

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

**DIMENZOVÁNÍ A KONTROLA VENKOVNÍHO
VEDENÍ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

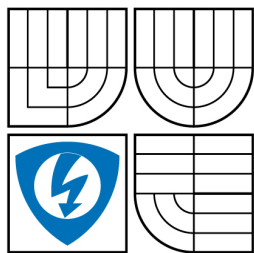
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADIM CHRÁSTEK

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Radim Chrástek

ID: 73022

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Dimenzování a kontrola venkovního vedení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1.mechanika venkovního vedení - křivka zavěšeného vodiče, namáhání vodiče v bodě závěsu
- 2.stavová rovnice zavěšeného vodiče - její účel a možnosti řešení
- 3.návrh a kontrola venkovního vedení v zadané klimatické oblasti

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 1.6.2009

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

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Radim Chrástek

Bytem: Polní 9, 79501, Rýmařov

Narozen/a (datum a místo): 18.9.1985, Rýmařov

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoprůdáv
elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

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

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

Název VŠKP: Dimenzování a kontrola venkovního vedení

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v *:

☒ tištěné formě – počet exemplářů 1

☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

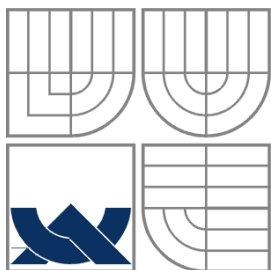
Bibliografická citace práce:

CHRÁSTEK, R. *Dimenzování a kontrola venkovního vedení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

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

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucí práce Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D. za poskytnutou literaturu, cenné rady a připomínky k mé práci.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

Dimenzování a kontrola venkovního vedení

Radim Chrástek

vedoucí: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Project of Overhead Line

by

Radim Chrástek

Supervisor: Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

Brno University of Technology, 2009

Brno

ABSTRAKT

Venkovní vedení musí vyhovovat řadě požadavků, aby všechny jeho části bezpečně odolaly mechanickému a elektrickému namáhání. Tato bakalářská práce se zabývá mechanickým namáháním. Nejprve budou odvozeny potřebné vztahy pro dimenzování a kontrolu vedení při různých klimatických podmínkách. Následně bude představen praktický výpočet pro část vedení. Výpočet bude prováděn pomocí programu Matlab.

KLÍČOVÁ SLOVA: námraza; průhyb vodiče; teplota; venkovní vedení; vítr

ABSTRACT

Overhead line has to suit a series of requests, so that all its parts safely resist mechanical and electrical tension. This bachelor's thesis deals with mechanical tension. At first, necessary overhead line's relationships under different climatic conditions are deduced. Consequently, practical calculations are introduced. Calculations are done with Matlab program.

KEY WORDS: frost; conductor sag; temperature; overhead line; wind

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	11
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	15
2 MECHANIKA VENKOVNÍHO VEDENÍ	16
2.1 ŘETĚZOVKA	16
2.2 PARABOLA	18
2.3 MECHANICKÝ VÝPOČET PRO ZAVĚŠENÝ VODIČ	18
2.3.1 SOUMĚRNĚ ZAVĚŠENÝ VODIČ.....	18
2.3.2 CHYBA VÝPOČTU PŘI NAHRAZENÍ ŘETĚZOVKY PARABOLOU	21
2.3.3 NESOUMĚRNĚ ZAVĚŠENÝ VODIČ	21
3 VLIV ZMĚNY TEPLoty A PŘETÍŽENÍ NA MECHANICKÉ NAPĚTÍ VE VODIČI.....	25
3.1 KLIMATICKÉ PODMÍNKY OVLIVŇUJÍCÍ VODIČ.....	25
3.1.1 TEPLOTA	26
3.1.2 NÁMRAZA	26
3.1.3 VÍTR	28
3.2 ODVOZENÍ STAVOVÉ ROVNICE	29
3.3 KRITICKÉ ROZPĚTÍ	30
3.4 KRITICKÁ TEPLOTA	31
3.5 ŘEŠENÍ STAVOVÉ ROVNICE	31
3.6 NESYMETRICKÉ STAVY NA VENKOVNÍCH VEDENÍCH	31
4 NÁVRH A KONTROLA VEDENÍ V DANÉ KLIMATICKÉ OBLASTI.....	33
4.1 CÍL PRÁCE	33
4.2 ZÁKLADNÍ ZÁSADY PŘI NÁVRHU VENKOVNÍHO VEDENÍ.....	33
4.3 ZPŮSOB ŘEŠENÍ NESOUMĚRNÉHO ZÁVĚSU POMOCÍ VÝPOČETNÍ TECHNIKY.....	33
4.3.1 KONTROLA PRO NORMOU DANÉ STAVY POČASÍ	34
4.4 POUŽITÉ STOŽÁRY A VODIČE	37
4.5 VYPOČÍTANÉ HODNOTY PRO JEDNOTLIVÁ POLE	39
4.5.1 POLE Č.1.....	39
4.5.2 POLE Č.2.....	40
4.5.3 POLE Č.3.....	41
4.5.4 POLE Č.4.....	42
4.5.5 POLE Č.5.....	44
4.5.6 ZHODNOCENÍ VÝPOČTŮ	45
5 ZÁVĚR.....	48
POUŽITÁ LITERATURA	49
PŘÍLOHA A PRŮHYBOVÉ KŘIVKY PRO POLE 1-5.....	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Princip řetězovky</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-2 Průhybová křivka jako řetězovka</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-3 Princip paraboly</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-4 Průhybová křivka jako parabola</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-5 Souměrný závěs.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-6 Nesouměrný závěs</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-1 Závislost mechanického napětí na rozpětí</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-2 Kotevní úsek s námrazkem jen v jednom (třetím) rozpětí.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-3 Přetržení vodiče v prvním rozpětí kotevního pole</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-1 Profil terénu.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-2 Rozlišení vyššího závěsného bodu</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-3 Vývojový diagram programu – 1. část.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-4 Vývojový diagram programu – 2. část.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-5 Vývojový diagram programu – 3. část.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-6 Kotevní stožár.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-7 Závislost průhybu lana na teplotě okolí (pole č.1)</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4-8 Závislost délky lana na teplotě okolí (pole č.1).....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4-9 Závislost celkového napětí v bode A,B na teplotě okolí (pole č.1)</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4-10 Závislost horizontálního napětí na délce rozpětí pro +40°C</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4-11 Závislost celkového mechanického napětí v bode A,B na převýšení závěsných bodů pro -5°C + NN (rozpětí a=300m).....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4-12 Závislost délky lana na převýšení závěsných bodů pro +40°C (rozpětí a=300m).....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. A-1 Pole č.1 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)</i>	<i>50</i>
<i>Obr. A-2 Pole č.2 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)</i>	<i>51</i>
<i>Obr. A-4 Pole č.4 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)</i>	<i>53</i>
<i>Obr. A-5 Pole č.5 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)</i>	<i>54</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 : Dovolené minimální vzdálenosti vodiče od země</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3-2 : Velikost námrazku pro výpočet mechanického napětí vodičů</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 3-3 : Hmotnost zvětšeného námrazku</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 3-4 : Hodnoty pro výpočet zatížení větrem</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 4-1 : Rozměry pro kotevní stožár</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 4-2 : Tabulkové hodnoty pro lano AlFe 240/3</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 4-3 : Pole č.1 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 4-4 : Pole č.1 - montážní tabulka</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 4-5 : Pole č.2 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 4-6 : Pole č.2 - montážní tabulka</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4-7 : Pole č.3 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4-8 : Pole č.3 - montážní tabulka</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4-9 : Pole č.4 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 4-10 : Pole č.4 - montážní tabulka</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 4-11 : Pole č.5 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 4-12 : Pole č.5 - montážní tabulka</i>	<i>44</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Δf	chyba výpočtu průhybu, (%)
F_H	vodorovná složka tahu ve vodiči, (N)
F_V	vertikální složka tahu ve vodiči, (N)
a	délka rozpětí, (m)
a_i	ideální rozpětí, (m)
b	délka šikmého rozpětí, (m)
c	parametr křivky, (-)
c	aerodynamický součinitel, (-)
d	průměr vodiče, (mm)
E	modul pružnosti vodiče, (MPa)
g_t	hmotnost námrazku, (kg.m ⁻¹)
g_1'	tíha 1m vodiče, (N.m ⁻¹)
g_2'	tíha přídatného zatížení námrazkem na 1 m samostatného vodiče, (N.m ⁻¹)
f_m	maximální průhyb, (m)
f_v	viditelný průhyb, (m)
f_x	maximální průhyb v libovolném bodě, (m)
h	převýšení závěsných bodů, (m)
l_{AB}	délka nesouměrné řetězovky, (m)
l_s	délka lana, (m)
v	rychlost větru, (m.s ⁻¹)
t	tloušťka námrazku, (mm)
x_A	vodorovná vzdálenost od závěsného bodu A po vrchol průhybové křivky, (m)
x_B	vodorovná vzdálenost od závěsného bodu B po vrchol průhybové křivky, (m)
y_A	vertikální vzdálenost od závěsného bodu A po vrchol průhybové křivky, (m)
y_B	vertikální vzdálenost od závěsného bodu B po vrchol průhybové křivky, (m)
z	přetížení vodiče námrazou, (-)

α	součinitel tepelné roztažnosti vodiče, ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
α_v	součinitel nerovnoměrnosti tlaku větru na vodiči, (-)
γ'	měrná tíha vodiče, ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)
ϑ	teplota, ($^{\circ}\text{C}$)
$\sigma_{\text{A,B}}$	mechanické napětí v závěsných bodech A a B, (Pa)
σ_{dov}	dovolené namáhání vodiče, (Pa)
σ_{H}	vodorovné namáhání ve vodiči, (Pa)
σ_{p}	pevnost v tahu daného vodiče, (Pa)

1 ÚVOD

Elektrická venkovní vedení jsou technologická zařízení pomocí nichž přenášíme elektrickou energii od elektráren k rozvodnám a transformovnám, a dále pak ke spotřebitelům. I přesto, že se může venkovní vedení zdát již archaickým způsobem přenosu elektrické energie, nelze ho jednoduše nahradit modernějším způsobem, a proto se pro rozvod elektrické energie v ČR používá převážně venkovní vedení.

Vedení musí vyhovovat řadě požadavků, aby všechny jeho části bezpečně odolaly mechanickému a elektrickému namáhání. Projekt venkovního vedení musí tedy obsahovat jednak návrh z hlediska elektrických parametrů (jmenovité napětí, proudové zatížení, ztráty na výkonu a práci, úbytky napětí, kompenzace induktivního zatížení a zemních proudů, způsob spojení uzlu se zemí, návrh izolace vedení, ztráty korónou, ochranu proti přepětí, určení základních parametrů R , L , C a další), ale také návrh podle mechanických vlastností, z nichž následně vychází volba trasy a rozmístění stožárů.

Výpočtem mechanických vlastností vedení je myšleno stanovení geometrických rozměrů a namáhání vodiče. V praxi se jedná o stavení maximálního průhybu a to buď v polovině rozpětí, nebo v libovolném bodě při různých klimatických podmínkách. Tento výpočet se provádíme z důvodu kontroly výšky vodiče nad zemí nebo nad konstrukcemi (budovy, dopravní stavby) pod vedením. Dále stanovujeme montážní tabulku, ve které jsou uvedeny napínací tahy pro určité montážní teploty. Tahy jsou voleny tak, aby vodič byl namáhán pouze dovoleným namáháním, které je menší než jeho mechanická pevnost.

Důsledky špatně navrženého vedení mohou být velký nebo malý tah. Velký tah ve vedení má za následek větší sklon k vibracím, což vede často k jejich přetržení. Naopak malý tah ve vodičích má za následek zvětšení průhybu, což může způsobit nedodržení vzdálenosti od země předepsané normou. Dále také může malý tah způsobit poruchu.

Vzhledem k tomu, že výstavba a údržba venkovního vedení je velmi finančně náročná je potřeba vedení dimenzovat tak, aby bylo bezpečné, ale také ekonomicky výhodné. Ovšem snižování nákladů na výstavbu vedení nesmí nikdy zhoršit mechanické vlastnosti vedení.

2 MECHANIKA VENKOVNÍHO VEDENÍ

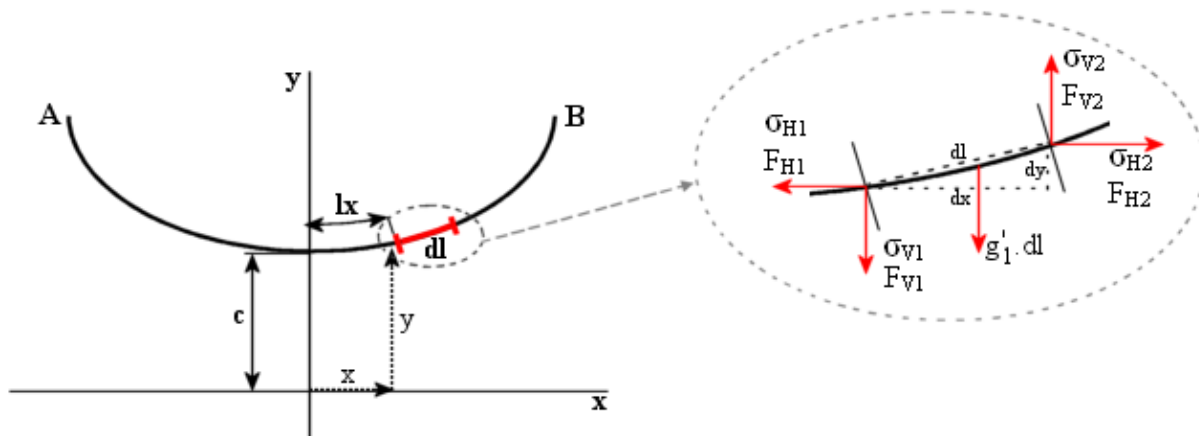
Výpočet mechanického namáhání venkovního vedení vychází z předpokladu, že je-li vodič zavěšen mezi dva body, prohne se do průhybové křivky, kterou lze analyticky vyjádřit pomocí řetězovky nebo paraboly. Řetězovka je pružná nebo nepružná, ale pro obtížnost výpočtu se v praxi počítá s nepružnou řetězovkou. Při výpočtech můžeme nahradit řetězovku parabolou, která se u malých a středních rozpětí (do 400m) nepatrně liší od řetězovky. Řetězovku používáme při výpočtech venkovního vedení větších rozměrů nebo u vedení s velkými sklony terénu.

2.1 Řetězovka [3]

Pro stanovení analytického vyjádření průhybové křivky předpokládáme, že tíha elementu vodiče je stálá a je dána rovnoměrným rozdělením tíhy po vodiči (viz. Obr. 2-1).



