

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Miroslav Müller

**Řešení kombinovaného namáhání venkovních vedení VVN
- statické a dynamické modely**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektroenergetika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, leden 2013

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře Elektroenergetiky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Miroslav Müller
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, Praha 6, 166 27

Školitel: Prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, Praha 6, 166 27

Školitel-specialista: Ing. Jan Švec, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, Praha 6, 166 27

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektroenergetika v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Elektroenergetika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Potřeba spolehlivého provozování přenosových linek vede k rozboru dílčích částí a konstrukcí (viz [1], [2]), z kterých jsou linky složeny, stejně tak k určování interakcí jednotlivých komponent, které tvoří složitý systém ovlivněný mnoha vnějšími vlivy.

Pro vysokou spolehlivost je nutné docílit pokud možno co největší spolehlivost všech dílčích komponent, tak aby byla možná vysoká spolehlivost celého systému.

Jednotlivé části vedení procházejí vývojem a ukazují se různé alternativní možnosti a vylepšení prvků. Roku 1907 navrhl Hook použití lan kombinovaných, kde jádro tvořilo železné lano opletené pláštěm z hliníku [2]. Tato lana se běžně označují jako AlFe, mezinárodně pak ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) (viz [3], [4], [5]) s doplněním o čísla, která značí průřez případně počet drátů jednotlivých částí. AlFe lana se stále používají s drobnými úpravami do dnes a jsou vyráběna v různých řadách lišících se celkovým průřezem a poměrem železa a hliníku. Dalším vývojem bylo použití kompaktních vodičů (ACSR/TW), které mají kruhové průřezy hliníku nahrazeny segmentovými částmi.

Asi před 20 lety byl ve Velké Británii populární homogenní vodič tvořený hliníkovou slitinou (AAAC, All-Aluminium Alloy Conductor) obsahující prvky jako je křemík a hořčík. Výhodou těchto vodičů je, že jsou při srovnání s AlFe lany při stejném průřezu lehčí, mechanicky pevnější a elektricky vodivější.

Dalšími možnostmi kombinací materiálů (hliník, slitina hliníku, ocel) jsou:

1. Hliníkový vodič se slitinovým jádrem (ACAR, Aluminium Conductor Alloy Reinforced)
2. Slitinový vodič s ocelovým jádrem (AACSR, Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced)
3. Celohliníkový vodič (AAC, All Aluminium Conductor). Lano AAC se používá díky své větší odolnosti proti korozi v pobřežních oblastech.

Slibnou oblastí ve vývoji se stalo také využití vysokoteplotních vodičů založených na slitinách hliníku a zirkonu (viz [6]), s kterými začali experimentovat Japonci už v 60. letech 20. století. Příkladem užití vysokoteplotních materiálů jsou lana:

1. TACSR (T-Aluminium Conductor Steel Reinforced), u kterých při vyšších teplotách než u lan AlFe nedochází k výraznému poklesu pevnosti.

2. TACIR (T-Aluminium Conductor Invar Reinforced) jsou lana s invarovým jádrem (slitina železa a niklu), které mají součinitel délkové teplotní roztažnosti asi třetinový oproti oceli.

Jinou možností konstrukce lana je hliník ve stabilizovaném stavu umístěný kolem ocelového jádra SSAC (Steel Supported Aluminium Conductor) značeno též ACSS, které nese celou hmotnost lana a neohroží tak tečení hliníku. Lano je možné tak provozovat i do teplot 200 °C. Délková teplotní roztažnost je dána vlastnostmi ocelového jádra.

Při návrhu nových venkovních vodičů se uplatňují také kompozitní materiály. Příkladem je ACFR (Aluminium Conductor Carbon Fibre Reinforced), který má velmi nízký teplotní součinitel délkové roztažnosti uhlíkového vlákna, což má za následek nízkou teplotu přechodu asi 70 °C.

Novinkou v oblasti vodivých lan je lano označované ACCR (Aluminium Conductor Composite Reinforced - viz [7]). Jádro lana je tvořené vysokým množstvím vláken oxidu hliníku obklopené pláštěm z vysoce vodivé slitiny hliníku a zirkonu. Lano dle výrobce neobsahuje ani polymery ani plasty. Lano ACCR má přibližně poloviční měrnou hmotnost a poloviční měrnou délkovou teplotní roztažnost. Nevýhodou nového typu lana je, že pro výpočet jeho napnutí neplatí základní lineární vztahy uvedené Robertem Hookem a je nutné použít složitějších vztahů případně programového vybavení dodaného výrobcem lana.

Lana venkovních vedení jsou stále více využívána také v oblasti telekomunikací a to tak, že ve vodivých lanech jsou umístěna optická vlákna. Jedním z těchto lan je OPGW (Optical Ground Wire - viz [8]) - optické vlákno je umístěno do jádra nadzemního zemního lana. Někdy bývá dokonce optické vlákno umístěno ve fázových vodičích.

Důležitou částí zkoumání je také návrh a použití matematických modelů vedení, které umožňují modelovat chování vedení za různých stavů. V oblasti mechaniky jde především o výzkumy v následujících oblastech (viz [9]):

1. vibrace vodivých lan vlivem větru
2. přetěžování lan a únava materiálu
3. tančení vodičů
4. kmity na svazkových vodičích
5. přetěžování vodivých lan s optickými vlákny
6. ostatní pohyby vodivých lan

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce se soustřeďuje na oblast mechaniky venkovního vedení. Jako výchozí je odvozen model vedení založený na statické souměrné řetězovce. Dále je ukázáno, jakým způsobem se odvozuje průhyb lana ve středu pole a v libovolném bodě podél řetězovky. Je určena délka lana a síly působící podél lana v závislosti na poloze vůči poli. V práci je také ukázána možnost určení parabolické náhrady průhybové křivky a analyzována chyba vzniklá použitím pro běžné napínací síly.

Další celek práce ukazuje rozšíření modelu a jeho odvození pro nesouměrnou řetězovku. Jsou popsány a částečně odvozeny používané průhyby, délka lana pro nesouměrnou řetězovku a také síly působící na vodič. V práci je věnována také část odvození stavové rovnice pro nesouměrně zavěšenou řetězovku a postupy pro případy běžně používaného tvaru pro souměrnou řetězovku a parabolickou náhradu průhybové křivky. Je odvozena délka lana řetězovky před zavěšením. Délka lana před zavěšením je jedním z klíčových parametrů pro další model, ale dá se také využít při určování výpočtu skutečné délky lana, která je potřeba pro postavení linky.

