



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky**

Vliv nových trendů na návrh venkovních vedení
The Influence of New Trends on Overhead Line Design

Diplomová práce

Studijní program: EEM
Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Luděk Krba

Michal Patera

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Michal Patera**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vliv nových trendů na návrh venkovních vedení**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte studii návrhu venkovního vedení zahrnující:
 - mechanický výpočet
 - elektrické parametry
 - používané typy vodičů
 - obecný výpočet pro ACCC vodič
- 2) Zpracujte případovou studii návrhu rekonstrukce venkovního vedení s vodičem ACCC.

Seznam odborné literatury:

- [1] Varga, L.- Leščinský, P.- Beňa, Ľ.: Výpočet mechanických pomerov vonkajších silových vedení, Edícia vedeckých spisov FEI TU Košice, ISBN 80-89061-56-7, september 2002, 187 s.
- [2] ČSN EN 50 182
- [3] ČSN EN 50 341

Vedoucí: Ing. Luděk Krba

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Abstrakt

Zvyšování spotřeby elektrické energie má za následek to, že existující přenosové linky musí být schopny přenášet stále větší výkony. Naproti tomu legislativa mnoha vyspělých zemí komplikuje nebo přímo zakazuje výstavbu nových přenosových vedení vzhledem k jejich environmentálním vlivům. Výsledkem tohoto jednání je, že některé přenosové linky mohou být provozovány prakticky na hranici svých přenosových možností. V této diplomové práci se zaměříme na jednu z nejpoužívanějších metod upratingu přenosových linek tzv. reconductoring neboli výměnu klasických vodičů AlFe za moderní vodiče ACCC (Aluminium Conductor Composite Core), které vykazují mnohem lepší provozní charakteristiky ve srovnání s těmito konvenčními vodiči. Pro účely komparace byl vybrán úsek stávajícího dvojitého vedení V412/413 o napěťové hladině 400 kV. Na uvažovaném úseku se posléze zabýváme technickým posouzením záměru implementace vodiče ACCC, a to bez jakékoliv změny konstrukčního uspořádání přenosového vedení.

Klíčová slova

uprating, výměna vodičů, ACCC, knee-point, ampacita, vysokoteplotní vodiče, nízkoprůhybové vodiče

Abstract

The increase in power demand has made that existing overhead transmission lines need to transmit more energy. In addition to this, the legislation of many developed countries hinders or even forbids the construction of new overhead lines because of their environmental impacts. As a result of this, some overhead transmission lines can be operated close to its critical capacity limit. In this master thesis, the technical comparison of replacing the composite ACCC (Aluminium Conductor Composite Core) conductors instead of ACSR without any change in line arrangement and just replacing a conductor with higher capacity is discussed. For the purposes of the comparison, the reconstruction of the existing 400 kV overhead transmission line in the western part of Bohemia was chosen.

Keywords

uprating, reconductoring, ACCC, knee-point, ampacity, high-temperature conductors, low-sag conductors

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Lud'ku Krbovi za ochotu, řadu cenných připomínek a především za věnovaný čas.

Obsah

1. Úvod	1
1.1 Uprating, Upgrading, Refurbishment	1
1.2 Obecné ekonomicko-technické zhodnocení	3
2. Elektrické parametry venkovních vedení	6
2.1 Podélná impedance vedení	6
2.1.1 Rezistance venkovních vedení	7
2.1.2 Indukčnost	9
2.2 Příčná admitance vedení	16
2.2.1 Konduktance venkovních vedení	17
2.2.2 Kapacita	17
2.3 Činitel přenosu	23
2.4 Vlnová impedance vedení	23
2.5 Elektrické pole venkovního vedení	24
2.6 Magnetické pole venkovního vedení	25
3. Elektrické parametry úseku stávajícího vedení	27
3.1 Všeobecné údaje o vedení	27
3.2 Základní technické údaje	29
3.3 Údaje o ochranných pásmech	29
3.4 Vlivy na obyvatelstvo a veřejné zdraví	30
3.5 Zhodnocení elektrických parametrů vedení	30
4. Mechanické parametry venkovních vedení	35
4.1 Nepružná řetězovka	35
4.2 Vodorovné pole	37
4.3 Šikmé pole	39
4.4 Stavová rovnice napnutého vodiče	41
4.5 Nesymetrický stav zatížení vodičů venkovního vedení	43
4.6 Řešení nesymetrických stavů klasickou stavovou rovnicí	44
5. Mechanické parametry úseku stávajícího vedení	47
5.1 Klimatické podmínky pro výpočet mechaniky vodičů	47
5.2 Montážní tabulka	50
5.3 Řešení nesymetrických stavů v poli křižovatky	51
6. Používané typy vodičů	52
6.1 Klasické vodiče	52
6.2 Kompaktní vodiče	54
6.3 Speciální vodiče	55

7. Rekonstrukce úseku stávajícího vedení	61
7.1 Elektrické parametry rekonstruovaného vedení	61
7.2 Mechanické parametry rekonstruovaného vedení	65
8. Závěr	70
Použitá literatura	72
Seznam příloh	73

Seznam obrázků

1	<i>Ekonomický model přenosové linky</i>	4
2	<i>Aktualizovaný ekonomický model přenosové linky</i>	4
3	<i>Ekonomický model projektu renovace linky</i>	5
4	<i>Smyčka vodič-vodič</i>	10
5	<i>Dvě smyčky vodič-zem</i>	12
6	<i>Obecné uspořádání vodičů 3-fázového vedení</i>	14
7	<i>Transpozice vedení</i>	14
8	<i>Dva přímkové vodiče</i>	18
9	<i>Dvě dvojice skutečných a fiktivních vodičů</i>	19
10	<i>Koncept liniových vodičů s délkovou hustotou náboje</i>	24
11	<i>Koncept liniových vodičů zatížených proudem i</i>	25
12	<i>Element délky průhybové křivky</i>	36
13	<i>Vodorovné pole</i>	38
14	<i>Šikmé pole</i>	39
15	<i>Symetrický stav v kotevním poli</i>	43
16	<i>Nerovnoměrná námraza na vodičích venkovního vedení</i>	44
17	<i>Přetrhnutí vodiče v prvním kotevním poli</i>	44
18	<i>Rovnováha izolátorového řetězce</i>	45
19	<i>Výpočetní program CCP</i>	67

Seznam grafů

1	<i>Průběh J_{mod} v závislosti na výšce spodních fázových vodičů nad zemí (AlFe)</i>	32
2	<i>Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ N“ (AlFe)</i>	33
3	<i>Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ N_s+12“ (AlFe)</i>	33
4	<i>Průběh elektrické intenzity v okolí vedení „Donau 1962 typ N“ (AlFe)</i>	34
5	<i>Průběh elektrické intenzity v okolí vedení „Donau 1962 typ N_s+12“ (AlFe)</i>	34
6	<i>Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ N“ (ACCC)</i>	63
7	<i>Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ N_s+12“ (ACCC)</i>	64
8	<i>Průběh J_{mod} v závislosti na výšce spodních fázových vodičů nad zemí (ACCC)</i>	64

Seznam tabulek

1	<i>Uprating mechanismy přenosové linky</i>	2
2	<i>Primární parametry vedení</i>	6
3	<i>Sekundární parametry vedení</i>	6
4	<i>Teplotní činitele odporu a rezistivita vodičů</i>	7
5	<i>Přibližné hodnoty konduktancí pro napětí 110, 220, 400 kV</i>	17
6	<i>Základní elektrické vzdálenosti dle ČSN EN 50 341-1</i>	28
7	<i>Minimální vzdálenosti od země a křížovaných objektů (ČSN EN 50 341-1)</i>	28
8	<i>Základní technické údaje uvažovaného úseku stávajícího vedení</i>	29
9	<i>Ochranná pásma dle zákona č. 458/2000 Sb.</i>	29
10	<i>Přípustné hodnoty modifikované indukované proudové hustoty v lidském těle</i>	30
11	<i>Konfigurace fázových vodičů</i>	31
12	<i>Výsledky primárních a sekundárních parametrů úseku stávajícího vedení</i>	31
13	<i>Minimální vzdálenosti od země a křížovaných objektů (ČSN 34 1100/64)</i>	47
14	<i>Vstupní údaje pro výpočet stavové rovnice</i>	49
15	<i>Vypočítané hodnoty mechanického namáhání pro zadané klimatické podmínky</i>	49
16	<i>Montážní tabulka pro střední rozpětí kotevního pole</i>	50
17	<i>Průhyby v jednotlivých rozpětích kotevního úseku (rozpětí č. 1 až 7)</i>	50
18	<i>Průhyby v jednotlivých rozpětích kotevního úseku (rozpětí č. 8 až 13)</i>	51
19	<i>Vyhodnocení nesymetrických stavů v polích křížovatek</i>	51
20	<i>Vlastnosti používaných hliníkových drátů</i>	55
21	<i>Vlastnosti používaných materiálů duše lana</i>	56
22	<i>Závislost teploty vodiče ACCC na procházejícím proudu (trojsvazek)</i>	62
23	<i>Výsledky primárních a sekundárních parametrů úseku rekonstruovaného vedení</i>	62

Seznam použitých zkratek

<i>AAAC</i>	All Aluminium Alloy Conductor
<i>AAC</i>	All Aluminium Conductor
<i>AACSR</i>	Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced
<i>ACAR</i>	Aluminium Conductor Alloy Reinforced
<i>ACCC</i>	Aluminum Conductor Composite Core
<i>ACCR</i>	Aluminum Conductor Composite Reinforced
<i>ACS</i>	Aluminium Clad Steel
<i>ACSR</i>	Aluminium Conductor Steel Reinforced
<i>ACSS</i>	Aluminium Conductor Steel Supported
<i>ADSS</i>	All Dielectric Self-Supporting
<i>AE</i>	Air Expanded
<i>AW</i>	Aluminum Clad Wire
<i>CCP</i>	Conductor Comparison Program
<i>CTC</i>	Composite Technology Corporation
<i>DN</i>	Dvojitý nosný izolátorový závěs
<i>EHS</i>	Extra High-Strength Steel
<i>FACTS</i>	Flexible AC Transmission System
<i>GA</i>	Gap Type Conductor
<i>HS</i>	High-Strength Steel
<i>IACS</i>	International Annealed Copper Standard
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>KTAL</i>	High-Strength Thermal Resistant Aluminium
<i>NESC</i>	National Electrical Safety Code
<i>nn</i>	Nízké napětí
<i>NNA</i>	Národní normativní aspekty
<i>NPV</i>	Net Present Value
<i>OPGW</i>	Optical Ground Wire
<i>PJM</i>	Pennsylvania-New Jersey-Maryland Transmission Organization
<i>PK</i>	Polokotevní izolátorový závěs
<i>SD</i>	Self Damping
<i>TACIR</i>	TAL Aluminium Conductor Invar-Steel Reinforced
<i>TACSR</i>	TAL Aluminium Conductor Steel Reinforced
<i>TAL</i>	Thermal Resistant Aluminium
<i>(TW)</i>	Trapezoidal Wire
<i>vn</i>	Vysoké napětí
<i>vvn</i>	Velmi vysoké napětí
<i>(Z)</i>	Z-Formed Wire
<i>ZTACIR</i>	ZTAL Aluminium Conductor Invar-Steel Reinforced
<i>ZTACSR</i>	ZTAL Aluminium Conductor Steel Reinforced
<i>ZTAL</i>	Super Thermal Resistant Aluminum Alloy
<i>zvn</i>	Zvláště vysoké napětí

1. Úvod

Očekává se, že v blízké budoucnosti budou země s poměrně rozsáhlou elektrickou infrastrukturou konfrontovány prakticky třemi závažnými problémy. Za prvé, majorita této infrastruktury byla postavena v 50. - 60. letech minulého století, což vede k vysokému stáří daných zařízení a to přibližně padesát i více let. Za druhé, projektovaná životnost převážné většiny infrastruktury v mnoha případech již dospěla za hranici své provozuschopnosti anebo ekonomické únosnosti a vyžaduje určitou formu prodloužení životnosti. Za třetí, potřeba zvyšování kapacity existující infrastruktury naléhá na mimořádné požadavky týkající se vytváření strategií, které směřují k tomuto zvyšování hlavně z toho důvodu, že schvalování výstavby nových linek je v současné době velice obtížné.

Přenosové linky spadají do části kritických elementů elektrické infrastruktury, které právě vyžadují tzv. uprating, upgrading, refurbishment, popřípadě další možnosti týkající se zvýšení jejich funkcionality jako je např. aplikace optických vláken (OPGW/ADSS). [1]

Uprating - navýšení elektrických parametrů a vlastností linky kvůli např. požadavku pro zvýšení její elektrické kapacity, ať už napěťové nebo proudové.

Upgrading - navýšení původní mechanické pevnosti linky kvůli např. požadavku pro zvýšení odolnosti vůči meteorologickým podmínkám jako je zatížení větrem, námrazkem i jejich kombinace. Mimo jiné se zabývá i elektrickými parametry podobně jako v případě upratingu.

Refurbishment - rozsáhlá renovace nebo oprava části linky, která vede k obnovení jejího původního návrhu životnosti a provozuschopnosti. Další možností refurbishmentu je i pouhé prodloužení životnosti linky, které ale samozřejmě neřeší její úplné zotavení a navrácení do původních navržených parametrů.

1.1. Uprating, Upgrading, Refurbishment

Možnosti upratingu přenosových linek

Přenosové linky jsou teoreticky modelovány jako dlouhá vedení (>100 km) a s vyšší napěťovou úrovní (>100 kV). Všeobecně propojují mezi sebou systémy výroby elektrické energie s její lokální distribucí. Jsou ovlivněny jednak termální (proudovou) kapacitou vodičů a potřebou zajistit, že bezpečné vzdálenosti pro zadané elektrické parametry nebudou porušeny, jednak také regulací napětí a potřebou zajistit, že napětí na konci linky je v rozmezí definovaných tolerancí. Z uvedeného vyplývá, že uprating přenosových linek se zabývá buďto zvyšováním napěťové kapacity nebo zvyšováním termální kapacity. Samozřejmě v některých případech není vyloučena možnost simultánně zvýšit napěťovou a termální kapacitu zároveň pro daný návrh přenosové linky.

V této práci se budeme podrobně zabývat zvyšováním systémové kapacity pomocí navýšení ratingu vodičů, a to především metodou výměny klasických AlFe vodičů za vodiče s kompozitním systémem tzv. ACCC (Aluminium Conductor Composite Core). Seznam nejpoužívanějších mechanismů upratingu, ať už napěťového či termálního, lze nalézt v tabulce uvedené níže (viz tab. 1). Bezesporu existuje i řada jiných metod, které mohou být použity pro zvýšení přenosové systémové kapacity, jedná se například o výkonová zařízení typu FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Avšak my se v rámci našeho tématu omezíme pouze na možnosti, které nabízí uprating.

Uprating mechanismy	Metody	Nástroje
Zvýšení termální kapacity	Výměna vodičů	kompaktní/vysokoteplotní vodiče vodiče s kompozitním systémem
	Zvýšení teploty	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče změna mechanického tahu ve vodiči
	Speciální metoda	statistické metody metody reálného času
Zvýšení napěťové kapacity	Izolace	výměna izolátorů/přídavné izolátory modifikace uchycení
	Vzdálenost vůči zemi	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče změna mechanického tahu ve vodiči
	Mezifázová vzdálenost	změna dvojitého vedení na jednoduché nová hlava stožáru

Tab. 1 – Uprating mechanismy přenosové linky

Možnosti upgradingu přenosových linek

Hlavním důvodem upgradingu jsou stále zvyšující se požadavky na strukturální a elektrickou dostupnost linek. Všeobecně se zabývá celou přenosovou linkou nebo její větší částí a také často vzájemně souvisí s upratingem. Upgrading konstrukcí a základů přenosových linek záleží na technických a praktických omezeních jako je dostupnost vybavení a materiálů použitých u původního konstrukčního řešení a ve své podstatě celková proveditelnost implementace upgradingu jako takového.

Kromě výše zmíněných konstrukčních záležitostí se upgrading zabývá i elektrickými parametry. V zásadě se jedná o vylepšení týkajících se provedení např. pro snížení možnosti zpětného přeskočení při úderu blesku do zemnicího lana či stožáru. Ten záleží na typu stožáru, jeho způsobu uzemnění a rezistivitě půdy. Dále se upgrading vztahuje na provedení vedoucí k omezení faktoru znečištění izolátorů, koróny na vedení, úrovní elektrického a magnetického pole, opatření proti televiznímu a radiovému rušení a redukci indukovaných napětí a proudů na dlouhých paralelních metalických infrastrukturách jako jsou např. přílehlá potrubí a telekomunikační vedení.

Možnosti refurbishmentu přenosových linek

Možnosti refurbishmentu zahrnují intervence do klíčových komponent přenosové linky jmenovitě do jejich konstrukcí, základů, izolátorových řetězců, vodičů a způsobu uzemnění. Jednotlivé komponenty linek jsou vystaveny nepříznivým podmínkám prostředí, ve kterém se nacházejí. Působí na ně znečištění, vítr a koroze, které pak ovlivňují a postupně mění jejich vlastnosti. Mimo vlivy prostředí je třeba spatřit příčiny i v nesprávné výrobě nebo montáži, případně i vandalismu, které následně mohou také přispět k pozvolnému zhoršení stavu dílčích komponent.

Proces refurbishmentu začíná porozuměním problému a jeho příčinám. To v sobě zahrnuje hodnocení stavu komponent, jeho příčin a vypracováním několika možností plánovaného

refurbishmentu. Následuje jejich ekonomické posouzení a zdůvodnění. Nakonec zbývá než vybrat to řešení, které bude nejvhodnější pro konkrétní implementaci.

Obvykle může být vyžadováno i další důkladnější hodnocení z důvodu ověření aktuální kondice daných komponent. Je nezbytné například určit stav koroze galvanizovaného povrchu a zbývající tloušťku kovu, abychom se ubezpečili, že je zachována strukturální integrita mřížových ocelových stožárů.

Rozšíření funkcionality přenosových linek

Lokace přenosových linek může navíc poskytovat příležitosti pro instalaci zařízení třetí strany, čímž generuje dodatečný příjem pro jejich majitele. V jistých případech je použití konstrukcí přenosových linek jediným způsobem jak zavést telekomunikační vybavení (antény) nebo linky s optickými vlákny kvůli absenci povolení od vlastníků jednotlivých pozemků, kde byly záměry tato zařízení instalovat. Je to také nejlepší způsob, jak snížit výdaje a předejít environmentálním restrikcím.

Nicméně je nezbytné před samotnou instalací těchto zařízení třetí strany důkladně zvážit jednak nosnost konstrukcí a základů přenosových linek, jednak i možnou kompromitaci jejich elektrických vlastností a v neposlední řadě i omezené pracovní praktiky.

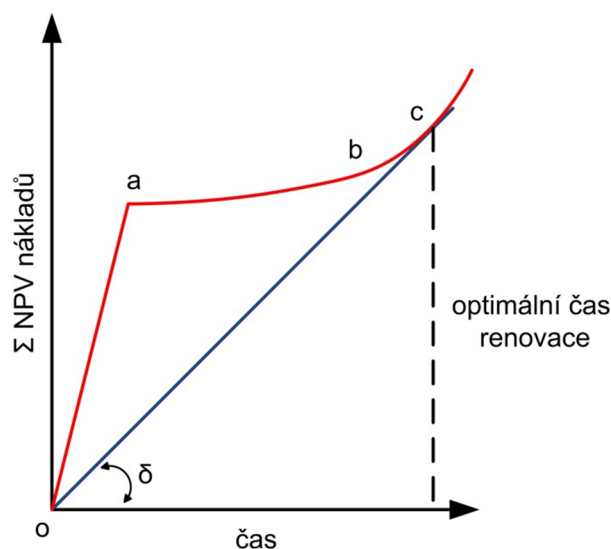
1.2. Obecné ekonomicko-technické zhodnocení

Abychom mohli zvýšit využití stávajících přenosových linek, musíme zvážit velký počet ekonomických a technických faktorů. Některé z těchto faktorů jsou ovlivněny základní potřebou zvyšování kapacity systému. Především by se ale rozhodnutí týkající se využití existujících linek mělo zakládat na těchto podkladech jako je předpokládaná životnost zařízení, prognóza růstu zatížení, plánovací horizont, hodnota kapitálu, analýza nákladů a výnosů, ekonomická optimalizace a nakonec i vzít v úvahu další projektová omezení. Základním objektivem pro majitele či provozovatele přenosových zařízení je neustále posuzovat kapacitu elektrické sítě, aby byli schopni určit nejekonomičtější a technicky proveditelné opatření týkající se provozu a vývoje sítě. Všechna tato rozhodnutí je potřeba provést za účelem uspokojení, jak zvyšující se poptávky elektřiny, tak i spolehlivosti elektrické dodávky daným spotřebitelům.

Obvykle se konec technické životnosti a provozuschopnosti objeví, když linky nevyhoví při výkonu standardních provozních požadavků a už dále nejsou způsobilé pro původní účely.

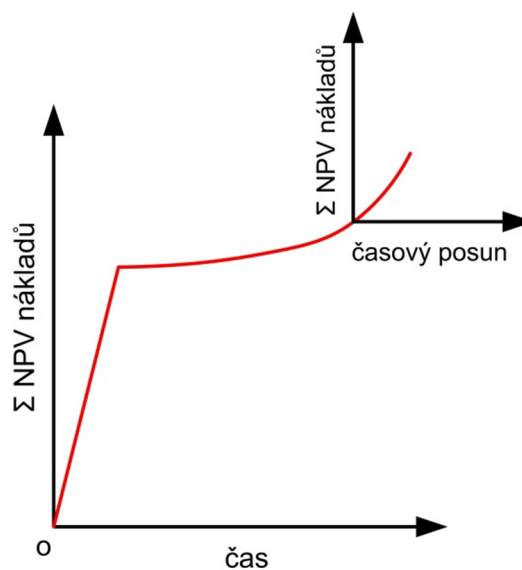
Nicméně by se měl brát v úvahu i konec ekonomické životnosti. Zvažme tedy souhrnnou čistou současnou hodnotu (NPV) nákladů aktiv přenosové linky včetně odpisů, údržby, ztrát a nákladů na řízení rizik za roky provozu (viz obr. 1). Souhrnná NPV nákladů představuje počáteční kapitálové výdaje (o až a), následuje NPV dlouhodobých provozních nákladů (a až b), která získá mezi body (b až c) pomalu rostoucí charakter v důsledku toho, že se již přesouváme nejen do počáteční fáze degradace daného aktiva, ale také do oblasti zvýšené aktivity údržby. Za bodem (c) se již nacházíme v oblasti stále vyšších a vyšších variabilních provozních nákladů na údržbu. [1]

Optimální čas pro obnovu aktiva a zároveň konec jeho ekonomické životnosti nastává, když suma NPV nákladů je rovna minimu dlouhodobých provozních marginálních nákladů, kde dané minimum představuje tangenta úhlu delta - klasicky značena symbolem δ .



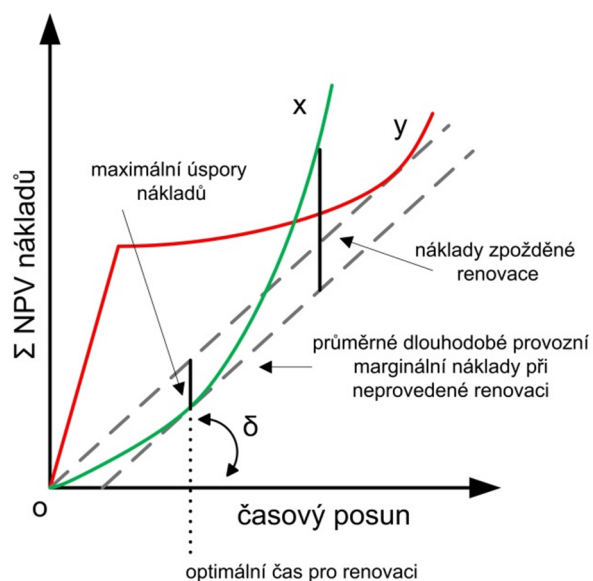
Obr. 1 – Ekonomický model přenosové linky

Ve většině případů společnosti nemají k dispozici podrobnou historii financování těchto aktiv. Proto se častěji používá realističtější finanční model, který má časově posunuté osy. Tím se respektuje absence informací zahrnující počáteční procesy s aktivy (obr. 2).



Obr. 2 – Aktualizovaný ekonomický model přenosové linky

Nyní zvažme projekt renovace linek s pevně daným rozpočtem a plánovacím horizontem. Stejně jako předtím zde budou určité kapitálové náklady s následnými dlouhodobými provozními náklady. Tento případ je ilustrován na (obr. 3), kde nákladová křivka x reprezentuje rozhodnutí pro neprovedení včasné renovace a jejím opakem je nákladová křivka y představující právě její renovaci a s ní související další financování. Jsou zde také zobrazeny dlouhodobé provozní marginální náklady daného projektu společně s minimem δ a optimální čas, kdy by se měla provést očekávaná rekonstrukce. Je zcela evidentní, že pokud se pohybujeme za bodem optima, tak výsledkem jsou postupně snižující se potenciální úspory, naopak pokud se nacházíme před ním, tak samozřejmě hrozí riziko, že potenciální maximální úspory nebudou nikdy dosaženy. [1]



Obr. 3 – Ekonomický model projektu renovace linky

Návratnost investic kapitálu pro dlouhodobý plánovací horizont projektu renovace linek značně závisí na správném vyhodnocení časově proměnné hodnoty kapitálu, na jeho průběhu NPV, dále na úrokových výnosech a optimálním času, kdy je vhodné podstoupit projekt renovace daného zařízení.

2. Elektrické parametry venkovních vedení

Pro studium jevů v elektrických a magnetických obvodech je jednou ze základních úloh výpočet parametrů. Ty jsou dále podkladem pro stanovení matematických modelů jednotlivých prvků. K popisu přenosových vedení se využívají tzv. primární a sekundární parametry. První z nich, primární parametry, jsou přehledně uvedeny v tabulce níže (viz tab. 2).

Parametr	Značka	Jednotka
Rezistance	R	Ω/km
Indukčnost	L	H/km
Kapacita	C	F/km
Svod	G	S/km

Tab. 2 – Primární parametry vedení

Tyto parametry se zpravidla vztahují na určitou jednotku délky vedení, což pak ve svém důsledku zjednodušuje jeho následný výpočet. Navíc jsou také závislé na kmitočtu, a proto by mělo být uvedeno, pro jaký kmitočet dané hodnoty platí. Při řešení soustav pak můžeme na základě znalosti primárních parametrů odvodit tzv. sekundární parametry (tab. 3).

Parametr	Značka	Jednotka
Reaktance	X	Ω/km
Susceptance	B	S/km
Podélná impedance	Z_l	Ω/km
Příčná admitance	Y_q	S/km
Vlnová impedance	Z_v	Ω
Činitel přenosu	γ	1/km

Tab. 3 – Sekundární parametry vedení

2.1. Podélná impedance vedení

Rezistance R a indukční reaktance $X = \omega L$ vytvářejí podélnou impedanci vedení:

$$Z_l = R + j\omega L = R + jX = Z_l e^{j\varphi} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.1)$$

kde

$$Z_l = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \tan \varphi = \frac{X}{R}; \quad \varphi \in \langle 0, \frac{\pi}{2} \rangle \quad (2.2)$$

Podélná impedance pak může být vlastní, vzájemná nebo provozní podle toho, kterou rezistancí a k ní příslušnou reaktancí budeme uvažovat. [2]

2.1.1 Rezistance venkovních vedení

Rezistance neboli také činný odpor je reálnou složkou podélné impedance. Způsobuje ztráty činného výkonu a vzniká na ní úbytek napětí. Je závislá na několika faktorech, které si v dalším textu blíže specifikujeme. Jedná se především o materiálové vlastnosti vodiče, teplotu, skin efekt, kroucení dílčích vodičů lan, odchylku od skutečného průřezu, průhyb a také spojky.

Při průchodu ustáleného stejnosměrného proudu platí pro odpor vodičů o průřezu S a rezistivitě ρ_0 při zadané konstantní teplotě T_0 na jednotku délky vztah:

$$R_{SS0} = \frac{\rho_0}{S} \quad (\Omega \cdot m^{-1}) \quad (2.3)$$

Vedle rezistivity se obvykle používá i konduktivita γ_0 , jež představuje její převrácenou hodnotu. Pro stanovení rezistance při provozu je nutné vzít v úvahu následující činitele [2]:

- **Materiálové vlastnosti**

Materiál a jeho čistotu respektujeme rezistivitou, předepsanou normou pro teplotu T_0 (20 °C). Pro feromagnetické materiály (např. lana AlFe), kde rezistance je víceméně funkcí proudu, je tato závislost na proudu zjišťována experimentálně.

- **Teplota**

Vliv teploty popisujeme pomocí teplotních činitelů odporu α a β při uvažované teplotě T pomocí korekčního činitele:

$$k_T = 1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 \quad (-) \quad (2.4)$$

Hodnoty teplotních činitelů odporu α a β jsou prezentovány v tabulce níže (tab. 4). Člen β se při malých ΔT běžně zanedbává. Je zde také uvedena rezistivita při teplotě 20 °C a v případě vodičů Fe se váže na proudovou hustotu 1 A.m⁻².

		Cu	Al, AlFe	Fe
α	(K ⁻¹)	3,93.10 ⁻³	4.10 ⁻³	4,5.10 ⁻³
β	(K ⁻²)	0,45.10 ⁻⁶	1,1.10 ⁻⁶	9.10 ⁻⁶
ρ_{20}	(μΩ.m)	17,8.10 ⁻³	28,7.10 ⁻³	200.10 ⁻³

Tab. 4 – Teplotní činitele odporu a rezistivita vodičů

- **Skin efekt**

Skin efekt je povrchový jev, při kterém dochází k nerovnoměrnému rozložení střídavého proudu po průřezu vodiče. Důsledkem tohoto jevu je zvětšení rezistance v porovnání s odporem pro stejnosměrný proud. Vyjadřuje se zavedením korekčního činitele zvětšení rezistance k_S , který se dá vyjádřit pomocí Besselových funkcí, použijeme-li pomocný koeficient m definovaný jako:

$$m = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\mu\omega}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\mu f}{2R_{SS0}}} \quad (-) \quad (2.5)$$

kde μ je permeabilita použitého materiálu,
 ω úhlová frekvence,
 ρ_0 rezistivita při teplotě T_0 ,
 f frekvence,
 r poloměr vodiče,
 R_{SS0} stejnosměrný odpor na jednotku délky.

S využitím znalosti koeficientu m lze pro činitel k_S dále psát zjednodušené vztahy, kde pro vodič kruhového průřezu z jednoho materiálu Al nebo Cu platí:

$$k_S = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{1442} \quad \text{pro } m \leq 1,2 \quad (-) \quad (2.6)$$

$$k_S = 0,25 + 0,708m + 0,06625m^{-1} \quad \text{pro } m > 1,2 \quad (-) \quad (2.7)$$

U vodičů z feromagnetického materiálu Fe je relativní permeabilita funkcí proudu a z toho důvodu pro výpočet činitele k_S se zde využívá následujících tvarů:

$$k_S = 1 + 0,85m^2 - 0,3m^3 + 0,05m^4 \quad \text{pro } m \leq 2 \quad (-) \quad (2.8)$$

$$k_S = 1,4m \quad \text{pro } m > 2 \quad (-) \quad (2.9)$$

AlFe lana mají svým způsobem velmi specifické postavení. Např. při jedné vrstvě vodičů Al na jádru z Fe je činitel k_S značně veliký. Naproti tomu již při dvou vrstvách Al lze aplikovat vzorec pro lana z jednoho materiálu. Obecně se dá ale říci, že při větším počtu vrstev Al než jedna je možno použít vzorce pro dutá lana, protože vnitřním ocelovým jádrem prochází přibližně 2 až 3 % celkového proudu. Platí:

$$k_S = 1 + 0,0375 \times 10^{-12} \left[\frac{(r_2 - r_1)f}{r_2 R_{SS0}} \right]^2 \quad (-) \quad (2.10)$$

kde r_1, r_2 je vnitřní a vnější poloměr Al vrstvy,
 f frekvence,
 R_{SS0} stejnosměrný odpor na jednotku délky.

- **Kroucení lan**

Kroucení lan neboli tzv. slanění způsobuje zvětšení rezistance oproti plnému vodiči stejné osové délky. Jednotlivé vodiče lana mají mezi sebou přechodový odpor vytvořený díky existenci nečistot, což má za následek rozdělení proudu po těchto dílčích vodičích a tím vymezení jeho průchodu po tzv. šroubovici. Činitel zvětšení rezistance kroucením drátů v lanech k_L je dán poměrem délky závitu šroubovice k její výšce a_n měřené v ose vodiče a je vyjádřen vztahem:

$$k_L = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \pi^2}}{a_n} \quad (-) \quad (2.11)$$

- **Odchylka skutečného průřezu**

Normy udávají jmenovité průřezy, což jsou ve skutečnosti zaokrouhlené hodnoty průřezů reálných. Nedoporučuje se proto výpočet s použitím průřezu jmenovitého namísto reálného.

- **Průhyb zavěšeného vodiče**

Průhyb zavěšeného vodiče způsobuje zvětšení jeho délky oproti topografické délce vedení. Tento nárůst pak popisujeme pomocí vztahu pro délku řetězovky:

$$l_h = 2c \sinh \frac{d}{2c} \quad (m) \quad (2.12)$$

kde c je parametr řetězovky,
 d vzdálenost dvou závěsných, stejně vysokých bodů.

Činitel zvětšení rezistance průhybem k_P je na základě znalosti délky řetězovky l_h a vzdálenosti závěsných bodů d určen poměrem:

$$k_P = \frac{l_h}{d} \quad (-) \quad (2.13)$$

Další charakteristické faktory jako je nerovnoměrnost průřezu vodiče a jejich spojky nelze matematicky spolehlivě zhodnotit, a proto je zanedbáme. Výslednou rezistanci venkovních vedení je pak možno vypočítat podle konečného vztahu:

$$R_1 = R_{SS0} k_T k_S k_L k_P \quad (\Omega) \quad (2.14)$$

Nicméně běžně se respektuje jen vliv teploty a povrchového jevu.

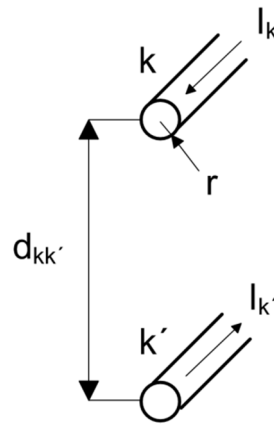
2.1.2 Indukčnost

Střídavé proudy procházející přes vodiče způsobují vznik časově proměnného magnetického pole v okolí těchto vodičů, jehož následkem jsou v nich indukovaná napětí. Tento zpětný vliv magnetických polí vystihujeme pomocí indukčnosti vedení. Při jejím výpočtu je důležité si vytvořit matematický model, kde soustavu skutečných vodičů, které jsou rovnoběžné jak s povrchem ideální země, tak i mezi sebou, doplníme soustavou fiktivních vodičů, rovnoběžných s těmito skutečnými vodiči. Tímto dostaneme uspořádání dvojic vodičů respektujících existenci jak povrchu země, tak i země samotné.

V dalších bodech si odvodíme vztahy pro vlastní a vzájemné indukčnosti na základě vyšetření dvou případových studií - smyčka vodič-vodič a smyčka vodič-zem, odkud získáme první zmíněnou, vlastní indukčnost resp. impedanci. Ta nám v dalším kroku zároveň poslouží ke stanovení vzájemné indukčnosti resp. impedance dvouvodičového vedení. Znalost těchto indukčností resp. impedancí jsou podkladem pro důležitý vztah k hodnocení elektrických vlastností vedení, a to indukčnosti a impedance provozní, použitelnou v případě souměrného systému navíc symetricky zatíženého. V případech, kdy nelze zaručit geometrickou souměrnost je zapotřebí danou soustavu vodičů symetrizovat a zajistit tak stejnost provozních indukčností resp. impedancí po celé délce transponovaného cyklu.

