vypočítat odpor uzemňovací soustavy. Následující výpočet byl převzatý z normy PNE 33 000-4 a souboru poskytnutého společností E.ON TNS 00 4910.0.

Používá se několik typů uzemnění, lišící se tvarem resp. uspořádáním, materiálem atp. My budeme uvažovat typ uvedený na obr. 15.



Obr. 16. Schéma zděné kiosk trafostanice s betonovým podkladem

Zemnicí systém tohoto typu je tvořen kombinací obvodových zemnicích elektrod a zemnicích tyčí. Jsou použity tyče 1,2m dlouhé. Vzdálenost mezi obvodovými elektrodami a základnou stanice je 1 m. Hloubka základny zemnicích elektrod je 0,7 metru a její šířka je 0,3m. Základna má rozměry 4,9 x 5,1 m.

Je tu také potenciální práh u vchodu, 1,5 m od obvodových zemnicích elektrod.

Zemní resistance základny zemnicího systému, vztah (6.3)

$$R_{EB} = \frac{\pi \cdot \rho_E}{4 \cdot (a + b)} = \frac{\pi \cdot 100}{4 \cdot (4,9 + 5,1)} = 7,854 \Omega \quad (6.3)$$

Obvod zemnicího systému je tvořen z FeZn pásků 30x4 mm s průměrem 15 mm. Pro počítání odporu zemnění používáme vzorec (6.4) ekvivalentního kruhu o průměru D_{ekv} :

$$D_{ekv} = \frac{2 \cdot (a + b)}{\pi} = \frac{2 \cdot [7,1 + (6,9 + 1,5)]}{\pi} = 9,87 \text{ m} \quad (6.4)$$

Nyní můžeme získat hodnotu zemního odporu od vzoru kruhové zemnicí elektrody s D_{ekv}

$$R_{EK} = \frac{\rho_e}{\pi^2 \cdot D} \ln \frac{2\pi \cdot D}{d} = \frac{100}{\pi^2 \cdot 9,87} \ln \frac{2\pi \cdot 9,87}{0,015} = 8,55 \Omega \quad (6.5)$$

Poslední částí kompletního zemnicího systému jsou čtyři zemnicí tyče, které jsou 1,2 m dlouhé a rozměry každé tyče jsou 50x50x5 mm s průměrem 25 mm. Vzdálenost mezi nimi je 6,9m nebo 7,1m viz Obr. 16. Pro náš případ použijeme vzdálenost 7m.

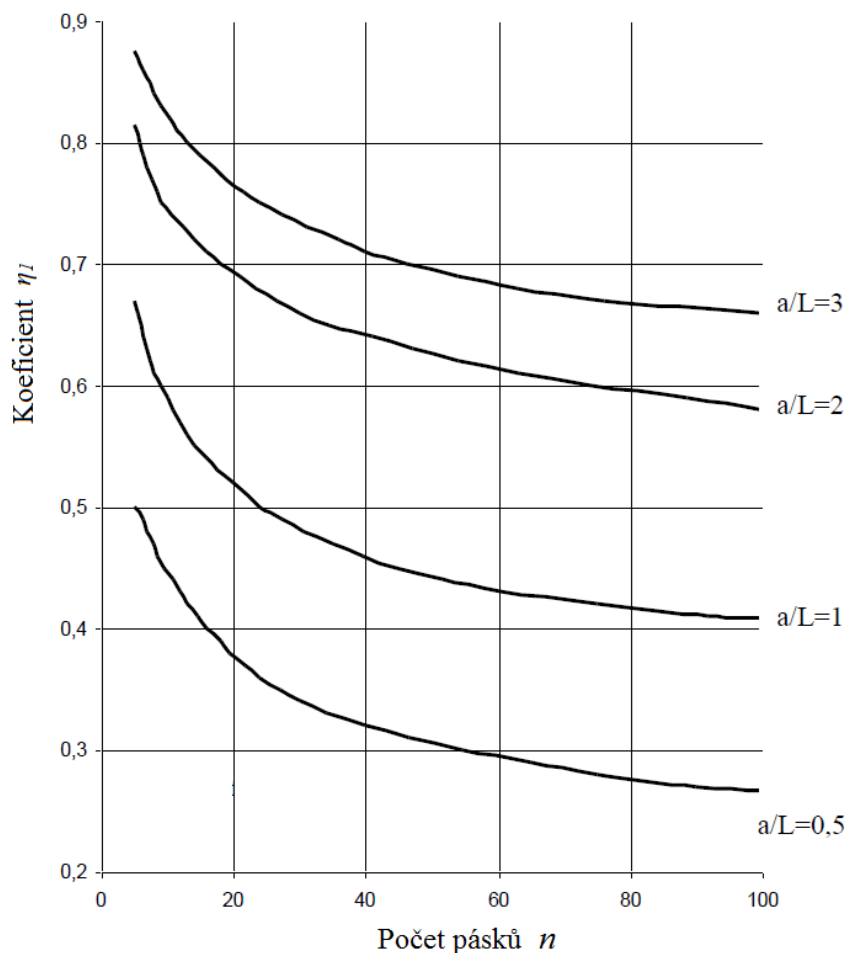
Pro jednu zemnicí tyč platí vzorec (6.6).

$$R_t = \frac{\rho_e}{2\pi \cdot L} \ln \frac{4L}{d} = \frac{100}{2\pi \cdot 1.2} \ln \frac{4 \cdot 1.2}{0.025} = 69.73 \Omega \quad (6.6)$$

Posledním krokem je sečíst všechny dílčí resistance pro výpočet resistance celého systému. První je kombinace zemnicích tyčí a obvodového zemnicího systému (6.7)

$$\frac{a}{L} = \frac{7.0}{1.2} = 5.8 \quad (6.7)$$

Z této hodnoty a počtu tyčí dostaneme hodnotu η_1 odečtenou z grafu na obr. 17. Veličina η je koeficient využití dílčího uzemňovacího systému, pro malé stanice se používá hodnota přibližně $\eta=0,75$.



Obr. 17. Koeficient využití v závislosti na počtu tyčí, kde L je délka jedné tyče, a je vzdálenost mezi tyčemi

Výpočet celkové resistance uzemňovací soustavy (6.8).

$$R_{E1} = \frac{1}{\frac{0.9 \cdot \eta_1 \cdot n}{R_t} + \frac{1}{R_{EK}}} = \frac{1}{\frac{0.9 \cdot 0.9 \cdot 4}{69.73} + \frac{1}{8.55}} = 6.12 \Omega \quad (6.8)$$

Kde R_t je resistance jedné zemnicí tyče a R_p je resistance obvodového zemnicího systému

Finální hodnota zemní resistance se počítá jako kombinace odporu zemnicí základny a obvodového zemnění s tyčí (6.9).

$$R_P = R_{DTS} = \frac{R_{E1} \cdot R_{EB}}{R_{E1} + R_{EB}} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{7.85 \cdot 6.12}{7.85 + 6.12} \cdot \frac{1}{0.75} = 4.59 \Omega \quad (6.9)$$

V případě společné uzemňovací soustavy platí vzorec (6.10). Pokud $\rho_e \leq 200\Omega\text{m}$, tak platí $R_{PEN}=2 \Omega$. V opačném případě $R_{PEN} = \frac{\rho_e}{100}$.

$$R_P = R_{DTS+PEN} = \frac{R_{DTS} \cdot R_{PEN}}{R_{DTS} + R_{PEN}} = \frac{4,59 \cdot 2}{4,59 + 2} = 1,39 \Omega \quad (6.10)$$

Níže uvedené vzorce (6.11), (6.12) vyjadřují závislost odporu zemnění na rezistivitě půdy. Vzorce platí pro půdu o rezistivitě $\rho_e > 200\Omega\text{m}$, v opačném případě by se nahradila část vzorce $\frac{\rho_e}{100}$ číslem 2.

a) Odděleného VN a NN

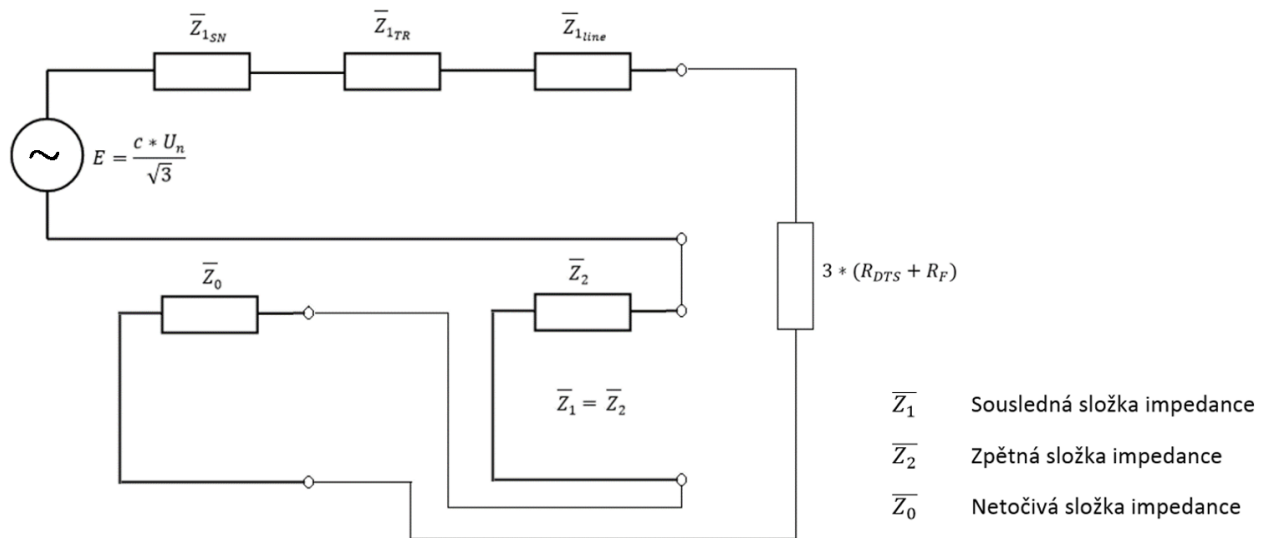
$$R_P = R_{DTS} = \rho_e \cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{2 \cdot 0.9 \cdot \eta_1 \cdot n \cdot L \cdot \pi}{\ln\left(\frac{4L}{d_1}\right)} + \frac{\pi^2 \cdot D}{\ln\left(\frac{2\pi \cdot D}{d_2}\right)} \right) + \frac{4 \cdot (a+b)}{\pi} \right] \cdot \eta} \quad (6.11)$$

b) Společného VN a NN

$$R_P = R_{DTS+PEN} = \frac{R_{DTS} \cdot \frac{\rho_e}{100}}{R_{DTS} + \frac{\rho_e}{100}} \quad (6.12)$$