Klíčová část práce se zabývá odvozením dynamického diskrétního prutového modelu řetězovky v rovině. Je uvedena konstrukce modelu a jeho dílčích komponent včetně matematického popisu. Jde jak o prvky působící vazbu mezi sousedními body formou pevné vzdálenosti, tak i o prvky tlumící relativní úhlové natočení sousedních elementů. Jsou rozebrány náhradní parametry prvků tvořící diskrétní náhradu řetězovky a systém potřebných parametrů. Následně je ukázán souhrn hlavních sil působících na jednotlivé elementy grafickou podobou. Tento oddíl je také doplněn o popis parametrů modelu, které je nutné získat pro simulace prováděné na modelu. Část práce se věnuje také postupu použití modelu pro simulace používané pro reálné použití diskrétního dynamického modelu, včetně popisu datových struktur a rámcového vývojového diagramu a popisu použitých parametrů. Je ukázána část problematiky určování počátečních podmínek polohy elementů prutového modelu a navrhnuty možnosti řešení a jejich jednoduché porovnání.

Další model, který je odvozen, je strunový model vedení. Je popsán postup pro určení okrajových podmínek na koncích vedení a také postup řešení matematického modelu včetně omezení vzniklých při jeho řešení. Dále pak jsou odvozeny a popsány vnější budící síly modelu, které jsou způsobeny především námrazkem a foukáním větru ve směru kolmém na osu lana. Při řešení je použita Fourierova transformace polohových souřadnic a vysvětleno odvození řešení modelu následně použitelné pro další výpočty. Nad modelem je probrána problematika vlastních kmitů lana a vliv tlumících konstant na

výsledné řešení ovlivňující praktické použití vyhodnocování vlastních kmitů pro monitorovací metody mechanického stavu vedení.

Je odvozen také model popisující síly a polohu lana v závislosti na protékáním proudy a napnutí dílčích lan. Je řešena problematika průběhu vzájemných sil rovnoběžných vodičů protékáných proudy a ukázáno řešení přibližnou aproximací zahrnující informaci o průměru vodičů. Dále pak je popsán postup výpočtu sil při použití strunového modelu a je také ukázán vliv počtu počítaných harmonických na výsledné řešení.

Další významná část práce je zaměřena na simulace a porovnání jednotlivých druhů modelů. Celé skupiny simulací je možné rozdělit do pěti skupin:

1. porovnání modelů v ustáleném stavu pro jedno pole
2. pád námrazku z lana po celé délce pro jedno pole
3. pád námrazku a dynamické chování lan pro jedno pole
4. simulace na třech polích
5. simulace vlivu zkratových proudů na kontrakci svazku vodiče

Výše uvedené případové studie předpokládají následující dílčí úkoly a výstupy:

- Výpočet parametrů průhybové křivky pro reálné pole a následné porovnání výsledků s výsledky strunového modelu a diskrétního prutového modelu v ustáleném stavu. Je ukázán vliv počtu harmonických strunového modelu na hodnotu výsledného max. průhybu. Podobným způsobem je ukázán vliv počtu elementů diskrétního modelu na výsledný maximální průhyb.
- Rozšíření porovnání modelů v ustáleném stavu pro případ s námrazkem po celé délce lana. Dále pak je určen průběh přechodového děje pádu námrazku.
- Simulací pádu námrazku lana z různých jeho částí a různé hmotnosti.
- Rozšíření na případ tří svázaných polí a provedení simulace pádu námrazků z prostředního pole pro různé případy umístění námrazku a různé hmotnosti.
- Simulace vlivu proudy svazkovým vodičem a jeho napnutí na jeho kontrakci. Ze simulací také je určena závislost popisující minimální vzdálenost svazkových vodičů na napínací síle a velikosti el. proudy svazkem.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Přehled řešených témat

- Ampacita
 - Bilanční rovnice pro teplotu vodiče
 - Výpočet ampacity a ustálené teploty
- Statická řetězovka
 - Nesouměrně zavěšená řetězovka
 - Vliv změny teploty a váhy lana na délku vodiče
 - Délka lana před zavěšením
- Diskrétní dynamický model řetězovky
 - Náhradní prvky
 - Koeficienty diskrétního modelu lana
- Rovnice struny
 - Řešení rovnice
 - Budící síly modelu
 - Vlastní kmity
 - Frekvence kmitů
 - Silové účinky proudu
- Simulace na modelech
 - Určení mechanických konstant prutového modelu
 - Ustálený stav řetězovky
 - Pád námrazku z lana po celé délce
 - Pád námrazku z části lana - 1 pole
 - Pád námrazku z části lana - tři pole
 - Průchod zkratového proudu svazkem vodičů

Ampacita

Proudová zatížitelnost venkovního vedení, označovaná též jako ampacita, není konstantní v čase (viz [10], [11], [12]). Na její velikost mají vliv především klimatické podmínky (okolní teplota, směr a intenzita foukání větru, námraza, intenzita slunečního záření), teplota vodiče a také způsob zatěžování vedení. Jako kritický parametr pro velikost zatížení se bere maximální dovolená teplota vodiče. Teplota vodiče má výrazný vliv na mechanické namáhání vodiče v tahu, průhyb lana a také na změny materiálu ovlivňující jeho kvalitu (vyžhání a rekrystalizace hliníku, tečení za studena).

Průměrná teplota vodiče může být určena s pomocí bilanční diferenciální rovnice tepelných výkonů:

$$M \cdot c_p \frac{dT_{AV}}{dt} = P_J + P_S + P_M - P_R - P_C \quad (\text{W/m}) \quad (1)$$

kde	M	(kg/m)	....	měrná hmotnost vodiče
	c_p	($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	....	měrná tepelná kapacita
	T_{AV}	($^{\circ}\text{C}$)	....	průměrná teplota vodiče
	t	(s)	....	čas
	P_J	(W/m)	....	ztráty způsobené průchodem proudu
	P_S	(W/m)	....	výkon dodávaný slunečním zářením
	P_M	(W/m)	....	ohřev magnetickým polem
	P_R	(W/m)	....	výkon odvedený sáláním
	P_C	(W/m)	....	výkon odvedený konvekcí

Výpočet přenosové kapacity vedení se zjednoduší, pokud budeme předpokládat, že teplota vodiče, elektrický proud, okolní teplota, intenzita slunečního záření, vítr a další klimatické vlivy jsou konstantní.