I. Vlastní indukčnost a impedance ve smyčce vodič-vodič

Při výpočtu indukčnosti uvažujeme dva rovnoběžné vodiče kruhového průřezu o poloměru r a stejných materiálových vlastností (obr. 4). Dále se předpokládají poměry na jednotku délky uvnitř smyčky ve značné vzdálenosti od konců obou vodičů. Na základě toho můžeme s využitím statické definice indukčnosti stanovit vnitřní a vnější indukčnost vodiče. [2]



Obr. 4 – Smyčka vodič-vodič

Vnitřní indukčnost, respektující magnetický tok na jednotku délky uvnitř vodiče, je podle odvození v teorii elektromagnetického pole na jednotku délky:

$$L_{ik} = \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8\pi} \alpha \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.15)$$

kde μ_{rv} je poměrná permeabilita materiálu vodiče,
 α činitel respektující skinefekt.

Vnější indukčnost na jednotku délky respektuje magnetický tok vně vodiče:

$$L_{ek} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.16)$$

kde μ_r je poměrná permeabilita vzduchu obklopující vodič,
 R poloměr s nespécifikovanou hodnotou.

Části magnetického toku druhého vodiče k' , která je v záběru s námi uvažovaným vodičem k ve vzdálenosti d , odpovídá indukčnost:

$$L_{kk'} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{R}{d} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.17)$$

Spojením vnější a vnitřní indukčnosti a s respektováním části magnetického toku druhého vodiče, dostaneme vlastní indukčnost jednoho vodiče smyčky L_{kv} na jednotku délky:

$$L_{kv} = \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8\pi} \alpha + \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{R}{r} - \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \frac{R}{d} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.18)$$

Po dosazení za $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, úpravách a zavedením dekadických logaritmů za přirozené dostáváme zjednodušený vztah:

$$L_{kv} = 0,46 \log \frac{d}{r} + 0,05 \mu_{rv} \alpha \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.19)$$

Vyjádříme-li dále:

$$\xi = 10^{-\frac{0,05 \mu_{rv} \alpha}{0,46}} \quad (-) \quad (2.20)$$

Pak bude platit:

$$L_{kv} = 0,46 \log \frac{d}{\xi r} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.21)$$

kde ξ je činitel nerovnoměrnosti rozložení proudové hustoty po průřezu a permeability vodiče.

Vlastní impedance jednoho vodiče ve smyčce dvou rovnoběžných vodičů na jednotku délky je po dosazení vztahů (2.14) a (2.21) za reálnou resp. imaginární složku impedance [2]:

$$\mathbf{Z}_{kv} = R_{1k} + j\omega L_{kv} = R_{1k} + j\omega \cdot 0,46 \log \frac{d}{\xi r} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.22)$$

kde R_{1k} je rezistance vodiče na jednotku délky.

II. Vlastní indukčnost a impedance ve smyčce vodič-zem

Vlastní impedanci vodič-zem lze rozložit na tři složky [2]:

- R_{1k} - rezistance respektující ztráty výkonu ve vodiči,
- X_{1k} - reaktance respektující složku magnetického toku spřaženého s vodičem, jenž se uzavírá ve vodiči a ve vzduchu,
- \mathbf{Z}_{1g} - impedance respektující složku magnetického toku v zemi v záběru s vodičem.

Pro vyšetření reaktance X_{1k} rozčleníme magnetický tok na část uvnitř a na část vně vodiče až po půlválec o poloměru h , který pak představuje povrch země. S využitím znalosti L_{ik} a L_{ek} určíme reaktanci X_{1k} jako:

$$X_{1k} = \omega(L_{ik} + L_{ek}) \rightarrow X_{1k} = \omega \cdot 0,46 \left(\log \frac{1}{\xi} + \log \frac{h}{r} \right) \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.23)$$

Impedance \mathbf{Z}_{1g} vztažená na jednotku délky má reálnou složku reprezentovanou rezistancí země danou vztahem:

$$R_{1g} = \pi^2 f \cdot 10^{-4} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.24)$$

Je patrné, že rezistance země je závislá jen na frekvenci a to lineárně. Nezávisí ani na výšce vodiče nad zemí, ani na rezistivitě zeminy.

Její imaginární složka vystihuje magnetický tok v zemi. Na rozdíl od reálné složky je ale zcela závislá na rezistivitě zeminy, výšce vodiče nad zemí a frekvenci:

$$X_{1g} = \omega \cdot 0,46 \log \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{h \sqrt{f}} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.25)$$

Podle předcházejícího rozboru lze pro vlastní impedanci jednoho vodiče ve smyčce k -tý vodič-zem psát vztah:

$$\mathbf{Z}_{kk} = R_{1k} + jX_{1k} + \mathbf{Z}_{1g} \quad (\Omega \cdot \text{km}^{-1}) \quad (2.26)$$

Po dosazení z rovnic pro (2.23), (2.24) a (2.25) dostaneme po formálních úpravách výsledný tvar pro vlastní impedanci jednoho vodiče ve smyčce vodič-zem na jednotku délky:

$$\mathbf{Z}_{kk} = R_{1k} + R_{1g} + j\omega \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{\xi r} = R_{kk} + j\omega L_{kk} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.27)$$

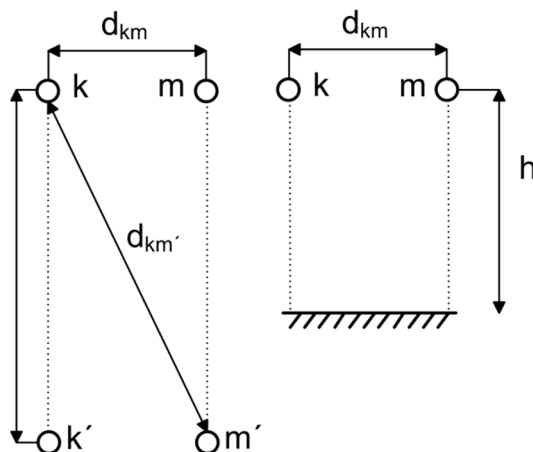
kde D_g je hloubka fiktivního vodiče v zemi, pro niž zavedeme platný vztah:

$$D_g = \frac{0,178 \sqrt{\rho \cdot 10^7}}{\sqrt{f}} \quad (m) \quad (2.28)$$

Tímto pomyslným „fiktivním“ vodičem se demonstrují magnetické účinky proudu procházejícího zemí. Prakticky na základě této úvahy se nahrazuje smyčka vodič-zem smyčkou dvou stejných vodičů ve vzdálenosti danou hodnotou D_g - jeden vodič je tedy skutečný a druhý, který nahrazuje účinek země vedoucí proud, je fiktivní.

III. Vzájemná indukčnost a impedance dvou smyček vodič-zem

Dvouvodičové jednofázové vedení lze s ohledem na magnetické pole jím vyvolané považovat za rovnocenné dvěma vedením vodič-zem, protože lze přijmout, že zpětné proudy v zemi se navzájem kompenzují a nedávají výsledně žádný účinek. Tvrzení platí jen tehdy, jeli vzdálenost mezi skutečnými vodiči k a m menší nebo rovna jejich výšce nad zemí.



Obr. 5 – Dvě smyčky vodič-zem

Tato záměna dvouvodičového jednofázového vedení dvou vodičů nad zemí za dvě smyčky vodič-zem umožňuje určit výslednou impedanci jednoho vodiče \mathbf{Z}_{kv} jako součet vlastní impedance jedné smyčky vodič-zem \mathbf{Z}_{kk} a vzájemné impedance \mathbf{Z}_{km} od druhé smyčky např. $m-m'$. Přihlédneme-li pak, že proudy uvažovaného a indukujícího vedení jsou stejné co do velikosti, ale opačné polarity, platí následující [2]:

$$\mathbf{Z}_{kv} = \mathbf{Z}_{kk} - \mathbf{Z}_{km} \rightarrow \mathbf{Z}_{km} = \mathbf{Z}_{kk} - \mathbf{Z}_{kv} \quad (\Omega) \quad (2.29)$$

Dosadíme-li do této rovnice výše probrané vztahy (2.22), (2.27) a zaměníme-li d za d_{km} , dostaneme po úpravě pro vzájemnou impedanci \mathbf{Z}_{km} na jednotku délky:

$$\mathbf{Z}_{km} = R_{1g} + j\omega \cdot 0,46 \log \frac{D_g}{d_{km}} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.30)$$

Tímto jsme si odvodili důležité vztahy pro vlastní resp. vzájemné impedance Z_{kk} a Z_{km} , s kterými budeme dále pracovat při dalších výpočtech parametrů elektrického vedení.

IV. Provozní indukčnost a impedance

Předešlé úvahy potom můžeme rozšířit na soustavu n skutečných vodičů-zem, jenž jsou nejen navzájem, ale i s rovinou země rovnoběžné. Příslušným matematickým modelem bude soustava n dvojic vodičů, z nichž jeden je skutečný, druhý fiktivní. Vlastní impedance (smyčka $k-k'$) i vzájemné impedance (mezi smyčkami $k-k'$ a $m-m'$) pro frekvenci 50 Hz vyjádříme jako [2]:

$$Z_{kk} = R_{kk} + j\omega L_{kk} = R_{1k} + R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{\xi r_k} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.31)$$

$$Z_{km} = Z_{mk} = R_{km} + j\omega L_{km} = R_{1g} + j0,1445 \log \frac{D_g}{d_{km}} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.32)$$

Výsledné působení proudů všech smyček na uvažovaný vodič k vyvolá úbytek napětí ΔU_k v k -tém vodiči na 1 km délky v důsledku magnetických účinků proudů ve všech vodičích:

$$\Delta U_k = \sum_{m=1}^n Z_{km} I_m = Z_k I_k \quad (V \cdot km^{-1}) \quad (2.33)$$

kde $k, m \in N \dots\dots\dots N$ je množina přirozených čísel od 1 do n .

Z předchozího vztahu plyne definice provozní impedance Z_k (na 1 km) k -tého vodiče. Ta se využívá, jak již bylo v úvodu této kapitoly zmíněno, u symetrických nebo symetrizovaných vedení:

$$Z_k = \frac{\sum_{m=1}^n Z_{km} I_m}{I_k} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.34)$$

Zvláštní postavení zaujímá její imaginární člen L_k , což je ve skutečnosti provozní indukčnost. Je určena impedancí jedné smyčky, která by měla týž účinek jako výsledně všechny smyčky na vodič námi uvažované smyčky. [2]

V. Indukčnost trojfázového vedení a jeho symetrizace

Uvažujeme trojfázové vedení bez zemnicích lan s vodiči v obecné poloze navzájem rovnoběžnými mezi sebou, ale i s povrchem země (obr. 6). Dále předpokládáme, že dané vodiče mají stejný poloměr a jsou zatíženy symetrickou zátěží. Pak provozní impedance jednotlivých fází (a, b, c) můžeme vyjádřit podle definičního vztahu (2.34):

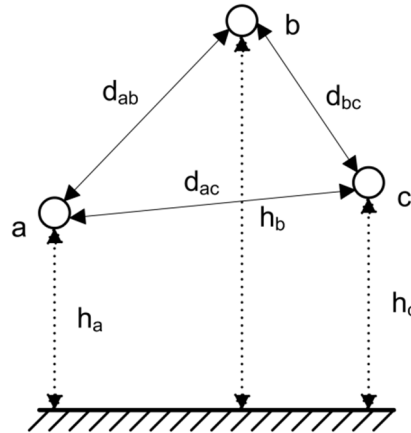
$$Z_a = \frac{(Z_{aa} I_a + Z_{ab} I_b + Z_{ac} I_c)}{I_a} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.35)$$

$$Z_b = \frac{(Z_{ba} I_a + Z_{bb} I_b + Z_{bc} I_c)}{I_b} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.36)$$

$$Z_c = \frac{(Z_{ca} I_a + Z_{cb} I_b + Z_{cc} I_c)}{I_c} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.37)$$

Jejich následné vyčíslení by ukázalo, že tyto provozní impedance mají různé jak reálné, tak i imaginární části. Tato nerovnoměrnost provozních impedancí způsobí nesymetrii napětí v jinak symetricky zatížené soustavě. Teprve bude-li spolu se symetrickým zatížením platit ještě geometrická souměrnost poloh vodičů, pak budou provozní impedance všech fází stejné, tudíž:

$$d_{ab} = d_{ac} = d_{bc} = d \quad (m) \quad (2.38)$$



Obr. 6 – Obecné uspořádání vodičů 3-fázového vedení

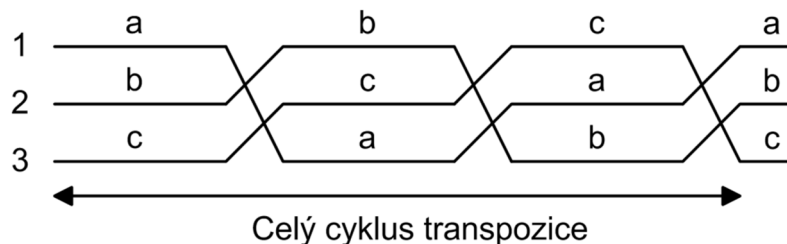
Po aplikaci podmínky (2.38) do vztahů (2.35), (2.36) a (2.37), dostáváme pro vedení, které je jak z hlediska geometrického uspořádání, tak i proudů zcela souměrné, vztah [2]:

$$\mathbf{Z}_a = \mathbf{Z}_b = \mathbf{Z}_c = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}' = \mathbf{Z}_1 = R_1 + j0,1445 \log \frac{d}{\xi r} = R_1 + jX_1 \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.39)$$

- kde \mathbf{Z}_1 je provozní impedance zcela souměrného vedení,
 R_1 rezistance vodiče na 1 km délky,
 X_1 provozní reaktance na 1 km délky,
 \mathbf{Z} vlastní impedance $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{kk} = \mathbf{Z}_{aa} = \mathbf{Z}_{bb} = \mathbf{Z}_{cc}$,
 \mathbf{Z}' vzájemná impedance $\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}_{km} = \mathbf{Z}_{ab} = \mathbf{Z}_{ac} = \mathbf{Z}_{bc}$.

Z rovnice pro provozní impedanci \mathbf{Z}_1 je patrné, že zemí výsledně neprochází žádný proud, neboť neobsahuje rezistanci země R_{lg} .

V praxi je nemožné dosáhnout geometrické souměrnosti podle vztahu (2.38). Výsledné symetrie se dosahuje jiným způsobem, a to především transpozicí vodičů vedení. Transpozice se provádí výměnou poloh vodičů, kdy po celém cyklu transpozice se dostane každý vodič do své původní polohy (obr. 7).



Obr. 7 – Transpozice vedení

Vyjmeme-li z každého transpozičního úseku délku 1/3 km, bude pro úbytky napětí na 1 km délky platit:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \left\{ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{13} & Z_{23} & Z_{33} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{33} & Z_{13} & Z_{23} \\ Z_{13} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{23} & Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{22} & Z_{23} & Z_{12} \\ Z_{23} & Z_{33} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{13} & Z_{11} \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Z impedančních matic jednotlivých úseků je zřejmé, že součet diagonálních prvků těchto matic vytvoří výše zmíněnou vlastní impedanci Z a součet mimo diagonálních prvků nám naopak poskytne vzájemnou impedanci Z' . U vzájemné impedance, ale dochází ke změně parametru vzdálenosti d , který se nahrazuje tzv. střední vzdáleností vodičů d_s , pro niž platí:

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}} \quad (m) \quad (2.41)$$

Transpozicí neboli křížením vodičů vychází tedy provozní impedance jednotlivých fází stejné po jednom úplném cyklu transpozice, pak za předpokladu symetrického proudového zatížení bude pro ně platit rovnice (2.39). [2]

VI. Vedení se svazkovými vodiči

Jsou-li jednotlivé fáze vedení tvořeny svazkovými vodiči, používá se v zásadě stejných vzorců pro provozní impedanci, pouze s tím rozdílem, že uvažujeme náhradní poloměr svazku. Pro náhradní poloměr svazku r_e platí [3]:

$$r_e = R \sqrt[n]{r \frac{n}{R}} \quad (m) \quad (2.42)$$

kde R je poloměr svazku,
 r poloměr jednoho dílčího vodiče ve svazku,
 n počet vodičů ve svazku.

Také je nezbytné respektovat změnu korekčního činitele nerovnoměrnosti rozložení proudové hustoty po průřezu a permeability vodiče:

$$\xi_e = \sqrt[n]{\bar{\xi}} \quad (m) \quad (2.43)$$

Po dosazení rovnic (2.42) a (2.43) do rovnice pro provozní impedanci zcela souměrného vedení (2.39) dostaneme upravený vztah:

$$Z_1 = R_{1s} + j0,1445 \log \frac{d}{\xi_e r_e} \quad (\Omega \cdot km^{-1}) \quad (2.44)$$

kde R_{1s} je rezistance celého svazku daná poměrem $\frac{R_1}{n}$
 ξ_e korekční činitel ξ celého svazku,
 r_e náhradní poloměr svazku.

Porovnáme-li rovnici pro impedanci svazkového vodiče s impedancí vodiče jednoduchého, dospějeme k závěru, že svazkový vodič se chová pro výpočet impedancí jako vodič jednoduchý, který má poloměr rovný náhradnímu poloměru r_e .

VII. Vliv zemnicích lan

Zemnicí lana se nejčastěji používají buďto jako lana Fe pozinkovaná, nebo lana typu AlFe. Jsou umístěna ve vrcholech stožárů, kde přes jejich konstrukci, svod a zemnič jsou spojena se zemí. Jejich úlohou je především snižovat četnost atmosférických výbojů do fázových vodičů vedení, redukovat indukovaná elektrostatická napětí a snižovat krokové a dotykové napětí při nesymetrických zkratech.

V případě výpočtu elektrických parametrů vedení se zemnicími lany je nutné provést tzv. modifikaci vedení. Ta spočívá v tom, že vytváříme pomyslné vedení bez zemnicích lan, které by se chovalo jako skutečné vedení se zemnicími lany. Princip si vysvětlíme na příkladu vícenásobného vedení se zemnicími lany popsané maticovou rovnicí [2]:

$$\begin{bmatrix} U_v \\ U_V \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{vv} & Z_{vV} & Z_{vz} \\ Z_{Vv} & Z_{VV} & Z_{Vz} \\ Z_{zv} & Z_{zV} & Z_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_v \\ I_V \\ I_z \end{bmatrix} \quad v \sim (a, b, c); \quad V \sim (A, B, C) \quad (2.45)$$

U zemnicích lan se zpravidla přijímá, že jsou uzemněna spojitě tj. v každém místě vedení nikoliv jen na stožárech. Za tohoto předpokladu platí:

$$\Delta U_{z1} = 0 = \Delta U_{z1} \rightarrow \Delta U_z = 0 \quad (2.46)$$

Dosazením poznatku (2.46) do poslední rovnice matice (2.45) a po vynásobení této rovnice submaticí Z_{zz}^{-1} zleva, dostáváme proud v zemnicím lanu I_z ve tvaru:

$$I_z = -Z_{zz}^{-1}(Z_{zv}I_v - Z_{zV}I_V) \quad (2.47)$$

Využijeme této znalosti a zpětným dosazením proudu zemnicím lanem (2.47) do prvních dvou rovnic matice (2.45), získáme po následné úpravě požadované rovnice:

$$\Delta U_v = (Z_{vv} - Z_{vz}Z_{zz}^{-1}Z_{zv})I_v + (Z_{vV} - Z_{vz}Z_{zz}^{-1}Z_{zV})I_V \quad (2.48)$$

$$\Delta U_V = (Z_{Vv} - Z_{Vz}Z_{zz}^{-1}Z_{zv})I_v + (Z_{VV} - Z_{Vz}Z_{zz}^{-1}Z_{zV})I_V \quad (2.49)$$

Maticové výrazy uvedené v okrouhlých závorkách se nazývají modifikované impedanční matice, ať už vlastní (vv , VV) nebo vzájemné (vV , Vv). S jejich pomocí pak vytváříme pomyslné vedení bez zemnicích lan. [2]

2.2 Příčná admitance vedení

konduktance G a kapacitní susceptance $B = \omega C$ vytvářejí příčnou admitanci vedení:

$$Y_q = \sqrt{G + j\omega C} = G + jB = Y_q e^{j\psi} \quad (S. km^{-1}) \quad (2.50)$$

kde

$$Y_q = \sqrt{G^2 + B^2}; \quad \tan \psi = \frac{B}{G}; \quad \psi \in \langle 0, \frac{\pi}{2} \rangle \quad (2.51)$$

Příčná admitance může být dílčí k zemi, dílčí vzájemná nebo provozní podle toho, kterou konduktanci a k ní příslušnou susceptanci uvažujeme. [2]

2.2.1 Konduktance venkovních vedení

Konduktance způsobuje ztráty činného výkonu, které nezávisí ani tak na zatížení, jako na napětí a klimatických vlivech. Nelze je přesně matematicky zformulovat. Dělí se obecně na ztráty svodem a ztráty korónou, které převládají.

Ztráty korónou jsou více znatelné za špatného počasí, např. při mlze, dešti se podstatně uplatní až od jmenovitého napětí 110 kV. Empirické hodnoty konduktance lze nalézt v tabulce (tab. 5).

Jmenovité napětí (kV)	110	220	400
Konduktance (S.km ⁻¹)	3,6 až 5.10 ⁻⁸	2,5 až 3,6.10 ⁻⁸	1,4 až 2.10 ⁻⁸

Tab. 5 – Přibližné hodnoty konduktancí pro napětí 110, 220, 400 kV

Jestliže vedením přes konduktanci G_1 prochází proud I_s a síť má fázové napětí U_f , případně sdružené U , budou příčné ztráty výkonu na tři fáze a 1 km délky vedení P_s ve zcela souměrné síti:

$$P_s = 3U_f I_s = 3U_f G_1 U_f = 3U_f^2 G_1 = U^2 G_1 \quad (W.km^{-1}) \quad (2.52)$$

Je důležité dodat, že příčné ztráty se zpravidla respektují u vedení se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším, a to ještě jen při detailnějších výpočtech. V porovnání se ztrátou činného výkonu způsobenou rezistancemi jsou při jmenovitém zatížení příčné ztráty mnohem menší. Nepříznivě se tu ale uplatňuje koróna. [2]

2.2.2 Kapacita

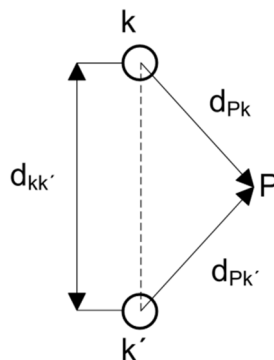
Kapacitou se vyjadřuje zpětný vliv elektrického pole vyvolaného v prostoru vedení napětím jednotlivých vodičů. Při výpočtu kapacity vycházíme ze soustav maticových rovnic ve tvaru $U = \delta Q$ a $Q = kU$, kde U jsou potenciály vodičů, Q lineární hustoty nábojů, δ potenciálové součinitele a k kapacitní součinitele. Výsledkem zpracování obou soustav rovnic jsou kapacity dílčí, případně provozní. Součin kapacity a úhlové frekvence pak poskytuje kapacitní susceptanci.

I. Potenciál v poli navzájem rovnoběžných vodičů

Uvažujeme nejprve dva přímkové rovnoběžné vodiče délky l ve vzájemné vzdálenosti $d_{kk'}$, kde první vodič má lineární hustotu náboje Q_k a druhý vodič $Q_{k'}$ opačné polarity (obr. 8). Tyto vodiče následně vyvolají v libovolném bodě P potenciál [2]:

$$U_P = U_{Pk} + U_{Pk'} = \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{Pk'}}{d_{Pk}} \quad (V) \quad (2.53)$$

kde ϵ je permitivita daného materiálu,
 d_{Pk} kolmá vzdálenost bodu P od vodiče k ,
 $d_{Pk'}$ kolmá vzdálenost bodu P od vodiče k' .



Obr. 8 – Dva přímkové vodiče

Výpočet nyní rozšíříme na soustavu n dvojic přímkových vodičů navzájem rovnoběžných, kde ke každému vodiči k s lineární hustotou náboje Q_k přiřadíme odpovídající vodič k' s lineární hustotou náboje $Q_{k'}$, která má opět opačnou polaritu ($k, k' \in N$). Pro potenciál v bodě P bude platit:

$$U_P = \sum_{k,k'=1}^n (U_{Pk} + U_{Pk'}) = \sum_{k,k'=1}^n \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{Pk'}}{d_{Pk}} \quad (V) \quad (2.54)$$

Skutečné vodiče ale nejsou přímkovými zdroji s náboji v osách, mají určitý poloměr např. k -tý vodič r_k . Pak za předpokladu, že $r_k \ll d_{km}$ resp. d_{mk} lze jednu z ekvipotenciálních ploch, jež jsou pro tento $2n$ -vodičový systém tvořeny válcovými plochami, ztotožnit s povrchem skutečného vodiče a přisoudit jí též potenciál jako ose vodiče. Položíme-li potom bod P kamkoliv na povrch m -tého vodiče bude jeho potenciál roven potenciálu m -tého vodiče [2]:

$$U_m = \sum_{k,k'=1}^n \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{mk'}}{d_{mk}} \quad (V) \quad (2.55)$$

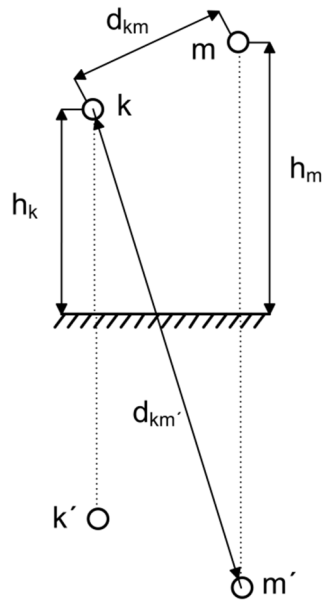
II. Potenciálové a kapacitní součinitele

U venkovních vedení je nezbytné kromě vodičů fází a zemnicích lan respektovat ještě rovinu povrchu ideální země. To provádíme pomocí metody zrcadlení. Metoda zrcadlení spočívá na principu přiřazení každému skutečnému vodiči k jeho fiktivní vodič k' , který je s námi uvažovaným vodičem rovnoběžný a je uložen zrcadlově k povrchu země. Tímto se vytvoří dvojice vodičů (k, k') k sobě přiřazených. Pak kterýkoliv bod Z , ležící na povrchu země bude mít od obou vodičů stejnou vzdálenost $d_{Zk} = d_{Zk'}$. Dosazením této podmínky do rovnice (2.55) dostaneme [2]:

$$U_Z = 0 \quad (V) \quad (2.56)$$

Povrch země je tedy ekvipotenciální plochou s nulovým potenciálem, proto napětí skutečných vodičů proti zemi bude rovno jejich potenciálům.

Toto zjištění a přijaté předpoklady o vodičích a povrchu země nám dovoluují nahradit uspořádání n skutečných vodičů fázových včetně zemnicích lan a země uspořádáním n dvojic vodičů, tvořených vždy vodičem skutečným k a fiktivním k' s lineárními hustotami náboje Q_k resp. $-Q_k$, viz (obr. 9).



Obr. 9 – Dvě dvojice skutečných a fiktivních vodičů

Pro vzdálenosti naznačené na (obr. 9) platí následující:

$$d_{mm} = r_m; \quad d_{kk} = r_k; \quad d_{km} = d_{mk} \quad (m) \quad (2.57)$$

kde d_{mm}, d_{kk} je vzdálenost vodiče sama od sebe,
 d_{mk}, d_{km} vzdálenost mezi skutečnými vodiči k a m ,

$$d_{mm'} = 2h_m; \quad d_{kk'} = 2h_k \quad (m) \quad (2.58)$$

kde $d_{mm'}, d_{kk'}$ je vzdálenost skutečného a vlastního fiktivního vodiče,

$$d_{km'} = d_{m'k} = d_{mk'} = d_{k'm} = \sqrt{4h_k h_m + d_{km}^2} \quad (m) \quad (2.59)$$

kde $d_{km'}$ až $d_{k'm}$ je vzdálenost skutečného a nevlastního fiktivního vodiče.

Rovnici pro potenciál m -tého vodiče (2.55) poté můžeme psát ve tvaru [2]:

$$\mathbf{U}_m = \sum_{k=1}^n \delta_{km} \mathbf{Q}_k \quad (V) \quad (2.60)$$

kde δ_{mm} je vlastní potenciálový součinitel pro $m = k$,
 $\delta_{km} = \delta_{mk}$ vzájemný potenciálový součinitel pro $m \neq k$.

Potenciálové součinitele lze určit ze zadaného geometrického uspořádání vodičů a zemních lan vedení podle vztahu [2]:

$$\delta_{mm} = \frac{\ln \frac{d_{mm'}}{d_{mm}}}{2\pi\epsilon} \quad \text{resp.} \quad \delta_{mk} = \frac{\ln \frac{d_{mk'}}{d_{mk}}}{2\pi\epsilon} \quad (m, F^{-1}) \quad (2.61)$$

Pro praktické výpočty pak používáme dekadické logaritmy místo přirozených a jednotku potenciálových součinitelů ($km \cdot \mu F^{-1}$), proto provedeme jejich úpravu:

$$\delta_{mm} = \frac{\log \frac{2h_m}{r_m}}{0,242 \cdot 2} \quad \text{resp.} \quad \delta_{mk} = \frac{\log \sqrt{\frac{4h_k h_m + d_{km}^2}{d_{mk}}}}{0,242 \cdot 2} \quad (km \cdot \mu F^{-1}) \quad (2.62)$$

Dále zavedeme definičně kapacitní součinitele k_{mm} a k_{mk} . Ty získáme na základě úvahy, že dielektrický tok m -tého vodiče rozdělíme na část k zemi a části k vodičům s indexem k . Vyjádříme-li pak každý dílčí náboj jako součin kapacity a napětí mezi příslušnými vodiči bude platit [2]:

$$\mathbf{Q}_m = \left(c_{m0} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n c_{mk} \right) \mathbf{U}_m + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (-c_{mk}) \mathbf{U}_k \quad (C) \quad (2.63)$$

kde c_{m0} je dílčí kapacita vodiče m k zemi,
 $c_{mk} = c_{km}$ dílčí kapacita mezi vodiči m a k .

Ve vztahu (2.63) výrazy v první závorce odpovídají vlastnímu součiniteli k_{mm} a výrazy v druhé závorce představují vzájemného součinitele k_{mk} . Tuto rovnici náboje m -tého vodiče lze přetransformovat do výsledného zjednodušeného tvaru:

$$\mathbf{Q}_m = \sum_{k=1}^n k_{mk} \mathbf{U}_k \quad (C) \quad (2.64)$$

Porovnáme-li rovnice (2.55) a (2.64), všimneme se vazby mezi kapacitním a potenciálovým součinitelem. Nejdříve, ale každou z uvedených rovnic rozepíšeme do soustavy n rovnic a dáme jim maticový tvar [2]:

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\delta} \mathbf{Q} \quad (V) \quad (2.65)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{k} \mathbf{U} \quad (C) \quad (2.66)$$

kde \mathbf{U} je sloupcová matice typu $(n, 1)$ potenciálů,
 \mathbf{Q} sloupcová matice typu $(n, 1)$ lineárních hustot nábojů,
 $\boldsymbol{\delta}$ regulární symetrická matice typu (n, n) ,
 \mathbf{k} matice stejných vlastností jako $\boldsymbol{\delta}$.

Následným dosazením \mathbf{Q} z rovnice (2.66) do rovnice (2.65) vyloučíme požadovanou vazbu mezi těmito součiniteli:

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\delta} \mathbf{k} \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{k} = \boldsymbol{\delta}^{-1} \quad (V; \mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.67)$$

Na základě znalosti této vazby se dají vypočítat dílčí kapacity vzájemné a k zemi, které lze psát ve tvaru vhodném pro výpočet:

$$c_{km} = c_{mk} = -k_{km} \quad \text{resp.} \quad c_{m0} = k_{mm} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n k_{mk} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.68)$$

III. Provozní kapacita

Podobně jako u indukčnosti definujeme provozní kapacitu fáze m vztahem:

$$C_m = \frac{c_{m0}U_m + \sum_{k=1}^n c_{mk}(U_m - U_k)}{U_m} = \frac{Q_m}{U_m} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.69)$$

Provozní kapacita popisuje celkové působení elektrického pole na vodič ve více-vodičové soustavě a je stanovena jako kapacita samotné dvojice k sobě příslušných vodičů, jak skutečného, tak i fiktivního se stejnými účinky, jako má výsledně na uvažovanou dvojici n dvojic vodičů, tvořených vždy skutečným a fiktivním vodičem. [2]

IV. Kapacita trojfázového vedení a jeho symetrizace

Uvažujeme trojfázové vedení bez zemnicích lan s vodiči v obecné poloze navzájem rovnoběžnými mezi sebou, ale i s povrchem země (obr. 6). Dále předpokládáme, že dané vodiče mají stejný poloměr a jsou napájeny symetrickým napětím. Pak provozní impedance jednotlivých fází (a, b, c) můžeme vyjádřit podle definičního vztahu (2.69):

$$C_a = \frac{c_{a0}U_a + c_{ab}(U_a - U_b) + c_{ac}(U_a - U_c)}{U_a} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.70)$$

$$C_b = \frac{c_{b0}U_b + c_{ab}(U_b - U_a) + c_{bc}(U_b - U_c)}{U_b} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.71)$$

$$C_c = \frac{c_{c0}U_c + c_{ac}(U_c - U_a) + c_{bc}(U_c - U_b)}{U_c} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.72)$$

Jejich následné vyhodnocení by ukázalo, že tyto provozní kapacity mají různé jak reálné, tak i imaginární části. Imaginární složka kapacity je původcem činného výkonu, který se vyměňuje mezi fázemi elektrostatickou vazbou. Součet těchto činných výkonů je roven nule, tudíž se vyměňuje mezi fázemi, aniž by výsledně zatěžoval zdroj. Důsledkem nestejných kapacit je proudová nesymetrie i v síti symetricky napájené. [2]

Symetrizace vedení lze dosáhnout opět pomocí transpozice jednotlivých fází, což si ukážeme na příslušných maticích s potenciálovými součiniteli pro jednotlivé transponované úseky vedení:

$$\boldsymbol{\delta} = \frac{1}{3} \left\{ \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{13} & \delta_{23} & \delta_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{33} & \delta_{13} & \delta_{23} \\ \delta_{13} & \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{23} & \delta_{12} & \delta_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{22} & \delta_{23} & \delta_{12} \\ \delta_{23} & \delta_{33} & \delta_{13} \\ \delta_{12} & \delta_{13} & \delta_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta & \delta' & \delta' \\ \delta' & \delta & \delta' \\ \delta' & \delta' & \delta \end{bmatrix} \right\} \quad (2.73)$$

Z těchto matic je zřejmé, že součet jejich diagonálních prvků nám dává vlastní potenciálové součinitele δ a součet mimo diagonálních prvků naopak vzájemné potenciálové součinitele δ' . U vzájemných potenciálových součinitelů, ale dochází ke změně parametru vzdálenosti d a výšky h , které se nahrazují tzv. střední vzdáleností vodičů d_s (2.41) resp. střední výškou vodičů h_s :

$$h_s = \sqrt[3]{h_{12}h_{13}h_{23}} \quad (m) \quad (2.74)$$

Transpozicí neboli křížením vodičů vychází tedy provozní kapacity jednotlivých fází stejné po jednom úplném cyklu transpozice, pak za předpokladu symetrických fázových napětí bude pro ně platit [2]:

$$C_a = C_b = C_c = C = c_0 + 3c' = \frac{1}{\delta - \delta'} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.75)$$

Dosazením za potenciálové součinitele ze vztahů (2.62), kde respektujeme změnu vzdáleností d a výšky h tzn. nahrazením za d_s a h_s , dostaneme vztah pro provozní kapacitu transponovaného vedení ve tvaru:

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{2h_s d_s}{r \sqrt{4h_s^2 + d_s^2}}} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (2.76)$$

Při praktickém výpočtu se vypočítají dílčí kapacity pro jednotlivé transpoziční úseky podle rovnic (2.67), (2.68) a z nich se určí střední hodnoty pro celý transpoziční cyklus.

