

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**CHRÁNĚNÍ VENKOVNÍCH VEDENÍ PŘED
KLIMATICKÝMI VLIVY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

PAVEL PETR

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Pavel Petr
Ročník: 3

ID: 119323
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Chránění venkovních vedení před klimatickými vlivy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Přetížení vodičů venkovního vedení větrem a námrazou.
2. Prostředky pro snížení negativních vlivů způsobených větrem.
3. Popis základních způsobů používaných k likvidaci námrazy.
4. Stanovení hodnoty vyhřívacího proudu vedení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

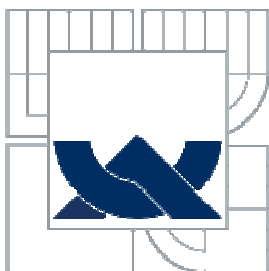
Bibliografická citace práce:

PETR PAVEL Chránění venkovních vedení před klimatickými vlivy. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012, 52 stran.

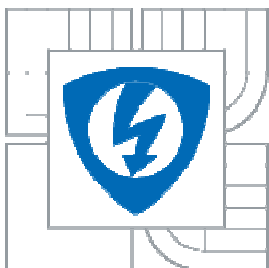
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského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

.....

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D. za ochotu, trpělivost a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ ELEKTROENERGETIKY**

CHRÁNĚNÍ VENKOVNÍHO VEDENÍ PŘED KLIMATICKÝMI VLIVY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

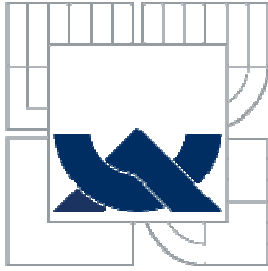
AUTOR PRÁCE

Pavel PETR

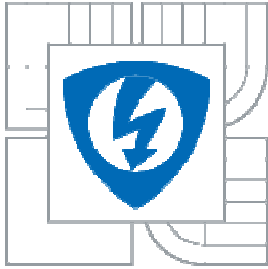
VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Jaroslava Orságová. Ph.D.

BRNO 2012



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

OVERHEAD LINE PROTECTION AGAINST CLIMATE EFFECT

BACHELOR'S THESIS

AUTHOR

Pavel Petr

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová. Ph.D.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Venkovní elektrické vedení jsou zařízení na přenos elektrické energie, které musí odolávat mechanickému a elektrickému namáhání. Kritériem správného návrhu venkovního vedení je kontrola tzv. mezních stavů zatížení. Tato práce si klade za cíl pojednat o povětrnostních vlivech působících na vodiče venkovního vedení. První část je zaměřena na rozdělení klimatických vlivů ovlivňujících vodiče venkovního vedení a výpočty namáhání vodičů pro jednotlivé faktory počasí. Druhá část je poté zaměřena na ochranu venkovního vedení proti negativním vlivům způsobených větrem a námrazou.

Cílem této práce je tedy pojednání především o způsobech odstraňování námrazy z vodičů venkovního vedení a o výpočtech potřebných k vyhřívání vodičů. Jsou zde uvedeny postupy výpočtů pro stanovení vyhřívajícího proudu pro různé teploty vodičů na odstranění námrazy.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Teplota; vítr; námraza; zatížení větrem; zatížení námrazou; venkovní vedení, odstraňování námrazy, vyhřívací proud

ABSTRACT

Overhead power lines are devices on the transmission of electrical energy, which must resist the mechanical and electrical strain. The criterion for correct suggestion of overhead lines is the control of the limit level loads. This thesis aims to discuss the weather influences acting on the wires overhead. The first part focuses on the distribution of climatic factors influencing the wires overhead wires and calculations of strain for different weather factors. The second part is then focused on the protection of overhead against the negative effects caused by wind and icing.

This thesis therefore deals primarily with the wals of de-icing of conductor overheads and with the calculations needed for the heating of wires. There are presented calculation procedures for determining basking current on de-icing from the conductors.

KEY WORDS:

Temperature; wind; icing; wind load; ice load; overhead line, de-icing, heating of wires

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	13
2 POVĚTRNOSTNÍ VLIVY	14
2.1 TEPLOTA.....	15
2.2 VÍTR	16
2.2.1 ZATÍŽENÍ VĚTREM.....	17
2.2.2 SÍLA VĚTRU NA LIBOVOLNÝ PRVEK VEDENÍ.....	19
2.2.3 SÍLA VĚTRU NA VODIČE	19
2.2.4 SÍLA VĚTRU NA SLOUPY	21
2.3 NÁMRAZA	21
2.3.1 VZNIK NÁMRAZY	22
2.3.2 ZATÍŽENÍ NÁMRAZOU	23
2.4 SOUČASNÉ PŮSOBENÍ KLIMATICKÝCH VLIVŮ	25
2.5 BOUŘKY	26
2.5.1 VZNIK BOUŘEK	26
3 KMITÁNÍ VODIČŮ VLIVEM VĚTRU	27
3.1 PROSTŘEDKY PRO SNÍŽENÍ NEGATIVNÍCH VLIVŮ ZPŮSOBENÝCH VĚTREM	28
4 ODSTRAŇOVÁNÍ NÁMRAZY Z VENKOVNÍHO VEDENÍ.....	30
4.1 MECHANICKÉ ODSTRAŇOVÁNÍ NÁMRAZKU	30
4.2 ODSTRAŇOVÁNÍ NÁMRAZY Z VODIČŮ VYHŘÍVÁNÍM	30
4.2.1 VYHŘÍVÁNÍ VEDENÍ STEJNOSMĚRNÝM PROUDEM	32
4.2.2 ODSTRAŇOVÁNÍ NÁMRAZY Z VODIČŮ VEDENÍ 110 kV PROVOZNÍM PROUDEM	34
4.2.3 VYHŘÍVÁNÍ VYPNUTÉHO VEDENÍ 110 kV	35
4.2.4 ODSTRAŇOVÁNÍ NÁMRAZY Z VEDENÍ 22 kV	35
4.3 ZAPOJENÍ TRANSFORMÁTORU 110/VN kV A VYHŘÍVANÉHO VEDENÍ.....	36
5 STANOVENÍ HODNOTY VYHŘÍVACÍHO PROUDU VEDENÍ	39
5.1 PŘEDPOKLADY PRO VÝPOČET VYHŘÍVACÍHO PROUDU	41
5.2 VÝPOČET VYHŘÍVACÍHO PROUDU.....	43
5.3 VOLBA VHODNÉHO VYHŘÍVACÍHO OBVODU	45
5.3.1 PŘÍKLAD VÝPOČTU	48
6 ZÁVĚR.....	50
POUŽITÁ LITERATURA	51
ŘÍLOHA A.....	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Mapa větrných oblastí na území ČR	16
<i>Obr. 2</i> Vychýlení vodiče vlivem větru do roviny výslednice R	20
<i>Obr. 3</i> Námrazek na vodiči o tloušce t	23
<i>Obr. 4</i> Izokeraunická mapa ČR.....	26
<i>Obr. 5</i> Výkyvná svorka.....	28
<i>Obr. 6</i> Kývavý tlumič typu Stockbridge.....	29
<i>Obr. 7</i> Pružinový tlumič.....	29
<i>Obr. 8</i> Distanční rozpěrka.....	29
<i>Obr. 9</i> Mechanické odstraňování námrazy.....	30
<i>Obr.10</i> Námraza na vodiči a námrazek.....	31
<i>Obr.11</i> Odstraňování námrazy stejnosměrným proudem jednofázovým zapojením.....	32
<i>Obr.12</i> Odstraňování námrazy stejnosměrným proudem s využitím třetí fáze jako zpětné	33
<i>Obr.13</i> Odstraňování námrazy stejnosměrným proudem dvoufázovým zapojením	33
<i>Obr.14</i> Vyhřívání vedení 110 kV provozním proudem 22 kV.....	34
<i>Obr.15</i> Vyhřívací zařízení pro vedenív rozvodně Řípov.....	35
<i>Obr.16</i> Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = \frac{1}{3} U_{fvn}$	36
<i>Obr.17</i> Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = \frac{2}{3} U_{fvn}$	37
<i>Obr.18</i> Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = U_{fvn} \pm 16\%$	37
<i>Obr.19</i> Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = U_{fvn} \pm 16\%$	37
<i>Obr.20</i> Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = \sqrt{3}U_{fvn}$	38
<i>Obr.21</i> Zapojení transformátoru 110/22 kV se zhášecí tlumivkou.....	38
<i>Obr.22</i> Časový průběh oteplení vodiče.....	39
<i>Obr.23</i> Námrazek na vodiči.....	39

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Beaufortova stupnice síly větru.....</i>	<i>15</i>
<i>Tab.2 Základní rychlost větru a součinitel nadmořské výšky.....</i>	<i>17</i>
<i>Tab.3 Součinitel terénu.....</i>	<i>17</i>
<i>Tab.4 Dynamický součinitel pro vodič.....</i>	<i>19</i>
<i>Tab.5 Součinitel aerodynamického odporu C_{pol}.....</i>	<i>20</i>
<i>Tab.6 Námrazové oblasti</i>	<i>23</i>
<i>Tab.7 Koeficienty pravděpodobnosti zatěžovacích stavů.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab.8 Tepelný odpor a tepelná kapacita vodičů [15].....</i>	<i>42</i>
<i>Tab.9 Příklad parametrů AlFe 6 a mědi.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab.10 Příklad parametrů železa.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab.11 Vypočtené vyhřívací proudy a časové konstanty vodiče AlFe 6.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab.12 Vypočtené vyhřívací proudy a časové konstanty vodiče Cu.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab.13 Vypočtené vyhřívací proudy a časové konstanty vodiče Fe.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab.14 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívané vedení AlFe s průřezem 50 mm^2.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab.15 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívané vedení AlFe s průřezem 70 mm^2.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab.16 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívané vedení AlFe s průřezem 95 mm^2.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab.17 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívané vedení Cu s průřezem 70 mm^2.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab.18 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívané vedení Cu s průřezem 95 mm^2.....</i>	<i>47</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název a popis značky
A	Plocha uvažovaného prvku, promítnuta do roviny kolmé na směr větru [m^2]
A_{pol}	Plocha sloupu [m^2]
c_{ALT}	Součinitel nadmořské výšky [-]
c_l	měrné teplo ledu [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
C	tepelná kapacita vodiče [$W \cdot s \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-1}$]
C_c	Součinitel aerodynamického odporu vodiče [-]
C_x, C_{pol}	Součinitel aerodynamického odporu [-]
d	Průměr vodiče [m]
D	Průměr vodiče s námrazkem [m]
F	Tah ve vodiči [N]
g	Tíha vodiče [N/m]
g_l	Tíha jednoho metru samotného vodiče [N/m]
G_c	Dynamický součinitel pro vodiče nebo součinitel rozpětí [-]
G_{pol}	Dynamický součinitel pro sloup [-]
G_q	Poryvový součinitel [-]
G_x	Dynamický součinitel [-]
h	Výška nad zemí [m]
H	tepelný odpor vodiče [$^\circ C \cdot m \cdot W^{-1}$]
I	Zatížení námrazou na jednotku délky vodiče [N/m]
I_d	Námraza na jednotku délky vodiče [N/m]
I_k	Zatížení námrazou [N/m]
I_R	Referenční zatížení námrazou [N/m]
I_v	Vyhřívací proud [A]
k	konstanta, která respektuje závislost časové konstanty na teplotě vodiče [-]
k_T	Součinitel terénu [-]
K_h	Součinitel výšky pro zatížení námrazou [-]
l	délka vodiče [m]
l_t	měrné skupenské teplo tání ledu ($l_t = 3,34 \cdot 10^2 kJ \cdot kg^{-1}$)
L	Délka příslušného rozpětí [m]
m	hmotnost námrazy [N/m]
n	Počet vodičů ve svazku [-]
O_0	konstanta [$^\circ C$]
q_h	Dynamický tlak větru [kg]
q_{hcl}	Dynamický tlak větru na omrzlý vodič [N/m^2]
q_{wc}	Zatížení větrem [N/m]
Q	Teplo [J]
Q_A	teplo akumulované ve vodiči [J]
Q_J	Jouleovo teplo [J]
Q_P	teplo odvedené do okolí prouděním [J]
Q_S	teplo odvedené do okolí sáláním [J]
Q_{wc}	Výsledná síla větru na podpěrný bod, způsobená silami větru na vodič v přilehlých rozpětích [N]

Značka	Název a popis značky
Q_{Wpol}	Síla větru na sloup [N]
Q_{Wx}	Síla větru na kterýkoli prvek vedení [N]
Q_Z	teplo pohlcené ze slunečního záření [J]
R	Výslednice vodiče způsobená tíhou vodiče a zatížením větru
R_k	rezistence vyhřívaného vedení na jednotku délky [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
R_V	činný odpor vyhřívaného vedení [Ω]
R_{20}	odpor vodiče při teplotě 20 °C na jednotkovou délku [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
S	průřez vyhřívaného vodiče [mm^2]
S_2	průřez námrazy, která se musí odstranit [mm^2]
t, t_l	Tloušťka námrazku [m]
T	čas vyhřívání [h]
V_g	Poryvová rychlost větru [m/s]
V_h	Rychlost vzduchu [m/s]
V_{mean}	Střední (10-minutová) rychlost větru [m/s]
V_R	Referenční rychlost větru [m/s]
U_{fvm}	Fázové napětí na sekundární straně transformátoru [V]
U_V	Vyhřívací napětí [V]
U_{vvn}	Fázové napětí na primární straně transformátoru [V]
X_V	reaktance vyhřívaného vedení [Ω]
X_T	reaktance transformátoru [Ω]
z	Přetížení vodiče větrem [-]
z_0	Třecí výška [m]
Z_{vo}	náhradní impedance vyhřívacího obvodu [Ω]
α	teplotní součinitel odporu [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
λ	Délka vlny [m]
ρ	Hustota vzduchu [kg/m^3]
ρ	měrný odpor [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]
ρ_I	Hustota námrazy [kg/m^3]
Ω	Úhel náběhu pro uvažovaný směr větru [°]
σ	Namáhání vodiče [MPa]
γ	Měrná hmotnost vodiče [$\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$]
γ_2	měrná hmotnost námrazy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
γ_I	Dílčí součinitel zatížení námrazou [-]
γ_G	Dílčí součinitel stálého zatížení [-]
γ_W	Dílčí součinitel zatížení větrem [-]
π	Ludolfovo číslo (3,1416)
ϑ_t	teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]
ϑ_1, ϑ_0	teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]
ϑ_m	ustálená teplota [$^{\circ}\text{C}$]
ϑ_V	teplota vodiče [$^{\circ}\text{C}$]
ν_{vl}	Vlastní frekvence vodiče [Hz]
ν_{vn}	Vynucená frekvence vodiče větrem [Hz]
τ	časová konstanta [s]
Ψ_{WC}	Součinitel kombinace pro zatížení vodičů [-]

1 ÚVOD

Venkovní silové vedení je zařízení, které slouží k přenášení elektrické energie od elektráren až ke spotřebiteli, u kterého je ochrana před nebezpečným dotykem živých částí řešena polohou. Přenos je uskutečňován na různou vzdálenost a s různou velikostí přenášeného výkonu. Potřebná vzdálenost a velikost přenášeného výkonu určují pro předpokládané provozní parametry velikost použitého napětí.

Hlavními částmi venkovního vedení jsou stožáry, základy, uzemnění, střešníky, konzoly a vodiče s příslušenstvím. Vodiče jsou funkčně nejdůležitější částí venkovního vedení a představují ekonomicky rozhodující prvek pro jeho realizaci.

