

Ing. Roman Gogola

Autoreferát dizertačnej práce

POČÍTAČOVÉ MODELOVANIE KMITANIA SILOVÝCH VODIČOV

na získanie

akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Elektroenergetika

v študijnom odbore

5.2.30. elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 07.07.2016

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Roman Gogola

Autoreferát dizertačnej práce

POČÍTAČOVÉ MODELOVANIE KMITANIA SILOVÝCH VODIČOV

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 07.07.2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Oddelení aplikovanej mechaniky a mechatroniky ÚAMT Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Roman Gogola**

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Justín Murín, DrSc.**

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Pavel Élesztös, PhD.**

Strojnícka fakulta STU v Bratislave
Námestie slobody 17, 812 13 Bratislava

Ing. Ján Glatz, PhD.

Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a.s.
Mlynské nivy 59/A, 824 84 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 31. 08. 2016 o h.

Na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
Dekan FEI STU

POČÍTAČOVÉ MODELOVANIE KMITANIA SILOVÝCH VODIČOV

Ing. Roman Gogola

Abstrakt

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá problematikou počítačového modelovania zavesených lanových vodičov a následnými simuláciami ich odozvy na statické a dynamické namáhanie. V úvodných častiach práce je uvedený prehľad používaných lanových vodičov na prenos elektrickej energie a materiálov používaných na ich výrobu. Sú špecifikované spôsoby zavesenia lanových vodičov medzi dvoma podpernými bodmi a v kotevných úsekoch, ako aj možné spôsoby zaťaženia a faktory vplývajúce na vznik kmitania lanových vodičov. Je spracovaný rozbor súčasného stavu riešenia danej problematiky vo svete a na Slovensku.

Hlavná časť práce je zameraná na homogenizáciu materiálových vlastností lanových vodičov vzhľadom na to, že prierez lanového vodiča je heterogénny. Je prezentovaná homogenizačná metóda založená na rozšírení teórie laminátov, resp. multivrstvových materiálov prierezu lana. Je uvedený výpočet efektívnych modulov pružnosti pre ťah-tlak, ohyb a krútenie. Taktiež sú uvedené vzťahy pre výpočet efektívnych zotrvačných síl a momentov vstupujúcich do dynamických analýz. Sú uvedené MKP rovnice nového 3D nosníkového konečného prvku, ktorý bol modifikovaný pre špecifické analýzy lán. Sú prezentované MKP modely jednoduchého, dvojzväzkového i trojzväzkového lana určených pre statické a dynamické výpočty. Sú prezentované výsledky numerických analýz lán pomocou nového konečného prvku (statická a modálna analýza), a pre porovnanie dosiahnutých výsledkov boli vykonané rovnaké analýzy komerčným softvérom ANSYS prostredníctvom nosníkového konečného prvku BEAM188.

Problematika kmitania vodičov je orientovaná na priestorovú modálnu a prechodovú analýzu, kde sa skúmal vplyv prúdenia vzduchu okolo vodičov, námrazy i oteplenia. V prípade riešenia interakcie prúdenia vzduchu okolo prierezu vodiča sa prechodová analýza vykonala v prostredí ANSYS CFX. Sú prezentované výsledky vplyvu vetra ako aj vplyvu opadávaní námrazy na dynamickú odozvu lana a dynamické sily pôsobiace v závesoch lana na stožiar. V závere práce sú vykonané experimentálne merania na vybranom lane, namerané výsledky sa porovnávajú a vyhodnocujú namerané výsledky s výsledkami z numerických analýz.

Kľúčové slová: lanový vodič, homogenizácia materiálových vlastností, metóda konečných prvkov, nový 3D nosníkový konečný prvok, počítačové modelovanie a simulácia, elastostatika a elastodynamické kmitanie vodičov, experimentálne meranie

COMPUTATIONAL MODELING OF VIBRATION OF POWER LINES

Ing. Roman Gogola

Abstract

This thesis is based on the computational modeling of overhead power lines and on simulations of their response to static and dynamic loadings. An overview of the conductors, which are used for the electric transmission and the materials used for them is presented. There the overhead power lines are specified, between the points of attachment and in multi-spans, possible loads and factors that can cause vibration of the overhead power lines. Current state of research on this issue in world and in Slovakia is presented as well.

The main part of the thesis is aimed to the homogenization of the material properties of conductors used for overhead power lines due to the fact, that the cross-section of the conductor is heterogenous. The homogenization method based on the laminate theory - multilayer material cross-section of the conductor is presented that can be used for calculation of effective elastic modulus for tension-compression, bending and torsion. There the FEM equations for new 3D beam finite element are presented which are modified for the specific simulations of the overhead power lines. The finite element models for simple, double and triple bundled power lines for static and dynamic analyses are presented. The numerical analyses of the overhead power lines are done by means of this new 3D beam finite element (elastostatic and modal analyses). Obtained results are compared with the ones obtained using the commercial software ANSYS via the beam element - BEAM188.

The issue of vibration of overhead power lines is focused on spatial modal and transient analyses, where the impact of air flow around the conductor cross-section and ice-shedding from the power line and heating is examined. In the case of air flow around the conductor, transient analyses were performed using ANSYS CFX. The results of numerical simulations that represents the interaction of air flow of the wind around the conductor, the impact of ice-shedding from the power lines to the dynamic response and dynamic forces in the points of attachment are presented. The last part of this work is aimed to the experimental measurements of eigenfrequencies of the chosen type of conductor, and the measured results were compared with the results from the numerical analyses.

Keywords: power line, homogenization of material properties, finite element method, new 3D beam finite element, computational modeling and simulation, elastostatics and elastodynamic vibration of power lines, experimental measurements

Obsah

Úvod.....	6
1 Vodiče a laná vonkajších elektrických vedení	6
1.1 Materiál a konštrukcia vodičov vonkajších elektrických vedení.....	7
1.2 Typy vodičov.....	8
2 Dynamické namáhanie vodičov.....	10
3 Rešerš súčasného stavu riešenia problematiky kmitania lanových vodičov	11
4 Ciele doktorandskej dizertačnej práce.....	11
5 Homogenizácia materiálových vlastností lanového vodiča.....	12
6 Nový 3D nosníkový konečný prvok na numerické analýzy lanových vodičov.....	16
7 Modelovanie zaťaženia a kmitania lanových vodičov	17
7.1 Modálna analýza zavesených vodičov	19
7.2 Vyšvihnutie lanového vodiča počas opadávania námrazy	21
7.3 Vplyv vetra na lanový vodič pri obtekaní okolo prierezu vodiča.....	22
8 Experimentálne merania	28
Prínosy dizertačnej práce a ďalšie smery rozvoja.....	31
Záver.....	32
Zoznam použitej literatúry	35
Zoznam publikačnej činnosti autora	38

Úvod

Najdôležitejšiu úlohu v systéme dopravy elektrickej energie zohrávajú vonkajšie elektrické vedenia (VEV), ktoré sú nedeliteľnou súčasťou prenosových a distribučných sústav vo svete a v SR. Bezpečný prenos a distribúcia elektrickej energie ku konečnému spotrebiteľovi je jednou z hlavných priorít distribútorov tohto druhu energie. V prípade nesprávneho návrhu konštrukcií VEV sa môžu časom objaviť závažné poruchy, ktoré v nepriaznivom prípade spôsobia prerušenie dodávky elektrickej energie ku konečným spotrebiteľom. Navyše, v blízkej budúcnosti sa očakáva aj rapídny rozmach e-mobility a bude nutné zabezpečiť bezporuchové dodávky elektrickej energie k nabíjacím staniciam pre elektromobily.

Materiály používané pri konštrukcii silových vodičov, ktoré sa v technickej praxi nazývajú lanové vodiče, sa musia vyznačovať vysokou materiálovou pevnosťou a spoľahlivosťou. Dynamické zaťažovanie lanových vodičov VEV má nepriaznivý vplyv na životnosť a spoľahlivosť prenosovej a distribučnej sústavy. Pri projektovaní a návrhu vedení je nutné vykonať rôzne analýzy a simulácie (ako analytické tak aj numerické), čím sa overí spoľahlivosť celého navrhovaného vedenia. Trasovanie vedení je komplikované, nakoľko prechádza rôznymi oblasťami s rôznymi klimatickými podmienkami, ktoré majú vplyv na priehyb vodičov a osovú silu v zaveseniach. Lanové vodiče sú sústavne zaťažené vlastnou tiažou a ďalšími vplyvmi akými sú zmena teploty lana, zmena teploty okolia, sústredená zaťaž iných telies, ktoré sa nachádzajú na lanách (letecké výstražné markery, montážne lávky, tlmiče vibrácií a pod.), prúdenie vzduchu okolo lanových vodičov. Práve prúdenie vzduchu okolo lanových vodičov a samotné prúdenie patria do náročne vypočítateľných fyzikálnych javov. Pri pôsobení vetra na prierezovo nesymetricky omrznutý lanový vodič vzniká kmitanie vodiča s veľkými amplitúdami a malými frekvenciami, známy jav ako galloping, pričom tento stav môže poškodiť nielen samotný lanový vodič ale aj armatúry a samotný stožiar, na ktorom je vodič uchytený. Pre vyššie uvedené prípady je potrebné poznať mechanické a elektrické vlastnosti vodičov, aby sa už pri projektovaní mohli zobrať do úvahy a naprojektované vedenie bolo dostatočne odolné voči všetkým možnými klimatickým podmienkam, čím sa môže predchádzať rôznym poruchám na vedeniach.

Samotné modelovanie a simulácia reálnych konštrukcií lanových vodičov je komplikované a náročné aj na výpočtový čas a výpočtové výkony. V praxi sa preto využívajú techniky na zjednodušenie konštrukcie - tzv. homogenizačné metódy na modelovanie kompozitných materiálov, pri ktorých sa do zjednodušenej konštrukcie zahŕňajú materiálové vlastnosti všetkých použitých materiálov. Tieto homogenizačné metódy boli použité aj v predkladanej dizertačnej práci. Do zjednodušených modelov vybraných lanových vodičov sa zahrnuli všetky materiálové vlastnosti a všetky faktory, ktoré vplývajú na vodič.

V dizertačnej práci sa na riešenie problematiky kmitania využili dva rozdielne prístupy. Prvým prístupom je využitie nového 3D nosníkového konečného prvku, ktorý bol upravený tak, aby sa mohol použiť na riešenie elastostatických a elastodynamických analýz zavesených lanových vodičov a kotevných úsekov. Efektivita a presnosť nového 3D nosníkového konečného prvku je v práci prezentovaná na numerických simuláciách a experimentálnych meraniach. Druhým prístupom riešenia bolo využitie komerčného softvéru ANSYS.

1 Vodiče a laná vonkajších elektrických vedení

Funkčne najdôležitejšie časti VEV tvoria vodiče a laná. Po ekonomickej stránke predstavujú rozhodujúcu zložku celého vedenia. Správna voľba vodičov pôsobí nielen na náklady vedenia ale aj na konštrukciu stožiarov. V prípade pretrhnutia vodiča nastane prerušenie dodávky elektrickej energie a ďalšie nebezpečné následky. Vodiče sú počas celej doby životnosti vystavené rôznym klimatickým vplyvom ako sú [1]: dážď, námraza, zmeny teplôt a chemické vplyvy.

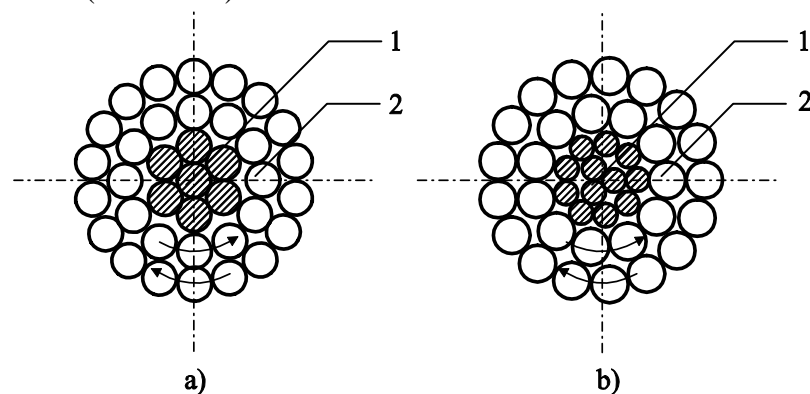
Kvôli vyššie spomenutým klimatickým vplyvom sú na vodiče a laná kladené nasledovné a často protichodné požiadavky [2]:

- a) veľká merná hmotnosť, aby ich vietor vychyľoval čo najmenej, ale naopak malá merná hmotnosť vzhľadom na montáž a vzhľadom na namáhanie stožiarov;
- b) veľký priemer vodičov, aby sa obmedzilo pôsobenie koróny (samostatný výboj medzi vodičmi, spôsobuje energetické straty, koróziu vodičov), ale naopak malý priemer aby pôsobenie vetra bolo na ne čo najmenšie;
- c) veľká mechanická pevnosť;
- d) odolnosť proti chemickým vplyvom a chveniu;
- e) mechanická odolnosť pri montáži;
- f) odolnosť pri teplotných zmenách;
- g) nízka cena.

1.1 Materiál a konštrukcia vodičov vonkajších elektrických vedení

Pre VEV, zemné laná a oznamovacie vedenia sa používajú nasledovné materiály [1, 3, 4, 5, 6]: tvrdá meď (E Cu 42 3001.31), polotvrdá meď (E Cu 42 3001.21), mäkká vyžíhaná meď (používa sa len na viazanie vodičov – E Cu 42 3001.11), hliník (Al) a jeho zliatiny (AlMgSi).

Z konštrukčného hľadiska rozlišujeme laná a drôty. Drôty sú jednoduché vodiče kruhového prierezu, sú súvislé a jednoliate. Spojením viacerých drôtov a ich stočením do skrutkovice dostávame lano [2, 7]. Laná sú ohybnejšie a v prevádzke bezpečnejšie. Majú rovnomernejšiu konštrukciu jednotlivých tenších drôtov, a tým je zaistená väčšia bezpečnosť. Ťahy sa lepšie prenášajú lanami ako drôtmi. Laná sa môžu rozdeliť na [2]: sústredené (Obr. 1.1 a) a nesústredené (Obr. 1.1 b).



Obr. 1.1 Konštrukcia sústredených a nesústredených lán [2]: 1 – ocelové jadro, 2- hliníkový obal

Zlaňovanie drôtov sa vykonáva podľa presne stanovených noriem a pravidiel [8] vo viacerých vrstvách, pričom drôty v jednotlivých vrstvách sa musia stáčať proti sebe a musia k sebe dobre priliehať. Jednotlivé vrstvy sú striedavo pravotočivé a ľavotočivé (Obr. 1.1), vonkajšia vrstva je vždy pravotočivá so stúpaním vinutia drôtov, ktoré sa pohybuje v rozmedzí 10 až 13- násobku priemeru drôtov [2, 8, 9].

1.2 Typy vodičov

Oceľové laná

Laná z oceľových pozinkovaných drôtov sa používajú na kotvenie, na zemné vodiče a na činné vodiče prechodov cez veľké križovatky v mestách. Vyrábajú sa z oceľových pozinkovaných, prípadne hliníkom oplátovaných drôtov. Elektrická vodivosť oceľových lán je veľmi nízka, ale mechanická pevnosť je približne 1000 – 1200 MPa [2, 3, 5].

Medzi najmodernejšie oceľové laná patrí lano typu **ACS** (Aluminium Clad Steel) – lanový vodič z ocele plátovanej hliníkom [2]. Výhodou lanového vodiča ACS v porovnaní s klasicky galvanizovanou oceľou je nižšia hmotnosť, nižšie elektrické straty, vynikajúce antikoročné vlastnosti (podobné s hliníkovými vodičmi ekvivalentného priemeru) a vyššia konduktivita ako pri klasických typoch lán pri rovnakom mechanickom namáhaní [2].

