

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
KATEDRA MECHANIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Plzeň, 2014

Eva Menclová



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
KATEDRA MECHANIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Dynamické modely vláken pro návrh vláknových
mechanismů**

Eva Menclová

Prohlášení

Předkládám k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 31. května 2014

.....

podpis

Poděkování

Chtěla bych poděkovat Ing. Michalu Hajžmanovi, Ph.D. a Ing. Radku Bulínovi za jejich velmi cenné rady, čas strávený konzultacemi a v neposlední řadě za trpělivost.

Eva Menclová

Abstrakt

Tato práce se zabývá dynamickými modely vláken pro návrh vláknových mechanismů. Všechny přístupy k modelování vláken jsou testovány ve výpočetním softwaru MSC.ADAMS. V práci jsou představeny silový model vlákna, model vlákna s využitím hmotných bodů a model vlákna vytvořený pomocí modulu *Cable*. Výsledky ze simulací jsou následně srovnány s výsledky provedených experimentů zaměřených na chování vlákna. Experimentálně i výpočtově byl zkoumán kolmý pád závaží na vlákně, šikmý pád závaží na vlákně a systém závaží a motoru spojených vláknem taženým přes kladku. K dalšímu zpracování a detailnímu srovnání výsledků byl použit program MATLAB.

Klíčová slova: dynamika, model vlákna, silový model, hmotný bod, modul *Cable*, MSC.ADAMS

Abstract

This thesis deals with the dynamic modelling of fibres for the design of fibre mechanisms. All approaches to the fibre modelling are tested in the MSC.ADAMS software. The force model of the fibre, the model of the fibre based on point masses and the fibre model created by *Cable* module are introduced in the thesis. The simulation results and the results of experimental measurements focused on the investigation of the fibre behaviour are mutually compared. The weight-fibre mechanical system in a vertical position, the weight-fibre mechanical system on an inclined plane and the weight-fibre-pulley-drive mechanical system were investigated by means of numerical simulations and experiments. The MATLAB software was used for the evaluating and comparison of the results.

Keywords: dynamics, fibre modelling, force model, point mass, *Cable* module, MSC.ADAMS

Obsah

1 Úvod	1
2 Silové modelování vláken	2
2.1 Princip metody	2
2.1.1 Funkce IF	2
2.2 Princip vytvoření modelu vlákna pomocí síly	3
2.3 Příklad tvorby vlákna v ADAMSu.....	4
2.3.1 Konečný předpis síly reprezentující vlákno	5
2.3.2 Výsledky ze simulace o trvání 1 sekundy	5
2.4 Výstupy předchozího příkladu řešeného bez tlumení	7
2.5 Stand 1: Volný pád závaží	8
2.5.1 Popis standu	8
2.5.2 Model v ADAMSu	9
2.5.3 Srovnání s experimentem	11
2.6 Stand 2: Šikmý pád závaží.....	15
2.6.1 Popis standu	15
2.6.2 Model v ADAMSu	16
2.6.3 Problém tření.....	18
2.6.4 Srovnání s experimentem	22
2.7 Stand 3: Model vlákna navinutého přes kladku	25
2.7.1 Popis standu	25
2.7.2 Model v ADAMSu	25
2.7.3 Pohyb motoru.....	30
2.7.4 Srovnání s experimentem	31
3 Model vlákna s využitím hmotných bodů	34
3.1 Testovací model	34
3.1.1 Popis modelu.....	34
3.1.2 Model v ADAMSu	35
3.1.3 Předpisy sil.....	35
3.1.4 Výsledky testovacích simulací.....	38
3.2 Stand 1: Volný pád závaží	40
3.2.1 Model v ADAMSu	40
3.2.2 Srovnání s experimentem	41
3.3 Stand 2: Šikmý pád závaží.....	44
3.3.1 Model v ADAMSu	44

3.3.2 Srovnání s experimentem	45
4 Úvod do modulu Machinery/Cable	49
4.1 Návod: jak vytvořit <i>Cable</i>	49
4.1.1 Cíl návodu.....	49
4.1.2 Kde najít funkci <i>Cable</i>	50
4.1.3 Krok 1 z 5: Nastavení úchytů.....	50
4.1.4 Krok 2 z 5: Vlastnosti kladky	51
4.1.5 Krok 3 z 5: Další nastavení kladek.....	52
4.1.6 Krok 4 z 5: Vlastnosti vlákna.....	53
4.1.7 Krok 5 z 5: Dokončení	57
4.2 Aplikace systému <i>Cable</i> na stand s kladkou.....	58
4.2.1 Srovnání s experimentem	58
5 Závěr	63
Literatura	64

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá tvorbou dynamických modelů vláken pro návrh vláknových mechanismů. Vlákna, lana, kabely a dráty jsou z hlediska dynamiky zajímavé mechanické systémy, které mají tu vlastnost, že přenáší pouze tahové síly a nelze na ně působit tlakem. V práci jsou představeny tři různé přístupy k řešení této problematiky s využitím programu MSC.ADAMS (*Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems*), což je obsáhlý výpočetní systém vhodný pro modelování a numerické simulace vázaných soustav těles [1], [2]. K účelům této práce byl používán modul ADAMS/View, který je současně provázán s doplňkem ADAMS/PostProcessor. V modulu ADAMS/View byly konstruovány modely a prováděny numerické simulace, zatímco v *PostProcessoru* byly získané výsledky dále zpracovány. Kromě ADAMSu byl využíván program MATLAB, ve kterém byly srovnávány výsledky ze simulací.

Struktura práce je následující. V kapitole 2 je popsán nejjednodušší způsob reprezentace vlákna pomocí nelineární síly. Kapitola 3 se věnuje dalšímu možnému postupu vytvoření modelu vlákna pomocí hmotných bodů, mezi kterými jsou předepsány nelineární síly. V kapitole 4 je představen třetí způsob modelování vlákna pomocí nově zavedené funkce *Cable* (*vlákno*) v modulu ADAMS/Machinery.

Práce si klade za cíl shrnout možné způsoby modelování vláken v rámci dynamiky vázaných soustav těles a představit aplikaci různých modelů vláken na konkrétní mechanické systémy (standy). Nedílnou součástí každé kapitoly je nejen vysvětlení principů tvorby modelu, ale také srovnání výsledků z numerických simulací s výsledky z převzatých experimentů.

2 Silové modelování vláken

Jeden z nejčastějších způsobů, jak vytvořit model vlákna, je popsat ho pomocí síly. Vlákno bude v modelu reprezentováno silou, jejíž velikost závisí na deformaci, tuhosti a na tlumicím koeficientu. Je zde tedy zjevná podobnost se silou v pružině [1]

$$F = kx,$$

kde k je tuhost pružiny a x je deformace pružiny.

2.1 Princip metody

Je obecně známo, že vlákno není schopno přenášet tlak, to znamená, že přenáší pouze tah. Toto musí být respektováno v samotném předpisu síly. Musí tedy být splněn fakt, že se síla opakovaně za určitých podmínek vypne a následně opět zapne. V softwaru ADAMS/View se toho dá docílit pomocí funkce *STEP* nebo *IF*. Ve všech následujících předpisech sil bude využito pouze funkce *IF* mající v ADAMSu tvar, který bude uveden následně.

2.1.1 Funkce IF

IF (Expression1: Expression2, Expression3, Expression4) [5]

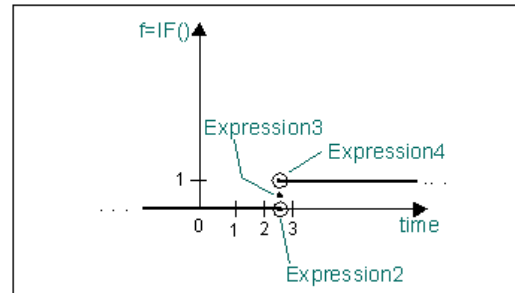
<i>Expression1</i>	výraz, který ADAMS vyhodnocuje
<i>Expression2</i>	pokud je hodnota (uvedena v <i>Expression1</i>) menší než 0, pak funkce IF vrátí hodnotu <i>Expression2</i>
<i>Expression3</i>	pokud je hodnota (uvedena v <i>Expression1</i>) rovna 0, pak funkce IF vrátí hodnotu <i>Expression3</i>
<i>Expression4</i>	pokud je hodnota (uvedena v <i>Expression1</i>) větší než 0, pak funkce IF vrátí hodnotu <i>Expression4</i>

Tabulka 2.1: Argumenty funkce IF [5]

Použití funkce IF na konkrétním příkladu

Funkce	IF(time-2.5;0,0.5,1)
Výsledek	0.0 if time < 2.5 0.5 if time = 2.5 1.0 if time > 2.5

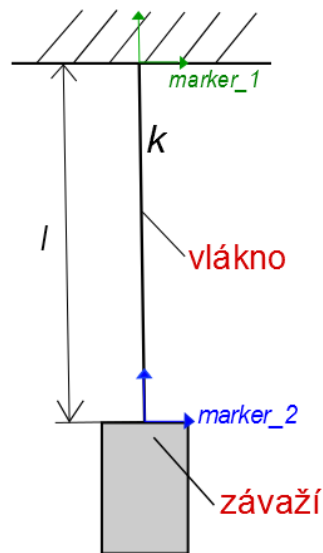
Tabulka 2.2: Příklad použití funkce IF [5]



Obrázek 2.1: Příklad použití funkce IF [5]

2.2 Princip vytvoření modelu vlákna pomocí síly

Mějme vlákno celkové délky l o tuhosti k . Na vláknu je zavěšeno závaží dle obrázku 2.2. Vzdálenost mezi markery $marker_1$ a $marker_2$ představuje aktuální délku mezi rámem a závažím. Tlumení v tomto případě není uvažováno.



Obrázek 2.2: Závaží zavěšeno na vlákne o tuhosti k a délce l

Pokud nadzvedneme závaží do určité výšky a následně ho pustíme, závaží bude padat volným pádem až do momentu, kdy bude aktuální vzdálenost mezi markery $DY(marker_1, marker_2)$ (*Distance Along Y*) větší než celková délka vlákna l . Právě v tomto časovém okamžiku se síla reprezentující vlákno zapne.

Svoji roli zde má samozřejmě i tuhost vlákna k . Pokud bude tuhost vlákna příliš malá, závaží „vykmitne“ více směrem dolů a chování vlákna se v tomto případě může podobat chování pružiny (v reálném případě by mohlo dojít k přetržení vlákna). Čím vyšší bude tuhost, tím větší bude i síla ve vlákně.

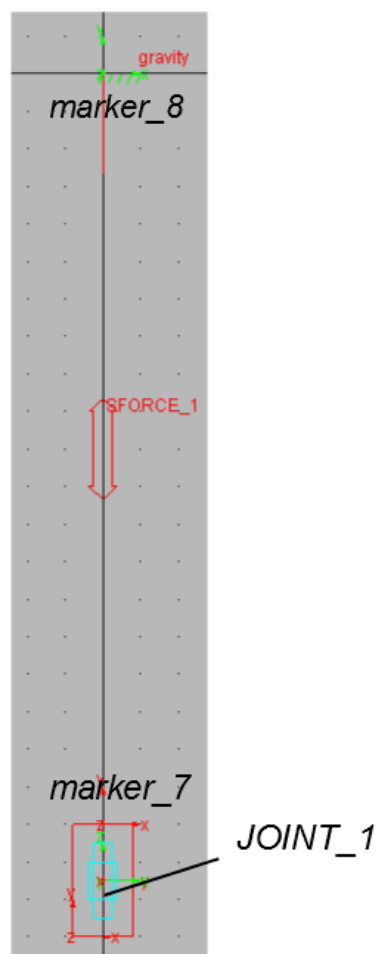
Předpis pro výslednou sílu reprezentující vlákno

Předpis výsledné síly je

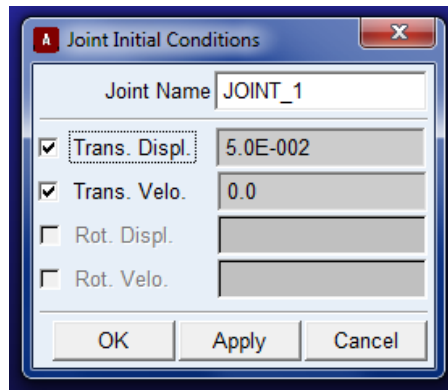
$$IF (DY (marker_1, marker_2) - l: 0, 0, k*(DY (marker_1, marker_2) - l)).$$

2.3 Příklad tvorby vlákna v ADAMSu

Mějme vlákno délky $l = 1$ m, tuhost vlákna $k = 10^5$ Nm⁻¹ a tlumení $b = 100$ Nm⁻¹s. Hmotnost závaží je $m = 3,096$ kg. Tento případ je zobrazen na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Příklad vlákna a závaží namodelován v ADAMSu



Obrázek 2.4: Zadávání počátečních podmínek vazbě JOINT_1

Na závaží byla aplikována posuvná vazba *JOINT_1*, která zaručuje pohyb závaží pouze ve vertikálním směru. Díky této posuvné vazbě je také možno zadat břemenu jakoukoliv počáteční podmínku. V tomto případě byla zvolena počáteční výchylka $y_0 = 0,05$ m a počáteční rychlost $v_0 = 0$ m/s, jak je ukázáno na obrázku 2.4.

Mezi rám a závaží byla dále aplikována síla *SFORCE_1*. Tato síla je typu *Between Two Bodies In Line-Of-Sight* (Mezi dvěma tělesy). Jako akční těleso bylo zvoleno břemeno a jako reakční těleso zvolen rám (*ground*).

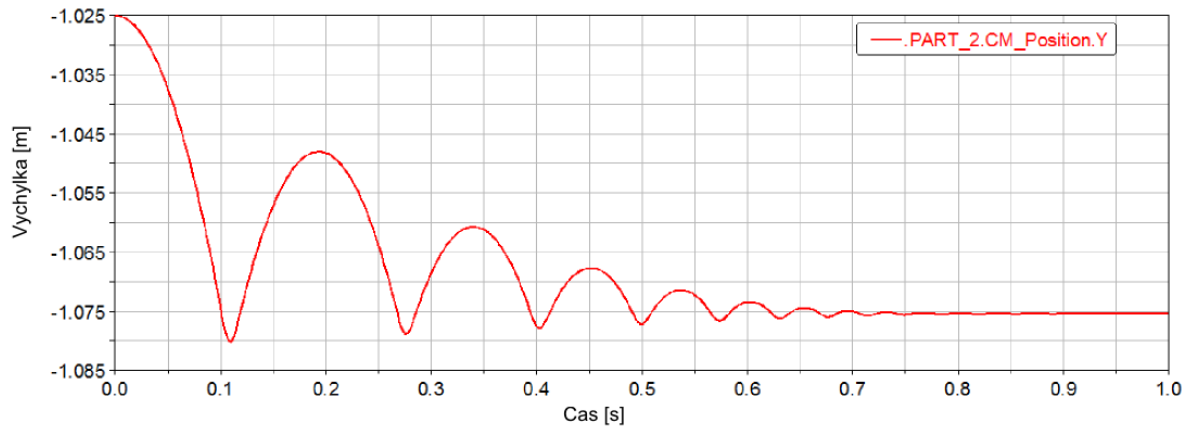
2.3.1 Konečný předpis síly reprezentující vlákno

$$IF(DY(MARKER_8, MARKER_7) - 1 : 0, 0, -((10**5)*(DY(MARKER_8, MARKER_7) - 1) + (100)*VY(MARKER_8, MARKER_7, 0)))$$

V první části je předpis typově téměř identický s předpisem uvedeným výše kromě jednoho „mínusu“ souvisejícího s orientací markerů *MARKER_7* a *MARKER_8* vůči sobě a vůči globálnímu souřadnému systému. V poslední části předpisu ve výrazu s tlumením vystupuje funkce *VY* (*Velocity Along Y*). Jedná se o funkci, která vrací y-ovou složku vektoru rozdílu rychlostí dvou různých markerů. V tomto případě se jedná opět o *MARKER_7* a *MARKER_8*.

