ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vočko** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **397848**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza zvýšení přenosové zatížitelnosti vedení

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of increasing the load capacity of transmission lines

Pokyny pro vypracování:

1. Zmapujte vybraná VN vedení v soustavě PREdi a teoreticky rozeberte jejich fyzikální parametry.
2. Analyzujte současný stav vybraných VN vedení v soustavách PREdi z hlediska přenosové zatížitelnosti.
3. Analyzujte možnosti potencionálního navýšení přenosové zatížitelnosti těchto vedení.
4. Porovnejte analýzy z bodu 2 a 3 a zhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

[1] Heinhold L.: Power cables and their application Part 1, Siemens Aktiengesellschaft 1990
[2] Heinhold L: Power cables and their application Part 2, Siemens Aktiengesellschaft 1993
[3] Anders G.J.: Rating of electric power cables (Ampacity computations for Transmission, Distribution and Industrial Applications), McGraw-Hill,
The institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York and Ontario Hydro Technologies 1997

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radek Hanuš Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání | Podpis studenta

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Analýza zvýšení přenosové zatížitelnosti vedení

Diplomová práce

Master's thesis

Bc. Jan Vočko

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radek Hanuš Ph.D.

Obor: Elektroenergetika

2017

Abstrakt
Tato diplomová práce se zabývá přenosovou schopností kabelových vedení VN a VVN, resp. jak ji zvýšit. V teoretické části je podrobně popsán postup výpočtu pomocí modelu tepelného obvodu a dále také alternativní metoda pro simulace pomocí parciálních diferenciálních rovnic. Praktická část se věnuje stávajícímu kabelovému vedení 22 kV a zvýšení jeho přenosové schopnosti. Druhá analýza v této části je věnována budoucímu kabelovému propoji mezi rozvodnami 400 kV a 110 kV, pomocí této analýzy se určí parametry kabelu, uložení, atd.

Klíčová slova
Kabel, rozvodna, koridor, vedení, tepelná kapacita, tepelný odpor, ztráty, dovolený proud, přetížení, ustálený stav

Abstract
This master thesis deals with load capacity of cable lines of MV and HV and its increase. Theoretical part describes, in detail, the process of calculation of the model of thermal circuit and also an alternative method used for computer simulations using partial differential equations. Practical part is dedicated to the existing cable line of 22 kV and increasing the load capacity. The second analysis in this part deals with the future cable connection between 400 kV substation and 110 kV substation. Parameters of the cable, storage etc. will be determined via this analysis.

Key words
Cable, substation, corridor, line, thermal capacity, thermal resistance, losses, permissible current, overload, steady state

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s Metodickými pokyny o dodržování etických principů při zhotovení vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne: ....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Radek Hanuš Ph.D. a dále Ing. Milanu Singerovi a Ing. Janu Vočkovi za věnovaný čas, velkou ochotu a množství poskytnutých rad.

Obsah

Přehled veličin a konstant

U_f	fázové napětí	[V]	I_{Dov}	dovolený proud	[A]
U_0	maximální fázové napětí	[kV]	E_c	maximální napětí na vodiči	[kV/mm]
R	odpor	[Ω]	E_i	maximální napětí na izolaci	[kV/mm]
X	reaktance	[Ω]	k_1, k_2, k_i	přepočítávací činitelé	[-]
$I_č$	činná složka proudu	[A]	Z_1, Z_2	impedance prostředí	[Ω]
I_j	jalová složka proudu	[A]	t_{imin}	minimální tloušťka izolace	[mm]
F	síla	[N]	r_i	poloměr izolace	[mm]
B	magnetická indukce	[T]	D_c	Průměr vodiče	[mm]
H	intenzita mag. pole	[A/m]	t_{pvc}	tloušťka polovodivého stínění	[mm]
l	délka	[m]	r_c	poloměr polovod. stínění	[mm]
I_{km}	nárazový zkrat. proud	[A]	ρ	tepelný odpor	[Km/W]
I_k''	počáteční rázový zkrat. proud	[A]	θ	teplota	[°C]
Z_k	zkratová impedance	[Ω]	W_{ent}	energie vstupující do tělesa	[J]
f_k	okamžitá síla	[N]	W_{int}	energie vytvořená samotným kabelem	[J]
k_1	činitel tvaru vodiče	[-]	ΔW_{st}	změna energie uložené v kabelu	[J]
k_2	činitel uspořádání vodičů	[-]	W_{out}	energie daná disipací z konvekce, sálání a vedení	[J]
a	vzdálenost	[m]	W_x	přestup tepla přes plochu S ve směru x	[W]
Q	teplo	[J]	W_{sol}	teplo získané ze slunce	[W/m]
t_k	doba trvání zkratu	[s]	W_{conv}	tepelné ztráty konvekcí	[W/m]
i_k	zkrat. proud	[A]	W_{rad}	tepelné ztráty sáláním	[W/m]
I_{ke}	ekvivalentní oteplovací proud	[A]	W_t	přenos tepla kondukcí uvnitř kabelu	[W/m]
c_v	měrná tepelná kapacita	$[\mathrm{J.m^{-3}.K^{-1}}]$	θ_e	teplota povrchu kabelu	[K]
V	objem	$[\mathrm{m^3}]$	θ_{amb}	teplota okolí	[K]
R_{20}	resistance vodiče při 20°C	[Ω]	ρ	hustota	$[\mathrm{kg/m^3}]$
ϑ_f	fiktivní teplota vodiče	[°C]	∇	operátor nabla	$[\mathrm{m^{-1}}]$
α	Úhel mezi osami	[°]	$\boldsymbol{\lambda}$	tepelná vodivost	$[\mathrm{J.m^{-3}.K^{-1}}]$
α	teplotní odpor. činitel	[-]	r	polohový vektor	$[\mathrm{m^{-1}}]$

K	materiálová konstanta	[-]	c	tepelná kapacita	$[\mathrm{J/K}]$
P	vyvinutý tepelný výkon	$[\mathrm{W}]$	T	teplota	$[\mathrm{K}]$, $[°\mathrm{C}]$
$\Delta \boldsymbol{\upsilon_m}$	max. dovolené oteplení	$[°\mathrm{C}]$	t	čas	$[\mathrm{s}]$
$\boldsymbol{\upsilon_m}$	nejvyšší dovol. teplota vodiče	$[°\mathrm{C}]$	Qv	objemová hustota tep. toku	$[\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}]$
υ_m	teplota okolí	$[°\mathrm{C}]$	σ	Boltzmannova konst.	$[\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}]$
R_{AC}	střídavý odpor	$[\Omega]$	ε	emisivita	[-]
R_{DC}	stejnosměrný odpor	$[\Omega]$	T_0	teplota okolí	[K]
α_{20}	tepl. souč. el. rezistivity při 20°C	$[\mathrm{K^{-1}}]$	S_1	velikost povrchu řezu kabelu	$[\mathrm{m^2}]$
θ	nejvyšší pracovní teplota	$[°\mathrm{C}]$	S_2	velikost povrchu řezu chráničkou	$[\mathrm{m^2}]$
y_s	činitel skinefektu	[-]	α	součinitel přestupu tepla	$[\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}]$
f	frekvence	[Hz]	ε_k	součinitel konvekce	[-]
y_p	činitel přiblížení	[-]	λ_{ekv}	ekvivalentní tepelná vodivost	$[\mathrm{J.m^{-3}.K^{-1}}]$
d_c	průměr jádra	[mm]	Pr	Pradtlovo číslo	[-]
s	vzdálenost mezi osami jader	[mm]	Gr	Grasshoffovo číslo	[-]
D_e	vnější průměr kabelu	[mm]	Nu	Nusseltovo číslo	[-]
ρ_{th}	tepelná resistivita materiálu	[Km/W]	Ra	Rayleighovo číslo	[-]
θ_{gas}	teplota vzduchu oblklopující kabel	[°C]	h_r	koeficient přestupu tepla radiací	[-]
Q_{th}	tepelná kapacita	[J/°C]	W_{th}	teplo uložené v Q_{th}	[J]
$\Delta\theta$	teplotní nárůst v Q_{th} díky W_{th}	[°C]	W_c	teplo generované ve vodiči	[W/m]
ρ_i	Tepelný odpor izolace	[Km/W]	p	Van Wormerův koeficient	[-]
W_s	ztráty v plášti (stínění)	[W/m]	W_a	ztráty v armování	[W/m]
λ_1	faktor ztrát v plášti (stínění)	[-]	λ_2	faktor ztrát v armování	[-]
W_d	dielektrické ztráty	[W]	T_1, T_2, T_3, a T_4	tepelné odpory vrstev kabelu	[Km/W]
λ_1'	ztráty indukovanými proudy	[-]	λ_1''	ztráty vířivými proudy	[-]

Kapitola 1: Úvod do problematiky

Silová kabelová vedení jsou nedílnou součástí distribučních energetických soustav. Pro správné fungování kabelu je třeba zajistit několik důležitých kroků. Nejdůležitějším z nich je bezpečnost. Dalšími důležitými faktory jsou hospodárnost, zatížitelnost, ekonomická optimalizace atd. Pro správné fungování kabelových systémů je nutné udělat řadu kroků před samotnou pokládkou kabelu a jeho provozem. Je tedy nutné správně dimenzovat kabelové vedení včetně dalšího příslušenství, jako jsou spojky, koncovky nebo ochranné prvky a samotný transformátor tak, aby tento celý systém vyhověl výše uvedeným parametrům.

Teoretická část práce (kapitoly 2-5) se věnuje postupům, jak spočítat přenosovou zatížitelnost pomocí norem řady IEC 287 a dále pomocí simulací parciálních diferenciálních rovnic. Oba postupy dávají prakticky stejné výsledky (část odvození je vzhledem ke své složitosti k nahlédnutí v přílohách na konci této práce). Principem teoretického odvození pomocí norem je nalezení zjednodušeného tepelného modelu, který se použije pro výpočet dovolených proudů.

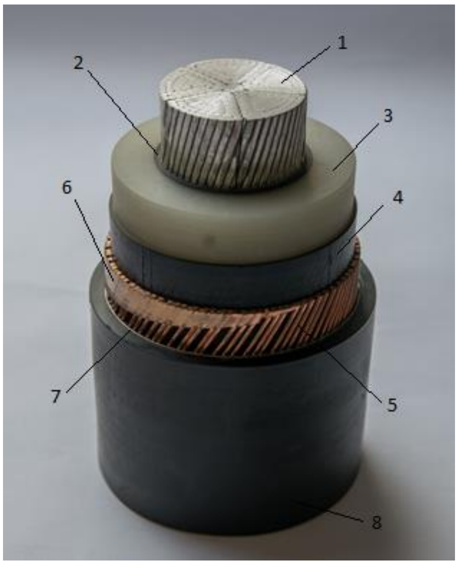
Praktická část (kapitoly 6-8) zkoumá 2 typy vedení. Prvním typem je již existující kabelové vedení VN 22 kV, o kterém jsem, za pomocí vhodné analýzy, získal informaci o přenosové schopnosti a jejím potencionálním navýšení. Druhým typem je plánované vedení mezi rozvodnami 400 kV (ČEPS) a 110 kV (PRE). Pro tento rozbor bylo nejprve nutné určit parametry kabelu a dále také vhodný průřez, konfiguraci a uložení tak, aby celý kabelový systém byl schopen přenést požadovaný jmenovitý výkon transformátoru.

Dále se práce zabývá přenosovými schopnostmi kabelů uložených v různých prostředích (kabely uložené přímo v zemi, kabely uložené v chráničkách a kabely v kabelovém kanále). Všechny výpočty jsou provedeny pro ustálený stav kabelu v normálním provozu. V závěru práce je vypracovaná analýza kabelů při přetížení v přechodových stavech.

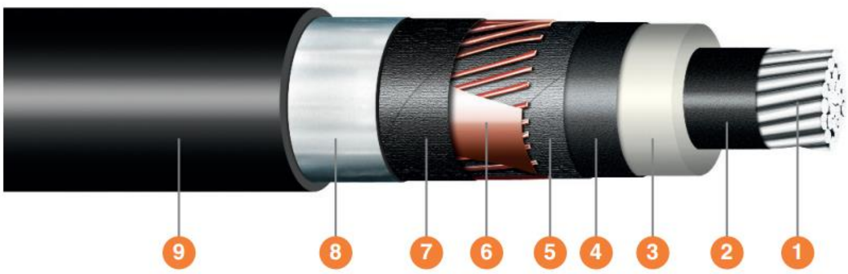
Výsledky z této analýzy poslouží jako materiál k hodnocení výše uvedených kabelových vedení a jako podklad pro jejich správné dimenzování. Tento podklad může zároveň posloužit jako informace o parametrech a chování sítě.

Kapitola 2: Konstrukce silových kabelů

Silové kabely slouží k přenosu a distribuci elektrické energie. Liší se konstrukcí, napěťovou hladinou, průřezem, použitou technologií, typem izolace nebo vodiče atd. Mezi nejčastější způsoby uložení kabelů patří uložení přímo v zemi, v chráničkách v zemi, na vzduchu (závěsné kabely), v kabelových kanálech nebo kolektorech. Samotný kabel se skládá z několika vrstev z různých materiálů. Protože se tato diplomová práce zabývá zejména VN a VVN kabely, budou na dalších stránkách popsány zejména tyto typy kabelů. Zobrazení vrstev 110 kV kabelu (VVN kabel) je vidět na obrázku 1 a zobrazení vrstev 22 kV kabelu (VN kabel) na obrázku 2.



Obrázek 1: 110 kV VVN kabel



Obrázek 2: 22 kV VN kabel

Zdroj: [10]

Popis vrstev 110 kV,VVN kabelu:

1. Jádro (materiálem je Cu nebo Al)
2. Vnitřní polovodivá vrstva
3. XLPE izolace
4. Vnější polovodivá vrstva
5. Polštářová vrstva (vodoblokující)
6. Měděné stínění
7. Hliníková fólie
8. Vnější polyethylenový plášť

Popis vrstev 22 kV, VN kabelu:

1. Jádro (materiálem je Cu nebo Al)
2. Vnitřní polovodivá vrstva
3. XLPE izolace
4. Vnější polovodivá vrstva
5. Polovodivá vodoblokující páska
6. Měděné stínění
7. Vodoblokující páska
8. Hliníková fólie
9. Vnější polyethylenový plášť

1. Jádro

Pro silové kabely na úrovni nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí jsou používány měď a hliník. Používanějším materiálem je hliník především díky nižší ceně oproti mědi. Další výhodou je, že hliník má menší hmotnost než měď, a proto je i pokládání kabelu a mechanické zacházení snadnější, než je tomu u těžšího měděného kabelu. Nevýhodou hliníkového jádra je potřeba většího průřezu (zhruba 1,3krát), než na přenos stejného množství výkonu u měděného kabelu. Další výhodou měděného kabelu je větší mechanická pevnost, odolnost a zejména menší rezistivita, což vede například k menším úbytkům napětí.

Průřez kabelu není obvykle udáván jako geometrický průřez, ale jako elektricky efektivní průřez, tzn. že je určen měřením odporu. Podle IEC 28 "International Standard of Resistance for Copper" je za standartní hodnotu rezistivity pro měď při 20 °C brána hodnota 0,017241 $\Omega\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$. Hodnota pro hliníkový vodič při teplotě 20 °C je 0,028264 $\Omega\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$.

Pro VN a VVN aplikace se v dnešní době používají kabely složené ze slaněných vodičů. Dva nejpoužívanější typy těchto kabelů jsou segmentovaná jádra SC (segmental conductor), protože jsou kolem jádra vytvořeny segmenty lan, respektive sektorů. Druhým typem, zejména pro menší průřezy, jsou slaněné vodiče SCC (stranded compacted conductor). Tato konstrukce zlepšuje mechanické vlastnosti, protože pokud by byl použit plný vodič, pak by se s ním velice špatně manipulovalo.

Vybrané tepelné fyzikální veličiny a hodnoty pro měď a hliník jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Materiálové veličiny

Materiál	Elektrická vodivost $[\mathrm{S.m^{-1}}]$	Hustota $[\mathrm{kg.m^{-3}}]$	Tepelná vodivost $[\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}]$	Tepelná kapacita $[\mathrm{J.mol^{-1}.K^{-1}}]$
Měď	$58{,}1.10^6$	8940	386	24,44
Hliník	$37{,}7.\ 10^6$	2700	237	24,20

2. Vnitřní polovodivá vrstva

Tato vrstva zlepšuje elektrické pole kolem kabelu. Toto pole je rovnoměrnější a více homogenní, protože, jak již bylo zmíněno, kabely jsou vytvořeny z velkého počtu lan tvořících vodič, tyto lanka jsou různě zaoblena, a tak narušují homogenitu jádra, mohou obsahovat i mikronehomogenity apod., které zhoršují elektromagnetické vlastnosti a mohou poškozovat i nadřazenou izolační vrstvu. To může vést k treeingu, což je jev, kdy dochází k vytvoření prasklin tvořících stromeček, které se postupně rozšiřují a vytvářejí větší nehomogenity, a tento jev může vést až k poškození kabelu. Tato vrstva především zabraňuje částečným výbojům mezi izolací a samotným jádrem.

3. XLPE izolace

Jedná se o nejdůležitější izolační vrstvu kabelu. V dnešní době se standardně používá jako materiál této vrstvy zesítěný polyethylén - XLPE, který má kritickou teplotu v normální provozu 90 °C. Nad touto teplotou izolace mění svoji hustotu a ztrácí svoje dobré fyzikální parametry. U starších typů kabelů se můžeme setkat s jinými typy materiálů jako např. PVC, který má ovšem nižší kritickou teplotu a to obvykle 65-70 °C. Tloušťka izolace je důležitým faktorem ovlivňující celou bezpečnost kabelového sytému, protože tloušťka kabelu rozhoduje o tom, jak velkým elektrickým polem bude izolace namáhána. Čím menší tloušťka, tím větší bude elektrické namáhání. V dnešní době je distributory v ČR preferována hodnota intenzity el. pole na vodiči kolem 15-18 kV/mm. Někteří výrobci dnes garantují i hodnoty kolem 13 kV/mm, já jsem pro návrh 110 kV kabel počítal s hodnotou 16 kV/mm.

4.Vnější polovodivá vrstva

Má podobnou funkci jako druhá vrstva a má za úkol chránit izolační vrstvu 3.

5.Polštářová vrstva (vodoblokující)

Tato vrstva má zabránit proniknutí vody do izolační vrstvy 2. a vodiče. Zároveň je elastická a redukuje roztažné síly, které vznikají se vzrůstající teplotou a tím i objemem.

6.Měděné stínění

Stínění slouží k odvodu svodových kapacitních proudů, 1-fázových zkratových proudů, ohraničuje elektrické pole kabelu a vytváří ochranu před nebezpečným dotykem. Stínění, resp. jeho průřez se navrhne podle velikosti 1-fázového zkratového proudu podle ČSN 949 a IEC 61443. Kromě měděného stínění se u starších typů kabelů používalo olověného pláště, který také zcela zabraňuje proniknutí vody.

7.Hliníková fólie

Zajišťuje tzv. radiální ochrannou vodotěsnost kabelu proti zamezení vniku vody.

8.Vnější polyethylenový plášť

Typy pláště se používají především podle uložení kabelu. Plášť vybereme podle toho, zdali je kabel uložen v zemi nebo na vzduchu. Pokud je kabel uložen na vzduchu, pak musí být jeho plášť z ohně retardujícího materiálu podle normy ČSN 60332, nebo musí být provedeny jiné kroky jako jsou například protipožární nátěry. Pokud je kabel uložen přímo v zemi, pak nemusí být použit oheň retardující plášť. V dnešní době nejčastěji používaným materiálem je HDPE (High-density polyethylen) neboli polyethylene s vysokou hustotou. Tento materiál postupně nahrazuje PVC. Nicméně HDPE je hořlavé, a tak se ve spoustě aplikací využívá PE. Tento vnější plášť má dobré mechanické vlastnosti.

Zdroj: [1], [2], [3]

Kapitola 3: Zkraty a dovolené oteplení

3.1 Zkraty

Kabel by měl být navržen tak, aby byl schopen vydržet zkratový proud, než ho ochranné prvky vypnou (v řádu setin až desetin sekundy). Tyto zkratové proudy několika násobně převyšují jmenovitý proud. Při zkratu se vyvinou elektromagnetické, elektrodynamické a elektrotepelné účinky doprovázené mechanickými silami. Na bezpečnost a životnost kabelu mají vliv dva hlavní efekty. Elektromagnetické síly mezi vodivými částmi. Druhým efektem je oteplení ve vodivých částech kabelu tzn. vodič, stínění, kovový plášť, popř. armování a nepřímo přilehlé izolační vrstvy. Účinky zkratových proudů jsou ovlivněny prostředím, kde jsou kabely uloženy.

Dynamické účinky zkratového proudu

Odolnost vodičů proti dynamickým účinkům zkratový proudů se vyjádří podle vztahu pro velikost síly $\vec{F}$, kterou na sebe působí dva rovnoběžné vodiče o délce l, kterými protéká proud I:

$$\vec{F} = \vec{B} I l \sin\alpha \qquad [\mathrm{N}] \tag{3-1}$$

kde:

$\vec{B}$ je magnetická indukce $[T]$, $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

μ_0 je permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \qquad [\mathrm{H.\,m^{-1}}]$

$\vec{H}$ je intenzita magnetického pole $[\mathrm{A.\,m^{-1}}]$

α je úhel, který svírá směr síly s osou vodiče

Intenzitu magnetického pole ve vzdálenosti a od vodiče se vyjádří vztahem:

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi a} \qquad [\mathrm{A.\,m^{-1}}] \tag{3-2}$$

Největší síla je, když $\sin\alpha = 1$, tedy ve směru kolmém k ose vodičů, po dosazení do rovnice (3-1) dostáváme vztah pro vodič o délce l:

$$\vec{F} = 4\pi 10^{-7} \frac{I^2}{2\pi a} l = 2.10^{-7} \frac{I^2}{a} l \qquad [N] \tag{3-3}$$

Největší hodnota síly při zkratovém proudu bude nevyšší okamžitá hodnota zkratového proudu, tzv. nárazový zkratový proud, který odpovídá prvnímu vrcholu proudu po vzniku zkratu. Lze ji vyjádřit vztahem:

$$I_{km} = k\sqrt{2} I_k'' \quad [A] \tag{3-4}$$

kde:

k je činitel závislý na druhu rozvodné sítě a je určn vztahem $k = 1{,}02 + 0{,}98 e^{-3R/X}$ (3-5), popř. se může určit z grafu, pro VVN sítě je jeho hodnota 1,7

I_k'' je počáteční zkratový proud $I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k}$ [A]

$cU_n/\sqrt{3}$ je ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Z_k je zkratová impedance

Nejvyšší okamžitou sílu, která působí na jednotkovou délku vodiče, dostaneme po dosazení do vztahu (3-3) a podle [5] dostaneme:

$$f_k = 2k_1k_2 10^{-7}\frac{I_{km}^2}{a} \qquad [\mathrm{N.\,m^{-1}; A, m}] \tag{3-6}$$

kde:
f_k je síla působící na 1 m délky vodiče $[\mathrm{N.\,m^{-1}}]$
k_1 je činitel tvaru vodiče, respektující rozložení proudu po průřezu vodiče
k_2 je činitel respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudů
I_{km} je nárazový zkratový proud $[\mathrm{A}]$
a je vzdálenost vodičů $[\mathrm{m}]$
k_1, k_2 se určí podle normy podle [5]

Těmto účinkům kromě samotných vodičů a izolace kabelu musí být schopné odolat i podpěrné izolátory, odpojovače a další vybavení zabezpečující provoz vedení.

Tepelné účinky
Časové působení proměnného zkratového proudu během zkratového jevu určuje tepelné účinky působící na jednotlivé komponenty kabelového systému. Pro další odvození vyjděme z předpokladu, že jistící ochrany jsou nastaveny, tak že vypnou zkrat za čas, kdy se vyvinuté teplo nestačí odvést ani vyzářit a projeví se pouze lokálním zvýšením teploty. Pro vyvinutý tepelný výkon ve vodiči pak můžeme psát:

$$Q = \int_0^{t_k} R(\vartheta).\, i_k^2(t).\, dt \tag{3-7}$$

Kde:
Q je vyvinuté teplo [J]
R je odpor vodiče $[\Omega]$
t_k je doba trvání zkratu $[s]$
i_k je zkratový proud $[A]$, tento časově proměnný proud je možné nahradit ekvivalentním oteplovacím proudem I_{ke} dle vztahu:

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k}\int_0^{t_k} i_k^2(t)dt} \tag{3-8}$$

„Tento proud můžeme definovat jako proud, který by vyvolal stejné tepelné účinky za dobu trvání zkratu, jako časově proměnný zkratový proud. Podle normy zmíněné normy ČSN EN 60865-1, lze tento proud určit vztahem“. [1]:

$$I_{ke} = k_e I_k'' \tag{3-9}$$

kde:
k_e je koeficient je určen podle tabulky 5, v závislosti na době trvání zkratu a na soustavě napětí.

Tabulka 2: Hodnoty činitele k_e

Doba trvání zkratu t_k[S]	Činitel k_e		
	Zkrat na svorkách alternátoru	Zkrat v soustavě	
		VVN, VN	NN
pod 0,05	1,70	1,60	1,50
0,05-0,1	1,60	1,50	1,20
0,1-0,2	1,55	1,40	1,10
0,2-1,0	1,50	1,30	1,05
1,0-3,0	1,30	1,10	1,00
nad 3,0	1,15	1,00	1,00

Po dosazení ekvivalentního oteplovacího proudu do rovnice (1-6) je vyvinuté teplo dáno rovnicí:

$$Q = R(\vartheta).I_{ke}^2.t_k \tag{3-10}$$

„Tímto teplem se ohřeje vodič z teploty ϑ_1 před zkratem na teplotu ϑ_k při zkratu, při objemu V, takže výše zmíněný vzorec můžeme zapsat ve tvaru“. [1]:

$$Q = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} c_V.V.d\vartheta \tag{3-11}$$

kde:
c_V je měrná tepelná kapacita objemu vodiče $[\mathrm{J.m^{-3}.K^{-1}}]$
V je objem vodiče $[\mathrm{m^3}]$
Po úpravě rovnice (1-10) dostáváme:

$$I_{ke}^2 t_k = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} \frac{c_V}{R(\vartheta)} d\vartheta \tag{3-12}$$

Vztah pro závislost odporu vodiče na teplotě se vyjádří jako:

$$R(\vartheta) = R_{20}\frac{\vartheta_f + \vartheta}{\vartheta_f + 20} \tag{3-13}$$

Po integraci:

$$I_{ke}^2 t_k = \frac{c_V V}{R_{20}}(\vartheta_f + 20)\ln\frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1} \tag{3-14}$$

Po následné úpravě, kdy za objem V je dosazen průřez vodiče $A\,[\mathrm{mm^2}]$ a délka společně s odporem R_{20} je vyjádřena jako $R_{20} = \rho_{20}\frac{l}{A}$ (ρ_{20} je resistivita 1 m délky vodiče při 20 °C $[\Omega.\mathrm{mm^2}.\mathrm{m^{-1}}]$

Podle předchozích rovnic a [5] je průřez, který vyhoví z hlediska tepelného namáhání při zkratu určen:

$$A = \frac{I_{ke}\sqrt{t_k}}{K} \tag{3-15}$$

Kde:

K je materiálová konstanta, která je určena vztahem $[\mathrm{A.s^{\frac{1}{2}}.mm^{-2}}]$:

$$K = \sqrt{\frac{c}{\rho_{20}}(\vartheta_f + 20)\ln\frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_1}} \tag{3-16}$$

Zdroj: [1], [5]

3.2 Dovolené oteplení

Dovolené oteplení θ [°C] je teplota, která je stanovená pro hospodárný provoz kabelového vedení a její hodnota nesmí být překročena. Tato hodnota je vztažena k použité izolaci, jak již bylo řečeno v dnešní době se jako hlavní izolace používá materiál XLPE, jehož kritická teplota je 90 °C, pro starší typy kabelů např. s izolací PVC to je 65-70 °C (izolace je obecně méně odolná než samotný vodič a nesnesla by takovou tepelnou zátěž). Každý vodič musí být dimenzován, tak aby byl schopen přenášet jmenovitý proud tak, aby nedocházelo k nadměrnému oteplení vodiče, jelikož průchodem proudu dochází vždy k oteplování vodiče. Generované teplo ve vodiči na jednotku délky l je rovno:

$$P = R_{AC}I^2 = \frac{\Delta v_m}{T} \tag{3-17}$$

Kde:

P je vyvinutý tepelný výkon [W]

Δv_m je maximální dovolené oteplení vodiče ($\Delta v_m = v_m - v_0$) [°C]

v_m je nejvyšší dovolená teplota vodiče podle dovolené teploty izolace [°C]

v_0 je teplota okolí [°C]

R_{AC} je střídavý odpor při 90 °C, který se podle normy ČSN IEC 287-1-1 + A1 určí ze vztahu:

$$R_{AC} = R_{DC}(1 + y_s + y_p) \tag{3-18}$$

Kde:

R_{DC} je stejnosměrný odpor, který je určen vztahem (při 20 °C):

$$R_{DC} = R_{20}(1 + \alpha_{20}(\theta - 20)) \tag{3-19}$$

Kde:

α_{20} je teplotní součinitel elektrické rezistivity při 20 °C [1/K] (její hodnota může být zaokrouhlena na 0.004 K^{-1}, přesná hodnota (podle [3]) pro měď je 3,93.10^{-3}/K a pro hliník je přesná hodnota (podle [3]) 4,03.10^{-3}/K)

θ je nejvyšší pracovní teplota [°C]

y_s je činitel skin efektu [-], který se určí ze vztahu:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0{,}8x_s^4} \tag{3-20}$$

Kde x_s se určí jako:

$$x_s = \frac{8\pi f}{R_{DC}} 10^{-7} k_s \tag{3-21}$$

Kde:
f je frekvence [Hz]
k_s je koeficient [-], který se určí z tabulky 2, str. 29 z normy ČSN IEC 287-1-1
y_p je činitel přiblížení [-], který se určí z:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0{,}8x_p^4}\left(\frac{d_c}{s}\right)2{,}9 \tag{3-22}$$

Kde x_p se určí ze vztahu:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{DC}} 10^{-7} k_p \tag{3-23}$$

Kde:
d_c je průměr jádra [mm]
s je vzdálenost mezi osami jader [mm]
k_p je koeficient, který se také určí pomocí tabulky 2, str. 29 z normy ČSN IEC 287-1-1
Pozn.: Při výpočtu resistance jsem použil koeficient k_{SS}, který ekvivalentně odpovídá členům v závorce $(1 + y_s + y_p)$ a jehož hodnota byla 1,02 [-]. Tento krok je z důvodu zpřehlednění a zjednodušení výpočtu.

Pomocí předešlých vzorců a vzorců, které budou podrobně popsány v dalších kapitolách je možné vypočítat proud, kterým může být vodič zatěžován. Dovolené oteplení, resp. dovolený proud je určen normami řady IEC 287, které mají i svou českou verzi pro ČSN. V této normě jsou uvedeny i hodnoty pro různá prostředí a přepočítávací koeficienty. Kabely jsou ovlivněny prostředím, ve kterém jsou uloženy (i více než 70%). Dalšími vlivy, které ovlivňují oteplení jsou souběhy nebo křížení s ostatními kabely nebo například blízkost jiného teplonosného média jako je teplovod. Tyto vlivy budou popsány podrobněji v dalších kapitolách.

Referenční podmínky, které jsou určeny podle norem ČSN IEC 287 a ČSN 341050 jsou uvedeny na následujících řádcích

Teplota země	20 ˚C
Teplota na vzduchu	30 ˚C
Teplota okolního vzduchu	35 ˚C
Hloubka uložení L	1,0m
Vzdálenost os kabelů při rovné formaci	70+D_s
Zemní tepelný odpor	1,0 (K.m)/W

Pozn.: Teplota země pro praktickou část byla určena 25 °C, protože přívaly veder v létě a relativně teplé zimy v posledních cca 10 let způsobili i oteplení půdy, a proto jsem se rozhodl tento fakt zohlednit zvýšením teploty pro výpočty. Dále pro praktické výpočty VVN kabelu ve větraném kanálu na vzduchu byla určena na 25 °C, předpokládal jsem, že vzduchotechnika v tomto kanálu je schopna držet teplotu na 25 °C. Hloubka uložení 1 m platí pro kabely VN, pro kabely VVN jsem počítal s 1,3 m.

Jeden ze způsobů, jak vypočítat dovolený proud, je pomocí:

$$I_{DOV} = I_N k_1 k_2 \dots . k_i \tag{3-24}$$

Kde:
I_{DOV} je jmenovitý maximální proud vodiče při teplotě jádra 90˚C, (udávaný výrobcem pro uložení v trojúhelníkové/rovinné formaci, v zemi/na vzduchu).
$k_1 k_2 \dots . k_i$ jsou redukční (přepočítávací) součinitelé respektující zatížení v závislosti na způsobu uložení, seskupení, okolní teploty, atd. (výpočet lze provést podle ČSN 287, koeficienty mohou být k nalezení v katalogu výrobce ABB „XLPE Land Cable Systems – User's Guide" popř. u jiných výrobců. (zdroj [12])

Následující tabulky uvádějí vybrané redukční faktory a jejich hodnoty:

k_1 je redukční faktor pro hloubku uložení rozdílnou od referenční

Hloubka uložení v m	0,5	0,7	1	1,3	1,5
Redukční faktor k_1	1,1	1,05	1	0,97	0,95

k_2 je redukční faktor pro teplotu země rozdílnou od referenční

Teplota ˚C	10	15	20	25	30
Redukční faktor k_2	1,11	1,04	1	0,96	0,93

k_3 je redukční faktor pro teplotní odpor země rozdílný od referenční

Tepelný odpor země Km/W	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5
Redukční faktor k_3	1,14	1,09	1,00	0,93	0,84

k_4 je redukční faktor pro různou vzdálenost fází mezi sebou (kde je D_e Ø vodiče v mm)

Vzdálenost fází jednoho vedení (mm)	D_e	D_e+70	250	300	1,5
Redukční faktor k_4	0,93	1,00	1,04	1,08	1,09

k_5 je redukční faktor pro vzájemnou vzdálenost více skupin kabelů vedle sebe

Osová vzdálenost skupin kabelů (mm)	Počet skupin kabelů (mm)			
	1	2	3	4
100	1	0,78	0,66	0,60
200	1	0,81	0,70	0,65
400	1	0,86	0,76	0,74
800	1	0,91	0,83	0,81
2000	1	0,96	0,93	0,92

Zdroj: [1], [5], [7]

Kapitola 4: Přenos tepla

Úvod

Výpočet přenosové zatížitelnosti kabelu vyžaduje výpočet tepelných rovnic jako funkce mezi proudem kabelu a teplotou kabelu a jeho okolím. Teplo v kabelu je generováno procházejícím proudem a hovoříme o tzv. Jouleově teple či ztrátách, což jsou tepelné ztráty a můžeme je zjednodušeně zapsat:

$$P = I^2.R/V \tag{4-1}$$

Kde:
I je proud kabel [A], R je odpor kabelu [Ω] a V je objem kabelu $[\mathrm{m}^3]$
Přenos tepla v kabelu je nejvíce ovlivňován prostředím, ve kterém je uložen. Obvykle se udává, že okolní prostředí má vliv zhruba 2/3. Tento jev je také důležitý z hlediska bezpečnosti, protože kabely uložené v prostředí s vyšším tepelným odporem okolí se mohou přehřát nad kritickou teplotu 90 °C mnohem rychleji než stejné typy kabelů v jiných prostředích. Dalšími faktory, které tepelné namáhání ovlivňují, mohou být například hospodárnost provozu či ekonomika provozu.

Rovnice sdílení tepla v kabelu, která pokrývá všechny vlivy včetně Jouleových ztrát se nazývá Fourier-Kirhoffova a může být zapsána v následujícím tvaru:

$$\rho(\bar{r}).c(\bar{r}).\frac{\partial T(\bar{r},t)}{\partial t} = \nabla.\big(\lambda(\bar{r}).\nabla T(\bar{r},t)\big) + Q_V \tag{4-2}$$

Kde:
∇ je operátor nabla $[\mathrm{m}^{-1}]$
$\bar{r}$ je polohový vektor $[\mathrm{m}^{-1}]$
λ je tepelná vodivost $[\mathrm{J.m^{-3}.K^{-1}}]$
ρ je hustota $[\mathrm{kg.m^{-3}}]$
c je měrná tepelná kapacita $[\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}]$
T je teplota tělesa, v našem případě kabelu [°C]
Q_V je objemová hustota tepelného výkonu, které vzniká Jouleovými ztrátami podle vzorce $P = I^2.R/V$ [W . $\mathrm{m^{-3}.K^{-1}}$], tento výkon vzniká v jádře a stínění, a proto ho můžeme zapsat ve tvaru: $Q_V = Q_{V\,jádro} + Q_{V\,stínění}$

Tato rovnice je numericky řešena například programem Agros2D či ANSYS. Za veličinu Q_V ztrátový výkon, který se spočítá z proudu kabelu a jeho odporu při teplotě 90 °C. Dále se dosazují materiálové konstanty c, ρ a λ, které pro dané materiály mohou být nalezeny např. na webových stránkách „Technických zařízení budov“ (TZB, www.tzb-info.cz). [1]

Tepelné mechanismy přenosu tepla

Pro výpočet přenosové zatížitelnosti kabelu je důležité určení teploty vodiče při daném zatížení a dále maximální dovolené zatížení pro kritickou teplotu 90 °C. Aby bylo možné tyto dva fenomény spočítat, je nutné vypočítat generované teplo v kabelu a míru disipace tepla do okolí z tohoto kabelu. Pro tyto výpočty je disipace okolního prostředí velice důležitá, protože se může lišit v závislosti na uspořádání půdy, obsahu vlhkosti, teploty prostředí nebo povětrnostních podmínkách. Teplo je přenášeno z kabelu do okolního prostředí třemi následujícími způsoby: vedením (kondukcí), sáláním a konvekcí.

4.1 Přenos tepla vedením

K tomuto jevu dochází v pevných látkách, tedy například pro kabely uložené v zemi. Teplo se zde přenáší z tělesa o vyšší teplotě na těleso o nižší teplotě, tedy ve směru klesající teploty mezi tělesy bezprostředně sousedícími. V tuhém tělese je tedy množství generovaného tepla úměrné teplotnímu gradientu, který je podle [6] na str. 13, definován jako:

$$\lim_{\Delta n \to 0} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\right) = \frac{\partial\theta}{\partial x} = grad\,\theta \qquad [\,°\mathrm{C/m}] \tag{4-3}$$

Množství tepla protékajícího jednotkou plochy lze vyjádřit:

$$q = -\lambda.grad\,\theta \tag{4-4}$$

Kde:
q je tepelný tok [W]
λ je součinitel tepelné vodivosti $[\mathrm{J.m^{-3}.K^{-1}}]$
θ je teplota [°C]
x je vzdálenost [m]
Tento zákon je základním zákonem vedení tepla a nazýváme ho Fourierovým zákonem.

Součinitel tepelné vodivosti (Tepelná vodivost) je fyzikální veličina, která vyjadřuje propustnost látky vůči teplu a definujeme ji jako [6]:

$$\lambda = -q/grad\,\theta \qquad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m.K}}\right] \tag{4-5}$$

Obecně tepelná vodivost závisí na řadě fyzikálních parametrů, jako je například hustota, vlhkost, tlak, teplota okolí apod. Z tohoto důvodu je poměrně obtížné určit její hodnotu, a proto ji bereme z technických tabulek nebo norem. Tato hodnota může být určena i pomocí matematicko-fyzikálních softwarů jako Agros2D nebo Wolfram Mathematica, a to pomocí iteračních metod, kde se bere ekvivalentní tepelná vodivost.

Pro výpočet pomocí norem je dále nutno určit tepelný odpor. Což je obrácená hodnota tepelné vodivosti a můžeme jí tedy definovat vztahem:

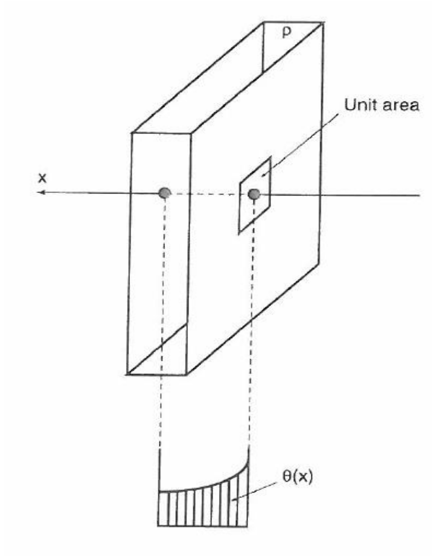
$$\rho = 1/\lambda \qquad \left[\frac{\mathrm{Km}}{\mathrm{W}}\right] \tag{4-6}$$

S touto veličinou se pracuje při výpočtech z norem ČSN IEC 287-1-1 a ČSN IEC 287-2-1 a dále s IEC 853-2. Vztah pro množství protékajícího tepla se pak změní na vztah:

$$q = -\frac{1}{\rho}.grad\,\theta = -\frac{1}{\rho}\frac{d\theta}{dx} \tag{4-7}$$

Tuto rovnici si nejlépe můžeme demonstrovat na následujícím obrázku přestupu tepla deskou. Vidíme, že ρ je závislé na materiálových vlastnostech. Oteplení $d\theta$ klesá s tloušťkou desky ve směru x a znaménko mínus v rovnici (4-5) a (4-7) je dané tím, že teplo je přenášeno ve směru poklesu teploty.

Zdroj: [1], [7]



Obrázek 3: Fourierův zákon

Zdroj: [6]

4.2 Přenos tepla sáláním

Tento způsob šíření tepla se uskutečňuje u kabelů uložených v chráničkách či na vzduchu (jako například v kolektoru nebo kanálech), a to tak že je teplo emitováno buď z povrchu kabelu, nebo povrchu chráničky. Podle [1]: „Přestup tepla sáláním souvisí se změnami vnitřní energie těles a tělesa pak vydávají záření, které je do prostoru vysíláno ve formě elektromagnetických vln, pokud dopadne toto záření na jiné těleso, dojde k pohlcení tohoto záření (teplota tohoto tělesa se zvýší), a také odražení části záření. Pohltivost a odrazivost materiálu jsou dané především jakostí daného materiálu a barvou povrchu. Pro absolutně bílé těleso platí, že se veškerá jeho energie odrazí, naopak pro absolutně černé těleso dojde k pohlcení. Výkon sáláním (radiací) obecně můžeme vyjádřit jako":

$$Q_r = \sigma \varepsilon S {\theta_s}^4 \tag{4-8}$$

Kde:
σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, jejíž hodnota je $5{,}67.\ 10^{-8}\ \mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$
ε je emisivita tělesa [-]
θ_s je teplota [K]
Mimo záření ze samotného tělesa, může být záření pohlcováno z jiného tepelného zdroje s teplotou θ_{amb} a pro to platí analogicky: $Q_a = \sigma \varepsilon S \theta_{amb}^4$. Pro praktické aplikace nastávají obě situace a vzorce můžeme upravit do tvaru:

$$Q = Q_r - Q_a = \sigma \varepsilon S(\theta^4 - \theta_{amb}^4) \tag{4-9}$$

Pro případ kabelu v chráničce uvažujeme, že je to těleso, které samo na sebe nesála a je uzavřeno v druhém tělese (chráničce) a výkon sáláním bude:

$$Q_{1\to 2} = S_1.\sigma.\frac{\theta_1^4 - \theta_2^2}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \qquad (4\text{-}10)$$

S_1 je velikost průřezu kabelu $[\mathrm{m}^2]$, ε_1 je emisivita kabelu [-]
S_2 je velikost průřezu chráničkou $[\mathrm{m}^2]$, ε_2 je emisivita chráničky [-]
Pokud pro jednu žílu platí, že $\frac{S_1}{S_2} \to 0$ pak se vztah (4-10) zjednoduší na tvar:

$$Q_{1\to 2} = S_1.\sigma.\varepsilon_1.(\theta_1^4 - \theta_2^2) \qquad (4\text{-}11)$$

Pro výpočtový program Agros2D se počítá v oblasti odpovídající vzduchové mezeře s tepelnou vodivostí, kterou označíme λ_{ekv}^{salani} a je řešením rovnice:

$$\frac{2.\pi.\lambda_{ekv}^{salani}(\theta_{kabel} - \theta_{chranicka})}{\ln\left(\frac{d_{chranicka}}{d_{kabel}}\right)} = \pi.d_{chranicka}.\sigma.\frac{\theta_{kabel}^4 - \theta_{chranicka}^4}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)} \qquad (4\text{-}12)$$

Při úvaze, že část tepla, která dopadá na plochu, bude absorbována, můžeme definovat absorptivitu α [-] jako:

$$q_{abs} = \alpha q_{inc} \qquad (4\text{-}13)$$

Kde:
q_{abs} je absorbovaný tepelný tok [W]
q_{inc} je dopadající tepelný tok [W]

Pro absorptivitu platí: $0 < \alpha < 1$. Jelikož povrch kabelu emituje a zároveň absorbuje sálání a tepelná výměna sálání může být modelována jako interakce mezi dvěma povrchy. Nicméně tato úvaha je poměrně složitě řešitelná. Proto pro výpočty pomocí norem můžeme uvažovat, že povrch kabelu je malý vzhledem k okolnímu prostředí, které je zároveň daleko od povrchu kabelu. Dále můžeme uvažovat $\alpha = \epsilon$ (šedivý povrch).

4.3 Přenos tepla konvekcí

Tento přenos se uskutečňuje, pokud se těleso nachází v kontaktu s plynem či kapalinou, tzn. například kabely uložené na vzduchu. Současně s tímto jevem dochází i k ochlazování nebo naopak k ohřívání tenké vrstvy tekutiny nebo plynu u stěny, přičemž záleží, zdali je teplota povrchu pevného tělesa větší než teplota tekutiny (souhrnný název pro plyn a kapalinu), nebo je tomu naopak. Při tomto teplotním rozdílu dojde k přirozenému proudění, které nazýváme konvekce. Ta může být rozdělena na tři základní typy, a to konvekci vynucenou, smíšenou a přirozenou. S přirozenou konvekcí se setkáváme u kabelů uložených v zemi a chráničkách. Smíšená a vynucená se objevuje u kabelů v kolektorech, kde je instalována ventilace, která ochlazuje celý kolektor. Pro přenos tepla konvekcí platí:

$$Q_c = \alpha S \Delta\theta \qquad [W] \qquad (4\text{-}14)$$

Kde:
α je součinitel přestupu tepla $[\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}]$
S je plocha stěny tělesa $[\mathrm{m^2}]$
$\Delta\theta$ je rozdíl teplot ohřívané či ochlazované kapaliny [K]
Podle [1]: „Součinitel přestupu tepla udává, jaký tepelný výkon proudí z kapaliny do stěny tělesa nebo naopak o ploše $1\ \mathrm{m^2}$ při teplotním rozdílu 1 K za dobu jedné sekundy. Velikost α nelze obecně určit, ale musíme ho vypočítat pro různé druhy situací, protože velikost α je určena celou řadou faktorů jako například rychlost proudění kapaliny, tepelnou vodivostí, kapacitou atd. Nicméně pro jednodušší aplikace se mohou její hodnoty nalézt ve vhodných fyzikálních tabulkách“ nebo normách.

Energetická bilance
Pro přestup tepla v kabelech je důležitý také zákon zachování energie. Tento zákon můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$W_{ent} + W_{int} = W_{out} + \Delta W_{st} [W] \tag{4-15}$$

Kde:
W_{ent} je energie vstupující do tělesa [Ws]. Tento druh energie může být generován ostatními kabely v blízkosti nebo sluneční radiací.
W_{int} je energie vytvořená samotným kabelem [Ws]. Tento druh energie je dán Jouleovými ztrátami nebo dielektrickými ztrátami.
ΔW_{st} je změna energie uložené v kabelu [Ws].
W_{out} je energie [Ws] daná disipací z konvekce, sálání a vedení

Zjednodušeně řečeno se dá říci, že množství příchozí energie a generované energie vyvolá zvýšení energie akumulované v kabelu, zatímco odchozí energie snižuje akumulovanou energii v kabelu. W_{ent} a W_{out} jsou veličiny, které závisí na povrchu kabelu. W_{int} je spojena s přeměnou elektrické energie na tepelnou a je úměrná objemu kabelu. Množství energie uložené v kabelu ΔW_{st} je úměrné také objemu, pro teplotní nárůst platí $\Delta W_{st} > 0$ a pro teplotní pokles platí $\Delta W_{st} < 0$, při konstantních podmínkách platí $\Delta W_{st} = 0$.

