

Článok vznikol s podporou Nórskych grantov o štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

Modelovanie dynamiky kotviaceho lana pomocou Simscape Multibody

O. Piroh¹, M. Novák², M. Vaško¹, L. Jakubovičová¹, M. Handrík¹

¹Department of Applied Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Zilina, Univerzitna 8215/1, Zilina 010 26, Slovakia.
Slovakia.

²niore Energy, s. r. o. , Oponice 956 14, Oponice, Slovensko

ondrej.piroh@fstroj.uniza.sk, miro.novak@niore.eu

Abstrakt Táto teoretická štúdia sa zameriava na tvorbu dynamického modelu kotviaceho lana s využitím matematického – fyzikálneho modelovania v prostredí programu Simscape Multibody. Kotviace lano predstavuje kritický prvok v systémoch, využívajúcich energiu morských vln na výrobu elektrickej energie. Jeho úlohou je zabezpečiť stabilitu a správny pohyb energetického konvertora v dynamickom pohybe morskej vlny. Okrem toho sa práca venuje novému konceptu uloženia, ktorý má za cieľ znížiť rázové zaťaženie vznikajúce pri dopade morskej vlny na konvertor. Tento koncept zahŕňa umiestnenie závažia na časť lana, ktorá sa nachádza na morskom dne. Výpočty a simulácie poskytujú podstatné informácie o správaní sa kotviaceho lana v závislosti od hmotnosti závažia. Tieto poznatky umožňujú optimalizáciu návrhu, ale aj predikciu kinematickej singularity, čo je kľúčové pre zabezpečenie bezpečnej a efektívnej prevádzky konvertora.

1.Úvod

Využívanie energie morských vln sa stáva čoraz populárnejším, zatiaľ čo energetická hustota slnečného žiarenia je okolo 200 W/m² v prípade vetra okolo 800 W/m², tak energetická hustota morskej vlny je viac ako 2500 W/m². Energia morských vln je aj dôležitým zdrojom obnoviteľnej energie s ohľadom na ochranu životného prostredia. V tejto súvislosti sa kotviace lano ukazuje ako kľúčová súčasť, ktorá zabezpečuje nielen stabilitu, ale aj správny pohyb konvertora. Okrem toho má kotviace lano úlohu zmiernovať rázové zaťaženie vznikajúceho pri dopade morských vln na lopatky konvertora. Napriek významu týchto aspektov sa predchádzajúce výskumy nevenovali vytváraniu dynamického modelu pre kotviace lano s využitím kombinácie metódy konečných prvkov a dynamiky sústav telies, čo je potvrdené absenciou relevantných štúdií [1], [2], [3].

Existujúce dynamické modely zlyhali v riešení komplexnej dynamiky pohybu, najmä pokiaľ ide o zahrnutie závaží umiestnených na morskom dne. V reakcii na túto medzeru naša teoretická štúdia predstavuje nový spôsob uloženia kotviaceho lana, so zameraním na uloženie závaží rozmiestnených na lane položenom na morskom dne. Keď je konvertor vystavený nárazu morských vln, dochádza k jeho vychýleniu a autormi navrhované riešenie zahŕňa využitie závaží na zmiernenie tohto rázového zaťaženia prostredníctvom riadeného zdvíhania a následného klesania na morské dno.

Teoretická štúdia sa zároveň zameriava na vytvorenie dynamického modelu pre kotviace lano, využívajúc základné princípy metódy konečných prvkov a dynamiky sústav telies v prostredí Simscape Multibody. Tento model nielen umožňuje preskúmanie pohybu jednotlivých prvkov v kotviacom lane, ale tiež umožňuje komplexnú analýzu toho, ako závažia ovplyvňujú pohyb konvertora. Týmto prístupom sa snažíme rozšíriť naše pochopenie zložitých dynamických procesov s konverziou energie morských vln a prispieť k optimalizácii kotviacich systémov pre zvýšenú efektívnosť a environmentálnu udržateľnosť.

Článok vznikol s podporou Nórskeho štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

2. Teoretické východiská pre uvedený výpočtový model

Pre výpočet dynamiky existujú rôzne spôsoby výpočtu a to napr. Statická analýza, Kvázi-statická analýza, Kvázi-dynamická analýza, dynamická analýza... Dôležitým aspektom pre správnu voľbu metódy je rozsah výpočtu a parametre, ktoré je potrebné vypočítať. V uvedenom prípade sa jednalo o využitie dynamickej analýzy.