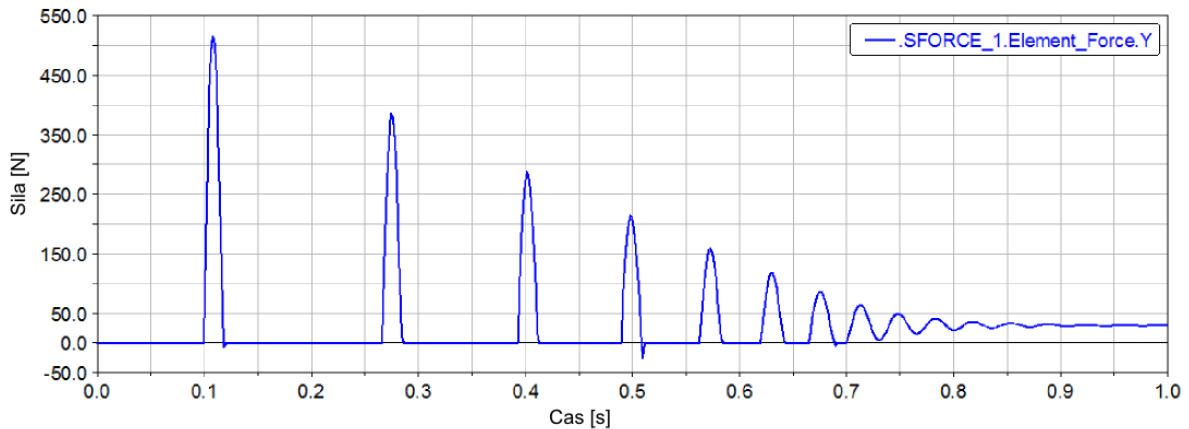
2.3.2 Výsledky ze simulace o trvání 1 sekundy

Důležité kritérium přesnosti výsledků je volba integrátoru. Velkou roli zde hraje především schopnost integrační metody při výpočtu zachovávat energii (míra zachování energie byla posuzována na příkladu pádu závaží řešeného bez tlumení, výsledky jsou na obrázcích 2.8 a 2.9). Na základě postupného testování všech dostupných integračních metod vyhověly v tomto ohledu metody HASTIFF a RKF45, které jsou proto využívány ve všech následujících případech pádu závaží.



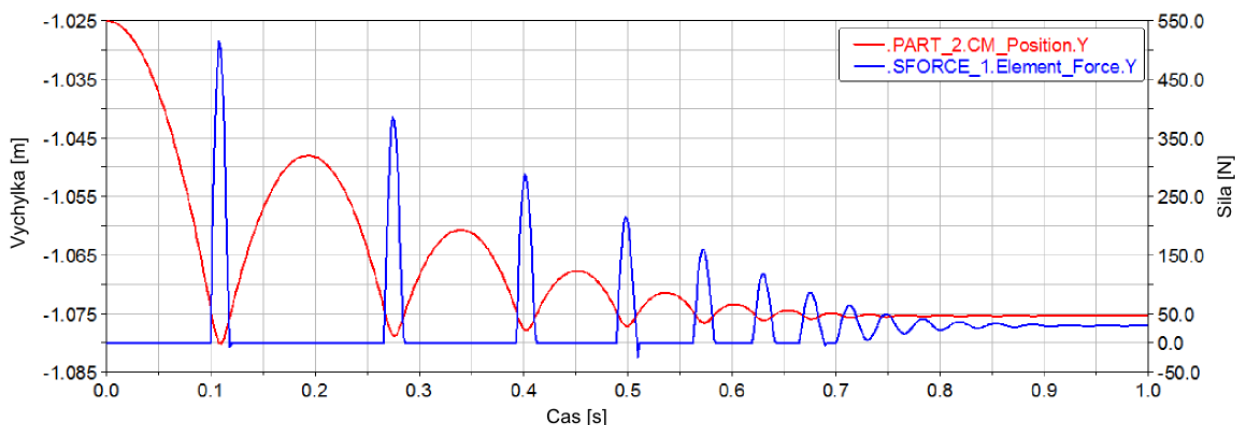
Obrázek 2.5: Závislost výchylky břemena na čase

Poloha centrálního markeru (*PART_2.CM*) břemena byla před začátkem simulace -1,075 m. 1 metr z této hodnoty představuje délka vlákna a 0,075 m je pak délka představující polovinu výšky závaží. Z grafu na obrázku 2.5 je vidět, že břemeno startuje z polohy o 50 mm vyšší, což je přesně hodnota udávající počáteční výchylku posuvné vazby závaží. Vlivem tlumicího členu dochází k postupnému zmenšování výchylky jednotlivých skoků až k jejímu úplnému ustálení na původní hodnotě -1,075 m.



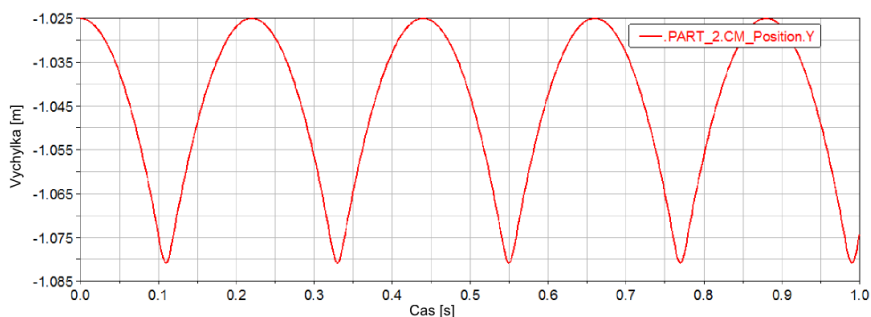
Obrázek 2.6: Závislost síly ve vlákně na čase

Na obrázku 2.6 je graf skokového průběhu síly ve vlákně. Jak již bylo naznačeno výše, síla ve vlákně se zapíná pouze po určitých časových intervalech. V jakýkoliv jiný časový okamžik je nulová. Absence síly ve vlákně nastává právě tehdy, když vlákno není napnuto. Propojení obou průběhů je zaznamenáno v následujícím grafu na obrázku 2.7.

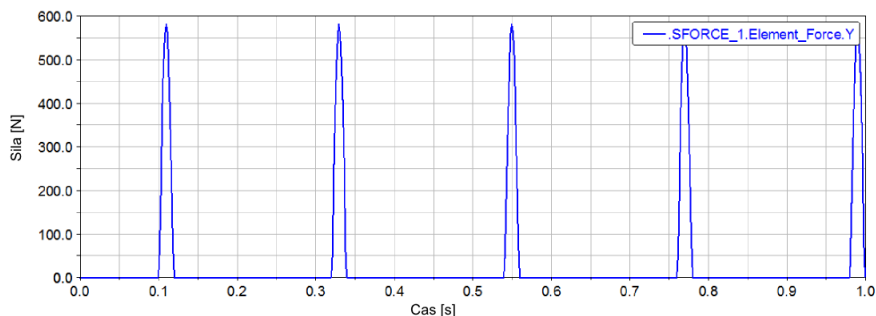


Obrázek 2.7: Graf propojení průběhu síly ve vlákně a průběhu výchylky závaží

2.4 Výstupy předchozího příkladu řešeného bez tlumení



Obrázek 2.8: Závislost výchylky břemena na čase (bez tlumení)



Obrázek 2.9: Závislost síly ve vlákně na čase (bez tlumení)

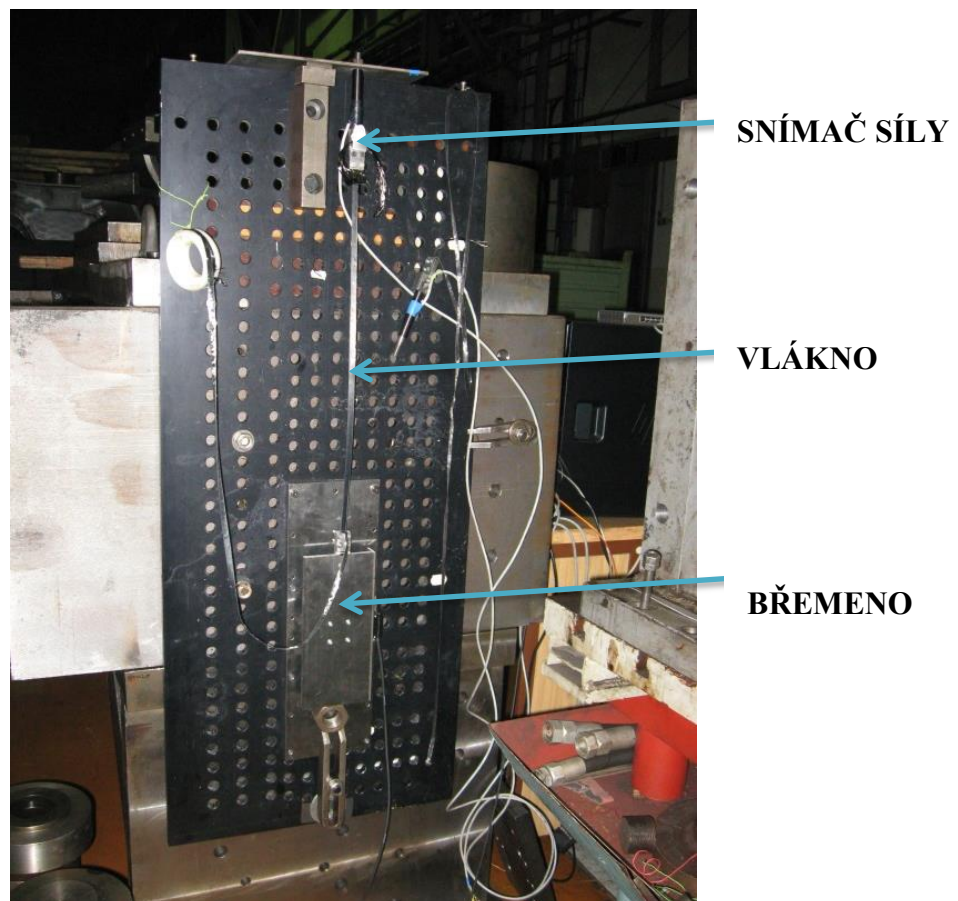
Jak je možno vidět v grafech (obrázek 2.8 a 2.9), v případech, kdy není tlumení uvažováno, dle řešiče programu nedojde k žádnému utlumení a soustava bude kmitat nekonečně dlouho. Ve skutečnosti by ale tato situace nemohla nikdy nastat kvůli dalším třecím silám (např.: třecí síly ve vedení), které by způsobily dřívější či pozdější úplné zastavení břemene. Tento případ je tedy jakýmsi limitním ideálním případem, ke kterému v reálných aplikacích nemůže nikdy dojít.

2.5 Stand 1: Volný pád závaží

Stand, který byl již popsán v podkapitole výše, je velmi podobný tomu, který bude popsán následovně. Rozdíl je v tom, že následující případ byl experimentálně odměřen. Součástí této kapitoly bude srovnání výsledků z vlastního modelu vytvořeného v ADAMSu s výsledky z provedeného experimentu [3].

2.5.1 Popis standu

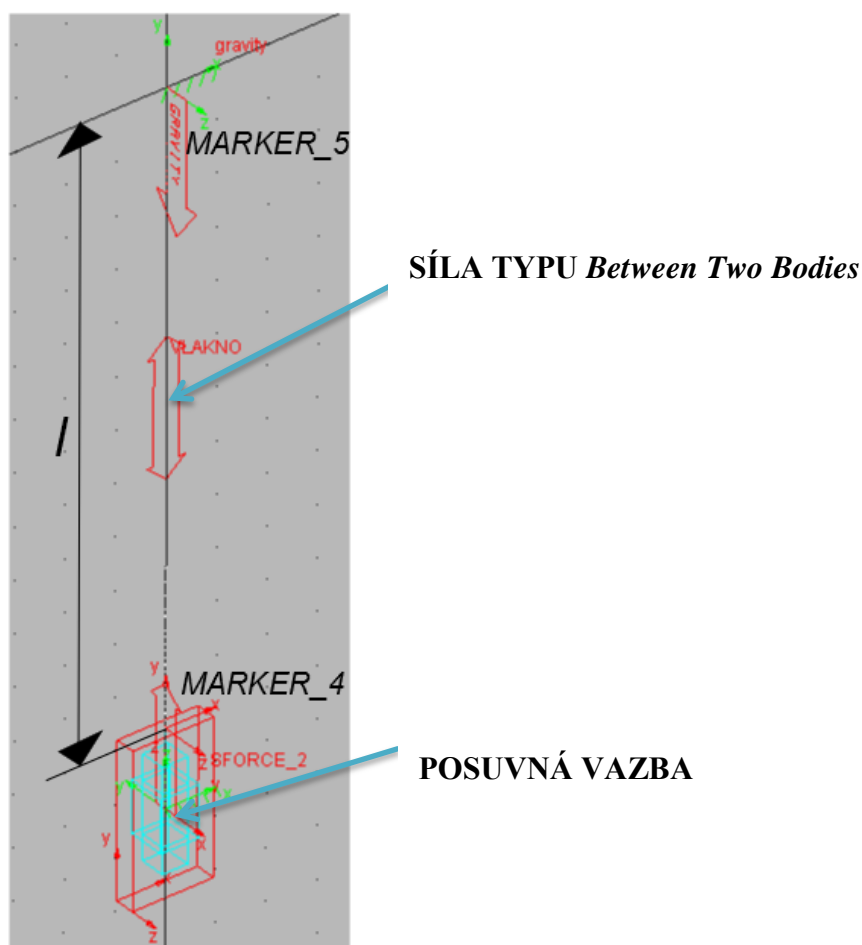
Břemeno o hmotnosti $m = 3,096$ kg je zavěšeno na vlákne o délce $l = 0,599$ m, tuhosti $k = 163 \cdot 10^3$ Nm⁻¹ a o tlumení $b = 113,94$ Nm⁻¹s. Jedná se o kolmý pád, to znamená, že rovina, po které se břemeno pohybuje, je nakloněna o úhel $\alpha = 90^\circ$. Uvedené hodnoty byly převzaty z [3]. Experimentální stand je ukázán na obrázku 2.10. Břemeno je upevněno k rovině pomocí vertikálního vedení z důvodu zabránění případnému vychýlení závaží do stran při odskocích.



Obrázek 2.10: Fotografie experimentu [3]

2.5.2 Model v ADAMSu

Model je zobrazen na obrázku 2.11. Závaží je opět modelováno ve tvaru kvádrů s danou hmotností. Délka od počátku souřadného systému k vrchní části závaží se rovná délce napnutého vlákna. *MARKER_5* a *MARKER_4* jsou umístěny dle obrázku 2.11 na počátek a na konec vlákna (na vrchní plochu břemene). Na závaží byla dále aplikována posuvná vazba, která nahrazuje posuvné vedení, po kterém se ve skutečnosti závaží pohybuje. Pro sílu reprezentující vlákno byla opět zvolena síla typu *Between Two Bodies* (*Mezi dvěma tělesy*).



Obrázek 2.11 Model standu v ADAMSu

Jak si lze dále všimnout, na obrázku 2.11 je zobrazena síla *SFORCE_2*. V tomto případě se jedná o sílu typu *On One Body* (*Na tělese*), která má za úkol simulovat skutečné tření v posuvném vedení. Její předpis je dán funkcí *SIGN* (signum). Správné použití této funkce v ADAMSu bude vysvětleno v následující podkapitole.

Funkce SIGNUM

Tato funkce vrací hodnoty takto:

- $SIGN(a_1, a_2) = ABS(a_1)$ jestliže $a_2 > 0$
- $SIGN(a_1, a_2) = -ABS(a_1)$ jestliže $a_2 < 0$

Formát je tedy ve tvaru $SIGN(x_1, x_2)$, kde x_1, x_2 jsou argumenty, které musí nabývat hodnoty reálného čísla (převzato a pozměněno z [5]).

Příklad [5]:

$SIGN(TIME, VZ(marker_2, marker_3))$

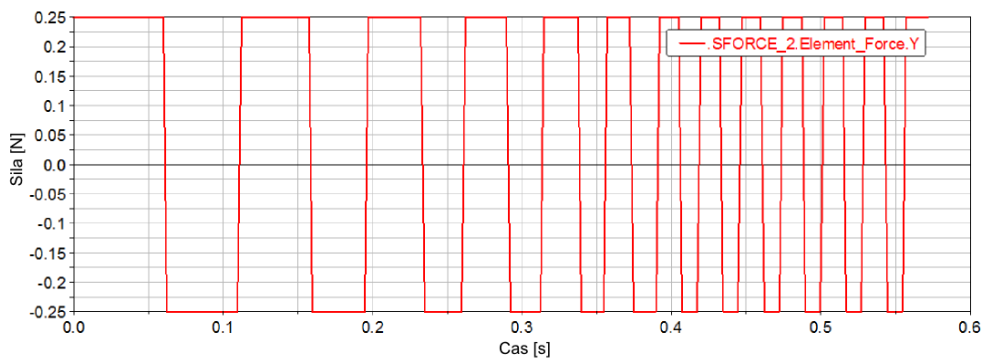
- Pokud $VZ(marker_2, marker_3) > 0$, pak funkce $SIGN$ vrátí hodnotu $ABS(TIME)$
- Pokud $VZ(marker_2, marker_3) < 0$, pak funkce $SIGN$ vrátí hodnotu $-ABS(TIME)$

Předpis třecí síly SFORCE_2

V předpisu

$SIGN(0.25, VY(MARKER_5, MARKER_4))$

je využito funkce VY (Velocity Along Y) a dále pak hodnoty výsledné třecí síly působící ve vedení, která byla v tomto případě odhadnuta na základě srovnání s experimentem. Časový průběh síly je zobrazen na obrázku 2.12.



