

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dynamický ohřev vodičů venkovních vedení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek ŠÍP**
Osobní číslo: **E10B0254P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Dynamický ohřev vodičů venkovních vedení**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte literární rešerši aktuálního stavu problematiky.
2. Proveďte teoretickou analýzu tepelné bilance vodiče.
3. Navrhněte tepelný model venkovního vodiče.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Rada J. a kol.: Elektrotepelná technika. Praha: SNTL, 1985.
2. Working Group B2/C1.19. Increasing capacity of overhead transmission lines. CIGRE, 2010.
3. Working Group 22.12. Thermal behaviour of overhead conductors. CIGRE, 2002.
4. Matlab - Simulink product help.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Šnajdr


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

7. června 2013


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku dynamického ohřevu vodičů venkovního vedení a jeho vlivu na přenášený výkon. První část práce obsahuje současné metody používané ke zvýšení přenášeného výkonu. Jsou zde popsány různé metody řešení. Popis zahrnuje jejich základní principy a jejich srovnání z hlediska ekonomické výhodnosti. Druhá část práce obsahuje analýzu vlivů, které ovlivňují teplotu vodiče během provozu. Ve třetí části je popsán postup při tvorbě a funkce tepelného modelu vodiče venkovního vedení. Tento model byl vytvořen v programu MATLAB – Simulink.

Klíčová slova

Venkovní vedení, přenášený výkon, maximální dovolený proud, Matlab – Simulink, tepelný model.

Abstract

The bachelor thesis is focused on issue of a dynamic heating of an overhead line and its effect on a power transmission ability. The first part contains current methods for increasing the power transmission ability. There are described various methods of a solution. The description includes their basic principle and their comparison in terms of economic benefits. The second part contains an analysis of factors, that influence the temperature of the conductor during the operation. The second part contains a procedure of a creation of a thermal model of the overhead line and its function. This model was created in MATLAB-Simulink.

Key words

Overhead line, transmitted power, maximal permitted current, Matlab – Simulink, thermal model.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 5.6.2013

Radek Šíp

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavovi Šnajdrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 AKTUÁLNÍ STAV PROBLEMATIKY	12
1.1 METODY ZVÝŠENÍ DOVOLENÉHO PROCHÁZEJÍCÍHO PROUDU	12
1.1.1 <i>Operativní metody</i>	12
1.1.2 <i>Metody založené na vodičích</i>	17
1.2 ZVÝŠENÍ JMENOVITÉHO NAPĚTÍ	18
1.3 ROZSÁHLÁ ŘEŠENÍ	19
1.3.1 <i>HSIL vedení</i>	19
1.3.2 <i>Konverze AC do DC</i>	19
1.4 ZHODNOCENÍ	20
2 TEORETICKÁ ANALÝZA TEPELNÉ BILANCE VODIČE	21
2.1 VLIV OKOLNÍ TEPLoty	22
2.2 ZÁKLADNÍ ROVNICE	22
2.3 OTEPLOVÁNÍ VODIČE	22
2.3.1 <i>Ohřev průchodem proudu</i>	22
2.3.2 <i>Sluneční ohřev</i>	24
2.3.3 <i>Ohřev korunou</i>	25
2.4 OCHLAZOVÁNÍ VODIČE	25
2.4.1 <i>Ochlazování prouděním</i>	25
2.4.2 <i>Ochlazování sáláním</i>	27
2.4.3 <i>Ochlazování vypařováním vody</i>	28
2.5 TEPELNÁ KAPACITA VODIČE	28
3 TEPELNÝ MODEL VODIČE VENKOVNÍHO VEDENÍ	29
3.1 MATLAB – SIMULINK	29
3.1.1 <i>Simscape</i>	29
3.1.2 <i>Použité bloky</i>	30
3.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MODELU	31
3.3 POUŽITÉ HODNOTY	31
3.4 STATICKÝ MODEL	32
3.5 DYNAMICKÝ MODEL	33
ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	39

Seznam symbolů a zkratek

C	Tepelná kapacita vodiče [J/K]
c	Měrná tepelná kapacita [$J/(kg \cdot K)$]
c_{20}	Měrná tepelná kapacita při teplotě 20 °C [$J/(kg \cdot K)$]
D	Vnější průměr vodiče [m]
I	Proud [A]
I_{AC}	Efektivní střídavý proud [A]
I_{DC}	Stejnoseměrný proud [A]
k	Koeficient upravující α_k podle směru větru [-]
K_{angle}	Faktor směru větru [-]
k_f	Tepelná vodivost vzduchu [$W/(m \cdot K)$]
k_j	Koeficient pro zvýšení teploty vlivem skin efektu [-]
m	Hmotnost vodiče na kilometr [kg/km]
P	Výkon [W]
R	Odpor vodiče na kilometr [Ω/km]
R_{AC}	Střídavý odpor [Ω]
R_{AZ}	Odpor ostatních neželezných vodičů [Ω]
R_{DC}	Stejnoseměrný odpor [Ω]
R_S	Odpor železného jádra [Ω]
S	Intenzita slunečního záření [W/m^2]
S_p	Povrch vodiče [m^2]
T_a	Okolní teplota [$^{\circ}C$]
T_{av}	Teplota vodiče [$^{\circ}C$]
T_s	Povrchová teplota vodiče [$^{\circ}C$]
v	Rychlost větru [m/s]
α	Teplotní koeficient odporu [K^{-1}]
α_s	Koeficient absorpce záření [-]

α_k	Koeficient přestupu tepla prouděním $[W/(m^2 \cdot K)]$
β	Teplotní součinitel měrné tepelné kapacity $[K^{-1}]$
ε	Koeficient emisivity sálání $[-]$
μ_f	Dynamická viskozita vzduchu $[Pa \cdot s]$
π	Ludolfovo číslo $[-]$
ρ_f	Hustota vzduchu $[kg/m^3]$
σ_B	Stefan – Boltzmanova konstanta $[W/(m^2 \cdot K^4)]$
HT	High temperature
MATLAB.....	Matrix laboratory
NRG.....	Net Radiation Gain

Úvod

Předkládaná práce se zabývá problematikou ohřevu vodičů venkovního vedení a jeho vlivu na přenášený výkon. Tuto problematiku je nutné řešit kvůli rostoucí poptávce po elektrické energii. Nejvíce limitující faktor pro zvýšení přenášeného výkonu je právě maximální teplota vodičů. Existuje několik metod na řešení tohoto problému. První část práce obsahuje popis těchto metod. Metody se rozdělují na několik skupin. Jedna z metod je zvýšení maximálního dovoleného procházejícího proudu. Tato metoda se rozděluje na tzv. operativní metody a metody založené na vodičích. Operativní metody jsou založené na pozorování okolních a provozních vlivů působících na teplotu vodiče. Podle výsledku působení těchto vlivů se řídí výkon přenášený vedením. Metody založené na vodičích se zabývají vlivem použitých vodičů na jejich oteplení a způsoby, jak tuto vlastnost ovlivnit. Další z metod je zvýšení jmenovitého napětí. Toto řešení je velmi účinné, ale přináší různá úskalí. K dispozici jsou i rozsáhlá řešení, kam patří například použití k přenosu elektrické energie stejnosměrné napětí. V druhé části práce je zpracována analýza provozních a okolních vlivů, které působí na teplotu vodiče. Mezi tyto vlivy patří hlavně rychlost a směr větru, okolní teplota, procházející proud a intenzita slunečního záření. Poznatky získané z této části jsou použity pro zhotovení tepelného modelu venkovního vedení, jehož popis a funkce jsou popsány ve třetí části. Model je vytvořen v programu MATLAB – Simulink. Výsledný model je ve formě blokového schématu. Vstupní veličiny jsou hodnoty okolních vlivů a výstupní veličina je teplota vodiče během dne. Model slouží pro nasimulování tepelného chování vodiče, což může být použito v systémech pro řízení přenášeného výkonu.

1 Aktuální stav problematiky

V mnoha zemích roste poptávka po elektrické energii. To přináší rostoucí požadavek na přenášenou energii přenosovým a distribučním vedením. Rostoucí požadavek se může naplnit různými řešeními. Každé řešení má jiné technologické, ekologické a ekonomické nároky. Jako jedno z nejlepších řešení se jeví výstavba nového vedení. To bohužel vyžaduje poměrně dlouhý čas na realizaci a vysoké ekonomické nároky. V současné době se proto pozornost zaměřuje na jiná řešení, která jsou časově a ekonomicky výhodnější, v ideálním případě neobsahují žádné (nebo jen minimum) konstrukční práce. Jedním z těchto řešení jsou tzv. operativní metody, které vykazují zvětšení přenášeného výkonu za nízké náklady. Tyto metody jsou založeny na sledování a predikci teploty vodiče. Při těchto metodách se tedy sledují okolní vlivy, které ovlivňují teplotu vodiče. Pomocí softwaru a sledovacích zařízení se pak řídí aktuální zatížení. Tato metoda přináší poměrně malé náklady.

Existují ovšem i jiná řešení a použití každého z nich je výhodné v jiných prostředích a situacích. Několik nejdůležitějších metod pro zvýšení přenášeného výkonu používaných v současné době je podrobněji analyzováno níže. [2]

Metody pro zvýšení přenášeného výkonu se rozdělují do těchto skupin:

- Zvýšení dovoleného procházejícího proudu
- Zvýšení jmenovitého napětí
- Rozsáhlá řešení

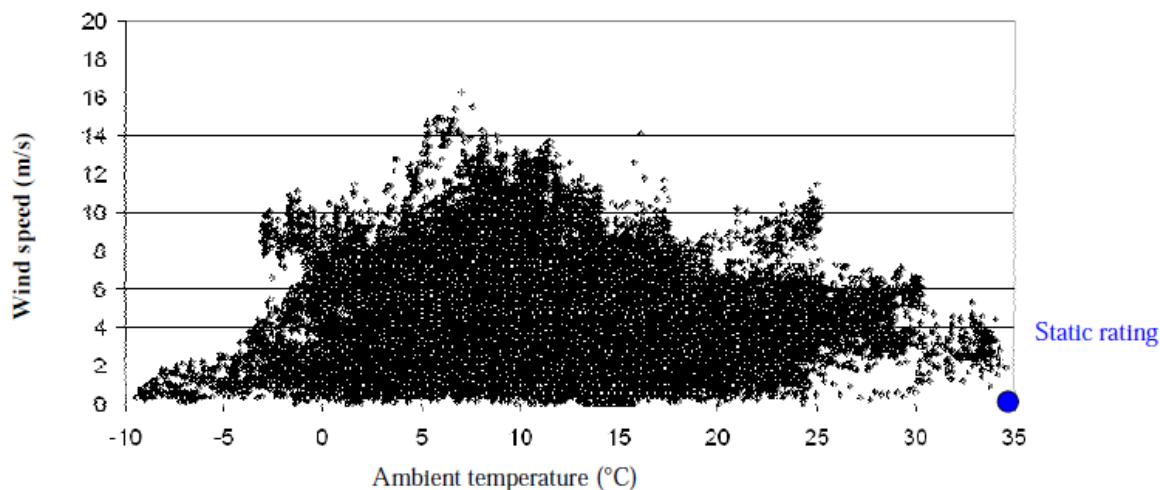
1.1 Metody zvýšení dovoleného procházejícího proudu

