



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Vliv volby typu vodiče na modernizaci vedení VVN

Impact of the conductor selection on a modernization of EHV overhead power line

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Jakub Smejkal

Bc. Jakub Šmíd

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jakub Šmíd**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vliv volby typu vodiče na modernizaci vedení VVN**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Definujte typy vodičů pro vedení VVN.
- 2) Popište parametry vodičů VVN a jejich vliv na návrh a provoz vedení VVN.
- 3) Popište mechaniku vodiče vedení VVN.
- 4) Zkoumejte proudovou zatížitelnost vodiče vedení VVN a srovnajte výpočetní modely.
- 5) Srovnajte a vyhodnoťte rozdíly v návrhu výstavby/rekonstrukce konkrétního úseku vedení VVN s použitím různých typů vodičů (určí zadavatel práce).

Seznam odborné literatury:

- [1] KIESSLING, Friedrich. Overhead power lines: planning, design, construction. New York: Springer, 2003, xxviii, 759 p. ISBN 35-400-0297-9.
- [2] TOMČÍK, Jaroslav. Proudové dimenzování AlFe lan. Elektrotechnický obzor 77., 1988
- [3] CIGRÉ WORKING GROUP 22.12. Thermal behaviour of overhead conductors. August 2002
- [4] ČSN EN 50341-1. Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45kV AC
- [5] ČSN 33 3300

Vedoucí: Ing. Jakub Smejkal

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

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

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Jakobovi Smejkalovi, za odborné konzultace, cenné rady a čas, který mi věnoval při tvorbě této práce. Také bych rád poděkoval společnosti TRANSENERGY s.r.o. za poskytnuté zázemí při psaní. A v neposlední řadě chci také poděkovat rodině a přátelům, kteří mi poskytovali podporu a inspiraci nejen při psaní diplomové práce, ale při celém studiu.

Anotace

Tato diplomová práce popisuje druhy vodičů a požadavky na ně. Shrnuje poznatky o mechanice zavěšeného vodiče a zabývá se proudovou zatížitelností vodičů. Jedním z cílů je vytvořit program pro výpočet proudové zatížitelnosti, který je následně využit v části této práce, jež se zabývá porovnáním návrhů modernizace a rekonstrukce vedení VVN s využitím rozdílných typů vodičů.

Klíčová slova

Nadzemní vedení, druhy vodičů, proudová zatížitelnost vodiče, CIGRÉ, Ing. Tomčík, celohliníkové vodiče, TACSR, ACCC, investiční náklady modernizace a rekonstrukce vedení VVN

Annotation

This diploma thesis describes the types of conductors and requirements to them. It summarizes knowledge about mechanics of hanging wires and deals with a current carrying capacity of conductors. One of the goals is to create a program for the calculation of the current capacity, which is then used in part of this work, which deals with comparing designs modernization of EHV lines by using different types of conductors.

Key words

Overhead line, types of conductors, current carrying capacity of conductors, CIGRÉ, Ing. Tomčík, all-aluminum conductors, TACSR, ACCC, Investment costs of modernization and reconstruction EHV overhead power line

Obsah

Úvod	8
1. Vodiče pro vedení VVN	10
1.1. Požadavky na slané vodiče	13
1.1.1. Materiál	13
1.1.2. Velikosti vodičů	14
1.1.3. Stav povrchu	14
1.1.4. Průměr vodiče	14
1.1.5. Slanění	14
1.1.6. Spojování drátů	14
1.1.7. Hmotnost vodiče na jednotku délky	14
1.1.8. Mazivo	15
1.1.9. Jmenovitá pevnost vodiče v tahu	15
1.1.10. Jmenovitý stejnosměrný odpor	15
1.2. Druhy vodičů	16
1.2.1. ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)	18
1.2.2. AAC (All Aluminium Conductor) a AAAC (All Aluminium Alloy Conductor)	18
1.2.3. ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)	20
1.2.4. Vysokoteplotní vodiče	20
2. Mechanika vodiče	27
2.1. Popis vedení VVN	27
2.2. Souměrná řetězovka a parabola	30
2.2.1. Řetězovka	31
2.2.2. Parabola	32
2.3. Nesouměrná řetězovka	33
2.4. Namáhání vodiče	37
2.5. Stavová rovnice – vliv změny teploty a zatížení	39
3. Proudová zatížitelnost vodičů	42
3.1. Bilanční rovnice tepelných výkonů	42
3.1.1. Jouleovy ztráty	43
3.1.2. Výkon dodaný Sluncem	45
3.1.3. Výkon odvedený konvekcí	46
3.1.4. Výkon odvedený radiací	49
3.2. Výpočet proudové zatížitelnosti	50

4. Modernizace a rekonstrukce vedení.....	51
4.1. Úvodní informace.....	51
4.2. Výpočet proudové zatížitelnosti vybraných vodičů	54
4.3. Normy a zásady projektování.....	57
4.4. Modernizace – stávající stožáry	58
4.5. Rekonstrukce – nové stožáry	60
4.5.1. Lehká námrazová oblast.....	63
4.5.2. Těžká námrazová oblast.....	65
4.6. Hodnocení variant modernizace a rekonstrukce z hlediska investičních nákladů.....	68
4.6.1. Modernizace – stávající stožáry	70
4.6.2. Rekonstrukce – nové stožáry v lehké námrazové oblasti	72
4.6.3. Rekonstrukce – nové stožáry v těžké námrazové oblasti	74
Závěr.....	76
Zdroje	79
Seznam zkratk a symbolů.....	83
Seznam obrázků	87
Seznam tabulek.....	88

Úvod

V současné době je celá naše technicky vyspělá společnost závislá na elektřině více, než si je schopná připustit. Bez ní by naše společnost fungovala jen s velkými obtížemi, možná by se dokonce úplně zhroutila, pokud by delší dobu nebyla elektřina dostupná. Tou delší dobou nemyslím žádné týdny nebo měsíce, ale pouhé dny. Přesto, anebo možná právě proto, že máme v naší zemi a v celé Evropě elektřiny zatím dostatek - máme ji v elektrických zásuvkách neustále a v potřebné kvalitě – neuvědomujeme si, jak jsme na ní závislí. Nepřemýšlíme o tom, co stojí za tím, že si můžeme uvařit čaj nebo se podívat na televizi, kdykoliv chceme. Počínaje těžbou primárních zdrojů (uhlí, ropa, plyn ...), přes přeměnu energie v nich obsažené na energii elektrickou, přenos elektrické energie z elektráren k velkým městům i zapadlým vesničkám, konče jejím rozvodem po městě, kdy je přivedena až do naší elektrické zásuvky, ve které máme rychlovarnou konvici nebo televizi.

A právě přenosem elektřiny od výrobce ke spotřebiteli se budu zabývat. Problematika přenosu elektrické energie je velice široká a já se budu věnovat pouze úzké části, problematice holých vodičů nadzemního venkovního vedení velmi vysokého napětí (VVN), případně zvláště vysokého napětí (ZVN). Vodič hraje v přenosu elektrické energie zásadní roli, protože jím teče proud z místa přebytku energie, do místa nedostatku energie. Jednodušeji řečeno od místa výroby k místu spotřeby. Existuje mnoho druhů vodičů s rozdílnými vlastnostmi, které ovlivňují návrh, výstavbu a provoz vedení.

Ideální vodič by byl levný, a šel by po něm přenést co největší výkon při co nejmenších ztrátách. Na vodiči a na jeho mechanickém chování na vedení je závislý také návrh stožárů, které mohou být při vhodně zvoleném vodiči nižší a dál od sebe (menší množství stožárů pro překonání stejné vzdálenosti) a tudíž i investičně méně náročné. Bohužel ideální vodič neexistuje a někdy jdou požadavky dokonce i proti sobě, takže když zvolíme vodič s nižší rezistivitou, a tím i nižšími provozními ztrátami, může se stát, že jeho mechanické chování bude takové, že budeme muset postavit vyšší stožáry, a to co ušetříme při provozu na ztrátách, zaplatíme při výstavbě vyšších stožárů nebo většího množství.

Přenesený výkon lze také zvýšit tak, že zvýšíme proud tekoucí vodičem, ale v tom jsme také omezeni maximální provozní teplotou vodiče, protože na proudu a okolních klimatických podmínkách je závislá teplota vodiče, jež roste s vyšším proudem. A s rostoucí teplotou se také vodič prodlužuje (nebo mění svou délku), což nás rovněž může

omezit. Při volbě vodiče se tedy jedná o optimalizaci návrhu pro konkrétní případ, kdy musíme zvolit, který typ vodiče bude pro daný případ vodiče nejvýhodnější.

V této diplomové práci se nejprve budu zabývat požadavky na vodiče venkovního vedení, poté popíši nejrůznější druhy vodičů, včetně speciálních. V další části se budu podrobněji věnovat mechanice zavěšeného vodiče. Poté rozeberu tepelný model vodiče a způsoby výpočtu proudové zatížitelnosti. Z těchto poznatků vyjdu při pokusu o sestavení programu pro výpočet proudové zatížitelnosti v Excelu dle rozdílných postupů a výsledky srovnám.

Následně se pokusím, na úseku konkrétního vedení VVN, které prošlo modernizací, porovnat mechanické chování vodiče, jež byl zvolen při této modernizaci, s jinými druhy vodičů a důsledky vyplývající pro proudovou zatížitelnost vedení a investiční náklady zhodnotit.

V práci také navrhnou variantu rekonstrukce tohoto úseku vedení s různými druhy vodičů a vzájemně porovnáme modernizaci a rekonstrukci, které se mezi sebou liší zejména tím, že stožáry se při modernizaci nemění a zůstávají původní, kdežto při rekonstrukci se staví stožáry nové.

Vzhledem k tomu, že životnost (i morální) stožárů a vodičů je rozdílná, je nutné při každém projektování zvýšení přenosové schopnosti vedení zvážit zda je lepší vedení modernizovat nebo rekonstruovat. Proto se podívám na proběhlou modernizaci okem investora a budu se snažit posoudit provedenou modernizaci a navrženou variantu rekonstrukce, s využitím i typů vodičů, které investor v době modernizace nemohl využít, protože nebyly příliš rozšířené. Toto posouzení je opět možné provést z pohledu investičních nákladů a proudové zatížitelnosti a já se pokusím najít způsob, jak tyto dvě hlediska propojit.

1. Vodiče pro vedení VVN

Na vedení se mohou vyskytovat až tři typy vodičů s rozdílnou funkcí. Fázové vodiče (FV), zemnicí lana (ZL) a kombinovaná zemnicí lana (KZL).

Hlavní funkcí fázového vodiče je přenést výkon, proto jím teče proud a vůči zemi má definované napětí (velmi vysoké napětí (VVN) – 110 kV a 220 kV, zvláště vysoké napětí (ZVN) – 400 kV).

Zemnicí lano je úmyslně uzemněný vodič, který je obvykle umístěn nad fázovými vodiči na vrcholech stožárů. Dle typu stožáru se v ČR vyskytuje jedno nebo dvě zemnicí lana. Uzemnění je provedeno na některých nebo všech stožárech vedení. Důvody pro užití zemnicího lana jsou ochrana vedení před přímým úderem blesku, což je poměrně častý jev vzhledem k tomu, že vedení bývá dost často nejvyšším objektem v krajině, kterou prochází, dále zmenšení přepětí vzniklého elektrostatickou indukcí a zmenšení krokového napětí a proudu jdoucího do země při zkratu na vedení.

Zemnicí lano se konstrukčně nijak zvlášť neliší od klasických fázových vodičů. V současnosti je už také požadavek na co nejvodivější zemnicí lano kvůli zkratovým situacím, aby co nejméně zkratového proudu zteklo přes stožárovou konstrukci do země. V minulosti se dokonce, jako zemnicí lana používala lana ze železa, bez hliníkových vrstev, ale to se v dnešní době již nedoporučuje.

Kombinované zemnicí lano plní všechny funkce jako zemnicí lano a navíc slouží, jako prostředek pro komunikaci po vedení. Starší způsob komunikace, ale stále hojně využívaný, je Hromadné Dálkové Ovládání (HDO), dnes ke komunikaci po vedení slouží i optická vlákna v kombinovaném lanu. Optických vláken ve vodiči bývá více, než přenosové nebo distribuční společnosti využijí, ostatní mohou být pronajímána například společností provozující kabelové televize, poskytující internetové připojení, armádě nebo policii.

Kombinované zemnicí lano bývá označováno jako OPGW (Optical Ground Wire). Konstrukce je taková, že optická vlákna jsou obvykle uprostřed tohoto vodiče a jsou obklopena hliníkovou trubičkou, na které jsou pak navinuty ocelové a hliníkové dráty. Hliníková trubička odstiňuje elektromagnetické pole, které pak neruší přenos informací v optických vláknech. Tato trubička má za úkol také tepelně izolovat optická vlákna od vnějších vrstev vodiče, což je důležité při úderu blesku, který má za následek rychlý

nárůst teploty vodiče a mohlo by dojít k zničení optických vláken. Z tohoto důvodu by měla být maximální teplota absorbovaná hliníkovou trubičkou nižší než nejvyšší přípustná teplota optických vláken.



Obrázek č. 1 – Vodič OPGW [8]

Ještě existuje speciální typ fázového vodiče, takzvaný OPPW (Optical Phase Wire), který má uvnitř optické vlákno, sloužící pro přenos informací, nebo i k monitorování teploty vodiče. Znalost teploty vodiče je důležitá, jak bude ukázáno v dalším textu. Na druhou stranu je užití OPPW problematické z pohledu provozního, kdy je jakákoliv úprava vodiče na již postaveném vedení značně problematická.

Vodiče hrají při návrhu a provozování venkovního elektrického vedení zásadní roli. Volba typu vodiče má vliv na investiční náklady při výstavbě vedení. Tento vliv není nijak zásadní z pohledu samotné ceny vodiče, ale z toho pohledu, že typ vodiče má vliv na počet stožárů a jejich výšky. Čím více vyšších stožárů, tím větší jsou investiční náklady, navíc zaberou více půdy, která se musí vykoupit, a musejí mít i větší kubaturu betonových základů, což stojí další peníze navíc. Obecně nelze říci, jak velký vliv volby vodiče na náklady bude, a to je jeden z důvodů proč tuto práci píšící, protože se tento vliv pokusím zhodnotit.

Volba vodiče má vliv i na provozní bezpečnost. Asi nejhorší reálně možný případ, jak by mohla být snížena provozní bezpečnost vedení, je stav, kdyby průhyb vodiče byl tak velký, že by mohlo dojít k přeskoku na objekty, eventuálně osoby pod vedením. Popis jak se chová a na čem je závislý průhyb vodiče, bude popsán dále v práci. Dalšími problémy mohou být nepříjemná četnost a trvání elektrických přeskoků způsobená přiblížením vodičů v rámci rozpětí a přenos vibrací, které poškozují vodiče, podpěrné body i výzbroj. Vibrace

závisí na orografii terénu, tahu ve vodiči, tíze vodiče a průměru vodiče. Na volbě vodiče samozřejmě závisí i ztráty elektrické energie, úbytky napětí a jiné.

Vzhledem k tomu, že se bavíme o venkovním vedení, je zřejmé, že vodiče jsou vystaveny klimatickým jevům. Mezi klimatické jevy mimo jiné patří déšť, vítr, námraza a změny teploty. Vodiče jsou vystaveny také chemickým vlivům, které na ně mají vliv a mohou je poškozovat.

Na vodiče jsou kladeny různé požadavky, které mohou být někdy i protichůdné:

- Malá měrná váha kvůli dopravě a manipulaci s vodičem, ale velká měrná váha, aby vodič vítr vychyloval co nejméně.
- Malý průměr vodiče, aby tlak větru nebyl velký, ale velký průměr vodiče, aby nevznikala koróna.
- Velká pevnost.
- Odolnost proti poškození při montáži.
- Malé ztráty pevnosti vodiče při oteplení.
- Odolnost proti chemickým vlivům a vibracím.
- Malé investiční náklady.

Vodiče obecně mohou být prosté kulaté dráty anebo lana. Dráty se používají velice omezeně, nejčastěji v rozvodech nízkého napětí a na rozvodnách. Jako vodiče venkovního vedení VVN a ZVN jsou v dnešní době používána lana, která vzniknou slaněním drátů.

Tyto vodiče musí být vyrobeny v souladu s technickými normami. Jedná se zejména o normu ČSN EN 50182 Vodiče venkovního elektrického vedení – Lanované vodiče vinuté z koncentrických kruhových drátů. Další normy zabývající se problematikou vodičů jsou například ČSN EN 50183, ČSN EN 50189, ČSN EN IEC 889 a jiné. V praktické části této práce se budu zabývat modernizací a rekonstrukcí vedení přenosové soustavy patřící společnosti ČEPS, tudíž v následující kapitole, kde se rozepíši o některých požadavcích na vodiče venkovního vedení VVN, použiji, jako jeden ze zdrojů i podnikovou normu této společnosti TN/46/2013 Lanové vodiče pro elektrická vedení přenosové soustavy revize č. 2, která vychází z již zmíněné normy ČSN EN 50182.

[1, 2, 14, 15]

1.1. Požadavky na slané vodiče

1.1.1. Materiál

Slaněný vodič musí být realizován z drátů vyrobených z těchto materiálů:

- Tvrdě tažený hliník dle ČSN IEC 889, značený jako AL1.

Dráty musí být z hliníku čistoty takové, aby byly dodrženy mechanické a elektrické vlastnosti uvedené v ČSN IEC 889. Podíl hliníku v drátu nesmí být menší než 99,5 %. Rezistivita odpovídá 61,0 % IACS vodivosti (Mezinárodní standard žíhané mědi).
- Slitina hliníku dle ČSN EN 50183, značená AL2-AL7.

Jedná se o dráty ze slitiny hliník-hořčík-křemík (Al-Mg-Si) o průměrech 1,5 mm až 5 mm. Koncentrace legujících prvků je omezena a je následující: Mg (0,4 – 0,9 %), Si (0,3 – 0,7 %), Fe (< 0,7 %) a Cu (< 0,5 %). Podle poměru jednotlivých prvků ve slitině rozlišujeme šest druhů těchto drátů s mírně odlišnými vlastnostmi. Rezistivita při 20°C a pevnost v tahu je závislá na druhu slitiny hliníku. Maximální rezistivita se pohybuje od 52,9 % vodivosti IACS pro AL4 po 57,5 % vodivosti IACS pro AL7.
- Pozinkovaný ocelový drát dle ČSN EN 50189, značený jako ST1A, ST2B, ST3D, ST4A, ST4A, ST5E a ST6C, kde číslice a písmeno udává jakost a třídu.

Pozinkované ocelové dráty kruhových průřezů se používají na konstrukci nebo zpevnění vodičů venkovního vedení VVN. Číslo v názvu udává jakost oceli a písmeno třídu zinkového povlaku. Zinkový povlak by měl obsahovat minimálně 99,85 % zinku. Zinkování slouží jako ochrana proti korozi ocelového drátu a může být provedeno galvanicky (elektrolýza) nebo žárovým zinkováním, což je technika pokovování ponorem. Mechanické a elektrické vlastnosti závisí na kombinaci jakosti oceli a třídě zinkového povlaku.
- Ocelový drát pokrytý hliníkem dle ČSN EN 61232, s označením třídy 20SA (stupeň A a stupeň B), 27SA, 30SA a 40SA.

Hliník musí mít minimální čistotu 99,5 % a musí mít dostatečnou jakost, aby splnil podmínky pro tloušťku a elektrický odpor dle výše uvedené normy.

1.1.2. Velikosti vodičů

V příloze normy ČSN EN 50182 je uveden přehled velikostí vodičů v jednotlivých zemích. Vzhledem k tomu, že vodiče v ČR běžně užívané, v této příloze nejsou uvedeny, společnost ČEPS doporučuje přednostně používat na nových a rekonstruovaných vedeních pro fázové vodiče kombinované lano s hliníkovými dráty AL1 s duší z ocelových pozinkovaných drátů ST1A, případně ST6C. Použití jiných než doporučovaných vodičů je možné, ale podléhá schválení a musí splňovat požadavky normy ČSN EN 50182.

1.1.3. Stav povrchu

Dráty musejí být kruhového průřezu a nesmí být deformované. Povrch vodiče nesmí obsahovat žádné pouhým okem, nebo běžnými brýlemi či očními čočkami, viditelné kazy, jako jsou vroubky, zářezy a podobně. Kontrola se provádí vizuálně.

1.1.4. Průměr vodiče

Jmenovitý průměr lana se vypočte z průměrů drátů v jednotlivých vrstvách podle následujícího vzorce:

$$Jmenovitý \varnothing \text{ lana} = \varnothing \text{ centrálního drátu} + \text{dvojnásobek } \varnothing \text{ drátu v jednotlivých vrstvách}$$

1.1.5. Slanění

Všechny dráty musí být slaněny soustředně tak, aby sousední vrstvy byly slaněny opačným směrem a směr vinutí vnější vrstvy byl pravotočivý. Důležitým pojmem je stáčecí poměr a výška vinutí. Výška vinutí je rovnoběžná vzdálenost s podélnou osou vodiče, ve které drát v příslušné vrstvě tvoří jeden kompletní závit kolem osy lana. Stáčecí poměr je pak poměr výšky vinutí příslušné vrstvy k vnějšímu průměru vrstvy. V normě ČSN EN 50182 jsou stanoveny minimální a maximální stáčecí poměry pro vrstvy duší z ocelových pozinkovaných drátů nebo z ocelových drátů pokrytých hliníkem a pro vrstvy hliníkových drátů. U vícevrstevného vodiče musí být stáčecí poměr všech vrstev stejný nebo menší, než je stáčecí poměr vrstvy, jež je přímo pod ní.

1.1.6. Spojování drátů

Ocelové pozinkované dráty duše a ocelové dráty duše pokryté hliníkem se nesmí nijak spojovat během slaňování. Je povoleno spojit dráty před jejich konečným tažením, za předpokladu splnění podmínek z norem pro příslušné dráty.

1.1.7. Hmotnost vodiče na jednotku délky

Jmenovitá hmotnost lana bez maziva se pro daný typ vodiče vypočte z hustot (případně měrných hmotností) hliníkových, ocelových pozinkovaných a ocelových drátů

pokrytých hliníkem uvedených v kapitole 1.1.1. a v příslušných normách. Při výpočtech průřezů drátů se vychází ze jmenovitých průměrů těchto drátů určených dle kapitoly 1.1.4. Slaněním dojde k tomu, že, s výjimkou centrálního drátu, mají všechny dráty větší délku, než je délka lana. Přírůstek hmotnosti závisí na použitých stáčecích poměrech a jsou pro různé skladby vodičů uvedeny v ČSN EN 50182.