V. Vedení se svazkovými vodiči

Jsou-li jednotlivé fáze vedení tvořeny svazkovými vodiči, používá se v zásadě stejných vzorců pro potenciálové součinitele (2.62), pouze s tím rozdílem, že uvažujeme náhradní poloměr svazku. Pro náhradní poloměr svazku r_e platí vztah (2.42), který byl již prezentován v části určené parametru indukčnosti vedení. Svazkový vodič se potom chová jako vodič jednoduchý s poloměrem rovným náhradnímu poloměru r_e .

VI. Vliv zemnicích lan

Podobně jako v předchozím případě při výpočtu impedance resp. indukčnosti vícenásobného vedení se zemnicím lanem, je i zde nutné vytvořit tzv. modifikované vedení. Postupujeme přitom obdobným způsobem, podle (2.65) dostaneme následující soustavu rovnic [2]:

$$\begin{bmatrix} U_v \\ U_V \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{vv} & \delta_{vV} & \delta_{vz} \\ \delta_{Vv} & \delta_{VV} & \delta_{Vz} \\ \delta_{zv} & \delta_{zV} & \delta_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_v \\ Q_V \\ Q_z \end{bmatrix} \quad v \sim (a, b, c); \quad V \sim (A, B, C) \quad (2.78)$$

S respektováním potenciálu spojitě uzemněných zemnicích lan, můžeme dále psát:

$$\Delta U_{z1} = 0 = \Delta U_{z2} \rightarrow \Delta U_z = 0 \quad (2.79)$$

Dosazením poznatku (2.79) do poslední rovnice matice (2.78) a po vynásobení této rovnice submaticí δ_{zz}^{-1} zleva, dostáváme elektrický náboj zemnicího lana Q_z ve tvaru:

$$Q_z = -\delta_{zz}^{-1}(\delta_{zv}Q_v - \delta_{zV}Q_V) \quad (2.80)$$

Využijeme této znalosti a zpětným dosazením náboje zemnicího lana (2.80) do prvních dvou rovnic matice (2.78), získáme po následné úpravě požadované rovnice:

$$\Delta U_v = (\delta_{vv} - \delta_{vz}\delta_{zz}^{-1}\delta_{zv})Q_v + (\delta_{vV} - \delta_{vz}\delta_{zz}^{-1}\delta_{zV})Q_V \quad (2.81)$$

$$\Delta U_V = (\delta_{Vv} - \delta_{Vz}\delta_{zz}^{-1}\delta_{zv})Q_v + (\delta_{VV} - \delta_{Vz}\delta_{zz}^{-1}\delta_{zV})Q_V \quad (2.82)$$

Maticové výrazy uvedené v okrouhlých závorkách se nazývají modifikované potenciálové součinitele, ať už vlastní ($\nu\nu$, VV) nebo vzájemné (νV , $V\nu$). Ty pak charakterizují vedení do podoby pomyslného vedení bez zemnicích lan. Z rozboru posledních dvou rovnic mimo jiné vyplývá, že přítomnost zemnicích lan zvětšuje kapacity k zemi a současně zmenšuje kapacity vzájemné. To je v souladu s fyzikálním pohledem, neboť zemnicí lano vlastně přibližuje zem. [2]

2.3 Činitel přenosu

Konstanta šíření je vyjádřena rovnicí:

$$\gamma = \sqrt{\mathbf{Z}_l \mathbf{Y}_q} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (\text{km}^{-1}) \quad (2.83)$$

Reálná část α se nazývá činitel tlumení a imaginární část β činitel fázového natočení. Reálná složka konstant šíření fyzikálně značí útlum amplitudy vlny na jednotku délky vedení (km^{-1}) a imaginární složka vyjadřuje číselně fázový posuv vlny na jednotku délky vedení (km^{-1}). Vzhledem k tomu, že oba činitelé jsou vypočítány z elektrických parametrů určených na jednotku délky lze je také nazvat jako měrné činitele. [4]

2.4 Vlnová impedance vedení

Vlnová impedance nebo také charakteristická impedance je popsána rovnicí:

$$\mathbf{Z}_V = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_l}{\mathbf{Y}_q}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (\Omega) \quad (2.84)$$

Modul a argument vlnové impedance je:

$$\mathbf{Z}_V = \frac{\mathbf{Z}_l}{\gamma} = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_l}{\mathbf{Y}_q}} = \sqrt{\frac{Z_l e^{i\varphi_Z}}{Y_q e^{i\varphi_Y}}} = Z_V e^{i\varphi_V} \quad (2.85)$$

kde

$$\varphi_V = \frac{1}{2} (\varphi_Z - \varphi_Y); \quad \varphi_Z = \arctg \frac{X}{R}; \quad \varphi_Y = \arctg \frac{C}{G} \quad (2.86)$$

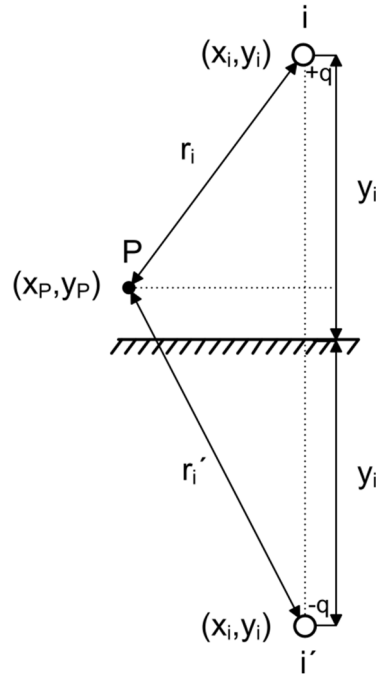
Na vedením zakončeném odběrovou impedancí rovné vlnové impedanci se bude napětí a proud šířit pouze postupnými vlnami, činitel odrazu bude pro tento stav nulový a vedením se bude přenášet přirozený výkon [4]:

$$\mathbf{S}_V = \frac{U^2}{|\mathbf{Z}_V|} e^{-j\beta} \quad (\text{VA}) \quad (2.87)$$

kde U je jmenovité sdružené napětí,
 \mathbf{Z}_V vlnová impedance vedení,
 β činitel fázového natočení.

2.5 Elektrické pole venkovního vedení

Pro výpočet rozložení elektrického pole je nezbytné předpokládat přímé a paralelní vodiče umístěné nad dokonale vodivou zemí ve výšce y_i . Na základě známých velikostí nábojů jednotlivých vodičů a jejich poloh, lze určit jednotlivé příspěvky elektrické intenzity od těchto vodičů a jejich obrazů v daném bodě. Tyto příspěvky se rozloží do složek x a y .



Obr. 10 – Koncept liniových vodičů s délkovou hustotou náboje $\pm q$

Pro složky E_x a E_y fázoru intenzity elektrického pole vzniklé působením i -tého vodiče a jeho obrazu v libovolném bodě prostoru P s definovanými souřadnicemi $[x_P, y_P]$, platí následující vztahy [4]:

$$E_{xi}(P) = aQ_i D_{xi} \quad \text{resp.} \quad E_{yi}(P) = aQ_i D_{yi} \quad (V \cdot m^{-1}) \quad (2.88)$$

kde a je konstanta charakterizující prostředí elektrického pole,
 D parametr určující geometrii mezi vodiči (i obrazy) a bodem P .

Pro délku $l = 1$ m a permitivitu vakua $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F.m⁻¹ nabývá konstanta a hodnoty:

$$a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} = 1,8 \cdot 10^{10} \quad (F^{-1}) \quad (2.89)$$

Se znalostí souřadnic vodičů, jejich obrazů a bodu P , můžeme pro parametr D psát:

$$D_{xi} = (x_P - x_i) \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_i'^2} \right) \quad \text{resp.} \quad D_{yi} = \frac{y_i - y_P}{r_i^2} + \frac{y_i + y_P}{r_i'^2} \quad (-) \quad (2.90)$$

kde r_i je vzdálenost bodu P od i -tého vodiče,
 r_i' vzdálenost bodu P od obrazu i -tého vodiče.

Pro více-vodičový systém lze provést superpozice daných složek intenzity elektrického pole vzniklé působením náboje v jednotlivých vodičích:

$$\mathbf{E}_{xP} = \sum_i \mathbf{E}_{xi}(P) \quad \text{resp.} \quad \mathbf{E}_{yP} = \sum_i \mathbf{E}_{yi}(P) \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.91)$$

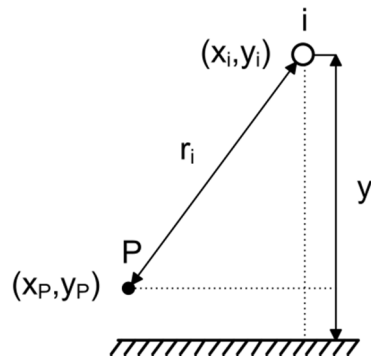
Výslednou hodnotu intenzity elektrického pole v bodě P je možné určit ze vzorce:

$$E_P = \sqrt{|\mathbf{E}_{xP}|^2 + |\mathbf{E}_{yP}|^2} \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.92)$$

Intenzitu elektrického pole je také možné řídit a tím ovlivňovat její velikost. V podstatě se používají následující opatření, jedná se o zvětšení vzdálenosti fázových vodičů od země a rovněž mezi sebou, snížení napětí, svazkování vodičů (krok svazku), zavedení stínících lan pod vedením nebo také pouhým sledem fází, což se běžně praktikuje většinou u vícenásobných vedení. [4]

2.6 Magnetické pole venkovního vedení

Při vyšetření intenzity magnetického pole v okolí venkovního vedení se uvažují dlouhé rovnoběžné vodiče, harmonický průběh proudu a ustálený stav. Poté je možno nahradit časově proměnnou hodnotu proudu jeho fázorem. Výsledné magnetické pole v okolí vedení je dáno superpozicí intenzit magnetického pole od jednotlivých vodičů. Superpozice je nutné provádět po složkách.



Obr. 11 – Koncept liniových vodičů zatížených proudem i

Velikost složky H_x a H_y fázoru intenzity magnetického pole, vybuzeného i -tým vodičem v libovolném bodě prostoru P s definovanými souřadnicemi $[x_P, y_P]$, je dána vztahem [4]:

$$H_{xi}(P) = \frac{I_i}{2\pi} \frac{y_i - y_P}{r_i^2} \quad \text{resp.} \quad H_{yi}(P) = \frac{I_i}{2\pi} \frac{x_i - x_P}{r_i^2} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.93)$$

kde r_i je vzdálenost bodu P od i -tého vodiče,
 I_i fázor proudu i -tého vodiče.

Pro získání velikosti fázorů v jednotlivých složkách je třeba provést superpozici složek od jednotlivých vodičů:

$$\mathbf{H}_{xP} = \sum_i \mathbf{H}_{xi}(P) \quad \text{resp.} \quad \mathbf{H}_{yP} = \sum_i \mathbf{H}_{yi}(P) \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.94)$$

Výsledná velikost fázoru intenzity magnetického pole je pak dána vzorcem:

$$\mathbf{H}_P = \sqrt{|\mathbf{H}_{xP}|^2 + |\mathbf{H}_{yP}|^2} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.95)$$

Velikost magnetické indukce v daném bodě je možné určit pomocí vztahu mezi intenzitou magnetického pole a magnetickou indukcí:

$$\mathbf{B}_P = \mu_0 \mathbf{H}_P \quad (\text{T}) \quad (2.96)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

Řízení magnetického pole venkovního vedení se provádí z velké části stejnými prostředky jako v případě řízení pole elektrického, a to na základě zvětšení vzdálenosti fázových vodičů od země nebo mezi sebou, snížením proudu, párováním vodičů, použitím stínících lan a v neposlední řadě i sledem fází u vícenásobných vedení. [4]

3. Elektrické parametry úseku stávajícího vedení

Předmětem studie je výměna tradičních AlFe lan za moderní vodiče s kompozitním systémem tzv. ACCC, které vykazují lepší provozní charakteristiky v porovnání s těmito konvenčními vodiči. Tato náhrada bude zpracována pro úsek stávajícího dvojitého vedení V412/413 s praktickým záměrem zvýšit jeho přenosovou schopnost. Nicméně v této kapitole se zaměříme ještě na výpočet elektrických parametrů vedení před jeho zamýšlenou rekonstrukcí, tzn. vedení s klasickými AlFe lany. Výsledné informace nám poslouží jako podklad pro porovnání a především zhodnocení s variantou po rekonstrukci, tzn. vedení s již implementovanými ACCC vodiči.

V následujících bodech shrneme jednotlivé předpoklady nutné pro výpočet elektrických parametrů zadaného úseku stávajícího vedení. Stručně popíšeme jeho základní charakteristiku, obeznámíme se s ochrannými pásmy a v neposlední řadě zmíníme vlivy na obyvatelstvo a veřejné zdraví, které se nepřímo odvolávají na nařízení vlády č. 1/2008 Sb.

3.1. Všeobecné údaje o vedení

Venkovní vedení je tvořené širokou škálou konstrukčních prvků, které se navíc mohou v různých částech linky značně odlišovat, a proto je nezbytné k nim zachovat individuální přístup. V dané případové studii budeme pracovat s vícenásobným vedením tzv. dvojitým, tj. s celkem šesti fázovými vodiči a jedním párem zemnicích lan. Krátké shrnutí struktur stávajícího dvojitého vedení je uvedeno níže:

- **Stožáry vedení**
Stožáry obvykle dělíme dle jejich funkce na tzv. kotevní a tzv. nosné:
 - Kotevní stožáry mají robustnější konstrukci a nacházejí se vždy v lomových bodech trasy a dále v místech, kde to vyžaduje statický výpočet. Jejich hlavním účelem je jednak udržet tíhové zatížení vodičů, jednak výslednice tahových reakcí vodičů ze sousedních úseků (a to i v případě, kdy tah působí pouze jednostranně) a výslednice sil v lomových bodech trasy. Z toho vyplývá, že čím větší je úhel lomu trasy, tím robustnější musí být konstrukce kotevního stožáru.
 - Nosné stožáry se nacházejí v přímých úsecích mezi lomovými body (kotevními stožáry) a jejich hlavním účelem je udržet tíhové zatížení vodičů. Nosné stožáry jsou proto lehčí konstrukce než stožáry kotevní.

Pro vedení je použit jako základní typ „Donau“. Stožáry jsou ocelové příhradové konstrukce, šroubované, chráněné proti korozi zinkováním a nátěrem. Nosné stožáry jsou typizované pro vedení 2x400 kV, jednodřívkové. Kotevní stožáry jsou rovněž jednodřívkové, navrženy pro různé úhly lomu.

Výpočet elektrických parametrů vedení demonstrujeme pouze na nosných stožárech, a to dvojího druhu. Jedná se především o nejnižší resp. nejvyšší nosný stožár vyskytující se na daném úseku vedení, tj. standardní nosný stožár „Donau 1962 typ N“ resp. zesílený nosný stožár „Donau 1962 typ Ns+12“. Oba typy mají zcela odlišnou geometrii konstrukce (viz příloha č. 1 a 2). Kotevní stožáry se ve výpočtu elektrických parametrů vedení neuvažují. Vedou k tomu důvody týkající se převážně menšího počtu těchto stožárů.

- **Minimální výška vodičů**

Minimální výška spodních fázových vodičů nad zemí je přibližně 8 metrů, a to v místech největšího průhybu mezi stožáry. Tím je zajištěna ochrana proti nebezpečnému dotyku vedení např. lidmi nebo živočichy. Tato hodnota vychází z normy ČSN 34 1100/64 podle níž bylo vedení původně navrženo. Současně platná norma ČSN EN 50 341-1 používá stejnou hodnotu minimální výšky, nejprve definuje tzv. základní elektrickou vzdálenost D_{el} odvíjející se od napěťové hladiny sítě (tab. 6).

U_s	(kV)	110	220	400
D_{el}	(m)	1	1,7	2,8

Tab. 6 – Základní elektrické vzdálenosti dle ČSN EN 50 341-1

K této hodnotě přidává ještě navýšení, jenž je určené charakterem prostředí, ve kterém se vedení nachází. Hodnoty navýšení společně s hodnotou D_{el} nám poskytují informace o výsledné minimální výšce (tab. 7).

		Běžný profil země*	Křižování pozemní komunikace	Křižování elektrického vedení
Minimální výška	(m)	$5 + D_{el}$	$6 + D_{el}$	$2 + D_{el}$

Pozn.: * $5 + D_{el}$ platí v případě, že vedení je v souladu s nařízením vlády č. 1/2008 Sb.

Tab. 7 – Minimální vzdálenosti od země a křižovaných objektů (ČSN EN 50 341-1)

Je důležité ale upozornit, že tím není zajištěna ochrana před elektromagnetickým polem podle požadavku nařízení vlády č. 1/2008 Sb., z toho důvodu se realizuje ještě následná korekce této minimální výšky (platí pouze u nových staveb vedení). Tato korekce se provádí na základě výpočtů elektromagnetického pole pro zadanou konstrukci tak, aby bylo garantováno, že nedojde k žádnému navýšení zdravotního rizika způsobeného neionizujícím zářením.

- **Základy stožárů**

Železobetonové, řídky armované, provedené dle statického výpočtu na základě realizovaného inženýrsko-geologického průzkumu a odpovídající základovým poměrům v podloží. Na terén vystupují pouze části základů pod jednotlivými stojinami stožárů, hlavní hmota základů je skryta pod terénem.

- **Fázové vodiče**

Jako fázové vodiče jsou použita AIFe lana „350 AIFe 6“ s ocelovým jádrem a hliníkovým opletením (příloha č. 3). Ocelové jádro zajišťuje zejména statické parametry vodiče, hliníkové opletení potom přenos elektrické energie. Dále z důvodu vyšší napěťové úrovně (400 kV) použijeme svazkové vodiče pro omezení ztrát korunou.

- **Napěťová úroveň**

Přímo ovlivňuje ztráty při přenosu elektrické energie. Vedení přenáší výkon s menšími ztrátami tehdy, je-li provozováno s přirozeným výkonem, tj. když přenáší jen tzv. činný výkon. Přirozený výkon přitom vzrůstá se čtvercem napětí. Vlastnosti vedení se tedy přizpůsobují tak, aby přenášený výkon odpovídal přirozenému.

- **Izolátorové závěsy**
Vodiče jsou na stožárech upevněny pomocí izolátorových závěsů délky cca 5 m.
- **Ochrana před atmosférickou elektřinou**
Vedení je vybaveno dvěma zemnicími lany (příloha č. 4 a 5). Ta jsou natažena nad fázovými vodiči a slouží jako ochrana před přímým úderem blesku do vedení. Zemnicí lana se běžně používají v kombinaci s optickými vlákny, po kterých jsou vedeny datové spoje a ani toto vedení není výjimkou. Vodič s optickým vláknem je umístěn na levém držáku zemnicího lana stožárové konstrukce.

3.2. Základní technické údaje

Základní údaje jsou následující (tab. 8):

Základní údaj	Popis
Délka úseku vedení	4 365 m
Napěťová soustava	třífázová s přímo uzemněným nulovým bodem
Jmenovité napětí	400 kV AC
Kmitočet	50 Hz
Max. proudové zatížení	1 995 A (trojsvazek)
Ochrana před úrazem	živých částí vedení - polohou neživých částí vedení - rychlým odpojením od zdroje
Vodiče	ocelohliníková lana 350 AIFe 6
Izolace	izolátorové závěsy
Zemnicí lana	ocelohliníková lana 183-AL1/43-ST1A, OPGW AL3/A20SA 177/49
Stožáry	jednodříkové, ocelové příhradové konstrukce, typ „Donau“
Ochrana proti korozi	žárové zinkování, nátěr
Základy stožárů	betonové dělené, hloubka založení do cca 3,5 m

Tab. 8 – Základní technické údaje uvažovaného úseku stávajícího vedení

3.3. Údaje o ochranných pásmech

Ochranná pásma nových venkovních vedení jsou stanovena zákonem č. 458/2000 Sb., energetický zákon, v platném znění. Pro vedení 400 kV je ochranným pásmem prostor vymezený svislými rovinami vedenými po obou stranách vedení ve vodorovné vzdálenosti 20 m od krajního vodiče (tab. 9). Pro běžnou trasu mezi nosnými stožáry je tedy celková šířka ochranného pásma vedení 67,6 m (nosný stožár „Donau 1962 typ N“).

Napěťová hladina	(kV)	1 - 35	35 - 110	110 - 220	220 - 400	> 400
Šířka o. pásma	(m)	7	12	15	20	30

Tab. 9 – Ochranná pásma dle zákona č. 458/2000 Sb.

Podmínky v ochranném pásmu jsou dány výše uvedeným zákonem č. 458/2000 Sb., energetický zákon, v platném znění. Striktně předepisuje, že v ochranném pásmu venkovního vedení je zakázáno bez souhlasu vlastníka vedení zřizovat stavby či zřizovat konstrukce, skladovat výbušné nebo hořlavé látky, provádět zemní práce, dále je zakázáno vysazovat chmelnice, nechávat růst porosty nad výšku 3 m, provádět činnost ohrožující spolehlivost a bezpečnost provozu vedení nebo životy, zdraví a majetek osob a činnosti znesnadňující přístup k vedení.

3.4. Vlivy na obyvatelstvo a veřejné zdraví

Základní a nutnou podmínkou je, aby záměr neohrožoval zdraví obyvatel. V daném případě přichází v úvahu zejména vliv elektromagnetického pole, ostatní v úvahu připadající potenciální vlivy (vlivy hluku, vlivy v důsledku dopravního provozu apod.) jsou celkově málo významné.

Expozice obyvatelstva elektrickému resp. magnetickému poli je limitována nařízením vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, v platném znění. U elektrických a magnetických polí (do 10 MHz) se přípustnost expozice posuzuje podle hustoty elektrických proudů, které tato pole v těle člověka mohou vyvolat.

Na základě nařízení vlády č. 1/2008 Sb. je stanovena nejvyšší přípustná hodnota modifikované indukované proudové hustoty J_{mod} v centrálním nervovém systému člověka (pro ostatní osoby, tj. veřejnost) $J_{mod} = 0,00282 \text{ A/m}^2$. Dále jsou zde uvedeny pro jmenovitý kmitočet vedení 50 Hz referenční hodnoty intenzity elektrického pole $E = 5 \text{ kV/m}$ a magnetické indukce $B = 100 \text{ } \mu\text{T}$. Tyto referenční hodnoty mohou být překročeny, pokud není překročena nejvyšší přípustná hodnota indukované proudové hustoty v těle člověka. Nepřekročení referenčních úrovní pak zaručuje, že nejsou překročeny ani nejvyšší přípustné hodnoty expozice osob, tj. hodnoty indukovaného proudu, stanovené nařízením vlády. [7]

		Veřejnost	Zaměstnanci	
J_{mod}	(mA/m ²)	2,82	14,14	f (50 Hz)
E_{max}	(kV/m)	5	10	
B_{max}	(μT)	100	500	

Tab. 10 – Přípustné hodnoty modifikované indukované proudové hustoty v lidském těle J_{mod}

3.5. Zhodnocení elektrických parametrů vedení

Výpočty elektrických parametrů stávajícího vedení, průběhu intenzity elektrického pole a indukce magnetického pole jsem provedl za pomoci softwaru Wolfram Mathematica. Podkladem pro výpočet mi byla data fázových a zemnicích lan získané od výrobce a rozměry použitých stožárových konstrukcí. Připomínám, že uvažujeme pouze nosné stožárové konstrukce, a to výhradně „Donau 1962 typ N“ nebo „Donau 1962 typ Ns+12“. Bližší specifikace spolu s odkazem na dané přílohy těchto podkladů jsou uvedeny výše v textu.

Vzhledem ke skutečnosti, že stávající úsek vedení je složen z tzv. dvojitého vedení, tak ve výpočtu respektujeme možnost vykompenzování elektrického i magnetického pole pomocí změny vzájemné interakce obou vedení. U dvojitých vedení se tak díky rozdílné konfiguraci fází na stožáru významně ovlivňuje rozložení elektrického a magnetického pole v jeho okolí. Existuje celkově třicet šest možných způsobů konfigurace fázových vodičů, ovšem

pouze šest z nich vykazuje rozdílné výsledky (tab. 11). Těchto šest rozmístění fází je uvažováno pro výpočet, jak primárních elektrických parametrů, tak i k vyšetření elektrické intenzity a indukce magnetického pole jednotlivých stožárů.

Konfigurace FV	A, B, C	a, b, c
1.varianta		
2.varianta		
3.varianta		
4.varianta		
5.varianta		
6.varianta		

Tab. 11 – Konfigurace fázových vodičů

Výsledné primární elektrické parametry a z nich odvozené sekundární elektrické parametry stávajícího vedení, pro jednotlivé koncepce nosných stožárových konstrukcí, jsou přehledně zobrazeny níže (tab. 12). Hodnoty jsou vztaženy na jeden potah vedení s dodržováním změny konfigurace fázových vodičů.

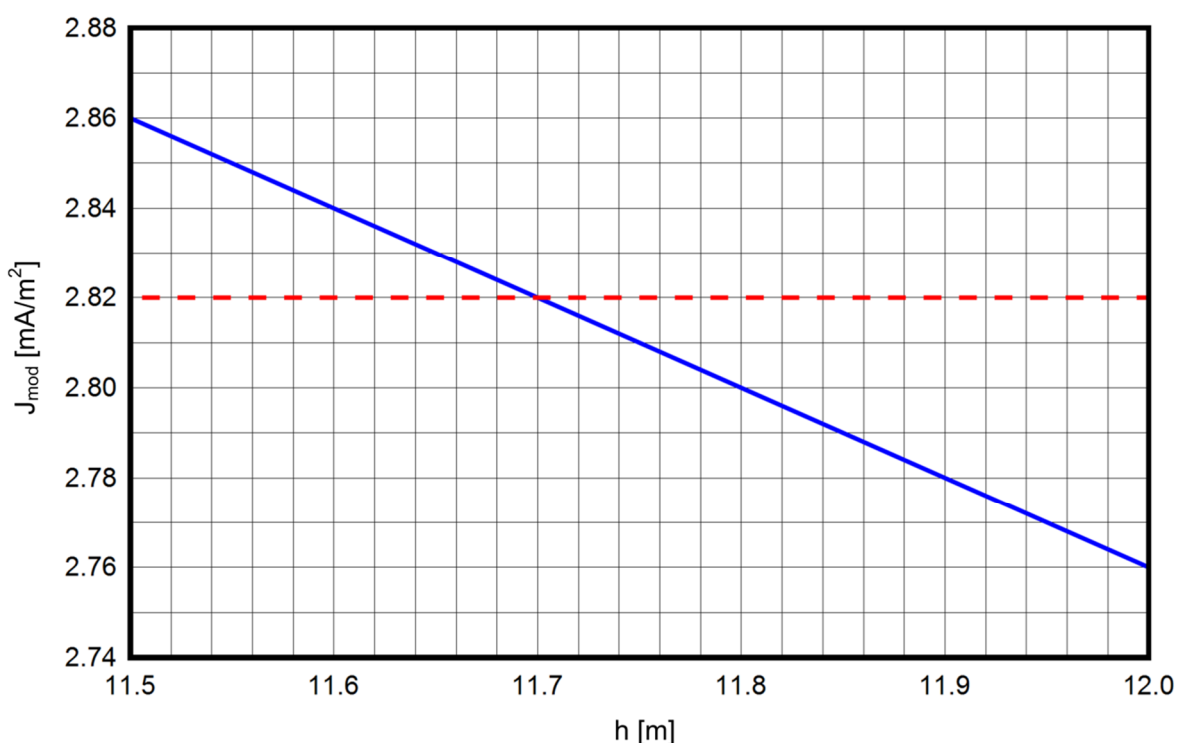
L (mH/km)	G (pS/km)	C (nF/km)	Z _v (Ω)	S _v (MVA)	L (mH/km)	G (pS/km)	C (nF/km)	Z _v (Ω)	S _v (MVA)
0,906	14 621	12,768	267,0	599,6	0,923	14 214	12,412	273,3	585,3
0,887	14 849	12,967	262,1	610,2	0,906	14 417	12,590	268,9	594,9
0,894	14 913	13,023	262,7	609,1	0,907	14 562	12,716	267,7	597,6
0,871	15 118	13,202	257,5	621,2	0,888	14 751	12,881	263,2	607,8
0,867	15 092	13,179	257,2	622,3	0,884	14 730	12,863	262,8	608,7
0,870	15 118	13,202	257,4	621,6	0,889	14 751	12,881	263,4	607,5
Nosný stožár „Donau 1962 typ N“					Nosný stožár „Donau 1962 typ Ns+12“				

Tab. 12 – Výsledky primárních a sekundárních parametrů úseku stávajícího vedení

V (tab. 12) není záměrně uveden parametr R neboli rezistance, a to z toho důvodu, že tento parametr je samozřejmě pro všechny konfigurace stejný. S respektováním činitele teploty a skin efektu se jeho hodnota ustálila na čísle 0,0348 Ω/km (pro vodič v trojsvazku). Postup výpočtu primárních a sekundárních parametrů pro první variantu konfigurace fázových vodičů je prezentován v (příloha č. 7), jak pro standardní nosný stožár, tak i zesílený.

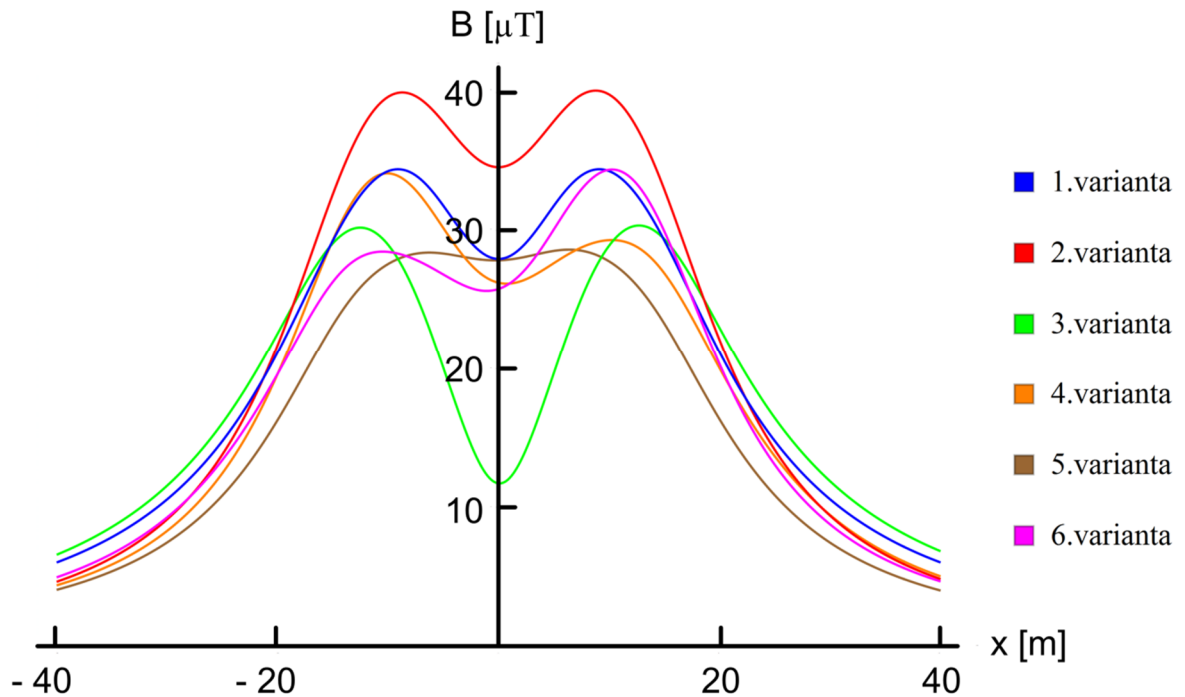
Výpočty intenzity elektrického pole a magnetické indukce byly provedeny ve výšce 1,8 m nad zemí. Spolu s nimi bylo důležité vyhodnotit velikost modifikované indukované proudové hustoty J_{mod} v lidském těle a korigovat tak minimální výšku spodních fázových vodičů nad zemí (přibližně 8 m, viz kapitola „3.1. Všeobecné údaje o vedení“). Jednotlivé vzorce či odvozené vztahy pro určení výše zmíněné indukované proudové hustoty značně překračují rámec studie této práce, z toho důvodu zde nejsou uvedeny. Nicméně si dovoluji odkázat na odpovídající doporučení zpracované Ministerstvem zdravotnictví ČR, podle kterého byl její výpočet realizován. [8] Pro stanovení J_{mod} jsme uvažovali pouze nejhorší možnou variantu sledu fázových vodičů, tzn. symetrickou konfiguraci fází varianty č. 1, a to pouze v případě nosné stožárové konstrukce „Donau 1962 typ N“.

Výsledná korigovaná hodnota minimální výšky spodních fázových vodičů nad zemí stávajícího vedení 2x400 kV typ „Donau“ je přibližně 11,7 m (viz graf č. 1). Tato hodnota minimální výšky pak zaručuje, že nebude překročena indukovaná proudová hustota v lidském těle v žádném místě podél tohoto vedení, což je v souladu s nařízením vlády č. 1/2008 Sb.

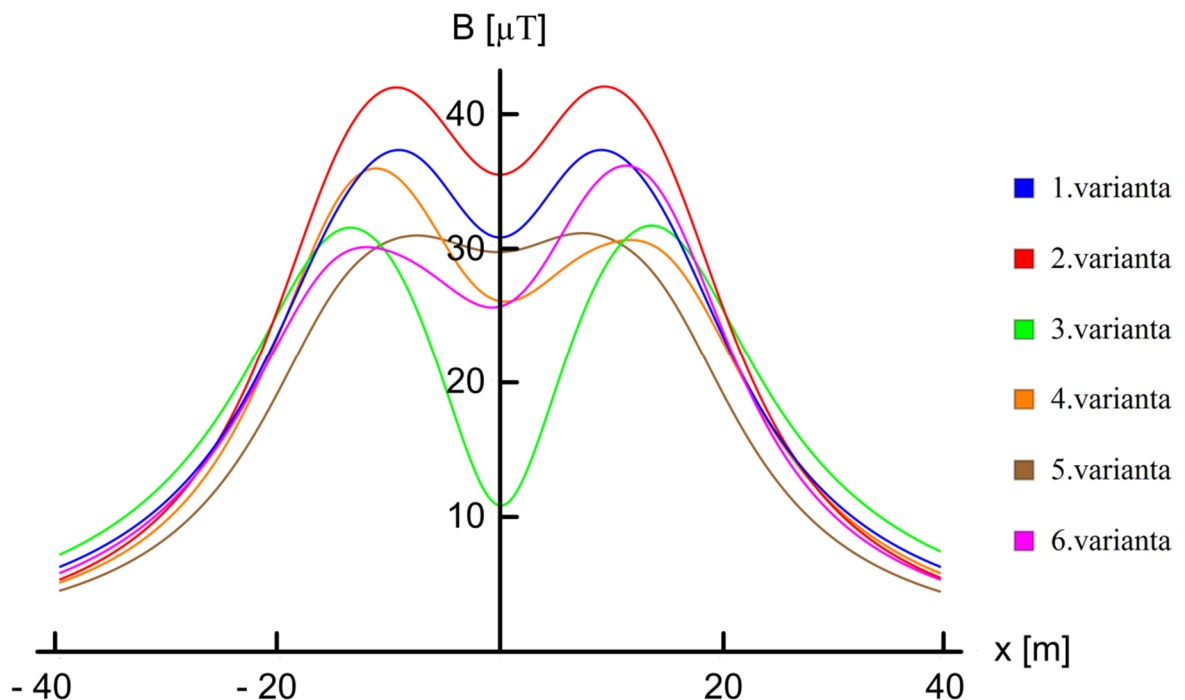


Graf č. 1 – Průběh J_{mod} v závislosti na výšce spodních fázových vodičů nad zemí (AlFe)

Následující čtveřice grafů zobrazuje průběhy intenzity elektrického pole a magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti x od středu stávajícího vedení 2x400 kV typ „Donau“ pro stanovenou korigovanou minimální výšku spodních fázových vodičů nad zemí 11,7 m. Grafy č. 2 a 4 reprezentují elektromagnetické pole pro nosný stožár „Donau 1962 typ N“, grafy č. 3 a 5 pak platí pro jeho zesílenou verzi „typ Ns+12“. Z grafu č. 4 je patrné, že dochází k překročení referenční hodnoty intenzity elektrického pole, tj. 5 kV/m (viz tab. 10). Připouští se ale také překročení této referenční hodnoty elektrické intenzity i magnetické indukce, pokud není zároveň překročena hodnota modifikované indukované proudové hustoty J_{mod} . Problém tedy nastává v případě, že minimální výška spodních fázových vodičů přesahuje zmíněných 11,7 m, což je velice pravděpodobné u tohoto vedení, vzhledem k faktu, že bylo projektováno podle normy ČSN 34 1100 z roku 1964, kde minimální výška spodních fázových vodičů je 8 m, a to bez ohledu na vliv elektromagnetického pole.