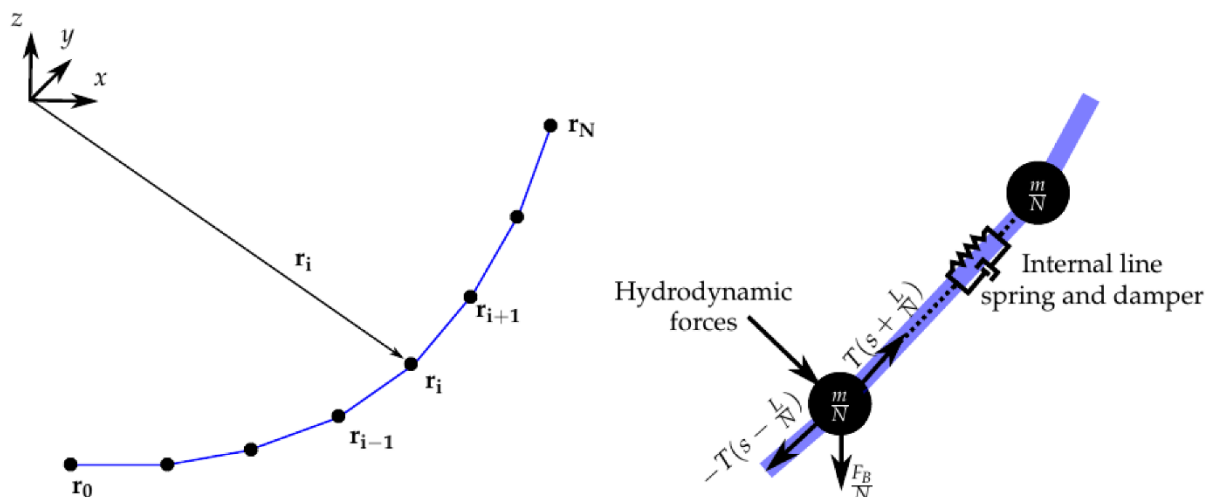
Dynamická analýza považuje kotviace lano za celok pozostávajúci z konečných prvkov sústredenej hmoty a systému pružina - tlmič. Pohyb každého prvku sa vypočíta pomocou druhého Newtonovho zákona, kde sa zohľadňujú všetky sily pôsobiace na prvok, pridaná hmotnosť, tlmenie a tuhosť.

Takáto analýza má potenciál byť najpresnejšou, pretože zahŕňa všetky dynamické účinky ako sú zotrvačnosť, interakcia morského dna...

Pri tomto modeli je počet stupňov voľnosti oveľa väčší v porovnaní napr. so Statickou analýzou. Metóda konečných prvkov rozdeľuje kotviace lano na viacero prvkov, pričom s ich stúpajúcim množstvom je možné zvyšovať presnosť výpočtu. [1]

2.1. Bodová metóda

Bodová metóda spočíva v zoskupení všetkých účinkov hmotností, vonkajších síl a vnútorných reakcií v konečnom počte uzlov N , pozdĺž čiary, lana, ako je zobrazené na obrázku (Obrázok 1.). Tento postup predpokladá, že správanie sa lana je modelované ako súbor koncentrovaných hmotných bodov spojených nehmotnými pružinami. Použitím rovníc dynamickej rovnováhy a mechaniky kontinua (napätie/deformácia) na každý bod sa odvodí súbor diskrétnych pohybových rovníc. Táto metóda sa ukázala ako výhodná v tom, že má striktnu diagonálnu maticu hmotností, čím eliminuje potrebu ďalších výpočtov pre inverziu matice [1,11]. Podrobnejší popis príkladov použitia bodovej metódy je možné nájsť v [4,5,6,7,8,9] a pre konkrétny prípad kotviacich systémov pre zariadenia využívajúce energiu morských vln (WEC) [10].



Obrázok 1. Prístup bodovej metódy (použitie z [1])

2.2. Metóda konečných diferencií

Prístup konečných diferencií sa líši od bodovej metódy tým, že používa nekonečne malý diferenciálny element namiesto konečného diskrétného elementu. Priestorové derivácie môžu byť potom matematicky spracované ako [1]:

Článok vznikol s podporou Nórskeho grantov o štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

$$\frac{\delta y}{\delta x} \approx \frac{y^{i+1} - y^i}{\Delta x} \approx \frac{y^i - y^{i-1}}{\Delta x} \approx \frac{y^{i+1} - y^{i-1}}{2\Delta x} \quad (1)$$

Podrobné popisy implementácie konečných diferencií pre modely kotviacich lán je možné nájsť v [12,13] a pre konkrétny prípad kotviacich systémov pre WEC [14].

2.3. Metóda konečných prvkov

Metóda konečných prvkov (FEM) tiež diskretizuje kotviace lano na malé diferenciálne elementy. Zatiaľ čo metóda konečných diferencií používa diferenciálny tvar riadiacich rovníc, FEM používa ich integrálny tvar. Premenné vnútri každého elementu sú potom popísané prostredníctvom interpolačných funkcií a integrály sú riešené pomocou numerických integračných techník. Na rozdiel od metódy konečných diferencií, ktorá odhaduje priestorové gradienty v riadiacej parciálnej diferenciálnej rovnici (PDE) s funkciami konečných diferencií prvého rádu, FEM eliminuje priestorové gradienty aproximovaním PDE lokálne súborom obyčajných diferenciálnych rovníc (ODE), podobným spôsobom ako pri bodovej metóde. Zatiaľ čo bodové modely musia umiestniť všetky hmoty na diskkrétne uzly, FEM môže odvodiť riadiace rovnice s integrovaním hmoty po celej dĺžke elementu, čo vedie ku „konzistentnej“ hmotnostnej formulácii [15]. Táto metóda je schopná produkovať presné výsledky s menším počtom prvkov v porovnaní s bodovou metódou [1]. Príklady rôznych riešení zahŕňajú: kolokačnú [16], Galerkinovu [17,18] a diskontinuálnu Galerkinovu metódu [20].