6.4 Výpočty poruchových proudů v jednotlivých typech sítí, lišících se uzemněním uzlu transformátoru

Metoda použita pro výpočet spočívá v zavedení ekvivalentního napět'ového zdroje do místa zkratu, který bude jediným zdrojem napětí soustavy. Všechna ostatní zařízení jsou nahrazována jejich vnitřními impedancemi, která jsou přepočítána na napět'ovou hladinu, na které se daný zkrat vyskytl. Pro výpočet hodnot zkratových proudů při souměrných i nesouměrných stavech se použije výpočet pomocí souměrných složek.



Obr. 18. Kompletní schéma sítě rozdělené do složek sousledné, zpětné a netočivé

V Obr. 18 je netočivá složka uvedena pouze obecně, protože se pro každou síť, lišící se typem uzemnění uzlu transformátoru, počítá individuálně.

6.4.1 Vnitřní impedance jednotlivých zařízení sítě

Sít'ový napaječ

Sousledná složka

$$R_1 = 0,1 * X_1 = 0,1 * 0,1854 = 0,01854 \Omega \quad (6.13)$$

$$X_1 = 0,995 * \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * I_{k_3p}} * \left(\frac{U_{vz}}{U_n}\right)^2 = 0,995 * \frac{1,1 * 110 * 10^3}{\sqrt{3} * 15 * 10^3} * \left(\frac{22 * 10^3}{110 * 10^3}\right)^2 = 0,1854 \Omega \quad (6.14)$$

$$Z_{1SN} = R_1 + X_1 = 0,01854 + j0,1854 = (0,01854 + j0,1854)\Omega \quad (6.15)$$

Netočivá složka

$$R_0 = 0,1 * X_0 = 0,1 * 0,1506 = 0,01506\Omega \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned} X_0 &= 0,995 * \left[\frac{c * U_n}{\sqrt{3}} * \left(\frac{3}{I_{k_{1p}}} - \frac{2}{I_{k_{3p}}} \right) \right] * \left(\frac{U_{vz}}{U_n} \right)^2 \\ &= 0,995 * \left[\frac{1,1 * 110 * 10^3}{\sqrt{3}} * \left(\frac{3}{16 * 10^3} - \frac{2}{15 * 10^3} \right) \right] * \left(\frac{22}{110} \right)^2 \\ &= 0,1506\Omega \end{aligned} \quad (6.17)$$

$$Z_{0_{SN}} = R_0 + X_0 = 0,01506 + j0,1506 = (0,01506 + j0,1506)\Omega \quad (6.18)$$

Transformátor VVN/VN**Sousledná složka**

$$R_1 = \frac{\Delta P_{Cu} * U_n^2}{S_n^2} * \left(\frac{U_{vz}}{U_n} \right)^2 = \frac{0,09 * 10^6 * 110 * 10^3^2}{40 * 10^6^2} * \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 0,0272 \Omega \quad (6.19)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= \sqrt{\left[\frac{u_k\% * U_n^2}{100 * S_n} * \left(\frac{U_{vz}}{U_n} \right)^2 \right]^2 - R_1^2} \\ &= \sqrt{\left[\frac{10 * 110 * 10^3^2}{100 * 40 * 10^6} * \left(\frac{22}{110} \right)^2 \right]^2 - 0,0272^2} = 1,2097\Omega \end{aligned} \quad (6.20)$$

$$Z_{1_{TR}} = R_1 + X_1 = 0,0272 + j1,2097 = (0,0272 + j1,2097)\Omega \quad (6.21)$$

Netočivá složka

$$R_0 = 0\Omega \quad (6.22)$$

$$X_0 = \frac{X_{0Tr}}{X_{1Tr}} * X_1 = 1,5 * 1,2097 = 1,8146\Omega \quad (6.23)$$

$$Z_{0_{TR}} = R_0 + X_0 = j1,8146\Omega \quad (6.24)$$

Kabel poruchy**Sousledná složka**

$$R_1 = R_K * l * l_0\% = 0,224 * 30 * 0,2 = 1,344 \Omega \quad (6.25)$$

$$X_1 = X_K * l * l_0\% = 0,287 * 30 * 0,2 = 1,772 \Omega \quad (6.26)$$

$$Z_{1_{line}} = R_1 + X_1 = 1,344 + j1,772 = (1,344 + j1,772) \Omega \quad (6.27)$$

Netočivá složka

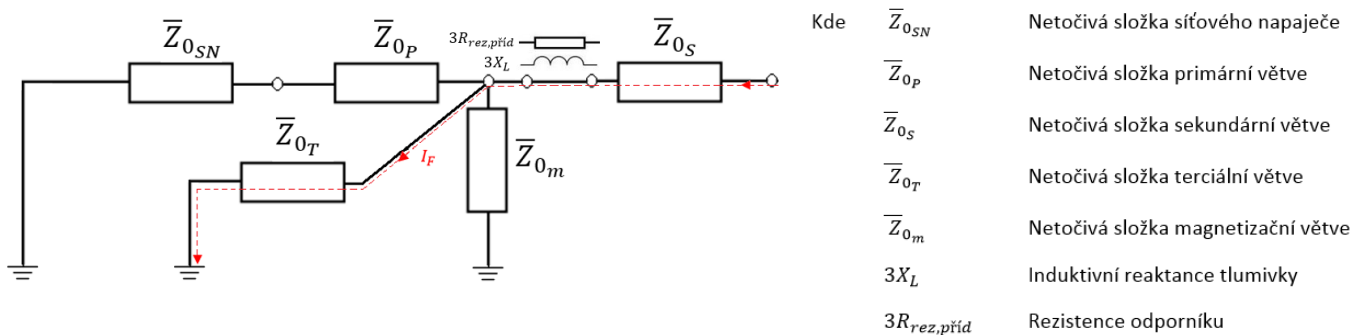
$$R_0 = R_1 * \frac{R_{0k}}{R_{1k}} = 1,344 * 1 = 1,344 \Omega \quad (6.28)$$

$$X_0 = X_1 * \frac{X_{0k}}{X_{1k}} = 1,772 * 1 = 1,772 \Omega \quad (6.29)$$

$$Z_{0_{line}} = R_1 + X_1 = 1,344 + j1,772 = (1,344 + j1,772) \Omega \quad (6.30)$$

6.4.2 Celková impedance a poruchové proudy v jednotlivých sítích, lišících se uzemněním uzlu transformátoru

V následující kapitole budeme počítat celkové impedance daných sítí, které se liší zapojením uzlu transformátoru, a jejich poruchové proudy. Ze začátku si musíme stanovit, jaké typy transformátorů se používají. Jsou k dispozici transformátory se třemi nebo dvěma vinutími, které při použití ovlivní soustavu z hlediska celkové impedance. Náhradní schéma netočivé složky impedance transformátoru se třemi vinutími je na Obr. 19.

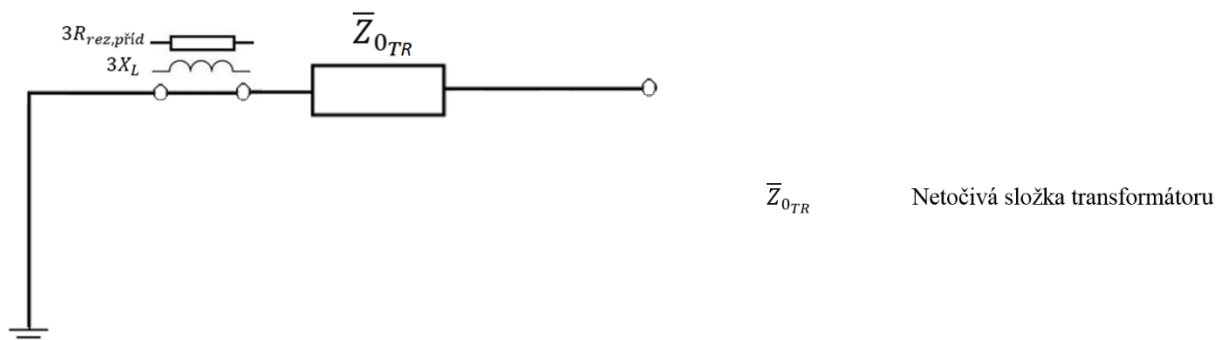


Obr. 19. Náhradní schéma netočivé složky impedance transformátoru se třemi vinutími

Primární a sekundární vinutí jsou zapojena do hvězdy, kdežto terciální je zapojeno do trojúhelníku. Terciální vinutí je zapojeno do trojúhelníku, čímž zkratuje magnetizační větev a díky tomu má kompenzační účinek, takže se do celkové impedance nebude započítávat netočivá složka impedance síťového napaječe.