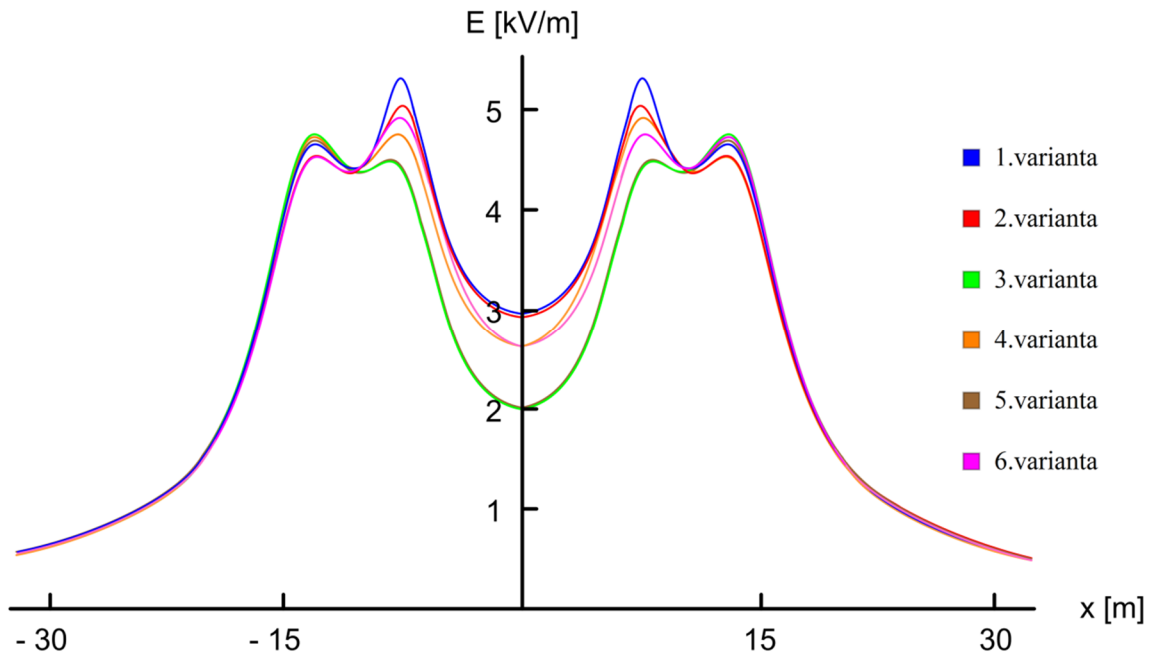


Graf č. 2 – Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ N“ (AlFe)

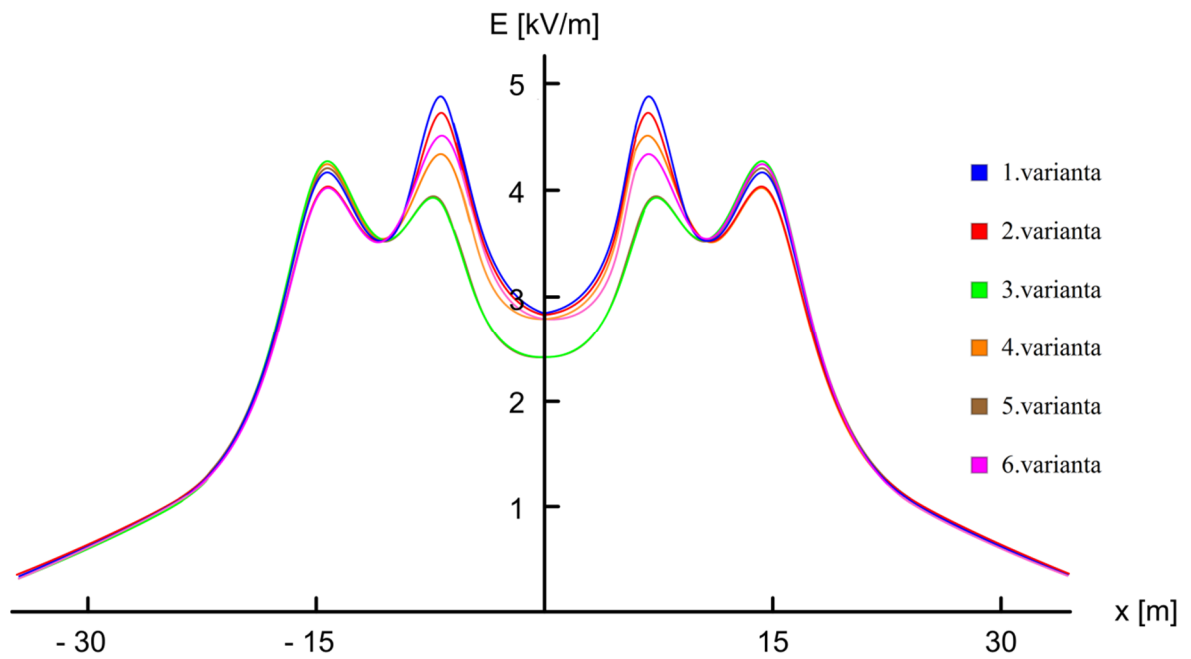


Graf č. 3 – Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ Ns+12“ (AlFe)

Z uvedených grafů vyplývá, že lze nalézt takové uspořádání fází, při kterém jsou ukazatele elektrické intenzity či magnetické indukce značně minimalizovány. Pro stožáry typu „Donau“ se jedná o konfiguraci, kdy blíže osy stožáru jsou fáze prostřídány a ve vodičích nejvíce vzdálených jsou pak fáze stejné. Nepříznivé jsou naopak konfigurace se stejnohlým nebo zrcadlovým rozmístěním fází.



Graf č. 4 – Průběh elektrické intenzity v okolí vedení „Donau 1962 typ N“ (AlFe)



Graf č. 5 – Průběh elektrické intenzity v okolí vedení „Donau 1962 typ Ns+12“ (AlFe)

4. Mechanické parametry venkovních vedení

Tvar křivky vodiče zavěšeného mezi dvěma podpěrnými body je pružná řetězovka. Rovnice této křivky má poměrně komplikovaný tvar a v praxi nemá široké uplatnění. Používá se víceméně pro přesnější výpočty, kde dokáže zohlednit pružnost vodiče, jehož deformace se řídí Hookovým zákonem. Pružnost vodiče způsobí, že se změní jeho délka, která pak samozřejmě ovlivňuje velikost mechanického napětí, a to tím více, čím je vodič kratší.

$$f(u) = \frac{2\sigma_1\sigma_2}{\gamma^2 a^2} \cosh u = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\gamma^2 a^2} + \frac{\sinh^2 u}{u^2} \left(1 + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{uE} \tanh \frac{u}{2}\right)^{-2} \quad (4.1)$$

Výše uvedená rovnice (4.1) je právě rovnice pružné řetězovky. Je zobrazená bez popisu jednotlivých členů, a to z toho důvodu, že nebyl ukázán postup jejího odvození, který je podstatný pro charakterizaci těchto členů. Je nutné si uvědomit, že rovnice pružné řetězovky se od rovnice nepružné řetězovky liší pouze výrazem v závorce. Při uvažování $E = \infty$ se vodič stane absolutně nepružným a rovnice se redukuje na výše zmíněnou rovnici nepružné řetězovky. Vzhledem ke komplexnosti rovnice (4.1) se proto v praxi především využívá rovnice nepružné řetězovky, přičemž na výpočet mechanických poměrů při různých klimatických stavech slouží klasická stavová rovnice. [9]

4.1. Nepružná řetězovka

Při výpočtu nepružné řetězovky se předpokládá rovnoměrné rozdělení tíhy vodiče a přídatného zatížení po celé délce vodiče. Odvození analytického vyjádření tvaru průhybové křivky pak vychází z podmínek mechanické rovnováhy. Vodič se nachází v rovnováze tehdy, je-li vektorový součet sil (součet sil ve směru osy x a y a součet momentů k libovolnému bodu) rovný nule. Z (obr. 12) se zvolí element průhybové křivky délky dl a vyšetří se podmínky rovnováhy. [9]

- **Součet působících sil ve směru osy x se rovná 0, pak platí:**

$$\sum F_x = 0; \quad F_{H1} - F_{H2} = 0; \quad F_{H1} = F_{H2} \quad (4.2)$$

kde F_{H1}, F_{H2} je horizontální síla v bodech 1 a 2 sledované křivky.

Z této podmínky můžeme usoudit, že horizontální složka síly je v každém bodě průhybové křivky stejná.

- **Součet působících sil ve směru osy y se rovná 0, pak platí:**

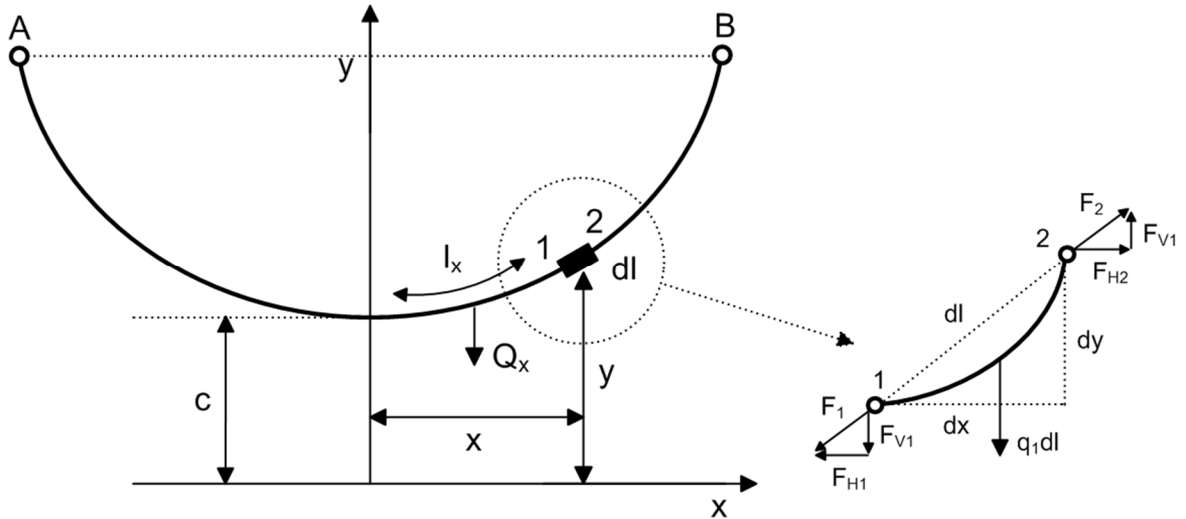
$$\sum F_y = 0; \quad F_{V2} - F_{V1} - q_1 dl = 0; \quad F_{V2} - F_{V1} = dF_V = q_1 dl \quad (4.3)$$

kde F_{V1}, F_{V2} je vertikální síla v bodech 1 a 2 dané křivky,
 q_1 vlastní tíha vodiče.

Z podmínky rovnováhy sil ve směru osy y vyplývá, že vertikální složka síly v daném bodě je rovná tíze vodiče příslušné délky dl . Minimální, nulová, je ve vrcholu (případně též dolu) průhybové křivky, maximální v závěsném bodě.

Po úpravě podmínky (4.3), vydělením dx , dostáváme výraz:

$$\frac{dF_V}{dx} = q_1 \frac{dl}{dx} \quad (4.4)$$



Obr. 12 – Element délky průhybové křivky

Po dosazení za $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}$ podle (obr. 12) do rovnice (4.4) dostaneme:

$$\frac{dF_V}{dx} = q_1 \frac{dl}{dx} = q_1 \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{dx} = q_1 \sqrt{1 + (y')^2} \quad (4.5)$$

- **Momentová podmínka:**

$$\tan \alpha = \frac{F_V}{F_H} = \frac{dy}{dx} \quad \rightarrow \quad F_V dx = F_H dy \quad (4.6)$$

Tato podmínka vyjadřuje rovnost momentů působících na element délky průhybové křivky zavěšeného vodiče.

Po úpravě momentové podmínky (4.6) dostaneme:

$$\frac{dF_V}{dx} = F_H \frac{dy'}{dx} \quad (4.7)$$

Porovnáním vztahů (4.5) a (4.7) získáme:

$$q_1 \sqrt{1 + (y')^2} = F_H \frac{dy'}{dx} \quad (4.8)$$

Po úpravě předešlého vztahu (4.8) provedeme jeho integraci:

$$\int \frac{dy'}{\sqrt{1 + (y')^2}} = \int \frac{q_1}{F_H} dx \quad (4.9)$$

Výsledkem integrace bude následující výraz:

$$y' = \sinh \left[\frac{q_1}{F_H} (x + k_1) \right] + k_2 \quad (4.10)$$

Po dalším integrování dostaneme:

$$y = \frac{F_H}{q_1} \cosh \left[\frac{q_1}{F_H} (x + k_1) \right] + k_2 \quad (4.11)$$

Konečný tvar rovnice průhybové křivky (nepružné řetězovky) je [9]:

$$y = c \cosh \frac{x}{c} \quad (m) \quad (4.12)$$

kde c je parametr řetězovky.

Pokud uvažujeme přetížení z , lze pro parametr c psát:

$$c = \frac{F_H}{(q_1 + q_2)} = \frac{\sigma_H}{\gamma z} \quad (m) \quad (4.13)$$

kde q_2 je tíha přídavného zatížení (např. námrazy),
 γ měrná tíha nezatíženého vodiče,
 z přetížení od námrazy.

V praxi se parametr řetězovky pro používané vodiče venkovního vedení nad 110 kV pohybuje v intervalech od 800 do 1 800 m. Geometricky představuje vzdálenost vrcholu od počátku souřadnicového systému (viz obr. 12).

Po rozvinutí rovnice řetězovky v řadu a s uvažováním jen prvních dvou členů výrazu dostáváme parabolické vyjádření průhybové křivky zavěšeného vodiče [9]:

$$y = c \cosh \frac{x}{c} = c \left(1 + \frac{x^2}{2! c^2} + \frac{x^4}{4! c^4} + \dots \right) = c + \frac{x^2}{2! c^2} \quad (m) \quad (4.14)$$

4.2. Vodorovné pole

Souměrné (vodorovné) pole (obr. 13) je charakterizované tím, že závěsné body A a B vodiče jsou ve stejných výškách a vrchol průhybové křivky leží ve středu rozpětí a (bod D). Potom podle (obr. 13) platí:

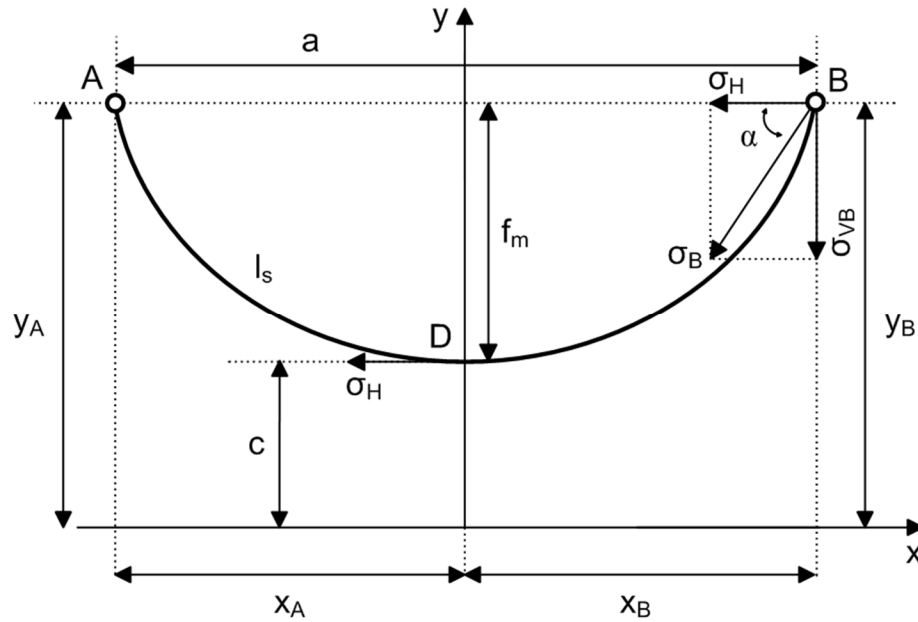
$$x_A = x_B = \frac{a}{2}; \quad y_A = y_B \quad (m) \quad (4.15)$$

V následující části si odvodíme vztahy pro průhyb, délku a mechanické napětí vodiče. [9]

- **Maximální průhyb (f_m)**

Maximální průhyb vodiče nastává při první podmínce v (4.15) a je rovný:

$$f_m = y_B - c = c \cosh \frac{x_B}{c} - c = c \cosh \frac{a}{2c} - c = c \left(\cosh \frac{a}{2c} - 1 \right) \quad (m) \quad (4.16)$$



Obr. 13 – Vodorovné pole

- **Délka vodiče (l_s)**

Délka vodiče při souměrném poli je dána výrazem:

$$l_s = 2c \sinh \frac{a}{2c} \quad (m) \quad (4.17)$$

- **Mechanické napětí ve vodiči (σ)**

Celkové mechanické napětí σ_B v závěsném bodě B (obr. 13) je dané vektorovým součtem horizontální složky mechanického napětí σ_H , která je stejná v každém bodě průhybové křivky a vertikální složky mechanického napětí σ_{VB} , jejíž velikost je dána místem, ve kterém se uvažuje.

Vertikální složka mechanického napětí je minimální, nulová, ve vrcholu průhybové křivky a maximální v závěsném bodě. Je dána tíhou vodiče příslušné délky počítané od vrcholu průhybové křivky. Výsledné mechanické napětí v závěsném bodě je rozhodující pro mechanický výpočet vodiče v případě, že překročí horizontální složku o víc jak 4 % (podmínka normy). Kontrola mechanického napětí v závěsném bodě se stává zbytečná v případě, jakmile jsou závěsné body přibližně ve stejných výškách a maximální průhyb f_m není větší jak 4 % z rozpětí. Při velkých rozpětí, nad 400 m, anebo při velkých výškových rozdílech je potřeba mechanické napětí v závěsném bodě kontrolovat.

Podle (obr. 13) platí pro závěsný bod B:

$$\sigma_B = \frac{\sigma_H}{\cos \alpha} \quad (N \cdot m^2) \quad (4.18)$$

Následně na základě znalosti goniometrických vztahů, postupných úprav a nakonec s použitím výše uvedeného vztahu (4.13), upravíme dále výraz (4.18):

$$\sigma_B = \frac{\sigma_H}{\cos \alpha} = \sigma_H \cosh \frac{a}{2c} = \sigma_H \frac{y_B}{c} = y_B \gamma \cdot z \quad (N \cdot m^2) \quad (4.19)$$

být kladná, rovná nule nebo záporná. Jakmile je $x_A > 0$, potom vrchol průhybové křivky je mezi závěsnými body A a B . Pokud $x_A = 0$, potom nižší závěsný bod leží ve vrcholu řetězovky. V posledním případě, kdy $x_A < 0$, vrchol řetězovky neleží mezi závěsnými body A a B , ale závěsné body leží na stejné straně průhybové křivky.

V následující části si odvodíme vztahy pro průhyb, délku a mechanické napětí vodiče. [9]

- **Maximální průhyb ($f_m^{VP, MP}$)**

Maximální průhyb vodiče se určuje pro tzv. ideální pole velké (spojnice fiktivního bodu A' a závěsného bodu B) a ideální pole malé (spojnice závěsného bodu A a fiktivního bodu B'). Pro maximální průhyb velkého pole pak platí:

$$f_m^{VP} = y_B - c = c \cosh \frac{x_B}{c} - c = c \left(\cosh \frac{x_B}{c} - 1 \right) \quad (m) \quad (4.24)$$

Analogicky maximální průhyb malého pole:

$$f_m^{MP} = y_A - c = c \cosh \frac{x_A}{c} - c = c \left(\cosh \frac{x_A}{c} - 1 \right) \quad (m) \quad (4.25)$$

Kromě průhybů těchto ideálních polí se pro šikmé pole také uvádí i tzv. průhyby charakteristické či viditelné.

- **Charakteristický průhyb (f_k)**

Charakteristický průhyb f_k je definovaný jako délka svislice mezi středem spojnice závěsných bodů a vodičem. Je určen podle vztahu:

$$f_k = f_m \cosh \frac{x_B - x_A}{2c} \quad (m) \quad (4.26)$$

- **Viditelný průhyb (f_v)**

Viditelný průhyb f_v je definovaný jako svislá vzdálenost mezi spojnicí závěsných bodů a tečnou k vodiči rovnoběžnou se spojnicí závěsných bodů:

$$f_v = y_B - y_v - h' \quad (m) \quad (4.27)$$

kde y_B, y_v jsou souřadnice bodů B a v (pro x_B a x_v),
 h' výškový rozdíl h' pro místo viditelného průhybu.

Pro vzdálenost x_v viditelného průhybu od počátku souřadnicové soustavy platí:

$$x_v = c \sinh^{-1} \frac{h}{a} \quad (m) \quad (4.28)$$

Výškový rozdíl h' připadající na místo viditelného průhybu je pak dán výrazem:

$$h' = (x_B - x_v) \frac{h}{a} \quad (m) \quad (4.29)$$

Pro rozpětí do 400 m a úhlu $\varphi < 30^\circ$ je možné ztotožnit charakteristický průhyb s průhybem viditelným, tj. $f_k \approx f_v$.

- **Délka vodiče (l_n)**

Pro délku nesouměrné řetězovky platí rozšířená Pythagorova věta, která říká, že rozdíl čtverců délek nesouměrné a souměrné řetězovky na stejném rozpětí se stejným parametrem se rovná čtverci rozdílu výšek vyšší a nižší podpěry.

$$l_n^2 - l_s^2 = h^2 \quad (m) \quad (4.30)$$

- **Mechanické napětí ve vodiči (σ)**

Při určování celkového mechanického napětí v závěsných bodech A a B platí podobné vztahy jako při souměrném poli s tím rozdílem, že mechanické napětí v závěsných bodech není stejné:

$$\sigma_A = y_A \gamma \cdot z \quad \text{resp.} \quad \sigma_B = y_B \gamma \cdot z \quad (N \cdot m^2) \quad (4.31)$$

Pro tahy ve vodičích platí:

$$F_A = y_A (q_1 + q_2) \quad \text{resp.} \quad F_B = y_B (q_1 + q_2) \quad (N) \quad (4.32)$$

4.4. Stavová rovnice napnutého vodiče

Při změně teplot a přetížení vodiče (větrem nebo námrazou) se mění mechanické napětí v daném vodiči a tím i jeho průhyb. Pro predikci mechanického napětí se velmi často používá klasická stavová rovnice napnutého vodiče. Tato rovnice vyjadřuje vzájemnou závislost mezi mechanickým napětím, teplotou, zatížením a rozpětím. Nicméně neuvažuje přitom s mechanickými podmínkami v sousedním rozpětí. Výpočet se obvykle provádí pro nejnepríznivější případ, který může nastat, tzn. pro takové klimatické podmínky, při kterých vzniká maximální průhyb, tj. nejmenší vzdálenost vodiče od země resp. od křížovaných objektů.

Vodič se při montáži musí napnout na takové mechanické napětí a průhyb, aby při předpokládaných nejnepríznivějších povětrnostních podmínkách nenastalo větší mechanické napětí a průhyb, než jak to povolují předpisy. Pokud se vodiče montují při různých klimatických podmínkách, je důležité sestavit montážní tabulku, ve které se uvádí mechanická namáhání a k tomu příslušné hodnoty průhybů v závislosti na teplotě, a to v intervalu přibližně od -30 °C až do $+40$ °C a pro -5 °C a přetížení námrazou. Montážní tabulka se sestavuje na základě řešení stavové rovnice.

Stavová rovnice je odvozená za předpokladů, že vedení je bez výškových rozdílů (vodorovné pole), s pevnými izolátorovými řetězci a zavěšený vodič má tvar paraboly. Klasickou stavovou rovnicí (4.33) uvedeme bez jednotlivých kroků vedoucí k jejímu výslednému tvaru. Indexem 0 se značí počáteční (základní stav), indexem 1 pak stav montážní neboli hledaný. [9]

$$\sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \left[\frac{\gamma^2 E}{24} \left(\frac{az_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + \alpha E (T_1 - T_0) - \sigma_{H0} \right] = \frac{\gamma^2 E}{24} (az_1)^2 \quad (4.33)$$

kde γ je měrná tíha vodiče,
 E modul pružnosti vodiče,
 T_1, T_0 teplota okolí ve stavu 1 resp. ve stavu 0,
 α součinitel tepelné roztažnosti vodiče,
 z_1, z_0 přetížení vodiče ve stavu 1 resp. 0,
 c_1, c_0 parametr řetězovky ve stavu 1 resp. 0.

Stavová rovnice se používá kromě určení tzv. montážní tabulky i k stanovení dalších dvou údajů, které jsou důležité při návrhu a montáži venkovních vedení. Je to kritické rozpětí a kritická teplota. [10]

- **Kritické rozpětí**

Je takové rozpětí, při kterém je mechanické napětí stejné jako při -5 °C a přetížení. Parametrem je teplota a obvykle se kritické rozpětí určí pro -30 °C . Při této teplotě je hodnota kritického rozpětí maximální.

Kritické rozpětí se určí z klasické rovnice za předpokladu (4.34):

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H0}; \quad T_0 = -5\text{ °C}; \quad z_1 = 1; \quad a = a_{krit} \quad (4.34)$$

Pro zkoumanou teplotu -30 °C má tvar:

$$a_{krit} = \frac{10 \cdot \sigma_{H0}}{\gamma} \sqrt{\frac{6\alpha}{z_0^2 - 1}} \quad (m) \quad (4.35)$$

Při skutečném rozpětí větším jako je vypočítané kritické rozpětí (4.35), je mechanické napětí při zvolené teplotě menší jako při -5 °C a přetížení a naopak.

- **Kritická teplota**

Je definovaná jako teplota, při které je stejný průhyb jako při -5 °C a přetížení. Je stejně důležitá při návrhu a výstavbě venkovního vedení jako kritické rozpětí. Vyžaduje se, aby vodič ani v nejnepříznivějším případě v bezporuchovém provozu (tj. -5 °C a přetížení resp. $+40\text{ °C}$) jako i v některých speciálních případech (nerovnoměrný námrazek, přetržení vodiče) nezasahoval do ochranných pásem křížovaných objektů či země. K tomu slouží určení kritické teploty.

Kritická teplota se určí na základě rovnosti průhybů při dané teplotě a -5 °C a námrazku, spolu s předpokladem následujících podmínek (4.36):

$$\sigma_{H1} = \sigma_{Hkrit}; \quad T_1 = T_{krit}; \quad T_0 = -5\text{ °C}; \quad z_1 = 1; \quad (4.36)$$

Pro výsledný tvar kritické teploty platí:

$$T_{krit} = \frac{1}{\alpha E} \left(\sigma_{H0} - \frac{\sigma_{H0}}{z_0} \right) - 5 \quad (\text{°C}) \quad (4.37)$$

Při kritické teplotě větší jako $+40\text{ °C}$ je maximální průhyb při -5 °C a přetížení a naopak. Mimo jiné ze vztahu (4.37) také vyplývá, že kritická teplota nezávisí na velikosti rozpětí.

Pro vedení s rozdílnými rozpětími a na závěsných izolátorových řetězcích je možné použít upravenou klasickou stavovou rovnici anebo použít grafickou metodu, která je velmi pracná a nepřesná. Z toho důvodu uvedeme pouze první zmíněnou variantu, tedy upravenou klasickou stavovou rovnici (4.38), která platí za předpokladu, že kotevní izolátorové řetězce na výstužných stožárech jsou pevné (ideální případ), čímž se celková délka kotevního úseku nemění. [9]

$$\sigma_{Hn} - \frac{a_p^2 (\gamma z_n)^2 E}{24 \sigma_{Hn}^2} = \sigma_{H0} - \frac{a_p^2 (\gamma z_0)^2 E}{24 \sigma_{H0}^2} - \alpha E (T_n - T_0) \quad (4.38)$$

Jedná se o všeobecnou rovnici stavu vodiče, ve které je namísto skutečného rozpětí udané průměrné rozpětí a_p kotevního pole:

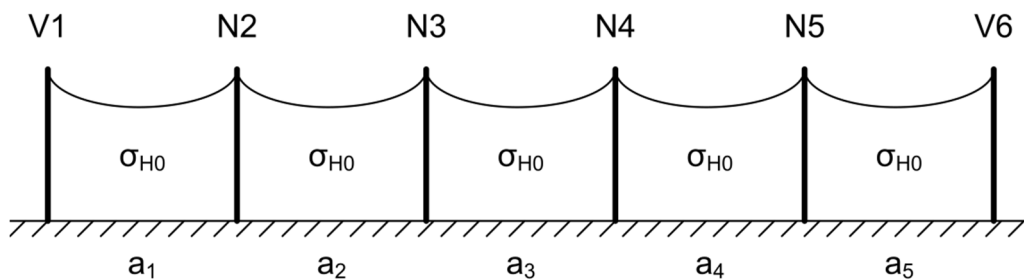
$$a_p = \sqrt{\frac{a_1^3 + a_2^3 + a_3^3 + \dots + a_n^3}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}} \quad (m) \quad (4.39)$$

Z rovnice (4.38) je možno vypočítat novou hodnotu mechanického napětí σ_n ve vodiči (které bude stejné v celém kotevním úseku) při změně teploty a zároveň příslušné průhyby vodičů jednotlivých rozpětí.

4.5. Nesymetrický stav zatížení vodičů venkovního vedení

Kromě symetrických stavů na venkovních vedení je potřeba se zabývat i stavy nesymetrickými, které vyvolávají nesymetrické (rozdílné) mechanické napětí v jednotlivých rozpětích kotevního pole.

Symetrický stav kotevního pole znamená, že ve všech rozpětích je stejná horizontální složka mechanického napětí. V takovém případě jsou izolátorové řetězce na nosných stožárech ve svislé poloze. Předpokládá se, že takovýto stav nastane při -5°C a přetížení, kdy vodič venkovního vedení je napnutý na stejné mechanické napětí v jednotlivých rozpětích kotevního pole, a to na dovolené mechanické napětí (obr. 15). Další symetrický stav je při $+40^\circ\text{C}$.



Obr. 15 – Symetrický stav v kotevním poli

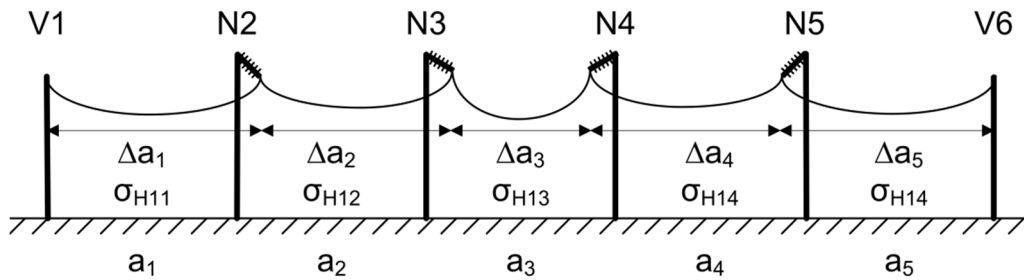
V ostatních případech jde vždy o stavy nesymetrické, kdy dochází vlivem rozdílnosti horizontálních složek mechanických napětí v sousedních rozpětích k vychylování izolátorových řetězců z jejich svislé polohy a k namáhání stožárů nejen vertikálními, ale i horizontálními silami.

Při nesymetrickém stavu vlivem změny teplot v případě rozdílných délek rozpětí a výškových rozdílů závěsných bodů rozdíly mechanických napětí v jednotlivých rozpětích nejsou příliš velké (při dodržení maximálně 20 % rozdílu délek sousedních rozpětí), podobně jako i výchylky izolátorových řetězců. Tyto stavy je možno řešit klasickou stavovou rovnicí, danou vztahem (4.33). [11]

K případům, které způsobují největší nesymetrii je nerovnoměrná námraza na vedení a přetrhnutí vodiče.

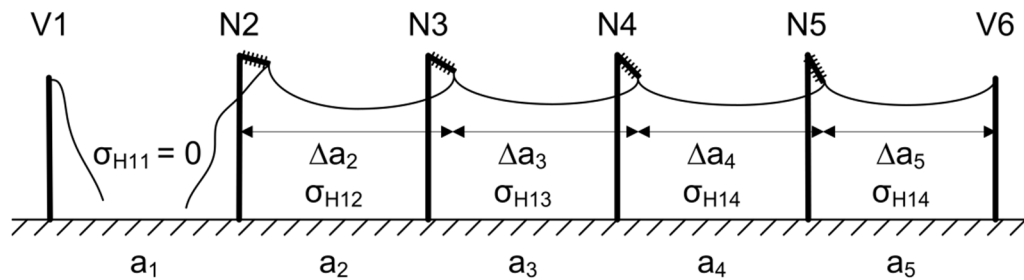
Nejnepříznivější případ nerovnoměrné námrazy nastane tehdy, jakmile námraza vznikne v prostředním poli. Je zřejmé, že následkem této námrazy bude v daném rozpětí větší mechanické napětí jako v jiných rozpětích, přitom mechanické napětí v ostatních rozpětích klesá směrem od rozpětí s námrazou. V rozpětí, v kterém je námraza, se zároveň i zvětší

průhyb vodiče. Z toho důvodu může dojít k nebezpečnému přiblížení vodičů ke křížovým objektům, zemi anebo jiným vodičům (obr. 16). [11]



Obr. 16 – Nerovnoměrná námraza na vodičích venkovního vedení

K přetrhnutí vodiče může dojít při mechanickém poškození, propálení anebo při vytáhnutí vodiče ze spojky. Přetrhnutí vodiče způsobuje značné rozdíly horizontálních tahů v jednotlivých rozpětích. Zatímco před přetrhnutím byly nosné stožáry namáhané jen vertikálními silami od tíhy vodičů s námrazou anebo bez, teď jsou namáhané i horizontálními silami, které mohou způsobit poškození stožárů. V neposlední řadě může nastat nebezpečné přiblížení vodičů ke křížovaným objektům, nejvíce v rozpětí sousedícím s rozpětím, v kterém se přetrhl vodič (kvůli podstatnému snížení mechanického napětí v přetrhnutém vodiči). [11]



Obr. 17 – Přetrhnutí vodiče v prvním kotevním poli

Pro řešení nesymetrických stavů na venkovním vedení se uplatňují dva výpočtové postupy. První výpočtový postup řeší úlohu s odvozenou klasickou stavovou rovnicí, druhý výpočtový postup předpokládá odvození nových vztahů a výrazů pro řešení nesymetrických stavů na venkovním vedení. My se zaměříme pouze na první výpočtový postup, který je svým způsobem časově náročný, ale zato mnohem jednodušší.

4.6. Řešení nesymetrických stavů klasickou stavovou rovnicí

Změny rozpětí následkem nerovnoměrné námrazy se určí ze stavové rovnice, kterou je možno napsat v následujícím tvaru pro i -té rozpětí:

$$a_i^3 \frac{(\gamma z_{1i})^2}{24\sigma_{H1i}^2} - a_i^3 \frac{(\gamma z_0)^2}{24\sigma_{H0}^2} = \alpha l_{0i}(T_1 - T_0) + \frac{l_{0i}}{E}(\sigma_{H1i} - \sigma_{H0}) \quad (4.40)$$

Stav označený indexem 1 je stav s přídatným zatížením (nesymetrický stav), stav hledaný a stav označený indexem 0 je stav počáteční, symetrický, tj. při -5°C a námraze na celém vedení, čemuž odpovídá dovolené mechanické napětí σ_{H0} (pojem normy).