Venkovní vedení musí splňovat řadu požadavků, které jsou na ně kladena, aby odolalo mechanickému a elektrickému namáhání. Musí se navrhovat a stavět takovým způsobem, aby po dobu plánované životnosti sloužilo ekonomicky a spolehlivě svému účelu a musí odolávat šíření poruchy i pokud dojde k poruše určité složky.

2 POVĚTRNOSTNÍ VLIVY

Vzhledem k tomu v jakém prostředí se vodiče nacházejí, jsou vystaveny různým klimatickým vlivům (větru, dešti, námraze, změnám teploty, chemickým vlivům), to má vliv na cenu vedení a jeho bezpečnost. Změny tahu ve vodiči způsobené větrem, námrazou a odchylkami teplot od referenční teploty jsou nahodilými zatíženími. Vlastní tíha vodičů a účinky tahu vodičů při referenční teplotě jsou považovány za stálá zatížení.

Pro návrh projektu venkovního vedení jsou důležité údaje:

1. Maximální a minimální teplota
2. Vítr
3. Námraza
4. Bouřky
5. Současné působení následujících jevů
 - a) teplota a vítr
 - b) teplota a námraza
 - c) teplota, vítr a námraza
 - d) teplota a bouřka

Vliv počasí je uplatňován na základě dlouhodobých meteorologických pozorování a provozních zkušeností na vedeních již postavených. Na základě těchto zkušeností se stanoví typické stavy počasí a pro tyto stavy se provádí kontrola venkovního vedení s ohledem na :

- Největší přípustnou teplotu vodičů
 - normální zatížení 80°C
 - při zatížení 180°C
 - při zkratu 300°C pro vodiče na bázi oceli, 200°C pro vodiče na bázi hliníku
- elektrické požadavky – z hlediska dostatečné elektrické pevnosti musí být dodrženy minimální vzdálenosti jednak mezi fázovými vodiči a dále mezi vodičem a zemí. Tyto vzdálenosti jsou definovány na základě nejvyšších provozních napětí s ohledem na koordinaci izolace při atmosférických a spínacích přepětích. Pro kontrolu mezních hodnot uvedených vzdáleností jsou definovány jednotlivé zatěžovací stavy:
 - ❖ Největší návrhová teplota – kontrola minimálních vzdáleností vodičů nad terénem, komunikacemi, křížovaným nebo souběžným vedením apod.
 - ❖ Zatížení rovnoměrnou a nerovnoměrnou námrazou – kontrola minimálních vzdáleností vodičů
 - ❖ Zatížení větrem – kontrola minimálních vzdáleností vodičů a vzdáleností vodič-konstrukce stožáru
 - ❖ Minimální teplota – kontrola vzdáleností vodič – konstrukce
 - ❖ Kombinované zatížení námraza a vítr – kontrola minimálních vzájemných vzdáleností vodičů a vzdáleností vodič-konstrukce stožáru, dále kontrola minimálních vzdáleností vodičů nad terénem, komunikacemi, křížovaným nebo souběžným vedením apod.

U vodičů, které nepřenesají zatížení se počítá s návrhovou teplotou +40°C.

- Mechanické požadavky

Venkovní elektrické vedení se musí navrhovat tak aby vyhovovalo požadavkům na jeho spolehlivost a mechanickou bezpečnost a požadavkům na bezpečnost osob, kteří na venkovním vedení pracují (údržba). Kritériem správného návrhu venkovního vedení je kontrola tzv. mezních stavů zatížení:

- Mezní stav únosnosti- stav spojený s konstrukčními poruchami a poškozením vodičů
- Mezní stav použitelnosti- jsou stanoveny podmínkami, při kterých již vedení nespĺňuje základní provozní požadavky (např. mechanickou pevnost vodičů nebo minimální elektrické vzdálenosti vodičů)

Tyto mezní stavy jsou vyjádřeny návrhovými hodnotami zatížení, které se určují z charakteristických hodnot zatížení, které působí v bodech závěsu a těmi obvykle jsou :

- charakteristická hodnota *stálých* zatížení-*tíha vodiče* g [N/m] v rozpětí
- charakteristická hodnota *nahodilých* zatížení - zatížení větrem q_{wc} [N/m],
- zatížení námrazou I_k [N/m],
- zatížení teplotou
- charakteristická hodnota *mimořádných* zatížení – působí obvykle krátce, hodnota přídatného zatížení způsobených zařízeními pro údržbu a revize

Základní návrhové hodnoty zatížení se určí jako součin charakteristického zatížení a koeficientu pravděpodobnosti γ a následně se porovnají s hraniční hodnotou určující pevnost vodiče venkovního vedení, přičemž platí:

- a) pro mezní stav únosnosti – tah vodiče v kterémkoli místě rozpětí při všech návrhových zatíženích, která odpovídají zatěžovacím stavům nesmí překročit
 - 65% matematické pevnosti vodiče pro vodiče na bázi hliníku
 - 68% matematické pevnosti vodiče pro vodiče na bázi oceli (AlFe)
- b) pro mezní stav použitelnosti – tah vodiče v kterémkoli místě rozpětí při návrhových zatíženích, které odpovídají zatěžovacím stavům odpovídajícím úrovni spolehlivosti 1 podle tabulky nesmí překročit
 - 55% matematické pevnosti vodiče pro vodiče na bázi hliníku
 - 58% matematické pevnosti vodiče pro vodiče na bázi oceli (AlFe)

2.1 Teplota

Teplota je jedním z nejdůležitějších parametrů pro dimenzování a stavbu venkovního vedení. Vlastnosti různých předmětů (materiálu) se mění, mění-li se jejich teplota. Pro vodiče venkovního vedení tomu není jinak. Vlivem teploty se mění namáhání ve vodiči a současně i jeho délka. Pro návrh vedení je proto důležité stanovit maximální a minimální teplotu prostředí, ve kterém je vodič používán. V našich podmínkách se uvažuje teplota okolí -30°C až $+40^{\circ}\text{C}$. Maximální teplota je důležitá z hlediska výpočtu maximálního průhybu a kontroly předepsané vzdálenosti od terénu. Má na ni vliv okolní teplota vzduchu a proudové zatížení vodiče. Při minimální teplotě se počítá s maximálním zkrácením vodiče, které je důležité zejména z hlediska sil působících na složky tahu vodiče v místě připojení na podpěrný bod.

Účinky teploty se mohou obecně týkat pěti různých návrhových situací. Jsou závislé na ostatních klimatických zatíženích.

- a) Minimální teplota, uvažuje se bez dalších klimatických zatížení.
- b) Při extrémní rychlosti větru se předpokládá normální teplota okolí
- c) Uvažuje se snížená rychlost větru v kombinaci s minimální teplotou
- d) Teplota předpokládaná při námraze. Pro oba hlavní typy námrazy (srážková námraza a vnitrooblaková námraza) lze počítat s teplotou 0°C, pokud není uvedeno jinak. V místech kde teplota po sněžení často významně klesá, se musí uvažovat s teplotou nižší
- e) Teplota pro kombinaci námrazy a větru

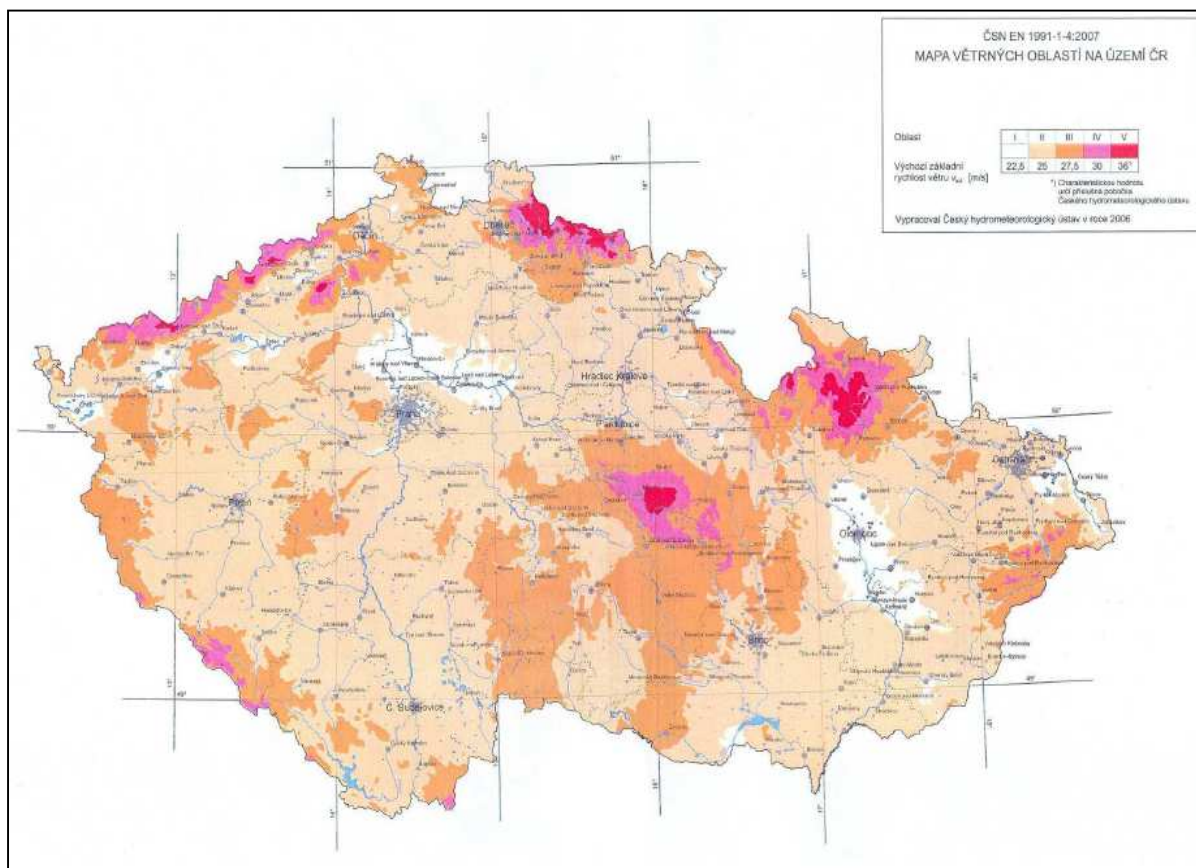
2.2 Vítr

Vítr popisuje pohyb vzduchu v určitém místě atmosféry v daném časovém okamžiku vzhledem k zemskému povrchu. Vzniká v důsledku nerovnoměrného rozložení tlaku vzduchu nad zemí. Za vítr se považuje jen horizontální složka vektoru větru, určuje směr a rychlost. Rychlost větru je vzdálenost, kterou urazí pohybující se vzduch za jednotku času, nejčastěji se udává v metrech za sekundu, nebo ve stupních podle Beaufortovy stupnice, která slouží k odhadu rychlosti větru bez použití přístrojů.

Tab.1 Beaufortova stupnice síly větru [9]

Stupeň	Označení	Rozpoznávací znaky	Rychlost [m/s]
0	Bezvětrí	Kouř stoupá kolmo vzhůru	0-0,2
1	Vánek	Směr větru je poznatelný podle pohybu kouře, vítr neúčinkuje na větrnou korouhev	0,3-1,5
2	Slabí vítr	Vítr je cítit ve tváři, listy stromů šelestí	1,6-3,3
3	Mírný vítr	Listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu	3,4-5,4
4	Dostí čerství vítr	Vítr zdvihá prach, pohybuje slabšími větvemi	5,5-7,9
5	Čerství vítr	Listnaté keře se začínají hýbat, na vodních plochách se tvoří menší vlny	8,0-10,7
6	Silný vítr	Vítr pohybuje silnějšími větvemi, je těžké používat deštník	10,8-13,8
7	Prudký vítr	Chůze proti větru je obtížná	13,9-17,1
8	Bouřlivý vítr	Vítr láme větve, chůze proti větru je téměř nemožná	17,2-20,7
9	Vichřice	Převrací lehčí předměty, shazuje střešní tašky	20,8-24,4
10	Silná vichřice	Láme a vyvrací stromy	24,5-28,4
11	Mohutná vichřice	Působí velké škody	28,5-32,6
12	Orkán	Ničivé účinky	>32,6

Podle [5] stanovení zatížení větrem se vychází ze střední rychlosti větru. Území České republiky je podle ČSN P ENV 1991-2-4 rozděleno do pěti větrných oblastí, pro něž jsou definovány různé základní referenční rychlosti větru V_R pro výšku 10 m nad zemí a kategorii terénu II. Hranice větrných oblastí jsou znázorněny v Mapě větrných oblastí na území ČR, která je na obázku 1.



Obr. 1 Mapa větrných oblastí na území ČR [7]

2.2.1 Zatížení větrem

Tlak větru na vodiče a na ostatní konstrukce vedení vyvolává sílu, která působí jako nahodilé (přídavné) zatížení. Působení je velmi proměnlivé a vítr tedy může mít negativní vliv na části venkovního vedení, obzvláště při prudkých nárazech větru (při vichřici) a tak s tímto faktorem musíme při dimenzování vedení počítat.

Jako základ pro určení rychlosti větru pro jiné kategorie terénu lze vycházet ze vztahu :

$$V_{RK} = k_T \cdot \ln \frac{10}{z_0} \cdot V_R \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.1)$$

kde k_T je poryvový součinitel rychlosti větru (–)
 V_R referenční rychlost ve výšce 10 m pro kategorii II ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 z_0 třecí výška [m]

Tab.2 Základní referenční rychlost větru V_R

Větrová oblast	Označení oblasti	Rreferenční rychlost větru V_R [$m \cdot s^{-1}$]
I.	bílá	22,5
II.	světle hnědá	25,0
III.	tmavě hnědá	27,5
IV.	růžová	30,0
V.	červená	36,0

Pro referenční rychlost větru V_h ve výškách větších než 10m nad zemí v daném místě se potom určí jako :

$$V_h = k_T \cdot \ln \frac{h}{z_0} \cdot V_R \quad (m \cdot s^{-1}) \quad (2.4)$$

kde h je výška nad zemí (m), pro výšku do 10 m nad zemí se $h = 10m$
 k_T součinitel terénu ($-$)
 V_R referenční rychlost ve výšce 10 m pro kategorii II ($m \cdot s^{-1}$)
 z_0 třecí výška (m)

Tab . 3 Součinitel terénu k_T a třecí výška z_0 pro různé kategorie terénu podle Eurokódu ENV 1991-2-4

Kategorie terénu	Charakteristika terénu	k_T	z_0
I	Bouřlivé otevřené moře, jezera do vzdálenosti nejméně 5 km proti směru větru a rovná plochá krajina bez překážek	0,17	0,01
II	Zemědělská půda s hraničními živými ploty, rozptýlené malé zemědělské usedlosti, domy a stromy	0,19	0,05
III	Předměstské nebo průmyslové oblasti a trvale zalesněné území	0,22	0,3
IV	Městské oblasti, ve kterých je alespoň 15% povrchu pokryto pozemními stavbami s průměrnou výškou > 15 m	0,24	1,0
V	Hornatý a více členitý terén, kde se vítr může místně zesilovat nebo zeslabovat	hodnotí se individuálně	

2.2.2 Síla větru na libovolný prvek vedení

Síla větru Q_{Wx} , způsobená vodorovně vanoucím větrem ve směru kolmém na libovolný prvek vedení je dána vztahem

$$Q_{Wx} = q_h \cdot G_q \cdot G_x \cdot C_x \cdot A \quad (N; N \cdot m^{-2}, m^2) \quad (2.5)$$

kde

q_h je dynamický tlak větru ($N \cdot m^{-2}$), stanoví se z hustoty vzduchu ρ , která je rovna $1,225 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ při teplotě $15^\circ C$ a atmosférickém tlaku 1013 hPa a z rychlosti vzduchu V_h ve výšce h nad zemí

$$q_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_h^2 \quad (2.6)$$

G_q je poryvový součinitel (-)

$$G_q = (k_g)^2 = \left(1 + \frac{2,28}{\ln \frac{h}{z_0}} \right)^2 \quad (2.7)$$