Obr. 2-1 Princip řetězovky



Obr. 2-2 Průhybová křivka jako řetězovka

Při odvození analytického vyjádření průhybové křivky vycházíme z mechanických podmínek rovnováhy. Platí tedy, že vodič se nachází v klidu, jestliže součet sil na něj působících je nulový a jestliže součet momentů sil k libovolnému bodu je rovněž nulový. Jako první zvolíme element průhybové křivky o délce dl a budeme zkoumat podmínky jeho rovnováhy (viz Obr. 2-2).

- 1) Z podmínek rovnováhy sil v ose x $\sum F_{xi} = 0$ je zřejmé, že vodorovná složka síly F_H i vodorovné namáhání je v každém bodě křivky stejné. Platí tedy, že

$$F_{H1} = F_{H2} \quad (2.1)$$

- 2) Z podmínky rovnováhy v ose y $\sum_i F_{yi} = 0$ vyplývá, že svislá složka síly v daném bodě je rovna tíze vodiče příslušné délky dl . Síla je maximální v bodě závěsu a minimální ve vrcholu průhybové křivky. Matematicky vyjádřeno

$$F_{v2} - F_{v1} - g_1' \cdot dl = 0 \quad (2.2)$$

$$dF_v = g_1' \cdot dl \quad (2.3)$$

- 3) Z podmínky rovnováhy momentů sil $\sum_i M_i = 0$ k počátku souřadné soustavy lze vyjádřit

$$-F_{v1} \cdot dx - F_{v2} \cdot dx + F_{H2} \cdot dy - F_{H1} \cdot dy = 0 \quad (2.4)$$

$$dF_v = \frac{dF_H \cdot dy}{dx} \quad (2.5)$$

Z těchto podmínek rovnováhy (1 až 3) získáme diferenciální rovnici průhybové křivky.

$$\frac{F_H \cdot dy'}{dx} = g_1' \cdot \sqrt{1 + (y')^2} \quad (2.6)$$

Tuto rovnici řešíme separací proměnných a následnou dvojistou integrací. Postup řešení uveden v [1]. Výsledný tvar rovnice průhybové křivky jako řetězovky je

$$y = c \cdot \cosh \frac{x}{c} \quad (2.7)$$

kde c je parametr křivky a je roven

$$c = \frac{F_H}{g_1' \cdot z} = \frac{\sigma_H}{\gamma' \cdot z} \quad (2.8)$$

V praxi se podle [1] hodnota parametru c pohybuje od 800 do 1800m.

Po dosazení za parametr c získáme další použitelný tvar

$$y = \frac{\sigma_H}{\gamma' \cdot z} \cdot \cosh \frac{x \cdot \gamma' \cdot z}{\sigma_H} \quad (2.9)$$

Kde: F_H vodorovná složka tahu ve vodiči (N)

σ_H vodorovné namáhání ve vodiči (MPa)

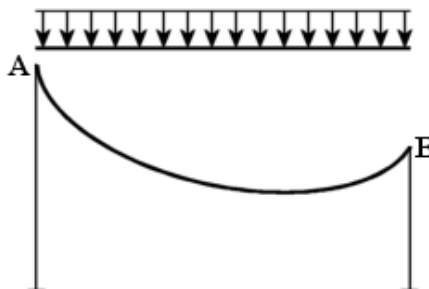
γ' měrná tíha vodiče ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)

g_1' tíha 1 vodiče ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

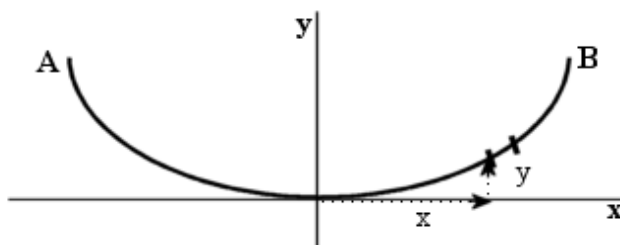
z přetížení vodiče námrazou (-)

2.2 Parabola [3]

Průhybová křivka může být vyjádřena také pomocí paraboly. Pro stanovení analytického vyjádření průhybové křivky jako paraboly předpokládáme, že tíha elementu vodiče je stálá a je dána rovnoměrným rozdělením tíhy po spojnici závěsných bodů (viz Obr. 2-3).



Obr. 2-3 Princip paraboly



Obr. 2-4 Průhybová křivka jako parabola

Pro odvození rovnice paraboly změním umístění souřadného systému tak, aby křivka ve svém nejnižším bodě procházela počátkem systému souřadnic (viz. Obr. 2-4). Výslednou rovnici získáme tak, že zjednodušíme rovnice řetězovky rozvedením cosh na mocninovou řadu.

$$y = c \cdot \left[1 + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{x}{c} \right)^2 + \frac{1}{4!} \cdot \left(\frac{x}{c} \right)^4 + \dots \right] - c \quad (2.10)$$

třetí a další členy řady můžeme zanedbat. Obecný tvar průhybové křivky tedy je

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot c} = \frac{x^2 \cdot \gamma' \cdot z}{2 \cdot \sigma_H} \quad (2.11)$$

2.3 Mechanický výpočet pro zavěšený vodič

Rozlišujeme dva způsoby závěsu a to souměrný a nesouměrný. Liší se od sebe vzájemnou polohou závěsných bodů.

2.3.1 Souměrně zavěšený vodič

Souměrný závěs je takový závěs, jehož závěsné body A a B jsou ve stejné výšce (viz Obr. 2-5).

Dále jsou z Obr. 2-5 patrné další vlastnosti souměrného závěsu: $x_A = x_B = \frac{a}{2}$, $y_A = y_B$.

Výpočet pomocí paraboly

$$f_m = y_B - y = \frac{e \cdot (a - e)}{2 \cdot c} \quad (2.16)$$

2.3.1.3 Výpočet délky lana - l_s

Výpočet pomocí řetězovky

$$l_s = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \sqrt{1 + (y')^2} \cdot dx = 2 \cdot \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{c}} \cdot dx = 2 \cdot \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{\cosh^2 \frac{x}{c} - \sinh^2 \frac{x}{c} + \sinh^2 \frac{x}{c}} \cdot dx$$

$$l_s = 2 \cdot \int_0^{\frac{a}{2}} \cosh \frac{x}{c} \cdot dx = 2 \cdot c \cdot \left[\sinh \frac{x}{c} \right]_0^{\frac{a}{2}} = 2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c} \quad (2.17)$$

Výpočet pomocí paraboly

$$l_s = a + \frac{a^3}{24 \cdot c^2} = a + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_m^2}{a} \quad (2.18)$$

2.3.1.4 Výpočet mechanického napětí ve vodiči

Celkové mechanické napětí ve vodiči je stejné pro oba body A i B a je dáno vektorovým součtem horizontální složky mechanického napětí (je stejné v každém bodě vodiče a bere se jako základ pro dovolené mechanické napětí) a vertikální složky, jejíž velikost je daná místem, ve kterém se uvažuje [3].

Z obrázku Obr. 2-5 je patrné, že

$$\sigma_B = \frac{\sigma_H}{\cos \alpha} \quad (2.19)$$

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \sqrt{tg^2 \alpha + 1} = \sqrt{\sinh^2 \frac{a}{2 \cdot c} + \cosh^2 \frac{a}{2 \cdot c} - \sinh^2 \frac{a}{2 \cdot c}} = \cosh \frac{a}{2 \cdot c} = \frac{y_B}{c} = \frac{f_m}{c} + 1 \quad (2.20)$$

Výsledné mechanické napětí získáme dosazením rovnice 2.20 do rovnice 2.19.

$$\sigma_B = \sigma_H \cdot \left(\frac{f_m}{c} + 1 \right) \quad (2.21)$$

$$\sigma_B = f_m \cdot \gamma' \cdot z + \sigma_H \quad (2.22)$$

Vertikální složka namáhání závěsném bodě σ_{VB} je minimální (nulová) ve vrcholu průhybové křivky a maximální v závěsných bodech. Podle [3] je její rovnice rovna

$$\sigma_{VB} = \sinh \frac{a}{2 \cdot c} \cdot \sigma_H = \frac{l_s}{2 \cdot c} \cdot \sigma_H = \frac{l_s}{2} \cdot \gamma \cdot z \quad (2.23)$$

2.3.2 Chyba výpočtu při nahrazení řetězovky parabolou [1]

Pokud budeme řetězovku nahrazovat parabolou bude se vzrůstající délkou rozpětí mezi závěsnými body vzrůstat chyba ve výpočtu. Zajímá nás chyba, které se při výpočtu průhybu dopustíme.

$$\text{Poměrný rozdíl} = \left(\frac{f_p}{a} \right).$$

Chyba výpočtu - Δf je rovna

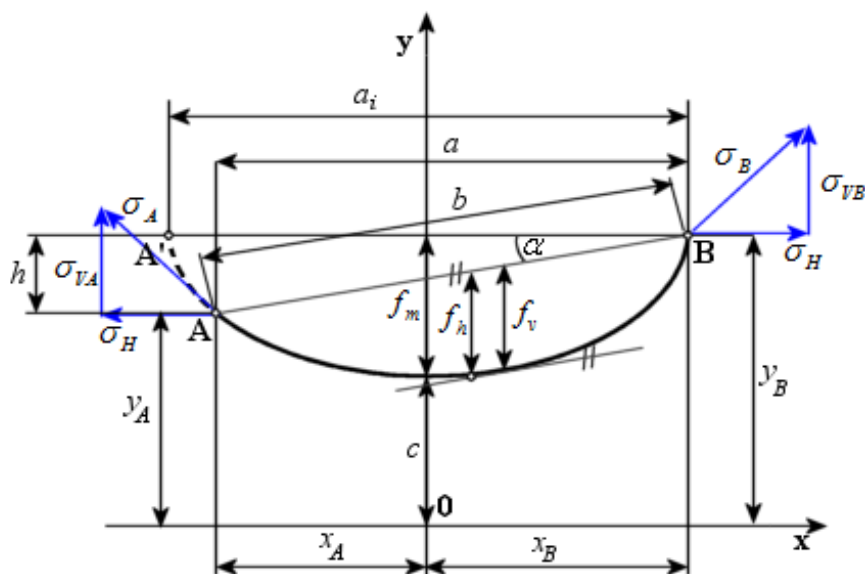
$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{f_r - f_p}{f_p} \cdot 100 = \frac{\left(\frac{a^2}{8 \cdot c} + \frac{a^4}{384 \cdot c^3} + \frac{a^6}{46080 \cdot c} \right) - \frac{a^2}{8 \cdot c}}{\frac{a^2}{8 \cdot c}} \cdot 100 \\ \Delta f &= \frac{\left(\frac{a^4}{384 \cdot c^3} + \frac{a^6}{46080 \cdot c^5} \right)}{\frac{a^2}{8 \cdot c}} \cdot 100 = \left(\frac{a^4}{48 \cdot c^2} + \frac{a^6}{5760 \cdot c^4} \right) \cdot 100 = \frac{a^4}{48 \cdot c^2} \cdot \left(1 + \frac{a^4}{120 \cdot c^2} \right) \\ \Delta f &= \frac{4 \cdot f_p^2}{3 \cdot a^2} \cdot \left(1 + \frac{18 \cdot f_p^2}{5 \cdot a^2} \right) \cdot 100 \quad (2.24) \end{aligned}$$

Vzhledem k tomu že na venkovních vedeních jsou maximální průhyby do 6% z rozpětí, tak nepřesnost výpočtu je 0,481%, což je zanedbatelná chyba. Při velkých rozpětích, kde dojde k větším průhybům je nutno použít k výpočtu řetězovku, tedy rovnici 2.12.

2.3.3 Nesouměrně zavěšený vodič

Nesouměrný závěs je závěs, který nemá závěsné body ve stejné výšce. Pro výpočet nesouměrně zavěšeného vodiče je vhodnější použít řetězovku, která při větších sklonech terénu lépe vystihuje tvar průhybové křivky vodiče.

Rozdíl výšek bodu A a B je převýšení a označíme si ho jako h . Vodorovná vzdálenost mezi závěsnými body je rozpětí, pro jeho označení zvolíme písmeno a . Délku šikmého rozpětí označíme jako b . Nesouměrný závěs je možno řešit obdobně jako souměrný, je ovšem nutné stanovit si ideální rozpětí a_i . Osy souřadného systému si zvolíme tak, abychom mohli nesouměrný závěs řešit stejně jako souměrný (viz Obr. 2-6).



Obr. 2-6 Nesouměrný závěs [3]

Z obrázku Obr. 2-6 jsou patrné základní vlastnosti souměrného závěsu:

$$x_B - x_A = a, \quad a_i = 2 \cdot x_B, \quad h = y_B - y_A, \quad \operatorname{tg} \varphi' = \frac{h}{a}.$$

2.3.3.1 Určení počátku šikmého pole nesouměrného závěsu

$$h = y_B - y_A = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{x_A}{c} \right) = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{a - x_B}{c} \right) \quad (2.25)$$

Pomocí vztahů mezi hyperbolickými funkcemi z [3] je možné tento vztah upravit na výsledný tvar

$$\frac{h}{2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c}} = \sinh \frac{x_B}{c} - \frac{a}{2 \cdot c} = \frac{h}{l_s} \quad (2.26)$$

$$p = \frac{h}{2 \cdot c \cdot \sinh \left(\frac{a}{2 \cdot c} \right)} \quad (2.27)$$

$$x_B = \frac{a}{2} + c \cdot p \quad (2.28)$$

Hodnotu x_B máme určenou a hodnota y_B závěsném bodu B je rovna

$$y_B = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} \quad (2.29)$$

Vzdálenost nižšího závěsného bodu A od vrcholu řetězovky je podle Obr. 2-6

$$x_A = a - x_B = \frac{a}{2} - c \cdot p \quad (2.30)$$

Ideální rozpětí

$$a_i = 2 \cdot x_B = a + 2 \cdot c \cdot p \quad (2.31)$$

Pokud je převýšení h příliš velké může dojít k tomu, že $x_A > 0$ a tím je vrchol mimo skutečné rozpětí. Vodič pak svým tahem spodní izolátor nadzvedá. Izolátor je potom třeba zatížit nebo uchytit zespodu dalším izolátorem [3]. K tomuto problému může dojít také, když se při maximálním zkrácení vodiče, to především při extrémních teplotách.