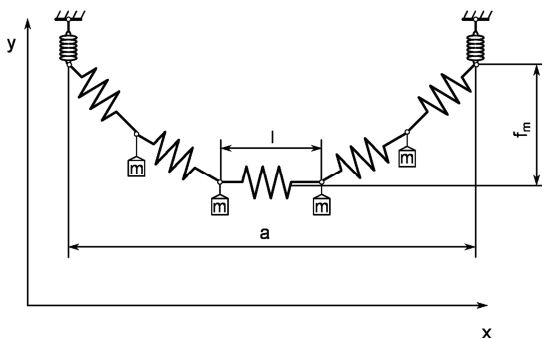
V ustáleném stavu pak platí $dT_{AV} / dt = 0$, což znamená, že nedochází k akumulaci energie ve vodiči. Následně je možné z rovnice (1) vyjádřit PJ a další úpravou získáme vztah pro výpočet ustálené hodnoty proudu:

$$I = \sqrt{\frac{P_R + P_C - P_S}{k_{ac} \cdot R_{dc}}} \quad (\text{A}) \quad (2)$$

kde	k_{ac}	(-)	....	poměr mezi střídavým a stejnosměrným odporem vodiče.
	R_{dc}	(Ω/m})	....	měrný stejnosměrný odpor při dané teplotě.
	I	(A)	....	efektivní hodnota ustáleného proudu

Diskrétní dynamický model řetězovky

Diskrétní model řetězovky je založen na kinematickém modelu s obecnými parametry. Systém je modelován jako soustava hmotných bodů (obr. 1) v prutové soustavě. Hmotné body jsou umístěny v kloubech.

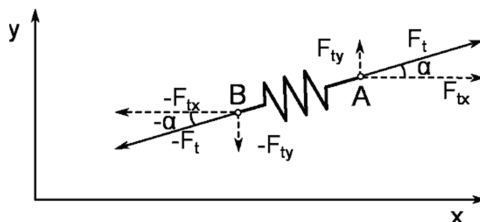


Obr. 1: Zjednodušené náhradní schéma řetězovky.

Náhradní prvky tvořící kinematický řetězec jsou rozděleny na prvky vztahující se k ramenům a kloubům (spojení ramen). Z jednotlivých náhradních prvků jsou vyjádřeny síly tak, aby bylo možné je dále použít při sestavování soustav rovnic.

a) Parametry ramen

Rameno nahradíme pružinou s jedním stupněm volnosti, kterým je posuv ve směru osy. Pružina je charakterizována svojí tuhostí a klidovou délkou. Tuhost pružiny k_t je definována jako síla F_{kt} potřebná k prodloužení pružiny o délku Δl .



Obr. 2: Rozklad sil na složky pro lineární element.

Tlumení ramene slouží k zatlumení pružiny charakterizující tuhost ramene. Velikost tlumící síly F_{bt} je úměrná rychlosti pohybu pružiny v ve směru osy pružiny.

b) Parametry kloubů

Mechanická tuhost v ohybu je popsána pomocí momentů sil působících na kloub spojující dvě sousední ramena. Tuhost kloubu popíšeme přes moment síly následně:

$$M_{ko} = k_o \cdot \varphi \quad (3)$$

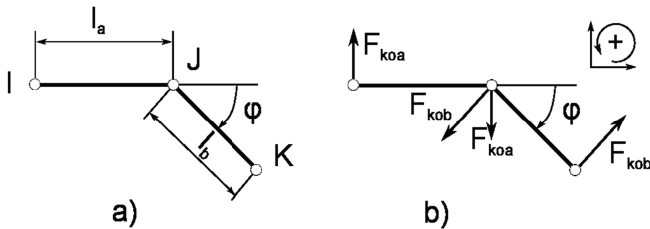
kde k_o (N m / rad) ... ohybová tuhost
 φ (rad) ... úhel měřený od klidového stavu
 M_{ko} (N m) ... moment ohybové tuhosti

Obdobným způsobem je popsáno tlumení v kloubu:

$$M_{b0} = b_o \cdot \omega \quad (4)$$

kde b_o (N · m · s / rad) ... ohybové tlumení
 ω (rad / s) ... úhlová rychlost
 M_{b0} (N m) ... moment ohybového tlumení

Detail situace ukazuje obr. 3.



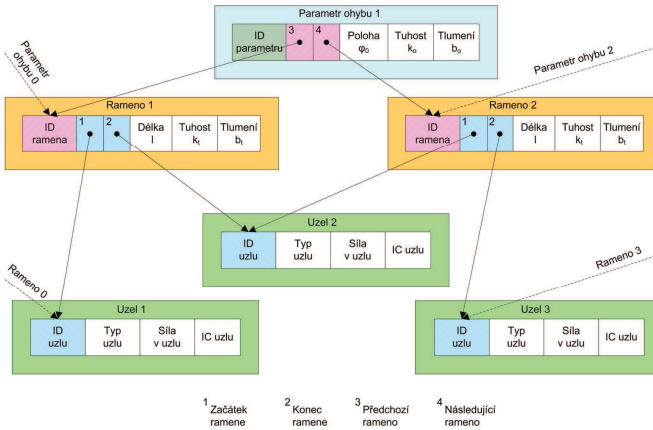
Obr. 3: Spojení dvou ramen: a) Geometrie, b) Silové dvojice.

Datová struktura modelu

Prutový model se skládá z jednotlivých elementů mezi kterými jsou vazby. V datovém modelu rozeznáváme 3 typy objektů: uzly (klouby), ramena a parametry ohybu. Bloky Rameno a Parametr ohybu jsou orientované vůči odkazům (záleží na pořadí). Ukázka datového modelu pro část lana je na obr. 4. Datový model je možné jednoduše doplnit o další vazby např. pomocí dalších ramen tvořících např. hvězdu, která představuje zavěšení průchozího lana na izolátoru. Pro příklad hvězdy ramen je nutné také doplnit příčné parametry tlumení v ohybu mezi tyto elementy.

Každý objekt má určité parametry, které se k němu vztahují. Pro sestavení soustavy rovnic, která je řešena, se vychází z počtu pohyblivých uzlů. Základní počet uzlů je zadán jako parametr elem. Rovnice popisující

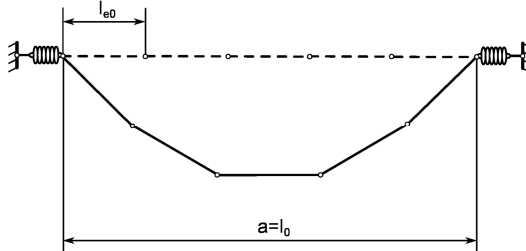
každý pohyblivý uzel je sestavena jako součet všech sil (i od ramen a parametrů ohybu) a hybnosti. Většina rovnic je sestavována automaticky z datové struktury.



Obr. 4: Datový model hlavních objektů pro popis lana.

Počáteční podmínky

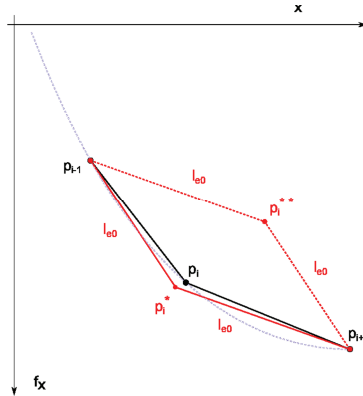
Počáteční podmínky simulace určuje stavový vektor ic , ve kterém jsou za sebou výchozí stavy jednotlivých uzlů IC . Stav IC je dán dvěma souřadnicemi polohy a dvěma složkami rychlosti. Počáteční stavový vektor určíme následovně: Ve všech uvedených případech simulace předpokládáme, že počáteční rychlost je nulová. Pro určení počáteční polohy uzlů použijeme průhybovou křivku statické řetězovky s tím, že řetězovku rozdělíme na n stejných elementů.