Tyto metody se rozlišují na dvě skupiny a to; metody založené na vodičích a operativní metody. Metody založené na vodičích hledají způsob přenosu proudu, který přesahuje stávající proudový limit. To se provádí tím, že se zvýší tepelná hranice stávajících vodičů nebo se nahradí stávající vodiče novými vodiči s lepšími tepelnými vlastnostmi. Operativní metody jsou založené na způsobu, jak častěji využít jakéhokoliv rezervního výkonu existujícího vedení bez fyzické změny vedení. [1]

1.1.1 Operativní metody

Reálný tepelný výkon vedení se nestále liší. Záleží na mnoha faktorech, včetně povětrnostních parametrů a proudu, který protéká vodičem. [1]

Obr. 1.1 ukazuje záznamy povětrnostních podmínek v průběhu jednoho roku v Německu. Na osách je rychlost větru a okolní teplota. Statické hodnocení je reprezentováno modrou tečkou. Nejhorší kombinace podmínek, na kterých je statické hodnocení založeno, je stav, který nikdy nenastal během tohoto období záznamu. [1]



Obr. 1.1 Povětrnostní podmínky v Německu [1]

Zkušenosti ukazují, že v praxi jsou skutečné okolní podmínky méně omezující (obvykle více než 98% času), než je navrhováno ve většině pevně daných standardů (např. okolní teplota 35 °C, rychlost větru 0,6 m/s, plné sluneční záření). To znamená, že po většinu času je na vedení jistá rezerva výkonu. V důsledku toho je zvýšení dovoleného procházejícího proudu vodičem na základě aktuálních povětrnostních podmínek k dispozici po většinu času. [1]

Monitorování v reálném čase a pravděpodobností metody jsou řešení, která jsou rychle aplikovatelná za rozumnou cenu. Když je rezervní výkon k dispozici, tato řešení umožňují majitelům vedení zvýšit výkon rychle v porovnání s řešením zahrnující významné změny infrastruktury. Když nastane nejhorší předpoklad počasí (v příkladu uvedeném na Obr. 1.1, rychlost větru 0,6 m/s a okolní teplota 35 °C), real-time hodnocení nebude v tu chvíli zvyšovat zatěžování linky. Za takových okolností, bez ohledu na hodnotící metodu, je výhodné mít monitorovací zařízení, které je schopno zaslat upozornění operátorovi. [1]

1.1.1.1 Pravděpodobnostní metody

Tyto metody jsou založené na pravděpodobnostních modelech vývoje okolních podmínek. Uvažuje se nastavení stavu vedení podle pevně daných hodnot. Soubor souvisejících hodnot pro rychlost větru, směr větru, sluneční záření a okolní teplotu se volí tak, aby teplotní omezení vodiče byly vždy splněny. [1]

1.1.1.2 Monitoring v reálném čase

Cílem monitorovacích zařízení je optimalizace zatížitelnosti stávajících venkovních vedení. Tento systém musí počítat s tím, že přenos výkonu linkou může být omezen okolnostmi stability, napěťovými a tepelnými omezeními. V případě tepelného omezení je proudové hodnocení omezeno průvřesem nebo teplotou žíhání vodičů. [1]

Aby bylo účinné využívání údajů zaznamenaných monitorovacím zařízením, musí být údaje:

- Vhodně analyzovány
- Poslány bezpečně a včas do řídicího centra
- Předloženy ve formě, která je smysluplná pro operátora, například "rezervní zatížení 15 MVA je k dispozici po dobu 20 minut" [1]

Průměrný zisk zatížitelnosti lze odhadnout z rozdílu mezi okolní teplotou použitou pro konstrukci vedení (např. 35 °C) a průměrnou teplotou okolí v oblasti (např. 10 °C). V průměru to činí asi 10 až 15%. [1]

Při zvyšování zatížitelnosti vedení je důležité kontrolovat, zda jsou všechny součásti obvodu dimenzované pro vyšší zatížitelnost a pokud je to nutné, vyměnit některé z nich (např. jističe, proudové transformátory, přípojnice a svorky). Navíc může být kontrolována hygienická hladina intenzity magnetického pole, která se zvyšuje ve spojení s nárůstem zatížení. [1]

Cena monitorovacích systémů zahrnuje samotné zařízení, jeho instalaci, integraci do procesu vyhodnocování a bezpečný přenos dat. V některých případech je třeba zahrnout i náklady na změnu ochranných prostředků linky. [1]

Náklady na samotné monitorovací zařízení jsou obstojné, ale významnou položkou v celkovém rozpočtu je komunikace. Informace musí být zaslány bezpečně do vysílacího centra v reálném čase a v použitelné formě. Ve srovnání s rekonstrukcí nebo úpravou stávajících linek jsou však tyto náklady nízké. [1]

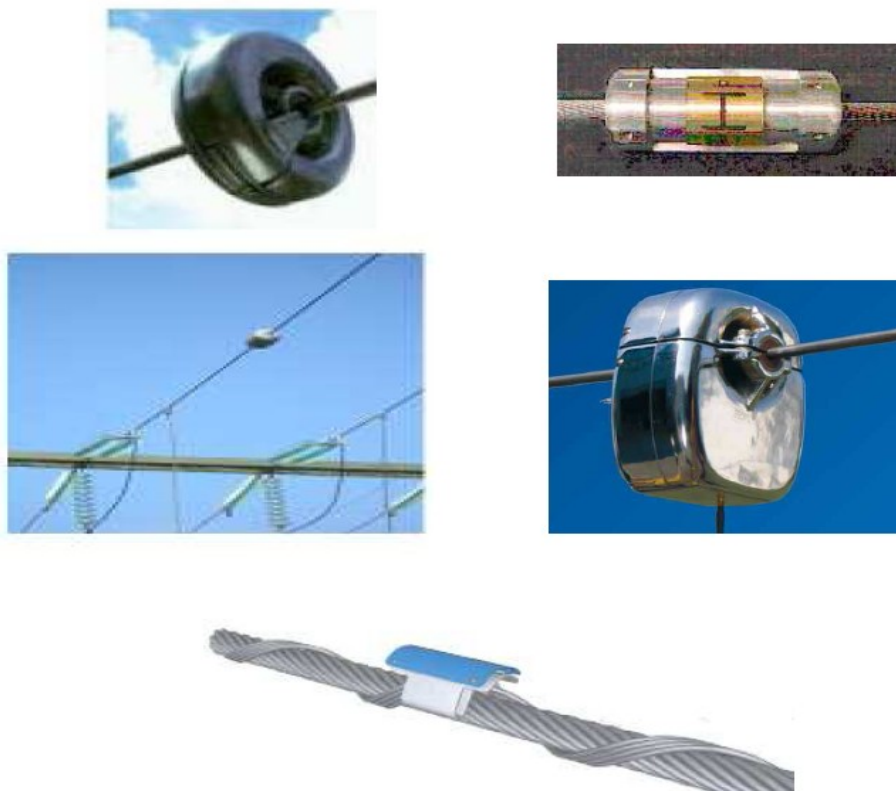
Monitorovací technologie zahrnuje zařízení v různých fázích vývoje. Nejstarší koncepce je sledování počasí, které se používá již po celá desetiletí. V současné době většina instalovaných monitorovacích systémů jsou systémy sledování mechanického napětí a meteostanice (USA a Evropa). Zařízení pro kontrolu teploty a monitorovací systémy mechanického napětí mají návratnost cca 10 let. Ostatní zařízení jsou stále koncepty nebo jsou na konečném stadiu vývoje, případně na začátku uvedení na trh. [1]

Současné systémy jsou klasifikovány podle fyzikálního principu, na kterém jsou založeny: [1]

- Měření teploty vodiče
- Měření napětí
- Sledování umístění bodů na vodiči
- Vibrační analýza
- Sbíráání dat o aktuálním počasí

1.1.1.2.1 Řešení založená na měření teploty vodiče

Tato řešení provádějí přímo měření teploty vodiče buď na jednom místě, nebo rozloženě, například pomocí optických vláken. Optické senzory jsou většinou používány pro podzemní kabely. [1]



Obr. 1.2 Měření teploty [1]

1.1.1.2.2 Řešení založená na měření mechanického napětí.

Princip této metody je založen na tom, že mechanické napětí je závislé na průměrné teplotě linky. Správně nastavené zařízení poskytuje poměrně přesné informace o teplotě vodiče. [3]

Snímač se nachází na koncích vodiče, kde snímá mechanické napětí mezi ukotvením izolátoru a stožárem, ze kterého se odvodí průvěs vodiče. Poblíž místa siloměru je instalována meteorologická stanice, aby se mohlo zhodnotit místní sluneční záření a rychlosti větru, stejně jako teplota vzduchu. Úkolem tohoto systému je odvodit prověšení vodiče a závislost prověšení na okolních podmínkách. [1]

1.1.1.2.3 Řešení na základě sledování polohy bodů na vodiči

Princip této metody je velmi podobný předchozí metodě. Průvěs vodiče je závislý na teplotě vodiče. Tyto systémy registrují pohyb cíle umístěného na vedení. Používají diferenciální GPS, kamery, lasery, radary nebo měření sonarem. Prověšení vodiče se počítá z informací zjištěných sledováním jednoho bodu na vedení. [1]

1.1.1.2.4 Řešení založená na analýze vibrací

Toto zařízení může být nainstalováno kdekoliv na vedení. Princip jeho funkce spočívá v tom, že frekvence kmitání vodiče je přímo spojena s jeho prověšením. Ve své podstatě to tedy zahrnuje vliv všech místních podmínek (rychlost větru, sluneční záření, teplota, zatížení vodiče, dotvarování případnou přítomností sněhu nebo ledu, atd.) na průvěs bez přímého měření. Snímač vibrací je po instalaci na vedení napájen indukcí. Snímač ke své funkci nepotřebuje žádné informace o vedení ani o použitém vodiči. Výsledná hodnota průvěsu je odvozena z frekvence vibrací. [1]

1.1.1.2.5 Řešení založená na aktuálním stavu počasí

Tato řešení se spoléhají na výpočet tepelné rovnováhy vodiče. Používají aktuální informace o stavu počasí. Z naměřených dat je pak pomocí modelu vodiče určena teplota a průvěs vodiče. [1]

Vzhledem k proměnlivosti meteorologických parametrů, jako je vítr nebo slunce podél vedení, je úkolem získat použitelné údaje o počasí, které jsou typické pro klimatické podmínky podél vedení. To je důvod, proč jsou většinu času použity nejhorší odhady pro sluneční záření. Vhodné lokality pro meteostanice jsou určeny meteorologickými ústavy. [1]

Okolní teplota může být měřena jakýmkoliv teplotním senzorem s přesností alespoň 1 °C. Vzhledem k tomu, že za určitých podmínek mohou být značné rozdíly mezi přízemní teplotou a teplotou ve výšce vodiče, musí být teplotní čidla umístěna přibližně ve stejné výšce jako vodič. Měření rychlosti větru by mělo být prováděno anemometrem s přesností do 0,5 m/s.