1.1.8. Mazivo

Požaduje-li se mazaný vodič, musí být mazivo ve shodě s normou EN 50326 a v délce lana se nesmí míchat maziva různých výrobců. Není-li pro konkrétní případ požadováno jinak, použijí se homogenní lana z ocelových pozinkovaných drátů (typ STyz) nemazané. Naopak lana typu ALx/STyz musí mít mazanou duši, stejně jako homogenní vodiče z ocelových drátů pokrytých hliníkem. Hmotnost maziva se musí připočíst k jmenovité hmotnosti lana.

1.1.9. Jmenovitá pevnost vodiče v tahu

Minimální pevnost drátu v tahu je rovna součinu jeho jmenovitého průřezu a minimální měrné pevnosti uvedené v příslušných normách pro každý typ drátu. Jedná-li se o lano z homogenních drátů, pak se jmenovitá pevnost lana stanoví jako součet minimálních pevností v tahu všech drátů. U kombinovaných lan typu ALx/STyz nebo ALx/yzSA je jmenovitá pevnost v tahu součtem minimální pevnosti v tahu hliníkové části a minimální pevnosti ocelové části odpovídající prodloužení, při kterém by došlo k přetržení hliníkové části.

1.1.10. Jmenovitý stejnosměrný odpor

Jmenovitá hodnota stejnosměrného odporu slaněného vodiče při teplotě 20°C v $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ vychází z hodnot rezistivity pro výpočetní účely uvedené v kapitole 1.1.1. a ze jmenovitého průřezu hliníkových drátů a ocelových drátů pokrytých hliníkem. Tato hodnota musí být zvětšena o přírůstky rezistivity zapříčiněné slaněním. U vodičů typu ALx/STyz se při výpočtu jmenovitého stejnosměrného odporu rezistivita ocelové duše neuvažuje, protože se předpokládá, že proud teče hliníkovou částí lana.

[11, 10, 16, 34, 35, 36, 37]

1.2. Druhy vodičů

Existuje celá řada druhů vodičů pro venkovní vedení VVN, z nichž velká část je vyrobena z materiálů, a dle požadavků, uvedených v kapitole 1.1. Mimo tyto, řekněme klasické vodiče, existuje také mnoho modernějších případně speciálních vodičů z nejrůznějších materiálů. Dle mého názoru by byla škoda se o nich v této práci nezmínit už proto, že některé z nich budu používat v praktické části práce. V následujících odstavcích tyto vodiče popíši, shrnu jejich vlastnosti, výhody a nevýhody.

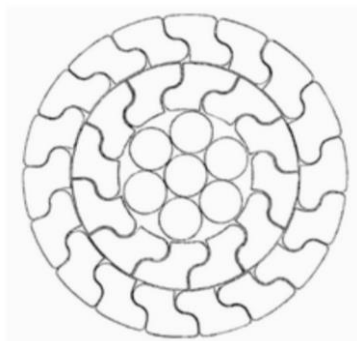
Než přejdu k jednotlivým vodičům, zmíním se o tvarech, jaké vodiče mohou mít. Nejčastější jsou vodiče slané z drátů s kruhovým příčným průřezem. Z toho vyplývá, že průřez vodiče obsahuje poměrně velké oblasti dutin a povrch takového vodiče obsahuje prohlubně mezi dráty horní vrstvy, což s sebou nese nevýhody, které je snaha odstraňovat užitím lepších tvarů drátu, z nichž je spleteno lano. Jeden z nových designů vodiče jsou dráty tvaru Z a druhým jsou segmentovaná lana.

Zformované vodiče tvaru Z se k sobě lépe tisknou a jak dutiny, tak i prohlubně jsou menší. Důsledkem je to, že tyto vodiče mají nižší odpor proti vodičům z kruhových drátů stejného vnějšího průměru. Negativem je, že při stejném průřezu a stejném materiálu, jako vodiče kruhové, bude hmotnost vodiče větší a tím pádem bude i více zatížen stožár. Spokojíme-li se s dosažením stejného odporu, pak nám stačí vodič z drátů tvaru Z s menším průměrem, tím naopak zatížení stožáru snížíme, protože bude nižší větrné namáhání, jež je závislé mimo jiné na průměru vodiče.

Do sebe zapadající dráty horní vrstvy zabraňují korozi uvnitř lana a celkově je stárnutí pomalejší. U vodičů s mazivem tato horní vrstva zabraňuje ztrátě maziva. Bylo změřeno, že po osmnácti letech provozu bylo u tohoto typu množství maziva stejné jako na začátku a u klasických vodičů došlo ke ztrátě necelých 30 % maziva.

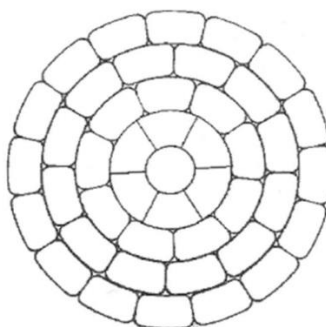
Ohledně vlivu na tlumení vibrací existují dva názory. Výrobce na jednu stranu uvádí, že kompaktnost vrstvy přinese až 2x rychlejší tlumení vibrací, ale na druhé straně by kompaktnost mohla mít za následek zmenšení samo tlumení vibrací, protože k němu dochází zejména ztrátou energie způsobenou vzájemným posunem jednotlivých vrstev po sobě. Naopak pozitivní vliv má použití Z drátu z pohledu tzv. tančení vodičů. Tento jev se projevuje až od určité rychlosti větru. Tato rychlost je podstatně vyšší než u klasických vodičů, a když už tančení vodiče nastane, je v menším rozsahu.

Lana tvaru Z jsou vhodnější i z hlediska koróny, kdy je její efekt menší z důvodu hladkého povrchu vodiče a také kvůli absenci prachových částic, které u klasického vodiče zůstávají v prohlubních horní vrstvy, kdežto u tohoto typu mohou být z povrchu lépe smyty deštěm. Poslední velká výhoda spočívá v tvorbě sněhových vrstev a námrazku. Testy prokázaly, že se námrazek tvoří 1,5x až 3x méně než na klasických vodičích.



Obrázek č. 2 – Vodič s dráty tvaru Z [1]

Segmentované vodiče mají obdobné vlastnosti jako lana s dráty tvaru Z popsané v předchozích odstavcích. Tato lana jsou slaná z drátů lichoběžníkových průřezů (anglicky trapezoidal wire – TW). Rozdíl je pouze v tom, že v segmentovaném lanu drží dráty méně v sobě a tuhost je o něco málo menší.



Obrázek č. 3 – Segmentovaný vodič [1]

[1, 14, 15]

1.2.1. ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

Český název vodiče ACSR je AlFe lano. Je to nejběžnější vodič používaný na venkovním vedení. Skládá se z ocelového jádra (duše), kolem kterého jsou hliníkové dráty v několika vrstvách. Jádro je spleteno z pozinkovaných drátů s velkou pevností a kolem jsou dráty z tvrdě taženého hliníku s velkou vodivostí. Změnami průřezů oceli a hliníku je možné sestavit vodiče s vyšší pevností na úkor vodivosti nebo s vyšší vodivostí a nižší pevností. Pro zlepšení vlastností lana se používá segmentovaného provedení hliníkových drátů.



Obrázek č. 4 – Vodič ACSR [22]

1.2.2. AAC (All Aluminium Conductor) a AAAC (All Aluminium Alloy Conductor)

Jedná se o dva typy celohliníkových vodičů. AAC je homogenní vodič z čistého hliníku a AAAC je homogenní vodič z tepelně ošetřené slitiny Al-Mg-Si. Oba vodiče se vyrábějí i v segmentovaném provedení (AAC/TW a AAAC/TW). Vodič AAC může být náhradou za klasické ACSR lano tam, kde je nutné zachovat proudové zatížení vedení, ale jsou požadovány lehčí vodiče. Vodiče AAAC nabízejí ve srovnání s klasickými ACSR zlepšení tepelných vlastností. Mají vyšší pevnost, protože když natáhneme vodič na podobné procento jmenovité pevnosti jako vodič ACSR, tak můžeme vedení provozovat při vyšších teplotách a průhyb bude menší než u ACSR. Musí se však dát pozor u vedení citlivé na vibrace, kde by natažení na podobné procento pevnosti mohlo způsobit problémy.



Obrázek č. 5 – Vodič AAC [23]



Obrázek č. 6 – Vodič AAC/TW [24]

To, že se jedná o vodič bez ocelového jádra, v sobě skýtá další výhodu a to tu, že je zabráněno vzniku galvanické koroze, jež může vznikat u vodičů ACSR. Použijeme-li ještě u celohliníkových vodičů maziva, které zabrání korozi způsobenou například mořskou solí, získáme ideální vodiče do přímořských oblastí s náročným okolním prostředím.



Obrázek č. 7 – Vodič AAAC [25]

1.2.3. ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)

Jedná se obvykle o kombinaci vodiče AAC a AAAC, kde vodič AAAC tvoří jádro lana a okolo je elektrovedný hliník AAC. Různou kombinací průřezů jednotlivých typů vodičů lze optimalizovat vlastnosti výsledného vodiče ACAR pro konkrétní aplikaci. Zvýšíme-li počet drátů AAAC získáme větší pevnost na úkor vodivosti a naopak větší počet drátů elektrovedného hliníku zapříčiní nižší rezistivitu. Obecně pro stejnou hmotnost vodiče ACAR jako vodiče ACSR dosáhneme vyšší proudové zatížitelnosti a pevnosti.



Obrázek č. 8 – Vodič ACAR[26]

1.2.4. Vysokoteplotní vodiče

Přenosovou schopnost vedení lze zvýšit dvěma základními způsoby. Buď zvětšíme proud tekoucí vedením, anebo napěťovou hladinu, na které je vedení provozováno. Při zvyšování napěťové hladiny je v podstatě nutné celé vedení nahradit úplně novým, což je finančně mnohem náročnější než se pokusit zvýšit kapacitu zvětšením proudu vedením. Jedním ze způsobů zvýšení proudu je výměna vodičů za takzvané vysokoteplotní, které umožňují provoz vodiče při vyšší teplotě. To má za následek vyšší proudovou zatížitelnost vedení. O souvislosti teploty vodiče, proudové zatížitelnosti a klimatických podmínek budu podrobněji psát v další části práce, takže to zde nebudu podrobněji rozebírat.

Vysokoteplotní vodiče musejí být vyrobeny ze speciálních materiálů, protože musí zachovat při vysokých teplotách své mechanické vlastnosti. Většina má obdobnou konstrukci jako klasické vodiče ACSR, ale existuje i speciální typ s mezerou. Jádro vodiče je z nejrůznějších druhů oceli, případně kompozitu, kvůli mechanickým vlastnostem a plášť z hliníkových slitin kvůli vodivosti. V následující tabulce srovnávám vlastnosti slitin hliníku.

Slitina hliníku	Vodivost IACS (%)	Minimální pevnost v tahu (MPa)	Dovolená provozní teplota (°C)	
			Ustálená	Pohotovostní
AL1	61	159 - 200	90	120
Tepelně odolný - TAL	60	159 - 176	150	180
Zvlášť tepelně odolný - ZTAL	60	159 - 176	210	240
Plně žíhaný - 1350-0	63	59 - 97	200 - 250	250

Tabulka č. 1 – Vlastnosti hliníkových slitin [1]

Z tabulky je zřejmé, že slitiny TAL a ZTAL mají podobné vodivostní a mechanické vlastnosti jako klasická slitina AL1, ale jsou schopné provozu při vyšších teplotách. Naopak plně žíhaný hliník má lepší vodivost a snese vyšší provozní teploty, ale jeho mechanické vlastnosti jsou podstatně horší oproti ostatním slitinám z tabulky.

	Minimální pevnost v tahu (MPa)	Modul pružnosti (GPa)	Koeficient lineární délkové roztažnosti ($\cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Galvanizovaná ocel	1230 - 1765	206	11,5
Ocelový drát pokrytý hliníkem (IACS 20,3%)	1070 - 1340	162	13
Ocel s Zn - Al (5 %) povlakem	1380 - 1620	206 (počáteční) 186 (konečný)	11,5
Slitina železa a niklu (36 %) - INVAR	1030 - 1080	162	2,8 - 3,6

Tabulka č. 2 – Vlastnosti ocelí [1]

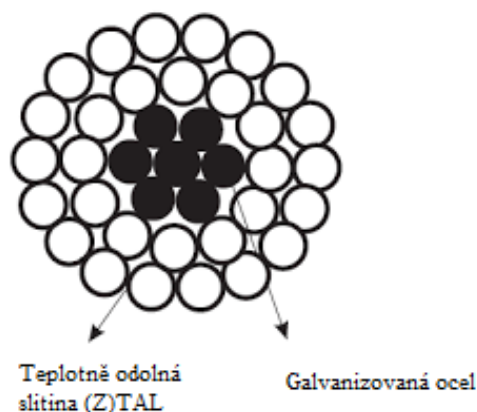
Z tabulky č. 2, která porovnává vlastnosti nejběžněji používaných ocelí, je nejzajímavější slitina železa a niklu (s obsahem Ni 36 %), jež se nazývá INVAR. Má přibližně 4x menší koeficient délkové roztažnosti než ostatní slitiny. Bohužel má také menší mechanickou pevnost než ostatní oceli.

Nyní přejdeme k popisu jednotlivých vysokoteplotních vodičů.

1.2.4.1. (Z)TACSR ((Super) Thermal Alloy Conductor Steel Reinforced)

Vodiče (Z)TACSR se liší od klasických vodičů ACSR pouze tím, že v plášti lana jsou použity dráty z tepelně odolné (TAL) nebo zvláště tepelně odolné (ZTAL) slitiny hliníku, a jejich vlastnosti jsou výsledkem vlastností oceli a hliníku. Tento typ vodiče se svými mechanickými vlastnostmi příliš neliší od ACSR. Na rozdíl od ostatních vysokoteplotních vodičů není navržen, jako nízko průhybový.

Vodič (Z)TACSR lze použít ke zvětšení přenosové schopnosti existujících vedení pouze tam, kde jsou dostatečné vzdálenosti vodičů od terénu a křižovatek (silnice, železnice, vedení elektrizační soustavy a sdělovací vedení), které musí být dodrženy a jsou definovány v normách platných v době výstavby vedení, neboť je zřejmé, že při provozu při vyšších teplotách budou průhyby vodiče větší než při návrhové teplotě +80°C u vodiče ACSR.



Obrázek č. 9 – Vodič (Z)TACSR [29]

1.2.4.2. G(Z)TACSR (Gap ((Super) Thermal Alloy Conductor Steel Reinforced)

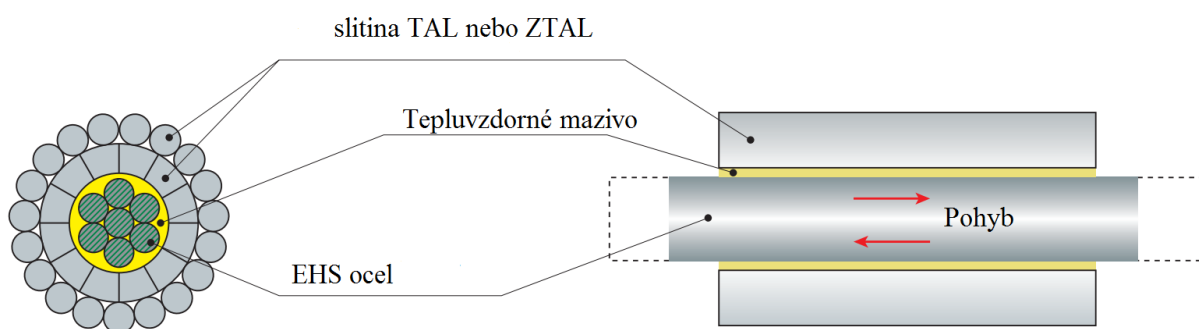
Vodič G(Z)TACSR je specifický svojí konstrukcí, která se výrazně liší od klasického vodiče ACSR. Mezi jádrem z vysoko pevnostní EHS (Extra High Strength) oceli a pláštěm ze slitiny TAL nebo ZTAL je mezera. Mezera je vyplněna mazivem, a aby se předešlo jeho úniku, musí být vrstva pláště přiléhající k mezeře ze segmentovaných vodičů. Mazivo musí být teplu vzdorné, a jeho hlavním úkolem je zabránit tření mezi jádrem a pláštěm, pak se dá považovat pohyb jádra a pláště za vůči sobě nezávislé.

Tento typ vodiče má dvě výhody oproti klasickému vodiči ACSR. První je vyšší proudová zatížitelnost, způsobená tím, že je možné díky použití speciálních slitin, lano provozovat při vyšších teplotách. Při stejném průřezu vodiče a použití slitiny TAL, jejíž provozní teplota je až 150°C, je proudová zatížitelnost 1,5x větší. Použijeme-li slitinu ZTAL s povolenou teplotou 210°C, je proudová zatížitelnost až dvojnásobná. Druhá výhoda

spočívá ve zmenšeném průhybu vodiče. Při provozu vodiče GTACSR s provozní teplotou (150°C) je průhyb 96 % průhybu vodiče ACSR při teplotě 90°C. U vodiče GZTACSR s teplotou 210°C je průhyb 104 % průhybu ACSR (90°C) [21].

Průhyb vodiče je spjat zejména s koeficientem teplotní roztažnosti materiálů vodiče. U klasického vodiče ACSR je tento koeficient přibližně dvojnásobný v porovnání s vodičem G(Z)TACSR, a to z toho důvodu, že u vodiče ACSR je koeficient závislý na kombinaci ocelového jádra a hliníkového pláště, kdežto u G(Z)TACSR pouze na teplotní roztažnosti ocelového jádra, protože plášť vodiče nemá nosnou funkci. Nicméně i u vodiče ACSR může dojít k tomu, že celý tah vodiče je přenesen na ocelové jádro. Stane se to po překročení takzvaného zlomového bodu. Při dalším nárůstu teploty za zlomový bod je průhyb závislý pouze na roztažnosti oceli. Této vlastnosti vodičů ACSR nelze při provozu využívat, protože zlomový bod je kolem teploty 120°C, což je daleko za povolenou provozní teplotou vodiče ACSR.

Nevýhodou tohoto typu lana je jeho složitější instalace. Při napínání se musí rozplést plášť, odkryté ocelové jádro napnout na požadovaný tah a nakonec hliníkové dráty opět navít na jádro. Při modernizaci vedení s použitím tohoto typu vodiče by bylo nutné použít speciální nosné svorky, ostatní prvky izolátorového závěsu by nutné měnit nebylo, takže lze v podstatě jednoduše zdvojnásobit proudovou zatížitelnost vedení za použití vodiče GZTACSR bez nutnosti jiných úprav než výměny nosných svorek, jako by mohla být výměna izolátorových závěsů, nebo dokonce zvyšování stožárů.



Obrázek č. 10 – Příčný a podélný řez vodičem G(Z)TACSR [21]



Obrázek č. 11 – Vodič G(Z)TACSR [21]

1.2.4.3. ZTACIR (Zirconium alloy Aluminum Conductor Invar steel Reinforced)

Vodič ZTACIR je svojí konstrukcí podobný klasickému ACSR, hlavní rozdíl je v materiálech použitých v tomto vodiči. Jádrem je z drátů slitiny zvané INVAR, jedná se o slitinu s 36% obsahem niklu. Plášť je z tepelně odolných slitin hliníku (TAL a ZTAL), což umožňuje provoz až do teplot 150°C, respektive 210°C. Výhoda použití INVARu v jádře spočívá v jeho minimální teplotní roztažnosti, v porovnání s ostatními ocelmi je přibližně třetinová. Na druhou stranu má INVAR menší pevnost v tahu, takže vodič ZTACIR má asi o 8 % menší pevnost než ACSR. Stejně jako u předchozího vysokoteplotního vodiče lze zdvojnásobit proudovou zatížitelnost vedení, ale odpadá komplikace s obtížnější instalací, protože ZTACIR se instaluje na vedení úplně stejně jako vodič ACSR.



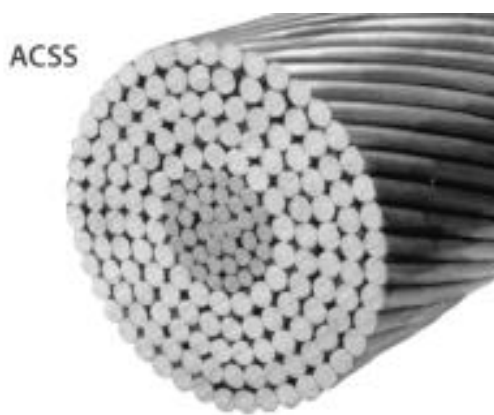
Obrázek č. 12 – Vodič ZTACIR [30]

1.2.4.4. ACSS(/TW) (Aluminum Conductor Steel Supported(/Trapezoidal Wire))

Tento typ vodiče se skládá z plně žíhaných hliníkových drátů navinutých kolem vysoko pevnostního jádra z oceli. Plášť může být jak z drátů kruhového průměru, tak ze segmentovaných drátů. Použitím plně žíhaného hliníku ve stabilizovaném stavu se zvýší provozní teplota lana.

Vzhledem k tomu, že hliník nenese žádné napětí, nehrozí jeho tečení ani při vysokých teplotách. Další pozitivum toho, že hliník nenese napětí je to, že teplotní roztažnost je podobná samotné roztažnosti oceli, která je, jak už bylo uvedeno výše, poloviční ve srovnání s vodičem ACSR a také, že konečný průhyb není ovlivněn tečením hliníku. Pevnost plně žíhaného hliníku je přibližně třikrát menší než tvrdě taženého, tudíž únosnost vodiče ACSS je nižší, na což musíme pamatovat. Nižší pevnost lze kompenzovat použitím extra pevných ocelí v jádře nebo zvětšením průřezu jádra vodiče, případně kombinací obou možností.

Užitím plně žíhaného hliníkového pláště se získá vynikající odolnost lana vůči korozi. Výhodnou vlastností vodiče typu ACSS i ACSS/TW je lepší samo tlumící schopnost a odolnost proti vibracím v porovnání s vodiči ACSR. Přestože se způsob instalace vodiče ACSS v zásadě neliší od instalace vodiče ACSR, je nutno postupovat opatrně, aby nedošlo k jeho poničení, protože vrchní vrstva z plně žíhaného hliníku je podstatně měkčí a náchylnější na poškození než dráty z tvrdě taženého hliníku.