Hliníkové vodiče a ich zliatiny

Hliníkové drôty sú vyrábané ťahaním a používajú sa aj priamo na výrobu jednomateriálových hliníkových lán, komprimovaných a oceľovo-hliníkových lán [5]. Drôty sa vyrábajú z elektrovodného hliníka – Al 99,5% v priemeroch 1,6 – 11,5 mm [2]. Hliník je lacná a dostupná surovina s malou pevnosťou. Najväčšie dovolené namáhanie je 90 MPa. Voči atmosférickým vplyvom je odolný, ale pri pôsobení alkálií veľmi rýchlo koroduje. Hliníkové laná sa vyrábajú v dvoch prevedeniach [2, 3, 5, 7]:

- **AAC** (All Aluminium Conductor) – celohliníkové laná s dobrou elektrickou vodivosťou a odolnosťou voči atmosférickým vplyvom
- **AAAC** (All Aluminium Alloy Conductor) – laná z hliníkových zliatin, s menšou vodivosťou akú má samotný hliník ale s lepšími mechanickými vlastnosťami. Najčastejšie sa používa zliatina Aldrey (99% Al, 0,5% Mg, 0,5% Si) [6], aluflex (99% Al, 0,7% Fe, 0,2% Mg, 0,1% iné.)

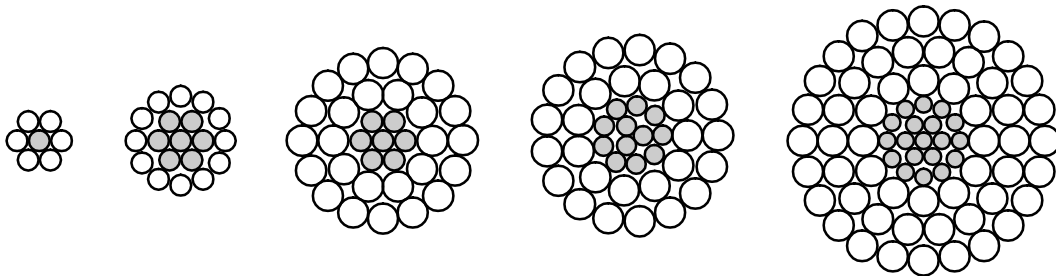
V SR sa používajú hliníkové laná s oceľovou dušou (AlFe). Hliníkové zliatiny s prvkami ako meď, zinok, mangán, kremík či horčík sú omnoho ľahšie ako AlFe laná [5] (pozri kombinované laná ACSR). Tak isto vykazujú veľmi dobré antikoročné vlastnosti. V súčasnosti sa už bežne využívajú vo vyspelých štátoch, kde nahradili predtým používané AlFe laná. V SR môžu byť použité pri projektovaní nových vedení alebo pri rekonštrukciách VEV [2].

Kombinované laná

Laná sa vyrábajú z drôtov rôznych materiálov. Kombinované laná majú širšie využitie, hlavne kvôli zvýšeniu mechanickej pevnosti a kvôli zmenšeniu priemeru lán, čím sa

zabraňuje vzniku koróny [2, 3, 4, 5]. Z kombinácie rôznych materiálov sa v praxi najviac osvedčili [2]:

- **ACSR** (Aluminium Conductor Steel Reinforced) – hliníkové laná s oceľovou dušou, známe aj ako AlFe laná (Obr. 1.2). Výhodou je veľmi dobrá elektrická vodivosť hliníka, veľká pevnosť ocele, menší priemer ako medené alebo hliníkové laná s rovnakou vodivosťou [2, 3, 4]. Nevýhodou AlFe lán je náchylnosť na chvenie, preto je nutné používať potrebné ochranné prostriedky na tlmenie vybudeneho chvenia (tlmiče vibrácií) [7].
- **AACSR** (Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced) – hliníkové zliatinové laná vystužené oceľou. Majú vlastnosti zliatiny, mechanické vlastnosti sú vylepšené oceľovou dušou [2, 7]. Používa sa ako vodič vzdušných prenosových a distribučných vedení. Tento typ vodiča ponúka optimálnu pevnosť pre navrhované vedenie, môže mať rôzne oceľové jadro s požadovanou pevnosťou lana bez zníženia dovoleného prúdového zaťaženia [2].



Obr. 1.2 Rôzne konštrukcie hliníkového lana s oceľovým jadrom ACSR [10]

Medzi moderné kombinované laná patrí lano **ACCC** (Aluminium Conductor Composite Core) [5, 9, 11]. Je to lano s hladkým povrchom, oceľové jadro sa nahradilo kompozitom uhlíka a sklenených vlákien a obal sa skladá z hliníka, ktorý má kompaktný tvar. Kým kompozitné jadro je nevodivé, je podstatne ľahšie a pevnejšie ako oceľové. Umožňuje to pri výrobe lana použiť o 28% viac hliníka ako pri ACSR lanách [11], čím sa zvýši aj prenosová schopnosť lana. Spomínané lano bolo vyvinuté z dôvodu, aby sa zvýšila účinnosť, kapacita a spoľahlivosť elektrickej prenosovej a distribučnej siete. ACCC lano (Obr. 1.3) je zaradené aj do kategórie vysokoteplotných vodičov.

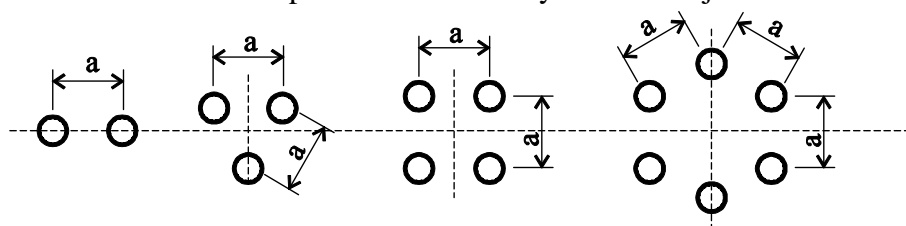


Obr. 1.3 ACCC lano [12]

Zväzkové vodiče

V dnešnej dobe prišlo k častejšiemu využívaniu zväzkových vodičov a to najmä pri výstavbách vedení s najvyššími napätiami. Vodič pozostáva z viacerých mechanicky aj elektricky paralelne zapojených jednoduchých lán (najmä AlFe), umiestnených do vrcholov pravidelného trojuholníka (mnohouholníka), ktoré z hľadiska montáže tvoria jednotný zväzok. Takéto usporiadanie zvyšuje hlavne elektrické vlastnosti vedení (kapacitu), znižuje indukčnosť a elektrické namáhanie na povrchu lán [1, 2, 5]. Dvojzväzkové vodiče sa

využívajú pri vedeniach s napätiami 110 kV až 220 kV, trojzväzkové vodiče pri vedeniach s napätiami do 400 kV. Možné usporiadanie zväzkových vodičov je znázornené na Obr. 1.4.



Obr. 1.4 Možné usporiadanie zväzkových vodičov

Ďalšími typmi lanových vodičov sú vysokoteplotné lanové vodiče, duté lanové vodiče, antivibračné laná a laná odolné voči vibráciám [2, 4, 5].

2 Dynamické namáhanie vodičov

Počas prevádzky sú vonkajšie elektrické vedenia sústavne vystavované dynamickým zaťaženiám. Medzi dynamické zaťaženia zaradujeme:

- kmitanie vodiča spôsobené vetrom
- pôsobenie vetra na nesymetricky omrznutý vodič (galloping)
- vyšvihnutie vodiča po opadnutí námrazy

Najviac ovplyvňujúcim činiteľom dynamiky lán VEV je tvar terénu, na ktorom je vonkajšie vedenie postavené. Najkritickejšie sú otvorené ploché terény, kde vzduch a vietor stabilne prúdia. V horských alebo členitých terénoch mestských oblastí sa prúdenie vzduchu a vetra čiastočne mení a obmedzuje [1, 2]. Ďalšími dôležitými faktormi sú: charakter vetra (rovnomerný, nárazový), výška vodičov nad zemou (čím vyššie je vodič, tým je vietor rovnomernejší) a rozpätie (pri zväčšovaní rozpätia stúpa aj počet vibračných polvln). V súčasnosti sa vibrácie na lanách VEV a zväzkových vodičoch potláčajú aktívnou a pasívnou ochranou. Medzi aktívnu ochranu sa zaradujú antivibračné laná, laná odolné voči vibráciám, tlmiče vibrácií, napríklad typu Stockbridge a tlmiace rozperky zväzkových vodičov [2, 5].

Medzi pasívne ochrany sa zaradujú opatrenia, ktorými sa znížia výsledné namáhania, ktoré vznikajú počas kmitania. Medzi tieto opatrenia sa zaraduje aj použitie festonov (laná, ktoré sú voľne zavesené na stranách svorky, sú pripevnené na miestach na vodiči, kde boli spozorované vibrácie), použitie výkyvných svoriek na kmitajúcom vodiči alebo nosnej svorky so špirálou s gumovou vložkou [13].

Pre vznik rezonancie je základnou podmienkou, aby sa budiaca frekvencia f_b [Hz] rovnala vlastnej frekvencii f_{vl} [Hz] vodiča, čo je vyjadrené vzťahom:

$$f_b = f_{vl} \quad (2.1)$$

kde budiaca frekvencia, ktorá je závislá od rýchlosti prúdiaceho vzduchu a priemeru vodiča je potom daná vzťahom [14]:

$$f_b = Sr \frac{v_{vzd}}{d} \quad (2.2)$$

kde Sr [-] je Strouhalovo číslo. Je to podobnostné bezrozmerné číslo, dáva do súvisu frekvenciu vytvárania vírov za prekážkou, charakteristický rozmer a rýchlosť prúdenia. V prípade prúdenia vzduchu okolo lanového vodiča sa Strouhalovo číslo pohybuje v rozmedzí od 0,185 až 0,21 [15]. Hodnota Strouhalovho čísla sa určuje podľa Reynoldsovho čísla Re [-] [16].

V praxi sa pri navrhovaní a konštruovaní lán počítajú len vlastné frekvencie analytickými metódami vo zvislej rovine. Výpočet priestorového kmitania vodičov je analytickými metódami veľmi náročný.

3 Rešerš súčasného stavu riešenia problematiky kmitania lanových vodičov

Kmitanie lán vonkajších elektrických vedení, jeho vplyv, možnosti obmedzenia a tlmenia kmitania lán sa rieši vo všetkých štátoch rôznymi spôsobmi a metódami, keďže kmitanie má nepriaznivý vplyv na životnosť nielen lanového vodiča, ale aj celého prenosového a distribučného vedenia. Danou problematikou sa zaoberajú ako technické univerzity, tak aj veľké spoločnosti s pôsobením v oblasti elektroenergetiky, konštrukciou elektrických vedení vo viacerých krajinách. V súčasnosti predstavujú numerické výpočty jeden z najdôležitejších inžinierskych nástrojov, ktoré sa uplatňujú aj pri riešení modelovania kmitania lanových vodičov.

V literatúre je možné nájsť mnoho publikácií zaoberajúcich sa problematikou kmitania zavesených lanových vodičov. Vo svete sa napríklad riešia vibrácie a galloping lanových vodičov) [16], vlastné tlmenie lanových vodičov pri rôznych konštrukciách drôtov [17], spôsoby tlmenia lanových vodičov [14], semi-aktívne riadenie tlmenia vynúteného kmitania lanových vodičov pomocou laditeľných tlmičov vibrácií za pomoci algoritmu vytvoreného v programe MATLAB [18], dynamické správanie sa zavesených vodičov počas opadávania námrazy [19], vibráciami zväzkových vodičov s veľkými amplitúdami pri veľkých rozpätiach počas nárazového vetra [20], modelovanie zavesených lanových vodičov pre napätostné analýzy počas návrhu a pri podmienkach trecieho opotrebovania [21] a skúmanie vplyvu vetra na vibračný koeficient pre systémy stožiar - lanový vodič [22].

Na Slovensku sa problematikou kmitania zavesených vodičov zaoberá kolektív Oddelenia aplikovanej mechaniky a mechatroniky ÚAMT, Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, hlavne CFD simuláciami prúdenia vzduchu okolo prierezu lanového vodiča [23], v spolupráci s pracovníkmi ÚEAE optimalizáciou ohrevu kombinovaného zemniaceho lana na vedení ZVN [24] a kolektív pracovníkov Technickej Univerzity v Košiciach, kde sa zaoberajú skúmaním dynamických javov na vodičoch vonkajších silových vedení - vplyvom rozloženia námrazy na vyšvihnutie lanového vodiča [25].

4 Ciele doktorandskej dizertačnej práce

Z predchádzajúcich kapitol vplynuli nasledovné tézy dizertačnej práce:

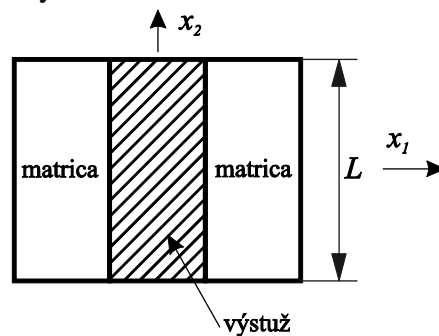
1. Zostavenie matematicko-fyzikálneho modelu voľného a vynúteného kmitania lanových vodičov pre elastodynamickú analýzu.

2. Modifikácia nového 3D nosníkového konečného prvku a jeho aplikácia na modálnu analýzu lanových vodičov.
3. Aplikácia nosníkového konečného prvku obsiahnutého v komerčnom softvéri ANSYS na elastodynamickú analýzu lán a porovnanie dosiahnutých výsledkov s výsledkami získanými novým 3D nosníkovým konečným prvkom.
4. Experimentálne overenie výsledkov numerických simulácií na vybranom lane.
5. Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov riešenia a návrh postupu ich využitia v technickej praxi.

5 Homogenizácia materiálových vlastností lanového vodiča

Navrhnuť model lanového vodiča, ktorý by identicky reprezentoval geometriu reálneho vodiča, je veľmi náročná úloha a najmä z časového hľadiska tvorby modelu ako aj realizácie samotnej simulácie je efektívnejšie pracovať so zjednodušením (napr. geometriou). To je dôvod, prečo sa využíva homogenizácia pre výpočet efektívnych materiálových vlastností.

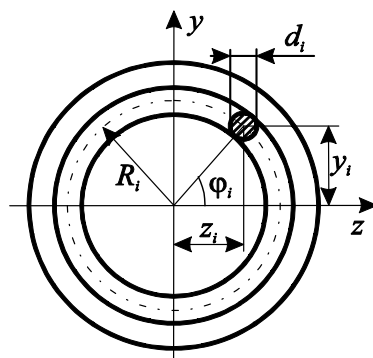
Na výpočet efektívnych materiálových vlastností heterogénnych materiálov ako sú kompozity, FGM (funkčne gradované materiály), biomateriály, sa používajú numerické metódy a simulácie na mikroštruktúrnych vzorkách. V literatúre sa takáto vzorka označuje ako reprezentatívny objemový element (RVE). Element hrá dôležitú úlohu pri analýze spomínaného materiálu. Efektívne vlastnosti materiálu v takomto materiáli závisia na rozložení jednotlivých fáz RVE [26]. Typický RVE pre zmiešavacie pravidlo, ktorý sa skladá z matrice a výstuže je znázornený na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 RVE pre zmiešavacie pravidlo [27]

Zmiešavacie pravidlo je jednou z metód modelovania heterogénnych materiálov. Na Oddelení aplikovanej mechaniky a mechatroniky Ústavu automobilovej mechatroniky FEI STU v Bratislave sa problematikou numerického výpočtu FGM – vývoja nových konečných prvkov zaoberá kolektív okolo prof. Murína. Bolo vylepšené a rozšírené zmiešavacie pravidlo [28], ktoré je často využívané pri modelovaní a homogenizácii vlastností FGM. Boli odvodené dve rôzne metódy na modelovanie FGM nosníka so spojitou zmenou materiálových vlastností – metóda vrstiev a metóda priamej integrácie [29]. Tieto spomínané homogenizačné techniky môžu byť použité pre homogenizáciu a výpočet efektívnych materiálových vlastností AlFe lana, keďže konštrukcia lana je nehomogénna (je vytvorená z dvoch rozdielnych materiálov).

Efektívny modul pružnosti pre ťah, šmyk, ohyb a krútenie sa vypočíta z podmienok tak, aby príslušná tuhosť prierezu reálnej konštrukcie sa rovnala tuhosti homogenizovaného prierezu.