Citlivější zařízení je žádoucí jen v případě, že nevyžaduje častější a dražší údržbu. Z praktických důvodů jsou anemometry většinou namontovány na nosné konstrukci vedení. Musí se ovšem dbát na to, aby konstrukce nestínila větru. Anemometry by měly být umístěny i v blízkosti úrovně maximálního průvěsu vodiče. Pokud to není možné, jsou naměřené hodnoty rychlosti větru upraveny podle přibližných vzorců pro změnu rychlosti větru v závislosti na výšce měření. Anemometry vyžadují pravidelnou údržbu, která by měla být provedena v souladu s výrobcem. Přesné měření slunečního záření je velmi obtížné. Teoreticky by to znamenalo měřit celkové záření, tj. kombinaci přímého, rozptýleného a odraženého záření. Celkové záření se měří pomocí přístrojů, které jsou velmi drahé a vyžadují neustálou údržbu. Kvůli tomu se měří globální záření, kde tyto problémy odpadají. [3]

1.1.2 Metody založené na vodičích

Tyto metody se dělí na 3 kategorie: [1]

- Zachování vodičů
- Změna vodiče
- Nové vedení

Každá kategorie znamená jiné zvýšení zatížitelnosti za jinou cenu. Je tedy nutné zjistit, jakou kategorii v daném případě využít. [1]

1.1.2.1 Zachování vodičů

Nahrazení vodiče je velmi drahé (zhruba 25% nákladů při výstavbě nové linky). Proto je zachování vodičů vhodné, pokud není k dispozici dostatek financí a zvýšení zatížitelnosti není potřeba velké. Metoda spočívá v tom, že se zvýší provozní teplota až na svojí horní mez. Nezbytnou podmínkou pro realizaci zvýšení zatížitelnosti při zachování vodičů je akceptování zvýšení provozní teploty vodiče k nové horní hranici. To znamená nárůst prověšení a snížení výšky vodiče nad zemí. Je nutné, aby byly plně využity teplotní možnosti vodiče. To také vyžaduje, aby teplotní možnosti vodiče určovaly přenosovou kapacitu více než impedance vedení. Z tohoto důvodu tato metoda má tendenci být užitečná jen na kratší linky a linky s nižším napětím - zpravidla menší než 300 kV. Náklady na uchování vodiče jsou minimalizovány při minimálních změnách na přenosovém zařízení. Změny na zařízení spočívají ve zvýšení konstrukce kvůli většímu průvěsu vodiče, který je způsoben zvýšenou teplotou. Obtížnost a náklady na zvýšení konstrukce se liší podle typu zařízení. [1]

1.1.2.2 Změna vodiče

Změna vodiče se stává výhodnou, pokud má linka rezervy ve svých konstrukcích nebo pokud mohou být konstrukce posíleny za nízkou cenu. Pak tedy konstrukce může nést vodič o vyšší hmotnosti. Některé typy vodičů, které nabízejí výrazně vyšší tepelné limity a omezení zatížitelnosti při zachování původní konstrukce vedení, jsou dražší než standardní vodiče. Proto je možné nahradit stávající vodič standardním vodičem s větším průřezem. Chceme-li získat větší zvýšení zatížitelnosti, musí být náklady vynaloženy na změnu vodiče i na změny konstrukce. [1]

Jak již bylo řečeno, stávající vodiče je možno zaměnit za standardní vodiče s větším průřezem nebo za některé speciální vodiče. Mezi tyto vodiče patří: vysokoteplotní (HT-high temperature) vodiče, celohliníkové vodiče, vodiče z jiných materiálů (z neželezných a nekovových materiálů). [1]

1.1.2.3 Nové vedení

U tohoto řešení je možno použít dva způsoby. Buď se na současnou konstrukci přidají další linky, nebo se vytvoří vedle zcela nová konstrukce. Ovšem je velmi vzácné najít místo na stávajících konstrukcích. Co se týče výstavby nové linky, je zde problém s potřebným prostorem. Výstavba nových vedení je častý způsob na posílení přenosové schopnosti. Nevýhodou je, že trvá 7–11 let od rozhodnutí stavět do zprovoznění linky. [1]

1.2 Zvýšení jmenovitého napětí

Provoz venkovního vedení na vyšší napěťové hladině je velmi účinný způsob, jak zvýšit přenášený výkon. Zatímco zvyšování proudu zvyšuje zatížitelnost v průměru málo, přechod na vyšší hladinu napětí zvýší zatížitelnost přímým poměrem změny napětí. Jsou také sníženy energetické ztráty v poměru k napětí na druhou. Obvykle jsou změny napětí dvojnásobné nebo více. Díky tomu je zvýšení přenášeného výkonu velmi velké. Často může průměr vodiče omezit zvyšování napětí. [1]

Nevýhodou zvyšování napětí je skutečnost, že zanikne obvod nižšího napětí. To může mít za následek nadbytečné problémy v síti, které je v mnoha případech třeba vyřešit jiným způsobem. Další nevýhodou je dlouhá doba realizace, která není vždy přijatelná. [1]

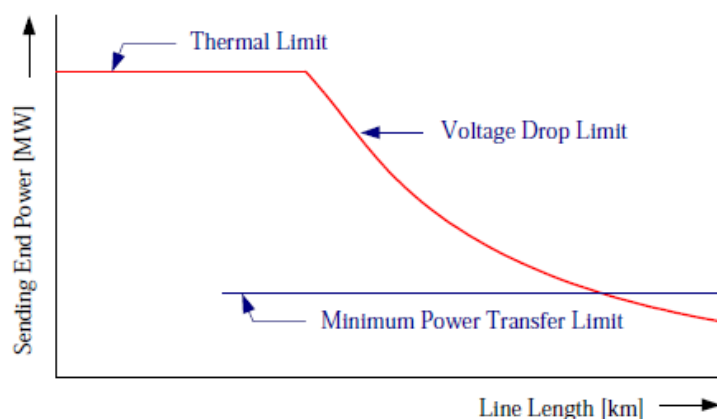
I když v některých případech je montáž nové linky levnější než zvýšení napětí, stále to má své výhody. Obecně platí, že jsou menší námitky proti rekonstrukci venkovního vedení. To znamená méně časově náročné postupy a mnohem rychlejší řešení. Naopak zvyšování

napětí vyžaduje určité přísné podmínky, například bezpečná vzdálenost k zemi a k překážkám, vzdálenost mezi fázemi a k uzemnění, šířka bezpečnostního pásu země, izolační požadavky, elektrická intenzita pole vodiče, dopady na transformátory v souvislosti se zvyšováním napětí. [1]

1.3 Rozsáhlá řešení

1.3.1 HSIL vedení

Přenosová kapacita nadzemního vedení je omezena z různých důvodů. Obr. 1.3 znázorňuje krátký přehled těchto omezení. K úbytku napětí dochází na delších linkách z důvodu rostoucí reaktance (X_L). Když k tomuto omezení dojde, pomocí HSIL linky se omezí úbytek napětí a zvýší se schopnost přenést větší výkon. Toto se používá v zemích s vedeními delšími než 250 km, jako je Rusko, Brazílie, Čína. [1]



Obr. 1.3 Omezení přenosové kapacity [1]

1.3.2 Konverze AC do DC

Stejnoseměrné systémy se většinou používají jen u přenosu na velkou vzdálenost nebo pro propojení rozdílných rozvodných sítí. Výhody stejnosměrných sítí jsou ty, že se neprojeví skin efekt (10%) a vedení není zatěžováno jalovým výkonem (15%). [1]

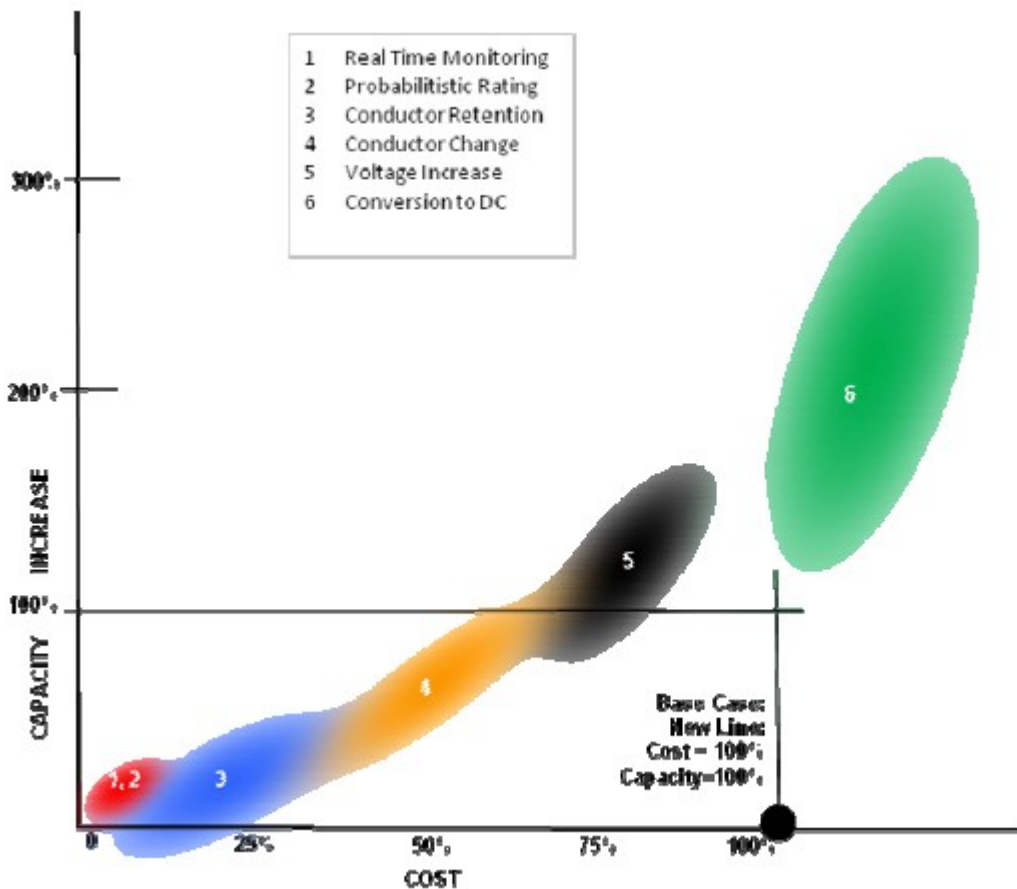
$$P_{DC} = \frac{\sqrt{2}P_{AC}}{0,85} = 1,8P_{AC} \quad (1.1)$$