Obrázek č. 13 – Vodič ACSS [31]



Obrázek č. 14 – Vodič ACSS/TW [32]

1.2.4.5. ACCC(Aluminum Conductor Composite Core)

Vodič ACCC je moderní typ vodiče, jež je složen z kompozitního jádra a pláště ze segmentovaných vodičů z plně žíhaného hliníku. Kompozitní jádro je z jednoho drátu, což je rozdíl oproti všem ostatním typům, které ho mají zpravidla slaňované. Materiálem jádra jsou karbonová vlákna obalená speciálními skelnými vlákny. Jádro je pevné (o 25 % pevnější než ocelové jádro) a jeho délka minimálně teplotně závislá.

Výsledné vlastnosti vodiče ACCC se vyznačují nízkým koeficientem teplotní roztažnosti (poloviční proti INVARU a skoro osmkrát menší než u běžné oceli). Oproti oceli je výrazně lehčí (o 60 %), takže umožňuje ve stejném průřezu vodiče obsahovat více hliníkových vrstev, což je dobré z hlediska celkové rezistivity vodiče a s ní související proudové zatížitelnosti.

Tento druh vodiče vyniká svými vlastnostmi u dlouhých rozpětí a tam kde je potřeba dosáhnout malých průhybů z důvodu dodržení minimálních bezpečných vzdáleností.



Obrázek č. 15 – Vodič ACCC [33]

[1, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 27, 30]

2. Mechanika vodiče

2.1. Popis vedení VVN

V kapitole 1 jsem se podrobně zabýval vodiči elektrického vedení VVN. Než přejdu k popisu, jak se vodič na vedení chová z pohledu mechaniky, popíši stručně, jak vedení VVN vypadá. Elektrická energie je z technických a především ekonomických důvodů přenášena na větší vzdálenosti pomocí holých vodičů, jež jsou pomocí izolátorových závěsů připevněny k podpěrným konstrukcím, což může být, buď stožár, u nás v drtivé většině z příhradové konstrukce, nebo sloup (dřevěný, betonový, ocelový ohraňovaný).

Izolátorový závěs je sestava o dostatečné délce, která je závislá na napěťové hladině vedení, skládající se mimo jiné například z nosných svorek, dvojitých ok, rozpěrek a izolátorů. Izolátory v dnešní době mohou být z nejrůznějších materiálů, jako je keramika, sklo, silikon, teflon, pryskyřice, kdy každý má trochu jiné vlastnosti. Nicméně požadavek na izolátor, aby se minimalizovala možnost, že dojde k přeskoku mezi fázovým vodičem a uzemněnou konstrukcí podpěrného bodu eventuálně zemí (objektem spojeným vodič se zemí), je společný bez ohledu na materiál, ze kterého je izolátor vyroben.

Stožáry jsou v drtivé většině z příhradových ocelových konstrukcí. Mohou být také trubkové z bezešvých trubek nebo z ohýbaných plechů. Na našem území se nejčastěji setkáme se stožáry typu soudek, portál, donau, delta a kočka. Z nichž soudek a donau jsou dvou systémové, to znamená, že jsou na nich umístěna dvě vedení, zpravidla jedno na každé straně.

Stožáry lze podle účelu dělit například na:

- Nosné (N) – nesou vedení v přímém směru
- Rohové (R) – zachycují výsledný tah vedení při změně směru (lomu trasy)
- Výztužné (V) – zpevňují mechanicky vedení v přímém směru
- Rohové výztužné (RV) - zpevňují mechanicky vedení v místě lomu trasy
- Zákrutové (Z) – je na nich provedena transpozice vedení (výměna poloh vodičů)

Podobně lze rozdělit stožáry podle funkce na nosné a kotevní. Kotevní je jiný název pro výztužné.

Na stožáry obecně působí síly od vodičů a síly zapříčiněné klimatickými podmínkami, jako je vítr a námraza. Sílu od vodičů je možné rozdělit na vodorovnou

a svislou. Vodorovná je způsobena mechanickým tahem vodiče (jak moc je napnut) a svislá je způsobena vlastní tíhou vodiče a případného námrazku.

Nosné stožáry jsou mezilehlé stožáry v přímém směru. Vodorovné složky tahů vodičů se vzájemně vyruší, tudíž nosné stožáry přenášejí pouze svislé síly působící od vodičů včetně tíhy případného námrazku. Nicméně i na nosné stožáry působí vodorovné síly, a to síly od tlaku větru, který působí na stožár a vodič.

Kotevní stožáry vytvářejí na trase vedení pevné body, ke kterým jsou přes kotevní izolátorové závěsy připojeny vodiče. Mezi oběma stranami stožáru přechází vodič mezi izolátorovými závěsy přes přeponku, jež není mechanicky namáhána. Na kotevní stožár jsou upevněny vodiče, tudíž na něj působí plný tah vodičů.

Na vedení by měly převažovat nosné stožáry, z toho důvodu, že jsou nejlevnější. Mezi nosné stožáry se vkládají stožáry kotevní (výztužné), díky kterým je umožněno napnutí vodičů a omezeno případné šíření mechanické poruchy dále po vedení.

Na namáhání stožárů mají klíčový vliv klimatické podmínky a jimi způsobená zatížení, které na konstrukci působí přímo nebo přes vodič. Jedná se zejména o vítr a námrazu, které nejsou po celé republice všude stejné, kvůli tomu existují větrové a námrazové mapy s přesně definovanými oblastmi a velikostí klimatických vlivů v nich. Důsledkem toho je, že namáhání stožáru, a tím pádem i výsledný typ a rozmístění stožárů v trase, je závislé na oblasti, kterým vedení prochází. V případě, že klimatické vlivy mají za následek takové síly působící na stožár, které nejsou pro standardní stožár dané typové řady dovolené, použije se stožár zesílené konstrukce.

Volně přejdeme k zavěšenému vodiči na vedení. U přenosu elektrické energie pomocí nadzemního elektrického vedení má zásadní roli mechanika vodiče, a to jak při projektování, tak i následně při provozu vedení. Je důležité znát namáhání a průhyby vodičů, a to hned z několika důvodů.

Prvním je, že v normách je stanovena minimální bezpečná vzdálenost vodičů od terénu a speciálních druhů křižovatek jako např. pozemní komunikace, železnice, jiná elektrická vedení přenosové nebo distribuční soustavy, která musí být dodržena při všech provozních stavech, aby mohlo být vedení provozováno. Normalizované hodnoty nejsou jen „zákonem spadlým z nebe“, ale jsou to vzdálenosti pro jednotlivé zatěžovací stavy a typy křižovatek, které mají svůj vývoj na základě zkušeností z provozu, v průběhu let se vyvíjí

a norma je stanoví, tak aby byla minimalizovaná pravděpodobnost, že dojde k přeskoku. Provozními stavy se rozumí nejružnější normou definované modelové kombinace teploty vodiče a okolí, síly a směry větru, námrazu ať už rovnoměrnou nebo nerovnoměrnou v poli křížovanky, pro které jsou stanoveny výše zmíněné minimální vzdálenosti a je nutné je při návrhu vedení výpočetně ověřit. Mimo minimální vzdálenosti od terénu a speciálních křížovatek musí být dodrženy stanovené vzdálenosti mezi jednotlivými fázemi, od zemnicích lan, od konstrukce a od souběžného vedení, na což se musí myslet už při návrhu vedení.

V druhé řadě musí být vedení, potažmo vodič, dostatečně odolný při vichřicích a extrémních námrazách, aby nebyly přerušeny dodávky elektrické energie.

A za třetí z ekonomických důvodů, protože vhodnou volbou namáhání a s ním souvisejícím průhybem lze zmenšit stožáry i základy, takže budou levnější. Zde stojí za připomenutí, že na průhyb má vliv i typ vodiče a klimatické podmínky.

Pokud bychom měli pružný a dokonale ohebný vodič zavěšený mezi dvěma body, prohnul by se do ideální průhybové křivky, paraboly. Ve skutečnosti vodič dokonale ohebný není, takže parabola nereprezentuje model zavěšeného vodiče a byl vytvořen model takzvané řetězovky, která průhyb vodiče reprezentuje daleko přesněji. Rozlišujeme ještě pružnou a nepružnou řetězovku. V praxi se počítá s nepružnou řetězovkou, která je použita z důvodu menší obtížnosti výpočtu, rozdíly jsou nepatrné. U malých a středních rozpětí je při výpočtech možné řetězovku nahradit parabolou a neuděláme výraznou chybu. Toto nahrazení je výhodné, protože se dá lehce definovat klasickou geometrií, na rozdíl od řetězovky, kde se musí počítat průhyb v každém bodě.

Předpoklady u těchto křivek jsou tyto:

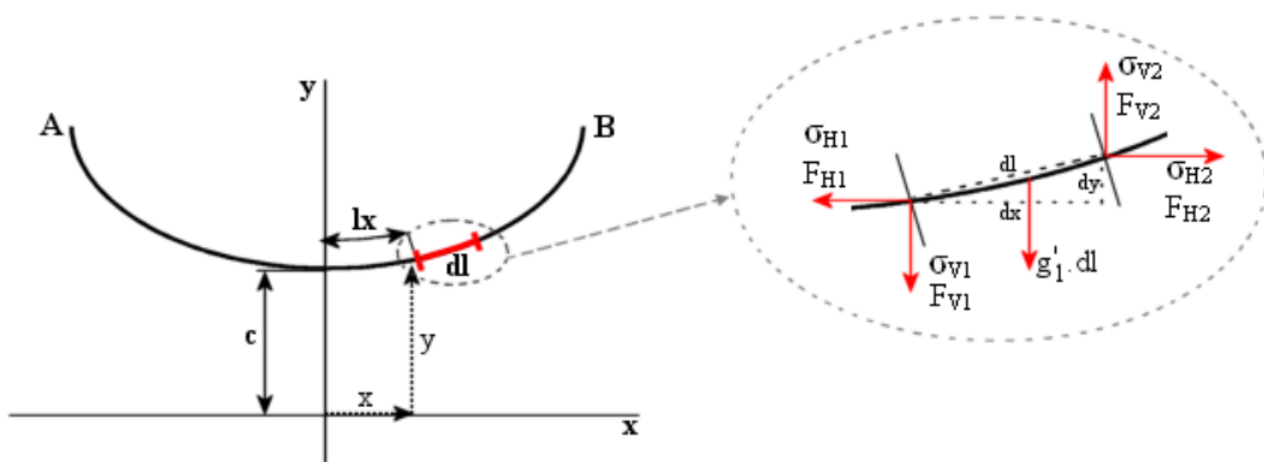
- Parabola – tíha vodiče i přídavného zatížení je rovnoměrně rozdělena po spojnici závěsů
- Nepružná řetězovka – tíha vodiče i přídavného zatížení je rovnoměrně rozdělena po délce vodiče
- Pružná řetězovka – tíha 1 m vodiče i přídavného zatížení je závislá na protažení vodiče v tomto místě, neboli tíha 1 m vodiče je nejmenší v místě, které je nejvíce namáhané

U výše uvedených křivek se nejčastěji počítá délka vodiče, velikost průhybu vodiče a osová síla potřebná pro určení mechanického napětí vodiče. Křivky jsou v ustáleném stavu namáhány pouze tahem, nikoliv tlakem.

[2, 4, 13, 14, 17, 28]

2.2. Souměrná řetězovka a parabola

Při výpočtu souměrné řetězovky a paraboly se předpokládá, že oba konce lana jsou upevněny ve stejné výšce, jinak řečeno jedná se o vodorovné pole. Mezi těmito uchyceními se vodič zdeformuje do řetězovky, jak je ukázáno na obrázku níže.



Obrázek č. 16 – Průhybová křivka - řetězovka [13]

Na obrázku je také vidět, jaké síly působí na element vodiče. Právě z působení sil se vychází při odvození rovnice řetězovky. Vodič se nachází v klidu právě tehdy, jestliže součet sil na vodič působících se rovná nule a také součet momentů sil k libovolnému bodu je nulový, neboli můžeme říct, že vodič je v mechanické rovnováze.

Aby byla splněna podmínka mechanické rovnováhy, musí platit, že vodorovná složka síly i vodorovné namáhání jsou stejné v každém bodě řetězovky. A svislá složka síly v daném bodě řetězovky je rovna tíze vodiče příslušného elementu. Tato síla je minimální ve vrcholu řetězovky a maximální v bodě uchycení.

2.2.1. Řetězovka

Z výše uvedených podmínek vychází odvození rovnice řetězovky, které zde nebudu provádět a uvedu pouze výslednou rovnici:

$$y = \frac{\sigma_H}{\gamma} \cdot \cosh \frac{x}{\frac{\sigma_H}{\gamma}} = c \cdot \cosh \frac{x}{c} \quad (1)$$

kde σ_H je mechanické napětí (Pa)

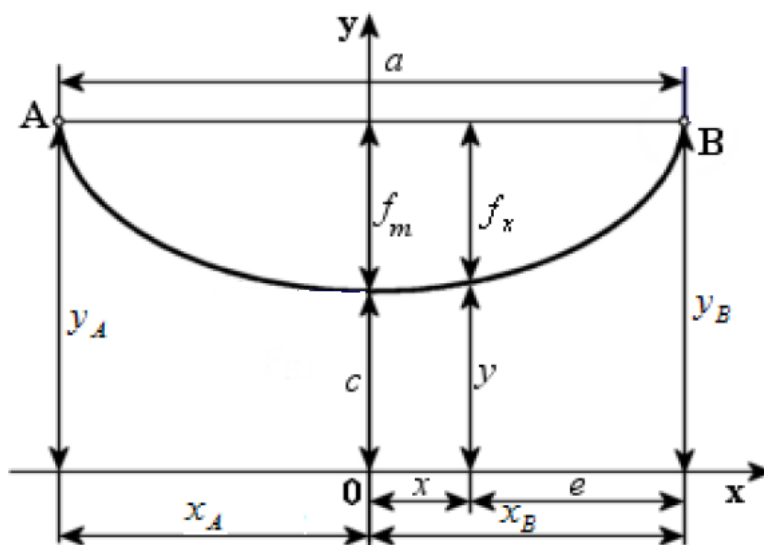
γ je měrná tíha ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)

c je parametr řetězovky (m)

Pokud budeme uvažovat i přetížení vodiče námrazou z (-) je rovnice řetězovky následující:

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

Při výpočtu průhybu řetězovky zavádíme parametr a , jež je celkovou délkou pole řetězovky, čímž myslíme vzdálenost mezi závěsnými body zavěšeného vodiče. U souměrně zavěšeného vodiče platí, že bod maximálního průhybu řetězovky je v polovině délky pole. Z obrázku č. 17 je vidět, že velikost maximálního průhybu získáme tak, že do rovnice řetězovky dosadíme za x polovinu délky pole a od toho odečteme funkční hodnotu v bodě vrcholu (dole řetězovky).



Obrázek č. 17 – Průhyb souměrné řetězovky [13]

$$f_m = c \cdot \cosh \frac{a}{2c} - c = c \cdot \left(\cosh \frac{a}{2c} - 1 \right) \quad (3)$$

Bude-li nás zajímat průhyb v libovolném bodě řetězovky, zavedeme si proměnnou e , která je vzdálenost bodu, v němž určujeme průhyb a bodu závěsu. Pak pro průhyb v tomto bodě platí rovnice:

$$f = c \cdot \left(\cosh \frac{a}{2c} - \cosh \frac{\frac{a}{2} - e}{c} \right) \quad (4)$$

Další věc co nás zajímá, je délka lana mezi body uchycení. Spočte se pomocí integrálu jako délka souměrné řetězovky. Výsledný vztah určující délku lana je následující:

$$l_s = 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c} \quad (5)$$

2.2.2. Parabola

Průhybovou křivku zavěšeného vodiče lze zjednodušeně vyjádřit také pomocí paraboly. Rovnici získáme zjednodušením rovnice řetězovky rozepsané na mocninnou řadu:

$$y = c \cdot \left[1 + \frac{1}{2!} \left(\frac{x}{c} \right)^2 + \frac{1}{4!} \left(\frac{x}{c} \right)^4 + \frac{1}{6!} \left(\frac{x}{c} \right)^6 + \dots \right] \quad (6)$$

Uvažujeme-li pouze druhý člen rozvoje, dostaneme vrcholovou rovnici paraboly ve tvaru:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot c} = \frac{x^2 \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot \sigma_H} \quad (7)$$

Vzorec pro výpočet maximálního průhybu zavěšeného vodiče nahrazenou parabolou je:

$$f_m = \frac{a^2}{8 \cdot c} = \frac{a^2 \cdot \gamma \cdot z}{8 \cdot \sigma_H} \quad (8)$$

Stejně jako u řetězovky lze i u paraboly vypočítat průhyb v libovolném bodě, a to dle vztahu:

$$f = \frac{e \cdot (a - e)}{2 \cdot c} \quad (9)$$

A nakonec vztah pro délku mezi upevněním zavěšeného vodiče vyjádřeného parabolou:

$$l_s = a + \frac{a^3}{24 \cdot c^2} = a + \frac{8}{3} \cdot \frac{f_m^2}{a} \quad (10)$$

Nahrazením zavěšeného vodiče parabolou dochází ke zjednodušení, ale také k chybě. Chyba spočívá v rozdílném průhybu vodiče nahrazeného řetězkou a parabolou při stejných parametrech c a délce rozpětí a . Řetězka leží v celém rozpětí pod parabolou a poměrný rozdíl mezi průhybem řetězky a paraboly stejných parametrů je tedy:

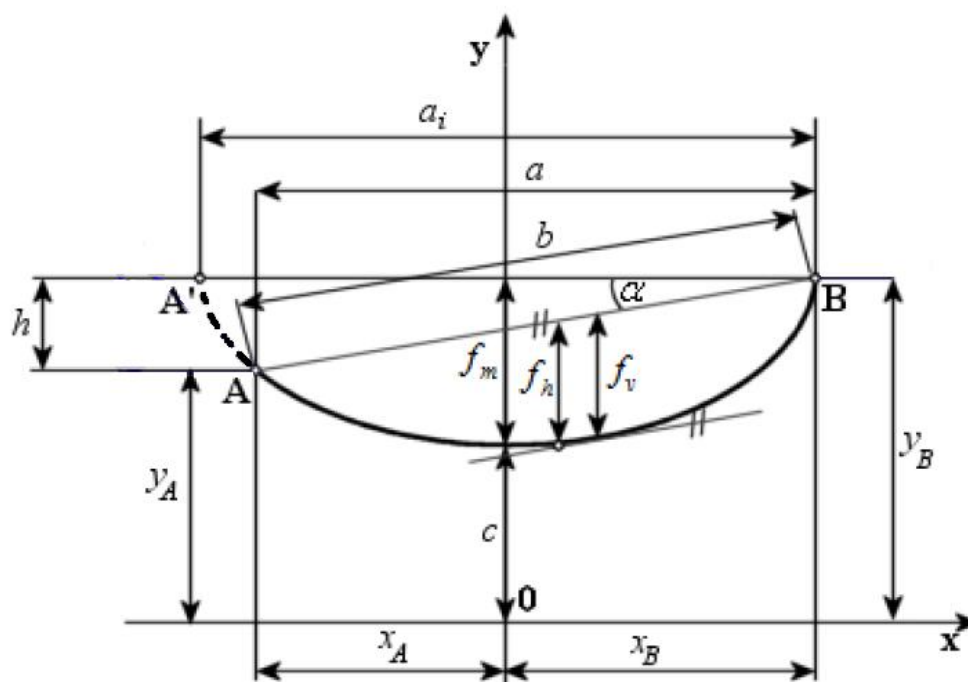
$$\xi = \frac{\left(\frac{a}{c}\right)^2}{48} \cdot \left(1 + \frac{\left(\frac{a}{c}\right)^2}{120}\right) \quad (11)$$

Z tohoto vzorce vyplývá, že čím delší je rozpětí, tím větší je chyba při stejném parametru řetězky c , ale tato chyba není nijak zásadní, protože vezmeme-li například reálné příklady z praxe, tak při rozpětí 350 m a parametru řetězky 1000 m je chyba průhybu paraboly oproti průhybu řetězky necelých 0,25 %. Největší rozdíl mezi průhybem paraboly a řetězky je ve vzdálenosti zhruba 0,15· a od závěsného bodu. Výraznější rozdíly jsou v případě, že se jedná o porovnání mezi nesouměrnou parabolou a nesouměrnou řetězkou. V praxi se při montáži vodič většinou nereguluje na namáhání, ale na průhyb, a proto použijeme-li při montáži průhyb vypočtený dle paraboly, bude skutečné namáhání vodiče větší než vypočtené.

[2, 13]

2.3. Nesouměrná řetězka

Do nesouměrné řetězky se prohne zavěšený vodič v případě, že závěsné body nejsou ve stejné výšce, což jsou prakticky všechny případy na reálných vedeních. Jak taková situace pak vypadá je vidět na obrázku níže. Rozdíl výšek zavěšení A a B nazýváme převýšení a značíme ho h . Vodorovná vzdálenost mezi závěsy je opět rozpětí, značíme ho a . Oproti souměrné řetězce se zde musíme definovat délku šikmého rozpětí b , je to vzdálenost mezi body zavěšení. A nakonec, protože budeme nesouměrnou řetězku řešit podobně jako souměrnou, zavedeme takzvané ideální rozpětí a_i , což je vodorovná vzdálenost jednoho bodu uchycení (zde bod B) a imaginárního bodu uchycení A' , který vznikne protažením řetězky do výšky odpovídající výšce závěsu B.