Pro kabely uložené na vzduchu se uvažuje pouze s povrchovými veličinami a pro tento případ se rovnice (4-15) redukuje na tvar:

$$W_{ent} - W_{out} = 0 \tag{4-16}$$

Přenos tepla v prostředích uložení kabelu

Jak již bylo uvedeno výše, proud generuje teplo, které je disipováno přes vrstvy izolací a stínění do okolního prostředí. Proudová zatížitelnost závisí na účinnosti tohoto disipačního procesu a omezením daným teplotou izolace. Následující podkapitoly vysvětlují šíření v jednotlivých prostředích, v kterých je kabel uložen.

4.4 Přenos tepla u kabelů uložených v zemi

Pro přenos tepla u kabelů uložených v zemi musíme vyjít ze zákona zachování energie. Vyjdeme nyní z [1]: „Množství tepla naakumulovaného v zemině je určeno její teplotou. Tento vztah mezi teplotou a teplem definuje tepelná kapacita. Celkové množství tepla obsažené v zemním zásobníku pak přímo závisí na aktuální teplotě, objemu zásobníku, na objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacitě zeminy“.

$$Q = C.T = V.c.\rho.T \tag{4-17}$$

Kde:

Q je teplo naakumulované v zemině [J]

C je tepelná kapacita zeminy $[\mathrm{J.K^{-1}}]$

T je aktuální teplota zeminy [K]

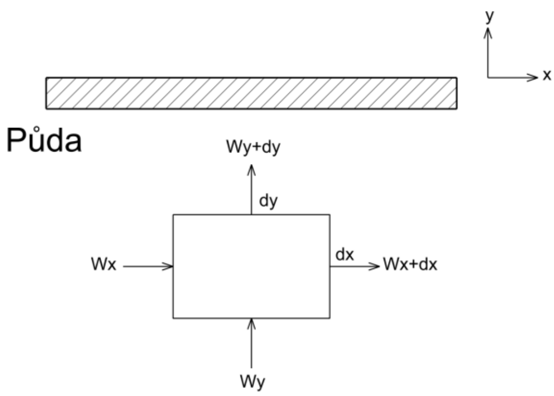
c je měrná tepelná kapacita zeminy $[\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}]$

ρ je hustota zeminy $[\mathrm{kg.m^{-3}}]$

V je objem zemního zásobníku $[\mathrm{m^3}]$

Obrázek 4: Kabely uložené v zemi

Dále můžeme v dalších úvahách využít následující 2D obrázek s využitím os x a y:



Obrázek 5: Odvození přenosu tepla v zemi Zdroj: [7]

Pro tento obrázek platí, že:

$$W_x = -\frac{S}{\rho}\frac{\partial\theta}{\partial x} \tag{4-17}$$

Kde:

W_x je přestup tepla přes plochu S ve směru x [W]

ρ tepelná rezistivita [Km/W]

S je plocha kolmá na směr tepelného toku $[\mathrm{m^2}]$

$\frac{\partial\theta}{\partial x}$ je teplotní gradient ve směru x

Pojďme nyní uvažovat element dx a dy na obr. 5. Pokud jsou zde teplotní gradienty, tak přestup tepla vedením bude přes každou vrstvu. Přestup tepla vedením do tělesa pro součadnice x a y je W_x a W_y. Přestup tepla vedením z tělesa pro souřadnice x a y je dán Taylorovou řadou jako W_{x+dx} a W_{y+dy}, při zanedbání vyšších řádů:

$$W_{x+dx} = W_x + \frac{\partial W_x}{\partial x} dx$$

$$W_{y+dy} = W_y + \frac{\partial W_y}{\partial y} dy$$

V souvislosti s elementy dx a dy, můžeme definovat také generovanou energii jako:

$$W_g = W_{int} dxdy \tag{4-18}$$

Kde:
W_{int} je energie generovaná tělesem na jednotku objemu pro odporové a kapacitní proudy $[\mathrm{W/m^3/m}]$
Dále se mohou objevovat změny v množství vnitřní energie uložené tělesem (kabelem) v elementu $dxdy$. Tyto změny jsou spojeny s kapacitním charakterem izolace kabelu. Můžeme tedy uloženou energii v kabelu vyjádřit jako:

$$\Delta W_{st} = c \frac{\partial \theta}{\partial t} dxdy \tag{4-19}$$

Kde:
c je měrná tepelná kapacita zeminy $[\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}]$
$\frac{\partial \theta}{\partial t}$ je oteplení v čase [K/s]

Při úvaze, že kondukce představuje přítok a odtok energie a dále zde není žádný další přestup tepla (pro kabely v zemi uvažujeme pouze s kondukcí), můžeme energetickou bilanční rovnici uvažovat ve tvaru:

$$W_x + W_y + W_{int} dxdy - W_{x+dx} - W_{y+dy} = c \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{4-20}$$

Při nahrazení S za $dxdy$, můžeme past poslední rovnici při dosazení rovnic 2.10 a 2.11:

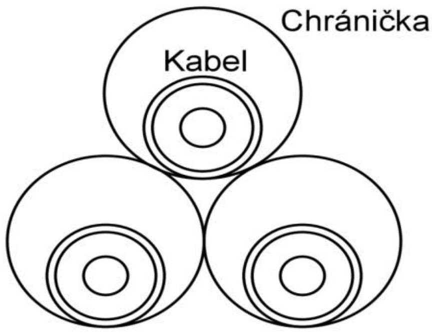
$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial \theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial \theta}{\partial y}\right) + W_{int} = c \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{4-21}$$

Tato rovnice je vyjádřením Fourier-Kirhoffovy rovnice pro uložení v půdě. Pro výpočty počítáme u kabelů uložených v zemi s přenosem tepla vedením.

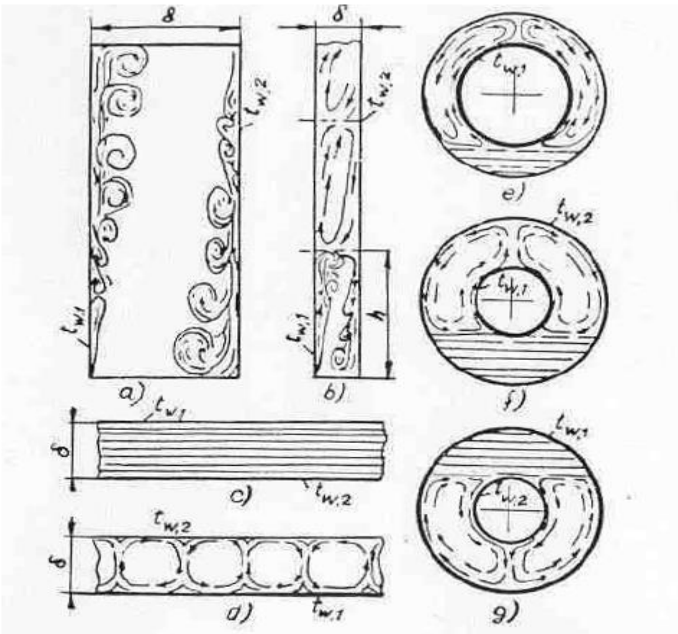
4.5 Přenos tepla v chráničkách

Pro přenos tepla v tomto prostředí si představme kabel, který je umístěn uvnitř chráničky a dotýká se jí (viz obr. 6). Pro některé praktické výpočty jako jsou např. tepelné simulace provedené programem Agros2D nebo ANSYS je nutné kabel symetricky vycentrovat do středu chráničky.

Pro další odvození vyjdeme z [6] na str. 81-83 kapitola 13. „Přestup tepla do omezeného prostoru". Přenos v tomto prostředí je zajištěn konvekcí a sáláním. V omezeném prostoru není možné oddělit od sebe ohřívání a ochlazování kapaliny (vzduchu v mezeře, dále jen kapalině). Určování proudění stoupající a klesající kapaliny je složité a závisí na řadě parametrů, zejména na tvaru a prostoru. Pro detailní popis vyjdeme z empirických vztahů zjištěných v [6]. První případ uvažujme pro proudění ve vodorovných mezerách a kanálech, kde je proudění závislé na vzájemné poloze ohřívacích a ochlazovacích povrchů a jejich vzdálenosti. Pokud bude ohřívací plocha nahoře, pak cirkulace nevznikne, což je vidět na obr. 7c. V případě, že je ohřívací plocha dole, pak vzniknou stoupající a klesající proudy, které se střídají, což je zobrazeno na obr. 7d. Případ válcové a kulové mezery (což je přesně případ kabelu v chráničce) je zobrazen na obr. 7e a 7f. Na těchto dvou obrázcích si můžeme všimnout cirkulace kapaliny, tato cirkulace se objevuje pouze nad dolním okraji ohřívaného povrchu a zároveň dole zůstává kapalina v klidu. Pokud by byl ohřívanou plochou válcový povrch, pak má cirkulace tvar jako je zobrazeno na obr. 7g a zasahuje do celého prostoru pod horním okrajem chladícího povrchu.



Obrázek 6: Schématický obrázek kabelu v chráničce



Obrázek 7: Přenos tepla v cylindrických předmětech Zdroj: [6]

Teoretický popis tepelného přenosu v omezeném prostoru je mnohem složitější než u neomezeného prostoru. Je prakticky nemožné stanovit součinitele přestupu tepla. Pro výpočty je tedy nutno uvažovat jednodušší postup, a to je přestup tepla vedením (kondukcí). Musíme zároveň zavést novou veličinu tzv. ekvivalentní tepelnou vodivost $\boldsymbol{\lambda_{ekv}}$. Tato veličina zaručuje, že se nemusí zvlášť určovat hodnoty α_1 a α_2 pro povrch kabelu a stěny chráničky.

Jak bylo uvedeno výše, uvažujeme přestup tepla vedením, kde se uvažuje zvýšená tepelná vodivost vzduchu podle výrazu:

$$\lambda_{ekv}^{konvekce} = \varepsilon_k . \lambda \tag{4-22}$$

Kde:

λ je tepelná vodivost kapaliny $[\mathrm{W/(m.K)}]$

ε_k je součinitel konvekce [-]

Pro součinitel konvekce platí:

$$\varepsilon_k = 0{,}105(Pr.Gr)^{0,3} \quad \text{pro} \quad 10^3 \leq Pr.Gr \leq 10^6 \tag{4-23}$$

$$\varepsilon_k = 0{,}4.\,(Pr.Gr)^{0,2} \quad \text{pro} \quad 10^6 \leq Pr.Gr \leq 10^{10} \tag{4-24}$$

Kde:
Pr je Prandtlovo číslo, což je bezrozměrné číslo, používané pro řešení přestupu tepla, můžeme ho vyjádřit vztahem $Pr = \frac{\nu}{a}$ (4-25)
ν je kinematická viskozita kapaliny při střední teplotě mezi teplotou povrchu kabelu a kapaliny (vzduchu) [N.s/m^2]
a je teplotní vodivost $a = \frac{\lambda}{\rho.c}$ (4-26), (při střední teplotě mezi teplotou stěny a vzduchu)
Pozn.: Pro vzduch se většinou uvádí hodnota $Pr = 0{,}7$.
Gr je Grashofovo bezrozměmé číslo, které vyjadřuje samovolné proudění dané rozdílem hustoty teplého a studeného vzduchu. Je definováno vztahem: $Gr = \frac{\beta \Delta T g L^3}{\nu^2}$ (4-27)
β je teplotní objemová roztažnost kapaliny při střední teplotě mezi teplotou stěny a vzduchu (kapaliny) $T_{stř} = \frac{T_{stěna} + T_{kapalina}}{2}$ (4-28), a pro ideální plyn (vzduch) platí: $\beta = 1/T_{stř}$ [1/K].(4-29)
ΔT je absolutní hodnota rozdílu teplot povrchu kabelu a vzduchu
g je gravitační zrychlení (9,81 m/s^2)
L je charakteristický rozměr tělesa, pro kabel nebo jednu žílu umístěné v chráničce. Charakteristický rozměr vypočítáme podle vztahu $L = \frac{4.S}{o}$ (4-30)
S je plocha, která odpovídá ploše mezi kabelem a chráničkou v příčném řezu [m^2]
o je obvod řezu chráničky [m]
Pokud nastane případ, že $Pr.Gr < 10^3$, pak se konvekce neuplatní a vezmeme $\varepsilon_k = 1$

Zdroj: [6]

Obrázek 8: Situace při uložení chrániček

4.6 Přenos tepla na vzduchu

Kabely se mohou u tohoto typu přenosu nacházet buď zavěšené na stožárech na venkovním vzduchu nebo v kabelových kanálech či kolektorech. U těchto typů kabelů se setkáváme s několika typy přenosů tepla. Kondukce je hlavní typem přenosu tepla uvnitř kabelu, toto teplo je způsobené jouleovými, feromagnetickými nebo dielektrickými ztrátami, označme tento typ ztrát W_t. Dalším typem přenosu je solární radiace od slunce. Přenos tepla z kabelu do okolí je zajištěn konvekcí a sálání. Energetickou bilanční rovnici můžeme pro povrch kabelu zapsat jako:

$$W_t + W_{sol} - W_{conv} - W_{rad} = 0 \tag{4-31}$$

Kde:
W_{sol} je teplo získané ze slunce [W/m]
W_{conv} jsou tepelné ztráty konvekcí [W/m]
W_{rad} jsou tepelné ztráty sáláním [W/m]
W_t je přenos tepla kondukcí uvnitř kabelu [W/m]
Vhodnou substitucí můžeme rovnici (4-24) přepsat na:

$$W_t + \sigma D_e H - \pi D_e h(\theta_e - \theta_{amb}) - \pi D_e \epsilon \sigma_B \left(\theta_e{}^4 - \theta_{amb}{}^4\right) = 0 \tag{4-32}$$

Kde:
θ_e je teplota povrchu kabelu [K]
σ je solární absorpční koeficient [-]
H je intenzita solární radiace [W/m^2]
σ_B je Stefan-Boltzmannova konstanta o hodnotě $5{,}67.10^{-8}$ [W/($\mathrm{m}^2\mathrm{K}^4$)]
ϵ je emisivita povrchu kabelu [-]
D_e je vnější průměr kabelu [mm]
θ_{amb} je teplota okolí [K]
Vztah pro konvekci můžeme dále přepsat na výraz:

$$W_{conv} = \alpha S \Delta\theta \tag{4-33}$$

Kde:
S je plocha [m^2] a α je součinitel tepelné vodivosti. Ten určíme pomocí teorie podobnosti při podmínce rovnosti Nusseltových čísel:

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 . L_1}{\lambda_1} = \frac{\alpha_2 . L_2}{\lambda_2} = Nu_2 \tag{4-34}$$

Kde:
L je charakteristický rozměr tělesa
λ je vlnová délka [nm]
Nusseltovou číslo Nu je bezrozměrné číslo sloužící k určení součinitele tepelné vodivosti. Když známe Nu, můžeme určit α:

$$\alpha = \frac{Nu.\lambda}{L} \tag{4-35}$$

Pozn.: Pokud uvažujeme střední hodnotu Nusseltova čísla, pak je výsledkem „alfa střední“, pokud místní hodnotu „alfa místní“.

Zdroj: [1], [6], [7]

Obrázek 9: Kabely v kolektoru

Kapitola 5: Přestup tepla pomocí tepelných obvodů a odvození elektrotepelného Ohmova zákona

Analytické řešení popsané v Kapitole 4 je možné provést pouze v případě, pokud máme k dispozici výpočetní nebo simulační programy jako např. Agros2D nebo ANSYS či Wolfram Mathematica. Ovšem i zde může dojít k limitujícím situacím, jako je například souběh více kabelů. Při příliš velkém množství kabelů dojde k tomu, že i s těmito softwary bude nemožné vypočítat přestup tepla. Kromě tohoto řešení existují také zjednodušené modely tepelného obvodu podobné elektrickým obvodům, kde elektrický odpor je nahrazen odporem tepelným a elektrická kapacita je nahrazena tepelnou kapacitou. V ustáleném stavu se projevuje pouze tepelný odpor. Elektrická indukčnost nemá analogickou tepelnou verzi.

Tepelný odpor je schopnost objektu bránit tepelnému toku v šíření. Tepelnou kapacitou se rozumí schopnost objektu ukládat teplo. Další analogií je převod elektrického napětí na teplotu a elektrického proudu na tepelný tok. Pokud se tepelné charakteristiky nemění s teplotou, pak můžeme tepelný obvod považovat za lineární a můžeme aplikovat princip superpozice. Jakákoliv změna v tepelném obvodu odpovídá teplu, tedy Ohmův zákon je analogický Fourierovu zákonu.

5.1 Analogie mezi tepelným a elektrickým obvodem

5.1.1 Tepelný odpor

Všechny nevodivé materiály v kabelu budou zabraňovat tepelnému toku v šíření z kabelu. Jsou to vrstvy jednotlivé izolace, protože vodivé části jako např. jádro a stínění jsou zanedbány, jelikož jejich hodnota je oproti izolačním vrstvám zanedbatelná. Pro další úvahy uvažujme cylindrickou nevodivou vrstvu s konstantní tepelnou rezistivitou ρ_{th} jako je např. izolační vrstva kabelu. Označíme dále vnitřní poloměr této vrstvy r_1 a vnější poloměr r_2, pak rozložení teploty uvnitř této vrstvy je dáno rovnicí:

$$\theta(r) = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\frac{r_1}{r_2}} \ln\frac{r}{r_2} + \theta_2 \tag{5-1}$$

Kde:

θ_1 a θ_2 jsou teploty odpovídající poloměrům r_1 a r_2. Toto teplotní rozdělení se pak využije ve Fourierově rovnici (4-17) k určení přestupu tepla. Derivací rovnice (5-1) získáme:

$$\frac{d\theta(r)}{dr} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\frac{r_1}{r_2}} \frac{1}{r} \tag{5-2}$$

Dosazením výrazu $2\pi r$ do rovnice (4-17), dostaneme následující výraz:

$$W = \frac{2\pi}{\rho_{th} \ln\frac{r_1}{r_2}} (\theta_1 - \theta_2) \tag{5-3}$$

Podobně jako je elektrický odpor úměrný elektrické vodivosti, je i tepelný odpor úměrný tepelné vodivosti. Z rovnice (5-3) vyplývá, výraz pro tepelný odpor pro cylindrickou vrstvu ve tvaru:

$$T = \frac{\rho_{th}}{2\pi} \ln\frac{r_2}{r_1} \tag{5-4}$$

Pro obdélníkový tvar:

$$T = \rho_{th} \frac{l}{S} \tag{5-5}$$

Kde:
ρ_{th} je tepelná resistivita materiálu [Km/W]
S je průřez tělesa [m^2]
l je tloušťka tělesa [m]
Analogicky platí pro stejný objekt Ohmův zákon pro elektrický odpor:

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \rho_{el} \frac{l}{S} \tag{5-6}$$

Mezi rovnicemi (5-5) a (5-6) je zřejmá analogie. Dále můžeme rovnici (5-3) přepsat na tvar:

$$W = \frac{\Delta\theta}{T} \tag{5-7}$$

Což je tepelný ekvivalent Ohmova zákona. Tepelný odpor může být také aplikován na přestup tepla konvekcí na povrchu tělesa. Z Newtonova zákona pro chlazení vyplývá (rovnice 2.2):

$$W = h_{conv} A_s (\theta_e - \theta_{amb}) \tag{5-8}$$

Kde:
A_s je oblast vnějšího povrchu kabelu na jednotku délky [m^2/m]
h_{conv} je koeficient povrchové konvekce [-]
θ_e je teplota povrchu kabelu [°C]
θ_{amb} je teplota okolí [°C]
Tepelný odpor pro konvekci je tedy:

$$T_{conv} = \frac{\theta_e - \theta_{amb}}{W} = \frac{1}{h_{conv} A_s} \tag{5-9}$$

Pro kabely instalované na vzduchu můžeme zavést ještě jeden druh odporu, a to tepelný odpor pro radiaci (sálání):

$$T_{rad} = \frac{\theta_e - \theta_{gas}}{W_{rad}} = \frac{1}{h_r A_{sr}} \tag{5-10}$$

Kde:
A_{sr} je oblast povrchu kabelu, u níž probíhá sálání [m^2/m]
θ_{gas} je teplota vzduchu oblklopující kabel, která pokud je kabel instalován ve vzduchu je rovna teplotě okolí θ_{amb} [°C]
h_r je koeficient přestupu tepla radiací [-], přestup tepla radiací je pak dán ve tvaru:

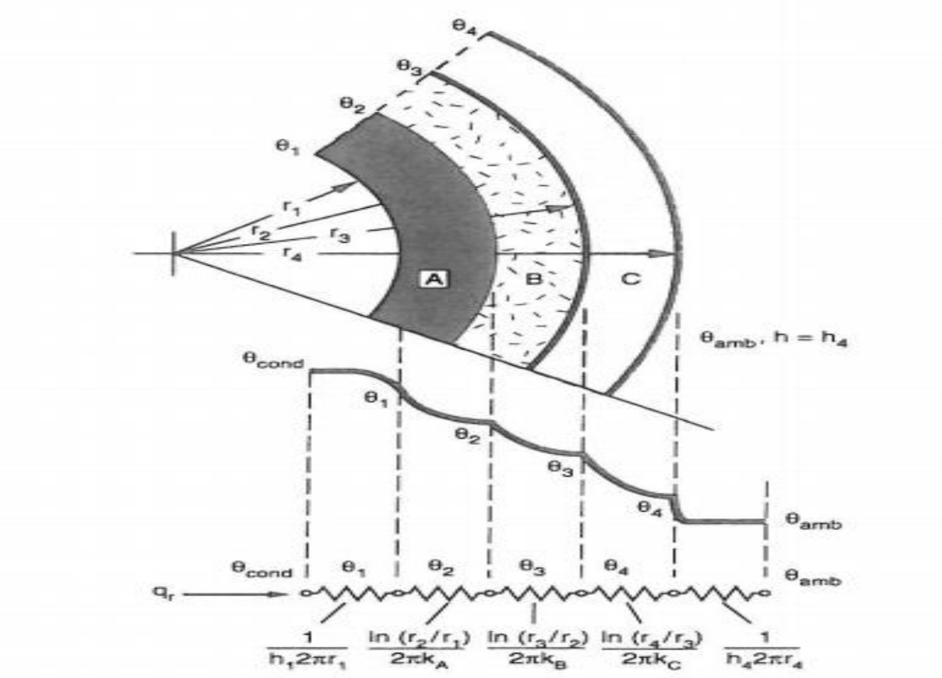
$$\begin{aligned} W_{rad} &= \epsilon \sigma_B A_{sr} \left({\theta_e}^4 - {\theta_{gas}}^4\right) = \\ &= \epsilon \sigma_B A_{sr} \left(\theta_e - \theta_{gas}\right)\left(\theta_e + \theta_{gas}\right)\left({\theta_e}^2 + {\theta_{gas}}^2\right) = \\ &= h_r A_{sr} \left(\theta_e - \theta_{gas}\right) \end{aligned} \tag{5-11}$$

A tedy koeficient přestupu tepla je:

$$h_r = \epsilon\sigma_B A_{sr}(\theta_e + \theta_{gas})(\theta_e{}^2 + \theta_{gas}{}^2) \tag{5-12}$$

Koeficient celkového přestupu tepla pro kabely uložené na vzduchu je:

$$h_t = h_{conv} + h_r \tag{5-13}$$



Obrázek 10: Vrstvy kabelu Zdroj: [7]

Ekvivalentní tepelný obvod kabelu je zobrazen na obr. 10, kde povrchové teploty jednotlivých vrstev kabelu jsou označeny θ_1 až θ_4 a přestup tepla může být určen pro každou vrstvu odděleně v následujícím tvaru:

$$W = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{\rho_A \ln(r_2/r_1)}{2\pi}} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{\frac{\rho_A \ln(r_3/r_2)}{2\pi}} = \frac{\theta_3 - \theta_4}{\frac{\rho_A \ln(r_4/r_3)}{2\pi}} = \frac{\theta_4 - \theta_{amb}}{\frac{1}{2\pi r_4 h}} \tag{5-14}$$

Tento vzorec může být dále zjednodušen na tvar:

$$W = \frac{\theta_1 - \theta_{amb}}{T_{tot}} \tag{5-15}$$

Kde celkový tepelný odpor všech vrstev je:

$$T_{tot} = \frac{\rho_A}{2\pi}\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{\rho_B}{2\pi}\ln\frac{r_3}{r_2} + \frac{\rho_C}{2\pi}\ln\frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{2\pi r_4 h} \tag{5-16}$$

5.1.2 Tepelné kapacity

Tepelné kapacity se, jak již bylo zmíněno, zanedbávají v ustálených stavech. Můžeme tedy říci, že tepelné kapacity jsou časově závislé, např. mějme dva paralelní kabely vedle sebe v ustáleném stavu se stejným zatížením, pokud vypneme jeden kabel, bude druhý kabel nést přidanou zátěž od prvního kabelu. Tato náhlá změna zátěže způsobí pomalejší změny v rozložení teploty v kabelu a okolních médiích. Pro určení časové závislosti rozložení teploty v kabelu a okolí by se mohlo vycházet z rovnic pro přestup tepla jako např. rovnice (4-21). Nicméně tento analytický postup je ve většině případů velice složitý, a proto se preferuje využít zjednodušeného modelu. Jedním z možných postupů, kdy jsou teplotní gradienty v kabelu malé, je metoda tzv. soustředných kapacit, tento analytický způsob výpočtu přestupu tepla rozděluje některé komponenty, jako třeba izolaci nebo okolní zeminu, na několik podsekcí tak, aby došlo k dodržení podmínky malého gradientu rozdělení teploty v kabelu.

Celý princip tepelné kapacity může být popsán na následujícím příkladu přestupu tepla v plášti kabelu uloženého na vzduchu. V čase $t = 0$ dojde k vypnutí kabelu a kabel se začne postupně ochlazovat. Základem metody soustředných kapacit je, že teplota pevného tělesa je prostorově uniformní v jakémkoliv okamžiku přechodového děje. Tento předpoklad znamená, že teplotní gradient uvnitř tělesa je zanedbatelný. Z Fourierova zákona plyne, že tepelná konduktivita při absenci teplotního gradientu znamená nekonečnou tepelnou vodivost. Takováto podmínka je zřejmě nemožná. Ovšem, tato podmínka může být blíže aproximována, pokud je odpor kondukce v plášti malý v porovnání s odporem při přestupu tepla mezi kabelem a okolním vzduchem. Pojďme tedy uvažovat, že nastal tento případ. Aplikováním rovnice (4-15) pro plášť kabelu s objemem V dostaneme tvar:

$$-W_{out} = W_{st} \tag{5-17}$$

Nebo

$$-h_t A(\theta - \theta_{max}) = Vc\frac{d\theta}{dt} \tag{5-18}$$

Kde:

A je celková plocha pláště vystavená přestupu tepla konvekcí a sálání [m^2]

V je objem tělesa [m^3]

c je měrná tepelná kapacita tělesa [J/(m^3. °C)]

Při předpokladu, že počáteční teplota pláště je $\theta(0) = \theta_0$, je řešením této rovnice:

$$\theta(t) = \theta_{amb} + (\theta_0 - \theta_{amb})\exp\left[-\left(\frac{h_t A}{Vc}\right)t\right] \tag{5-19}$$

Tato rovnice značí, že rozdíl mezi teplotami pláště a okolního prostředí klesá exponenciálně k nule při $t \to \infty$, výraz $(\frac{Vc}{h_t A})$ je nazýván tepelnou časovou konstantou. Využitím výrazu $T_4 = \frac{1}{\pi D_e h_t}$, tato časová konstanta může být přepsána na tvar:

$$\tau = \left(\frac{1}{h_t A}\right)(Vc) = T.Q \tag{5-20}$$

Kde:

Q je soustředná tepelná kapacita pláště

T je tepelný odpor pláště

Z těchto vztahů je zřejmé, že toto chování je analogické napěťovému poklesu, který se objeví, když je kapacitor vybíjen přes resistor v RC obvodu. Tato analogie s RC obvodem tedy může být použita pro přechodové stavy. Jak jsme si tedy již dokázali pro Ohmův zákon, analogie mezi elektrickým a tepelným modelem existuje a má tvar:

Elektrický model:
$$\Delta V = \frac{Q}{C} \tag{5-21}$$

Tepelný model:
$$\Delta \theta = \frac{W_{th}}{Q_{th}} \tag{5-22}$$

Kde:
C je elektrická kapacita [F]
Q je elektrický náboj uložený v kapacitě [C]
ΔV je napěťový přírůstek v C díky Q [V]
Q_{th} je tepelná kapacita [J/ °C]
W_{th} je teplo uložené v Q_{th} [J]
$\Delta \theta$ je teplotní nárůst v Q_{th} díky W_{th} [°C]
Tepelná kapacita může být dále definována jako schopnost objektu uchovávat teplo a nabývá výrazu:

$$Q_{th} = Vc \tag{5-23}$$

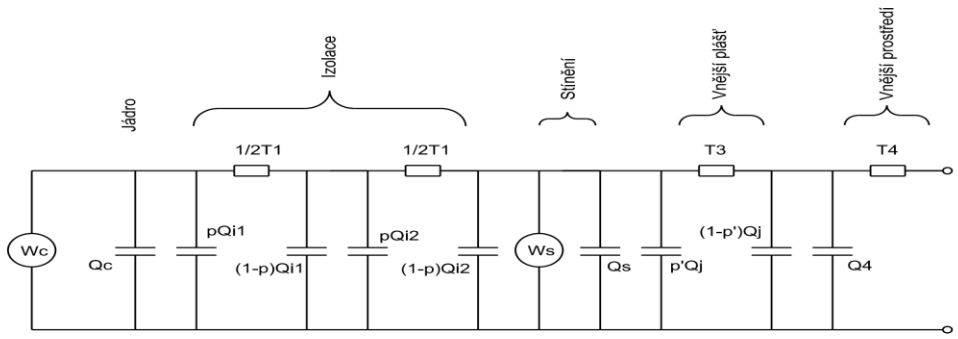
Kde:
V je objem tělesa [m^3] a c je měrná tepelná kapacita [J/(kg.K)]
Pro cylindrické uspořádání s koaxiálním kabelem by výraz (5-22) mohl být upraven na:

$$Q_{th} = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)c \tag{5-24}$$

Kde:
D_1 je vnitřní průměr vrstvy a D_2 je vnější průměr vrstvy [m]

5.2 Konstrukce žebříkovité sítě se soustřednými parametry kabelu (tepelný obvod)

Na základě odvození analogie mezi elektrickým a tepelným polem, resp. obvodem můžeme použít analogické vztahy z elektrických obvodů, a tím vyřešit a vypočítat mnoho problémů v tepelném poli kabelů. Takto vytvořený tepelný obvod se nazývá žebříkovitá síť (podle anglického Ladder Network). Na obr. 11 je zobrazen takovýto obvod pro kabely na obr. 1-2. Není zde zakreslen tepelný odpor T_2, což je tepelný odpor armování, které se kabelů na obr. 1-2 nevyskytuje. Jednotlivé vrstvy s tepelnými odpory a kapacitami budou detailněji popsány v pozdějších kapitolách.

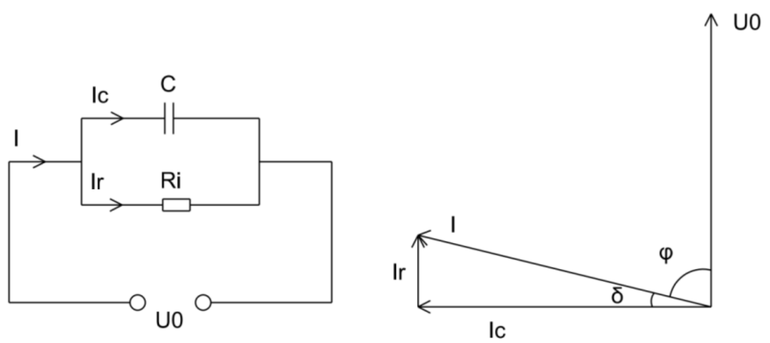


Obrázek 11: Tepelný obvod kabelu

V následujících podkapitolách bude vysvětleno odvození pro dovolený proud, kterým může být daný kabel zatížen. Tento proud definuje přenosovou zatížitelnost kabelu.

5.2.1 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty zvyšují celkové tepelné ztráty kabelu. Při konstrukci tepelného obvodu je potřeba řešit přechodové a ustálené stavy tak, jako by se vyskytovaly uprostřed tepelného odporu mezi vodičem a pláštěm, ačkoliv se vyskytují v celé izolaci. Izolace je vystavena v provozu střídavému napětí a chová se jako velký kapacitor a zároveň v ní proudí nabíjecí proudy. Práce potřebná k přeskupení elektronů v každém časovém okamžiku, kdy dojde ke změně směru napětí (tzn. při frekvenci 50 Hz je to 50krát za sekundu), produkuje teplo, které se projevuje jako reálné výkonové ztráty, které nazýváme dielektrické. Tyto ztráty by měly být odlišeny od ztrát reaktivních. Velikost nabíjecích proudů na jednotku délky kabelu je dána jako funkce dielektrické konstanty izolace, rozměru kabelu a provozního napětí. Pro některé typy kabelů jako např. vysokonapěťové kabely s papírovou izolací mohou mít tyto ztráty velký vliv na přenosovou schopnost kabelu.



Obrázek 12: Odvození dielektrických ztrát

Izolace kabelu je materiál, jehož dielektrická odezva je výsledek jejího kapacitního charakteru neboli schopnosti uchovávat náboj a také jejího vodivostního charakteru neboli schopnosti vést náboj. Tento materiál může být zobrazen jako odpor a kapacitor jako tomu je na obr. 12. Když je k tomuto obvodu přiloženo napětí U_0, pak vzniklý proud I vytváří s tímto napětím úhel φ. Vzniklý proud je tvořen dvěmi složkami: kapacitní (nabíjecí) I_c a odporovou (svodovou) I_r. Vzhledem ke kvalitním izolačním materiálům je velikost svodového proudu výrazně nižší než velikost vektoru kapacitního proudu, a tím je i velikost ztrátového úhlu δ velmi malá. Nabíjecí (kapacitní) a svodové proudy jsou rovny:

$$I_c = j\omega C U_0 \quad \text{a} \quad I_r = \frac{U_0}{R_i} \tag{5-25}$$

Kde:

C je kapacita izolace [F]

$\omega = 2\pi f$ je úhlová frekvence [Hz]

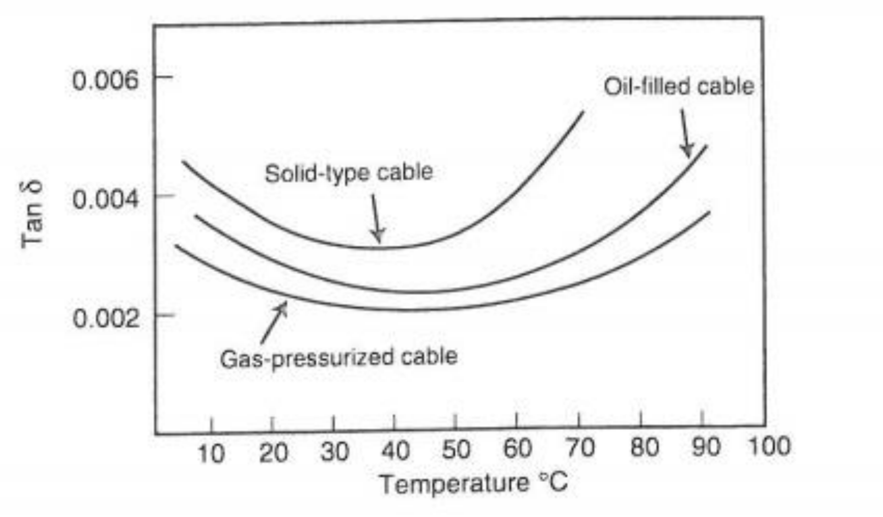
Po zavedení relativní permitivity $\varepsilon = \frac{C}{C_0}$ [-], kde C_0 je kapacita stejného kapacitoru ve vakuu. ε je často statická nebo s nízkou frekvencí. Pak můžeme vztah pro kapacitu vyjádřit:

$$C = \varepsilon C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9} \tag{5-26}$$

Kde:
D_i je vnější průměr izolace kromě stínění a d_c je průměr vodiče zahrnující stínění.
Dalším důležitým parametrem dielektrika je jeho ztrátový úhel tan δ. Z obrázku 12 plyne vztah:

$$\tan\delta = \frac{|I_r|}{|I_c|} = \frac{U_0}{R_i C\omega U_0} = \frac{1}{R_i C\omega} \tag{5-27}$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že čím nižší je hodnota ztrátového úhlu, tím lepší má dielektrikum vlastnosti, zároveň tento faktor je teplotně závislý, jak je vidět na grafu 1.



Graf 1

Pro výpočty jsou však ε a δ považovány za konstantní. Jejich hodnoty pro dané materiály jsou v tabulce 3 v normě IEC 287-1-1.

Dielektrické ztráty na jednotku délky v každé fázi jsou poté získány z rovnice:

$$W_d = \frac{U_0^2}{R_i} = \omega C U^2 \tan\delta \tag{5-28}$$

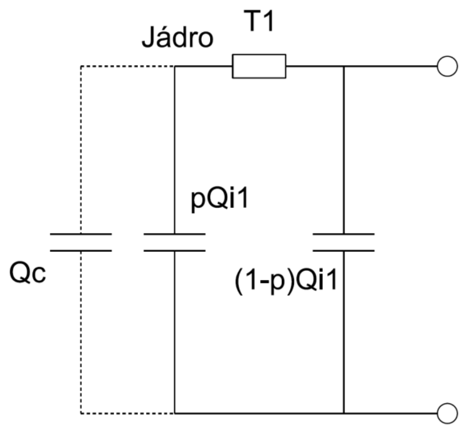
Z této rovnice vidíme, že dielektrické ztráty jsou napěťově závislé a projevují se až na vyšším napětí (275 kV a vyšším).

5.2.2 Vytvoření kapacit dielektrika v tepelném obvodu

V minulosti bylo pro kabelové výpočty uvažováno s rozdělením tepelné kapacity rovnoměrně mezi vodič a plášť (stínění). Nicméně tepelná kapacita izolace není lineární funkcí tloušťky dielektrika, a proto pro zpřesnění výpočtů byl zaveden tzv. Van Wormerův koeficient, takže celkové naakumulované teplo v izolaci je zastoupeno touto modifikací. Předpokladem je, že rozdělení teploty v izolaci má logaritmické rozdělení normálního provozního stavu po dobu přechodového stavu. Van Wormerův koeficient se určuje pro krátkodobé přechodové stavy ($t \leq \frac{1}{3}\sum T.\sum Q$, kde T je vnitřní tepelný dpor kabelu a Q je vnitřní tepelná kapacita kabelu) a dlouhodobé přechodové stavy ($t > \frac{1}{3}\sum T.\sum Q$). Protože tyto stavy záleží na konstrukci kabelu. Zjednodušeně můžeme za krátkodobé stavy pokládat ≤ 1 hod a dlouhodobé stavy $t > 1$ hod (podle IEC 863-2).

5.2.3 Van Wormerovi koeficienty pro dlouhodobé přechodové stavy

Dielektrikum je reprezentováno soustřednými tepelnými konstantami. Celková tepelná kapacita Q_i je rozdělena mezi vodič a plášť (stínění) podle obr. 13.



Obrázek 13: Obvod pro určení Van Wormerova koeficientu 1

V obr. 13 je Q_c tepelná kapacita jádra (vodiče) a Q_i je tepelná kapacita dielektrika a T_1 je tepelný odpor mezi jádrem a pláštěm (tepelný odpor dielektrika). p je Van Wormerův koeficient.

Pro určení Van Wormerova koeficientu p uvažujme rozšíření části kabelu ke stínění. Dále označme q_i jako kapacitu izolace vztaženou na jednotkovou plochu, takže $Q_i = A.q_i$. Jestliže p představuje část tepelné kapacity umístěné na teplotu vodiče θ_c a člen (1-p) část umístěnou na teplotu pláště (stínění) θ_s, pak celkové teplo uložené v izolaci může být spočítáno jako:

$$pAq_i\theta_c + (1-p)Aq_i\theta_s = q_i \int_{d_c/2}^{D_i/2} \theta_r 2\pi r\, dr \tag{5-29}$$

Kde:

D_i je vnější průměr dielektrika [mm] a d_c je vnější průměr vodiče [mm]

Podle geometrie kabelu je $A = \frac{\pi}{4}(D_i^2 - d_c^2)$ [mm^2]

V normálním provozním stavu je teplota v izolaci ve vzdálenosti r od vodiče daná rovnicí:

$$\theta_c - \theta_r = W_c \frac{\rho_i}{2\pi} \ln \frac{r}{d_c} \tag{5-30}$$

Nebo:

$$\theta_c - \theta_r = W_c \frac{\rho_i}{2\pi} \ln \frac{D_i}{d_c} \tag{5-31}$$

Kde:

W_c je teplo generované ve vodiči [W/m]

ρ_i je tepelný odpor izolace [Km/W]

Porovnáním rovnic (3-25) - (3-27) dostáváme:

$$pAq_i(\theta_c - \theta_s) + Aq_i\theta_s = 2\pi q_i \int_{d_c/2}^{D_i/2} \left(\theta_c - W_c \frac{\rho_i}{2\pi} \ln \frac{r}{d_c}\right) r\, dr \tag{5-32}$$

Po integraci:

$$pAq_i(\theta_c - \theta_s) + Aq_i\theta_s = 2\pi q_i\left[\frac{\theta_c\left(D_i^2 - d_c^2\right)}{8} - W_c\frac{\rho_i}{2\pi}\left(\frac{D_i^2}{8}\ln\frac{D_i}{d_c} - \frac{\left(D_i^2 - d_c^2\right)}{16}\right)\right] \tag{5-33}$$

Porovnáním rovnice (5-33) s rovnicemi (5-29) a (5-31) dostaneme řešení pro p ve tvaru:

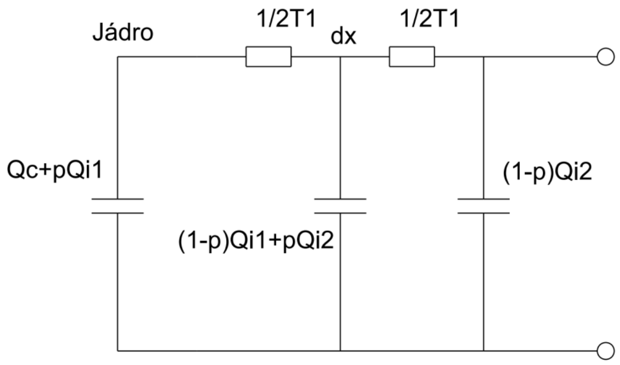
$$p = \frac{1}{2\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c}\right)^2 - 1} \tag{5-34}$$

Faktor p je spočítán na základě rozměrů 1-fázového kabelu a je aplikován na tepelné kapacity založené na dvou podmínkách:

1. Skutečné vodiče jsou uvažovány kompletně uvnitř průměru ekvivalentního 1-fázového vodiče, zbytek ekvivalentního vodiče je zastoupen v izolaci.
2. Prostor mezi ekvivalentním vodičem a stíněním je považován za kompletně vyplněný izolací.

5.2.4 Van Wormerovi koeficienty pro krátkodobé přechodové stavy

Tyto koeficienty se obvykle počítají pro časy od 10 min od 1 hodiny. Pro krátkodobý přechodový stav uvažujme, že izolace je tlustá. Metoda je samo o sobě stejná jako pro dlouhodobý přechodový stav s výjimkou toho, že je izolace kabelu rozdělena ve vzdálenosti $d_x = \sqrt{D_i.d_c}$ na dvě části o stejných tepelných odporech, jako je tomu na obr. 14.



Obrázek 14: Obvod pro určení Van Wormerova koeficientu 2

Tepelné kapacita první části izolace Q_{I1} je definována jako:

$$Q_{I1} = \frac{\pi}{4}(D_i.d_c - d_c^2).c \tag{5-35}$$

Tato kapacita je rozdělena na dvě kapacity $Q_{i1} = p^*.Q_{I1}$ a $Q_{i2} = (1 - p^*).Q_{I1}$
Celková tepelná kapacita druhé části izolace je:

$$Q_{I2} = \frac{\pi}{4}\left(D_i^2 - D_i.d_c\right).c \tag{5-36}$$

Která je rozdělena také na další dvě části, $Q_{i3} = p^*.Q_{I2}$ a $Q_{i4} = (1 - p^*).Q_{I4}$

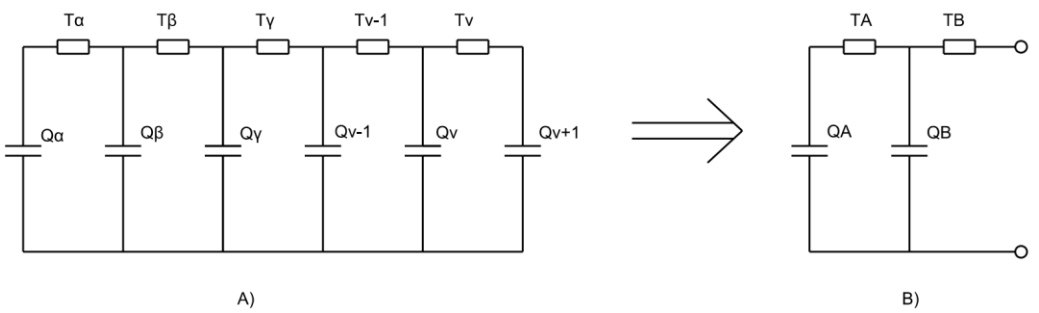
$$p^* = \frac{1}{\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c}\right) - 1} \tag{5-37}$$

Kde:
p^* je Van Wormerův koeficient pro krátké přechodové stavy.

5.2.5 Redukce žebříkovité sítě na dvousmyčkový obvod

Pro zjednodušení výpočtů a určitou standardizaci procesů pro základní typy kabelů byl zaveden model redukce. Kabelová žebříkovitá síť se redukuje na dvě části. Proces této redukce je následovný. Uvažujme žebříkovitou síť složenou z n odporů a (n+1) kapacit, jak je zobrazeno na obr. 15a.

Pokud je posledním elementem sítě kapacita, pak je poslední kapacita Q_{n+1} zkratována. Ekvivalentní model je rozdělen na dvě části: $T_A Q_A$ a $T_B Q_B$, jak je zobrazeno na obr. 15b.



Obrázek 15: Redukce žebříkovité sítě

První člen tohoto modelu je tvořen $T_A = T_\alpha$ a $Q_A = Q_\alpha$ bez modifikace pro relativně krátké trvání. Druhý člen $T_B Q_B$ je vytvořen ze zbývajících částí původního obvodu porovnáním tepelné imedance druhé části k celkové impedanci vícenásobných sekcí. Laplaceova transformace tepelné impedance Z_B je tedy:

$$Z_B(s) = \frac{1}{sQ_B + \frac{1}{T_B}} \tag{5-38}$$

Celkový tepelný odpor musí být stejný pro každou fázi, a proto můžeme psát:

$$T_B = T_\beta + T_\gamma + \cdots + T_n \tag{5-39}$$

Ekvivalentní kapacita při zanedbání členů vyšších řádů má tvar:

$$Q_B = Q_\beta + Q_\gamma \left(\frac{T_\gamma + T_\delta + \cdots + T_n}{T_\beta + T_\gamma + \cdots + T_n}\right)^2 + Q_\delta \left(\frac{T_\delta + T_\epsilon + \cdots + T_n}{T_\beta + T_\gamma + \cdots + T_n}\right)^2 \dots + Q_n \left(\frac{T_n}{T_\beta + T_\gamma + \cdots + T_n}\right)^2 \tag{5-40}$$

Tento vzorec je obecný a je použit pro výpočty přechodových stavů.