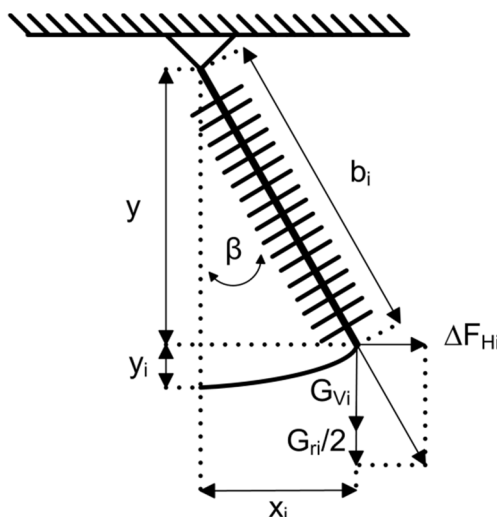
Jakmile do výše uvedené rovnice dosadíme za $l_{0i} = a_i$ a $T_1 = T_0$ (z toho důvodu, že při námraze se uvažuje s teplotou -5°C), dostaneme vztah pro změnu rozpětí [11]:

$$\Delta a_i = (\sigma_{H1i} - \sigma_{H0}) \frac{a_i}{E} + \frac{a_i^3 \gamma^2}{24} \left(\frac{z_0^2}{\sigma_{H0}^2} - \frac{z_{1i}^2}{\sigma_{H1i}^2} \right) \quad (m) \quad (4.41)$$

Pokud počítáme změnu rozpětí, v které není námraza, tak $z_{1i} = 1$, pokud námraza je, potom $z_{1i} = z_0$. Všeobecně může být, že $z_{1i} \neq z_0$.

Prodloužení nebo zkrácení rozpětí o Δa_i je závislé od vychýlení izolátorových řetězců x_i , tudíž od rozdílu horizontálních tahů ΔF_{Hi} resp. od rozdílu mechanických napětí $\Delta \sigma_{Hi}$ na daném podpěrném bodě. [11]

Pro i -tý závěsný bod mezi dvěma rozpětími a_{i-1} a a_i platí (viz obr. 18):



Obr. 18 – Rovnováha izolátorového řetězce

Vertikální složka síly je dána tíhou vodiče příslušné délky a poloviční tíhou izolátorového řetězce:

$$F_{Vi} = G_{Vi} + \frac{G_{ri}}{2} \quad (N) \quad (4.42)$$

Z podobnosti trojúhelníků vyplývá:

$$\frac{\Delta F_{Hi}}{F_{Vi}} = \frac{x_i}{y} \quad (4.43)$$

Po další úpravě dostaneme vztah pro závislost změny horizontálního tahu od posunu závěsného bodu vodiče:

$$\Delta F_{Hi} = F_{Vi} \frac{x_i}{\sqrt{b_i^2 - x_i^2}} \quad (N) \quad (4.44)$$

Použitím vztahu pro výpočet vertikální síly působící na závěsný bod při výpočtu tzv. utopeného stožáru dostaneme výraz pro výpočet rozdílu horizontálních tahů [11]:

$$\Delta F_{Hi} = \left[\frac{1}{2} \left(a_{i-1} \frac{z_{1i-1}}{q_1} + a_i \frac{z_{1i}}{q_1} \right) + G_{ri} \pm F_{H0} \left(\frac{h_{i-1}}{a_{i-1}} \pm \frac{h_i}{a_i} \right) \right] \frac{x_i}{\sqrt{b_i^2 - x_i^2}} \quad (N) \quad (4.45)$$

Po vydělení rovnice (4.40) průřezem vodiče S získáme vztah pro změnu horizontálního napětí $\Delta\sigma_{Hi}$.

Při výpočtu je třeba dbát na správné určení znaménka + nebo - před výškovými rozdíly h_{i-1} resp. h_i . Pro vyšší závěsný bod se udává kladné znaménko, pro nižší závěsný bod záporné. Potom podle toho do vztahu (4.45) je potřebné zadat výškové rozdíly se znaménky tímto způsobem.

Jednotlivé posuvy závěsných bodů na nosných stožárech se určují ze vztahu:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta a_i \quad (m) \quad (4.46)$$

Výpočtový postup dále předpokládá, že posuvy na izolátorových řetězcích na výstužných stožárech jsou rovny nule.

Celkový postup výpočtu je následující, nejprve se zvolí mechanické napětí v prvním rozpětí σ_{H11} , vypočítá se změna tohoto rozpětí Δa_1 , pak se určí výchylka závěsného bodu na druhém stožáru x_2 , vypočítá se rozdíl mechanického napětí $\Delta\sigma_{H2}$ mezi prvním a druhým rozpětím a stanoví se mechanické napětí v druhém rozpětí σ_{H12} . Dále se postupuje stejně jako po zvolení napětí v prvním rozpětí σ_{H11} . Výpočet je správný v tom případě, že posun závěsného bodu na druhém výstužném stožáru je rovný nule. [11]

Jestliže podmínka není splněna, musí se zvolit nové mechanické napětí v prvním rozpětí σ_{H11} a výpočet je nutné opakovat.

5. Mechanické parametry úseku stávajícího vedení

V této kapitole se zaměříme na mechanický výpočet naší případové studie, tzn. úseku stávajícího vedení V412/413. Máme k dispozici vytyčenou trasu tohoto vedení již převedenou do podélného profilu v daném měřítku (viz příloha č. 10). V trase jsou vyznačena přesná místa, v kterých stojí stožáry, ať už kotevní či nosné. V prostoru trasy jsou též zachycené meze, cesty, křižovatky, vedení sdělovací i silové, budovy, vodní toky (řeky, potoky), hranice kultur, lesy i ostatní menší porosty. Na profilu jsou v místě křižovatek vymezené prostory, do kterých vodič nesmí zasahovat ani při největším průhybu a někdy ani při námraze jen v poli křižovatky. Rohové stožáry jsou na profilu výrazně vyznačené s úhlem lomu a profil se na těchto místech přeruší. Kromě nárysu se zhotovuje i půdorys, kde dole pod profilem mají být zakreslené všechny křižovatky (sdělovací a silové vedení, cesty, železnice i jiné objekty). Trasa se mimo jiné zakresluje i do katastrálních map.

V profilu je dále zpracované kromě rozmístění stožárů i jejich rozdělení a určení jednotlivých typů. U každého stožáru se do profilu vepisuje jeho pořadové číslo (čísla na sebe navazují od samotného začátku vedení), typ stožáru, druh izolátorového závěsu a délky jednotlivých rozpětí. Rozmístění a rozdělení stožárů má potom vliv na křižovatky - prostory, do kterých vodič nesmí zasahovat ani při největším průhybu. Tyto prostory nejsou dány pouze obrysem objektu, ale i ochrannými vzdálenostmi, které vyžaduje příslušná norma.

Normy jsou prakticky nejdůležitějším aspektem pro výpočet mechanických parametrů vedení. Co se naší případové studie týče, bylo stávající vedení V412/413 projektováno podle normy ČSN 34 1100/64. V této normě jsou definované nejkratší možné vzdušné vzdálenosti požadované na zabránění výboje mezi fázovými vodiči a objekty na potenciálu země při přepětí. Tyto vzdálenosti mohou být vnitřní, jakmile se berou v úvahu nejkratší možné vzdálenosti mezi vodiči a konstrukcí stožáru, anebo vnější, pokud se počítá s nejkratší vzdáleností mezi vodičem a objektem. Hodnoty vnějších minimálních vzdáleností dané normou ČSN 34 1100/64 jsou přehledně uvedené v tabulce níže (tab. 13).

		Běžný profil země	Křížení s komunikací	Křížení s vedením*
Min. výška (pro C_{+80})	(m)	8,03	9,03	4,03
Min. výška (pro C_{NS})	(m)	Ø kontrola	8,03	2,80

Pozn.: Křížení s vedením* nezávisí na napěťové hladině elektrického vedení

Tab. 13 – Minimální vzdálenosti od země a křižovaných objektů (ČSN 34 1100/64)

V následující části provedeme „kontrolní“ výpočet původního mechanického návrhu pro zadané klimatické podmínky, sestavíme montážní tabulku pro střední kotevní rozpětí a určíme průhyby v jednotlivých polích kotevního úseku zadaného vedení. Výsledné informace nám poslouží jako podklad pro porovnání a především zhodnocení s variantou po rekonstrukci, tzn. vedení s již implementovanými ACCC vodiči.

5.1. Klimatické podmínky pro výpočet mechaniky vodičů

Na venkovní vedení působí svými účinky větry, vichřice, bouřky, blesky, námrazy, změny teplot, chemické účinky, ovzduší, nadmořská výška. Protože klimatické poměry jsou v každém státu rozdílné, je i stylizace klimatických podmínek v různých předpisech různá. Jednotlivé krajiny mají klimatické podmínky mechanického výpočtu vodičů dané ve svých

předpisech a normách. Je nutné dodat, že vliv počasí se uplatňuje na základě dlouhodobých meteorologických pozorování a provozních zkušeností na již postavených vedení.

Údaje potřebné při návrhu venkovního vedení jsou maximální a minimální teplota, vítr, námrazy, bouřky a současné působení několika předchozích jevů (teplota a vítr, teplota a námraza atd.). Ani při jedné klimatické podmínce nesmí být překročeny dovolené mechanické napětí ve vodiči. Uvažuje se s horizontální složkou mechanického napětí, které je definované ve vrcholu průhybové křivky. Pouze tehdy je-li v závěsném bodě vodiče výsledné mechanické napětí o 4 % větší jako ve vrcholu průhybové křivky, je nezbytné s ním uvažovat. Tento případ nastává při velkých rozpětí a velkých převýšení závěsných bodů.

Podle normy ČSN 34 1100/64 pak provedeme kontrolu vedení při těchto stavech počasí:

- -30 °C, bezvětří, bez námrazy;
- -5 °C, vítr, bez námrazy;
- -5 °C, bezvětří, normální námraza;
- -5 °C, bezvětří, zvětšená námraza;
- +40 °C, bezvětří.

Ve všech uvedených návrhových situacích se pod uvedenou teplotou rozumí teplota vodiče. To se týká i poslední návrhové situace (+40 °C a bezvětří), u které se dodává, že pokud je trvalé proudové zatížení větší než 80 % proudové zatížitelnosti, uvažuje se též oteplení vodiče proudem, a to teplota nejméně +60 °C. Pro tento stav se pak počítá maximální průhyb. V našem případě jsme počítali až s teplotou +80 °C, pro ni je také v podélném profilu vedení zakreslený průhyb spolu s uvedeným parametrem c_{+80} (viz příloha č. 10).

Pro uzemňovací lana a jiné vodiče, nepřenášejících provozní proud, je nejvyšší návrhová teplota vodiče +40 °C. Dále při křížování elektrických vedení se při kontrole vzdáleností mezi vodiči obou vedení za podmínek bezvětří předpokládá nejvyšší návrhová teplota vodičů horního vedení a teplota vodičů spodního vedení +40 °C.

Pro všechny návrhové situace nesmí mechanické namáhání vodičů (řázových i zemnicích) překročit jejich dovolené hodnoty namáhání. Pro hliníková lana s ocelovou duší platí, že dovolené mechanické namáhání dosahuje 38 % z pevnosti lana. Výjimku tvoří poslední návrhová situace (-5 °C, bezvětří, zvětšená námraza), kde musí být splněna podmínka, že mechanické namáhání vodiče nepřesáhne 85 % z pevnosti lana. Spolu s dodržáním mechanického namáhání vodičů musí být samozřejmě dodrženy i minimální vzdálenosti vodičů od země, případně křížovaných objektů.

Mechanický výpočet pro navržené nejnejpříznivější případy se provede pomocí upravené stavové rovnice pro střední kotevní rozpětí (4.38). Stavová rovnice vodiče venkovního vedení, jak již bylo uvedeno, vyjadřuje závislost mechanického napětí na teplotě, zatížení (námraza, vítr) a rozpětí. Vstupy pro výpočet stavové rovnice jsou shrnuty níže v (tab. 14).

K těmto vstupům zbývá ještě určit přetížení z , a to při normálním námrazku, zvětšeném námrazku a nakonec při působení větru. Výpočet přetížení při daných klimatických podmínkách je realizován v souladu se zmíněnou normou ČSN 34 1100/64 (II. větrová oblast). Je naprosto zbytečné demonstrovat výpočty normálního či zvětšeného námrazku a dynamického tlaku větru podle normy staré více jak padesát let, proto jsme si v našem případě ulehčili výpočet tím, že jsme získali zadanou hmotnosti normálního a zvětšeného námrazku společně s dynamickým tlakem větru, který působí kolmo na daný vodič v příslušné větrové oblasti. Tyto hodnoty jsou pak prezentovány v závěru tabulky (tab. 14).

Vstupní údaje	Jednotka	Hodnota	
Průměr (d)	(mm)	26,50	Parametry lana 350 AlFe 6
Průřez (S)	(mm ²)	410,76	
Hmotnost (m)	(kg.m ⁻¹)	1,4726	
Tepl. souč. (α)	(K ⁻¹)	18,85E-06	
Měrná tíha (γ)	(N.cm ⁻³)	0,03516	
Modul pruž. (E)	(MPa)	74 639	
Dov. nam. (σ _{Dov})	(MPa)	111,48	
Základní nam. (σ)	(MPa)	88,37	
Pevnost (t _p)	(kN)	120,50	
<hr/>			
Hmotnost NN (q _{NN})	(kg.m ⁻¹)	1,019	ČSN 34 1100 Klimat. stavy
Hmotnost ZN (q _{ZN})	(kg.m ⁻¹)	2,547	
Zatížení větrem (W)	(N.m ⁻¹)	13,614	

Tab. 14 – Vstupní údaje pro výpočet stavové rovnice

Všechny uvedené vstupy byly zadány do stavové rovnice, jejíž výpočet je realizován pomocí softwaru Wolfram Mathematica. Výpočtový kód je také součástí elektronické přílohy diplomové práce. Cílem výpočtu je jednak kontrola výsledných hodnot případové studie s firemním softwarem společnosti Elektrotrans a.s., jednak porovnání s variantou případové studie po její rekonstrukci, kde nám tyto výsledné hodnoty poslouží jako podklad.

		-30 °C	-5 °C + vítr	-5 °C + NN	-5 °C + ZN	+80 °C
Horizontalní mech. namáhání	(MPa)	63,58	74,61	88,37	129,04	44,02
Celkové mech. namáhání	(MPa)	63,90	75,12	89,03	130,21	44,48

Tab. 15 – Vypočítané hodnoty mechanického namáhání pro zadané klimatické podmínky

Z výsledků mechanického namáhání příslušného AlFe lana (tab. 15) je patrné, že nedošlo k překročení dovoleného mechanického namáhání v žádné návrhové situaci. Zároveň také nedochází k porušení minimální vzdálenosti vodičů od země podle předpisů původní normy ČSN 34 1100/64. Kontrola minimální výšky proběhla vizuální formou, kdy byl terén v podélném profilu kotevního úseku navýšen o 8 m podél celého vedení. V případě, že by došlo k průniku tohoto „fiktivního“ terénu s fázovými vodiči, pak by byla porušena i minimální výška spodních fázových vodičů. Výjimku tvoří křížované objekty, kde se kontrola neprovádí pouze pro parametr c_{+80} , ale též pro nesymetrické stavy. Z toho důvodu v místech, kde jsou situované křížovatky, se pro dané kotevní pole provede navíc kontrola dodržení minimálních vzdáleností nad křížovaným objektem pomocí nerovnoměrné námrazy, kdy námrazek umístíme pouze do konkrétního pole s křížovatkou. Podobně jako v případě minimálních vzdáleností od země i zde proběhne vizuální kontrola podobným způsobem v podélném profilu vedení.

5.2. Montážní tabulka

Vodič se při montáži musí napnout na takové mechanické napětí a takový průhyb, aby i při předpokládaných nejnepríznivějších povětrnostních podmínkách nenastalo větší mechanické napětí a průhyb, než jak to povolují předpisy. Jelikož se vodiče montují při různých klimatických podmínkách, je potřeba sestavit montážní tabulku, v které jsou uvedené mechanické namáhání a k tomu příslušné hodnoty průhybů v závislosti na teplotě, a to v intervalu teplot od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetížení námrazou. Montážní tabulka se sestavuje na základě řešení stavové rovnice.

V následující části vypočítáme hodnoty mechanického namáhání pro montážní tabulku v požadovaném rozsahu teplot, rozsah teplot navýšíme až do teploty $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tab. 16). Zároveň tabulku doplníme o maximální průhyby při těchto teplotách. Výpočtový kód montážní tabulky je opět součástí elektronické přílohy diplomové práce.

Teplota ($^{\circ}\text{C}$)		-30	-25	-20	-15	-10	-5	-5*	0	5
σ_H	(MPa)	63,58	62,19	60,87	59,61	58,42	57,28	88,37	56,20	55,17
c	(m)	1 808	1 768	1 731	1 695	1 661	1 629	1486	1 598	1 569
.....										
Teplota ($^{\circ}\text{C}$)		10	15	20	25	30	35	40	80	110
σ_H	(MPa)	54,19	53,25	52,35	51,49	50,67	49,88	49,12	44,02	41,03
c	(m)	1 541	1 514	1 489	1 464	1 441	1 418	1 397	1 252	1 167

Pozn.: -5* představuje stav přetížení vodiče námrazou

Tab. 16 – Montážní tabulka pro střední rozpětí kotevního pole

Na základě znalosti parametru c jsme dále schopni stanovit maximální průhyb podle vztahu (4.16). Maximální průhyb je pak vyhodnocen pro jednotlivá pole celého kotevního úseku s tím, že se omezíme pouze na zásadní teploty tj. $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, -5°C a NN, $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a především $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viz tab. 17 resp. 18). Kompletní seznam průhybů všech kotevních polí, a to v celém rozsahu teplot, je k nahlédnutí prostřednictvím zmíněného výpočtového kódu montážní tabulky.

Teplota ($^{\circ}\text{C}$)		-30	-5	-5*	40	80
Rozpětí	1. 350,0 m	8,48	9,41	10,32	10,98	12,26
	2. 348,2 m	8,39	9,31	10,21	10,87	12,13
	3. 351,8 m	8,56	9,51	10,43	11,09	12,38
	4. 350,7 m	8,51	9,45	10,36	11,02	12,30
	5. 330,1 m	7,53	8,37	9,18	9,76	10,89
	6. 352,6 m	8,60	9,55	10,47	11,14	12,44
	7. 242,2 m	4,06	4,50	4,94	5,25	5,86
		Průhyb (m)				

Pozn.: -5* představuje stav přetížení vodiče námrazou

Tab. 17 – Průhyby v jednotlivých rozpětích kotevního úseku (rozpětí č. 1 až 7)

Teplota (°C)		-30	-5	-5*	40	80
Rozpětí	8. 374,8 m	9,72	10,79	11,83	12,59	14,06
	9. 538,3 m	20,07	22,29	24,45	26,01	29,05
	10. 308,1 m	6,57	7,29	7,99	8,50	9,49
	11. 298,8 m	6,18	6,86	7,52	8,0	8,93
	12. 200,7 m	2,79	3,09	3,99	3,61	4,03
	13. 318,6 m	7,02	7,80	8,55	9,09	10,15
		Průhyb (m)				

Pozn.: -5* představuje stav přetížení vodiče námrazou

Tab. 18 – Průhyby v jednotlivých rozpětích kotevního úseku (rozpětí č. 8 až 13)

5.3. Řešení nesymetrických stavů v poli křižovatky

Kromě symetrických stavů se na venkovním vedení vyskytují i stavy nesymetrické, které vyvolávají nesymetrické (rozdílné) mechanické napětí v jednotlivých rozpětích kotevního úseku. Následkem toho dochází k vychylování izolátorových řetězců z jejich svislé polohy a tím i k namáhání nosných stožárů nejen vertikálními, ale i horizontálními silami. K případům, které způsobují největší nesymetrii, patří nerovnoměrná námraza na vedení a přetrhnutí vodiče. V obou situacích může dojít k nebezpečnému přiblížení vodičů ke křižovaným objektům, zemi anebo jiným vodičům.

		6. pole	8. pole	12. pole	13. pole
c_{NS} (L/P)	(m)	1 069/1 069	1 058/1 058	936/935	1 070/1 068
f_{NS} (L/P)	(m)	14,57/14,57	16,64/16,64	5,38/5,39	11,88/11,90
f_{+40}	(m)	11,14	12,59	3,61	9,09
f_{+80}	(m)	12,44	14,06	4,03	10,15

Tab. 19 – Vyhodnocení nesymetrických stavů v polích křižovatek

Výpočet nesymetrických stavů je proveden pouze pro pole křižovatek, tzn. pole č. 6, 8, 12 a 13 (tab. 19). V těchto polích dochází ke křižování se silnicemi 2. třídy, vedením vn 22 kV a vedením V302 110 kV. Vyhodnocení se realizuje pomocí firemního softwaru společnosti Elektrotrans a.s., výsledek je poté zakreslen do podélného profilu pro vizuální kontrolu dodržení minimálních vzdáleností (příloha č. 10). Na rozdíl od symetrických stavů na vedení je u nesymetrických stavů nezbytné respektovat rozdílné úhly lomů kotevních stožárů. Ty pak komplikují samotný mechanický výpočet, jelikož je potřeba vyhodnocovat mechanické namáhání fázového vodiče jak na kraji konzole levé, tak na kraji konzole pravé (L/P). Důvodem je fakt, že natočením kotevních stožárů se zvětšuje vodorovná vzdálenost závěsných bodů vodiče na jedné konzole a naopak zmenšuje na konzole druhé. V (tab. 19) mimo jiné uvádíme i hodnoty pro f_{NS} , f_{+40} , f_{+80} , jež mají víceméně relativní charakter, protože nepředstavují skutečnou velikost průhybu čistě nad křižovaným objektem, ale maximální průhyb daného pole při zadaných klimatických podmínkách.

6. Používané typy vodičů

Vodiče a lana jsou funkčně nejdůležitější částí venkovního vedení a i po ekonomické stránce představují rozhodující složku celého vedení. Volba vodičů a lan působí nejen na náklady vedení a na konstrukci stožárů, ale i na jejich provozní bezpečnost, protože přetrhnutí vodiče způsobuje přerušení dodávky elektrické energie s dalšími následky. Vodiče rozhodují o ztrátách elektrické energie, úbytcích napětí a rušících vlivech. Jelikož jsou vodiče vystavené různým klimatickým vlivům jako větru, dešti, námraze, změnám teploty, chemickým vlivům atd., jsou požadavky na ně kladené také různé a často i protichůdné.

Pro venkovní vedení se jako vodiče používají dráty, lana či závěsné kabely. Použití drátů a závěsných kabelů pro venkovní vedení je velmi omezené, nejvíce se používají v rozvodech *nn* až *vn*. Naproti tomu lana jsou mnohem používanější a také výhodnější v porovnání s nimi. Jsou ohebnější a bezpečnější co se provozu týče. Větší provozní bezpečnost je zajištěna především tím, že lana mají rovnoměrnější konstrukci jednotlivých tenčích drátů a také proto, že vztahy ve vodičích jsou lépe přenášeny lany než dráty. U drátů může jedna materiálová chyba způsobit znehodnocení celého vodiče, zatímco u lan porucha, případně přetrhnutí jednoho drátu neznehodnotí celý vodič i s tím, že namáhání ostatních vodičů se zvýší.

V současné době se jako materiál pro lanové vodiče nejvíce používá kombinace ocelové duše s hliníkovým opletením. Šíře se začínají také uplatňovat kromě čistého elektrochemického hliníku i jeho slitiny, které mají v porovnání s ním lepší mechanické vlastnosti. Nejčastější slitina hliníku, která se používá pro venkovní vedení je Aldrey (Al 98,6 %, Mg 0,5 %, Si 0,5 %, Fe 0,4 %), případně slitina Al-Mg-Si s přísadami Cu, Mn, Ti a V. V další části se zaměříme na vlastnosti a použití lanových vodičů pro venkovní vedení uvedeného složení. Tyto lanové vodiče dále roztřídíme do tří kategorií - klasické vodiče, kompaktní vodiče a speciální neboli také vysokoteplotní vodiče. [11]

6.1. Klasické vodiče

Klasické vodiče jsou obvykle dvojího typu. Mohou být buďto složeny z jednoho, nebo i více materiálů, potom se jedná o homogenní resp. nehomogenní lana. První zmíněný typ lanových vodičů představují celohliníková lana AAC (All Aluminium Conductor), AAAC (All Aluminium Alloy Conductor), případně také ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced). Druhým typem lanových vodičů jsou ocelohliníková lana, mezi něž se řadí známá a prakticky nejčastěji používanější lana pro venkovní vedení ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) či jeho zesílená verze AACSR (Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced). Oba typy klasických vodičů mají specifické vlastnosti, jež se pak odrážejí v jejich aplikaci. Vždy je podstatné nalézt kompromis mezi poměrem průřezu slitiny hliníku/oceli a elektrovodného hliníku pro dosažení vyšší pevnosti lana na úkor jeho vodivosti (např. pro oblasti s velkou námrazou), nebo naopak samozřejmě vyšší vodivosti na úkor pevnosti. [11]

- **AAC (All Aluminium Conductor)**

Lano, které má všechny prameny z hliníku tříd AA, A, B a C. Třída AA se používá pro holé vodiče většinou u venkovních distribučních vedení. Třída A se používá pro vodiče pokryté materiálem odolným proti povětrnostním vlivům a pro holé vodiče, u kterých se vyžaduje lepší ohybnost. Třída B se používá pro vodiče pokryté různou izolací a pro vodiče, od kterých se vyžaduje lepší ohybnost. Třída C se používá pro vodiče, od kterých se vyžaduje pouze lepší ohybnost.

- **AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*)**
Lano se všemi prameny ze slitiny hliníku. Počet stočených vodičů v laně může být 7, 19, 37, 61 anebo 91. Tento typ lana se používá jak u přenosových, tak u distribučních venkovních vedení. Lano je zkonstruované z vysoce odolné slitiny hliníku a dosahuje vysokého poměru pevnosti a hmotnosti, čímž poskytuje lepší průhybové charakteristiky. Slitina hliníku poskytuje vyšší odolnost vůči korozi v porovnání s vodičem ACSR. Slitina hliníku je tvrdší jak klasický hliník, a proto je vodič odolnější vůči odírání. Stejnoseměrný odpor vodiče AAAC a vodiče ACSR při 20 °C stejného průřezu je přibližně stejný. Vodič je podobný dalším vodičům ze slitiny hliníku známým jako Ardival, Aldrey či Almelec.
- **ACAR (*Aluminium Conductor Alloy Reinforced*)**
Lano s hliníkovými prameny vrchních vrstev a jádrem tvořeným z pramenů ze slitiny hliníku. Používají se podobně jako AAAC lana pro vodiče venkovních přenosových a distribučních vedení. Dobrý poměr pevnosti a hmotnosti předurčuje vodič ACAR pro použití v těch případech, kdy dovolený proud i mechanická pevnost jsou prvořadé při navrhování vedení. Při stejné hmotnosti vodiče ACAR a ACSR vodič ACAR poskytuje vyšší mechanickou pevnost a vyšší dovolený proud.
- **ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*)**
Lano s ocelovým jádrem a hliníkovým pláštěm. Jedná se o lano, které je ekvivalentní s lanem u nás vyráběným pod označením AlFe. Vyrábí se s různými poměry hliníku a oceli. Aplikuje se jak v přenosových, tak i v distribučních vedeních. Vodič ACSR tudíž nabízí optimální pevnost pro navrhované vedení díky variabilnímu ocelovému jádru, které umožňuje dosáhnout požadované pevnosti bez snížení dovoleného proudu.

Kromě klasického ACSR lana existují i jeho deriváty určené pro speciální aplikace:

- **ACSR/AW (*AW - Aluminium Clad Steel Reinforced*)**
Je to podobné lano jako ACSR, pouze ocelové jádro má galvanizované hliníkem. ACSR/AW má stejnou mechanickou pevnost jako ACSR, o trochu větší dovolený proud a větší odolnost vůči korozi způsobené hliníkovým povlakem na vodičích ocelového jádra. Používá se tam, kde jsou náročné klimatické podmínky.
- **ACSR/SD (*SD - Self Damping*)**
Hliníkový vodič s ocelovým jádrem odolným vůči vibracím. Má samotlumící schopnost, dokáže eliminovat vibrace způsobené větrem na bezpečnou úroveň bez ohledu na velikost mechanického napětí ve vodiči anebo délku rozpětí.
- **ACSR/AE (*AE - Air Expanded*)**
Vodič, jehož průměr je zvětšený skeletem z hliníkových drátů umístěných mezi ocelovým jádrem a dalšími vrchními vrstvami hliníkových vodičů, čímž se vytvoří vzduchový prostor. Vodič má tak zvětšený průměr, který je potřebný na minimalizaci koróny na vodičích vedení s napětíovou hladinou nad 110 kV. Takovýto vodič obsahuje méně materiálu jako by měl konvenční vodič ACSR.

- **ACSR/T-2**
Tento nový, ne velmi známý vodič se začíná stále více používat. Je sestaven z páru stejných vodičů spletených jeden okolo druhého s velkým stoupáním závitu. Je odolný vůči „gallopingu“ tím, že mění profil vystavěný větru a též vykazuje nízké eolické vibrace a vibrace subvodičů.
- **AACSR (Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced)**
Lano s ocelovým jádrem a pláštěm ze slitiny hliníku. Vyrábí se s různým poměrem slitiny hliníku a oceli, podobně jako ACSR lana a používá se jak v případě přenosových, tak i v případě distribučních vedení. Je schopný odolávat i drsnějším klimatickým podmínkám.

6.2. Kompaktní vodiče

Klasické vodiče venkovního vedení jsou zkonstruované ze spirálovitých točivých drátů s kruhovým příčným řezem. To má za následek průřez vodiče obsahující poměrně velké oblasti dutin. Pomocí tvarovaných drátů může být ale zkonstruován vodič se zvětšeným poměrem kovu vůči vzduchu. Tyto tvarované vodiče spadají do oblasti kompaktních vodičů, které se vyznačují především větší hliníkovou částí a tím pádem i nižším odporem než má normální vodič kruhového průřezu se stejným vnějším průměrem. U vedení s vodiči z tvarovaných drátů, bude váha vodičů větší a tím i mírně vyšší zatížení stožáru. Nebo je naopak možné dosáhnout menšího průřezu a tím i větrného namáhání při zachování stejných hodnot činného odporu vodiče.

Design vodiče může být tvořen dráty lichoběžníkového tvaru tzv. TW (Trapezoidal Wire) či mozaikou ve tvaru písmene Z, čímž získáme tzv. Z-Formed uspořádání. Obě konstrukce ztuhnutých vodičů se využívají jak u celohliníkových, tak i u ocelohliníkových klasických vodičů (AAAC/TW, ACAR/TW, ACSR/TW, AERO-Z).

Kromě vyšší přenosové schopnosti, má kompaktnost vrstvy také za následek až dvakrát rychlejší tlumení vibrací. Navíc tlak větru vysokých rychlostí na lano je oproti klasickému ACSR lanu až o 40 % nižší. V souvislosti s tím a díky rychlému tlumení vibrací se objevuje tzv. efekt tančení vodičů až u značně vyšších rychlostí větru. Pokud už tančení vodičů nastává, děje se ve značně menším rozsahu. [12]

Další výhodou těchto lan je také menší produkce koróny díky hladkému povrchu a absenci prachových částic, které mohou být smyty deštěm. U klasických lan zůstávají nečistoty v prohlubních mezi dráty vrchní vrstvy, povrch lana se tak stává drsnější a efekt koróny se tím ještě zvyšuje. Kompaktní vodiče mají tak pochopitelně i menší ztráty na vedení.

I co se tvorby sněhových vrstev a námrazku týče, dochází u těchto vodičů ke zlepšení. Klasické lano se po zachycení malé vrstvičky sněhu na povrchu pootočí, čímž dochází postupně ke vzniku sněhové vrstvy na celém povrchu a následně i k jejímu růstu. Zatímco u kompaktního se lano nenatáčí, takže vrstva vzniká stále na jedné straně a po dosažení určité tloušťky sama opadá. Testy také prokázaly, že námrazek se tvoří 1,5 až 3 krát méně než na klasických lanech. Instalace nevyžaduje žádné speciální armatury ani nástroje, protože se tyto vodiče vyrábí ve standardních průměrech AIFe lan. [12]

Závěr pro kompaktní vodiče je takový, že v porovnání s klasickými vodiči stejného průřezu, vychází kompaktní vodiče menšího průměru. Vzhledem k tomu, že rozhodující zátěž při dimenzování vedení bývá zatížení větrem na omrzlý vodič, lze použít stožáry na menší

zatížení. Netvoří se tak velké námrazky a plocha pro působení větru je menší. V případě vodiče o stejném průměru lze dosáhnout vyšší proudové zatížitelnosti.

6.3. Speciální vodiče

Velkým problémem při navrhování nových vedení s vyšším přenášeným výkonem je jejich mohutnost a tím i estetický vzhled těchto vedení. Je to způsobené též výškou stožárů, která souvisí se zabezpečením dostatečné a bezpečné vzdálenosti vodičů nad zemí, případně nad objekty pod vedením. Proto se hledali nové typy vodičů s lepšími vlastnostmi, aby se mohla snížit výška stožárů.

Při zvyšování přenosové schopnosti již existujících vedení se při zvyšování proudu přesouvá provozní teplota do oblastí vyšších teplot a průhyb vodiče se zvětšuje. Tudiž použitím takových vodičů, ve kterých je zvětšování průhybu eliminované, můžeme zmenšit výšku stožárů nového přenosového vedení, resp. při stejné výšce stožárů zvětšit přenosovou schopnost vedení. Proto byly vyvinuté vodiče, jenž mají malý průhyb při vysoké provozní teplotě způsobené velkým proudem. Patří sem čtyři nejrozšířenější typy vodičů: TACSR (nebo ZTACSR), TACIR (nebo ZTACIR), ACSS a poslední typem jsou tzv. Gap vodiče TACSR/GA případně ACSS/GA.

Všechny tyto vodiče jsou stvořeny kombinací ocelového jádra (duše) kvůli mechanickým vlastnostem a slitinou hliníku tvořícího plášť kvůli vodivosti. Ocelové dráty jsou často obalené mazivem, aby se předešlo korozi mezi ocelí a hliníkem. Mazání sice zabraňuje korozi lana, má ovšem nepříznivý vliv na samotlumící schopnosti lan, takže ta pak více trpí vibracemi. Vlastnosti rozličných slitin hliníku a oceli používaných pro vysokoteplotní vodiče jsou porovnané v následujících tabulkách (tab. 20) resp. (tab. 21). [13]

		1350-H19	6201-T81	1350-0	TAL	KTAL	ZTAL	XTAL
Pevnost	(MPa)	162	317	55	165	186	165	165
Vodivost	(%IACS)	61,2	XX	63	60	55	60	58
T přípustná > 10 hodin	(°C)	90	90	200	150	150	210	230
T přípustná < 10 hodin	(°C)	120	120	250	180	180	240	260

Tab. 20 – Vlastnosti používaných hliníkových drátů

Slitiny TAL a ZTAL jsou tzv. teplotně odolné slitiny, u kterých jsou vodivostní a mechanické vlastnosti podobné klasické slitině 1350-H19, avšak jsou schopné při provozu za výrazně vyšších teplot. Plně žíhaná slitina 1350-0 je schopna vysokých teplot při provozu, ale její mechanické vlastnosti zaostávají oproti ostatním typům. Mimo jiné jsou zde uvedeny i méně často používané materiály jako teplotně odolná hliníková slitina s vysokou pevností KTAL nebo zvláště vysoce teplotně odolná slitina XTAL dosahující přípustných hodnot teploty až 260 °C. Nutno ale poznamenat, že se nedoporučuje provozovat vodič při takovýchto teplotách, a to především kvůli armaturám a duši lana.