Obrázek č. 18 – Nesouměrná řetězovka [13]

Při výpočtu počátku pole nesouměrné řetězovky vyjdeme ze vztahu:

$$h = y_B - y_A = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{x_A}{c} \right) = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{a-x_B}{c} \right) \quad (12)$$

Odvozením s pomocí vztahů mezi hyperbolickými funkcemi lze dospět na výsledný tvar určující souřadnici x_B :

$$x_B = \frac{a}{2} + c \cdot \left(\frac{h}{2c \cdot \sinh \frac{a}{2c}} \right) \quad (13)$$

A souřadnice y_B závěsného bodu B je rovna:

$$y_B = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} \quad (14)$$

Vzdálenost vrcholu řetězovky od nižšího závěsného bodu je pak rovna:

$$x_A = \frac{a}{2} - c \cdot \left(\frac{h}{2c \cdot \sinh \frac{a}{2c}} \right) \quad (15)$$

Ideální rozpětí je evidentně dvakrát vzdálenost vrcholu řetězovky od závěsného bodu B:

$$a_i = a + 2c \cdot \left(\frac{h}{2c \cdot \sinh \frac{a}{2c}} \right) \quad (16)$$

Mohou nastat tři případy umístění vrcholu řetězovky. Vrchol řetězovky je mezi závěsnými body A a B, jestliže platí:

$$h < c \cdot \cosh \frac{a}{c} - c \quad (17)$$

Vrcholem řetězovky je právě bod A, když platí:

$$h = c \cdot \cosh \frac{a}{c} - c \quad (18)$$

A nakonec stav, kdy vrchol řetězovky neleží mezi závěsnými body, ale až za bodem A. Tento stav nastane v případě, že platí:

$$h > c \cdot \cosh \frac{a}{c} - c \quad (19)$$

Na stav kdy, vrchol leží mimo skutečné rozpětí, je třeba při projektování pamatovat. Nastává u velkých převýšení a má za následek, že níže umístěný izolátorový závěs je namáhán silou od vodiče, kterou je nadzvedáván. Izolátor se v tomto případě musí zatížit například závažími.

Nyní rozeberu průhyby nesouměrně zavěšeného vodiče, kterých je ve srovnání se souměrnou řetězovkou více. Můžeme rozlišovat maximální průhyb ideálního pole, průhyb v libovolném bodě šikmého pole, charakteristický průhyb a viditelný průhyb.

Začnu s maximálním průhybem ideálního pole, tj. pole se závěsy ve stejné výšce, kdy se maximální průhyb f_m rovná vztahu:

$$f_m = y_B - c = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} - c = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - 1 \right) \quad (20)$$

Podobně lze vypočítat průhyb v libovolném bodě šikmého pole, kde zaujme zavěšený vodič tvar řetězovky:

$$f_x = y_B - y_x = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} - c \cdot \cosh \frac{x}{c} = c \cdot \left(\cosh \frac{a_i}{2c} - \cosh \frac{x}{c} \right) \quad (21)$$

Charakteristický průhyb f_h je průhyb uprostřed rozpětí, nebo jinak řečeno svislá délka mezi středem spojnice rozpětí a řetězovkou. Nejdříve musíme znát vzdálenost bodu, kde bude charakteristický průhyb od počátku. Vzdálenost x_k se spočítá jako:

$$x_k = \frac{x_A + x_B}{2} - x_A \quad (22)$$

A poté charakteristický průhyb je:

$$f_h = f_m \cdot \cosh \frac{x_k}{c} \quad (23)$$

Posledním průhybem u nesouměrně zavěšeného vodiče je viditelný průhyb. Jedná se o svislou vzdálenost mezi spojnicí závěsů A, B a tečnou k řetězovce. Prvně je potřeba určit vzdálenost od počátku pro bod s viditelným průhybem, označme ho x_v :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a} = \sinh \frac{x_v}{c} \quad (24)$$

$$x_v = \frac{h}{a \cdot \sinh\left(\frac{1}{c}\right)} \quad (25)$$

Budeme předpokládat řetězovku procházející tímto bodem o souřadnici y_v rovnou výrazu:

$$y_v = c \cdot \cosh \frac{x_v}{c} \quad (26)$$

Dále je potřeba znát y_B , které jsme si spočítali výše v (14) a můžeme zavést výškový rozdíl v místě viditelného průhybu h' :

$$h' = (x_B - x_v) \cdot \frac{h}{a} \quad (27)$$

A konečně se dostáváme ke vztahu pro viditelný průhyb f_v :

$$f_v = y_B - y_v - h' \quad (28)$$

Na závěr této podkapitoly uvedu, jak se spočítá délka zavěšeného vodiče, opět se k výslednému vztahu dojde integrací jako u souměrné řetězovky, akorát budou jiné meze integrace. Dojdeme k výslednému vztahu:

$$l_s = c \cdot \left(\sinh \frac{x_B}{c} + \sinh \frac{x_A}{c} \right) \quad (29)$$

A následnou úpravou lze dostat jiný tvar:

$$l_s = \sqrt{h^2 + \left(2c \cdot \sinh \frac{a}{2c} \right)^2} \quad (30)$$

[1, 2, 13]

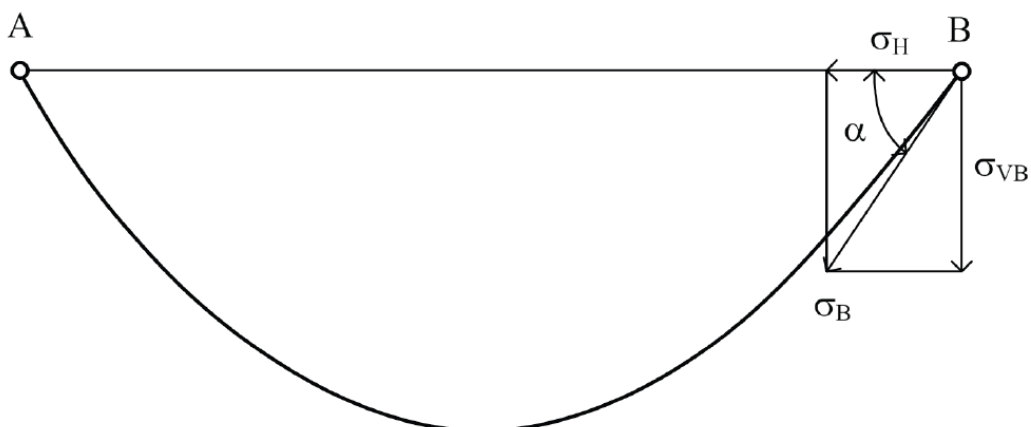
2.4. Namáhání vodiče

Mechanické napětí ve vodiči je v každém bodě dáno vektorovým součtem horizontální složky mechanického napětí σ_H a vertikální složky mechanického napětí σ_V . Horizontální složka je v každém bodě zavěšeného vodiče stejná. Naproti tomu vertikální složka je závislá na místě, v němž se namáhání vodiče zjišťuje.

V dolu (místo maximálního průhybu) je tah ve vodiči roven váze zavěšeného vodiče včetně přídatného zatížení (námrazek), který má stejnou délku jako parametr c :

$$\sigma_H = c \cdot \gamma \cdot z \quad (31)$$

Často při nesouměrně zavěšených vodičích nebo při velkých rozpětích je nutné spočítat namáhání u závěsu, jež může být znatelně větší oproti namáhání v dolu. Na obrázku č. 19 je vidět souměrná řetězovka s vyznačenými namáháními v závěsném bodě B.



Obrázek č. 19 – Namáhání v bodě závěsu [1]

Výsledné namáhání, což jak už bylo řečeno je vektorový součet složek mechanického napětí v závěsném bodě B, má směr tečny k řetězovce v tomto bodě a svírá s osou x úhel α .

Namáhání je určeno následujícími rovnicemi, které nebudu odvozovat a napíši pouze dva výsledné tvary:

$$\sigma_B = \sigma_H \cdot \cosh \frac{a}{2c} = \sigma_H + f_m \cdot \gamma \cdot z \quad (32)$$

Ze vztahů je patrné, že namáhání v závěsném bodě vodiče, je pro daný vodič s definovaným přetížením, závislé pouze na délce rozpětí a parametru c , nebo jen na maximálním průhybu.

Tah v bodě závěsu F_B se rovná váze zavěšeného vodiče, včetně přídavného zatížení, jehož délka je rovna y_B . Nebo se také tah v závěsném bodě rovná tahu v dole zvětšeném o váhu zavěšeného vodiče, včetně přídavného zatížení, jehož délka je stejná jako průhyb f_m . Vyjádřeno matematicky je to takto:

$$F_B = y_B \cdot g \cdot (q_1 + q_2) = \sigma_H \cdot S + f_m \cdot S \cdot \gamma \cdot z \quad (33)$$

kte F_B je tah v bodě závěsu (N)

S je průřez vodiče (mm^2)

g je tíhová konstanta ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

γ je měrná tíha ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)

q_1 je hmotnost 1 m vodiče ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)

q_2 je hmotnost přídavného zatížení vodiče ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)

Svislá složka namáhání σ_v se určí z obrázku č. 19 pomocí $\text{tg } \alpha$. Bude-li nás opět zajímat svislé namáhání v bodě závěsu B, lze ho vyjádřit pomocí délky řetězovky l_s následujícím vztahem:

$$\sigma_{vB} = \frac{l_s \cdot \gamma \cdot z}{2} \quad (34)$$

Svislá složka tahu se rovná:

$$F_B = S \cdot \sigma_{vB} = S \cdot \sigma_H \cdot \sinh \frac{a}{2c} \quad (35)$$

A svislý tah v bodě závěsu je roven tíze poloviny délky zavěšeného vodiče, včetně přídavného zatížení:

$$F_{vB} = S \cdot \frac{l_s \cdot \gamma \cdot z}{2} = \frac{l_s \cdot g \cdot (q_1 + q_2)}{2} \quad (36)$$

Když zavěšíme vodič, tak jeho délka je větší než délka vodiče ležícího volně na hladké vodorovné rovině. Dochází k prodloužení zavěšeného vodiče o Δl , jež se rovná:

$$\Delta l = \frac{l_s \cdot \sigma_B + a \cdot \sigma_H}{2 \cdot E} \quad (37)$$

kde E je modul pružnosti (Pa)

To znamená, že prodloužení zavěšeného vodiče je aritmetický průměr mezi prodloužením vodiče dlouhého jako řetězovka nataženého tahem σ_B a prodloužením vodiče dlouhého jako rozpětí a nataženého tahem σ_H .

[1, 2, 13]

2.5. Stavová rovnice – vliv změny teploty a zatížení

Zavěšený vodič je ovlivňován prostředím, kterým vedení prochází, a aktuálními klimatickými podmínkami. Nicméně předchozí úvahy vycházely z předpokladu, že namáhání napnutého vodiče je neměnné. Realita je taková, že namáhání se mění v závislosti na okolní teplotě, námrazku a větru. Než se pustím do odvození stavové rovnice zavěšeného vodiče, tak se krátce zmíním, jak jednotlivé klimatické podmínky ovlivní zavěšený vodič.

Změní-li se teplota, ať už vodiče nebo okolí, tak se změní i délka a mechanické napětí ve vodiči. S rostoucí teplotou se zvětšuje i délka vodiče a tím i průhyb, ale namáhání vodiče se naopak snižuje. A opačně, s klesající teplotou se zmenší délka vodiče a průhyb, ale vzroste namáhání vodiče. Z této závislosti je zřejmé, že minimální uvažovaná teplota je podstatná z hlediska sil působících na vodič a izolátorové závěsy. Maximální uvažovanou teplotu je pak důležité hlídat z hlediska největšího průhybu.

Námraza na vodiči a vítr působící na tento vodič způsobí přídatné zatížení, které má za následek zvětšení průhybu a snížení mechanického namáhání ve vodiči.

Při odvození stavové rovnice budeme uvažovat dva stavy vedení, původní a konečný. Veličiny v původním stavu označíme indexem 0 a v konečném stavu indexem 1. Vodič se při změně teploty $\Delta \vartheta$ prodlouží anebo zkrátí o Δl_ϑ dle vztahu:

$$\Delta l_\vartheta = \alpha \cdot l_0 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta \vartheta \quad (38)$$

kde α je součinitel tepelné délkové roztažnosti ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Je-li původní teplota vyšší než konečná, je Δl_{ϑ} záporné a dojde ke zkrácení délky vodiče a naopak. Pokud se vodič prodlouží, zvětší se jeho průhyb a poklesne mechanické napětí o $\Delta\sigma_H$, díky tomu se vodič pružně zkrátí o Δl_{σ} dle vztahu:

$$\Delta l_{\sigma} = \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) = \frac{l_0}{E} \cdot \Delta\sigma_H \quad (39)$$

kde E je modul pružnosti (MPa)

σ_H je horizontální složka namáhání vodiče (MPa)

Celková změna délky zavěšeného vodiče Δl pak bude:

$$\begin{aligned} \Delta l &= \Delta l_{\vartheta} - \Delta l_{\sigma} = \alpha \cdot l_0 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) = \\ &= l_0 \cdot \left[\alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \right] \end{aligned} \quad (40)$$

Délka zavěšeného vodiče se při náhradě parabolou obecně spočítá, jak již bylo uvedeno výše následujícím vztahem:

$$l = a + \frac{a^3}{24 \cdot c^2} = a + \frac{a^3 \cdot \gamma^2}{24 \cdot \sigma_H^2} \quad (41)$$

Odečteme-li původní délku od konečné, dostáváme pro změnu délky vztah:

$$\Delta l = l_1 - l_0 = \frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_0} \right) = \frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{\gamma_1^2}{\sigma_{H1}^2} - \frac{\gamma_0^2}{\sigma_{H0}^2} \right) \quad (42)$$

Oba vztahy pro změnu délky vodiče Δl se přirozeně musejí rovnat a lze tedy napsat stavovou rovnici:

$$\frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{\gamma_1^2}{\sigma_{H1}^2} - \frac{\gamma_0^2}{\sigma_{H0}^2} \right) = l_0 \cdot \left[\alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \right] \quad (43)$$

Při zjednodušujícím výpočtu pomocí paraboly lze přibližně uvažovat, že platí $l_0 \approx a$, potom lze stavovou rovnici přepsat ve tvaru:

$$\frac{a^2}{24} \cdot \left(\frac{\gamma_1^2}{\sigma_{H1}^2} - \frac{\gamma_0^2}{\sigma_{H0}^2} \right) = \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \quad (44)$$

Úpravami lze dosáhnout tvaru kubické rovnice pro výpočet konečného namáhání σ_{H1} , také je výhodné γ_1 a γ_0 nahradit součinem měrné tíhy vodiče γ_v a přetížení z_1 , respektive z_0 . Po tomto všem se stavová rovnice zavěšeného vodiče rovná:

$$\sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \cdot \left[\frac{E \cdot \gamma_v^2}{24} \cdot \left(\frac{a \cdot z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + \alpha \cdot E \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] - \frac{E \cdot \gamma_v^2}{24} \cdot (a \cdot z_1)^2 = 0 \quad (45)$$

[1, 2, 13]

3. Proudová zatížitelnost vodičů

Po kapitole věnující se vodičům a jejich druhům a po kapitole popisující mechaniku zavěšeného vodiče, přejdu k části zabývající se teplotou a proudovou zatížitelností vodiče.

Této problematice se věnoval Ing. Jaroslav Tomčík, CSc. a s kolegy publikoval články Vliv klimatických podmínek na zatížitelnost ocelohliníkových lan a Proudové dimenzování AlFe lan. Z těchto článků a z technických norem, dnes je platná ČSN EN 50341, se při výpočtech proudové zatížitelnosti a projektování vedení vychází dodnes. Dále se tímto tématem zabývala pracovní skupina číslo 22.12 profesní organizace CIGRÉ v článku Thermal behaviour of overhead conductors.

Všechny tyto materiály vychází ze stejných předpokladů a teoretických poznatků, které níže uvedu také. Přesto jsou v nich i drobné rozdíly, jež ovlivňují výsledné hodnoty proudové zatížitelnosti vodičů.

3.1. Bilanční rovnice tepelných výkonů

Pro zhodnocení tepelných výkonů a teploty vodiče se nejčastěji využívá následující bilanční diferenciální rovnice, kde součtem všech výkonů (z pravé strany rovnice) je výkon akumulující tepelnou energii ve vodiči:

$$M \cdot c_p \cdot \frac{dT_{AV}}{dt} = P_Z + P_S - P_R - P_C \quad (46)$$

kde

M je poměrná hmotnost vodiče (kg/m), která se spočítá dle vztahu

$$M = \rho \cdot S = \text{hustota} \cdot \text{průřez}$$

c_p je měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_{AV} je teplota vodiče ($^{\circ}\text{C}$)

P_Z jsou Jouleovy ztráty (W/m)

P_S je výkon dodaný slunečním zářením (W/m)

P_R je výkon odvedený radiací (W/m)

P_C je výkon odvedený konvekcí (W/m)

V této práci budu zkoumat ustálený stav. To je takový stav, kdy parametry ovlivňující teplotu vodiče jsou konstantní. Jak bude popsáno podrobněji dále, jedná se o tyto parametry: elektrický proud protékající vodičem, rychlost a směr větru ochlazující vodič, sluneční záření dopadající na vodič a okolní teplota. Za předpokladu konstantních parametrů uvedených výše je časová změna teploty vodiče nulová, tím se rovnice (46) zjednoduší a přejde do tvaru:

$$0 = P_Z + P_S - P_R - P_C \quad (47)$$

,což lze upravit na tvar:

$$P_Z + P_S = P_R + P_C \quad (48)$$

Rovnici (48) lze vyjádřit také jako:

$$\textit{Teplo dodané} = \textit{Teplo odevzdané}. \quad (49)$$

Mimo tepelné výkony, které jsem uvedl a budu dále podrobněji rozebírat, na vodič působí i další. Například zahřívání vlivem koróny nebo ochlazování vypařováním, je-li vodič v kontaktu s vodní párou obsaženou ve vzduchu nebo vodními kapkami, jak je uvedeno ve Zprávě pracovní skupiny 22 CIGRÉ. Nicméně oba tyto vlivy jsou zanedbatelné a v praxi se neuvažují.

3.1.1. Jouleovy ztráty

Začneme s tepelnými výkony, které vodiči teplo dodávají. Nejvýznamnějším tepelným výkonem zahřívající vodič jsou takzvané Jouleovy ztráty vyvolané průchodem střídavého provozního proudu I_P tekoucím vodičem a jsou závislé na střídavém odporu vedení R_{AC} . V katalogích lan, ale bývá uveden stejnosměrný odpor při určité teplotě, nejčastěji při teplotě 20°C (R_{DC20}), což skýtá dva problémy. První je ten, že teplota není oněch 20°C , ale zpravidla vyšší a druhý je, že vodičem teče střídavý proud.

Odpor kovů s rostoucí teplotou stoupá. To jak s teplotou odpor roste, je charakteristické pro každý materiál. Pak lze napsat následující:

$$R_{DCx} = R_{DC20} \cdot (1 + b \cdot (T_x - T_{20})) \quad (50)$$

kde R_{DCx} a T_{DCx} jsou odpory, které počítáme a teplota, při které je počítáme

b je teplotní součinitel odporu - hliník $4,03 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ a železo $4,5 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$

R_{DC20} je stejnosměrný odpor při 20°C (Ω)

To, že vodičem teče střídavý proud a ne stejnosměrný, způsobuje ve vodičích přídavné ztráty, takže střídavý odpor je větší než stejnosměrný. Poměr mezi střídavým a stejnosměrným odporem vyjadřuje koeficient k_{AC} a je vždy větší než 1. Jeho velikost závisí zejména na skinefektu, hysterezních ztrátách, vířivých proudech a proudovém zatížení. Při jeho odvození se vychází z předpokladu, že tepelný výkon vstupující do vodiče musí být při stejné teplotě stejný, ať se jedná o stejnosměrný nebo střídavý proud tekoucí vodičem. Platí tedy:

$$I_{AC}^2 \cdot R_{AC} = I_{DC}^2 \cdot R_{DC} \quad (51)$$

Ale abychom dosáhli číselné hodnoty koeficientu, musí se provést měření na vodiči a z těchto měření poté vyjde hodnota k_{AC} . Jako příklad můžeme vyjít z měření, které bylo provedeno pracovní skupinou CIGRE. Jednalo se o AlFe lano s třemi vrstvami hliníkových vodičů s označením „Zebra“, a vyšel jim následující vztah pro střídavý proud:

$$I_{DC} = I_{AC} \cdot \sqrt{1,0123 + 2,36 \cdot 10^{-5} I_{AC}} \quad (52)$$

Z rovnice (51) je vidět, že:

$$k_{AC} = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \left(\frac{I_{DC}}{I_{AC}}\right)^2 \quad (53)$$

Takže pro třívrstvý vodič je koeficient k_{AC} roven 1,0123. Pro vodič s jednou nebo dvěma vrstvami hliníku o průřezu větším než 175 mm^2 platí dle materiálu CIGRE, že $k_{AC} = 1,0045$. Pro vodiče s menším průřezem jsou v materiálu stanoveny složitější vztahy, které zde nebudu uvádět i kvůli tomu, že vodiče VVN a ZVN mají zpravidla průřezy větší než 175 mm^2 . V článku Ing. Tomčíka [3] jsou uvedené jiné hodnoty k_{AC} , a to následující.

Pro vodič s jednou hliníkovou vrstvou se k_{AC} rovná 1,3. Máme-li vodič s dvěma vrstvami hliníku pak $k_{AC} = 1,005$, pro tři vrstvy hliníku je pak $k_{AC} = 1,06$. A nakonec pro vodič třemi vrstvami hliníku se k_{AC} rovná 1,05.

Nyní můžeme napsat výsledný vztah pro Jouleovy ztráty s využitím výše uvedených poznatků a odvození:

$$P_Z = I_P^2 \cdot R_{AC} = I_P^2 \cdot R_{DC20} \cdot k_{AC} (1 + b \cdot (T_{AV} - 20)) \quad (54)$$

3.1.2. Výkon dodaný Sluncem

Druhý výkon dodávající teplo vodiči je sluneční záření. Celkové sluneční záření dopadající na zemský povrch, a tedy zahřívající náš vodič, se skládá ze tří částí. Záření přímé, odražené a difúzní. Pro náš výpočet můžeme bez významné ztráty přesnosti záření odražené a difúzní zanedbat, protože se na celkovém vyhřívání vodiče podílejí v kritických případech maximálně 4 %.

Pro tento výkon můžeme napsat následující rovnici:

$$P_S = \alpha \cdot D \cdot I_P \cdot \sin \omega \quad (55)$$

kde α je koeficient pohltivosti slunečního záření daným povrchem (-)

D je průměr vodiče (m)

I_P intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na kolmou rovinu k směru slunečních paprsků (W/m^2)

ω úhel mezi osou slunečních paprsků a osou vodiče (rad)

Hodnota koeficientu pohltivosti α , jež je závislá na materiálu vodiče, době provozu a na okolním prostředí, se musí volit a je k tomu několik přístupů. V národním normativním aspektu k normě ČSN EN 50341, jež se zabývá návrhem vedení nad 45 kV, se uvažuje velikost $\alpha=0,5$. Stejně jako ve výpočtech v příspěvku pracovní skupiny 22.12 organizace CIGRÉ. Zde je dále uvedeno, že koeficient pohltivosti se mění v závislosti na čase a místě, kde je vodič provozován. Pro nový lesklý hliníkový vodič je koeficient 0,23 a pro vodič užívaný dlouho v průmyslovém prostředí může být velikost α až 0,95. Ve svém článku pánové Tomčík a Šebelík uvádějí vztah pro výpočet tohoto koeficientu, který přebrali z [7] a má následující tvar:

$$\alpha = 0,43 + \frac{0,7 \cdot r}{1,22 + r} \quad (56)$$

kde r je počet provozních let vodiče

Vyjde-li tento koeficient větší než 1, pak $\alpha = 1$. Dle tohoto vzorce se velikost koeficientu pohybuje od 0,43 u nového vodiče a od šestého roku provozu se uvažuje α rovna 1.