5.3 Ustálený stav

Výpočty v ustáleném stavu zahrnují řešení rovnic uvedených v předchozí kapitole, s tím že tepelné kapacity jsou zanedbány. Výsledný diagram zahrnující i vnější tepelné odpory je zobrazen na obr. 16 (na tomto obrázku je zobrazen jednožílový kabel, trojžílový kabel je k nalezení v přílohách na konci tohoto dokumentu). Neznámé proměnné v tomto případě jsou buď proud vodiče I, nebo jeho provozní teplota θ_c. V prvním případě je maximální provozní teplota známá (pro dnes používané silové kabely nejčastěji 90 °C), v druhém případě je proud známý. Jelikož se ztráty objevují na několika místech v kabelovém systému (pro síť se soustřednými parametry), tepelný tok v tepelném obvodu na obr. 16 narůstá v několika krocích. Celkové jouleovy ztráty W_t v kabelu jsou vyjádřeny jako:

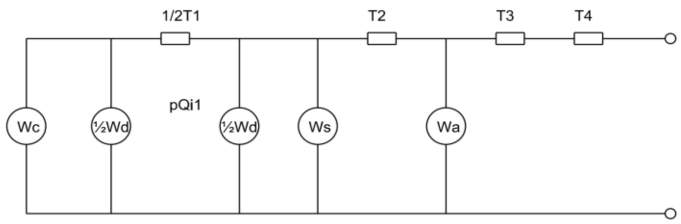
$$W_t = W_c + W_s + W_a = W_c(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \tag{5-41}$$

Kde:

W_c jsou ztráty ve vodiči, W_s jsou ztráty v plášti (stínění), W_a ztráty v armování (uvažováno pouze pro starší typy kabelů s olejem impregnovanou izolací) [W]

λ_1 je faktor ztrát v plášti (stínění) [-] a je úměrný poměru celkových ztrát ve stínění k celkovým ztrátám ve vodiči

λ_2 je faktor ztrát v armování a je roven poměru celkových ztrát v metalickém armování k celkovým ztrátám ve vodiči (v našem případě bereme $\lambda_2 = 0$)



Obrázek 16: Tepelný obvod jednožilového kabelu

Pozn.: Ztráty v armování T_2 se zde neobjevují.

S využitím diagramu na obr. 16 a analogie mezi elektrickým a tepelným obvodem můžeme psát pro oteplení vodiče nad teplotu okolí $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \left(W_c + \frac{1}{2}W_d\right)T_1 + [W_c(1+\lambda_1) + W_d]nT_2 + [W_c(1+\lambda_1+\lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4) \tag{5-42}$$

Kde:

n je počet fází přenášející proudové zatížení [-]

W_d jsou dielektrické ztráty [W] (neuvažujeme do napětí 275 kV)

Teplotou okolí se rozumí teplota média obklopující kabel za normálních podmínek a zahrnuje i další lokální zdroje tepla, ale ne oteplení v bezprostřední blízkosti kabelu v důsledku z nich vzniklého tepla.

T_1, T_2, T_3 a T_4 jsou tepelné odpory. Budou odvozené v pozdějších podkapitolách.

Dovolený proud pro přenosovou zatížitelnost získáme z rovnice (5-40), s připomenutím, že $W_c = I^2R$:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0{,}5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)}\right]^{0{,}5} \tag{5-43}$$

Kde:

R je AC resistance na jednotku délky vodiče při maximální provozní teplotě [Ω/m]

Výpočtem dovoleného proudu se zabývají normy řady IEC 287. Jeho hodnota je velmi důležitá, protože nám dává hodnotu proudu, kterým může být kabel potažmo kabelové vedení trvale zatěžováno. Podle jeho hodnoty snadno zjistíme, jestli je dané vedení schopné přenášet jmenovitý výkon transformátoru.

5.4 Přechodové stavy

Mechanismus výpočtu přechodových stavů se odlišuje od ustálených stavů. V tomto přechodovém stavu nás zajímá, jaký je maximální proud, který může kabel přenášet v daném čase, pokud teplota nemá překročit kritickou hodnotu, nebo naopak jak dlouho může být aplikován zvýšený proud, tak aby nedošlo k překročení kritické teploty. Pro další popis využijeme schéma tepelného obvodu na obr. 11 na str. 29. Neznámou veličinou je v tomto případě změna oteplení vodiče v závislosti na čase $\Delta\theta$. Na rozdíl od ustáleného stavu není tato teplota prostou funkcí proudu vodiče $I(t)$. Tento proces určení $I(t)$ vyžaduje iterační metody. V následujících podkapitolách bude vysvětleno odvození dovoleného proudu pro přechodové stavy.

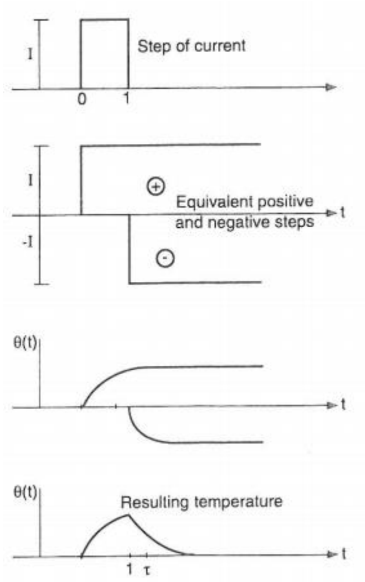
5.4.1 Odezva na skokovou změnu proudu

V tomto případě můžeme uvažovat jednoduchý kabelový systém nebo i složitější kabelový systém. V čase $t = 0$ dojde ke skokové změně a navýšení výkonu, např. v důsledku poruchy nebo přepojení, začne teplota narůstat v závislosti na velikosti aplikovaného proudu viz obr. 17. Na tomto obrázku je dále vidět pokles teploty při vypnutí.

Odezva na skokovou změnu proudu závisí na kombinaci tepelných kapacit a odporů od jednotlivých vrstev kabelu a okolního prostředí. Dále také záleží na délce trvání přechodového děje, např. pro kabely uložené v zemi je pro krátké přechodové děje důležitá tepelná kapacita kabelu, ale pro dlouhé přechodové děje může být zanedbána. Naopak tepelná kapacita zeminy může být pro krátkodobé přechodové stavy zanedbána, ale pro dlouhé přechodové stavy je důležitá. Tento fakt je daný tím, že samotná časová konstanta kabelu je výrazně kratší než časová konstanta okolní zeminy. Pro výpočet rozdělíme kabel do pouhých dvou smyček, výsledné oteplení bude součtem obou smyček, respektive komponent. První komponentou bude oteplení uvnitř kabelu a druhou oteplení vně kabelu. Tato konfigurace počítá s tím, že teplo je akumulováno v první části tepelného obvodu a je následně redukováno čili „vybíjeno“ v druhé části tepelného obvodu během přechodového stavu. Redukční činitel je znám jako attainment factor $\alpha(t)$ a v první části je definován vztahem:

$$\alpha(t) = \frac{\theta_c(t)}{W_c(T_A + T_B)} \tag{5-44}$$

Kde:
$\theta_c(t)$ je oteplení vodiče [°C]
W_c jsou ztráty ve vodiči [W/m]
T_A a T_B definovány v 5.2.6
Tepelný přechodový děj druhé části tepelného obvodu je pak složen ze své vlastní funkce odezvy na změnu tepelného výkonu násobenou redukčním koeficientem $\alpha(t)$.



Obrázek 17: Skoková odezva Zdroj: [7]

5.4.2 Oteplení ve vnitřní (první) části tepelného obvodu

Vnitřní část obsahuje celý kabel. Pokud je kabel uložen v chráničce nebo trubce, jsou i tyto části zahrnuty do této vnitřní části. U kabelů ve vzduchu se kabel rozšiřuje až na volný vzduch.

Pro další odvození vyjděme z toho, že si definujeme nějakou obecnou odezvu na vstupní funkci. V tomto případě odezvou bude oteplení povrchu kabelu nad teplotu okolí v uzlu i a vstupní funkce bude tepelná ztráta vodiče. Tento matematický proces se provede pomocí tzv. přenosové funkce sítě. Tato přenosová funkce je ve skutečnosti Fourierova transformace odezvy jednotkového impulzu sítě. Laplaceovou transformací sítě dostáváme pro přenosovou funkci poměr:

$$H(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \tag{5-45}$$

Kde:

$P(s)$ a $Q(s)$ jsou polynomy, které závisí na počtu smyček v síti (tepelném obvodu). Uzel i pak může být samotný vodič nebo kterákoliv jiná vrstva kabelu. Odezva tohoto uzlu v čase je definována jako:

$$\theta_i(t) = W_c \sum_{j=1}^{n} T_{ij}\left(1 - e^{-P_j t}\right) \tag{5-46}$$

Kde:

$\theta_i(t)$ je oteplení v uzlu i v čase t [°C]

W_c jsou ztráty ve vodiči zahrnující i skin a proximity efekty [W/m]

T_{ij} je koeficient [°C.m/W]

P_j je časová konstanta [1/s]

t je čas od počátku skoku [s]

n je počet smyček v síti [-]

5.4.3 Druhá část tepelného obvodu – Vliv okolní zeminy

Výpočty oteplení vnější vrstvy kabelu při přechodovém ději se mohou provést, pokud je kabel reprezentován liniovým zdrojem umístěným v homogenním nekonečném médiu s rovnoměrnou počáteční teplotou. Na základě těchto předpokladů může být rovnice (4-21) přepsána na tvar:

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\theta}{\partial r}+\rho_s W_t=\frac{1}{\delta}\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{5-47}$$

Kde:
ρ_s je tepelný odpor půdy [K.m/W]
δ =1/$\rho_s c$ je tepelný rozptyl půdy [m^2/s]
Integrací této rovnice dostáváme výraz:

$$\theta_e(t)=-W_t\frac{\rho}{4\pi}\int_t^{\infty}\frac{1}{u}e^{-\frac{r^2}{4\delta u}}\,du \tag{5-48}$$

Po substituci proměnných, kde $-Ei(-x)=\int_x^{\infty}\frac{e^{-\gamma}}{\gamma}$ je exponenciální integrál, dostáváme tvar:

$$\theta_e(t)=W_t\frac{\rho}{4\pi}\left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4\delta t}\right)\right] \tag{5-49}$$

Hodnota exponenciálního integrálu pomocí řad:

$$-Ei(-x)=-0{,}577-\ln x+x-\frac{x^2}{2.2!}+\frac{x^3}{3.3!}\dots \tag{5-50}$$

Pokud je $x<0{,}1$ pak:

$$-Ei(-x)=-0{,}577-\ln x+x \tag{5-51}$$

Pro velké hodnoty x lze psát:

$$Ei(-x)=-\frac{e^{-x}}{x}\left(1-\frac{1}{x}+\frac{2!}{x^2}-\frac{3!}{x^3}+\cdots\right) \tag{5-52}$$

Tyto hodnoty mohou být nalezeny např. v nomogramech normy IEC 853-2. Matematické řešení tohoto postupu je za podmínky, že je kabel brán jako liniový zdroj s vnitřními tepelnými odpory rovnými odporu okolní země. Tento postup je správný pro velmi krátké časy a hluboké uložení kabelu. Pro další praktické výpočty musíme vzít v úvahu tzv. Kenellyho hypotézu, že povrch země je isoterma. Při tomto předpokladu je oteplení v jakémkoliv bodě M v zemině v jakémkoliv čase rovno součtu oteplení způsobených zdrojem tepla W_t a jeho fiktivním obrazem umístěným symetricky s povrchem země, který emituje $-W_t$.

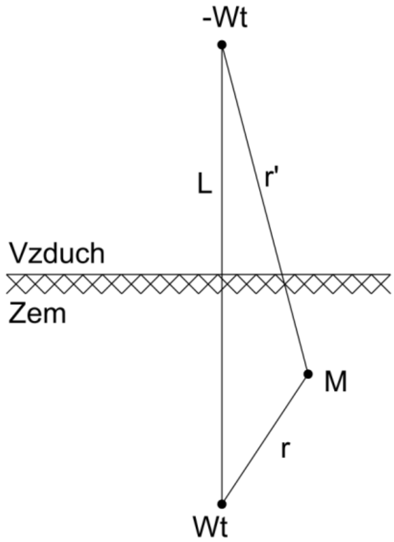
V tomto případě dostáváme:

$$\theta_M(t)=W_t\frac{\rho}{4\pi}\left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4\delta t}\right)+Ei\left(-\frac{r'^2}{4\delta t}\right)\right] \tag{5-53}$$

Umístěním bodu M na povrch kabelu a za předpokladu identických materiálů uvnitř a vně kabelu nyní dostáváme:

$$\theta_e(t)=W_t\frac{\rho}{4\pi}\left[-Ei\left(-\frac{D_e^2}{16\delta t}\right)+Ei\left(-\frac{L^2}{\delta t}\right)\right] \tag{5-54}$$

Kde:
D_e je průměr vnějšího povrchu kabelu [m]
L je axiální hloubka kabelu v zemi [m]



Obrázek 18: Kennellyho hypotéza

5.4.4 Druhá část tepelného obvodu – Kabely na vzduchu

Pro tyto kabely je nezbytné spočítat samostatnou odezvu pro kabelové prostředí. Celkové oteplení je získáno z rovnice (5-45) a je počítáno s vnějším tepelným odporem T_4 popsaným v kapitole 5.5.

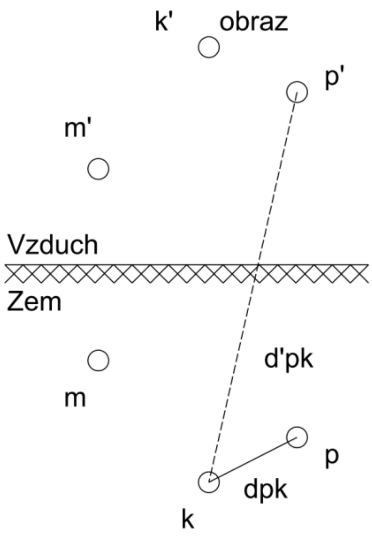
5.4.5 Skupina kabelů stejně nebo nestejně zatížených

Jak již bylo uvedeno kabely se vzájemně ovlivňují a tím si současně snižují přenosovou zatížitelnost, tyto vlivy musí být zahrnuty do tepelných výpočtů. Záleží také na délce přechodového děje a zdali je dostatečně dlouhý na to, aby se kabely vzájemně ovlivňovali. Pokud jsou kabely nestejně zatížené, musíme k oteplení samotného kabelu zároveň přičíst oteplení od ostatních kabelů. Oteplení v kabelu p od kabelu k se vypočítá:

$$\theta_{pk}(t) = W_{Ik} \frac{\rho}{4\pi}\left[-Ei\left(-\frac{d_{pk}^2}{4\delta t}\right) + Ei\left(-\frac{d_{pk}'^2}{4\delta t}\right)\right] \tag{5-55}$$

Kde:

W_{Ik} jsou celkové jouleovy ztráty v kabelu k [W/m], d_{pk} a d_{pk}' označují vzdálenosti od středu kabelu p ke středu kabelu k a jeho obrazu (zobrazeny na obr. 19



Obrázek 19: Skupina kabelů a jejich obrazy

5.4.6 Celkové oteplení

Celkové oteplení kabelu při přechodovém ději v jakémkoliv čase je dáno součtem oteplení vlastních ztrát (daných parametry systému) a oteplení daného vzájemným oteplováním od ostatních kabelů a fiktivních obrazů. Celkové oteplení v jakékoliv vrstvě kabelu v čase t po začátku výkonového skoku je dáno rovnicí:

$$\theta_{ptot}(t) = \theta_i(t) + \alpha(t)\theta_e(t) + \theta_d(t) + \alpha(t)\sum_{k=1}^{N-1}\left[\theta_{pk}(t) + \theta_{pdk}(t)\right] \quad (5\text{-}56)$$

Kde:

$\alpha(t)$ je attainment factor (redukční činitel) [-]

N je počet kabelů [-]

$\theta_d(t)$ je oteplení dané dielektrickým oteplení, které ale uvažujeme až pro kabely na napětí 275 kV

$\theta_{pdk}(t)$ je oteplení kabelu p od kabelu k dané dielektrickými ztrátami, v případě 275 kV je násobeno $\alpha(t)$ pouze pokud je napájeno v čase $t = 0$

5.4.7 Oteplení a odpor vodiče pro proměnlivou zátěž

Tyto výpočty se hodí pro proměnlivou zátěž nebo pro křivku denního diagramu zatížení. Celý diagram je rozdělen na řadu skoků o konstantní velikosti. Pro několik po sobě jdoucích kroků jsou udělány výpočty a konečná hodnota je získána superpozicí.

Díky proměnlivé zátěži se teplota neustále mění a současně s tím i elektrický odpor vodiče jako i ostatních kovových částí kabelu. Pro tyto změny byl definován vzorec:

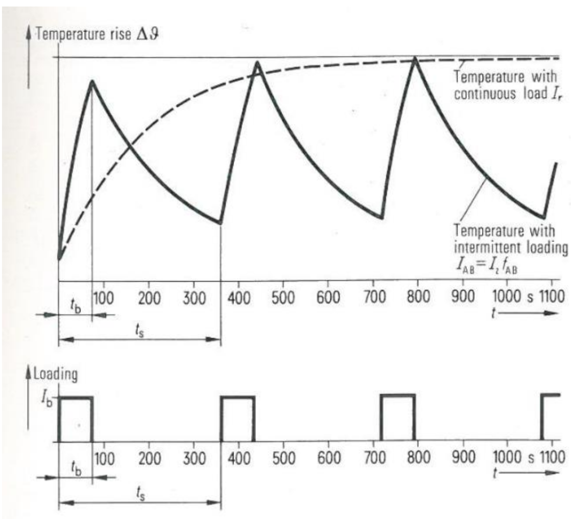
$$\theta_a(t) = \frac{\theta(t)}{1 + a[\theta(\infty) - \theta(t)]} \quad (5\text{-}57)$$

Kde:

$\theta(t)$ je oteplení vodiče při přechodové stavu nad teplotu okolí bez korekce změny ve ztrátách vodiče, založeném na odporu vodiče na konci přechodového děje [°C]

$\theta(\infty)$ je oteplení v ustáleném stavu nad teplotu okolí [°C]

a je teplotní koeficient elektrické rezistivity materiálu vodiče na začátku přechodového děje $a = 1/[\beta + \theta(0)]$, kde β je recipročí koeficient teploty při 0 °C a $\theta(0)$ je teplota na začátku přechodového stavu



Obrázek 20: Proměnlivá zátěž

Zdroj: [3]

5.4.8 Výpočet dovoleného proudu pro přechodový stav při přetížení

Během těchto stavů, kdy např. dojde ke krizové situaci a jeden ze dvou paralelních kabelů vedení je odpojen, musí být schopen druhý kabel přenést větší hodnotu proudu, než je dovolená hodnota proudu v normálním stavu nebo pokud je například jeden ze dvou paralelních transformátorů odepnut a druhý transformátor musí z nějakého důvodu přenést přetížení po určitou dobu. Tyto stavy obvykle trvají pouze několik hodin nebo i méně, ale kabel se v tomto čase nesmí přehřát nad kritickou teplotu.

Pro další odvození uvažujme izolovaný kabel uložený v zemi, který přenáší konstantní proud I_1 po dostatečně dlouho dobu, abychom mohli říci, že dosáhl ustáleného stavu. Pokud je cyklická zátěž s vrcholovou hodnotou proudu rovnou I aplikována dostatečně dlouho dobu, pak platí vztah $I_1 = \sqrt{\mu} I$, kde μ je činitel ztrát při cyklickém zatížení. V čase $t = 0$ dojde k zatížením proudem I_2, který je vyšší než I_1. Otázkou nyní je, jak velký může proud I_2 být, tak aby nedošlo k překročení kritické teploty (při uvažování změny odporu vodiče se vzrůstající teplotou). Dielektrické ztráty jsou zanedbatelné, ale měli by být brány v potaz na konci přechodového děje pro kabely na napětí 275 kV a vyšší.

Budeme dále předpokládat, že generované tepelné ztráty na jednotku vodiče v čase t při přetížení jsou konstantní a rovné hodnotě W_{max} na konci přechodového stavu. Při tomto přetížení dojde k oteplení vodiče nad teplotu okolí θ_{max}. Podle výše uvedených předpokladů můžeme psát:

$$\frac{\theta_{max} - \theta_R(0)}{\theta_R(t)} = \frac{W_{max} - W_0}{W_R} \tag{5-58}$$

Kde:

$W_0 = I_1^2 R_1$ je teplo vytvořené na jednotku vodiče v čase $t = 0$ a $W_R = I_R^2 R_R$ je teplo vytvořené během ustáleného stavu [W/m]

I_R je proud v ustáleném stavu [A]

R_R je AC resistance korespondující s proudem I_R [Ω/m]

Substitucí z definice ztrát vodiče můžeme rovnici (5-58) přepsat na tvar:

$$\frac{r - h_1^2 R_1 / R_R}{\theta_R(t)/\theta_R(\infty)} = \frac{\frac{I_2^2}{I_R^2} R_{max}}{R_R} - \frac{h_1^2 R_1}{R_R} \tag{5-59}$$

Kde:

$r = \frac{\theta_{max}}{\theta_R(\infty)}$ [-]

$h_1 = \frac{I_1}{I_R}$ [-]

θ_{max} je maximální dovolené oteplení nad teplotu okolí na konci přetížení [°C]

$\theta_R(\infty)$ je oteplení nad teplotu okolí v čase t korespondující s I_R, které zanedbává změnu odporu vodiče od $t = 0$ [°C]

$\theta_R(0)$ je oteplení v ustáleném stavu nad teplotu okolí při I_1 [°C]

Proud pro přetížení při přechodovém stavu dostaneme řešením rovnice (5-59) pro I_2:

$$\boxed{I_2 = I_R \left[\frac{h_1^2 R_1}{R_{max}} + \frac{\frac{R_R}{R_{max}} \left(r - h_1^2 \frac{R_1}{R_R} \right)}{\frac{\theta_R(t)}{\theta_R(\infty)}} \right]^{0,5}} \tag{5-60}$$

Oteplení v normálním stavu nad teplotu okolí je získáno jako:

$$\theta_R(t) = \theta_c - \theta_{amb} - \theta_d \tag{5-61}$$

Kde:
θ_c je maximální teplota vodiče v ustáleném stavu [°C]
θ_{amb} je teplota okolí [°C]
θ_d je oteplení dané dielektrickými ztrátami (uvažováno pouze od 275 kV) [°C]

5.5 Odvození veličin pro dovolené proudy

5.5.1 Odvození tepelných odporů

A) Tepelný odpor T_1 – Tepelný odpor mezi vodičem a stíněním (pláštěm)

Tento tepelný odpor pro jednožílový kabel je dán z rovnice (5-4) a můžeme ho přepsat na vztah:

$$T_1 = \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_1}{d_c}\right) \tag{5-62}$$

Kde:
ρ je tepelná resistivita izolace [Km/W]
d_c je průměr vodiče [mm]
t_1 je tloušťka izolace mezi vodičem a stíněním [mm]
T_1 je tepelný odpor mezi vodičem a stíněním (pláštěm) [Km/W]
Člen $\ln\left(1 + \frac{2t_1}{d_c}\right)$ se nazývá geometrický faktor.

Vztah pro trojžilový kabel je složitější, protože úplně přesné matematické formulace nemohou být určeny, nicméně matematické výrazy zohledňující všechny podmínky byly odvozeny experimentálně. Obecný vzorec je:

$$T_1 = \frac{\rho}{2\pi} G \tag{5-63}$$

Kde geometrický faktor s logaritmem v rovnici (5-62) byl nahrazen obecný geometrickým faktorem G. Hodnoty geometrického faktoru pro třížílové kabely v normě IEC 287 jsou založeny na empirických výsledcích vytvořené organizací E.R.A. ve Velké Británii ve třicátých letech. Problém analytického řešení byl překonán numerickými metodami jako například metodou integrální rovnice, Metodou filament heat source (f.h.s.) a metodou konečných prvků (kterou využívá program Agros2D nebo ANSYS). Pro metodu integračních rovnic je povrch vodiče včetně stínění považován za okrajovou podmínku a tepelné pole mezi těmito okrajovými podmínky je pak řešeno numericky. Pro f.h.s. metodu se místo povrchu vodiče jako okrajové podmínky nahradí vodič početnou skupinou menších vodičů nebo vláken (filament=vlákno), která se v součtu rovnají hlavnímu vodiči. Pro metodu konečných prvků platí, že tepelný odpor izolace je spočítán přímo za předpokladu, že okrajové podmínky na vodiči a stínění jsou isotermické. S danými ztrátami od každého vodiče W_c a teploty stínění θ_s je s pomocí metody konečných prvků spočítá teplota vodiče θ_c a hodnota T_1 je poté získána jako:

$$T_1 = \frac{\theta_c - \theta_s}{W_c} \tag{5-64}$$

B) Tepelný odpor T_2 – Tepelný odpor mezi pláštěm a armováním

Tento odpor se počítá pro jednožílové a třížílové kabely s armováním. Tento odpor u dnešních kabelů zanedbáváme. Jediná výjimka, kde se v této diplomové práci vyskytuje, je analýza 22 kV vedení do RS 7820, kde jeden z napájecích kabelů je typu AMKTOPV a ANKTOYPV, které mají olejem napuštěnou papírovou izolaci. Pro tento tepelný odpor platí vztah:

$$T_2 = \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_2}{D_s}\right) \tag{5-65}$$

Kde:
ρ je tepelná resistivita armování [Km/W]
D_s je vnější průměr pláště [mm]
t_2 je tloušťka armování [mm]

C) Tepelný odpor T_3 – Tepelný odpor vnější vrstvy kabelu
Jedná se o odpor poslední vrstvy izolace kabelu a je ve tvaru:

$$T_3 = \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D_a}\right) \tag{5-66}$$

Kde:
ρ je tepelná resistivita vnější izolační vrstvy [Km/W]
D_a je vnější průměr kabelu [mm]
t_3 je tloušťka vnější izolace [mm]

D) Tepelný odpor T_4 – vnější tepelný odpor
Ampacita kabelů velmi závisí na tepelném odporu vnějšího prostředí, ve kterém jsou kabely uloženy. Pro kabel uložený v zemi se uvažuje, že okolní prostředí způsobuje více než 70 % z oteplení vodiče. Pro uložení v zemi závisí vnější tepelný odpor na charakteristice půdy, průměru kabelu, hloubce uložení, způsobu instalace (přímo uložené, v zásypu, trubkách nebo chráničkách atd.) a na tepelném poli vytvořeném od sousedících kabelů. Pro kabely uložené na vzduchu má vnější tepelný odpor menší efekt na přenosovou zatížitelnost kabelu.

Jednožílové kabely uložené v zemi
Pro analytické řešení vnějšího tepelného odporu je nutné uvažovat, že tepelný odpor země není ovlivněn teplotou. Dále provedeme předpoklad, že tepelný odpor je konstantní v celé půdě. V tento okamžik můžeme aplikovat metodu superpozice, a to tak že teplotní změna vyskytující se v jakémkoliv bodě v obecném tepelném poli je rovna sumě teplotních změn vytvořených v jakémkoliv bodě všech tepelných polí.

Pro jednožílový kabel budeme dále uvažovat, že je uložen přímo v uniformní zemině. Při předpokladu, že rozměr kabelu je výrazně menší než rozměry okolní půdy, pak můžeme kabel považovat za vláknový nebo liniový tepelný zdroj v nekonečném médiu. Při ustáleném stavu zjednodušíme rovnici (4-21) na:

$$\frac{d\theta}{dr} + \frac{\rho_s}{2\pi r} W_t = 0 \tag{5-67}$$

Oteplení v jakémkoliv bodě M umístěném ve vzdálenosti d od středu kabelu je získáno integrací rovnice (5-67):

$$\Delta\theta = \int_{\infty}^{d} -\frac{\rho_s}{2\pi r} W_t \, dr = -\frac{\rho_s}{2\pi r} W_t \ln d \tag{5-68}$$

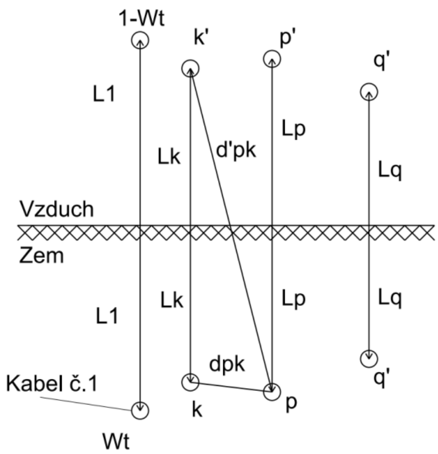
Pro vyhnutí se předpokladu o nekonečném uniformním médiu, budeme dále považovat povrch země za isotermu. Při této úvaze je oteplení v jakémkoliv bodě M v zemině a v jakémkoliv čase rovno sumě oteplení způsobených tepelným zdrojem W_t a jeho fiktivním obrazem umístění symetricky s ohledem na povrch země a emitující teplo $-W_t$ jako je to zobrazeno na obr. 21. Tyto dva tepelné toky probíhají současně a výsledná teplota je získána pomocí principu superpozice. Do rovnice (5-64) se přičte člen korespondující s fiktivním tepelným zdrojem umístěným ve vzdálenosti d' od bodu M.

$$\Delta\theta = -\frac{\rho_s}{2\pi r} W_t \ln d + \frac{\rho_s}{2\pi r} W_t \ln d' = \frac{\rho_s}{2\pi r} W_t \ln \frac{d'}{d} \tag{5-69}$$

Pokud je bod M umístěn na povrchu kabelu a vyjádříme d jako L – hloubku uložení [m] a d' jako D_e – vnější průměr kabelu (popř. chráničky, pokud jsou kabely uloženy v chráničkách) [m], pak hloubka středu kabelu a jeho průměru může být z rovnice (5-65) přepsána na:

$$\Delta\theta = \frac{\rho_s}{2\pi r} W_t \ln 2u \tag{5-70}$$

Kde:
$u = 2L/D_e$ [-]
ρ_s je tepelný odpor zeminy [Km/W]
W_t jsou celkové ztráty v kabelu [W/m]



Obrázek 21: Kabely a jejich fiktivní obrazy

Rovnice (5-66) předpokládá, že siločáry tepelného toku se vynořují z geometrického středu kabelu. Tepelný tok končí v malé vzdálenosti vertikálně nad geometrickým středem tepelného zdroje. Velikost přemístění je dána rovnicí:

$$e = D_e/2\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) \tag{5-71}$$

Tímto výrazem nabývá rovnice (5-66) tvar známý jako Kennellyho vzorec:

$$\Delta\theta = \frac{\rho_s}{2\pi r} W_t \ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) \tag{5-72}$$

Z rovnic (5-68) a (5-7) dostáváme výraz pro vnější tepelný odpor ve tvaru:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi r} \ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) \tag{5-73}$$

Pokud je hloubka uložení mnohem větší, než je průměr kabelu (což platí ve většině případů), pak u je mnohem větší než 1 (obvykle více než 10) a rovnice (5-69) se zredukuje na tvar:

$$T_4 = \frac{\rho_S}{2\pi r} \ln \frac{4L}{D_e} \tag{5-74}$$

Vnější tepelný odpor pro skupinu kabelů (nedotýkajících se)

U několika zatížených kabelů uložených v zemi je nutné uvažovat překrývající se tepelná pole od ostatních kabelů. Princip superpozice můžeme použít za předpokladu, že každá fáze se chová jako liniový zdroj a neovlivňuje tepelné pole dalších kabelů. Pro další předpoklady budeme uvažovat, že kabely jsou uloženy dostatečně daleko od sebe, aby tyto výše uvedené předpoklady platily. Osová vzdálenost kabelů by měla být alespoň dva průměry kabelů.

1. **Nestejně zatížené kabely**

   Tato metoda je navržená tak, že bere v úvahu výpočet oteplení na povrchu kabelu od ostatních kabelu v souběhu a toto oteplení se odečte od $\Delta\theta$ (použité v rovnici (5-43). Odhad rozptýleného výkonu na jednotku délky každého kabelu se musí provést předem a může být následně doplněn jako výsledek výpočtu, pokud to bude nezbytné. Z rovnice (5-70), oteplení $\Delta\theta_{kp}$ na povrchu kabelu p s generovaným výkonem W_k od kabelu k:

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{\rho_S}{2\pi} W_k \ln \frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \tag{5-75}$$

   Vzdálenosti d_{pk} a d'_{pk} jsou měřeny ze středu p-tého kabelu ke středu kabelu k a středu obrazu kabelu k na povrchu země-vzduch (viz. obr. 21). Tedy oteplení $\Delta\theta_p$ nad teplotu okolí na povrchu p-tého kabelu způsobené rozptylem výkonu od ostatních $(q-1)$ kabelů ve skupině je dáno jako:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \cdots + \Delta\theta_{kp} + \cdots + \Delta\theta_{qp} \tag{5-76}$$

   Člen $\Delta\theta_{pp}$ není do této rovnice zahrnut.

   Označme nyní θ_{ep} jako vnější teplotu v izolaci kabelu p. Náhradou pravé strany rovnice (5-71) rovnicí (5-72) a aplikováním rovnice (5-70) dostáváme obecný výraz pro vnější tepelný odpor p-tého kabelu ve tvaru:

$$T_4^p = \frac{\theta_{ep} + \Delta\theta_p - \theta_{amb}}{W_p} = \frac{\rho_S}{2\pi}\left(\ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right) + \frac{1}{W_p}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq p}}^{q} W_k \ln \frac{d'_{pk}}{d_{pk}}\right) \tag{5-77}$$

2. **Stejně zatížené kabely uložené v zemi**

   Pokud uvažujeme skupinu identicky zatížených kabelů, pak se výpočty velmi zjednoduší. V tomto případě je výpočet přenosové zatížitelnosti určen ampacitou nejvíce oteplovaného kabelu. Obvykle je možné z konfigurace uložení kabelů určit tento nejvíce oteplovaný kabel. Tato metoda spočívá ve vypočítání modifikované hodnoty T_4, která bere v potaz vzájemné tepelné ovlivňování ve skupině kabelů a nechává hodnotu $\Delta\theta$ uvedenou v rovnici (5-62) nezměněnou.

Pokud jsou ztráty ve skupině kabelů stejné, pak můžeme rovnici (5-73) zjednodušit na tvar:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi}\left\{\left(u+\sqrt{u^2-1}\right).\left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}}\right)\left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}}\right)\dots\left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}}\right)\dots\left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}}\right)\right]\right\} \tag{5-78}$$

Vnější tepelný odpor pro skupinu kabelů (těsně se dotýkajících)

Když se kabely uložené v zemi dotýkají nebo jsou uloženy v blízkosti ostatních kabelů, pak tepelné pole kabelu bude ovlivněno tepelným polem jiných kabelů. V tomto případě nelze použít princip superpozice. Superpozice je možná provést pouze u vzdáleností větších, než je průměr 2 kabelů. Následující podsekce berou v úvahu nejčastější situace uložení kabelů.

1. **Tři jednožílové kabely v uložení vedle sebe**

   Vzorec byl empiricky vytvořen členy WG10 a SC20A při IEC a nabývá tvar:

$$T_4 = \rho_s[0{,}475\ln 2u - 0{,}346] \quad \text{pro } u \geq 5 \tag{5-79}$$

Pro kabely, u kterých jsou povrchy neisotermické (např. kabely v chráničkách), byl odvozen vztah:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{\pi}[\ln 2u - 0{,}297] \tag{5-80}$$

2. **Tři jednožílové kabely uložené v trojúhelníku**

   V této konfiguraci je hloubka uložení L meřena ke středu trojúhelníkové skupiny a D_e je průměr kabelu.

   Vzorec pro tuto konfiguraci je možné najít také v normě IEC 287-2-1 ve tvaru:

$$T_4 = \frac{1{,}5\rho_s}{\pi}[\ln 2u - 0{,}603] \tag{5-81}$$

Tato rovnice je platná pro $u \geq 4$. Pokud zanedbáme vliv obvodové kondukce tepla metalických vrstev, pak tepelný odpor izolace a vnějších vrstev naroste, protože je bráněno rozptýlení tepla. A platí:

$$T_1^* = f_\varphi T_1 \qquad\qquad T_3^* = f_\varphi T_3 \tag{5-82}$$

Tepelné odpory T_1 a T_3 byly vypočítány v předchozích podkapitolách. Hodnota f_φ představuje část obvodu kabelu, kterému je bráněno ostatními kabely v odvodu tepla. Tato část závisí na úhlu φ jak je vidět na obr. 22. Pro f_φ pak platí:

$$f_\varphi = \frac{\pi}{\pi - \varphi} \tag{5-83}$$

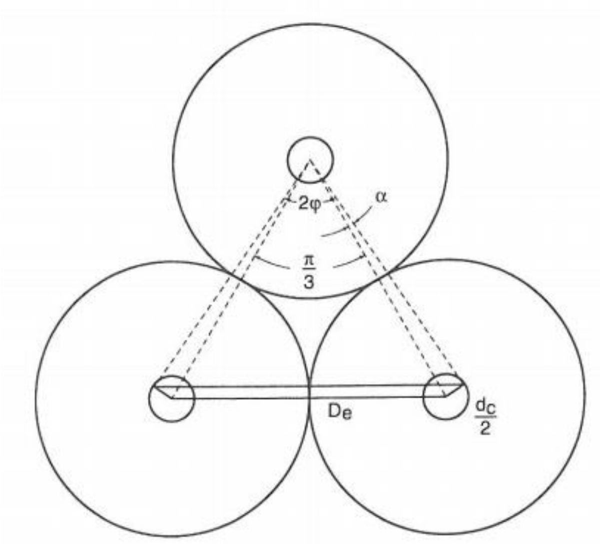
A pro úhel φ platí:

$$\varphi = \frac{\pi}{6} + \alpha = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{180}\arcsin\left(\frac{d_c}{2D_e}\right) \tag{5-84}$$

Pro standardně používané typy kabelů jsou rozměry kabelů podle rovnic (5-83) a (5-84) v rozmezí hodnot 1,27-1,42. Nicméně podle normy IEC 287 je doporučeno standardně počítat s hodnotou $f_{\varphi} = 1{,}6$ pro tepelný odpor T_3.

Pro 110 kV kabely se rovnice pro T_4 upraví na tvar:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi}[\ln 2u + 2\ln u] \tag{5-85}$$



Obrázek 22: Kabely v trojúhelníkové konfiguraci

Zdroj: [7]

Vnější tepelný odpor pro kabely uložené v chráničkách a trubkách

Chráničky nebo trubky, ve kterých se kabely nacházejí, mohou být vyplněny vzduchem nebo kapalinou, popř. v dnešní době hojně používaný materiál Bentonit, který má tu vlastnost, že zlepšuje tepelnou vodivost prostředí uvnitř trubek a chrániček, neboť vzduch v omezeném prostoru (jako například v chráničce) má obecně nižší tepelnou vodivost a tím i horší odvod tepla, než je tomu u kabelu uložených přímo v zemi (Bentonit se používá pouze u kabelů 110 kV). Bentonit tedy zlepšuje odvod tepla. Kabely 110 kV uložené vedle sebe mají chráničky pro každou fázi, (viz. obrázky řezů v přílohách) kde je prostředí vyplněno vzduchem. Je to z důvodu toho, že kdyby byly vyplněny Bentonitem, tak by bylo obtížné s nimi manipulovat, zhoršily by se mechanické parametry a bylo by velmi obtížné někdy v budoucnu tyto kabely vytáhnout.

Kabely 110 kV v trojúhelníku v chráničkách se obvykle dělají jako tři menší chráničky pro každou fázi navíc se čtvrtou větší chráničkou obklopující tyto tři menší chráničky (viz obrázky řezů v přílohách). Prostor mezi třemi menšími chráničkami a velkou chráničkou je vyplněn Bentonitem. V dnešní době se již dokáže vytvořit protlak bez velké chráničky a místo toho je tento prostor vyplněn pouze Bentonitem. Tento zásah zlepšuje tepelné parametry celého systému, protože v tomto případě nemusíme počítat s tepelným odporem T_4'' velké chráničky.

Vnější tepelný odpor kabelů v chráničkách může být rozdělen na následující:

1. Tepelný odpor vzduchu nebo kapaliny mezi povrchem kabelu a povrchem stěny chráničky T_4'.
2. Tepelný odpor samotné chráničky T_4''.
3. Vnější tepelný odpor chráničky T_4'''.

Hodnota T_4 v rovnici (5-43) se nahradí sumou tří výše uvedených tepelných odporů:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \tag{5-86}$$

1. **Tepelný odpor vzduchu nebo kapaliny mezi povrchem kabelu a povrchem stěny chráničky T_4'.**

   Pro další odvození předpokládejme, že vnitřní povrch chráničky je isotermický. Tento předpoklad je správný pro kovové vodiče, pro chráničky vyrobené z materiálů se špatnou tepelnou vodivostí bude počítáno s průměrnou teplotou uvnitř chráničky. Při předpokladu ustálených podmínek na povrchu kabelu, pak tepelný tok kondukcí z vnitřní vrstvy je roven tepelným ztrátám kondukcí, volné (přirozené) konvekci a sálání. Energetická bilanční rovnice pak nabyde tvar:

$$W_t = W_{conv,s} + W_{cond} + W_{rad,s-\omega} \tag{5-87}$$

Kde:
$W_{conv,s}$ je přirozená konvekce mezi vnitřním povrchem kabelu a okolním médiem na jednotku délky [W/m]
W_{cond} je přestup tepla vedením (kondukcí) v médiu obklopující kabel [W/m]
$W_{rad,s-\omega}$ je tepelné sálání mezi vnitřním povrchem chráničky a vnějším povrchem kabelu [W/m]
W_t je celková energie na jednotku délky generovaná v kabelu [W/m]

Pro přirozenou konvekci platí pro kabel v chráničce vztah:

$$W_{conv,s} = h_s(\theta_s - \theta_\omega)A_s \tag{5-88}$$

Kde:
h_s je koeficient přirozené konvekce povrchu kabelu [W/($\mathrm{m}^2\mathrm{K}$)]
θ_s je průměrná teplota vnějšího povrchu kabelu [°C]
θ_ω je teplota vnitřního povrchu chráničky [°C]
A_s je efektivní plocha pro konvektivní přestup tepla na jednotku délky [m^2]
Hodnota A_s zohledňuje propojení dvou tepelných odporů korespondující s vnějším povrchem kabelu a vnitřním povrchem chráničky:

$$A_s = \frac{2\pi}{\ln \frac{D_d}{D_e}} \tag{5-89}$$

Kde:
D_d je vnitřní průměr chráničky [mm] a D_e je vnější průměr kabelu [mm]

Koeficient přirozené konvekce je získán z úvahy, že chránička a v ní umístěný kabel mají cylindrickou konfiguraci, což je v praxi prakticky vždy porušeno, protože kabel je zpravidla umístěn na dno chráničky. Nicméně, tepelný odpor vzduchu/kapaliny obklopující kabel je pouze malou částí celkového vnějšího tepelného odporu kabelu. Pak toto zjednodušení představuje pouze malou chybu. Koeficient přestupu tepla představuje v tomto případě efektivní tepelnou vodivost kapaliny nebo vzduchu. Empirický vztah pro h_s odvozený Raithbym a Hollandsem má tvar:

$$h_s = 0{,}386 \frac{1}{\rho} \left(\frac{Pr}{0{,}861 + Pr} \right)^{1/4} (Ra)^4 \tag{5-90}$$

$$Ra = \frac{[\ln(D_d/D_e)]^4}{\left(D_d^{-3/5} + D_e^{-3/5}\right)^5} \frac{g\beta(\theta_s - \theta_\omega)d^2\rho c_p}{\mu} \tag{5-91}$$

Kde:
Ra je Rayleigho číslo [-]
β je objemový tepelný expanzní koeficient [1/K]
c_p je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku [J/(kg.K)]
d je hustota [kg/m^3]
g je gravitační zrychlení [mm/s^2]
μ je viskozita [kg/(s.m)]
ρ je tepelná resistivita kapaliny [Km/W]
Pr je Prandtlovo číslo [-]
D_d je vnitřní průměr chráničky [mm]
D_e je vnější průměr kabelu [mm]
Pokud by byl vzorec použit pro skupinu kabelů uložených v trubkách pak D_e je ekvivalentní průměr skupiny kabelů:

- Dvou kabelů: D_e = 1,65násobek vnějšího průměru kabelu [m]
- Tří kabelů: D_e = 2,15násobek vnějšího průměru kabelu [m]
- Čtyř kabelů: D_e = 2,50násobek vnějšího průměru kabelu [m]

Rovnice (5-89) a (5-90) mohou být použity pro rozmezí $10^2 \leq Ra \leq 10^7$, pro $Ra < 100$ je $h_s = 1/\rho$. Označíme-li D_f jako faktor reprezentující geometrii kabelu a chráničky a nahradíme rovnice (5-87) a (5-88) - (5-89) v rovnici (5-86) dostáváme pro ztráty konvekcí:

$$W_{conv,s} = 2\pi.\,0{,}386\left(\frac{Pr}{0{,}861 + Pr}\right)^{1/4} D_f^{3/4}.\left[\frac{g\beta d^2 c_p}{\mu\rho^3}\right]^{1/4} (\theta_s - \theta_\omega)^{5/4} \tag{5-92}$$

Kde:

$$D_f = \left(D_d^{-3/5} + D_e^{-3/5}\right)^{-5/3} \tag{5-93}$$

Pokud je médium mezi kabelem a stěnou chráničky vzduch s atmosférickým tlakem (což je ve většině situací), pak se hodnoty konstant mohou získat z tabulek IEC 287. Pro jiné plyny a kapaliny mohou být hodnoty získány z řady publikací o přestupu tepla nebo například na webových stránkách TZB.

Podobně jako pro konvekci, tak i pro vedení tepla se počítá s tím, že je kabel umístěn ve středu chráničky. Toto zjednodušení vede pouze k zanedbatelné chybě. Tepelné ztráty vedením jsou tedy dány vztahem:

$$W_{cond} = \frac{2\pi(\theta_s - \theta_\omega)}{\rho \ln\frac{D_d}{D_e}} \tag{5-94}$$

Pro přenos tepla sáláním platí:

$$W_{rad,s-\omega} = A_{sr} F_{s,\omega} \sigma_B (\theta_s^4 - \theta_\omega^4) \tag{5-95}$$

Kde:
σ_B je Stefan-Boltzmannova konstanta rovná 5,67x10^{-8} W/($\mathrm{m}^2\mathrm{K}^4$)
$F_{s,\omega}$ je faktor tvaru tepelného sálání, jeho hodnota záleží na geometrii soustavy [-]
A_{sr} je efektivní plocha povrchu kabelu pro tepelné sálání [m^2]

Tato rovnice je aplikovatelná v případě chrániček vyplněných vzduchem.
Tepelný odpor mezi povrchem kabelu a vnitřním povrchem chráničky je získán podělením úbytků teploty napříč mezerou v chráničce celkovým teplem vycházejícím z povrchu kabelu. Takže podle rovnice (5-85) dostáváme:

$$T_4' = \frac{\theta_s - \theta_\omega}{W_t} = \frac{\theta_s - \theta_\omega}{W_{conv,s} + W_{cond} + W_{rad,s-\omega}} \tag{5-96}$$

Jelikož se v těchto výpočtech setkáváme s řadou parametrů, které jsou buďto neznámé nebo jsou obtížné určit. Je nutné pro výpočet T_4' provést několik zjednodušení a aproximací. První aproximace zohledňuje goemetrii kabelu a chráničky. Efektivní průměr z rovnice (5-93) je aproximován na tvar:

$$D_f = \frac{D_e^{3/4}}{1{,}39 + \frac{D_e}{D_d}} \tag{5-97}$$

Další zjednodušení jsou (neuvažujeme trubky plněné olejem):

1. V případě inertního plynu jsou fyzické vlastnosti média uvažovány jako dostatečně nezávislé na teplotě přes celé spektrum pracovního rozsahu, naopak hustota je přímou funkcí tlaku. Takže, označíme-li P jako tlak, pak dostáváme:

   $$\frac{W_{conv,s}}{\Delta\theta_{sv}}(plyn) = 4{,}744.\frac{(D_e)^{3/4}}{1{,}39 + \frac{D_e}{D_d}} P^{1/2}.\Delta\theta_{s\omega}^{1/4} \tag{5-98}$$

   Kde: $\Delta\theta_{s\omega} = \theta_s - \theta_\omega$

2. Radiační složka s plynem (vzduchem) je dána vztahem:

   $$\frac{W_{rad,s-\omega}}{\Delta\theta_{sv}}(plyn) = 13{,}21.D_e.\varepsilon_s.(1 + 0{,}0167.\theta_m) \tag{5-99}$$

   Kde:
   ε_s je emisivita vnějšího povrchu kabelu [-]

   Substitucí v rovnici (5-94) rovnicemi (5-92) a (5-95 až 5-97) dostáváme:

   $$\frac{1}{T_4'}(plyn) = 4{,}744.\frac{{D_e}^{3/4}}{1{,}39 + \frac{D_e}{D_d}}.P^{1/2}.\Delta\theta_{s\omega}^{1/4} + \frac{0{,}5279}{\ln\frac{D_d}{D_e}} + 13{,}21.D_e.\varepsilon_s.(1 + 0{,}0167.\theta_m) \tag{5-100}$$

Výraz pro kondukci v rovnici (5-100) má vliv zhruba 14 % pro typické uložení s chráničkami, pro radiaci to je zhruba 63 %. Změna v D_e/D_d může způsobit velkou změnu v kondukci, ale celkový efekt je malý, protože kondukce představuje poměrně malou část tepelného toku. Navíc tato změna má opačný vliv na člen s konvekcí. Došlo se tedy k tomu, že minimální chyba bude, když se člen s kondukcí bude brát jako konstantní a jmenovatel u výrazu s konvekcí také jako konstantní.