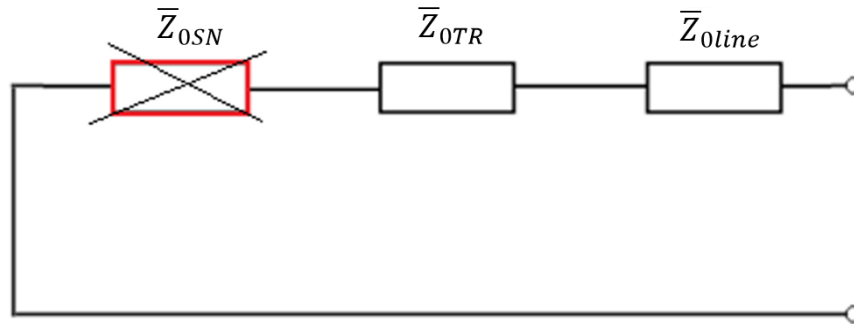
Náhradní schéma netočivé složky impedance transformátoru se dvěma vinutími je totožné, jako u transformátoru se třemi vinutími s tím rozdílem, že se zde nevyskytuje terciální větev, takže se zde projeví netočivá složka impedance síťového napaječe.

V našem případě budeme uvažovat použití transformátoru se dvěma vnutími. Dále pro zjednodušení zanedbáme netočivou složkou impedance síťového napaječe, protože je ve srovnání s vnitřními impedancemi ostatních zařízení zanedbatelná. Z důvodu zanedbání netočivé složky impedance síťového napaječe, se naše síť bude chovat jako síť s transformátorem se třemi vnutími. Dále zanedbáme vnitřní netočivou impedanci transformátoru v síti kompenzované a kompenzované s přídatným odporníkem, protože je ve srovnání s impedancí tlumivky zanedbatelná. Z výše uvedeného vyplývá schéma na Obr. 20.



Obr. 20. Netočivé schéma impedance s uvažováním výše popsaných podmínek

6.4.2.1 Účinně uzemněná síť



Obr. 21. Schéma netočivé složky soustavy účinně uzemněné

Celková impedance sítě

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_{0TR} + Z_{0line} + 3(R_{DTS} + R_F) \\ &= j1,8146 + 1,344 + j1,772 + 3 * (1,39 + 10) \\ &= (35,514 + j3,5866)\Omega \end{aligned} \quad (6.31)$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1SN} + Z_{1TR} + Z_{1line} \\ &= 0,01854 + j0,1854 + 0,0272 + j1,2097 + 1,344 + j1,772 \\ &= (1,3897 + j3,1671)\Omega \end{aligned} \quad (6.32)$$

$$Z_{0line} = R_1 + X_1 = 1,344 + j1,772 = (1,344 + j1,772)\Omega \quad (6.33)$$

Výpočet poruchových proudů

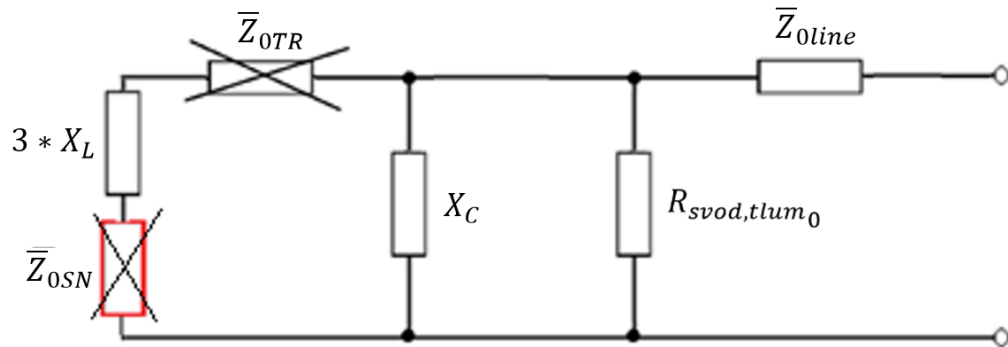
$$\begin{aligned} L - N \quad I_F &= \frac{c * U_{vz} * \sqrt{3}}{|2 * Z_1 + Z_0|} \\ &= \frac{1,1 * 22 * 10^3 * \sqrt{3}}{|2 * (1,3897 + j3,1671) + (35,514 + j3,5866)|} = 1059,6 A \end{aligned} \quad (6.34)$$

$$\begin{aligned} L - L - N \quad I_F &= \frac{c * U_{vz} * \sqrt{3}}{|2 * Z_0 + Z_1|} \\ &= \frac{1,1 * 22 * 10^3 * \sqrt{3}}{|2 * (35,514 + j3,5866) + (1,3897 + j3,1671)|} = 573 A \end{aligned} \quad (6.35)$$

$$\begin{aligned} L - L \quad I_F &= \frac{c * U_{vz} * 3}{|6 * (|Z_1| + R_{DTS} + R_F)|} = \frac{1,1 * 22 * 10^3 * 3}{|6 * (3,4586 + 1,39 + 10)|} \\ &= 817,4 A \end{aligned} \quad (6.36)$$

Kde L-L představuje dvě zemní spojení blízko sebe.

6.4.2.2 Kompenzovaná síť



Obr. 22. Schéma netočivé složky kompenzované sítě

Induktivní reaktance tlumivky

$$3X_{L0} = 3 * \frac{U_{vz}}{\sqrt{3} * (v + I_c)} = 3 * \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3} * (0 + 200)} = 190,5256 \Omega \quad (6.37)$$

Kapacitní reaktance vůči zemi

$$X_{c0} = -3 * 3X_L = -190,5256 \Omega \quad (6.38)$$

Činný odpor svodu a zhášecí tlumivky

$$R_{svod,tlum_0} = \frac{U_{vz} * \sqrt{3}}{0,1 * (v + I_c)} = \frac{22 * 10^3 * \sqrt{3}}{0,1 * (0 + 200)} = 1905,2559 \Omega \quad (6.39)$$

Celková impedance sítě

$$\begin{aligned} Z_0 &= \left(\frac{1}{R_{svod,tlum_0}} + j \frac{1}{3X_{L0}} - j \frac{1}{X_{c0}} \right)^{-1} + Z_{0line} \\ &= \left(\frac{1}{1905,3} + j \frac{1}{190,5256} - j \frac{1}{190,5256} \right)^{-1} + 1,344 + j1,772 \\ &= (1906,64 + j1,772) \Omega \end{aligned} \quad (6.40)$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1SN} + Z_{1TR} + Z_{1line} \\ &= 0,01854 + j0,1854 + 0,0272 + j1,2097 + 1,344 + j1,772 \\ &= (1,3897 + j3,1671) \Omega \end{aligned} \quad (6.41)$$

a) Řešení

$$L - N \quad I_F = 0,1 * I_c = 0,1 * 200 = 20 \text{ A} \quad (6.42)$$

b) Řešení

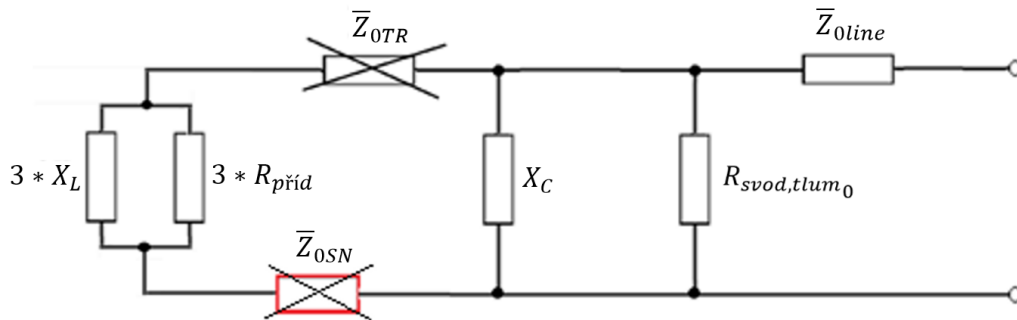
Výpočet poruchových proudů (6.36), (6.34)

$$\begin{aligned} L - N \quad I_F &= \frac{c * U_{vz} * \sqrt{3}}{|2 * Z_1 + Z_0 + 3(R_{DTS} + R_F)|} \\ &= \frac{1,1 * 22 * 10^3 * \sqrt{3}}{|2 * (1,3897 + j3,1671) + 1906,64 + j1,772 + 3 * (1,39 + 10)|} = 21,57 \text{ A} \end{aligned}$$

$$L - L \quad I_F = \frac{c * U_{vz} * 3}{|6 * (|Z_1| + R_{DTS} + R_F)|} = \frac{1,1 * 22 * 10^3 * 3}{|6 * (3,4586 + 1,39 + 10)|} = 817,4 \text{ A}$$

Kde L-L představuje dvě zemní spojení blízko sebe.