G_x je dynamický součinitel pro uvažovaný konstrukční prvek (-)
lze vypočítat podle Eurokódu ENV 1991-2-4,

C_x součinitel aerodynamického odporu, závisejícího na tvaru uvažovaného prvku (-)

A plocha uvažovaného prvku, promítnuta do roviny kolmé na směr větru (m^2)

2.2.3 Síla větru na vodiče

Tlak větru působící na vodič vyvolává sílu působící kolmo ke směru vedení a zároveň zvětšuje namáhání vodičů. Síla větru na vodič v jednom rozpětí se vypočte podle vztahu

$$Q_{Wc} = q_h \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_c \cdot d \cdot L \cdot \cos^2 \Omega \quad (N; N \cdot m^{-2}, m, m) \quad (2.8)$$

kde

q_h je dynamický tlak větru ($N \cdot m^{-2}$)

G_q poryvový součinitel (-)

G_c dynamický součinitel pro vodiče, závisející na délce rozpětí (nazývaný také součinitel rozpětí) (-)

d průměr vodiče (m)

L délka příslušného rozpětí [m]

Ω úhel náběhu pro uvažovaný směr větru a rozpětí ($^\circ$)

C_c součinitel aerodynamického odporu vodiče (-)

$C_c = 1,0$ pro vodiče o průměru $d \geq 16 \text{ mm}$

$C_c = 1,1$ pro vodiče o průměru $12,5 \text{ mm} \leq d < 16 \text{ mm}$

$C_c = 1,2$ pro vodiče o průměru $d < 12,5 \text{ mm}$

$C_c = 1,1$ pro všechny průměry omrzlých vodičů

Tab.4 Dynamický součinitel pro vodič

Kategorie terénu	Součinitel rozpětí G_c jako funkce větrového rozpětí L						
	Vzorec	100 m	200 m	300 m	400 m	600 m	800 m
I	$1,30-0,073 \cdot \ln(L)$	0,96	0,91	0,88	0,86	0,83	0,81
II	$1,30-0,082 \cdot \ln(L)$	0,92	0,87	0,83	0,81	0,78	0,75
III	$1,30-0,098 \cdot \ln(L)$	0,85	0,78	0,74	0,71	0,67	0,65
IV	$1,30-0,110 \cdot \ln(L)$	0,79	0,72	0,67	0,64	0,6	0,57

Podle [6] uvedené vzorce neplatí pro větrové rozpětí pod 100m. Hodnoty G_c pod 100 m se vypočtou lineární interpolací mezi $G_c = 1$ pro rozpětí 0 m a vypočítanou hodnotou G_c pro rozpětí 100 m.

Přetížení vodiče větrem je definováno vztahy

- pro jeden vodič :

$$z = \frac{\sqrt{(g_1)^2 + (Q_{wc}/L)^2}}{g_1} \quad (- ; N \cdot m^{-1}) \quad (2.9)$$

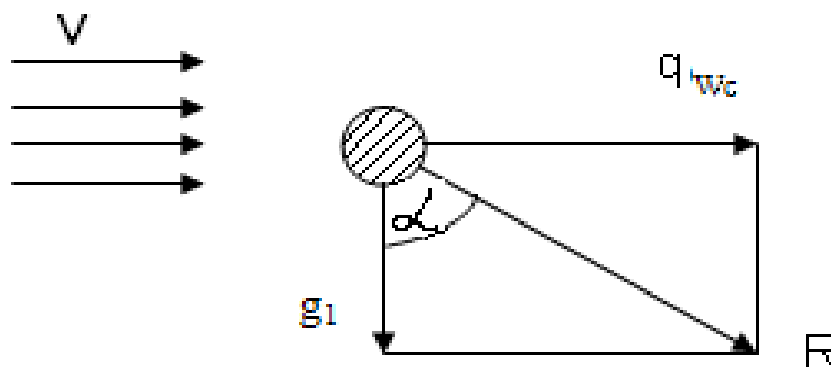
- pro vodiče ve svazku :

$$z = \frac{\sqrt{(n \cdot g_1)^2 + (\sum_i Q_{wc}/L)^2}}{n \cdot g_1} \quad (- ; N \cdot m^{-1}) \quad (2.10)$$

kde g_1 je tíha 1 metru samotného vodiče – svislá síla ($N \cdot m^{-1}$)

Q_{wc} přídavné zatížení vodiče větrem – vodorovná síla ($N \cdot m^{-1}$)

n počet vodičů ve svazku (-)

Obr.2 Vychýlení vodiče vlivem větru do roviny výslednice R

2.2.4 Síla větru na sloupy

Pro výpočet síly větru působící přímo na sloup, můžeme vycházet ze vztahu (2.6)

$$Q_{Wpol} = q_h \cdot G_q \cdot G_{pol} \cdot C_{pol} \cdot A_{pol} \quad (N; N \cdot m^{-2}, m^2) \quad (2.11)$$

kde je G_{pol} dynamický součinitel pro sloup, pro samotné ocelové sloupy je typická hodnota 1,15

lze vypočítat podle Eurokódu ENV 1991-2-4

je C_{pol} součinitel aerodynamického odporu, závisející na tvaru a drsnosti povrchu sloupu (-)

A_{pol} promítnutá plocha sloupu (m^2)

q_h dynamický tlak větru [$N \cdot m^{-2}$]

Tab.5 Součinitel aerodynamického odporu C_{pol} [6]

Typy sloupu	C_{pol}
Ocelové, kompozitní, a betonové s kruhovým profilem	0,7
dřevěné s kruhovým průřezem	0,8
ocelové a betonové s dvanáctiúhelníkovým profilem	
ocelové a betonové se čtvercovým a obdélníkovým profilem	1,5
ocelové, betonové sloupy a dřevěné lepené s osmihranným profilem	1,3
ocelové, betonové a dřevěné lepené sloupy s desetiúhlým profilem, dřevěné lepené sloupy s dvanáctiúhelníkovým profilem	1,2
ocelové, betonové sloupy a dřevěné lepené se šestihranným profilem	1,4
dřevěné lepené sloupy se čtvercovým profilem	1,8
dřevěné lepené sloupy s obdélníkovým profilem	1,9

2.3 Námraza

V zimních obdobích přichází vlivem nízkých teplot možnost výskytu tvorby námrazy. Námraza představuje velké zatížení vodičů venkovních vedení. Zvyšuje namáhání ve vodičích a může tak způsobit přetržení vodičů, ohnutí nebo zlomení stožárů. Oprava poškozeného vedení je z důvodu povětrnostních podmínek složitá a proto je vhodné námraza, která by překročila hodnotu namáhání, na které bylo vedení dimenzováno, v co nejkratší době odstranit. To se provádí dvěma způsoby :

- sklepáváním izolačními tyčemi
- vyhřívání vodičů proudem

2.3.1 Vznik námrazy

Námraza se tvoří při tzv. teplotním zvratu neboli inverzi, kdy je vyšší teplota ve větších výškách a mráz v nižších polohách. Pro vznik námrazy mají důležitou roli tyto faktory :

- a) Obsah vodních par (vlhkost vzduchu)
- b) Obsah nasycených vodních par
- c) Podchlazení vody
- d) Ohřívání vzduchu nad zemí

Podle [4] při relativní vlhkosti 100% je skutečný obsah vodních par roven obsahu nasycených vodních par. Sníží-li se teplota, sníží se také obsah nasycených vodních par a přebytečná pára se začne srážet. Podchlazení vody je úkaz, při kterém čistá voda existuje v kapalně fázi při teplotách nižších než je 0°C. Potom stačí i nejmenší impuls, aby voda okamžitě zmrzla. Podobný úkaz existuje i v ovzduší nějaký předmět (vodič, kde je podchlazená voda ve formě sražené vodní páry- mlhy. Narazí-li takováto mlha na) velmi rychle se přemění v led a vytvoří námrazek.

Rozeznáváme druhy námrazy:

- průsvitná námraza
- zrnitá námraza
- ledovka

Krystalická námraza jsou sněhobílé trsy vláknité struktury, které mají často zrnitou strukturu a prostor mezi dvěma trsy je vyplněn práškovým sněhem. Usazuje se za mlžného počasí na každou nerovnost povrchu, hlavně na vertikálních plochách povrchu předmětů. Tyto krystalické útvary se obvykle rozšiřují směrem od povrchu předmětu proti působení směru větru a vytvářejí několik centimetrů dlouhé hroty, které se zlomí svou vlastní hmotností, větrem nebo jiným mechanickým ořísesem. Tloušťka této námrazy dosáhne až 10 cm. Její hmotnost je průměrně 0,3 kg.dm⁻³.

Zrnitá námraza na rozdíl od krystalické námrazy vzniká zrnitá námraza hlavně rychlým zmrznutím přechlazených kapek mlhy při jejich dotyku s povrchem předmětu. Při tomto ději se vytvářejí útvary z ledu se značnou přilnavostí (podle velikosti vodních kapek mlhy), které mají někdy tvar trsu. V důsledku velké dotykové plochy s předmětem a v důsledku pevného přichycení se na předmětech může vytvořit zrnitá námraza značně větší než u krystalické námrazy. Její měrná hmotnost je až 0,5 kg.m⁻³.

Podle toho jak se mění počasí, mění se i vnitřní struktura námrazy a lze tedy pozorovat vrstvy námraz v řezu. Vlivem těchto změn počasí se může stát, že některé vrstvy námraz jsou tvořeny krystalickou námrazou a některé zrnitou námrazou. Vlastnosti námrazku jsou potom výsledkem vlastností jednotlivých vrstev. V těchto případech je velmi důležitá první vrstva, která přidržuje celý námrazek k předmětu (udává trvanlivost celé námrazy).

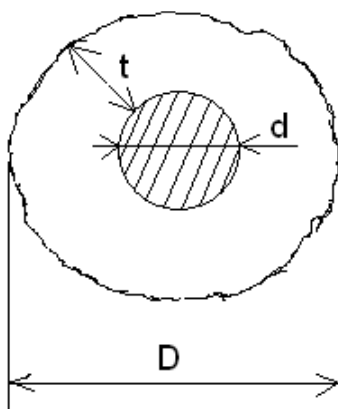
Ledovka vzniká dopadem mrznoucích kapek z husté mlhy nebo při mrhnutí na zamrznutý povrch přičemž se kapky rozlijí po povrchu dříve než zmrznou. Vzniká tak průhledná vrstva ledu s hladkým povrchem. Obvyklou příčinou vzniku ledovky je rychlý vpád teplého vzduchu, po předcházejícím období mrazu. Ve výškách se nachází teplý vzduch zatímco nad zemským povrchem může ještě stagnovat chladný vzduch. Kapky deště dopadající na zemský povrch jsou podchlazené a mrznou. Měrná hmotnost ledovky je průměrně od 0,8 – 0,9 kg.dm⁻³.

Nejpříznivější podmínky pro vznik námrazy jsou v rozmezí teplot 0 až -10°C . Při snižování teploty klesá absolutní vlhkost vzduchu a tedy i pravděpodobnost vzniku námrazy. Při teplotě do -6°C vzniká převážně ledovka a při teplotě od -3°C do -10°C jsou převažují námrazy.

2.3.2 Zatížení námrazou

Pro stanovení referenčního zatížení námrazou podle [5] je území České republiky rozděleno na námrazové oblasti, které jsou znázorněny v Mapě námrazových oblastí ČR (Příloha č.1). Velikost námrazku se statisticky sleduje z naměřených hmotností námrazy na měřící tyči o průměru 30 mm. Hmotnost námrazy na vodiči o průměru 30 mm v příslušné námrazové oblasti je specifikován číslem za značkou N pro dané námrazové oblasti, tj. do 1 kg/m v oblasti N1, do 2 kg/m v oblasti N2, do 3 kg/m v oblasti N3 atd., s výjimkou námrazové oblasti N0, které odpovídá hmotnost námrazy na vodiči o průměru 30 mm do 0,5 kg/m. V námrazové oblasti NK je hmotnost námrazy větší než 18 kg/m.

Pro stanovení zatížení námrazou na venkovním vedení se podle [5] uvažuje pouze s námrazou z oblačnosti ve formě jinovatky o hustotě $\rho_I = 500 \text{ kg/m}^3$.



Obr.3 Námrazek na vodiči o tloušce t

Tab.6 Námrazové oblasti

Námrazová oblast	Referenční zatížení námrazou I_R (N/m) na jednotku délky vodiče o průměru d (mm)	
	$d \leq 30 \text{ mm}$	$d > 30 \text{ mm}$
N0	$1,298 + 0,1562 \cdot d$	$5,267 + 0,0239 \cdot d$
N1	$3,873 + 0,2698 \cdot d$	$10,566 + 0,0467 \cdot d$
N2	$10,566 + 0,4457 \cdot d$	$21,423 + 0,0838 \cdot d$
N3	$18,305 + 0,5899 \cdot d$	$33,032 + 0,0957 \cdot d$
N5	$35,376 + 0,8155 \cdot d$	$55,569 + 0,1424 \cdot d$
N8	$63,077 + 1,0890 \cdot d$	$90,254 + 0,1831 \cdot d$
N12	$102,063 + 1,3852 \cdot d$	143,619
N18	$162,924 + 1,7501 \cdot d$	215,427
NK	Stanoví se individuálně	

Charakteristické zatížení námrazou na jednotku délky vodiče I_K ve výšce h nad zemí se určí ze vztahu

$$I_K = K_h \cdot I_R \quad (N \cdot m^{-1}; -, N \cdot m^{-1}) \quad (2.12)$$

kde je I_R referenční zatížení námrazou na jednotku délky vodiče o průměru d v příslušné námrazové oblasti podle Tab.6

K_h součinitel výšky pro zatížení námrazou, který je roven

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,13} \quad \text{pro námrazové oblasti N0 až N3} \quad (2.13)$$

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,25} \quad \text{pro námrazové oblasti N5 až N18 a NK} \quad (2.14)$$

h je výška vodiče nad zemí (při teplotě -5°C bez námrazy)

Návrhové zatížení námrazou na jednotku délky vodiče I_d [N/m] ve výšce h nad zemí se určí ze vztahu

$$I_d = \gamma_I \cdot I_K \quad (N \cdot m^{-1}; -, N \cdot m^{-1}) \quad (2.15)$$

kde γ_I je koeficient pravděpodobnosti Tab. 7 (-)

I_k charakteristické zatížení námrazou ($N \cdot m^{-1}$)

Tab.7 Koeficienty pravděpodobnosti zatěžovacích stavů

Zatěžovací stav	Tíha	Úroveň spolehlivosti					
		1		2		3	
	γ_G	γ_w	γ_I	γ_w	γ_I	γ_w	γ_I
Exténní vítr (-5°C)	1,00	1,00		1,20		1,40	
Minimální teplota	1,20	-30°C		-35°C		-40°C	
Rovnoměrné zatížení námrazou (-5°C)	1,00		1,00		1,25		1,50
Kombinované zatížení větrem a námrazou (-5°C)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,5
		$\Psi_{WC} = 0,25$		$\Psi_{WC} = 0,25$		$\Psi_{WC} = 0,25$	

Přetížení vodiče námrazou je veličina definovaná vztahem [3] :

$$z = \frac{g_1 + I_d}{g_1} \quad (-) \quad (2.16)$$

Kde g_1 je tíha 1m samotného vodiče ($N \cdot m^{-1}$).

2.4 Současné působení klimatických vlivů

Nejčastějším kombinovaným zatížením vedení, které se bere v úvahu je kombinované zatížení větrem a námrazou.