Obrázek 2.12: Časový průběh třecí síly ve vedení

Předpis síly reprezentující vlákno

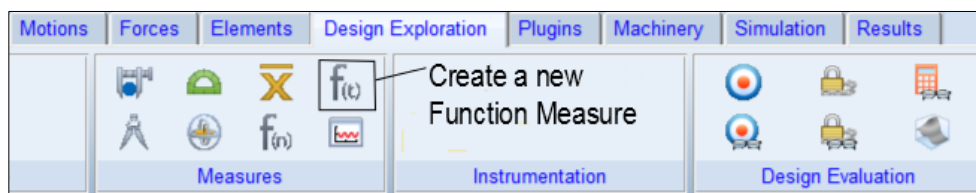
Předpis síly je

$IF(DY(MARKER_5, MARKER_4) - 0.599 : 0, 0, -((163 * 10^{**3}) * (DY(MARKER_5, MARKER_4) - 0.599) + (113.94) * VY(MARKER_5, MARKER_4, 0)))$.

2.5.3 Srovnání s experimentem

Experimentální měření probíhalo ve třech částech. V první části bylo břemeno vychýleno o hodnotu zhruba 5 mm a v dalších částech se pak počáteční výchylka břemene zvětšovala na cca 10 mm a 15 mm. Pro každou z těchto počátečních podmínek byla zaznamenána výchylka závaží a také síla ve vláknech. Grafy se srovnáním síly ve vláknech a výchylky pro každou část jednotlivě jsou zobrazeny na obrázcích 2.14 – 2.19. Srovnání výsledků experimentu a modelu bylo provedeno v programu MATLAB určeného k matematickým a vědeckotechnickým výpočtům.

Jak je vidět z grafů výchylek (obrázek 2.14, 2.16, 2.18), hodnoty na svislé ose představují výchylku břemene v lokálním souřadném systému, nikoliv v globálním souřadném systému. Proto bylo nutno vytvořit novou proměnnou funkci odečítající polohu závaží přímo. V ADAMS/View se nová funkce takového typu vytváří pomocí ikony vyznačené na obrázku 2.13.



Obrázek 2.13: Vytvoření funkce Measure

Funkce popisující polohu závaží

Funkce, která popisuje polohu břemene, má tvar

$$0.599 - DY(MARKER_5, MARKER_4) + (1.8597 \cdot 10^{(-4)}),$$

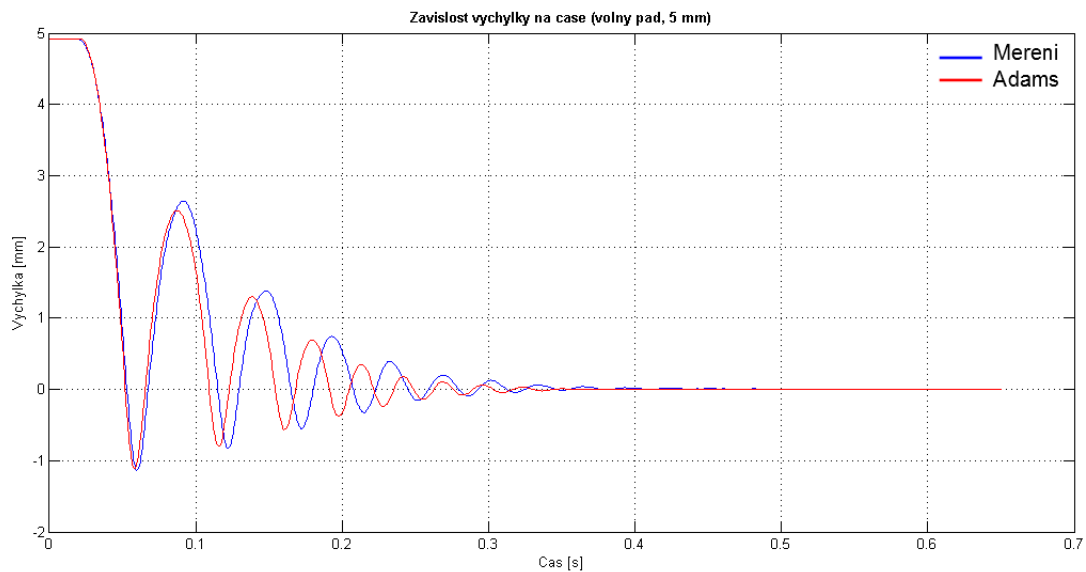
kde první část ($0.599 - DY(MARKER_5, MARKER_4)$) představuje aktuální polohu závaží. Pokud bychom břemenu neudali žádnou počáteční podmínku, na začátku simulace by tento výraz byl ($0,599 - 0,599 = 0$) nulový. Tato část předpisu tedy doopravdy odpovídá aktuální poloze závaží.

Druhá část předpisu ($1.8597 \cdot 10^{(-4)}$) se dále týká statické rovnovážné polohy. Pokud by závaží opět nebyla udána žádná počáteční podmínka a byla by spuštěna simulace, dojde k samovolnému kmitání břemene díky jeho vlastní váze. Na konci tohoto děje se pak závaží ustálí v určité poloze, která je udána právě číslem v druhé části předpisu funkce. Proto tuto hodnotu musíme k předpisu přičíst, aby se závaží na konci každého děje ustálilo na nulové výchylce.

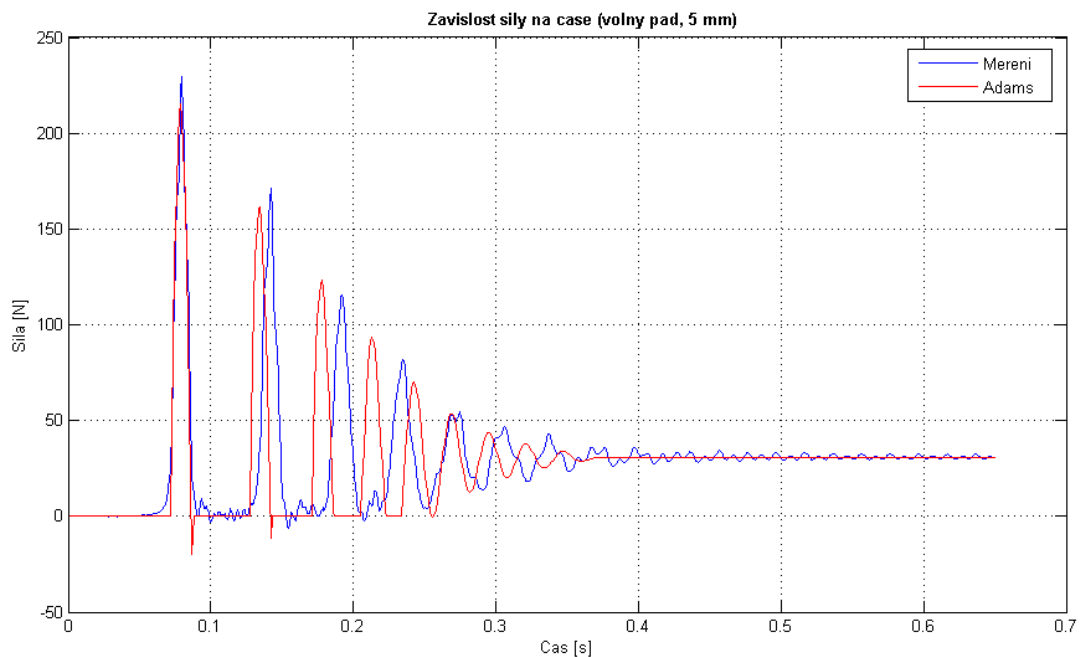
Grafy jednotlivých srovnání experimentálního měření s modelem v ADAMSu

Výsledné křivky pořízené z experimentálního měření mají v grafech vždy modrou barvu. Výsledky z modelu vytvořeného v ADAMSu mají barvu červenou.

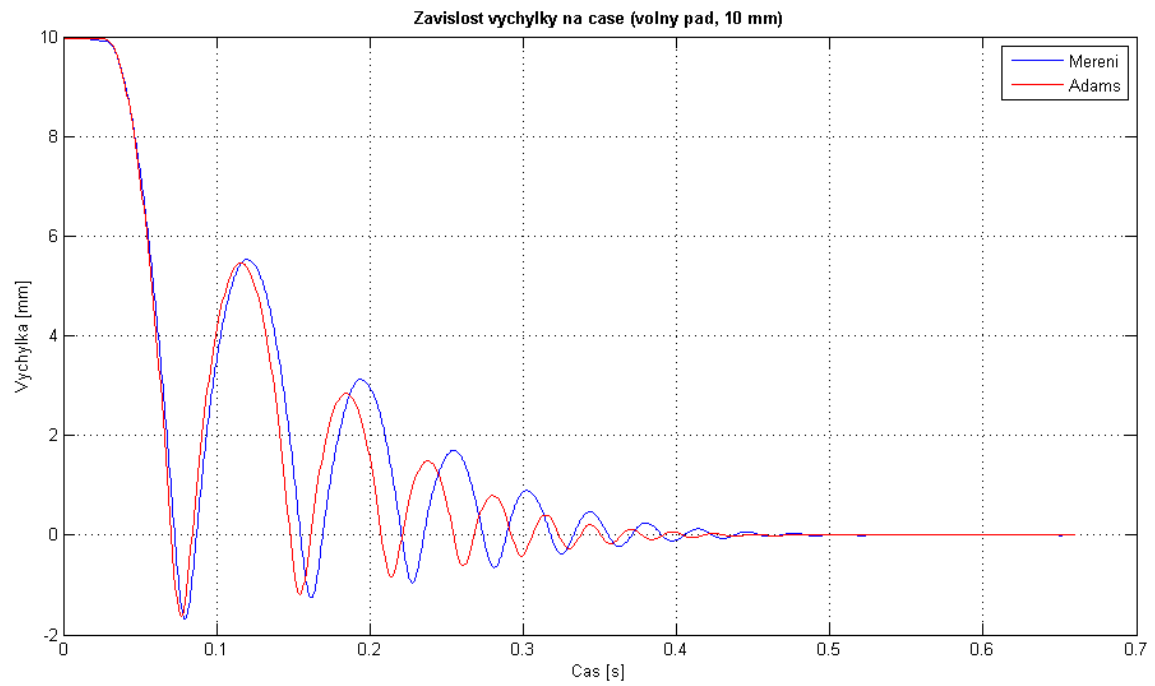
Jak již bylo řečeno výše, kvalita výsledků z ADAMSu je ve velké míře závislá na volbě integrátoru. Pokud by došlo k nevhodné volbě integrátoru, simulace by buď selhala, nebo by proběhla nepřesně. Pro tento případ byla zvolena integrační metoda HASTIFF s dovolenou maximální chybou 10^{-6} .



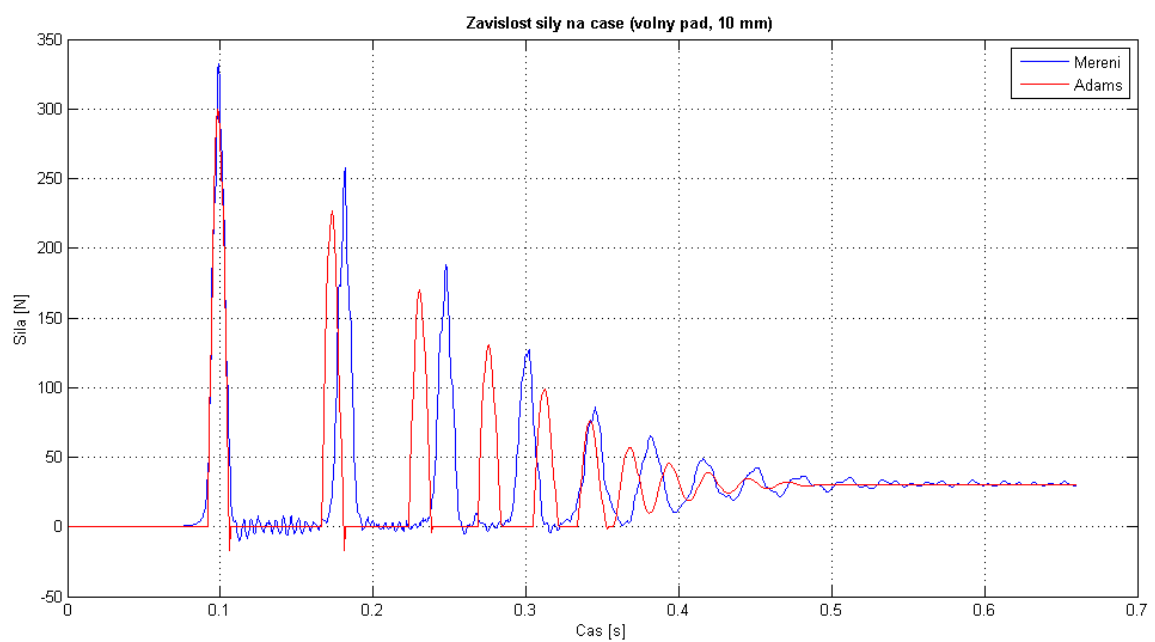
Obrázek 2.14: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5$ mm



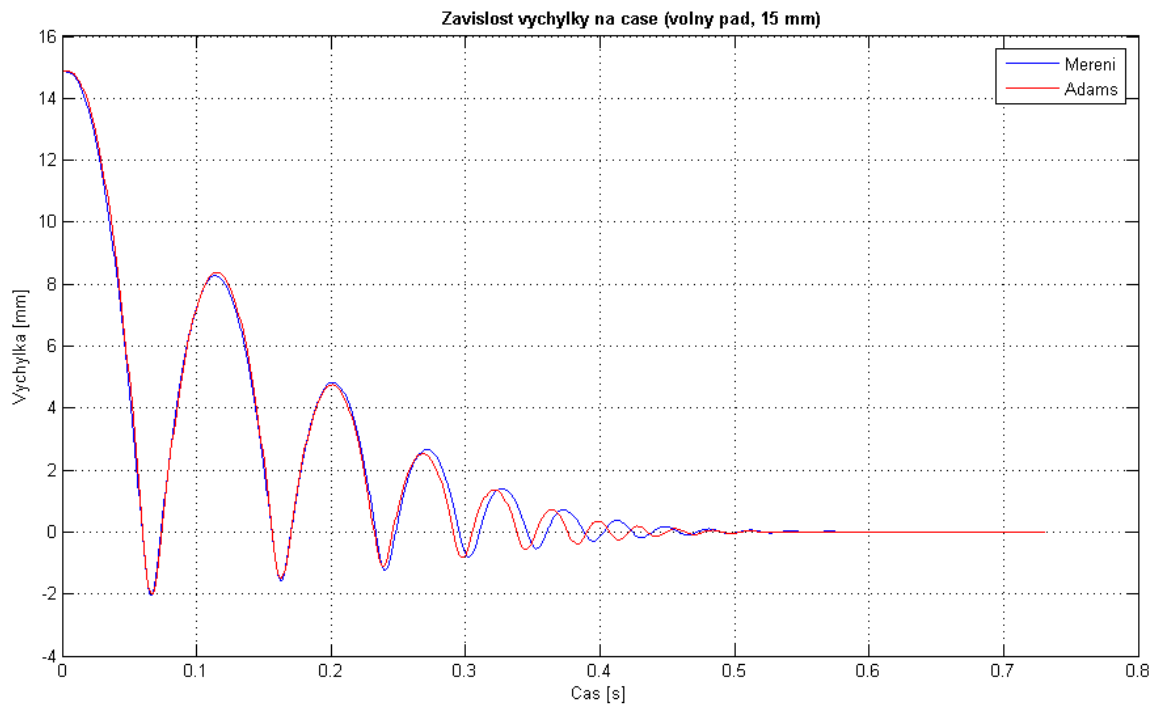
Obrázek 2.15: Graf srovnání síly ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5$ mm