2.3.3.2 Maximální průhyb ideálního pole – f_m [1]

Výpočet pomocí řetězovky

$$f_m = y_B - c = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} - c = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - 1 \right) \quad (2.32)$$

2.3.3.3 Průhyb v libovolném bodě šikmého pole - f_x [1]

Výpočet pomocí řetězovky

$$f_x = y_B - y_x = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} - c \cdot \cosh \frac{x}{c} = c \cdot \left(\cosh \frac{a_i}{2 \cdot c} - \cosh \frac{x}{c} \right) \quad (2.33)$$

2.3.3.4 Charakteristický průhyb - f_h [1]

Jedná se o průhyb uprostřed rozpětí. Pro jeho vyjádření si napřed určíme vzdálenost bodu od počátku x_k

$$x_k = \frac{x_A + x_B}{2} - x_A \quad (2.34)$$

Nyní můžeme určit charakteristický průhyb

$$f_h = f_m \cdot \cosh \frac{x_k}{c} \quad (2.35)$$

2.3.3.5 Viditelný průhyb - f_v [1]

Jedná se o průhyb v tečném bodě tečny rovnoběžné se spojnicí závěsných bodů. Nejprve určíme vzdálenost bodu s viditelným průhybem od počátku x_v .

$$\frac{h}{a} = \sinh \left(\frac{x_v}{c} \right) \quad (2.36)$$

$$x_v = \frac{h}{a \cdot \sinh\left(\frac{1}{c}\right)} \quad (2.37)$$

Dále určíme y souřadnici bodu y_v .

$$y_v = c \cdot \cosh\left(\frac{x_v}{c}\right) \quad (2.38)$$

Hodnotu y_B známe z rovnice 2.29. Určíme výškový rozdíl v místě viditelného průhybu h' .

$$h' = (x_B - x_v) \cdot \frac{h}{a} \quad (2.39)$$

Nyní můžeme určit velikost viditelného průhybu

$$f_v = y_B - y_v - h' \quad (2.40)$$

2.3.3.6 Délka nesouměrné řetězovky - l_{AB} [1]

$$l_{AB} = \int_{-x_A}^0 \sqrt{1 + (y')^2} \cdot dx + \int_0^{x_B} \sqrt{1 + (y')^2} \cdot dx = c \cdot \sinh \frac{x_B}{c} + c \cdot \sinh \frac{x_A}{c} \quad (2.41)$$

2.3.3.7 Výpočet mechanického napětí ve vodiči

Vodorovná složka namáhání σ_H je stejná v každém bodě vodiče. Svislé složky namáhání σ_{vA} , σ_{vB} jsou dány podmínkou rovnováhy sil v ose y – jsou tedy stejně jako u souměrného závěsu určeny měrnou tíhou oblouku od bodu 0 po závěsné body A a B [3].

Výpočet pomocí **řetězovky**

$$\sigma_A = y_A \cdot \gamma' \cdot z \quad (2.42)$$

$$\sigma_B = y_B \cdot \gamma' \cdot z \quad (2.43)$$

Vertikální složky mechanického napětí jsou rovny

$$\sigma_{vA} = l_A \cdot \gamma' \cdot z \quad (2.44)$$

$$\sigma_{vB} = l_B \cdot \gamma' \cdot z \quad (2.45)$$

Při odvození pomocí **paraboly** se nabízí další způsob výpočtu

$$\sigma_{vA} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot \gamma' \cdot z - \sigma_H \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.46)$$

$$\sigma_{VB} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot \gamma' \cdot z + \sigma_H \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.47)$$

3 VLIV ZMĚNY TEPLoty A PŘETÍŽENÍ NA MECHANICKÉ NAPĚTÍ VE VODIČI

Změny teplot a přetížení vodiče od námrazy nebo větru mají za následek změnu mechanického napětí ve vodiči a také změnu průhybu vodiče. Mechanický výpočet napětí ve vodiči a výpočet maximálního průhybu se určují pro nejnepříznivější klimatické podmínky, které mohou za provozu nastat. Přitom vzdálenost nejnižšího bodu vodiče nad zemí nesmí překročit vzdálenost danou v normě [2].

Vodiče se však montují při různých klimatických podmínkách, musí se tedy při montáži napnout na takové mechanické napětí a průhyb, aby i při nejnepříznivějších podmínkách vyhovoval normám. Proto je potřeba na základě **stavové rovnice** sestavit montážní tabulku, ve které jsou uvedeny potřebné hodnoty mechanického napětí a průhybů pro teploty od -30°C do 40°C a pro -5°C a přetížení. Kromě montážní tabulky stanovují dvě hodnoty – kritické rozpětí a kritická teplota.

3.1 Klimatické podmínky ovlivňující vodič

Prostředí, ve kterém vedení prochází, značně ovlivňuje jeho parametry. Hlavními faktory, které ovlivňují klimatické podmínky mechanického výpočtu jsou vítr, námraza, změny teploty, chemické účinky ovzduší, nadmořská výška a zeměpisná šířka. Vliv počasí se uplatňuje na základě dlouhodobých meteorologických pozorování v dané oblasti. Vzhledem k tomu, že jednotlivé oblasti mají různé klimatické podmínky je potřeba stanovit přepisy a normy, které obsahují potřebné informace pro návrh vedení v dané klimatické oblasti. Údaje potřebné při návrhu vedení jsou maximální a minimální teplota, vítr, námraza a současné působení následných jevů: a) Teplota a vítr

b) Teplota a námraza

c) Teplota, vítr a námraza

Dále se také při projektování vedení užívá předchozích zkušenosti z dřívějších projektů venkovního vedení v podobných oblastech.

Podnebí v ČR je mírné, tvoří přechod mezi západním přímořským podnebím a suchozemským východoevropským klimatem. Vzhledem k relativně malé rozloze území jsou klimatické rozdíly mezi východem a západem a mezi severem a jihem malé. Místní charakter počasí a podnebí je mnohem více ovlivňován výškovou členitostí a nadmořskou výškou [1].

Norma pro ČR - ČSN 33 3300 [2] předepisuje kontrolu vedení při těchto stavech počasí:

1. -5°C , bezvětrí, normální námraza. Pro tento stav se počítá namáhání a průhyb, **jedná se základní stav počasí**.
2. -5°C , vítr, bez námrazy. Pro tento stav počasí se počítá namáhání, průhyb a vychýlení vodičů větrem.

3. +40°C, bez větru. Pokud je trvalé proudové zatížení větší než 80% proudové zatížitelnosti podle ČSN 341020, uvažuje se též oteplení vodiče proudem – uvažuje se teplota +60°C. Pro tento stav se počítá maximální průhyb.
4. -30°C, bez větru, bez námrazy. Pro tento stav se počítá namáhání a síly působící na izolátory při největším zkrácení vodiče.
5. -5°C, vítr, normální námraza. Pro tento stav počasí se počítá namáhání a vzdálenosti vodičů.
6. -5°C, bez větru, zvetšená námraza. Pro tento stav počasí se počítá maximální namáhání vodičů při rozpětí větším než 50m.

Pro **stavy počasí 1. až 5.** nesmí namáhání vodičů (fázových i zemních) překročit dovolené hodnoty $\sigma_{A,B} < \sigma_{dov}$ stanovené pro jednotlivé materiály vodičů v [2].

Namáhání vodičů ve **stavu počasí 6** musí splňovat podmínku pro vodiče AlFe: $\sigma_{A,B} \leq 0,85 \cdot \sigma_p$

Kde: $\sigma_{A,B}$ - mechanické napětí v závěsných bodech A a B (Pa)

σ_{dov} - dovolené namáhání vodiče (Pa)

σ_p - pevnost v tahu daného vodiče (Pa)

Pro **všechny** stavy počasí nesmí být zmenšeny dovolené vzdálenosti od terénu, od konstrukce i navzájem od sebe. Minimální dovolené vzdálenosti od země jsou uvedeny tabulce Tab.3-1.

Tab. 3-1 : Dovolené minimální vzdálenosti vodiče od země [2]

Druh vedení	Místa volně [m]	
	přístupná	nepřístupná
do 1 kV - mimo vedení nad zemědělskými plochami	5	1
do 1 kV - nad zemědělskými plochami	6	1
10 ÷ 110 kV	6	3
220 kV	7	4
400 kV	8	5

3.1.1 Teplota

Teplota je jedním z nejdůležitějších činitelů pro dimenzování vedení. Její změna má za následek změnu délky vodiče a to tak, že při zvyšování teploty se zvětšuje délka vodiče, tím se zvětšuje průhyb, ale mechanické napětí ve vodiči se sníží. Snižování teploty způsobí zkrácení vodiče, tím se sníží průhyb, ale zvětší se mechanické napětí ve vodiči. V našich podmínkách se uvažuje teplota okolí v rozmezí - 30°C do 40°C. Minimální teplota je důležitá z hlediska sil, které působí na izolátory naopak maximální teplota je důležitá z hlediska maximálního průhybu.

3.1.2 Námraza

Námraza je atmosférický jev, který se projevuje vznikem ledových krystalů na povrchu objektů působením následující vlivů:

- a) mrznutím drobných kapének vzdušné vlhkosti (mraků, mlhy apod.) při jejich styku s povrchem země, objektů nebo jiných předmětů o teplotě 0°C a nižší
- b) srážením (sublimací) vzdušné vlhkosti na dostatečně prochlazeném zemském povrchu nebo předmětech, a to i bez přítomnosti mlhy nebo oblačnosti

Nejvyšší pravděpodobnost vzniku námraz je při styku prochlazeného povrchu (0 až -5 °C) objektů s vlhkým vzdušným prouděním. Při teplotách pod -5°C a nižších výrazně klesá možnost vzniku a při teplotách pod -12 °C námraza téměř již nevzniká nebo je velice slabá.

Námraza na představuje velké zatížení vodičů, které může způsobit přetržení vodičů, ohnutí či zlomení stožárů. V [2] je rozděleno území ČR na 4 **námrazové oblasti**: L-lehká, S-střední, T-těžká, K-kritická. Velikost normálního námrazku pro jednotlivé oblasti jsou uvedeny v Tab. 3-2.

Tab. 3-2 : Velikost námrazku pro výpočet mechanického napětí vodičů [5]

Námrazová oblast	Hmotnost normálního námrazku
	g_t
	$kg \cdot m^{-1}$
L	1,0
S	2,0
T	3,0
K	>3,0

Kde: d průměr vodiče (mm)

g_t hmotnost námrazku na měřící tyči ($kg \cdot m^{-1}$)

Tloušťka námrazku se stanoví na základě vztahu odvozeného v [3] a podle Tab. 3-2.

$$t = \sqrt{225 + 795,8 \cdot g_t} - 15 \quad (3.1)$$

Hmotnost námrazku na 1 m vodiče - g_2 , se stanoví podle:

$$g_2 = c_1 + c_2 \cdot d \quad (3.2)$$

Kde: $c_1 = 1,257 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$

$$c_2 = 1,257 \cdot 10^{-3} \cdot t$$

Každé vedení je potřeba překontrolovat na přetížení zvětšeným námrazkem (stav počasí 6). Jeho hmotnost určíme pomocí Tab.3-3.

Tab. 3-3 : Hmotnost zvětšeného námrazku [5]

$g_2 (kg \cdot m^{-1})$	do 3	3-8	8-12	12-18	nad 18
$g_{2z} (kg \cdot m^{-1})$	$3 \cdot g_2$	$8 + 0,35 \cdot g_2$	$6,4 + 0,55 \cdot g_2$	$3 + 0,833 \cdot g_2$	g_2

Dále je potřeba určit z hmotnosti přídatného zatížení vodiče tíhu přídatného zatížení vodiče.

$$g_2' = 9,81 \cdot g_2 \quad (3.3)$$

Přetížení vodiče námrazou je tedy definováno vztahem

$$z = \frac{g_1' + g_2'}{g_1'} \quad (3.4)$$

Kde: g_1' tíha 1 m samostatného vodiče ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

g_2' tíha přídatného zatížení námrazkou na 1 m samostatného vodiče ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

3.1.3 Vítr

Podobně jako námraza způsobuje i vítr přídatné zatížení vodičů. Podle [3] pro neomrzlý vodič platí

$$g_{2v}' = 0,625 \cdot \alpha_v \cdot c_v \cdot v^2 \cdot d \quad (3.5)$$

Pro omrzlý vodič za stavu počasí 5 se uvažuje, že námraza má tvar válce a přídatné zatížení je dáno vztahem 3.6. Při tomto stavu počasí se uvažuje poloviční rychlost větru [3].

$$g_{2v}' = 0,625 \cdot \alpha_v \cdot c_v \cdot v^2 \cdot (d + 2 \cdot t) \quad (3.6)$$

Kde: α_v součinitel nerovnoměrnosti tlaku větru na vodiči (-)

c_v aerodynamický součinitel, který závisí na tvaru vodiče (roven 1 pro omrznutý vodič a pro $d < 16 \text{ mm}$, pro $d > 16 \text{ mm}$ je roven 1,1)

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

Rychlost větru volíme podle uvažované výšky závěsného bodu. Potřebné hodnoty nalezneme v Tab. 3-4.

Tab. 3-4 : Hodnoty pro výpočet zatížení větrem [3]

Výška závěsného bodu [m]	Rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Součinitel α pro rozpětí $a > 20 \text{ m}$ (pro $a < 20 \text{ m}$ $\alpha = 1$)
0 - 20	29,6	0,8
20 - 40	33,5	0,75
40 - 100	38,0	0,75
100 - 150	43,0	0,75

Celkové přetížení větrem pro jeden vodič je

$$z = \frac{\sqrt{g_1'^2 + g_{2v}'^2}}{g_1'} \quad (3.7)$$

3.2 Odvození stavové rovnice [1]

Změnou teploty z ϑ_0 na ϑ_1 za předpokladu, že $\vartheta_1 > \vartheta_0$ se vodič prodlouží o hodnotu Δl

$$\Delta l_{\vartheta} = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (3.8)$$

Prodloužením vodiče se zvětší jeho průhyb, a tím se zmenší mechanické napětí, tím se vodič pružně zkrátí.

$$\Delta l_{\sigma} = \frac{l_0}{E} \cdot \Delta \sigma_H = \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) \quad (3.9)$$

Celková změna délky vodiče bude

$$\Delta l = \Delta l_{\vartheta} - \Delta l_{\sigma} = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \quad (3.10)$$

Délka vodiče při teplotě ϑ_0 a při teplotě ϑ_1 podle 2.18 bude

$$l_0 = a + \frac{a^3}{24 \cdot c_0^2} \quad (3.11)$$

$$l_1 = a + \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} \quad (3.12)$$

Rozdílem těchto délek je dané prodloužení vodiče

$$\Delta l = l_1 - l_0 = \left(a + \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} \right) - \left(a + \frac{a^3}{24 \cdot c_0^2} \right) = \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} - \frac{a^3}{24 \cdot c_0^2} \quad (3.13)$$

Změny délek vodiče ze vztahu 3.9 a 3.10 se musejí rovnat

$$\frac{a^3 \cdot (\gamma' \cdot z_1)^2}{24 \cdot \sigma_{H1}^2} - \frac{a^3 \cdot (\gamma' \cdot z_0)^2}{24 \cdot \sigma_{H0}^2} = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \quad (3.14)$$

Při parabolickém výpočtu, který zvolíme z důvodu složitosti při použití řetězovky (řetězovku můžeme nahradit parabolou až do rozpětí 400m), můžeme uvažovat, že $l_0 = a$, potom platí

$$\frac{a^2 \cdot (\gamma' \cdot z_1)^2}{24 \cdot \sigma_{H1}^2} - \frac{a^2 \cdot (\gamma' \cdot z_0)^2}{24 \cdot \sigma_{H0}^2} = \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \quad (3.15)$$