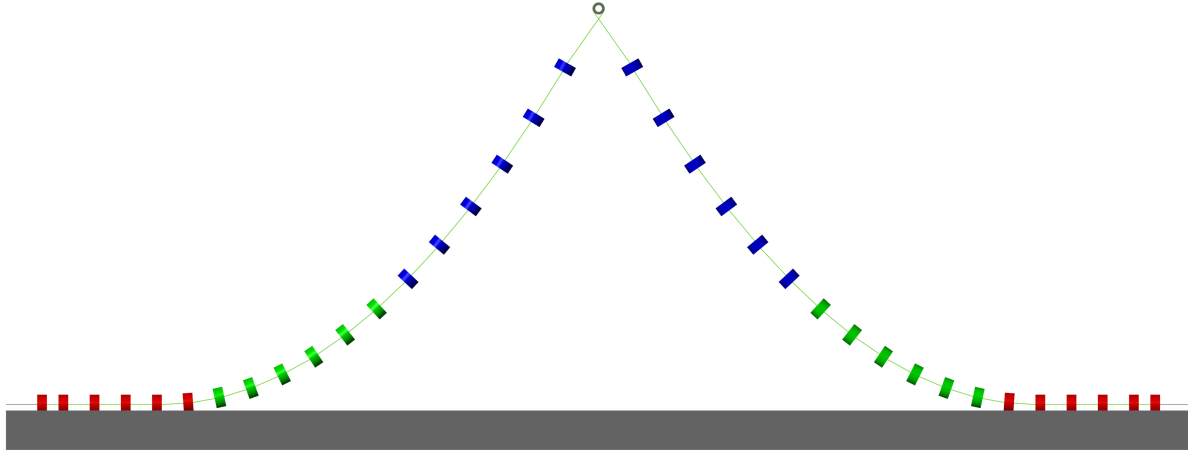
3. Tvorba dynamického modelu

Dynamický model bol vytvorený v prostredí Simscape Multibody. Toto prostredie umožňuje vytvorenie matematicko – fyzikálneho modelu ako aj výbornú integráciu s prostredím Simulink a MATLAB. Uvedené prostredie neumožňuje simuláciu pre priame zaťažovanie lana, preto bolo potrebné vyvinutie nového spôsobu.

Pre vytvorenie modelu bola použitá základná myšlienka metódy konečných prvkov – rozdelenie lana na jednotlivé elementy. V tomto prípade však nebola vytváraná sieť konečných prvkov, ale samotné lano sa rozdelilo na elementy, ktoré sú vzájomne spojené nehmotnými pružinami a tlmičmi.

Aby bolo možné simulovať vplyv závažia ako aj samotnú tiaž lana, boli vytvorené prvky v tvare valčekov, ktoré popisujú hmotnosť v danej oblasti. Každý takýto valček má priemer lana, ktoré by bolo fyzicky použité. Jedna sa o dokonale tuhé telesá s jednotnou dĺžkou. Kotviace lano má parabolický tvar, ako je možné vidieť na obrázku (Obrázok 2.). Parabolický tvar je špecificky navrhnutý tak, aby minimalizoval nežiaduce silové koncentrácie a umožnili rovnomerné rozdelenie zaťaženia.

Článok vznikol s podporou Nórskeho grantov o štátneho rozpočtu Slovenskej republiky



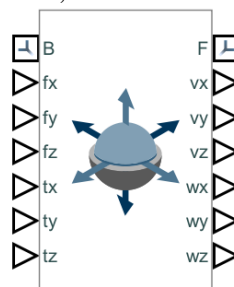
Obrázok 2. Geometria kotviaceho lana

Lano bolo rozdelené na 37 prvkov vrátane stredovej kladky. Pre dosiahnutie spomínaného parabolického tvaru je potrebné definovanie polohy jednotlivých elementov v daných osiach. Prostredie *Simscape Multibody* funguje na princípe presúvania súradnicového systému, poprípade jeho natočenie. Takéto posunutie zabezpečuje blok *Rigid Transform* na základe definovania polohy vzhľadom k danému súradnicovému systému.

Aby bolo možné zohľadniť vztlakovú silu, boli hmotnosti jednotlivých valčekov upravované v závislosti na polohe. Spomínaných 37 prvkov obsahuje 36 elementov, ktoré sú rozdelené do troch skupín po 6 na obidvoch stranách. Každá takáto skupina popisuje inú hĺbku a teda má rozdielnu hmotnosť. Valčeky označené červenou farbou reprezentujú závažia ležiace na morskem dne. Valčeky označené zelenou farbou reprezentujú trvalo vznášajúcu časť kotviaceho lana. Modré valčeky reprezentujú časť lana, ktorá trvale pláva. Týmto spôsobom bolo možné namodelovať stav, kedy určitá časť lana pláva, vznáša sa a leží na morskem dne.

3.1. Model elementu kotviaceho lana

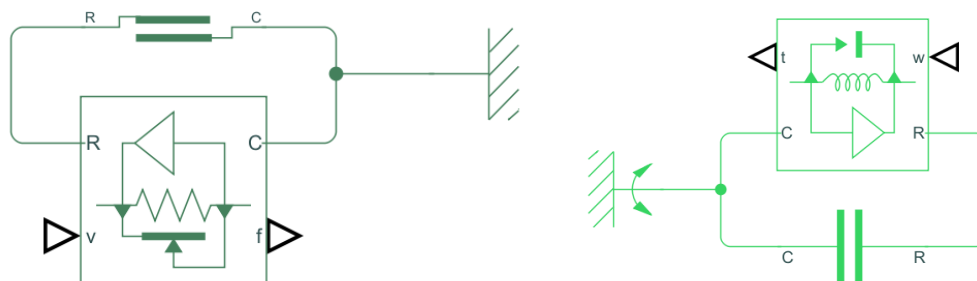
Každý element kotviaceho lana je tvorený kĺbom, ktorý zabezpečuje správne natáčanie a posúvanie jednotlivých elementov. Jedna sa o kĺb s názvom *6-DOF Joint*. Kĺb umožňuje rotácie a posunutia v troch osiach. V rámci vnútornej mechaniky dovoľuje nastavenie rovnovážnej polohy ako aj tuhosť pružiny, ktorá drží kĺb na definovanom mieste, a tlmenie v danej osi [20].