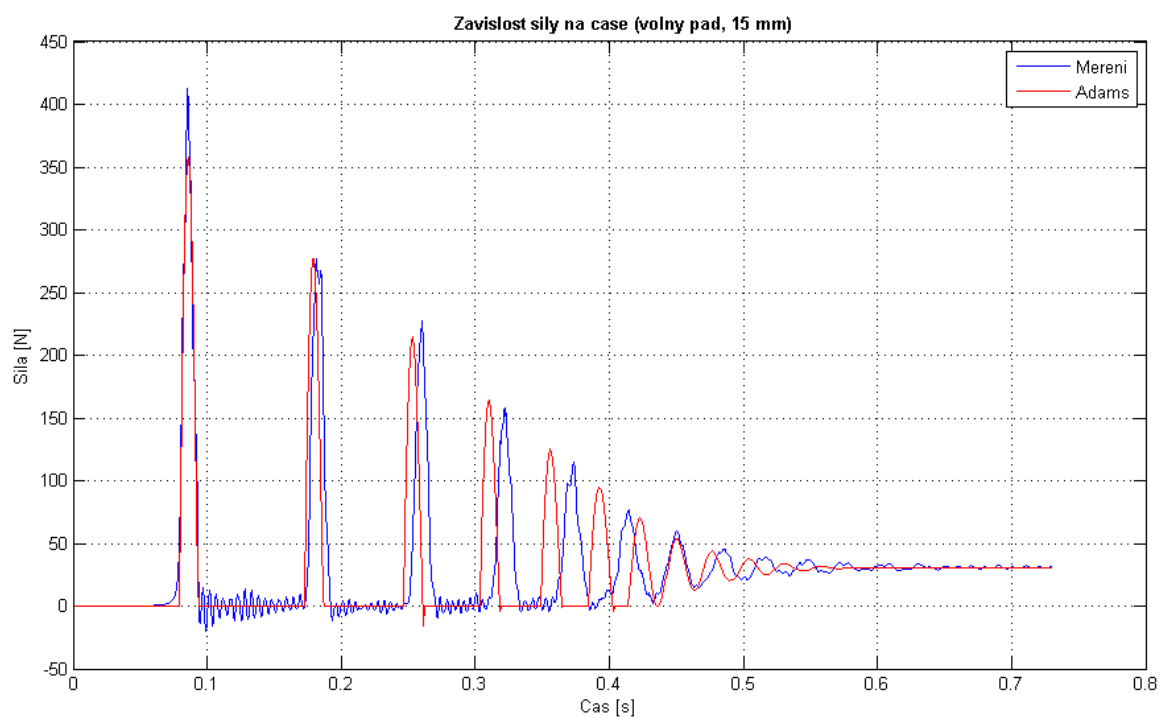
Obrázek 2.16: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 2.17: Graf srovnání síly ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 2.18: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15 \text{ mm}$



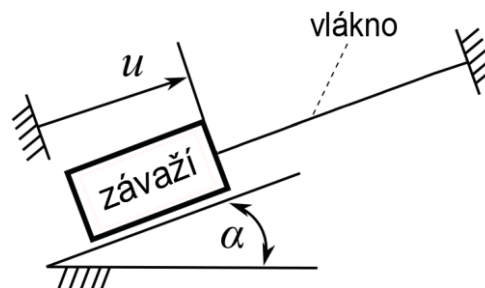
Obrázek 2.19: Graf srovnání síly ve vlákně pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15 \text{ mm}$

2.6 Stand 2: Šikmý pád závaží

Jak již název kapitoly napovídá, následující stand se bude týkat břemene, které se pohybuje po nakloněné rovině. Úhel nakloněné roviny je $\alpha = 45^\circ$. Hmotnost závaží i délka vlákna zůstanou zachovány, změna nastane v tuhosti i tlumení vlákna. Tento případ byl také experimentálně změřen a vyhodnocen, proto bude součástí této kapitoly opět srovnání modelu v ADAMSu s experimentem [3].

2.6.1 Popis standu

Mějme závaží o totožné hmotnosti $m = 3,096$ kg a vlákno o stejné délce $l = 0,599$ m, tuhosti $k = 104 \cdot 10^3$ Nm⁻¹ a o tlumení $b = 83,47$ Nm⁻¹s. Úhel nakloněné roviny je tentokrát tedy $\alpha = 45^\circ$. Uvedené hodnoty byly převzaty z [3]. Stand je ukázán na schématickém obrázku 2.20.



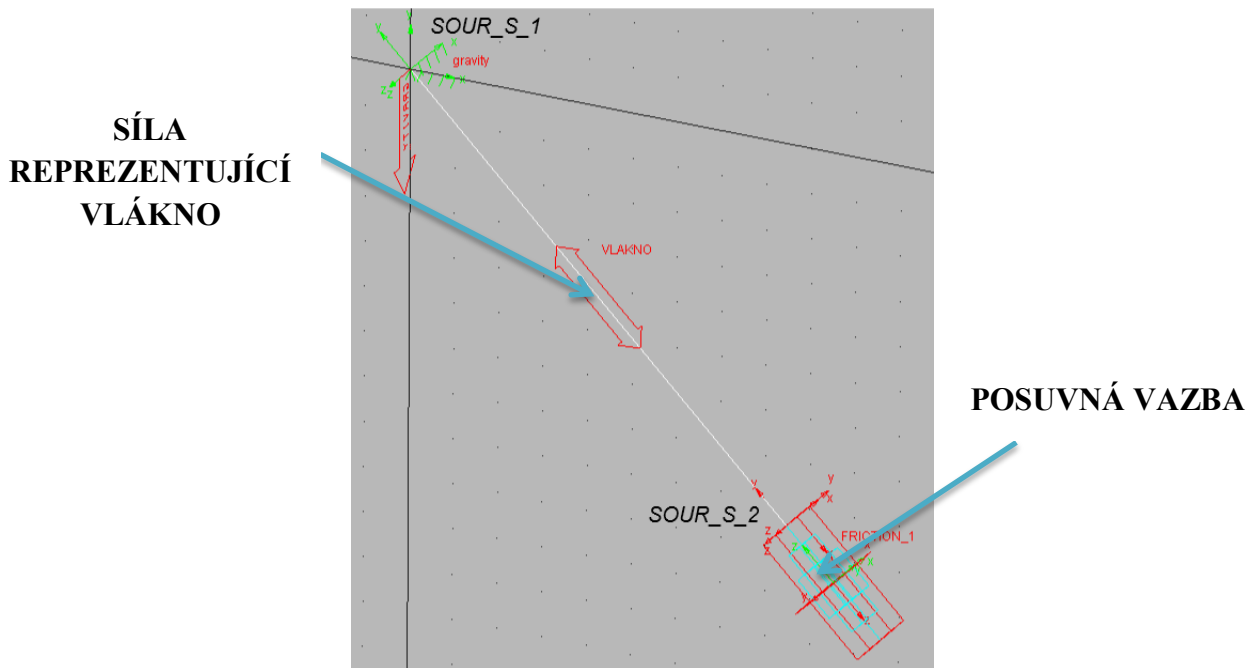
Obrázek 2.20: Schéma standu závaží na nakloněné rovině o úhel $\alpha = 45^\circ$ [3,4]



Obrázek 2.21: Fotografie experimentu pořizena v laboratoři [3,4]

2.6.2 Model v ADAMSu

Model je zobrazen na obrázku 2.22. Vše bylo namodelováno stejně jako v případě předchozího standu. Liší se ale úhel sklonu roviny, po které se závaží pohybuje. Typ síly reprezentující vlákno byl opět zvolen *Between Two Bodies*. Z obrázku 2.22 si lze dále povšimnout funkce *FRICITION_1* přiřazené posuvné vazbě. Jedná se o reprezentaci tření, která bude objasněna v následující kapitole.



Obrázek 2.22: Model standu v ADAMSu

Předpis síly reprezentující vlákno má tvar

$$IF (DY (SOUR_S_1, SOUR_S_2, SOUR_S_1) - 0.599:0, 0, -((104*10^{**}3)*(DY (SOUR_S_1, SOUR_S_2, SOUR_S_1) - 0.599) + (83.47)*VY (SOUR_S_1, SOUR_S_2, SOUR_S_1))),$$

kde se vyskytují funkce *DY* i *VY* mající 3 parametry. Třetí parametr v závorce je v předpisu z důvodu pootočení celého modelu vzhledem k hlavnímu souřadnému systému. V případě svislého pádu zastoupení třetího parametru v závorce nebylo nutné, protože byla y-ová složka daného markeru totožná s osou y globálního souřadného systému. V tomto případě tomu tak ale není, proto bylo nutné třetí parametr použít. Pro lepší představu bude následně vysvětleno použití funkcí *DY* a *VY* včetně jejich třetích parametrů.

Distance Along Y (DY)

DY je funkce, která vrací y-ovou složku vektoru vzdálenosti od jednoho markeru k druhému [5].

Formát funkce:

DY (K Markeru, Od Markeru, Podle Markeru)

<i>K Markeru</i>	Marker, ke kterému je vzdálenost měřena (povinný argument).
<i>Od Markeru</i>	Marker, od kterého je vzdálenost měřena (nepovinný argument).
<i>Podle Markeru</i>	Marker, podle kterého (dle směru jeho y-ové osy) je vzdálenost měřena (nepovinný argument).

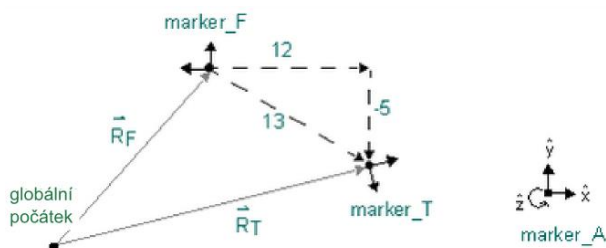
Tabulka 2.3: Argumenty funkce DY [5]

Pokud není specifikován nepovinný parametr, pak se daný parametr vztahuje automaticky ke globálnímu souřadnému systému [5].

Příklad použití funkce DY:

Funkce	<i>DY (marker_T, marker_F, marker_A)</i>
Výsledek	-5

Tabulka 2.4: Konečný tvar funkce DY a hodnota jejího výstupu [5]



Obrázek 2.23: Příklad použití funkce DY [5]

Velocity Along Y (VY)

VY je funkce, která vrací y-ovou složku vektoru rozdílu rychlostí dvou různých markerů [5].

Formát funkce:

VY (K Markeru, Od Markeru, Podle Markeru, Referenční Marker)

<i>K Markeru</i>	Marker, jehož rychlost je měřena (povinný argument).
<i>Od Markeru</i>	Marker, jehož rychlost se odečítá (nepovinný argument). Pokud není tento argument specifikován, vztahuje se ke globálnímu počátku.
<i>Podle Markeru</i>	Marker, podle kterého je y-ová složka rychlosti měřena (nepovinný argument). Pokud není tento argument specifikován, vztahuje se ke globální ose y.
<i>Referenční Marker</i>	Marker, ve kterém je počítána časová derivace (nepovinný argument). Pokud není tento argument specifikován, pak se vztahuje k referenci na <i>groundu</i> .

Tabulka 2.5: Argumenty funkce VY [5]

Příklad použití funkce VY [5]:

Následující funkce vrací y-ovou složku vektoru rychlosti mezi markery *marker_T* a *marker_F*. Vektor je vyjádřen v souřadném systému markeru *marker_A* a všechny časové derivace jsou počítány vzhledem k markeru *marker_R*.

$$VY(marker_T, marker_F, marker_A, marker_R)$$

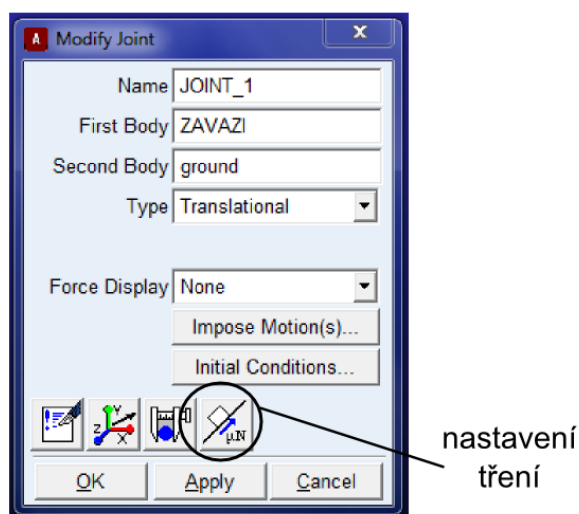
2.6.3 Problém tření

Zatímco v předchozím případě svislého pádu břemene bylo tření reprezentováno pomocí síly, v jejímž předpisu bylo využito funkce signum, v tomto případě bude tření ve vedení řešeno dvěma různými přístupy. Software MSC.ADAMS/View umožňuje různým vazbám přiřazení určitých vlastností, mezi které patří i parametry tření. Nastavením těchto parametrů tedy můžeme simulovat reálné tření v posuvném vedení. Další možný způsob reprezentace tření, který bude vysvětlen v jedné z následujících podkapitol, se týká vyjádření tření pomocí síly závislé na rychlosti tělesa. Tentokrát bude ovšem v předpisu využito funkce *AKISPL*.

Tření popsané pomocí parametrů tření v posuvné vazbě

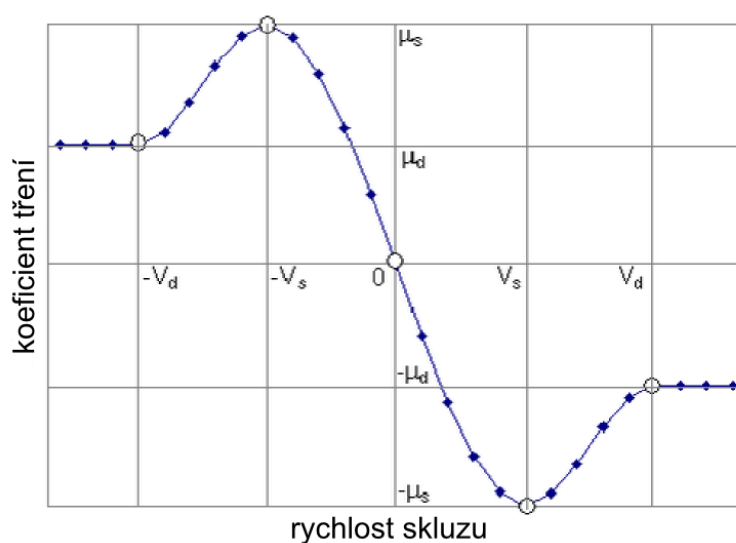
Jeden ze způsobů, jak zavést tření ve vazbě, se týká nastavení několika klíčových parametrů ve vlastnostech vazby. V tomto případě bylo nutno nastavit následující hodnoty.

- μ_s ... statický koeficient tření (*Mu Static*)
- μ_d ... dynamický koeficient tření (*Mu Dynamic*)
- v_s ... přechodová rychlost přilnutí (*Stiction Transition Velocity*)
- d_{max} ... maximální deformace přilnutí (*Max Stiction Deformation*)



Obrázek 2.24: Ikona nastavení parametrů tření

Z obrázku 2.24 je možno vidět, pod jakou ikonou se nastavení daných parametrů nachází. Způsob, jakým byly tyto hodnoty nastaveny, vychází ze základního tvaru tzv. třecí charakteristiky zobrazené na obrázku 2.25. Jedná se o graf, jehož osa x představuje hodnotu rychlosti skluzu tělesa a osa y je pak velikost jednotlivých třecích koeficientů. Významy jednotlivých konstant vyznačených v grafu jsou uvedeny výše, v_d je pak označení pro třecí přechodovou rychlost (*Friction Transition Velocity*).