6.4.2.3 Síť kompenzovaná s dočasným přídatným rezistorem



Obr. 23. Schéma netočivé složky soustavy kompenzované s přídatným rezistorem

Induktivní reaktance tlumivky (6.37)

$$3X_{L_0} = 3 * \frac{U_{vz}}{\sqrt{3} * (v + I_c)} = 3 * \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3} * (0 + 200)} = 190,5256 \Omega$$

Kapacitní reaktance vůči zemi (6.38)

$$X_{c_0} = -3 * 3X_L = -190,5256 \Omega$$

Rezistence přídatného odporu

$$3R_{přid_0} = 3 * \frac{U_{vz}}{\sqrt{3} * I_R} = 3 * \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3} * 20} = 1905,2559 \Omega \quad (6.43)$$

Činný odpor svodu a zhášecí tlumivky (6.39)

$$R_{svod,tlum_0} = \frac{U_{vz} * \sqrt{3}}{0,1 * (v + I_c)} = \frac{22 * 10^3 * \sqrt{3}}{0,1 * (0 + 200)} = 1905,2559 \Omega$$

Celková impedance sítě

$$\begin{aligned} Z_0 &= \left(\frac{1}{R_{svod,tlum_0}} + \frac{1}{3R_{přid_0}} + j \frac{1}{3X_{L_0}} - j \frac{1}{X_{c_0}} \right)^{-1} + Z_{0line} \\ &= \left(\frac{1}{1905,3} + \frac{1}{1905,3} + j \frac{1}{190,5256} - j \frac{1}{190,5256} \right)^{-1} + 1,344 \\ &\quad + j1,772 = (953,997 + j1,772) \Omega \end{aligned} \quad (6.44)$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1SN} + Z_{1TR} + Z_{1line} \\ &= 0,01854 + j0,1854 + 0,0272 + j1,2097 + 1,344 + j1,772 \\ &= (1,3897 + j3,1671) \Omega \end{aligned} \quad (6.45)$$

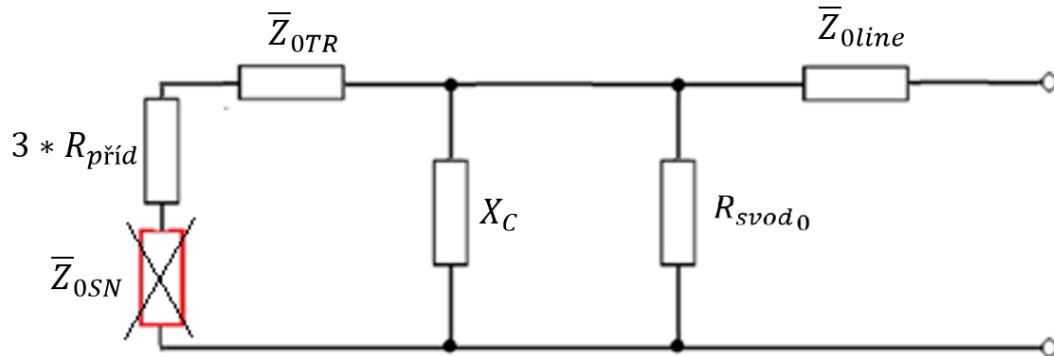
Výpočet poruchových proudů (6.36), (6.34)

$$\begin{aligned} L - N \quad I_F &= \frac{c * U_{vz} * \sqrt{3}}{\left| 2 * Z_1 + Z_0 + 3(R_{DTS} + R_F) \right|} \\ &= \frac{1,1 * 22 * 10^3 * \sqrt{3}}{\left| 2 * (1,3897 + j3,1671) + 953,997 + j1,772 + 3 * (1,39 + 10) \right|} = 42,3 \text{ A} \end{aligned}$$

$$L-L \quad I_F = \frac{c * U_{vz} * 3}{|6 * (|Z_1| + R_{DTS} + R_F)|} = \frac{1,1 * 22 * 10^3 * 3}{|6 * (3,4586 + 1,39 + 10)|} = 817,4 \text{ A}$$

Kde L-L představuje dvě zemní spojení blízko sebe.

6.4.2.4 Síť uzemněná přes rezistor



Obr. 24. Schéma netočivé složky soustavy uzemněné přes odporník

Činný odpor svodu (6.39)

$$R_{svod_0} = \frac{U_{vz} * \sqrt{3}}{0,1 * (v + I_C)} = \frac{22 * 10^3 * \sqrt{3}}{0,1 * (0 + 200)} = 1905,2559 \Omega$$

Rezistence odporu (6.43)

$$3R_{rez_0} = 3 * \frac{U_{vz}}{\sqrt{3} * I_R} = 3 * \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3} * 1000} = 38,105 \Omega$$

Kapacitní reaktance vůči zemi (6.38)

$$X_{C_0} = -3 * 3X_L = -190,5256 \Omega$$

Celková impedance sítě

$$\begin{aligned} Z_0 &= \left(\frac{1}{R_{svod_0}} + \frac{1}{3R_{rez_0}} - j \frac{1}{X_{C_0}} \right)^{-1} + Z_{0line} + Z_{0TR} \\ &= \left(\frac{1}{1905,3} + \frac{1}{38,105} - j \frac{1}{190,5256} \right)^{-1} + 1,344 + j1,772 \\ &\quad + j1,8146 = (37,3188 + j10,6405) \Omega \end{aligned} \quad (6.46)$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1SN} + Z_{1TR} + Z_{1line} \\ &= 0,01854 + j0,1854 + 0,0272 + j1,2097 + 1,344 + j1,772 \\ &= (1,3897 + j3,1671) \end{aligned} \quad (6.47)$$

Výpočet poruchových proudů (6.36), (6.34)

$$L - N \quad I_F = \frac{c * U_{vz} * \sqrt{3}}{|2 * Z_1 + Z_0 + 3(R_{DTS} + R_F)|}$$

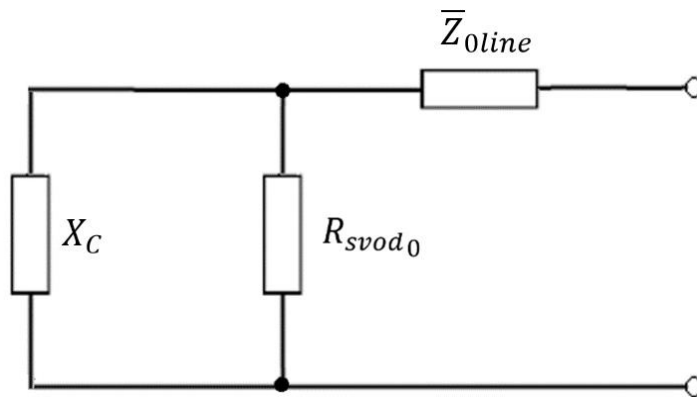
$$= \frac{1,1 * 22 * 10^3 * \sqrt{3}}{|2 * (1,3897 + j3,1671) + 37,3188 + j10,6405 + 3 * (1,39 + 10)|}$$

$$= 550,2 \text{ A}$$

$$L - L \quad I_F = \frac{c * U_{vz} * 3}{|6 * (|Z_1| + R_{DTS} + R_F)|} = \frac{1,1 * 22 * 10^3 * 3}{|6 * (3,4586 + 1,39 + 10)|} = 817,4 \text{ A}$$

Kde L-L představuje dvě zemní spojení blízko sebe.

6.4.2.5 Sít' izolovaná



Obr. 25. Schéma netočivé složky izolované sítě

Činný odpor svodu (6.39)

$$R_{svod0} = \frac{U_{vz} * \sqrt{3}}{0,1 * I_C} = \frac{22 * 10^3 * \sqrt{3}}{0,1 * 200} = 1905,2559 \Omega$$

Kapacitní reaktance vůči zemi (6.38)

$$X_{c0} = -3 * 3X_L = -190,5256 \Omega$$

a) Řešení

Výpočet poruchových proudů

$$L - N \quad I_F = I_C = 200 \text{ A} \quad (6.48)$$

b) Řešení

Celková impedance sítě

$$Z_0 = \left(\frac{1}{R_{svod0}} - j \frac{1}{X_{c0}} \right)^{-1} + Z_{oline}$$

$$= \left(\frac{1}{1905,3} - j \frac{1}{190,5256} \right)^{-1} + 1,344 + j1,772$$

$$= (20,2 + j190,41) \Omega \quad (6.49)$$

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= Z_{1SN} + Z_{1TR} + Z_{1line} \\
 &= 0,01854 + j0,1854 + 0,0272 + j1,2097 + 1,344 + j1,772 \\
 &= (1,3897 + j3,1671)\Omega
 \end{aligned} \tag{6.50}$$

Výpočet poruchových proudů (6.36), (6.34)

$$\begin{aligned}
 L - N \quad I_F &= \frac{c * U_{vz} * \sqrt{3}}{|2 * Z_1 + Z_0 + 3(R_{DTS} + R_F)|} \\
 &= \frac{1,1 * 22 * 10^3 * \sqrt{3}}{|2 * (1,3897 + j3,1671) + (20,2 + j190,41) + 3 * (1,39 + 10)|} = 204,59 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$L - L \quad I_F = \frac{c * U_{vz} * 3}{|6 * (|Z_1| + R_{DTS} + R_F)|} = \frac{1,1 * 22 * 10^3 * 3}{|6 * (3,4586 + 1,39 + 10)|} = 817,4 \text{ A}$$

Kde L-L představuje dvě zemní spojení blízko sebe.

6.5 Výpočet koeficientů z vypočtených a zadaných hodnot

V následujících tabulkách jsou shrnuty všechny dosud vypočítané, zadané a odhadnuté hodnoty, ze kterých budeme vycházet při výpočtu pravděpodobnosti úmrtí člověka v blízkosti venkovního vedení.