Rovnici vynásobíme $E \cdot \sigma_{H1}^2$

$$\frac{a^2 \cdot (\gamma' \cdot z_1)^2 \cdot E}{24} - \frac{a^2 \cdot (\gamma' \cdot z_0)^2}{24 \cdot \sigma_{H0}^2} \cdot E \cdot \sigma_{H1}^2 = E \cdot \sigma_{H1}^2 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \sigma_{H1}^2 \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \quad (3.16)$$

Upravíme a získáme stavovou rovnici

$$\sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \cdot \left[\frac{(\gamma')^2 \cdot E}{24} \cdot \left(\frac{a \cdot z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + \alpha \cdot E \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] = \frac{(\gamma')^2 \cdot E}{24} \cdot (a \cdot z_1)^2 \quad (3.17)$$

V tomto vztahu jsou α, γ, E materiálové konstanty, proto rovnici může upravit

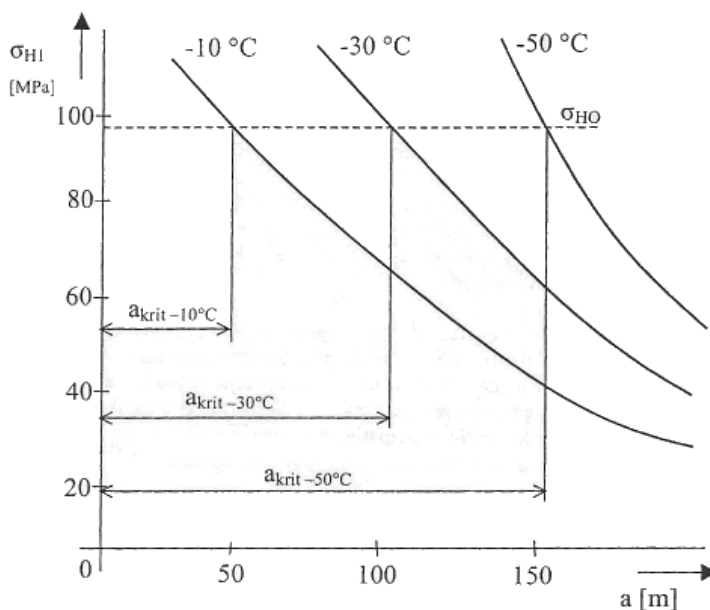
$$\sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \cdot \left[A \cdot \left(\frac{a \cdot z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + B \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] = A \cdot (a \cdot z_1)^2 \quad (3.18)$$

$$A = \frac{(\gamma')^2 \cdot E}{24}, \quad B = \alpha \cdot E$$

Kde: σ_{H1}, σ_{H0} vodorovné mechanické napětí ve stavech 1 a 0 (MPa)
 E modul pružnosti vodiče (MPa)
 ϑ_1, ϑ_0 teplota okolí ve stavech 1 a 0 ($^{\circ}\text{C}$)
 α součinitel tepelné roztažnosti vodiče ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 z_1, z_0 přetížení ve stavech 1 a 0 (-)

3.3 Kritické rozpětí

Vzhledem k tomu, že ve vodiči může být při nižších teplotách větší mechanické napětí než při -5°C a přetížení určujeme tzv. kritické rozpětí, při kterém je mechanické napětí stejné jako při -5°C a přetížení [1]. Jako nejdůležitější většinou považujeme -30°C , protože při této teplotě je hodnota kritického rozpětí maximální (viz Obr. 3-1). Při rozmísťování stožárů to znamená, že nesmí být žádné rozpětí na vedení menší jako kritické rozpětí.



Obr. 3-1 Závislost mechanického napětí na rozpětí [4]

Kritické rozpětí se určí ze stavové rovnice za předpokladu

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H0}, \quad \vartheta_0 = -5^{\circ}\text{C}, \quad z_1 = 1, \quad a = a_{\text{krit}}$$

Výsledný vztah z [1] má tvar

$$a_{\text{krit}} = \frac{\sigma_{H0}}{\gamma'} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha [-(\vartheta_1 + 5)]}{z_0^2 - 1}} \quad (3.19)$$

a pro $\vartheta_1 = -30^\circ\text{C}$

$$a_{\text{krit}} = \frac{10 \cdot \sigma_{H0}}{\gamma'} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \alpha}{z_0^2 - 1}} \quad (3.20)$$

3.4 Kritická teplota

Podle [3] je kritická teplota definována jako teplota, při které je průhyb vodiče stejný jako při -5°C a přetížení, a určujeme ji, protože je třeba zjistit, při které klimatické podmínce dojde k maximálnímu průhybu. Z definice vyplývá, že prodloužení vodiče vlivem teploty se rovná pružnému zkrácení vlivem změny mechanického napětí. Tedy:

$$\Delta l_{\vartheta} = \Delta l_{\sigma}$$

Za předpokladu, že

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 = -5^\circ\text{C}, \quad z_1 = 1, \quad \sigma_{H1} = \sigma_{H0},$$

je podle [3] kritická teplota rovna

$$\vartheta_{\text{krit}} = \frac{\sigma_{H0}}{\alpha \cdot E} \cdot \left(\frac{z_0 - 1}{z_0} \right) - 5 \text{ } (^\circ\text{C}) \quad (3.21)$$

Z rovnice 3.21 je zřejmé, že kritická teplota nezávisí na rozpětí. Kritická teplota se porovnává s teplotou -40°C a mohou nastat tyto případy [3]:

$\vartheta_{\text{krit}} > 40^\circ\text{C}$: maximální průhyb nastává při -5°C a přetížení

$\vartheta_{\text{krit}} = 40^\circ\text{C}$: maximální průhyb nastává při -5°C a přetížení a je roven průhybu při 40°C

$\vartheta_{\text{krit}} < 40^\circ\text{C}$: maximální průhyb nastává při 40°C

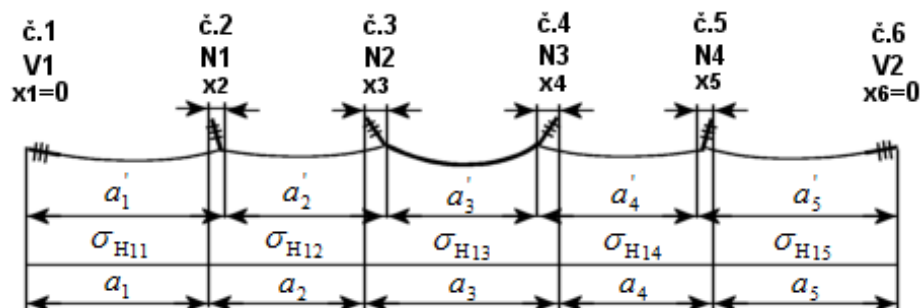
3.5 Řešení stavové rovnice

Řešením stavové rovnice je rovnice třetího řádu. Řešit ji můžeme pomocí numerickými metodami (např. Newtonovu metodu). Výhodné je použití výpočetní techniky. Výpočetní techniku, program Matlab, použijeme i při řešení praktického příkladu, který je součástí této práce.

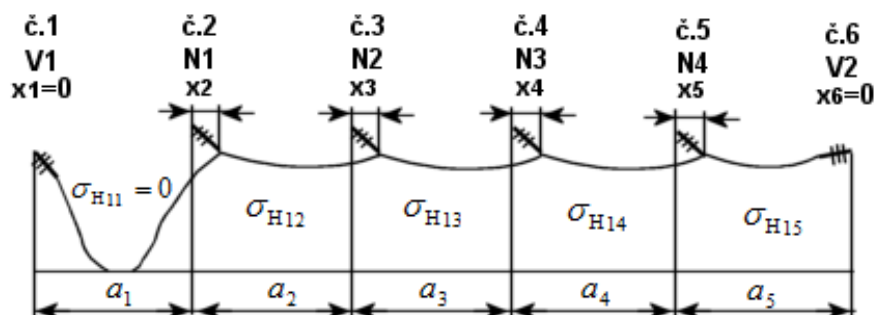
3.6 Nesymetrické stavy na venkovních vedeních

Nesymetrické stavy jsou stavy na vedeních při, kterých se značně mění mechanické namáhání **nosných stožárů**, nastávají při nerovnoměrně rozmístěné námraze a nebo přetržení vodiče. Podle Obr. 3-2 je zřejmé, že v rozpětí, které je ztíženo námrazou dojde k většímu zatížení a tím se zvýší mechanické napětí oproti jiných rozpětím, přičemž mechanické napětí v ostatních rozpětích klesá směrem od rozpětí z námrazou. V rozpětí z námrazkem se zároveň i zvětší průhyb

vodiče. Poruchový stav na vedení nastane v případě přetržení vodiče (Obr. 3-3). Přetržení vodiče způsobuje značné rozdíly horizontálních tahů v jednotlivých rozpětích. Zatím, co před přetržením vodiče byly nosné stožáry namáhány pouze vertikálním namáháním jsou teď namáhány i horizontálními namáháními [1].



Obr. 3-2 Kotevní úsek s námrazkem jen v jednom (třetím) rozpětí [1]

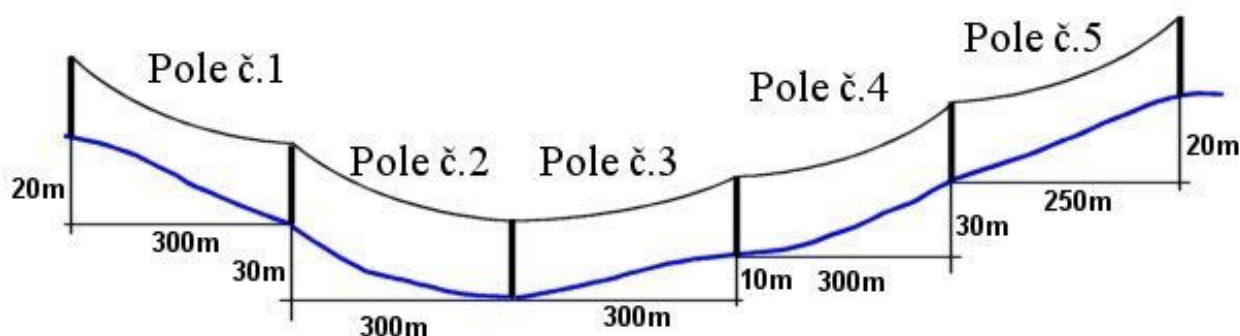


Obr. 3-3 Přetržení vodiče v prvním rozpětí kotevního pole [1]

4 NÁVRH A KONTROLA VEDENÍ V DANÉ KLIMATICKÉ OBLASTI

4.1 Cíl práce

Cílem této práce je dimenzovat a zkontrolovat po mechanické stránce část venkovního 110kV elektrického vedení. Jedná se tedy o určení, zda dané pole vedení vyhovuje ve stavech počasí uvedených v normě [2] a popsaných v kapitole 3.1 a určení montážní tabulky. Obr. 4-1 obsahuje všechny potřebné údaje o profilu terénu. Námrazová oblast je střední – S.



Obr. 4-1 Profil terénu

4.2 Základní zásady při návrhu venkovního vedení

Při návrhu projektu venkovního vedení bychom měli dodržet následující zásady [1]:

- vedení má být podle možností snadno přístupné, a to ne jen při montáži, ale také při opravách.
- trasa vedení má být co nejkratší, někdy však křižovatky tak zvyšují cenu výstavby, že výhodnější je delší trasa.
- trasa má mít podle možností málo úseků, zato však úseky dlouhé a přímé, neboť každý lom vedení je nákladný.
- lomy vedení by měli být co nejtupější, protože výslednice tahů záleží přímo na velikosti úhlu lomu a při námrazách a velkých průřezích vodičů je značně velká.
- rohový stožár se má dávat do blízkosti svahu.
- železnice a jiné vedení se nemají křižovat v příliš ostrém úhlu.
- při křižovatkách se splavnými řekami se nábrežní stožáry nemají používat jako kotevní.
- trasa vedení se má vyhnout dlouhým souběhům s datovým vedením, aby nedocházelo k rušení.

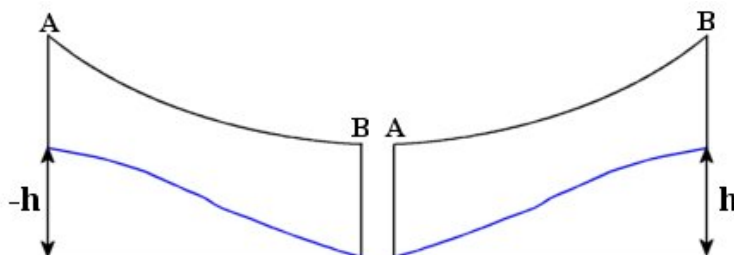
4.3 Způsob řešení nesouměrného závěsu pomocí výpočetní techniky

Všechny potřebné vztahy pro výpočet geometrických a mechanických parametrů vedení jsou odvozeny v kapitolách 2 a 3 a nyní budou použity při řešení praktického problému. Jak již bylo v předešlé kapitole řečeno, nejvíce vyhovujícím způsobem řešení je použití výpočetní techniky. V našem případě použijeme program Matlab.

Vytvoříme tedy program, který pro 110 kV venkovní vedení s vodiči AlFe 6, nacházející se v dané námrazové oblasti o délce rozpětí (a) a převýšení (h), určí zda pole vyhovuje pro stavy

počasí 1 až 6 (popsané v kapitole 3.1). Pro všech šest podmínek vykreslíme průhybovou křivku, podle níž bude zřejmé zda je dodržena minimální vzdálenost od země. Dále určíme montážní tabulku (namáhání v bodech závěsu) doplněnou o hodnoty maximálního viditelného průhybu a délky lana, pro teploty od -30°C do 40°C . Určíme také kritické rozpětí a kritickou teplotu.

Program pracuje podle vývojového diagramu v Obr. 4-3, Obr. 4-4, Obr. 4-5 a řeší vždy jedno pole. Zdrojový kód programu je uveden na CD s elektronickou verzí k této práci. Výpočet může být proveden pro jakékoliv AlFe lano. Rozlišení vyššího závěsného bodu se provede pomocí hodnoty převýšení – h (viz. Obr. 4-2).