Změna θ_m může ovlivnit radiační člen do 20 %, nicméně pokud počítáme přenosovou zatížitelnost pro fixní teplotu v rozmezí 70-90 °C (v závislosti na druhu izolace), pak je tento člen malý. Z výše uvedených předpokladů může být rovnice (5-100) přepsána na tvar:

$$T_4' = \frac{1}{D_e\left[a\left(\frac{\Delta\theta_{s\omega}.\,P^2}{D_e}\right)^{1/4} + b + c.\,\theta_m\right]} \tag{5-101}$$

Kde konstanty a, b a c byly vytvořeny empiricky.
Pokud omezíme $\Delta\theta_{s\omega}$ na hodnotu 20 °C pro kabely v chráničkách a průměr kabelu 25-100 mm a pro třížílové kabely v trubkách o průměru 75-125 mm, můžeme rovnici (5-99) přepsat na tvar:

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0{,}1(V + Y\theta_m)D_e} \tag{5-102}$$

Kde konstanty U, V a Y záleží na druhu instalace a uložení a jsou k nalezení v normě IEC 287-2-1.

2. **Tepelný odpor samotné chráničky T_4''**
   Tento odpor dostaneme přímou aplikací rovnice (5-4):

$$T_4'' = \frac{\rho}{2\pi}\ln\frac{D_o}{D_d} \tag{5-103}$$

Kde:
ρ je tepelná resistivita materiálu [Km/W], D_o je vnější průměr chráničky a D_d je vnitřní průměr chráničky [mm]

3. **Vnější tepelný odpor chráničky T_4'''**
   Pro chráničky nezabudované v betonu je tento tepelný odpor spočítán stejným způsobem jako pro vnější odpor kabelů uložených v zemi (viz. předchozí stránky), pouze vnější průměr kabelu D_e je pro výpočty nahrazen vnějším průměrem chráničky D_o.

Vnější tepelný odpor pro kabely uložené na vzduchu

Pro tyto výpočty se počítá s tím, že kabely jsou uloženy horizontálně na deskách s výložníky, například v kabelových kanálech nebo kolektorech nebo vertikálně upevněné na stěnách. Přenos tepla v tomto prostředí je komplexnější než u kabelů uložených v zemi a je nutné vyřešit řadu energetických bilančních rovnic. Odpovídající energetická bilanční rovnice pro n vodičů kabelu je daná:

$$\begin{aligned} nI^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d + \sigma D_e H - \pi D_e h_{conv}(\theta_e - \theta_{amb}) \\ - \pi D_e \varepsilon_s \sigma_B(\theta_e^4 - \theta_{amb}^4) = 0 \end{aligned} \tag{5-104}$$

Kde:
h_{conv} je koeficient konvektivního přestupu tepla [W/(Km^2)]
θ_e je teplota povrchu kabelu [K]
σ je solární absorpční koeficient
H je intenzita solárního záření [W/m^2]
σ_B je Stefan-Boltzmannova konstanta rovná 5,67x10^{-8} W/(m^{2}K^4)
ε_s je emisivita vnějšího povrchu kabelu [-]
D_e je vnější průměr kabelu [mm]
θ_{amb} je teplota okolí [k]
V rovnici (5-104) jsou dvě neznámé, a to proud vodiče I a teplota povrchu kabelu θ_e. Následující rovnice ukazuje vztah mezi těmito dvěma veličinami a dále mezi teplotou vodiče a povrchu kabelu:

$$\theta_c - \theta_e = n(I^2R.T + \Delta\theta_d) \tag{5-105}$$

Kde T představuje vnitřní tepelný odpor kabelu [Km/W] a $\Delta\theta_d$ je oteplení dielektrickými ztrátami [K] a konstanta n reprezentuje počet vodičů v kabelu [-]

Pro získání výrazu pro vnější tepelný odpor kabelu na vzduchu, přepíšeme rovnici (5-104) za použití výrazu $W_t = \pi D_e h_t(\theta_e - \theta_{amb})$:

$$W_t = \pi D_e h_t \Delta\theta_s \tag{5-106}$$

Kde $\Delta\theta_s = \theta_e - \theta_{amb}$ je oteplení povrchu kabelu nad teplotu okolí, h_t je koeficient celkového přestupu tepla a W_t zahrnuje teplo získané ze slunečního záření. Z rovnice (5-104) je vnější tepelný odpor kabelu dán:

$$T_4 = \frac{\Delta\theta_s}{W_t} = \frac{1}{\pi D_e h_t} \tag{5-107}$$

Předtím než se vypočítá vnější tepelný odpor v rovnici (5-107), je nutné nejdříve určit h_t. Tento koeficient je nelineární funkcí teploty povrchu kabelu. Nicméně využijeme zjednodušení za pomocí normy IEC 287-2-1. Modifikovaný vzorec pro W_t pomocí norem je ve tvaru:

$$W_t = \pi D_e h(\Delta\theta_s)^{5/4} \tag{5-108}$$

Kde h je součinitel tepelných ztrát [W/m^{2}K$^{5/4}$], který se získá z následujícího vzorce:

$$h = \frac{Z}{(D_e)^g} + E \tag{5-109}$$

Koeficienty Z, E a g jsou uvedeny v tabulce 2 normy IEC 287-2-1.
Vnější tepelný odpor kabelu uloženého na vzduchu se určí za pomocí rovnice (5-108):

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e h(\Delta\theta_s)^{1/4}} \tag{5-110}$$

Kde:
D_e je vnější průměr kabelu [mm]

$\Delta\theta_s$ je oteplení povrchu kabelu nad teplotu okolí (níže uvedený postup výpočtu) [K]
Pro jeden kabel dále platí:

$$h_t = h\Delta\theta_s^{1/4} \tag{5-111}$$

Pro výpočet $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ se použije iterační metoda (např. pomocí MS Excel, Matlab nebo Wolfram Mathematica) popř. se může použít alternativní metoda výpočtu pomocí grafické metody uvedené v kapitole 3.2 normy IEC 287-2-1, nejdříve vypočteme:

$$K_A = \frac{\pi D_e h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \tag{5-112}$$

Poté

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}}\right]^{0,25} \tag{5-113}$$

Dále si zvolíme si počáteční hodnoty $(\Delta\theta_s)^{1/4} = 2$ a budeme pokračovat v iteraci, dokud nedosáhneme výsledku: $(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)^{1/4} \leq 0{,}001$
Kde:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \sigma H K_A/\pi h}{1 + K_A(\Delta\theta_s)_n^{1/4}}\right]^{1/4} \tag{5-114}$$

5.5.2 Jouleovy ztraty ve stínění, plášti, armování a trubkách

Tyto ztráty jsou generovány indukovaným napětím a proudem ve stínění nebo kovovém plášti od proudů ve vodiči. Ztráty v plášti jsou proudově závislé a mohou být rozděleny do dvou kategorií podle typů uzemnění (bonding). Prvním typem jsou ztráty, které jsou způsobené v důsledku indukovaných proudů (cirkulujících), které tečou v plášti (stínění, pozn. pro další odvozování budeme uvažovat, že kovový plášť=stínění, protože dříve se místo stínění používal plášť) jednožílových kabelů, pokud je plášť na obou koncích uzemněn (tzv. both ending). Dalším typem ztrát jsou pak tzv. vířivé proudy, které cirkulují radiálně (tzv. skin effect) a azimutálně (proximity effect – efekt přiblížení). Ztráty vířivými proudy se objevují u jedno i třížílových kabelů bez ohledu na typ uzemnění. Nicméně ztráty vířivými proudy u jednožilových kabelů pevně uzemněných jsou významně nižší než ztráty indukovaným proudem a jsou zanedbány s výjimkou kabelů s velkými segmentovými jádry.

Ztráty v ochranném armování také spadají do několika kategorií podle typu kabelu, materiálu armování a metody uložení. Armovaný jednožílový kabel bez metallického pláště má obvykle nemagnetické armování, protože ztráty v železných drátech nebo páskách by byli neúnosně veliké. Kabely s nemagnetickým armování jsou počítány jako by to byl plášť kabelu a kalkulace záleží také, zdali je uzemněn na dvou koncích nebo na jednom. Tyto typy ztrát, ale pro dnes vyráběné kabely neuvažujeme, proto jejich odvození je pouze v přílohách.

Ztráty v pláštích (stínění)

Ztráty v plášti u jednožílovém kabelu závisí na řadě faktorů, jedním z nich je uspořádání uzemnění. Ve skutečnosti je uspořádání uzemnění druhým nejdůležitějším faktorem z hlediska ampacity po vnějším tepelném odporu kabelu. Z bezpečnostních důvodů musí být plášť kabelu uzemněn, a to alespoň na jednom konci. Existují tři způsoby.

Single-point bonding (Jednostranné uzemnění - SPB)

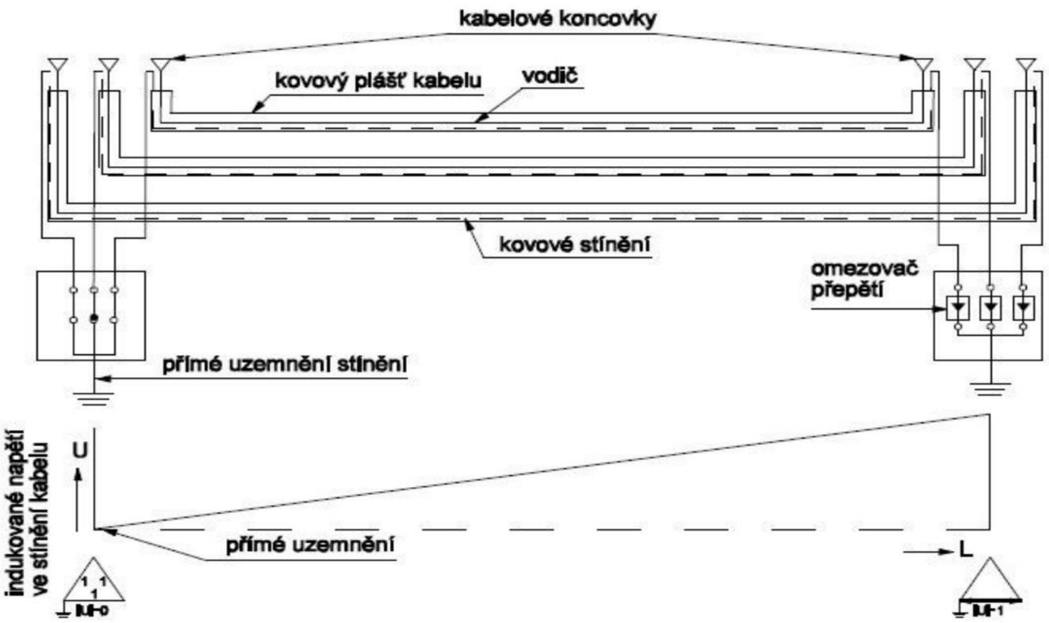
Při této metodě je stínění, resp. plášť kabelu uzemněn přímo pouze na jednom konci kabelového vedení. Na druhém neuzemněném konci mohou v určitých situacích napětí dosáhnout vysokých hodnot. Toto napětí je úměrné délce kabelového vedení (viz. obr. 23, tyto nebezpečné hodnoty napětí, resp. přepětí, které obvykle vzniknout díky atmosférickým nebo přechodovým jevům, se omezí omezovačem přepětí. Dále je vhodné také položit souběžně s vedením paralelní zemní vodič, který odvede proudy při poruše a omezí interferenci na sdělovacím vedení.

V tomto uspořádání je eliminován efekt oteplení od indukovaného proudu, který se zde nevyskytuje, protože je stínění v normálním provozním stavu rozepnuto. Tato metoda je vhodná pro kabelová vedení do 1 km.

Both-end bonding (oboustranné uzemnění - BEB)

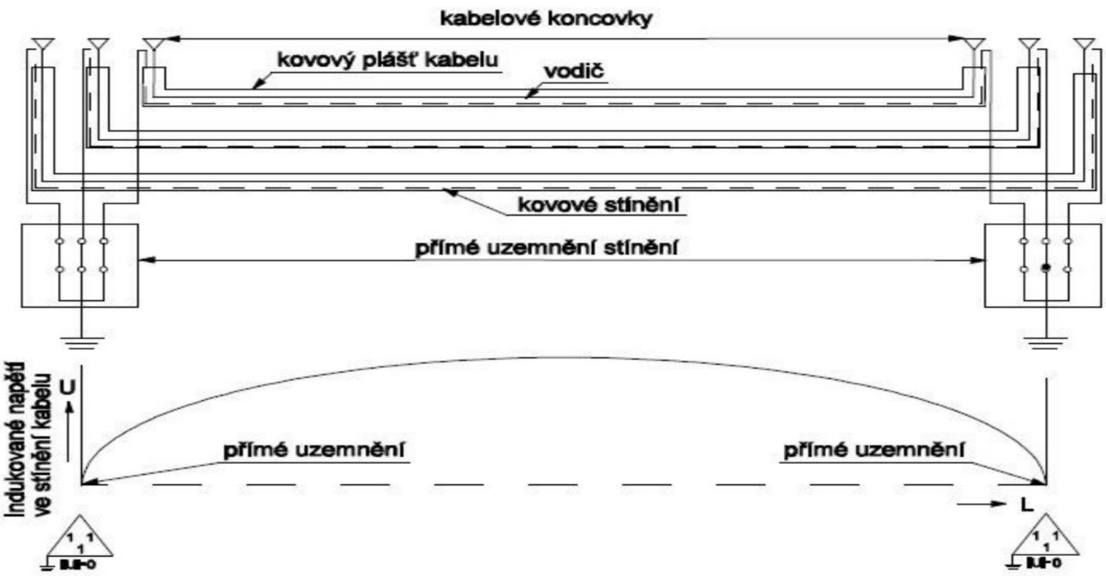
U této metody je stínění kabelu, resp. plášť uzemněn na obou koncích. Tato konfigurace eliminuje indukované napětí, takže na obou koncích vedení je nulové indukované napětí ale nedokáže zabránit indukovaným proudům. Tyto proudy pak výrazně snižují proudovou zatížitelnost kabelu.

V tomto uspořádání mají kabely vedle sebe nižší hodnotu proudové zatížitelnosti než kabely v trojúhelníku (u single-point a cross-bondingu je naopak zatížitelnost vyšší u kabelů vedle sebe než u kabelů v trojúhelníku).



Obrázek 23: Single-Point Bonding

Zdroj: [2]



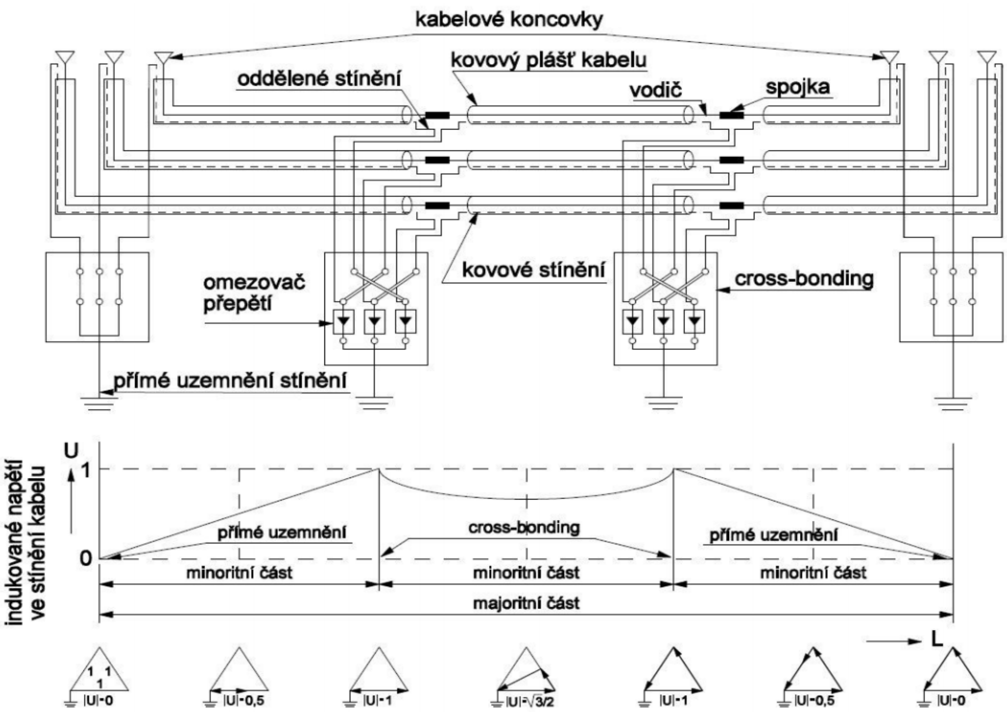
Obrázek 24: Both-end bonding

Zdroj: [2]

Cross-bonding (Transpozice - CB)

Tato metoda umožňuje vyhnout se indukovaným proudům a zároveň nadměrným indukovaným napětím v plášti. Současně umožňuje zvýšit rozteč kabelů nebo délku vedení. Zvětšení rozteče kabelů zvyšuje proudovou zatížitelnost. Provedení je pomocí transpozice po třetinách délky kabelového vedení vykřížením pláště (stínění) takovým způsobem, že se indukované napětí vyruší. Přičemž je kabelové vedení uzemněno na obou koncích (viz. obr. 25).

Pro omezení možných přepětí se používají také omezovače přepětí. Tato konfigurace má také výhodu v tom, že snižuje tepelný odpor. Díky výše uvedeným opatřením je zvýšena proudová zatížitelnost. evýhodou je, že kabely a spojky musí být izolovaným systémem stínění. Další nevýhodou je vyšší cena nebo složitost instalace. Hodí se pro delší kabelová vedení.



Obrázek 25: Cross-bonding

Zdroj: [2]

Činitel ztrát pro stínění a plášť

Jelikož je odvození ztrát ve stínění nebo plášti poměrně složité. Budou v následující podkapitole uvedeny pouze základní vzorce pro jednotlivá uspořádání a typy kabelů podle normy IEC 287-1-1. Detailnější popis ztrát a podrobné odvození jednotlivých ztrát bude provedeno v přílohách na konci této diplomové práce.

Pro další popis vyjděme z toho, že stínění=plášť, protože ve starších publikacích se setkáváme zejména s pojmem plášť, protože starší typy kabelu měly místo stínění kovový plášť. Odvození pro obě komponenty je stejné. Ztráty ve stínění označujeme λ_1 a skládají se ze ztrát indukovanými proudy λ_1' (nebo též nazývanými cirkulující) a ztráty vířivými proudy λ_1''. Můžeme tedy psát:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \tag{5-115}$$

Činitel ztrát pro oboustranně uzemněné kabely bez (BEB) a s transpozicí (Cross-bonding)

Pro oboustranně uzemněné vedení (BEB) jednožílových kabelů se berou v úvahu pouze ztráty indukovanými proudy. Vztah pro oboustranné uzemnění je definován v normě ČSN IEC 287-1-1 pro kabely v trojúhelníku (Kapitola 2.3.1 „Dva jednožílové kabely a tři jednožílové kabely **(v uspořádání do trojúhelníku)** s plášti navzájem spojenými na obou koncích elektrického úseku“ je definován jako:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R}\frac{1}{1+\left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \tag{5-116}$$

Kde:

R_s je rezistance pláště nebo stínění na jednotku délky kabelu při jeho nejvyšší pracovní teplotě [Ω/m]

X je reaktance pláště nebo stínění na jednotku délky kabelu [Ω/m] = $2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$

$\omega = 2\pi f$ [1/s]

s je vzdálenost mezi osami jader daného elektrického úseku [mm]

d je střední průměr pláště [mm]

Kabely vedle sebe s transpozicí (cross-bondingem) jsou uvedeny v kapitole 2.3.2 stejné normy a výraz pro ně nabývá tvar:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R}\frac{1}{1+\left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2} \tag{5-117}$$

Kde:

X_1 je reaktance na jednotku délky pláště [Ω/m] = $2\omega 10^{-7} \ln\left[2\sqrt[3]{2}\left(\frac{s}{d}\right)\right]$

Ztráty vířivými proudy považujeme opět $\lambda_1'' = 0$, což ale neplatí pro kabely s velkými sektorovými jádry.

Pro tři jednožílové kabely uložené **vedle sebe bez transpozice** na obou koncích uzemněných (metoda BEB) vyjdeme kapitoly 2.3.3 a pro vnější kabel zpožděné fáze můžeme ztráty psát:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R}\left[\frac{0{,}75P^2}{R_s^2+P^2} + \frac{0{,}25Q^2}{R_s^2+Q^2} + \frac{2R_sPQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2+P^2)(R_s^2+Q^2)}\right] \tag{5-118}$$

Pro druhý vnější kabel zpožděné fáze:

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R}\left[\frac{0{,}75P^2}{R_s^2+P^2} + \frac{0{,}25Q^2}{R_s^2+Q^2} - \frac{2R_sPQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2+P^2)(R_s^2+Q^2)}\right] \tag{5-119}$$

Pro prostřední kabel:

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \tag{5-120}$$

Kde:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

X je reaktance pláště nebo stínění na jednotku délky kabelu [Ω/m] = $2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$

X_m je vzájemná reaktance pro kabely uložené vedle sebe mezi pláštěm vnějšího kabelu a jádry ostatních dvou [Ω/m] =$2\omega\, 10^{-7} \ln(2)$

$\lambda''_1 = 0$, ztráty vířivými proudy jsou zanedbány, což opět neplatí u kabelů s velkými sektorovými jádry

Nutno podotknout, že ztráty vířivými proudy jsou u toho oboustranného uzemnění mnohem větší než u jednostranného uzemnění nebo uzemnění s transpozicí. Ztráty s tímto typem uzemnění navíc rostou se zvětšující se vzdáleností mezi jednotlivými fázemi. Optimální vzdálenosti se musí určit s ohledem na ztráty a také vzájemné oteplování kabelů.

Činitel ztrát pro jednostranně uzemněné kabely (SPB)

Činitel ztrát vířivými proudy pro jednostranné uzemnění se určí podle kapitoly 2.3.6. v normě IEC 287-1-1 následujícím způsobem:

$$\lambda''_1 = \frac{R_s}{R}\left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}}\right] \tag{5-121}$$

Kde:

g_s a β_1 jsou určeny a odvozeny v příloze na konci této diplomové práce

t_s je tloušťka stínění nebo pláště

Pro λ_0, Δ_1 a Δ_2 jsou určeny níže (a odvozeny opět v příloze):

1) Tři jednožílové kabely uspořádané do trojúhelníku:

$$\lambda_0 = 3\left(\frac{m^2}{1 + m^2}\right)\left(\frac{d}{2s}\right)^2 \tag{5-122}$$

$$\Delta_1 = (1{,}14 m^{2{,}45} + 0{,}33)\left(\frac{d}{2s}\right)^{0{,}92m + 1{,}66} \tag{5-123}$$

$$\Delta_2 = 0 \tag{5-124}$$

Kde:

$m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$, pro $m \leq 0{,}1$ může být Δ_1 a Δ_2 zanedbáno

2) Tři jednožílové kabely v konfiguraci vedle sebe:

a) Prostřední kabel

$$\lambda_0 = 6\left(\frac{d}{2s}\right)^2 \frac{m^2}{1+m^2} \tag{5-125}$$

$$\Delta_1 = 0{,}86m^{3{,}08}\left(\frac{d}{2s}\right)^{1{,}4m+0{,}7} \tag{5-126}$$

$$\Delta_2 = 0 \tag{5-127}$$

b) Vnější kabel předstihující fáze

$$\lambda_0 = 1{,}5\left(\frac{d}{2s}\right)^2 \frac{m^2}{1+m^2} \tag{5-128}$$

$$\Delta_1 = 4{,}7m^{0{,}7}\left(\frac{d}{2s}\right)^{0{,}16m+2} \tag{5-129}$$

$$\Delta_2 = 21m^{3{,}3}\left(\frac{d}{2s}\right)^{1{,}47m+5{,}06} \tag{5-130}$$

c) Vnější kabel zpožděné fáze

$$\lambda_0 = 1{,}5\left(\frac{d}{2s}\right)^2 \frac{m^2}{1+m^2} \tag{5-131}$$

$$\Delta_1 = -\frac{0{,}74(m+2)m^{0{,}5}}{2+(m-0{,}3)^2}\left(\frac{d}{2s}\right)^{m+1} \tag{5-132}$$

$$\Delta_2 = 0{,}92m^{3{,}7}\left(\frac{d}{2s}\right)^{m+2} \tag{5-133}$$

Vliv velkých segmentových jader

V této části uvažujme kabely s velkými izolovanými segmentovými jádry s oboustranným uzemněním. Dále uvažujme, že tyto kabely jsou navrženy a uloženy tak, aby se minimalizoval proximity efekt (efekt přiblížení), u tohoto systému musíme dále přičíst vířivé proudy ve stínění k ztrátám indukovaným napětím. Pokud je stínění uzemněno na jednom konci, pak ztráty vířivými proudy jsou způsobeny pouze elektromagnetickým polem proudů vodičů. Analytické řešení je poměrně komplikované, proto byly vytvořeny následující aproximace a zjednodušení (tyto výpočty jsou opět zahrnuty v normě IEC 287), kde se pouze uvažují proudy ve vodiči, tyto proudy jsou ve výsledku násobeny činitelem F, který má tvar:

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M+N)^2}{4(M^2+1)(N^2+1)} \tag{5-134}$$

Kde:

$M = N = \frac{R_S}{X}$ pro kabely v trojúhelníkové konfiguraci

a

pro kabely vedle sebe se stejně vzdálenými fázemi $\begin{cases} M = \frac{R_S}{X+X_m} \\ N = \frac{R_S}{X-\frac{X_m}{3}} \end{cases}$

Zdroj: [2], [3], [7], [14], [15], [16], [17]

Praktická část

V praktické části v kapitole 6 se nachází zmapování sítě PRE v Praze.

Kapitola 7 je zaměřena na analýzu stávajícího kabelového vedení 22 kV v síti PREdi.

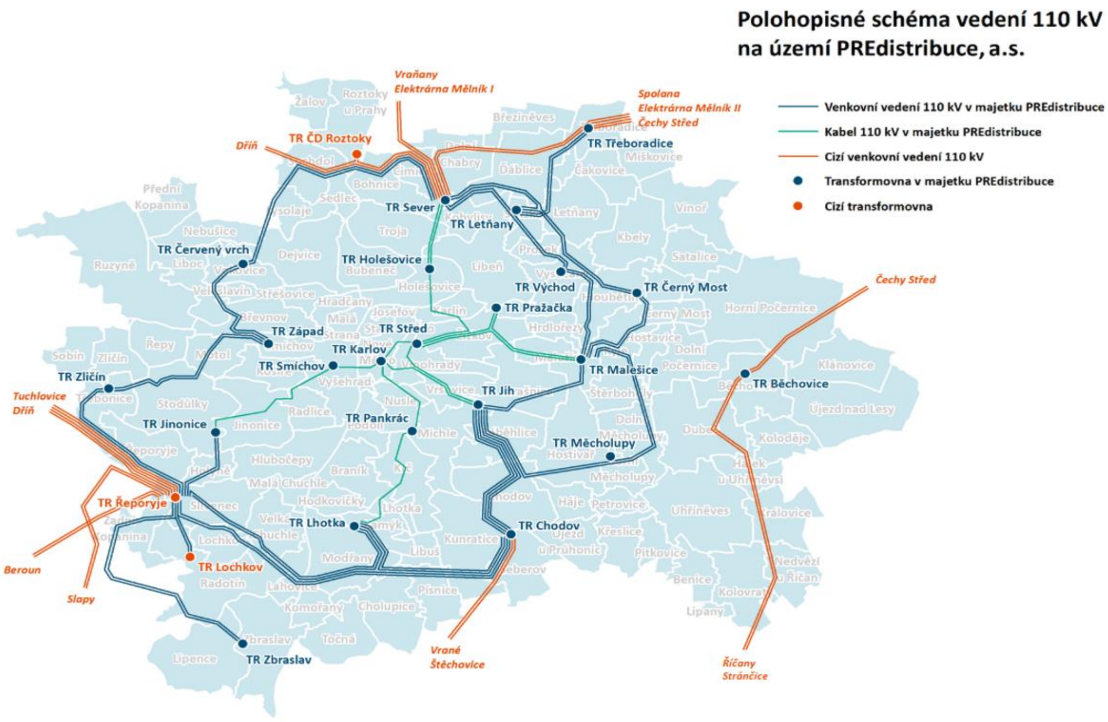
Kapitola 8 je věnována analýze nově zamýšleného kabelového vedení 110 kV mezi rozvodnami 400 kV a 110 kV.

Kapitola 6: Zmapování sítě PRE (Praha)

Tabulka 3 uvádí délky vedení NN, VN a VVN (kabelová + venkovní vedení) a energii dodanou odběratelům v síti PRE a dále údaje o transformaci.

Tabulka 3: Informace o síti PRE

Veličina	Jednotka	2012	2013	2014	2015	2015
Elektrická energie dodaná odběratelům	GWh	5919,1	5937,7	5742,2	5812,9	5929,5
Ztráty	GWh	342,5	345,7	332,4	316,6	300,2
Délka sítě VVN	km	206,4	206,4	206,8	206,8	206,8
Počet stanic VVN/VN	ks	22/24	22/24	22/24	22/23	22/23
Instalovaný výkon transformace VVN/VN	MVA	2855	2815	2815	3926	2838
Délka vedení VN	km	3865	3872	3854	3867	3872
Počet stanic VN/NN	ks	4833	4834	4835	4843	4858
Délka sítě NN	km	7850,0	7833,8	7945,1	7939,6	7974,8



Obrázek 26: 110 kV síť PRE

[Zdroj: www.predistribuce.cz]

Na obr. 26 je zobrazena mapa Prahy s vyznačenými vedeními 110 kV v majetku PREdistribuce a cizími vedeními 110 kV včetně transformoven.

Tabulka 4: Kabelová vedení 110 kV

ÚSEK VEDENÍ	ČÍSLO VEDENÍ	ROK ZPROVOZNĚNÍ	DÉLKA TRASY KABELU				TYP KABELU	PŘENOSOVÁ SCHOPNOST
			TUNEL [km]	KANÁL [km]	VÝKOP [km]	CELKEM [km]	[mm^2]	[A] / [MVA]
MALEŠICE STŘED	K 101	1974/2009	4,303	1,617	1,819	7,739	3x1x1200 Al XDRCU-ALN BRUGG	1000 / 190
STŘED JIH	K 102	1978/2008	4,450	0,122		4,572	3x1x1200 Al XDRCU-ALN BRUGG	850 / 160
MALEŠICE PRAŽAČKA	K 103	1985	2,178	1,600	1,642	5,420	3x1x1000 Al 3x1x1400 Al SIPRELEC	1000 / 190
PRAŽAČKA STŘED	K 104	1986	3,940			3,940	3x1x1000 Al SIPRELEC	1000 / 190
JINONICE SMÍCHOV	K105	2000			6,638 0,500	7,138	3x1x1000 Cu 3x1x1200 Cu SIPRELEC	750 / 142
KARLOV SMÍCHOV	K 106	2008	0,950		1,500	2,450	3x1x1600 Al XDRCU-ALN BRUGG	1000 / 190
STŘED HOLEŠOVICE	K108	2001	4,058		2,615	6,673	3x1x1000 Cu 3x1x800 Al SIPRELEC	815 / 155
SEVER HOLEŠOVICE	K 109	1980	2,950			2,950	3x1x1200 Al AXKJ	1 200 228
SEVER HOLEŠOVICE	K 110	1980	2,810 0,140			2,950	3x1x1200 Al AXKJ 3x1x800 Cu N2XS(FL)2Y	1200 / 228
STŘED KARLOV	K 111	2004	1,390		0,710	2,100	3x1x1600Al AXLJ ABB	800 / 152
KARLOV JIH	K112	2001	3,076		2,187	5,263	3x1x1000 Cu 3x1x800 Al SIPRELEC	815 / 155
PANKRÁC KARLOV	K 113	2012	0,619		3,596	4,215	3x1x1600 Al XDRCU-ALT BRUGG	1000 / 190
LHOTKA PANKRÁC	K 114	2008	0,540		6,317	6,857	3x1x1600 Al A2XS(FL)H CCC Berlin	1000 / 190
MALEŠICE TMA III	K 904	2003		0,330		0,330	3x1x500 Al A2XS(FL)2Y PIRELLI	330 / 63
CELKEM			**31,404**	**3,669**	**27,524**	**62,597**		

[Zdroj: Provozní zpráva za rok 2016, PREdistribuce a.s.]

Z tabulky 4 plyne, že v Praze je ve vlastnictví PREdistribuce celkově 14 kabelových vedení. Dalších 45 110 kV vedení je venkovních, která zahrnují jednoduchá, dvojitá a čtyřnásobná vedení o celkové délce 144,2 km. Kabelová vedení 110 kV mají nejdelší délku v tunelech, a to 31,4 km. Druhým nejdelším typem jsou kabely ve výkopech s délkou 27,5 km. Nejkratší délku mají kabely v kanálech, a to 3,7 km. Výhoda tunelů resp. kolektorů a např. větraných kanálů je lepší odvod tepla, lepší chránění kabelů před vnějšími vlivy, lepší opravitelnost, dostupnost a údržbu. Zásadní jsou kolektory zejména pro zásobování centrálních částí města se zapouzdřenými rozvodnami VVN, kdy jiný způsob připojení není prakticky možný. Nevýhodou oproti kabelu ve výkopech je vyšší cena a v případě kolektorů složitější a delší výstavba.

Tabulka 5: Kabelová vedení 22 kV

	DÉLKA VEDENÍ 22 kV				CELKEM [km]
	KABELOVÁ VEDENÍ 22 kV *	VENKOVNÍ VEDENÍ 22 kV			
		JEDNODUCHÉ	DVOJITÉ	CELKEM délka trasy	
	[km]	[km]	[km]	[km]	
PREdi celkem	3768,91	87,04	16,30	103,34	3872,25

[Zdroj: Provozní zpráva za rok 2016, PREdistribuce a.s.]

Kabelová síť 22 kV je výrazně delší než síť venkovních vedení 22 kV. Jak je patrné z tabulky 5, kabelové vedení 22 kV je zhruba 3768,9 km dlouhé oproti 103,3 km venkovního vedení.

Kapitola 7: Analýza stávajícího vedení 22 kV mezi RS7820 a TR Řeporyje

7.1 Důvod analýzy

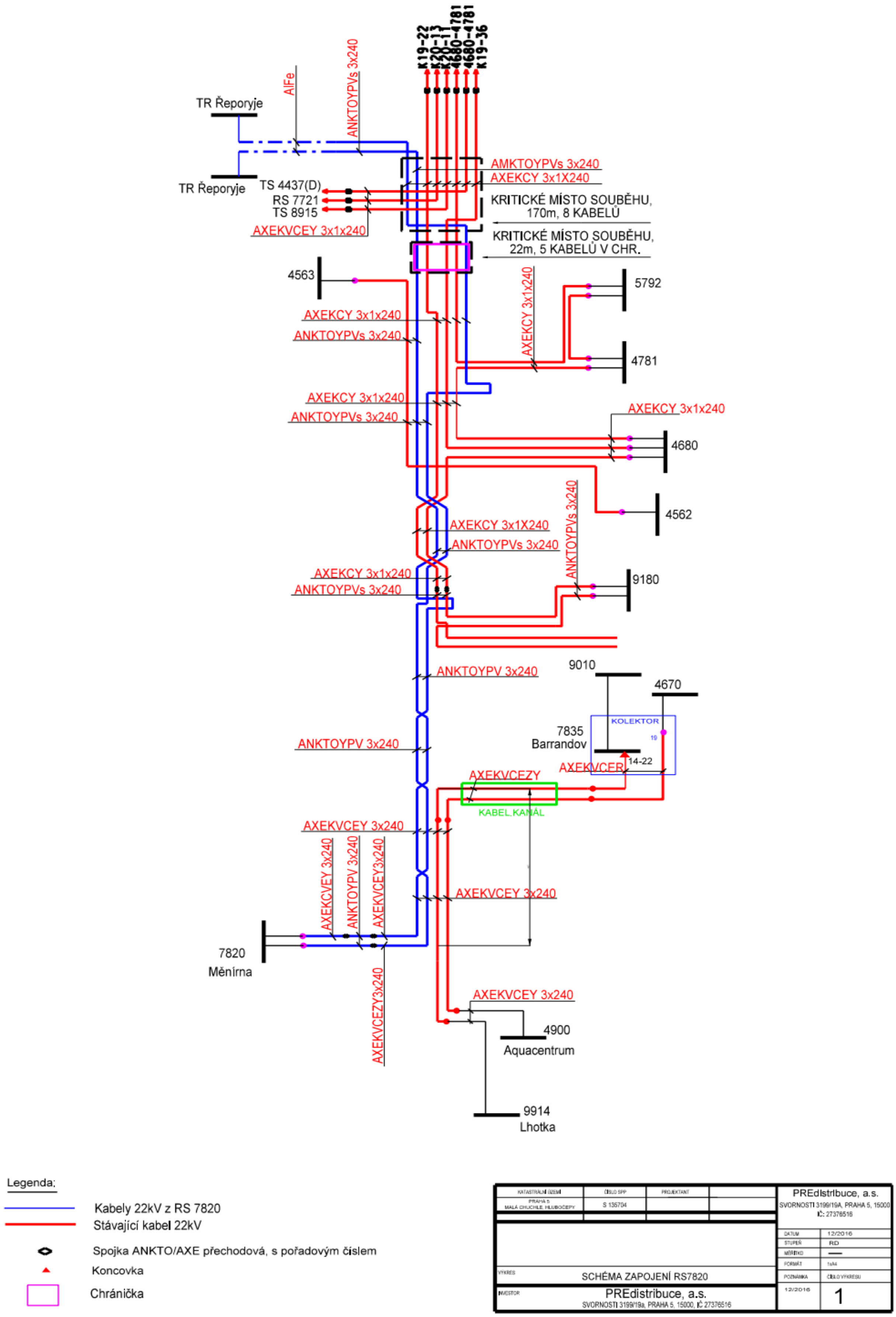
Důvodem analýzy bylo prověření možnosti zvýšení přenosové schopnosti stávajícího vedení VN s ohledem na jeho způsoby uložení. Proto byla vypracována následující analýza zjišťující stávající stav v síti VN a prověřující možnost potencionální navýšení proudového zatížení kabelového vedení VN do RS 7820.

7.2 Popis vedení

Toto vedení je složeno ze dvou paralelních kabelových vedení K04-08 a K04-07, které napájí RS7820 měnírnu Chuchle z TR ŘEPORYJE. Tato měnírna napájí kolejové vedení stejnosměrným proudem 3 kV. V této podzemní trase dochází k dlouhým souběhům kabelů VN s dalšími vedeními, k několika křížením kabelů a zároveň se zde střídá několik typů kabelů AXEKVCEY, AXEKCY, ANKTOYPV, AMKTOYPV a AMKTOYPV. Kabely AXEKVCEY a AXEKCY mají izolaci XLPE, která má kritickou teplotu 90 °C a kabely ANKTOYPV, AMKTOYPV a AMKTOYPV, které mají olejem napuštěnou papírovou izolaci (starší typ kabelů) a jejichž kritická teplota se pohybuje mezi 65-70°C, tady mají nižší teplotní odolnost než dnes vyráběné kabely, a tím mají i nižší proudovou zatížitelnost.

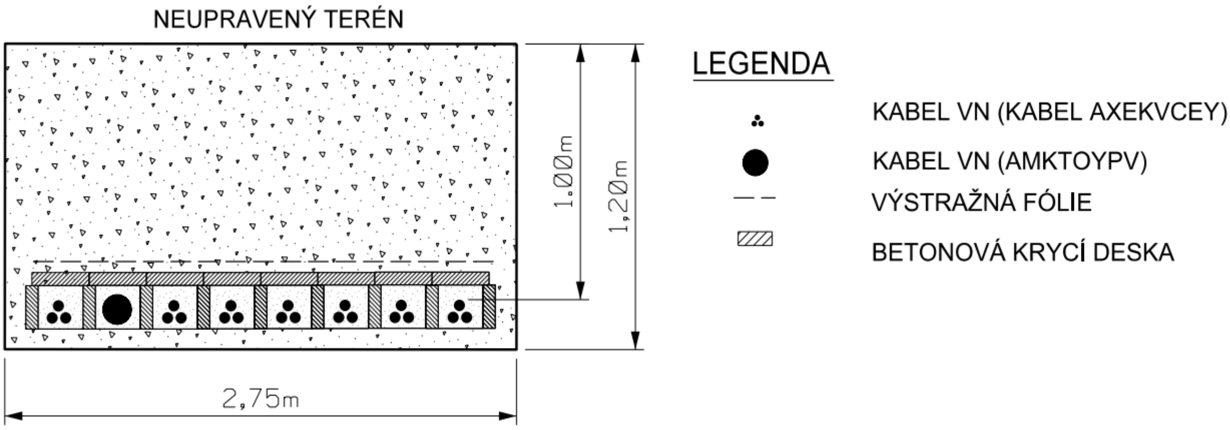
Pro analýzu tohoto vedení byla vybrána dvě kritická místa (která jsou na obr. 27 vyznačeny čerchovanou čarou). Jedná se o souběh 8 kabelů cca 170 m dlouhý (Řez 1) a souběh 5 kabelů (Řez 2) v chráničkách zhruba 22 m dlouhý. První kritické místo s 8 kabely je problematické velkým souběhem kabelů, a tím vyšší vzájemným tepelným ovlivňováním jednotlivých kabelů. Druhé kritcké místo s 5 kabely je problematické tím, že tyto kabely se nacházejí v chráničkách, které zhoršují tepelné vlastnosti kabelového systému, protože vzduchová mezera mezi kabely zhoršuje odvod tepla, díky své nižší tepelné vodivosti. Kabely se v tomto prostředí více otepluj í.

Každý kabel typu AXE se skládá ze 3 fází uložených v trojúhelníku (viz Řez 1) Takto jsou uloženy ve společné chráničce (viz Řez 2).

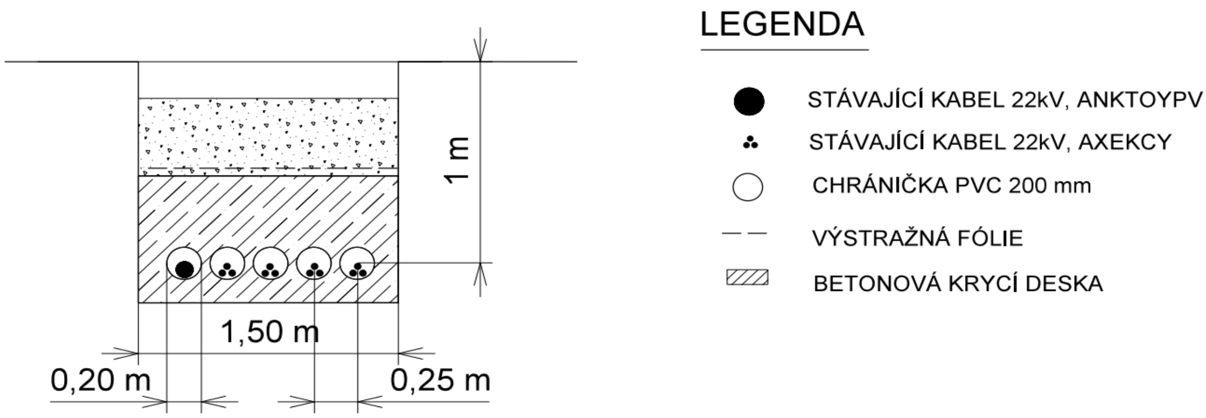


Obrázek 27: Schéma kabelového vedení do RS7820

Řezy v kritických místech kabelové trasy



Řez 1: Souběh 8 kabelů



Řez 2: Souběh 5 kabelů v chráničkách

Výchozí podklady pro kabely:

Parametry kabelů VN byly převzaty z katalogu výrobců.
Jedná se o tyto kabely:
ANKTOYPVs 3x1x240 (Kablo Kladno)
AXEKCY 3x1x240 (NKT Cables)
AXEKVCEY 3x1x240 (NKT Cables)
Chráničky PVC Ø200/188 mm
Pískové lože tl.200 mm,
Krytím deskami KD2 500x250x4,5mm
Zemina s tepelným odporem 1 Km/W

Stávající nastavení ochran

Rozvodna RS 7820:

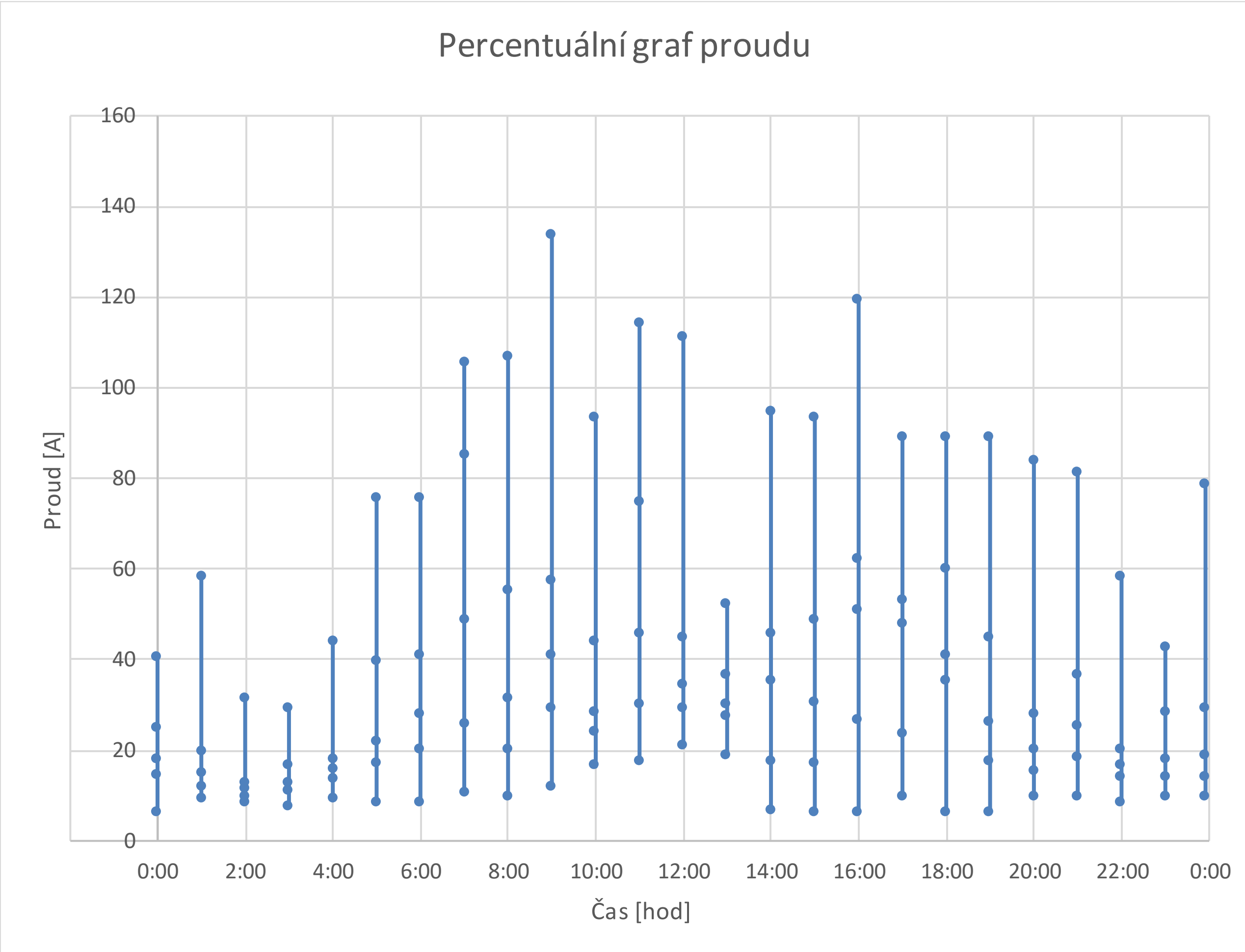
Ochrana AT31, nastavení na 320A/0,7 sec.