Je patrné, že výše uvedené přístupy se liší. Při projektování vedení se uvažuje s předpokládanou životností daného vedení, aby za každého okamžiku provozu vedení bylo provozování vedení bezpečné svému okolí a splňovalo veškeré normalizované hodnoty. Jelikož například pro návrh vodičů se běžně uvažuje s jejich životností 30 let, proto když se bude počítat, že koeficient pohltivosti je jedna, neudělá se chyba.

Intenzita přímého slunečního záření je závislá na poloze slunce na obloze, která se mění v průběhu dne i během celého roku, dále na zeměpisné šířce místa na Zemi, nadmořské výšce tohoto místa, znečištění atmosféry a v neposlední řadě i na aktuálním počasí (oblačnost, mlha...). Pro podmínky České republiky se celkové sluneční záření I_p volí 1000 W/m^2 , jak je uvedeno v národním normativním aspektu k ČSN EN 50431. Zajímavé je, že ČEPS a.s. uvažuje pro letní období intenzitu slunečního záření 1200 W/m^2 a pouze 400 W/m^2 pro zimní období.

Pro úhel ω , který svírají sluneční paprsky s osou vodiče, existují poměrně složité goniometrické vzorce (myšleno pro tento případ), které jsou použity i v [9]. Tyto vzorce zohledňují měsíc a den v roce, azimut vodiče, zeměpisnou šířku a sluneční čas. My si vystačíme s tím, že s ohledem na bezpečnost návrhu, budeme brát nejnepříznivější případ, kdy je $\sin \omega = 1$, což platí pro $\omega = 90^\circ$. V normě ani národním normativním aspektu se velikost tohoto úhlu nepředepisuje. V příspěvku CIGRE je brán také úhel $\omega = 90^\circ$.

3.1.3. Výkon odvedený konvekcí

Prvním tepelným výkonem ochlazující vodič, který budu uvažovat, je konvekce. Konvekci můžeme rozdělit na volnou a nucenou. K volné konvekci dochází při bezvětří, kdy je proudění chladícího média (vzduchu) způsobeno rozdílem teplot vodiče a vzduchu, respektive změnou hustoty vzduchu u vodiče během jeho ohřívání. Na rozdíl od tohoto je při nucené konvekci proud vzduchu vyvolán větrem. Na ochlazování vodiče má tedy vliv průměrná rychlost větru, nárazovost větru, úhel mezi směrem větru a normálou k ose vodiče

a výška vodiče nad terénem a jeho členitost. Všechny tyto vlivy lze pro naše potřeby zjednodušit tak, že je nahradíme ekvivalentní rychlostí větru w_s , jež má stejný ochlazovací účinek.

V dalším textu budou použity tyto fyzikální konstanty a podobnostní číslo:

$$\text{Normální tíhové zrychlení } g \quad g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Teplotní součinitel rozpínivosti vzduchu } \beta = 1/(T+273,15) \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Prandtlovo číslo pro vzduch } Pr = 0,71$$

Definiční teplota T pro následující výpočty bude uvažována teplota mezní stykové vrstvy chladicího média:

$$T = \frac{T_{AV} + T_{okolí}}{2} \quad (57)$$

Kinematická viskozita vzduchu ν (m^2/s) mírně závisí na teplotě T a na nadmořské výšce V_H (m). Kdežto tepelná vodivost vzduchu λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) závisí pouze na teplotě. V intervalu $0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$ a $V_H < 2000$ lze kinematickou viskozitu a tepelnou vodivost vzduchu aproximovat:

$$\nu = 10^{-7} \cdot (133 + 0,96 \cdot T + 0,019 \cdot V_H + 0,000113 \cdot V_H \cdot T) \quad (58)$$

$$\lambda = 6,68 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,0244 \quad (59)$$

Pro známý průměr vodiče D , který pro případy obtékání vodiče vzduchem je zároveň definičním rozměrem používaným pro výpočet podobnostních čísel, je definováno Grashoffovo číslo:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot D^3 (T_{AV} - T_{okolí})}{\nu^2} \quad (60)$$

Dalším podobnostním číslem potřebným k výpočtu tepelného výkonu konvekci je Nusseltovo číslo, které se liší pro volnou a nucenou konvekci. Pro volnou konvekci platí:

$$Nu_V = c_V \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (61)$$

kde konstanta c_v nabývá hodnot mezi 0,436 a 0,54, je možno zvolit průměrnou hodnotu $c_v=0,5$.

Nusseltovo číslo pro nucenou konvekci závisí na Reynoldsově čísle:

$$Re = \frac{w_s \cdot D}{\nu} \quad (62)$$

Pak

$$Nu_N = c_N \cdot Re^n \quad (63)$$

Konstanty c_N a n jsou závislé na Reynoldsově čísle dle následující tabulky:

Re	c_N	n
$1 \leq Re \leq 4$	0,891	0,33
$4 \leq Re \leq 40$	0,821	0,385
$40 \leq Re \leq 4000$	0,615	0,466
$4000 \leq Re \leq 40\ 000$	0,174	0,618
$40\ 000 \leq Re \leq 400\ 000$	0,0239	0,805

Tabulka č. 3 – Velikost konstant c_N a n [1]

Pro zajištění spojitého průběhu Nusseltova čísla v oblasti přechodu mezi volnou a nucenou konvekci je doporučováno zavést výsledné Nusseltovo číslo Nu :

$$Nu = \sqrt[4]{Nu_V^4 + Nu_N^4} \quad (64)$$

Chceme-li respektovat vliv úhlu ψ mezi směrem větru a normálou k ose vodiče, lze Nusseltovo číslo korigovat následujícím vztahem:

$$k_w = 1,194 - \sin \psi - 0,194 \cdot \cos 2\psi + 0,364 \cdot \sin 2\psi \quad (65)$$

Jestliže nepřevládá žádný směr větru, uvažujeme $\psi = 45^\circ$.

Pro součinitele přestupu tepla α ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), který je klíčový pro ochlazovací tepelný výkon platí:

$$\alpha = k_w \cdot \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (66)$$

Nyní už máme definované všechny potřebné veličiny pro výpočet tepelného výkonu odváděného z vodiče konvekcí, výsledný vzorec je následující:

$$P_C = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{AV} - T_{okolí}) \quad (67)$$

Při výpočtu odvedeného výkonu konvekcí budu počítat s nadmořskou výškou 400 metrů nad mořem, což je stejně, jako uvažuje ČEPS. Ve vztahu je použit vnější průměr vodiče D , protože se stejně v mezerách mezi slaňovanými dílčími vodiči vytvoří vrstva vzduchu, která se na tepelné výměně konvekcí nepodílí. Definiční teplota T bude nejčastěji rovna $57,5^\circ\text{C}$, což je průměr normou určené okolní teploty $+35^\circ\text{C}$ a návrhové teploty vodiče $+80^\circ\text{C}$. Ve výpočtech dle materiálu CIGRE jsou uvedeny trochu odlišné empirické vztahy pro výpočet podobnostních čísel a z toho důvodu vychází obvykle výsledný ochlazovací výkon konvekcí nižší.

3.1.4. Výkon odvedený radiací

Druhým a zároveň posledním výkonem ochlazující vodič, který uvažuji, je výkon odvedený radiací (někdy také nazýván sáláním). Tento výkon je určen známým vztahem:

$$P_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot D \cdot [(T_{AV} + 273,15)^4 - (T_a + 273,15)^4] \quad (68)$$

kde T_{AV} je teplota vodiče ($^\circ\text{C}$)

T_a je teplota okolí ($^\circ\text{C}$)

D je průměr vodiče (m)

σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

ε je koeficient emisivity tepelného záření (-)

Velikost koeficientu ε je těžké přesně určit. Je závislý na povrchu vodiče, jež se v čase mění, v [6] je uvedeno, že se pohybuje od 0,23 u nového vodiče až po 0,95 u vodiče vystavenému po dlouhou dobu znečištěnému prostředí v průmyslové oblasti. Proto se velikost ε volí. U výpočtu dle (NNA a Cigre) se uvažuje $\varepsilon = 0,5$. Ve zdroji [7], se kterým počítá ve své práci Ing. Tomčík [3], se koeficient emisivity spočte dle vztahu:

$$\varepsilon = 0,23 + \frac{0,7 \cdot r}{1,22 + r} \quad (69)$$

kde r je počet provozních let vodiče.

Z tohoto vzorce vyplývá, že se emisivita v průběhu let mění. Koeficient emisivity je přibližně roven 0,23 u nového vodiče, po roce provozu je 0,545, po deseti letech provozu je 0,854, po dvaceti 0,89 a po třiceti letech se podle [9] uvažuje 0,903.

Ochlazování vodiče radiací se při stejné okolní teplotě mění v čase a to tak, že čím déle je vodič provozován, tím je tepelný výkon odvedený radiací větší.

3.2. Výpočet proudové zatížitelnosti

Jestliže chceme spočítat proudovou zatížitelnost, jinak řečeno ampacitu, pro danou návrhovou teplotu vodiče, využijeme vzorců (55, 68, 57) pro výpočty tepelných výkonů P_S , P_R a P_C , jež jsou uvedeny v předchozí kapitole.

Ustálený provozní proud se pak spočte následujícím vztahem:

$$I = \sqrt{\frac{P_C + P_R - P_S}{R_{AC}}} \quad (\text{A}) \quad (70)$$

Proudová zatížitelnost konkrétního vodiče pak závisí na jeho technických parametrech, maximální provozní teplotě vodiče a na tzv. hraničních klimatických podmínkách, které spolu vstupují do výpočtů jednotlivých tepelných výkonů. Hraniční klimatické podmínky jsou nejnepříznivější klimatické podmínky, jež mohou nastat, a na tyto podmínky je vhodné dimenzovat vodič. Jedná se o maximální teplotu okolí, minimální rychlost větru a maximální intenzitu slunečního záření. Při těchto hraničních podmínkách nám vyjde maximální proud, jímž lze vodič zatěžovat. Návrh musí respektovat zejména požadavky dle ČSN EN 50 341 a NNA, resp. projektové specifikace, ale provozovatel vedení může následně proudovou zatížitelnost měnit na základě aktuálních provozních podmínek (na několika vedeních přenosové soustavy již probíhají meteorologická měření v reálném čase, která ovlivňují dispečerské řízení).

Proudová zatížitelnost se s měnícími klimatickými podmínkami mění následovně. Roste s rostoucí rychlostí větru působícího na vodič a naopak klesá s rostoucí teplotou okolí, s rostoucím úhlem působení větru (čím víc vítr fouká rovnoběžněji s vodičem tím hůř), s rostoucí intenzitou slunečního záření a s rostoucí nadmořskou výškou.

[1, 3, 5, 6, 7, 9]

4. Modernizace a rekonstrukce vedení

4.1. Úvodní informace

V předchozích třech kapitolách jsem shrnul teoretické poznatky, ze kterých vychází druhá část mé práce. V té se zaměřím na proběhlou modernizaci jednoho konkrétního vedení přenosové soustavy. Pokusím se na něm demonstrovat problémy s výpočtem proudové zatížitelnosti a provedu posouzení modernizace a mého návrhu rekonstrukce tohoto vedení:

1. Modernizace – stejné stožáry a přeizolace jako v proběhlé modernizaci s využitím jiných typů vodičů
2. Rekonstrukce – nové stožáry na nových stožárových místech a různé typy vodičů

Posouzení provedu z hlediska proudové zatížitelnosti, mechanického chování vodiče na vedení a, s tím souvisejících, investičních nákladů.

Ačkoliv se v práci zaměřím na modernizaci a rekonstrukci konkrétního úseku vedení, závěry z mého porovnání budou obecné. Z důvodu ještě větší obecnosti závěrů provedu rekonstrukci ve dvou námrazových oblastech. V praxi se jedná o poměrně časté rozhodování, zdali postačí modernizace vedení nebo bude výhodnější provést rekonstrukci.

Jak je zřejmé z textu výše, kde důsledně rozlišuji mezi modernizací a rekonstrukcí vedení, je mezi těmito dvěma pojmy rozdíl. Jelikož životnost vodičů a výzbroje je ve srovnání s ocelovou konstrukcí stožáru zhruba poloviční a navíc vývoj vodičů a izolátorů jde stále kupředu, proto stávající vodiče a izolátory zastarávají i morálně, tak se provádí modernizace vedení, kdy se vymění FV, izolátorové závěsy, většinou i ZL, případně se ZL nahradí KZL. Současně s tím se provozovatel vedení snaží zvýšit proudovou zatížitelnost na maximum zvýšením návrhové teploty vodiče z dřívějších $+40^{\circ}\text{C}$ na v současnosti povolených $+80^{\circ}\text{C}$, pokud to jde. U modernizace je problém s tím, že stávající ocelové konstrukce musí „unést“ nové vodiče a výzbroj, které mohou být těžší.

V případě rekonstrukce provozovatel staví vedení kompletně nové a to z toho důvodu, že buď potřebuje na daném vedení maximální proudovou zatížitelnost a té by dosáhl pouze neúměrným zvyšováním stávajících stožárů, tudíž je ekonomicky výhodnější postavit stožáry nové, hustěji, anebo se rozhodl použít vodiče, které by stávající ocelové konstrukce neunesly.

Pro toto porovnání i nový návrh jsem si vybral dva konkrétní kotevní úseky vedení, a to takové, kde jsou dlouhá rozpětí a největší převýšení trasy, z důvodu, že se nejvíce projeví odlišné mechanické vlastnosti vodičů. Ale mechanické vlastnosti nepředstavují jedinou věc, jež nás zajímá. Je třeba se též zaměřit na proudovou zatížitelnost, což jak bylo řečeno v úvodu, může jít proti sobě.

Vedení s označením V245/V246 je jedno z nejstarších vedení provozovaných společností ČEPS, bylo postaveno koncem 50. let minulého století. Vede mezi rozvodnami Lískovec a Bujakow (Polsko), tudíž se jedná o přeshraniční vedení. V České republice stojí 79 stožárů, z toho 13 kotevních, a délka vedení na našem území je 23,383 km. Jedná se, jak je patrné z označení, o vedení s napěťovou hladinou 220 kV. Stožáry jsou typu soudek.

Vzhledem ke stáří vedení bylo rozhodnuto o jeho modernizaci, která proběhla v roce 2001. Další důvod modernizace bylo zvýšení přenosové schopnosti vedení, kterého se dosáhlo zvýšením návrhové teploty vodiče z původních $+40^{\circ}\text{C}$ na maximální, současnými normami dovolenou, návrhovou teplotu $+80^{\circ}\text{C}$. Při modernizaci byl vybrán vodič TACSR/ACS 380/50 z důvodu lepších mechanických vlastností oproti klasickému ACSR vodiči, pro který by se muselo dělat více úprav na vedení při výměně vodičů, aby vyhověl pro $+80^{\circ}\text{C}$. Jeho výhoda spočívá také v tom, že je vysokoteplotní, čehož je využíváno pro dynamické zatěžování až do teploty $+110^{\circ}\text{C}$. Dynamické zatěžování je, že když teplota okolí bude například -5°C , může vodičem téct proud, který by vyvolal za stanovených podmínek teplotu $+110^{\circ}\text{C}$.

Modernizace byla navržena dle normy ČSN 33 3300, což byla norma platná v době návrhu modernizace, a dalších navazujících norem, proto i já při svém návrhu vyjdu ze stejné normy. V rámci této práce nicméně nebudu uvažovat nejvyšší návrhovou teplotu u všech vodičů $+80^{\circ}\text{C}$, ale budu brát v úvahu nejvyšší možnou provozní teplotu vodičů danou jejich typem, abych vzal v potaz jejich potenciál, jež by se v budoucnu při změně norem projevil.

Nyní přejdu k vodičům. Původní vodič na vedení byl typu ACSR s označením AIFe 350/4 (dle ČSN 024210). Jestli bychom chtěli zůstat u typu klasického ACSR vodiče, pak by se jako náhrada nabízely dva druhy vodičů z přednostně doporučených vodičů, které si stanovila společnost ČEPS.

První by byl vodič 326-AL1/86-ST6C, jehož mechanické (modul pružnosti, teplotní roztažnost, hmotnost) i elektrické (proudová zatížitelnost) vlastnosti jsou nejpodobnější

ve srovnání s původním vodičem. Druhá možná náhrada typem ACSR by mohl být vodič 362-AL1/59-ST1A, který má lepší mechanické vlastnosti i vyšší proudovou zatížitelnost než původní vodič a má prakticky stejný průměr.

Při modernizaci se nakonec rozhodlo o použití vysokoteplotního vodiče TACSR/ACS 380/50, jehož všechny vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 4, stejně jako ostatních vodičů zmiňovaných v této části práce. V porovnání s původním vodičem je lehčí s větším průřezem i průměrem, menší únosností, s nižším modulem pružnosti a větší teplotní roztažností.

Za jakých podmínek lze dosáhnout srovnatelné přenosové schopnosti vedení s použitím klasického vodiče ACSR, který je pro provozovatele nejvyhledávanější? Vodič, který by svojí proudovou zatížitelností odpovídal vodiči TACSR/ACS 380/50 je vodič 490-AL1/64-ST1A, ale musel by být provozován při návrhové teplotě $+80^{\circ}\text{C}$, což jak bude ukázáno později, v tomto případě není možné kvůli jeho mechanickému chování.

Vodiče ACSR jsou pro provozovatele přenosové soustavy nejvyhledávanější variantou, protože ve standardech nic jiného nemá a má za cca 70 let provozu s těmito vodiči výborné zkušenosti. Navíc je provozovatel hodně konzervativní v přístupu k typům vodičů, protože navrhované vedení musí fungovat bez nutné modernizace minimálně dalších 30 let.

Kdyby se modernizace plánovala v dnešní době, alternativami by mohly být celohliníkový vodič AAC/AAAC nebo speciální vysokoteplotní ACCC vodič s kompozitním jádrem, které v době modernizace nebyly používány. Jako celohliníkovou alternativu jsem si zvolil vodiče 500-AL3 a 626-AL3. Oba vodiče mají větší průměr i průřez, oproti původnímu vodiči. Vodič 500-AL3 má nižší proudovou zatížitelnost a vodič 626-AL3 naopak větší, než zvolený TACSR vodič při teplotě $+80^{\circ}\text{C}$.

Vodič ACCC jsem zvolil ACCC 360, jež má v podstatě stejný průřez jako původní vodič, ale mohl by být provozován až do $+175^{\circ}\text{C}$ (kdyby to dovozovaly normy), což má za následek velkou proudovou zatížitelnost. Tento vodič je ještě zajímavý tím, že má tzv. zlomový bod, teplotní koleno (thermal knee point), v provozních teplotách. To je bod, který představuje teplotu vodiče, která když se překročí, tak se díky vyšší teplotní roztažnosti hliníkového pláště, přenesou celý tah na kompozitní jádro s výrazně nižším koeficientem délkové roztažnosti, než mají slitiny hliníku. Důsledkem toho se vodič za teplotou odpovídající tomuto bodu bude prodlužovat výrazně méně. V práci budu uvažovat provoz

vodiče za tímto bodem, tedy kromě stavů, kdy se zkoumá chování vodiče při -5°C a -30°C (s námrazkem nebo bez něj, ve větru nebo v bezvětrí, případně nerovnoměrná námraza v poli křižovatky).

V následující tabulce shrnu základní vlastnosti vodičů uvažovaných při modernizaci a rekonstrukci vedení V245/V246.

Označení	Celkový průřez	Počet drátů	Průměr drátů	Celkový průměr	Hmotnost	Jmenovitá pevnost	DC odpor při 20°C	Modul pružnosti	Součinitel délkové roztažnosti
	mm^2		mm	mm					
AlFe 350/4	414,45	19xFe + 30xAl	2,36 + 3,75	26,8	1,6052	144,60	0,0840	81 666	$1,77 \cdot 10^{-5}$
TACSR/ACS 380/50	431,18	7xFe + 54xAl	3,00	27,0	1,3840	124,26	0,0595	72 050	$2,04 \cdot 10^{-5}$
326-AL1/86-ST6C	411,70	19xFe + 32xAl	2,40 + 3,60	26,4	1,5761	173,31	0,0889	72 000	$1,76 \cdot 10^{-5}$
362-AL1/59-ST1A	421,10	7xFe + 26xAl	3,28 + 4,21	26,7	1,4739	122,97	0,0798	74 200	$1,89 \cdot 10^{-5}$
490-AL1/64-ST1A	553,80	7xFe + 54xAl	3,40	30,6	1,8655	150,81	0,0590	67 100	$1,94 \cdot 10^{-5}$
500-AL3	499,80	61xAl	3,23	29,1	1,3814	147,45	0,0666	55 000	$2,30 \cdot 10^{-5}$
626-AL3	626,20	91xAl	2,96	32,6	1,7377	184,73	0,0534	55 000	$2,30 \cdot 10^{-5}$
ACCC 360	412,28	1xKompozitní jádro + 18xAl/TW	7,75 + 4,98 a 5,14	23,55	1,0960	101,80	0,0781	117 000	$1,61 \cdot 10^{-6}$

Tabulka č. 4 – Vlastnosti uvažovaných vodičů [10,11,27]

V další kapitole se zmíním o různých výsledcích výpočtů proudové zatížitelnosti dle rozdílných postupů pro některé vybrané vodiče.

[10, 11, 12, 38]

4.2. Výpočet proudové zatížitelnosti vybraných vodičů

V kapitole 3 jsem popsal bilanční rovnici vodiče, z níž vychází výpočty proudové zatížitelnosti. Sestrojil jsem v EXCELU dva výpočty, jeden respektující úvahy a vzorce dle příspěvku Ing. Tomčíka z konce osmdesátých let minulého století, a druhý dle příspěvku CIGRÉ z roku 2002. Oba postupy v této části práce porovnám, mezi s sebou, stejně

jako s údaji o proudové zatížitelnosti dle společnosti ČEPS, jež se mi podařilo sehnat pro některé vodiče. Pro podrobné porovnání jsem si vybral vodič TASCRA/ACS 380/50, jež byl použit při modernizaci V245/V246, a uvažoval jeho teplotu +110°C.