Obr. 5.2 Princíp výpočtu kvadratického momentu prierezovej plochy [30]

Využitím Steinerovej vety [13, 54] sa vypočíta kvadratický moment prierezovej plochy lana, ktorý je znázornený na Obr. 5.2, kde R_i [m] je rozstupový polomer kružnice, d_i [m] je priemer i -tého drôtu v lane, φ_i [°] určuje obvodové umiestnenie i -tého drôtu v lane, y_i a z_i [m] určujú vzdialenosť i -tého drôtu od stredu prierezu lana. Vzdialenosti y_i [m] a z_i [m] vypočítame podľa vzťahov (5.1) a (5.2) [13, 54]:

$$y_i = R_i \sin \varphi_i \quad (5.1)$$

$$z_i = R_i \cos \varphi_i \quad (5.2)$$

Následne kvadratický moment prierezovej plochy i -tého drôtu vzhľadom na os y I_{yi} [m⁴] sa vypočíta podľa vzťahu (5.3), a vzhľadom na os z I_{zi} [m⁴] podľa vzťahu (5.4) [13, 53, 54]:

$$I_{yi} = \frac{\pi d_i^4}{64} + z_i^2 \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (5.3)$$

$$I_{zi} = \frac{\pi d_i^4}{64} + y_i^2 \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (5.4)$$

Zo vzťahov (5.3) a (5.4) je možné vypočítať polárny moment zotrvačnosti i -tého drôtu podľa vzťahu [13, 54, 55]:

$$I_{pi} = I_{yi} + I_{zi} \quad (5.5)$$

Pomocou vzťahov (5.3) a (5.4) je možné vypočítať maximálny modul pružnosti lana pre ohyb (vychádza sa z predpokladu, že všetky vrstvy oceľových a hliníkových drôtov sa po sebe z dôvodu vysokého trenia neposúvajú) okolo osi y $E_{L\max}^{M_yH}$ [MPa] a ohyb okolo osi z $E_{L\max}^{M_zH}$ [MPa] podľa nasledujúcich vzťahov [2, 52, 56]:

$$E_{L\max}^{M_yH} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i I_{yi}}{\sum_{i=1}^n I_{yi}} \quad (5.6)$$

$$E_{L_{\max}}^{M_z H} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i I_{zi}}{\sum_{i=1}^n I_{zi}} \quad (5.7)$$

kde E_i [MPa] je modul pružnosti pre i -ty drôt v lane. Minimálny modul pružnosti lana pre ohyb $E_{L_{\min}}^{M_y H} = E_{L_{\min}}^{M_z H}$ [MPa] (vychádza sa z predpokladu, že všetky vrstvy oceľových aj hliníkových drôtov sa vzájomne po sebe posúvajú bez trenia) sa vypočíta pomocou vzťahu [2, 53]:

$$E_{L_{\min}}^{M_y H} = \frac{\frac{\pi}{64} (n_{Fe} d_{Fe}^4 E_{Fe} + n_{Al} d_{Al}^4 E_{Al})}{\sum_{i=1}^n I_{yi}} \quad (5.8)$$

$$E_{L_{\min}}^{M_z H} = \frac{\frac{\pi}{64} (n_{Fe} d_{Fe}^4 E_{Fe} + n_{Al} d_{Al}^4 E_{Al})}{\sum_{i=1}^n I_{zi}} \quad (5.9)$$

kde n [-] je počet drôtov a indexy Fe a Al reprezentujú typ drôtu. V praxi sa efektívny modul pružnosti pre ohyb lanového vodiča okolo osi y $E_L^{M_y H}$ [MPa] vypočíta ako priemerná hodnota zo vzťahov (5.6) a (5.8), efektívny modul pružnosti pre ohyb okolo osi z $E_L^{M_z H}$ [MPa] sa vypočíta ako priemerná hodnota zo vzťahov (5.7) a (5.9) [2, 55]:

$$E_L^{M_y H} = \frac{E_{L_{\max}}^{M_y H} + E_{L_{\min}}^{M_y H}}{2} \quad (5.10)$$

$$E_L^{M_z H} = \frac{E_{L_{\max}}^{M_z H} + E_{L_{\min}}^{M_z H}}{2} \quad (5.11)$$

Efektívny modul pružnosti pre ťah-tlak E_L^{NH} [MPa] sa vypočíta pomocou vzťahu [52, 56]:

$$E_L^{NH} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i S_i}{S} \quad (5.12)$$

kde $S_i = \pi d_i^2 / 4$ je prierezová plocha i -tého drôtu, $S = \sum_{i=1}^n S_i$ je prierezová plocha lana.

Predpokladá sa, že efektívny modul pružnosti pre šmyk v smere y $G_{L_y}^H$ [MPa] a šmyk v smere z $G_{L_z}^H$ [MPa] sa rovná a je vyjadrený vo vzťahu [52, 53, 56]:

$$G_{L_y}^H = G_{L_z}^H = \frac{\sum_{i=1}^n k_{y,i}^{sm} G_i S_i}{k_y^{sm} \sum_{i=1}^n S_i} \quad (5.13)$$

kde $G_i = E_i/2(1 + \nu_i)$ je modul pružnosti v šmyku i -tého drôtu, ν_i [-] je Poissonova konštanta, $k_{y,i}^{sm}$ a k_y^{sm} sú korekčné faktory šmyku pre prierez i -tého drôtu a pre celkový prierez lana. Efektívny modul pružnosti v krútení $G_L^{M,H}$ [MPa] je vyjadrený vzťahom [52, 53, 56]:

$$G_L^{M,H}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n G_i I_{pi}}{\sum_{i=1}^n I_{pi}} \quad (5.14)$$

Efektívna homogenizovaná materiálová hustota pre pozdĺžne kmitanie nosníkov ρ_L^{NH} [kg.m⁻³] je vyjadrená vzťahom (5.15) a pre torzné kmitanie nosníkov $\rho_L^{M,H}$ [kg.m⁻³] je vyjadrená vzťahom (5.16) [52, 53, 56]:

$$\rho_L^{NH} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i S_i k_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5.15)$$

$$\rho_L^{M,H} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i I_{pi}}{\sum_{i=1}^n I_{pi}} \quad (5.16)$$

kde ρ_i [kg.m⁻³] je materiálová hustota i -tého drôtu a k_i [%] je nárast hmotnosti i -tého materiálu v lanovom vodiči, ktoré je spôsobené skrúcaním [8, 9]. Podrobné odvodenie uvedených vzťahov možno nájsť v [57].

Efektívna homogenizovaná Poissonova konštanta ν_L^{NH} [-] je vyjadrená vzťahom [52, 53, 56]:

$$\nu_L^{NH} = \frac{\sum_{i=1}^n \nu_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5.17)$$

kde ν [-] je Poissonova konštanta i -tého drôtu. Efektívna homogenizovaná teplotná rozťažnosť α_{TL}^H [K⁻¹] je vyjadrená vzťahom [1, 2, 58]:

$$\alpha_{TL}^H = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i E_i}{\sum_{i=1}^n S_i E_i} \quad (5.18)$$

kde α_i [K^{-1}] je teplotná rozťažnosť i -tého drôtu.

6 Nový 3D nosníkový konečný prvok na numerické analýzy lanových vodičov

Úpravou existujúcich vzťahov rovníc konečného prvku pre axiálne, torzné, ohybové zaťaženie a kombináciou ich vzťahov sa získajú MKP rovnice v lokálnom súradnicovom systéme v tvare [34, 35]:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} N_i \\ R_{yi} \\ R_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \\ N_j \\ R_{yj} \\ R_{zj} \\ M_{xj} \\ M_{yj} \\ M_{zj} \end{bmatrix}}_{\underline{F}_{loc}^e} = \underbrace{\begin{bmatrix} B_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{1,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & B_{2,2} & 0 & 0 & 0 & B_{2,6} & 0 & B_{2,8} & 0 & 0 & 0 & B_{2,12} \\ & & B_{3,3} & 0 & B_{3,5} & 0 & 0 & 0 & B_{3,9} & 0 & B_{3,11} & 0 \\ & & & B_{4,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{4,10} & 0 & 0 \\ S & & & & B_{5,5} & 0 & 0 & 0 & B_{5,9} & 0 & B_{5,11} & 0 \\ Y & & & & & B_{6,6} & 0 & B_{6,8} & 0 & 0 & 0 & B_{6,12} \\ & M & & & & & B_{7,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & M & & & & & B_{8,8} & 0 & 0 & 0 & B_{8,12} \\ & & & E & & & & & B_{9,9} & 0 & B_{9,11} & 0 \\ & & & & T & & & & & B_{10,10} & 0 & 0 \\ & & & & & R & & & & & B_{11,11} & 0 \\ & & & & & & Y & & & & & B_{12,12} \end{bmatrix}}_{\underline{B}_{loc}^e} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ \varphi_{xi} \\ \varphi_{yi} \\ \varphi_{zi} \\ u_j \\ v_{yj} \\ w_{zj} \\ \varphi_{xj} \\ \varphi_{yj} \\ \varphi_{zj} \end{bmatrix}}_{\underline{U}_{loc}^e} \quad (6.1)$$

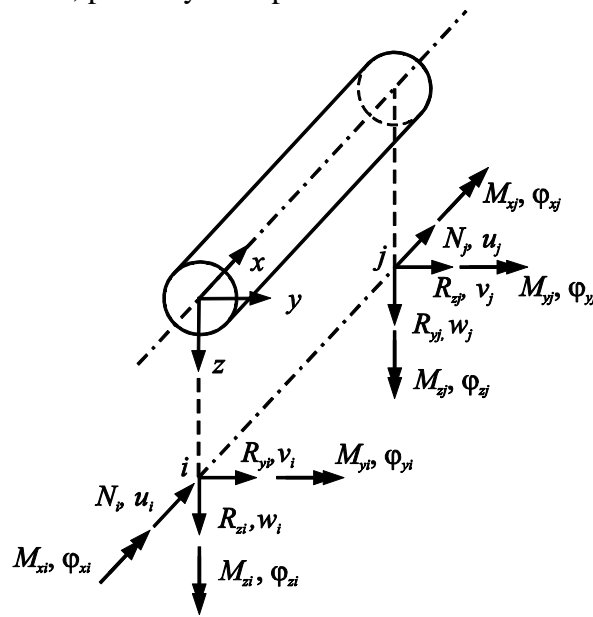
V symetrickej matici konečného prvku \underline{B}_{loc}^e sú členy $B_{i,j}$ závislé od parametrov ako kruhová frekvencia ω , osová sila N^H , spojité rozloženie hmotnosti m a ďalšie parametre. V praxi to znamená, že pre rôzne hodnoty kruhovej frekvencie sa získajú rôzne hodnoty všetkých členov $B_{i,j}$. Vektor \underline{F}_{loc}^e je vektorom lokálnych síl elementu a \underline{U}_{loc}^e je vektorom lokálnych posunutí. Nový dvojuzlový 3D konečný prvok v lokálnom súradnicovom systéme (LSS), zobrazený na Obr. 6.1, má 12 stupňov voľnosti (6 stupňov voľnosti pre každý uzol).

Do lokálnej matice konečného prvku \underline{B}_{loc}^e sú zahrnuté aj matice tuhosti \underline{K}_{loc}^e a matice hmotnosti \underline{M}_{loc}^e nosníka a sú zapísané v tvare:

$$\underline{B}_{loc}^e = \underline{K}_{loc}^e - \omega^2 \underline{M}_{loc}^e \quad (6.2)$$

Výpočet vlastných frekvencií štruktúry, na modelovanie ktorej je použitý nový 3D nosníkový konečný prvok je iteračný proces. Postupne sa frekvencia iteračne mení, až kým determinant daného systému nie je rovný nule. Frekvencia, pri ktorej je determinant nulový, je

vlastná frekvencia systému. Aby sa našli všetky vlastné frekvencie vyšetřovaného systému, je vhodné určiť veľkosť krokov, pri ktorých sa počíta determinant.



Obr. 6.1 Nový 3D nosníkový konečný prvok

Klasickou transformáciou matice \underline{B}_{loc}^e v LSS sa získa matica \underline{B}_{glob}^e v globálnom súradnicovom systéme (GSS). Transformácia má nasledovný tvar [26]:

$$\underline{B}_{glob}^e = \underline{T}^{eT} \underline{B}_{loc}^e \underline{T}^e \quad (6.3)$$

kde \underline{T}^e je transformačná matica a \underline{T}^{eT} je jej transponovaný tvar. Následne sa môžu zapísať MKP rovnice v GSS, ktoré sú v tvare:

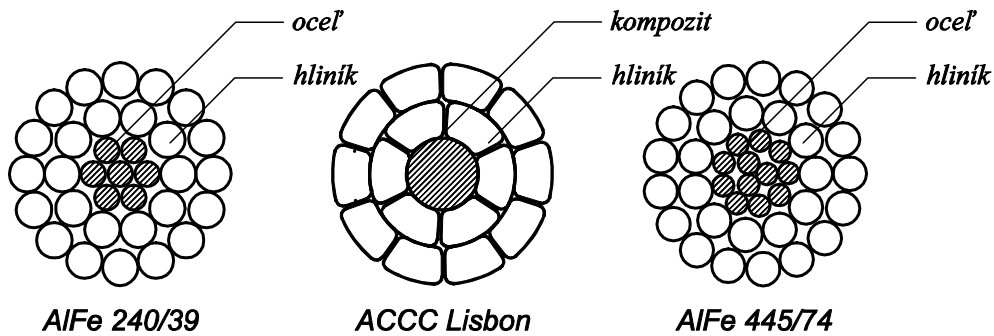
$$\underline{F}_{glob}^e = \underline{B}_{glob}^e \underline{U}_{glob}^e \quad (6.4)$$

kde \underline{F}_{glob}^e je vektor globálnych síl a \underline{U}_{glob}^e je vektor globálnych posunutí.

Výhodou nového 3D nosníkového konečného prvku je jeho možnosť použiť aj pre štruktúrnu (statickú) analýzu. Po zvolení kruhovej frekvencie, ktorá bude rovná nule $\omega = 0$, získajú sa MKP rovnice v ktorých vystupuje len matica tuhosti systému \underline{K}_{loc}^e .

7 Modelovanie zaťaženia a kmitania lanových vodičov

Pomocou MKP sa namodelovali dva symetrické oceľovo-hliníkové (AlFe) lanové vodiče, označované ako AlFe 240/39 a AlFe 445/74 a jeden kompozitno-hliníkový lanový vodič (ACCC) označovaný ako ACCC Lisbon (Obr. 7.1), ktoré boli vybrané na základe ich použitia na reálnych vedeniach na území SR a v okolitých štátoch. Parametre jednotlivých typov vybraných lanových vodičov sú uvedené v Tab. 7.1.



Obr. 7.1 Vybrané typy lanových vodičov

Tab. 7.1 Parametre lanových vodičov [1, 8, 37, 38, 39, 40]

Typ lanového vodiča	AIFe 240/39	ACCC Lisbon	AIFe 445/74
Počet Fe drôtov/priemer [mm]	1+6/2,65	-	3+9/2,80
Priemer jadra z kompozitu [mm]	-	7,11	-
Počet Al drôtov/priemer [mm]	10+16/3,45	16/4,95	11+17/4,50
Priemer vodiča [mm]	21,75	21,78	29,63
Plocha lana [mm ²]	289,66	349,27	519,20
Zaručená pevnosť [kN]	75,70	93,15	139,95

Mechanické vlastnosti použitých materiálov v jednotlivých lanových vodičoch sú zobrazené v Tab. 7.2.

Tab. 7.2 Mechanické vlastnosti použitých materiálov [39, 40, 41]

Použitý materiál	Oceľ	Hliník	Kompozit
E [MPa]	207000	69000	114000
G [MPa]	79600	26500	44000
ν [-]	0,28	0,33	0,29
ρ [kg.m ⁻³]	7780	2703	1935
α [K ⁻¹]	$11,5 \times 10^{-6}$	23×10^{-6}	$1,6 \times 10^{-6}$

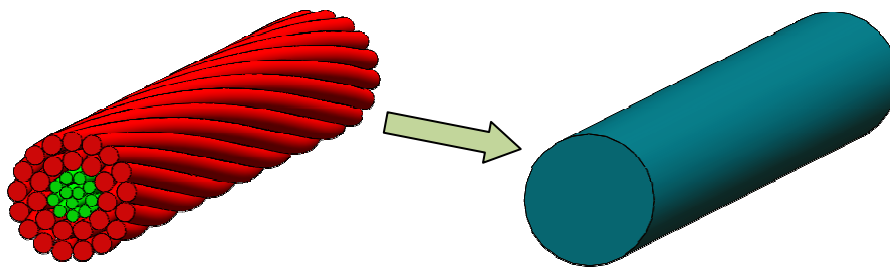
Efektívne kvadratické momenty prierezovej plochy lanových vodičov, ktoré sú vypočítané na základe vzťahov (5.3) a (5.4) sú:

- AIFe 240/39: $I_y = I_z = 8093,8 \text{ mm}^4$
- ACCC Lisbon: $I_y = I_z = 9748,2 \text{ mm}^4$
- AIFe 445/74: $I_y = I_z = 28528,3 \text{ mm}^4$

Na základe vzťahov (5.6) až (5.18) sa vypočítajú homogenizované materiálové vlastnosti lanového vodiča, ktoré sú uvedené v Tab. 7.3. Takto sa zjednoduší matematický model lanového vodiča (Obr. 7.2) a zároveň sa zefektívni výpočet sledovaných parametrov.