Obr. 5: Příklad jednoduché diskretizace pole pro 5 elementů.

Korekce počáteční polohy bodů prutového modelu je nutné provádět, protože nesouhlasí zcela jejich vzájemná poloha určená pomocí vzorce pro

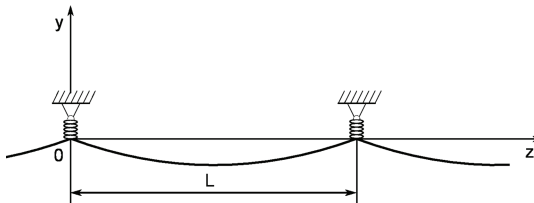
popis délky lana s lineární interpolací a ekvidistantním umístěním bodů. Rozdíl v poloze je dán způsobem určením vzdálenosti bodů. V prvním případě jde o délku křivky a v druhém případě pak o prostou vzdálenost dvou bodů. Pro korekci byl použit algoritmus provádějící korekci změnou polohy bodů podle obr. 6.



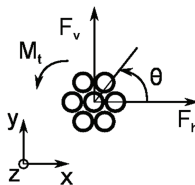
Obr 6: Ukázka řešení korekce pozice bodu pro náhradu řetězovky.

Rovnice struny

Pro sledování dynamického chování si můžeme zjednodušeně představit napjaté lano mezi stožáry (obr. 7) jako strunu s 3 stupni volnosti. Podél délky lana můžeme v každém bodě udělat řez (obr. 8).



Obr. 7: Přehledový obrázek pole mezi stožáry.



Obr. 8: Síly a moment působící na vodič z pohledu řezu.

Dynamiku pohybu vodiče popisuje následující sada rovnic:

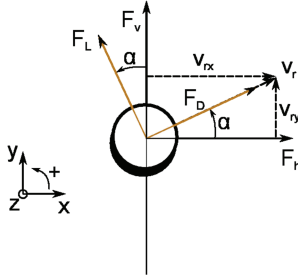
$$\begin{aligned}
 m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C_y \frac{\partial y}{\partial t} - T \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} &= F_v(z) \\
 m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + C_x \frac{\partial x}{\partial t} - T \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} &= F_h(z) \\
 I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + C_\theta \frac{\partial \theta}{\partial t} - GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} &= M_t(z)
 \end{aligned} \tag{5}$$

kde	m	(kg/m)	....	hmotnost 1 metru lana včetně příp. námrazku.
	x, y, z	(m)	....	souřadnice polohy
	T	(N)	....	mechanické napětí napínající lano.
	t	(s)	....	čas
	F_v	$(N \cdot m^{-1})$	....	vertikální budící síla působící na 1 m vodiče.
	F_h	$(N \cdot m^{-1})$	....	horizontální budící síla působící na 1 m vodiče.
	I	$(kg \cdot m)$	....	moment setrvačnosti vodiče vztažený na délku 1 m vodiče.
	GJ	$(N \cdot m^2)$	....	torzní napětí.
	M_t	(N)	....	torzní budící moment vztažený na 1 m délky vodiče.
	C_y, C_x	$(N \cdot s \cdot m^{-2})$	....	tlumící koeficienty.
	C_θ	$(N \cdot s)$	....	tlumící koeficient.

Napnuté vedení z pohledu dynamiky ovlivňuje mnoho parametrů a proměnných veličin. Jde především o vítr, námrazu a kombinace jejich zatížení. Mechanické parametry vedení budeme brát jako neměnné v čase. Z dlouhodobého pohledu se mechanické parametry vedení mění v čase také, ale z hlediska simulací jsou jejich změny zanedbatelné.

Síla větru

Vítr působící na vodič představuje proudění vzduchu, kterému klade odpor průmět vodiče do jeho směru. Zjednodušeně můžeme předpokládat, že vítr působí stejnou silou po celé délce vedení v rámci jednoho pole. Účinky větrů můžeme pro model převést na silové účinky a moment sil ([13], [14]).



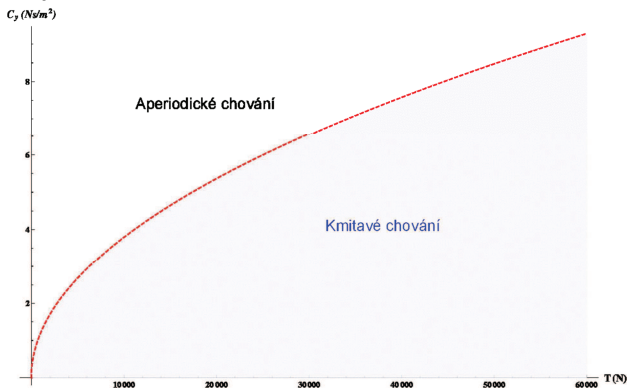
Obr. 9: Rozklad sil větru působících na vodič.

Vlastní kmity

Vlastní kmity struny jsou zkoumány ve středu pole (tj. nezávisle na souřadnici z) a pro souřadnici $y(t)$. U vlastních kmitů je předpokládáno nulové vnější buzení. Pro složku $y(t)$ platí po vztah:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{L}\right)^2 \frac{T}{m} - \left(\frac{C_y}{2\pi m}\right)^2} \quad (6)$$

Mezní závislost tlumícího koeficientu C_y na napínacím napětí lana ALFe 350/59 pro 1. harmonickou ukazuje obr. 10. Průběh grafu napínací síly ukazuje, že pro konstantní tlumení platí, že pro nízké napínací síly je lano rychle ztlumeno a ani nemusí kmitat. Naopak při velkém napnutí se kmity tlumí pomaleji.

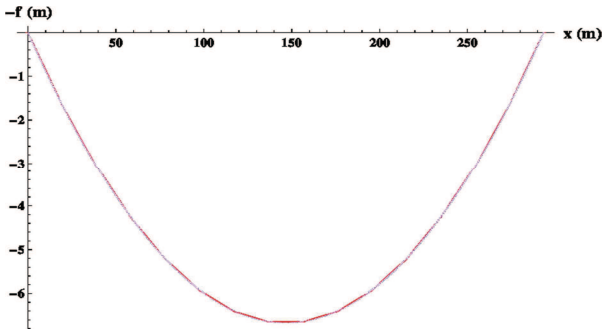


Obr. 10: Závislost tlumící konstanty 1. harm. na napínacím napětí.