Obr. 4-2 Rozlišení vyššího závěsného bodu

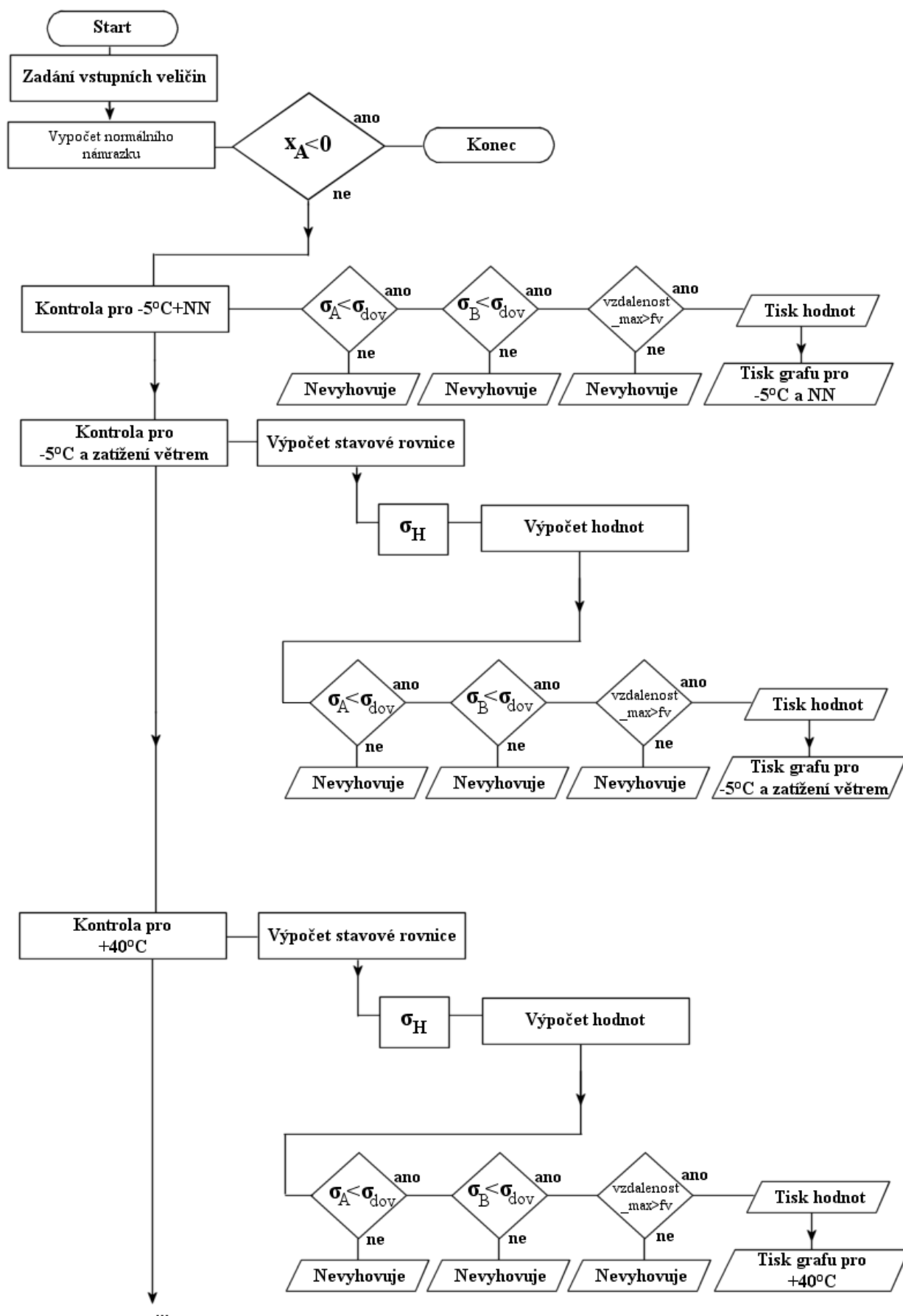
4.3.1 Kontrola pro normou dané stavy počasí

Každé pole budeme kontrolovat pro tyto stavy počasí (blíže popsané v kapitole 3.1):

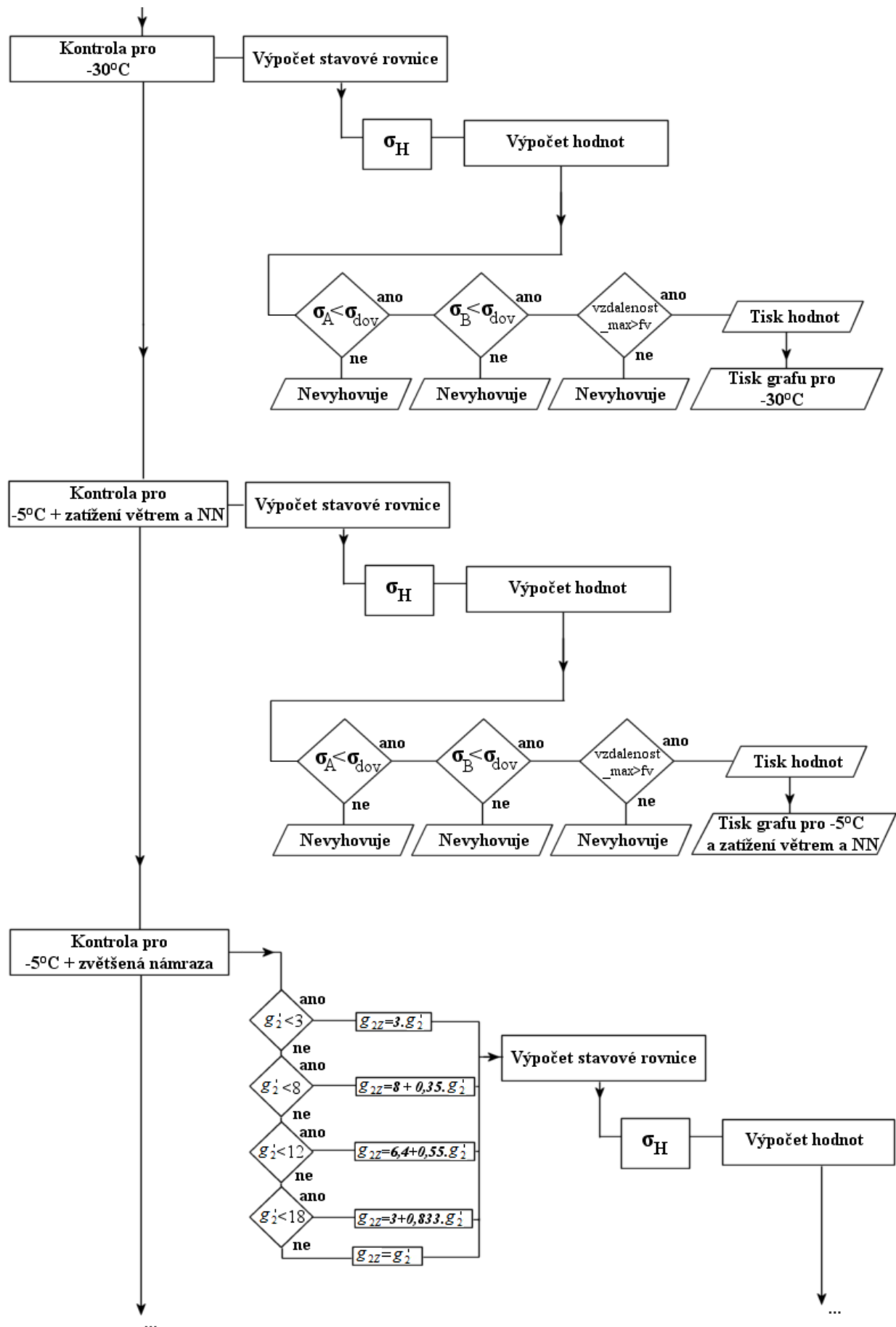
1. -5°C , bezvětrí, normální námraza.
2. -5°C , vítr, bez námrazy.
3. $+40^{\circ}\text{C}$, bez větru.
4. -30°C , bez větru, bez námrazy.
5. -5°C , vítr, normální námraza.
6. -5°C , bez větru, zvětšená námraza.

Pro každý stav počasí, oproti normě [2], která určuje pro každý stav počasí různé kontroly, zkontrolujeme jak mechanické napětí (celkové v každém závěsném bodě) tak i maximální průhyb. Všechny tyto stavy budou graficky znázorněny.

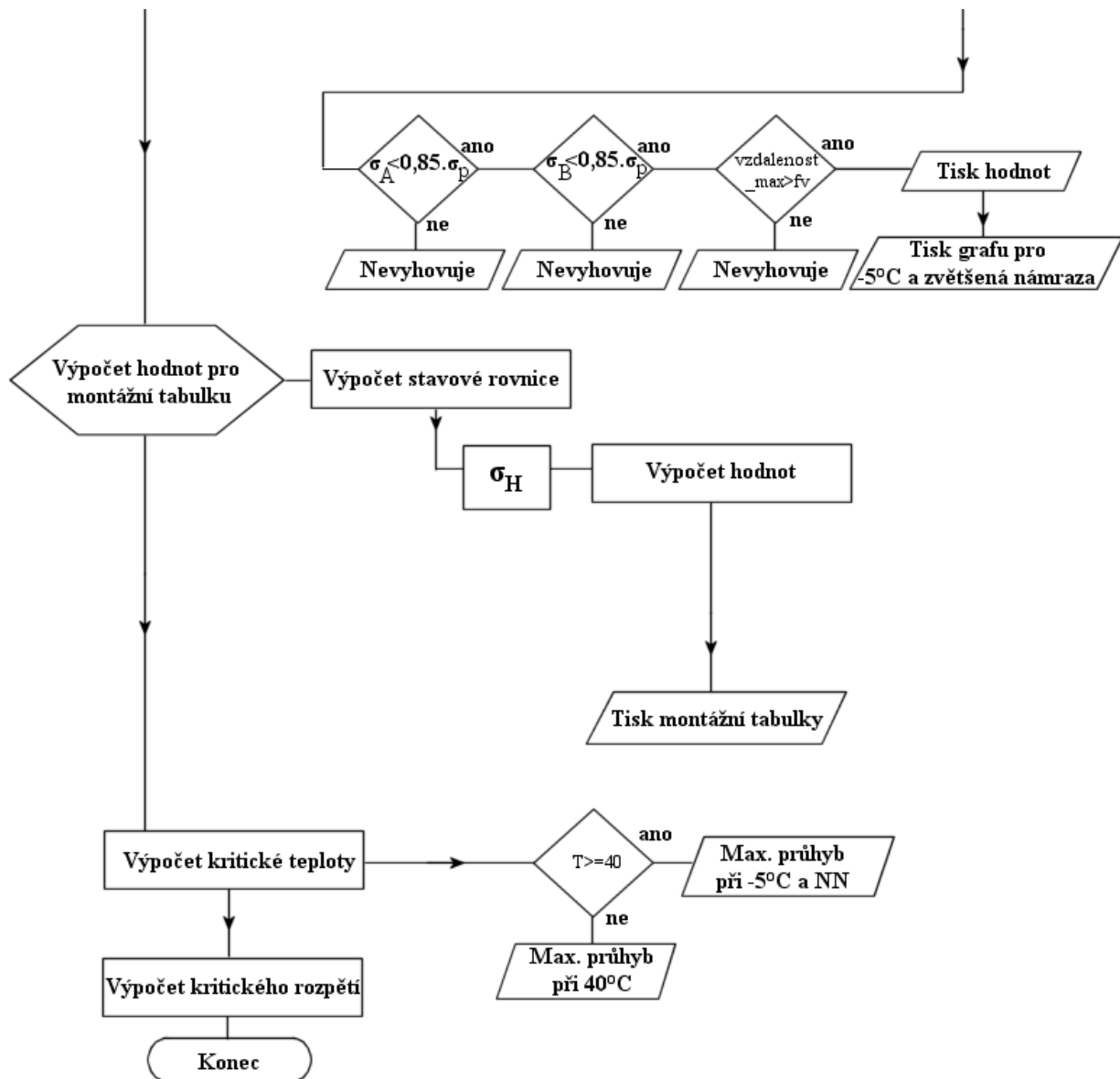
Pro stavy počasí 1. až 5. nesmí namáhání vodičů (fázových i zemních) překročit dovolené hodnoty $\sigma_{A,B} < \sigma_{dov}$ stanovené pro jednotlivé materiály vodičů v [2]. Namáhání vodičů ve stavu počasí 6 musí splňovat podmínku $\sigma_{A,B} \leq 0,85 \cdot \sigma_p$.



Obr. 4-3 Vývojový diagram programu – 1. část



Obr. 4-4 Vývojový diagram programu – 2. část



Obr. 4-5 Vývojový diagram programu – 3. část

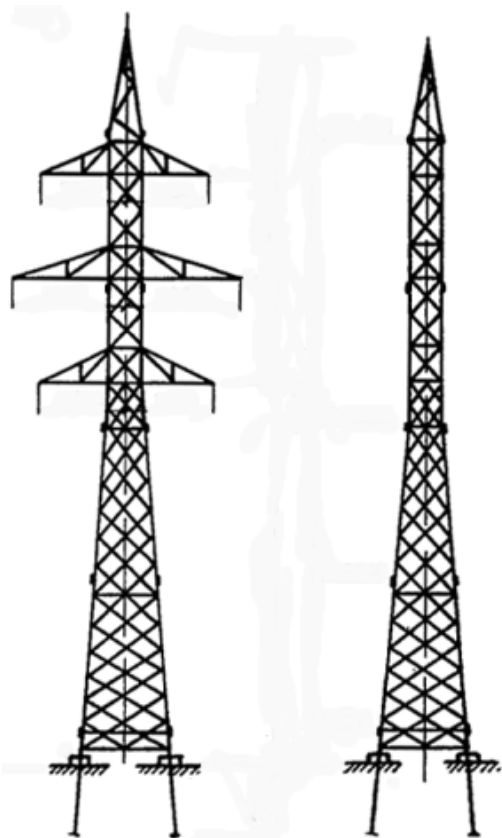
4.4 Použité stožáry a vodiče

Stožáry:

Na vedení budou použity stožáry pro dvojité 110 kV vedení typového řádu ELV (Obr. 4-6), rozměry stožáru nalezneme v Tab. 4-1. Vzhledem k velkým převýšením mezi jednotlivými poli budou použity stožáry **kotevní**. Tím odpadá kontrola **nesymetrických** stavů na vedení, které se řeší při použití nosných stožárů. Všechny závěsné body na stožáru jsou ve výšce 20 – 40 m stačí provést jednu kontrolu na namáhání větrem.

Tab. 4-1 : Rozměry pro kotevní stožár[1]

Skupina stožárů	Kotevní
Typ stožáru	I+6
Funkce	R
Uvažovaná výška spodního závěsu	20 m
Výška stožáru po dolní konzolu	19940 mm
Výška stožáru po střední konzolu	23790 mm
Výška stožáru po horní konzolu	27640 mm
Celková výška stožáru	33260 mm



Obr. 4-6 Kotevní stožár

Vodiče:

Vodiče jsou zvoleny AlFe 240/39. Tabulkové hodnoty potřebné pro výpočty jsou v Tab. 4-2.

Tab. 4-2 : Tabulkové hodnoty pro lano AlFe 240/39[3]

Průřez lana	S	267,8 mm ²
Průměr lana	d	21,35 mm
Tíha 1 m samostatného vodiče	g_1'	7,698 N.m ⁻¹
Modul pružnosti vodiče	E	88,3. 10 ³ MPa

Koeficient tepelné roztažnosti	α	$19,75 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Horizontální mechanické napětí	σ_H	90 MPa
Maximální mechanické napětí	σ_p	280,31 MPa
Dovolené mechanické napětí	σ_{dov}	106,52 MPa

Minimální vzdálenost vodičů od země dle normy [3] je pro 110 kV vedení **6 m**.