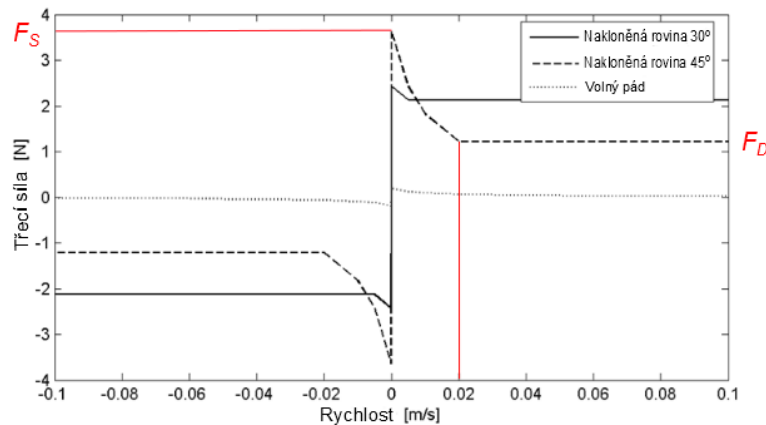


Obrázek 2.25: Závislost velikosti koeficientu tření na rychlosti skluzu [5]

Konkrétní hodnoty pro μ_s a μ_d byly zjištěny pomocí změřeného experimentu, díky němuž bylo možno stanovit konkrétní průběh třecí síly pro případ nakloněného pádu. Křivka popisující její průběh je zobrazena na obrázku 2.26. Osa x představuje opět rychlost závaží a osa y je velikost třecí síly mezi závažím a vedením. V obrázku je označena rychlost v_s , jejíž hodnota ($v_s = 0,02$ m/s) byla přímo použita v nastavení tření. Dále jsou zde označeny síly F_D a F_S , které lze z grafu změřit. Hodnoty μ_s a μ_d se pak dopočítají ze vztahů

$$\mu_s = \frac{F_S}{m \cdot g \cdot \cos \frac{\pi}{4}} = \frac{3,6}{3,096 \cdot 9,81 \cdot \cos \frac{\pi}{4}} = 0,16763,$$

$$\mu_d = \frac{F_D}{m \cdot g \cdot \cos \frac{\pi}{4}} = \frac{1,32}{3,096 \cdot 9,81 \cdot \cos \frac{\pi}{4}} = 0,061464.$$



Obrázek 2.26: Graf třecí síly mezi vedením a závažím v závislosti na rychlosti závaží (převzato a upraveno z [3])

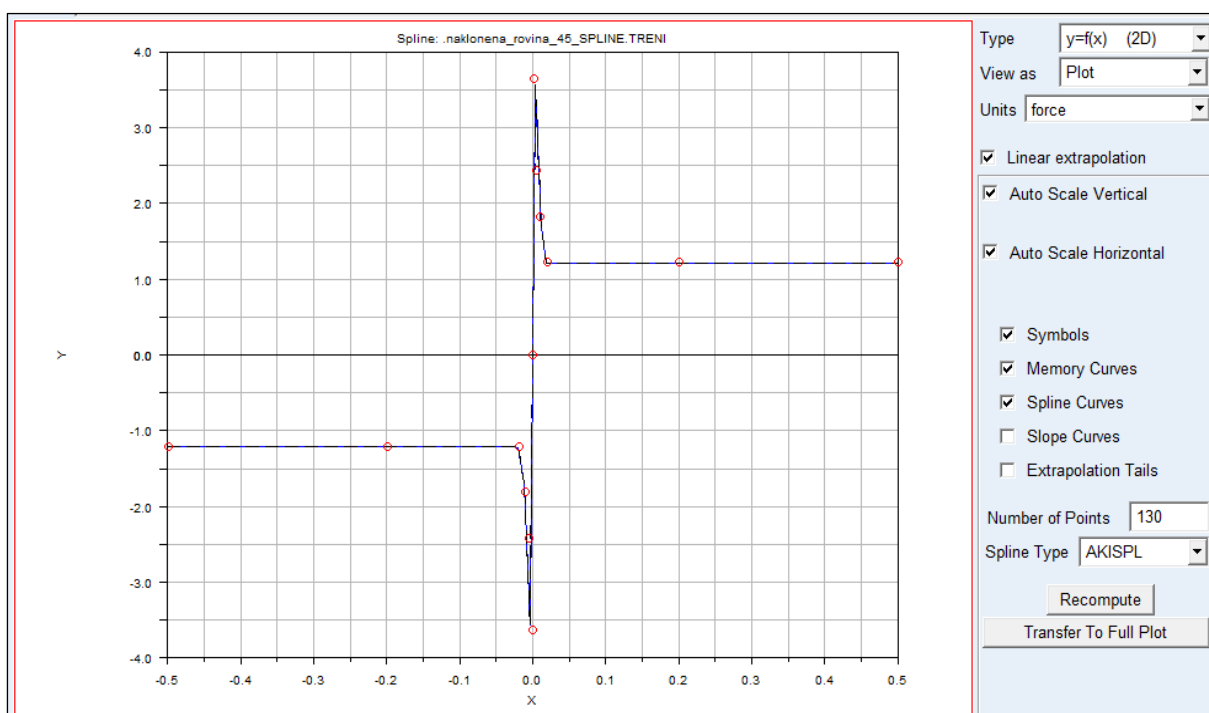
Translational Parameters	
Mu Static	0.16763
Mu Dynamic	6.1464E-002
Reaction Arm	1.2
Initial Overlap	1.0
With Positive Joint Displacement	
Overlap Will	Remain Constant
Stiction Transition Velocity	2.0E-002
Max Stiction Deformation	3.0E-002
Friction Force Preload	0.0
Effect	Stiction and Sliding
Input Forces to Friction:	
<input type="checkbox"/> Preload	<input checked="" type="checkbox"/> Reaction Force
<input type="checkbox"/> Torsional Moment	<input type="checkbox"/> Bending Moment

Obrázek 2.27: Výsledné nastavené hodnoty tření

Na obrázku 2.27 je zobrazeno konečné nastavení tření. Hodnoty *Reaction Arm* a *Initial Overlap* v tomto případě nemají na tření žádný vliv, protože ve vazbě nepůsobí žádný torzní (*Torsional Moment*) ani ohybový moment (*Bending Moment*). Hodnota *Max Stiction Deformation* byla odhadnuta.

Tření nastavené pomocí funkce AKISPL

Jak již bylo zmíněno výše, druhá možnost zavedení tření v posuvné vazbě je pomocí síly, v jejímž předpisu je použita funkce umožňující předepsání konkrétního průběhu síly. Tentokrát bylo využito funkce *AKISPL*, která na základě proložení daných bodů spline křivkou, umožňuje předepsat sílu, jejíž průběh je dán právě touto křivkou. Na obrázku 2.28 je vidět její průběh a také červeně označené body potřebné k jejímu proložení. Lze si také všimnout, že je křivka na tomto obrázku téměř identická s křivkou na obrázku 2.26, čehož bylo samozřejmě potřeba docílit.



Obrázek 2.28: Výsledná proložená křivka znázorňující průběh třecí síly

Předpis síly reprezentující tření ve vazbě

$$AKISPL (VY (SOUR_S_1, SOUR_S_2, SOUR_S_1), 0, TRENI)$$

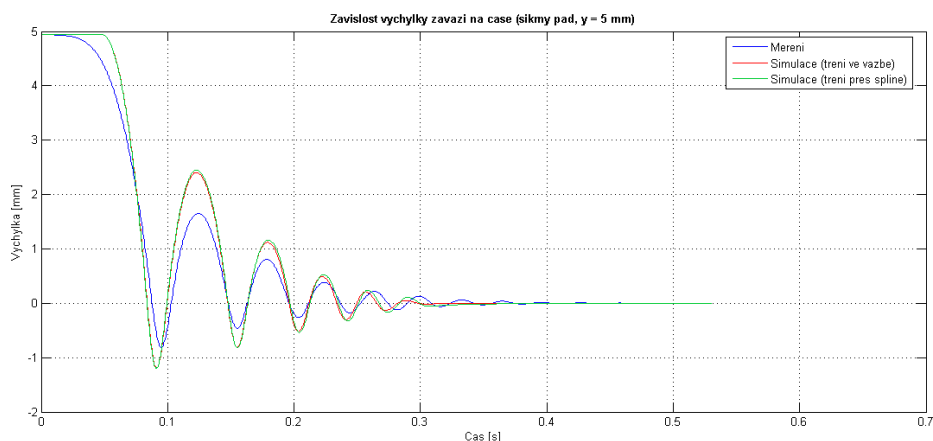
využívá funkce *AKISPL*, která má v závorce tři argumenty. První představuje první nezávislou proměnnou (*1st Independent Variable*) na ose *x*. Jedná se o rychlost závaží ve směru nakloněné roviny, tedy ve směru markeru *SOUR_S_1*. Druhý parametr (*2nd Independent Variable*) je nulový, protože jsou na ose *y* dány hodnoty síly, kterou tímto předpisem definujeme. Poslední argument je potom jméno splinu (*Spline Name*), kterým chceme sílu definovat.

2.6.4 Srovnání s experimentem

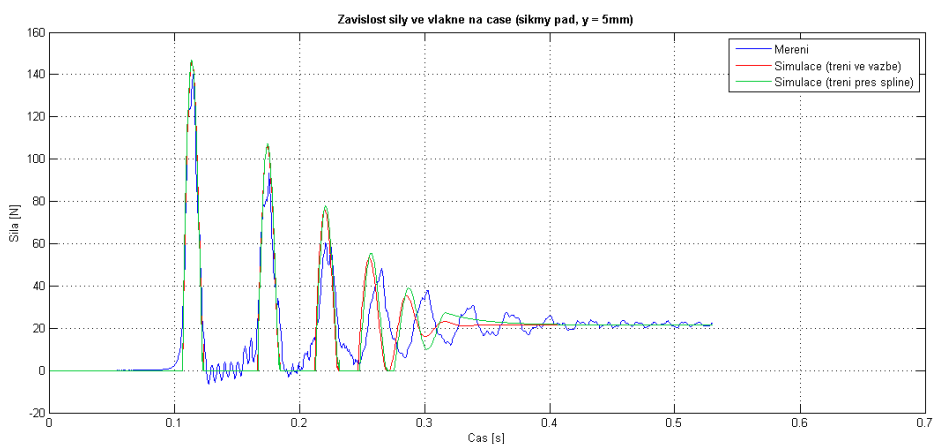
Následující obrázky 2.29 – 2.34 představují grafy jednotlivých srovnání. V každém z grafů je srovnáno experimentální měření s modelem se třením řešeným dvěma odlišnými způsoby objasněnými výše. Výsledky měření jsou v obrázcích opět vyznačeny modrou barvou a výstupy obou dvou druhů modelů jsou pak červeně a zeleně. Byly simulovány tři pády s odlišnými počátečními podmínkami. Pro každou jednotlivou počáteční podmínku byla vždy srovnána výchylka břemene a následně síla ve vláknech.

V případě volby integrátoru došlo ale ke změně. Metoda RKF45 je (stejně jako HASTIFF) schopna při simulaci zachovat energii. Z tohoto důvodu byla zvolena právě tato integrační metoda s dovolenou maximální chybou 10^{-6} .

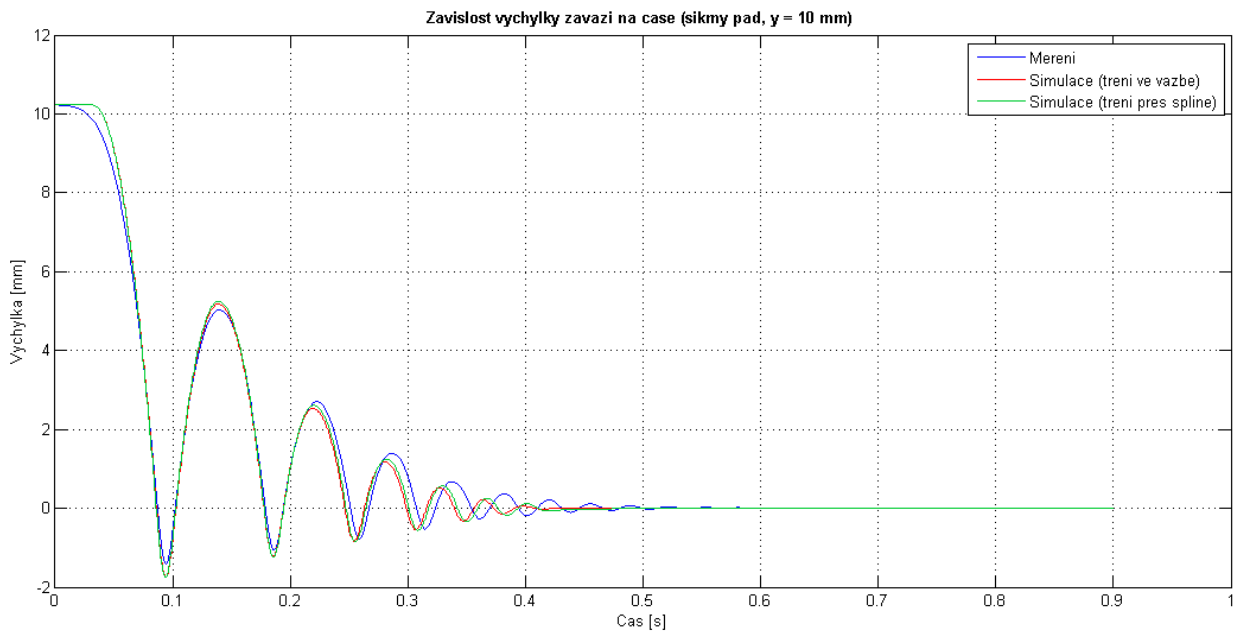
Z grafů je vidět posunutí začátku simulace u červených a zelených křivek popisující výchylku břemene. Bylo nutné tento posun provést z důvodu pomalého rozjezdu břemene při prováděném měření v laboratoři. Tohoto rozjezdu nebylo možno docílit při nastavování tření u modelu v ADAMSu, proto byl proveden posun každé křivky při tvorbě výsledného grafu v MATLABu.



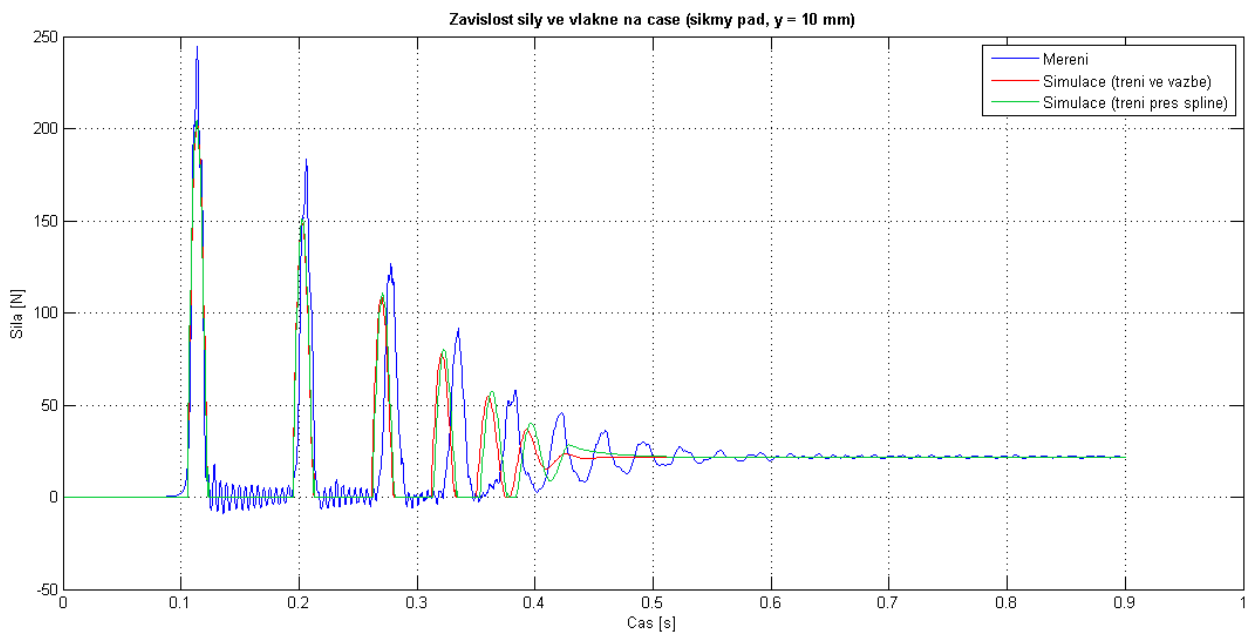
Obrázek 2.29: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5$ mm