Obrázok 3. Kĺb so šiestimi stupňami voľnosti [20]

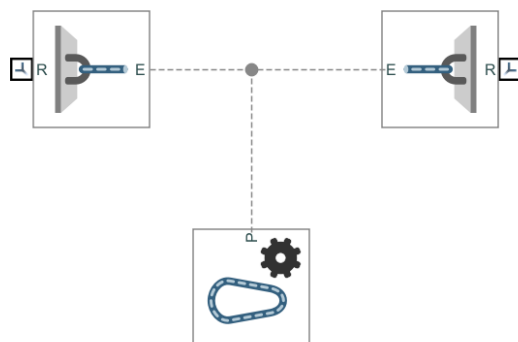
Aby bolo možné simulovať pohyb v morskej vode, je potrebné nastavenie tretej sily vo všetkých troch osiach. V spomínanom prostredí je možné použiť posuvnú treciu silu aj rotačnú.

Článok vznikol s podporou Nórskeho štátneho rozpočtu Slovenskej republiky



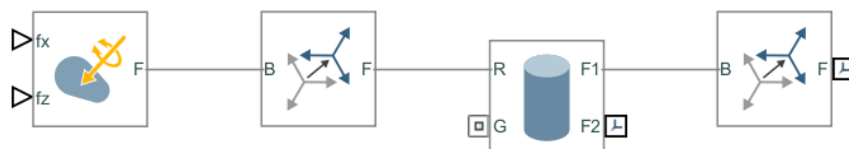
Obrázok 4. Posuvná a rotačná trecia sila spolu s konvertorom signálu pre Simscape a Simscape Multibody

Ďalším prvkom je lano, ktoré zabezpečuje spojenie medzi jednotlivými elementami. Jedná sa o kombináciu blokov *Belt - Cable End* a *Belt - Cable Properties*. Táto kombinácia zabezpečuje správne spojenie so zachovaním pohyblivosti, ktorú umožňuje spomínaný kĺb. Tento spôsob popisuje lano, ktoré je za každých okolností plne napnuté, zároveň však nedeformovateľné.



Obrázok 5. Časť modelu pre plne napnutého a nedeformovateľného lana

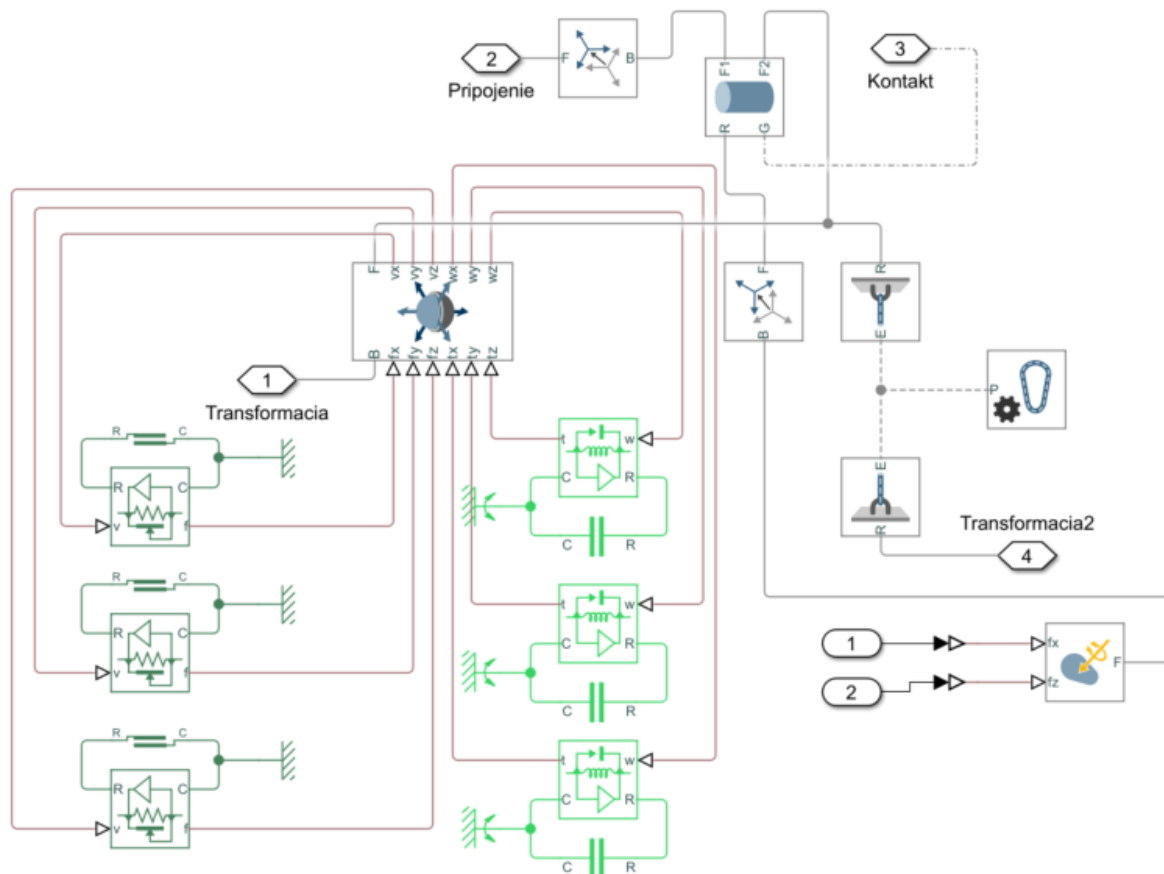
Pre aplikovanie sily pôsobiacej v morském prúde je využitý blok *External Force and Torque*. Blok umožňuje definovanie budiacej sily priamo na solidový prvok. Toto zabezpečuje simulovanie morského prúdu. Kompletná konfigurácia prvkov je zobrazená na obrázku (Obrázok 6.). Valčeky sú modelované pomocou bloku *Cylindrical Solid*. Tento blok popisuje dokonale tuhé teleso, pričom dovoľuje definovanie základných vlastností ako napr. hmotnosť alebo hustota...