Tab. 7.3 Homogenizované materiálové vlastnosti lanových vodičov

Typ lanového vodiča	AlFe 240/39	ACCC Lisbon	AlFe 445/74
E_L^{NH} [MPa]	87916,09	74104,76	88639,14
$E_L^{M_yH} = E_L^{M_zH}$ [MPa]	45756,06	34838,10	47929,78
$G_{Ly}^H = G_{Lz}^H$ [MPa]	33813,88	28501,83	34091,98
$G_L^{M_xH}(x)$ [MPa]	27411,57	26761,18	27688,99
ν_L^{NH} [-]	0,323	0,325	0,323
ρ_L^{NH} [kg.m ⁻³]	3455,31	2661,09	3482,75
$\rho_L^{M_xH}$ [kg.m ⁻³]	2786,52	2690,16	2813,05
α_{TL}^H [K ⁻¹]	$19,3 \times 10^{-6}$	$19,3 \times 10^{-6}$	$19,2 \times 10^{-6}$



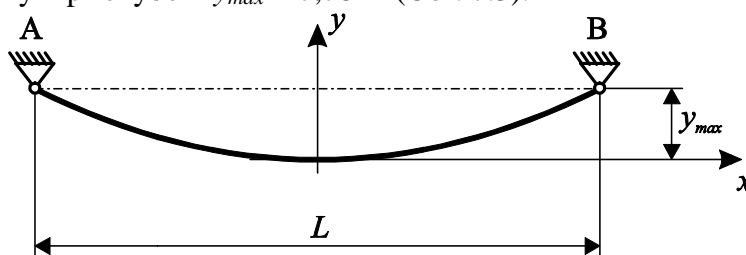
Obr. 7.2 Reálny (vľavo) a homogenizovaný (vpravo) lanový vodič AlFe 445/74

Na modelovanie zväzkových vodičov sa použili dištančné rozperky, ktorých materiálové vlastnosti sú: modul pružnosti $E = 75$ GPa, Poissonova konštanta $\nu = 0,33$, hustota materiálu $\rho = 2730$ kg.m⁻³.

7.1 Modálna analýza zavesených vodičov

V modálnej analýze sa určovali vlastné frekvencie a vlastné tvary kmitania zavesených lanových vodičov, pričom sa skúmal vplyv osových síl na vlastné frekvencie a vlastné tvary zavesených vodičov, typy zavesených lán (jedno lano príp. dvoj a trojzväzkový vodič).

Na modálnu analýzu boli vytvorené modely zavesených lanových vodičov a dvojzväzkových vodičov s dĺžkou rozpätia $L = 250$ m s využitím lanových vodičov typu AlFe 240/39 s maximálnym priehybom $y_{max} = 7,78$ m (Obr. 7.3).



Obr. 7.3 Symetricky zavesené lanové vodiče

Na modálnu analýzu vodiča typu AIFe 240/39 sa navrhli modely jedného lana a dvojzväzkových vodičov. Podobne ako v statickej analýze, na modelovanie sa použili nosníkové konečné prvky typu BEAM188. Pri modelovaní jedného lana sa na vysieťovanie celej jeho dĺžky použilo 1000 BEAM188 nosníkových konečných prvkov, pre dvojzväzkový vodič bolo použitých 2012 (2000 konečných prvkov na vysieťovanie oboch lán a 12 konečných prvkov pre dištančné rozperky). Tá istá problematika bola riešená pomocou nového 3D konečného prvku (3D K.P.) [35]. V modálnej analýze pomocou nového 3D nosníkového prvku je použitých 80 3D konečných prvkov, v prípade dvojzväzkového lanového vodiča sa použilo 172 3D konečných prvkov. Takéto zníženie počtu konečných prvkov pre prípad riešenia pomocou nového 3D nosníkového konečného prvku bolo z dôvodu, že výpočet sa robí iteračne a samotný riešič v softvéri Mathematica je pomalší než tomu je v komerčnom softvéri ANSYS. Počet prvkov sa znižoval až do hodnoty, pri ktorej bol ešte rozdiel medzi jedným a druhým prístupom riešenia najmenší. Takýto spôsob riešenia bol použitý aj pre ostatné typy zavesených lanových vodičov.

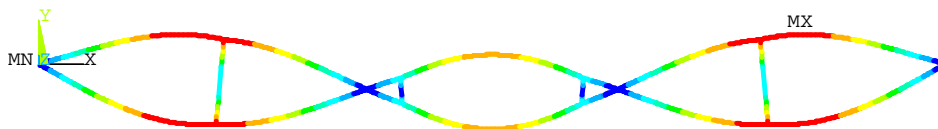
Vypočítané vlastné frekvencie pre zavesený dvojzväzkový lanový vodič typu AIFe 240/39 využitím softvéru ANSYS a pomocou nového 3D nosníkového konečného prvku sú uvedené v Tab. 7.4.

Tab. 7.4 Vlastné frekvencie symetricky zaveseného dvojzväzkového vodiča AIFe 240/39

f_{vl} [Hz]		ANSYS	3D K.P.	Δ [%]
f_1	ohybové v rovine xz	0,1987	0,1980	0,3475
f_2	ohybové v rovine xy	0,3953	0,3941	0,3149
f_3	ohybové v rovine xz	0,3971	0,3960	0,2737
f_4	ohybové v rovine xy	0,4962	0,4952	0,2056
f_5	torzné	0,5098	0,5424	-6,0134
f_6	torzné	0,5490	0,5717	-3,9657
f_7	ohybové v rovine xz	0,5962	0,5941	0,3604
f_8	ohybové v rovine xy	0,6595	0,6580	0,2263
f_9	torzné	0,7082	0,7392	-4,1875
f_{10}	ohybové v rovine xy	0,7928	0,7921	0,0886

V prípade torzných vlastných frekvencií ANSYS nepočíta so špeciálnym modulom pružnosti pre krútenie ako je tomu v prípade nového 3D nosníkového konečného prvku. Ako ukázali aj výsledky z iných analýz [34], nový nosníkový konečný prvok dáva pre krútenie presnejšie hodnoty torzných frekvencií. Pri zväzkových vodičoch je tuhosť zavesených lanových vodičov ovplyvňovaná konštrukciou dvojzväzkového vodiča (platí aj pre trojzväzkové vodiče) ako zmeneným modulom pružnosti v krútení.

Na Obr. 7.4 je zobrazený deviaty vlastný tvar symetricky zaveseného dvojzväzkového lanového vodiča.

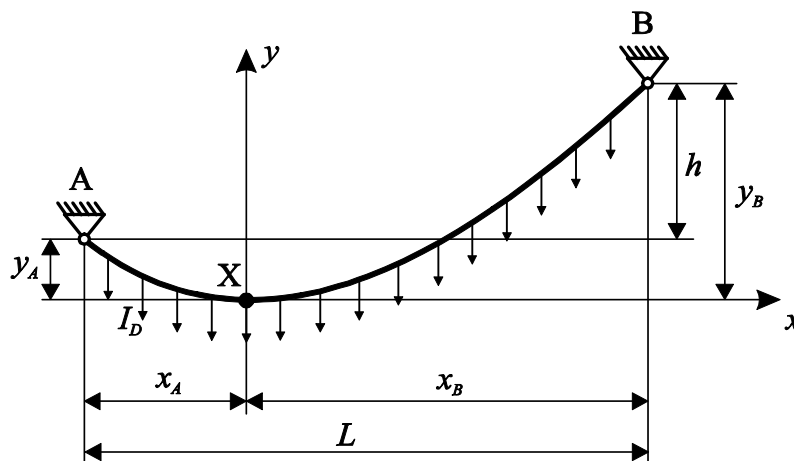


Obr. 7.4 Deviaty vlastný tvar kmitania dvojvážkového lanového vodiča AlFe 240/39

7.2 Vyšvihnutie lanového vodiča počas opadávania námrazy

V prechodovej analýze sa skúmal vplyv opadávania námrazy na vyšvihnutie jedného lanového vodiča a trojvážkového vodiča, nakoľko vyšvihnutie patrí medzi špecifické problémy v prenosových a distribučných sústavách. Počas vyšvihnutia môže dôjsť na kritických úsekoch za určitých podmienok k medzifázovému skratu, čo spôsobuje poškodenie drôtikov v lanových vodičoch a tým sa skracaie životnosť zavesených lanových vodičov a spôsobuje aj znižovanie prenosovej schopnosti daného vedenia.

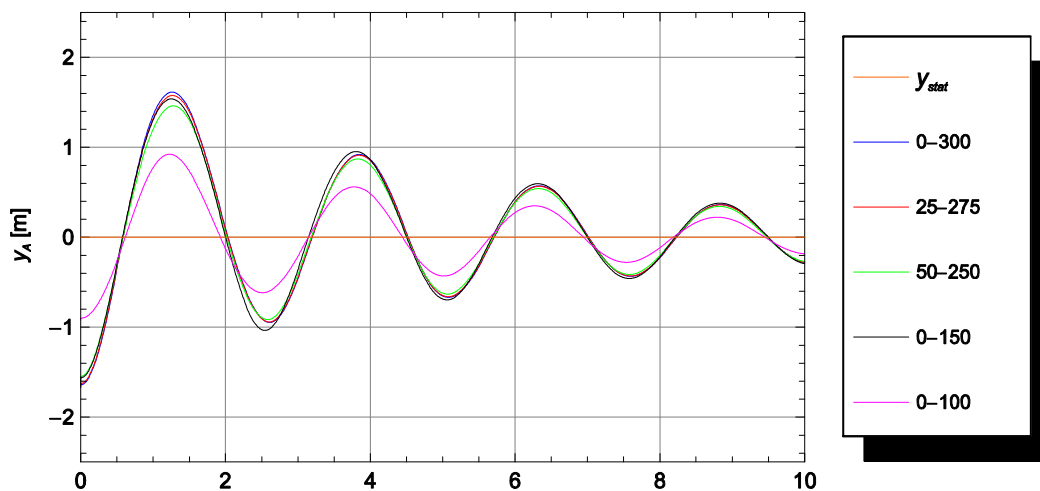
V numerických analýzach boli vytvorené modely zavesených vodičov s dĺžkou rozpätia $L = 300$ m použitím lanového vodiča typu AlFe 445/74. Lanové vodiče boli zavesené symetricky (Obr. 7.3) a nesymetricky (Obr. 7.5) s výškovým rozdielom závesných bodov $h = 10$ m.



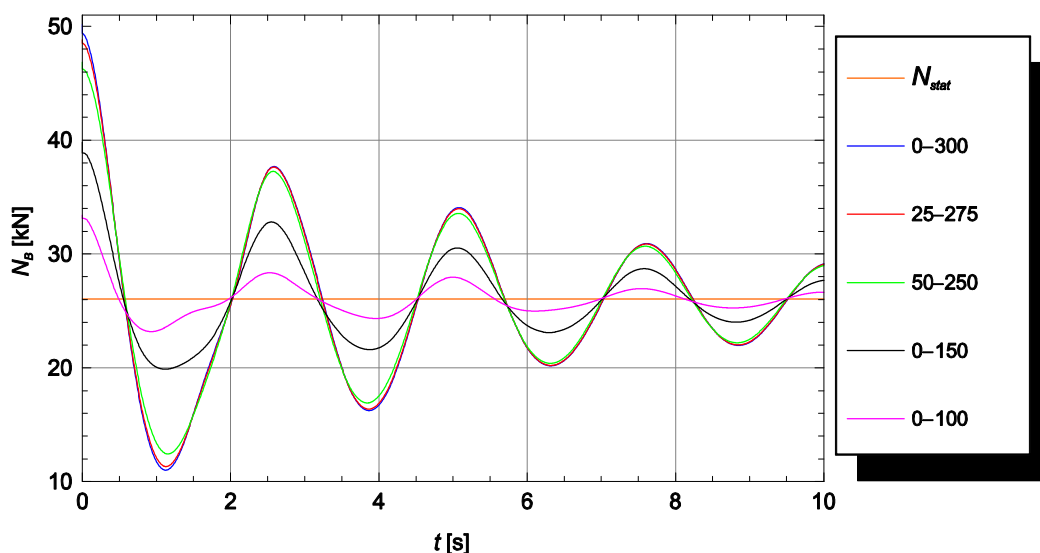
Obr. 7.5 Nesymetricky zavesený lanový vodič zaťažný námrazou

Prechodové numerické analýzy boli vykonané v programovom prostredí ANSYS, nakoľko do kódu v programovom prostredí Mathematica nebol ešte implementovaný príslušný riešič pre prechodové analýzy. V každom prípade simulácií a navrhnutých priebehov zavesených lanových vodičov bola teplota lana $T = 0$ °C. Počas numerických simulácií vyšvihnutia lanového vodiča sa uvažovalo s Rayleighovým tlmením s hodnotami koeficientov $\alpha = 0,0038$ s⁻¹ a $\beta = 0,0545$ s (bolo použité pre všetky prechodové analýzy) [42, 43, 44]. Vypočítaná navrhovaná merná hmotnosť námrazy, ktorou sa lanové vodiče zaťažovali bola $I_D = 23,83$ N.m⁻¹ [2, 45].

Počas vyšvihnutia lanového vodiča sa sledovali priebehy posunutí najnižšieho bodu priehybu (bod X) (Obr. 7.6) a osových síl (Obr. 7.7) nesymetricky zaveseného lanového vodiča v mieste najvyššieho uchytenia (bod B) počas jeho vyšvihnutia.



Obr. 7.6 Priebeh posunutí najnižšieho bodu rozpätia (bod X) nesymetrického zavesenia počas vyšvihnutia lanového vodiča

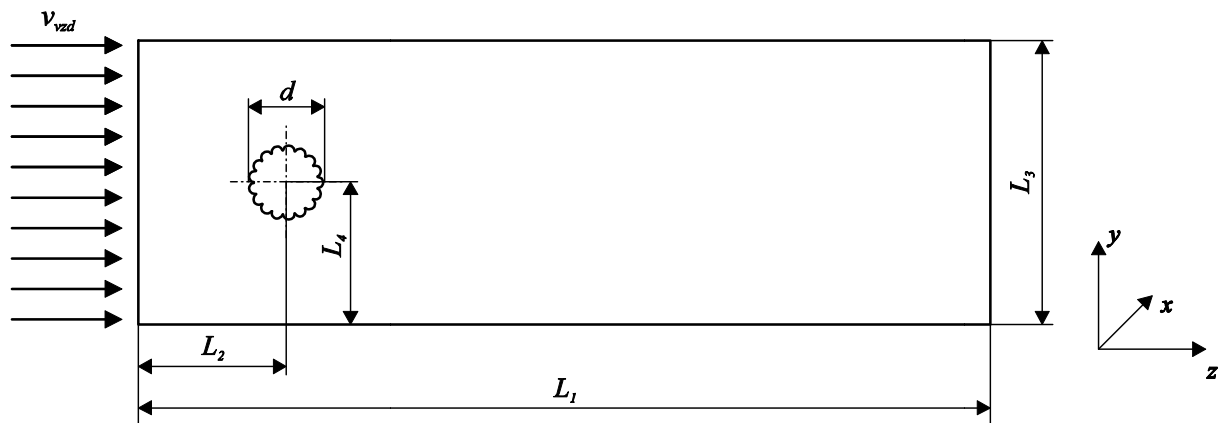


Obr. 7.7 Priebeh osových síl v nesymetricky zavesenom lanovom vodiči v mieste najvyššieho uchytenia (bod B) počas vyšvihnutia lanového vodiča

7.3 Vplyv vetra na lanový vodič pri obtekaní okolo prierezu vodiča

Na zistenie vplyvu prúdiaceho vzduchu na dynamické odozvy lanových vodičov je potrebné vykonať prechodové analýzy v príslušných programoch (napr. ANSYS CFX). Zavesené lanové vodiče sú prúdiacim vzduchom vychýľované z rovnovážnej polohy a sú budené určitou budiacou frekvenciou. Ak by sa táto budiaca frekvencia rovnala vlastnej frekvencii zaveseného vodiča, môže dôjsť k rezonancii a tým by sa ovplyvnila životnosť celej prenosovej a distribučnej sústavy.