4. VÝSLEDKY

Ustálený stav řetězovky

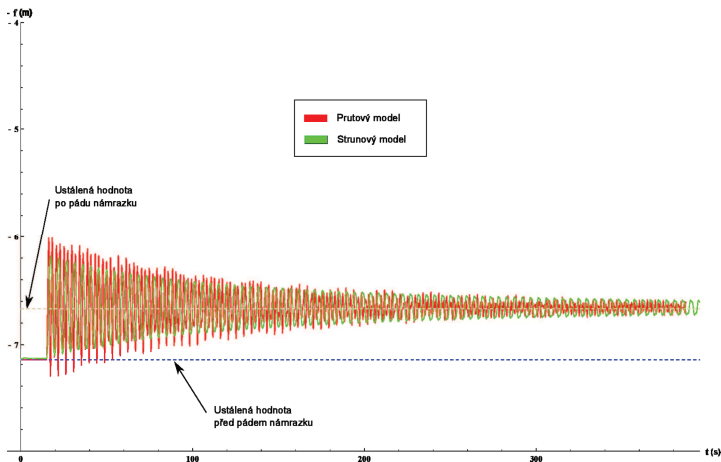
Obrázek 11 ukazuje všechny tři modely (statický, prutový, strunu) umístěné přes sebe v ustáleném stavu. Jednotlivé modely opticky splývají.



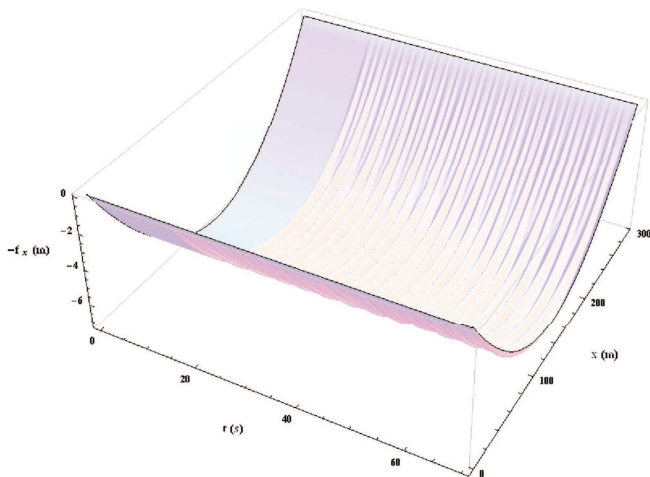
Obr. 11: Průběh průhybu lana na testovacím poli v závislosti na poloze, měřené od konce pole.

Přechodová charakteristika

Ukázku přechodové charakteristiky při pádu námrazku ukazuje obr. 12. Na obrázku jsou zobrazeny simulace pro strunový a prutový model středu lana v čase. Čárkované čáry jsou určeny pomocí modelu statické řetězovky a ukazují ustálené hodnoty průhybů před a po pádu námrazku. Přechodový jev - pád námrazku z celého pole najednou, nastane v čase $t=15$ s. Můžeme konstatovat, že prutový a strunový model se ve svém trendu shodují. Rozdíly mezi jednotlivými průběhy jsou dány jiným způsobem výpočtu hodnot a rozsahem modelovaných jevů. Na prutový model má také vliv podélná tuhost jednotlivých elementů, která se projevuje také jako vliv vibrací.



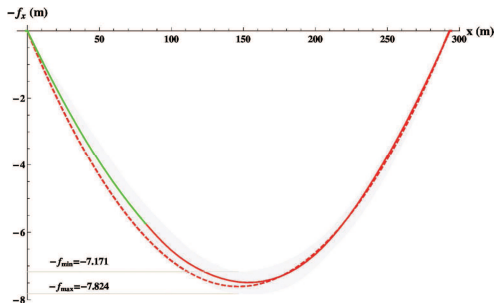
Obr. 12: Průběh polohy středu lana pro pád námrazku - porovnání všech tří modelů.



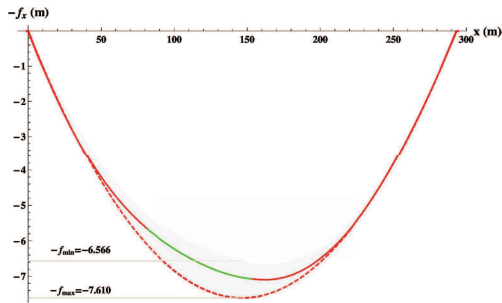
Obr. 13: Průběh přechodové charakteristiky prutového modelu - skok v čase 15 s.

Obrázek 13 ukazuje taktéž výsledky simulace pro prutový model tentokrát jako prostorový graf. Na grafu je zachycena poloha řetězovky (průhybová křivka) v čase. Pád námrazku z lana po celé délce pole nastane v čase $t=15s$.

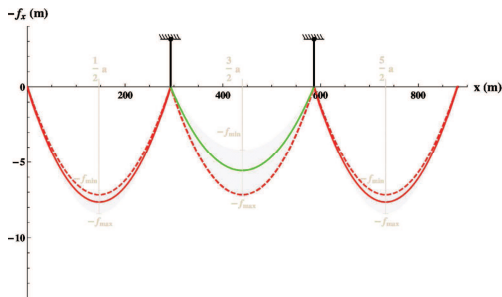
Pád námrazku z části lana - 1 pole



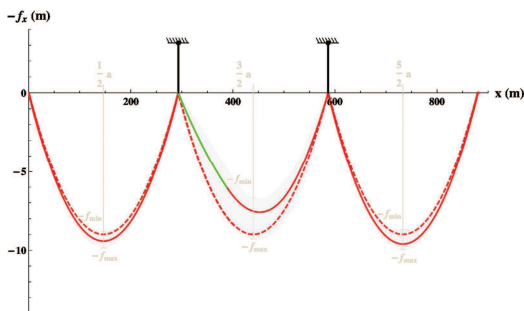
Obr. 14: Poloha lana během přechodové charakteristiky pro pád námrazku z části lana pro oblast N1.



Obr. 15: Poloha lana během přechodové charakteristiky pro pád námrazku z části lana pro oblast N1.



Obr. 16: Poloha lana během přechodové charakteristiky pro pád námrazku z části lana prostředního pole pro oblast N0.