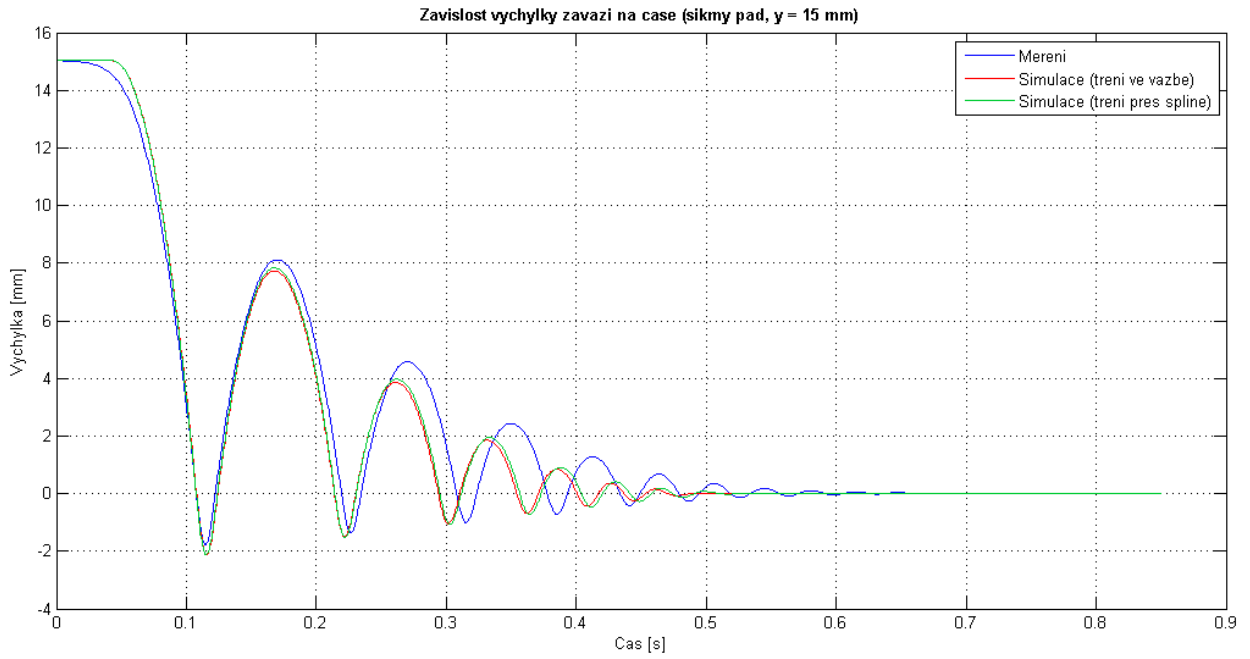
Obrázek 2.30: Graf srovnání síly ve vláknech pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5$ mm



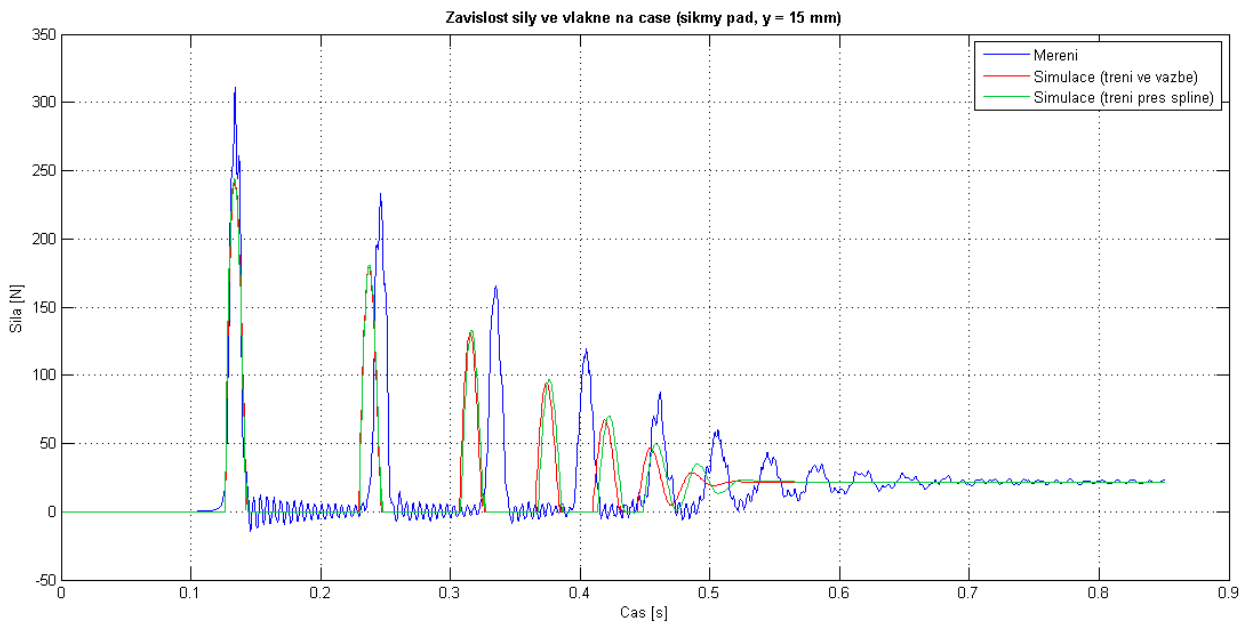
Obrázek 2.31: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 2.32: Graf srovnání síly ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 2.33: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15$ mm



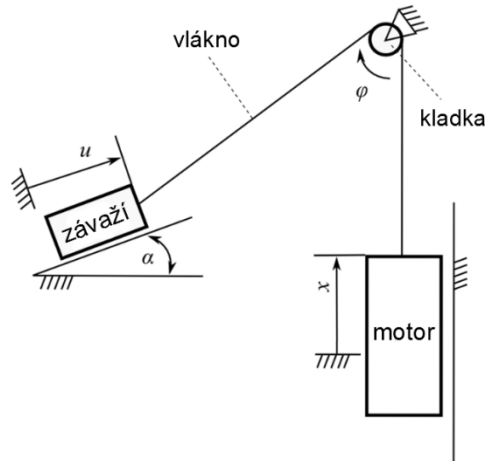
Obrázek 2.34: Graf srovnání síly ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15$ mm

2.7 Stand 3: Model vlákna navinutého přes kladku

Zatímco předchozí standy se týkaly pouze vlákna a na něm upevněného břemene, tentokrát bude model složitější. Schéma tohoto standu je zobrazeno na obrázku 2.35. Jedná se o vlákno navinuté přes kladku, které mezi sebou propojuje z jedné strany závaží o určité hmotnosti a ze strany druhé motor, který celé soustavě udává periodický pohyb. I tentokrát proběhlo experimentální měření [4], proto se bude část této kapitoly zabývat srovnáním výsledků z modelu v ADAMSu s převzatými výsledky z experimentálního modelu.

2.7.1 Popis standu

Mějme ocelové závaží o hmotnosti $m_1 = 5,083$ kg a motor, jehož hmotnost není v tomto případě důležitá, protože má za úkol pouze udávat pohyb soustavy a jeho kinematické veličiny jsou předepsány. V modelu v ADAMSu byla motoru přiřazena hmotnost $m_2 = 13,5$ kg. Břemeno a motor jsou mezi sebou propojeny vláknem o celkové délce $l = 1,82$ m taženým přes kladku o poloměru $r = 0,04$ m. Břemeno se pohybuje po nakloněné rovině o úhel $\alpha = 30^\circ$. Tuhost i tlumení vlákna budou ale proměnné s ohledem na aktuální délku vlákna po obou stranách kladky a budou přepočítávány až v jednotlivých předpisech sil reprezentující vlákno.

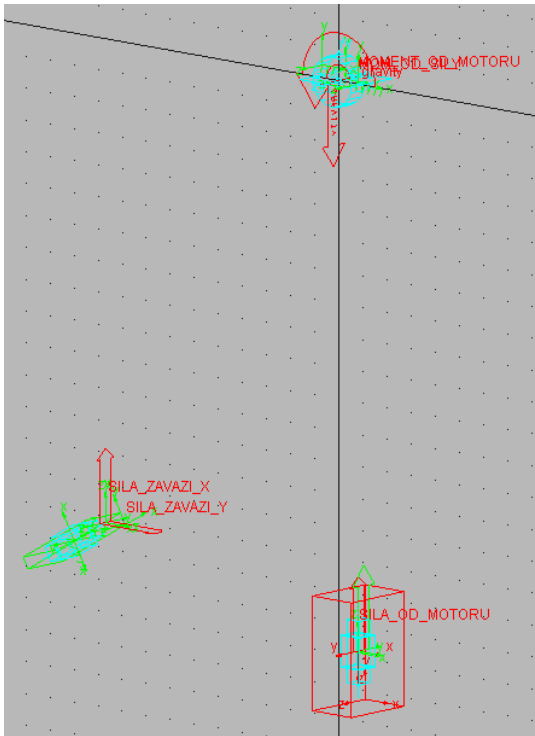


Obrázek 2.35: Schéma standu závaží-kladka-motor [3,4]

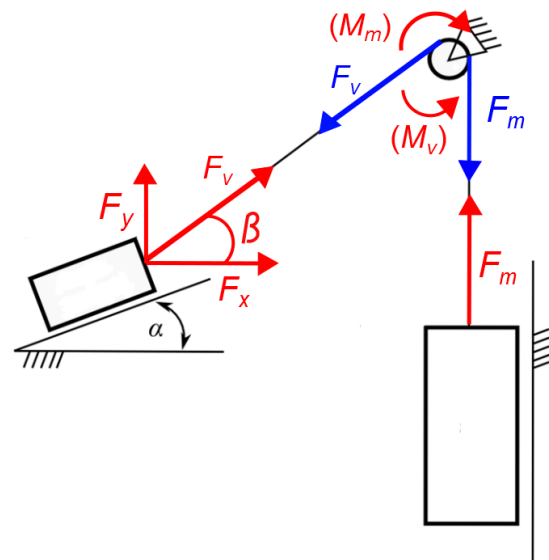
2.7.2 Model v ADAMSu

Model je vyobrazen na obrázku 2.36, ze kterého je patrné, že kladka byla v modelu nahrazena válcem o stejném průměru, což na celkovou funkčnost modelu nemá žádný vliv a vytvoření modelu je pak jednodušší, jestliže není nutné modelovat přesný geometrický tvar kladky. Závaží pohybující se po nakloněné rovině má opět tvar kvádra, stejně tak i motor.

Zatímco v předchozích případech nám k reprezentaci vlákna postačila pouze jedna síla, tentokrát tomu tak není. Z obrázku 2.36 lze vidět použití dvou sil u závaží, dvou momentů na kladce a jedné síly u motoru. Vzhledem k tomu, že je pohyb této soustavy ve srovnání s předchozími modely složitější, budou i komplikovanější jednotlivé předpisy sil, ve kterých bude muset být zohledněna nejen proměnná tuhost a tlumení v závislosti na aktuální délce vlákna, ale i měnící se délka vlákna s ohledem na pootočení kladky a tedy i s ohledem na pohyb členu na druhém konci vlákna. Bylo tedy potřeba docílit celkové provázanosti všech tří členů soustavy pomocí silových účinků zobrazených červeně na obrázku 2.37.



Obrázek 2.36: Model v ADAMSu



Obrázek 2.37: Schematické zobrazení sil

Z obrázku 2.37 je zřejmé, že platí

$$\underline{F_v} = \underline{F_{v_1}}$$

$$\underline{F_m} = \underline{F_{m_1}}$$

$$\underline{F_x} = F_v \cdot \cos \beta,$$

$$\underline{F_y} = F_v \cdot \sin \beta,$$

$$\underline{M_m} = r \cdot \underline{F_m}$$

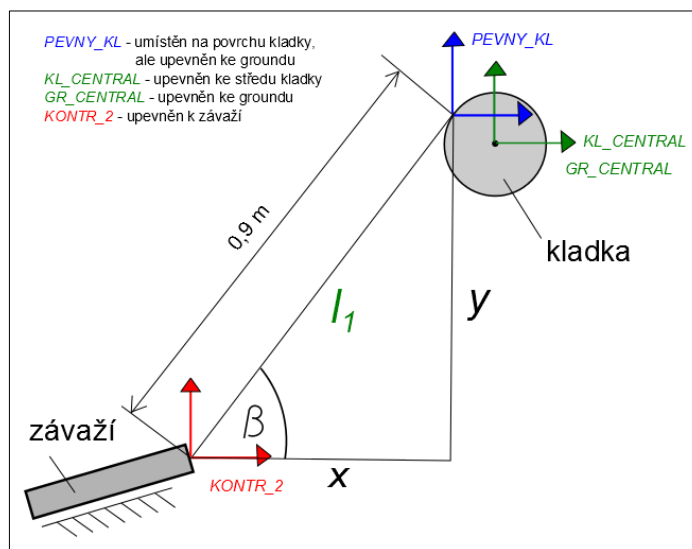
$$\underline{M_v} = r \cdot \underline{F_{v_2}}$$

kde r je poloměr kladky.

Vysvětlení předpisů sil a momentů

Protože jsou předpisy sil použité v modelu v ADAMS/View na pohled velmi komplikované a pouhé jejich opsání by bylo nesrozumitelné, bude každý z jednotlivých předpisů vyjádřen schematicky.

Předpis síly F_x :



Obrázek 2.38: Schéma uspořádání markerů v modelu v ADAMSu

Pro aktuální vzdálenosti x a y platí

$$x = DX(KONTR_2, PEVNY_KL),$$

$$y = DY(KONTR_2, PEVNY_KL).$$

Pro aktuální vzdálenost mezi markery $KONTR_2$ a $PEVNY_KL$ l_1 platí $l_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Proměnná délka levé části vlákna:

Na počátku simulace je délka vlákna na levé straně od kladky 0,9 m. V průběhu pohybu soustavy ale dochází vlivem levotočivé rotace kladky k prodloužení délky vlákna, proto je nutno vždy připočítávat prodloužení vlákna od rotace kladky. Vyjádření proměnné délky vlákna l_{01} bude tedy

$$l_{01} = 0.9 + (0.04 \cdot AZ(KL_CENTRAL, GR_CENTRAL)).$$

Funkce AZ představuje aktuální úhel natočení mezi markery $KL_CENTRAL$ a $GR_CENTRAL$ a hodnota 0,04 je poloměr kladky.

Pro celkovou deformaci levé části vlákna platí

$$\Delta l_1 = l_1 - l_{01}.$$

Proměnná tuhost levé části vlákna je

$$k_{01} = \frac{k_1 \cdot l_1}{l_{01}} = \frac{104 \cdot 10^3 \cdot 0,599}{l_{01}}.$$

Tuhost k_l je tuhost vlákna z předchozího případu vztažená ke konstantní délce $l_l = 0,599$ m.

Proměnné tlumení levé části vlákna je

$$b_{01} = \frac{b_1 \cdot l_1}{l_{01}} = \frac{83,47 \cdot 0,599}{l_{01}}.$$

Dále je potřeba vyjádřit kosinus úhlu β . Je známo, že platí

$$\cos \beta = \frac{\text{přilehlá}}{\text{přepona}} = \frac{|x|}{l_1}.$$

Pro sílu F_x platí (tečka nad výrazem značí časovou derivaci)

$$F_x = k_{01} \cdot \Delta l_1 \cdot \cos \beta + b_{01} \cdot \left(\Delta \dot{l}_1 \cdot \frac{|x|}{l_1} + \Delta l_1 \cdot \left(\frac{|\dot{x}|}{l_1} \right) \right),$$

kde výraz za proměnným tlumením b_{01} vyjadřuje derivaci součinu.

Výsledný schematický předpis síly F_x v ADAMSu bude

$$IF \left(l_1 - l_{01}; 0, 0, k_{01} \cdot \Delta l_1 \cdot \cos \beta + b_{01} \cdot \left(\Delta \dot{l}_1 \cdot \frac{|x|}{l_1} + \Delta l_1 \cdot \left(\frac{|\dot{x}|}{l_1} \right) \right) \right).$$

Předpis síly F_y :

Zatímco síla F_v zobrazena na obrázku 2.37 byla v předchozím případě promítána pomocí kosinu úhlu β do horizontálního směru, tentokrát bude F_v promítána do směru vertikálního, tedy pomocí funkce sinus. Předpis síly F_y bude jinak naprosto identický s předpisem síly F_x , pouze s rozdílem změny goniometrické funkce.