4.5 Vypočítané hodnoty pro jednotlivá pole

4.5.1 Pole č.1

Vstupní hodnoty: $a = 300\text{m}$, $h = -20\text{m}$

Výstupní hodnoty: kontrola pro stavy počasí 1-6 v Tab. 4-3 a montážní tabulka Tab. 4-4.

Průběh průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 viz. Obr. A-1.

Tab. 4-3 : Pole č.1 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6

	Stav počasí	Mechanické napětí- horizontální [MPa]	Mechanické napětí- celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	
1	-5°C + NN	90	Bod A: 92,14	11.41	Vyhovuje
			Bod B: 90,32		
2	-5°C + vítr	56,60	Bod A: 57,86	10.83	Vyhovuje
			Bod B: 56,77		
3	+40°C	27,76	Bod A: 28,44	11.69	Vyhovuje
			Bod B: 27,87		
4	-30°C	33,83	Bod A: 34,47	9.58	Vyhovuje
			Bod B: 33,89		
5	-5°C + vítr + námraza	86,99	Bod A: 89,06	11.36	Vyhovuje
			Bod B: 87,30		
6	5°C + ZN	187,77	Bod A: 193,14	12.97	Vyhovuje
			Bod B: 188,83		

Tab. 4-4 : Pole č.1 - montážní tabulka

	Teplota [°C]	Mechanické napětí- horizontální [MPa]	Mechanické napětí- celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	Délka lana [m]
1	-30	33,83	Bod A: 34,47	9,58	301,47
			Bod B: 33,89		
2	-20	32,73	Bod A: 33,37	9,90	301,53

			Bod B: 32,80		
3	-10	31,72	Bod A: 32,38	10,22	301,58
			Bod B: 31,80		
4	0	30,80	Bod A: 31,46	10,53	301,64
			Bod B: 30,89		
5	10	29,95	Bod A: 30,62	10,83	301,70
			Bod B: 30,04		
6	20	29,17	Bod A: 29,84	11,12	301,75
			Bod B: 29,26		
7	30	28,44	Bod A: 29,12	11,41	301,81
			Bod B: 28,54		
8	40	27,76	Bod A: 28,44	11,69	301,87
			Bod B: 27,87		

4.5.2 Pole č.2

Vstupní hodnoty: $a = 300m$, $h = -30m$

Výstupní hodnoty: kontrola pro stavy počasí 1-6 v Tab. 4-5 a montážní tabulka Tab. 4-6.

Průběh průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 viz. Obr. A-2.

Tab. 4-5 : Pole č.2 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6

	Stav počasí	Mechanické napětí-horizontální [MPa]	Mechanické napětí-celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	
1	-5°C + NN	90,00	Bod A: 92,85	11.43	Vyhovuje
			Bod B: 90,12		
2	-5°C + vítr	56,60	Bod A: 58,29	10.85	Vyhovuje
			Bod B: 56,65		
3	+40°C	27,76	Bod A: 28,66	11.70	Vyhovuje
			Bod B: 27,80		
4	-30°C	33,83	Bod A: 34,71	9.59	Vyhovuje
			Bod B: 33,84		
5	-5°C + vítr + námraza	86,99	Bod A: 89,74	11.38	Vyhovuje
			Bod B: 87,11		
6	5°C + ZN	187,77	Bod A: 194,75	12.98	Vyhovuje
			Bod B: 188,27		

Tab. 4-6 : Pole č.2 - montážní tabulka

	Teplota [°C]	Mechanické napětí- horizontální [MPa]	Mechanické napětí-celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	Délka lana [m]
1	-30	33,83	Bod A: 34,71	9,59	302,31
			Bod B: 33,84		
2	-20	32,73	Bod A: 33,61	9,91	302,36
			Bod B: 32,75		
3	-10	31,72	Bod A: 32,61	10,23	302,42
			Bod B: 31,75		
4	0	30,80	Bod A: 31,69	10,54	302,47
			Bod B: 30,83		
5	10	29,95	Bod A: 30,85	10,84	302,53
			Bod B: 29,98		
6	20	29,17	Bod A: 30,06	11,13	302,58
			Bod B: 29,20		
7	30	28,44	Bod A: 29,34	11,42	302,64
			Bod B: 28,48		
8	40	27,76	Bod A: 27,80	11,70	302,70
			Bod B: 28,66		

4.5.3 Pole č.3

Vstupní hodnoty: $a = 300m$, $h = 10m$

Výstupní hodnoty: kontrola pro stavy počasí 1-6 v Tab. 4-7 a montážní tabulka Tab. 4-8.

Průběh průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 viz. Obr. A-3.

Tab. 4-7 : Pole č.3 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6

	Stav počasí	Mechanické napětí- horizontální [MPa]	Mechanické napětí- celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	
1	-5°C + NN	90,00	Bod A: 90,63	11.40	Vyhovuje
			Bod B: 91,54		
2	-5°C + vítr	56,60	Bod A: 56,95	10.82	Vyhovuje
			Bod B: 57,49		
3	+40°C	27,76	Bod A: 27,96	11.68	Vyhovuje
			Bod B: 28,25		

4	-30°C	33,83	Bod A: 33,98	9.57	Vyhovuje
			Bod B: 34,27		
5	-5°C + vítr + námraza	86,99	Bod A: 87,60	11.35	Vyhovuje
			Bod B: 88,47		
6	5°C + ZN	187,77	Bod A: 189,59	12.95	Vyhovuje
			Bod B: 191,75		

Tab. 4-8 : Pole č.3 - montážní tabulka

	Teplota [°C]	Mechanické napětí-horizontální [MPa]	Mechanické napětí-celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	Délka lana [m]
1	-30	33,83	Bod A: 33,98	9,57	300,97
			Bod B: 34,27		
2	-20	32,73	Bod A: 32,89	9,90	301,03
			Bod B: 33,18		
3	-10	31,72	Bod A: 31,89	10,21	301,09
			Bod B: 32,18		
4	0	30,80	Bod A: 30,98	10,52	301,14
			Bod B: 31,27		
5	10	29,95	Bod A: 30,14	10,82	301,20
			Bod B: 30,42		
6	20	29,17	Bod A: 29,36	11,11	301,25
			Bod B: 29,65		
7	30	28,44	Bod A: 28,64	11,4	301,31
			Bod B: 28,92		
8	40	27,76	Bod A: 27,96	11,68	301,37
			Bod B: 28,25		

4.5.4 Pole č.4

Vstupní hodnoty: $a = 300m$, $h = 30m$

Výstupní hodnoty: kontrola pro stavy počasí 1-6 v Tab. 4-9 a montážní tabulka Tab. 4-10.

Průběh průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 viz. Obr. A-4.

Tab. 4-9 : Pole č.4 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6

	Stav počasí	Mechanické napětí-horizontální [MPa]	Mechanické napětí-celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	
1	-5°C + NN	90,00	Bod A: 90,12	11.48	Vyhovuje
			Bod B: 92,85		
2	-5°C + vítr	56,60	Bod A: 56,65	10.90	Vyhovuje
			Bod B: 58,29		
3	+40°C	27,76	Bod A: 27,80	11.75	Vyhovuje
			Bod B: 28,66		
4	-30°C	33,83	Bod A: 33,84	9.64	Vyhovuje
			Bod B: 34,71		
5	-5°C + vítr + námraza	86,99	Bod A: 87,11	11.43	Vyhovuje
			Bod B: 89,74		
6	5°C + ZN	187,77	Bod A: 188,27	13.03	Vyhovuje
			Bod B: 194,75		

Tab. 4-10 : Pole č.4 - montážní tabulka

	Teplota [°C]	Mechanické napětí-horizontální [MPa]	Mechanické napětí-celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	Délka lana [m]
1	-30	33,83	Bod A: 33,84	9,64	302,31
			Bod B: 34,71		
2	-20	32,73	Bod A: 32,75	9,96	302,36
			Bod B: 33,61		
3	-10	31,72	Bod A: 31,75	10,28	302,42
			Bod B: 32,61		
4	0	30,80	Bod A: 30,83	10,59	302,47
			Bod B: 31,69		
5	10	29,95	Bod A: 29,98	10,89	302,53
			Bod B: 30,85		
6	20	29,17	Bod A: 29,20	11,18	302,58
			Bod B: 30,06		
7	30	28,44	Bod A: 28,48	11,47	302,64

			Bod B: 29,34		
8	40	27,76	Bod A: 27,80	11,75	302,70
			Bod B: 28,66		

4.5.5 Pole č.5

Vstupní hodnoty: $a = 250m$, $h = 20m$

Výstupní hodnoty: kontrola pro stavy počasí 1-6 v Tab. 4-11 a montážní tabulka Tab. 4-12.

Průběh průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 viz. Obr. A-5.

Tab. 4-11 : Pole č.5 - vypočítané hodnoty pro stavy počasí 1-6

	Stav počasí	Mechanické napětí-horizontální [MPa]	Mechanické napětí-celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	
1	-5°C + NN	90,00	Bod A: 90,00	7.94	Vyhovuje
			Bod B: 91,92		
2	-5°C + vítr	57,83	Bod A: 57,87	7.38	Vyhovuje
			Bod B: 58,96		
3	+40°C	27,50	Bod A: 27,53	8.21	Vyhovuje
			Bod B: 28,11		
4	-30°C	37,01	Bod A: 37,02	6.10	Vyhovuje
			Bod B: 37,59		
5	-5°C + vítr + námraza	87,14	Bod A: 87,23	7.90	Vyhovuje
			Bod B: 88,98		
6	5°C + ZN	181,00	Bod A: 181,44	9.36	Vyhovuje
			Bod B: 185,75		

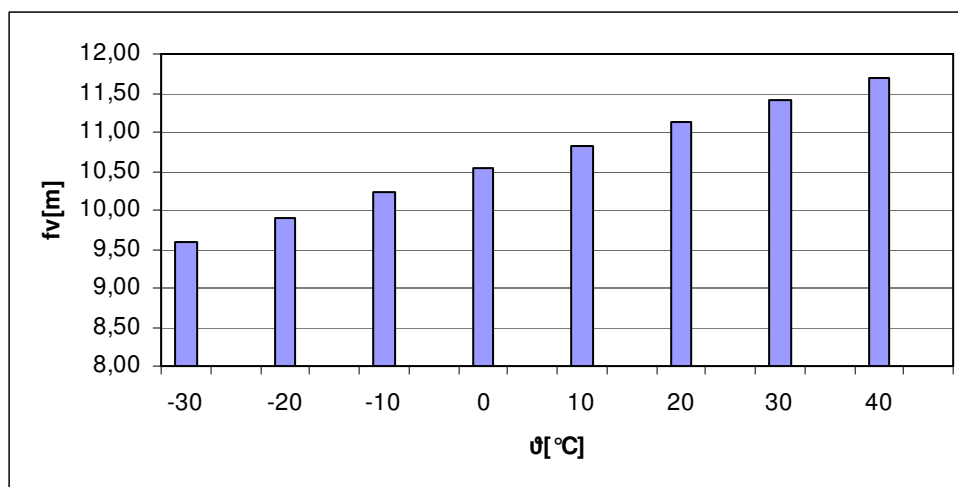
Tab. 4-12 : Pole č.5 - montážní tabulka

	Teplota [°C]	Mechanické napětí-horizontální [MPa]	Mechanické napětí-celkové [MPa]	Viditelný průhyb[m]	Délka lana [m]
1	-30	37,01	Bod A: 37,02	6.10	251,19
			Bod B: 37,59		
2	-20	35,10	Bod A: 35,11	6.43	251,23
			Bod B: 35,68		
3	-10	33,43	Bod A: 33,44	6.75	251,28
			Bod B: 34,02		

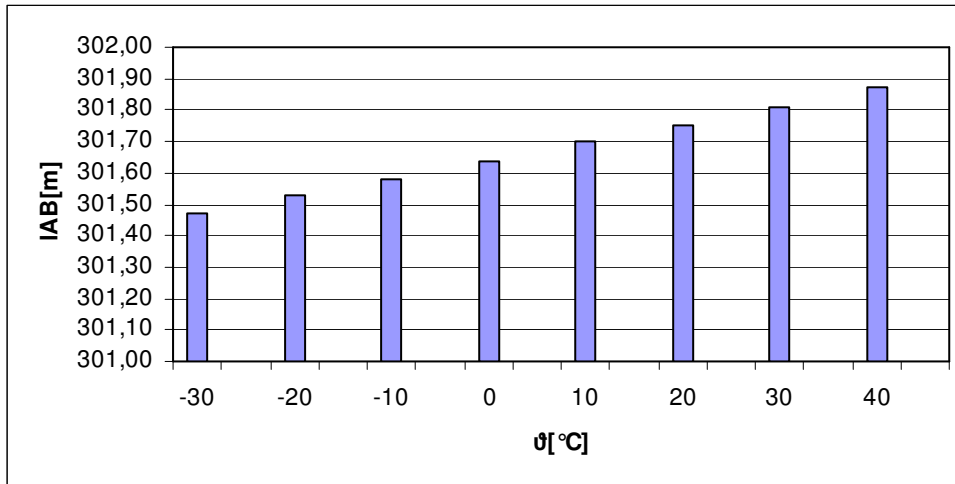
4	0	31,96	Bod A: 31,98	7.06	251,32
			Bod B: 32,55		
5	10	30,66	Bod A: 30,68	7.36	251,37
			Bod B: 31,26		
6	20	29,49	Bod A: 29,52	7.65	251,41
			Bod B: 30,10		
7	30	28,45	Bod A: 28,48	7.94	251,46
			Bod B: 29,05		
8	40	27,50	Bod A: 27,53	8.21	251,51
			Bod B: 28,11		

4.5.6 Zhodnocení výpočtů

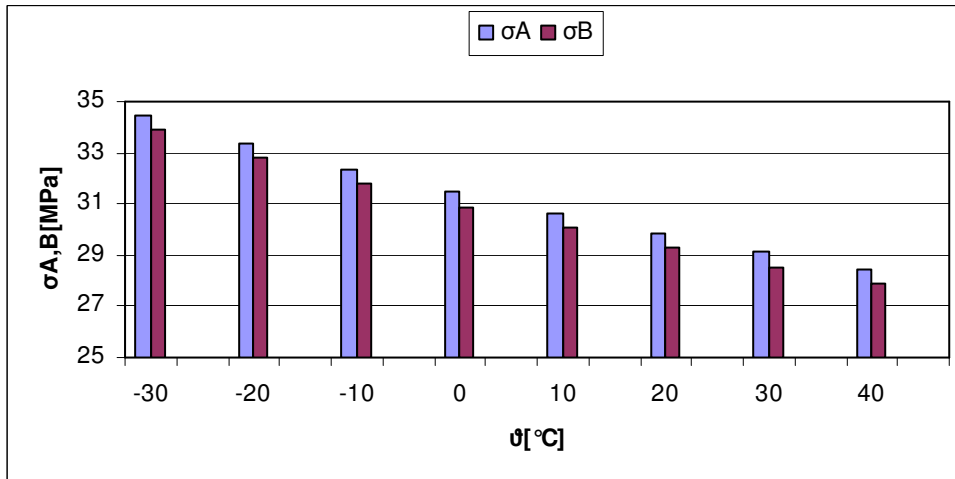
Závislosti jsou uvedeny pro **pole č.1**, ostatní pole mají stejné vlastnosti. Z vypočtených hodnot je zřejmé, že s rostoucí teplotou se zvětšuje průhyb (Obr. 4-7) a délka lana (Obr. 4-8), ale namáhání v závěsných bodech klesá (Obr. 4-9).