Hraniční klimatické podmínky jsem převzal z Národních normativních aspektů normy ČSN EN 50 341, stejně jako koeficienty emisivity a pohltivosti slunečního záření, a jsou následující:

Intenzita přímého slunečního záření	1000	W/m ²
Teplota okolí	35	°C
Průměrná rychlost větru	0,5	m/s
Úhel mezi směrem větru a normálou k ose vodiče	45	°
Nadmořská výška	400	m
Koeficient pohltivosti povrchu vodiče	0,5	(-)
Emisivita vodiče	0,5	(-)
Teplota vodiče (neuvedu-li jinak)	80	°C

Tabulka č. 5 – Podmínky pro výpočet proudové zatížitelnosti

V následující tabulce jsou spočteny tepelné výkony působící na vodič a výsledná proudová zatížitelnost:

Vodič TACSR/ACS 380/50 - teplota vodiče 110°C		
	Výpočet Tomčik	Výpočet CIGRÉ
Tepelný výkon dodaný sluncem (W/m)	13,5	13,5
Tepelný výkon odvedený radiací (W/m)	30,1	30,1
Tepelný výkon odvedený konvekcí (W/m)	86,8	78,8
Proudová zatížitelnost (A)	1097	1065

Tabulka č. 6 – Výsledky pro vodič TACSR/ACS 380/50

Je vidět, že v tepelných výkonech dodaných slunečním zářením a odvedených radiací, se oba postupy výpočtu neliší. Rozdíl je v tepelném výkonu odvedeném konvekcí, a to z toho důvodu, že konvekce se obtížně počítá a využívá se k výpočtu podobnostních čísel, s tím, že každý způsob výpočtu užívá jiné empirické vztahy pro tyto podobnostní čísla. Od společnosti ČEPS se mi podařilo zjistit, že proudovou zatížitelnost tohoto vodiče při 110°C uvažují 1050 A. Je vidět, že tomuto číslu se více blíží výpočet dle CIGRÉ, takže proto a i kvůli tomu, že vychází z o 24 let novějšího materiálu, ho budu užívat jako výpočetní

postup proudové zatížitelnosti i dále v práci. V tabulce níže jsem spočetl proudové zatížitelnosti vodičů uvažovaných při modernizaci a rekonstrukci vedení.

Proudová zatížitelnost vodičů při modernizaci vedení V245/V246					
Označení vodiče	Teplota vodiče (°C)	Dle ČEPS (A)	Výpočet CIGRÉ (A)	Rozdíl CIGRÉ oproti ČEPSu	
				Absolutní (A)	Relativní (%)
AlFe 350/4	80	655	685	+30	+4,6
TACSR/ACS 380/50	110	1050	1065	+15	+1,4
TACSR/ACS 380/50	80	-	805	-	-
326-AL1/86-ST6C	80	650	664	+14	+2,2
362-AL1/59-ST1A	80	685	702	+17	+2,5
490-AL1/64-ST1A	80	815	834	+19	+2,3
500-AL3	80	-	785	-	-
626-AL3	80	-	902	-	-
ACCC 360	80	-	693	-	-
ACCC 360	110	-	917	-	-
ACCC 360	175	-	1234	-	-

Tabulka č. 7 – Proudová zatížitelnost vodičů uvažovaných při modernizaci a rekonstrukci vedení V245/V246

Z tabulky je vidět, že ČEPS ve své technické normě TN 46 obecně uvažuje proudovou zatížitelnost nižší, než jsem vypočetl. Absolutní rozdíl u vybraných vodičů byl 14 A až 30 A, což vztáhnu-li k hodnotě zatížitelnosti dle ČEPSu je obvykle kolem 2 %.

Rozdíl může být způsoben bezpečnostní rezervou, kterou si ČEPS nechává, anebo tím, že má o jednotlivých vodičích přesnější/jiné informace než se podařilo získat mně. Problematické jsou zejména teplotní součinitel odporu vodiče a poměr stejnosměrného a střídavého odporu. Ani jeden z těchto parametrů nebývá v katalogích vodičů uveden. Z toho důvodu jsem k jejich určení přistoupil následovně.

Všechny uvažované vodiče mají větší průřez hliníku než ostatních materiálů, případně jsou celohliníkové, a vzhledem k tomu, jak je uvedeno v [1], výsledná hodnota teplotního součinitele lana je obvykle výrazně bližší hodnotě pro hliníkové vodiče, uvažoval jsem tento součinitel ve výpočtech, jako by se jednalo o hliník.

Poměr mezi stejnosměrným a střídavým odporem jsem určoval přes poměr mezi střídavým a stejnosměrným proudem, dle materiálu TB207 od CIGRÉ, kde jsou uvedeny empirické vztahy pro tento převod.

[3, 5, 6]

4.3. Normy a zásady projektování

Jak bylo řečeno v úvodních informacích ke kapitole 4, zabýval jsem se modernizací se zachováním stávajících stožárových míst na dvou úsecích vedení V245/V246 a pak pro tyto dva úseky navrhl variantu rekonstrukce s novými stožáry na nových stožárových místech. Ke každé variantě jsem musel přistoupit trochu odlišně, ale obě respektují normu ČSN 33 3300. Nyní uvedu několik podmínek z této normy, které jsem při projektování modernizace i rekonstrukce musel respektovat.

Při provozu vedení mohou nastat různé zatěžovací stavy, které pak mají vliv na vodiče a vedení. V tabulce níže jsem sepsal zatěžovací stavy, které musejí být dle této normy kontrolovány, zda při nich není překročeno dovolené mechanické napětí ve vodiči nebo tah od vodiče na kotevní stožáry.

Zatěžovací stavy dle ČSN 33 3300	
a)	-5°C, bezvětří a námraza dle příslušné oblasti (L, S, T, K)
b)	-5°C, vítr na vodič bez námrazku
c)	+40°C a bezvětří
d)	-30°C, bezvětří a vodič bez námrazku
e)	-5°C, vítr a námraza dle příslušné oblasti (L, S, T, K)

Tabulka č. 8 – Zatěžovací stavy dle ČSN 33 3300

Mimo stavy uvedené v tabulce č. 8, ještě existuje stav zvaný extrémní námraza, jež je definován jako trojnásobek jmenovité námrazy příslušné námrazové oblasti.

Celé vedení V245/V246 na českém území vede námrazovou oblastí „LEHKÁ“ dle ČSN 33 3300/84, zkráceně ČSN 33 3300/84-L, a jmenovitá hmotnost námrazku q_n na vodiči o průměru d (mm) na 1 m délky se spočte dle vztahu:

$$q_n = 0,361 + 0,0213 \cdot d$$

V normě je také stanoveno dovolené mechanické napětí ve vodiči, ale vzhledem k tomu, že v každé variantě budu postupovat jinak, rozepíši se o tom později.

Dle této normy musí být dodržena minimální vzdálenost vodičů od země pro vedení o napěťové hladině 220 kV alespoň 7 m.

Při dodržení minimálních bezpečných vzdáleností od křižovatek stanovených normou, v této práci ČSN 33 3300, jsou nejdůležitější dva zatěžovací stavy, které obvykle vycházejí nejhůře: nejvyšší návrhová teplota vodičů (80°C nebo i více u vysokoteplotních

vodičů pokud by to norma umožňovala) a zatížení nerovnoměrnou námrazou v rozpětí křižovatky (teplota okolí resp. vodiče -5°C , bezvětrí a námraza pouze v poli křižovatky, okolní rozpětí bez námrazy).

V následující tabulce jsem vypsal minimální vzdálenosti křižovatek, jež se v posuzovaných úsecích nacházejí, případně se obecně často vyskytují na vedeních, s vedením 220 kV pro tyto dva zatěžovací stavy.

Druh křižovatky	Minimální vzdálenost (m)	
	Nejvyšší návrhová teplota	Nerovnoměrná námraza v rozpětí křižovatky
Silnice a dálnice	8	8
Schůdné střechy budov	6	6
Neschůdné střechy budov	4	4
Hlava kolejnice dráhy bet trakčního vedení	9	7
Vodič drážního sdělovacího vedení	4	3
Trakční vedení drah	4	4
Vedení elektrizační soustavy nad 1 kV	3	2
Vedení elektrizační soustavy do 1 kV	3	3

Tabulka č. 9 – Nejkratší vzdálenosti od vybraných křižovatek dle ČSN 33 3300

4.4. Modernizace – stávající stožáry

Výchozím materiálem pro mě byla provozní dokumentace vedení V245/V246, poskytnutá společností ČEPS, zejména přehledný soupis, projekční tabulky a podélné profily kotevních úseků mezi stožáry číslo 293-282 a 260-252. V podélných profilech byl zakreslen vodič TACSR/ACS 380/50 při teplotě 80°C , přepočítal jsem parametr řetězovky a znovu zakreslil tento vodič při teplotě $+110^{\circ}\text{C}$, to je teplota vodiče při maximální přenosové kapacitě vedení, v případě, že by ho šlo provozovat na $+110^{\circ}\text{C}$, což je možný vývoj v budoucnu.

Kvůli tomu, že při modernizaci v roce 2001 nebyly vyměněny stožáry, ale pouze vodiče a izolátorové závěsy, na vedení zůstaly původní ocelové konstrukce z doby výstavby. Nevím, v jakém jsou stavu, a proto při návrhu budu uvažovat maximální tah od vodičů na konstrukce kotevních stožárů, které nebudou větší, než jsou tahy v současnosti po modernizaci a také maximální tíha od vodičů na nosné stožáry by neměla být větší než tíha, kterou působil původní vodič AlFe 350/4. Druhá podmínka není splněna pro vodiče 490-AL1/64-ST1A (maximální tíha od vodičů je větší o 10,4 %) a 626-AL3 (maximální tíha od

vodičů je větší o 8,7 %), proto by pro tyto dva vodiče muselo dojít před použitím při modernizaci ke statickému posouzení ocelových konstrukcí a případnému zesílení stožárů, což by mělo za následek zvýšení investičních nákladů.

Po vyloučení úseků na vedení o délce pouze jednoho rozpětí, jsem zprůměroval maximální tahy od vodičů na kotevní stožáry všech zbývajících kotevních úseků. Vyšel mi průměrný maximální tah od vodičů na kotevní stožár 36,8 kN. Tento tah proto nepřekročím při žádném zatěžovacím stavu pro žádný z uvažovaných vodičů.

Následně jsem pro všechny uvažované vodiče vypočetl parametr řetězovky s tím, že jsem se snažil zvolit co největší tah vodiče (aby byl vodič co nejvíce napnutý) při respektování limitu 36,8 kN.

Jednotlivé vodiče jsem zakreslil do dvou podélných profilů, které jsou součástí příloženého CD, a nyní zhodnotím vliv použitého vodiče na modernizaci při zachování stávajících míst. V podélných profilech není zakreslen vodič při nerovnoměrné námraze v poli křižovatky, a to z toho důvodu, že vedení je v lehké námrazové oblasti, a dle provedených výpočtů průhyb vodiče není příliš odlišný od průhybu při nejvyšší návrhové teplotě a podélný profil by se stal ještě více nepřehledný z důvodu velkého množství zakreslených vodičů. Nicméně i u tohoto zatěžovacího stavu jsem samozřejmě zkontroloval, zda jsou dodrženy minimální bezpečné vzdálenosti.

V tabulce č. 10 jsou uvedeny typy vodičů a nejvyšší teplota vodiče, při níž lze vedení provozovat, aby byla dodrženy všechny minimální bezpečné vzdálenosti od terénů a křižovatek s objekty pod vodiči. Vodiče jsou seřazeny sestupně dle proudové zatížitelnosti při této teplotě vodiče.

V úseku vedení st. č. 293 – st. č. 282 mi vyšlo, že při stejně zvolených izolátorových závěsech, jako při skutečně provedené modernizaci, by bylo možné všechny v této práci uvažované vodiče provozovat na jejich nejvyšších provozních teplotách daných typem vodiče, případně určených provozovatelem.

Ve druhém posuzovaném kotevním úseku, st. č. 260 – st. č. 252, došlo k případu, kdy dva vodiče, s největším průřezem a největší měrnou tíhou, nevyhověly při své maximální teplotě svým průhybem při křížení s vedením vysokého napětí. Je pochopitelné, že se musí uvažovat nejnižší ze všech maximálních provozních teplot, které vyšly pro jednotlivé úseky, proto následující tabulka respektuje omezení z kotevního úseku st. č. 260 – st. č. 252. A ještě

připomenu, že při užití vodičů 490-AL1/64-ST1A a 626-AL3 by bylo nutné zesílit ocelové konstrukce stožárů.

Označení vodiče	Nejvyšší vyhovující provozní teplota vodiče	Proudová zatížitelnost vodiče (A)
ACCC 360	+175°C	1234
TACSR/ACS 380/50	+110°C	1065
500-AL3	+80°C	785
490-AL1/64-ST1A	+75°C	775
626-AL3	+70°C	766
362-AL1/59-ST1A	+80°C	702
326-AL1/86-ST6C	+80°C	664

Tabulka č. 10 – Proudová zatížitelnost vodičů v mnou posuzovaných úsecích vedení V245/V246

Zajímavé je pozorovat rozdílné chování dvou posuzovaných vysokoteplotních vodičů. Vodič ACCC je oproti vodiči TACSR nízko průhybový, jak velký to je rozdíl demonstruji v následující tabulce č 11. V rozpětí st. č. 292 – st. č. 291, které je z mnou posuzovaných nejdelší, měří 336 metrů, jsem změřil rozdíl v průhybech u vodiče ACCC a TACSR pro teploty vodiče +80°C a +110°C.

Vodič	Zvětšení průhybu při zahřátí vodiče z +80°C na +110°C (m)	Absolutní rozdíl zvětšení průhybů vodičů (m)	Relativní rozdíl zvětšení průhybů vodičů (%)
TACSR/ACS 380/50	1,12	0,84	75%
ACCC 360	0,28		

Tabulka č. 11 – Zvětšení průhybů při zahřátí vodičů TACSR/ACS 380/50 a ACCC 360

4.5. Rekonstrukce – nové stožáry

V případě rekonstrukce, kterou jsem v této práci navrhoval, jsem dodržel stožárová místa kotevních stožárů a lomy trasy. Nosné stožáry jsem se snažil umístit nově tak, aby jich bylo co nejméně, s tím, že jsem se snažil zachovat řádově stejné výšky nosných stožárů, jako byly na původním vedení, takže největší použitý stožár má převýšení 16 metrů (stožár N+16). Opět jsem návrh provedl na kotevních úsecích jako v kapitole 4.3.1.

Zde je nutno podotknout, že dle ČSN 33 3300 musí být výztužné, rohové výztužné nebo odbočné výztužné stožáry stavěny každé 3 km a vložených nosných stožárů by nemělo být více než 9. V kotevním úseku st. č. 293 – st. č. 282 požadavek na maximální délku kotevního úseku nebyl dodržen. V případě modernizace s dodržením stávajících stožárových

míst jsem to neřešil z důvodu, že jsem uvažoval stejné stožáry, jako jsou ty stávající. V případě, kdy navrhuji nová stožárová místa, jsem obě výše uvedené podmínky dodržoval.

V případě nových stožárových míst jsem k návrhu mohl přistoupit jinak, protože se jednalo o nové stožáry. U nových ocelových konstrukcích jsem si stanovil, na základě zkušeností s novou stožárovou řadou, předpoklad maximálního tahu na novou konstrukci 56 kN (od vodiče na kotevní stožáry) a s touto hodnotou jsem počítal při návrhu, nicméně při každém návrhu vedení se musí každý stožár staticky posoudit. Hodnotu 56 kN jsem opět nepřekročil při žádném zatěžovacím stavu z tabulky č. 8.

Vzhledem k tomu, že tah ve vodiči mohl být podstatně větší než v případě modernizace s původními stožáry, je nutné dát pozor, aby nebylo překročeno nejvyšší dovolené mechanické napětí samotných vodičů. Norma ČSN 33 3300 v odstavci 1.13. stanovuje nejvyšší dovolené mechanické napětí vodičů při podmínkách v definovaných zatěžovacích stavech z tabulky č. 8. U vodičů ACSR je dovolené mechanické napětí stanoveno jako 38 % jmenovité pevnosti lana. U lan ze slitin hliníku je dovolené mechanické napětí stanoveno jako 40 % jmenovité pevnosti lana. Pro vysokoteplotní vodič ACCC pochopitelně v této starší normě není stanoveno nic, proto uvažuji horší z variant, která mi stanoví, že tento vodič mohu napnout na 38 % jmenovité pevnosti vodiče. Nad toto omezení je normou doporučeno zvolit ještě o 10 % nižší mechanické napětí. Toto doporučení jsem respektoval.

Pro případ extrémní námrazy ($3xq_n$) se musí zkontrolovat, zda mechanické napětí ve vodiči nepřesáhne 85 % pevnosti pro vodiče ACSR (v mém případě i pro ACCC) a 80 % pro lana ze slitin hliníku.

Další omezení, jež jsem musel respektovat, se týká omezení síly působící na nosný izolátorový závěs a kotevní svorku. Únosnost prvků izolátorového závěsu je minimálně 120 kN, dle normy nesmí být překročena minimální únosnost při zatížení trojnásobkem síly vyvozené vodičem, což by znamenalo 40 kN, ale s ohledem na bezpečnost se v praxi bere z této hodnoty 75 %, takže omezení na nosný izolátorový závěs jsem při návrhu bral 30 kN. U kotevní svorky, obvykle s únosností 140 kN, nesmí být překročena minimální únosnost při zatížení 2,5 násobkem tahové síly vyvozené vodičem. To znamená, že tah od vodiče na kotevní svorku při mém návrhu, nemohl být větší než 56 kN.

Při návrhu vedení je výhodné mít v celé délce trasy stejný tah ve vodiči z toho důvodu, že pak na kotevní stožáry působí z obou dvou stran stejná síla. Toho jsem se držel i v mém návrhu rekonstrukce a v obou kotevních úsecích jsem použil stejný a co největší tah vodiče, s respektováním výše uvedených podmínek.

Při projektování rekonstrukce vedení s novými stožárovými místy jsem zúžil počet uvažovaných vodičů o dva druhy s nejmenší proudovou zatížitelností, a to o 362-AL1/59-ST1A a 326-AL1/86-ST6C, z toho důvodu, že jedním z cílů rekonstrukce by mělo být zvýšení přenosové schopnosti, což by s těmito vodiči nešlo. Všechny varianty rekonstrukce jsem navrhl tak, aby vodiče mohly být provozovány při nejvyšší návrhové teplotě dané typem vodiče.

Dále jsem se rozhodl zjistit, jaký vliv na volbu vodiče má námrazová oblast. Skutečné vedení V245/V246 je v nejlehčí námrazové oblasti, proto jsem vedení vyprojektoval i v těžké námrazové oblasti, aby byly výsledky této práce obecnější. V těžké námrazové oblasti ČSN 33 3300/84-T je hmotnost námrazku na jednotku délky o něco více než 3 krát větší než v lehké oblasti. Přesný vzorec pro výpočet pro vodič o průměru d (mm) je následující:

$$q_n = 1,638 + 0,0454 \cdot d$$

V následující tabulce jsou přehledně uvedena omezení týkající se stožárů a izolátorových závěsů, které jsem musel dodržet při návrhu.

Typ omezení	Hodnota
Maximální tah od vodiče na kotevní stožár	56 kN
Maximální síla na nosný izolátorový závěs	30 kN
Maximální tah na kotevní svorku	56 kN

Tabulka č. 12 – Omezení velikosti tahu na stožáry a izolátorové závěsy

Tabulka na následující stránce shrnuje maximální dovolené mechanické napětí samotných vodičů vycházející z normy a mechanických vlastností těchto vodičů, jak již bylo uvedeno výše v textu. Tyto hodnoty jsem v žádné variantě návrhu nemohl překročit, a také nepřekročil.

Vodič	Omezení pro	
	Zatěžovací stavy a) až e) z tabulky č. 8	Stav extrémní námrazy
ACCC 360	41,8 kN	98,3 kN
TACSR/ACS 380/50	42,3 kN	99,4 kN
500-AL3	53,1 kN	125,3 kN
490-AL1/64-ST1A	51,3 kN	120,6 kN
626-AL3	66,5 kN	157,0 kN

Tabulka č. 13 – Omezení velikosti tahů ve vodičů

Porovnáním omezení z tabulek č. 12 a č. 13 je zřejmé, že při návrhu s použitím nových stožárových míst a ocelových konstrukcí se omezujícím vlivem, s výjimkou hliníkového vodiče 626-AL3, stalo maximální dovolené mechanické napětí vodiče.

V následujících dvou podkapitolách sepíši navržené typy stožárů, které by bylo nutné postavit pro provoz vedení v dané námrazové oblasti pro každý vodič. Podélné profily s návrhem stožárů pro obě námrazové oblasti a všechny vodiče jsou na příloženém CD.

4.5.1. Lehká námrazová oblast

První navrhovaný úsek st. č. 290 – st. č. 282, původně měřící přes 3 km, musel být rozdělen na dva kotevní úseky, aby bylo vyhověno normě ČSN 33 3300. Rozdělení jsem provedl na místě stožáru číslo 290, kde jsem nahradil původní nosný stožár výztužným stožárem.

V navrženém kotevním úseku st. č. 293 – st. č. 290 je průměrné rozpětí 363,7 m a v kotevním úseku st. č. 290 – st. č. 282, to je 415,1 m. V součtu obou kotevních úseků se počet nosných stožárů oproti původnímu stavu se napnutím vodičů na maximální dovolené hodnoty a přestožarováním snížil z 10 na 6, ale naopak musel přibýt jeden výztužný stožár. Průměrné rozpětí původního stavu bylo přirozeně menší, konkrétně 300,6 m.

Z tabulky č. 14 jsou vidět rozdílná převýšení nosných stožárů, které by pro daný vodič musely být postaveny, aby vyhověly minimální bezpečné vzdálenosti od terénu a křižovatek. Nejvyšší stožáry by musely být pro nejtěžší vodič (490-AL1/64-ST1A) a vysokoteplotní vodič, jež není nízko průhybový (TACSR/ACS 380/50). Naopak pro nízko

průhybový vysokoteplotní vodič ACCC 360 v lehké námrazové oblasti vycházejí stožáry nejnižší.