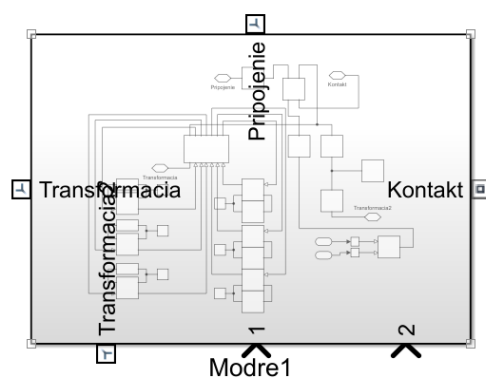
Obrázok 6. Aplikovanie sily spolu s natočením valčeka

Uvedený model je vytvorený ako subsystém, ktorého výstupy umožňujú pripojenie k jednotlivým blokom pre určenie polohy v priestore s taktiež aj definovanie sily a kontaktu s ostatnými elementmi a morským dnom. Kompletná schéma jedného elementu je zobrazená na obrázkoch (Obrázok 7.), (Obrázok 8.).

Článok vznikol s podporou Nórskeho štátneho rozpočtu Slovenskej republiky



Obrázok 7. Model elementu kotviaceho lana



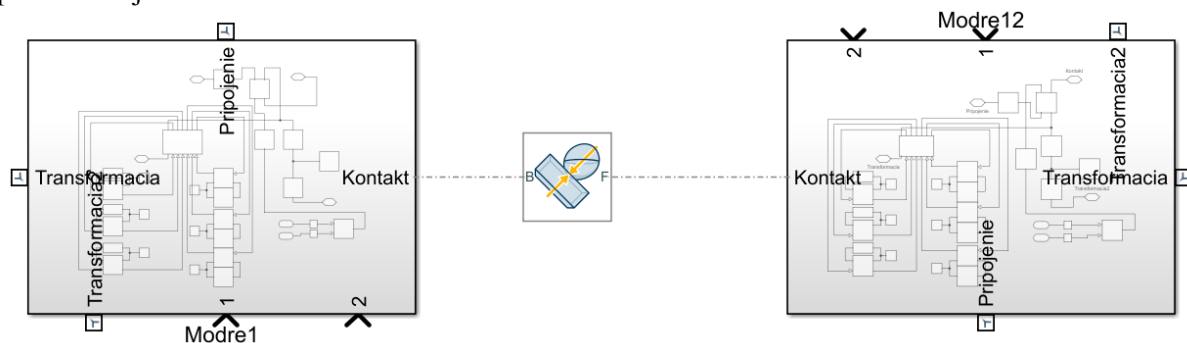
Obrázok 8. Model elementu kotviaceho lana

3.2. Definovanie kontaktu

Všetky elementy majú definovaný kontakt voči morskému dnu. Morské dno je charakterizované pomocou bloku *Brick Solid*. Jedná sa o dokonale tuhý kváder. Pre vytvorenie kontaktu je použitý blok s názvom *Spatial Contact Force*. Blok umožňuje definovanie tuhosti, tlmenia ale aj šírku prechodovej

Článok vznikol s podporou Nórskeho grantov o štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

oblasti do detekcie kontaktu. Pre zabezpečenie správneho fungovania je potrebné exportovanie celej geometrie valčeka. Takýto export zabezpečí detekciu kontaktu na celom valčeku, pokiaľ zasiahne do prechodovej oblasti.



Obrázok 9. Definovanie kontaktu medzi elementami

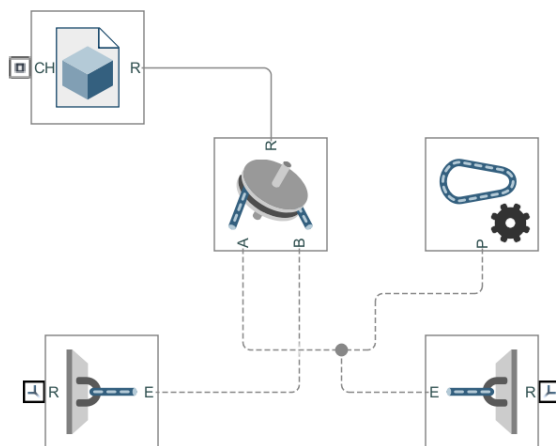
3.3. Závažie

Modelovanie závažia vychádza so zmeny hmotnosti jednotlivých valčekov nachádzajúcich sa na morskom dne. Takto upravené závažia dokážu riadiť posúvanie a nakláňanie konvertora v danom smere. V extrémnom prípade nastáva stav, kedy sú na jednej strane všetky valčeky dvihnuté, zatiaľ čo na opačnej strane ležia. Dôležitým aspektom pre správnu voľbu hmotnosti sú vlastnosti samotného lana, ako aj hmotnosť a zotrvačnosť konvertora. Použitý blok *Cylindrical Solid* umožňuje definovanie rôznej hmotnosti pri zachovaní daných geometrických parametrov.