Účinek větru na omrzlý vodič je určen třemi proměnnými:

- rychlostí větru, kdy je vodič pokryt námrazou
- hmotností námrazové vrstvy
- tvarem námrazové vrstvy, tzn. průměrem a příslušným součinitelem aerodynamického odporu

Při této kombinaci se bere v úvahu extrémní zatížení námrazou, která je rovna návrhové hodnotě zatížení námrazou ($\gamma_I \cdot Q_{IK}$), se zatížením mírným větrem ($\Psi_W \cdot Q_{WK}$).

Při výpočtu zatížení vodičů při kombinovaném zatížení námrazou a větrem se jako mírná rychlost větru bere 50% extrémní rychlosti větru s dobou návratu 50 let. Předpokládá se s hustotou $\rho_I = 500 \text{ kg/m}^3$ a součinitelem aerodynamického odporu $C_{cl} = 1,1$, pro všechny průměry vodičů. Podle Tab. 7 je součinitel pro kombinované zatížení vodičů větrem a námrazou $\Psi_{Wc} = 0,25$.

Pro kombinaci zatížení extrémní návrhovou námrazou a mírným větrem je dynamický tlak větru na omrzlém vodiči dán vztahem:

$$q_{hcl} = \Psi_{Wc} \cdot q_h \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-1}; -, \text{N} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.17)$$

kde je Ψ_{Wc} součinitel kombinace zatížení omrzlého vodiče větrem
 q_h dynamický tlak větru dle vztahu 2.7

Průměr omrzlého vodiče D [m] pro tuto kombinace lze vypočítat ze vztahu :

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4 \cdot I_d}{g \cdot \pi \cdot \rho_I}} \quad (\text{m}) \quad (2.18)$$

kde je d průměr vodiče [m]
 I_d zatížení námrazou na jednotku délky vodiče ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
 g gravitační zrychlení ($g=9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)
 π Ludolfovo číslo (3,1416)
 ρ_I hustota námrazy $\rho_I=500 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$

Jednotkové zatížení omrzlého vodiče větrem

$$q_{Wc} = q_{hcl} \cdot G_q \cdot G_C \cdot C_{cl} \cdot D \cdot \cos^2 \Omega \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-1}; -, \text{N} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.19)$$

kde je C_{cl} součinitel aerodynamického odporu omrzlého vodiče
 (předpokládá se $C_{cl} = 1,1$)

Přetížení způsobené větrem a námrazou

$$z = \frac{\sqrt{(g_1 + I_d)^2 + (q_{Wc})^2}}{g_1} \quad (-) \quad (2.20)$$

2.5 Bouřky

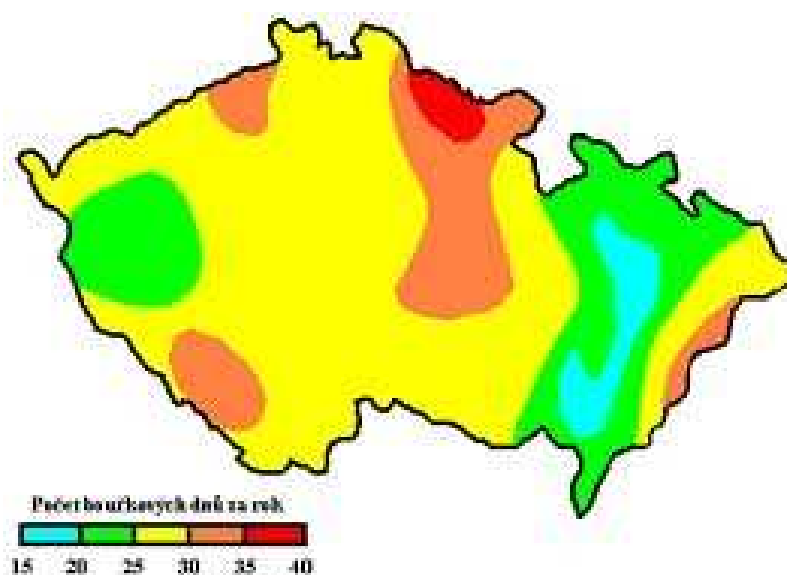
Bouřky jsou přírodní úkazy, při nichž dochází k výboji atmosférické elektřiny. Při této činnosti je uvolňováno velké množství energie za velmi krátký okamžik. Svými následky velmi nepříznivě působí zvláště na venkovní vedení, které ohrožují buď přímým zásahem do stožárů a vodičů, nebo přepětím, vzniklým indukci při vzdálenějších výbojích. Při tomto jevu dochází velmi často k poškození izolátorů, stožárů, k přepálení vodičů apd. Bouřkové přepětí trvají velmi krátkou dobu (do 100 μ s), mohou však dosáhnout velikostí, které se nedají žádnou izolací zvládnout..

2.5.1 Vznik bouřek

Bouřkový mrak se vytváří při mohutném výstupu oblaku teplého a vlhkého vzduchu. Podle příčiny, které způsobují vzestup vzduchových mas se rozeznávají tři druhy bouřek :

- *Bouřky z tepla (místní)* – sluneční paprsky zahřívají vzduchové vrstvy při zemi a tím začnou stoupat a jsou nahrazovány klesajícím chladným vzduchem. Podmínkou vzniku bouřky je takové prohřátí vzduchu při zemi, aby vystoupil a značně přesáhl výšku, kde teplota klesá pod 0 °C.
- *Frontální bouřky* - bouřky vznikají při postupu studeného vzduchu, který vytlačuje od povrchu země teplý vzduch vzhůru. Ten se ochlazuje a vytváří se mohutný bouřkový mrak.
- *Orografické bouřky* – vznikají prouděním vzduchu přes kopce nebo souvislé horské hřebeny, přičemž se teplý vzduch dostává do značných výšek.

Největší bouřková činnost je na horách (asi 30 až 45 bouřkových dnů za rok) a nejmenší v nížinách nebo v nižších polohách (asi 20 až 30 dnů v roce).



Obr. 4 Izokeraunická mapa ČR [13]

3 KMITÁNÍ VODIČŮ VLIVEM VĚTRU

[4]Vlivem větru vzniká přídavné zatížení vodičů, které zvětšuje jeho namáhání, vychýlení vodiče do roviny výslednice, způsobené působením větru a tíhou vodiče. Může způsobit též kmitání vodičů ve svislé rovině.

Kmitání vzniká aerodynamickým působením větru poměrně malých rychlostí. Frekvence kmitání bývá 10 až 15 Hz ,délka stojaté vlny na vodiči 1 až 20m a amplituda několik dm. Námraza na vodičích v kombinaci s větrem může způsobit také kmitání (galloping). Tento jev je odlišný od chvění vyvolaného větrem. Má nízký kmitočet (do 1 Hz) a amplituda se pohybuje od několika metrů až po velikost průhybu v rozpětí. Teplota vzduchu je kolem bodu mrazu a rychlost větru může být v intervalu $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vznikem námrazy se mění profil vodiče a to vyvolává aerodynamický zdvih a vodič se stane aerodynamicky nestabilní a kmitá.

Kmity[4] vznikají, když vlastní frekvence vodiče ν_{vl} je rovna frekvenci vynucené větrem ν_{vn} . Vynucená frekvence lze stanovit ze vztahu:

$$\nu_{vn} \doteq 200 \cdot \frac{v}{d} \quad (\text{Hz}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}) \quad (3.1)$$

kde je v rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

d průměr vodiče (mm)

Považuje-li se vodič za hmotné vlákno, pak pro vlastní frekvenci stojatého vlnění můžeme psát :

$$\nu_{vl} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{F}{g_1}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} \quad (\text{Hz}) \quad (3.2)$$

kde je λ délka vlny (m)

F tah ve vodiči (N)

g_1 hmotnost 1 metru vodiče [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$]

σ namáhání vodiče (MPa)

γ měrná hmotnost vodiče ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$)

Kmitání se projeví v momentě, kdy délka vodiče je celistvým násobkem vzdálenosti dvou uzlů stojaté vlny, tj. $\lambda/2$. Z předchozích vztahů lze vyjádřit délku vlny :

$$\lambda = \frac{d}{200} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} \quad (\text{m}) \quad (3.3)$$

Na vznik vibrací se podílí několik faktorů jako je charakter větru, terénní nerovnosti, výška ve které je vodič umístěn, rozpětí závěsných bodů.

- a) Charakter větru - vibrace vodičů lze dosáhnout při působení rovnoměrného větru i malých rychlostí. Spodní hranice rychlosti větru, u kterého tento jev nastává, se pohybuje od $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Menší rychlosti větru nemají na způsobení kmitání dostatečnou energii. Horní hranice rychlosti je dána rovnoměrností proudění a pohybuje se od $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při vyšších rychlostech není už proudění větru rovnoměrné a má spíše charakter rázů. Důležitý je i úhel mezi směrem větru a vedením. Do 30° vibrace nevzniká, od 30° do 45° nemá trvalý charakter.

- b) Terénní nerovnosti – rovný terén napomáhá rovnoměrnosti proudění a tím napomáhá vzniku vibrací.
- c) Výška vodiče a rozpětí – čím výše je vodič nad zemí, tím méně se projevují terénní nerovnosti a vítr je rovnoměrnější. Proto jsou tyto vodiče náchylnější na vznik vibrací. Rovněž tak zvětšováním rozpětí závěsných bodů napomáhá ke vzniku vibrací.

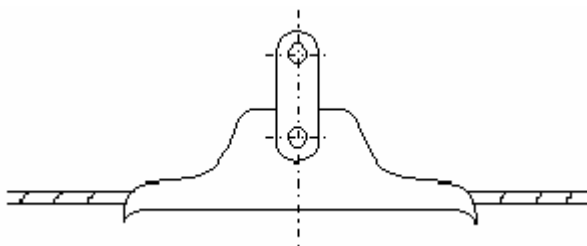
3.1 Prostředky pro snížení negativních vlivů způsobených větrem

Vlivem kmitání vodičů, dochází k jeho namáhání a v místech jeho upevnění může nastat lom. K eliminaci těchto poruch se v zásadě můžeme bránit dvěma způsoby:

a) Ochrana pasivní

Tato ochrana zmenšuje účinek kmitání. Patří sem například:

- použití výkyvných lehkých svorek obr.3, které sledují pohyb vodiče a tím se sníží dynamické namáhání v místě výstupu vodiče ze svorky
- zesílení lan vodičů u výstupu ze svorek ovitím páskem nebo obalem z pružných drátů



a)



b)

Obr.5 a),b) Výkyvná svorka [8]

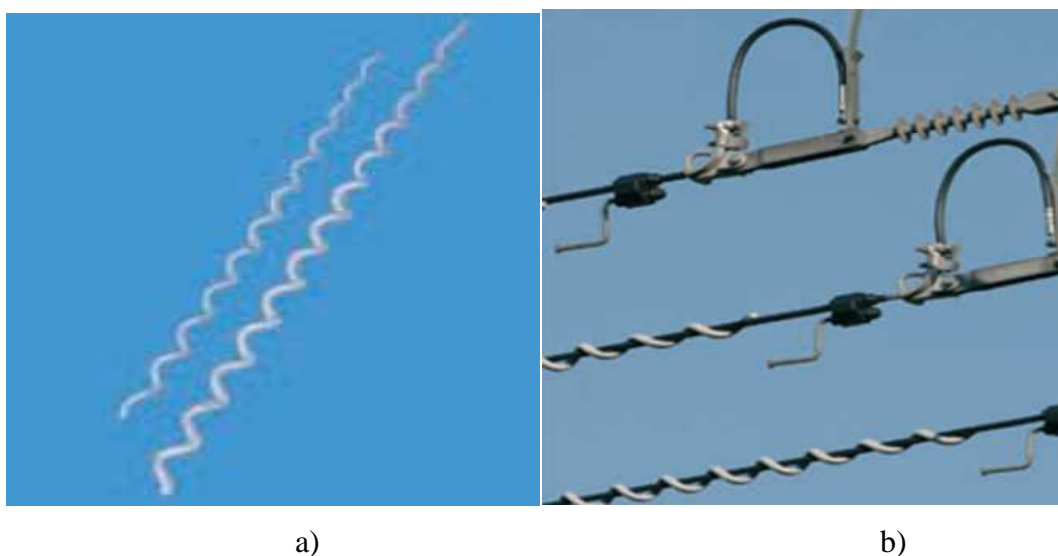
b) Ochrana aktivní

Tato ochrana zamezuje vlastnímu kmitání, posunuje vlastní frekvenci v_{vl} do oblasti mimo velikost v_{vn} . K této ochraně například patří:

- Antivibrační lano – je to speciální duté hliníkové lano, uvnitř kterého je volně uloženo ocelové lano. Lana jsou napnuta různým tahem a jejich vlastní frekvence je různá. Pro náročnou montáž a výbavu je použití jen ojedinělé.
- Tlumiče kmitání – je to zařízení, které se montuje do místa kmitny vodiče. Při vzniku vibrací vyvolávají síly fázově posunutě za pohybu vodiče a tím působí proti kmitání. Podle provedení mohou být kývavé, pružinové, váhové, pneumatické. V našich sítích se nejčastěji užívají tlumiče kývavé.



Obr.6 Kývavý tlumič typu Stockbridge [11]



a)

b)

Obr. 7 a),b) Pružinový tlumič [11]

Mimo kmitání způsobuje působení větru vychýlení vodičů z jeho klidové polohy. Abychom zabránili těmto poruchám dávají se na vedení distanční rozpěrky.

Je to prvek, který nezabraňuje kmitání vodičů, ale zabezpečuje konstantní vzdálenost vodičů od sebe. Vyrábí se dvoj-, troj-, čtyř- a šesti ramenná pro vedení drátů.



Obr. 8 Distanční rozpěrka [10]

4 ODSTRAŇOVÁNÍ NÁMRAZY Z VENKOVNÍHO VEDENÍ

Působení námrazy na vedení má odlišný charakter oproti ostatním živelným vlivům jako jsou např. vichřice, bouřka, přívalové deště. Na rozdíl od těchto vlivů, u kterých musíme vyčkat až na konec jejich činnosti, lze u námrazy předcházet jejímu nadměrnému nárůstu, a tak předejít tvorbě namáhání a poruchám. Toho lze docílit včasným zákrokem na základě monitorování tvorby námrazy, které se provádí dvěma způsoby:

- Automatizovaný systém námrazoměrných stanic
- Kontrola provozními pracovníky

4.1 Mechanické odstraňování námrazku

Mechanické odstraňování námrazku z vodičů je velmi namáhavé a fyzicky a časově náročné. Při pozvolném nárůstu námrazy je tato metoda realizovatelná. Provádějí ji provozní pracovníci použitím tyčí kuželového nebo válcového tvaru, stíráním (seškrabáváním) námrazy z vodičů (obr.9), nebo oklepáváním (rozkmitáním). Tyče jsou vyrobeny z vysokopevnostního kompozitu epoxidové matrice a tkaných skleněných vláken.

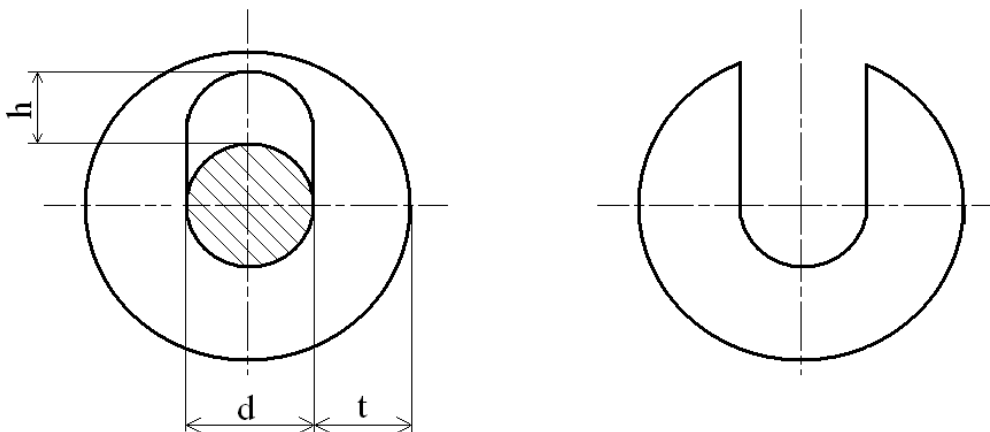


Obr. 9 Mechanické odstraňování námrazy [16]

Při velmi rychlém nárůstu námrazy je tato metoda neefektivní. Námrazek se nestíhá včas odstranit a dochází ke škodám na vedení a tím i k přerušení dodávky elektrické energie.