Tab. 6. Statistika poruch v sítích s různým uzemněním uzlu transformátoru

Hladina napětí	Zapojení uzlu	Typ poruchy	Počet poruch v síti za rok		Počet DTS v síti (-)	Počet poruch na DTS za rok f_n
			f_{n1}	f_{n2}		
VN	Kompenzovaná	L-N	182	0	22000	0,00827
		L-L	5	0		0,00023
VN	Uzemněná přes rezistor	L-N	45	0	5500	0,00818
		L-L	2	0		0,00036
VN	Izolovaná	L-N	94	0	11000	0,00855
		L-L	3	0		0,00027
VN	Účinně uzemněná	L-N	118	0	15000	0,00787
		L-L-N	6	0		0,00040
		L-L	4	0		0,00027

Tab. 6. uvádí počet poruch v dané soustavě na určitý počet DTS vypnuté první ochranou f_{n1} a druhou ochranou f_{n2} za jeden rok. Hodnoty byly částečně odhadnuty, protože provozovatelé soustav statistiky poruch neprovádí. Platí, že čím přesnější statistiky budou k dispozici, tím více bude výsledek vypovídající. Koeficient f_n je celkový počet poruch na DTS, tzn. poruchy vypnuté první i záložní ochranou.

Tab. 7. Výskyt poruchy na jedné DTS za rok respektující opětovné zapnutí

Trvání poruchy na jedné DTS za rok respektující opětovné zapnutí						
Hladina napětí	Zapojení uzlu	Typ poruchy	Výskyt poruchy na DTS za rok		OZ (-)	Suma
			f_{n1oz}	f_{n2oz}		f_{noz}
VN	Kompenzovaná	L-N	0,008273	0	0	0,008273
		L-L	0,000455	0	1	0,000455
VN	Uzemněná přes rezistor	L-N	0,016364	0	1	0,016364
		L-L	0,000727	0	1	0,000727
VN	Izolovaná	L-N	0,008545	0	0	0,008545
		L-L	0,000545	0	1	0,000545
VN	Účinně uzemněná	L-N	0,015733	0	1	0,015733
		L-L-N	0,000800	0	1	0,000800
		L-L	0,000533	0	1	0,000533

Hodnota opětovného zapnutí je volitelná a v případě jejího nastavení na 1 se zvýší počet poruch za rok o dvojnásobek, protože dojde k opětovnému zapnutí, kdy může dojít k opětovnému vzniku poruchy. Veličina f_{n1} reprezentuje počet poruch na jedné DTS vypnuté prvním ochranným prvkem. Veličina f_{n2} reprezentuje počet poruch na jedné DTS vypnuté záložní ochranou. Koeficient $f_{n_{oz}}$ je celkový počet poruch na DTS, tzn. poruchy vypnuté první i záložní ochranou při respektování opětovného zapnutí.

Příklad výpočtu 2. řádku Tab. 7.:

$$f_{n_{oz}} = f_{n1} + f_{n1} * OZ = 0,00023 + 0,00023 * 1 \doteq 0,000455 \quad (6.51)$$

$$f_{n_{oz}} = f_{n1_{oz}} + f_{n2_{oz}} = 0,000455 + 0 = 0,000455 \quad (6.52)$$

Tab. 8. Hodnoty poruchových proudů jednotlivých typů uzemnění uzlu a jejich vypínací časy

Hladina napětí	Zapojení uzlu	Typ poruchy	Maximální hodnota poruchy (A)	Časové nastavení ochran (s)		K_n
				f_{d1}	f_{d2}	
VN	Kompenzovaná	L-N	20,0	1200	0	9,9272727
		L-L	817,4	0,3	0,5	0,0001364
VN	Komp. s přídavným rezistorem	L-N	42,3	1	0	0,0163636
		L-L	817,4	x	x	x
VN	Uzemněná přes rezistor	L-N	550,4	0,3	0,5	0,0049091
		L-L	817,4	0,3	0,5	0,0002182
VN	Izolovaná	L-N	200,0	1	0,5	0,0085455
		L-L	817,4	0,3	0,5	0,0001636
VN	Účinně uzemněná	L-N	1060,6	0,3	0,5	0,00472
		L-L-N	817,4	0,3	0,5	0,00024
		L-L	573,1	0,3	0,5	0,00016

V Tab. 8. jsou sjednoceny výsledky z kapitoly 6.4 a zadané parametry z kapitoly 6.2. Koeficient K_n reprezentuje součin činitelů f_n a f_d .

Příklad výpočtu 2. řádku Tab. 8.:

$$K_n = f_{n_{oz}} * f_d = f_{n1_{oz}} * f_{d1} + f_{n2_{oz}} * f_{d2} = 0,000455 * 0,3 + 0 * 0,5 = 0,0001364 \quad (6.53)$$

Kde $f_{n1_{oz}} * f_{d1}$ celková doba působení poruch vypnutých prvním ochranným prvkem na jedné DTS za rok respektující opětovné zapnutí.
 $f_{n2_{oz}} * f_{d2}$ celková doba působení poruch vypnutých záložním ochranným prvkem na jedné DTS za rok respektující opětovné zapnutí.

Aplikováním koeficientů f_{noz} a K_n vyjde upravený vzorec:

$$P_{náhoda} = \frac{p_n * (K_n + f_{noz} * p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60} \quad (6.54)$$

f_{noz} počet poruch na jedné DTS za jeden rok respektující opětovné zapnutí

p_n počet výskytů člověka v blízkosti uzemňovací soustavy za jeden rok

p_d délka výskytu člověka (s)

T doba, pro kterou je pravděpodobnost počítána (roky) = 1 rok

CRF redukční faktor náhody, jehož velikost závisí na povědomí lidí o nebezpečí vyskytujících se v blízkosti uzemňovací soustavy (výstražnými tabulemi, značkami)

Koeficienty T a CRF budeme uvažovat rovny jedné.

6.6 Výpočet pravděpodobnosti úmrtí

Nadcházející část se počítá pro všechny typy sítí totožně, takže si pro náš příklad výpočtu zvolíme síť kompenzovanou. Pro výpočet pravděpodobnosti máme téměř všechny potřebné veličiny, chybí nám pouze specifikovat scénář a dobu jednoho dotyku člověka s nástrojem, na kterém se může vyskytnout dotykové napětí.

Tab. 9. Uvažované scénáře, při kterých by mohlo dojít k úrazu elektrickým proudem

Vyhodnocení dotykového napětí				
Respektované scénáře	Obuv	U_{TNN0}	dotyků/osobu/rok	Trvání dotyku (s)
		[%]		
a) Sprcha	Ne	30	1000	4
b) Kohoutek na dvoře	Ne	50	100	4
c) Kuchyňský dřez	Ne	20	1000	4
d) Pračka	Ne	30	300	4
e) Ohřev motoru auta	Ano	40	100	4
f) Míchačka	Ano	80	100	4

V případě všech zmíněných scénářů v Tab. 9. by mělo podle zákona fungovat společné pospojování. Může však nastat situace, kdy z nějakého důvodu některý z výše zmíněných scénářů pospojovaný nebude, což je pro obyvatele domácnosti velmi nebezpečné. Budeme tedy uvažovat nejhorší možnou situaci, a to bez společného pospojování.

Tabulka charakterizuje běžné situace, ve kterých se při vzniku poruchy může na daném nástroji, zařízení objevit napětí rovné námi zadané procentuální hodnotě potenciálu zemniče.

Nyní již máme dostupné všechny potřebné parametry k výpočtu pravděpodobnosti.

Tab. 10. Výsledky pravděpodobnosti úmrtí člověka v případě kompenzované sítě

Uzel	Porucha	$U_{T,DTS}$	U_{Tnn}	U_T		U_{Tp}					Individ. $P_{náhoda}$	Celková $P_{náhoda}$
		[V]	[V]	Sc.	[V]	I_E	t_1	$U_{Tp}(t)$	$Z_T(U_{Tp})$	U_{vTp}		
Komp. sít'	L-N	28	28	a)	8	20	1200	80		80	0	9,29673 E-08
				b)	14					80	0	
				c)	6					80	0	
				d)	8					80	0	
				e)	11				1900	128	0	
				f)	22				1900	128	0	
	L-L-N	1138	1138	a)	341	817	0,30	300		300	6,19782 E-08	
				b)	569					300	6,19782 E-09	
				c)	228					300	0	
				d)	341					300	1,85935 E-08	
				e)	455				1100	614	0	
				f)	911				1100	614	6,19782 E-09	

Příklad výpočtu Tab. 10. poruchy L-N:

Potenciál zemniče

$$U_T = I_E * R_{DTS} * r = 20 * 1,39 * 1 = 28 V \quad (6.55)$$

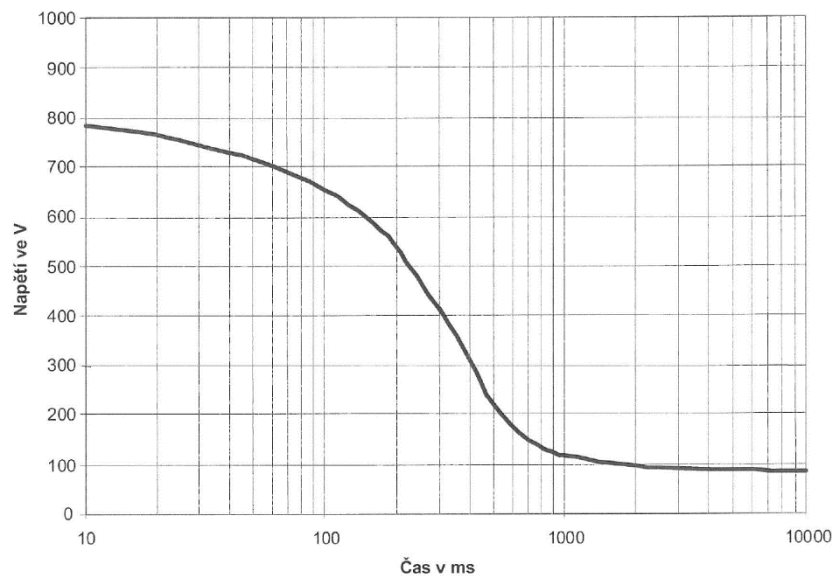
Dotykové napětí soustavy VN ovlivňující soustavu NN. Předpokládáme přenesení 100% dotykového napětí strany VN.

$$U_{Tnn} = U_T * \frac{(U_{TNN}/U_{TVN})}{100} = \frac{28 * 100}{100} = 28 V \quad (6.56)$$

Dotykové napětí vzniklé u jednotlivých scénářů z Tab. 9.

$$\begin{aligned} a) U_{TNNa} &= U_{TNNa} * U_{TNNoa} = 28 * 0,3 \doteq 8 V \\ b) U_{TNNa} &= U_{TNNb} * U_{TNNob} = 28 * 0,5 \doteq 14 V \\ c) U_{TNNa} &= U_{TNNc} * U_{TNNoc} = 28 * 0,2 \doteq 6 V \\ d) U_{TNNa} &= U_{TNNd} * U_{TNNod} = 28 * 0,3 \doteq 8 V \\ e) U_{TNNa} &= U_{TNNe} * U_{TNNoe} = 28 * 0,4 \doteq 11 V \\ f) U_{TNNa} &= U_{TNNf} * U_{TNNof} = 28 * 0,8 \doteq 22 V \end{aligned} \quad (6.57)$$

Hodnota dovoleného dotykového napětí $U_{Tp}(t)$ byla odečtena z následující grafické závislosti.