4. Uloženie kotviaceho lana s využitím kladky

Uloženie pomocou kladky vychádza z myšlienky, kedy je lano prevesené cez kladku a zároveň má skrížené konce. Takto umiestnené lano umožňuje zachovanie istej pohyblivosti konvertora. Prekríženie lana za kladkou zabezpečí, aby sa lano z kladky nevyvlieklo. Závažia umiestnené v spodnej časti dokážu túto pohyblivosť redukovať a zabezpečiť optimálny pohyb pri redukovaní rázového zaťaženia dopadajúcej vlny na konvertor.

Simscap umožňuje modelovanie kladky pomocou bloku *Pulley*. Pre správne fungovanie je potrebné priradenie geometrie kladkového kolesa a taktiež prídanie lana. Geometria kladkového kolesa bola vytvorená v CAD systéme. Pri importovaní do výpočtu, je možné definovanie základných fyzikálnych vlastností ako je hmotnosť, hustota, poloha ťažiska, zotrvačné momenty.... Kompletný model kladky je zobrazená na obrázku:



Článok vznikol s podporou Nórsnych grantov o štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

Obrázok 10. Modelovanie kladky

Pre uloženie kladky je použitý kĺb s názvom *PlanarJoint*. Tento kĺb umožňuje tri stupne voľnosti, pričom sa jedná o dve posunutia v navzájom kolmých rovinách a jednu rotáciu kolmú na roviny posunutí. V tomto prípade posunutia zabezpečujú pohyb kladky v rovine. Rotácia umožňuje jej natáčanie počas pohybu kotviaceho lana. Tento predpoklad umožňuje zjednodušenie riešeného problému ako aj zrýchlenie samotného výpočtu.

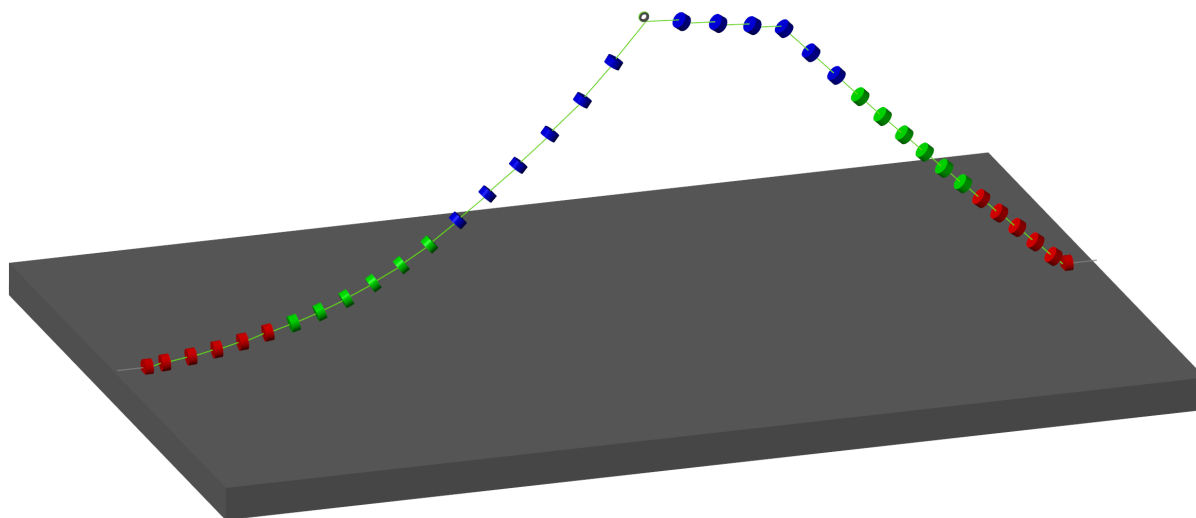
5.Simulácia pohybu kotviaceho lana

Ako už bolo spomenuté, pre výpočet bolo použitých 37 elementov. Cieľom výpočtu bolo určenie vplyvu hmotnosti závažia na pohyb kladkového kolesa. Pre vyvolanie pohybu bola použitá budiaca sila, predstavujúca morský prúd. Táto sila bola reprezentovaná pomocou bloku s názvom *Sine Wave*. Tento blok umožňuje generovanie signálu so sínusovým priebehom na základe definovaných parametrov. Vztlaková sila je reprezentovaná blokom s názvom *Constant*, ktorý umožňuje generovanie konštantného signálu počas celej doby výpočtu.

Pre riešenie systému nelineárnych parciálnych diferenciálnych rovníc je použitý riešič s názvom *ode15s*. Ide o riešič s variabilnou veľkosťou kroku, ktorý pracuje pomocou metódy s premenným rádom.