Na modelovanie a simuláciu pôsobiacich síl na lanový vodič počas obtekania prúdom vzduchu okolo prierezu lanového vodiča bol vytvorený model (tunel) v prostredí ANSYS CFX, v ktorom na vodič pôsobil vodorovný konštantný ustálený prúd vzduchu v smere zľava doprava (Obr. 7.8).



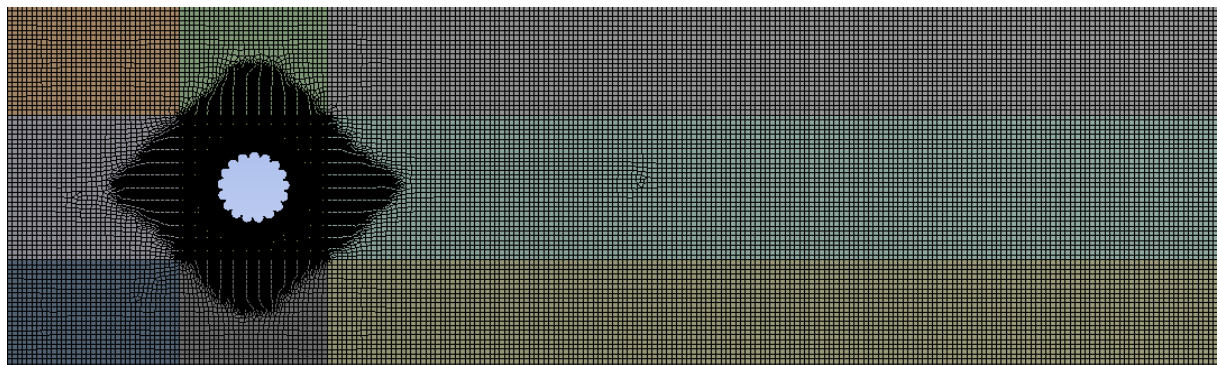
Obr. 7.8 Model prúdenia vzduchu okolo prierezu lanového vodiča

Parametre modelu sú nasledovné:

- dĺžka tunela: $L_1 = 0,6$ m
- poloha vodiča od začiatku tunela: $L_2 = 0,1$ m
- výška tunela: $L_3 = 0,15$ m
- hĺbka tunela: $b = 0,001$ m
- poloha vodiča od spodnej strany tunela: $L_4 = 0,075$ m
- priemer vodiča AIFe 445/74: $d = 0,02963$ m
- rýchlosti prúdenia vzduchu: $v_{vzd} = 1, 5, 10, 15, 20, 24, 26$ m.s⁻¹
- turbulencia vzduchu na vstupe: $turb = 5\%$

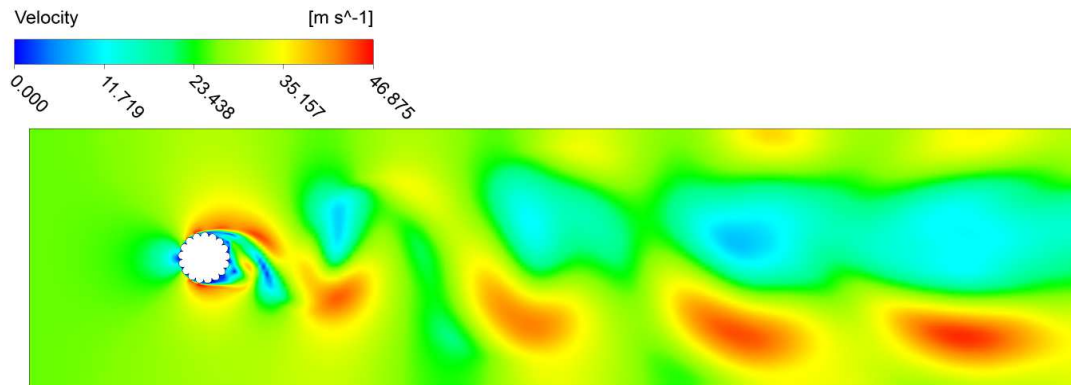
V simuláciách sa uvažovali rôzne rýchlosti vzduchu obtekajúce okolo prierezu lanového vodiča: $v_{vzd} = 1$ m.s⁻¹, $v_{vzd} = 5$ m.s⁻¹, $v_{vzd} = 10$ m.s⁻¹, $v_{vzd} = 15$ m.s⁻¹, $v_{vzd} = 20$ m.s⁻¹. Podľa normy [45] sa pre územie SR uvádzajú dve vetrové oblasti, pri ktorých sú určené základné referenčné rýchlosti vetra $v_{ref,0}$ [m.s⁻¹]. V prvej vetrovej oblasti je $v_{ref,0} = 24$ m.s⁻¹, v druhej vetrovej oblasti je $v_{ref,0} = 26$ m.s⁻¹. Aj tieto dve rýchlosti vetra obtekajúce okolo prierezu lanového vodiča sú vyšetrované v simuláciách. Numerické simulácie boli vykonané pre teplotu lana (okolia) $T = 20$ °C.

Počas riešenia dejov prúdenia sa vysoký dôraz kládol aj na kvalitnú sieť konečných prvkov (Obr. 7.9), aby sa mohli zachytiť medzné vrstvy na povrchu lanového vodiča a na okrajoch tunela. Sledovaným parametrom na medzné vrstvy bol parameter y^+ [-]. Pre prípad obtekania prúdu vzduchu okolo prierezu lanového vodiča AIFe 445/74 platí $y^+ < 2$.



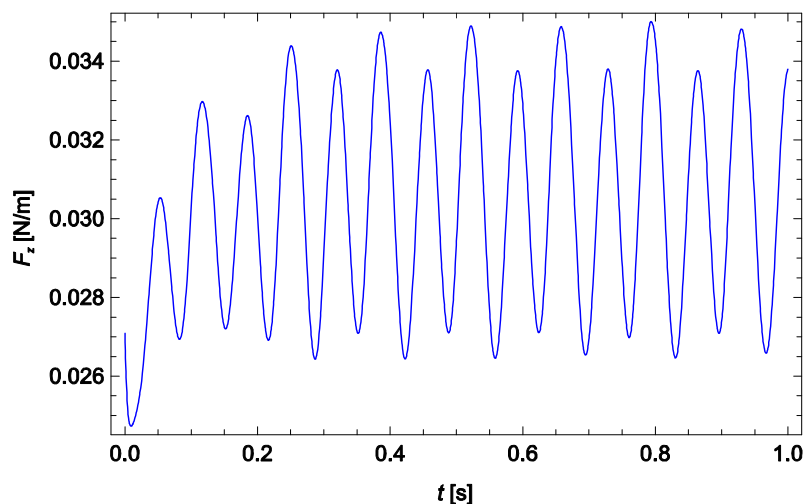
Obr. 7.9 Sieť uvažovaného modelu

Odtfňanie vírov za vodičom pôsobí spätne periodickou silou, ktorej hlavným smerom pôsobenia je kolmo na prúd vzduchu. Počas prúdenia sa sledovali rozloženia tlakov pôsobiacich na vodič a rýchlostí prúdenia, z ktorých sa následne vypočítala sila pôsobiaca na prierez vodiča dĺžky $b = 1$ mm. Na Obr. 7.10 je znázornené rozloženie rýchlostí prúdenia vzduchu za prierezovou plochou lanového vodiča pre vetrové oblasti, ktoré sú uvádzané v norme [45].

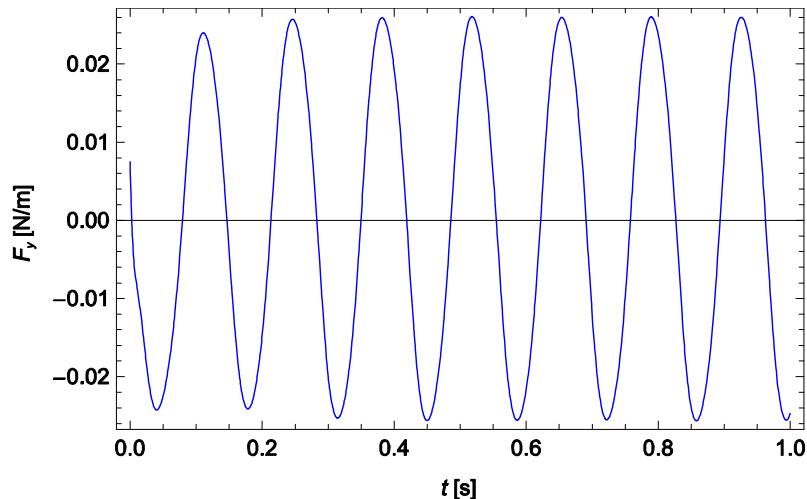


Obr. 7.10 Rozloženie rýchlostí prúdenia vzduchu v čase 5 sekúnd pre rýchlosť vzduchu 26 m.s^{-1}

Zo získaných analýz sa prepočítali horizontálne a vertikálne budiace sily na jednotku dĺžky lanového vodiča pri pôsobení prúdu vzduchu. Počiatočná hodnota pôsobiacej budiacej sily sa získala zo statickej analýzy. Časová závislosť horizontálnej a vertikálnej budiacej sily na jednotku dĺžky lanového vodiča pri pôsobení prúdu vzduchu rýchlosťou $v_{vzd} = 1 \text{ m.s}^{-1}$ je znázornená na Obr. 7.11 a Obr. 7.12. Treba si všimnúť mierky osí grafov, kde vidieť, že hlavné oscilácie sú vo vertikálnom smere.



Obr. 7.11 Časová závislosť horizontálnej budiacej sily pre rýchlosť prúdu vzduchu 1 m.s^{-1}



Obr. 7.12 Časová závislosť vertikálnej budiacej sily pre rýchlosť prúdu vzduchu 1 m.s^{-1}

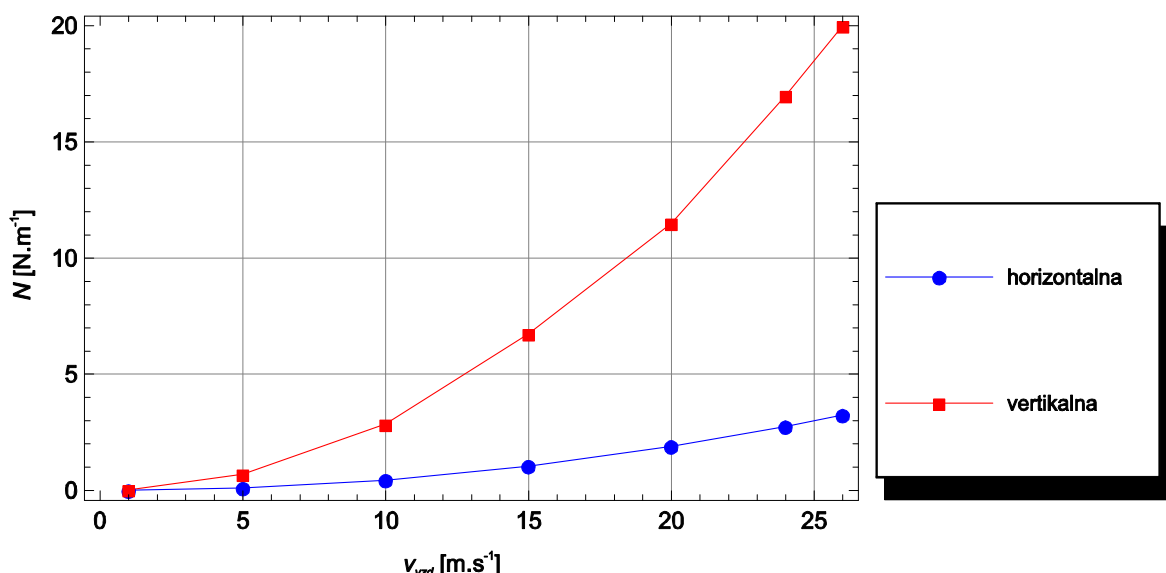
Z Obr. 7.11 a Obr. 7.12 je jasné, že v smere prúdu vzduchu má kmitanie lanového vodiča dvojnásobnú frekvenciu oproti frekvencii odtrhania vírov. V Tab. 7.5 sú znázornené vypočítané budiace frekvencie podľa rovnice (2.2) a sú porovnané s horizontálnymi a vertikálnymi budiacimi frekvenciami, ktoré sa boli vypočítané na základe numerických simulácií.

Tab. 7.5 Porovnanie analyticky f_{ban} [Hz] a numericky vypočítaných frekvencií budiacich síl f_{bz} [Hz] a f_{by} [Hz] v závislosti od rýchlosti vzduchu

Rýchlosť vetra v_{vzd} [m.s^{-1}]	Analyticky f_{ban} [Hz]	ANSYS CFX	
		f_{bz} [Hz]	f_{by} [Hz]
1	7,056	14,806	7,353
5	33,602	79,872	38,970
10	67,204	161,810	78,864
15	100,811	232,234	118,906
20	134,408	323,415	158,983
24	161,289	377,358	191,424
26	174,726	420,168	207,727

Rozdiely medzi analyticky vypočítanými a zo simulácií určenými vertikálnymi budiacimi frekvenciami sú spôsobené tým, že pri analytických výpočtoch sa uvažuje s kruhovým prierezom s hladkým povrchom, ale v CFD simuláciách je obtekanie numericky riešené okolo vodiča s geometriou, ktorá je veľmi podobná reálnej.

Zo simulácií je zrejmé, že amplitúda horizontálnej sily N_{BH} [N.m^{-1}] je oveľa menšia než je hodnota amplitúdy vertikálnej budiacej sily N_{BV} [N.m^{-1}]. Hodnoty týchto síl pre každú sledovanú rýchlosť vetra v_{vzd} [m.s^{-1}] sú znázornené na Obr. 7.13.

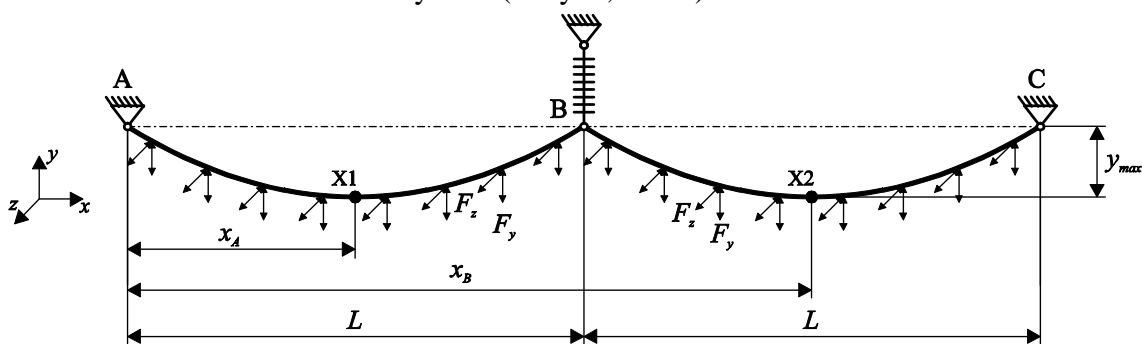


Obr. 7.13 Amplitúdy horizontálnych a vertikálnych budiacich síl pôsobiacich na lanový vodič pri jednotlivých rýchlostiach vetra

Z porovnania vlastných frekvencií zaveseného lanového vodiča získaných z modálnej analýzy s horizontálnymi a vertikálnymi budiacich frekvenciami sa zistilo, že v okolí každej jednej budiacej frekvencie prislúchajúcej k určitej rýchlosti vetra sa nachádzajú dve vlastné frekvencie zaveseného lanového vodiča, napr.: pre $v_{vzd} = 1 \text{ m.s}^{-1}$ sa v rovine xy nachádzajú vlastné frekvencie $f_{79} = 7,293 \text{ Hz}$ a $f_{81} = 7,487 \text{ Hz}$. Za špecifických podmienok, ak by sa frekvencia kmitania priblížila k príslušným vlastným frekvenciám, tak by pre túto rýchlosť vetra mohlo dôjsť k rezonancii lanového vodiča.