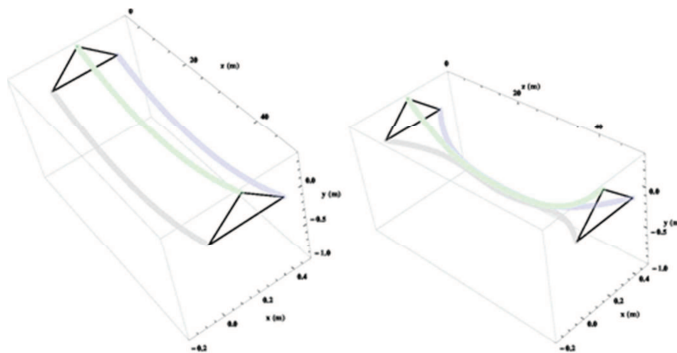


Obr. 17: Poloha lana během přechodové charakteristiky pro pád námrazku z části lana prostředního pole pro oblast N3.

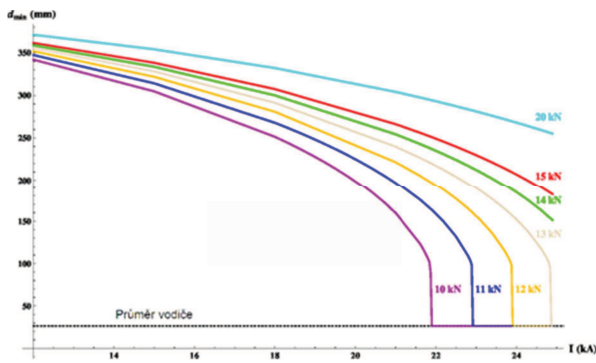
Průchod zkratového proudu svazkem vodičů

Při průchodu zkratového proudu svazkem vodičů může dojít k vzájemnému dotyku jednotlivých vodičů daného svazku. Zda dojde ke změně vzájemné polohy vodičů ve svazku vlivem zkratového proudu, závisí na mnoha okolnostech. Hlavními z nich jsou konstrukční parametry, které jsou dány druhem použitého lana a jeho mechanickými vlastnostmi. Dále pak provozní vzdálenosti jednotlivých lan ve svazku a jejich mechanickým spojením formou rozpěrek a samozřejmě také velikostí napínací síly působící na lano. V neposlední řadě také druhem a uspořádáním svazku včetně počtu lan ve svazku. Z elektrických parametrů to jsou odpor vedení, velikost a časový průběh zkratového proudu včetně rozložení proudu mezi jednotlivými vodiči.

Následující simulace se zabývá průchodem proudu svazkem tří vodičů umístěných v rovnostranném trojúhelníku, kde vzdálenost jednotlivých vodičů je 0.4 m a vzdálenost mezi rozpěrkami je 50 m. Zvolené parametry odpovídají standardní vzdálenosti pro vedení 400 kV v ČR. Rozpěrky v simulaci představují pevné upnutí a v simulaci se nepředpokládá jejich deformace. Simulace je modelována pomocí strunového modelu.



Obr 18: Ukázka úseku lana mezi rozpěrkami pro napnutí $T = 11$ kN.
 a) - bez proudu. b) - zkratový proud svazkem 24.9 kA.



Obr 19: Závislost minimální vzdálenosti dvou lan ve svazku d_{\min} na celkovém zkratovém proudu I pro vybrané parametry T .

5. ZÁVĚR

Disertační práce se zaměřuje na problematiku modelování mechaniky venkovního vedení včetně její dynamiky. Problematika modelování venkovního vedení se stává čím dál tím více aktuální téma vzhledem k narůstajícím požadavkům společnosti na přenos a rozvod elektrické energie. Zvyšující spotřeba energií tak vede k požadavkům na nárůst přenosových kapacit existujících linek a znalost jejich provozních mezí. Jedním z těchto aspektů je také mechanika a dynamika vedení, kde její bližší poznání umožní efektivnější provoz jednotlivých přenosových linek, které jsou strategickou páteří sítí.

Práci můžeme rozdělit do několika částí. První tři části se zabývají popisem a rozбором jednotlivých modelů mechaniky vedení včetně jejich odvození. Následují pak společné simulace, kde jsou tyto modely porovnány a prakticky použity na modelech.

Práce začíná odvozením mechaniky jednoduché statické souměrně zavěšené řetězovky s výpočtem běžných parametrů. Navazuje rozbor sil působících na lano a dále je model rozšířen pro případ nesouměrně zavěšené řetězovky. Na šikmém poli řetězovky je následně ukázán vliv teploty, který se může projevit ve změně mechanického napětí a také v délce lana. Stavová rovnice popisující vztah mezi teplotou lana a mechanickým napětím je uvedena v rozšířeném tvaru pro případ šikmého pole. Z hlediska dalšího modelování bylo nutné určit délku lana v nezavěšeném stavu tj. délku volně položeného nataženého lana.

Druhá část se zabývá odvozením diskrétního dynamického prutového modelu pro 2D případ. Nejprve je sestaven model s popisem jednotlivých náhradních prvků a dále ukázka sestavení rovnic popisující jeden element lana. Pak jsou rozebrány jednotlivé parametry modelu. Navazuje postup výpočtu s popisem implementace v programu Mathematica a ukázka datových struktur včetně rozboru problémů spojených s reálnou simulací.

Třetí model je založen na podobnosti se strunou. Jedná se o dynamický model popsany superpozicí jednotlivých harmonických. Strunový model je odvozen jako 3D model s možností natáčení lana. Na strunový model lana navazuje popis a odvození sil vyvolané větrem a námrazou. Následuje úprava modelu pro použití v programu. Pro strunový model je proveden rozbor vlastních mechanických kmitů a vliv tlumících konstant na tento kmitočet. Pro rovnoběžně natažená lana je dále sestaven model pro zkoumání sil vyvolaných vlivem průchodu proudů vodiči. Navazuje postup výpočtu včetně popisu implementace a počátečních podmínek simulace.

Důležitou část práce tvoří simulace, kde jsou jednotlivé modely aplikovány. První z řady simulací se zabývá porovnáním všech tří modelů "řetězovky" v ustálených stavech pro modelový příklad reálného pole. V této části můžeme zhodnotit, že se modely svými výsledky celkem shodují a dávají stejné výsledky. Drobné rozdíly mezi výsledky jsou dány především rozsahem zahrnutých faktorů, které jednotlivé modely zahrnují (tuhosti, pružnosti, tlumení) a dále pak numerickými nepřesnostmi při výpočtu. Další ze simulací ukazuje pád námrazku z celého pole a opět porovnání všech 3 modelů v rámci rozsahu schopnosti jednotlivých modelů. Opět můžeme konstatovat, že se modely dobře shodují. Při porovnání přechodových charakteristik strunového a diskrétního prutového modelu dochází k určitým

nepřesností zapříčiněných absencí podélných kmitů ve strunovém modelu a také nepřesností použitých parametrů modelu.

Následují simulace pádu různých hmotností a polohy námrazku z rozpětí jednoho pevného pole s popisem maximálních a minimálních hodnot sil a průhybů. Barevně je vyznačen stav před a po pádu námrazku a vybarveným pozadím pak obálka určující maximální rozkmit lana během přechodové charakteristiky.