4.2 Odstraňování námrazy z vodičů vyhříváním

Jednou z metod odstraňování námrazku z vodičů je pomocí vyhřívacího proudu. Pro stanovení hodnoty tohoto proudu je potřeba určit teplo, potřebné k rozehrání námrazku na vodiči, které vyvine vodič při průchodu elektrického proudu. Důležitým parametrem při odstraňování námrazy je také doba zatížení vodiče vyhřívacím proudem, která má vliv na mechanickou pevnost vodiče.



Obr.10 Námraza na vodiči a námrazek

Při průchodu elektrického proudu vodičem vzniká Jouleovo teplo úměrné odporu vodiče a čtverci proudu. Část tepla se spotřebuje v samotném vodiči (ohřátí vodiče) a část se předává do okolí sáláním a prouděním. Při sestavení tepelné bilance na vodičích nesmíme zapomenout na klimatické vlivy jako je sluneční záření. Můžeme tedy napsat rovnici o zachování energie :

$$Q_J + Q_Z = Q_S + Q_P + Q_A \quad (J) \quad (4.1)$$

kde

Q_J je Jouleovo teplo, které se vyvine ve vodiči průchodem proudu [J]

Q_Z teplo pohlcené ze slunečního záření [J]

Q_S teplo odvedené do okolí sáláním [J]

Q_P teplo odvedené do okolí prouděním [J]

Q_A teplo akumulované ve vodiči [J]

Vzhledem ke krátkodobému zatížení vodiče – přirovnatelnému ke zkratu, je možné zanedbat vliv působení slunečního záření, neboť pohlcené teplo od slunečního záření oproti Joulovu teplu je několikanásobně menší.

Teplo odvedené do okolí sáláním a prouděním je při krátkodobém odtavování taktéž zanedbatelné a tak můžeme říci, že hodnota Jouleova tepla Q_J , vyvinutá elektrickým proudem, je spotřebována na ohřátí vodiče. Rovnice se tak zjednoduší na tvar :

$$Q_J = Q_A \quad (J) \quad (4.2)$$

Aby námraza skutečně odpadla, je nutné dosáhnout oteplení alespoň o 40 °C vyšší než je teplota okolí. Se stoupajícím proudem a tím i oteplením se doba vyhřívání zkracuje.

Pro předcházení problémům s námrazou se doporučuje vyhřívát vedení ještě před vážným narůstáním námrazy. Jestliže se udržuje vodič na teplotě 9 °C, zabrání se jejich namrzání.

Při odpadnutí námrazy, může dojít k vyšvihnutí vodiče vlivem náhlého odlehčení od námrazy, důsledkem tohoto negativního jevu může docházet i ke zkratům a proto se musí s tímto

jevem počítat. Nejčastější metodou je metoda kdy se vedení na jednom konci spojí nakrátko a z druhé strany se napájí tak, aby proud námrazu rozpustil.

4.2.1 Vyhřívání vedení stejnosměrným proudem

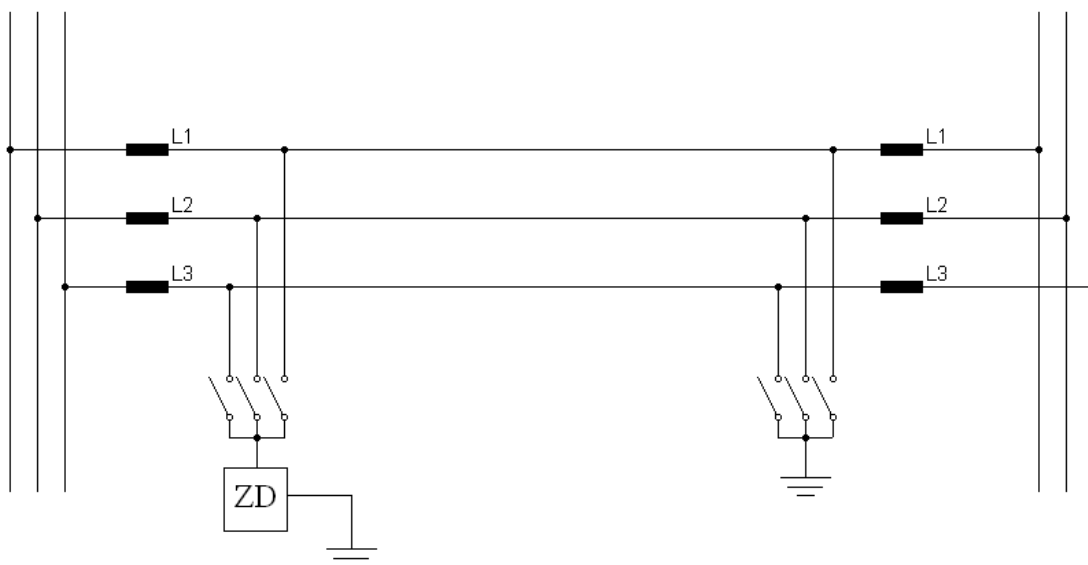
Pro vedení s velkým průřezem vodičů je vhodné požívat k odstraňování námrazy stejnosměrný proud. Odstraňování námrazy stejnosměrným proudem se může udělat těmito způsoby :

- jednofázový zkrat (fáze – zem)
- dvojfázový zkrat (fáze – fáze)
- třífázový zkrat (tři fáze – zem)

Metoda jednofázového zkratu

Tato metoda je založená na principu zapojení jednoho pólu zdroje stejnosměrného proudu na jednu fázi vodiče a druhý pól je uzemněný. Zdroj stejnosměrného proudu zahřívá jednu fázi odpojené sítě. Po odpadnutí námrazy z této fáze se provede zapojení druhé fáze a pak třetí.

Při tomto způsobu je velmi důležité mít dobré zemniče.

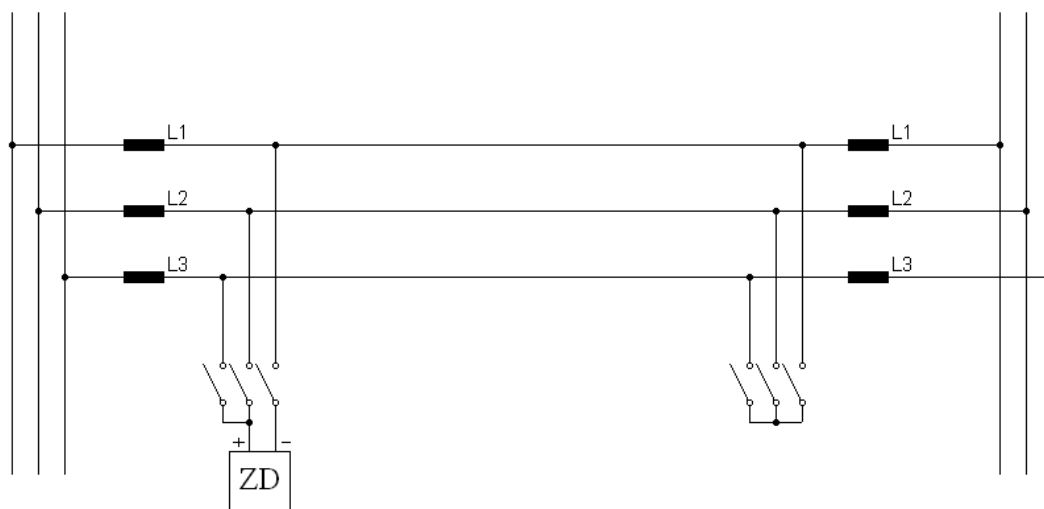


Obr.11 Odstraňování námrazy stejnosměrným proudem jednofázovým zapojením

Metoda dvojfázového zkratu

Tato metoda je zobrazená na obrázku 12, při které zdroj stejnosměrného proudu zahřívá vodiče dvou fází odpojené sítě. Po odstranění námrazy z těchto fází se zahřívá třetí fáze. Proud teče třetí fází a vrací se jednou nebo dvěma fázemi odlehčenými od námrazy. Čas odstranění námrazy podle těchto zapojení je menší než u jednofázového zkratu.

Přednost této metody je, že nepotřebuje dobré zemniče.

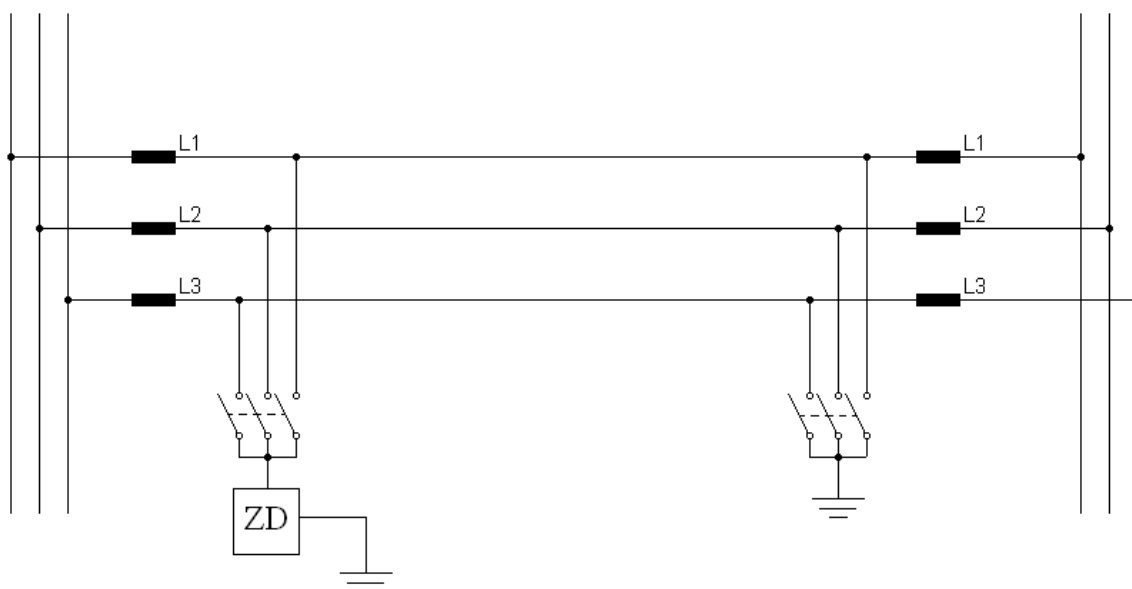


Obr.12 Odstraňování námrazy stejnosměrným proudem dvoufázovým zapojením s využitím třetí jako zpětné

Metoda třífázového zkratu

Při této metodě se odstraňuje námraza ze všech tří fází současně. Zdroj stejnosměrného proudu je zapojen na začátku vedení jednotlivých fází a na konci vedení jsou vodiče spojené a uzemněné. Schéma zapojení je na obrázku 13.

Výhoda této metody je v čase potřebném k odstraňování námrazy z vodičů, kdy se námraza odstraňuje ze všech fází současně. Tato metoda je tedy třikrát rychlejší než u jednofázového zkratu. Nevýhodou je použití zemničů na začátku a na konci vedení.

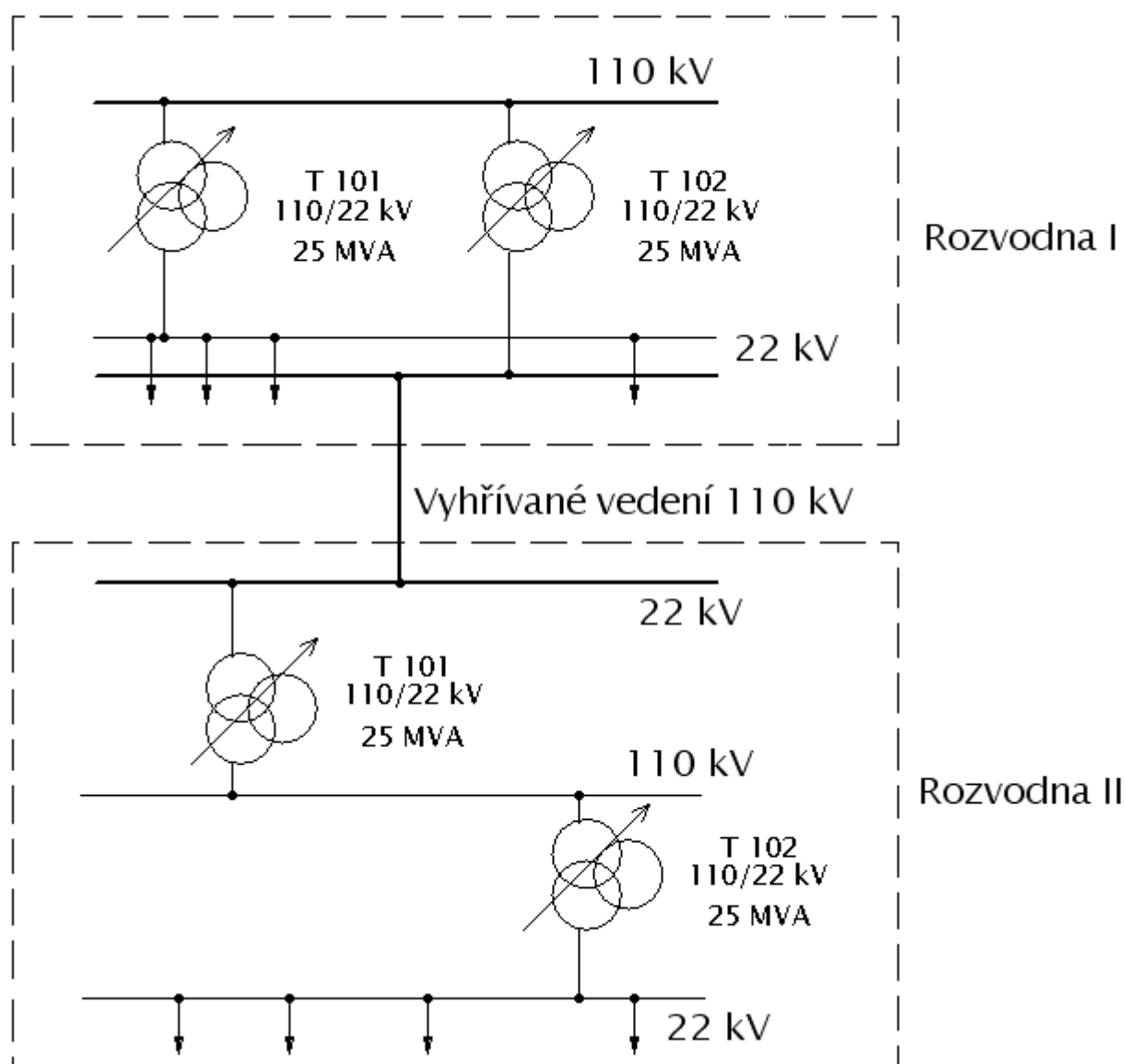


Obr.13 Odstraňování námrazy stejnosměrným proudem třífázově zapojeným

4.2.2 Odstraňování námrazy z vodičů vedení 110 kV provozním proudem

Použití jednotlivých způsobů odstraňování námrazy z vedení je dáno konfigurací sítě 110, 22 kV a manipulačními možnostmi v rozvodnách. Jednou z metod je převedení napětí vedení 110 kV na napětí 22 kV. Vedení se zahřeje provozním zatížením 22 kV, což má za následek zvýšení proudu přibližně pětinasobně oproti napěťové hladině 110 kV. Dojde k ohřátí vodičů a opadnutí námrazy. Vodiče jsou převážně typu AlFe s průřezem 240 mm² a 180 mm².