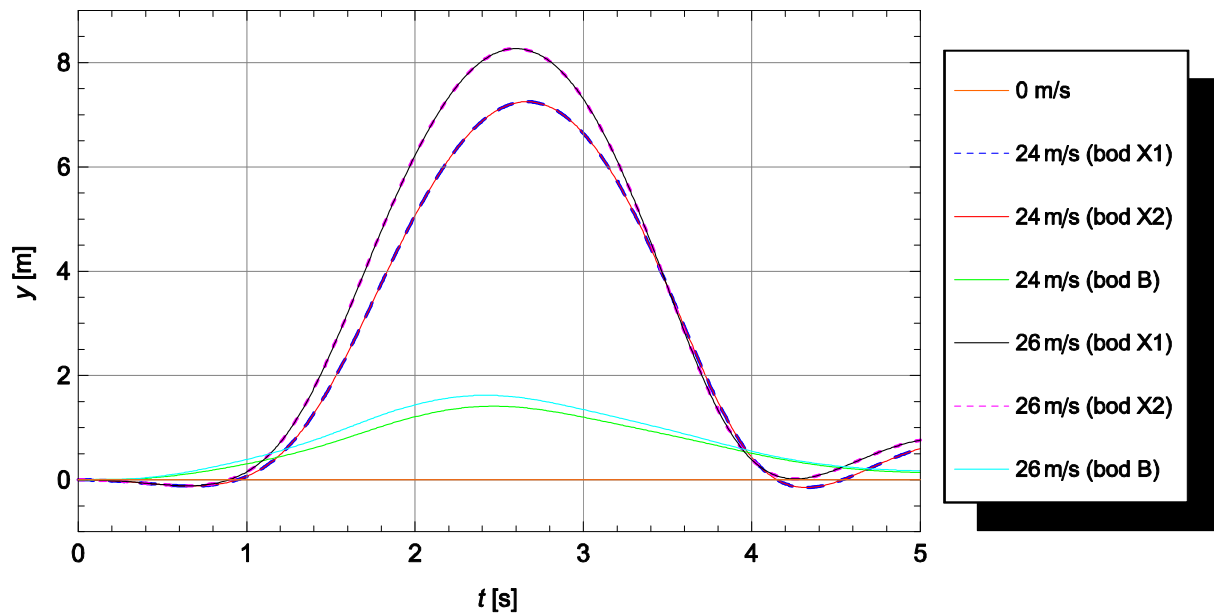
Kotevný úsek

Aplikáciou získaných dynamických síl na celý kotevný úsek s dĺžkou $L_{kot} = 600 \text{ m}$ (Obr. 7.14) je možné získať priebehy posunutí bodov X1, X2 a posunutie izolátora v mieste spojenia s lanovým vodičom (bod B) a taktiež aj priebehy osových síl a mechanických napätí v lanovom vodiči a v miestach uchytenia (body A, B a C).

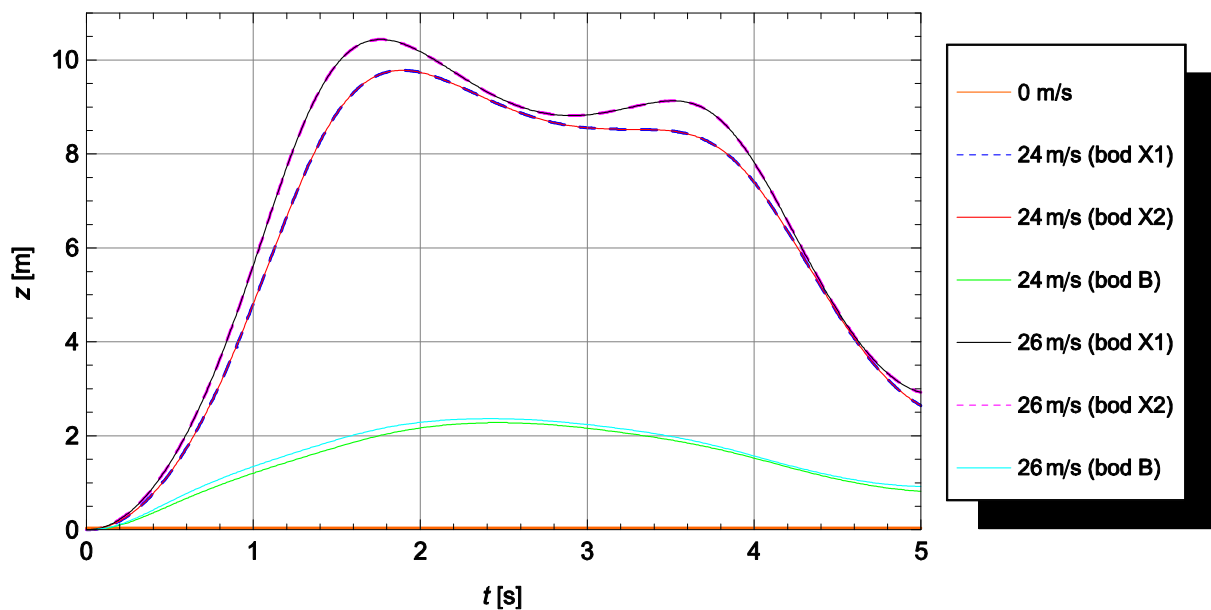


Obr. 7.14 Sily pôsobiace na kotevný úsek počas obtekania prúdu vzduchu okolo prierezu vodiča

Jednotkové sily, ktoré pôsobili v rovine xz boli do softvéru ANSYS aplikované na lano ako sily F_z [N.m⁻¹] a jednotkové sily v rovine xy ako sily F_y [N.m⁻¹], tak ako to je znázornené aj na Obr. 7.14. Numerické simulácie boli vykonané len pre maximálne rýchlosti pre dve vetrové oblasti, ktoré sú uvádzané v norme [45]. Priebehy posunutí stredných bodov jednotlivých rozpätí (body X1 a X2) a posunutie izolátora v mieste spojenia s lanovým vodičom (bod B) v rovinách xy a xz sú znázornené na Obr. 7.15 a Obr. 7.16.

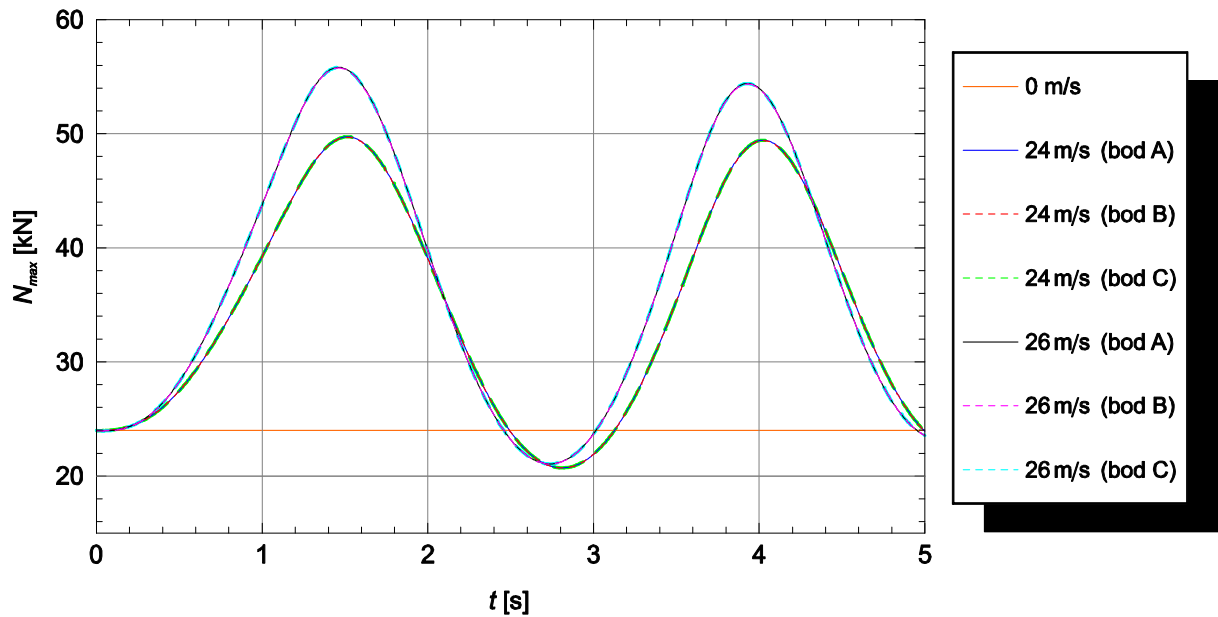


Obr. 7.15 Priebeh posunutí (smerom nahor) stredných bodov rozpätí (body X1 a X2) symetricky zaveseného lanového vodiča a izolátora (bod B) v rovine xy počas obtekania prúdu vzduchu okolo prierezu vodiča



Obr. 7.16 Priebeh posunutí (v smere prúdenia vzduchu) stredných bodov rozpätí (body X1 a X2) symetricky zaveseného lanového vodiča a izolátora (bod B) v rovine xz počas obtekania prúdu vzduchu okolo prierezu vodiča

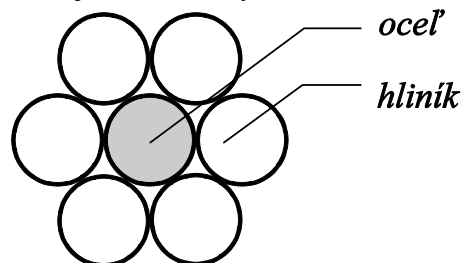
Priebehy osových síl a mechanických napätí v miestach uchytenia symetricky zaveseného vodiča v kotevnom úseku (body A, B a C) počas obtekania prúdu vzduchu s rýchlosťami $v_{vzd} = 24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $v_{vzd} = 26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ okolo prierezu vodiča sú znázornené na Obr. 7.17.



Obr. 7.17 Priebek osových síl v zavesenom lanovom vodiči v kotevnom úseku v miestach uchytenia počas obtekania prúdu vzduchu okolo prierezu vodiča

8 Experimentálne merania

Experimentálne merania boli realizované na overenie vhodnosti navrhnutých modelov, vhodnosť homogenizácie materiálových vlastností lanových vodičov a využitie nového 3D nosníkového konečného prvku na numerické riešenia problematiky kmitania lanových vodičov. Na experimentálne merania sa použil lanový vodič označovaný ako AlFe 42/7. Tento typ vodiča je skonštruovaný z jedného oceľového drôtu a šiestich hliníkových drôtov (Obr. 8.1). Detail lanového vodiča je znázornený na Obr. 8.2.



Obr. 8.1 Prierez lanového vodiča typu AlFe 42/7



Obr. 8.2 Detail lanového vodiča typu AlFe 42/7

Priemer oceľového drôtu je $d_{Fe} = 3$ mm, priemer hliníkových drôtov je $d_{Al} = 3$ mm. Priemer vodiča je $d = 9$ mm s plochou vodiča $S = 49,48$ mm². Zaručená pevnosť lanového

vodiča je $F_{zar} = 13,74$ kN [1, 8, 39, 40]. Kvadratický moment prierezovej plochy lanového vodiča je $I_y = I_z = 218,68$ mm⁴. Na výpočet efektívnych materiálových vlastností lanového vodiča sa uvažovalo s takými materiálovými vlastnosťami pre oceľ a hliník, ktoré sa uvádzajú v norme [39, 40]. Vypočítané efektívne materiálové vlastnosti pre lanový vodič sú nasledovné:

$$E_L^{NH} = 88714,29 \text{ MPa}, E_L^{M_yH} = E_L^{M_zH} = 40704,43 \text{ MPa}, G_{L_y}^H = G_{L_z}^H = 34120,91 \text{ MPa},$$

$$G_L^{M_xH}(x) = 27503,49 \text{ MPa}, \rho_L^{NH} = 3460,49 \text{ kg.m}^{-3}, \rho_L^{M_xH} = 2795,31 \text{ kg.m}^{-3}, \nu_L^{NH} = 0,323,$$

$$\alpha_{TL}^H = 19,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

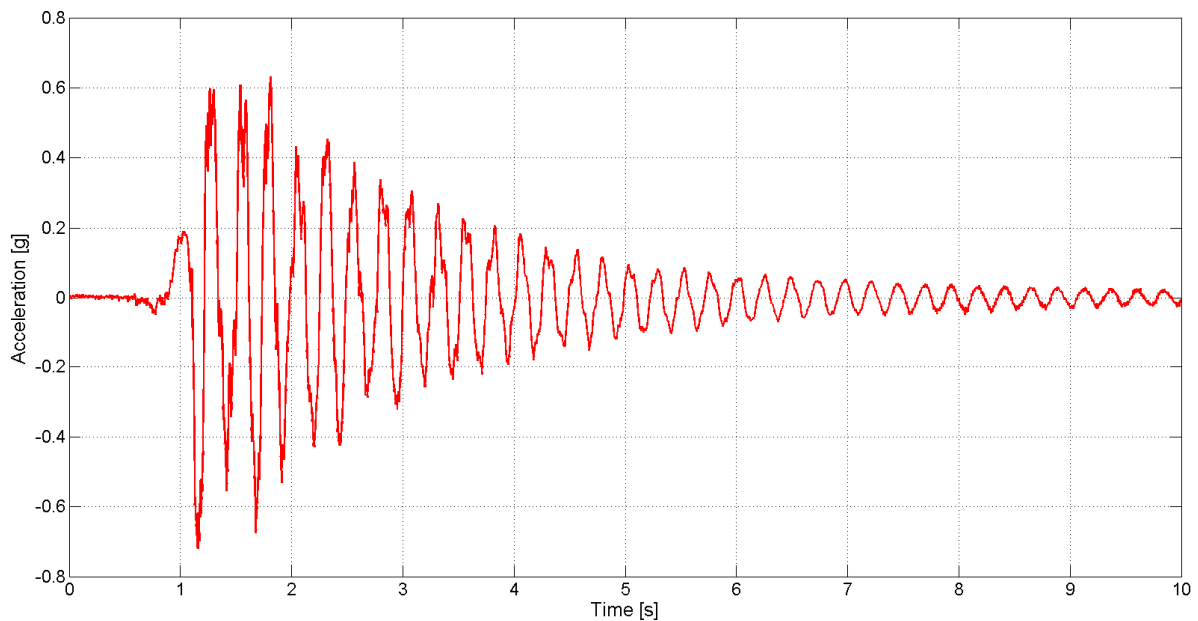
Na experimentálne merania a určenie ohybových vlastných frekvencií zaveseného lanového vodiča sa použili:

- dva integrované elektronické piezoelektrické (IEPE) akcelerometre PCB Piezotronics s citlivosťou 100 mV/g a s rozsahom ± 50 g (Obr. 8.3 vľavo) [46],
- impulzné kladívko PCB Piezotronics s citlivosťou 2,47 mV/N a s rozsahom $\pm 112,41$ N [46],
- 2-kanálový osciloskop PicoScope 4224 IEPE s rozsahom merania 20 MHz s USB pripojením k počítaču,
- tenzometrický snímač sily EMS 150 s maximálnym rozsahom merania $F_{max} = 10$ kN (Obr. 8.3 vpravo).