Simulace je následně rozšířena na kotevní úsek 3 polí, kde je zkoumán vliv pádu námrazku prostředního pole na 1. a 3. pole. Simulace je doplněna průběhem sil působících podél celého vedení.

Poslední skupinou simulací je užití strunového modelu pro zkoumání silových účinků zkratového proudu na svazek 3 vodičů a určení minimální vzdálenosti, které pro dané napnutí lana způsobí daný konstantní proud.

Přínosem práce je zejména vytvoření prutového modelu s velkým množstvím variabilních parametrů. Prutový model je následně porovnán se statickým modelem a modelem struny. Pro porovnání chování různých přístupů modelování vedení byl vytvořen model s parametry blízkými reálnému poli. Vlastní implementace spočívala v konstrukci prutového modelu a jeho porovnání s běžně používaným statickým modelem a modelem struny. Ověření funkčnosti modelů bylo provedeno v různých stavech. Modely byly vytvořeny prostředím SW Mathematica, ale jejich struktura umožňuje přepis do libovolného vývojového prostředí s dostatečnou podporou matematických funkcí. Modely jsou postaveny tak, aby bylo možné v případě potřeby modelovat rozsáhlejší simulace dynamického chování napnutého lana včetně několika úseků. Model při doplnění rozsahu vstupních dat v budoucnu umožní analýzu chování celého vedení a otevře prostor pro snadné určení kritických částí vedení včetně predikce přechodových jevů při působení různých vnějších vlivů.

Bližší znalost dynamiky vedení otvírá prostor pro rozvoj nových monitorovacích a diagnostických technik založených na zpřesněných modelech vedení a spolu s dalšími informacemi popisujícími topologii a geometrii linky umožní tak její efektivnější provozování včetně výstrahy v případě blížícího se predikovatelného nebezpečí. Větší množství informací o dané lince umožní její efektivnější využití a dá se předpokládat, že v budoucnu budou nové metody měření a estimace stavu linky využity a začleněny v nadřazeném systému, který bude hlídat a informovat o okamžitých přenosových schopnostech všech klíčových linek.

Seznam v teziích použité literatury

- [1] Kiessling, F. - Nefzger, P. - Nolasco, J. F. - Kaintzyk, U.: Overhead Power Lines - Planning, Design, Construction, Germany: Springer, 2003, 759 p. ISBN 3-540-00297-9.
- [2] Fecko, Š. - Žiaran, J. - Varga, L.: Elektrické siete, Bratislava: SVŠT, 1990, 237 s. ISBN 80-227-0288-9.
- [3] Southwire Company, Available: <http://www.southwire.com>
- [4] General Cable, Available: <http://www.cable.alcan.com/cablepublic>
- [5] Lanové vodiče, Žiar nad Hronom : [ŽHS], 2007, <<http://www.lana.sk>>
- [6] Thermal Resistant Aluminium Conductor Aluminium Clad Steel Reinforced, Available: <http://www.kmi.co.id/products/rods-a-conductors>
- [7] 3M Aluminum Conductor Composite Reinforced, Available: http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/EMD_ACCR/ACCR_Home/
- [8] Optické fázové vodiče (OPGW/OPPC), Available: <http://www.nktcables.com/cz/solutions/electrical-infrastructure>
- [9] Chan, J., et al. EPRI Transmission Line Reference Book: Wind - Induced Conductor Motion, 2006, EPRI, Palo Alto
- [10] Deb, A. K.: Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications, CRC Press, 2000, 264 s. ISBN 0-8493-1306-6.
- [11] Švec, J.: Řízení výkonových toků v elektrizačních soustavách s využitím systémů FACTS, Praha, 2009. 150 s. ČVUT v Praze, FEL. Disertační práce.
- [12] Tlustý, J. - Kyncl, J.: Klimaticky závislá ampacita přenosových linek, Energetika, 2003, roč. 53, č. 2, s. 61-63.
- [13] Lilien, J. L. - Wang, J. - Chabart, O. - Pirotte, P.: Overhead Transmission Lines Design Some Mechanical Aspects, 1994, ICPST'94 (International Conference on Power System Technology). October 18-21. Beijing, China. p. 1-5.
- [14] Wang, J. - Lilien, J.L.: Overhead Transmission Line Galloping. A Comparative Study between 2-DOF and 3-DOF Models., 1994, 3^{eme} Congr'es National Belge de Mécanique Théorique et Appliquée. Liège. May. Acte du Congr'es. p. 257-261.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

Publikace v impaktovaných časopisech

- [PA1] Müller, M. - Müller, Z. - Tlustý, J.: Model of Dynamic Behaviour of Overhead Lines, In Przegląd Elektrotechniczny. Přijat k publikaci dne 19.11.2012 pod číslem PE 3474.

Publikace v recenzovaných časopisech

- [PA2] Müller, M.: Overhead Line Mechanics Taking the Influence of Wind into Account, In Acta Polytechnica. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Vol. 52, No. 5/2012, May 2012, p. 70-75. ISSN 1210-2709.

Patenty

-

Publikace excerpované WOS

- [PA3] Müller, M. - PhanTu, V. - Tlustý, J.: New Approach of Thermal Field and Ampacity of Underground Cables Using Adaptive hp-FEM, In Sborník konference EPE2010 [CD-ROM]. Brno: BUT, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2010, p. 639-643. ISBN 978-80-214-4094-4.

Ostatní publikace

- [PA4] Müller, M. - Tlustý, J.: Dynamic Model of Overhead Line Mechanics. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, p. 917-920. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [PA5] Müller, M. - Tlustý, J.: Wire Motion Induced Ice Falling. In ELEN 2012 [CD-ROM]. Praha: vydavatelství ČVUT v Praze, 2012, p. 1-8. ISBN 978-80-01-05096-5.
- [PA6] Müller, M.: Overhead Line Mechanics Respecting Wind Influence, In Poster 2012 [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012, p. 1-5.
- [PA7] Müller, M.: Mechanical Model of Overhead Line, In Poster 2011 [CD-ROM] Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, p. 1-4. ISBN 978-80-01-04806-1.

- [PA8] Müller, M.: Mechanika vodiče venkovního vedení. In Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. 1. vyd., ČVUT Praha, 2011, s. 126-149, ISBN 978-80-01-04940-2.

Ostatní publikace

Publikace v impaktovaných časopisech

- [PA9] Kasembe, A. - Müller, Z. - Müller, M.: Assessment of Power Systems with Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbines. Advanced Science Letters. 2013, vol. 19, No. 3, p. 811-815. ISSN 1936-6612.