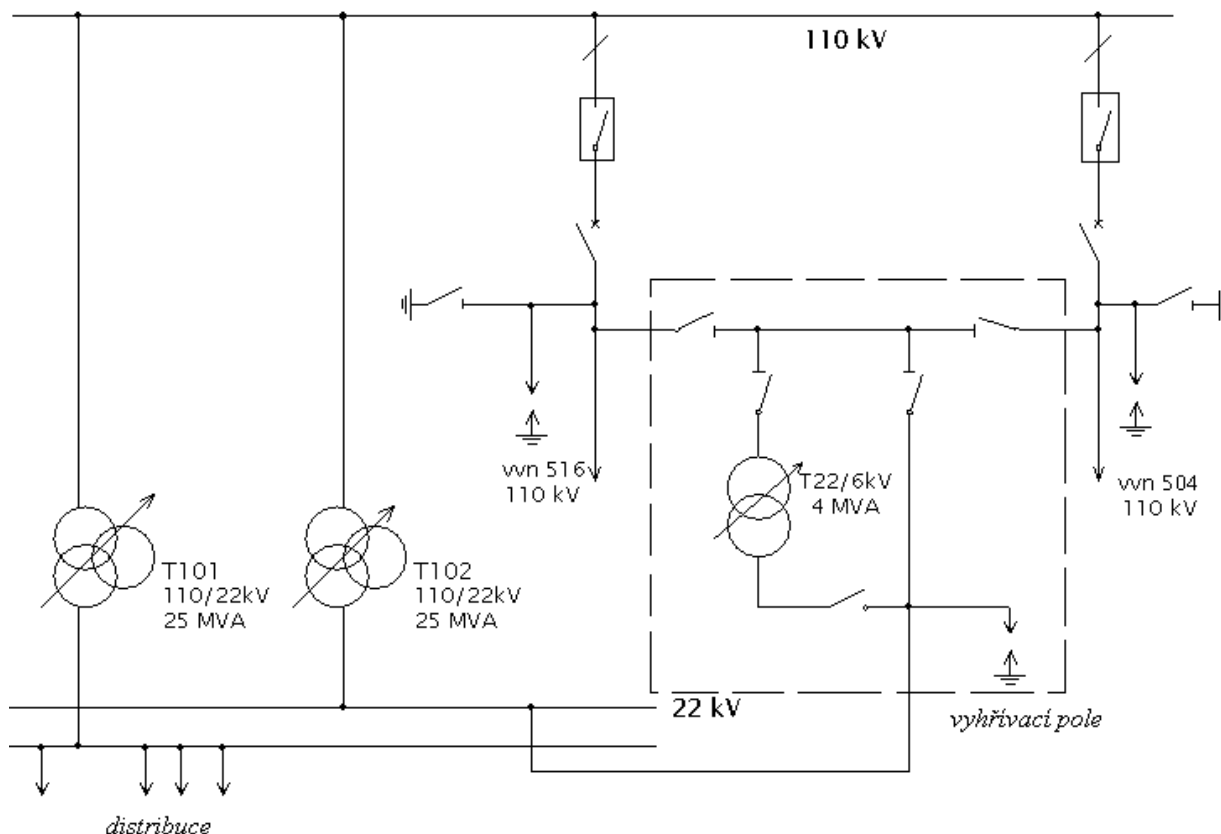
Principiální schéma je na obrázku 14. Pomocí vhodného zapojení dvou transformátorů 110/22 kV lze vyregulovat úbytek napětí. Metoda nevyžaduje žádné investiční náklady.



Obr. 14 Vyhřívání vedení 110 kV provozním proudem 22 kV

4.2.3 Vyhřívání vypnutého vedení 110 kV

Další metodou je vyhřívání vypnutého, na konci zkratovaného vedení 110 kV, které se napájí v závislosti na délce a na průřezu napětím 6 kV, 22 kV nebo i jiným. K tomuto účelu byla zřízena pomocná rozvodna v rozvodně Řípov u Třebíče s transformátorem 22/6 kV



Obr.15 Vyhřívací zařízení pro vedení v rozvodně Řípov

Rozvodna musí obsahovat regulační transformátor 22/6 kV o výkonu 4 MVA a pomocné odpojovače pro převod napěťové hladiny 110 kV na 22 kV i 6 kV. Vyhřívání se na konci uzemní a potřebný vyhřívací proud se reguluje transformátorem 22/6 kV. Veškeré zařízení musí být dimenzováno na 600 A.

4.2.4 Odstraňování námrazy z vedení 22 kV

Pro vedení 22 kV je odstraňování námrazy náročnější oproti vedení 110 kV. Vedení 22 kV je složitější z důvodu velkého množství odboček a přípojních míst odběratelů. Na základě rozsahu a velikosti námrazy, počtu úseků vedení 22 kV požadovaných pro vyhřívání musí dispečer dispečinku 22 kV zkoordinovat postup vyhřívání.

Odstraňování námrazy na venkovním vedení 22 kV se provádí zatížením vedení větším proudem, které má za následek úbytek napětí na vedení.

4.3 Zapojení transformátoru 110/vn kV a vyhřívaného vedení

Potřebný vyhřívací proud se docílí zvláštním zapojením transformátoru 110/vn kV. Vyhřívací proud lze zvolit tak aby námraza odpadla během několika minut. Metoda se dá využívat všude, kde lze uvolnit jeden transformátor 110/vn a jednu přípojnicí.

U transformátoru se odpojí uzel 110 kV a napájí se jen do jedné fáze 110 kV. Zbývající dvě fáze se rozpojí a připojí na uzemnění rozvodny.

Při tomto zapojení vznikne na straně vn mezi uzlem vn a spojením se zemí napětí v jedné fázi $2/3 U_{f_{vn}}$ a ve zbývajících dvou fázích napětí $1/3 U_{f_{vn}}$. Díky tomuto zapojení a možnosti regulace $\pm 16\%$ můžeme docílit potřebného napětí pro optimální vyhřívací proud podle parametru vedení (délka a průřez vodiče). Potřebné napětí připojíme na fázi vyhřívaného vedení, které je na konci zkratované na zem. Zbývající dvě fáze se připojí na uzemnění rozvodny.

Jednotlivé způsoby zapojení pro různá vyhřívací napětí :

a) Pro transformaci 110/22 kV je to 3,7 – 5,1 kV

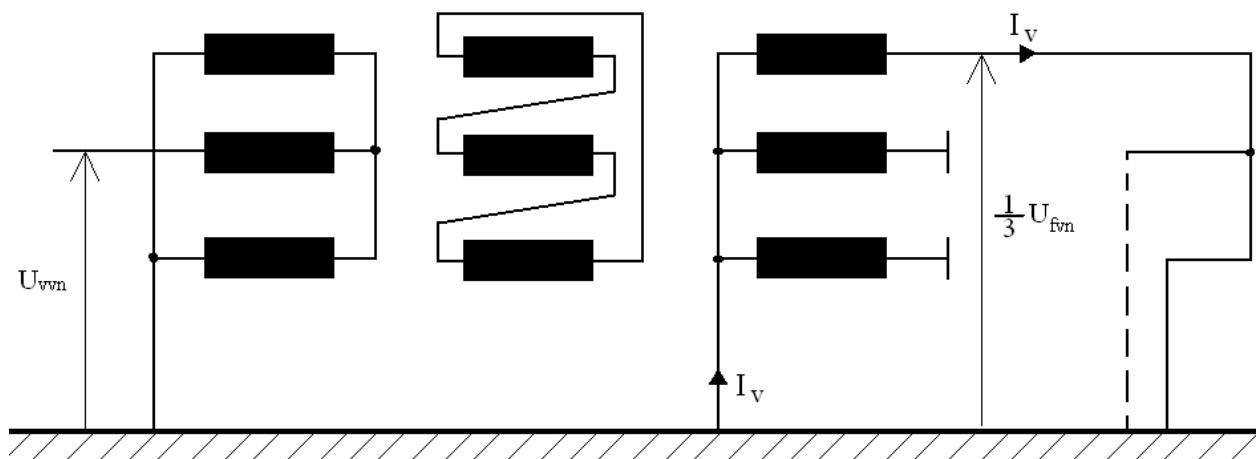
$$U_V = \frac{1}{3} \cdot U_{f_{vn}} \pm 16 \% \quad (\text{V}) \quad (4.3)$$

$$U_V = \frac{1}{3} \cdot I_V \cdot \sqrt{(2R_V)^2 + (2X_V + X_T)^2} \quad (\text{V}) \quad (4.4)$$

Kde R_V je činný odpor vyhřívaného vedení (Ω)

X_V reaktance vyhřívaného vedení (Ω)

X_T reaktance transformátoru (Ω)

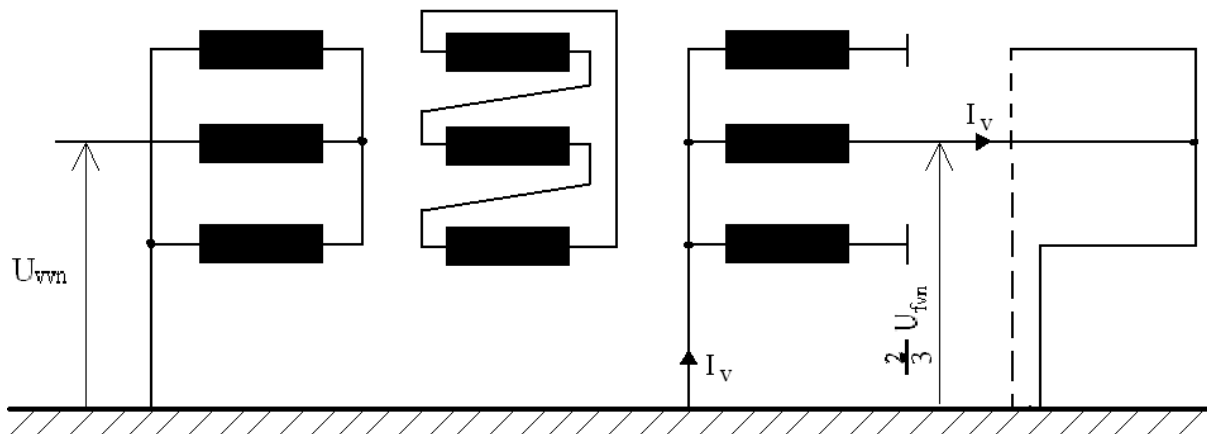


Obr.16 Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_V = \frac{1}{3} U_{f_{vn}}$

b) Pro transformaci 110/22 kV je to 7,4 – 10,3 kV

$$U_V = \frac{2}{3} \cdot U_{f_{vn}} \pm 16 \% \quad (\text{V}) \quad (4.5)$$

$$U_V = \frac{2}{3} \cdot I_V \cdot \sqrt{(2R_V)^2 + (2X_V + X_T)^2} \quad (\text{V}) \quad (4.6)$$

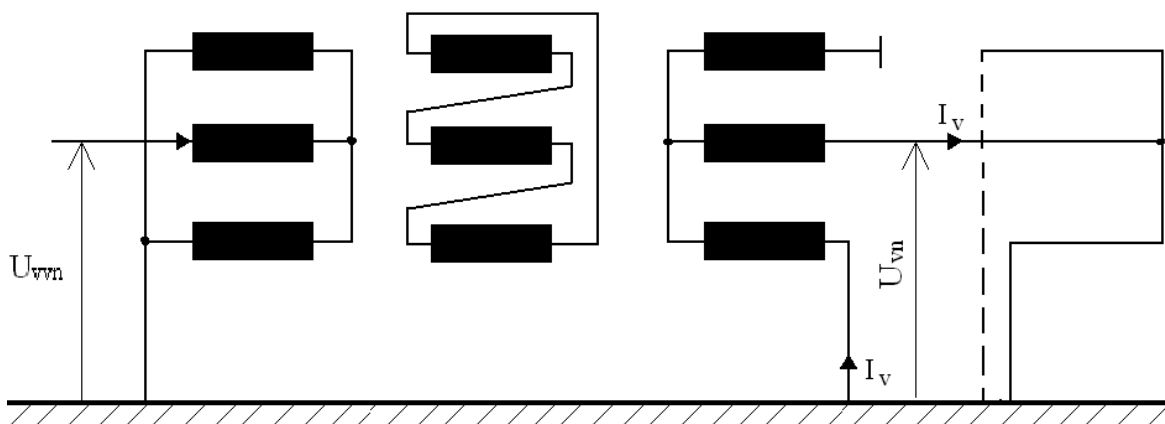


Obr.17 Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = \frac{2}{3} U_{fvn}$

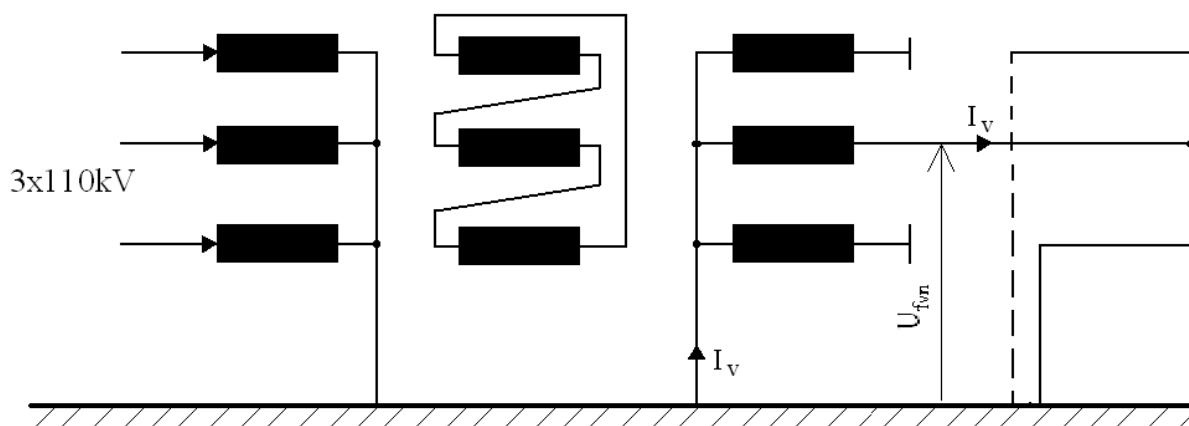
c) Pro transformaci 110/22 kV je to 11,2 – 15,3 kV

$$U_V = U_{fvn} \pm 16 \% \quad (V) \quad (4.7)$$

$$U_V = I_V \cdot \sqrt{(2R_V)^2 + (2X_V + X_T)^2} \quad (V) \quad (4.8)$$



Obr.18 Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = U_{fvn} \pm 16\%$



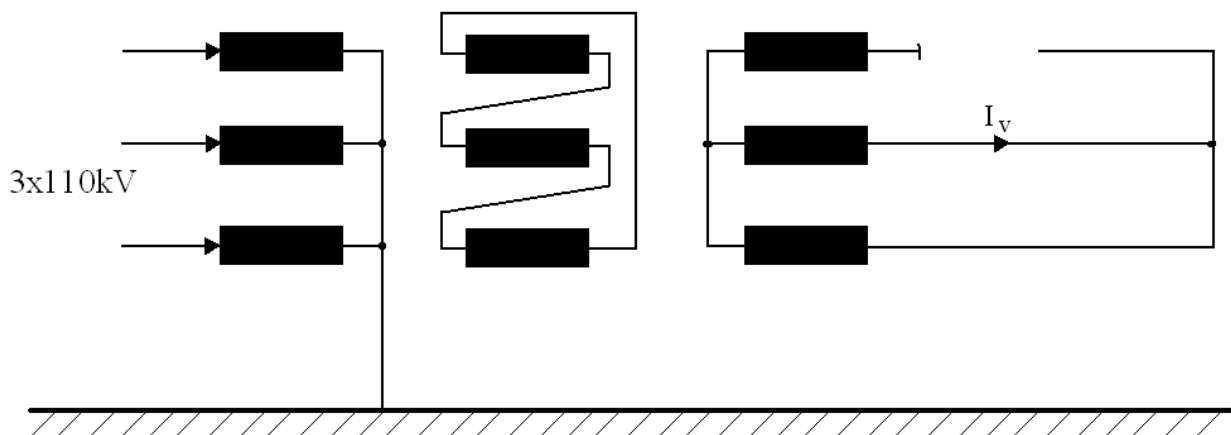
Obr.19 Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_v = U_{fvn} \pm 16\%$

d) Pro transformaci 110/22 kV je to 19,3 – 26,7 kV

Toto zapojení lze použít u vedení jen tehdy, pokud nejsou připojeny distribuční transformátory.