Obr. 4-7 Závislost průhybu lana na teplotě okolí (pole č.1)

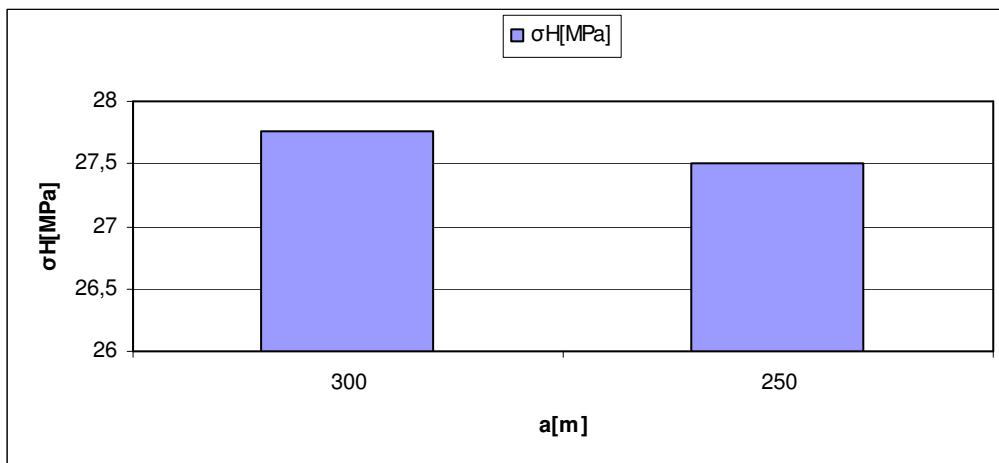


Obr. 4-8 Závislost délky lana na teplotě okolí (pole č.1)

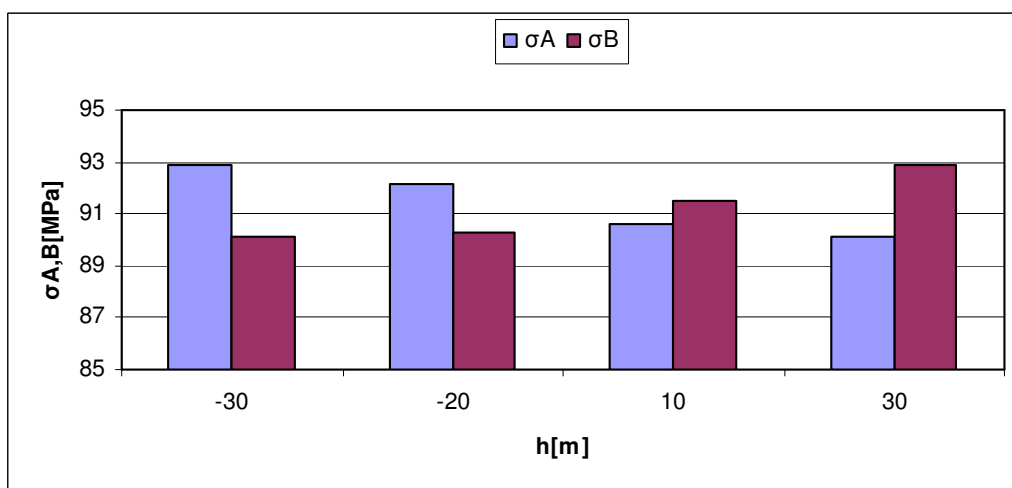


Obr. 4-9 Závislost celkového napětí v bode A,B na teplotě okolí (pole č.1)

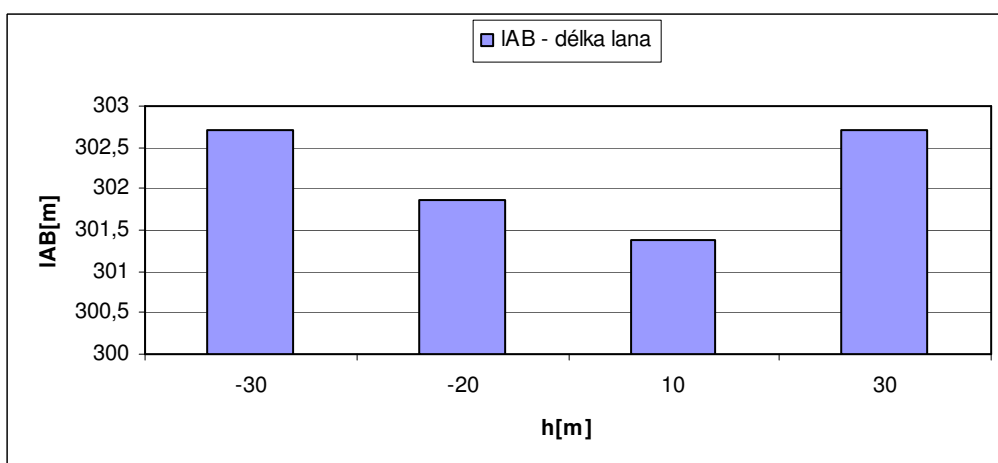
Velikost horizontálního napětí σ_H se mění s délkou rozpětí na vedení. S rostoucí délkou rozpětí roste horizontální napětí σ_H (viz. Obr. 4-10). Změna převýšení nemá na horizontální napětí σ_H vliv. Změna převýšení má naopak vliv na hodnoty celkových namáhání v závěsných bodech a to tak, že větší namáhání působí ve vyšším závěsném bodě (se vzrůstajícím převýšením roste namáhání ve vyšším závěsném bodě a naopak v nižším bodě namáhání klesá, viz. Obr. 4-11). Dále má velikost převýšení vliv na délku lana (Obr. 4-12). Rostoucí převýšení způsobí prodloužení délky lana.



Obr. 4-10 Závislost horizontálního napětí na délce rozpětí pro +40°C



Obr. 4-11 Závislost celkového mechanického napětí v bode A,B na převýšení závěsných bodů pro -5°C + NN (rozpětí a=300m)



Obr. 4-12 Závislost délky lana na převýšení závěsných bodů pro +40°C (rozpětí a=300m)

5 ZÁVĚR

Venkovní elektrické vedení musí být navrženo tak, aby vyhovovalo řadě požadavků. Tedy všechny jeho části musejí bezpečně odolat mechanickému a elektrickému namáhání. Ovšem vedení by mělo být navrženo tak, aby bylo ekonomicky výhodné. Pokud je vedení špatně navrženo může v závěsných bodech dojít k velkému nebo malému tahu. Velký tah má často za následek větší sklon k vibracím, což vede často k přetržení vodičů. Naopak malý tah ve vodičích má za následek zvětšení průhybu, což může způsobit nedodržení vzdálenosti od země předepsané normou, nebo také může způsobit poruchu.

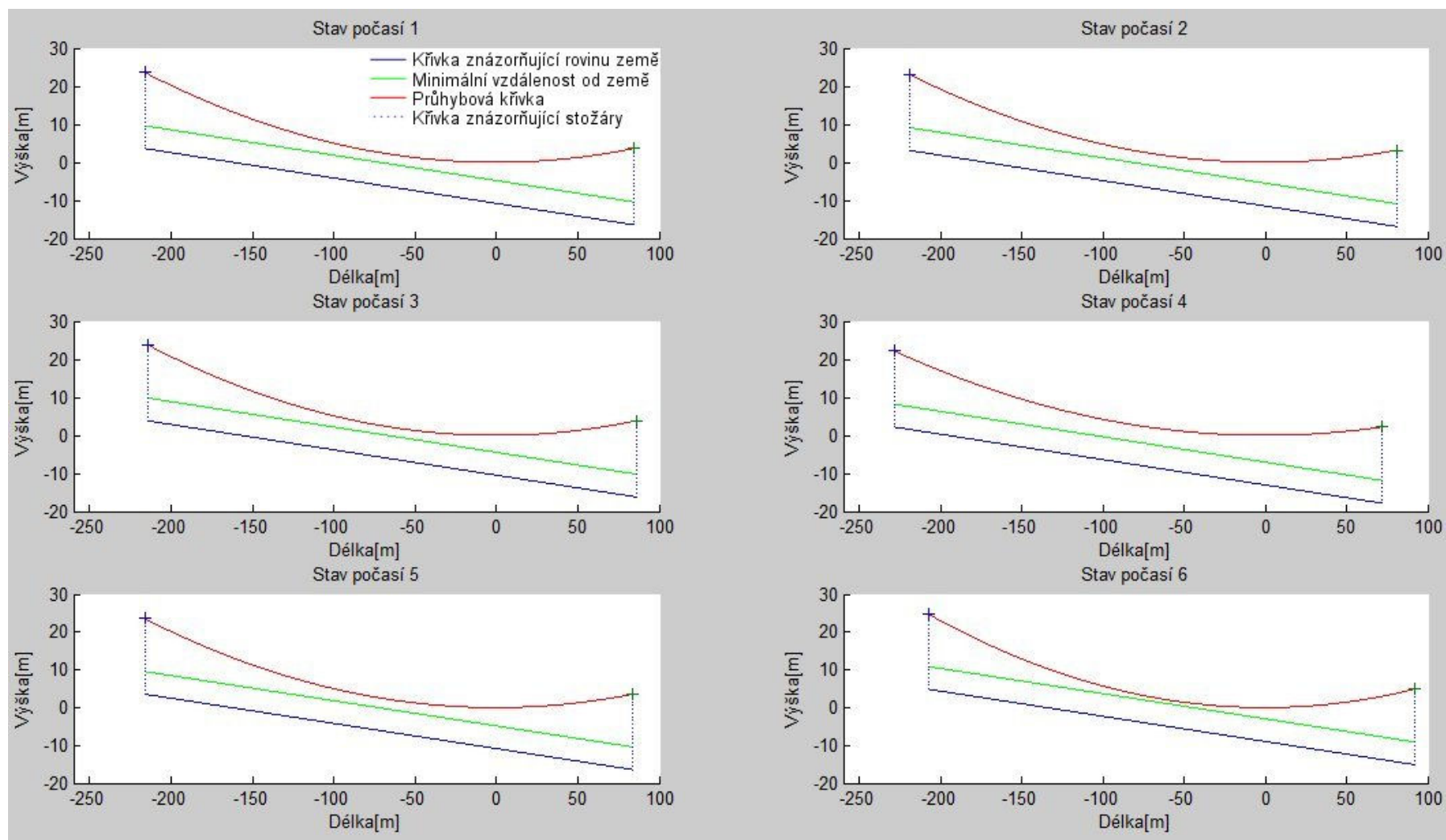
Rozlišujeme dva druhy závěsu – souměrný a nesouměrný. Pro každý závěs máme odvozeny potřebné vztahy pro výpočet geometrických a mechanických vlastností. Tyto vztahy jsou následně použity při řešení problematiky nesouměrného závěsu.

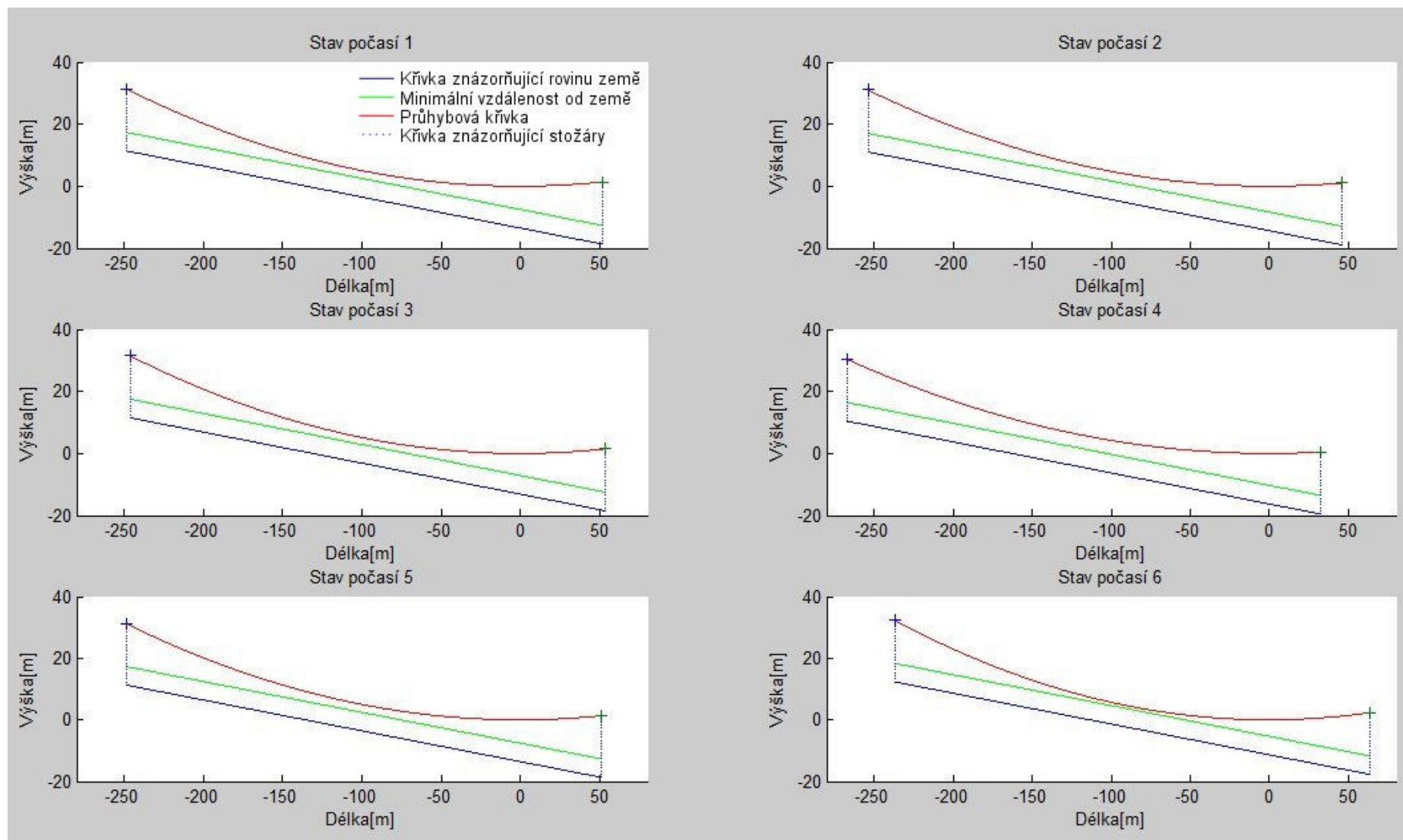
Vedení je ovlivňováno řadou klimatických jevů: vítr, blesky, námraza, změny teploty, chemické účinky ovzduší, nadmořská výška a zeměpisná šířka. Změny teplot a přetížení vodiče od námrazy nebo větru mají za následek změnu mechanického napětí ve vodiči a také změnu průhybu vodiče. Proto se mechanický výpočet napětí ve vodiči a výpočet maximálního průhybu určují pro nejnepríznivější klimatické podmínky, které mohou za provozu nastat. Vodiče se však montují při různých klimatických podmínkách, musí se tedy při montáži napnout na takové mechanické napětí a průhyb, aby i při nejnepríznivějších podmínkách vyhovoval normám. Pro určení mechanického napětí a průhybů při různých teplotách a přetížení je potřeba použít stavovou rovnici.