Publikace v recenzovaných časopisech

-

Patenty

-

Publikace excerptované WOS

- [PA10] Müller, Z. - Švec, J. - Kyncl, J. - Müller M.: Advanced Method of Phasors Identification in Electrical Grids, In Sborník konference EPE2010 [CD-ROM]. Brno: BUT, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2010, p. 419-423. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [PA11] Mareček, P. - Müller, M. - Müller, Z. - Švec, J. - Sýkora, T. - et al.: Dynamic Equivalents in Power System Stability Assessment. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. Brno: Brno University of Technology, 2010, vol. 1, p. 135-138. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [PA12] Müller, M. - Kyncl, J.: Experimentální určení celkového součinitele přestupu tepla mezi předřadníkem a vnitřním prostorem svítidla, In Sborník konference EPE2010 [CD- ROM]. Brno: BUT, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2010, p. 757-759. ISBN 978-80-214-4094-4.

Ostatní publikace

- [PA13] Švec, J. - Tlustý, J. - Müller, Z. - Müller, M. - Kasembe, A. - et al.: Synchronous Phasors Monitoring System – Testing Project in the Czech Republic. In Proceedings of the 7th Annual CIGRÉ Canada Conference on Power Systems [CD-ROM]. Montreal: Cigre Canada, 2012, p. 1-8.
- [PA14] Švec, J. - Tlustý, J. - Müller, Z. - Müller, M. - Santarius, P.: Advanced Applications of FACTS in Industrial Distribution Systems in Middle Europe. In Proceedings of the 7th Annual CIGRÉ Canada Conference on Power Systems [CD-ROM]. Montreal: Cigre Canada, 2012, p. 1-8.
- [PA15] Müller, Z. - Švec, J. - Kyncl, J. - Müller, M.: Advanced Method of Phasors Identification in Electrical Grids. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, p. 419-424. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [PA16] Müller, Z. - Švec, J. - Kyncl, J. - Müller, M.: Effective Method of Synchronous Phasor Detection. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011 [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, p. 1-4. ISBN 978-80-248-2393-5.
- [PA17] Müller, M. - Kyncl, J.: The usage of synchrophasor for optimised fault localization method, In Sborník konference ELEN 2010 [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electroenergetics, 2010, p. 1-5. ISBN 978-80-254-8089-2.
- [PA18] Müller, M. - Müller, Z. - Kasembe, A. - Sýkora, T. - Švec, J. - Šrom, J. - Tlustý, J.: Phasor Measurement Units in Power System Monitoring, In Sborník konference ELEN 2010 [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electroenergetics, 2010, p. 1-5. ISBN 978-80-254-8089-2.
- [PA19] Müller, M.: Adaptive Meshing in Evaluation of Electromagnetic Field of Induction Heating, In Poster 2010 [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, p. 1-5. ISBN 978-80-01-04544-2.
- [PA20] Müller, M.: Transformer Core Optimisation in Mathematica, In Poster 2009 [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, p. 1-5.

[PA21] Musil, L. - Müller, M.: New Library for Design of Cross-Section of Transformers Cores in Mathematica, In Sborník konference ELEN 2008 [CD-ROM]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electroenergetics, 2008, p. 1-3. ISBN 978-80-254-2293-9.

Podíl spoluautorství u všech uvedených publikací je dělen mezi jednotlivé autory vždy rovným dílem.

Na uvedené publikace nebyly registrovány žádné ohlasy ani citace.

SUMMARY

The dissertation thesis is focused on overhead lines mechanics. The introductory part gives the overview of models used in this field including their explanation and derivation.

A static asymmetrical catenary model is derived. A parabolic simplification curve for a static catenary model is evaluated. A state change equation for an asymmetrically hanged catenary was derived. The state change equation is transformed into a commonly used form using a parabolic sag model.

The following chapters concentrate on the derivation and description of a dynamic discrete beam catenary model in 2D space. The model construction including all the components is clarified. The model consists of elements connecting neighbour nodal points using a fixed distance and elements providing relative angle damping ability. The chapter contains the description of the method used during simulations.

A detailed derivation process and the description of the created string-based model are explained in the thesis final part. The model description includes excitation forces. These forces are mainly caused by the combination of icing and wind blowing. The model is used to analyze the overhead line own frequency and the influence of damping constants on the practical use of the created model for monitoring techniques. One of the string model extensions is the description of the force field and the wire state as a function of the line current and bundled wire tension.

The thesis final part is focused on case studies. The steady state results are shown as a reference. The key part consists of dynamic behaviour analyses during transients, e.g. ice falling from conductors. These analyses are extended using a multi-span model providing the behaviour of the neighbour spans during ice falling. The influence of tension forces and line currents on bundle conductors contraction is analyzed too.

KEYWORDS

Mechanics of Overhead Lines, Catenary, Beam Model, String, Effect of Weather Conditions on Overhead Lines, Conductor galloping.

RESUMÉ

Disertační práce se soustřeďuje na oblast mechaniky venkovního vedení. Nejprve je uveden přehled modelů, které jsou dále vysvětleny a odvozeny.

V práci je odvozen model statické nesouměrné řetězovky. Pro statický model řetězovky je ukázána parabolická náhrada průhybové křivky. Dále byla odvozena stavová rovnice pro nesouměrně zavěšenou řetězovku. Stavová rovnice je převedena do běžně používaného tvaru souměrné řetězovky s parabolickou náhradou průhybové křivky.

Další část se zabývá popisem a odvozením dynamického diskrétního prutového modelu řetězovky v rovině. Je uvedena konstrukce modelu a jeho jednotlivé dílčí komponenty. Model je tvořen jak prvky působícími vazbu mezi sousedními body formou pevné vzdálenosti, tak i prvky tlumícími relativní úhlové natočení sousedních elementů. Součástí popisu je i postup použití modelu pro simulace.

Detailní popis a odvození modelů uzavírá strunový model vedení. Odvození modelu obsahuje popis vnějších budících sil, které jsou způsobeny především námrazkem a foukáním větru. Nad modelem je analyzována problematika vlastních kmitů lana a vlivu tlumících konstant na výsledné řešení ovlivňující praktické použití modelu pro monitorovací metody mechanického stavu vedení. Jedním z rozšíření strunového modelu je model popisující síly a polohu lana v závislosti na protékaném proudu a napnutí dílčích lan svazových vodičů.

Podstatná část práce je soustředěna na výpočet případových studií na simulacích. Pro srovnání jsou uvedeny výstupy v ustáleném stavu. Klíčovou část tvoří výpočty dynamického chování lana při pádu námrazku z jeho části. Tato simulace je dále rozšířena na pád námrazku v jednom poli a analýzu ovlivnění sousedních polí. Dále je analyzován vliv napínacích sil a elektrického proudu na kontrakci svazkového vodiče.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mechanika venkovního vedení, řetězovka, prutový model, struna, působení klimatických podmínek na venkovní vedení, tančení vodičů.