TR Řeporyje:

Nadproudová ochrana 320 A/1,0 sec.
Zkratová ochrana 900 A/0,2 sec.

7.3 Analýza současného zatížení

Na grafu 2 jsou zobrazeny průměrné hodnoty proudů u kabelu K04-08 za měsíc červen, kabel K04-07 byl vypnut (při kritériu N-1) a zatížen pouze kapacitním proudem vedení o hodnotě 6 A s výjimkou zhruba 10 minut, kdy byl přibližně pod proudem 5,2 A.



Graf 2

V tomto grafu jsou zobrazeny hodnoty z tohoto měsíce rozvržené do jednoho dne po 24 hodinách. Každé hodnotě přísluší vždy 5 hodnot proudu, a to největší, nejmenší, 25 %, 50 % a 75 % za celý měsíc. Tyto hodnoty byly převedeny do jednoho dne do 24 hodinového grafu 2. Lze si všimnout, že v některých místech tento graf nekopíruje graf denní spotřeby, např. v čase 10 hodin nebo ve večerních hodinách, kdy bychom očekávali větší zatížení. Tyto rozdíly jsou způsobené specifickým typem odběru, kde převažuje trakční odběr.

Hodnoty proudů s proudovými špičkami, které přesahují hodnotu 150 A jsou uvedeny v tabulce 6. Tyto hodnoty byly naměřeny po dobu celého měsíce června. Těchto hodnot není mnoho, konkrétně 11 za celý měsíc, a jsou rozprostřeny poměrně nahodile. Nejvíce (4) jich bylo první den měsíce června. Nejvyšší hodnota proudu je 210,4 A, což je zhruba 50,3 % maximální proudové zatížitelnosti kabelu AXEKVCEY. Průměrná hodnota těchto proudů je 166,1 (39,8 % maximálního proudu).

Tabulka 6: Hodnoty proudů nad 150 A

Datum	čas[h]	proud [A]
1/6	8:05	166.3
1/6	16:50	161.9
1/6	17:30	210.4
1/6	18:20	164.1
2/6	17:35	154.4
7/6	10:40	165.6
13/6	8:20	166.3
24/6	17:10	155.2
25/6	11:35	162.6
28/6	17:35	161.9
30/6	14:35	158.9
Průměrný proud		**166.1**

Z těchto hodnot vidíme, že vedení není příliš zatěžováno. Kabel K04-08 z výše uvedených grafů a čísel má velkou rezervu a je značně nevyužit. V následující kapitole bude analyzován nejhorší den (1. červen) z hlediska přenosového zatížení.

7.4 Výpočet přenosové schopnosti vedení

Souběh 8 kabelů

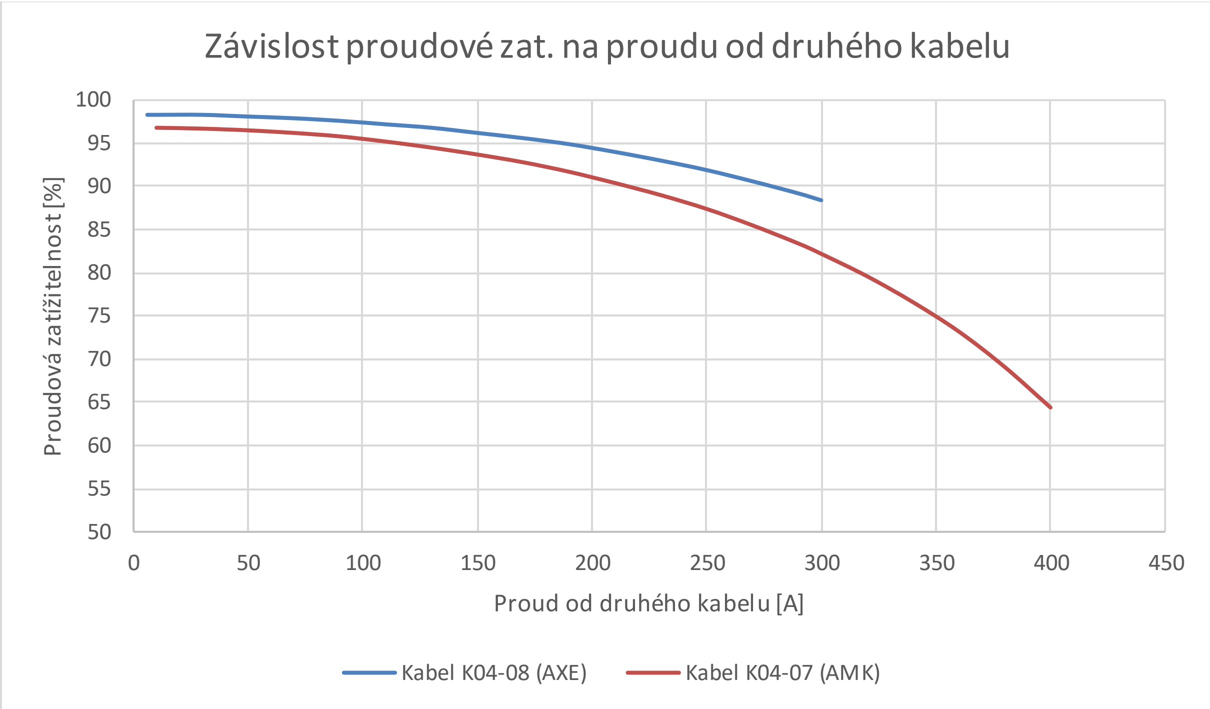
Tento výpočet bude proveden podle kapitoly 2.2.3.1 „Nerovnoměrně zatížené kabely“ normy ČSN IEC 287-2-1 (alternativně jsem použil také software Agros2D). Pro výpočet přenosové schopnosti byly vybrány dva nejkritičtější úseky, a to úsek 8 kabelů v souběhu a souběh 5 kabelů v chráničkách. V tabulce 7 jsou uvedeny průměrné hodnoty z naměřených dat u dalších 6 kabelů navíc doplněné o dva kabely z vedení, které napájí RS7820 (dva kabely v tabulce K04-08 a K04-07). Kabely K04-07 a K04-08, které napájí RS7820 jsou ve schématu na obr. 27 zobrazeny modrou barvou.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty proudů kabelů za měsíc červen 2016

Kabel	**kb 1**	**kb2**	kb 3	kb 4	kb 5	kb 6	kb7	kb8
	K04-08/7820	**K04-07/7820**	K19-22/9180	K20-13/8915	K20-11/8915	4781	4437	K19-36/4680
Proud [A]	150	6	100	50	100	50	50	150

Poskytnutá naměřená data v tabulkách ukazují, že ostatní kabely v souběhu nejsou příliš zatíženy, protože pro kabely AKCEKVCEY nebo AXEKCY jsou maximální nominální proudy dané výrobcem zhruba 400-417 A, přičemž budeme uvažovat s maximálním proudem okolo 375 A. Současný stav provozu je z hlediska teplotního namáhání bezproblémový, protože při tak malém proudu kabel nedokáže generovat dostatečné teplo k tomu, aby se překročila kritická teplota 90 °C pro kabely AXEKVCEY a AXEKCY a 65-70 °C pro kabely ANKTOYPV a AMKTOYPV . Tato teplota by neměla být při provozu překročena. Výhodou vedení do RS7820 je, že u souběhu 8 kabelů jsou tyto kabely na kraji, proto se také nepřehřejí tolik jako kabely blíže ke středu. Kabel K04-08 se zahřeje při tomto zatížení na teplotu přibližně 22,3 °C (maximum pak 36,8 °C, způsobené proudem 210,4 A, což je ale výjimka) a maximální vypočítaná proudová zatížitelnost je 98,3 %, tedy zhruba 393,2 A.

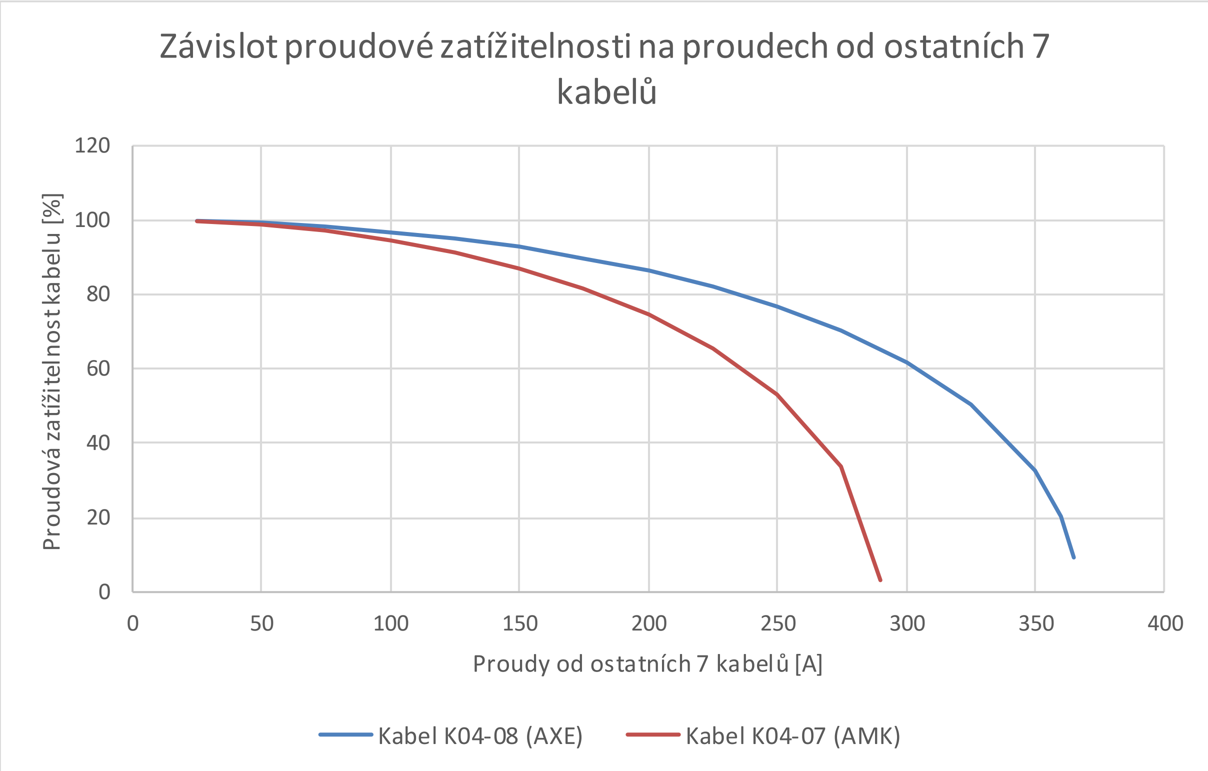
Pro kabel K04-07 je teplota 26,1 °C a proudová zatížitelnost 93,7 %, tedy 281,1 A. V grafu 3 můžeme vidět závislost proudové zatížitelnosti obou kabelů při změně proudu u druhého kabelu, například pokud u kabelu K04-07 zvýšíme proud na hodnotu 110 A, pak proudová zatížitelnost u kabelu K04-08 bude 97,2 % apod. U tohoto grafu byly hodnoty ostatních kabelů ponechány na hodnotách průměrných, tedy jak je uvedeno v tabulce 7.



Graf 3

Z grafu 3 je patrné, že proudová zatížitelnost příliš neklesá (zejména u kabelu K04-08 AXEKCY), pokud se zvýší proud pouze jednoho kabelu, u kabelu K04-08 klesne proudová zatížitelnost na 88,4 % (353,6 A) (teplota vzroste na 35,3 °C) a u kabelu K04-07 na hodnotu 64,4 % (proud 193 A, teplota 49,3 °C).

Graf 4 zobrazuje proudovou zatížitelnost zvýšení proudů u ostatních kabelů, např.: pokud se u ostatních kabelů zvýší proud na hodnotu 275 A, pak proudová zatížitelnost klesne u kabelu K04-08 na 70,1 % apod. Vidíme, že při takovémto nárůstu proudu u ostatních kabelů v souběhu dojde k prudkému snížení přenosové zatížitelnosti, u K04-08 to bylo 9,3 % (37,2 A) při proudu 365 A u ostatních kabelů (teplota povrchu kabelu by byla 89,4 °C, kritická teplota je 90 °C), a pro K04-07 to bylo 3,2 % (9,6 A) při proudu 290 A (teplota 69,9 °C, přičemž u kabelu AMKTOYPV je přípustná teplota 70 °C).



Graf 4

Souběh 5 kabelů v chráničkách (22 m)

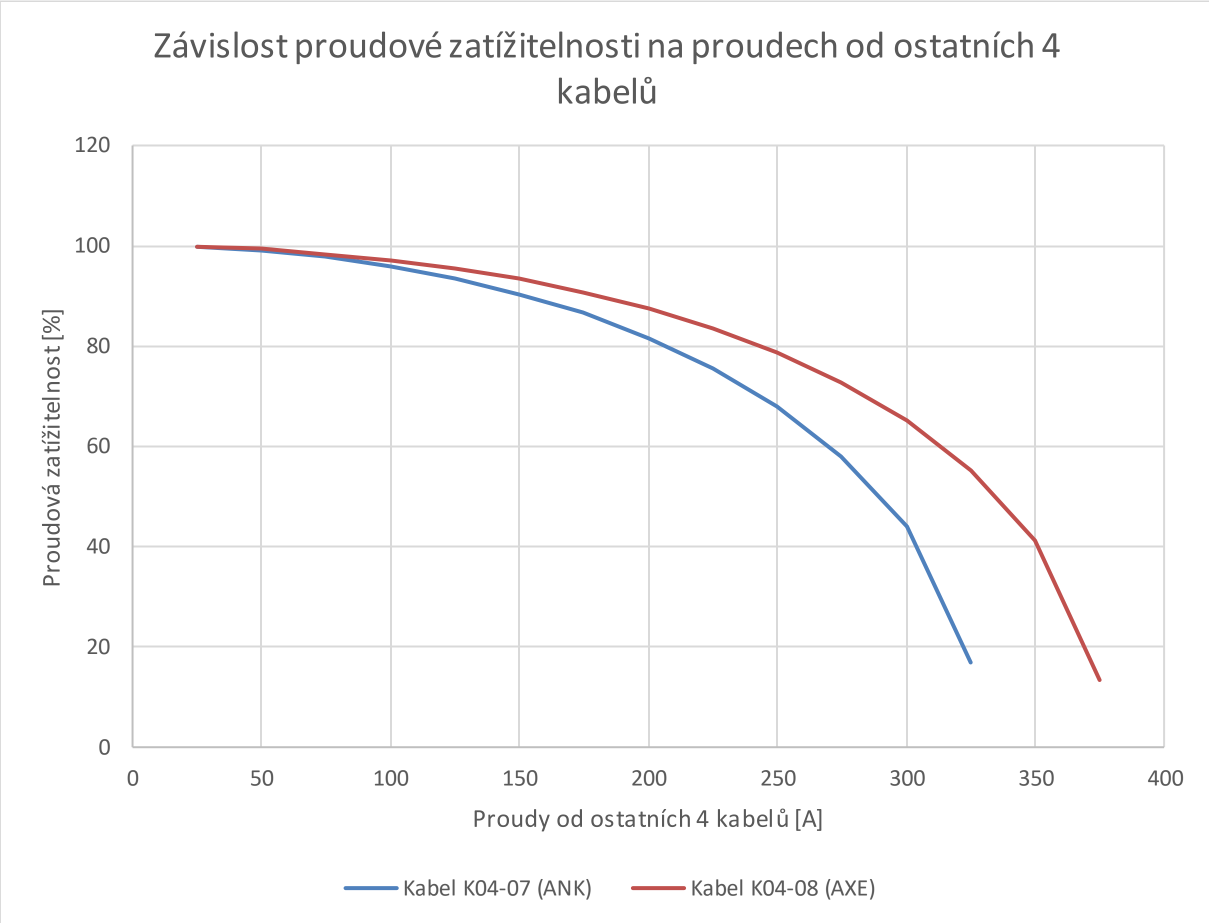
Tabulka 8 ukazuje kabely K04-08 a K04-07 doplněné navíc o další 3 kabely v souběhu 5 kabelů v chráničkách. Průměrné proudy kabelů v tomto souběhu jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Průměrné hodnoty proudů u souběhu 5 kabelů

Kabel	kb 1	kb2	kb 3	kb 4	kb 5
	K04-07/7820	K04-08/7820	K19-22/9180	K20-13/8915	K04-08/7820
Proud [A]	6	100	150	50	150

Hodnoty proudové zatížitelnosti kabelů v souběhu v této tabulce nejsou opět příliš vysoké a kabel pro toto zatížení nemá problém s teplotou. Pro tyto hodnoty pro kabel K04-07 (ANKTOYPV) byla proudová zatížitelnost 94,3 % (282,9 A) a teplota 25,5 °C. Pro kabel K04-08 (AXEKVCY) byla proudová zatížitelnost 97,4 % (389,6 A) a teplota 23,6 °C.

Graf 5 zobrazuje podobně jako Graf 4 zvýšení proudu v každém kabelu. Vidíme, že tento graf má podobný průběh jako graf 4, avšak v porovnání vychází o něco lépe, neboť se podařilo dosáhnout vyšších hodnot proudové zatížitelnosti, proudová zatížitelnost pro K04-07 byla 16,9 % při teplotě 68,6 °C při proudu 325 A u ostatních kabelů. U K04-07 by byla proudová zatížitelnost 13,4 % a teplota 88,7 °C při proudu 375 A u ostatních kabelů.



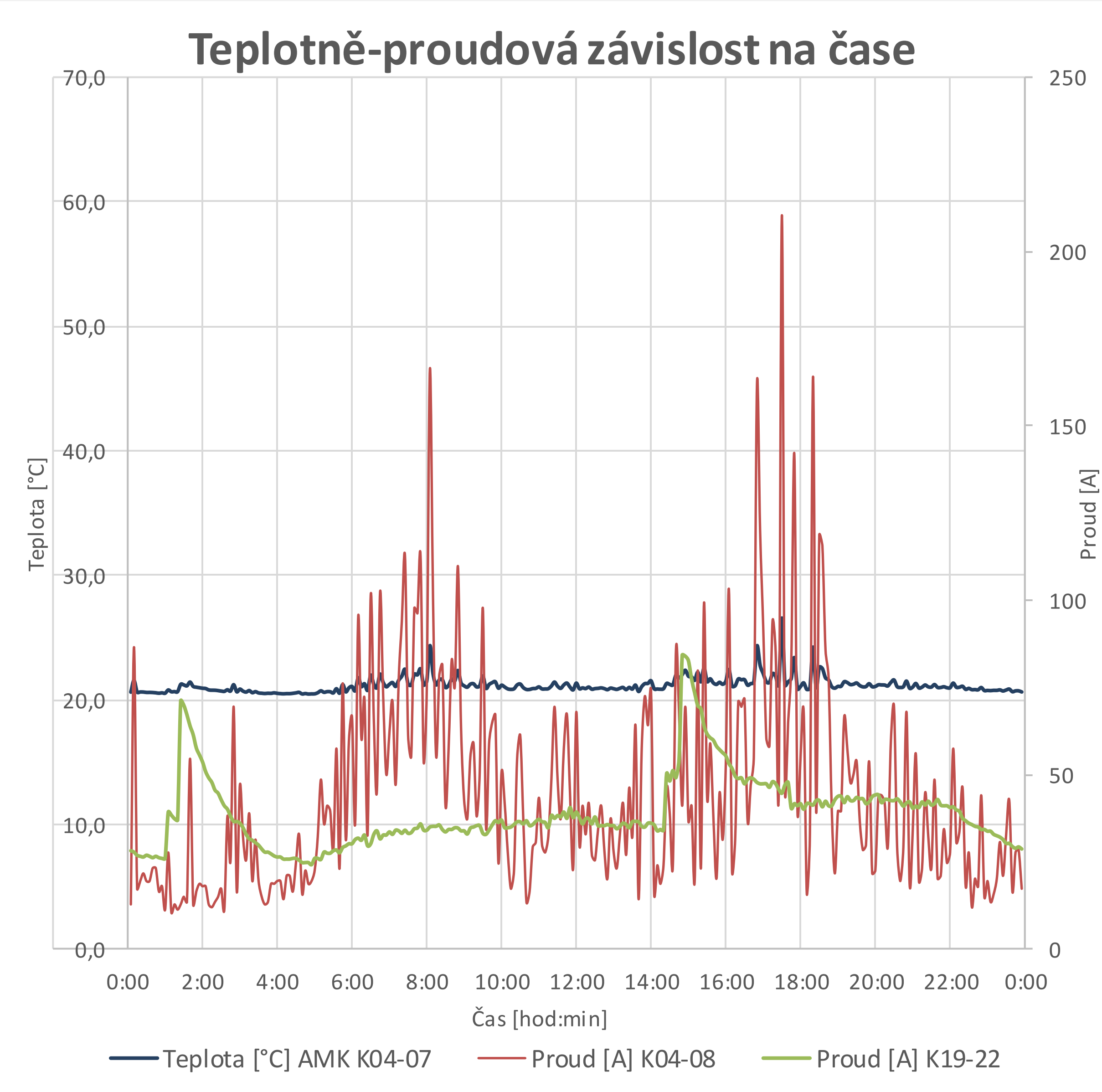
Graf 5

Z výše uvedených grafů vidíme, že proudová zatížitelnost závisí na počtu kabelů v souběhu. Souběh s 8 kabely se ukázal být z těchto grafů nejkritičtější než souběh 5 kabelů v chráničkách.

Proudová zatížitelnost zejména u kabelu AXEKCY je poměrně stabilní a neklesá tolik jako proudová zatížitelnost kabelu ANKTOYPV/AMKTOYPV, ovšem i tento starší typ kabelu má poměrně dobré charakteristiky zatížitelnosti. V současné době tvoří tyto kabely jsou v Praze téměř polovinu provozovaných kabelů VN a postupně jsou nahrazovány novými kabely AXEKCVEY.

Teplotní a proudové porovnání souběhu 8 kabelů

Pro porovnání jsem dále vypracoval druhý typ grafů s teplotně proudovou závislostí, které jsou zobrazeny níže. Graf 6 zobrazuje tři křivky s třemi osami. Vertikální osa v levé části grafu zobrazuje teplotní stupnici a platí pro modrou křivku zobrazující teplotu kabelu AMKTOYPV K04-07, druhá vertikální osa v pravé části grafu zobrazuje proudovou stupnici, která platí pro červenou křivku (kabel AXEKCY K04-08) a pro zelenou křivku (sousední kabel AXEKCY K19-22). Horizontální osa zobrazuje jeden celý den v čase, pro tento graf byl vybrán nejhorší den s nejvyššími proudovými hodnotami. Vidíme, že proud v kabelu K04-08 má poměrně velké výkyvy např. v porovnání s kabelem K19-22. Nicméně zatížení kabelu není tak velké, aby teplota dosáhla nějakých velkých hodnot. Maximální hodnota u kabelu K04-07 dosáhla zhruba 26 °C, a tento kabel má tedy i v tento nejhorší den velkou teplotní rezervu.



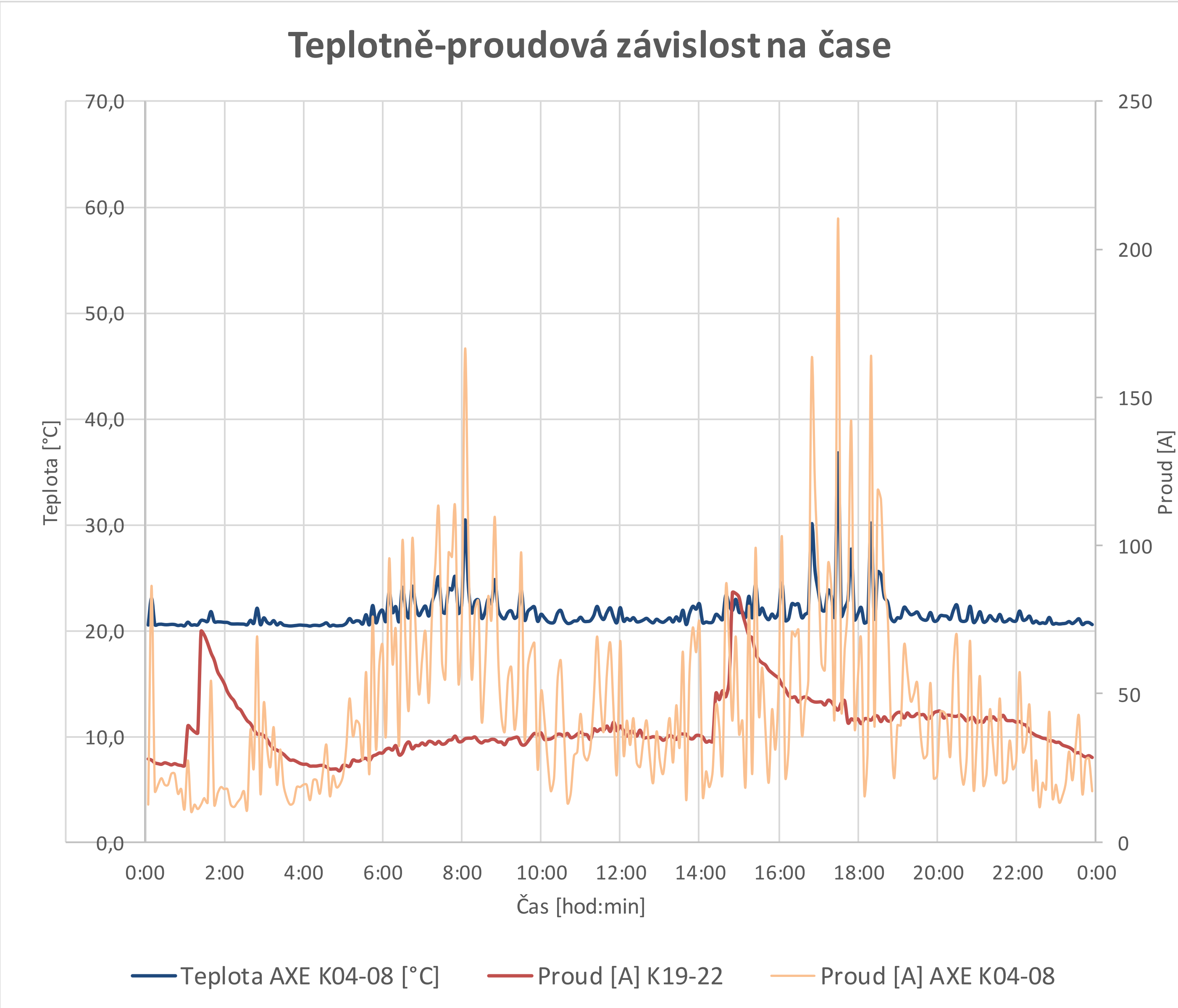
Graf 6

V grafu 6, který zobrazuje nejhorší den měsíce (1. červen) je oteplení kabelu AMKTOYPV K04-08 od ostatních 7 kabelů v souběhu (modrá křivka). V podstatě, jaký vliv mají ostatní kabely na tento kabel, při zatížení, které je stejné jako u grafu 6. Při takovýchto hodnotách proudu můžeme vidět, že ostatní kabely oteplují tento kabel jenom zhruba o 1-3 °C. Červená křivka (pravá vertikální osa v %) koresponduje s modrou křivkou a zobrazuje proudovou zatížitelnost kabelu K04-08, při daném oteplení od ostatních kabelů. Hodnoty jsou blízké 100 %, tedy maximálnímu proudovému zatížení pro kabel AMKTOYPV, což je 300 A.

Graf 7

Graf 7 popisuje, jak se mění přenosová zatížitelnost grafu v závislosti na teplotě kabelu. Vidíme, že, při daném zatížení, teplota dosahuje zhruba 26 °C v maximu. Tato hodnota ovlivní přenosovou schopnost jenom minimálně, jak lze vidět na červené křivce.

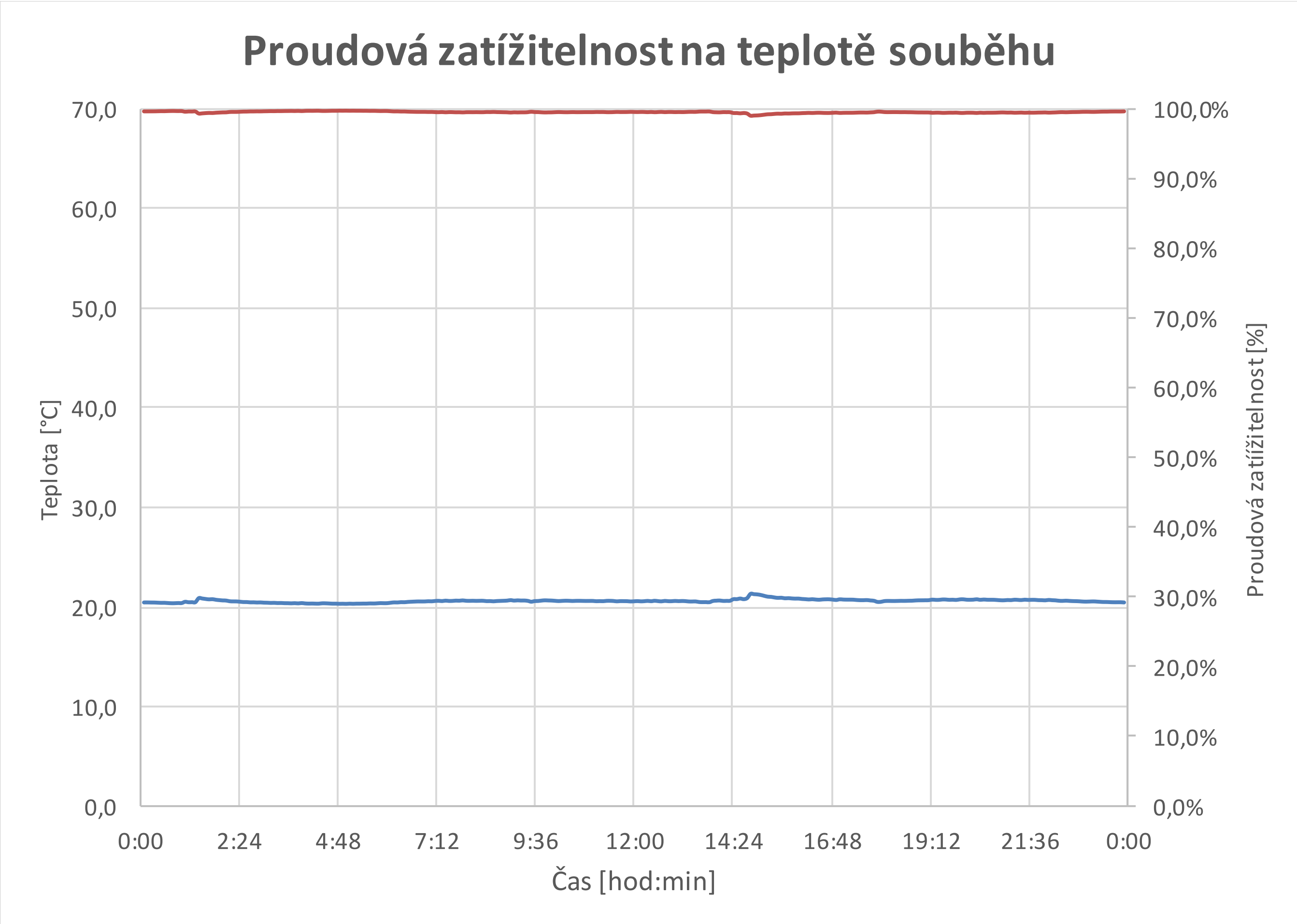
Graf 8 je analogický ke grafu 6. Modrá křivka odpovídá teplotě kabelu AXEKCY K04-08, oranžová křivka proudu kabelu K04-08 a červená křivka proudům sousedního kabelu K19-22. Porovnáním grafů 6 a 8 vychází, že kabel K04-08 dosahuje vyšších teplotních hodnot (maximum zhruba 36,8 °C oproti 26,2 °C u kabelu K04-07), což je způsobeno tím, že kabel K04-07 je vypnut a teče jím pouze kapacitní proud 6 A, a tím prakticky negeneruje téměř žádný tepelný výkon, který by zvyšoval teplotu kabelu. Naopak vliv okolních kabelů je větší u K04-07 protože je druhý zleva (viz řez 1).



Graf 8

Graf 9 je analogický ke grafu 7 s tím rozdílem, že je zde zobrazeno oteplení kabelu AXEKCY K04-08 od ostatních kabelů v souběhu (modrá křivka). Tato charakteristika potvrzuje, že vliv ostatních kabelů na K04-08 je menší, než na K04-07 a při daném proudovém zatížení si drží téměř konstantní hodnotu 21 °C. Konstantní hodnota téměř 100% je i u proudového zatížení tohoto kabelu (oranžová křivka), jinými slovy tento kabel může být, při takovýchto proudových hodnotách ostatních kabelů, zatěžován téměř 100% nominální hodnotou proudu (400 A), aniž by se přehřál nad kritickou teplotu 90 °C při normálním provozu.

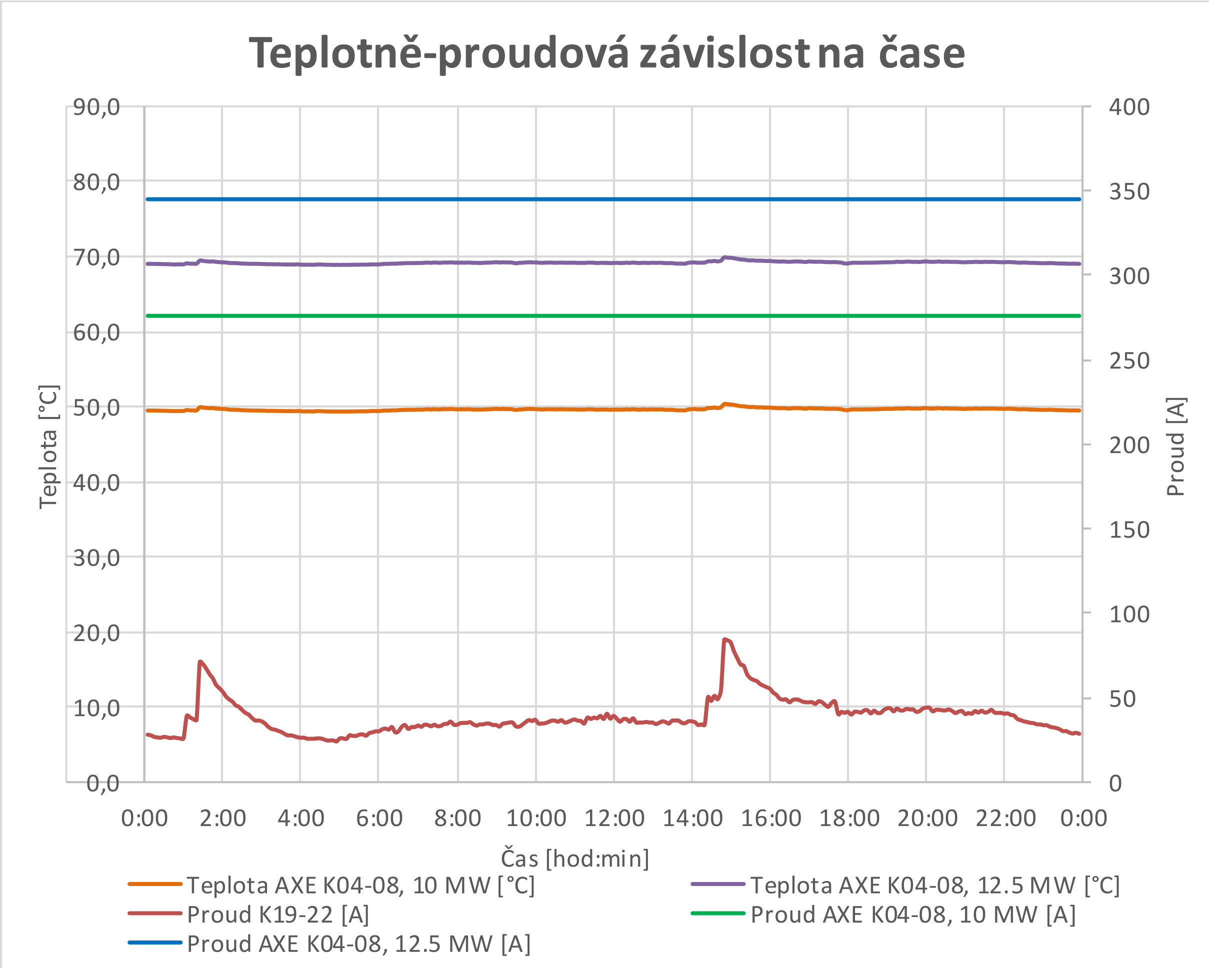
Z grafu 6 a 8 vidíme, že kabel K04-08, který napájí měnírnu RS7820 vykazuje strmé velké proudové nárůsty oproti např. kabelu K19-22. Tyto výkyvy by bylo vhodné dále prověřit na straně odběratele. Jako možný zdroj těchto výkyvů se může nabízet velký záběrový proud při rozjezdech. Z katalogu ČD je patrné, že jednotkové jmenovité výkony mohou dosahovat více než 6 MW tj. cca 160 A. To by mohlo být hlavním příspěvkem zatížení uvedeného kabelu.



Graf 9

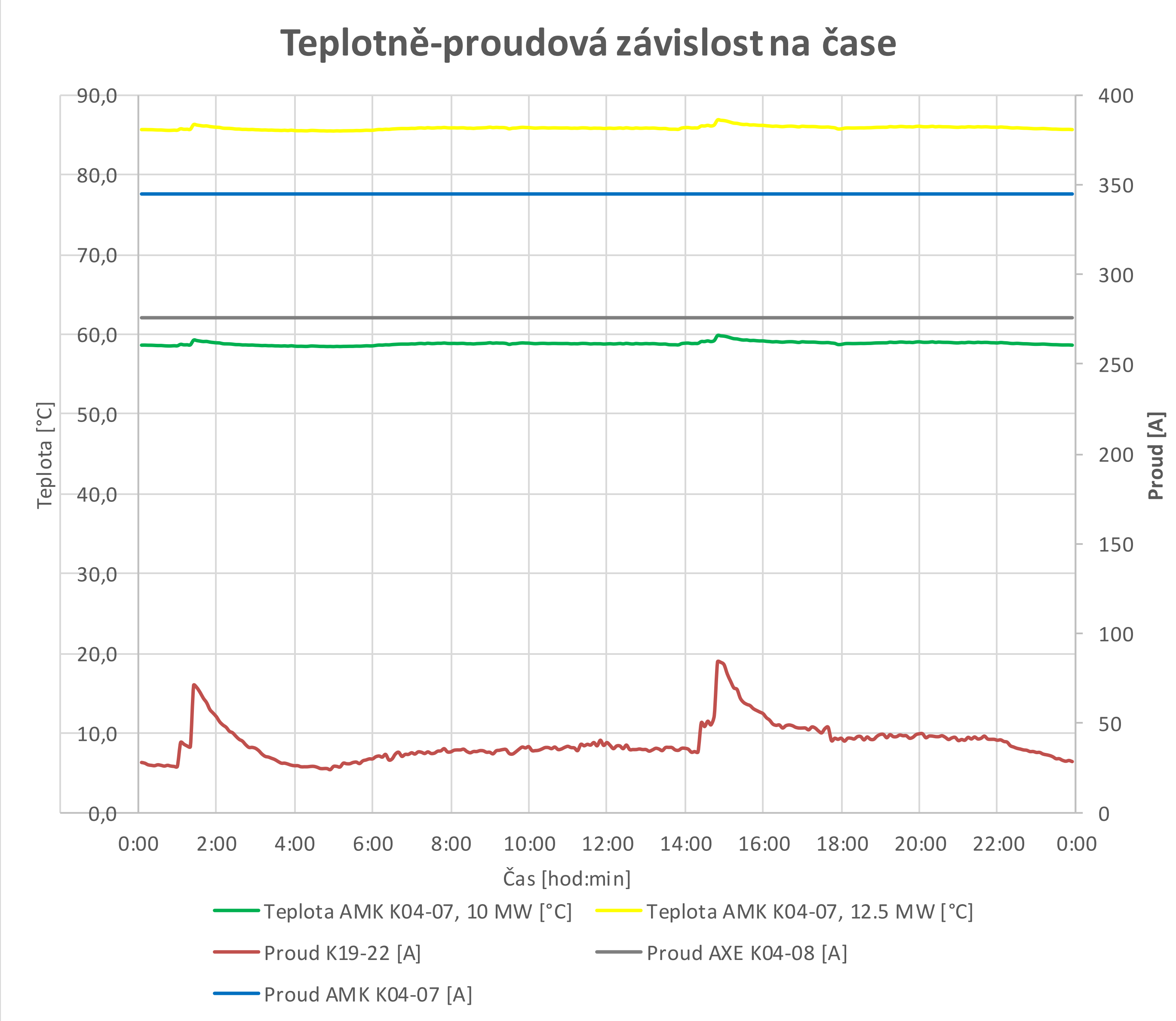
Všechny výše uvedené grafy jsou vztaženy na denní diagram spotřeby. Jelikož se jedná o napájení trakčního vedení, tak křivky v těchto grafech mají o něco jiný průběh než křivky v denním diagramu pro normální spotřebu. Z grafu 2 vyplývá, že největší zatížení je zhruba od 8 do 10 hodiny a pak zhruba kolem 16 hodiny. To koresponduje s charakterem tohoto trakčního vedení, neboť je primárně určeno pro převoz těžkého nákladu jako např. cementu. Výkonové špičky v těchto časech souvisí s rozjížděním vlaků s větším nákladem a tím i velkým záběrným proudem.

Navýšení výkonového zatížení na 10 a 12,5 MW



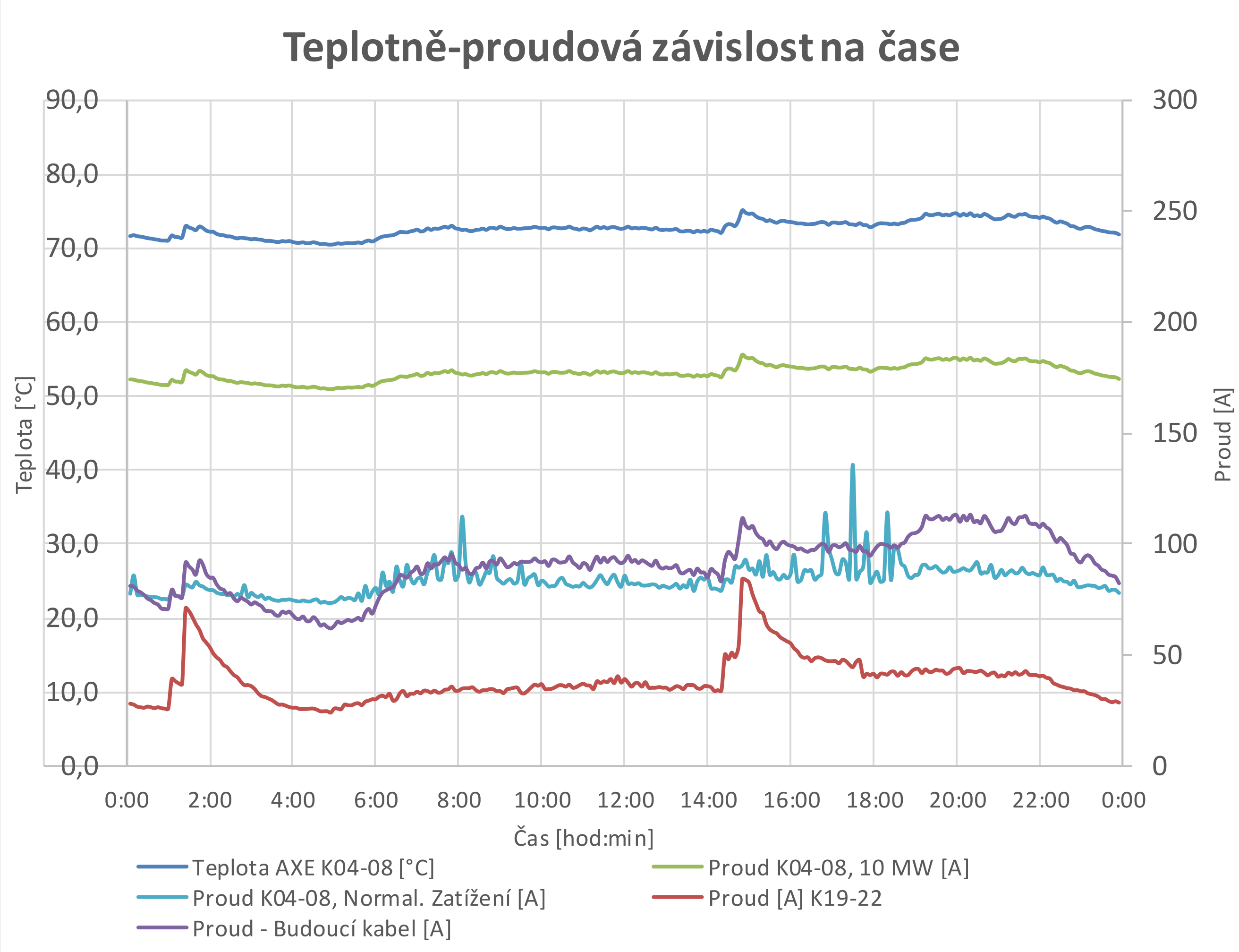
Graf 10

Na základě požadavku provozovatele bylo dalším postupem analýzy zkoumáno možnost navýšení výkonu na konstantní hodnotu 10 MW a 12,5 MW (graf 10, odpovídající kabelu AXEKCY K04-08). Na tomto grafu je zelenou křivkou vyznačen výkon 10 MW, čemuž odpovídá 276 A (pravá vertikální osa), tmavě modrá křivka odpovídá konstantnímu výkonu 12,5 MW (345 A). Těmto proudům odpovídají dvě teplotní křivky, a to oranžová křivka (výkon 10 MW) a fialová křivka (výkon 12,5 MW). Z grafu můžeme vidět, že ani jedna z těchto dvou teplotních křivek nepřekročila kritickou teplotu (leva vertikální osa). Teplotní křivka odpovídající hodnotě 10 MW se ustálila přibližně na hodnotě kolem 50 °C, to znamená ještě rezervu zhruba 40 °C a křivka odpovídající výkonu 12,5 MW se ustálila okolo hodnoty 70 °C. V tomto grafu byly výkony ostatních 7 kabelů zachovány, pouze výkon kabelu K04-08 AXEKCY byl navýšen.



Graf 11

Graf 11 je analogický ke grafu 10 s tím rozdílem, že tento graf zobrazuje naopak situaci, kdy byl navýšen proud na úroveň 276 A (10 MW) a 345 A (12,5 MW) u kabelu AMKTOYPV a naopak kabel AXEKCY K04-08 byl vypnut. Šedá křivka odpovídá proudu 276 A a tmavě modrá proudu 345 A. Tento proud by se v normálním provozu u kabelů AMKTOYPV nebo ANKTOYPV neměl objevit, protože jeho maximální povolený proud je 300 A. Tato situace tedy spíše ukazuje teoretické vytížení nad povolený maximální proud, který podle teplotní charakteristiky (žlutá křivka) nepřekročil 90 °C. Pro kabely AMKTOYPV je kritická teplota 60-70 °C, vidíme tedy, že by kabel na takovýto proud nemohl být provozován. Zelená křivka dále zobrazuje teplotu pro hodnotu proudu 276 A. Tato teplota dosáhla hodnoty přibližně 58 °C což je nárůst o zhruba 8 °C oproti kabelu AXEKCY. Pro tuto hodnotu proudu kabel vyhovuje.