Obr. 26. Hodnota dovoleného dotykového napětí v závislosti na době působení [1]

Při uvažování zemního spojení v síti kompenzované s nastavením ochrany na 1200s, je odečtené dovolené dotykové napětí rovno 80V.

Pokud počítáme scénář, ve kterém se předpokládá, že člověk bude mít dodatečnou impedanci ve formě obuvi, tak je nutné přičíst impedanci obuvi k impedanci těla a dovolené dotykové napětí aproximovat k hodnotě odpovídající k dané hodnotě celkové impedance. Pro $U_{Tp}(t) = 80V$ jsme tedy odečetli impedanci těla 1900 Ω . Tabulka závislosti impedance lidského těla na dovoleném dotykovém napětí je uvedena v normě ČSN 50522 tabulka B.2.

Nyní je nutné přepočítat dovolené dotykové napětí respektující změnu impedance.

$$U_{vTp} = U_{Tp}(t) * \left(1 + \frac{R_d + 1,5 * \rho_E}{Z_T(U_{Tp})} \right) = 80 * \left(1 + \frac{1000 + 1,5 * 100}{1900} \right) = 128 V \quad (6.58)$$

Kde R_d je impedance obuvi, součin $1,5 * \rho_E$ respektuje přechodový odpor mezi podrážkou obuvi a zemí. Převzato z normy ČSN 50522 tabulky B.4.

Posledním krokem je vyhodnocení výsledků. Musíme porovnat maximální dovolené dotykové napětí se skutečným dotykovým napětím. V tomto případě u všech scénářů platí $U_{Tp}(t) > U_T(t)$, takže počítat pravděpodobnost úmrtí člověka není nutné, protože nedojde k tak velkému navýšení potenciálu, aby to člověka zabilo.

Příklad výpočtu Tab. 10. poruchy L-L-N:

Potenciál zemniče (6.55)

$$U_T = I_E * R_{DTS} * r = 817 * 1,39 * 1 = 1138 \text{ V}$$

Dotykové napětí soustavy VN ovlivňující soustavu NN. Předpokládáme přenesení 100% dotykového napětí strany VN. (6.56)

$$U_{T_{nn}} = U_T * \frac{(U_{T_{NN}}/U_{T_{VN}})}{100} = \frac{1138 * 100}{100} = 1138 \text{ V}$$

Dotykové napětí vzniklé u jednotlivých scénářů z Tab. 9. (6.57)

$$a) U_{T_{NNa}} = U_{T_{NNa}} * U_{T_{NNoa}} = 1138 * 0,3 \doteq 341 \text{ V}$$

$$b) U_{T_{NNa}} = U_{T_{NNb}} * U_{T_{NNob}} = 1138 * 0,5 \doteq 569 \text{ V}$$

$$c) U_{T_{NNa}} = U_{T_{NNc}} * U_{T_{NNoc}} = 1138 * 0,2 \doteq 228 \text{ V}$$

$$d) U_{T_{NNa}} = U_{T_{NNd}} * U_{T_{NNod}} = 1138 * 0,3 \doteq 341 \text{ V}$$

$$e) U_{T_{NNa}} = U_{T_{NNe}} * U_{T_{NNoe}} = 1138 * 0,4 \doteq 455 \text{ V}$$

$$f) U_{T_{NNa}} = U_{T_{NNf}} * U_{T_{NNof}} = 1138 * 0,8 \doteq 911 \text{ V}$$

Hodnota dovoleného dotykového napětí $U_{Tp}(t)$ byla odečtena z Obr. 23.

Při uvažování dvojitého zemního spojení resp. zkratu v síti kompenzované s nastavením ochrany na 0,3s, je odečtené dovolené dotykové napětí rovno 300 V.

Pokud počítáme scénář, ve kterém se předpokládá, že člověk bude mít dodatečnou impedanci ve formě obuvi, tak je nutné přičíst impedanci obuvi k impedanci těla a dovolené dotykové napětí aproximovat k hodnotě odpovídající k dané hodnotě celkové impedance. Pro $U_{Tp}(t) = 300\text{V}$ jsme tedy odečetli impedanci těla 1100 Ω . Tabulka závislosti impedance lidského těla na dovoleném dotykovém napětí je uvedena v normě ČSN 50522 tabulka B.2.

Nyní je nutné přepočítat dovolené dotykové napětí respektující změnu impedance. (6.58)

$$U_{v_{Tp}} = U_{Tp}(t) * \left(1 + \frac{R_d + 1,5 * \rho_E}{Z_T(U_{Tp})}\right) = 300 * \left(1 + \frac{1000 + 1,5 * 100}{1100}\right) = 614 \text{ V}$$

Kde R_d je impedance obuvi, součin $1,5 * \rho_E$ respektuje přechodový odpor mezi podrážkou obuvi a zemí. Převzato z normy ČSN 50522 tabulky B.4.

Posledním krokem je vyhodnocení výsledků. Musíme porovnat maximální dovolené dotykové napětí se skutečným dotykovým napětím.

U případů, kdy platí $U_{Tp}(t) > U_T(t)$, tak $P_{náhoda} = 0$, protože nedojde k ohrožení člověka, tudíž se nemusí počítat pravděpodobnost úmrtí. V ostatních případech se musí počítat pravděpodobnost úmrtí pro jednotlivé scénáře pomocí následujícího vzorce (6.54).

$$P_{náhoda} = \frac{p_n * (K_n + f_{noz} * p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60}$$

$$P_{náhoda(a)_{L-L-N}} = \frac{p_n * (K_n + f_{noz} * p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60} = \frac{1000 * (0,0001364 + 0,00046 * 4)}{365 * 24 * 60 * 60} = 6,2 * 10^{-8}$$

$$P_{náhoda(b)_{L-L-N}} = \frac{p_n * (K_n + f_{noz} * p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60} = \frac{100 * (0,0001364 + 0,00046 * 4)}{365 * 24 * 60 * 60} = 6,2 * 10^{-9}$$

$$P_{náhoda(c)_{L-L-N}} = 0$$

$$P_{náhoda(d)_{L-L-N}} = \frac{p_n * (K_n + f_{noz} * p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60} = \frac{300 * (0,0001364 + 0,00046 * 4)}{365 * 24 * 60 * 60} = 1,86 * 10^{-8}$$

$$P_{náhoda(e)_{L-L-N}} = 0$$

$$P_{náhoda(f)_{L-L-N}} = \frac{p_n * (K_n + f_{noz} * p_d) * T * CRF}{365 * 24 * 60 * 60} = \frac{100 * (0,0001364 + 0,00046 * 4)}{365 * 24 * 60 * 60} = 6,2 * 10^{-9}$$

Sečtením pravděpodobností všech scénářů úmrtí vzniklé při poruchách L-N a L-L-N dostaneme celkovou pravděpodobnost úmrtí člověka v blízkosti kompenzované sítě.

$$P_{náhoda_{celková}} = \sum_{k=a}^f P_{náhoda_{L-L-N}} + \sum_{k=a}^f P_{náhoda_{L-N}} = 9,3 * 10^{-8} + 0 = \underline{9,3 * 10^{-8}} \quad (6.59)$$

Dalším a posledním krokem je vyhodnotit výsledek vzhledem k Tab. 11.

Tab. 11. Limity pravděpodobnosti individuálního úmrtí [4].