Úsek st. č. 293 – st. č. 282					
Stožár číslo	Typ stožáru pro daný druh vodiče				
	TACSR/ACS 380/50	490-AL1/64-ST1A	500-AL3	626-AL3	ACCC 360
293	RV+4	RV+4	RV+4	RV+4	RV+4
292	N+6	N+6	N+6	N+6	N+4
291	N+8	N+6	N+2	N+4	N
290	V+0	V+0	V+0	V+0	V+0
289	N+4	N+4	N	N+4	N
288	N+4	N+4	N+4	N+2	N+4
286	N	N	N	N	N
283	N+6	N+4	N	N+2	N
282	RV+2	RV+2	RV+2	RV+2	RV+2

Tabulka č. 14 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 293 – st. č. 282 v lehké námrazové oblasti

V druhém zkoumaném úseku není v lehké námrazové oblasti mezi použitými vodiči rozdíl. Pro všechny vodiče mi vyšly stejné výšky nosných stožárů. Počet nosných stožáru se mi podařilo oproti modernizaci bez přestožarování v tomto úseku snížit ze 7 na 5. Průměrné rozpětí vzrostlo z 264,7 m na 365,6 m. V tabulce č. 15 jsou uvedeny navržené stožáry pro úsek st. č. 260 – st. č. 252 pro vedení V245/V246.

Úsek st. č. 260 – st. č. 252					
Stožár číslo	Typ stožáru pro daný druh vodiče				
	TACSR/ACS 380/50	490-AL1/64-ST1A	500-AL3	626-AL3	ACCC 360
260	RV	RV	RV	RV	RV
259	N	N	N	N	N
257	N	N	N	N	N
256	N	N	N	N	N
255	N+16	N+16	N+16	N+16	N+16
253	N+2	N+2	N+2	N+2	N+2
252	RV+4	RV+4	RV+4	RV+4	RV+4

Tabulka č. 15 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 260 – st. č. 252 v lehké námrazové oblasti

Podívám-li se na mojí variantu rekonstrukce vedení s přestožarováním v kontextu všech vedení 220 kV v ČR pak lze říci, že mi vyšly delší rozpětí a větší tahy vodičů, protože průměrné rozpětí na vedení 220 kV je 315,2 m a tah ve vodiči 36,8 kN. Na druhou stranu

není důvod neudělat rozpětí a tahy větší, když dojde k dodržení všech podmínek vyplývajících z norem a zkušeností.

4.5.2. Těžká námrazová oblast

Nyní se podívám na vliv námrazové oblasti na návrh rekonstrukce vedení. Návrh jsem provedl pro dva úseky vedení V245/V246 stejné jako v kapitole 4.3.2.1. s tím, že nyní jsem je uvažoval v těžké námrazové oblasti dle ČSN 33 3300/84-T. Návrh jsem opět provedl tak, aby byl umožněn provoz daných vodičů na nejvyšší návrhové teplotě, s využitím maximálních dovolených tahů dle tabulek č. 12 a č. 13.

Snažil jsem se o návrh s co nejmenším počtem stožárových míst, ale na druhé straně jsem stožáry nenavrhoval s větším převýšením než 16 m, což je obvykle nejvyšší typový stožár. Je-li potřeba postavit větší, jedná se pak už o atypové stožáry, kterým se při projektování snažíme vyhnout. Opět musel být vložen jeden výztužný stožár, tentokrát jsem ho v návrhu vložil na místo původního stožáru číslo 286, tudíž se úsek rozdělil na kotevní úsek st. č. 293 – st. č. 286 a st. č. 286 – st. č. 282.

Podélný profil vedení dle mého návrhu je samozřejmě přiložen v příloze na CD a typy navržených stožárů jsou přehledně vypsány v následujících tabulkách.

Na první pohled je zřejmé, že v těžké námrazové oblasti se rozdílily mezi druhy vodičů zvětšují.

U prvního zkoumaného úseku vedení s uvažováním lehké námrazové oblasti v kapitole 4.3.2.1. nebylo nutné mít pro každý druh vodiče jiný počet stožárů, ale stačilo některé stožáry pouze zvýšit (největší rozdíl je 8 m), kdežto u těžké námrazové oblasti jsem musel stožáry zvýšit až do převýšení 16 m, abych mohl zachovat stejný počet stožárových míst jako u varianty v lehké námrazové oblasti.

U dvou vodičů ani to nestačilo a musel jsem zvýšit počet stožárů, ale zase mohly být o něco nižší. Jestli je levnější zvyšovat stožáry nebo postavit nižší, ale zato větší počet se pokusím vyhodnotit s respektováním rozdílné ceny jednotlivých vodičů v další kapitole.

Návrh stožárů pro úsek st. č. 293 – st. č. 282 je v tabulce č. 16 na další stránce.

Úsek st. č. 293 – st. č. 282					
Pořadové číslo stožáru	Typ stožáru pro daný druh vodiče				
	TACSR/ACS 380/50	490-AL1/64-ST1A	500-AL3	626-AL3	ACCC 360
1	RV+4	RV+4	RV+4	RV+4	RV+4
2	N+6	N+8	N+4	N+6	N+4
3	N	N+16	N+14	N+16	N+16
4	N	N	N	N	N
5	N	N	N+12	N+14	N+14
6	N	N+2	N+12	N+12	N+16
7	N+4	N+8	V+4	V+4	V+4
8	N+10	V+4	N+8	N+10	N+10
9	V+4	N+14	RV+2	RV+2	RV+2
10	N+4	RV+2	-	-	-
11	N	-	-	-	-
12	RV+2	-	-	-	-

Tabulka č. 16 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 293 – st. č. 282 v těžké námrazové oblasti

Zajímavé je se podívat zejména na vodič ACCC 360, pro který v lehké námrazové oblasti mohly být postaveny, v porovnání s hliníkovými vodiči 500-AL3 a 626-AL3, nižší stožáry. V těžké námrazové oblasti mi naopak vyšel požadavek na vyšší stožáry v porovnání s hliníkovými vodiči. V těžké námrazové oblasti se stírá výhoda kompozitního vysokoteplotního vodiče, kdy pro případy nerovnoměrné námrazy v poli křížovatky, se musí uvažovat chování tohoto vodiče pod bodem teplotního kolena, což negativně ovlivní jeho mechanické chování na vedení, a to tím více, čím těžší je námrazová oblast.

Ve druhém projektovaném úseku by při uvažování těžké námrazové oblasti také musely být postaveny vyšší stožáry, nebo by jich muselo být postaveno více, než při projektování úseku v lehké námrazové oblasti. U lehké námrazové oblasti je dokonce návrh stožárů pro všechny vodiče naprosto stejný, což pro těžkou námrazovou oblast zdaleka neplatí, jak je vidět v tabulce na další stránce.

Úsek st. č. 260 – st. č. 252					
Pořadové číslo stožáru	Typ stožáru pro daný druh vodiče				
	TACSR/ACS 380/50	490-AL1/64-ST1A	500-AL3	626-AL3	ACCC 360
1	RV	RV	RV	RV	RV
2	N+6	N+2	N	N+2	N
3	N	N	N	N	N
4	N+6	N+12	N+6	N+8	N+6
5	N+4	N+16	N+16	N+16	N+16
6	N+16	N+16	N+8	N+12	N+16
7	N+16	N	RV+4	RV+4	N
8	N+2	RV+4	-	-	RV+4
9	RV+4	-	-	-	-

Tabulka č. 17 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 260 – st. č. 252 v těžké námrazové oblasti

Z návrhů dvou stejných úseků vedení, jednou v lehké a jednou v těžké námrazové oblasti, vyplývá, že námrazová oblast má obecně na návrh vedení zásadní vliv, prohlubuje rozdíly mezi jednotlivými vodiči s rozdílnými mechanickými vlastnostmi a prodražuje výstavbu vedení. Jak velký je rozdíl v investičních nákladech mezi různými vodiči při návrhu vedení v lehké a těžké námrazové oblasti kvantifikují v další kapitole.

4.6. Hodnocení variant modernizace a rekonstrukce z hlediska investičních nákladů

Abych mohl provést hodnocení z hlediska investičních nákladů, musím znát jednotkové ceny jednotlivých typů stožárů a vodičů. Všechny následující ceny, které budu uvádět, platí pro vedení 220 kV. Tabulka č. 18 ukazuje jednotkové ceny vodičů použitých v této práci, jež byly ujištěny od výrobců vodičů.

Vodič	Cena za 1 kg	Cena za 1 m
ACCC 360	796,00 Kč	872,40 Kč
TACSR/ACS 380/50	238,80 Kč	330,50 Kč
626-AL3	98,80 Kč	171,70 Kč
490-AL1/64-ST1A	79,60 Kč	148,50 Kč
500-AL3	98,80 Kč	136,50 Kč
326-AL1/86-STC6	79,60 Kč	125,70 Kč
362-AL1/59-ST1A	79,60 Kč	117,30 Kč

Tabulka č. 18 – Jednotkové ceny vodičů

Jednotkové ceny za práci při instalaci vodičů, výpočet potřebné délky vodiče, stejně jako investiční náklady na stavbu nových stožárových konstrukcí, případně demontáž starého vedení jsem při výpočtech použil na základě informací od společnosti TRANSENERGY s.r.o. a nebudu je zde sdělovat, protože jsou součástí know-how firmy a jsou obchodním tajemstvím.

Obecně lze investiční náklady na nové stožáry rozdělit na náklady na ocelové konstrukce, náklady na nátěry ocelových konstrukcí, náklady na izolátorové závěsy a náklady na základy. Všechny tyto náklady se dále dělí na náklady na materiál a na práci. A to, jak se podílí na celkových investičních nákladech, je uvedeno v následující tabulce. Ještě lze obecně říci, že kotevní stožáry jsou dražší než nosné stožáry z důvodů mohutnějších ocelových konstrukcí, větších základů a větších izolátorových závěsů.

	Ocelová konstrukce		Nátěry		Izolátorové závěsy		Základy	
	Podíl na celkových investičních nákladech	Z toho materiál	Podíl na celkových investičních nákladech	Z toho materiál	Podíl na celkových investičních nákladech	Z toho materiál	Podíl na celkových investičních nákladech	Z toho materiál
V+0	66%	61%	4%	60%	17%	76%	13%	45%
V+2	64%	60%	4%		17%			
V+4	61%	60%	4%		16%			
RV+0	68%	62%	4%		15%			
RV+2	66%		4%		15%			
RV+4	63%		4%		14%			
N-2	65%		5%		11%	67%		
N+0	66%		5%		11%			
N+2	67%		5%		10%			
N+4	69%	5%	10%					
N+5	70%	5%	9%					
N+6	71%	5%	9%					
N+8	72%	5%	9%					
N+10	72%	5%	8%					
N+12	73%	5%	8%					
N+14	74%	5%	8%					
N+16	74%	5%	8%					

Tabulka č. 19 – Podíl jednotlivých nákladů na investičních nákladech nových stožárů

Z jednotkových cen spočtu celkové investiční náklady rekonstrukce dvou úseků vedení (tří kotevních úseků), včetně demontáže stávajícího vedení, pro každý z pěti uvažovaných vodičů a obě námrazové oblasti (ČSN 33 3300/84-L a ČSN 33 3300/84-T). Pro hodnocení modernizace a rekonstrukce vedení s různými druhy vodičů z hlediska investičních nákladů si zavedu veličinu cena za přenos proudu o velikosti 1 A, což představuje celkové investiční náklady na výstavbu vedení přepočtené přes proud, kterým lze toto vedení zatěžovat.

V celkových investičních nákladech budou zahrnuty i ostatní náklady, jako například náklady na projekt, přípravné práce, inženýring, věcná břemena a jiné. Veškeré ceny uváděné v této práci jsou bez DPH.

Porovnání z hlediska investičních nákladů rozdělím do tří částí: modernizace vedení se zachováním stávajících stožárů, rekonstrukce vedení s novými stožáry v lehké námrazové oblasti a rekonstrukce vedení s novými stožáry v těžké námrazové oblasti.

4.6.1. Modernizace – stávající stožáry

V tomto případě se na investičních nákladech podílejí náklady na demontáže (FV, ZL, izolátorových závěsů), náklady na nové FV, KZL a izolátorové závěsy, případně náklady vyvolávající potřeba zesílení stožárů a samozřejmě také ostatní náklady (projekt, přípravné práce, inženýring, věcná břemena a jiné). V tabulce č. 20 jsou vypočteny celkové investiční náklady pro jednotlivé vodiče, a v tabulce č. 21 pak procentuální podíl jednotlivých nákladů.

	Celkové náklady	Cena za 1 m vedení	Cena za přenos 1 A
500-AL3	19 270 758 Kč	3 692 Kč	24 549 Kč
TACSR/ACS 380/50	26 416 062 Kč	5 061 Kč	24 804 Kč
490-AL1/64-ST1A	20 149 538 Kč	3 860 Kč	25 999 Kč
362-AL1/59-ST1A	18 563 591 Kč	3 556 Kč	26 444 Kč
626-AL3	21 004 031 Kč	4 024 Kč	27 420 Kč
326-AL1/59-STC6	18 872 977 Kč	3 616 Kč	28 423 Kč
ACCC 360	46 375 143 Kč	8 884 Kč	37 581 Kč

Tabulka č. 20 – Celkové investiční náklady modernizace se stávajícími stožáry

Porovnáme-li cenu za 1 m vedení, tak vidíme, že investiční náklady na modernizaci s použitím vodiče typu ACCC jsou skoro 2,5 krát větší než u ostatních vodičů. A i přesto, že má vyšší proudovou zatížitelnost než ostatní vodiče, tak při porovnání ceny za přenos 1 A tento typ vodiče vychází zhruba 1,5 krát dražší.

Vodič typu TACSR je dražší na 1 m vedení přibližně o třetinu než vodiče ACSR a celohliníkové, ale při porovnání ceny za přenos 1 A, již díky své vyšší proudové zatížitelnosti, vychází levněji než ostatní vodiče s výjimkou vodiče 500-AL3.

Nejlevnější vodiče na 1 m délky vedení (362-AL1/59-ST1A a 326-AL1/86-STC6) jsou logicky ty nejlehčí s nejmenším průřezem, a proto i s nejmenší proudovou zatížitelností, tudíž při porovnávání s dražšími vodiči na 1 m délky, je cena za přenos 1 A vyšší.

Pro vodič 500-AL3 mi vyšla nejnižší cena za přenos proudu o velikosti 1 A, konkrétně 24 549 Kč. Nicméně cena za přenos 1 A u vodiče TACSR/ACS 380/50 je vyšší jen o málo, konkrétně je cena 24 804 Kč, ale proudová zatížitelnost by byla větší o 280 A.

Ještě je nutno připomenout, že vodiče 490-AL1/64-ST1A a 626-AL3 by nemohli být vůli svým mechanickým vlastnostem, provozovány při teplotě vodiče +80°C, ale nižší, což je znevýhodňuje v porovnání ceny za přenos 1 A.

Označení vodiče	Demontáže	Náklady na FV	Náklady na nové IZ	Náklady na zesílení stožárů	Náklady na KZL	Ostatní náklady
500-AL3	7%	48%	21%	0%	14%	11%
TACSR/ACS 380/50	5%	59%	15%	0%	10%	11%
490-AL1/64-ST1A	7%	48%	20%	2%	13%	11%
362-AL1/59-ST1A	7%	46%	21%	0%	14%	11%
626-AL3	7%	50%	19%	2%	12%	11%
326-AL1/86-STC6	7%	47%	21%	0%	14%	11%
ACCC 360	3%	72%	9%	0%	6%	11%

Tabulka č. 21 – Podíl jednotlivých nákladů na celkových investičních nákladech modernizace

Při modernizaci se na celkových investičních nákladech nejvíce podílí náklady na FV, u vodičů ACSR a celohliníkových přibližně padesáti procenty, u vodiče TACSR necelými 60 % a u vodiče typu ACCC dokonce skoro 3/4 celkových nákladů na modernizaci. Podíly ostatních nákladů jsou vidět v tabulce č. 21.

4.6.2. Rekonstrukce – nové stožáry v lehké námrazové oblasti

V případě rekonstrukce vedení se na investičních nákladech podílejí v největší míře náklady na nové stožáry, dále náklady na demontáž původního vedení, které jsou ve stejné výši jako u modernizace, protože demontáže ocelových konstrukcí se v rozpočtech neuvažují (demontáž je zdarma), náklady na nové FV, KZL a samozřejmě také ostatní náklady (projekt, přípravné práce, inženýring, věcná břemena a jiné).

V lehké námrazové oblasti jsou náklady na stožáry mezi vodiči srovnatelné, rozdíl mezi nejlevnější a nejdražší variantou je méně než 900 000 Kč. Tudíž se v rozdílech mezi variantami nejvíce uplatní rozdílná cena fázových vodičů pro cenu za 1 m vedení a v případě porovnávání ceny za přenesený 1 A i rozdílná proudová zatížitelnost vodičů. Celkové investiční náklady a cenu za 1 m vedení, stejně jako cenu za přenos 1 A, jsou uvedeny v následující tabulce.

Typ vodiče	Celkové náklady	Cena za 1 m vedení	Cena za přenos 1 A
TACSR/ACS 380/50	59 311 890 Kč	11 363 Kč	55 692 Kč
626-AL3	52 960 534 Kč	10 146 Kč	58 715 Kč
490-AL1/64-ST1A	52 318 691 Kč	10 023 Kč	62 732 Kč
ACCC 360	78 299 155 Kč	15 000 Kč	63 452 Kč
500-AL3	51 428 238 Kč	9 852 Kč	65 514 Kč

Tabulka č. 22 – Celkové investiční náklady rekonstrukce vedení v lehké námrazové oblasti

Vodič 500-AL3 má nejnižší cenu na 1 m vedení, náklady na výstavbu by s tímto vodičem vyšly na 9 852 Kč/m vedení, ale cena za přenos 1 A je kvůli nízké proudové zatížitelnosti nejvyšší. Z hlediska investičních nákladů na přenos 1 A mi vyšel nejpříznivěji vodič typu TACSR kdy cena za přenos 1 A je 55 692 Kč, což je zhruba o 5 % méně než u druhého nejlevnějšího vodiče 626-AL3.

Typ vodiče	Demontáže	Náklady na stožáry včetně IZ	Náklady na FV	Náklady na KZL	Ostatní náklady
TACSR/ACS 380/50	2%	56%	26%	4%	11%
626-AL3	3%	62%	20%	5%	11%
490-AL1/64-ST1A	3%	63%	18%	5%	11%
ACCC 360	2%	41%	43%	3%	11%
500-AL3	3%	64%	18%	5%	11%

Tabulka č. 23 – Podíl jednotlivých nákladů na celkových investičních nákladech rekonstrukce v lehké námrazové oblasti

V případě rekonstrukce vedení už vodič většinou není to nejdražší, jak je vidět v tabulce č. 23. Tuto roli přebírají stožáry, které se pro případy ACSR a hliníkových vodičů, podílejí na celkových investičních nákladech z necelých 2/3. Vodiče se podílejí na celkových investičních nákladech u těchto vodičů kolem 20 %. U vodiče typu TACSR je podíl nákladů na FV na celkových nákladech o něco více než 1/4. Pouze v případě moderního a také výrazně dražšího vodiče ACCC je podíl nákladů na FV a na stožáry srovnatelný, a to zhruba 40 %.

Vodič ACCC, v případě, že by se stavělo nové vedení v lehké námrazové oblasti, už vychází ekonomicky podstatně zajímavěji. Díky svým mechanickým vlastnostem stačí pro tento vodič postavit nižší stožáry, čímž nám klesnou investiční náklady na stožáry, ale i s touto úsporou je v mém návrhu cena o polovinu vyšší. Nicméně promítneme-li do výsledků podstatně vyšší proudovou zatížitelnost tohoto typu vodiče, vyjde nám, že investiční náklady na vedení přepočtené na proud, který lze přenést, jsou u tohoto vodiče nižší než u vodiče 500-AL3.

4.6.3. Rekonstrukce – nové stožáry v těžké námrazové oblasti

Při návrhu vedení v těžké námrazové oblasti se prohlubují rozdíly navržených stožárů mezi jednotlivými vodiči. A také mírně roste podíl nákladů na stožáry na celkových investičních nákladech. V tabulce č. 24, jsou sepsány vypočtené náklady, ceny za 1 m vedení a za přenos 1 A pro porovnávané vodiče.

Typ vodiče	Celkové náklady	Cena za 1 m vedení	Cena za přenos 1 A
626-AL3	55 683 608 Kč	10 668 Kč	61 733 Kč
TACSR/ACS 380/50	71 382 356 Kč	13 675 Kč	67 026 Kč
ACCC 360	83 065 518 Kč	15 913 Kč	67 314 Kč
500-AL3	53 814 771 Kč	10 310 Kč	68 554 Kč
490-AL1/64-ST1A	57 766 163 Kč	11 067 Kč	69 264 Kč

Tabulka č. 24 – Celkové investiční náklady rekonstrukce vedení v těžké námrazové oblasti

V tomto případě jsou již rozdíly v nákladech na stožáry výraznější. Mezi nejnákladnější variantou u vodiče TACSR a nejlevnější u hliníkového vodiče 500-AL3 je rozdíl větší než 6 500 000 Kč.

Stejně jako v lehké námrazové oblasti i zde je nejlevnější na 1 m vedení vodič 500-AL3 s cenou 10 310 Kč/m a cena přenosu 1 A je nejnižší u vodiče 626-AL3 s cenou 61 733 A. Naopak nejvyšší cena za přenos 1 A je v tomto případě u vodiče 490-AL1/64-ST1A.

Typ vodiče	Demontáže	Náklady na stožáry včetně IZ	Náklady na FV	Náklady na KZL	Ostatní náklady
626-AL3	2%	63%	19%	5%	11%
TACSR/ACS 380/50	2%	61%	23%	4%	11%
ACCC 360	2%	44%	40%	3%	11%
500-AL3	3%	65%	17%	5%	11%
490-AL1/64-ST1A	2%	66%	17%	5%	11%

Tabulka č. 25 – Podíl jednotlivých nákladů na celkových investičních nákladech rekonstrukce vedení v těžké námrazové oblasti

Když porovnáme chování vodičů v lehké a těžké námrazové oblasti z hlediska vlivu na investiční náklady, tak z následující tabulky je vidět, že rozdíly mezi typy vodičů jsou značné.