Co se materiálů duše lana týče (viz tab. 21), je vidět, že invar (slitina železa a niklu) vykazuje velmi nízký koeficient lineární roztažnosti, který je způsobený jejím speciálním složením (36 % Ni), avšak její únosnost je nižší v porovnání s ostatními typy ocelí.

		HS	EHS	EXHS	ACS	Invar	Al ₂ O ₃ matrix	C fibres
Pevnost	(MPa)	1 230	1 765	1 965	1 103	1 030	1 310	4 295
Modul E	(GPa)	206	206	200	162	152	215	124
α	($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	11,5	11,5	11,5	13	3,7	6	1,61
γ	(g/cm ³)	7,778	7,778	7,778	6,588	7,778	3,322	1,938

Tab. 21 – Vlastnosti používaných materiálů duše lana

Vodiče TACSR a TACIR jsou slaňované jako klasické ACSR vodiče. Jejich elektrické a mechanické vlastnosti jsou výsledkem vlastností hliníku a oceli, ze kterých jsou vyráběné. ACSS vodiče mohou být klasického kruhového průřezu či vyráběné z kompaktních hliníkových vodičů. V obou případech záleží vlastnosti vodiče především na vlastnostech ocelových drátů z hlediska mechanických poměrů.

Unikátní vlastnosti vodičů TACSR/GA a ACSS/GA jsou důsledkem jak vlastností drátů, tak také jejich konstrukcí. Vnitřní vrstva TAL či plně žíhaných drátů je kompaktní a malá mezera mezi ocelovým jádrem je ponechána kvůli možnosti instalace vodiče tak, aby bylo namáhané tahem jen ocelové jádro.

Za uvedenou čtveřicí nejrozšířenějších typů speciálních vodičů si představíme i dvojici „neznámých“ moderních vodičů. Jedná se o nová lana typu ACCR a ACCC. Pro tyto vodiče nejsou známy případy praktického použití, nejsou zkušenosti z montáže a z provozu, což samozřejmě mluví v jejich neprospěch. [13]

- **TACSR (Thermal Resistant Aluminium Conductor Steel Reinforced)**

Obal lana má z teplotně odolného hliníku (s příměsí zirkonia), materiál je odolný teplotám 150 °C dlouhodobě a 180°C krátkodobě (ZTAL/XTAL až 200/230 °C dlouhodobě). Duše lana je z HS (High-Strength) oceli, obvykle i z ACS (Aluminium Clad Steel). Dráty obalu lana mohou být tvarované do lichoběžníkového tvaru (TW) nebo (Z) tvaru. Používají se ve všech vrstvách nebo jen ve vnitřní vrstvě podle požadovaného provedení pro konkrétní projekt. Pokud je duše lana mazaná, musí se použít mazivo odolné vysoké teplotě.

Lano se chová jako standardní kombinované ACSR lano, pouze dráty obalu lana odolávají vyšší teplotě. Problémy vyplývající z rozdílné teplotní roztažnosti hliníku a oceli a následného uvolňování hliníkových vrstev při vyšší teplotě nejsou významné. Teplotní závislost průhybu na teplotě je standardní i pro vyšší teploty.

Výhody: použitím TACSR namísto původního ACSR lze zvýšit přenosovou schopnost vedení o cca 55 % pro přípustnou provozní teplotu 150 °C, ovšem za podmínky realizace opatření pro dodržení vzdáleností od terénu a objektů, např. zkrácení izolace nebo zvětšení výšky závěsných bodů jiným způsobem.

Nevýhody: při větším proudovém zatížení se lano provozuje s vyšší teplotou, a tím i s vyššími ztrátami. Průhyb lana spojitě narůstá při zvyšování teploty, „knee-point“ se ale neprojevuje.

Praktické využití: pro požadovanou výšku závěsných bodů na stožárech je rozhodující průhyb vodiče při nejvyšší provozní teplotě. Potom při použití TACSR namísto standardního ACSR a při současné úpravě výšky závěsných bodů na stožárech pro dodržení vzdálenosti od terénu lze relativně efektivně zvýšit přenosovou kapacitu vedení. Je také nutné brát v úvahu metalurgické tečení vodiče při vysokých teplotách. Konkrétní náročnost realizace závisí na situaci v profilu daného vedení (terén a křížovanky).

- **TACIR (*Thermal Resistant Aluminium Conductor Invar-Steel Reinforced*)**

Podobně jako u TACSR je obal lana složen z teplotně odolného hliníku (s příměsí zirkonia). Materiál této slitiny je odolný teplotám 150 °C dlouhodobě a 180°C krátkodobě, podle použité slitiny obalu i více. Duše lana je z invarové oceli, teplota duše není limitující, tj. dovolená provozní teplota lana je daná maximální přípustnou teplotou drátů obalu uvedenou výše.

Lano se chová jako standardní kombinované ACSR lano, pouze dráty obalu lana odolávají vyšší teplotě a duše lana (invar) má velmi malou teplotní roztažnost. Celková teplotní roztažnost TACIR lana je mírně nižší při normálních provozních teplotách, nad kritickou teplotou dojde k úplnému uvolnění mechanického napětí v hliníkových drátech obalu a celé lano je mechanicky nesené jen ocelovou duší - lano se chová jako ocelové. Problémy vyplývající z rozdílné teplotní roztažnosti hliníku a invaru a následného uvolňování hliníkových vrstev při vyšší teplotě nejsou významné. Teplotní závislost průhybu na teplotě je nelineární. Navýšení přenosové schopnosti pak závisí na konkrétním případě použití.

Výhody: má nižší součinitel délkové roztažnosti než ACSR při všech teplotách a také nižší průhyb při teplotách nad „knee-point“ (projevuje se jen ocelová duše). Dalším pozitivem jsou armatury pro TACIR, které jsou svým způsobem pouze mírně modifikované standardní armatury. Lano je navíc vyzkoušené v provozu v jiných zemích.

Nevýhody: „knee-point“ je vysoko, a proto se dá využít v malém rozsahu teplot. Při větším proudovém zatížení vzniká vyšší teplota a vyšší ztráty při přenosu.

Praktické využití: výhoda v podobě nižšího průhybu se projevuje až při vysoké teplotě, čímž se náhrada ACSR tímto typem vodiče pro zvýšení přenosové kapacity bez zásahu do výšky závěsných bodů na stožárech stává problematickou - nutné řešit pro konkrétní případ.

- **ACSS (*Aluminium Conductor Steel Supported*)**

Na rozdíl od předchozích dvou vodičů je v tomto případě obal lana tvořen z měkkého vyžíhaného hliníku. Duše lana je z HS (High-Strength) nebo EHS (Extra High-Strength) oceli. Vyžíhaný hliník je odolný teplotám 200 °C dlouhodobě, krátkodobě až 250 °C. Dráty obalu lana mohou být tvarované do lichoběžníkového tvaru (TW). Dovolená provozní teplota není limitována duší lana a je pak dána maximální teplotou drátů obalu.

Po namontování lana a jeho vyvěšení, dochází k tomu, že při teplotách nad kritickou teplotu („knee-point“ je velmi nízký cca 60 - 70 °C) nenese obal žádné mechanické zatížení, projevuje se pouze duše a vodič se chová jako ocelové lano. Opět platí, že problémy vyplývající z rozdílné teplotní roztažnosti hliníku a oceli a následného uvolňování hliníkových vrstev při vyšší teplotě nejsou významné. Teplotní závislost průhybu na teplotě je nelineární. Navýšení přenosové schopnosti závisí čistě na konkrétním případě aplikace.

Výhody: má nižší součinitel délkové roztažnosti v oblasti nad „knee point“, který se pohybuje mezi 60 - 70 °C. Lano je vyzkoušené v provozu v jiných zemích, především velké uplatnění nalézá v USA.

Nevýhody: montáž vodiče je velice komplikovaná kvůli měkkým drátům, kdy při implementaci vodiče může dojít k poškození vnější vrstvy drátů obalu. Hmotnost lana je také vyšší než u ACSR, protože obvykle je potřeba mírně větší průřez ocelové duše (hliníkový obal nenese žádné mechanické namáhání). Pro požadovaný průřez je ze stejného důvodu nutný mírně větší průměr než u ACSR. Vodič má větší hmotnost než ostatní typy, čímž i nízký poměr pevnost/hmotnost. Při větším proudovém zatížení - vyšší teplota lana a vyšší ztráty při přenosu.

Praktické využití: výhoda týkající se nižšího průhybu při vyšší teplotě je snížena speciálními požadavky na montáž, kdy při výkonu montáže hrozí nebezpečí poškození vrchní vrstvy. Konkrétní náročnost realizace záleží na situaci v profilu vedení (terén a křížovatky).

- **„Gap“ vodiče (ACSS/GA, TACSR/GA)**

Obal lana je z drátů z teplotně odolného hliníku (s příměsí zirkonia). Materiál je odolný teplotám 150 °C dlouhodobě a 180 °C krátkodobě (i více podle použité slitiny) nebo z vyžíhaného měkkého hliníku odolného teplotám 200 °C dlouhodobě, krátkodobě až 250 °C. Duše lana je z HS oceli. Mezi obalem a duší musí být mechanicky (konstrukčně) zajištěna malá mezera. Vnitřní vrstva hliníkových drátů musí zaručit, že se mezera nezboří - obvykle jsou použity (TW) nebo jinak formované dráty. Mezera je vyplněná mazadlem, čímž se duše a obal lana mohou vzájemně posunovat. Teplota duše lana není limitující, tj. dovolená provozní teplota je daná dovolenou teplotou drátů obalu. Mazadlo musí být odolné předpokládané provozní teplotě a musí vydržet po celou dobu životnosti lana.

Při montáži se vodič namontuje s duší v tahu, hliníkové dráty se nechají uvolnit a vodič se zakotví. V místě nosných svorek, distančních rozpěrek, tlumičů apod. nesmí dojít k deformaci a sevření vrstev obalu na duši. Díky mezeře se obal lana a duše mohou relativně pohybovat. Při teplotách mírně vyšších než montážní teplota („knee-point“ cca 15 - 20 °C podle konstrukce) je celé mechanické zatížení nesené ocelovou duší a vodič se chová jako ocelové lano. Navýšení přenosové schopnosti závisí na konkrétním případě použití.

Výhody: součinitel délkové roztažnosti je nízký, a tím i průhyb v oblasti nad kritickou teplotou, jež se nachází mezi 15 - 20 °C.

Nevýhody: je potřeba speciálních postupů z důvodu komplikované montáže vodiče a svorek. Dále při použití vyžíhaných hliníkových drátů ve vnější vrstvě hrozí ne-

bezpečí poškození při montáži. Při větším proudovém zatížení zase díky vyšší teplotě vznikají i vyšší ztráty při přenosu. Nevyniká ani poměr pevnost/hmotnost, navíc po delší době provozu může dojít ke ztrátě výhod vodiče (kvůli mazadlu).

Praktické využití: podobně jako v případě ACSS je i zde výhoda nižšího průhybu při vyšší teplotě redukována speciálními požadavky na montáž a především také cenou. V praxi nedošlo k rozšíření, přestože je řešení známé delší dobu.

- **ACCR (Aluminium Conductor Composite Reinforced)**

Lano se sestává z drátů z teplotně odolného hliníku (s příměsí zirkonia), materiál je odolný teplotám 150 °C dlouhodobě a 180 °C krátkodobě (i více, opět závisí na aplikované slitině). Lze také použít tvarované dráty (TW) v obalu lana. Duše lana je konstruovaná z „Al oxid matrix“ drátů (obsahuje Al₂O₃ vlákna v hliníkovém základním materiálu) s poloviční teplotní roztažností než ocel a modulem pružnosti zhruba jako ocel. Z tohoto materiálu jsou vyrobené dráty a z nich je stočená duše lana. Výška vinutí duše je pravděpodobně výrazně vyšší než u ACSR lan, údaje zatím nejsou známy. Teplota duše lana není limitující, tj. dovolená provozní teplota je daná dovolenou teplotou drátů obalu.

Duše lana z „Al oxid matrix“ má menší teplotní roztažnost, proto kombinované lano s hliníkovým obalem má celkově menší teplotní roztažnost. Při teplotě nad kritickou teplotu („knee-point“ cca 70 - 75 °C) je celé mechanické zatížení nesené jádrem a lano se chová jako by bylo složeno jen z „Al oxid matrix“ drátů. Duše lana má malou hmotnost, tím je nižší i celková hmotnost lana. Navýšení přenosové schopnosti závisí na konkrétním případě použití.

Výhody: teplotní závislost délkové roztažnosti je nižší v porovnání s ACSR, stejně tak i průhyb lana pro stejný tah díky menší hmotnosti. V souvislosti s menší hmotností má i velmi dobrý poměr pevnost/hmotnost. Také průměr lana je pro stejný průřez v porovnání s ACSR mírně nižší.

Nevýhody: duše lana je poměrně tuhá, ale zároveň i křehká, tím hrozí nebezpečí poškození při její montáži. Tyto předpoklady pak vedou k speciálním požadavkům a k použití komplikovaných svorek. Při větším proudovém zatížení vzniká vyšší oteplení lana a vyšší ztráty při přenosu. Nejsou známy případy praktického použití.

Praktické využití: pro výšku stožárů je pro ACCR určující průhyb při námraze, protože při všech provozních teplotách je průhyb vždy menší. Možnosti využití vlastností vodiče závisí na únosnosti dalších prvků (zvláště stožárů) a jiných limitech.

- **ACCC (Aluminium Conductor Composite Core)**

Obal lana je uspořádán z drátů z teplotně odolného hliníku (s příměsí zirkonia), materiál je odolný teplotám 150 °C dlouhodobě a 180 °C krátkodobě (i více podle použité slitiny) nebo z vyžíhaného měkkého hliníku odolného teplotám 200 °C dlouhodobě, krátkodobě až 250 °C. Lze použít tvarované dráty (TW) v obalu lana. Duše lana je konstruovaná z „carbon fibres“ neboli karbonových vláken s extrémně nízkou teplotní roztažností a vysokou pevností. Modul pružnosti dosahuje zhruba poloviny hodnoty pro ocel. Karbonová vlákna tvoří jednolitou tyč v duši lana. Teplota karbonové duše lana není limitující, tj. dovolená provozní teplota je daná dovolenou teplotou drátů obalu.

Karbonová vlákna mají velmi malou teplotní roztažnost, proto kombinované lano s hliníkovým obalem má celkově menší teplotní roztažnost. Při teplotě nad kritickou teplotu („knee-point“ cca 70 - 75 °C) je celé mechanické zatížení nesené karbonovým jádrem a lano se tím chová jako zcela karbonové. Duše lana má velmi malou hmotnost, tím je nižší i celková hmotnost lana. Navýšení přenosové schopnosti závisí na konkrétním případě použití.

Výhody: teplotní závislost délkové roztažnosti je menší, stejně tak i průhyb lana pro stejný tah v porovnání s ACSR díky velmi malé hmotnosti. Kromě toho má z vybraných typů speciálních vodičů nejlepší poměr pevnost/hmotnost. Rovněž i průměr lana je nižší pro stejný průřez ve srovnání s ACSR díky menším rozměrům duše a eventuálně tvarovaným drátům (TW) v obalu lana. Případně pro stejný průměr jako ACSR má ACCC o 25 - 28% větší průřez hliníku při zachování mechanické pevnosti.

Nevýhody: stejně jako ACCR má tuhou duši lana, čímž hrozí nebezpečí při montáži pro obal (plně vyžíhané dráty) a též pro duši. Z toho plynou i speciální požadavky na montáž, komplikované svorky atd. Obecně jako u všech předešlých vodičů platí, že větší proudové zatížení vyvolá větší termální zatížení, a tím i vyšší ztráty při přenosu. Nejsou známy případy praktického použití.

Praktické využití: podmínky jsou podobné jako u ACCR. Pro výšku stožárů je pro ACCC určující průhyb při námraze, protože při ostatních provozních teplotách, prakticky všech včetně teplot nad 200 °C, je průhyb vždy menší než při námraze. Možnost využití vlastností vodiče závisí na únosnosti dalších prvků (zvláště stožárů) a jiných limitech.

Tímto jsme shrnuli možnosti použití, výhody a nevýhody jednotlivých typů speciálních vodičů. Rovněž přikládáme i graf jejich teplotní závislosti průhybu, který je k nahlédnutí v (příloha č. 9). Z technického hlediska jednoznačně vynikají vodiče ACCR a ACCC, protože díky výhodnému poměru pevnost/hmotnost a malé závislosti průhybu na teplotě nabízejí optimální řešení pro zvýšení přenosové schopnosti venkovních vedení. Jejich cena je však mnohem vyšší než u ACSS a TACIR vodičů. Navíc v jejich neprospěch mluví velmi malé (téměř neznámé) zkušenosti z montáže a provozu.

7. Rekonstrukce úseku stávajícího vedení

Zvyšování přenosové schopnosti existujících vedení metodou použití vodičů s nízkým průhybem, kdy výměna těchto vodičů probíhá bez jakékoliv rekonstrukce stožárů, je efektivní prostředek z hlediska minimalizace nepříznivých vlivů stavebních a montážních prací na okolní prostředí. V budoucnosti se předpokládá zvýšené využívání náhrady původních vodičů vodiči s nízkým průhybem. Tento předpoklad je i předmětem studie této práce, v níž se zabýváme výměnou konvenčních vodičů AlFe za moderní vodiče s kompozitním systémem tzv. ACCC, které ve srovnání s nimi vykazují lepší provozní charakteristiky.

Pro posouzení vhodnosti řešení v souvislosti s použitím ACCC vodičů na rekonstrukci stávajícího vedení V412/413 je nutné zpracovat srovnávací studii. Do posouzení je potřeba zahrnout všechny vlivy týkající se této implementace (situace v profilu vedení, možnosti zvyšování závěsných bodů, hodnota přepokládaného přenášeného výkonu a doba provozu s tímto výkonem, další technické, ekonomické a především legislativní omezení).

Vstupní podmínky pro porovnání jsou následující:

- stejný maximální horizontální tah projektovaného lana jako původního;
- průměr projektovaného lana do 26,5 mm, ne více;
- průřez projektovaného lana alespoň podobný jako průřez původního lana.

Z provedené selekce ACCC vodičů odpovídá těmto podmínkám typ „Grosbeak“. Prakticky dosahuje stejného průměru jako současné AlFe lano „350 AlFe 6“, podobné matematické pevnosti a navíc díky formovaným drátům lichoběžníkového tvaru má větší hliníkovou část, a tím i nižší rezistanci než zmíněné AlFe lano. Bližší specifikace týkající se elektrických a mechanických parametrů a konstrukčního uspořádání vybraného ACCC vodiče jsou přehledně uvedeny v (příloha č. 6).

V další části této kapitoly se zaměříme na výpočet elektrických a mechanických parametrů vodiče ACCC/TW typu „Grosbeak“ a realizujeme jeho instalaci na úseku stávajícího vedení V412/413. Ve všech případech vždy probíhá srovnání s původním AlFe lanem. Podkladem pro porovnání těchto vodičů jsou data z kapitoly č. 3 a 5. V závěru také učiníme rozhodnutí o vhodnosti použití uvažovaného typu ACCC vodiče na základě zohlednění všech aspektů, jak mechanických, elektrických, tak i legislativních.

7.1. Elektrické parametry rekonstruovaného vedení

Před samotným výpočtem elektrických parametrů venkovního vedení s ACCC vodiči je důležité zjistit, jaké proudové zatížitelnosti tyto vodiče dosahují, tzn. určit jejich ampacitu. Závislost teploty vodiče na procházejícím proudu byla stanovena na základě metodiky IEEE (letní období) výpočetním programem od společnosti PJM. Z výsledků výpočtu pro vodič ACCC vyplývá, že teplota vodiče narůstá s procházejícím proudem standardním způsobem, přičemž maximální dovolená provozní teplota dosahuje hodnoty 200 °C při proudu 1 513 A (proud na 1 dílčí vodič). V případě vodiče v trojsvazku by proudové zatížení dosahovalo až 4 540 A. Z těchto hodnot je patrné, že takovéto zatížení by představovalo značný problém, a to především v souvislosti s nařízením vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Na základě tohoto nařízení se koriguje minimální výška spodních fázových vodičů nad zemí (předepsaná příslušnou normou), tak aby nebyla překročena nejvyšší přípustná hodnota modifikované indukované proudové hustoty v centrálním nervovém systému člověka. Je naprosto jasné, že by tak velký provozní proud

způsobil značné navýšení indukované proudové hustoty, což by prakticky muselo vést k následným opatřením pro její snížení. Obecně pak existuje několik způsobů, jak indukovanou proudovou hustotu omezit na přijatelnou úroveň, nejběžnějším postupem je zvýšení výšky fázových vodičů od země (navýšením jejich závěsné výšky nebo napnutím na vyšší mechanické napětí). Vzhledem k tomu, že není dostatečný prostor jak na konstrukční změnu stožáru, výměnu závěsného izolátoru či větší montážní machinace s aplikovaným vodičem, čímž by se ve všech uvedených případech dosáhlo vyšší výšky fázových vodičů nad zemí a snížila by se tím indukovaná proudová hustota, je potřeba od této hodnoty zatížení odstoupit. Z toho důvodu jsme zvolili mnohem menší hodnotu provozního proudu 3 225 A (trojsvazek), jemuž koresponduje provozní teplota vodiče 109 °C. Celkový přehled proudové zatížitelnosti vybraného vodiče ACCC v závislosti na ostatních provozních teplotách je uveden níže (tab. 22).

Teplota (°C)	60	80	100	109	120	140	160	180	200
Proud (A)	1 976	2 590	3 050	3 225	3 426	3 749	4 036	4 298	4 540

($T_a = 35^\circ\text{C}$; $v = 0,6 \text{ m/s}$; úhel větru = 45° ; n. výška = 400 m.n.m.; $\epsilon = \text{aps} = 0,5$; IEEE - letní období)

Tab. 22 – Závislost teploty vodiče ACCC na procházejícím proudu (trojsvazek)

Výpočty elektrických parametrů rekonstruovaného vedení, stejně tak i průběhy intenzity elektrického pole a magnetické indukce, jsou realizovány analogicky jako v kapitole „3. Elektrické parametry stávajícího vedení“. Pouze jsou provedeny s tím rozdílem, že data fázového vodiče „350 AlFe 6“ stávajícího vedení byla zaměněna za data fázového vodiče ACCC typ „Grosbeak“ použitého pro rekonstrukci vedení. Data zemnicích vodičů a stožárových konstrukcí „Donau 1962 typ N“ a „typ Ns+12“ zůstala pro výpočet nezměněna. Zároveň se při výpočtu respektuje i skutečnost, že rekonstruovaný úsek vedení je složen z dvojitého vedení, které poskytuje možnost vykompenzování elektrického i magnetického pole pomocí změny konfigurace fázových vodičů jednotlivých potahů (tab. 11). Rozdílné uspořádání fází je uvažováno pro vyšetření, jak primárních elektrických parametrů, tak i elektrické intenzity a indukce magnetického pole daných stožárů.

Výsledné primární elektrické parametry a z nich odvozené sekundární elektrické parametry rekonstruovaného vedení, pro jednotlivé koncepce nosných stožárových konstrukcí, jsou přehledně zobrazeny níže (tab. 23). Hodnoty jsou vztaženy na jeden potah vedení s dodržováním změny konfigurace fázových vodičů.

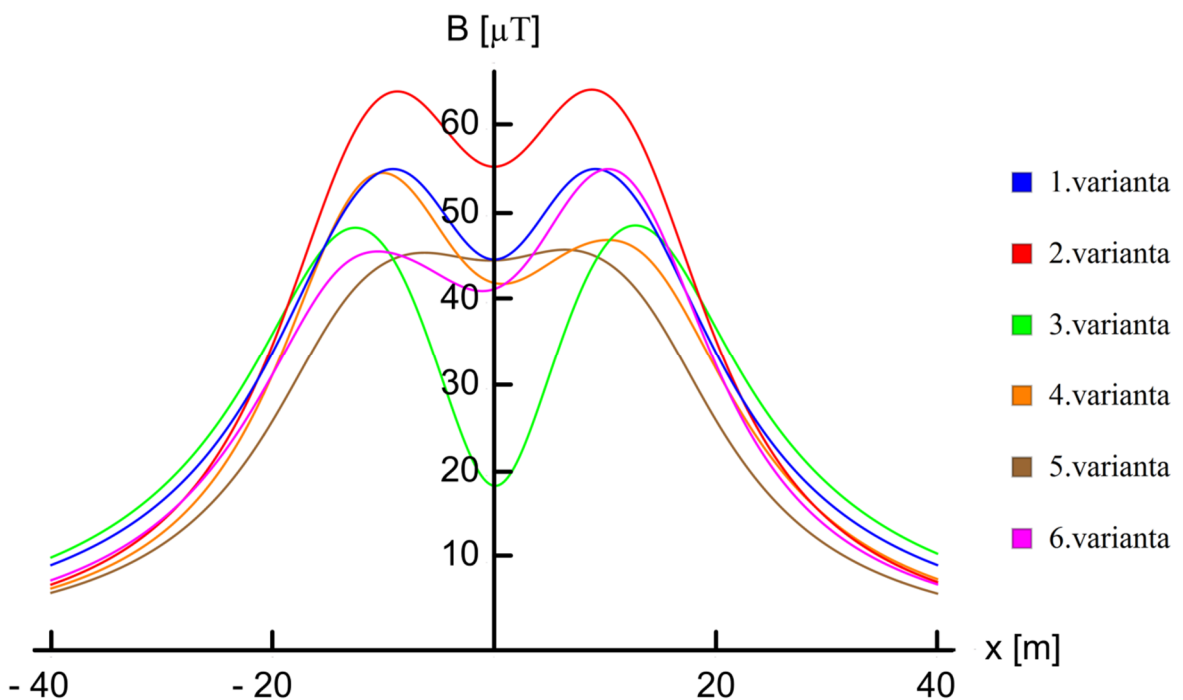
L (mH/km)	G (pS/km)	C (nF/km)	Z _v (Ω)	S _v (MVA)	L (mH/km)	G (pS/km)	C (nF/km)	Z _v (Ω)	S _v (MVA)
0,910	14 563	12,717	268,5	595,9	0,927	14 159	12,364	274,8	582,2
0,890	14 789	12,914	263,6	607,1	0,909	14 362	12,541	270,2	592,1
0,898	14 853	12,970	264,1	605,7	0,911	14 504	12,665	269,2	594,4
0,875	15 057	13,148	259,0	617,7	0,890	14 692	12,829	264,4	605,1
0,870	15 031	13,125	258,5	618,7	0,888	14 672	12,812	264,3	605,4
0,874	15 057	13,148	258,9	618,1	0,891	14 692	12,829	264,6	604,8
Nosný stožár „Donau 1962 typ N“					Nosný stožár „Donau 1962 typ Ns+12“				

Tab. 23 – Výsledky primárních a sekundárních parametrů úseku rekonstruovaného vedení

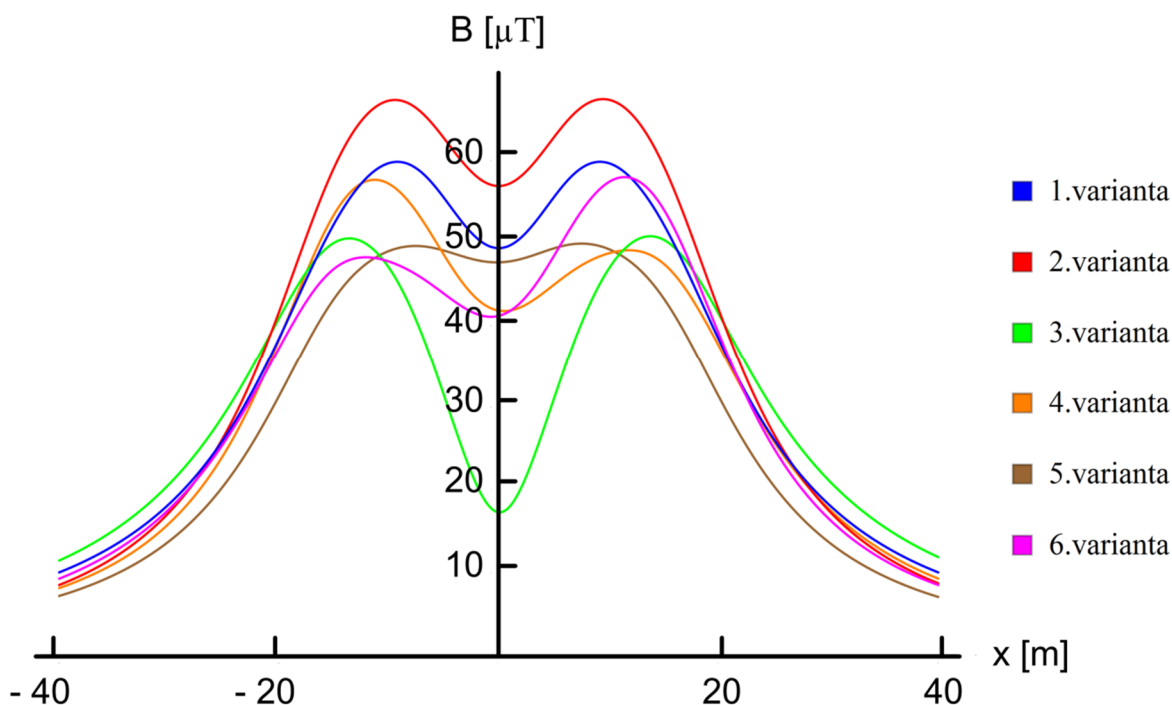
V (tab. 23) není záměrně uveden parametr R neboli rezistance, a to z toho důvodu, že tento parametr je pro všechny konfigurace fází stejný. S respektováním činitele teploty (109 °C) a skinefektu se jeho hodnota ustálila na čísle $0,0351\ \Omega/\text{km}$ (pro vodič v trojsvazku). Postup výpočtu primárních a sekundárních parametrů pro první variantu konfigurace fázových vodičů je prezentován v (příloha č. 8), jak pro standardní nosný stožár, tak i zesílený.

Výpočty intenzity elektrického pole a magnetické indukce byly provedeny ve výšce $1,8\text{ m}$ nad zemí, v souladu s dalšími předpoklady uvedenými v kapitole „3.5. Zhodnocení elektrických parametrů vedení“. Společně s výpočtem elektromagnetického pole bylo důležité provést i vyhodnocení velikosti modifikované indukované proudové hustoty. Dá se s jistotou předpokládat, že u zvoleného vodiče ACCC dojde k jejímu nárůstu v porovnání s AlFe lanem, a to ve stejné minimální výšce (korigované), jaká byla pro původní lano již stanovena. Je vcelku podstatné připomenout, že minimální výška AlFe lana byla zkorigována z normovaných 8 m na $11,7\text{ m}$ (viz graf č. 1). Vše se podřídilo tomu, aby byla zaručena přípustná hodnota modifikované indukované proudové hustoty. Nicméně korigovaná hodnota minimální výšky platí pouze u nových staveb vedení (včetně rekonstrukcí), nevztahuje se tedy na stávající vedení V412/413 projektované v 70. letech minulého století.

Důvodem nárůstu indukované proudové hustoty v případě rekonstruovaného vedení je fakt, že vodič ACCC je schopen přenášet velký provozní proud oproti AlFe lanu stávajícího vedení. Výsledná modifikovaná indukovaná proudová hustota nebude tedy ovlivněna ani tak elektrickou intenzitou, jako magnetickou indukci. Intenzita elektrického pole rekonstruovaného vedení zůstává přibližně stejná pro korigovanou minimální výšku spodních fázových vodičů nad zemí $11,7\text{ m}$. Naproti tomu indukce magnetického pole rekonstruovaného vedení výrazně naroste v této výšce v důsledku velkého provozního proudu ACCC vodiče. Následující dvojice grafů zobrazuje průběhy magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti x od středu rekonstruovaného vedení $2 \times 400\text{ kV}$ typ „Donau“ pro zmíněnou korigovanou minimální výšku spodních fázových vodičů nad zemí $11,7\text{ m}$. Graf č. 6 prezentuje magnetické pole pro nosný stožár „typ N“, graf č. 7 pak platí pro „typ Ns+12“.

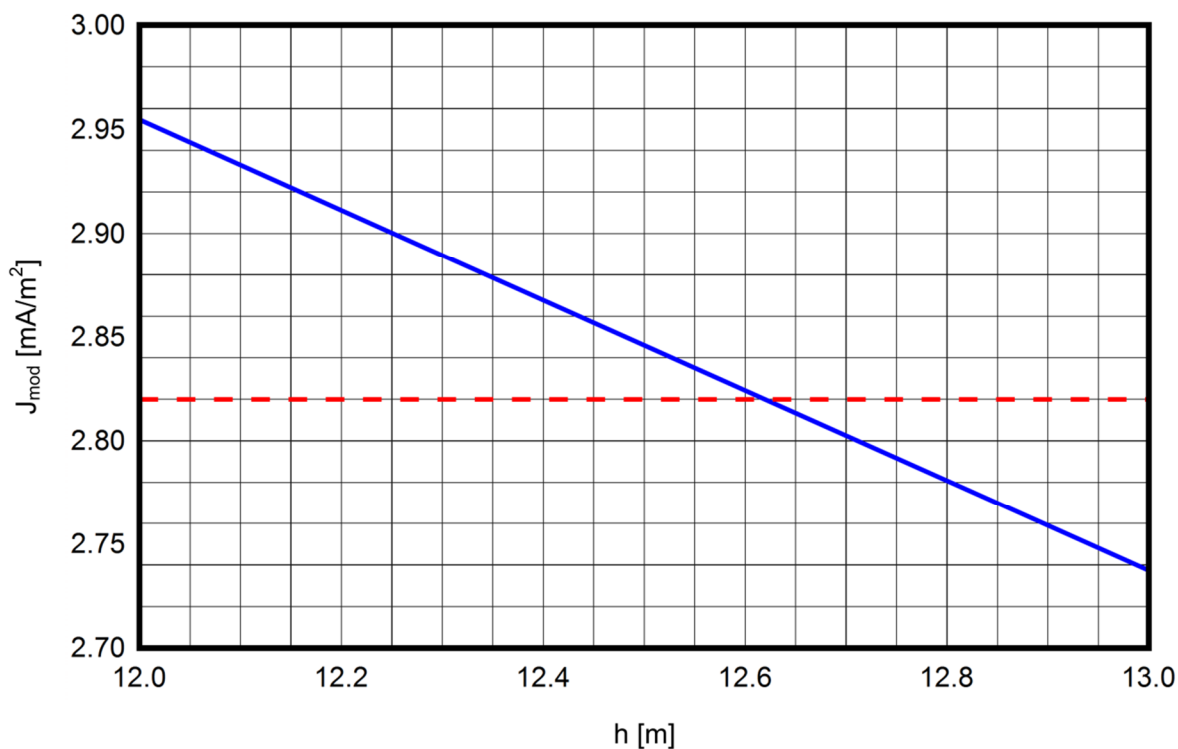


Graf č. 6 – Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ N“ (ACCC)



Graf č. 7 – Průběh magnetické indukce v okolí vedení „Donau 1962 typ Ns+12“ (ACCC)

Pokud porovnáme výsledky výše uvedených grafů s grafy č. 2 a 3, které ilustrují magnetické pole stávajícího vedení s AlFe lany, je evidentní, že došlo k navýšení magnetické indukce u všech variant, jak pro standardní nosný, tak i zesílený nosný stožár. Na základě toho lze očekávat, že je porušen limit modifikované indukované proudové hustoty pro tuto zvolenou vzdálenost a nezbývá tedy nic jiného než nalézt novou zdatně větší korigovanou hodnotu minimální výšky spodních fázových vodičů nad zemí pro vodič ACCC.