Nevýhodu představuje použití měničů AC/DC na obou koncích, které jsou velmi drahé. Jednopolový systém, kdy se proud vrací přes zem, se nepoužívá kvůli možnému poškození

podzemních systémů (potrubí a telekomunikační kabely). Používá se tedy dvoupólový nebo speciální třípólový systém. [1]

1.4 Zhodnocení

Obr. 1.4 ukazuje srovnání jednotlivých řešení. Z obrázku je vidět že závislost nákladů za řešení na zvýšení přenášeného proudu je skoro lineární. Real – time monitoring nabízí relativně malé zvýšení, ovšem za nízkou cenu. Oproti tomu konverze do stejnosměrného proudu vykazuje velké navýšení přenášeného výkonu, ovšem náklady na provedení jsou vysoké. [1]



Obr. 1.4 Srovnání jednotlivých řešení [1]

2 Teoretická analýza tepelné bilance vodiče

Maximální výkonové zatížení starého vedení je obvykle určováno s ohledem na stabilitu systému, přípustný regulační rozsah napětí nebo na náklady energetických ztrát. Výkon kratších vedení může být určený maximální předepsanou provozní teplotou vodičů, jestliže jsou spoje a svorky v dobrém stavu. Maximální přípustná teplota je ta teplota, při které je dosažen největší přípustný průvès nebo ta, která má za následek maximální přípustné ztráty pevnosti po celou dobu životnosti vodiče. [2]

Teplota vodiče bude záviset na přenášeném proudu, elektrických vlastnostech vodiče a na povětrnostních podmínkách jako je vítr a slunce. Vztah mezi těmito parametry je znám jako tepelná rovnice. Předpokládáme-li, že je vodič v tepelné rovnováze, tj. teplo není uložené ve vodiči, pak :

$$\text{tepelný zisk} = \text{tepelná ztráta},$$

Lze to použít ke stanovení teplotního hodnocení vodičů v navrhovací a plánovací fázi vedení. Také to může být také použito ke stanovení, zda není nějaký dostupný rezervní výkon v existujícím vedení. Neuvažuje se zde tepelná kapacita vodiče. Pokud bychom chtěli rovnici použitelnou pro skutečný monitorovací systém, který používají meteorologické stanice nebo jiná zařízení, která měří teplotu nebo mechanické napětí vodičů, musíme použít jinou rovnici. Tato rovnice zahrnuje vodič, který není v tepelné rovnováze, tzn. nastává přechodový děj. Tato rovnice již uvažuje tepelnou kapacitu vodiče:

$$\text{teplo uložené ve vodiči} = \text{tepelný zisk} - \text{tepelná ztráta}.$$

Existuje ještě speciální případ rovnice:

$$\text{teplo uložené} = \text{teplo získané}.$$

Tato rovnice předpokládá, že zde není ochlazování (adiabatický stav). Je použita ke stanovení teploty vodičů pod zkratovými podmínkami, kdy se tepelná energie nestačí odvádět z vodiče. [2]

Povětrnostní parametry ovlivňující teplotní stav vodiče zahrnují hlavně rychlost, směr a víření větru, okolní teplotu a sluneční záření. [2]

2.1 Vliv okolní teploty

Okolní teplota má vliv na teplotu vodiče v poměru jedna ku jedné. To znamená, že když se zvýší teplota okolí například o 10 °C, zvýší se o tuto hodnotu i teplota vodiče. Vliv okolní teploty má relativně malý omezující účinek, pokud jsou vodiče určeny pro vysoké provozní teploty, ale může mít značný vliv pro nízkoteplotní vodiče. [3]

2.2 Základní rovnice

$$P_j + P_m + P_s + P_i = C \cdot \frac{dT}{dt} + P_c + P_r + P_w \quad (2.1)$$

P_j [W/m] ...ohřev jouleovým teplem, P_m [W/m] ...magnetický ohřev, P_s [W/m] ...sluneční ohřev, P_i [W/m]...ohřev korunou, P_c [W/m]...ochlazování prouděním, P_r [W/m]...ochlazování sáláním, C [J/K]...tepelná kapacita, P_w [W/m]...ochlazování vypařováním vody

Rovnice (2.1) popisuje tepelnou bilanci vodiče. Složky na levé straně způsobují oteplování vodiče a složky na pravé straně způsobují ochlazování vodiče. [2]

2.3 Oteplování vodiče

Oteplování vodiče je způsobeno průchodem proudu (jouleův ohřev, elektromagnetické ztráty a skin efekt), slunečním zářením a korunou. Tyto vlivy jsou dále podrobněji popsány.

2.3.1 Ohřev průchodem proudu

Ohřev průchodem proudu je ohřev vodiče způsobený zatížením proudem a zahrnuje účinky jouleových a elektromagnetických ztrát a skin efektu. [2]

Jouleův ohřev je způsoben elektrickým odporem vodiče. Elektromagnetické ztráty jsou způsobeny ohřevem vodiče kvůli cyklickému magnetickému toku, který způsobuje ohřev vířivými proudy, hysterezí a magnetickou viskozitou. K tomuto jevu dochází pouze u střídavého proudu a obvykle se zanedbává u neželezných vodičů. Může být významný u vodičů s ocelovým jádrem. Skin efekt je způsoben frekvencí střídavého proudu. Proud není rovnoměrně rozložen v průřezu vodiče, ale více u okrajů. To také způsobuje ohřev vodiče. Při vyhodnocení ohřevu vodiče průchodem proudu u neželezných vodičů se zanedbává magnetický ohřev. [2]

2.3.1.1 Jouleův ohřev pro neželezné vodiče

Ohřev jouleovým teplem je počítán takto:

$$P_J = k_J \cdot I^2 \cdot R_{DC} \cdot [1 + \alpha(T_{av} - 20)] \quad (2.2)$$

I [A]...efektivní hodnota proudu, k_J [-]...koeficient pro zvýšení teploty vlivem skin efektu, R_{DC} [Ω]...stejnoseměrný odpor vodiče při 20°C, α [K⁻¹]...teplotní koeficient odporu, T_{av} [°C]...teplota vodiče

Je navrženo používat $k_J = 1,0123$ [2]

Vztah pro výpočet střídavého odporu :

$$R_{AC} = k_J \cdot R_{DC} \quad (2.3)$$

k_J [-]...koeficient pro zvýšení teploty vlivem skin efektu, R_{DC} [Ω]...stejnoseměrný odpor vodiče při 20°C

2.3.1.2 Jouleův ohřev pro vodiče s železným jádrem

Zjednodušená teorie je založena na rovnosti energie vložené do střídavého a stejnosměrného proudu pro stejnou průměrnou teplotu vodiče. Stejnoseměrný proud bude mít za následek jisté zvýšení teploty a pomocí dalších vzorců se přepočítá pro daný střídavý proud. Vztah pro ohřev jouleovým teplem je zredukován na: [2]

$$P_J = I_{DC}^2 \cdot R_{DC} \cdot [1 + \alpha(T_{av} - 20)] \quad (2.4)$$

I_{DC} [A]...hodnota stejnosměrného proudu, R_{DC} [Ω]...stejnoseměrný odpor vodiče při 20°C, α [K⁻¹]...teplotní koeficient odporu, T_{av} [°C]...teplota vodiče

Energie vložená musí být stejná pro oba stejnosměrné a střídavé proudy pro stejné průměrné teploty vodiče. [2] Tedy:

$$I_{AC}^2 \cdot R_{AC} = I_{DC}^2 \cdot R_{DC} \quad (2.5)$$

I_{AC} [A]...efektivní hodnota střídavého proudu, R_{AC} [Ω]...střídavý odpor vodiče, I_{DC} [A]...hodnota stejnosměrného proudu, R_{DC} [Ω]...stejnoseměrný odpor vodiče

Pro hliníko-ocelové vodiče se 3 vrstvami hliníkového drátu:

Výpočet stejnosměrného odporu:

$$\frac{1}{R_{DC}} = \frac{1}{R_S} + \sum_1^{n_a} \frac{1}{R_{AZ}} \quad (2.6)$$

$R_S [\Omega]$...odpor železného jádra, $R_{AZ} [\Omega]$...odpor ostatních neželezných vodičů

Výpočet střídavého proudu:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1,0123 + 2,319 \cdot 10^{-5} \cdot I_{DC}}} \quad (2.7)$$

$I_{DC} [A]$...hodnota stejnosměrného proudu

Vzorec pro výpočet stejnosměrného proudu:

$$I_{DC} = I_{AC} \cdot \sqrt{1,0123 + 2,319 \cdot 10^{-5} \cdot I_{AC}} \quad (2.8)$$

$I_{AC} [A]$...efektivní hodnota střídavého proudu

2.3.2 Sluneční ohřev

Solární tepelný zisk P_s závisí na mnoha parametrech. Abychom ho vypočítali, museli bychom znát všechny tyto parametry. Mezi tyto parametry patří například to, jestli je vodič zkorodovaný a podobně. Mezi základní parametry patří intenzita slunečního záření, koeficient absorpce záření a plocha vodiče. V praxi se ukázalo, že měření celkového slunečního záření je drahé a potřebná měřicí zařízení jsou náročná na údržbu. Celkové záření je kombinací přímého, rozptýleného a odraženého záření. Proto se používá měření globálního slunečního záření, které je relativně levné a spolehlivé. [2]

Vztah pro sluneční ohřev používající celkové sluneční záření:

$$P_s = \alpha_s \cdot S \cdot D \quad (2.9)$$

$\alpha_s [-]$...koeficient absorpce záření, $S [W/m^2]$...intenzita slunečního záření, $D [m]$...vnější průměr vodiče

Hodnota α_s se liší od 0,23 pro lesklý hliníkový lanový vodič do 0,95 pro zkorodovaný vodič v průmyslovém prostředí. Pro většinu případů může být použita hodnota 0,5. [2]

Když neprotéká žádný proud, teplota vodiče je rovna teplotě vzduchu a je zvýšena díky slunečnímu ohřevu. Tento kombinovaný efekt se nazývá Net Radiation Temperature. Rozdíl mezi tímto efektem a okolní teplotou je Net Radiation Gain (NRG). NRG je přímo úměrný absorbovanému slunečnímu záření a intenzitě slunečního záření a nepřímo úměrný ochlazování prouděním. Vysoká rychlost větru ho tedy snižuje. Rozdíl teplot NRG nad 10 °C je vzácný a vyskytuje se velmi zřídka. [3]

2.3.3 Ohřev korunou

Ohřev korunou je významný pouze u vysoké intenzity elektrického pole, které se dále zvyšuje při srážkách a silném větru, když je vysoké ochlazování prouděním a odpařováním vody. Vzhledem k tomuto faktu se ohřev korunou zanedbává. [2]

2.4 Ochlazování vodiče

Ochlazování vodičem se rozděluje na ochlazování prouděním a ochlazování sáláním, případně ochlazování vypařováním. Tyto způsoby jsou zde detailněji popsány.