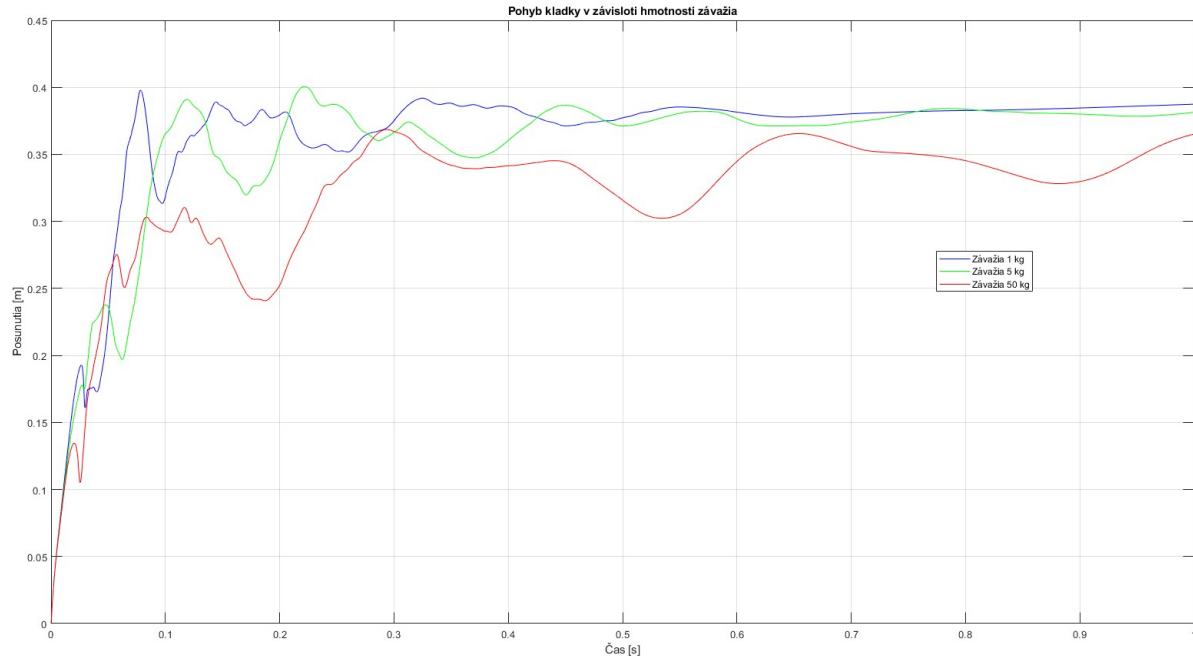
Obrázok (Obrázok 11.) vykresľuje mechanizmus v maximálne vychýlenej polohe, kedy je možné vidieť, že všetky závažia na pravej strane sú zdvihnuté.

Na obrázku (Obrázok 12.) sú zobrazené vypočítané hodnoty polohy kladkového kolesa pri použití rôznych hmotností závaží. Z vypočítaných hodnôt je zjavné, že optimálna hmotnosť závažia má kľúčový vplyv na pohyb. Pri zvyšujúcej sa hmotnosti závažia, klesá prvotné vychýlenie kladkového kolesa. Na druhú stranu však dochádza k väčšiemu napätiu v lane ako aj času potrebného na ustálenie do rovnovážnej polohy. Z vypočítaných hodnôt vyplýva, že ak sa bude neúmerne zvyšovať hmotnosť závažia, bude dochádzať k dlhému kmitaniu lana. Toto kmitanie bude negatívne vplyvať na pohyb konvertora po morskej hladine, nakoľko bude dochádzať k brzdeniu pohybu. Pokiaľ však hmotnosť závaží nebude dostatočne veľká, morské vlny budú konvertor naďalej rázovo zaťažovať, čo môže opäť znížiť jeho účinnosť.



Obrázok 11. Maximálne vychýlenie kotviaceho lana

Článok vznikol s podporou Nórskeho grantov o štátneho rozpočtu Slovenskej republiky



Obrázok 12. Vypočítané polohy kladkového kolesa v závislosti od hmotnosti závažia

6.Záver

Simscape Multibody predstavuje silný nástroj pre oblasť viac telesovej dynamiky. Umožňuje výpočet zložitých sústav s relatívne dobrým výpočtovým časom. Popisovaný model spĺňa všetky potrebné predpoklady pre správne riešenie dynamického modelu kotviaceho lana. Nakoľko Simscape Multibody neumožňuje priamu simuláciu, je nutná diskretizácia na elementy, ktoré sú tvorené blokmi. Zvolené bloky presne popisujú fyzikálne parametre a vlastnosti vybraného ideálneho lana. Každý element lana obsahuje solidový prvok, ktorý charakterizuje hmotnosť elementu. Taktiež obsahuje treciu silu pre rotáciu a posunutie a lanové bloky, ktoré elementu dodávajú vlastnosti podobné ako má samotné lano. Ako už bolo ukázané, dynamický model lana umožňuje získať dôležité poznatky o jeho správaní. Vypočítané polohy stredovej kladky jasne ukazujú dôležitosť správnej voľby závažia pre dané parametre vln. Pri príliš vysokej hmotnosti závažia dochádza ku kolapsu systému, zatiaľ čo príliš nízka hmotnosť neumožní dostatočné tlenie rázového zaťaženia. Zvolený parabolický tvar lana zabezpečuje rovnomerné rozloženie zaťaženia, čo pozitívne ovplyvňuje životnosť lana ale aj samotného konvertora.