Graf č. 8 – Průběh J_{mod} v závislosti na výšce spodních fázových vodičů nad zemí (ACCC)

Výsledná korigovaná hodnota minimální výšky spodních fázových vodičů nad zemí pro rekonstruované vedení 2x400 kV typ „Donau“ je přibližně 12,6 m (viz graf č. 8). Tato hodnota minimální výšky pak zaručuje, že nebude překročena indukovaná proudová hustota v lidském těle v žádném místě podél tohoto vedení, což je zcela v souladu s nařízením vlády č. 1/2008 Sb. Přitom jsme pro její stanovení opět uvažovali pouze nejhorší možnou variantu sledu fázových vodičů, tzn. symetrickou konfiguraci fází varianty č. 1, a to jen v případě nosné stožárové konstrukce „Donau 1962 typ N“. Varianta č. 1 sice vykazuje menší hodnoty magnetické indukce oproti variantě č. 2, zato ale dosahuje mnohem větších hodnot elektrické intenzity ve srovnání s druhou variantou. Potom skalární součet obou indukovaných proudových hustot, jak od elektrického, tak od magnetického pole dává ve svém výsledku modifikovanou indukovanou proudovou hustotu vyšší u první varianty.

7.2. Mechanické parametry rekonstruovaného vedení

Jednotlivé krajiny mají klimatické podmínky mechanického výpočtu vodičů dané ve svých předpisech a normách. V současnosti to jsou normy ČSN EN 50 341-1 a ČSN EN 50 341-3-19, jež stanovují určitou míru bezpečnosti před těmito vlivy. Uvedené normy se netýkají pouze výstavby nových venkovních vedení, ale také i rekonstrukcí již existujících vedení. Pokud srovnáme současně platné normy s původní normou ČSN 34 1100/64, která byla použita v kapitole „5. Mechanické parametry úseku stávajícího vedení“, je patrné, že obecné principy navrhování konstrukcí jsou nově založeny na tzv. metodě mezních stavů ve spojitosti s metodou dílčích součinitelů. Mezní stavy se pak rozlišují na mezní stavy únosnosti a mezní stavy použitelnosti. Kladou se i odlišné základní požadavky na spolehlivost, zabezpečení soustavy a bezpečnost. Úrovně spolehlivosti pro zatížení větrem a námrazou odpovídají určité teoretické době návratu těchto klimatických zatížení. Dále se rozlišují zatížení podle toho, zda jsou stálá, proměnná nebo mimořádná. Zavádějí se charakteristické hodnoty zatížení a také i charakteristické hodnoty vlastností materiálů, ty pak v kombinaci s dílčím součinitelem poskytují výslednou návrhovou hodnotu zatížení.

Na ověření mezních stavů jsou podle normy ČSN EN 50 341-3-19 uvedené následující návrhové situace a k nim příslušné teploty:

- na ověření mezních stavů únosnosti se uvažuje minimální teplota -30 °C bez dalších klimatických zatížení (vítr, námraza) při úrovni spolehlivosti 1, která představuje základní úroveň s dobou životnosti zařízení 50 let;
- při extrémní rychlosti větru se předpokládá teplota -5 °C ;
- snížená rychlost větru v kombinaci s minimální teplotou se bere v úvahu tehdy, pokud se tato návrhová situace v projektové specifikaci vyžaduje, projektová specifikace dále určí i příslušnou minimální teplotu;
- při extrémním zatížení námrazou se předpokládá teplota -5 °C ;
- při kombinovaném zatížení větrem a námrazou se předpokládá též teplota -5 °C .

Kromě toho se pro kontrolu minimálních vzdáleností (viz dále) uvádí nejvyšší návrhová teplota fázových vodičů. Přitom se ale nedoporučuje volit nejvyšší návrhovou teplotu vodiče menší jako $+70\text{ °C}$, a to především u těch vedení, kde je průřez fázových vodičů určený provozním proudem. V naší případové studii rekonstrukce stávajícího vedení uvažujeme teplotu 109 °C , pro ni je také v podélném profilu vedení zakreslený průhyb spolu s uvedeným parametrem c_{+109} (viz příloha č. 10).

Pro uzemňovací lana a jiné vodiče, nepřenášejících provozní proud, je nejvyšší návrhová teplota vodiče $+40\text{ °C}$. V případě křížování elektrických vedení, kde se kontroluje vzdále-

nost mezi vodiči obou vedení, se předpokládá (za podmínek bezvětrí) nejvyšší návrhová teplota u vodičů horního vedení a teplota +40 °C u vodičů spodního vedení.

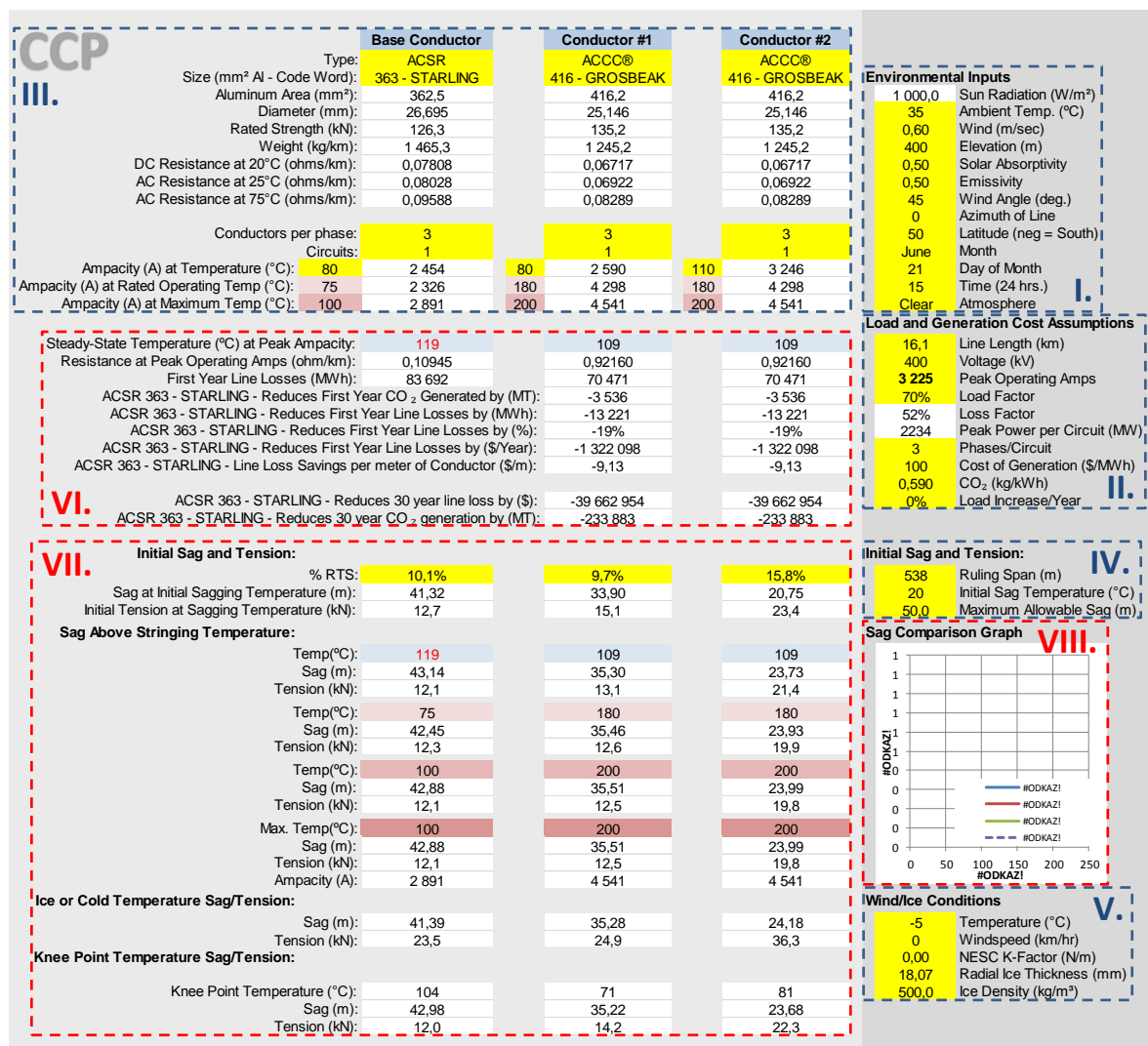
Pro všechny návrhové situace nesmí mechanické namáhání vodičů (fázových i zemnicích) překročit jejich dovolené hodnoty namáhání. Vzhledem k faktu, že se jedná o rekonstrukci stávajícího vedení pomocí výměny vodičů, a to bez jakékoliv další změny v struktuře vedení, je nutné dodržet taková mechanická namáhání v jednotlivých návrhových situacích, jaká by odpovídala původnímu mechanickému návrhu. Tyto záměry jsou navíc podpořeny i samotnou vstupní podmínkou výběru projektovaného vodiče, jež se týká jeho maximálního horizontálního tahu (stejný jako u vodiče AlFe). Spolu s dodržением mechanického namáhání vodičů musí být samozřejmě dodrženy i minimální vzdálenosti vodičů od země, případně křížovaných objektů. Hodnoty minimálních vzdáleností dané normou ČSN EN 50 341-1 již byly uvedeny v příslušných tabulkách (viz tab. 6 a 7) v kapitole „3.1. Všeobecné údaje o vedení“. Uvedená hodnota pro běžný profil země není platná z toho důvodu, že rekonstruované vedení při této výšce spodních fázových vodičů nespĺňuje požadavky nařízení vlády č. 1/2008 Sb. Tato normovaná hodnota minimální výšky pro běžný profil země je nahrazena její korigovanou hodnotou vypočítanou v předchozí kapitole (graf č. 8).

Tímto se dostáváme k mechanickému výpočtu pro navržené nejnepříznivější případy a zároveň narážíme na problém, který s daným výpočtem přichází. Je patrné, že mechanický výpočet rekonstruovaného stávajícího vedení s vodiči ACCC nemůže být realizován pomocí upravené stavové rovnice pro střední kotevní rozpětí (4.38), a to z toho důvodu, že vodič ACCC patří mezi vodiče s nelineární charakteristikou závislosti průhybu na teplotě. Tato nelineární charakteristika je způsobená tím, že „knee-point“ vodiče ACCC se nachází v rozmezí jeho provozních teplot (70 °C), na rozdíl od vodiče AlFe, jehož „knee-point“ se projevuje až za oblastí provozních teplot (100 °C). „Knee-point“ prakticky rozděluje charakteristiku závislosti průhybu vodiče na teplotě do dvou částí, pod tímto bodem má vodič mechanické vlastnosti dané spojením materiálů jeho duše a pláště, naopak za tímto bodem se vodič mechanicky chová jako by byl složen pouze z jeho duše. Hodnoty „knee-pointu“ nelze zobecňovat pro daný druh vodiče, vždy záleží na poměru materiálů pláště/duše, délce rozpětí a počáteční montáži vodiče. Nicméně tato vlastnost vodiče ACCC značně komplikuje jeho mechanický výpočet a neumožňuje tak aplikovat standardní výpočetní postupy.

Mechanický výpočet vodiče ACCC je tudíž zapotřebí provádět pomocí jiných alternativních výpočetních metod. V souvislosti s tím, jsme využili možnosti poskytující společnost CTC Global a získali jsme tak výpočetní program CCP (Conductor Comparison Program), který umožňuje řešit i tyto nelineární vodiče. Program CCP je schopen porovnávat ampacitu, ztráty na vedení, průhyby způsobené jak teplotní změnou, tak i přídatným zatížením a ekonomické aspekty jakéhokoliv typu vodiče. Navíc je CCP kompatibilní s výsledky programů PLS CADD a Sag 10. Program je rozdělen do několika vstupních a výstupních sekcí, mezi něž patří následující:

1. Environmentální vlivy
2. Údaje o vedení a ekonomické faktory jeho provozu
3. Výběr vodičů
4. Faktory ovlivňující výpočet průhybu
5. Podmínky přídatného zatížení
6. Ztráty na vedení a emise CO₂
7. Výsledky průhybu a mechanického namáhání vodiče
8. Grafické znázornění závislosti průhybu vodiče na jeho teplotě

Jednotlivé sekce jsou pak ilustrovány níže (obr. 19). Modrou barvou jsou označeny vstupní, červenou výstupní sekce.



Obr. 19 – Výpočetní program CCP

Vstupní sekce vyžadují zadávání specifických hodnot pro komplexní výpočet mechanického namáhání vodiče ACCC, výjimkou není ani sekce č. 5. Tato sekce zohledňuje podmínky přídatného zatížení v podobě větru a námrazku. Při jejím detailním rozboru narážíme na další problém, který s mechanickým výpočtem rekonstruovaného vedení úzce souvisí. Požadované vstupní hodnoty této sekce, týkající se zmíněných klimatických podmínek přídatného zatížení, zčásti neodpovídají hodnotám získaným podle současně platných norem. Z toho důvodu také tento program neumožňuje plnohodnotné vyhodnocení vodiče ACCC v těch návrhových situacích, kde je nutné počítat i s přídatným klimatickým zatížením. Svým způsobem se dalo očekávat od programu tohoto formátu, že nebude korespondovat s evropskými, natož s českými normami. Nicméně program svůj účel dostatečně splňuje i přes tyto uvedené nedostatky. Výše popsanou problematiku klimatických podmínek, které musí být brány v úvahu při mechanickém výpočtu daného vodiče, se pokusíme dále rozvést a objasnit na principu výpočtu návrhového zatížení vodiče větrem a námrazou.

Při určování návrhového zatížení větrem se vychází ze střední rychlosti větru. Území České republiky je rozdělené do několika větrových oblastí, pro které se definuje různá zá-

kladní referenční rychlost větru. Hranice větrovních oblastí se znázorňují na příslušné mapě větrovních oblastí na území ČR, která je přílohou normy ČSN EN 1991-1-4. V naší případové studii rekonstrukce stávajícího vedení V412/413 uvažujeme větrovnou oblast č. 2. Dále norma ČSN EN 50 341-1 definuje následující pojmy pro ohodnocení rychlosti větru, a to zmíněnou střední rychlost větru, nárazovou rychlost větru a v neposlední řadě i rychlost větru v libovolné výšce. Poslední dva pojmy se odvíjejí od hodnoty střední rychlosti větru. Střední rychlost větru je přímo určena základní referenční rychlostí větru ve vztažné výšce 10 m nad zemí a koeficientem nadmořské výšky. Mnohem podstatnější je ale rychlost větru v libovolné výšce nad zemí, která se určuje pro prvky venkovních vedení nacházejících se ve výšce větší jako je vztažná výška 10 m nad zemí. V souvislosti s jejím výpočtem také zohledňujeme i členitost terénu, ve kterém se vedení nachází, a to jednak pomocí koeficientu terénu, jednak pomocí třetí výšky. Nicméně je naprosto zbytečné pokračovat dál ve výpočtu návrhového zatížení vodiče větrem. Program CCP prakticky nedokáže výsledné návrhové zatížení ani aplikovat, ani jakýmkoliv jiným způsobem jej respektovat. Tímto tudíž odpadne výpočet dynamického tlaku větru, který by pak společně s dynamickým koeficientem rozpětí a koeficientem aerodynamického odporu vodiče poskytoval výslednou hodnotu návrhového zatížení vodiče větrem. V programu CCP se používá pouze rychlost větru pro danou výšku vodičů nad zemí, kterou je možno do sekce č. 5 dosadit.

Velikost námrazy u nás stanovuje norma ČSN EN 50 341-1 a ČSN EN 50 341-3-19. Pro určení zatížení námrazou jednotlivých částí vedení se počítá jen s námrazou z oblačnosti ve formě jinoatky (o měrné hustotě 500 kg/m^3). Uvedené normy definují velikost vzniklé námrazy následujícím postupem. Nejprve se určí referenční zatížení námrazou, což je zatížení námrazou na jednotku délky vodiče ve vztažné výšce 10 m nad zemí s návrhovou životností vodiče 50 let. Vztahy pro určení referenčního zatížení námrazou se liší v závislosti na námrazové oblasti a průměru vodiče. Území České republiky je rozdělené na námrazové oblasti, které jsou znázorněné na mapě tvořící informativní přílohu NNA (Národních normativních aspektů) ČR k normě ČSN EN 50 341-3-19. V naší případové studii rekonstrukce stávajícího vedení V412/413 uvažujeme námrazovou oblast N1. Na základě znalosti referenčního zatížení námrazou lze získat zatížení charakteristické, které není jen funkcí námrazové oblasti, ale i výšky vodiče nad zemí. Pak spojením charakteristického zatížení vodiče námrazou s dílčími koeficienty zatížení dostaneme požadovanou hodnotu návrhového zatížení vodiče námrazou. Nicméně program CCP přímo nevyžaduje uvedené návrhové zatížení. Není ale problém jej respektovat tím, že se vypočte ekvivalentní průměr vodiče s námrazou a následně se stanoví tloušťka námrazku, která se dá v programu CCP v sekci č. 5 uplatnit.

Z principu výpočtu klimatických podmínek přídatného zatížení podle současně platných norem vyplývá, že ne vždy lze zohlednit hodnoty návrhových zatížení v programu CCP. Zvolený program je uzpůsoben požadavkům a předpisům normy NESC (National Electrical Safety Code), jež například vyžaduje při výpočtu mechanického namáhání vodiče zahrnout i tzv. K-faktor a jinak tomu není ani v případě tohoto programu. „K-faktor“ je v podstatě aditivní konstanta, jejíž hodnoty jsou stanoveny předpisem NESC 230B a 251B a liší se jak na základě charakteru prostředí, ve kterém se vyskytují podmínky přídatného zatížení, tak i ochrannými pásmy. Komplikací spojených s programem CCP je samozřejmě více a některé, jako tomu je v případě sekce č. 5, mají podstatný vliv na vyhodnocení vodiče ACCC, některé naopak vliv zanedbatelný. V souvislosti s tím se také nebudeme dále zabývat popisem ostatních vstupních sekcí a jejich případnými nedostatky. Celkové nastavení programu CCP včetně zadaných vstupních hodnot pro mechanický výpočet uvažovaného vodiče je k dispozici formou elektronické přílohy diplomové práce. Součástí elektronické přílohy je také podrobný manuál programu CCP.

Na základě výše uvedených důvodů proběhlo vyhodnocení mechanického namáhání vodiče ACCC pouze v té návrhové situaci, kde se uvažuje nejvyšší návrhová teplota vodiče, tj. teplota 109 °C. Tato návrhová situace slouží především ke kontrole dodržení minimální vzdálenosti spodních fázových vodičů od země. Zároveň je nutné si uvědomit, že se nejedná o hodnotu minimální vzdálenosti podle současně platné normy ČSN EN 50 341-1, ale o její korigovanou hodnotu (viz graf č. 8). Kontrola korigované minimální výšky proběhla vizuální formou, kdy byl terén v podélném profilu kotevního úseku navýšen o hodnotu 12,6 m podél celého vedení. Pakliže by došlo k průniku tohoto „fiktivního“ terénu s fázovými vodiči, byla by porušena i korigovaná minimální výška spodních fázových vodičů, což se stalo i v našem případě. Prakticky jediným řešením vzniklého problému je zásah do dalších struktur vedení i navzdory tomu, že tento zásah nebyl původním předpokladem rekonstrukce stávajícího vedení.

Na úseku stávajícího vedení byly použity klasické izolátorové závěsy sestavené z tyčových keramických izolátorů typu DN₊, které mají nejdelší stavební délku. Při nedostatečné výšce vodičů nad terénem byly také záměrně využity konstrukční vlastnosti polokotevních kompozitních izolátorů. Jedná se především o polokotevní závěs tvaru „A“ resp. speciální polokotevní závěs tvaru „T“ (PK_Λ resp. PK_⊥). Jejich aplikací lze předejít dalšímu navýšení nosných stožárů, což je výhodné především v polích křížovatek, kde může dojít k nebezpečnému přiblížení vodičů ke křížovaným objektům při nesymetrických stavech na venkovním vedení. Nicméně všechny uvedené typy izolátorových závěsů, a to jak standardní DN₊, tak i nestandardní polokotevní závěsy PK_Λ a PK_⊥, musí být dále bez výjimky nahrazeny novými izolátorovými závěsy z kompozitních materiálů. Tímto způsobem se dosáhne zvýšení závěsné výšky fázových vodičů a zároveň dodržení jejich korigované minimální výšky nad zemí. V případě prvního kotevního pole nejsou ale tyto machinace s izolátorovými závěsy stále dostačující a nadále dochází k přesahu korigované minimální výšky, proto nezbyvá nic jiného než přistoupit na variantu navýšení nosného stožáru, a to konkrétně stožáru č. 33. V důsledku toho lze konstatovat, že podél celého úseku rekonstruovaného vedení s vodiči ACCC není překročena stanovená hodnota korigované minimální výšky spodních fázových vodičů nad zemí a nedochází tak k nadměrné expozici obyvatelstva elektrickému resp. magnetickému poli, což je v souladu s nařízením vlády 1/2008 Sb.

8. Závěr

Zadané téma diplomové práce lze prakticky vyčlenit na dvě části. V první části práce jsme se zabývali teoretickým rozbohem elektrických a mechanických parametrů venkovních vedení s tím, že získané poznatky jsme demonstrovali na úseku stávajícího dvojitého vedení V412/413. V druhé části práce jsme se seznámili se současně nejpoužívanějšími typy speciálních vodičů a provedli selekci uvedených typů, z níž byl vybrán vhodný vodič pro účel rekonstrukce stávajícího vedení a opět jsme předvedli výpočty elektrických i mechanických parametrů. V samotném závěru práce jsme pak realizovali krátké technické posouzení předchozích dvou částí.

V tematicky první oblasti jsme se zaměřili na výpočty elektrických a mechanických parametrů konkrétního úseku stávajícího vedení V412/413, které bylo původně projektováno s fázovými vodiči v podobě ALFe lan. Společně s výpočty elektrických parametrů proběhlo i vyhodnocení průběhu elektrické intenzity a magnetické indukce vedení. Přitom jsme uvažovali pouze nosné stožárové konstrukce daného úseku, a to „Donau 1962 typ N“ a „typ Ns+12“. Vzhledem ke skutečnosti, že stávající úsek vedení je složen z tzv. dvojitého vedení, jsme ve výpočtech zvažili možnost vykompenzování elektrického i magnetického pole pomocí změny konfigurace fázových vodičů. Z výsledků elektrických parametrů vedení je patrné, že s větší vzdáleností mezi vodiči, v případě zesíleného nosného stožáru „Donau“, se zvětšuje indukčnost a snižuje kapacita vedení oproti případu standardního nosného stožáru. Tyto změny pak nepřímo ovlivňují úbytek napětí a ztráty na vedení. Výpočty elektrické intenzity a magnetické indukce jsme provedli současně s vyhodnocením velikosti modifikované indukované proudové hustoty v lidském těle a na základě toho jsme korigovali minimální výšku spodních fázových vodičů nad zemí. Tato korigovaná hodnota minimální výšky pak zaručuje, že nebude překročena indukovaná proudová hustota v lidském těle v žádném místě podél daného vedení, což je v souladu s nařízením vlády č. 1/2008 Sb. Nicméně je nutné zdůraznit, že korigovaná hodnota minimální výšky nahrazuje její normovanou hodnotu jen v případech, kdy se jedná o rekonstrukce a výstavby nových vedení. Nevztahuje se tudíž na uvažované stávající vedení, jenž bylo navrženo podle normy ČSN 34 1100/64 v 70. letech minulého století. Získaná hodnota korigované minimální výšky stávajícího vedení není proto platná pro pozdější mechanický návrh tohoto vedení.

V souvislosti se zmíněnou normou ČSN 34 1100/64 se dostáváme k výpočtu mechanických parametrů úseku stávajícího vedení. V našem případě se jednalo víceméně o kontrolní výpočet původního mechanického návrhu pro zadané klimatické podmínky. Z výsledků mechanického namáhání příslušného ALFe lana je patrné, že nedochází k překročení dovoleného mechanického namáhání v žádné návrhové situaci a zároveň také k porušení minimální vzdálenosti vodičů od země podle předpisů dané normy. Kontrola minimální výšky proběhla vizuální formou, kdy byl terén v podélném profilu kotevního úseku navýšen o normovanou hodnotu minimální výšky (8 m) podél celého vedení. V případě, že by došlo k průniku tohoto „fiktivního“ terénu s fázovými vodiči, pak by byla porušena i minimální výška spodních fázových vodičů. Výjimku tvoří křížované objekty, kde jsme kontrolu neprovedli pouze pro parametr c_{+80} , ale též pro nesymetrické stavy.

V tematicky druhé oblasti jsme si představili speciální typy vodičů a podrobně jsme se zaměřili na vodiče s provozní charakteristikou HTLS (High-Temperature Low-Sag). Mezi představitele HTLS vodičů patří i námi zvolený vodič ACCC. Před samotným výpočtem elektrických parametrů úseku rekonstruovaného vedení s vodiči ACCC bylo důležité zjistit, jaké proudové zatížitelnosti tyto vodiče dosahují, tzn. určit jeho ampacitu. Z výsledků

výpočtu pro vodič ACCC vyplývá, že jeho provozní proud je více než dvojnásobný oproti provoznímu proudu původního AlFe lana (4 540 A vs. 1 995 A - při maximálních dovolených teplotách obou vodičů v trojsvazku). Je naprosto jasné, že takovéto zatížení by představovalo značný problém, a to především v souvislosti s nařízením vlády č. 1/2008 Sb. Z toho důvodu jsme zvolili mnohem menší hodnotu provozního proudu 3 225 A (trojsvazek), jemuž koresponduje provozní teplota vodiče 109 °C. Následné výpočty elektrických parametrů rekonstruovaného vedení s vodiči ACCC, stejně tak i průběhy intenzity elektrického pole a magnetické indukce, jsou realizovány analogicky jako v tematicky první oblasti a odpovídají teoretickým předpokladům. Při vyšetření průběhu elektrické intenzity a magnetické indukce rekonstruovaného vedení jsme zaznamenali očekávaný nárůst korigované hodnoty minimální výšky vůči její hodnotě v případě stávajícího vedení s AlFe lany. I tak je ale nárůst korigované hodnoty minimální výšky značně minimalizován v souvislosti s tím, že jsme uvažovali znatelně menší hodnotu provozního proudu vodiče ACCC oproti jeho maximální možné hodnotě. Získaná korigovaná hodnota minimální výšky je platná pro pozdější mechanický návrh rekonstruovaného vedení a zajistí, že nebude překročena modifikovaná indukovaná proudová hustota v lidském těle v žádném místě podél tohoto vedení, což je v souladu s nařízením vlády č. 1/2008 Sb.

Výpočet mechanických parametrů úseku rekonstruovaného vedení s vodiči ACCC byl značně komplikovaný, a to vzhledem k specifickým vlastnostem uvažovaného vodiče, které se týkají především jeho nelineární charakteristiky závislosti průhybu na teplotě. Tyto vlastnosti vodiče pak zamezují použití standardních výpočetních postupů. V souvislosti s tím jsme využili možnosti poskytující společnost CTC Global a získali jsme tak výpočetní program CCP. Nicméně problematika výpočtu mechanických parametrů rekonstruovaného vedení tím neskončila, program CCP totiž nekorresponduje se současně platnými normami. Z toho důvodu také tento program neumožňuje plnohodnotné vyhodnocení vodiče ACCC v těch návrhových situacích, kde je nutné počítat i s přídatným klimatickým zatížením. Kvůli tomu proběhlo vyhodnocení mechanického namáhání vodiče ACCC pouze v té návrhové situaci, kde se uvažuje nejvyšší návrhová teplota vodiče, tj. teplota 109 °C. Tato návrhová situace slouží především ke kontrole dodržení minimální vzdálenosti spodních fázových vodičů od země. Je ale nutné si uvědomit, že se nejedná o hodnotu minimální vzdálenosti podle současně platné normy ČSN EN 50 341-1, nýbrž o její korigovanou hodnotu. Kontrola korigované minimální výšky proběhla vizuální formou podobně jako v případě původního AlFe lana, jen s tím rozdílem, že terén v podélném profilu kotevního úseku byl navýšen o hodnotu korigované minimální výšky (12,6 m) podél celého vedení. Současně však došlo k průniku tohoto „fiktivního“ terénu s fázovými vodiči, a tím byla překročena i korigovaná minimální výška spodních fázových vodičů. V důsledku toho následovalo řešení vzniklého problému, jenž vyústilo v zásah do dalších struktur vedení i navzdory tomu, že tento zásah nebyl původním předpokladem rekonstrukce vedení.

Použitá literatura

- [1] Lindsey, K., Brennan, G., Meijers, R.: *Guidelines for increased utilization of existing overhead transmission lines*. [PDF] 2008. Dostupné z WWW: <<http://www.e-cigre.org/Order/select.asp?ID=13688>>.
- [2] Němeček, F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. Ediční středisko ČVUT Praha, 1983.
- [3] Fejt, Z., Čermák, J.: *Elektroenergetika*. Ediční středisko ČVUT Praha, 1985.
- [4] Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. SNTL Praha, 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [5] ČSN 34 1100/64: *Elektrická venkovní vedení - Křižovatky a souběhy vedení*. Praha, 1964.
- [6] ČSN EN 50 341-1: *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV - Část 1: Všeobecné požadavky - Společné specifikace*. Praha, 2002.
- [7] Nařízení vlády č. 1/2008 Sb.: *O ochraně zdraví před neionizujícím zářením*.
- [8] Ministerstvo zdravotnictví ČR: *Věstník Ministerstva zdravotnictví ČR*. [PDF] 2009. Dostupné z WWW: <http://www.mzcr.cz/Legislativa/dokumenty/vestnik-c_3628_1779_11.html>.
- [9] Varga, L., Leščinský, P., Beňa, L.: *Výpočet mechanických pomerov vonkajších silových vedení*. Edícia vedeckých spisov FEI TU Košice, 2002. ISBN 80-89061-56-7.
- [10] Pochop, K., List, V.: *Mechanika venkovních vedení*. SNTL Praha, 1955.
- [11] Otčenášová, A.: *Mechanika vonkajších silových vedení*. EDIS ŽU v Žiline, 2010. ISBN 978-80-554-0181-2.
- [12] Tlustý, J., Kyncl J., et al.: *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. ČVUT Praha, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [13] Technická zpráva EGEM s.r.o.: *Použití speciálních nízkoprůhybových vodičů*. Praha, 2009.
- [14] ČSN EN 50 341-3-19: *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV – Část 3: Národní normativní aspekty. Oddíl 19: Národní normativní aspekty pro Českou republiku*. Praha, 2007.
- [15] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha, 2007.

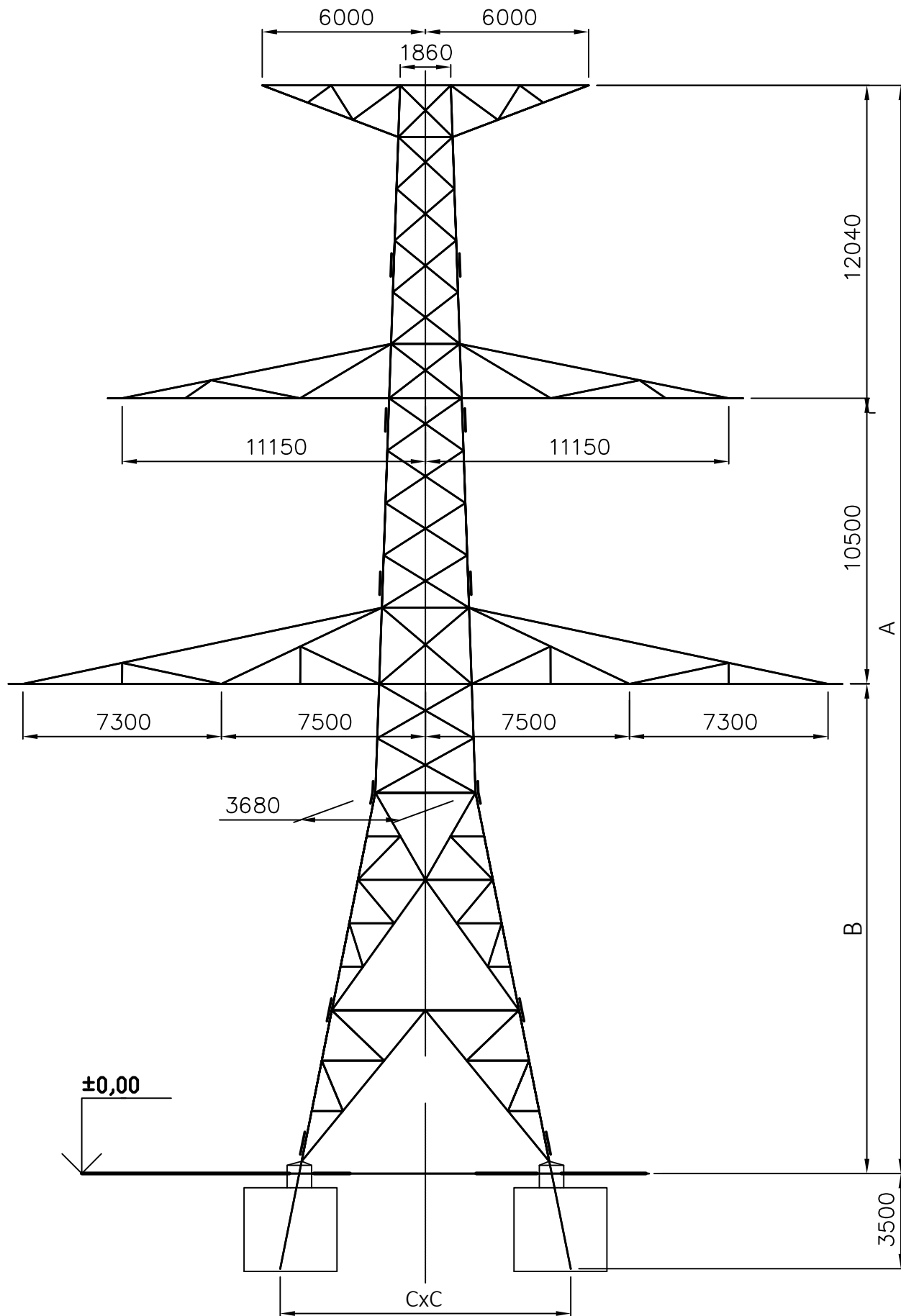
Seznam příloh

<i>Příloha č. 1</i>	I
<i>Příloha č. 2</i>	II
<i>Příloha č. 3</i>	IV
<i>Příloha č. 4</i>	V
<i>Příloha č. 5</i>	VI
<i>Příloha č. 6</i>	VI
<i>Příloha č. 7</i>	VII
<i>Příloha č. 8</i>	XI
<i>Příloha č. 9</i>	XV

Pozn.: Příloha č. 10 je umístěna na zadní straně desek diplomové práce.