$$U_V = \sqrt{3} \cdot U_{f_{vn}} \pm 16 \% \quad (\text{V}) \quad (4.9)$$

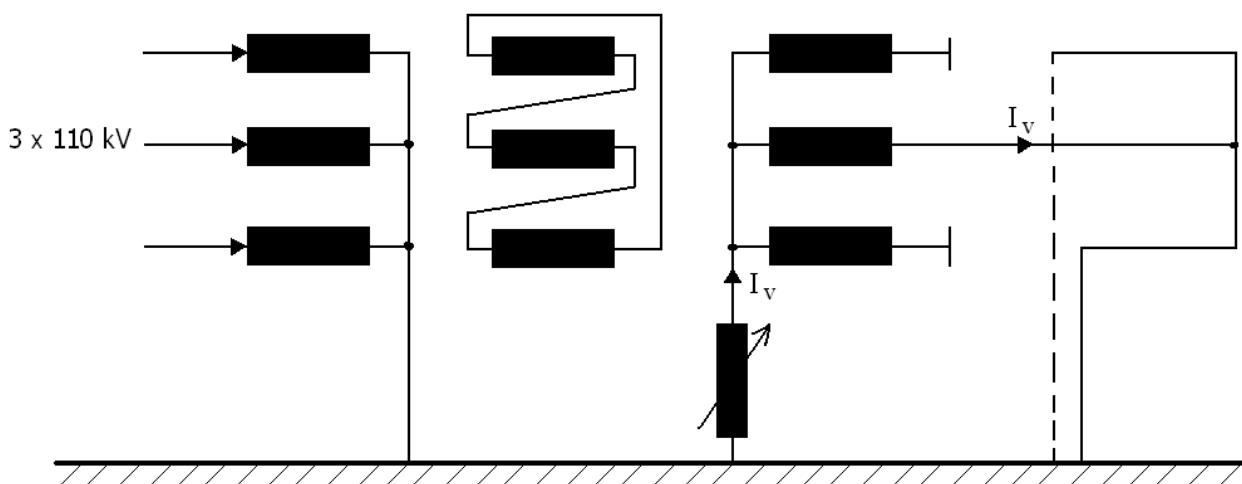
$$U_V = \sqrt{3} \cdot I_V \cdot \sqrt{(2R_V)^2 + (2X_V + X_T)^2} \quad (\text{V}) \quad (4.10)$$



Obr.20 Zapojení transformátoru 110/22 kV pro napětí $U_V = \sqrt{3}U_{f_{vn}}$

e) Zapojení se zhášecí tlumivkou

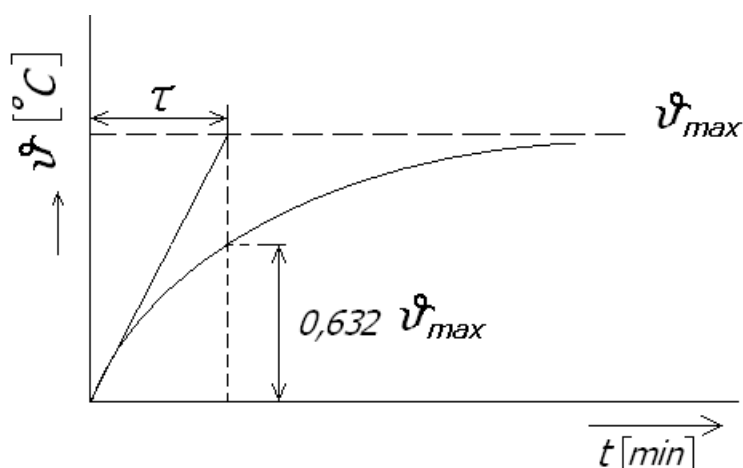
$$U_V = U_{f_{vn}} \pm 16 \% \quad (\text{V}) \quad (4.11)$$



Obr.21 Zapojení transformátoru 110/22 kV se zhášecí tlumivkou

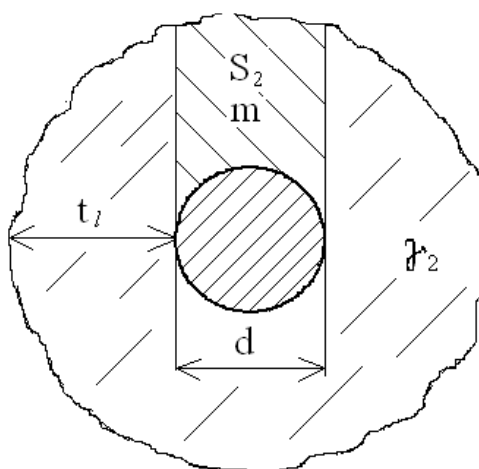
5 STANOVENÍ HODNOTY VYHŘÍVACÍHO PROUDU VEDENÍ

Jak již bylo řečeno v kapitole 4.2, vlivem průchodu elektrického proudu vodičem vzniká teplo, které může snížit jeho mechanickou pevnost. Proud, který zajistí odpadnutí námrazy, je nutné stanovit tak, aby vyhřívání vodiče trvalo co nejkratší dobu a nedošlo při tom ke snížení jeho pevnosti. Proto používáme jen takový proud, aby při dlouhodobém trvání (max. 10 minut) dosáhl vodič nejvýše ustálené teploty. Ustálená teplota je teplota k níž dojde za čtyřnásobek oteplovací časové konstanty τ . Oteplování vodiče v závislosti na čase zobrazuje oteplovací charakteristika, *obrázek 22*.



Obr. 22 Časový průběh oteplení vodiče

Po ustálení teploty se veškeré teplo vyvinuté ve vodiči předává pouze do okolí. Při proudech od určité hodnoty se již nestačí povrchem vodiče předat do okolí veškeré vyvinuté teplo, teplota stále stoupá a dochází tak k poškození vodiče.



Obr.23 Námrazek na vodiči

Teplo potřebné k ohřátí námrazy o průřezu S_2 podle *obrázku 23*

$$Q = m \cdot c_l \cdot (\vartheta_t - \vartheta_1) + m \cdot l_t \quad (kJ) \quad (5.1)$$

kde je m hmotnost námrazy která se musí rozpustit (kg),
 c_l měrné teplo ledu $c_l = 2,100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 ϑ_t teplota tání 0°C ,
 ϑ_1 teplota okolí ($^\circ\text{C}$),
 l_t měrné skupenské teplo tání ledu ($l_t = 3,34 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Pro hmotnost ledu, který je třeba rozpustit ,podle obr.23 platí

$$m = S_2 \cdot \gamma_2 \cdot l = d \cdot t_l \cdot \gamma_2 \cdot l \cdot 10^{-6} \quad (kg) \quad (5.2)$$

kde je S_2 průřez námrazy, která se musí odstranit (mm^2)
 γ_2 měrná hmotnost námrazy ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 d průměr vodiče (mm)
 t_l tloušťka ledu (mm)
 l délka vodiče (m)

Po dosazení je :

$$Q_a = d \cdot t_l \cdot \gamma_2 \cdot l \cdot (l_t + c_l \cdot (\vartheta_t - \vartheta_1)) \cdot 10^{-6} \quad (kJ) \quad (5.3)$$

nebo

$$Q_a = d \cdot t_l \cdot \gamma_2 \cdot l \cdot (l_t + c_l \cdot (\vartheta_t - \vartheta_1)) \cdot \frac{10^{-6}}{3600} \quad (\text{kWh}) \quad (5.4)$$

Teplo způsobené zatížením vodiče proudem :

$$Q_j = R_{\vartheta_1} \cdot I^2 \cdot T \cdot 10^{-3} = R_{\vartheta_1} \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)) \cdot I^2 \cdot T \cdot 10^{-3} \quad (\text{kWh}) \quad (5.5)$$

kde je I vyhřívací proud (A)
 T čas vyhřívání (h)
 α teplotní součinitel odporu ($^\circ\text{C}^{-1}$)
 pro vodič AlFe $\alpha = 3,87 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
 ϑ teplota okolí ($^\circ\text{C}$)
 R_{ϑ_1} odpor vodiče při teplotě okolí (Ω)

$$R_{\vartheta_1} = \rho \cdot \frac{l}{S} ,$$

průřez vyhřívávaného vodiče

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (\text{mm}^2) \quad (5.6)$$

Po dosažení do vztahu (4.2) můžeme psát :

$$d \cdot t_l \cdot \gamma_2 \cdot l \cdot (l_t + c_l \cdot (\vartheta_t - \vartheta_1)) \cdot \frac{10^{-6}}{3600} = \frac{4 \cdot \rho}{\pi \cdot d^2} \cdot l \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)) \cdot I^2 \cdot T \cdot 10^{-3} \quad (5.7)$$

Z rovnice (5.7) vyjádříme potřebný vyhřívací proud

$$I = \sqrt{\frac{\pi \cdot d^3 \cdot t_l \cdot \gamma_2 \cdot (l_t + c_l \cdot (\vartheta_t - \vartheta_1)) \cdot 10^{-3}}{3600 \cdot 4 \cdot \rho \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)) \cdot I^2 \cdot T}} \quad (A) \quad (5.8)$$

Při číselném dosazení do vztahu (5.8) a pro $\vartheta = -10^\circ\text{C}$ můžeme napsat :

$$I = 8,64 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{d^3 \cdot t_l}{\rho \cdot T}} \quad (A) \quad (5.9)$$

Při vyhřívání je třeba kontrolovat teplotu vodiče, aby nadměrným oteplením nedošlo k zmenšení mechanické pevnosti. Podle vztahu (5.10) [4] se uvádí, jakou dosáhne teplota vodiče při vyhřívání

$$\vartheta_V = \left(\frac{I}{202}\right)^2 \cdot \frac{10^3 \cdot \rho}{\left(\frac{d}{10}\right)^{2,4}} \approx 5,1 \cdot \frac{I^2 \cdot \rho}{d^{2,4}} \quad (^\circ\text{C}; A, \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}, \text{mm}) \quad (5.10)$$

kde d je průměr vodiče (mm)

ρ měrný odpor ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)

5.1 Předpoklady pro výpočet vyhřívacího proudu

- Ustálená teplota vodiče se volí 180°C . Je to nejvyšší dovolené zatížení holých vodičů než jištění vypne přetížení
- Teplota okolí je 0°C a bezvětrí
Předpokládá se, že teplota vodiče před vyhříváním je stejná jako teplota okolí. Vlivem teploty okolí, která je zpravidla nižší než 0°C , můžeme říci, že teplota vyhřívávaného vodiče nikdy nedosáhne stanovené ustálené teploty 180°C a proto bude čas nutný k odstranění námrazy kratší než čas k docílení ustálené teploty.

Podle [15] pro výpočet ustálené teploty v závislosti na proudu a pro výpočet časové konstanty platí :

$$\vartheta_m = \frac{R_{20} \cdot I^2 \cdot H \cdot O_0 + \vartheta_0(O_0 + 20)}{(O_0 + 20) - R_{20} \cdot I^2 \cdot H} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.11)$$

$$\tau = H \cdot C \cdot k \cdot \frac{(O_0 + 20)}{(O_0 + 20) - R_{20} \cdot I^2 \cdot H} \quad (\text{s}) \quad (5.12)$$

kde

R_{20} je odpor vodiče při teplotě 20 °C ($\Omega \cdot \text{m}^{-1}$)

I proud kterým je zatížen vodič (A)

H tepelný odpor vodiče ($^\circ\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$)

O_0 konstanta pro hliníkové vodiče 228 °C
železné vodiče 222 °C
měděné vodiče 234,5 °C

ϑ_0 teplota prostředí ($^\circ\text{C}$)

C tepelná kapacita vodiče ($\text{W} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

k je konstanta, která respektuje závislost časové konstanty na teplotě vodiče

$$k = \sqrt[4]{\frac{70}{\vartheta}} \quad (-)$$

Úpravou rovnice (5.11) lze vyjádřit proud ve vodiči

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_m \cdot (O_0 + 20) - \vartheta_0(O_0 + 20)}{R_{20} \cdot H \cdot (\vartheta_m + O_0)}} \quad (\text{A}) \quad (5.13)$$

Podle předpokladu je teplota prostředí 0 °C a po dosazení je výsledný proud roven :

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_m \cdot (O_0 + 20)}{R_{20} \cdot H \cdot (\vartheta_m + O_0)}} \quad (\text{A}) \quad (5.14)$$

Tab. 8 Tepelný odpor a tepelná kapacita vodičů [15]

Materiál	AlFe 6		Měď		Železo	
	H ($^\circ\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$)	C ($\text{W} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	H ($^\circ\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$)	C ($\text{W} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	H ($^\circ\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$)	C ($\text{W} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
25			1,234	86,25	1,216	90,25
35	1,126	85,75	1,190	120,75	1,190	126,35
50	1,072	122,5	1,139	172,5		
70	1,017	171,5	1,100	241,5		
95	0,992	232,75				
185	0,896	453,25				

5.2 Výpočet vyhřívacího proudu

V tabulce 9,10 jsou uvedeny potřebné parametry vedení 22 kV

Tab. 9 Příklad parametrů AlFe 6 a mědi [15]

materiál	AlFe 6			Měď		
průřez (mm ²)	R _k (Ω·km ⁻¹)	X _k (Ω·km ⁻¹)	Z (Ω·km ⁻¹)	R _k (Ω·km ⁻¹)	X _k (Ω·km ⁻¹)	Z (Ω·km ⁻¹)
25				0,712		0,712
35	0,837	0,392	0,924	0,526	0,392	0,656
50	0,596	0,380	0,707	0,366	0,380	0,527
70	0,434	0,368	0,569	0,264	0,368	0,453
95	0,319	0,359	0,478	0,195	0,356	0,406

Tab 10 Příklad parametrů železa

materiál	Železo		
průřez (mm ²)	R _k (Ω·km ⁻¹)	X _k (Ω·km ⁻¹)	Z (Ω·km ⁻¹)
25	6,32	2,05	6,64
35	4,47	1,64	4,76

Tab.11 Vypočtené vyhřívací proudy a časové konstanty vodiče AlFe 6

ustálená teplota	180 °C		140 °C		100 °C		70 °C	
Průřez vodiče (mm ²)	I _v (A)	τ (min)	I _v (A)	τ (min)	I _v (A)	τ (min)	I _v (A)	τ (min)
35	340	2,27	316	2,18	283	2,12	248	2,10
50	413	3,09	384	2,97	344	2,88	301	2,86
70	497	4,11	462	3,94	413	3,83	363	3,80
95	588	5,44	546	5,22	488	5,06	429	5,03

Tab. 12 Vypočtené vyhřívací proudy a časové konstanty vodiče Cu

ustálená teplota	180 °C		140 °C		100 °C		70 °C	
	I_v (A)	τ (min)	I_v (A)	τ (min)	I_v (A)	τ (min)	I_v (A)	τ (min)
25	354	2,48	329	2,38	294	2,31	258	2,30
35	420	3,34	389	3,22	348	3,12	305	3,11
50	514	4,57	477	4,40	427	4,27	374	4,25
70	616	6,18	572	5,95	511	5,78	448	5,75