Pravděpodobnost úmrtí jednotlivce	Klasifikace rizika veřejností	Výsledné řešení rizika
$\geq 10^{-4}$	Velké nebo netolerovatelné riziko	Musí zabránit riziku bez ohledu na náklady
$10^{-4} - 10^{-6}$	Střední riziko	Je třeba minimalizovat výskyt, pokud náklady nepřevyšují hodnotu získané bezpečnosti
$\leq 10^{-6}$	Malé nebo tolerovatelné riziko	Riziko je obecně přijatelné

7 ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ

7.1 Ohodnocení ukázkového příkladu

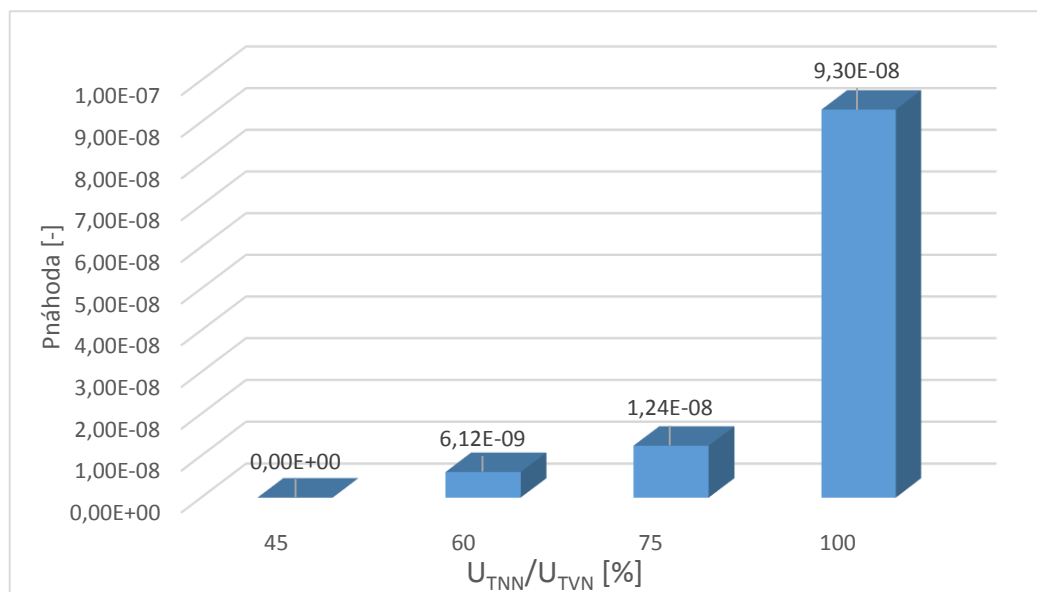
Po vypracování ukázkového příkladu sítě z kapitoly 6. je potřeba učinit závěr resp. vyhodnocení. V kapitole 6. jsme dovršili požadovaného výsledku pravděpodobnosti úmrtí v případě kompenzované sítě $P_{náhoda_{celková}} = 9,3 \cdot 10^{-8}$. Tento výsledek musíme vyhodnotit na základě Tab. 11. Z toho vyplývá, že u námi počítaného ukázkového příkladu kompenzované sítě s pravděpodobnosti úmrtí člověka $P_{náhoda} = 9,3 \cdot 10^{-8}$, která spadá do rizik malých, či tolerovatelných, nemusí být žádná dodatečná opatření, protože je riziko obecně přijatelné.

Pokud by hodnota pravděpodobnosti překročila tolerovatelnou hranici $P_{náhoda} \geq 10^{-4}$, tak by bylo nutné přepracovat návrh projektu uzemňovací soustavy tak, aby pravděpodobnost spadala do tolerovatelných mezí. Toho lze docílit například snížením hodnoty skutečného dotykového napětí, což se uskuteční snížením hodnoty odporu uzemňovací soustavy. V tomto případě se zkrátka musí dosáhnout přijatelného rizika za každou cenu. Postupuje se podle diagramu v Obr. 14. Pokud by se hodnota pravděpodobnosti pohybovala v intervalu $10^{-4} \geq P_{náhoda} \geq 10^{-6}$, tak se musí vypracovat návrh zmírňujících opatření a vypočítat finanční náklady těchto opatření. Následně se porovná součin počtu úmrtí za dobu provozu uzemňovací soustavy a odhadované ceny lidského života s částkou, která je potřeba vynaložit na opatření ke zmírnění rizik.

7.2 Parametry, které mají majoritní vliv na pravděpodobnost úmrtí

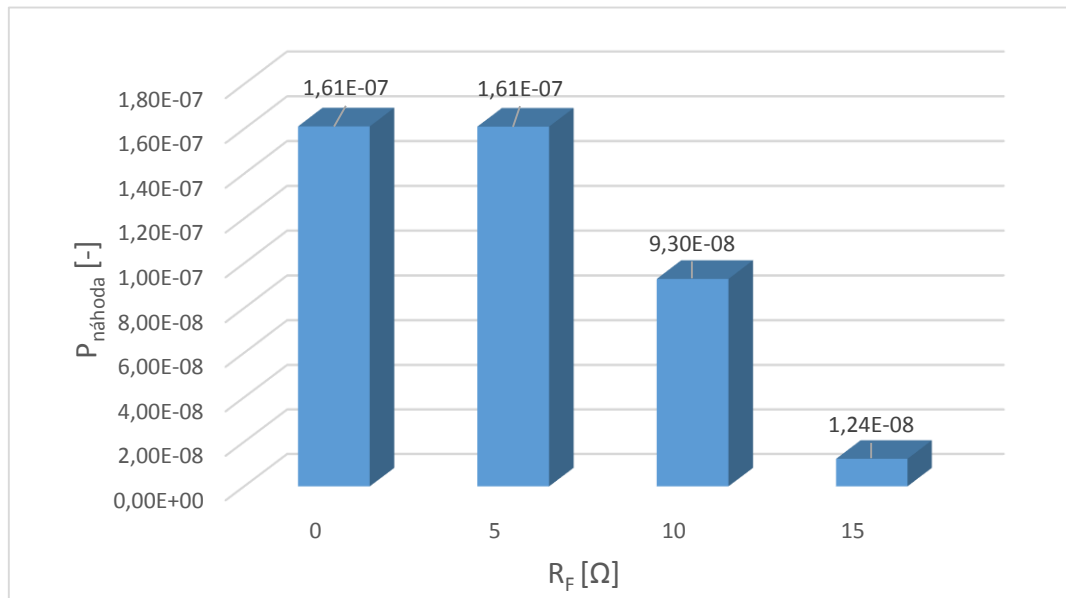
Na výslednou pravděpodobnost mají značný vliv vstupní parametry, které nejsou vždy přesně známy a mění se s časem. Proto je vhodné udělat citlivostní analýzu, která nám pomůže poukázat na některé nedostatky tohoto přístupu, pokud nejsou dostupná relevantní data.

V Obr. 27. je vyobrazena analýza závislosti změny procentuálního přenosu potenciálu z VN na NN soustavu na pravděpodobnosti úmrtí při zachování ostatních parametrů. Je patrné, že při zvolení úplného přenosu, se zvýšila pravděpodobnost úmrtí téměř desetinásobně ve srovnání s přenosem 75% potenciálu. Rozdíl byl vyvolaný překročením dovoleného dotykového napětí ve scénářích a) a d) z Tab. 9. o 14%.



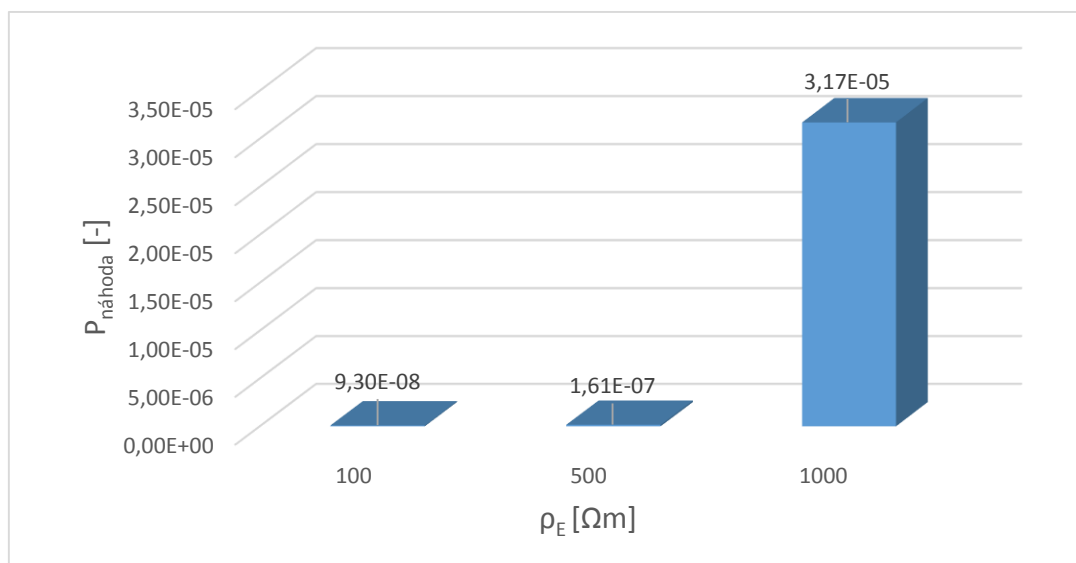
Obr. 27. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na procentuálním přeneseném potenciálu z VN na NN

Další analýzou byla závislost pravděpodobnosti úmrtí na odporu poruchy při zachování zbylých parametrů. Je logické, že čím větší odpor poruchy bude, tím menší bude poruchový proud, tím méně scénářů bude smrtelných, tím menší bude pravděpodobnost úmrtí. Jelikož se odpor poruchy nedá exaktně určit, tak je nutné, aby se vždy počítalo s nejhorším možným případem, a to $R_F = 0$.



Obr. 28. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na odporu poruchy

Posledním zvoleným parametrem pro analýzu, je rezistivita půdy. Níže je uvedený graf závislosti pravděpodobnosti úmrtí na rezistivitě půdy při zachování zbylých parametrů. Mezi 100 Ωm a 500 Ωm není nijak markantní rozdíl, pravděpodobnost stoupla o necelý dvojnásobek. Na druhou stranu rozdíl mezi 500 Ωm a 1000 Ωm už dosahuje téměř dvousetnásobku. K pravděpodobnosti úmrtí všech scénářů při zkratu, se přidal i scénář b) z Tab. 9. u zemního spojení, kdy dovolené dotykové napětí bylo překročeno o 2V. Ovšem situace, kdybychom počítali s rezistivitou 100 Ωm a v nejhorším případě by se vlivem vlhkosti atp. vyskytlo 500 Ωm či dokonce 1000 Ωm , je nereálná.