Graf 12

Další graf 12 ukazuje situaci, kdy by v budoucnu mohly být do tohoto souběhu přidány další tři kabely a vznikl by souběh až 11 kabelů. Vybrán byl nejhorší možný souběh, kdy jsou tyto tři kabely přidány zleva a námi sledované kabely K04-08 a K04-08 se posunou na pozice č. 4 a 5 zleva. Na grafu můžeme vidět proud jednoho z možných budoucích kabelů, tento proud jsem vzal od jednoho kabelu ze souběhu, který měl průměrně nejvyšší proud. Zelená křivka ukazuje teplotu kabelu při výkonu 10 MW, můžeme si všimnout toho, že je tato křivka více zvlněna oproti grafu 10. Je to dáno přidanými třemi kabely, které ještě více teplotně ovlivňují náš kabel. Nicméně hodnoty dosahují pouze o zhruba 4°C vyšších hodnot. Podobná situace je u světle modré křivky, kde teplota dosáhla maximální hodnoty zhruba 75°C. Žádná z charakteristik, ale nepřekročila kritickou hodnotu teploty a tudíž by vyhověla pro kabel K04-08 AXEKCY. Pro kabel AMKTOYPV K04-07 byla provedena stejná situace a hodnoty se změnily jenom nepatrně (nejvyšší hodnota zhruba 61 °C) a kabel také vyhověl pro výkon 10 MW.

7.5 Zhodnocení

Z analýzy v této kapitole lze vidět, že nejkritičtějším místem úseku je souběh 8 kabelů. Podle tohoto místa by se mělo nastavit proudové zatížení vedení do RS7820. Z hlediska teplotních parametrů zde nejsou problémy pro stávající proudy. Tyto proudy jsou poměrně malé, a jak vyplývá z grafů je zde prostor pro poměrně velké navýšení např. na hodnotu 250 A s ještě poměrně velkou rezervou.

Výpočty byly provedeny podle normy IEC 60853-2 , IEC 60853-1 a -3, které se zabývají tepelnými časovými konstantami. Alternativně pro výpočet teplot byl použit program Agros2D. Výsledky pro teploty byly prakticky stejné.

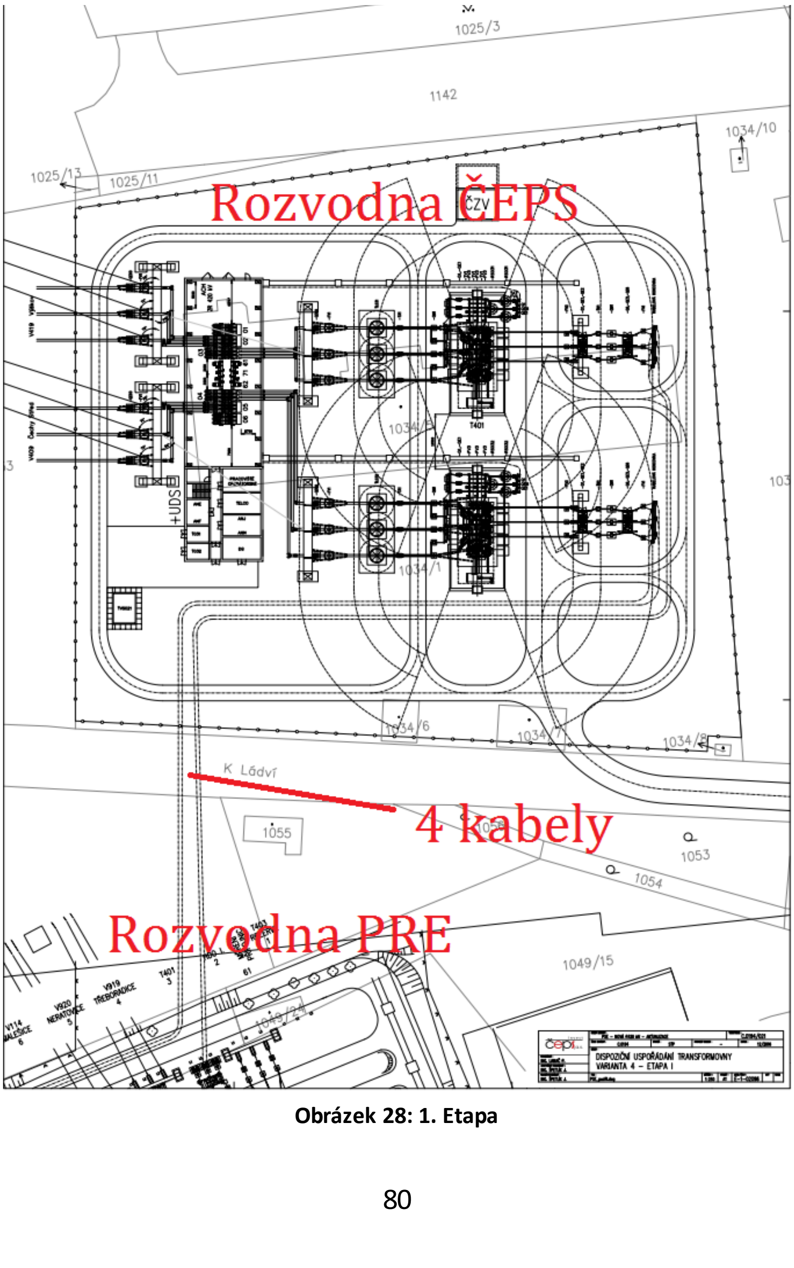
Kapitola 8 - Přenosová zatížitelnost kabelového vedení 110 kV

8.1 Důvod analýzy a popis

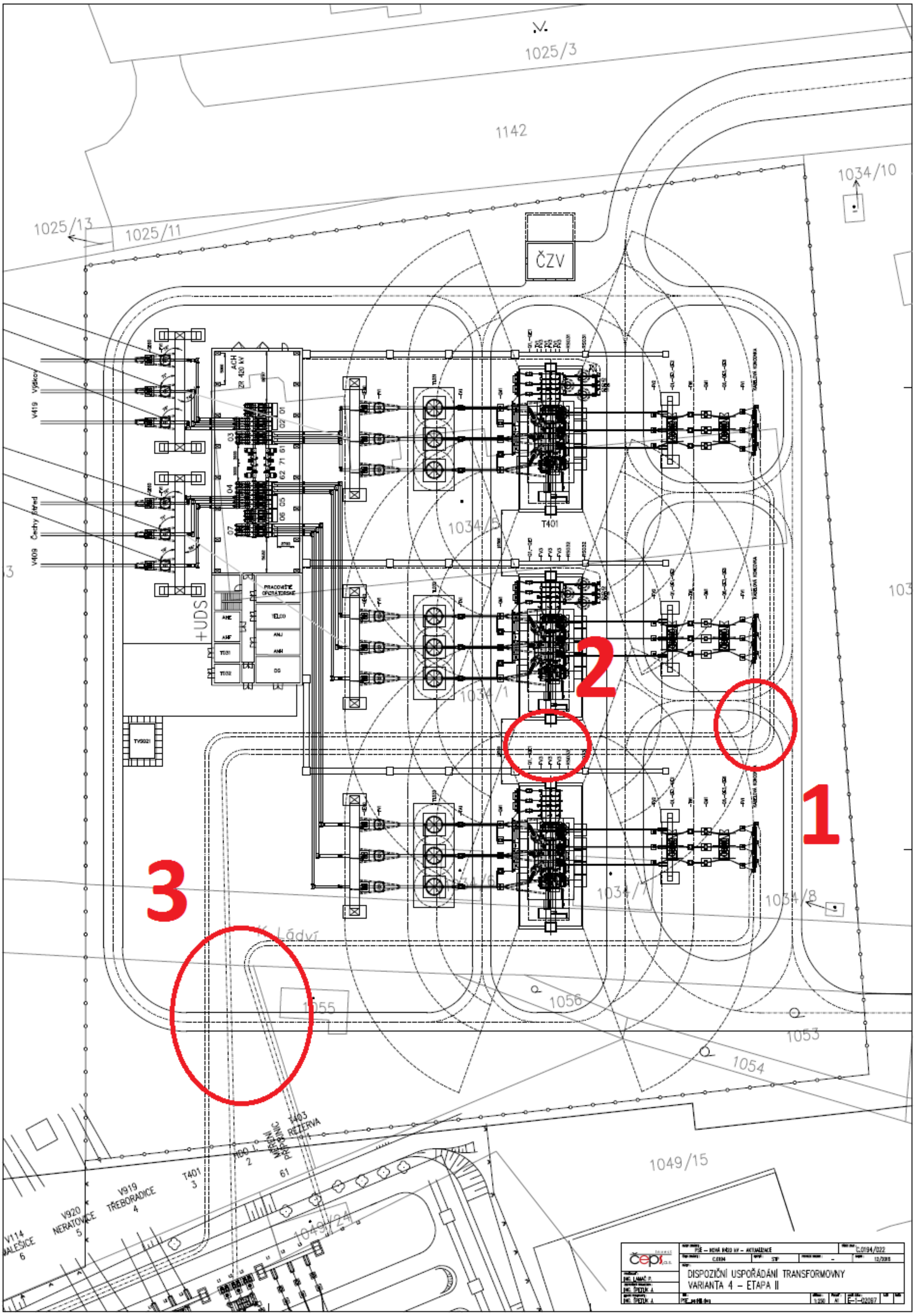
Z jednání mezi společností ČEPS a PRE vyplynula nutnost vybudování nového kabelového vedení mezi TR Sever 110/22 kV (ve vlastnictví PRE) a budoucí TR Praha Sever 400/110 kV (ve vlastnictví ČEPS) pro zajištění požadovaného výkonu. Celkový požadovaný přenesený výkon mezi oběmi rozvodnami je 3x350 MVA = 1050 MVA a celkový proud 3x1840 A.

Náplní této části diplomové práce je analýza a výběr vhodného propojovacího vedení včetně variantních řešení. Na obr. 28 je zobrazena 1. etapa propojení 2 vedeními (každé vedení má jeden kabel, proto celkově 4 kabely). V rozvodně ČEPSu budou nejprve osazeny dva transformátory o výkonu 350 MVA. Z těchto dvou transformátorů bude vyveden výkon přes kabelové vedení do rozvodny PRE.

V 2. etapě podle obr. 29 bude ke stávajícím 2 transformátorům přidán třetí. Dále budou doplněné další vedení. Celkem bude mezi těmito rozvodnami 6 kabelových vedení 110 kV. Takový počet 110 kV kabelů ovlivní vzájemnou přenosovou zatížitelnost. Proto je nutné vybrat správné průřezy kabelů, vhodnou technologii a také šířku kabelového koridoru resp. vzdálenosti mezi jednotlivými kabely, tak aby byly kabely schopny přenášet jmenovitý proud transformátoru 350 MVA. Na obr. 29 jsou zobrazeny 3 kritická místa z hlediska tepelného ovlivňovaná, a tím i přenosové zatížitelnosti kabelů. Tyto místa budou dále podrobně analyzovány.



Obrázek 28: 1. Etapa



Obrázek 29: 2. Etapa

8.2 Parametry kabelu

Parametry analyzovaných kabelů jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9: Parametry kabelů

Průřez kabelu	Průměr vodiče	Průměr kabelu	AC odpor vodiče při 90°C o o o	AC odpor vodiče při 90°C Δ	Maximální dovolený proud, uložení v zemi, SPB o o o	Maximální dovolený proud, uložení na vzduchu, SPB o o o
$[\mathrm{mm}^2]$	[mm]	[mm]	[Ω/km]	[Ω/km]	[A]	[A]
1000	38	94,6	0,0378	0,0379	960	1350
1200	44	100,6	0,0322	0,0324	1040	1490
1400	48	104,6	0,0278	0,0281	1115	1620
1600	52	108,6	0,0246	0,0249	1175	1730
2000	56	112,6	0,0200	0,0205	1285	1930
2500	66	122,6	0,0166	0,0171	1575	2366

Parametry maximálního dovoleného proudu převzaty z katalogu výrobců ABB a Prysmian. Další parametry kabelů pro výpočet byly stejné pro všechny průřezy kabelů a jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Parametry kabelů 2

Tloušťka polovodivého stínění	Tloušťka izolace XLPE	průměr izolace	Tloušťka vnějšího pláště kabelu	Průřez stínění
mm	mm	Mm	Mm	mm^2
1,5	16	73	6	221

Tloušťka izolace 16 mm byla určena výpočtem podle [8], výpočet se provede následujícím způsobem:

$$r_c = \frac{D_c}{2} + t_{pvc} \tag{6-1}$$

$$r_i = r_c + t_i \tag{6-2}$$

$$E_c = \frac{U_0}{r_c \ln\frac{r_i}{r_c}} \tag{6-3}$$

$$E_i = \frac{U_0}{r_i \ln\frac{r_i}{r_c}} \tag{6-4}$$

$$t_{imin} = r_c \cdot \left(e^{\frac{U_0}{r_c E_c}} - 1 \right) \tag{6-5}$$

Kde:

r_c je poloměr polovodivého stínění vodiče [mm], D_c je průměr vodiče [mm], t_{pvc} je tloušťka polovodivého stínění [mm], t_i je tloušťka izolace [mm], r_i je poloměr izolace [mm], U_0 je maximální fázové napětí [kV], E_c je maximální napětí na vodiči [kV/mm], E_i je maximální napětí na izolaci [kV/mm], t_{imin} je minimální tloušťka izolace [mm]

V dnešní době garantují výrobci i tloušťku kolem 13 mm, nicméně to také znamená větší zatěžování izolace elektrickým polem. Proto je vhodné zvolit tloušťku izolace mezi 15-18 mm. Např. pro 13 mm izolaci je maximální napětí na vodiči E_c s průřezem 1600 mm^2 6,7 kV/mm, kdežto u tloušťky 16 mm je to 5,6 kV/mm.

Průřez stínění byl dalším výpočtem určen na 221 mm^2 pro jednofázový zkratový proud 35 kA (podle studie EGÚ Brno). Výpočet je daný normou ČSN IEC 949.

8.3 Postup výpočtu

Z výše uvedených dat a informací byla vypracována analýza pomocí norem ČSN IEC 287-1-1, ČSN IEC 287-2-1 a IEC 60853-2. Nejdříve si musíme vypočítat elektrický odpor vodiče a z něho určit řadu dalších parametrů. Využijeme i parametrů spočítaných v předchozí sekci. Dále si musíme spočítat činitele ztrát a tepelné odpory kabelu a vnějšího okolí. Tyto veličiny pak můžeme použít pro výpočet tzv. ohmova elektrotepelného zákona ve tvaru (odvozeno v kapitole 5):

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0{,}5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + n(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)}\right]^{0{,}5} \tag{6-6}$$

Veličiny v této rovnici jsou uvedeny v kapitole 5 s přesný odvozením této rovnice.
Dovolený proud pro přetížení je počítán pomocí normy IEC 80653-2, pomocí následující rovnice (tato rovnice byla odvozena již v kapitole 5):

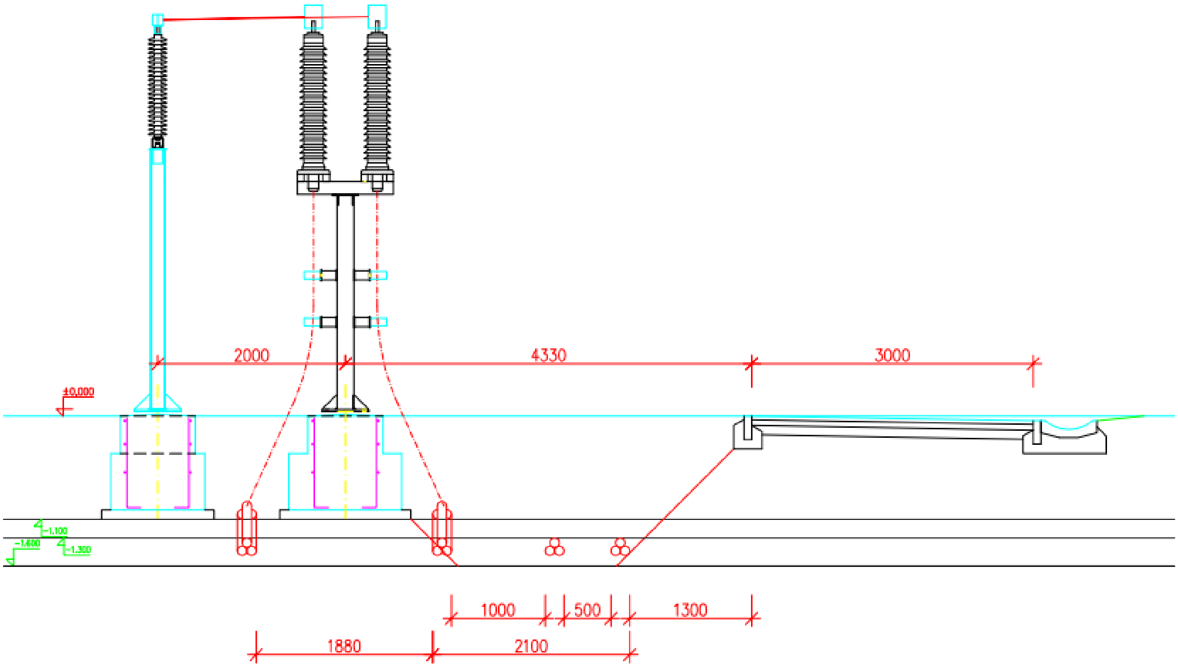
$$I_2 = I_R\left[\frac{h_1^2 R_1}{R_{max}} + \frac{(R_R/R_{max})(r - h_1^2[R_1/R_R])}{\theta_R(t)/\theta_R(\infty)}\right]^{0{,}5} \tag{6-7}$$

Veličiny v této rovnici jsou v kapitole 5 s přesný odvozením této rovnice.

Byla vybrána 3 kritická místa, jak plyne z obr. 29. Zpočátku byly výpočty vytvořeny jen pro kabely o průřezu 1600 mm^2 a 2000 mm^2 v kopané trase a v protlacích. Další vyrianta byla větraný kabelový kanál s průřezy kabelů 1000, 1200,1400 a 1600 mm^2. Dodatečně byl přidán průřez 2500 mm^2 pro první kritické místo, kde nižší průřezy nevyhověly.

8.4: 1. Kritické místo - Vývod u transformátoru

Na obr. 29 je zobrazeno první kritické místo - vývod u prostředního transformátoru. V tomto místě je společností ČEPS daný koridor o šířce 4,1 m. Tento koridor je rozdělen na dvě další části. V první část je kabel úplně vlevo a je vzdálený od ostatních kabelů zhruba 1,88 m. Tato vzdálenost prakticky snižuje vzájemné tepelné ovlivňování kabelů na minimum. V druhé části je koridor se třemi dalšími kabely zúžený na 2,1 m. V tomto případě uspořádání by vyhovoval podle tepelných výpočtů kabel s průřezem 2500 mm^2. Pozn.: Řezy s jednotlivými konfiguracemi a průřezy jsou k nalezení v přílohách.



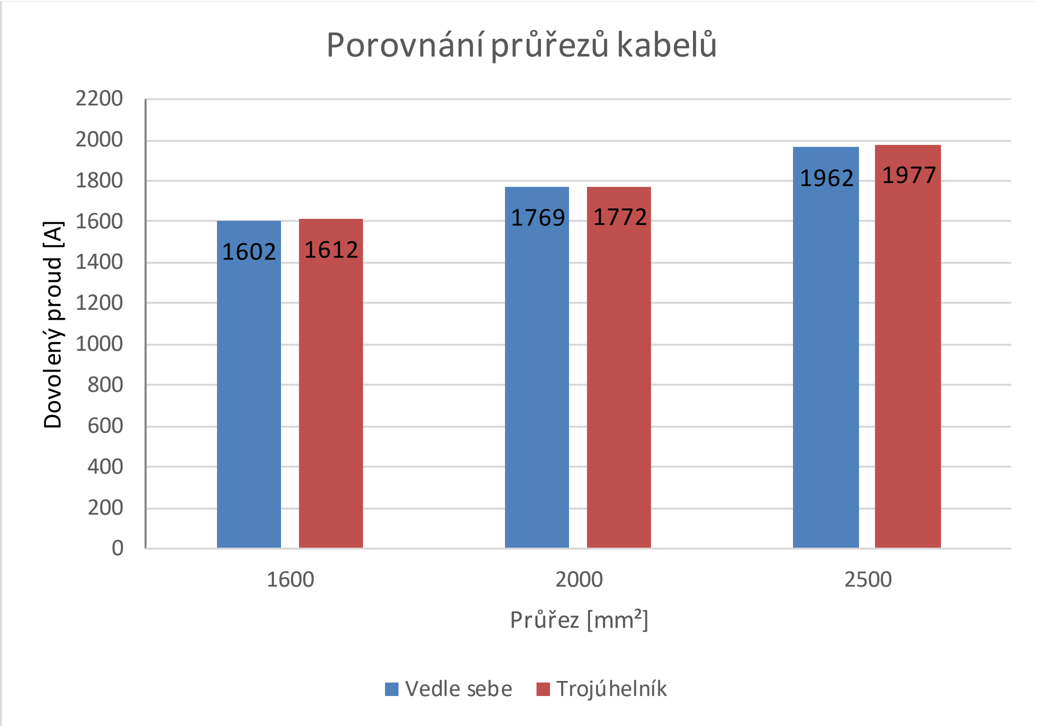
Obrázek 30: Vývod u transformátoru

[Zdroj: 19]

Hodnoty proudů pro tuto šířku koridoru jsou v tabulce 11. V ní jsou uvedeny hodnoty proudů pro 1 vedení, tedy dva kabely a přenesený výkon. Pro přenesení jmenovitého výkonu 350 MVA je potřeba, aby tyto dva kabely byly schopny přenést proud 1840 A. Z tabulky 11 vidíme, že takovýto proud přenesly pouze kabely o průřezu 2500 mm^2 v konfiguraci vedle sebe i trojúhelník. Pro trojúhelník dosáhl tento kabel dokonce vyšších hodnot. Je to dáno limitujícím prostorem, protože se zde výrazně eliminuje prostorová výhoda kabelů vedle sebe. Na grafu 13 jsou zobrazeny hodnoty z tabulky 11 pro obě konfigurace a všechny tři průřezy. Minimální hodnota I_{dov}/2 kabely = 1840A vyhovují zeleně označené hodnoty v tab. 11, červené nevyhovují.

Tabulka 11: Tabulka hodnot dovolených proudů pro první kritické místo

Průřez	Konfigurace	Osová rozteč mezi fázemi	Vzdálenost mezi krajními kabely	Metoda SPB		Metoda BEB	
				Dovolený proud I_{dov} pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb	Dovolený proud I_{dov} pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb
mm^2		mm	mm	A	MVA	A	MVA
1600	Vedle sebe	100+108	250	1602	305	890	170
2000		100+112	250	1769	337	918	175
2500		100+122	250	1962	374	952	181
1600	Trojúhelník	108	550	1612	306	1244	237
2000		112	550	1772	337	1318	251
2500		122	550	1977	377	1390	265



Graf 13

Byly provedeny další výpočty hledající vhodnou šířku koridoru tak, aby byly kabely o průřezu 1600 mm^2 a 2000 mm^2 schopny přenést jmenovitý výkon transformátoru, jelikož průřez 2500 mm^2 byl neakceptovatelný pro společnost PRE vzhledem ke své vysoké ceně.

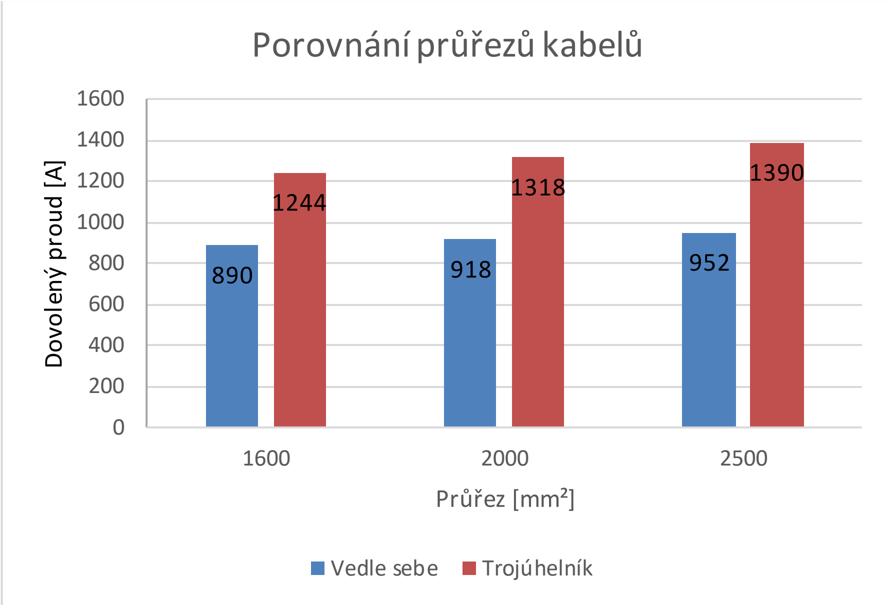
V tabulce 12 jsou k nalezení hodnoty minimální šířky koridoru potřebné k přenesení jmenovitého výkonu transformátoru. Pro průřez 2000 mm^2 bylo potřeba celkový koridor pro 4 kabely posunout pouze o zhruba 0,9 m na celkových 5 m pro obě konfigurace vedle sebe i trojúhelník. Pro průřez 1600 mm^2 v konfiguraci vedle sebe by bylo potřeba celkový koridor rozšířit na 6,2 m, tedy přesně o 2,1 m a pro trojúhelníkovou konfiguraci by byl celkový koridor 7,2 m široký, tedy rozšíření o 3,1 m.

Tabulka 12: Tabulka hodnot s minimální šířkou koridoru pro přenesení P_{nom}

Průřez	Konfigurace	Osová rozteč mezi fázemi	Vzdálenost mezi krajními kabely	**Šířka koridoru bez ochranných pásem (kraj kabelu-kraj kabelu) souběh 3 kb**	**Celková šířka koridoru 4 kb**
mm^2		mm	mm	**m**	**m**
1600	Vedle sebe	250+108	0,65	**3,7**	**6,2**
2000		100+112	0,5	**2,5**	**5,0**
1600	Trojúhelník	108	1,9	**4,7**	**7,2**
2000		112	0,8	**2,5**	**5,0**

V souvislosti s výše uvedenými údaji se energetické společnosti rozhodly vybrat kabelu o průřezu 2000 mm^2 . Pro takto vybraný průřez byla dále navřena, upravena trasa a šířka koridoru. Koridor byl rozšířen, tak aby byly kabely schopny přenést požadovaný výkon.

V souvislosti s tímto místem jsem provedl ještě kontrolní výpočet pro jednostranné uzemnění (SPB) a oboustranné uzemnění (BEB). Tabulka 11 ukazuje nevýhodnost metody BEB oproti SPB, hodnoty proudů jsou výrazně nižší a tyto hodnoty jsou v grafu 14. Můžeme si také všimnout, že hodnoty v konfiguraci trojúhelník jsou výrazně vyšší než v konfiguraci vedle sebe. Tento fakt je způsoben většími ztrátami v konfiguraci vedle sebe. Důležitým závěrem z výpočtu je, že žádná konfigurace ani průřez s metodou BEB nepřesáhl požadovanou hodnotu 1840 A.

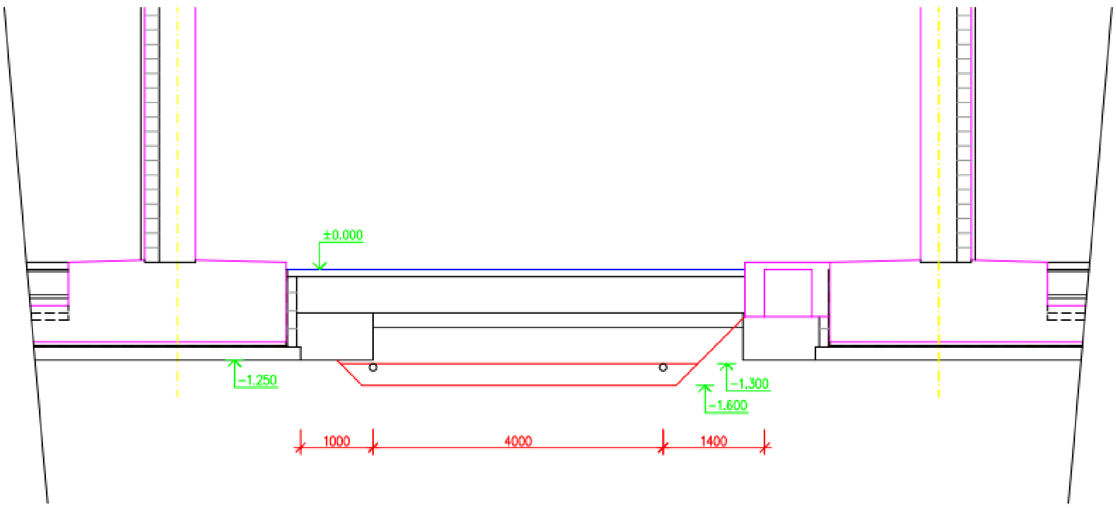


Graf 14

Pozn.: Hloubka uložení kabelů je 1,3 m od povrchu země na povrch kabelu a u kabelů v chráničkách je to na povrch chráničky.

2. Kritické místo - Koridor mezi dvěma transformátory

Další kritické místo se nachází mezi dvěma transformátory, jak je zobrazeno na obr. 29. Detailnější zobrazení je na obr. 31 a v řezech v přílohách na konci této diplomové práce.



Obrázek 31: Koridor mezi 2 transformátory Zdroj: [19]

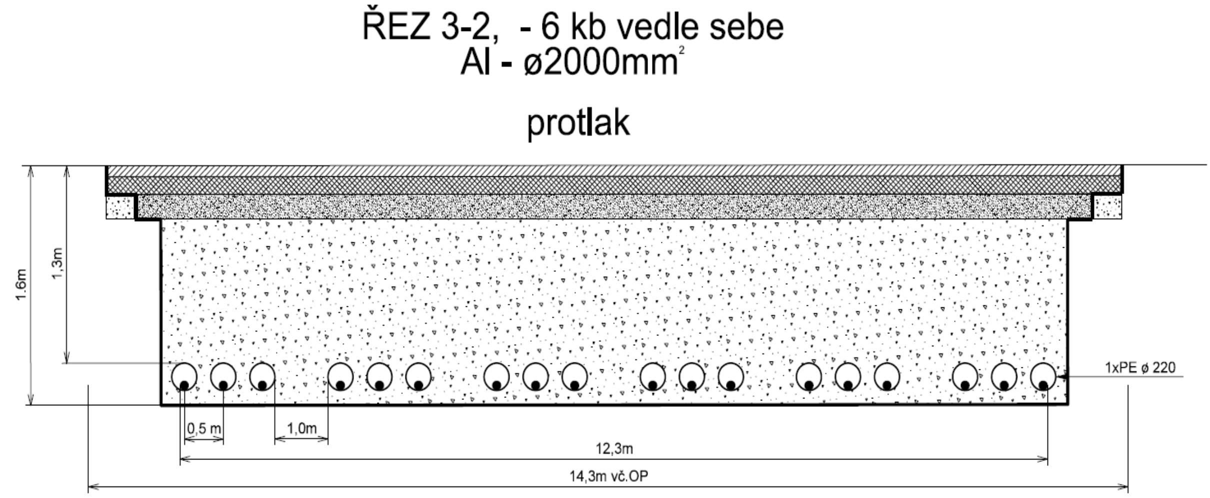
V tomto místě je koridor šířky zhruba 4 m, tedy přibližně stejně široký jako u prvního kritického místa. Nicméně u tohoto místa je výhoda, že koridor není rozdělen a kabely mohou být uloženy ve stejné vzdálenosti od sebe.

Tabulka 13: Hodnoty dovolených proudů pro koridor mezi 2 transformátory

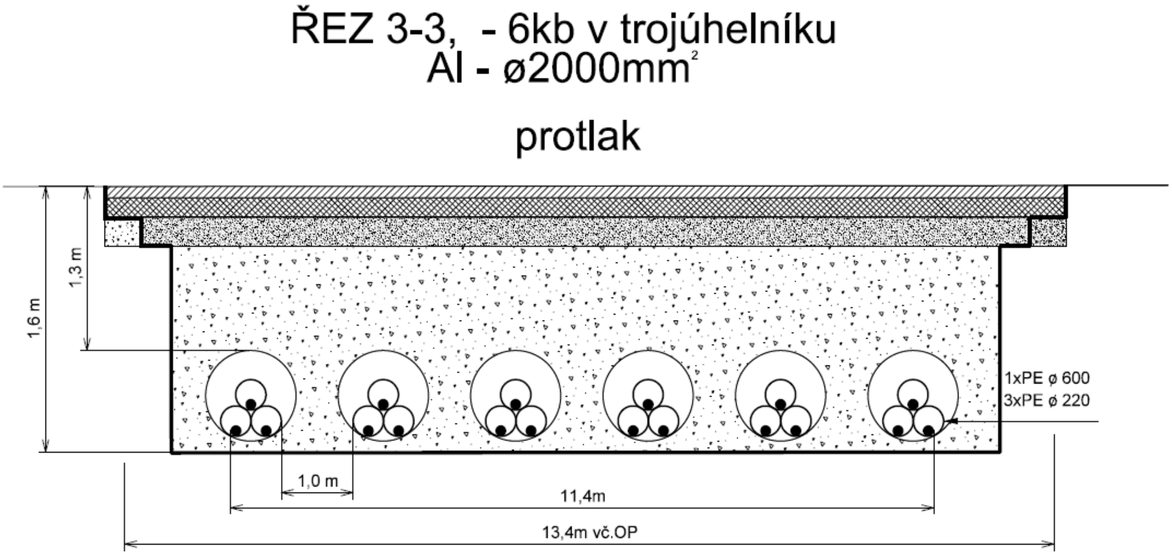
					Metoda Single-Point bonding (SPB)		Metoda Both-Ending bonding (BEB)	
Průřez	Konfigurace	Osová rozteč mezi fázemi	Nejmenší vzdálenost mezi krajními kabely	Šířka koridoru bez ochr. pásma	Dovolený proud pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb	Dovolený proud pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb
mm^2		mm	mm	m	A	MVA	A	MVA
1600	Vedle sebe	250	750	4,6	1920	366	1009	192
2000		250	500	3,8	1979	377	963	184
1600	Trojúhelník	108,6	1750	6,4	1869	356	1533	292
2000		112,6	1000	4,1	1847	352	1468	280

Z tabulky 13 vyplývá, že pro toto místo není nutné uvažovat kabel s průřezem 2500 mm^2, protože kabel s průřezem 2000 mm^2 se svými rozměry vejde do tohoto zhruba 4 m koridoru a zároveň dokáže přenést požadovaný proud 1840 A. Konfigurace vedle sebe pro průřez 1600 mm^2 vyžaduje 4,6 m, tedy rozšíření o 0,6 m a konfigurace v trojúhelníku pro stejný průřez vyžaduje 6,4 m celkové šířky koridoru, tedy rozšíření o 2,4 m. V tabulce 13 si můžeme všimnout dalšího porovnání kabelů s metodou SPB a BEB. Uzemnění s BEB vychází opět výrazně hůře a žádná konfigurace ani průřez pro jmenovitý výkon transformátoru nevyhoví. Vidíme dále, že při takovýchto vzdálenostech přenese větší proud konfigurace vedle sebe (pro metodu SPB).

3. Kritické místo - Protlak se 6 kabely



Řez 3



Řez 4

Třetím kritickým místem byl protlak 6 kabelů v chráničkách zobrazený na obr. 27. Chráničky obecně zhoršují tepelné parametry. Tyto nepříznivé vlivy mohou být částečně eliminovány materiálem Bentonit, který efektivně odvádí teplo z kabelového systému. Vzorové řezy pro kabel 2000 mm^2 v konfiguraci vedle sebe a trojúhelníku jsou na Řezu 3 a Řezu 4. Řez pro průřez 1600 mm^2 je k nalezení v příloze na konci této diplomové práce. Na těchto dvou řezech je vidět minimální šířka koridoru potřebná k přenesení potřebného výkonu transformátoru 350 MVA (opět pro dva kabely).

V tabulce 14 jsou zobrazeny hodnoty dovolených proudů pro jednotlivé konfigurace, průřezy a vzdálenosti mezi jednotlivými kabely v souběhu. Osová rozteč 500mm pro kabely vedle sebe byla konstantní pro oba průřezy. Měnila se ale vzdálenost mezi krajními kabely a zároveň se vzdálenost mezi krajními kabely měnila i v konfiguraci do trojúhelníku, kde osová rozteč byla na šířku chráničky, tedy 220 mm. Z této tabulky vidíme, že jmenovitý proud přenesly všechny kabely vedle sebe s průřezem 2000 mm^2, tak i 1600 mm^2.

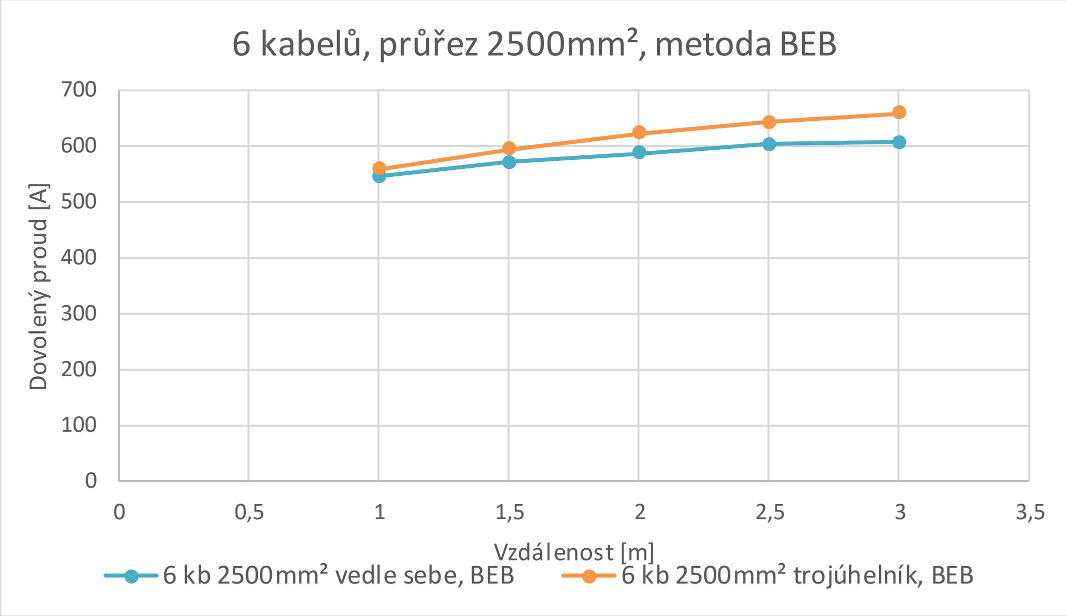
Tabulka 14: Hodnoty dovolených proudů pro 6 kabelů v protlaku

Průřez	Konfigurace	Vzdálenost krajních kabelů	šířka koridoru (vč. ochr. pásma)	Dovolený porud I_{dov} pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb
mm2		m	m	A	MVA
1600	Vedle sebe	1	14.3	1920	365
		1.5	16.8	2012	383
		2	18.9	2070	394
		2.5	21.8	2130	405
		3	23.8	2148	409
1600	Trojúhelník	1	10.9	1679	319
		1.5	13.4	1779	339
		2	15.9	1851	352
		2.5	18.4	1904	362
		3	20.9	1943	370
2000	Vedle sebe	1	14.3	2088	397
		1.5	16.8	2184	416
		2	18.9	2246	427
		2.5	21.8	2308	439
		3	23.8	2328	443
2000	Trojúhelník	1	10.9	1799	342
		1.5	13.4	1907	363
		2	15.9	1984	378
		2.5	18.4	2042	389
		3	20.9	2086	397

Kabely v trojúhelníku s průřezem 1600 mm^2 vyhověly až od vzdálenosti 2 m mezi krajními kabely a pro průřez 2000 mm^2 vyhověli kabely se vzdáleností 1,5 m mezi krajními kabely vedení. Budeme-li brát tedy nejkratší šířky koridorů pro jednotlivé průřezy a konfigurace, tak nejmenší šířku koridoru 14,3 m zaujímá kabel v trojúhelníku s průřezem 2000 mm^2, nicméně nedosahuje dovoleného proudu jako kabel s průřezy 1600 mm^2 a 2000mm^2 se šířkou koridoru 14,3 m, které mají oba stejně široký koridor. Nejhůře dopadl kabel s průřezem 1600 mm^2 v trojúhelníku (se šířkou 15,9 m), kde se kabely musely posunout do větší šířky, protože se vzájemně tepelně více ovlivňovaly. Důvodem proč vzdálenost kabelů v konfiguraci vedle sebe nemůže být nižší je to, že při nižší osové vzdálenosti mezi kabely by u kabelů v protlaku mohlo dojít při realizaci k zborcení protlaku neboť po vytvoření prvního protlaku má druhý protlak tendenci sjíždět k prvnímu a při menších vzdálenostech by mohlo dojít k zhroucení a spojení dvou protlaků. Z uvedeného tedy vidíme, že souběh kabelů je velice kritický místem a významně tepelně ovlivňuje přenosovou schopnost kabelů.

Metoda BEB (Both-ending bonding, oboustranně uzemněné) pro chráničky

Výše uvedené výpočty pro chráničky byly provedeny pro metodu SPB (Single-point bonding nebo-li jednostranné uzemnění). Metoda BEB byla také počítána, a to pro průřezy 1600 mm^2, 2000 mm^2 a 2500 mm^2 (poslední průřez je i na grafu 15).



Graf 15:Idov pro BEB

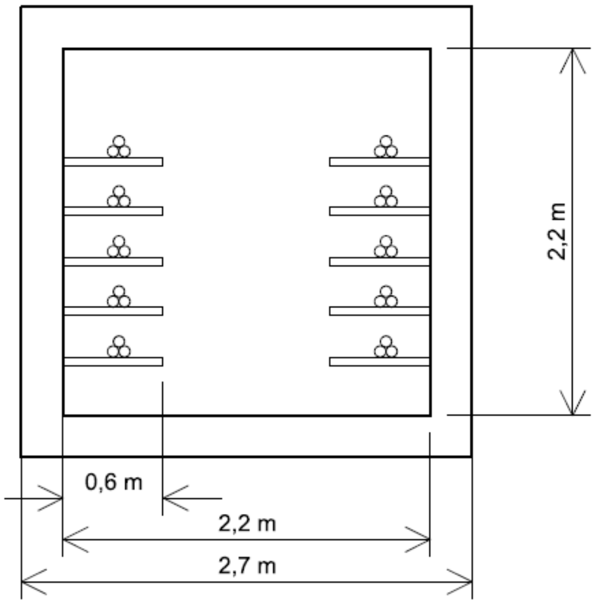
Tabulka 15: Dovolené proudy pro BEB

Průřez	Konfigurace	Vzdálenost mezi krajními kb	Dovolený proud pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb
mm²		m	A	MVA
1600	Vedle sebe	1	1028	196
		1.5	1073	204
		2	1103	210
		2.5	1133	215
		3	1141	217
	Trojúhelník	1	1008	192
		1.5	1073	204
		2	1121	213
		2.5	1156	220
		3	1183	225
2000	Konfigurace	Vzdálenost mezi krajními	Dovolený proud pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb
		m	A	MVA
	Vedle sebe	1	1040	198
		1.5	1084	206
		2	1116	212
		2.5	1146	218
		3	1154	219
	Trojúhelník	1	1056	201
		1.5	1124	214
		2	1176	224
		2.5	1214	231
		3	1242	236

Z vypočítaných výsledků a grafu 15 a tabulky 15 lze vidět, že žádná konfigurace ani průřez nepřekročila hodnotu proud 920 A (1840 A pro dva kabely) a tudíž tato metoda není vhodná pro propojení transformátoru o takovémto výkonu. Také je zde opět vidět, že vyšší proudy jsou u konfigurace v trojúhelníku, což je způsobeno většími ztrátami (viz PNE 34 1050, str. 49). Tato metoda potvrdila teoretické předpoklady a ve všech kritických místech nebyla schopna přenést požadovaný výkon, proto toto řešení není pro tento projekt a typ transformátoru vhodné.

8.5 Alternativa s větraným kabelovým kanálem

K řešení v kopané trase byla provedena alternativní analýza s kabelovým kanálem. Zvolil jsem pro tento kabelový kanál konstantní teplotu 25°C. Testované průřezy kabelů 1000 mm^2, 1200 mm^2, 1400 mm^2 a 1600 mm^2. Výpočet pro kabelový kanál byl opět proveden podle ČSN IEC 287-1-1 a ČSN IEC 287-2-1. Výhodou tohoto kanálu oproti uložení v zemi je, že díky větrání na vzduchu je přenosová schopnost kabelů výrazně vyšší a tím i dovolený proud. Rozměry tohoto kanálu byly zvoleny 2,2mx2,2m s kabelovými lávkami na obou stranách o šířce 600 mm a šířka průchozího koridoru je 1 m. Vzorový řez kabelovým kanálem je na obrázku 32.

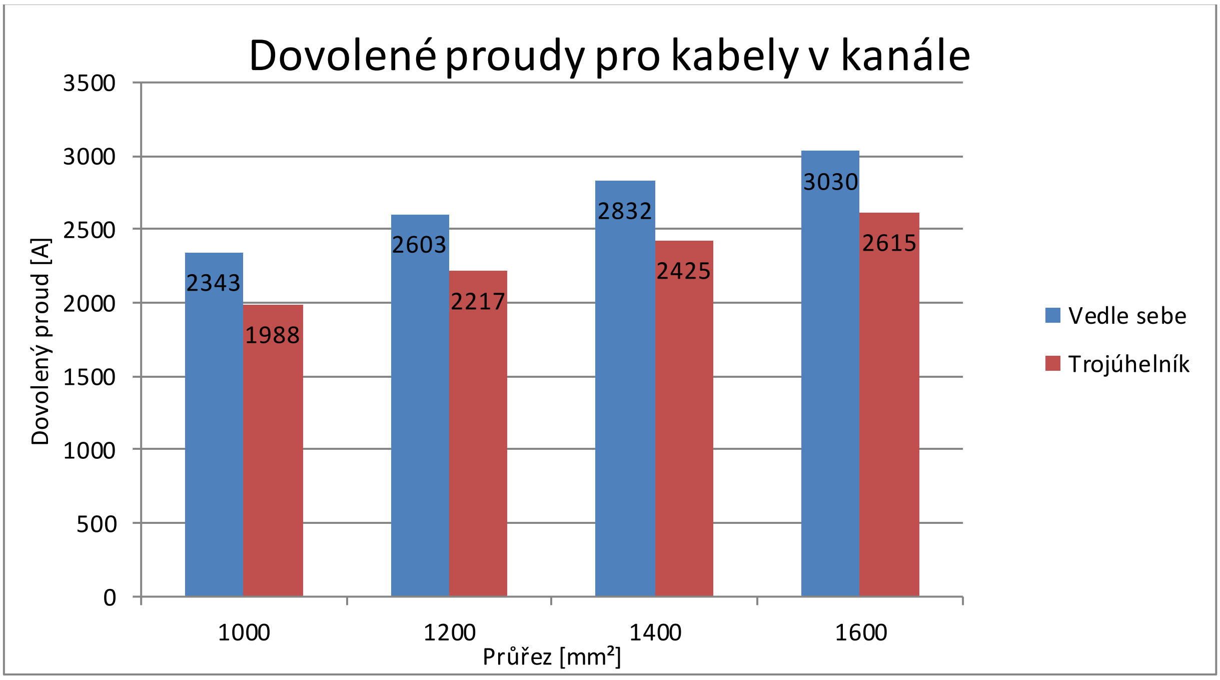


Obrázek 32: Vzorový řez kabelovým kanálem

Výsledné dovolené proudy pro všechny průřezy a konfigurace jsou uvedeny v tabulce 16 a grafu 16.

Tabulka 16: Tabulka dovolených proudů pro kabely v kabelovém kanálu

Průřez	Konfigurace	Dovolený proud pro 1 kb	Dovolený proud pro 2 kb	Přenesený výkon pro 2 kb
mm2		A	A	MVA
1000	Vedle sebe	1174	2343	446
	Trojúhelník	994	1988	379
1200	Vedle sebe	1305	2603	496
	Trojúhelník	1109	2217	422
1400	Vedle sebe	1423	2832	540
	Trojúhelník	1213	2425	462
1600	Vedle sebe	1528	3030	577
	Trojúhelník	1307	2615	498



Graf 16

Z výsledných hodnot vidíme, že díky tomuto řešení by bylo možné použít i kabel o průměru 1000 mm^2, tedy o polovinu menší průřez než v případě uložení v kopané trase. Toto řešení je z technického a zejména z provozního hlediska výhodnější než kabely uložené přímo v zemi. Pro vysoké investiční náklady na vybudování kabelového kanálu nebylo toto řešení přijato.