Příloha č. 1

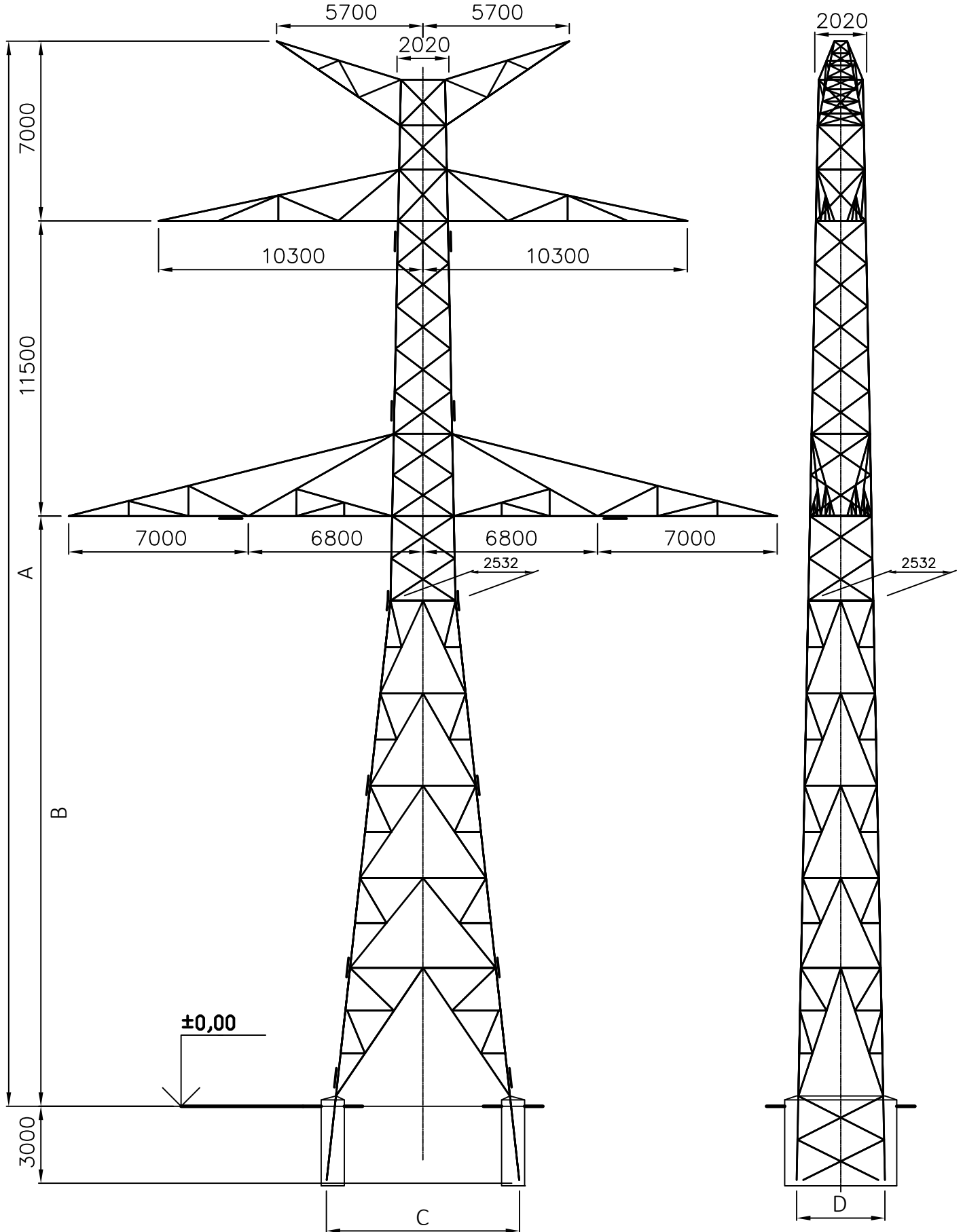
STOŽÁR 2x400kV DONAU TYP 1962 - KOTEVNÍ I



HLAVNÍ ROZMĚRY		
ROZMĚR	I+0	I+4
A	40000	44000
B	18000	22000
C	10680	12280

Příloha č. 2 - (1. část)

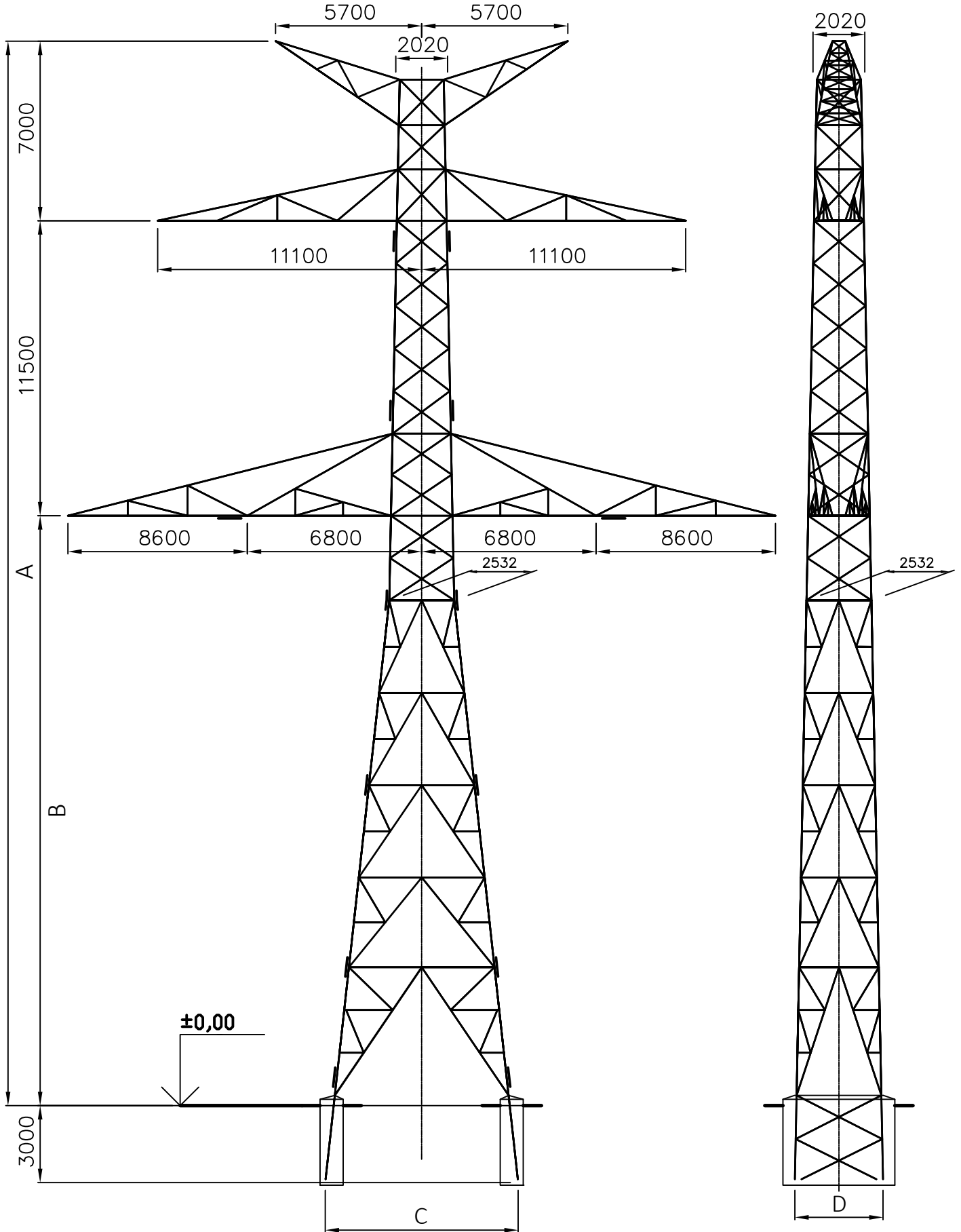
STOŽÁR 2x400kV DONAU TYP 1962 - NOSNÝ N



HLAVNÍ ROZMĚRY				
ROZMĚR	N+0	N+4	N+8	N+12
A	41500	45500	49500	53500
B	23000	28000	32000	36000
C	7526	8406	7846	8726
D	3440	3600	3760	3920

Příloha č. 2 - (2. část)

STOŽÁR 2x400kV DONAU TYP 1962 - NOSNÝ Ns



HLAVNÍ ROZMĚRY				
ROZMĚR	N+0	N+4	N+8	N+12
A	41500	45500	49500	53500
B	23000	28000	32000	36000
C	7526	8406	7846	8726
D	3440	3600	3760	3920

Příloha č. 3

350 AlFe 6			
Fe duše lana	Počet drátů a konstrukce	(-)	3+9
	Jmenovitý průměr drátu	(mm)	2,5+2,5
	Vypočtený průměr	(mm)	10,50
	Matematický průřez	(mm ²)	58,90
Al/AA plášť	Počet drátů a konstrukce	(-)	11+17
	Jmenovitý průměr drátu	(mm)	4+4
	Matematický průřez	(mm ²)	351,86
Lano	Průměr	(mm)	26,50
	Matematický průřez	(mm ²)	410,76
	Poměr průřezů Al:Fe	(-)	5,97
	Jmenovitá hmotnost bez mazadla	(kg·km ⁻¹)	1,4546
	Jmenovitá hmotnost s mazadlem	(kg·km ⁻¹)	1,4706
	Modul pružnosti	(MPa)	74639
	Součinitel teplotní roztažnosti	10 ⁶ ·(K ⁻¹)	18,85
	Měrná tíha	(N·cm ⁻³)	0,035109
	Matematická pevnost	(kN)	120,50
	Stejnoseměrný el. odpor při 20°C	(Ω·km ⁻¹)	0,07980
Směr vinutí vnější vrstvy	-	pravý	

Pozn.: Data byla převzata od společnosti Elektrotrans a.s.

Příloha č. 4

183-AL1/43-ST1A			
Fe duše lana	Počet drátů a konstrukce	(-)	1+6
	Jmenovitý průměr drátu	(mm)	2,79
	Vypočtený průměr	(mm)	8,37
	Matematický průřez	(mm ²)	42,80
Al/AA plášť	Počet drátů a konstrukce	(-)	12+18
	Jmenovitý průměr drátu	(mm)	2,79
	Matematický průřez	(mm ²)	183,41
Lano	Průměr	(mm)	19,53
	Matematický průřez	(mm ²)	226,20
	Poměr průřezů Al:Fe	(-)	4,29
	Jmenovitá hmotnost bez mazadla	(kg·km ⁻¹)	0,8416
	Jmenovitá hmotnost s mazadlem	(kg·km ⁻¹)	0,8501
	Modul pružnosti	(MPa)	80500
	Součinitel teplotní roztažnosti	10 ⁶ ·(K ⁻¹)	17,90
	Měrná tíha	(N·cm ⁻³)	0,036855
	Matematická pevnost	(kN)	79,97
	Stejnoseměrný el. odpor při 20°C	(Ω·km ⁻¹)	0,15759
Směr vinutí vnější vrstvy	-	pravý	

Pozn.: Data byla převzata od společnosti Elektrotrans a.s.

Příloha č. 5

OPGW AL3/A20SA 177/49			
Fe duše lana	Počet drátů a konstrukce	(-)	1+5
	Jmenovitý průměr drátu	(mm)	4,1+3,0
	Vypočtený průměr	(mm)	10,10
Al/AA plášť	Počet drátů a konstrukce	(-)	15+21
	Jmenovitý průměr drátu	(mm)	2,5
Lano	Průměr	(mm)	20,10
	Matematický průřez	(mm ²)	225,30
	Modul pružnosti	(MPa)	79600
	Součinitel teplotní roztažnosti	10 ⁶ ·(K ⁻¹)	18,60
	Hmotnost	(kg·km ⁻¹)	868
	Matematická pevnost	(kN)	112,30
	Stejnoseměrný el. odpor při 20°C	(Ω·km ⁻¹)	0,170
	Dodací délka lana	(m)	4000

Pozn.: Data byla převzata od společnosti Elektrotrans a.s.

Příloha č. 6

ACCC typ "Grosbeak"			
Duše lana	Vypočtený průměr	(mm)	8,13
	Matematická pevnost	(kN)	112
Lano	Průměr	(mm)	25,15
	Matematický průřez	(mm ²)	416,20
	Hmotnost	(kg·km ⁻¹)	1245
	Matematická pevnost	(kN)	135,20
	Stejnoseměrný el. odpor při 20°C	(Ω·km ⁻¹)	0,06717

Pozn.: Data vodiče ACCC typu „Grosbeak“ byla převzata od výrobce CTC Global, Inc.

Příloha č. 7 - (1. část)

Nosný stožár „Donau 1962 typ N“ (fázový vodič „350 AlFe 6“)

Matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

0.084+0.552 ĩ	0.049+0.263 ĩ	0.049+0.263 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.049+0.213 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.049+0.259 ĩ	0.049+0.231 ĩ
0.049+0.263 ĩ	0.084+0.552 ĩ	0.049+0.297 ĩ	0.049+0.213 ĩ	0.049+0.211 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.049+0.218 ĩ	0.049+0.205 ĩ
0.049+0.263 ĩ	0.049+0.297 ĩ	0.084+0.552 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.049+0.255 ĩ	0.049+0.221 ĩ	0.049+0.213 ĩ
0.049+0.229 ĩ	0.049+0.213 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.084+0.552 ĩ	0.049+0.263 ĩ	0.049+0.263 ĩ	0.049+0.231 ĩ	0.049+0.259 ĩ
0.049+0.213 ĩ	0.049+0.211 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.049+0.263 ĩ	0.084+0.552 ĩ	0.049+0.297 ĩ	0.049+0.205 ĩ	0.049+0.218 ĩ
0.049+0.229 ĩ	0.049+0.229 ĩ	0.049+0.255 ĩ	0.049+0.263 ĩ	0.049+0.297 ĩ	0.084+0.552 ĩ	0.049+0.213 ĩ	0.049+0.221 ĩ
0.049+0.259 ĩ	0.049+0.218 ĩ	0.049+0.221 ĩ	0.049+0.231 ĩ	0.049+0.205 ĩ	0.049+0.213 ĩ	0.248+0.722 ĩ	0.049+0.266 ĩ
0.049+0.231 ĩ	0.049+0.205 ĩ	0.049+0.213 ĩ	0.049+0.259 ĩ	0.049+0.218 ĩ	0.049+0.221 ĩ	0.049+0.266 ĩ	0.263+0.720 ĩ

Korigovaná matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

0.072+0.431 ĩ	0.036+0.159 ĩ	0.036+0.156 ĩ	0.037+0.110 ĩ	0.036+0.109 ĩ	0.036+0.123 ĩ
0.036+0.159 ĩ	0.070+0.462 ĩ	0.035+0.205 ĩ	0.036+0.109 ĩ	0.035+0.121 ĩ	0.035+0.137 ĩ
0.036+0.156 ĩ	0.035+0.205 ĩ	0.070+0.457 ĩ	0.036+0.123 ĩ	0.035+0.137 ĩ	0.035+0.161 ĩ
0.037+0.110 ĩ	0.036+0.109 ĩ	0.036+0.123 ĩ	0.073+0.431 ĩ	0.036+0.159 ĩ	0.036+0.156 ĩ
0.036+0.109 ĩ	0.035+0.121 ĩ	0.035+0.137 ĩ	0.036+0.159 ĩ	0.070+0.462 ĩ	0.035+0.205 ĩ
0.036+0.123 ĩ	0.035+0.137 ĩ	0.035+0.161 ĩ	0.036+0.156 ĩ	0.035+0.205 ĩ	0.070+0.457 ĩ

Proudy v zemnicích lanech (A):

-120.957-14.306 ĩ
-119.437-17.575 ĩ

Příloha č. 7 - (pokračování 1. části)

Nosný stožár „Donau 1962 typ N“ (fázový vodič „350 AlFe 6“)

Matice vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/ μ F):

110.003	24.7081	24.7081	19.9158	12.3914	16.0800	30.7114	23.1812
24.7081	101.137	29.7216	12.3914	8.91687	12.5596	15.8289	12.8862
24.7081	29.7216	101.137	16.0800	12.5596	18.6666	16.6549	14.8234
19.9158	12.3914	16.0800	110.003	24.7081	24.7081	23.1812	30.7114
12.3914	8.91687	12.5596	24.7081	101.137	29.7216	12.8862	15.8289
16.0800	12.5596	18.6666	24.7081	29.7216	101.137	14.8234	16.6549
30.7114	15.8289	16.6549	23.1812	12.8862	14.8234	162.372	35.7947
23.1812	12.8862	14.8234	30.7114	15.8289	16.6549	35.7947	161.856

Korigovaná matice vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/ μ F):

102.445	20.7126	20.3693	12.8025	8.56966	11.8493
20.7126	99.0208	27.4174	8.56906	6.86796	10.2975
20.3693	27.4174	98.6213	11.8479	10.2971	16.1765
12.8025	8.56906	11.8479	102.437	20.7087	20.3658
8.56966	6.86796	10.2971	20.7087	99.0190	27.4159
11.8493	10.2975	16.1765	20.3658	27.4159	98.6201

Korigovaná matice vzájemných a vlastních kapacitních součinitelů (μ F/km):

0.0105909	-0.0016445	-0.0015003	-0.0008317	-0.0003071	-0.0005976
-0.0016445	0.0112646	-0.0026662	-0.0003071	-0.0001790	-0.0004281
-0.0015003	-0.0026662	0.0115018	-0.0005975	-0.0004281	-0.0011856
-0.0008317	-0.0003071	-0.0005975	0.0105915	-0.0016443	-0.0015001
-0.0003071	-0.0001790	-0.0004281	-0.0016443	0.0112647	-0.0026661
-0.0005976	-0.0004281	-0.0011856	-0.0015001	-0.0026661	0.0115019

Příloha č. 7 - (2. část)

Nosný stožár „Donau 1962 typ Ns+12“ (fázový vodič „350 AlFe 6“)

Matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

0.084+0.552 ě	0.049+0.262 ě	0.049+0.262 ě	0.049+0.225 ě	0.049+0.208 ě	0.049+0.227 ě	0.049+0.257 ě	0.049+0.229 ě
0.049+0.262 ě	0.084+0.552 ě	0.049+0.284 ě	0.049+0.208 ě	0.049+0.204 ě	0.049+0.225 ě	0.049+0.216 ě	0.049+0.203 ě
0.049+0.262 ě	0.049+0.284 ě	0.084+0.552 ě	0.049+0.227 ě	0.049+0.225 ě	0.049+0.255 ě	0.049+0.221 ě	0.049+0.213 ě
0.049+0.225 ě	0.049+0.208 ě	0.049+0.227 ě	0.084+0.552 ě	0.049+0.262 ě	0.049+0.262 ě	0.049+0.229 ě	0.049+0.257 ě
0.049+0.208 ě	0.049+0.204 ě	0.049+0.225 ě	0.049+0.262 ě	0.084+0.552 ě	0.049+0.284 ě	0.049+0.203 ě	0.049+0.216 ě
0.049+0.227 ě	0.049+0.225 ě	0.049+0.255 ě	0.049+0.262 ě	0.049+0.284 ě	0.084+0.552 ě	0.049+0.213 ě	0.049+0.221 ě
0.049+0.257 ě	0.049+0.216 ě	0.049+0.221 ě	0.049+0.229 ě	0.049+0.203 ě	0.049+0.213 ě	0.248+0.722 ě	0.049+0.266 ě
0.049+0.229 ě	0.049+0.203 ě	0.049+0.213 ě	0.049+0.257 ě	0.049+0.216 ě	0.049+0.221 ě	0.049+0.266 ě	0.263+0.720 ě

Korigovaná matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

0.072+0.433 ě	0.036+0.159 ě	0.036+0.155 ě	0.037+0.107 ě	0.035+0.106 ě	0.036+0.121 ě
0.036+0.159 ě	0.070+0.464 ě	0.035+0.192 ě	0.036+0.106 ě	0.035+0.116 ě	0.035+0.133 ě
0.036+0.155 ě	0.035+0.192 ě	0.070+0.457 ě	0.036+0.121 ě	0.035+0.133 ě	0.035+0.161 ě
0.037+0.107 ě	0.036+0.106 ě	0.036+0.121 ě	0.073+0.433 ě	0.036+0.159 ě	0.036+0.155 ě
0.035+0.106 ě	0.035+0.116 ě	0.035+0.133 ě	0.036+0.159 ě	0.070+0.464 ě	0.035+0.193 ě
0.036+0.121 ě	0.035+0.133 ě	0.035+0.161 ě	0.036+0.155 ě	0.035+0.193 ě	0.070+0.457 ě

Proudy v zemnicích lanech (A):

-119.432-7.6850 ě
-118.113-10.972 ě

Příloha č. 7 - (pokračování 2. části)

Nosný stožár „Donau 1962 typ Ns+12“ (fázový vodič „350 AlFe 6“)

Matice vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/ μ F):

116.128	31.6519	31.6519	24.2863	17.4191	22.2984	35.5041	27.6687
31.6519	110.305	35.0442	17.4191	14.0657	18.9942	21.4614	18.0033
31.6519	35.0442	110.305	22.2984	18.9942	27.0864	22.7348	20.7161
24.2863	17.4191	22.2984	116.128	31.6519	31.6519	27.6687	35.5041
17.4191	14.0657	18.9942	31.6519	110.305	35.0442	18.0033	21.4614
22.2984	18.9942	27.0864	31.6519	35.0442	110.305	20.7161	22.7348
35.5041	21.4614	22.7348	27.6687	18.0033	20.7161	166.930	40.2864
27.6687	18.0033	20.7161	35.5041	21.4614	22.7348	40.2864	166.414

Korigovaná matice vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/ μ F):

106.248	25.5241	24.9600	14.8876	11.5036	15.7304
25.5241	106.496	30.8749	11.5027	10.3503	14.8793
24.9600	30.8749	105.728	15.7283	14.8786	22.5413
14.8876	11.5027	15.7283	106.239	25.5189	24.9554
11.5036	10.3503	14.8786	25.5189	106.493	30.8726
15.7304	14.8793	22.5413	24.9554	30.8726	105.726

Korigovaná matice vzájemných a vlastních kapacitních součinitelů (μ F/km):

0.0104810	-0.0018267	-0.0016327	-0.0007899	-0.0003438	-0.0006674
-0.0018267	0.0106868	-0.0024861	-0.0003437	-0.0002530	-0.0005471
-0.0016327	-0.0024861	0.0110544	-0.0006673	-0.0005471	-0.0014468
-0.0007899	-0.0003437	-0.0006673	0.0104817	-0.0018265	-0.0016326
-0.0003438	-0.0002530	-0.0005471	-0.0018265	0.0106868	-0.0024861
-0.0006674	-0.0005471	-0.0014468	-0.0016326	-0.0024861	0.0110544

Příloha č. 8 - (1. část)

Nosný stožár „Donau 1962 typ N“ (fázový vodič „Grosbeak“)

Matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

$$\begin{vmatrix} 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.263 \text{ i} & 0.049+0.263 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.259 \text{ i} & 0.049+0.231 \text{ i} \\ 0.049+0.263 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.297 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.211 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.218 \text{ i} & 0.049+0.205 \text{ i} \\ 0.049+0.263 \text{ i} & 0.049+0.297 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.255 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} \\ 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.263 \text{ i} & 0.049+0.263 \text{ i} & 0.049+0.231 \text{ i} & 0.049+0.259 \text{ i} \\ 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.211 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.263 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.297 \text{ i} & 0.049+0.205 \text{ i} & 0.049+0.218 \text{ i} \\ 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.255 \text{ i} & 0.049+0.263 \text{ i} & 0.049+0.297 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} \\ 0.049+0.259 \text{ i} & 0.049+0.218 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} & 0.049+0.231 \text{ i} & 0.049+0.205 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.278+0.722 \text{ i} & 0.049+0.266 \text{ i} \\ 0.049+0.231 \text{ i} & 0.049+0.205 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.259 \text{ i} & 0.049+0.218 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} & 0.049+0.266 \text{ i} & 0.295+0.720 \text{ i} \end{vmatrix}$$

Korigovaná matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

$$\begin{vmatrix} 0.076+0.433 \text{ i} & 0.039+0.159 \text{ i} & 0.039+0.157 \text{ i} & 0.041+0.110 \text{ i} & 0.039+0.110 \text{ i} & 0.039+0.123 \text{ i} \\ 0.039+0.159 \text{ i} & 0.073+0.464 \text{ i} & 0.038+0.205 \text{ i} & 0.039+0.110 \text{ i} & 0.037+0.122 \text{ i} & 0.038+0.138 \text{ i} \\ 0.039+0.157 \text{ i} & 0.038+0.205 \text{ i} & 0.073+0.459 \text{ i} & 0.039+0.123 \text{ i} & 0.038+0.138 \text{ i} & 0.038+0.161 \text{ i} \\ 0.041+0.110 \text{ i} & 0.039+0.110 \text{ i} & 0.039+0.123 \text{ i} & 0.077+0.433 \text{ i} & 0.039+0.159 \text{ i} & 0.039+0.157 \text{ i} \\ 0.039+0.110 \text{ i} & 0.037+0.122 \text{ i} & 0.038+0.138 \text{ i} & 0.039+0.159 \text{ i} & 0.073+0.464 \text{ i} & 0.038+0.205 \text{ i} \\ 0.039+0.123 \text{ i} & 0.038+0.138 \text{ i} & 0.038+0.161 \text{ i} & 0.039+0.157 \text{ i} & 0.038+0.205 \text{ i} & 0.073+0.459 \text{ i} \end{vmatrix}$$

Proudy v zemnicích lanech (A):

$$\begin{vmatrix} -193.352-28.229 \text{ i} \\ -190.059-33.785 \text{ i} \end{vmatrix}$$

Příloha č. 8 - (pokračování 1. části)

Nosný stožár „Donau 1962 typ N“ (fázový vodič „Grosbeak“)

Matice vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/ μ F):

110.316	24.7081	24.7081	19.9158	12.3914	16.0800	30.7114	23.1812
24.7081	101.450	29.7216	12.3914	8.91687	12.5596	15.8289	12.8862
24.7081	29.7216	101.450	16.0800	12.5596	18.6666	16.6549	14.8234
19.9158	12.3914	16.0800	110.316	24.7081	24.7081	23.1812	30.7114
12.3914	8.91687	12.5596	24.7081	101.450	29.7216	12.8862	15.8289
16.0800	12.5596	18.6666	24.7081	29.7216	101.450	14.8234	16.6549
30.7114	15.8289	16.6549	23.1812	12.8862	14.8234	162.372	35.7947
23.1812	12.8862	14.8234	30.7114	15.8289	16.6549	35.7947	161.856

Korigovaná matice vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/ μ F):

102.758	20.7126	20.3693	12.8025	8.56966	11.8493
20.7126	99.3335	27.4174	8.56906	6.86796	10.2975
20.3693	27.4174	98.9341	11.8479	10.2971	16.1765
12.8025	8.56906	11.8479	102.749	20.7087	20.3658
8.56966	6.86796	10.2971	20.7087	99.3318	27.4159
11.8493	10.2975	16.1765	20.3658	27.4159	98.9329

Korigovaná matice vzájemných a vlastních kapacitních součinitelů (μ F/km):

0.0105540	-0.0016348	-0.0014917	-0.0008270	-0.0003062	-0.0005949
-0.0016348	0.0112219	-0.0026483	-0.0003062	-0.0001787	-0.0004267
-0.0014917	-0.0026483	0.0114571	-0.0005948	-0.0004266	-0.0011784
-0.0008270	-0.0003062	-0.0005948	0.0105547	-0.0016346	-0.0014916
-0.0003062	-0.0001787	-0.0004266	-0.0016346	0.0112220	-0.0026483
-0.0005949	-0.0004267	-0.0011784	-0.0014916	-0.0026483	0.0114571

Příloha č. 8 - (2. část)

Nosný stožár „Donau 1962 typ Ns+12“ (fázový vodič „Grosbeak“)

Matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

$$\begin{vmatrix} 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.262 \text{ i} & 0.049+0.262 \text{ i} & 0.049+0.225 \text{ i} & 0.049+0.208 \text{ i} & 0.049+0.227 \text{ i} & 0.049+0.257 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} \\ 0.049+0.262 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.284 \text{ i} & 0.049+0.208 \text{ i} & 0.049+0.204 \text{ i} & 0.049+0.225 \text{ i} & 0.049+0.216 \text{ i} & 0.049+0.203 \text{ i} \\ 0.049+0.262 \text{ i} & 0.049+0.284 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.227 \text{ i} & 0.049+0.225 \text{ i} & 0.049+0.255 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} \\ 0.049+0.225 \text{ i} & 0.049+0.208 \text{ i} & 0.049+0.227 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.262 \text{ i} & 0.049+0.262 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.257 \text{ i} \\ 0.049+0.208 \text{ i} & 0.049+0.204 \text{ i} & 0.049+0.225 \text{ i} & 0.049+0.262 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.284 \text{ i} & 0.049+0.203 \text{ i} & 0.049+0.216 \text{ i} \\ 0.049+0.227 \text{ i} & 0.049+0.225 \text{ i} & 0.049+0.255 \text{ i} & 0.049+0.262 \text{ i} & 0.049+0.284 \text{ i} & 0.084+0.553 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} \\ 0.049+0.257 \text{ i} & 0.049+0.216 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} & 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.203 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.278+0.722 \text{ i} & 0.049+0.266 \text{ i} \\ 0.049+0.229 \text{ i} & 0.049+0.203 \text{ i} & 0.049+0.213 \text{ i} & 0.049+0.257 \text{ i} & 0.049+0.216 \text{ i} & 0.049+0.221 \text{ i} & 0.049+0.266 \text{ i} & 0.295+0.720 \text{ i} \end{vmatrix}$$

Korigovaná matice vzájemných a vlastních impedancí (ohm/km):

$$\begin{vmatrix} 0.076+0.435 \text{ i} & 0.039+0.160 \text{ i} & 0.039+0.156 \text{ i} & 0.040+0.107 \text{ i} & 0.039+0.107 \text{ i} & 0.039+0.122 \text{ i} \\ 0.039+0.160 \text{ i} & 0.073+0.465 \text{ i} & 0.038+0.193 \text{ i} & 0.039+0.107 \text{ i} & 0.037+0.116 \text{ i} & 0.038+0.134 \text{ i} \\ 0.039+0.156 \text{ i} & 0.038+0.193 \text{ i} & 0.073+0.459 \text{ i} & 0.039+0.122 \text{ i} & 0.038+0.134 \text{ i} & 0.038+0.161 \text{ i} \\ 0.040+0.107 \text{ i} & 0.039+0.107 \text{ i} & 0.039+0.122 \text{ i} & 0.076+0.435 \text{ i} & 0.039+0.160 \text{ i} & 0.039+0.156 \text{ i} \\ 0.039+0.107 \text{ i} & 0.037+0.116 \text{ i} & 0.038+0.134 \text{ i} & 0.039+0.160 \text{ i} & 0.073+0.465 \text{ i} & 0.038+0.193 \text{ i} \\ 0.039+0.122 \text{ i} & 0.038+0.134 \text{ i} & 0.038+0.161 \text{ i} & 0.039+0.156 \text{ i} & 0.038+0.193 \text{ i} & 0.073+0.459 \text{ i} \end{vmatrix}$$

Proudy v zemnicích lanech (A):

$$\begin{vmatrix} -191.195-17.545 \text{ i} \\ -188.257-23.170 \text{ i} \end{vmatrix}$$

Příloha č. 8 - (pokračování 2. části)

Nosný stožár „Donau 1962 typ Ns+12“ (fázový vodič „Grosbeak“)

Maticе vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/μF):

116.441	31.6519	31.6519	24.2863	17.4191	22.2984	35.5041	27.6687
31.6519	110.617	35.0442	17.4191	14.0657	18.9942	21.4614	18.0033
31.6519	35.0442	110.617	22.2984	18.9942	27.0864	22.7348	20.7161
24.2863	17.4191	22.2984	116.441	31.6519	31.6519	27.6687	35.5041
17.4191	14.0657	18.9942	31.6519	110.617	35.0442	18.0033	21.4614
22.2984	18.9942	27.0864	31.6519	35.0442	110.617	20.7161	22.7348
35.5041	21.4614	22.7348	27.6687	18.0033	20.7161	166.930	40.2864
27.6687	18.0033	20.7161	35.5041	21.4614	22.7348	40.2864	166.414

Korigovaná maticе vzájemných a vlastních potenciálových součinitelů (km/μF):

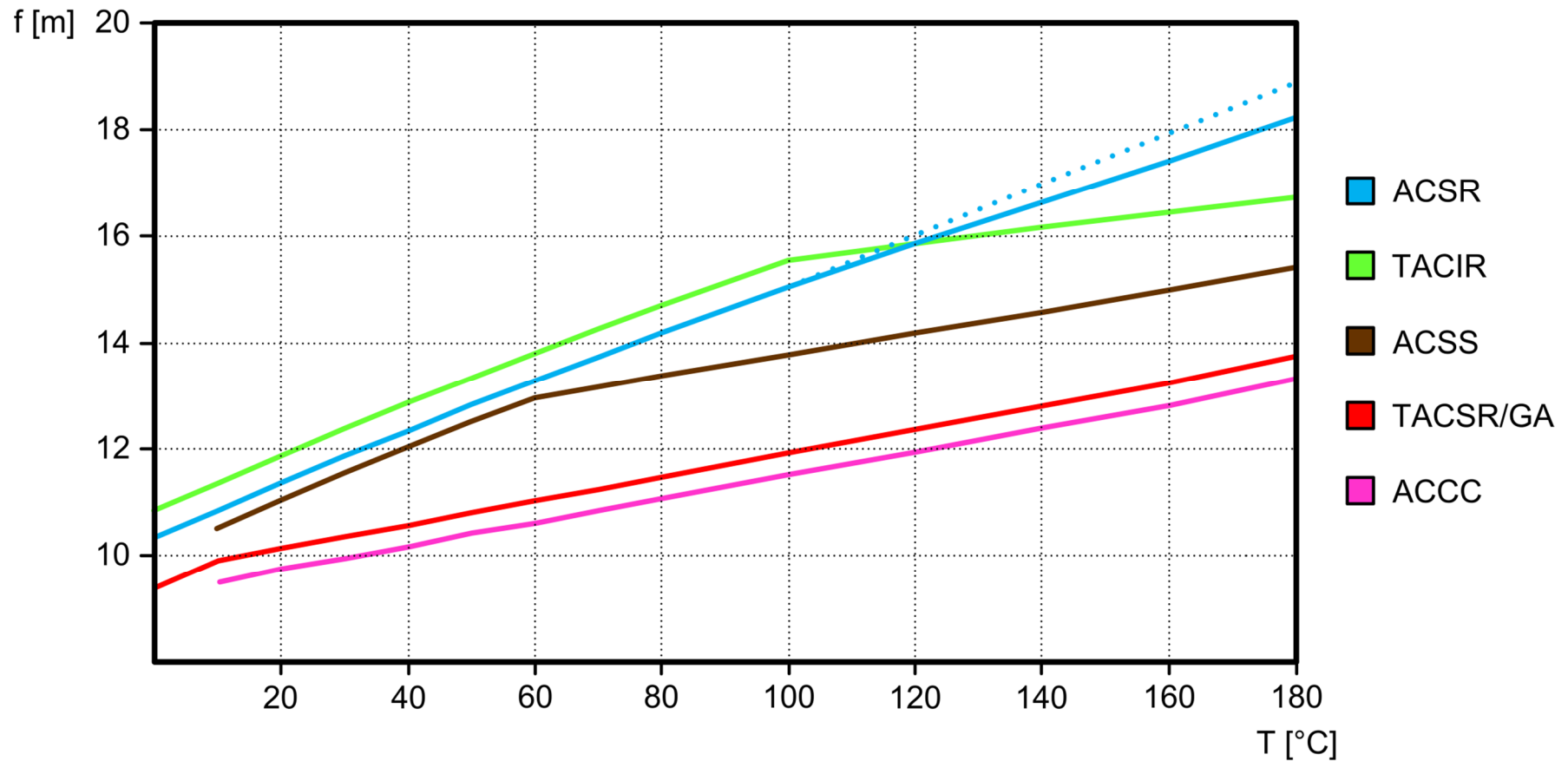
106.561	25.5241	24.9600	14.8876	11.5036	15.7304
25.5241	106.809	30.8749	11.5027	10.3503	14.8793
24.9600	30.8749	106.041	15.7283	14.8786	22.5413
14.8876	11.5027	15.7283	106.551	25.5189	24.9554
11.5036	10.3503	14.8786	25.5189	106.806	30.8726
15.7304	14.8793	22.5413	24.9554	30.8726	106.039

Korigovaná maticе vzájemných a vlastních kapacitních součinitelů (μF/km):

0.0104445	-0.0018161	-0.0016237	-0.0007858	-0.0003429	-0.0006646
-0.0018161	0.0106481	-0.0024706	-0.0003429	-0.0002526	-0.0005453
-0.0016237	-0.0024706	0.0110127	-0.0006646	-0.0005453	-0.0014383
-0.0007858	-0.0003429	-0.0006646	0.0104452	-0.0018159	-0.0016235
-0.0003429	-0.0002526	-0.0005453	-0.0018159	0.0106481	-0.0024706
-0.0006646	-0.0005453	-0.0014383	-0.0016235	-0.0024706	0.0110127

Příloha č. 9

Teplotní závislost průhybu pro různé konstrukce vodičů (ilustrativní příklad)



Pozn.: Graf slouží pro ilustraci chování vodičů, nelze z něj odvozovat absolutní hodnoty a porovnávat průhyby pro jednotlivé typy.