2.4.1 Ochlazování prouděním

Ochlazování prouděním je velmi složitý děj, který je ovlivňován mnoha parametry. Ochlazování prouděním se rozděluje na nucené ochlazování prouděním a přirozené ochlazování prouděním. [2]

Rovnice (2.10) vyjadřuje nenucené ochlazování prouděním, tj. při nulové rychlosti větru. Rovnice vyjadřující ochlazování prouděním při nuceném ochlazování jsou uvedeny níže. Rovnice (2.11) se vztahuje na nízké rychlosti větru, ale neodpovídá při vysokých rychlostech větru. Pro vysoké rychlosti větru je určena rovnice (2.12). [6]

Ovšem ani tyto rovnice nejsou úplně přesné. Pro přesné výpočty je nutné postupovat jinak. Problém se řeší pomocí modelu a naměřené výsledky se zobecní pomocí teorie podobnosti. Tato teorie zavádí kriteria podobnosti (Nusseltovo, Reynoldsovo, Grashofovo a Prandtlovo). [2]

$$P_{cl} = 0,0205 \rho_f^{0,5} D^{0,75} (T_s - T_a)^{1,25} \quad (2.10)$$

D [m]...průměr vodiče, ρ_f [kg/ m³]...hustota vzduchu, T_s [K]... povrchová teplota vodiče, T_a [K]... okolní teplota

$$P_{cl} = \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{D\rho_f v}{\mu_f} \right)^{0,52} \right] k_f K_{angle} (T_s - T_a) \quad (2.11)$$

D [m]...průměr vodiče, ρ_f [kg/ m³]...hustota vzduchu, v [m/s]...rychlost proudění vzduchu
 μ_f [Pa.s]... dynamická viskozita vzduchu, K_{angle} [-] ...faktor směru větru, k_f [W/(m.K)]...tepelná
 vodivost vzduchu, T_s [K]... povrchová teplota vodiče, T_a [K]... okolní teplota

$$P_{cl} = \left[0,0119 \left(\frac{D\rho_f v}{\mu_f} \right)^{0,6} \right] k_f K_{angle} (T_s - T_a) \quad (2.12)$$

D [m]...průměr vodiče, ρ_f [kg/ m³]...hustota vzduchu, v [m/s]...rychlost proudění vzduchu
 μ_f [Pa.s]... dynamická viskozita vzduchu, K_{angle} [-] ...faktor směru větru, k_f [W/(m.K)]...tepelná
 vodivost vzduchu, T_s [K]... povrchová teplota vodiče, T_a [K]... okolní teplota

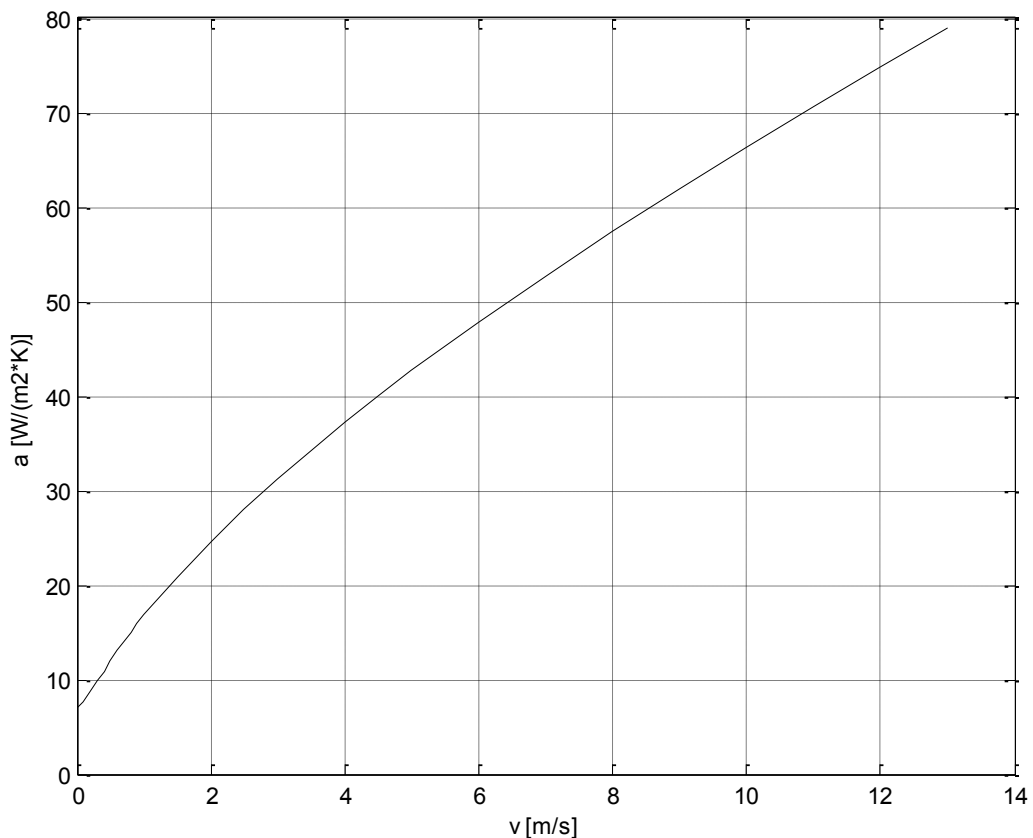
Rovnice (2.11) a (2.12) jsou velmi složité a namodelovat je by bylo velmi obtížné. Rovnice (2.13) představuje zjednodušený vztah pro ochlazování prouděním, který je použit v modelu. Nejmarkatnější vlivy, které ovlivňují ochlazování prouděním jsou směr a rychlost větru. Tyto dva vlivy jsou zahrnuty v koeficientu přestupu tepla prouděním. Závislost koeficientu přestupu tepla prouděním α_k na směru větru je vidět na Obr. 2.1. Závislost na směru větru je vyjádřena v Tab. 2.1, kde je zobrazena hodnota koeficientu k pro daný směr větru, kterou se vynásobí koeficient α_k . [2]

$$P_c = \alpha_k \cdot S_p \cdot (T_s - T_a) \quad (2.13)$$

α_k [W/(m².K)]...koeficient přestupu tepla prouděním, S_p [m²]...povrch vodiče,
 T_s [K]... povrchová teplota vodiče, T_a [K]... okolní teplota

Tab. 2.1 Závislost konstanty k upravující koeficient α_k na směru větru [5]

Úhel [°]	0,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00
k [-]	0,45	0,50	0,63	0,75	0,86	0,95	0,99	1,00	1,00

Obr. 2.1 Závislost koeficientu a_k na rychlosti větru [5]

2.4.2 Ochlazování sáláním

Každé těleso vyzařuje svým povrchem tepelnou energii, která má charakter elektromagnetických vln. Význam tohoto fyzikálního jevu se uplatňuje u velkých rozdílů teplot (nad 150 °C), kdy začne sálání převažovat nad prouděním. [4]

Pro ochlazování sáláním budeme uvažovat vztah (2.14) vzhledem k tomu, že ochlazování sáláním je obvykle malé ve srovnání s celkovými tepelnými ztrátami, a to zejména s ochlazováním prouděním. [2]

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \varepsilon \cdot \sigma_B \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (2.14)$$

ε [-]...koeficient emisivity sálání, D [m]...průměr vodiče, σ_B [$W/(m^2 \cdot K^4)$]...Stefan-Boltzmanova konstanta, T_a [°C]... okolní teplota, T_s [°C]... je povrchová teplota vodiče.

Koeficient emisivity sálání ε závisí na povrchu vodiče a pohybuje se v mezích od 0,23 pro nový vodič do 0,95 pro zkorodovaný vodič (doporučená hodnota je 0,5). [2]

2.4.3 Ochlazování vypařováním vody

Ochlazování v důsledku vypařování vody se neprojevuje při dešti nebo při velké vlhkosti, ale až když je vodič na povrchu morký. Z tohoto důvodu se ochlazování odpařováním obvykle zanedbává. [2]

2.5 Tepelná kapacita vodiče

Tepelná kapacita vyjadřuje vlastnost vodiče do sebe akumulovat tepelnou energii. Je definována jako součin měrné tepelné kapacity a hmotnosti vodiče na jednotku délky. V případě, že se vodič skládá z více materiálů, je tepelná kapacita definována tímto způsobem pro každý použitý materiál. U vodiče s ocelovým jádrem (AlFe lano) je dána součtem tepelné kapacity jádra a pláště. [6]

$$C = m \cdot c = m_j \cdot c_j + m_p \cdot c_p \quad (2.15)$$

C [J/K]...tepelná kapacita, m [kg]...hmotnost vodiče, m_j [kg]...hmotnost jádra vodiče, m_p [kg]...hmotnost pláště vodiče, c [J/(kg.K)]... měrná tepelná kapacita, c_j [J/(kg.K)]... měrná tepelná kapacita jádra vodiče, c_p [J/(kg.K)]... měrná tepelná kapacita pláště vodiče

Hmotnost vodiče je prakticky konstantní až do 100°C, ale měrná tepelná kapacita se mění s teplotou podle vztahu (2.16). [2]

$$c = c_{20}[1 + \beta(T - 20)] \quad (2.16)$$

c [J/(kg.K)]...měrná tepelná kapacita, c_{20} [J/(kg.K)]...měrná tepelná kapacita vodiče při 20°C, T [K]...teplota materiálu, β [K⁻¹]...teplotní součinitel měrné tepelné kapacity

3 Tepelný model vodiče venkovního vedení

Cílem je vytvořit model vodiče venkovního vedení, který bude zahrnovat základní vlastnosti vodiče a okolní parametry. Výstupem tohoto modelu bude závislost teploty na čase. Nejprve bylo vhodné vytvořit model, který bude fungovat pouze ve statickém režimu, tj. vstupní a výstupní data budou pouze konstanty. Po úspěšném zhotovení tohoto modelu bylo nutné vytvořit model, který bude fungovat již v dynamickém režimu, při kterém se budou vstupní parametry měnit v závislosti na čase. Pro vytvoření modelu byl zvolen program Matlab – Simulink pro svou jednoduchost a názornost.