Pro sinus úhlu β platí

$$\sin \beta = \frac{\text{protilehlá}}{\text{přepona}} = \frac{|y|}{l_1}.$$

Síla F_y bude mít tvar

$$F_y = k_{01} \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \beta + b_{01} \cdot \left(\Delta \dot{l}_1 \cdot \frac{|y|}{l_1} + \Delta l_1 \cdot \left(\frac{|\dot{y}|}{l_1} \right) \right).$$

Výsledný schematický předpis síly F_y v ADAMSu je

$$IF \left(l_1 - l_{01}; 0, 0, k_{01} \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \beta + b_{01} \cdot \left(\Delta \dot{l}_1 \cdot \frac{|y|}{l_1} + \Delta l_1 \cdot \left(\frac{|\dot{y}|}{l_1} \right) \right) \right).$$

Předpis momentu M_v :

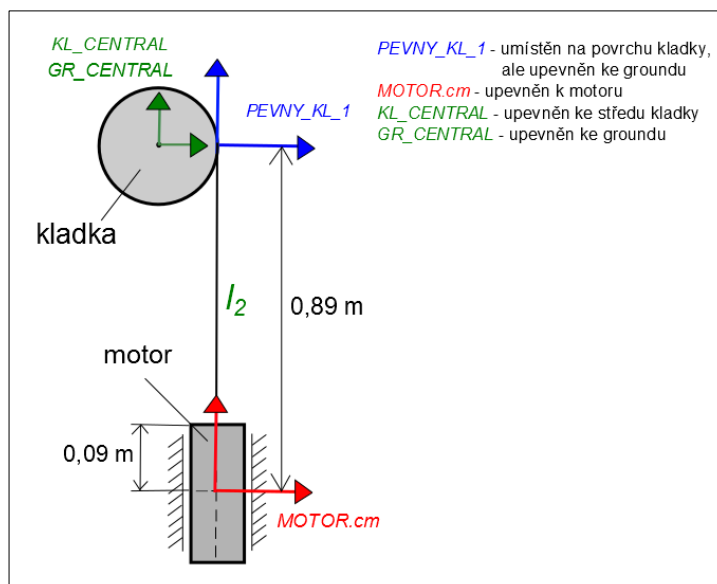
Z obrázku 2.37 je patrné, že se velikost momentu M_v určí jako součin poloměru kladky r a síly F_v . V minulém případě byly stanoveny průměty síly F_v do svislého i vodorovného směru. Sílu F_v máme tedy již určenou. Moment M_v je

$$M_v = 0.04 \cdot (k_{01} \cdot \Delta l_1 + b_{01} \cdot \Delta \dot{l}_1).$$

Předpis momentu M_v v ADAMSu je

$$0.04 \cdot (IF(l_1 - l_{01}; k_{01} \cdot \Delta l_1 + b_{01} \cdot \Delta \dot{l}_1)).$$

Předpis síly F_m :



Obrázek 2.39: Schéma rozmístění markerů v modelu v ADAMSu

Pro aktuální vzdálenost mezi markery $PEVNY_KL_1$ a $MOTOR.cm$ l_2 platí

$$l_2 = DY(PEVNY_KL_1, MOTOR.cm).$$

Proměnná délka pravé části vlákna:

Na počátku je celá soustava v klidu a délka vlákna na pravé straně od kladky je 0,8 m. Po uvedení soustavy do pohybu motor vyjíždí nahoru. Tím dochází ke zkracování vlákna, což musí být v konečném výrazu zohledněno. Proto je nutno od původní vzdálenosti mezi markery $PEVNY_KL_1$ a $MOTOR.cm$ odečíst aktuální velikost zkrácení vlákna. Proměnná délka pravé části vlákna l_{02} je tedy

$$l_{02} = 0.89 - (0.04 \cdot AZ(KL_CENTRAL, GR_CENTRAL)).$$

Celková deformace pravé části vlákna je $\Delta l_2 = l_2 - l_{02}$.

Proměnná tuhost pravé části vlákna je $k_{02} = \frac{k_1 \cdot l_1}{l_{02}} = \frac{104 \cdot 10^3 \cdot 0,599}{l_{02}}$.

Proměnné tlumení pravé části vlákna je $b_{02} = \frac{b_1 \cdot l_1}{l_{02}} = \frac{83,47 \cdot 0,599}{l_{02}}$.

Síla F_m je ve tvaru $F_m = k_{02} \cdot \Delta l_2 + b_{02} \cdot \Delta \dot{l}_2$.

Výsledný schematický tvar předpisu síly F_m v ADAMSu je

$$IF(l_2 - l_{02}; 0, 0, (k_{02} \cdot \Delta l_2 + b_{02} \cdot \Delta \dot{l}_2)).$$

Předpis momentu M_m :

Z obrázku 2.37 lze usoudit, že velikost momentu M_m je rovna součinu poloměru kladky a velikosti síly F_m . Síla F_m je již známa, proto má moment M_m tvar

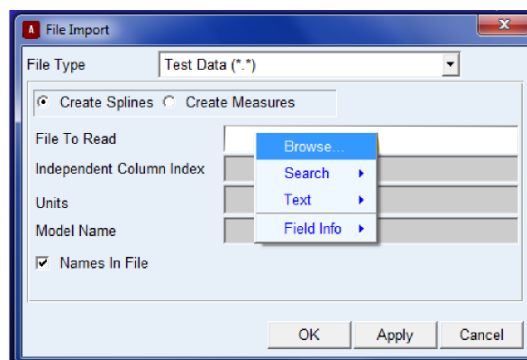
$$M_m = 0,04 \cdot (k_{02} \cdot \Delta l_2 + b_{02} \cdot \Delta \dot{l}_2).$$

Schematický předpis momentu M_m v ADAMSu je

$$0,04 \cdot IF(l_2 - l_{02}; 0, 0, (k_{02} \cdot \Delta l_2 + b_{02} \cdot \Delta \dot{l}_2)).$$

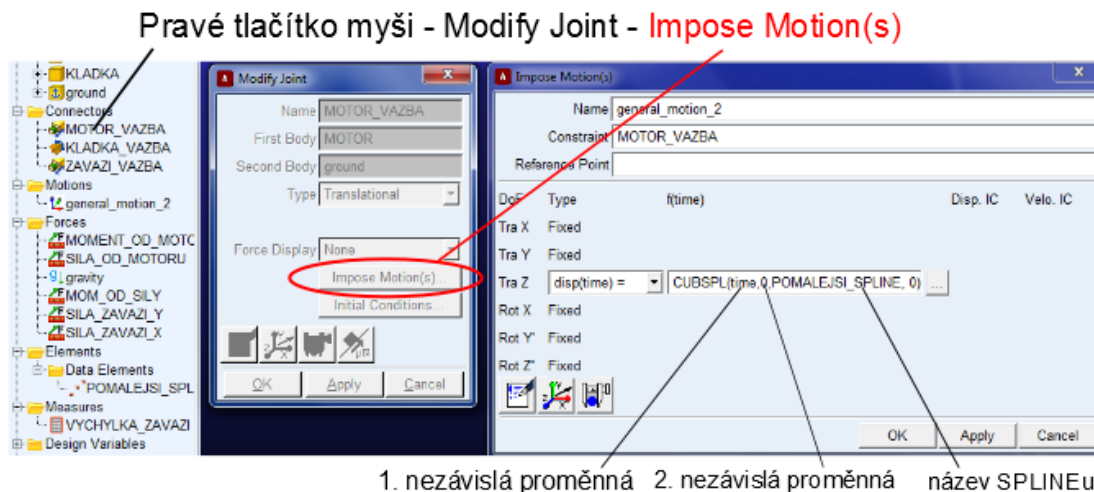
2.7.3 Pohyb motoru

Za běhu celé soustavy se motor pohybuje periodicky nahoru a dolů. Svým pohybem dává do pohybu celý systém. Bylo ale nutno pohyb pohonu (resp. jeho změřený průběh) nejdříve nainportovat příkazem *File* → *Import*. Po stisknutí možnosti *Import* se zobrazí tabulka vyobrazená na obrázku 2.40. V kolonce *File Type* se vybere *Test data* a provede se zaškrtnutí možnosti *Create Splines*. V další kolonce *File Name* se příkazem *Browse* (obrázek 2.40) provede nastavení konkrétního souboru k importu. V další řádce s označením *Independent Column Index* je pak nutno vepsat 1, protože se právě v prvním sloupci nachází nezávislá proměnná (čas). Po stisknutí tlačítka *OK* se pak spline zobrazí ve stromě v levé části pracovního okna pod kategorií *Elements* → *Data Elements*.



Obrázek 2.40: Tabulka File Import

Nově vytvořený spline představuje skutečný pohyb motoru, proto je nutno tento pohyb předepsat motoru, resp. jeho posuvné vazbě. Postup při předepsání je zobrazen na obrázku 2.41, ze kterého je vidět, že byla použita funkce *CUBSPL*, jejíž parametry jsou vysvětleny na témže obrázku.

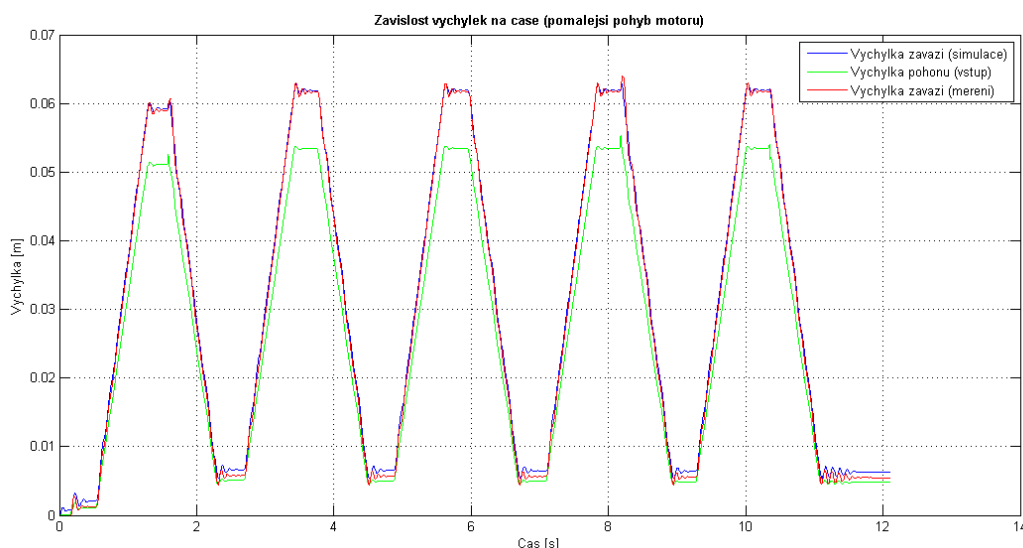


Obrázek 2.41: Postup při předepsání pohybu posuvné vazbě motoru

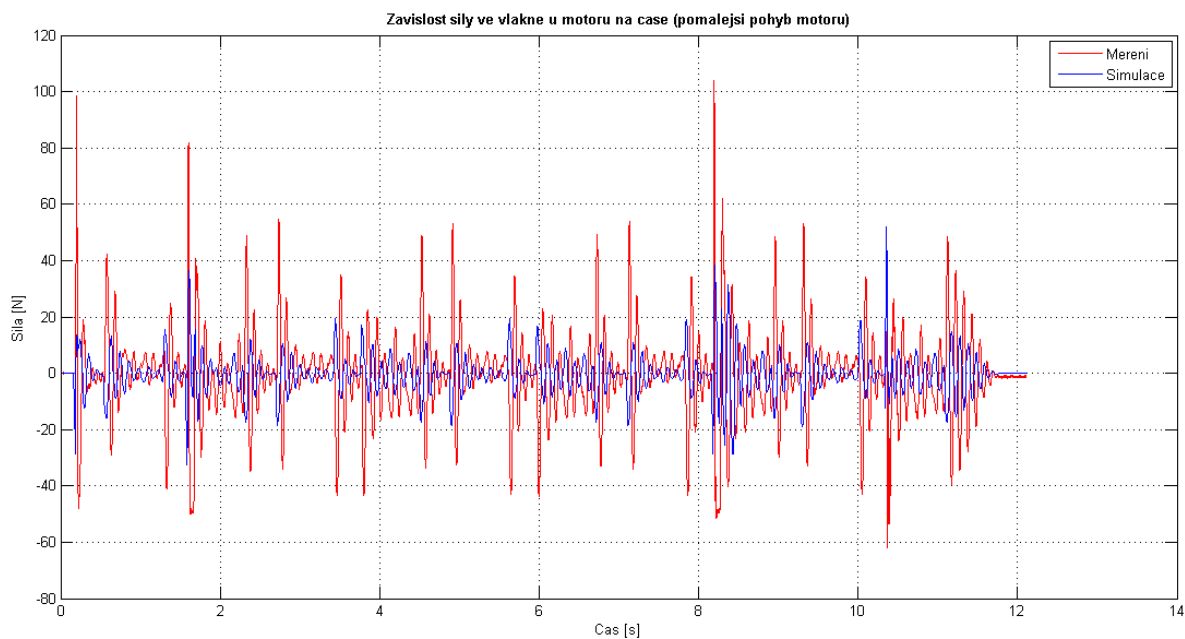
2.7.4 Srovnání s experimentem

U tohoto standu bylo v laboratoři měřeno více dějů, vybrány ke srovnání byly však dva děje, které se odlišovaly ve frekvenci periodického pohybu motoru. Při každém druhu pohybu byla měřena a zaznamenána síla ve vláknech u motoru a zároveň také výchylka závaží spolu s výchylkou motoru. Výsledky srovnání jsou zobrazeny na obrázcích 2.42 – 2.45.

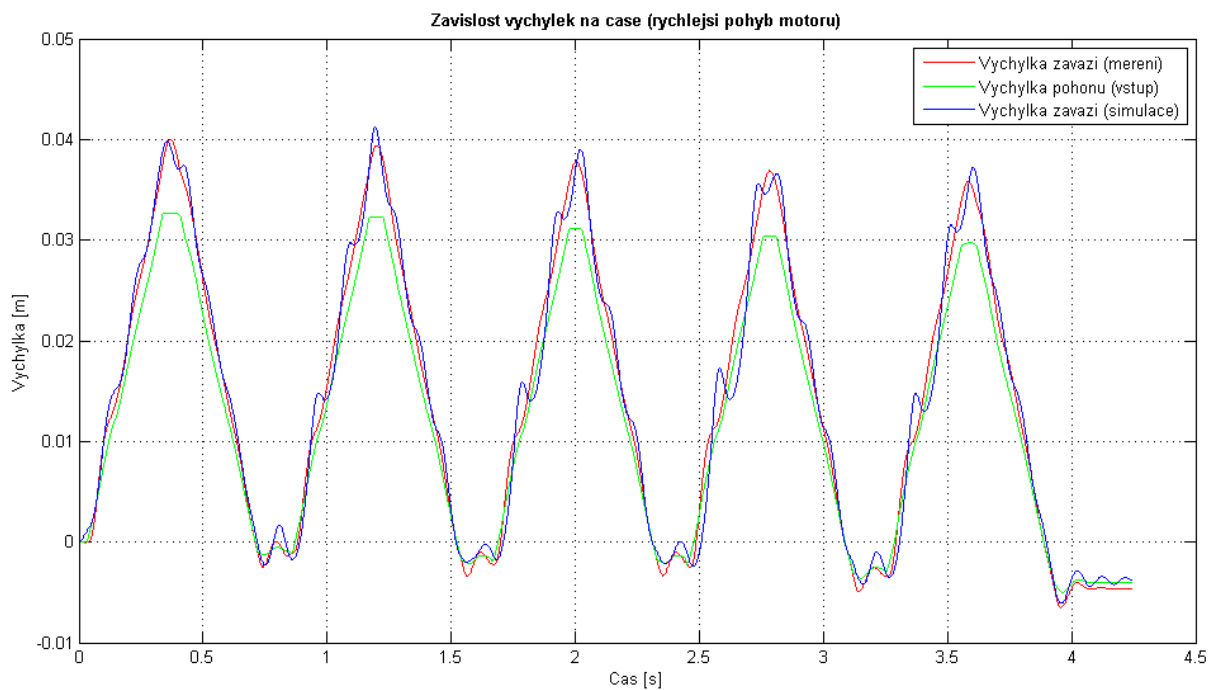
Při simulaci měla vliv na kvalitu výsledků především volba počtu kroků během simulace. Platí tvrzení, že čím více zvolíme kroků, tím je větší přesnost výsledků.