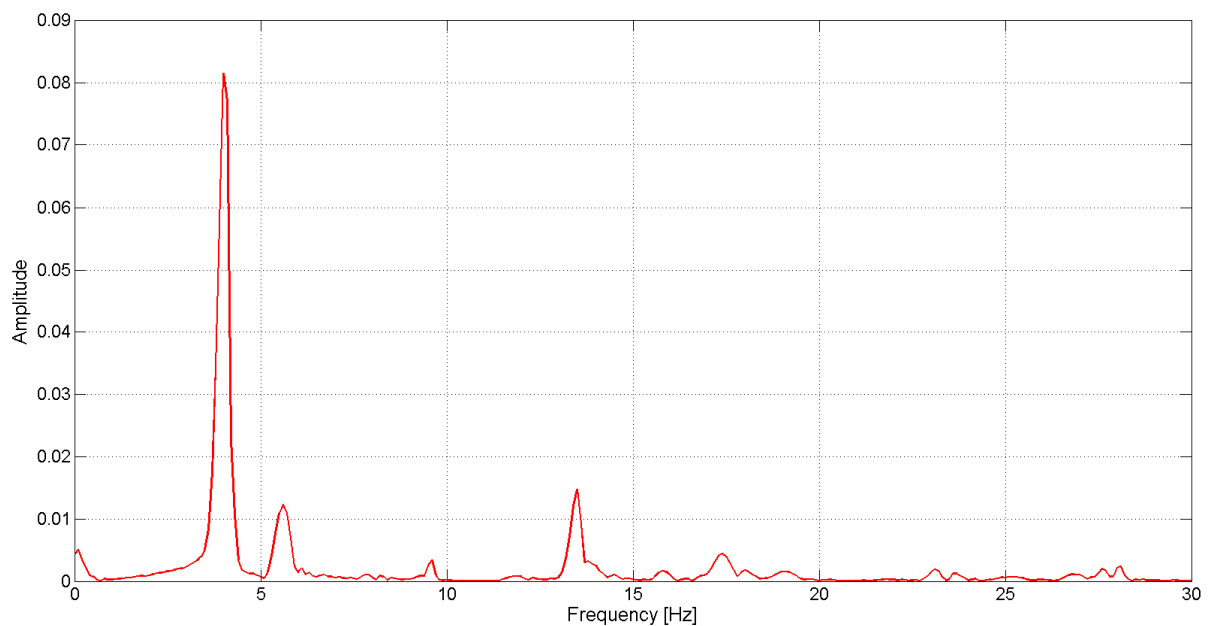


Obr. 8.3 Piezoelektrický akcelerometer uchytený na lanovom vodiči (vľavo), uchytený tenzometrický snímač sily na sledovanie osovej sily v lanovom vodiči (vpravo)

Z nameraných priebehov zrýchlenia počas voľného kmitania lanového vodiča (pre $F_H = 6$ kN sú zrýchlenia počas voľného kmitania lana zobrazené na Obr. 8.4), ktoré sa získalo z jednoosových akcelerometrov, sa rýchlou Fourierovou transformáciou (FFT) vygenerovalo frekvenčné spektrum (napr.: pre namáhanie nového vodiča osovou silou $F_H = 6$ kN je frekvenčné spektrum pre zvislé ohybové vlastné frekvencie zobrazené na Obr. 8.5), z ktorého sa určili ohybové vlastné frekvencie zaveseného vodiča. Rýchla Fourierova transformácia (FFT) bola vykonaná v komerčnom softvéri LabView [47].



Obr. 8.4 Priebeh zrýchlenia počas voľného kmitania lanového vodiča pri namáhaní $F_H = 6$ kN



Obr. 8.5 Namerané zvislé vlastné frekvencie AlFe lanového vodiča pri namáhaní $F_H = 6$ kN

Vypočítané efektívne materiálové vlastnosti lanového vodiča boli použité pri modelovaní zavesených lanových vodičov, pre ktoré boli modálnou analýzou numericky vypočítané ohybové vlastné frekvencie f_{vl} [Hz] v rovine xy a v rovine xz . Podľa reálneho modelu bol vytvorený numerický model nesymetricky zaveseného lanového vodiča s dĺžkou rozpätia $L = 19,9$ m s výškovým rozdielom v uchyteniach $h = 0,8$ m.

Na výpočet vlastných frekvencií sa použil komerčný softvér ANSYS [48], pričom bola použitá sieť 200 nosníkových konečných prvkov BEAM188. Ten istý model bol riešený pomocou nového 3D nosníkového konečného prvku, kde sa použilo 80 nosníkových konečných prvkov a výpočet bol realizovaný v programovom prostredí Mathematica [49].

Výsledky nameraných a numericky vypočítaných vlastných frekvencií nového lanového vodiča pre namáhanie osovou silou $F_H = 6$ kN sú zobrazené v Tab. 8.1.

Tab. 8.1 Namerané a numericky vypočítané ohybové vlastné frekvencie lanového vodiča v rovinách xy a xz pri osovej sile $F_H = 6$ kN

f_{vl} [Hz]		f_{MER} [Hz]	f_{ANS} [Hz]	f_{3D} [Hz]	Δ_{ANS} [%]	Δ_{3D} [%]
f_1	v rovine xz	4,16	4,77	4,72	14,63	13,35
f_2	v rovine xy	4,09	4,77	4,72	16,63	15,39
f_3	v rovine xz	9,58	9,54	9,43	-0,46	-1,56
f_4	v rovine xy	9,54	9,54	9,43	-0,01	-1,14
f_5	v rovine xz	13,93	14,28	14,15	2,48	1,56
f_6	v rovine xy	13,77	14,31	14,15	3,92	2,74
f_7	v rovine xz	18,57	19,08	18,87	2,76	1,59
f_8	v rovine xy	18,35	19,08	18,87	4,00	2,81
f_9	v rovine xz	23,60	23,68	23,59	0,36	-0,06
f_{10}	v rovine xy	22,91	23,86	23,59	4,15	2,95

Z predchádzajúcich tabuliek je zrejmé, že numerické modely navrhnuté v oboch programových prostrediach sú dostatočne presné, nakoľko rozdiely medzi nameranými vlastnými frekvenciami a numericky vypočítanými sú malé. Taktiež sa potvrdila efektivita a presnosť nového 3D nosníkového konečného prvku.

Prínosy dizertačnej práce a ďalšie smery rozvoja

Výsledky numerických výpočtov potvrdili vhodnosť počítačového modelovania a simulácií na analýzu zavesených lanových vodičov. Veľmi efektívne sa preukázala aj vhodnosť homogenizácie a výpočet efektívnych materiálových vlastností zavesených lanových vodičov. Ako vhodná alternatíva ku klasickým konečným prvkom v komerčných softvéroch sa ukázal nový 3D nosníkový konečný prvok a to najmä z hľadiska, že do rovníc sú implementované vypočítané efektívne materiálové vlastnosti, t.j. nielen efektívny modul pružnosti pre ohyb, ale taktiež aj pre ťah-tlak, krútenie a šmyk okolo osí y a z , zatiaľ čo v prípade použitého komerčného prvku sa zadávala len jedna hodnota modulu pružnosti, čo spôsobuje nepresnosti vo výsledkoch vykonaných analýz.

Hlavnými teoretickými prínosmi dizertačnej práce sú:

- metóda homogenizácie na výpočet efektívnych materiálových vlastností lanových vodičov pre priestorové analýzy lanových vodičov,
- úprava nového 3D nosníkového konečného prvku na použitie na statické a dynamické analýzy zavesených lanových vodičov medzi dva podperné body a v kotevných úsekoch.

Hlavnými praktickými prínosmi dizertačnej práce sú:

- priestorové analýzy statických a dynamických vlastností zavesených lanových vodičov (aj zväzkových) - v literatúre sa uvádzajú vzťahy len na analýzu v jednej rovine,
- priestorové analýzy nielen zavesených vodičov medzi dva podperné body ale taktiež aj analýzy zavesených lán v kotevných úsekoch,
- prechodové analýzy opadávaní námraz zo zavesených lán a možnosť sledovania maximálneho namáhania v miestach uchytenia lán počas kmitania,
- analýza vplyvu obtekajúceho prúdu vzduchu okolo prierezu lanového vodiča a jeho vplyv na jeho kmitanie v priestore - aplikácia získaných budiacich síl do ďalších numerických modelov,
- experimentálne overenie numerických výsledkov modálnej analýzy.

Ďalšie možnosti analýz zavesených lanových vodičov

V ďalšej práci chceme vykonať experimentálne merania vybudeneho kmitania zaveseného lanového vodiča na vibračnej linke, čím by sa overila vhodnosť aj presnosť numerických výpočtov vybudeneho kmitania lán. Taktiež by bolo vhodné namodelovať a analyzovať vplyvy kmitania zavesených lanových vodičov spolu s izolátorovými závesmi na nosné a kotevné stožiare.

Záver

Pri projektovaní a návrhoch VEV je nutné od prípadu k prípadu vykonať numerické výpočty a simulácie, ktoré overujú mechanickú funkčnosť celého projektovaného vedenia. V prípade modelovania ocelovo-hliníkových alebo lanových vodičov podobnej konštrukcie je komplikované a časovo náročné vytvoriť presný model lana, a práve pre tieto prípady sa vytvárajú zjednodušené modely lán, na ktorých sa zisťujú namáhania a deformácie, ktoré vplývajú na bezpečnú funkčnosť a životnosť lanových vodičov. Práve pri zjednodušovaní modelov nám napomáhajú homogenizačné techniky, pričom sa do modelov zahrňujú aj efektívne materiálové vlastnosti a všetky možné zaťaženia (zmeny osových síl vo vodiči spôsobená zmenou teploty lán, vlastná tiaž iných telies ktoré sú zavesené na lanách, atď.), ktoré vplývajú na lanový vodič. Následne numerickými výpočtami je možné vykonať simulácie a zisťovať kritické stavy, pri ktorých s veľkou pravdepodobnosťou môže nastať poškodenie systému. Okrem statických namáhání na lanové vodiče pôsobia aj namáhania dynamické, ktoré vznikajú pri prúdení vzduchu okolo prierezu vodiča, opadávaní námrazy z vodičov alebo kombináciou oboch prípadov. Práve dynamické namáhania spôsobujú najčastejšie kritické poruchy na VEV, čo jednak znamená prerušenie dodávky elektrickej energie a veľké finančné výdavky na opravu alebo rekonštrukciu poškodených častí vedenia.

V prvej a druhej kapitole dizertačnej práce sa venuje základným prehľadom najviac používaných typov lanových vodičov na VEV. Spracoval sa prehľad klasických ako aj špeciálnych typov lanových vodičov, ktoré sa využívajú najmä v kritických oblastiach, kde na kmitanie vodičov má veľký vplyv nielen vietor, ale aj extrémna námraza spôsobujúca vyšvihnutie lanových vodičov. Venovalo sa viacerým možnostiam zaťaženia zavesených lanových vodičov, pričom sa brali do úvahy aj prípady kombinovaných zaťažení, ktoré

spôsobujú najväčšie namáhania až pretrhnutie lán alebo poškodenie armatúr na vedeniach. Taktiež boli opísané niektoré javy, ktoré sa vyskytujú na VEV akými sú galloping (tančenie vodičov), vyšvihnutie lanových vodičov alebo len samotné kmitanie zavesených lán spôsobené vetrom. Na základný prehľad potom v nasledujúcej kapitole nadväzovala rešerš súčasného riešenia problematiky kmitania zavesených lanových vodičov vo svete a na Slovensku.

Piata kapitola sa venuje homogenizácii materiálových vlastností lanového vodiča. Keďže lanový vodič je skonštruovaný väčšinou z viacerých materiálov, je efektívne využitie homogenizačných techník na výpočet materiálových vlastností a na zjednodušenie konštrukcie modelovaných systémov nevyhnutné. Zjednodušením konštrukcie sa znížia nároky na výpočtovú výkonnosť a teda aj pri rozsiahlych prechodových analýzach zjednodušená konštrukcia skracuje dĺžku riešenia danej problematiky. Pri výpočte efektívnych materiálových vlastností lanového vodiča sa brali do úvahy polohy jednotlivých drôtikov z ktorých bolo lano vyrobené, pričom sa ku každému drôtičku priradila príslušná materiálová vlastnosť. Následne sa vypočítané efektívne materiálové vlastnosti aplikovali do vytvoreného modelu.

V šiestej kapitole boli uvedené a upravené základné MKP rovnice a postupy na numerickú analýzu nosníkov novým 3D nosníkovým konečným prvkom, ktoré boli implementované do programového prostredia Mathematica.

Siedma kapitola je venovaná samotnému modelovaniu zaťaženia a kmitania zavesených lanových vodičov pre rôzne možnosti zavesenia. Vypočítali sa efektívne materiálové vlastnosti pre tri vybrané typy lanových vodičov, ktoré sa využívajú v distribučných a prenosových sústavách vo svete a na Slovensku. Statická a modálna analýza vybraných zavesených lán bola vykonaná v komerčnom softvéri a taktiež pomocou nového 3D nosníkového konečného prvku, kde sa overovala jeho efektivita využitia a presnosť na riešenie danej problematiky. Ďalej sa v kapitole venovalo prechodovej analýze zavesených vodičov, kde sa riešilo opadávanie navrhovanej námrazy z lanového vodiča, pričom sa riešilo viacero možností rozmiestnenia samotnej námrazy a jej opadnutiu. Sledoval sa vplyv opadnutia na výšku vyšvihnutia lanového vodiča a maximálne osovú silu a mechanické napätia v miestach uchytenia na izolátory. Taktiež sa modelovalo prúdenie vzduchu okolo prierezu lanového vodiča a jeho vplyv na vychýlenie zaveseného vodiča z rovnovážneho statického stavu. Analyzovali sa vplyvy budiacich frekvencií v závislosti od rýchlosti prúdiaceho vzduchu okolo prierezu modelovaného vodiča. Následne sa sledovali maximálne osovú silu a mechanické napätia v zavesenom vodiči v miestach uchytenia na izolátory.

Posledná kapitola práce je zameraná na experimentálne merania vlastných frekvencií zavesených lanových vodičov. Na merania sa použil jeden nový lanový vodič, pre ktorý sa pomocou homogenizácie vypočítali efektívne materiálové vlastnosti. Experimentálnymi meraniami a numerickými analýzami sa zistila veľmi dobrá presnosť medzi nameranými a numericky vypočítanými vlastnými frekvenciami zavesených vodičov a taktiež veľmi dobrá presnosť a efektivita nového 3D nosníkového konečného prvku, keďže vo väčšine prípadov boli hodnoty vlastných frekvencií získaných jeho využitím bližšie k nameraným hodnotám než to bolo v prípade využitia komerčného softvéru.

Dôležitým poznatkom získaným z riešenia uvedenej problematiky je, že MKP je veľmi spoľahlivá a efektívna metóda riešenia elastostatiky i dynamiky VEV, pričom výpočtový

model VEV je veľmi blízky reálnemu vedeniu, čím sa získajú omnoho širšie poznatky o jeho dynamických vlastnostiach. Pri modelovaní a simuláciách treba dbať na správne zadefinovanie okrajových podmienok, nakoľko od nich závisí relevantnosť dosiahnutých výsledkov. Tieto poznatky umožňujú navrhovať VEV s vyššou efektívnosťou a spoľahlivosťou bezpečnej prevádzky.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Š. Fecko, et. al., Elektrické siete: Vonkajšie silové vedenia, Bratislava: STU v Bratislave, 1990.
- [2] Š. Fecko, D. Reváková, L. Varga, J. Lago, S. Ilenin, Vonkajšie elektrické vedenia, Bratislava: Renesans, s.r.o., 2010.
- [3] D. G. Fink, H. W. Beaty, Standard Handbook for Electrical Engineers, New York: McGraw-Hill, 2012.
- [4] A. J. Pansini, „Power Transmission and Distribution, 2nd Edition - Front Matter,“ 2005. [Online]. Available: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BYUIB4/power-transmission-distribution/front-matter>.
- [5] F. Kiessling, P. Nefzger, J.F. Nolasco, U. Kaintzyk, Overhead Power Lines; Planing, Design, Construction, Berlin, Hiedelberg, New York: Springer-Verlag, 2003.
- [6] STN EN 50183, Vodiče na vonkajšie vedenia. Drôty zo zliatiny Al-Mg-Si, 2001.
- [7] M. Bindzar, D. Reváková, „Vodiče pre vonkajšie elektrické vedenia,“ rev. ŠVOČ - Elektroenergetika, Bratislava, 2007.
- [8] STN EN 50182, Vodiče na vonkajšie vedenia. Vodiče koncentricky zlanovaných kruhových drôtov, 2001.
- [9] STN EN 62219, Vodiče na vonkajšie vedenia. Vodiče z tvarovaných drôtov s koncentricky lanovanými polohami, 2002.
- [10] J. Hrabovský, J. Murín, R. Gogola, V. Kutiš, J. Paulech, V. Goga, „Homogenization of material properties of AlFe power lines,“ rev. APCOM, Štrbské Pleso, 2015.
- [11] D. Bryant, Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC Conductor, California: CTC Global Corporation, 2011.
- [12] „Aluminium Conductor Composite Core - ACCC,“ [Online]. Available: <http://www.conduspar.com.br/?q=en/produto/aluminum-conductor-composite-core-acccr-htls>.
- [13] PREFORMED LINE PRODUCTS, „Aeolian Vibration Basics,“ October 2013. [Online]. Available: www.preformed.com.
- [14] S. Ch. Sun, J. Yung, „Vibration Damping for Transmission Line Conductors,“ DULHUNTY POWER, 2009. [Online]. Available: http://www.dulhuntypower.com/technology_papers.php.
- [15] Vedecký bedecker, „Strouhalovo číslo,“ [Online]. Available: www.veda.sk. [Cit. 8 6 2015].
- [16] J. Wang, „Overhead Transmission Line Vibration and Galloping,“ Chongqing, China, 2008.
- [17] K. Munaswamy, A. Hladar, „Self-Damping Measurements of Conductors with Circular and Trapezoidal Wires,“ *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, zv. 15, vyd.2, pp. 604 - 609, 2000.
- [18] N. A. Saadabad, H. Moradi, G. Vossoughi, „Semi-active control of forced oscillations in power transmission lines via optimum tuneable vibration absorbers: With review on linear dynamic aspects,“ *International Journal of Mechanical Sciences*, vyd.87, pp. 163 - 178, 2014.
- [19] X. Meng, L. Wang, L. Hou, G. Fu, B. Sun, M. MacAlpine, W. Hu, Y. Chen, „Dynamic characteristic of ice-shedding on UHV overhead transmission lines,“ *Elsevier*, vyd.66,