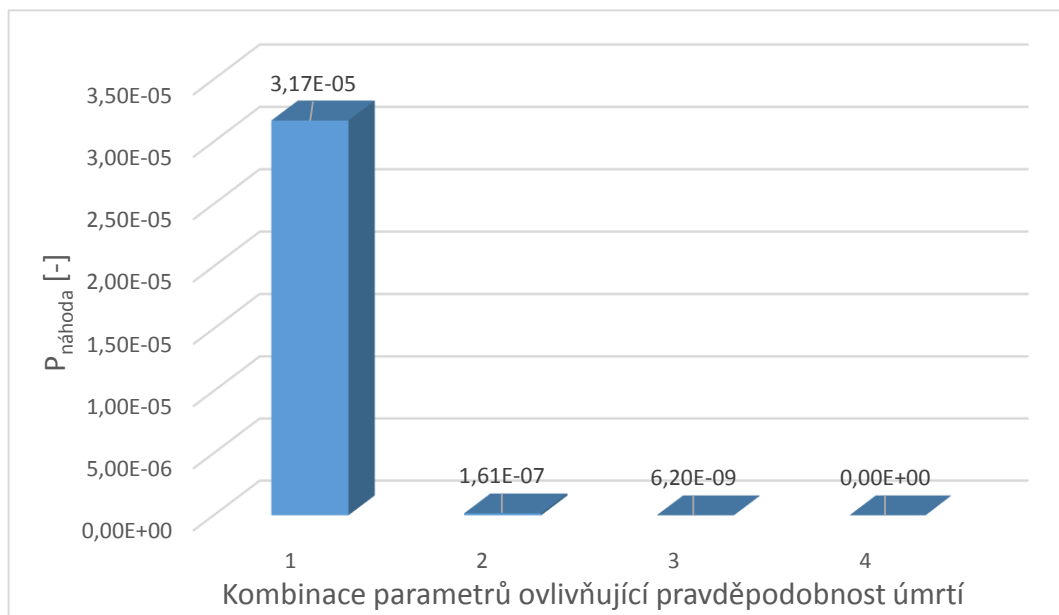


Obr. 29. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na rezistivitě půdy

V Obr. 30. jsou uvedeny 4 ilustrativní scénáře kombinací výše uvedených parametrů mající majoritní vliv na pravděpodobnost úmrtí

, kde

1. $\rho_e = 1000 \Omega m$; $R_F = 0 \Omega$; $\frac{U_{TNN}}{U_{TVN}} = 100\%$ nejhorší možný případ
2. $\rho_e = 500 \Omega m$; $R_F = 5 \Omega$; $\frac{U_{TNN}}{U_{TVN}} = 75\%$
3. $\rho_e = 100 \Omega m$; $R_F = 10 \Omega$; $\frac{U_{TNN}}{U_{TVN}} = 60\%$
4. $\rho_e = 100 \Omega m$; $R_F = 15 \Omega$; $\frac{U_{TNN}}{U_{TVN}} = 45\%$ příznivější případ



Obr. 30. Závislost pravděpodobnosti úmrtí na kombinacích ρ_e , R_F a U_{TNN}/U_{TVN}

Jak je patrné z Obr. 27, Obr. 28, Obr. 29, tak relevantními parametry majoritně ovlivňující pravděpodobnost úmrtí jsou rezistivita půdy a procentuální přenos potenciálu z VN na NN. Co se procentuálního přenosu potenciálu týče, tak je jeho změna v průběhu funkčnosti soustavy, nepravděpodobná. Rezistivita půdy se může během roku měnit. Může se navýšit až trojnásobně, což by zapříčinilo navýšení pravděpodobnosti úmrtí o jeden až dva řády, ale to by musely být splněny podmínky pro tak markantní nárůst rezistivity, což není standardní. Na základě získaných výsledků je doporučeno, aby se počítalo se vstupními parametry +15% pro dosažení jisté rezervy, protože není jistota přesných dostupných dat, tudíž musíme počítat s horším případem, který se může vyskytnout. Pokud bychom počítali se změřenými daty, tak by se mohla vyskytnout situace, kdy námi změřené hodnoty nebyly přesně stanoveny, tudíž není výsledek pravděpodobnosti úplně přesný. Potom záleží, jak se námi stanovená hodnota liší od skutečnosti. Pokud by reálná hodnota byla vyšší, než námi určená, tak by v případě, pokud by u námi zvolené hodnoty byly hodnoty dotykového napětí mírně pod hranicí dovoleného dotykového napětí, tak by při uvažování reálné resp. správné hodnoty, vzrostla pravděpodobnost úmrtí o scénáře, u kterých by ta hranice byla překročena, což by mělo značný vliv na celkovou pravděpodobnost úmrtí.

8 ZÁVĚR

V začátku práce jsme popsali teoretický přehled potřebný k dosažení cíle práce, jako druhy elektrických sítí podle uzemnění, proudy zemních spojení a zkratů v různých sítích lišících se zapojením uzlu, rozdělení proudů v uzemňovací soustavě a následně postup a podmínky řešení přístupu hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav používaný v současné době. Podstatou tohoto přístupu je navrhnout uzemňovací soustavu na maximální dovolené dotykové napětí neohledně na náklady. Diagram procesu návrhu zemnicí soustavy z hlediska bezpečnosti je na Obr. 10.

Jelikož se současný přístup zdá být neefektivní z hlediska nákladů na realizaci, tak bylo druhým úkolem práce popsat nový přístup pro hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav, jehož diagram se nachází v Obr. 14. Kompletní zpracování teorie nového přístupu je v kapitole 4. Z popisu nového přístupu, se zdá být, že je tento přístup efektivnější z hlediska nákladů na realizaci, než přístup současný. K tomu jsou ovšem potřebná relevantní data, statistiky poruch, od provozovatelů sítí, kteří je ve velké míře buď vůbec neprovádí, nebo je provádí, ale nemají dostatečnou vypovídající hodnotu.

V kapitole 5. jsou porovnány výše zmíněné přístupy hodnocení bezpečnosti zemnicích soustav.

Praktická část práce obsahuje zpracování ukázkového příkladu hodnocení vybrané zemnicí soustavy novým přístupem. Ilustrační schéma takové sítě v kapitole 6. a její zadané parametry v kapitole 6.2. Nejsložitější částí celého výpočtu, jsou výpočty impedancí a poruchových proudů jednotlivých typů sítí, lišící se uzemněním uzlu, které jsou uvedeny v kapitole 6.4. Přesnost výsledku pravděpodobnosti přímo souvisí s korektností vypočtených poruchových proudů. Druhým faktorem, který ovlivňuje přesnost výsledku, jsou relevantní data statistik poruch získaná od provozovatelů sítí. Pravděpodobnost úmrtí byla spočtena pomocí vzorce (4.1) pro několik scénářů, chcete-li místa dotyku, které jsou uvedeny spolu s procentuálním přeneseným potenciálem v Tab. 9. Jelikož se pravděpodobnost úmrtí počítá pro všechny typy sítí stejně, zvolili jsme ukázkový výpočet pro kompenzovanou síť. Výsledky jsou v Tab. 10.

V kapitole 6. jsme dovršili požadovaného výsledku pravděpodobnosti úmrtí v případě kompenzované sítě $P_{náhoda_{celková}} = 9,3 * 10^{-8}$. Tento výsledek je třeba vyhodnotit na základě Tab. 11. Z toho vyplývá, že námi počítaný ukázkový příklad kompenzované sítě spadá do rizik obecně tolerovatelných, tudíž nejsou potřebná žádná další zmírňující opatření.

V kapitole 7.2 byla provedena citlivostní analýza vlivu parametrů mající majoritní vliv na pravděpodobnost úmrtí. Provedli jsme analýzu pro měnící se rezistivitu půdy ρ_E , procentuální přenos potenciálu z VN na NN U_{TNN}/U_{TVN} a odpor poruchy R_F , zobrazeny jsou v Obr. 27, Obr. 28, Obr. 29. Dospěli jsme k závěru, že relevantními parametry mající majoritní vliv na pravděpodobnost úmrtí jsou rezistivita půdy ρ_E a procentuální přenos potenciálu z VN na NN U_{TNN}/U_{TVN} . Dalším zjištěním bylo, že je rozumné při výpočtu uvažovat vstupní parametry o 15% větší, než jsou námi předpokládáné, či změřené. Vyhneme se tak situaci, kdyby se s uvažováním námi zvolé hodnoty, bez rezervy, vypočetlo dotykové napětí pod hranicí dovoleného dotykového napětí, ale skutečná hodnota parametru, která by reálně mohla být o 5-15% větší, by dotykové napětí vyšlo u některých scénářů nad hranici dovoleného dotykového napětí. To by zapříčinilo neočekávané několikanásobné zvýšení pravděpodobnosti.

Elektronická verze bakalářské práce a kalkulátor pravděpodobnosti vytvořený programem excel, jsou dostupné na CD přiloženém k této práci.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 50522: *Uzemňování elektrických instalací AC nad 1kV*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] Petr TOMAN, Jiří DRÁPELA, David TOPOLÁNEK, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ a Martin PAAR. *Provoz distribučních soustav*. 1. Praha: ČVUT Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] BERNARD, Lukáš. Ochrany vedení v sítích IT. *Elektro*. Praha, 2008, **1991**(3): 7.
- [4] *Power System Earthing Guide* [online]. Austrálie, 2010, 2010 [cit. 2015-12-22]. Dostupné z: <http://www.severon.com.au/>
- [5] ČSN 332000-4-442: *Ochrana zařízení nn při zemních poruchách v síti vysokého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 1999.