Tab.13 Vypočtené vyhřívací proudy a časové konstanty vodiče Fe

ustálená teplota	180 °C		140 °C		100 °C		70 °C	
	I_v (A)	τ (min)	I_v (A)	τ (min)	I_v (A)	τ (min)	I_v (A)	τ (min)
25	118	2,62	110	2,51	98	2,42	86	2,41
35	142	3,51	132	3,38	118	3,29	104	3,27

Příklad výpočtu vyhřívacího proudu pro měděný vodič:

ustálená teplota $\vartheta_m = 180 \text{ °C}$

průřez vodiče $S = 70 \text{ mm}^2$

tepelný odpor mědi (pro $S = 70 \text{ mm}^2$) $H_{Cu} = 1,1 \text{ °C} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$

tepelná kapacita mědi (pro $S = 70 \text{ mm}^2$) $C_{Cu} = 241,5 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

Po dosažení a podle parametrů tab. 8, 9, 10 a výrazu (5.14) můžeme napsat

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_m \cdot (O_0 + 20)}{R_{20} \cdot H \cdot (\vartheta_m + O_0)}} = \sqrt{\frac{180 \cdot (234,5 + 20)}{0,264 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1(180 + 234,5)}} = \underline{\underline{616,9 \text{ A}}}$$

Výpočet časové konstanty τ :

$$\tau = H \cdot C \cdot k \cdot \frac{(O_0 + 20)}{(O_0 + 20) - R_{20} \cdot I^2 \cdot H}$$

$$\tau = 1,1 \cdot 241,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{70}{180} \cdot \frac{(234,5 + 20)}{(234,5 + 20) - 0,264 \cdot 10^{-3} \cdot 616^2 \cdot 1,1}} = 369,9 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{369,9}{60} = \underline{\underline{6,17 \text{ min}}}$$

5.3 Volba vhodného vyhřívacího obvodu

Pro vyhřívání vedení vypočteme proud podle jednotlivých zapojení dle z kapitoly 4.3 .

$$I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} \quad (\text{A}; \text{V}, \Omega) \quad (5.15)$$

kde U_V je vyhřívací napětí (V)

Z_{Vo} náhradní impedance vyhřívacího obvodu (Ω)

$$Z_{Vo} = \sqrt{(2 \cdot R_k \cdot l)^2 + (2 \cdot X_k \cdot l + X_{TR})^2} \quad (\Omega) \quad (5.16)$$

kde R_k je rezistence vyhřívání vedení na jednotku délky ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)

X_k reaktance vyhřívání vedení na jednotku délky ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)

X_{TR} reaktance transformátoru (Ω)

V následujících tabulkách jsou vypočteny hodnoty vyhřívajících proudů pro jednotlivé typy vodičů dle *tabulky 9 a 10*, napájecí transformátor 110/22 kV s reaktancí $X_{TR} = 2,3\Omega$ a reaktance zhášecí tlumivky $X_{Ztr} = 35 \Omega$

Tab.14 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívání vedení AlFe s průřezem 50 mm^2

zapojení transformátoru	Vyhřívací napětí U_V (kV)	Délka vyhřívání úseku vedení AlFe s průřezem 50 mm^2					
		5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km
		Vyhřívací proud I (A)					
obr. 16,	3,7	433,9	238,8	164,3	125,1	101,0	84,7
	5,1	598,0	329,1	226,4	172,5	139,2	116,7
obr. 17	7,4	867,7	477,6	328,5	250,2	202,0	169,4
	10,3	1207,7	664,7	457,3	348,3	281,2	235,7
obr. 18,19	11,2	1313,3	722,8	497,2	378,7	305,8	256,4
	15,3	1794,0	987,4	679,2	517,4	417,7	350,2
obr. 20	19,3	2263,0	1245,6	856,8	652,6	526,9	441,8
	26,7	3130,8	1723,1	1185,3	902,8	728,9	611,1
obr.21	11,2	269,7	241,1	215,9	194,2	175,8	160,2
	15,3	368,4	329,3	294,9	265,4	240,2	218,8
Poznámka : zapojení transformátoru kapitola 4.3							

Tab.15 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívání vedení AlFe s průřezem 70 mm²

zapojení transformátoru	Vyhřívací napětí U _v (kV)	Délka vyhříváního úseku vedení AlFe s průřezem 70 mm ²					
		5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km
		Vyhřívací proud I (A)					
<i>obr. 16,</i>	3,7	500,8	284,9	198,5	152,2	123,4	103,7
	5,1	690,2	392,7	273,6	209,8	170,1	143,0
<i>obr. 17</i>	7,4	1001,5	569,8	397,0	304,4	246,8	207,4
	10,3	1394,0	793,1	552,6	423,7	343,4	288,7
<i>obr. 18,19</i>	11,2	1515,8	862,4	600,8	460,7	373,5	314,0
	15,3	2070,7	1178,1	820,8	629,3	510,2	428,9
<i>obr. 20</i>	19,3	2612,0	1486,1	1035,4	793,9	643,6	541,0
	26,7	3613,5	2055,9	1432,3	1098,2	890,3	748,5
<i>obr.21</i>	11,2	271,8	246,2	223,7	204,2	187,4	172,7
	15,3	371,3	336,3	305,6	279,0	255,9	235,0
Poznámka : zapojení transformátoru kapitola 4.3							

Tab. 16 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívání vedení AlFe s průřezem 95 mm²

zapojení transformátoru	Vyhřívací napětí U _v (kV)	Délka vyhříváního úseku vedení AlFe s průřezem 95 mm ²					
		5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km
		Vyhřívací proud I (A)					
<i>obr. 16,</i>	3,7	552,4	323,8	228,4	176,3	143,5	121,0
	5,1	761,4	446,3	314,8	243,0	197,8	166,8
<i>obr. 17</i>	7,4	1104,7	647,6	456,8	352,6	287,1	242,0
	10,3	1537,7	901,4	635,8	490,8	400,0	336,9
<i>obr. 18,19</i>	11,2	1672,0	980,1	691,4	533,7	434,5	366,3
	15,3	2284,3	1338,9	944,5	729,1	593,5	500,4
<i>obr. 20</i>	19,3	2881,3	1689,0	1191,4	919,7	748,7	631,3
	26,7	3986,0	2336,6	1648,2	1272,3	1035,8	873,3
<i>obr.21</i>	11,2	273,1	249,2	228,5	210,5	194,8	181,0
	15,3	373,0	340,4	312,2	287,5	266,0	247,3
Poznámka : zapojení transformátoru kapitola 4.3							

Tab. 17 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívání vedení Cu s průřezem 70 mm²

zapojení transformátoru	Vyhřívací napětí U _v (kV)	Délka vyhříváního úseku vedení AlFe s průřezem 70 mm ²					
		5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km
		Vyhřívací proud I (A)					
obr. 16,	3,7	566,0	336,1	238,5	184,7	150,7	127,2
	5,1	780,2	463,3	328,7	254,6	207,7	175,4
obr. 17	7,4	1132,0	672,2	477,0	369,4	301,4	254,5
	10,3	1575,7	935,6	663,9	514,2	419,5	354,3
obr. 18,19	11,2	1713,3	1017,4	721,9	559,2	456,2	385,2
	15,3	2340,6	1389,8	986,2	763,9	623,2	526,2
obr. 20	19,3	2952,5	1753,1	1244,0	963,6	786,1	663,8
	26,7	4084,6	2425,3	1721,0	1333,0	1087,6	918,4
obr.21	11,2	272,7	249,0	228,6	211,0	195,7	182,2
	15,3	372,6	340,2	312,3	288,2	267,3	248,9
Poznámka : zapojení transformátoru kapitola 4.3							

Tab.18 Vypočtených hodnot proudů pro vyhřívání vedení Cu s průřezem 95 mm²

zapojení transformátoru	Vyhřívací napětí U _v (kV)	Délka vyhříváního úseku vedení AlFe s průřezem 95 mm ²					
		5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km
		Vyhřívací proud I (A)					
obr. 16,	3,7	596,4	360,9	258,4	201,1	164,6	139,3
	5,1	822,0	497,5	356,2	277,2	226,9	192,0
obr. 17	7,4	1192,7	721,9	516,8	402,3	329,3	278,6
	10,3	1660,1	1004,8	719,3	559,9	458,3	387,9
obr. 18,19	11,2	1805,2	1092,6	782,2	608,8	498,3	421,7
	15,3	2466,0	1492,6	1068,5	831,7	680,8	576,1
obr. 20	19,3	3110,7	1882,8	1347,8	1049,2	858,7	726,8
	26,7	4303,4	2604,7	1864,6	1451,4	1187,0	1005,4
obr.21	11,2	273,6	250,8	231,3	214,4	199,6	186,7
	15,3	373,7	342,7	315,9	292,8	272,7	255,0
Poznámka : zapojení transformátoru kapitola 4.3							

5.3.1 Příklad výpočtu

Pro vedení AlFe 6 , průřez 95 mm^2 , délka 20 km,

rezistence vyhřívaného vedení $R_k = 0,0319 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$

reaktance vyhřívaného vedení $X_k = 0,359 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$

reaktance transformátoru $X_{TR} = 2,3 \Omega$

reaktance zhášecí tlumivky $X_{Ztl} = 35 \Omega$

Impedance vyhřívacího obvodu pro zapojení dle obr. 16,17,18,19,20:

$$Z_{Vo} = \sqrt{(2 \cdot R_k \cdot l)^2 + (2 \cdot X_k \cdot l + X_{TR})^2} \quad (\Omega) \quad (5.17)$$

$$Z_{Vo} = \sqrt{(2 \cdot 0,0319 \cdot 20)^2 + (2 \cdot 0,359 \cdot 20 + 2,3)^2} = 20,99 \Omega$$

Impedance vyhřívacího obvodu pro zapojení dle obr. 21:

$$Z_{Vo} = \sqrt{(2 \cdot R_k \cdot l)^2 + (2 \cdot X_k \cdot l + X_{TR} + X_{Ztl})^2} \quad (\Omega) \quad (5.18)$$

$$Z_{Vo} = \sqrt{(2 \cdot 0,0319 \cdot 20)^2 + (2 \cdot 0,359 \cdot 20 + 2,3 + 35)^2} = 53,2 \Omega$$

1) Zapojení obr. 16,:

$$\text{pro } U_V = 3,7 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{3700}{20,99} = 176,3 \text{ A}$$

$$\text{pro } U_V = 5,1 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{5100}{20,99} = 243,0 \text{ A}$$

2) Zapojení obr. 17:

$$\text{pro } U_V = 7,4 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{7400}{20,99} = 352,5 \text{ A}$$

$$\text{pro } U_V = 10,3 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{10300}{20,99} = 490,7 \text{ A}$$

3) Zapojení obr. 18,19:

$$\text{pro } U_V = 11,2 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{11200}{20,99} = 533,6 \text{ A}$$

$$\text{pro } U_V = 15,3 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{15300}{20,99} = 728,9 \text{ A}$$

4) Zapojení obr. 20:

$$\text{pro } U_V = 19,3 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{19300}{20,99} = 919,5 \text{ A}$$

$$\text{pro } U_V = 26,7 \text{ kV} : \quad I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{26700}{20,99} = 1272,0 \text{ A}$$

5) Zapojení obr. 21:

$$\text{pro } U_V = 11,2 \text{ kV} : I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{11200}{53,2} = 210,5 \text{ A}$$

$$\text{pro } U_V = 15,3 \text{ kV} : I_V = \frac{U_V}{Z_{Vo}} = \frac{15300}{53,2} = 287,6 \text{ A}$$

Pro ustálenou teplotu 140 °C a 180 °C je optimální vyhřívací proud při zapojení číslo 3.

Pro ustálenou teplotu 70 °C a 100 °C je optimální vyhřívací proud při zapojení číslo 2.

6 ZÁVĚR

Řešení problémů týkajících se ovlivňování venkovního vedení různými klimatickými vlivy, vychází z lokality, ve které je venkovní vedení provozováno nebo navrhováno. Při návrhu nového vedení se vychází z dlouhodobých meteorologických pozorování a provozních zkušeností na vedeních již postavených. V dnešní době je důležité, aby projektanti venkovního vedení využívali meteorologická data získaná z těchto zkušeností, a tak mohli s ohledem na dodržení bezpečnostních norem a s ohledem na ekonomické požadavky navrhnout vedení a vybrat ideální trasy pro zabezpečení dodávky elektrické energie na požadovaná místa až ke spotřebiteli. Pro navržení určitého typu vedení je tedy důležité znát dlouhodobý průměr a extrémní situace, které v dané lokalitě byly změřeny.

Námraza na vodičích představuje velké zatížení, které mohou vést k poškození vedení. Na základě monitorování tvorby námrazy můžeme předejít problémům, jenž námrazu doprovází. Mechanické odstraňování námrazy je velmi zdoluhavé, fyzicky náročné a při rozsáhlém a rychlém nárůstu neproveditelné. Metoda vyhřívání vodičů je velmi efektivní a nevyžaduje žádné investiční náklady. Důležitým faktorem je volba správné metody vyhřívání, aby nedošlo jak k poškození vedení samotného, tak i k jiným hospodářským škodám.

Pro příklad odvození optimální metody jsem použil vodič AlFe 6 s průměrem 95 mm^2 a délkou rozpětí 20 km. Podle výpočtu mi vyšla nejlépe pro ustálenou teplotu $180 \text{ }^\circ\text{C}$ metoda zapojení č.3 (obrázek 18) a pro teplotu $70 \text{ }^\circ\text{C}$ zapojení dle obrázku 17.

Doba nutná pro působení vyhřívacího proudu je závislá především na velikosti námrazy a na povětrnostních podmínkách vyhřívání úseku. Kratší dobu vyhřívání lze docílit použitím vyššího vyhřívacího proudu, ale je důležité počítat i s tím, že vedení je zbytečně namáháno.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vitr.php
- [2] ČSN 33 3300 Stavba venkovních silových vedení
- [3] Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D., Rozvodná zařízení. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně
- [4] Ing. Josef Verner, CSc., Skripta Elektrická stanice a vedení. Vysoké učení technické v Brně 1985
- [5] ČSN 33 3300 EN 50341-3/Z2 Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 KV-
Část 3: Soubor Národních normativních aspektů
- [6] ČSN 33 3301 EN 50423-1 Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 1 KV do AC 45kV včetně. Část 1: Všeobecné požadavky
- [7] ČSN EN 1991-1-4 zatížení větrem
- [8] http://www.sse.sk/pls/kpfc/kpfc_web.detail?meno=&idk=3&ids=76&csap=8211L
- [9] http://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice/
- [10] http://cz.pfisterer.com/p-freileitung_feldabstandhalter.php?nav=overheadlines&bc=1116&land
- [11] http://www.ensto.com/download/18972_ENSTO_Prislusenstvi_izolovanych_a_holych_vedeni_VN_izolov.pdf
- [12] Ing. Jaroslav Jirků, CSc., Ing. František Popolanský, CSc., Atmosférická přepětí v rozvodu elektrické energie
- [13] Izokeraunická mapa ČR - <http://mve.energetika.cz/>
- [14] Fecko Š., Žiaran J., Vaga L., Elektrické siete. Vonkajšie silové vedenia. SVŠT v Bratislave, 1990
- [15] Ing. Josef Podrazil, Odstraňování námrazy z vodičů venkovního vedení vn. ZN 4/76/JME
- [16] http://www.lopour.cz/doc/basic.php3?langSel=cz&main=pw_98sl.php3

ŘÍLOHA A

Mapa námrazových oblastí území ČR [5]