Typ vodiče	Procentuální nárůst investičních nákladů v těžké námrazové oblasti oproti lehké
626-AL3	5%
500-AL3	5%
ACCC 360	6%
490-AL1/64-ST1A	10%
TACSR/ACS 380/50	20%

Tabulka č. 26 – Procentuální nárůst investičních nákladů v těžké námrazové oblasti oproti lehké

Závěr

V této práci bylo stručně popsáno venkovní vedení VVN s tím, že jsem se zaměřil na vodiče, kdy jsem podrobněji sepsal typy vodičů vyskytujících se na vedení a jejich funkci, z čehož vyplynuly různé požadavky na jednotlivé typy.

Shrnujím požadavky na slané vodiče dle platných norem a detailně popsal druhy fázových vodičů pro venkovní vedení VVN nejrůznějších tvarů, počínaje klasickými vodiči ACSR, přes celohliníkové vodiče až po moderní a relativně nové vysokoteplotní vodiče. U všech jsem popsal jejich konstrukci, význačné vlastnosti a samozřejmě zhodnotil jejich výhody a nevýhody.

V další části jsem poměrně podrobně sepsal teoretické poznatky o chování zavěšeného vodiče z pohledu mechaniky, včetně vlivu změny teploty a zatížení námrazou.

Poté jsem se věnoval proudové zatížitelnosti vodičů, k čemuž jsem využil bilanční rovnice tepelných výkonů v ustáleném stavu, a jednotlivé tepelné výkony jsem dostatečně rozebral, aby z nich mohl vyjít při sestavení výpočtů proudové zatížitelnosti dle postupu profesní organizace CIGRÉ a dle postupu uvedených ve článku Proudové dimenzování AlFe lan od Ing. Tomčíka.

Když oba postupy porovnám, mohu říci, že rozdíly ve vypočtené proudové zatížitelnosti vznikají při výpočtu tepelného výkonu ochlazující vodič konvekcí, kdy je tento výkon pro výpočet dle CIGRÉ menší přibližně o 10 % než při výpočtu dle článku Ing. Tomčíka. Srovnáním hodnoty proudové zatížitelnosti vodiče spočteného mnou vytvořeným programem v EXCELU s údaji od společnosti ČEPS jsem dospěl k závěru, že tento můj výpočet dává zhruba o 2 % vyšší hodnotu proudové zatížitelnosti, nicméně i přes tento rozdíl, je výpočet dostatečně přesný, aby mohl být používán v praxi ve společnosti TRANSENERGY s.r.o. pro výpočet proudové zatížitelnosti vodiče.

Dále jsem vybral, dle mého názoru, vhodné vodiče pro porovnávání proběhlé modernizace a návrhu možné rekonstrukce konkrétního úseku vedení V245/V246. Modernizaci a rekonstrukci vedení jsem vyprojektoval (včetně varianty vedení stojícího v těžké námrazové oblasti nikoliv v lehké, jak je to ve skutečnosti) a vodiče zakreslil do podélných profilů, které jsou k dispozici na přiloženém CD. Následně jsem u všech variant spočítal investiční náklady a nyní zde uvedu, některé mé poznatky.

Do srovnání jsem zahrnul vodič typu ACSR, dva celohliníkové vodiče, vysoko teplotní vodiče TACSR a ACCC. Vodič ACCC byl navíc nízko průhybový, což se projevilo tím, že v nejdelším rozpětí měl při zahřátí z $+80^{\circ}\text{C}$ na $+110^{\circ}\text{C}$ pouze čtvrtinové zvětšení průhybu ve srovnání s vodičem TACSR.

Při projektování rekonstrukce i modernizace vedení by měla být snaha o co nejmenší počet nosných stožárů i za cenu toho, že budou vyšší a je lepší stožáry zvyšovat než stavět nové, k tomuto závěru mě vede to, že zvýšení o každé dva metry přinese průměrné náklady 80 000 Kč, kdežto nový nosný stožár stojí minimálně přes 1,3 mil Kč, jinak řečeno za cenu 3 stožárů typu N je možno postavit 2 stožáry s převýšením 16 m (N+16) a ještě nám 200 000 Kč zbyde.

Další poznatek je ten, že na investiční náklady má vliv námrazová oblast a to tak, že s těžší námrazovou oblastí investiční náklady rostou. Tento nárůst je u některých druhů vodiče zásadní u jiných menší. Nejmenší nárůst investičních nákladů byl u celohliníkových vodičů (5 %) a vodiče ACCC, naopak zásadní u vodiče TACSR (20 %), u vodiče ACSR to byl nárůst o 10 %.

Další velkou výhodou celohliníkových vodičů vidím ve větší únosnosti vodičů, což v případě rekonstrukce vedení, kdy jsou nové stožárové konstrukce umožňuje napnout vodič na takový tah, co dovolí stožár. U ostatních druhů vodičů je tah omezen nikoliv stožáry, ale samotným vodičem. Důsledkem toho jsou nižší průhyby celohliníkových vodičů v porovnání s vodiči ACSR se stejnou měrnou tíhou.

Co se týká vodičů TACSR a ACCC, tak jejich problém je v současné době cena a to, že není dle norem dovoleno uvažovat návrhovou teplotu vodiče vyšší než $+80^{\circ}\text{C}$. Vodič TACSR je 3 krát dražší než klasický vodič ACSR a vodič ACCC dokonce 10 krát, ale když vezmeme v potaz jejich výrazně vyšší proudovou zatížitelnost, tak užití začne mít ekonomický smysl, protože nám v některých případech může cena za výstavbu vedení přepočtená na 1 A přenosové schopnosti tohoto vedení vyjít nižší než při užití vodičů ACSR a celohliníkových. Ale v případě, že maximální návrhová teplota vodiče nebude vyšší než $+80^{\circ}\text{C}$, tak úspora investičních nákladů, díky jejich lepšímu mechanickému chování na vedení, nebude, dle mého názoru, v drtivé většině případů větší, než o kolik více zaplatíme za pořízení tohoto vodiče.

Takže mám-li udělat závěr, který vodič bych vybral pro každou, v práci popisovanou situaci, moje volba by byla následující.

V případě modernizace bych se rozhodoval mezi vodičem TACSR/ACS 380/50 a vodičem 500-AL3, jež má nepatrně nižší investiční náklady na přenos proudu o velikosti 1 A, ale v případě budoucího vývoje a možnosti provozovat vodič při teplotě vyšší než +80°C bych volil vodič typu TACSR s podstatně vyšší proudovou zatížitelností, v opačném případě bych zvolil vodič 500-AL3.

Při rekonstrukci vedení v lehké námrazové oblasti bych vybral vodič TACSR/ACS 380/50, opět za možnosti provozovat ho při vyšší teplotě než +80°C. Jinak bych zvolil vodič 626-AL3. Tento celohliníkový vodič bych zvolil také v případě rekonstrukce vedení v těžké námrazové oblasti, kde měl nejlepší kombinaci mechanických vlastností a proudové zatížitelnosti.

Zdroje

- [1] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Zdeněk MÜLLER a Miroslav MÜLLER. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [2] LIST, Vladimír a Karel POCHOP. *Mechanika venkovních vedení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
- [3] TOMČÍK, Jaroslav. Proudové dimenzování AlFe lan. *Elektrotechnický obzor* 77. 1988, č. 11, str. 650-654.
- [4] ČSN EN 50341-1. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45kV AC, část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace*. 2. vyd. 2012.
- [5] ČSN EN 50341-3. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45kV AC, část 3: Národní normativní aspekty*. 2. vyd. 2007.
- [6] WORKING GROUP 22.12. Thermal behaviour of overhead conductors. In: *Technical brochure 207* [online]. 2002 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.e-cigre.org/Search/ru_se.asp
- [7] BLACK, W. Z. a REHBERG, R. L. Simplified Model for Steady State and real-time Ampacity of Overhead Conductors. *IEEE PAS-104*, 1985, č. 10, str. 2942-2953
- [8] AlumaCore Optical Ground Wire (OPGW). *AFL* [online]. © Copyright 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: [https://www.aflglobal.com/Products/Fiber-Optic-Cable/OPGW/Alumacore-Cable/AlumaCore-Optical-Ground-Wire-\(OPGW\).aspx](https://www.aflglobal.com/Products/Fiber-Optic-Cable/OPGW/Alumacore-Cable/AlumaCore-Optical-Ground-Wire-(OPGW).aspx)
- [9] TOMČÍK, Jaroslav a Čestmír ŠEBELÍK. Vliv klimatických podmínek na zatížitelnost ocelohliníkových lan. *Elektrotechnický obzor*. 1988, č. 6, str. 335-343.
- [10] TN/46/2013 revize č. 2. *Lanové vodiče pro elektrická vedení přenosové soustavy*. místo neznámé: ČEPS a.s., 2013.
- [11] ČSN EN 50 182. *Vodiče venkovního elektrického vedení - Lanované vodiče vinuté z koncentrických kruhových drátů*. Praha: Český normalizační institut, 2002.

[12] ČSN 33 3300. *Stavba venkovních silových vedení*. 2. náklad. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1986.

[13] CHRÁSTEK, Radim. *Dimenzování a kontrola venkovního vedení: Project of Overhead Line* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009 [cit. 2015-04-29]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné

z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14674.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

[14] KIESSLING, Friedrich. *Overhead power lines: planning, design, construction*. New York, 2003, xxviii, 759 p. ISBN 35-400-0297-9.

[15] PARMAR, Jignesh. Types of Overhead Conductors. In: *Electrical Notes & Articles* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z:

<https://electricalnotes.wordpress.com/2011/03/20/overhead-conductors/>

[16] The International Annealed Copper Standard. *NDT Resource Center* [online]. 2001-2014 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/GeneralResources/IACS/IACS.htm>

[17] Vodiče izolátory stožáry. In: *FastStone* [online]. © 2008 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://files.milanovo-misto.webnode.cz/200000440-04f5406e94/04%20Vodi%C4%8De%20izol%C3%A1tory%20sto%C5%BE%C3%A1ry.pdf>

[18] ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced). *MIDAL CABLES LTD.* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <https://www.midalcable.com/overhead-line-conductors/acar-aluminium-conductor-alloy-reinforced>

[19] ACAR. *Southwire* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.southwire.com/products/ACAR.htm>

[20] Conductors. *LAMIFIL* [online]. © Lamifil 2010 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://lamifil.be/conductors/>

- [21] GTACSR (Gap type thermal-resistant aluminum alloy conductor steel reinforced), GZTASCR (Gap type super thermal-resistant aluminum alloy conductor steel reinforced). In: *J-Power Systems* [online]. Copyright (C) 2007 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap_c1.pdf
- [22] ACSR Cable(Aluminum Conductor Steel Reinforced Cable). *ZMS Cable* [online]. Copyright © 2010-2012 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.vericable.com/cables/overheadcable/acsr-cable.htm>
- [23] ALUMINIUM 1350. In: *Nexans* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.nexans.co/Colombia/2013/AAC_37HILOS%20I.png
- [24] AAC/TW. *Southwire* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.southwire.com/products/AAC/TW.htm>
- [25] AAAC Conductor, All Aluminum Alloy Conductor. *ZMS Power Cable* [online]. © 2010 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.zmscable.com/AAAC-Conductor.html>
- [26] ACSR ACAR AAC AAAC bare conductor. *Alibaba.com* [online]. © 1999-2014 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://zzhd.en.alibaba.com/product/604281414-211970519/ACSR_ACAR_AAC_AAAC_bare_conductor.html
- [27] ENERGY EFFICIENT HIGH CURRENT OH CONDUCTORS - TECHNICAL DATA SHEET. In: *MIDAL CABLES LTD.* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: [https://www.midalcable.com/sites/default/files/ACCC%20Data%20Sheets\(Metric%20size\).pdf](https://www.midalcable.com/sites/default/files/ACCC%20Data%20Sheets(Metric%20size).pdf)
- [28] Ing. PROCHÁZKA, Radek. Stožáry VVN (I). In: *Tzbinfo* [online]. 4.6.2007 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i>
- [29] G Trans TACSR. *GUPTA POWER* [online]. Copyright 2013 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.guptapower.com/Technical-Specification/1/142/173/>
- [30] Invar Core Conductors (TACIR, KTACIR, ZTACIR). *De Angeli Prodotti* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.deangeliprodotti.com/en/content/invar-core-conductors-tacir-ktacir-ztacir>

- [31] Steel Supported Conductor/ Steel Supported Conductors - ACSS. *Wiretec* [online]. © 1999 - 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://wiretec.eu/epconssc_steel_supported_conductor.htm
- [32] EN 50540 ACSS/TW Conductor. *Alibaba.com* [online]. © 1999-2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.alibaba.com/product-detail/EN-50540-ACSS-TW-Conductor_1000836347.html
- [33] ACCC Conductor. *Jeff Thompson* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.jeffreythompson.org/blog/2013/04/09/accc-conductor/>
- [34] ČSN IEC 889. *Tvrde tažené hliníkové dráty pro vodiče nadzemního vedení*. 1997. Praha: Český normalizační institut.
- [35] ČSN EN 50183. *Dráty ze slitin Al-Mg-Si pro vodiče venkovních vedení*. 2000. Praha: Český normalizační institut.
- [36] ČSN EN 50189. *Pozinkované ocelové dráty pro vodiče venkovních vedení*. 2000. Praha: Český normalizační institut.
- [37] ČSN EN 61232. *Ocelohliníkové dráty pro elektrotechniku*. 1997. Praha: Český normalizační institut.
- [38] ČEPS A.S. *Provozní dokumentace vedení 200 kV V245*. 2004.

Seznam zkratek a symbolů

VVN	velmi vysoké napětí
ZVN	zvláště vysoké napětí
FV	fázový vodič
ZL	zemní lano
KZL	kombinované zemní lano
ČR	Česká republika
HDO	hromadné dálkové ovládání
OPGW	kombinované zemní lano s optickými vlákny
OPPW	kombinovaný fázový vodič s optickými vlákny
IACS	Mezinárodní standard žíhané mědi
AL1	tvrdě tažený hliník
AL2 – AL7	slitiny hliníku
Al	hliník
Mg	hořčík
Fe	železo
Cu	měď
ST1A, ST2B, ST3D, ST4A, ST5E, ST6C	pozinkované ocelové dráty
TW	segmentovaný vodič
ACSR	lano složené z oceli a hliníku
AlFe	lano složené z oceli a hliníku
AAC	vodič z čistého hliníku
AAAC	vodič z tepelně ošetřené slitiny Al-Mg-Si
ACAR	kombinovaný vodič z vodičů AAC a AAAC
TAL	tepelně odolný hliník
ZTAL	zvláště tepelně odolný hliník
INVAR	slitina železa a niklu
(Z)TACSR	vodič složený z ocelového jádra a drátů z TAL nebo ZTAL
G(Z)TACSR	vodič s jádrem z EHS, pláštěm TAL nebo ZTAL a mezerou mezi jádrem a pláštěm

EHS	vysoko pevnostní ocel
ZTACIR	vodič s jádrem z INVARu a pláštěm z drátů TAL nebo ZTAL
ACSS	vodič s jádrem z EHS a pláštěm z plně žíhaných hliníkových drátů
ACCC	vodič s jádrem z karbonových vláken se skelnými vlákny a pláště z plně žíhaného hliníku
N	nosný stožár
R	rohový stožár
V	výztužný stožár
RV	rohový výztužný stožár
Z	zákrutový stožár
IZ	izolátorový závěs
σ_H (Pa)	vodorovná složka namáhání vodiče
γ ($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)	svislá složka namáhání vodiče
c (m)	parametr řetězovky
z (-)	přetížení vodiče
f_m (m)	maximální průhyb řetězovky
a (m)	délka rozpětí
ξ	poměrný rozdíl mezi průhybem řetězovky a paraboly stejných parametrů
l_s (m)	délka zavěšeného vodiče
a_i (m)	délka ideálního rozpětí
h (m)	výškový rozdíl závěsných bodů A a B
x_A (m)	horizontální vzdálenost bodu řetězovky od závěsného bodu A
x_B (m)	horizontální vzdálenost bodu řetězovky od závěsného bodu B
y_B (m)	výška závěsného bodu B
y_A (m)	výška závěsného bodu A
f_h (m)	charakteristický průhyb nesouměrné řetězovky
f_v (m)	viditelný průhyb nesouměrné řetězovky
h' (m)	výškový rozdíl závěsných bodů A a B v místě viditelného průhybu
σ_B (Pa)	mechanické napětí v závěsném bodě B

F_B (N)	tah v bodě závěsu B
S (mm ²)	průřez vodiče
G (m·s ⁻²)	tíhová konstanta
q_1 (kg·m ⁻¹)	hmotnost 1 m vodiče
q_2 (kg·m ⁻¹)	hmotnost přídatného zatížení vodiče
σ_{vB} (Pa)	mechanické napětí ve svislém směru v závěsném bodě B
F_{vB} (N)	svislý tah v bodě závěsu B
Δl (m)	prodloužení zavěšeného vodiče
E (MPa)	modul pružnosti
α (°C ⁻¹)	součinitel tepelné délkové roztažnosti
M (kg·m ⁻¹)	poměrná hmotnost vodiče
c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	měrná tepelná kapacita
T_{AV} (°C)	teplota vodiče
P_Z (W/m)	Jouleovy ztráty
P_S (W/m)	výkon dodaný slunečním zářením
P_R (W/m)	výkon odvedený radiací
P_C (W/m)	výkon odvedený konvekcí
R_{DC20} (Ω)	stejnoseměrný odpor při 20°C
k_{AC} (-)	poměr mezi střídavým a stejnoseměrným odporem
b (K ⁻¹)	teplotní součinitel odporu
R_{DC} (Ω)	stejnoseměrný odpor
R_{AC} (Ω)	střídavý odpor
I_{DC} (A)	stejnoseměrný proud
I_{AC} (A)	střídavý proud
α (-)	koefficient pohltivosti slunečního záření daným povrchem
D (m)	průměr vodiče
I_p (W/m ²)	intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na kolmou rovinu k směru slunečních paprsků
ω (rad)	úhel mezi osou slunečních paprsků a osou vodiče

r	počet provozních let vodiče
g (m/s^2)	tíhové zrychlení
β (K^{-1})	teplotní součinitel rozpínivosti vzduchu
Pr (-)	Prandtlovo číslo
T ($^{\circ}\text{C}$)	definiční teplota
V_H (m)	nadmořská výška
λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	tepelná vodivost vzduchu
ν (m^2/s)	kinematická viskozita vzduchu
Gr (-)	Grashoffovo číslo
w_S (m/s)	ekvivalentní rychlost větru
Re (-)	Reynoldsovo číslo
Nu_N (-)	Nusseltovo číslo pro nucenou konvekci
Nu_V (-)	Nusseltovo číslo pro volnou konvekci
ψ (rad)	úhel mezi směrem větru a normálou k ose vodiče
α ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	součinitel přestupu tepla
T_a ($^{\circ}\text{C}$)	teplota okolí
ε (-)	koeficient emisivity tepelného záření
NNA	národní normativní aspekty
q_n ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	jmenovitá hmotnost námrazku

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 – Vodič OPGW	11
Obrázek č. 2 – Vodič s dráty tvaru Z.....	17
Obrázek č. 3 – Segmentovaný vodič	17
Obrázek č. 4 – Vodič ACSR	18
Obrázek č. 5 – Vodič AAC	19
Obrázek č. 6 – Vodič AAC/TW	19
Obrázek č. 7 – Vodič AAAC.....	19
Obrázek č. 8 – Vodič ACAR.....	20
Obrázek č. 9 – Vodič (Z)TACSR	22
Obrázek č. 10 – Příčný a podélný řez vodičem G(Z)TACSR.....	23
Obrázek č. 11 – Vodič G(Z)TACSR.....	24
Obrázek č. 12 – Vodič ZTACIR	24
Obrázek č. 13 – Vodič ACSS.....	25
Obrázek č. 14 – Vodič ACSS/TW.....	26
Obrázek č. 15 – Vodič ACCC	26
Obrázek č. 16 – Průhybová křivka - řetězovka	30
Obrázek č. 17 – Průhyb souměrné řetězovky	31
Obrázek č. 18 – Nesouměrná řetězovka	34
Obrázek č. 19 – Namáhání v bodě závěsu.....	37

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Vlastnosti hliníkových slitin	21
Tabulka č. 2 – Vlastnosti ocelí	21
Tabulka č. 3 – Velikost konstant c_N a n	48
Tabulka č. 4 – Vlastnosti uvažovaných vodičů	54
Tabulka č. 5 – Podmínky pro výpočet proudové zatížitelnosti	55
Tabulka č. 6 – Výsledky pro vodič TACSR/ACS 380/50.....	55
Tabulka č. 7 – Proudová zatížitelnost vodičů uvažovaných při modernizaci a rekonstrukci vedení V245/V246	56
Tabulka č. 8 – Zatěžovací stavy dle ČSN 33 3300	57
Tabulka č. 9 – Nejkratší vzdálenosti od vybraných křižovatek dle ČSN 33 3300.....	58
Tabulka č. 10 – Proudová zatížitelnost vodičů v mnou posuzovaných úsecích vedení V245/V246	60
Tabulka č. 11 – Zvětšení průhybů při zahřátí vodičů TACSR/ACS 380/50 a ACCC 360.....	60
Tabulka č. 12 – Omezení velikosti tahu na stožáry a izolátorové závěsy.....	62
Tabulka č. 13 – Omezení velikosti tahu ve vodičů	63
Tabulka č. 14 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 293 – st. č. 282 v lehké námrazové oblasti	64
Tabulka č. 15 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 260 – st. č. 252 v lehké námrazové oblasti	64
Tabulka č. 16 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 293 – st. č. 282 v těžké námrazové oblasti	66
Tabulka č. 17 – Navržené stožáry pro úsek st. č. 260 – st. č. 252 v těžké námrazové oblasti	67
Tabulka č. 18 – Jednotkové ceny vodičů	68
Tabulka č. 19 – Podíl jednotlivých nákladů na investičních nákladech nových stožárů	69
Tabulka č. 20 – Celkové investiční náklady modernizace se stávajícími stožáry	70
Tabulka č. 21 – Podíl jednotlivých nákladů na celkových investičních nákladech modernizace	71
Tabulka č. 22 – Celkové investiční náklady rekonstrukce vedení v lehké námrazové oblasti	72
Tabulka č. 23 – Podíl jednotlivých nákladů na celkových investičních nákladech rekonstrukce v lehké námrazové oblasti.....	73
Tabulka č. 24 – Celkové investiční náklady rekonstrukce vedení v těžké námrazové oblasti	74
Tabulka č. 25 – Podíl jednotlivých nákladů na celkových investičních nákladech rekonstrukce vedení v těžké námrazové oblasti.....	74
Tabulka č. 26 – Procentuální nárůst investičních nákladů v těžké námrazové oblasti oproti lehké	75