3.1 Matlab – Simulink

Simulink je součástí MATLABu, se kterým je úzce integrován. Simulink je programové prostředí, které pomocí blokových schémat umožňuje mezioborové simulování a modelování dynamických systémů. Poskytuje interaktivní grafické prostředí a přizpůsobitelnou sadu knihoven, které umožňují navrhovat, simulovat a testovat různé časově proměnné systémy včetně komunikace, kontroly, zpracování signálů, videa a obrazu. Je integrován s MATLABem, což umožňuje začlenit algoritmy z Matlabu do modelů, exportovat výsledky simulací do MATLABu pro další případnou analýzu a definování vstupů do modelů. Výhodou Simulinku je jeho jednoduchost a možnost vytvoření modelu problému bez větších znalostí programování. [7]











3.1.1 Simscape

Simscape rozšiřuje Simulink nástroji pro modelování systémů zahrnujících mechanické, elektrické, hydraulické, tepelné a další fyzické domény. Poskytuje základní stavební bloky, ze kterých je možné vytvářet vlastní model. Simscape obsahuje knihovny bloků, které umožňují vytváření elektrických, hydraulických, magnetických, mechanických pneumatických a tepelných modelů. Modely ze Simscapu mohou být použity k vývoji kontrolních systémů a testům výkonnosti systému. Knihovny Simscapu lze rozšířit pomocí MATLABu, na jehož základě je Simscape postavený. Je možné vytvořit vlastní bloky nebo upravit ty stávající tak, aby plnily požadovanou funkci. [7]


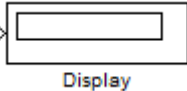

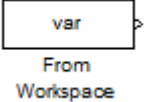
3.1.2 Použité bloky

V následujících tabulkách jsou uvedeny bloky ze Simulinku a Simscape, které jsou použity v modelu, a stručný popis jejich základní funkce.

Tab. 3.2 Bloky ze Simscape [7]

Značka	Název	Popis funkce
 Ideal Temperature Source	Ideal Temperature Source	Ideální zdroj tepelné energie, který je dostatečně silný k udržení zadané teploty na jejím výstupu bez ohledu na proudění tepla v systému.
 Ideal Heat Flow Source	Ideal Heat Flow Source	Ideální zdroj tepelné energie, který je dostatečně silný k udržení zadaného tepelného toku na svém výstupu, bez ohledu na rozdíl teplot na zdroji.
 Convective Heat Transfer	Convective Heat Transfer	Simulace přenosu tepla prouděním.
 Radiative Heat Transfer	Radiative Heat Transfer	Simulace přenosu tepla sáláním.
 Ideal Temperature Sensor	Ideal Temperature Sensor	Ideální teplotní senzor, tzn. zařízení, které určuje teplotní rozdíl naměřený mezi dvěma body.
 Thermal Reference	Thermal Reference	Teplotní referenční bod, tzn. bod s teplotou rovnající se absolutní nule.
 Thermal Mass	Thermal Mass	Simulace tepelné kapacity materiálu.
 Simulink-PS Converter	Simulink – PS Converter	Převod vstupních signálů ze Simulinku na signály Simscape. Používá se k připojení zdrojů ze Simulinku nebo jiných bloků ze Simulinku na vstupy se Simscape signály.
 PS-Simulink Converter	PS – Simulink Converter	Převod signálů ze Simscape na výstupní signály Simulinku. Používá se k připojení Simscape signálů na vstupy různých zobrazovačů a bloků v Simulinku.
 Solver Configuration	Solver Configuration	Nastavení parametrů řešení simulace.

Tab. 3.1 Bloky ze Simulinku [7]

Značka	Název	Popis funkce
	Constant	Generuje reálnou nebo konstantní hodnotu.
	Display	Zobrazuje výstupní hodnotu.
	Scope	Zobrazuje signály vygenerované během simulace.
	From Workspace	Načte data z Matlabu z proměnné, ve které jsou uloženy.

3.2 Základní vlastnosti modelu

Model jsem navrhnul pro délku vodiče jeden metr. Model vodiče byl navržen tak, aby zahrnoval všechny již výše uvedené vlivy, které ovlivňují jeho tepelnou bilanci. Jedná se tedy prakticky o namodelování základní rovnice (2.1). V modelu je z rovnice zanedbán ohřev korunou a ochlazování odpařováním. Ostatní dílčí vlivy jsou v modelu nasimulovány příslušnými bloky. Každý použitý blok svojí funkcí odpovídá jednotlivým vlivům zahrnutých v základní rovnici (2.1).

3.3 Použité hodnoty

Výsledek modelu je velmi závislý na vstupních hodnotách. Pro výpočet vstupních hodnot je nutné mít k dispozici naměřené hodnoty vlivů působících na vodič. Naměřené hodnoty mi poskytl vedoucí práce. Tyto hodnoty obsahovaly okolní teplotu, intenzitu slunečního záření, teplotu vodiče, procházející proud, rychlost a směr větru v konkrétním čase během dne. Dále je nutné znát parametry použitého vodiče. Tímto vodičem je AlFe lano 382-AL1/49-ST1A. Jeho parametry jsou uvedeny v Tab. 3.3. Hodnoty koeficientu přestupu tepla prouděním závislé na směru větru jsem použil ze závislosti zobrazené na Obr. 2.1. Závislost na směru větru jsem převzal z Tab. 2.1.

Tab. 3.3 Parametry vodiče

Vnější průměr vodiče	D [m]	0,027
Odpor vodiče na kilometr	R [Ω /km]	0,0758
Hmotnost Hliníku	m [kg/km]	1054,2
Hmotnost Oceli	m [kg/km]	388,3
Měrná tepelná kapacita hliníku	c [J/(kg.K)]	890
Měrná tepelná kapacita oceli	c [J/(kg.K)]	450

3.4 Statický model

Nejprve jsem namodeloval vodič pouze v ustáleném stavu. To znamená, že ze základní rovnice (2.1) vypadne vztah pro tepelnou kapacitu vodiče. Jedná se tedy o tzv. statický model. Ohřev vodiče průchodem proudu je v modelu nasimulován blokem Ideal Heat Flow Source. Vstup do tohoto bloku je již tepelný výkon. Tento tepelný výkon bylo nutné nejprve vypočítat pomocí již uvedené rovnice (2.4). Sluneční ohřev je nasimulován opět blokem Ideal Heat Flow Source. Tento tepelný výkon je spočítán pomocí rovnice (2.9). Jak již bylo zmíněno, ohřev korunou je v modelu zanedbán. Ochlazování prouděním je nasimulováno blokem Convective Heat Transfer. Tento blok již sám obsahuje rovnici pro výpočet odvedeného tepelného výkonu. Tato rovnice je ekvivalentní s rovnicí (2.13). Do tohoto bloku jen stačí zadat hodnotu koeficientu přestupu tepla prouděním a povrch vodiče. Hodnota koeficientu přestupu tepla prouděním je závislá na rychlosti a směru větru. Závislost koeficientu přestupu tepla prouděním na rychlosti větru je uvedena v grafu na Obr. 2.1. Ochlazování sáláním je nasimulováno blokem Radiative Heat Transfer. Tento blok již sám obsahuje rovnici pro výpočet odvedeného tepelného výkonu. Tato rovnice je ekvivalentní s rovnicí (2.14). Do tohoto bloku jen stačí zadat hodnotu koeficientu přestupu tepla sáláním a povrch vodiče. Ochlazování odpařováním vody je zanedbáno. V modelu samozřejmě nesmí chybět vliv okolní teploty. Ten je nasimulován blokem Ideal Temperature Source. Hodnota okolní teploty je přímo vstup do tohoto bloku. Vstupní hodnoty pro bloky Ideal Temperature Source a Ideal Heat Flow Source jsou vloženy pomocí bloku Constant. V praxi je tento model skoro nepoužitelný, protože hodnoty okolních vlivů se neustále mění.

3.5 Dynamický model

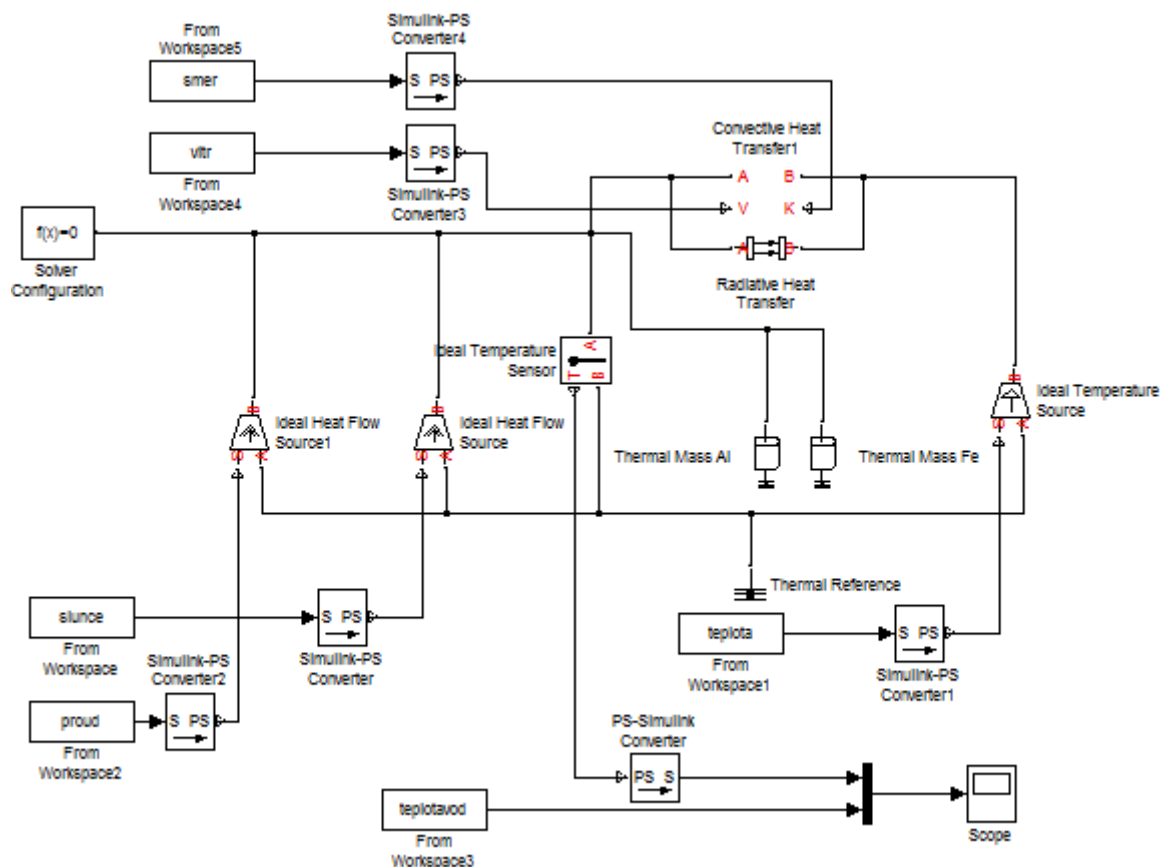
Struktura a funkční bloky jsou u tohoto modelu prakticky stejné jako u statického modelu. Tento model již počítá s tím, že hodnoty jednotlivých vlivů jsou v čase proměnné, stejně jako u reálného vodiče. Nejprve bylo nutné realizovat vstup hodnot závislých na čase do jednotlivých bloků. Simulink vyžaduje vstupní data ve formě proměnné, která v prvním sloupci obsahuje údaj o čase a ve druhém sloupci proměnnou s požadovanými hodnotami. Vytvořil jsem tedy v MATLABu proměnnou, kde v prvním řádku byl údaj o čase v sekundách a ve druhém řádku již hodnota určitého vlivu v daném čase. Tuto proměnnou jsem načtl do Simulinku pomocí bloku From Workspace a připojil k požadovanému bloku.