Praktické použití stavové rovnice a odvozených vztahů je představeno při řešení problému nesouměrného závěsu. Řešeno bylo pět polí vedení v náhodně zvoleném terénu. Pro každé pole byla provedena kontrola všech stavů počasí dle normy [2] a všechna pole těmito požadavkům vyhověla. Dále byla určena montážní tabulka s napínacími tahy vodičů, průhyby a délkami lana. Vypočtené hodnoty jsou následně zhodnoceny v kapitole 4.5.6. Z grafů uvedených v této kapitole je zřejmé, že s rostoucí teplotou se zvětšuje průhyb (Obr. 4-6) a délka lana (Obr. 4-8), ale namáhání v závěsných bodech klesá (Obr. 4-9). Velikost horizontálního napětí σ_H se mění s délkou rozpětí na vedení, s rostoucí délkou rozpětí roste horizontální napětí σ_H (viz. Obr. 4-10). Změna převýšení nemá na horizontální napětí σ_H vliv. Změna převýšení má vliv na hodnoty celkových namáhání v závěsných bodech a to tak, že větší namáhání působí ve vyšším závěsném bodu (viz. Obr. 4-11). Dále má velikost převýšení vliv na průhyb a délku lana (Obr. 4-12) a to tak, že rostoucí převýšení způsobí větší průhyb a tím se prodlouží délka lana.

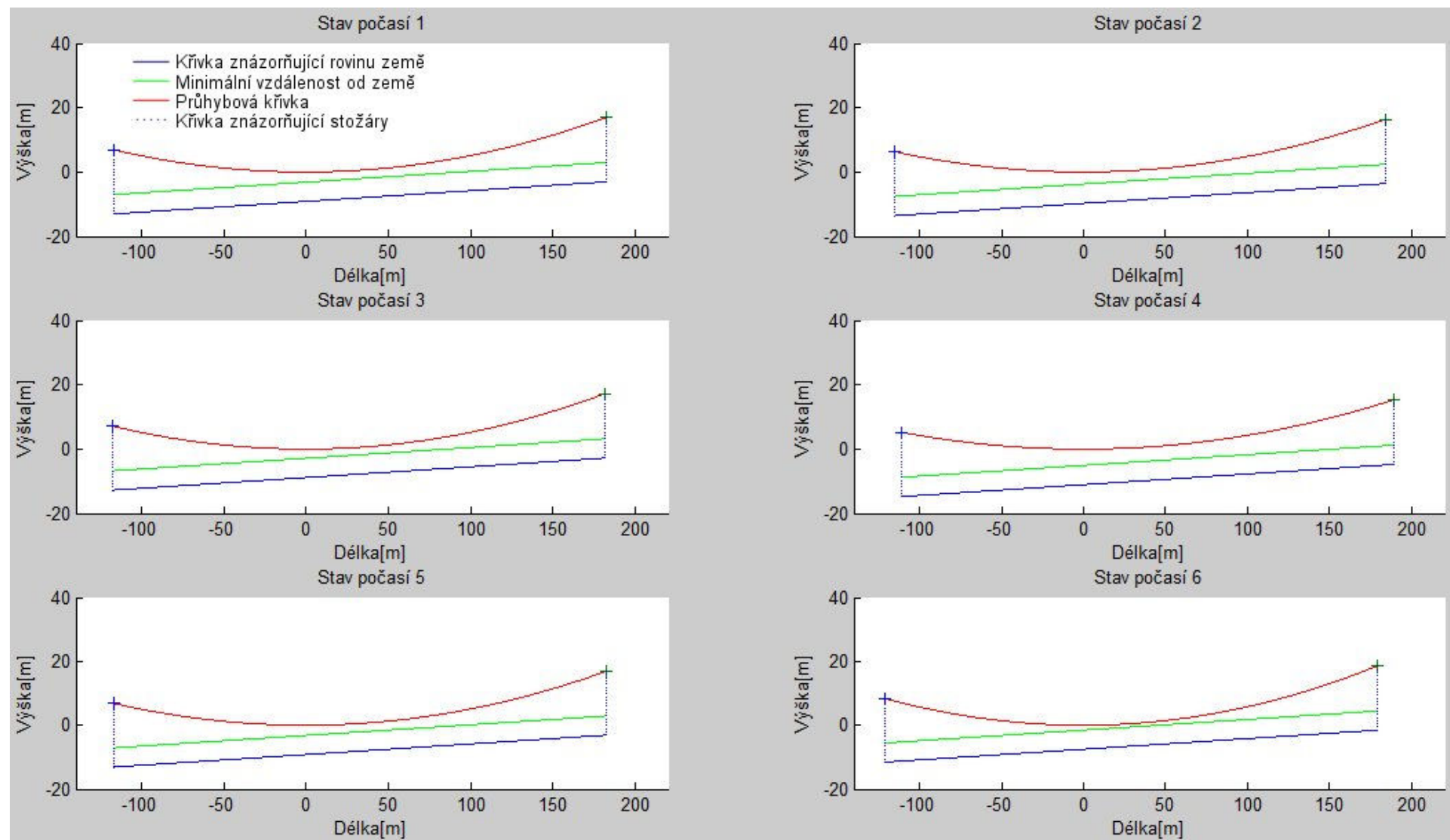
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Fecko Š., Žiaran J., Varga L.: *Elektrické siete. Vonkajšie silové vedenia*. SVŠT v Bratislave, 1990.
- [2] ČSN 33 3300 Stavba venkovních silových vedení.
- [3] Orságová J.: *Elektrické stanice a vedení*, Vysoké učení technické v Brně.
- [4] Beňa L., Leščinský P., Varga L.: *Výpočet mechanických pomerov vonkajších silových vedení*. Merkury-Smékal, 2002.
- [5] Verner J.: *Elektrické stanice a vedení*. Vysoké učení technické v Brně, 1985.

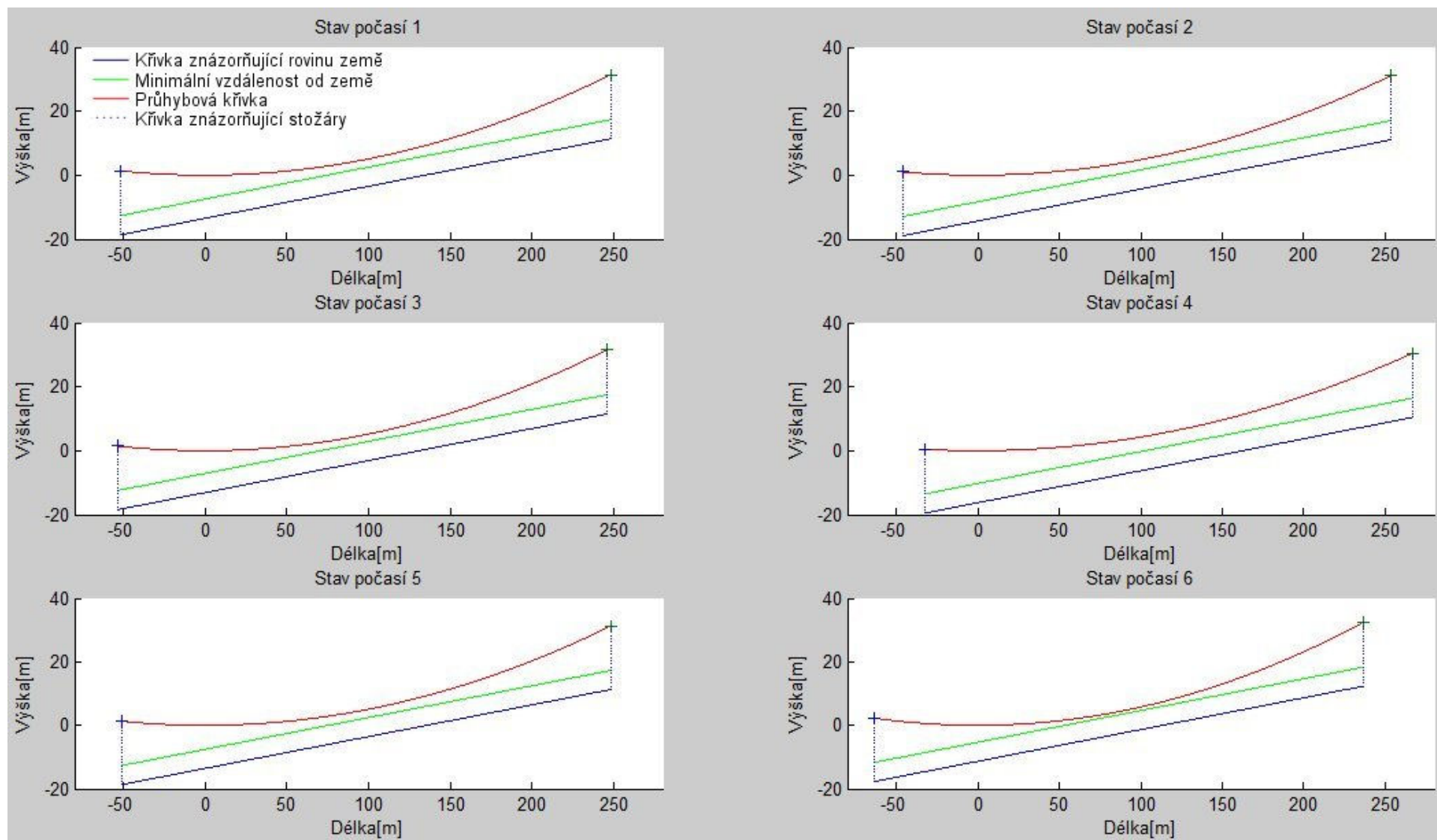
Příloha A Průhybové křivky pro pole 1-5.*Obr. A-1 Pole č.1 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)*



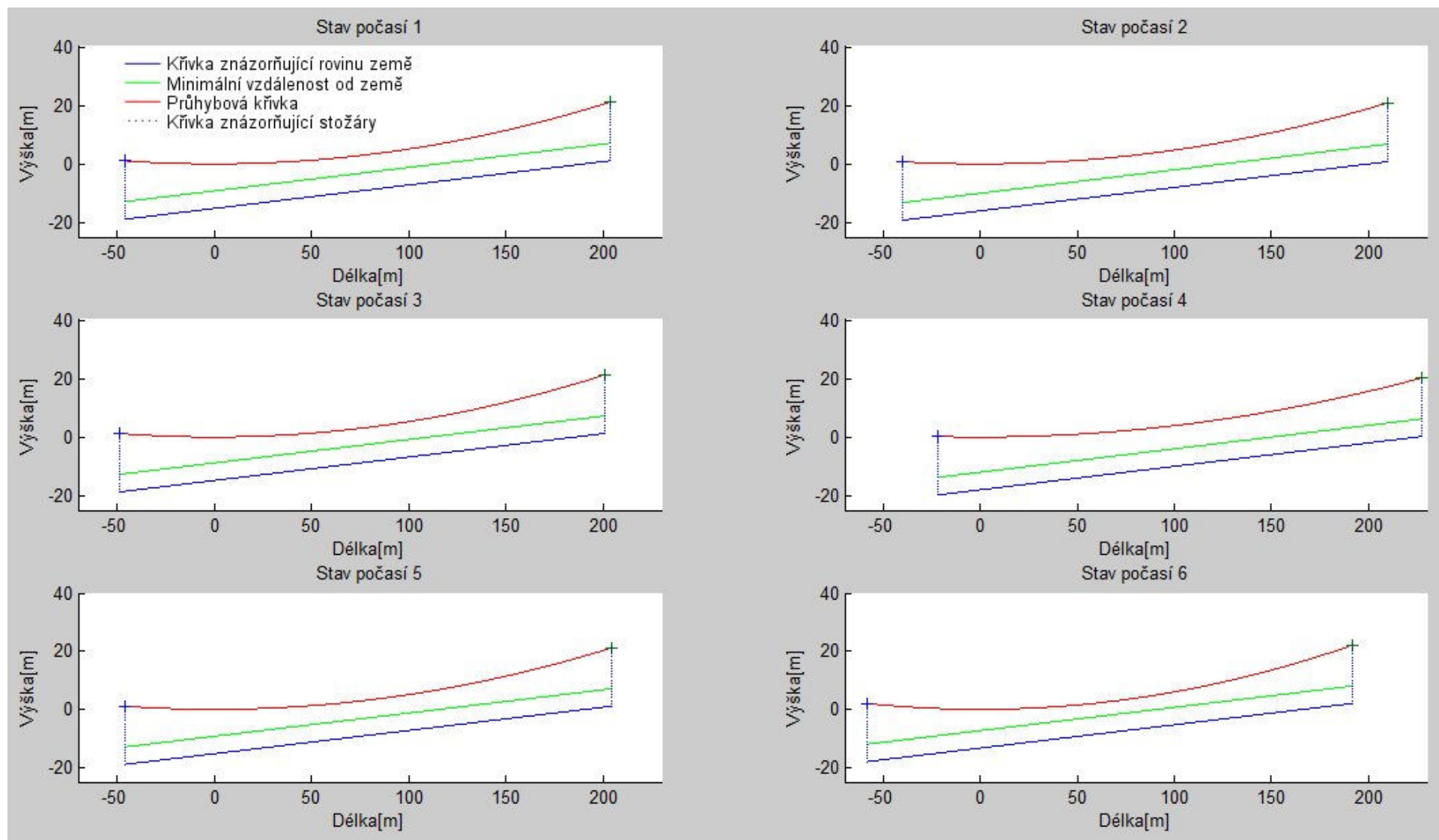
Obr. A-2 Pole č.2 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)



Obr. A-3 Pole č.3 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)



Obr. A-4 Pole č.4 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)



Obr. A-5 Pole č.5 - průhybové křivky ve stavech počasí 1-6 (dolní konzole)