8.6 Přetížení kabelů

V rámci analýzy byly provedeny výpočty pro požadované přechodové stavy přetížení. Zkoumal jsem přetížení pro dlouhé přechodové stavy, tedy $t > 1$ hod. (konkrétně 2 hod.) a krátké přechodové stavy $t \leq 1$ hod. Tyto výpočty byly počítány podle normy evropské IEC 853-2, protože česká verze normy dosud neexistuje.

Dlouhé přechodové děje

Přetížení 6 kabelů v protlaku (v chráničkách)

Pro přetížení kabelů je požadováno, aby vydržely zátěž 120 % (2208 A) po dobu 2 hodin a 130 % (2392 A) po dobu 1 hodiny z předchozího zatížení 60 % v normálním stavu. První vypočítaný případ kabelů v chráničkách se vyznačuje tím, že pro dlouhé stavy jsou některé tepelné kapacity vnitřních izolačních vrstev zanedbatelné a naopak pro dlouhé přechodové stavy je tepelná kapacita půdy zanedbatelná (viz teoretická část). V tabulce 17 je uveden první případ dlouhého přechodového stavu, kdy před přechodovým stavem bylo kabelové vedení zatíženo na 60 %.

Tabulka 17: Dlouhý přech. stav pro kabely v chráničkách

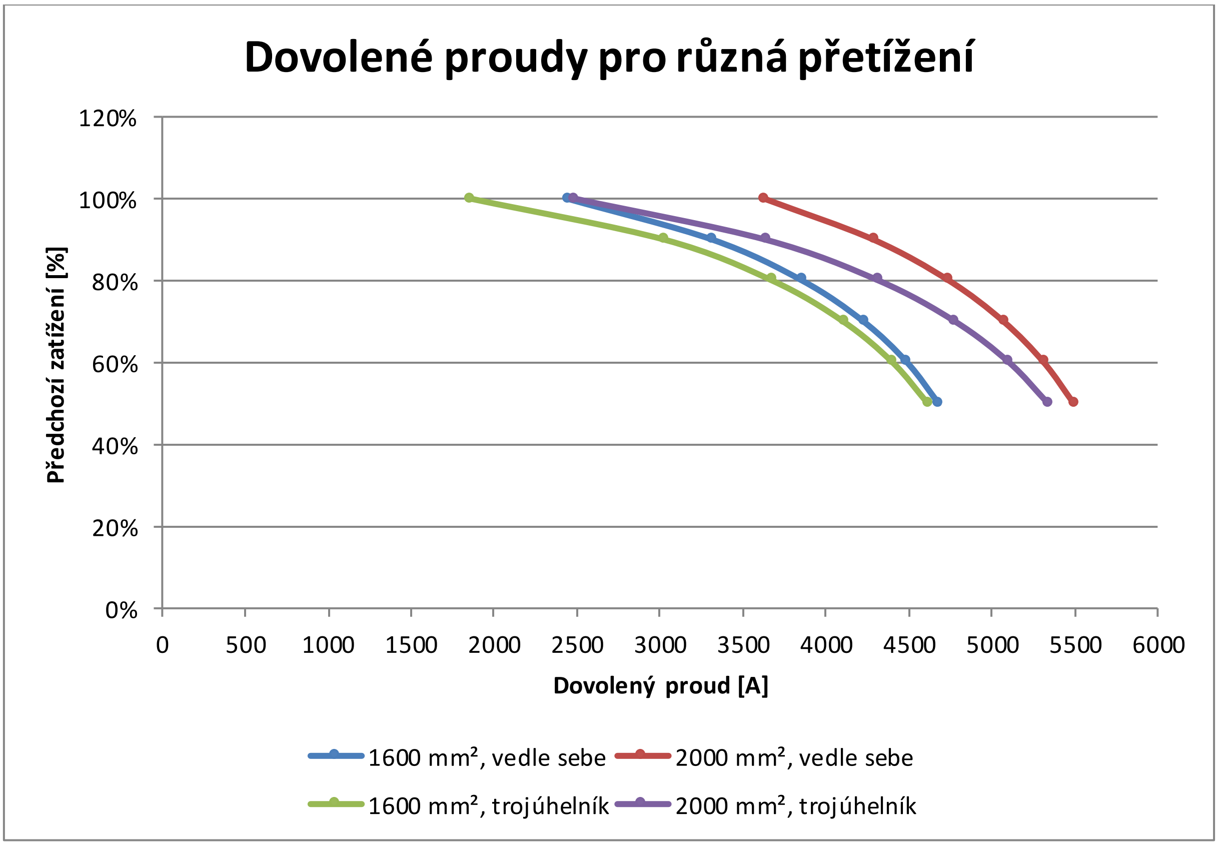
Veličina	Jednotka	Typ kabelu			
		1600 mm^2 o o o	2000 mm^2 o o o	1600 mm^2 Δ	2000 mm^2 Δ
Dovolený proud při přetížení pro 1 kb	A	2245	2657	2202	2553
Dovolený proud při přetížení pro 2 kb	A	4491	5315	4404	5106
Přenos MVA pro 1 kb	MVA	428	506	419	486
Přenos MVA pro 2 kb	MVA	856	1013	839	973

V tabulce 17, jsou hodnoty dovolených proudových zatížení pro dobu 2 hod. Vidíme, že tento proud s prakticky dvojnásobnou rezervou přenesou oba dva kabely v jednom vedení ve všech konfiguracích a průřezech. Navíc toto přetížení by po dobu dvou hodin byl schopen vydržet i jediný kabel s výjimkou kb 1600mm^2 v uložení do trojúhelníku.

V tabulce 18 jsou uvedeny dovolené hodnoty proudu po dobu 2 hodin, pokud by počáteční předchozí zatížení bylo v rozmezí 50-100 %. Hodnoty proudů jsou uvedeny pro dva kabely. Je vidět, že pouze kabely 1600 mm^2 v trojúhelníku by nevyhověly, pokud by byly v normálním stavu zatěžovány na 100 % s následným přetížením po dobu dvou hodin. Ostatní kabely by přetížení i po předchozím 100 % zatížení vydržely. Tabulka 18 je vykreslena na grafu 17.

Tabulka 18: Změna předchozího zatížení kabelu v ustáleném stavu pro 2 kabely

předchozí zatížení	Typ kabelu			
	1600 mm^2 o o o	**2000** mm^2 o o o	**1600** mm^2 Δ	**2000** mm^2 Δ
50 %	4680	5494	4615	5339
60 %	4491	5315	4404	5106
70 %	4227	5071	4105	4779
80 %	3857	4742	3677	4319
90 %	3316	4287	3027	3636
100 %	2441	3629	1860	2489



Graf 17

Přetížení 4 kabelů uložených přímo v zemi

Provedl jsem i výpočet pro kabely uložené přímo v zemi, kde jsem pro srovnání (předpokládáme, že protlak s chráničkami je nejslabším místem vedení) použil maximální dovolené proudy v ustáleném stavu stejné, jako pro kabely v chráničkách. Vidíme z tabulky 19 (pro zatížení 60 % v ustáleném stavu), že zde nejsou velké rozdíly v hodnotách. Kabely v zemi dosahují vyšších proudů než kabely v chráničkách. Z hlediska přetížení není v tomto místě s uložením kabelů problém.

Tabulka 19: Dlouhý přech. stav pro kabely uložené přímo v zemi

Veličina	Jednotka	Typ kabelu			
		1600 mm^2 o o o	2000 mm^2 o o o	1600 mm^2 Δ	2000 mm^2 Δ
Dovolený proud při přetížení pro 1 kb	A	2272	2681	2186	2532
Dovolený proud při přetížení pro 2 kb	A	4544	5362	4373	5063
Přenos MVA pro 1 kb	MVA	433	511	417	482
Přenos MVA pro 2 kb	MVA	866	1022	833	965

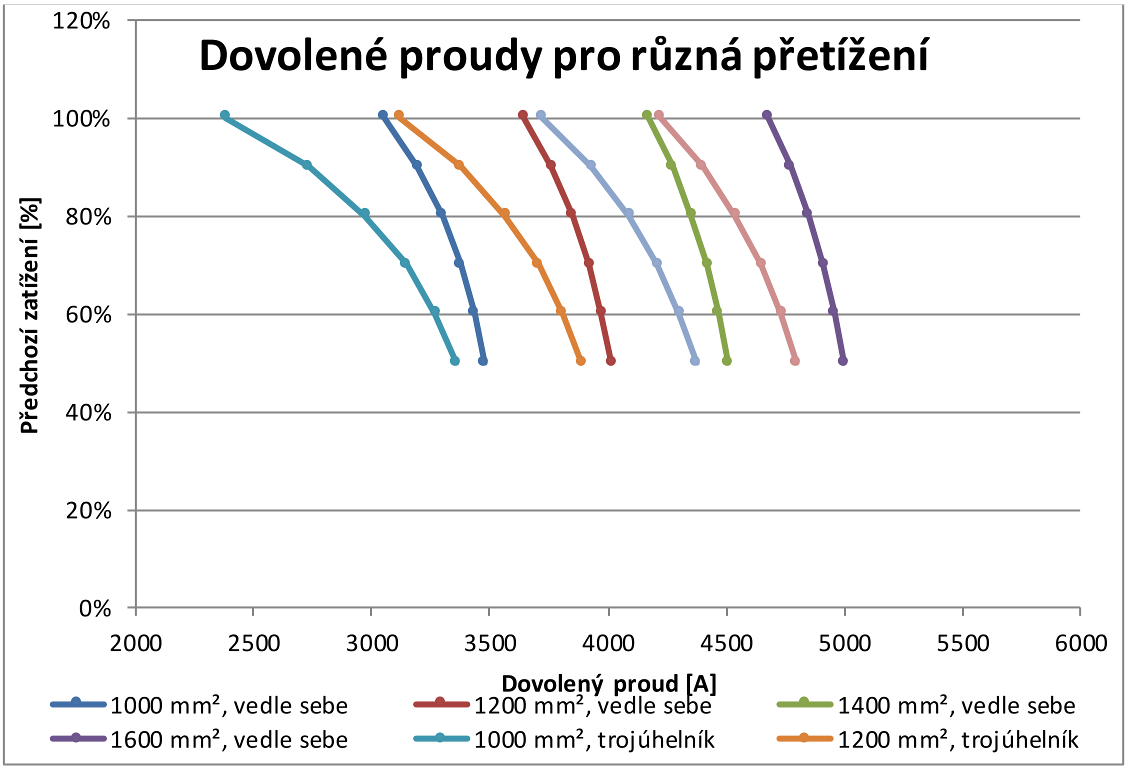
Přetížení kabelů v kabelovém kanále

Pro přetížení jsem počítal se všemi průřezy kabelů jako tomu bylo v ustáleném stavu. Všechny průřezy splnili podmínku 2208 A, viz tabulka 20 (opět počítáno s počátečním zatížením 60 %). Přechodové stavy potvrzují technickou výhodnost kabelů v kanále, protože s mnohem menším průřezem kabelu splníme s dostatečnou rezervou požadované podmínky.

Tabulka 20: Dlouhý přech. stav pro kabely v kanále

Veličina	**Jednotka**	**Vedle sebe**				**Trojúhelník**			
		1000 mm^2	**1200** mm^2	**1400** mm^2	**1600** mm^2	**1000** mm^2	**1200** mm^2	**1400** mm^2	**1600** mm^2
Dovolený proud při přetížení pro 1 kb	**A**	1717	1987	2235	2481	1634	1905	2152	2367
Dovolený proud při přetížení pro 2 kb	**A**	3434	3973	4470	4961	3269	3809	4305	4733
Přenos MVA pro 1 kb	**MVA**	327	379	426	473	311	363	410	451
Přenos MVA pro 2 kb	**MVA**	654	757	852	945	623	726	820	902

Graf 18 je analogický grafu 17, zobrazuje dovolené proudy pro jednotlivá přetížení v závislosti na předchozím zatížení v ustáleném stavu pro všechny průřezy kabelů v kanálu a jejich konfigurace. Vidíme, že pro vyšší předchozí zatížení je dovolený proud nižší, ale rychle narůstá pro nižší zatížení u konfigurace v trojúhelníku. U konfigurace vedle sebe je nárůst menší.



Graf 18

Krátké přechodové děje

Přetížení kabelů v chráničkách a kabelů uložených v zemi

Dalším typem přetížení je krátkodobé přetížení. Obecně se požaduje přetížení 130 % po dobu 1 hod. Pro tuto kapitolu jsem vybral pouze hodnoty kabelů v chráničkách, protože hodnoty kabelů uložených přímo v zemi jsou podobné, neboť jak již bylo řečeno pro krátké přechodové děje je vliv okolní zeminy popř. okolní chráničky zanedbatelný. Oproti dlouhým přechodovým stavům se krátké odlišují Van Wormerovým koeficientem a dále výpočtem Q_B, viz Teoretická část Kapitola 5.

Tabulka 21: Krátký přech. stav kabelů v chráničkách

Veličina	Jednotka	Typ kabelu			
		1600 mm^2 o o o	2000 mm^2 o o o	1600 mm^2 Δ	2000 mm^2 Δ
Dovolený proud při přetížení pro 1 kb	A	2589	3116	2524	2974
Dovolený proud při přetížení pro 2 kb	A	5178	6232	5048	5949
Přenos MVA pro 1 kb	MVA	493	594	481	567
Přenos MVA pro 2 kb	MVA	987	1187	962	1133

Vidíme z tabulky 21, že přetížení 2392 A vyhoví všechna vedení o dvou kabelech a dokonce s poměrně velkou rezervou i pro jeden samostatný kabel.

Přetížení kabelů v kabelovém kanále

Tabulka 22: Krátký přech. stav kabelů v kanále

Veličina	Jednotka	Vedle sebe				Trojúhelník			
		1000 mm^2	1200 mm^2	1400 mm^2	1600 mm^2	1000 mm^2	1200 mm^2	1400 mm^2	1600 mm^2
Dovolený proud při přetížení pro 1 kb	**A**	1770	2167	2523	2861	1321	1839	2251	2592
Dovolený proud při přetížení pro 2 kb	**A**	3540	4334	5045	5721	2642	3677	4502	5184
Přenos MVA pro 1 kb	**MVA**	337	413	481	545	252	350	429	494
Přenos MVA pro 2 kb	**MVA**	674	826	961	1090	503	701	858	988

Z tabulky 22 plyne, že pro nižší průřezy není nárůst dovoleného proudu tak velký. Nicméně již u průřezu 2000 mm^2 ve vodorovné formaci je rozdíl mezi 2 hodinovým přechodovým dějem a 1 hod. skoro 400 A.

Tyto informace o přetížení mohou být zajímavou informací pro dispečera v situacích, kdy dojde k poruše a díky těmto datům má čas se správně rozhodnout. Dále je tato informace důležitá z toho důvodu že víme, jak moc při přetížení můžeme kabel zatěžovat resp. přetěžovat.

8.7 Zhodnocení

Pro kabelový propoj mezi rozvodnami 400 kV a 110 kV mezi společnostmi ČEPS a PRE bylo nutné zvolit nový kabel, který bude tyto rozvodny propojovat. Pomocí výpočtů se došlo k návrhu optimálního průřezu kabelu. Vypočítaný průřez 2000 mm^2 v konfiguraci vedle sebe je schopen plně pokrýt požadavky obou společností na bezpečný provoz jak v ustáleném stavu, tak i v přechodovém stavu s požadavkem na přetížení vedení. Dále byla ukázána technická výhodnost větraného kabelového kanálu, kde by bylo možno využít kabely až s polovičním průřezem oproti kopané trase.

Toto řešení nebylo přijato vzhledem k vyšším investičním nákladům za stavební část kabelového kanálu. Kabely také vykázaly velice dobré vlastnosti při přechodových dějích. Pokud bychom uvažovali standardní podmínky požadované např. společností ČEPS, tzn. 60 % zatížení v ustáleném stavu s následným přetížením na 120 % po dobu 2 hodin a 130 % po dobu jedné hodiny, což znamená proud 2208 A, resp. 2392 A, tak žádné vedení (2 kabely) nemělo problém požadavek na dovolený proud splnit. Většina vedení přesáhla dvojnásobně toto požadované přetížení, např. kabelové vedení s průřezem 2000 mm^2 o o o s proudem 5315 A dosáhlo přetížitelnosti až 288 % po dobu 2 hodin a dokonce 338 % (6232 A) po dobu 1 hodiny. U normálního zatížení kabelového vedení můžeme ve většině případů počítat se zatížením 50 % i méně, což dále zvyšuje dovolený proud kabelového vedení při přetížení.

Výše uvedená fakta ukazují, že kabel při splnění podmínek uložení a zapojení podle studie není slabým místem energetického systému a všem požadavkům provozovatelů vyhovuje.

Pro první kritické místo dojde k rozšíření kabelového koridoru tak, aby bylo toto kabelové vedení schopno přenést požadovaný jmenovitý výkon transformátoru. Tímto opatřením se provozovatelé vyhnuly průřezu 2500 mm^2. Druhé kritické místo vyhovělo pro průřez 2000 mm^2 v obou konfiguracích a nebylo potřeba koridor rozšířit. U třetího případu vyhovuje průřez 2000 mm^2 také bez dodatečných podmínek na rozšíření koridoru.

Kapitola 9 - Závěr

Cílem této diplomové práce bylo s pomocí výpočtů a simulací zjistit přenosovou zatížitelnost kabelových vedení. V teoretické části a v přílohách byly rozebrány a odvozeny vztahy nutné k výpočtům a simulacím. V praktické části byly provedeny dvě analýzy.

První analýza se zabývala již existujícím vedením 22 kV, které je málo výkonově zatížené a cílem této analýzy bylo prozkoumání, zdali je toto kabelové vedení schopné přenést navýšení výkonu na požadovanou konstantní hodnotu 10 MW a 12,5 MW. Na výsledcích je patrné, že kabely typu AXEKCY jsou schopné trvale přenést výkon 10 MW a 12,5 MW. Ovšem starší typy kabelů AMKKTOYPV jsou schopny přenést konstantní výkon pouze 10 MW.

Druhá analýza se věnovala plánovanému kabelovému propojení mezi rozvodnami 400 kV a 110 kV mezi společnostmi ČEPS a PRE. Na základě této analýzy byl vybrán vhodný průřez kabelu, jeho konfigurace a provozní systému SPB (jednostranné uzemnění), který se ukázal jako výhodnější než systém BEB (oboustranné uzemnění). Dále byl navržen kabelový koridor, resp. jeho šířka. Poté byla prostudována možnost kabelového kanálu proti uložení v kopané trase. Z výpočtu vyšlo, že kabely uložené v kanále mohou mít i dvojnásobně menší průřez, než kabely uložené v kopané trase, a zároveň budou schopny přenést požadovaný výkon transformátoru.

Poslední část této analýzy ukázala, že požadovaná přetížení nepředstavují pro kabely zásadní velký problém. Kabelová vedení jsou schopná přenést v požadovaném čase přetížení i více než dvojnásobný výkon.

Přílohy

Odvození ztrát

Indukovaný proud v plášti (stínění) a armování

Podmínkou výpočtu proudů indukovaných v plášti (stínění) a armování je znalost teploty pláště, která se dá spočítat na základě parametrů kabelu, k tomuto výsledku dojdeme iterativní metodou. Pro první výpočet musí být teplota pláště odhadnuta, tento odhad může být prověřen později, jakmile budou provedeny všechny nezbytné výpočty týkající se proudu. Pokud by došlo k nepřesnostem, pak by museli být výpočty přepočítány. Ztráty v plášti označme λ_1, tyto ztráty se skládají ze ztrát indukovanými proudy (cirkulujícími) λ_1' a ztrát vířivými proudy λ_1''. Můžeme tedy psát:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \tag{P-1}$$

Ztráty v armování se skládají také ze dvou složek, a to ztrát indukovanými (cirkulujícími) proudy λ_2' a hysterézních ztrát λ_2''. Můžeme tedy psát:

$$\lambda_2 = \lambda_2' + \lambda_2'' \tag{P-2}$$

Pro jednožílové kabely s oběma konci uzemněnými (BEB) se počítá pouze se ztrátami indukovanými proudy, protože ztráty vířivými proudy jsou velmi malé. U single-point bondingu (SPB) se indukované proudy neindukují.

Předpoklad je tří fázové vedení a komplexní proudy tekoucí vodičem I_c, stíněním I_s a armováním I_a. Pak ztráty v plášti a armování zapíšeme:

$$\lambda_1 = \frac{|I_s|^2 R_s}{|I_s|^2 R} \tag{P-3}$$

$$\lambda_1 = \frac{|I_a|^2 R_a}{|I_c|^2 R} \tag{P-4}$$

Kde R [Ω/m] je AC odpor vodiče, při pracovní teplotě a R_s [Ω/m] je odpor pláště a R_a [Ω/m] je odpor armování. Jak vyplývá z výše uvedených rovnic, aby bylo možno spočítat ztráty, pak musí být proudy pláště a armování vyjádřeny jako funkce závislé na proudu vodiče. Proudy I_s a I_a můžeme vypočítat z následující závislosti na napětí:

$$\begin{pmatrix} U_c \\ U_s \\ U_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} & Z_{ca} \\ Z_{sc} & Z_{ss} & Z_{sa} \\ Z_{ac} & Z_{as} & Z_{aa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_c \\ I_s \\ I_a \end{pmatrix} \tag{P-5}$$

Kde Z_{ij} je impedance mezi elementy i a j. Výpočet těchto impedancí je diskutován dále. Přístup k odvození indukčností bude skrz výpočet vazebných toků, kromě indukčností vyplývajících z magnetických toků tloušťky armování. Obr. 31 poslouží k ilustraci konceptu vazebných toků. tento obrázek zobrazuje kabely v trojúhelníkové formaci, kde je každý kabel složen z jádra, pláště a armování. Dále je zde zobrazen magnetický tok způsobený proudy ve spodním vodiči. Např. impedance vodič-vodič Z_{cc} je počítán pro spodní vodič na obrázku 31. Tato impedance se skládá z odprou vodiče, vlastní reaktance a vzájemná reaktance s dalšími dvěma vodiči. Vlastní indukčnost je vazba toku spodního vodiče s jeho proudem, vzájemná indukčnost je vazba toku spodního vodiče s proudem v ostatních vodičích. Výpočet vodič-vodič indukčnosti zahrnuje jak vlastní tak vzájemnou indukčnost a skládá se z integrace vazebných toků vodiče z prostředku vodiče do čerchované čáry procházející středy dalších dvou vodičů jak je zobrazeno na obr. 31 . Indukčnosti ve vodiči a v tloušťce pláště a armování budou odvozeny v následujících podkapitolách, nejprve začněme vnitřními indukčnostmi.

Vnitřní indukčnost dutého vodiče

Pro vnitřní indukčnost dutého vodiče na jednotku celkového proudu, jednotku vnějšího poloměru a vnitřního poloměru a (obr. 32) platí pro proud vodiče o poloměru menším než r:

$$I_{<r} = \frac{r^2 - a^2}{1 - a^2} \tag{P-6}$$

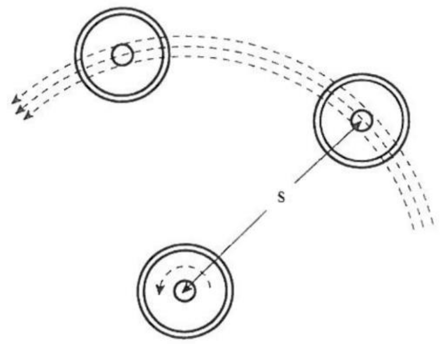
tok je dán jako:

$$d\Phi = \frac{\mu_0 I_{<r}}{2\pi r} dr \tag{P-7}$$

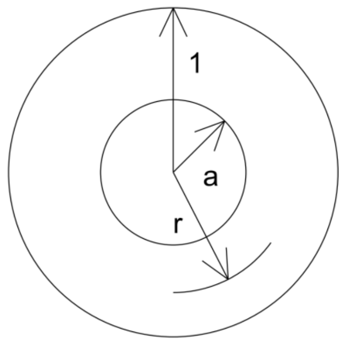
Vnitřní indukčnost dutého vodiče je pak:

$$L_{cc-int} = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_a^1 \frac{I_{<r}^2}{r} dr = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\frac{1}{4} - a^2 + a^4 (\frac{3}{4} - \ln a)}{(1 - a^2)^2} \right] \tag{P-8}$$

kde a je poměr mezi vnitřním a vnějším poloměrem.
Pro pevné vodiče ($a = 0$), se redukuje na $\left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right) . \left(\frac{1}{4}\right)$.
Pro $a \to 1$ konverguje k $\left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right) . \left(\frac{1}{3}\right) (1 - a) = \left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right) . \left(\frac{1}{4}\right) (\frac{t_s}{r_s})$.
Kde t_s je střední tloušťka pláště [mm], r_s je střední poloměr pláště [mm]



Obrázek 31



Obrázek 32: Dutý vodič

Zdroj: [7]

Vnitřní indukčnost pláště vodiče

Pro střední poloměr r_s a tloušťky t_s, hustota toku vodiče na jednotku proudu vodiče je zhruba daná vztahem:

$$B_c \approx \mu_0 / (2\pi r_s^*) \tag{P-9}$$

Poměr mezi proudem pláště a poloměrem r je zhruba:

$$I_{<r} \approx (r - r_s + \frac{t_s}{2})/t_s \tag{P-10}$$

Vnitřní indukčnost je pak daná vazebním tokem takto:

$$L_{cs-int} \approx \frac{\mu_0}{2\pi r_s}\int_{r_s-t_s/2}^{r_s+t_s/2} \frac{r - r_s + t_s/2}{t_s} dr = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_s + t_s/2}{r_s}\right) \tag{P-11}$$

Vnitřní indukčnost plášť-plášť

Pro střední poloměr r_s a tloušťku t_s a jednotky celkového proudu ve stínění, poměr mezi proudem pláště a vzdáleností x vnitřního průměru je roven $I_{<x} = x/t_s$. Tok $d\Phi$ obklopující v dx tento proud je daný:

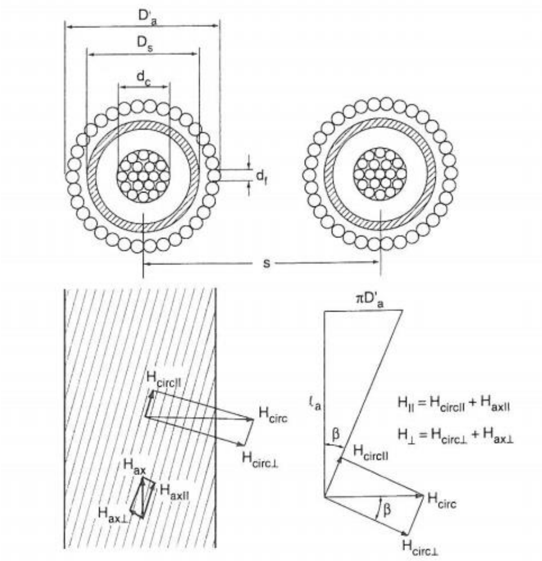
$$d\Phi = \frac{\mu_0 I_{<x}}{2\pi r_s} dx \tag{P-12}$$

Indukčnost je dána integrálem toku krát poměr proudu, který ho obklopuje, takže vnitřní vlastní indukčnost pak je:

$$L_{ss-int} = \frac{\mu_0}{2\pi r_s}\int_0^{t_s} I_{<x}^2 dr = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{1}{3}\frac{t_s}{r_s} \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_s + t_s/2}{r_s + t_s/6}\right) \tag{P-13}$$

Vnitřní indukčnost armování

Magnetický tok v tloušťce armování ovlivňuje všechny indukčnosti. Vnitřní indukčnosti plynoucí z toku v armovaných páscích nebo drátech jsou poměrně komplikované. Armování může být počítáno jako cívka obklopená kruhovým tokem jako výsledek proudů vodiče a pláště a vlastního proudu armování. Dále armování obklopuje solenoidní tok jako výsledek svého vlastního proudu. Tento solenoidní tok není nicméně uvažován v normě IEC 287. magnetické pole v tloušťce armování je superpozicí axiálních a kruhových polí. Kruhové pole z vodiče a pláště jsou téměř uniformní mezi vnitřním a vnějším povrchem tenkého armování a jsou tedy považovány za uniformní. Pole vlastního armování nejsou ovšem uniformní. Axiální pole je maximum na vnitřní vrstvě armování a klesá k nule na vnější vrstvě, protože axiální pole při daném poloměru je způsobeno proudem z většího poloměru. Naopak kruhové pole je maximální na vnější vrstvě armování a klesá k nule na vnitřní vrstvě, protože kruhové pole při daném poloměru je způsobené proudem na menším poloměru. Situace je dále komplikovaná faktem, že magnetická permeabilita drátů je rozdílná, paralelní a kolmá na dráty. Kruhové a axiální pole v armování musí tedy být řešeny ve směrech paralelních a kolmých na dráty (obr. 33).



Obrázek 33: Magnetické pole v paralelních a kolmých složkách Zdroj: [7]

Pro odvození indukčních vztahů je užita spirálovitá geometrie proudů a toků vedoucích k vazebným tokům, která je poměrně složitá na vizualizaci, proto je odvození provedeno pomocí integrace komplexního výkonu přes objem armování. Tyto integrace jsou identické výpočtům vazebných toků. Celkový elektromagnetický výkon je dán Poyntingovým teorémem:

$$P + jQ = \frac{d}{dt}\left[\iint \int (\vec{J} \times \vec{E} + \vec{B} \times \vec{H}) dV\right] \tag{P-14}$$

Kde $\vec{J}$ je proudová hustota [A/m^2], $\vec{E}$ je intenzita elektrického pole [V/m], $\vec{B}$ je magnetická indukce [T], $\vec{H}$ je intenzita magnetického pole [A/m]

Výraz $\vec{J} \times \vec{E}$ resultuje ve ztrátový výkon I^2R. Druhý výraz, integrovaný pouze přes objem armování, je použit k získání vnitřní indukčnosti armování, a také jako příspěvek toho, že vnitřní tok armování způsobuje indukčnost všech ostatních kabelů.

Komplexní výkon je dán jako:

$$P + jQ = \sum_{i,j} (I_i . I_j) Z_{ij} \tag{P-15}$$

Kde Z_{ij} je vzájemná (nebo vlastní pro $i = j$) impedance.

$$I_i . I_j = Re(I_i)Re(I_j) + Im(I_i)Im(I_j) = (I_i I_j^* + I_i^* I_j)/2 \tag{P-16}$$

Porovnáním těchto dvou rovnic nám dovoluje identifikovat $j\omega L_{ij}$ (část Z_{ij}) ve výkonu získanem z rovnice (P-15). Všechny proudy, napětí a pole jsom v RMS hodnotách.

Pro zjednodušení výpočtů jsou pro armování uvažovány pásky a ne dráty, chyba kterou se tím dopustíme je zanedbatelná. Střední poloměr a tloušťka jsou určeny jako r_a a t_a. Délka pásků armování je l_a. Pole v pásce je získané řešením solenoidního pole $(1 - x)I_a/l_a$ a kruhového pole $\frac{I_c + I_s + xI_a}{2\pi r_a}$ paralelně a kolmo na pásky. Paralelní a kolmé složky magnetického pole na pozici x v armování (za předpokladu uniformní proudové hustoty) jsou:

$$H_{//} = (1-x)I_a \frac{\cos\beta}{l_a} + (I_c + I_s + xI_a)\frac{\sin\beta}{2\pi r_a} = (I_c + I_s + xI_a)\frac{\cos\beta}{l_a} \quad \text{(P-17)}$$

$$H_{\perp} = -(1-x)I_a \frac{\sin\beta}{l_a} + (I_c + I_s + xI_a)\frac{\cos\beta}{2\pi r_a}$$
$$= [(I_c + I_s)\cos^2\beta + I_a(x - \sin^2\beta)]\frac{1}{2\pi r_a \cos\beta} \quad \text{(P-18)}$$

Kde I_c je RMS hodnota proudu vodiče [A], I_s je RMS hodnota proudu pláště [A], I_a RMS hodnota proudu armování [A], x je vzdálenost od vnitřní vrstvy/tloušťka armování ($x = 0$ na vnitřní vrstvě, $x = 1$ na vnější vrstvě), β je spirálovitý úhel uložení s ohledem na osu kabelu, l_a je spirálovitá délka armování [mm], r_a je střední poloměr armování [mm]

První výraz v $H_{\perp}$ je –(1-x), který zohledňuje axiální pole armování a jeho kolmá složka v pásce je opačného směru na kolmé složky všech kruhových polí.

Uvažujme nyní druhý výraz na pravé straně rovnice (P-14), komplexní paralelní výkon je daný:

$$(P + jQ)_{//} = j\omega\mu_0\mu_l H_{//} H_{//}^*$$

$$= \frac{j\omega\mu_0\mu_l}{l_a^2} |I_c + I_s + I_a|^2 \cos^2\beta$$

$$= \frac{j\omega\mu_0\mu_l A_a}{l_a^2} |I_c + I_s + I_a|^2 \cos^2\beta \quad \text{(P-19)}$$

$$= \frac{j\omega\mu_0\mu_l A_a}{l_a^2} |I_c + I_s + I_a|^2 \cos\beta$$

$$= \frac{j\omega\mu_0\mu_l A_a}{2\pi l_a r_a} |I_c + I_s + I_a|^2 \sin\beta$$

Kde μ_l je komplexní relativní longitudinální magnetická permeabilita, A_a je součet drátů nebo průřezů pásek $[\mathrm{mm}^2]$

$$|I_c + I_s + I_a|^2 = |I_c|^2 + |I_s|^2 + |I_a|^2 + 2I_cI_s + 2I_cI_a + 2I_sI_a \quad \text{(P-20)}$$

Z tohoto výrazu a rovnic (P-15) a (P-16) lze vidět, že výraz $\left(\frac{\mu_0\mu_l A_a}{2\pi l_a}\right)$ přispívá rovnocenně všem indukčnostem kabelu L_{cc}, L_{ss}, L_{sa}, L_{ac}, L_{as} a L_{aa}.

Kolmá složka komplexního výkonu je pak daná:

$$(P + jQ)_{\perp} = j\omega\mu_0\mu_t H_{\perp} H_{\perp}^* \quad \text{(P-21)}$$

$$= j\omega\mu_0\mu_t\int_0^1[H_\perp H_\perp^*](2\pi r_a t_a)dx$$

$$= \frac{j\omega\mu_0\mu_t}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}[|I_c + I_s|^2\cos^2\beta + |I_a|^2\left(\frac{1}{3\cos^2\beta} - \sin^2\beta\right) + (I_c + I_s)I_a\left(\frac{1}{2} - \sin^2\beta\right)$$

Kde μ_t je komplexní relativní transversální magnetická permeabilita.

Pro kruhové dráty byla IEC 287 upravena tak, že transversální složka může být použita pro válcovitá tělesa. Ačkoliv je výše uvedená rovnice (P-21) komplexní, v IEC 287 je s ní počítáno jako s reálnou. Z tohoto důvodu budeme s touto veličinou v dalším uvažování počítat jako s reálnou proměnnou, protože je to navíc poměrně malá hodnota v porovnání s podélnou permeabilitou a je tedy velmi mále spjata s hysterezními ztrátami. Například pro armování z přilnavých železných drátů je $\mu_t = 10$, z nepřilnavých železných drátů $\mu_t = 1$.

Z rovnic pro kolmý výkon a z rovnic (P-15) a (P-16) můžeme psát:

$[\frac{\mu_0\mu_t}{2\pi}](\frac{r_a}{t_a})\cos^2\beta$	Přispívá rovnocenně do $L_{cc}, L_{cs}, L_{sc}\ a\ L_{ss}$.	(P-22)
$\left[\frac{\mu_0\mu_t}{2\pi}\right]\left(\frac{r_a}{t_a}\right)[1/(3\cos^2\beta) - \sin^2\beta]$	Přispívá do L_{aa}.	(P-23)
$\left[\frac{\mu_0\mu_t}{2\pi}\right]\left(\frac{r_a}{t_a}\right)[1/2 - \sin^2\beta]$	Přispívá rovnocenně do $L_{ca}, L_{sa}, L_{ac}\ a\ L_{as}$.	(P-24)

Celkový příspěvek vnitřního toku armování do každého kabelu je daný jako suma paralelních a kolmých výkonů.

Celková indukčnost

Na základě odvození vnitřních indukčností v předcházející podkapitole můžeme nyní odvodit výrazy pro celkové indukčnosti všech kabelových komponent.

Indukčnost mezi vodiči

Integrací vazebného toku mezi středem jádra vodiče a vnější vrstvou dostáváme vnitřní indukčnost L_{cc-int}, kterou přesněji získáme z rovnice (P-8). Permeabilita pláště (stínění) je uvažována μ_0 a tím přítomnost pláště nevytváří žádný rozdíl v množství toku vodičem v tloušťce stěn pláště. Nicméně přítomnost pláště způsobuje rozdíl v celkovém toku, neboť tok vodičem indukuje proudy v plášti, které jsou brány v potaz pro výpočet indukčnosti mezi vodičem a pláštěm. Pokud je přítomnost armování dočasně ignorována, pak vnější indukčnost mezi vodiči je daná jako integrál toku z povrchu vodiče ve vzdálenosti s.

$$L_{ext-no\,armor} = \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{r_c}^{s}\frac{1}{r}\,dr = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{s}{r_c}\right) \tag{P-25}$$

Kde μ_0 je magnetická permeabilita vakua: $4\pi.10^{-7}$ [H/m], r_c je vnější poloměr vodiče [mm], s je axiální vzdálenost mezi vodiči [mm]

Magnetické armování způsobuje rozdíl v indukčnosti mezi vodiči kvůli své vysoké magnetické permeabilitě. Dalším krokem je třeba odečíst příspěvek zahrnutý v rovnici 8.21 pro mezeru, v které se armování nachází (toto platí pro starší typy kabelů):

$$L_{armor\,space} = \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{r_a-t_a/2}^{r_a+t_a/2}\frac{1}{r}\,dr \approx \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a} \tag{P-26}$$

Celková indukčnost mezi vodiči je získána z rovnic (P-8), (P-21) a (P-22).

$$L_{cc} = \frac{\mu_0}{2\pi}[f] + \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{s}{r_c}\right) - \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a} + \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}[\mu_t\cos^2\beta] + \frac{\mu_0\mu_l A_a}{2\pi r_a l_a}\sin\beta \tag{P-27}$$

Kde

$$f = \frac{\frac{1}{4} - a^2 + a^4(\frac{3}{4} - \ln a)}{(1-a^2)^2} \tag{P-28}$$

a a je poměr mezi vnitřním a vnějším poloměrem dutého vodiče.

Dále:

β je úhel spirálovitého uložení vzhledem k ose kabelu (obr. 33), l_a je délka spirálovitého uložení armování [mm], r_a je střední poloměr armování [mm], t_a je tloušťka armování [mm], μ_l je komplexní relativní longitudiální magnetická permeabilita (imaginární část z ní popisuje hysterézní ztráty magentického materiálu, μ_t je komplexní relativní transversální magnetická permeabilita, A_a je suma drátů nebo průřezů pásek [mm^2]

První dva výrazy mohou být kombinovány v jeden při definování efektivního poloměru vodiče αr_c, kde $\alpha = \exp(-f)$. Pro pevný vodič je $\alpha = \exp\left(-\frac{1}{4}\right) = 0{,}778$. Celková indukčnost mezi vodiči se poté zredukuje na výraz:

$$L_{cc} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{s}{\alpha r_c}\right) + \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}[\mu_t\cos^2\beta - 1] + \frac{\mu_0\mu_l A_a}{2\pi r_a l_a}\sin\beta \tag{P-29}$$

Pro nemagnetické armování, poslední dva členy jsou zanedbány jou pro magnetické armování zanedbány. Pro nepřiléhavé magnetické armování je druhý člen zanedbán.

Indukčnost vodič-plášť (stínění)

Odvození je podobné indukčnosti mezi vodiči. Vazebný tok je mezi tokem spodního vodiče na obr. 31 a všemi třemi proudy pláště (stínění). Vnitřní indukčnost mezi vodičem a pláštěm L_{cs-int} byla získána v rovnici (P-11). Vnější vazebný tok mezi vodičem a pláštěm se získá integrací z vnějšího poloměru pláště do vzdálenosti s a poté vezmeme v úvahu přítomnost armování. Celková indukčnost mezi vodičem a pláštěm pak je:

$$L_{cs} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{r_s + t_s/2}{r_s}\right) + \frac{\mu_0}{2\pi}\ln(\frac{s}{r_s + \frac{t_s}{2}}) + \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}[\mu_t \cos^2\beta - 1] + \frac{\mu_0\mu_l A_a}{2\pi r_a l_a}\sin\beta$$
$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{s}{r_s}\right) + \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}[\mu_t \cos^2\beta - 1] + \frac{\mu_0\mu_l A_a}{2\pi r_a l_a}\sin\beta \quad \text{(P-30)}$$

Kde:
r_s je střední poloměr pláště [mm], t_s je tloušťka pláště [mm]
Z tohoto vztahu vyplývá, že v rámci tloušťky pláště tok ve vodiči váže zhruba polovinu proudu v plášti. Vnitřní a vnější výrazy s logaritmem mohou tedy být kombinovány pro vhodnou aproximaci jako integrál toku ze středního poloměru pláště do vzdálenosti s. Pro nemagnetická armování budou opět poslední dva výrazy ignorovány. Pro nepřiléhavá magnetická armování je opět druhý člen zanedbán.

Indukčnost plášť-plášť

Indukčnost mezi plášti je vazba toku spodního pláště s proudy ve všech třech pláštích (obr. 31). Vnitřní indukčnost mezi plášti L_{ss-int} je daná rovnicí (P-13).

Vnější vazebný tok mezi plášti je získán integrací vnějšího poloměru pláště do vzdálenosti s a poté s předpokladem přítomnosti armování je indukčnost dána:

$$L_{cs} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{r_s + t_s/2}{r_s + t_s/6}\right) + \frac{\mu_0}{2\pi}\ln(\frac{s}{r_s + \frac{t_s}{2}}) + \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}[\mu_t \cos^2\beta - 1] + \frac{\mu_0\mu_l A_a}{2\pi r_a l_a}\sin\beta$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\ln(\frac{s}{r_s + \frac{t_s}{6}}) + \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}[\mu_t \cos^2\beta - 1] + \frac{\mu_0\mu_l A_a}{2\pi r_a l_a}\sin\beta \quad \text{(P-31)}$$

Z výše uvedených rovnic můžeme vypozorovat, že v rámci tloušťky pláště, jeho vlastní tok váže přibližně jednu třetinu proudu pláště. Výraz s vnějším a vnitřním logaritmem pak tedy může být kombinován pro vhodnou aproximaci jako integrál toku od $r_s + t_s/6$ pláště do vzdálenosti s. Pro manuální výpočty, může být výraz $\frac{t_s}{6}$ zanedbán.

Indukčnost armování

Vnější indukčnost armování lze získat integrací od vnější vrstvy armování $r_a + t_a/2$ do vzdálenosti s.

$$L_{aa} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln(\frac{s}{r_a + \frac{t_a}{2}}) \quad \text{(P-32)}$$

Následující vztahy pro indukčnost vztahující se k armování jsou dány jako suma vnějších indukčností a vnitřních indukčností jak pro paralelní, tak i kolmý výkon. Indukčnost vodič-armování a plášť-armování jsou dány jako:

$$L_{ca} = L_{sa} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(\frac{s}{r_a + \frac{t_a}{2}}) + \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \frac{t_a}{r_a} [\frac{1}{2} - \sin^2 \beta] + \frac{\mu_0 \mu_l A_a}{2\pi r_a l_a} \sin \beta \tag{P-33}$$

Impedance Kabelů

Aby bylo možné spočítat faktor ztrát je nutné, aby byly impedance rozděleny na reálnou a imaginární část. Každá indukčnost kabelu zahrnuje podélný vnitřní člen pro armování jako:

$$jX_L = \frac{j\omega \mu_0 \mu_l A_a}{2\pi r_a l_a} \sin \beta \tag{P-34}$$

Kde:

ω je úhlový kmitočet [Hz], μ_l je komplexní relativní longitudiální magnetická permeabilita

Rovnice (P-31) může být dále rozdělena na imaginární a reálnou část, jak je ukázáno níže. Komplexní podélná magnetická permeabilita je vyjádřena jako:

$$\mu_l = |\mu_l|(\cos \gamma - j \sin \gamma) \tag{P-35}$$

Kde:

γ je úhel časového zpoždění magnetické indukce $\vec{B}$ za intenzitou magnetického pole $\vec{H}$. Reálná a imaginární část z rovnice (P-31) jsou pak:

$$B_0 = Im(jX_L) = \frac{\omega \mu_0 |\mu_l| A_a}{2\pi r_a l_a} \sin \beta \cos \gamma \tag{P-36}$$

a

$$B_2 = Re(jX_L) = \frac{\omega \mu_0 |\mu_l| A_a}{2\pi r_a l_a} \sin \beta \sin \gamma \tag{P-37}$$

Pro rovnici (P-25) by impedance vodič-vodič byla daná jako:

$$Z_{cc} = (R + B_2) + \frac{j\omega \mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{s}{\alpha r_c}\right) + jB_0 + \frac{j\omega \mu_0}{2\pi} \frac{t_a}{r_a} [\mu_l \cos^2 \beta - 1] \tag{P-38}$$

Kde:

R je AC resistence vodiče [Ω/m], s je vzdálenost mezi kabely v trojúhelníkovém svazku nebo geometrickém středu tří kabelů uložených vedle sebe s mezerou [mm], αr_c je efektivní poloměr vodiče [mm].