- pp. 44-52, 2011.
- [20] P. V. Hung, H. Yamaguchi, M. Isozaki, J. H. Gull, „Large amplitude vibrations of long-span transmission lines with bundled conductors in gusty wind,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, zv. 126, pp. 48-59, 2014.
- [21] G. Qi, Computational Modeling for Stress Analysis of Overhead Transmission Line Stranded Conductors Under Design and Fretting Fatigue Conditions, Dissertation work, Montreal, Canada, 2013.
- [22] W. Chunming, M. Bin, S. Tingting, „Research on the Wind-induced Vibration Coefficient of Transmission Tower-line System,“ rev. *International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering*, 2012.
- [23] J. Paulech, J. Lago, V. Kutiš, S. Stančík, R. Fric, J. Murín, CFD Simulation of Air Flow around Overhead Power Lines, Bratislava, 2010.
- [24] J. Murín, M. Masný, J. Lelák, F. Janíček, „Optimalizácia ohrevu kombinovaného zemniaceho lana,“ rev. *Elosys*, Trenčín, 2006.
- [25] M. Katin, E. Csanyi, R. Jakubčák, „Dynamické javy na vodičoch vonkajších silových vedení faktory ovplyvňujúce vyšvihnutie vodiča - vplyv rozloženia námrazy,“ *Elektroenergetika*, vyd.4, 2011.
- [26] J. Hrabovský, Multiscale modelling and simulation of free vibration of FGM beams, Dizertačná práca, Bratislava, 2013.
- [27] Y. Chang, On homogenization and de-homogenization of composite materials, Drexel University, 2003.
- [28] J. Murin, V. Kutis, Improved mixture rules for the composite (FGM's) sandwich beam finite element., Barcelona, Spain, 2007, pp. 647-650.
- [29] V. Kutiš, J. Murín, R. Belák and J. Paulech, „Beam element with spatial variation of material properties for multiphysics analysis of functionally graded materials,“ *Computers and Structures*, 89, pp. 1192 - 1205.
- [30] R. Gogola, J. Murín, J. Hrabovský, G. Gálik, „Computational modeling of free vibration of power lines,“ rev. *Elitech'14*, Bratislava, 2014.
- [31] J. Murín, M. Kalousek, V. Kutiš, *Mechanika a Termomechanika: vybrané kapitoly pre elektrotechnikov*, Bratislava: STU Bratislava, 2006.
- [32] J. Kovačik, M. Beniač, *Pružnosť a pevnosť pre špeciálne inžinierstvo*, Žilina: Žilinská univerzita, 2005.
- [33] J. Murín, J. Hrabovský, R. Gogola, G. Gálik, „Modal analysis of the power lines by finite element methods,“ rev. *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*, Trenčín, 2014.
- [34] J. Murín, M. Aminbaghai, J. Hrabovský, R. Gogola, S. Kugler, „Beam finite element for modal analysis of FGM structures,“ *Engineering Structures*, vyd.121, pp. 1-18, 2016.
- [35] J. Murín, M. Aminbaghai, J. Hrabovský, V. Kutiš, J. Paulech, S. Kugler, „A new 3D FGM beam finite element for modal analysis,“ rev. *Proceedings of the 11th WCCM*, Barcelona, Spain, 2014.
- [36] J. Murín, V. Kutiš, „An effective multilayered sandwich beam-link finite element for solution of the electro-thermo-structural problems,“ *Computers and Structures*, zv. 87, vyd.23-24, pp. 1496-1507, 2009.
- [37] Midal Cables Ltd, „Technical Datasheet,“ [Online]. Available: <https://www.midalcable.com/acc%20AE-aluminum-conductor-composite-core>. [Cit. 3 9 2015].

- [38] CTC Global, „CCC IEC Datasheet,“ CTC Global, California, 2015.
- [39] STN EN 50189, *Vodiče na vonkajšie vedenia. Pozinkované ocelové drôty*, 2001.
- [40] STN EN 60889, *Tvrdo ťahané hliníkové drôty pre vodiče nadzemných elektrických vedení*, 2001.
- [41] Electric Power Research Institute, „Demonstration of Advanced Conductors for Overhead Transmission Lines,“ Electric Power Research Institute, Palo Alto, 2008.
- [42] Š. Benča, *Výpočtové postupy MKP pri riešení lineárnych úloh mechaniky*, Bratislava: STU, 2006.
- [43] J. Kortiš, *Numerické a experimentálne modelovanie účinkov pohyblivého zaťaženia na doskové koľajové podklady*, Žilina, 2011.
- [44] Roscience, „Rayleigh Damping,“ [Online]. Available: https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp9/pdf_files/tutorials/Tutorial_34_C_-_Rayleigh_Damping.pdf. [Cit. 20 Február 2016].
- [45] STN EN 50341-1, *Vonkajšie elektrické vedenia so striedavým napätím nad 45 kV, Časť 1: Všeobecné požiadavky, spoločné špecifikácie*.
- [46] PCB Group, „PCB Piezotronics,“ [Online]. Available: <http://www.pcb.com>. [Cit. 5 Marec 2016].
- [47] National Instruments Corporation, LabView, 11500 Mopac Expwy, Austin, 78759-3504 Texas.
- [48] ANSYS Swanson Analysis System, Inc., 201 Johnson Road, Houston, PA 15342/1300, USA.
- [49] S. Wolfram Mathematica 5, Wolfram research, Inc., 2003.

Zoznam publikačnej činnosti autora

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC1 MURÍN, Justín - AMINBAGHAI, Mehdi - HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - KUGLER, Stephan. Beam finite element for modal analysis of FGM structures. In *Engineering Structures*. Vol. 121, (2016), s. 1-18. ISSN 0141-0296. V databáze: CC.

Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

ADE1 GOGOLA, Roman - KÓSA, Arpád. Electronic Control of Fuel Mixture Preparation and Injection in Internal Combustion Engines. In *American Journal of Mechanical Engineering [elektronický zdroj]*. Vol. 2, no. 7 (2014), online, p. 231-238. ISSN 2328-4110.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC1 JANÍČEK, František - HOLJENČÍK, Jozef - LENĎÁK, Fedor - GOGOLA, Roman. The effect of conductor diameter upon the thickness of icing. In *EPE 2016 : 17th International scientific conference on electric power engineering. Prague, Czech Republic. May 16-18, 2016*. Prague : Czech Technical University in Prague, 2016, S. 114-117. ISBN 978-1-5090-0907-7. V databáze: IEEE.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD1 CIGÁNEK, Ján - NOGE, Filip - GÁLIK, Gabriel - GOGOLA, Roman. Fuzzy Tracking Controller for Shape Optimized Robotic System. In *RAAD 2014 [elektronický zdroj] : 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region. Conference Proceedings. September 3-5, 2014, Smolenice Castle, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Publishing House of Slovak University of Technology, 2014, CD-ROM, [8] p. ISBN 978-80-227-4219-1. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-84921825936 ; WOS: 000360803800016.

AFD2 GOGA, Vladimír - PAULECH, Juraj - VÁRY, Michal - MURÍN, Justín - JANÍČEK, František - GOGOLA, Roman. Electro-thermal analysis of overhead AIFe power line using FEM. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 151-155. ISBN 978-80-89402-69-4.

AFD3 GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - GÁLIK, Gabriel. Computational modeling of free vibration of power lines. In *ELITECH'14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 June 2014*. 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014, CD-ROM, [5] p. ISBN 978-80-227-4171-2.

AFD4 GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj. Modal analysis of overhead alfe power lines with differing attachment levels using new 3D FGM beam finite element. In *ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4358-7.

AFD5 GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - PAULECH, Juraj - KUTIŠ, Vladimír - GOGA, Vladimír. Modal analysis of alfe power lines using new 3D FGM beam finite element. In *APCOM 2015 : Proceedings of 21st international conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 24-26, 2015*. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2015, S. 350-354. ISBN 978-80-227-4373-0.

AFD6 GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - JANÍČEK, František. Elastodynamic analysis of the power lines during ice-shedding. In *ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2015 [elektronický zdroj] : Konferencia s medzinárodnou účasťou. Trenčín,*

Slovakia. 13. – 15. október 2015. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU v Bratislave, 2015, CD-ROM, S. 82-86. ISBN 978-80-227-4437-9.

AFD7 GOGOLA, Roman - HRABOVSKÝ, Juraj - MURÍN, Justín - PAULECH, Juraj - KUTIŠ, Vladimír - JANÍČEK, František. FEM analysis of ice-shedding on overhead power lines. In *Power engineering 2016. Energy-Ecology-Economy 2016 : 13th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016.* Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, [6] s. ISBN 978-80-89402-85-4.

AFD8 GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín. Experimental measurements and numerical simulations of eigenfrequencies of ACSR conductor. In *ELITECH'16 [elektronický zdroj] : 18th Conference of doctoral students.* Bratislava, Slovakia. June 8, 2016. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, CD-ROM, [5] s.

AFD9 HRABOVSKÝ, Juraj - MURÍN, Justín - GOGOLA, Roman - KUTIŠ, Vladimír - PAULECH, Juraj - GOGA, Vladimír. Homogenization of material properties of AlFe power lines. In *APCOM 2015 : Proceedings of 21st international conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 24-26, 2015.* 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2015, S. 355-359. ISBN 978-80-227-4373-0.

AFD10 HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - PAULECH, Juraj - KUTIŠ, Vladimír. Vibration of ACSR power line depending on the speed of air flowing around the power line cross-section. In *Power engineering 2016. Energy-Ecology-Economy 2016 : 13th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016.* Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, [5] s. ISBN 978-80-89402-85-4.

AFD11 KUTIŠ, Vladimír - JAKUBEC, Jakub - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel - MURÍN, Justín - GOGOLA, Roman - HRABOVSKÝ, Juraj. CFD analysis of nominal project conditions in downcomer of VVER 440. In *Power engineering 2016. Energy-Ecology-Economy 2016 : 13th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016.* Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, [4] s. ISBN 978-80-89402-85-4.

AFD12 MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - GÁLIK, Gabriel. Modal analysis of the power lines by finite element methods. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014.* Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 202-206. ISSN 1335-2547.

AFD13 MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - KUTIŠ, Vladimír - PAULECH, Juraj. Modelling of elasto-statics of power lines by new composite beam finite element. In *APCOM 2015 : Proceedings of 21st international conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 24-26, 2015.* 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2015, S. 375-379. ISBN 978-80-227-4373-0.

AFD14 MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - LUKÁČ, Miroslav. Elastostatic and modal analysis of AlFe power lines with coupler. In *Elektroenergetika 2015 [elektronický zdroj] : 8th International scientific symposium on electrical power engineering. Stará Lesná, Slovakia. September 16-18, 2015.* Košice : Technical University of Košice, 2015, CD-ROM, S. 576-579. ISBN 978-80-553-2187-5. V databáze: WOS: 000361561700142 ; SCOPUS: 2-s2.0-84945194770.

AFD15 MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - GOGA, Vladimír - BINDZÁR, Miroslav - JANÍČEK, František. Numerical and experimental analysis of

eigenfrequencies of ACSR power line. In *Power engineering 2016. Energy-Ecology-Economy 2016 : 13th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016*. Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, [4] s. ISBN 978-80-89402-85-4.

AFD16 PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel - JAKUBEC, Jakub - KUTIŠ, Vladimír - MURÍN, Justín - GOGOLA, Roman - HRABOVSKÝ, Juraj - SEDLÁR, Tibor. Thermo-hydraulic conditions in VVER-440 during major outage. In *Power engineering 2016. Energy-Ecology-Economy 2016 : 13th International scientific conference. Tatranske Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016*. Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, [3] s. ISBN 978-80-89402-85-4.

Abstrakty príspevkov z domácich konferencií

AFH1 GOGOLA, Roman - HRABOVSKÝ, Juraj - MURÍN, Justín - GÁLIK, Gabriel - SEDLÁR, Tibor. Airflow around the AIFe power line in unsymmetric multi-span. In *Applied Mechanics 2016 : book of abstracts*. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2016, [2] s. ISBN 978-80-227-4547-5.

AFH2 HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - JAKUBEC, Jakub - SEDLÁR, Tibor. Modeling of asymmetric ice-shedding from overhead power lines. In *Applied Mechanics 2016 : book of abstracts*. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2016, [2] s. ISBN 978-80-227-4547-5.

AFH3 KUTIŠ, Vladimír - JAKUBEC, Jakub - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel - MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - SEDLÁR, Tibor - GOGOLA, Roman. CFD analysis of orifice diameter's influence on coolant mass flow through fuel assembly of nuclear reactor VVER 440. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2016, [2] s. ISBN 978-80-227-4547-5.

AFH4 PAULECH, Juraj - KUTIŠ, Vladimír - JAKUBEC, Jakub - GÁLIK, Gabriel - MURÍN, Justín - GOGOLA, Roman - SEDLÁR, Tibor - HRABOVSKÝ, Juraj. Thermo-hydraulic conditions in nuclear reactor VVER-440 under refuelling conditions. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2016, [2] s. ISBN 978-80-227-4547-5.

Podané príspevky

Konferencia ECCOMAS 2016

KUTIŠ, Vladimír - MURÍN, Justín - PAULECH, Juraj - HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - JAKUBEC, Jakub. Finite beam element with piezoelectric layers and functionally graded material of core.

PAULECH, Juraj - KUTIŠ, Vladimír - HRABOVSKÝ, Juraj - MURÍN, Justín - GOGOLA, Roman - SEDLÁR, Tibor - GÁLIK, Gabriel. Two-way coupled electro-thermal analysis of FGM system calculated by the new link finite element.

Konferencia APCOM 2016

GOGOLA, Roman - GOGA, Vladimír - MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - BOHUŠ, Jakub. Numerical analysis and experimental measurement of eigenfrequencies of ACSR power lines.

HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - GÁLIK, Gabriel. Modal analysis of overhead power lines at different ambient temperatures.

MURÍN, Justín - GOGA, Vladimír - HRABOVSKÝ, Juraj - PODEŠVA, Pavol - GOGOLA, Roman. Numerical analysis of the artificial muscle made of fishing line.

PAULECH, Juraj - JAKUBEC, Jakub - GÁLIK, Gabriel - KUTIŠ, Vladimír - MURÍN, Justín - GOGOLA, Roman - HRABOVSKÝ, Juraj - SEDLÁR, Tibor. Thermo-hydraulic behaviour of coolant in nuclear reactor VVER-440 during outage.

Strojnícky časopis

GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj. Numerical calculation of overhead power line dynamics.

HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - MURÍN, Justín. Modeling of ice-shedding from ACSR power line.

Konferencia ICCS19

MURÍN, Justín - HRABOVSKÝ, Juraj - GOGOLA, Roman - Modelling and simulation of the power lines made of composite material



Ing. Roman Gogola

(*1988) Absolvoval Fakultu elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, kde v roku 2013 ukončil inžinierske štúdium v odbore Mechatronika - študijný program Aplikovaná mechatronika. Po ukončení štúdia nastúpil na denné doktorandské štúdium s pôsobiskom na Ústave automobilovej mechatroniky, Oddelenia aplikovanej mechaniky a mechatroniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Je autorom a spoluautorom viacerých vedeckých článkov publikovaných na domácich a zahraničných konferenciách, v domácich a zahraničných vedeckých periodikách. Je spoluautorom jedného karentovaného článku. Podieľal sa ako spoluriešiteľ na projektoch VEGA a APVV. Počas doktorandského štúdia mu bola udelená Cena dekana Fakulty elektrotechniky a informatiky za mimoriadne výsledky. Na Fakulte elektrotechniky a informatiky viedol študentov na cvičeniach z predmetu Úvod do inžinierstva. V súčasnosti sa na Oddelení aplikovanej mechaniky a mechatroniky Ústavu automobilovej mechatroniky naďalej venuje problematike počítačového modelovania a simulácií na báze metódy konečných prvkov v oblasti elektroenergetiky.