Poznatky získané týmto výskumom, môžu byť použité pre ďalší výskum a to so zameraním na samotný dynamický model kladky. Uloženie pomocou kladky vytvára niekoľko možných problémov, ktoré táto teoretická štúdia nerieši. Ďalšia možnosť výskumu je vytvorenie dynamického modelu, pri ktorom bude kladka súčasťou plávajúceho konvertora. V tomto prípade bude ďalšie tlenie predstavovať generátor, ktorý bude odoberať podstatnú časť energie morskej vlny.

Článok vznikol s podporou Nórskeho štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

7. Použitá literatúra

- [1] Davidson, J.; Ringwood, V.R. Mathematical modelling of mooring systems for wave energy converters-A review, *Energies*. 2017, 10(5), 666. <https://doi.org/10.3390/en10050666>
- [2] Li, B.Ch.; Chen, M.; Choung, J. The quasi-static response of moored floating structures based on minimization of mechanical energy, *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9(9), 960. <https://doi.org/10.3390/jmse9090960>
- [3] Depalo, F.; Wang, S.; Xu, S.; Soares, G.C. Design and analysis of mooring system for a wave energy converter, *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9(7), 782. <https://doi.org/10.3390/jmse9070782>
- [4] Low, Y.; Langley, R. Time and frequency domain coupled analysis of deepwater floating production systems. *Appl. Ocean Res.* 2006, 28, 371–385. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2007.05.002>
- [5] Hall, M.; Goupee, A. Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data. *Ocean Eng.* 2015, 104, 590–603. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.035>
- [6] Van den Boom, H. Dynamic behaviour of mooring lines. In Proceedings of the BOSS Conference, Delft, The Netherlands, 1–5 July 1985. <https://www.scribd.com/document/391053985/Boom-1985-Dynamic-Behaviour-of-Mooring-Lines-pdf>
- [7] Khan, N.U.; Ansari, K.A. On the dynamics of a multicomponent mooring line. *Comput. Struct.* 1986, 22, 311–334. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(86\)90037-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(86)90037-4)
- [8] Chai, Y.; Varyani, K.; Barltrop, N. Three-dimensional Lump-Mass formulation of a catenary riser with bending, torsion and irregular seabed interaction effect. *Ocean Eng.* 2002, 29, 1503–1525. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00087-7](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00087-7)
- [9] Buckham, B.J. Dynamics modelling of low-tension tethers for submerged remotely operated vehicles. Ph.D. Thesis, University of Victoria, Victoria, BC, Canada, 2003. <http://dspace.library.uvic.ca/handle/1828/3644>
- [10] Vissio, G.; Passione, B.; Hall, M.; Raffero, M. Expanding ISWEC Modelling with a Lumped-Mass Mooring Line Model. In Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference, Nantes, France, 6–11 September 2015. http://matt-hall.ca/docs/vissio_2015_eim.pdf
- [11] Masciola, M.; Jonkman, J.; Robertson, A. Extending the capabilities of the mooring analysis program: A survey of dynamic mooring line theories for integration into FAST. In Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, CA, USA, 8–13 June 2014; p. V09AT09A032. <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23508>
- [12] Chatjigeorgiou, I.; Mavrakos, S. Assessment of bottom-cable interaction effects on mooring line dynamics. In Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Lisbon, Portugal, 5–6 July 1998. <https://www.researchgate.net/profile/Spyridon->

Článok vznikol s podporou Nórskeho štátneho rozpočtu Slovenskej republiky

[Mavrakos/publication/265292429_Assessment_of_Bottom_Cable_Interaction_Effects_on_Mooring_Line_Dynamics/links/54074afb0cf2bba34c1e98f5/Assessment-of-Bottom-Cable-Interaction-Effects-on-Mooring-Line-Dynamics.pdf](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.01.006)

[13] Chatjigeorgiou, I.K. A finite differences formulation for the linear and nonlinear dynamics of 2D catenary risers. *Ocean Eng.* 2008, 35, 616–636. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.01.006>

[14] Cerveira, F.; Fonseca, N.; Pascoal, R. Mooring system influence on the efficiency of wave energy converters. *Int. J. Mar. Energy* 2013, 3, 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.006>

[15] Gobat, J.; Grosenbaugh, M. Time-domain numerical simulation of ocean cable structures. *Ocean Eng.* 2006, 33, 1373–1400. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.07.012>

[16] Chatjigeorgiou, I.; Mavrakos, S. Comparison of numerical methods for predicting the dynamic behavior of mooring lines. In Proceedings of the the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, 30 May–4 June 1999. <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE99/All-ISOPE99/24914>

[17] Aamo, O.M.; Fossen, T.I. Finite element modelling of mooring lines. *Math. Comput. Simul.* 2000, 53, 415–422. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00235-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00235-4)

[18] Aamo, O.; Fossen, T. Finite element modelling of moored vessels. *Math. Comput. Model. Dyn. Syst.* 2001, 7, 47–75. <https://doi.org/10.1076/mcmd.7.1.47.3632>

[19] Palm, J.; Paredes, G.M.; Eskilsson, C.; Pinto, F.T.; Bergdahl, L. Simulation of mooring cable dynamics using a discontinuous Galerkin method. In Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Hamburg, Germany, 29–31 May 2013. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/333008>

[20] MathWorks. 6-DOF Joint-Program documentation. <https://www.mathworks.com/help/sm/ref/6dofjoint.html>