Dynamický model již počítá i s tzv. přechodovým dějem. To znamená že model simuluje celou základní rovnici (2.1) (kromě zanedbaných vlivů). Do modelu je tedy nutné zahrnout i tepelnou kapacitu vodiče. Tepelná kapacita vodiče je nasimulována blokem Thermal Mass. Do tohoto bloku se musí zadat hodnoty měrné tepelné kapacity materiálu vodiče, jeho hmotnost a počáteční teplota. Výstupní rovnice bloku je ekvivalentní se vztahem (2.15). Změna měrné tepelné kapacity vlivem zvyšující se teploty je v modelu zanedbána. Modelovaný vodič je AlFe lano. Skládá se tedy z ocelové části (jádro) a hliníkové části (plášť). Tyto dvě části vodiče bylo nutné namodelovat zvlášť. V modelu jsou tedy dva prvky Thermal Mass, z nichž jeden zastupuje jádro vodiče a druhý plášť vodiče.

Další zásadní změnou je nutná úprava bloku Convective Heat Transfer, který simuluje ochlazování vodiče prouděním. Jak již bylo zmíněno, tento blok sám provede výpočet odvedeného tepelného výkonu. Ve statickém modelu do tohoto bloku stačilo zadat povrch vodiče a příslušnou hodnotu koeficientu přestupu tepla prouděním pro danou rychlost větru. Rychlost větru je ovšem proměnná, tzn. pro každý čas může mít jinou hodnotu. Bylo tedy nutné tento blok zmíněnému faktu přizpůsobit. Bloky ze Simscapu mají svoji funkci určenou zdrojovým kódem, který je napsaný v programovacím jazyku MATLAB. Pro každý prvek ze Simscapu je tento kód přístupný. Simulink umožňuje vytvoření nového bloku nebo upravení toho stávajícího právě úpravou či vytvořením tohoto kódu. Upravil jsem tedy zdrojový kód bloku Convective Heat Transfer, aby plnil požadovanou funkci. Nejprve bylo nutné do tohoto bloku zavést jako proměnný vstup rychlost větru. To jsem provedl pomocí funkce input. Závislost koeficientu přestupu tepla prouděním na rychlosti větru není nijak matematicky vyjádřitelná. Přiřazení koeficientu přestupu tepla prouděním dané rychlosti větru jsem tedy provedl pomocí funkce tablelookup. Tato funkce funguje tak, že je nejprve nutné nadefinovat tabulku hodnot pro danou závislost, v tomto případě je to závislost koeficientu přestupu tepla

prouděním na rychlosti větru. Vstup do této funkce je hodnota rychlosti větru. Funkce pro tuto rychlost větru z tabulky vybere hodnotu koeficientu přestupu tepla prouděním. Když hodnota v tabulce není obsažena, získá funkce tuto hodnotu interpolací, případně extrapolací, hodnot v tabulce. Získaná hodnota slouží v rovnici tohoto bloku ke konečnému výsledku ochlazení prouděním.

Pomocí tohoto modelu jsem nasimuloval průběh teploty během jednoho dne. Výsledný průběh je vidět na *Obr. 3.2*. Z tohoto obrázku je vidět, že namodelovaná a naměřená teplota se od sebe v některých místech diagramu liší i o několik stupňů Celsia. Rozhodl jsem se proto model vylepšit, aby zahrnoval nejenom rychlost ale i směr větru. Toto vylepšení znamenalo opět pozměnit blok pro ochlazování vodiče. Hodnota koeficientu přestupu tepla prouděním se upraví vynásobením konstantou, která odpovídá danému směru větru. Ve výsledku to znamenalo přidat do bloku ještě jeden vstup (směr větru), opět použít funkci tablelookup a postupovat obdobným způsobem. Konečné zapojení modelu je vidět na *Obr.3.1*.



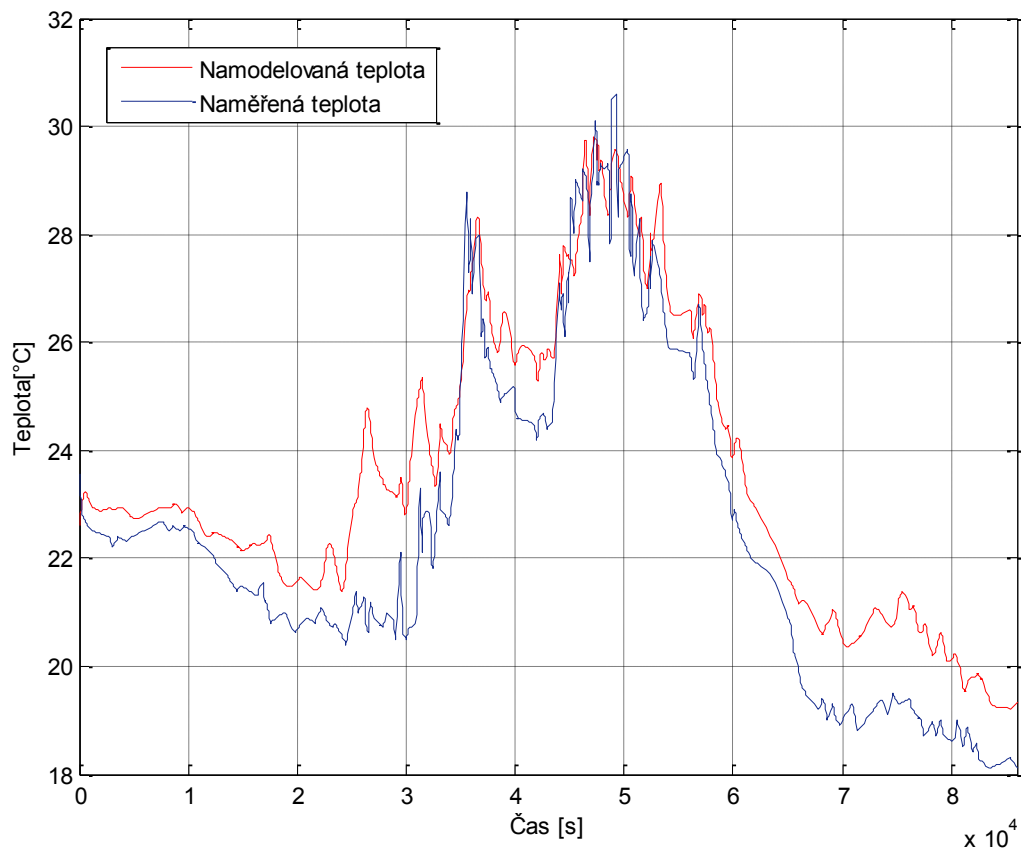
Obr. 3.1. Zapojení modelu

Průběh teploty namodelovaný takto upraveným modelem vykazoval již menší odchylku od naměřené hodnoty. Odchylka se pohybovala maximálně do velikosti 1 °C, jak je vidět na

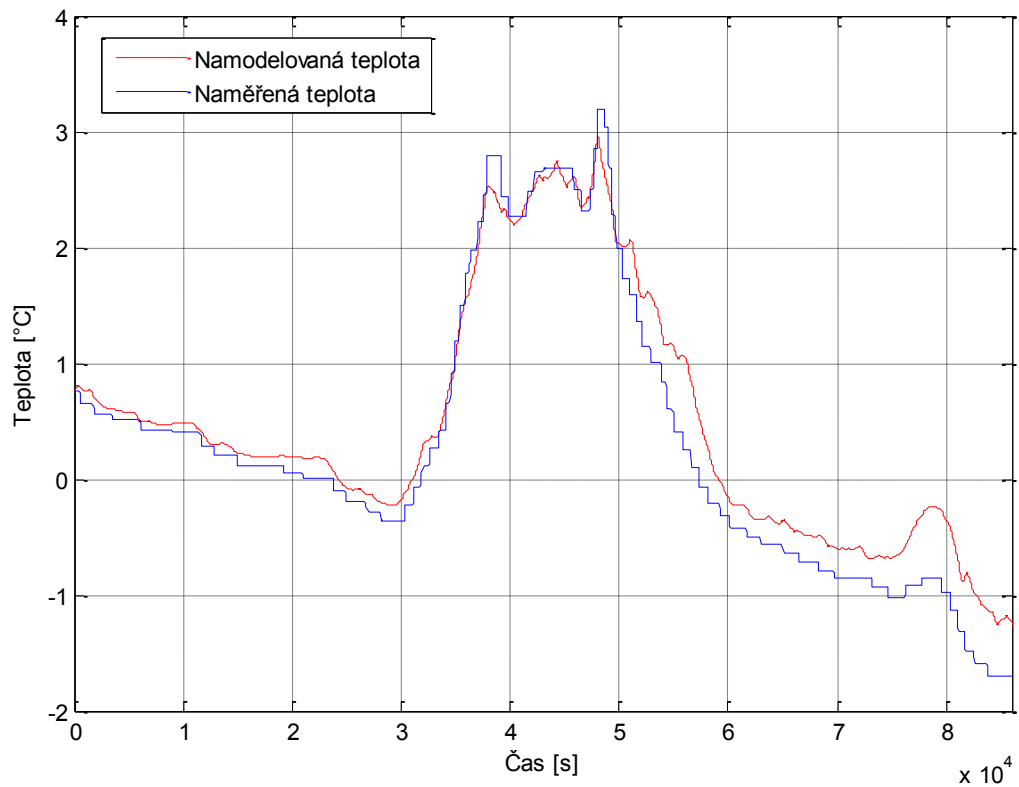
Obr. 3.3. Nicméně ani tento model není úplně přesný. Příčinu těchto nepřesností se nepodařilo odhalit. Jisté nepřesnosti mohly vzniknout zanedbáním některých vlivů nebo nerespektováním neměřitelných vlivů jako je déšť, sníh, námraza apod. Také nebyl znám technický stav vodiče, který ovlivňuje výpočty např. ohřevu slunečním zářením.

Na *Obr. 3.4* je zobrazen časový průběh veličin ovlivňujících teplotu vodiče během dne, jejíž průběh je zobrazen na *Obr. 3.3*. Na *Obr. 3.5* je zobrazen průběh okolní teploty a teploty vodiče během jednoho dne. Z těchto diagramů lze vyčíst, že teplota vodiče přibližně odpovídá teplotě okolí při nižších hodnotách proudu. Při vyšších hodnotách proudu se teplota vodiče začne zvyšovat. Intenzita slunečního záření má logicky podobný průběh s okolní teplotou, ale nemá tak velký vliv na ohřev vodiče. Když bychom uvažovali konstantní okolní teplotu, tak má na ohřev vodiče v tento den největší vliv procházející proud, jak je vidět na *Obr. 3.6*.