Dále z rovnice (P-26), impedance vodič-plášť bude dána následujícím vztahem:

$$Z_{cs} = Z_{sc} = B_2 + jB_1 \tag{P-39}$$

Kde:

$$B_1 = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{s}{r_s}\right) + B_0 + \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \frac{t_a}{r_a} [\mu_l \cos^2 \beta - 1] \tag{P-40}$$

Impedance vodič-armování a plášť-armování se získají z rovnice (P-29).

$$Z_{ca} = Z_{ac} = Z_{sa} = Z_{as} = B_2 + jB_3 \tag{P-41}$$

Kde:

$$B_3 = \frac{\omega\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{s}{r_a + \frac{t_a}{2}}\right) + B_0 + \frac{\omega\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}\mu_l\left[\frac{1}{2} - \sin^2\beta\right] \tag{P-42}$$

Impedance plášť-plášť je získána z rovnice (P-27). Pro zjednodušení může být člen $t_s/6$ zanedbán a dopustíme se tím zanedbatelné chyby ve výpočtech. Pak dostáváme výraz:

$$Z_{ss} \approx (R_s + B_2) + jB_1 \tag{P-43}$$

Z rovnice (P-30) dostáváme pro výpočet impedance armování-armování vztah:

$$Z_{aa} \approx (R_a + B_2) + jB_4 \tag{P-44}$$

Kde:

$$B_4 = \frac{\omega\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{s}{r_a + \frac{t_a}{2}}\right) + B_0 + \frac{\omega\mu_0}{2\pi}\frac{t_a}{r_a}\mu_l\left[\frac{1}{3\cos^2\beta} - \sin^2\beta\right] \tag{P-45}$$

R_a je resistence armování zahrnující $1/\cos\beta$, [Ω/m]

Faktor ztrát

Napětí U_s a U_a v rovnici (P-5) jsou nulové pokud jsou oba konce pláště (stínění) a armování uzemněny a napětí v plášti a armování je popsáno následující rovnicí (BEB):

$$\begin{bmatrix} (R_s + B_2) + jB_1 & B_2 + jB_3 \\ B_2 + jB_3 & (R_a + B_2) + jB_4 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_s \\ I_a \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} (B_2 + jB_1)I_s \\ (B_2 + jB_3)I_a \end{bmatrix} \tag{P-46}$$

Řešení pro proudy I_s a I_a jsou následující:

$$I_s = \frac{(B_2 + jB_1)[(R_a + B_2) + jB_4] - (B_2 + jB_3)^2}{[(R_s + B_2) + jB_1][(R_a + B_2) + jB_4] - (B_2 + jB_3)^2} I_c \tag{P-47}$$

a

$$I_s = \frac{(B_2 + jB_3)R_s}{[(R_s + B_2) + jB_1][(R_a + B_2) + jB_4] - (B_2 + jB_3)^2} I_c \tag{P-48}$$

Pak definujme:

$$Y_1 = B_2(R_a + B_2) - B_1B_4 - B_2^2 + B_3^2 \tag{P-49}$$

$$Y_2 = B_1(R_a + B_2) - B_1B_4 - B_2^2 - 2B_2B_3 \tag{P-50}$$

$$Y_3 = R_s(R_a + B_2) \tag{P-51}$$

$$Y_4 = R_sB_4 \tag{P-52}$$

$$Y_5 = R_sB_2 \tag{P-53}$$

$$Y_6 = R_sB_3 \tag{P-54}$$

Po převzetí reálné a imaginární části z rovnic (P-44) a (P-45) bude řešením:

$$I_s = \frac{Y_1 + jY_2}{(Y_1 + Y_3) + j(Y_2 + Y_4)} I_c \tag{P-55}$$

$$I_a = \frac{Y_5 + jY_6}{(Y_1 + Y_3) + j(Y_2 + Y_4)} I_c \tag{P-56}$$

Definujme $Y = (Y_1 + Y_3)^2 + (Y_2 + Y_4)^2$, poté můžeme psát:

$$|I_s|^2 = \frac{Y_1^2 + Y_2^2}{Y} |I_c|^2 \tag{P-57}$$

$$|I_a|^2 = \frac{Y_5^2 + Y_6^2}{Y} |I_c|^2 \tag{P-58}$$

Faktor ztrát indukovanými proudy pro plášť armování můžeme tedy zapsat jako:

$$\lambda_1' = \frac{|I_s|^2 R_s}{|I_c|^2 R} = \frac{R_s}{R} \frac{Y_1^2 + Y_2^2}{Y} \tag{P-59}$$

a

$$\lambda_2' = \frac{|I_a|^2 R_a}{|I_c|^2 R} = \frac{R_a}{R} \frac{Y_5^2 + Y_6^2}{Y}$$

Hysterézní faktor ztrát (starší typy kabelů) pro armování můžeme zapsat:

$$\lambda_2' = \frac{|I_a + I_c + I_s|^2 B_2}{|I_c|^2 R} = \frac{B_2}{R} \frac{(Y_3 - Y_5)^2 + (Y_4 - Y_6)^2}{Y} \tag{P-60}$$

Armování se nevyskytuje u VN a VVN jednožilových kabelů s izolací XLPE, tedy v dnešní době standartně vyráběné kabely. Nicméně se s ním počítá u třížílových kabelu například s olejem napuštěnou papírovou izolací např. u kabelů ANKTOYPV.

Ztráty indukovanými proudy (cirkulujícími) – speciální případy

Následující vztahy v této podkapitole jsou velice obecné a dají se použít prakticky na všechny možné situace a kombinace, z důvodu úspornosti budou vybrány pouze nejčastější konfigurace pro kabely v trojúhelníku a kabely vedle sebe s mezerou i bez ní.

Dva nebo tři jednožílové kabely v trojúhelníkové konfiguraci se stíněním (pláštěm) na obou koncích uzemněným (BEB)

Jelikož je stínění uzemněno na obou koncích, pak faktor ztrát vířivými proudy je nulový, tedy $\lambda_1'' = 0$, kromě kabelů s velkými segmentovými jádry, v tomto případě je λ_1'' počítána podle kapitoly 2.3.5 v IEC 287.

Pro výpočty uvažujme pouze stínění kabelu, pak v tomto případě poslední dva výrazy rovnice (P-40) zmizí a reaktance B_1, která obvykle bývá označena jako X, má tvar:

$$X = B_1 = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln\frac{2x}{d} = \omega.2.10^{-7} \ln\frac{2s}{d} \tag{P-61}$$

Kde:

s je vzdálenost mezi osou vodiče [mm], d je středmí průměr stínění [mm]
Rovnice (P-57) se tímto redukuje na:

$$I_s = \frac{IX}{\sqrt{R_s^2 + X^2}} \tag{P-62}$$

a faktor ztrát ve stínění je:

$$\boxed{\lambda_1' = \frac{I_s^2 R_s}{I^2 R} = \frac{R_s}{R}\frac{X^2}{R_s^2 + X} = \frac{R_s}{R}\frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}} \tag{P-63}$$

Rovnice (P-63) popisuje to, že λ_1' narůstá s poklesem odporu R vodiče a nárůstu X, což znamená zvětšit průřez vodiče a širší vzdálenost. Faktor ztrát dosahuje maxima při $R_s = X$. Pro typické podmínky $R_s > X$, znamená pokles R_s zvyšuje λ_1'. Toto je obecně důvod proč mají kabely s hliníkovým pláštěm větší ztráty než kabely s olověným pláštěm.

Tři jednožílové kabely vedle sebe s transpozicí (cross-bondngem) a pláštěm uzemněným na obou koncích

Z pohledu transpozice je napětí v plášti ve třetině transponování rovno vektorovému průměru napětí indukovaných v každém ze tří sekcí. Průměrné napětí je dané vztahem:

$$U_l = I\left(X + \frac{X_m}{3}\right)$$

Kde:

X_m je vzájemná reaktance pláště vnějšího kabelu k ostatním dvěma vodičům [Ω/m] = $2.\omega.\,10^{-7}\ln 2$

Výraz $\left(X + \frac{X_m}{3}\right)$ je označen jako X_1 a rovnici (P-61) pak můžeme přepsat na:

$$X_1 = 2\omega.\,10^{-7}\ln\left[2\sqrt[3]{2}\left(\frac{s}{d}\right)\right] \tag{P-64}$$

A rovnice pro výpočet faktoru ztrát, kde X je nahrazen X_1, pak můžeme přepsat:

$$\boxed{\lambda_1' = \frac{R_s}{R}\frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}} \tag{P-65}$$

Také zde je $\lambda_1'' = 0$, kromě kabelů s velkými segmentovými jádry.

Tři jednožílové kabely vedle sebe bez transpozice a pláštěm uzemněným na obou koncích (BEB)

Za předpokladu, že je kabel v rovinném uspořádání a všechny fáze mají mezi sebou stejnou vzdálenost, pak vzájemná indukčnost mezi prostředním vodičem a vnějšími vodiči je

$$P = 2\omega.\,10^{-7}\ln 2\,.\frac{2s}{d} = 2\omega.\,10^{-7}\ln 2 + 2\omega.\,10^{-7}\ln\frac{2s}{d} = X_m + X \tag{P-66}$$

a nechť

$$I_1 = I_2\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \tag{P-67}$$

$$I_3 = I_2\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \quad \text{(P-68)}$$

Pak

$$I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} = 0 \quad \text{(P-69)}$$

$$E_{s1} = E_{s2} = E_{s3} \quad \text{(P-70)}$$

Kde E_0 je zbytkové napětí podél pláště (stínění) kabelu, které obvykle nepřekročí 50 V a mohlo by být nulové, pokud jsou oba konce pláště kabelu uzemněny.

Aplikováním rovnice (P-67)-(P-70) je zbytkové napětí spočítané pro každý plášť samostatně:

$$E_{s1} = E_0 = I_{s1}(R_s + jX) - \frac{1}{2}jI_2(X - X_m) - \frac{\sqrt{3}}{2}I_2(X + X_m) - jI_{s3}X_m \quad \text{(P-71)}$$

$$E_{s2} = E_0 = I_{s2}(R_s + jX) + jI_2X \quad \text{(P-72)}$$

$$E_{s3} = E_0 = I_{s3}(R_s + jX) - \frac{1}{2}jI_2(X - X_m) + \frac{\sqrt{3}}{2}I_2(X + X_m) - jI_{s1}X_m \quad \text{(P-73)}$$

Řešením rovnic (P-67)-(P-70) pro proudy v plášti dostáváme:

$$I_{s1} = \frac{I_2}{2}\left[\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\sqrt{3}R_sP}{R_s^2 + P^2} + j\left(\frac{R_sQ}{R_s^2 + Q^2} - \frac{\sqrt{3}P^2}{R_s^2 + P^2}\right)\right] \quad \text{(P-74)}$$

$$I_{s2} = -I_2\left(\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} + j\frac{R_sQ}{R_s^2 + Q^2}\right) \quad \text{(P-75)}$$

$$I_{s3} = \frac{I_2}{2}\left[\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{\sqrt{3}R_sP}{R_s^2 + P^2} + j\left(\frac{R_sQ}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\sqrt{3}P^2}{R_s^2 + P^2}\right)\right] \quad \text{(P-76)}$$

kde P a Q jsou definovány jako: $P = X_m + X$ a $Q = X - X_m/3$

Pokud vezmeme velikost proudu v plášti z rovnic (P-74)-(P76) a vezmeme-li v úvahu, že $|I_2| = |I|$ dostáváme následující výrazy pro faktory ztrát v plášti (stínění):

Vnější kabel předstihující fáze

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R}\left[\frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} - \frac{2R_sPQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + Q^2)(R_s^2 + P^2)}\right] \quad \text{(P-77)}$$

Prostřední fáze

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R}\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \quad \text{(P-78)}$$

Vnější kabel zpožděné fáze

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R}\left[\frac{\frac{1}{4}Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{\frac{3}{4}P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{2R_sPQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + Q^2)(R_s^2 + P^2)}\right] \quad \text{(P-79)}$$

Z těchto tří rovnic vyplývá, že faktory ztrát se liší. Pokud jsou jednožílové kabely uloženy vedle sebe bez transpozice (cross-bondingu), pak ztráty v plášti (stínění) narůstají se vzdáleností mezi uloženými kabely, tato závislost není lineární. Zároveň vnější tepelný odpor se snižuje s rostoucí vzdáleností mezi kabely. Ideální vzdáleností mezi kabely je tudíž vhodný kompromis mezi těmito dvěma vlivy. Pro výpočty kabelů uložených na vzduchu by měly být použity ztráty ve zpožděné fázi, protože nabývají největší hodnoty. Ztráty pro všechny tři kabely jsou použity pro výpočet vnějšího tepelného odporu u kabelů uložených v zemi s mezerou.

Ztráty vířivými proudy

Ztráty vířivými proudy musí být zahrnuty do rovnic pro výpočet dovolených proudů pro jednožílové a třížílové kabely u jednostranného uzemnění (SPB). Analytické výpočty vířivých proudů zejména pro jednožílové kabely jsou složité a často poloempirické. Vířivé proudy ve stínění se skládají z několika složek. Vířivé proudy prvního řádu ve stínění jsou způsobeny kombinací vlivů proudů samotného axiálního vodiče a proudů sousedních kabelů. Tyto dva typy proudů mohou být uvažovány odděleně a výsledné ztráty mohou být sečteny. Ve většině případů jsou ztráty indukované vlastním vodičem zanedbatelné. Vířivé proudy druhého řádu vznikají z magnetického pole vířivých proudů prvního řádu v ostatních kabelů.

Pro další úvahy budeme předpokládat, že tloušťka stínění je malá v porovnání s jeho poloměrem, tak že vířivé proudy mohou být považovány za rovnoměrně rozdělené po stěně a působí v středním poloměru pláště. Výsledná geometrie a princip je zobrazen na obr. 34. V tomto obrázku jsou zobrazeny dva kabely, a to kabel A a kabel X oddělené osovou vzdáleností s_{AX}. V těchto vodičích tečou proudy I_A a I_X. Tloušťka stínění je t_s a vnější poloměr je označen r_A resp. r_X. Bod P zobrazuje magnetický tok v tomto bodě.

Vířivé proudy prvního řádu

Hustota vířivých proudů v jakémkoliv stínění je určena při uvažování vlivu magnetického pole sousedních kabelů resp. proudů v nich. Takto indukovaný proud je proudem prvního řádu. Základní indukční rovnice spojující magnetický tok ϕ s proudovou hustotou i_A:

$$r_A \frac{\partial\, i_A}{\partial \theta} = j\omega\mu_r\mu_0 \frac{t_S}{\varsigma}\frac{\partial \phi}{\partial r} \qquad \text{(P-80)}$$

Při $r = r_A$

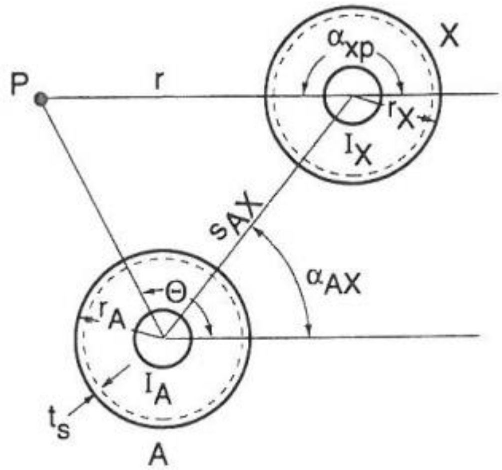
Kde:

$\omega = 2\pi f$ je úhlová frekvence [Hz]

$\mu_0 = 4\pi.\,10^{-7}$ je permeabilita vakua [H/m]

μ_r je relativní permeabilita [-]

ς je elektrická resistivita materiálu stínění [Ω/m]



Obrázek 34: Vířivé proudy

Zdroj: [7]

Řešení rovnice (P-80) za použití obr. 34 dostáváme:

$$i_{A_1} = \frac{I}{2\pi r_A}\sum_{n=1}^{\infty}\left(F_{A_n}\cos n\theta + F'_{A_n}\sin n\theta\right) \tag{P-81}$$

Kde:

$$F_{A_n} = (F_n)_A \sum_{X=A+1}^{q} \frac{M_X}{(s_{AX})^n}\exp(j\psi x)\cos n\alpha_{AX} \tag{P-82}$$

$$F'_{A_n} = (F_n)_A \sum_{X=A+1}^{q} \frac{M_X}{(s_{AX})^n}\exp(j\psi x)\sin n\alpha_{AX} \tag{P-83}$$

$$(F_n)_A = \frac{j2r_A m_A}{n + jm_A} \tag{P-84}$$

$$m_A = \frac{\mu\mu_0\omega}{4\pi R_s} \tag{P-85}$$

X je fiktivní proměnná
$\sum_{X=A+1}^{q}$ ... představuje sumu všech X kromě A
M_X a ψx jsou velikost a fázový úhel proudu I_X definovaný s ohledem na libobolný referenční proud I

$$I_X = M_X \exp(j\psi x)\, I \tag{P-86}$$

Z rovnice (P-81) získáme následující výraz pro faktor ztrát vířivými proudy ve stínění:

$$\lambda_1'' = \frac{\frac{\varsigma r_A}{t_s}\int_{\theta=0}^{2\pi}\left|\frac{i_A}{2}\right|^2 d\theta}{I^2 R} = \frac{\varsigma r_A}{t_s}\frac{I^2}{(2\pi r_A)^2}\pi\frac{1}{I^2 R}\sum_{n=1}^{\infty}\left(\left|F_{A_n}\right|^2 + \left|F'_{A_n}\right|^2\right) = \tag{P-87}$$

$$= \frac{R_s}{2R} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left| F_{A_n} \right|^2 + \left| F'_{A_n} \right|^2 \right)$$

Substitucí rovnice (P-83) v rovnici (P-87) dostáváme výraz:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{2R} \sum_{n=1}^{\infty} 2 r_A^{2n} \frac{m_A^2}{n + m_A^2} \sum_{X=A+1}^{q} \frac{M_X}{(s_{AX})^n} \left[\frac{M_X}{(s_{AX})^n} + \sum_{\substack{Y=X+1 \\ Y \neq A}}^{q} 2 \frac{M_Y}{(s_{AY})^n} \cos n(\alpha_{AX} - \alpha_{AY}) \cos(\psi AX - \psi AY) \right] \tag{P-88}$$

Rovnice (P-87) dává obecný výraz pro faktor ztrát vířivými proudy prvního řádu jako funkce geometrie systému. Výpočty se můžou stát složitější při situaci s více kabely, proto je nutné zavést zjednodušení.

1. **Zjednodušení – Jednofázový obvod**
   Uvažujme, že s je vzdálenost mezi kabely. Jelikož v tomto předpokladu figurují jenom dva kabely, pak je druhý výraz v sumě v rovnici (P-88) roven nule a $M_X = 1$ a tedy rovnice (P-88) dostává tvar:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{2R} \sum_{n=1}^{\infty} \left[2 \left(\frac{d}{2s} \right)^{2n} \frac{m^2}{n + m^2} \right] \tag{P-89}$$

   Kde $m = m_A$ a d je střední průměr stínění [mm]

2. **Zjednodušení – Kabely vedle sebe se stejnými třífázovými proudy**
   Pro toto zjednodušení dostáváme následující tvary:

$$M_A = M_B = M_C = 1 \qquad \psi_A = 0, \psi_B = \tfrac{4\pi}{3}, \psi_C = \tfrac{2\pi}{3} \tag{P-90}$$

   Vířivé proudy budou jiné ve všech třech fázích. Pro prostřední kabel platí:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{2R} \sum_{n=1}^{\infty} \left[2 \left(\frac{d}{2s} \right)^{2n} \frac{m^2}{n + m^2} (2 - (-1)^n) \right] \tag{P-91}$$

   Pro vnější kabely platí:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{2R} \sum_{n=1}^{\infty} \left[2 \left(\frac{d}{2s} \right)^{2n} \frac{m^2}{n + m^2} \left(1 + \frac{1}{2^{2n}} - \frac{1}{2^n} \right) \right] \tag{P-91b}$$

3. **Zjednodušení – Kabely v těsném trojúhelníku se stejnými třífázovými proudy**
   Substitucí rovnice (P-90) do (P-88) dostaneme v tomto případě:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{2R}\sum_{n=1}^{\infty}\left[2\left(\frac{d}{2s}\right)^{2n}\frac{m^2}{n+m^2}\left(2-\cos\frac{n\pi}{3}\right)\right] \tag{P-92}$$

Proudy vyšších řádů

Proces určení vířivých proudů druhého řádu i_{A_2}, které jsou způsobeny magnetickým polem vířivých proudů prvního řádu tekoucích v přilehlých kabelech se určí stejným způsobem jako i_{A_1}. Takže celkový proud druhého řádu ve stínění A vyvolaný přilehlými q kabely je:

$$i_{A_1} = \frac{I}{2\pi r_A}\sum_{n=1}^{\infty}\left(G_{A_n}\cos n\theta + G'_{A_n}\sin n\theta\right) \tag{P-93}$$

Kde:

$$G_{A_n} = \left(\frac{F_n}{2}\right)_A \sum_{k=1}^{\infty}\frac{(n+k-1)!\,(-1)^{k+1}}{(n-1)!\,k!}\sum_{X=A+1}^{q}\frac{r_X^k}{(s_{AX})^{n+k}}[F_{Xk}\cos(n + k)\alpha_{AX} + F'_{Xk}\sin(n+k)\alpha_{AX}] \tag{P-94}$$

$$G'_{AX} = \left(\frac{F_n}{2}\right)_A \sum_{k=1}^{\infty}\frac{(n+k-1)!\,(-1)^{k+1}}{(n-1)!\,k!}\sum_{X=A+1}^{q}\frac{r_X^k}{(s_{AX})^{n+k}}[F_{Xk}\cos(n + k)\alpha_{AX} - F'_{Xk}\sin(n+k)\alpha_{AX}] \tag{P-95}$$

Podobným způsobem s doplnění příslušných indexů by se pokračovalo pro vyšší řády.

Celkový vířivý proud a faktor ztrát způsobený vnějšími proudy

Celková hustota vířivých proudů ve stínění A je:

$$i_A = i_{A_1} + i_{A_2} + \cdots + i_{A_n} = \frac{I}{2\pi r_A}\sum\left(F_{A_n} + G_{A_n} + \cdots\right)\cos n\theta + \left(F'_{A_n} + G'_{A_n} + \cdots\right)\sin n\theta\Big) \tag{P-96}$$

Při použití notace:

$$C_{An} = F_{A_n} + G_{A_n} + \cdots \tag{P-97}$$

$$C'_{An} = F'_{A_n} + G'_{A_n} \tag{P-98}$$

a za použití stejných postupů, které vedli k rovnici (P-87), dostáváme následující výraz pro celkový faktor ztrát vířivými proudy vyvolaný vnějšími proudy:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{2R}\sum_{n=1}^{\infty}\left(|C_{An}|^2 + |C'_{An}|^2\right) \tag{P-99}$$

Ztráty způsobené vnitřními proudy

Vířivé proudy indukované ve stínění vlastním koaxiálním vodičem jsou konstantní pro všechny úhly θ při uvažování rovnoměrné proudové hustoty ve vodiči. Takže existuje pouze jeden ztrátový člen ekvivalentní $n = 0$ a ztráty mohou být přičteny přímo k vnějším ztrátám. Protože je tato ztráta velmi velice malá, je možno zanedbat magnetické pole způsobené samotnými vířivými proudy. Tato ztráta může být vyjádřena:

$$\lambda_A'' = \frac{R_s}{R} M_A^2 \frac{(\beta_1 t_s)^2}{12} 10^{-12} \tag{P-100}$$

Kde:

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \varsigma}}$$

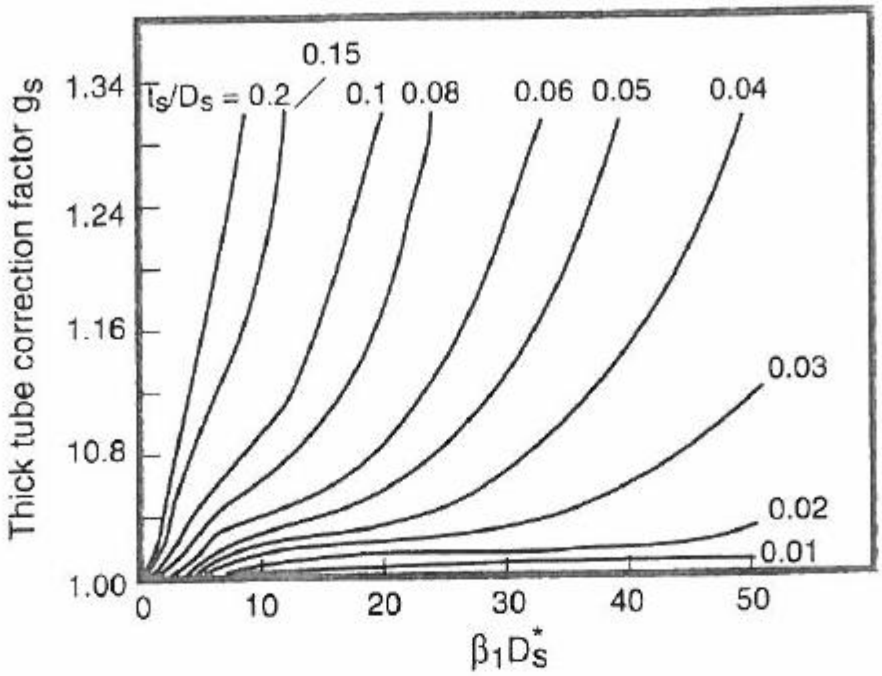
a t_s je tloušťka stínění [mm]
Celkový faktor ztrát je získám sečtením rovnic (P-99) a (P-100):

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{2R} \sum_{n=1}^{\infty} (|C_{An}|^2 + |C_{An}'|^2) + \frac{M_A^2 (\beta_1 t_s)^4}{6} 10^{-12} \tag{P-101}$$

Korekce pro tloušťku stěny stínění
Předchozí analýza byla pro předpoklad, že vířivé proudy jsou rovnoměrně rozdělené po stěně stínění. Pro stínění s tloušťkou větší než jsou obvyklé tloušťky stínění je zaveden korekční činitel, kterým se rovnice (P-99) přenásobí. Tento činitel označíme g_s (zobrazen na obr. 8.9). Na tomto grafu je člen $\beta_1 D_1^*$ bezrozměrná veličina, kde D_1^* je vnější průměr stínění pro různé poměry tloušťky stínění proti vnějšímu průměru kabelu.
Analytická aproximace křivek v grafu na obr. 8.9 je ve tvaru:

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s}\right)^{1,74} (\beta_1 D_s . 10^{-3} - 1,6) \tag{P-102}$$

Pro ztráty způsobené vnitřními proudy se tento typ korekce neprovádí.



Obrázek 34: Korekční činitel

Zdroj: [7]

Zjednodušení pro tři jednofázové kabely v konfiguraci vedle sebe a v trojúhelníku

Výpočet faktoru ztrát z rovnice (P-101) je poměrně složitý, proto pro účely výpočtu pomocí normy byly zavedeny následující zjednodušení. První zjednodušení je, že v rovnicích (P-89), (P-91)-(P-93) je první člen použit k aproximaci prvního řádu vířivých proudů a druhé zjednodušení je analytický výraz použitý pro aproximaci zbývajících členu v rovnici (P-101). Tato rovnice je aproximována ve tvaru:

$$\lambda_1'' = \frac{R_S}{2R}[g_s\lambda_0(1+\Delta_1+\Delta_2+]+\frac{(\beta_1 t_s)^2}{12}10^{-12} \qquad \text{(P-103)}$$

Kde:

g_s je dáno rovnicí (P-102)

λ_0 je první člen ztrát způsobených viřívými proudy prvního řádu a $\Delta_1+\Delta_2$ jsou vyjádřeny pro jednotlivé konfigurace níže.

1. **Tři jednožílové kabely v trojúhelníkové konfiguraci**

$$\lambda_0 = 3\left(\frac{d}{2s}\right)^2\frac{m^2}{1+m^2} \qquad \text{získáno z (P-92) substitucí } n=1 \qquad \text{(P-104)}$$

$$\Delta_1 = (1{,}14m^{2{,}45}+0{,}33)\left(\frac{d}{2s}\right)^{0{,}92m+1{,}66} \qquad \text{(P-105)}$$

$$\Delta_2 = 0 \qquad \text{(P-106)}$$

Kde m je definováno stejnou rovnici jako m_A (P-85)

2. Tři jednožílové kabely v konfiguraci vedle sebe

a) Prostřední kabel

$$\lambda_0 = 6\left(\frac{d}{2s}\right)^2 \frac{m^2}{1+m^2} \qquad \text{získáno z (P-92) substitucí } n = 1 \tag{P-107}$$

$$\Delta_1 = 0{,}86 m^{3{,}08}\left(\frac{d}{2s}\right)^{1{,}4m+0{,}7} \tag{P-108}$$

$$\Delta_2 = 0 \tag{P-109}$$

b) Vnější kabel předstihující fáze

$$\lambda_0 = 1{,}5\left(\frac{d}{2s}\right)^2 \frac{m^2}{1+m^2} \qquad \text{získáno z (P-92) substitucí } n = 1 \tag{P-110}$$

$$\Delta_1 = 4{,}7 m^{0{,}7}\left(\frac{d}{2s}\right)^{0{,}16m+2} \tag{P-111}$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3{,}3}\left(\frac{d}{2s}\right)^{1{,}47m+5{,}06} \tag{P-112}$$

c) Vnější kabel zpožděné fáze

$$\lambda_0 = 1{,}5\left(\frac{d}{2s}\right)^2 \frac{m^2}{1+m^2} \qquad \text{získáno z (P-92) substitucí } n = 1 \tag{P-113}$$

$$\Delta_1 = -\frac{0{,}74(m+2)m^{0{,}5}}{2+(m-0{,}3)^2}\left(\frac{d}{2s}\right)^{m+1} \tag{P-114}$$

$$\Delta_2 = 0{,}92 m^{3{,}7}\left(\frac{d}{2s}\right)^{m+2} \tag{P-115}$$

Speciální případy kabelů

Třížílové kabely se spolelčným pláštěm

Pro třížílové kabely s oválným nebo kulatým vodičem s pláštěm s resistancí $\leq 100\ \mu\Omega/m$, je faktor ztrát daný:

$$\lambda_1'' = \frac{3R_s}{2R}\left[\left(\frac{2c}{d}\right)^2 \frac{1}{1+\left(\frac{R_s 10^7}{\omega}\right)^2} + \left(\frac{2c}{d}\right)^4 \frac{1}{1+4\left(\frac{R_s 10^7}{\omega}\right)^2}\right] \tag{P-116}$$

Pro oválné a kulaté vodiče s resistancí větší než $100\ \mu\Omega/m$:

$$\lambda_1'' = \frac{3.2\omega^2}{R_s R}\left(\frac{2c}{d}\right)^2 10^{-14} \tag{P-117}$$

Pro sektorově tvarovaná jádra při jakékoliv hodnotě R_s:

$$\lambda_1'' = \frac{0{,}94R_s}{R}\left(\frac{2r_1+t}{d}\right)^2 \frac{1}{1+4\left(\frac{R_s 10^7}{\omega}\right)^2} \tag{P-118}$$

Kde:
r_1 je poloměr kruhu ohraničujícího tři fáze [mm]
t je tloušťka izolace mezi vodiči [mm]
d je střední průměr pláště [mm]

Vliv velkých segmentových jader

Řečeno již v kapitole 5.5.2. V této části uvažujme kabely s velkými izolovanými segmentovými jádry s oboustranným uzemněním. Dále uvažujme, že tyto kabely jsou navrženy a uloženy tak, aby se minimalizoval proximity efekt (efekt přiblížení), u tohoto systému musíme dále přičíst vířivé proudy ve stínění k ztrátám indukovaným napětím. Pokud je stínění uzemněno na jednom konci, pak ztráty vířivými proudy jsou způsobeny pouze elektromagnetickým polem proudů vodičů. Analytické řešení je poměrně komplikované, proto byly vytvořeny následující aproximace a zjednodušení (tyto výpočty jsou opět zahrnuty v normě IEC 287), kde se pouze uvažují proudy ve vodiči, tyto proudy jsou ve výsledku násobeny činitelem F, který má tvar:

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M+N)^2}{4(M^2+1)(N^2+1)} \qquad \text{(P-119)}$$

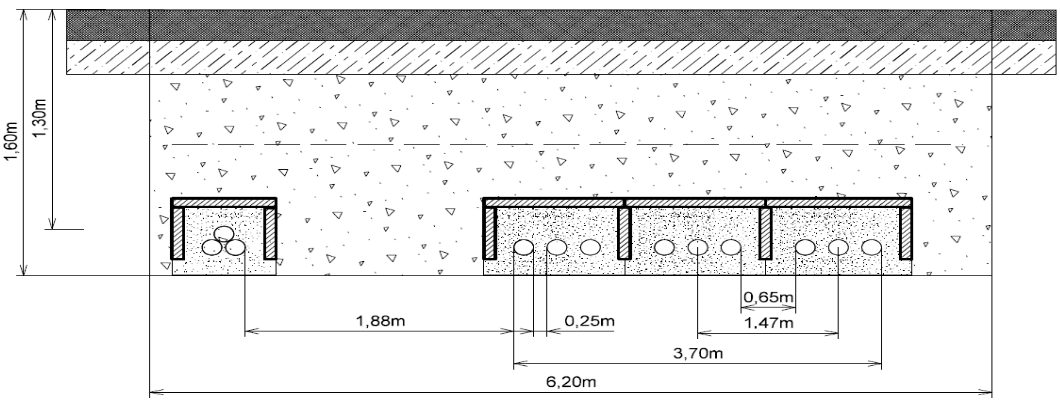
Kde:
$M = N = \frac{R_S}{X}$ pro kabely v trojúhelníkové konfiguraci
a

pro kabely vedle sebe se stejně vzdálenými fázemi $\begin{cases} M = \frac{R_S}{X+X_m} \\ N = \frac{R_S}{X-\frac{X_m}{3}} \end{cases}$

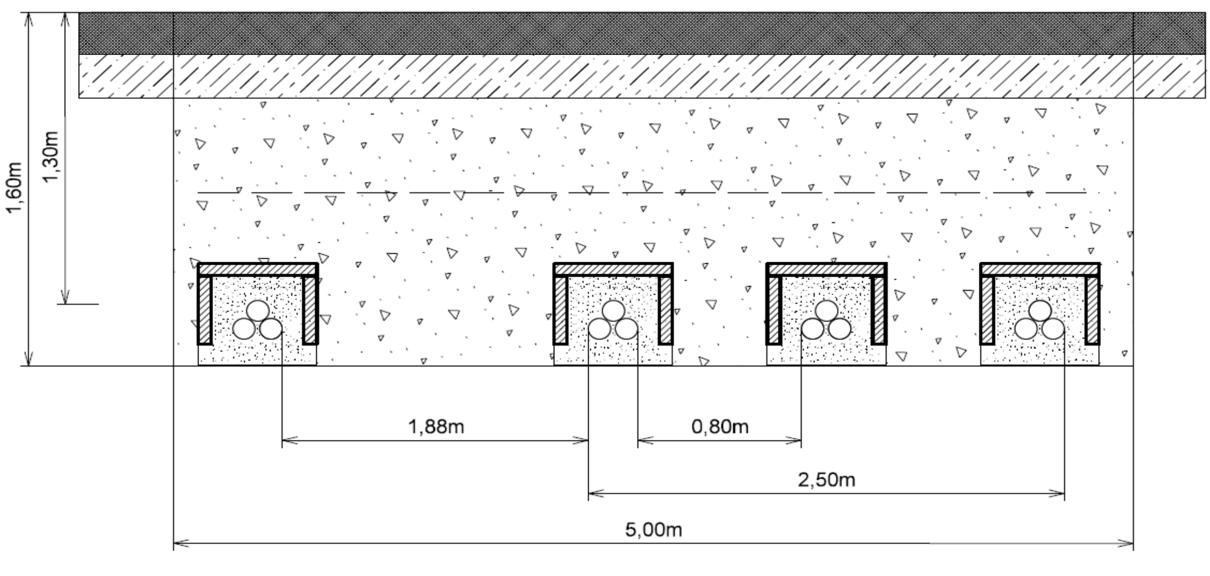
ŘEZY:

1. **Kritické místo kabelu 110 kV**

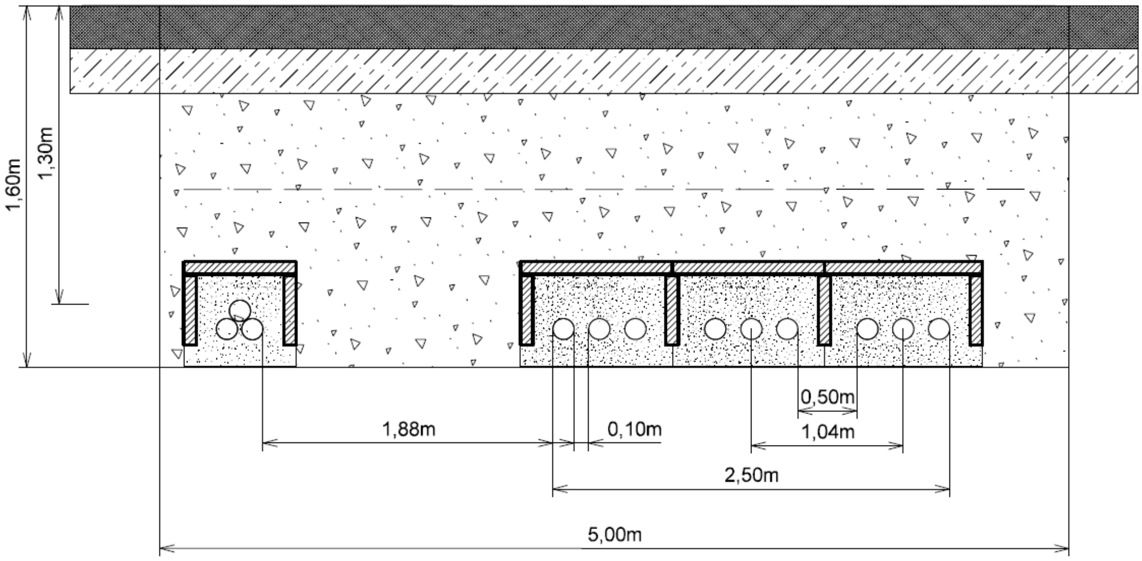
ŘEZ 1-1, - 3kb vedle sebe + 1kb
v trojúhelníku, vývod u prostředího trafa
Al - ø1600mm²



ŘEZ 1-2, - 4kb v Trojúhelníku
vývod u prostředího trafa
Al - ø2000mm²

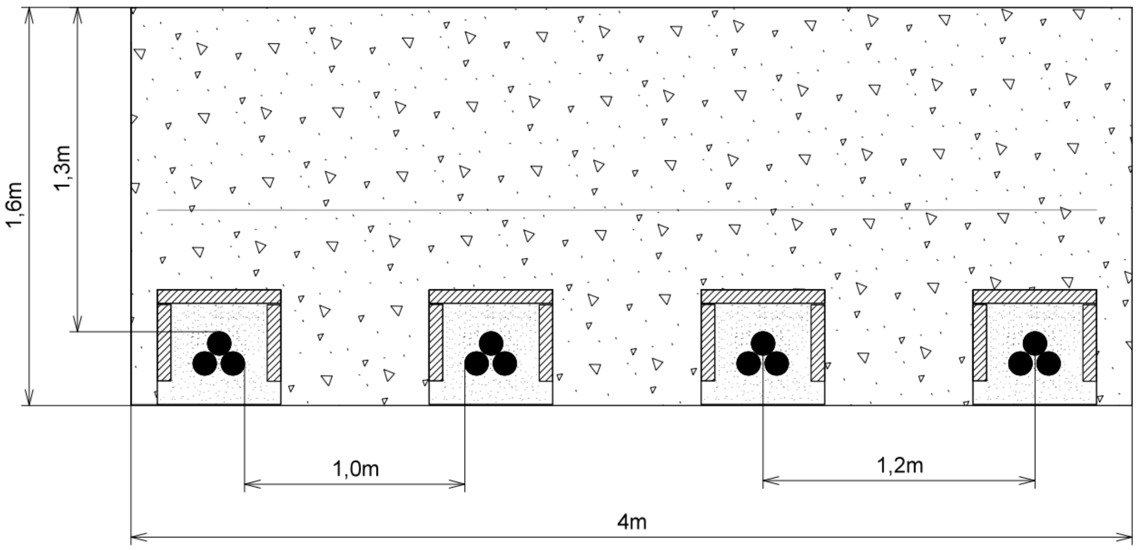


ŘEZ 1-3, - 3kb vedle sebe + 1kb v trojúhelníku, vývod u prostředího trafa Al - ø2000mm²

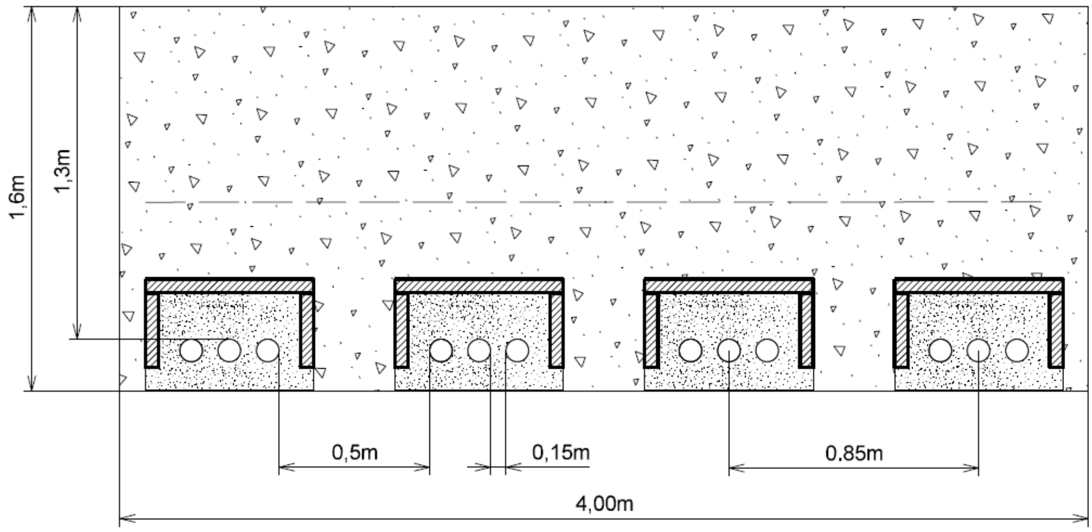


2. Kritické místo kabelu 110 kV

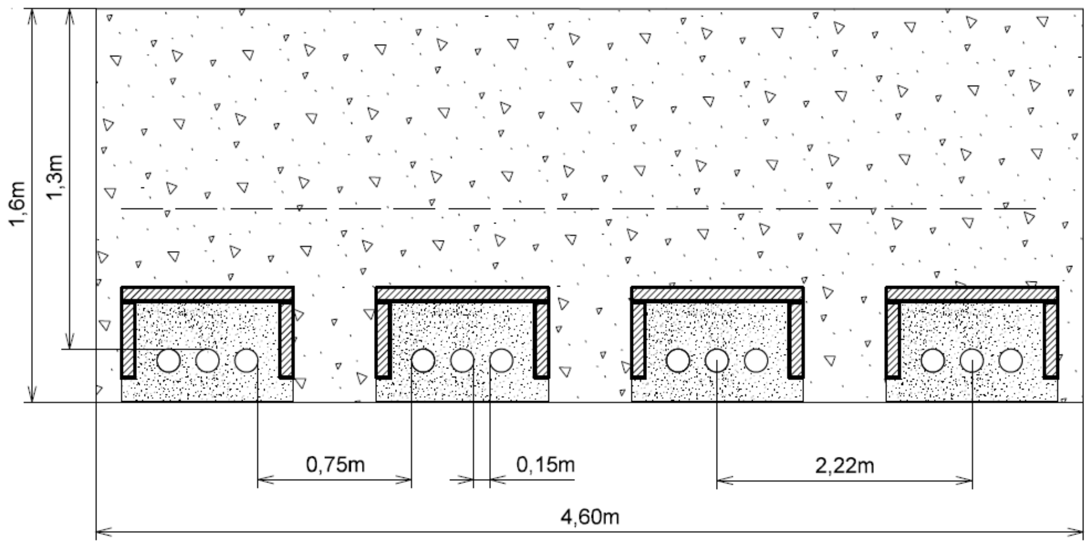
ŘEZ 2-1 - 4 kb v Trojúhelníku koridor mezi 2 trafama Al-o2000mm²



ŘEZ 2-2, - 4 kb vedle sebe
koridor mezi 2 trafama
Al - ø2000mm²



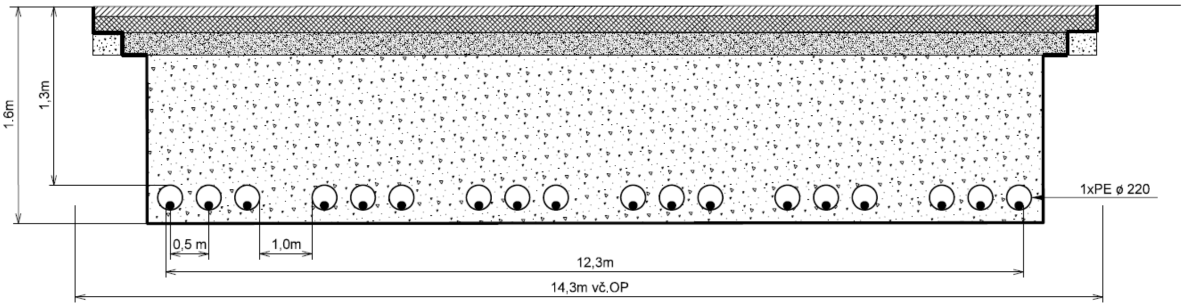
ŘEZ 2-3, - 4kb vedle sebe
koridor mezi 2 trafama
Al - ø1600mm²



3. Kritické místo kabelu 110 kV

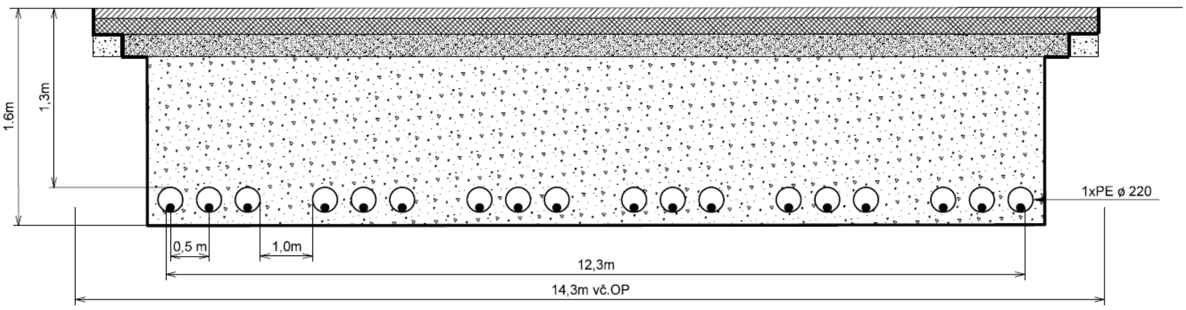
ŘEZ 3-1, - 6 kb vedle sebe
Al - ø1600mm²

protlak



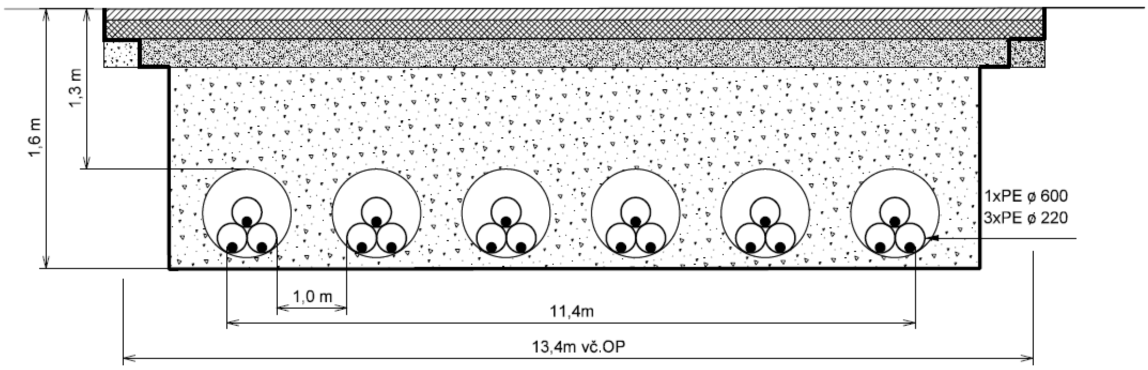
ŘEZ 3-2, - 6 kb vedle sebe
Al - ø2000mm²

protlak



ŘEZ 3-3, - 6kb v trojúhelníku
Al - ø2000mm²

protlak



Seznam obrázků:

Obrázky 4, 8 a 9 jsou ze zdroje [13].

Seznam tabulek:

Zdroje:

[1]: Bakalářská práce – Dimenzování silových kabelů z hlediska tepelného namáhání, Jan Vočko, ČVUT 2013

[2]: Podniková norma energetiky 341050 – Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky

[3]: Power Cables and Their Application: Part 1, Lothar Heinhold, Siemens, 1993

[4]: Power Cables and Their Application: Part 2, Lothar Heinhold, Siemens, 1993

[5]: Elektrický rozvod a rozvodná zařízení, Doc. Ing. František Fencl CSc., ČVUT FEL 2009

[6]: Základy sdílení tepla, M.A. Michejev, Průmyslové vydavatelství, 1952

[7]: Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations For Transmission, Distribution And Industrial Applications, G. J. Anders, McGraw-Hill and IEEE PRESS, 1997

[8]: Katalog firmy ABB: XLPE Land Cable Systems – User's Guide

[9]: Teplotní pole zemin, Ing. Petr Kacálek, FS VUT v Brně

[10]: www.nkt.cz

[11]: http://predistribuce.cz

[12]: www.bruggcables.com

[13]: Osobní sbírka fotografií ze sbírky Jana Vočka

[14]: ČSN IEC 287-1-1 +a1 (347420), Elektrické kabely – Výpočet dovolených proudů – Část 1: Rovnice pro výpočet dovolených proudů (100% zatížitelnost) a výpočet ztrát – Oddíl 1: Všeobecně

[15]: ČSN IEC 287-2-1 (347420), Elektrické kabely – Výpočet dovolených proudů – Část 2: tepelný odpor – Oddíl 1: Výpočet tepelného odporu

[16]: IEC 60853-1: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables, Part 1: Cyclic rating factor for cables up to and including 18/30 (36) kV

[17]: IEC 60853-2: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables, Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages

[18]: IEC 60853-3: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables – Part 3: Cyclic rating factor for cables of all voltages with partial drying of the soil

[19]: Materiály poskytnuté společností ČEPS