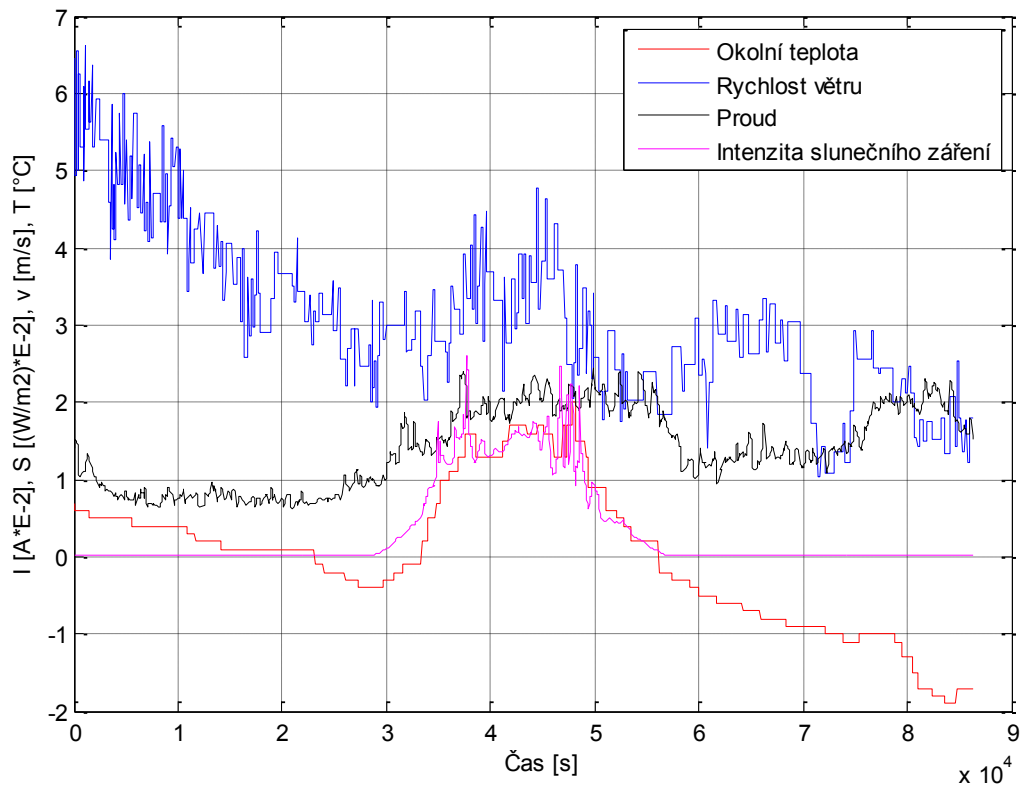
Takovýmto způsobem se dá pomocí modelu analyzovat a předpovídat vliv okolních podmínek na vodič. Výsledky těchto analýz a předpovědí pak lze použít pro řízení přenášeného výkonu a tím zvýšit přenosovou kapacitu vedení.



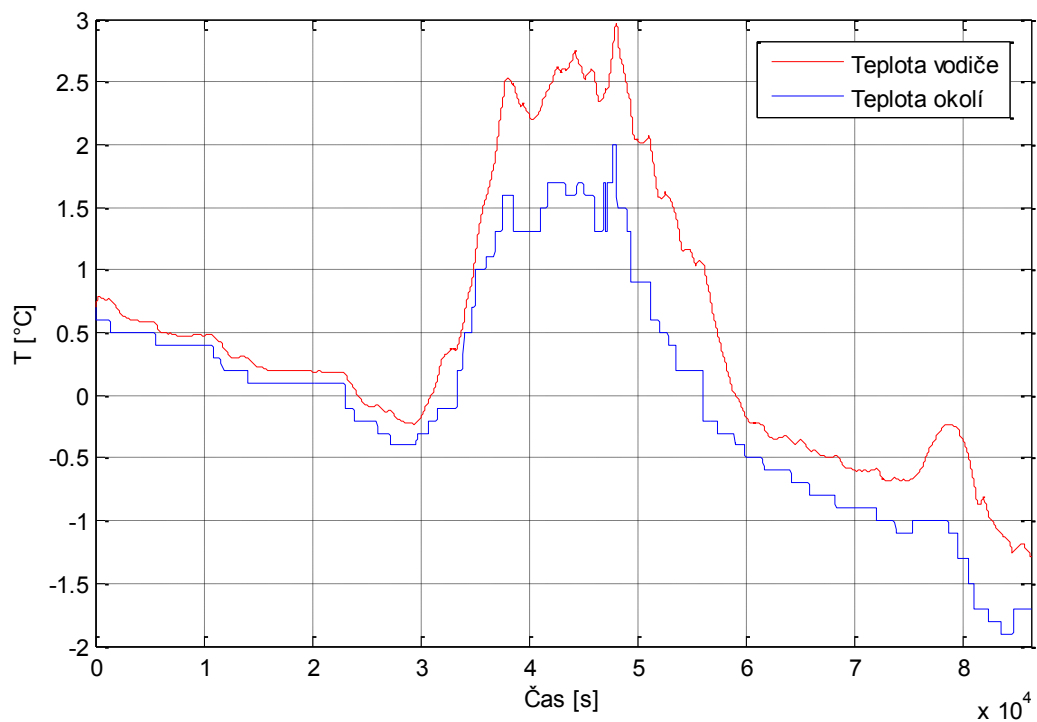
Obr. 3.2 Průběh teploty bez uvažování směru větru během jednoho dne



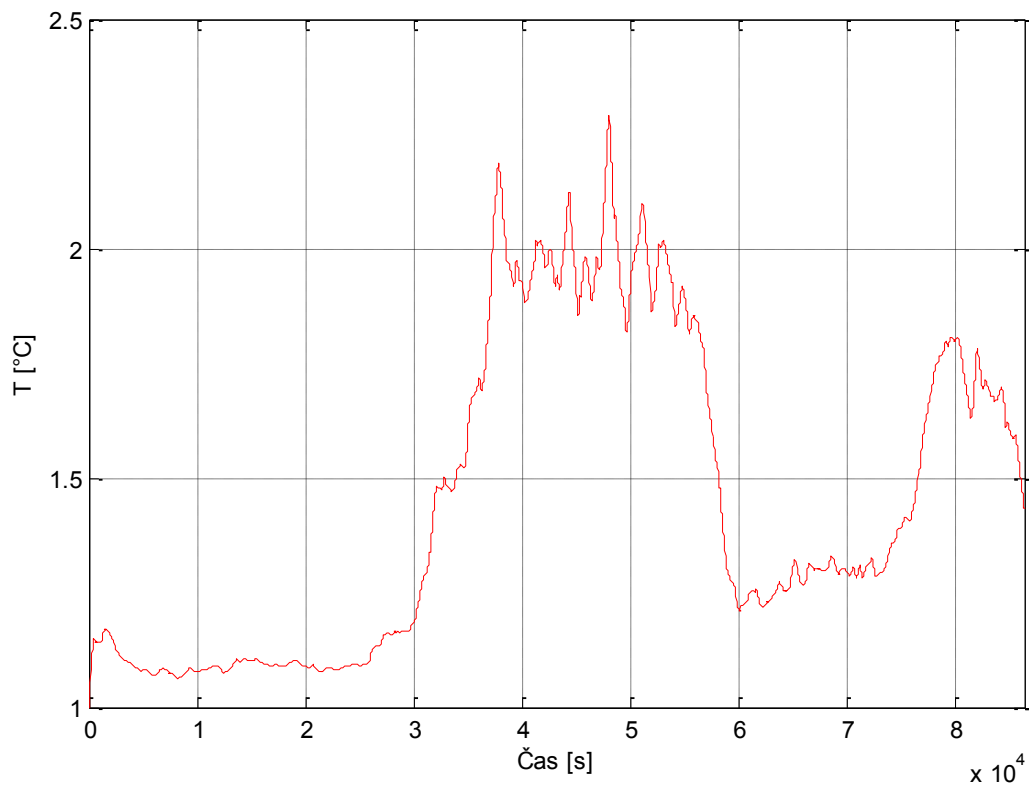
Obr. 3.3 Průběh teploty s uvažování směru větru během jednoho dne



Obr. 3.4 Průběh veličin ovlivňující teplotu vodiče během jednoho dne



Obr. 3.5 Průběh teploty vodiče a okolní teploty během jednoho dne



Obr. 3.6 Průběh teploty vodiče při uvažování konstantní okolní teploty během jednoho dne

Závěr

Existuje několik metod, jak zvýšit přenášený výkon. Tyto metody jsou popsány v kapitole 1. Jednou z metod je zvýšení maximálního dovoleného procházejícího proudu. Do této skupiny patří operativní metody, které se zakládají na sledování stavu provozních a okolních podmínek a následném využití všech rezerv, které jsou v daném čase k dispozici. Tato metoda nabízí relativně malé zvýšení přenášeného výkonu za nízké náklady. Další výhodou této metody je relativní jednoduchost oproti ostatním řešením a krátký čas na její zhotovení. Další metody, které zvyšují dovolený proud, jsou metody založené na vodičích. V praxi to znamená zvýšení proudu ve vodiči na nejvyšší povolenou mez, výměnu vodičů nebo výstavbu nového vedení. Dalšími řešeními jsou zvýšení jmenovitého napětí nebo přechod na stejnosměrné napětí. Tyto metody vykazují vysoké zvýšení přenášeného výkonu. V praxi se však příliš nepoužívají kvůli vysokým nákladům na zhotovení, dlouhému času na provedení a celkové složitosti.

Tepelný model vodiče byl zhotoven v programu MATLAB-Simulink ve formě blokového schématu. Postup při tvorbě modelu a jeho vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 3. Tepelný model vodiče zahrnuje základní okolní a provozní parametry, které ovlivňují jeho teplotu. Analýza těchto parametrů je provedena v kapitole 2. Výstup z modelu je průběh teploty vodiče během dne, který je zobrazený na *Obr. 3.3*. Na diagramu je vidět porovnání nasimulované a naměřené teploty vodiče. Možné příčiny odchylky jsou uvedeny na konci odstavce 3.5. Po vylazení těchto nedostatků by model mohl ve spojení s předpovědí počasí sloužit k předpovídání teploty vodiče. Podle této předpovězené teploty vodiče by se mohlo řídit zatěžování linky. Tato teorie má ovšem několik úskalí. Největší problém je s otázkou spolehlivosti předpovědi počasí, kterou je u některých vlivů velmi obtížné zaručit.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Working Group B2 / C1.19. Increasing capacity of overhead transmission lines. CIGRE, 2010
- [2] Working Group 22.12. Thermal behaviour of overhead conductors. CIGRE, 2002
- [3] Working Group B2.12, „Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor rating“, CIGRE, 2006
- [4] Rada J. a kol.: „Elektrotepelná technika“, SNTL, 1985
- [5] VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. *VDI Heat Atlas*. 2. vyd. Düsseldorf: VDI Verlag, 2010. ISBN 978-3-540-77876-9
- [6] IEEE Power Engineering Society, „IEEE standard for calculating the current temperature of bare overhead conductors“, 2007
- [7] MATLAB – Simulink product help