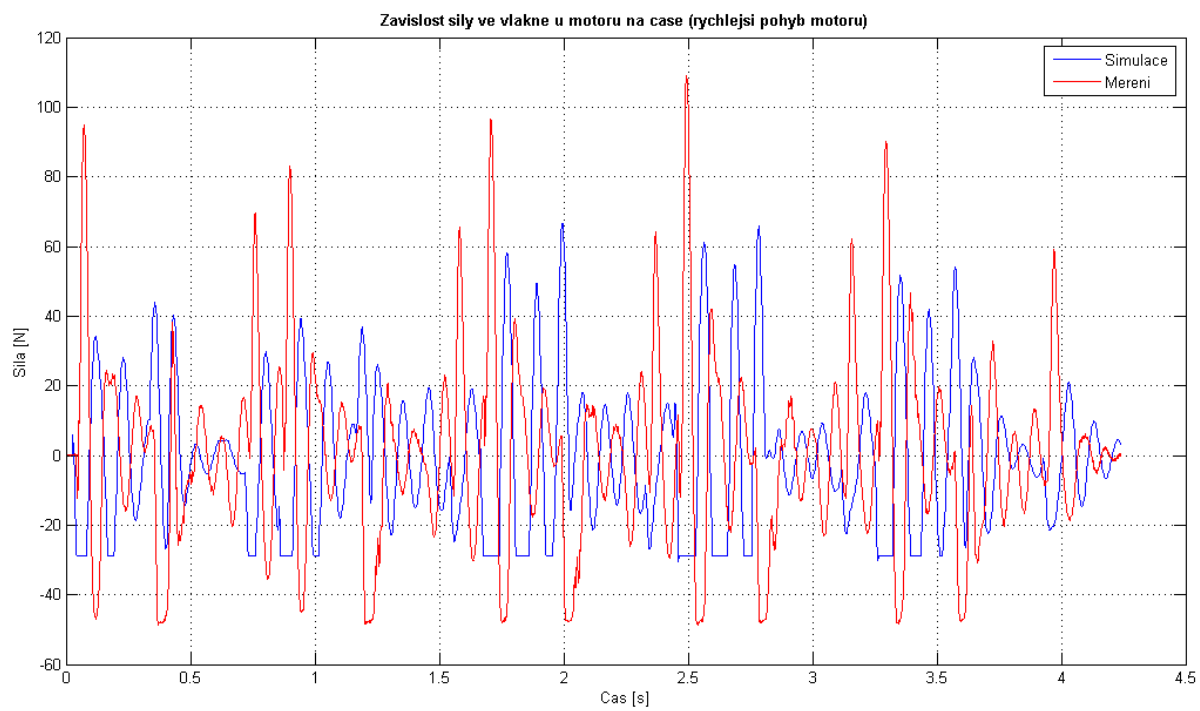
Obrázek 2.42: Graf srovnání vychylek motoru i závaží při pomalém pohybu pohonu



Obrázek 2.43: Graf srovnání síly ve vlákne u motoru při pomalém pohybu pohonu



Obrázek 2.44: Graf srovnání vychylek motoru i závaží při rychlém pohybu pohonu



Obrázek 2.45: Graf srovnání síly ve vlákne u motoru při rychlém pohybu pohonu

3 Model vlákna s využitím hmotných bodů

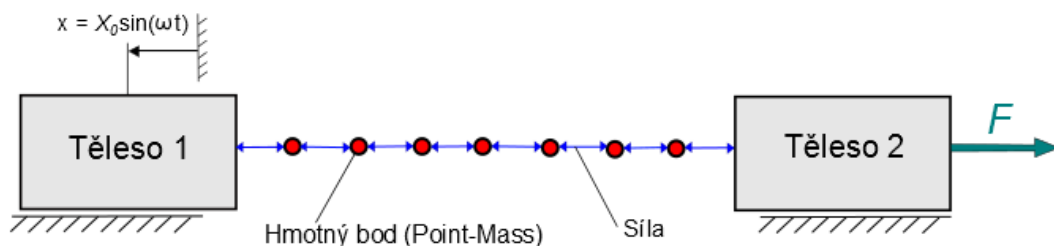
V předchozí kapitole byl představen model vlákna založený na reprezentaci pomocí nelineární síly. Tato kapitola je věnována komplexnějšímu modelu, který umožňuje respektovat rovněž hmotnost vlákna. Celý princip spočívá v nahrazení vlákna nejen silami, ale i hmotnými body. Zatímco v předchozím typu modelu vlákna byla zavedena jedna síla mezi spojenými tělesy, tentokrát to bude více sil a budou umístěny mezi jednotlivé hmotné body. Do modelu je možné zahrnout hmotnost vlákna přepočítanou na tyto hmotné body.

3.1 Testovací model

Za účelem vyzkoušení a odladění způsobu modelování byl připraven jednoduchý testovací model.

3.1.1 Popis modelu

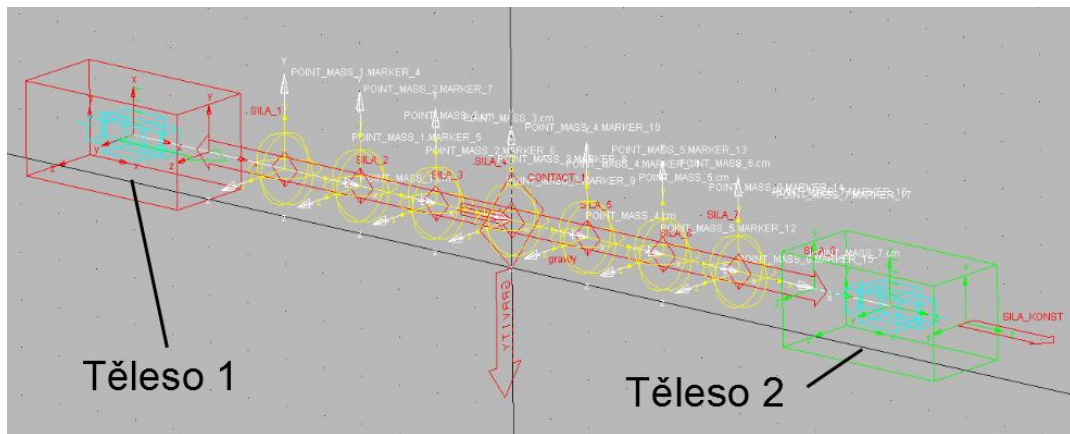
Mějme dvě tělesa ve tvaru kvádru. Obě tělesa mají hmotnost $m = 2$ kg. Tyto tělesa jsou mezi sebou propojena vláknem o délce $l = 0,8$ m. Vlákno je reprezentováno sedmi hmotnými body, které jsou mezi sebou a tělesy propojeny celkem osmi silami. Tělesu 1 byl udán sinusový pohyb s periodou $X_0 = 0,1$ m a frekvencí, jejíž hodnota byla v průběhu testování několikrát změněna. Na těleso 2 působí konstantní síla $F = 15$ N. Schéma tohoto systému je zobrazeno na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Schematický obrázek testovacího modelu

3.1.2 Model v ADAMSu

Model je vyobrazen na obrázku 3.2, kde jsou vyznačena obě tělesa. Mezi nimi jsou rovnoměrně rozmístěny hmotné body. Mezi body je zavedených osm sil typu *Mezi dvěma tělesy* (*Between Two Bodies In Line-Of-Sight*). Oběma tělesům jsou přiřazeny posuvné vazby z důvodu zajištění pohybu pouze v horizontálním směru. Posuvné vazbě prvního tělesa je pak udán periodický pohyb naznačen v obrázku 3.1. Na obrázku 3.2 je vidět síla typu *On One Body* přiřazená tělesu 2. Tato síla má konstantní hodnotu a způsobuje tak neustálý posun tělesa doprava.



Obrázek 3.2: Model v ADAMSu

3.1.3 Předpisy sil

Stejně jako u silového modelu, budou i v tomto případě síly nelineární, to znamená, že budou působit pouze v tahu. Ve všech předchozích případech byly síly řešeny pouze v jednom směru, jednalo se tedy vždy o rovinný problém. Tentokrát tomu ale tak nebude. Protože je vlákno tvořeno hmotnými body, které se mohou pohybovat nejen ve směru x , ale i ve směru y a z , je z tohoto důvodu potřeba postihnout posuvy ve všech třech směrech. Jedná se tedy o prostorový problém, který je třeba zohlednit v předpisech sil. Takové funkce, které zohledňují prostorový posuv, jsou funkce *DM* (*Distance Magnitude*) a *VR* (*Velocity Along Line-Of-Sight*). Tyto funkce použité v ADAMSu budou dále popsány.

Distance Magnitude (*DM*)

DM je funkce, která vrací velikost posuvu vektoru z jednoho markeru do druhého [5].

Formát funkce [5]:

DM (*Do Markeru, Od Markeru*)

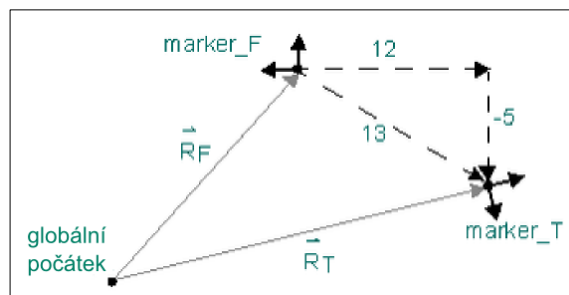
<i>Do Markeru</i>	Marker, do kterého je vzdálenost měřena (povinný argument).
<i>Od Markeru</i>	Marker, od kterého je vzdálenost měřena (nepovinný argument). Pokud není specifikován, pak se argument vztahuje ke globálnímu souřadnému systému.

Tabulka 3.1: Argumenty funkce DM [5]

Příklad použití:

Funkce	$DM(marker_T, marker_F)$
Výsledek	13

Tabulka 3.2: Příklad [5]



Obrázek 3.3: Příklad [5]

Dle [5] se matematicky funkce DM počítá jako

$$DM = \sqrt{[\vec{R}_T - \vec{R}_F] \cdot [\vec{R}_T - \vec{R}_F]}.$$

Velocity Along Line-Of-Sight (VR)

VR je funkce, která vrací relativní rychlost mezi dvěma markery [5].

Pokud se dva markery od sebe vzdalují, funkce VR je pozitivní. Pokud se k sobě přibližují, pak je funkce VR negativní [5].

Formát funkce [5]:

$VR(Do\ Markeru, Od\ Markeru, Referenční\ Marker)$

<i>Do markeru</i>	Marker, jehož rychlost je měřena (povinný argument).
<i>Od markeru</i>	Marker, jehož rychlost je odečítána (nepovinný argument). Pokud tento argument není specifikován, vztahuje se ke globálnímu počátku.
<i>Referenční marker</i>	Marker, ve kterém je počítána časová derivace (nepovinný argument). Pokud není tento argument specifikován, pak se vztahuje k referenci na <i>groundu</i> .

Tabulka 3.3: Argumenty funkce VR [5]

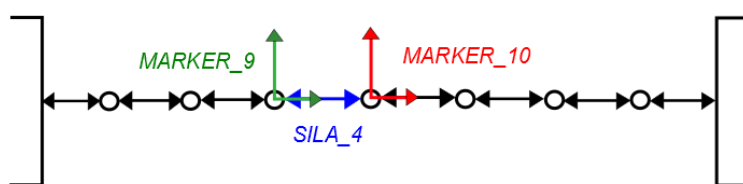
Příklad použití funkce VR [5]:

$$VR(marker_T, marker_F, marker_R)$$

Tato funkce vrací relativní rychlost vektoru rychlosti mezi markery $marker_T$ a $marker_F$. Vektor časové derivace je počítán v referenci markeru $marker_R$ [5].

Předpis jedné ze sil reprezentujících vlákno

Síla $SILA_4$ je umístěna mezi markery $MARKER_9$ a $MARKER_{10}$ (obrázek 3.4), proto se tyto markery budou vyskytovat i v předpisu síly.



Obrázek 3.4: Umístění síly $SILA_4$

Předpis síly $SILA_4$ je

$$IF(DM(MARKER_{10}, MARKER_9) - 0.1 : 0, 0, -((8 * 122 * 10^{**3}) * (DM(MARKER_{10}, MARKER_9) - 0.1) + (8 * 85.31) * (VR(MARKER_{10}, MARKER_9)))).$$

Přepočet tuhosti a tlumení

Protože se původní hodnoty vztahují k původní délce vlákna ($l_0 = 0,599$ m), je nutno tuhost i tlumení přepočítat k aktuální používané délce vlákna $l = 0,8$ m. Přepočet je proveden následujícím způsobem.

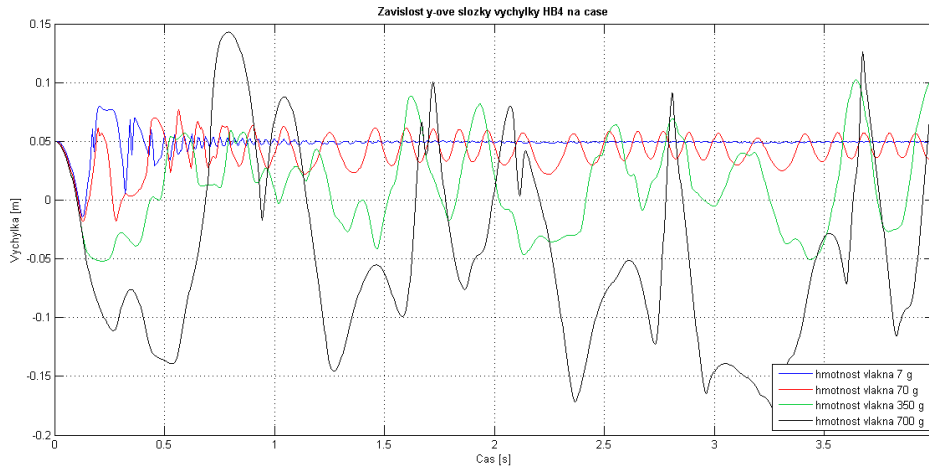
$$k = k_0 \cdot \frac{l_0}{l} = 163 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,599}{0,8} = 122 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$b = b_0 \cdot \frac{l_0}{l} = 113,94 \cdot \frac{0,599}{0,8} = 85,31 \text{ Ns} \cdot \text{m}^{-1}$$

Hodnoty k a b jsou tedy přepočítány na vlákno o celkové délce 0,8 m. Jak již bylo ale řečeno výše, vlákno reprezentuje celkem osm sil umístěných za sebou. Pro výpočet tuhosti jednotlivých „dílů“ vlákna mezi hmotnými body byly proto využity vztahy pro tuhost sériově řazených pružin.

3.1.4 Výsledky testovacích simulací

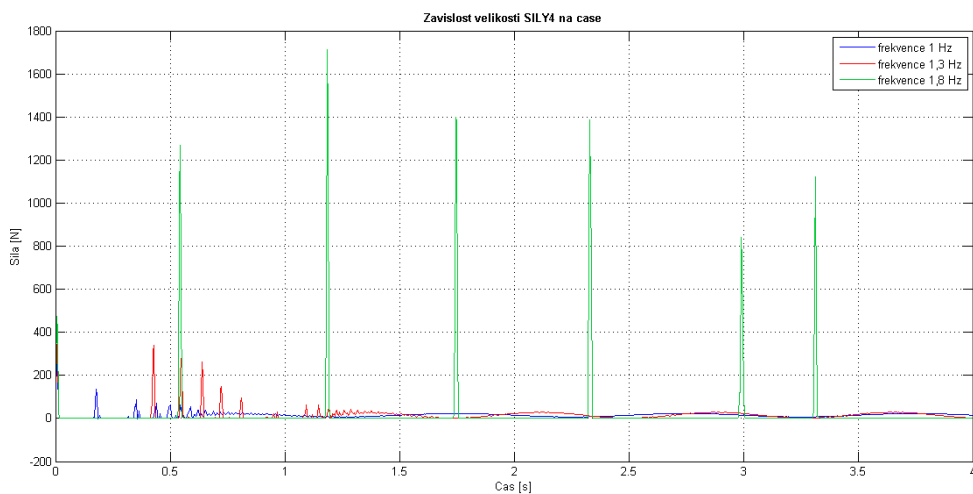
Cílem testovacích simulací bylo ověřit chování modelu pro různé parametry.



Obrázek 3.5: Závislost y-ové složky výchylky hmotného bodu 4 na čase

Na obrázku 3.5 jsou zobrazeny křivky představující y-ovou složku výchylky bodu, který se nachází v polovině vlákna, v závislosti na čase. Každá z těchto čtyř křivek má jiný průběh z důvodu postupného zvyšování hmotnosti celého vlákna, jak je uvedeno v legendě. Modrá křivka je výchylka hmotného bodu o hmotnosti 1 g. Protože je ale vlákno tvořeno celkem sedmi hmotnými body, bude hmotnost celého vlákna 7 g (viz legenda). Frekvence periodického pohybu prvního tělesa je ponechána na hodnotě 1 Hz.

Je zřejmé, hmotnost vlákna má na velikost rozkmitu hmotných bodů velký vliv. Pokud bude hmotnost vlákna dostatečně malá, pak dojde k rychlému ustálení hmotného bodu na konstantní výšce, která už se do konce děje nezmění (modrá křivka). Pokud ale hmotnost vlákna překročí určitou mez, k ustálení kmitavého pohybu již nedojde a během děje tak dojde k periodickému pohybu bodu, jehož rozkmit se s jeho zvyšující se hmotností zvětšuje.

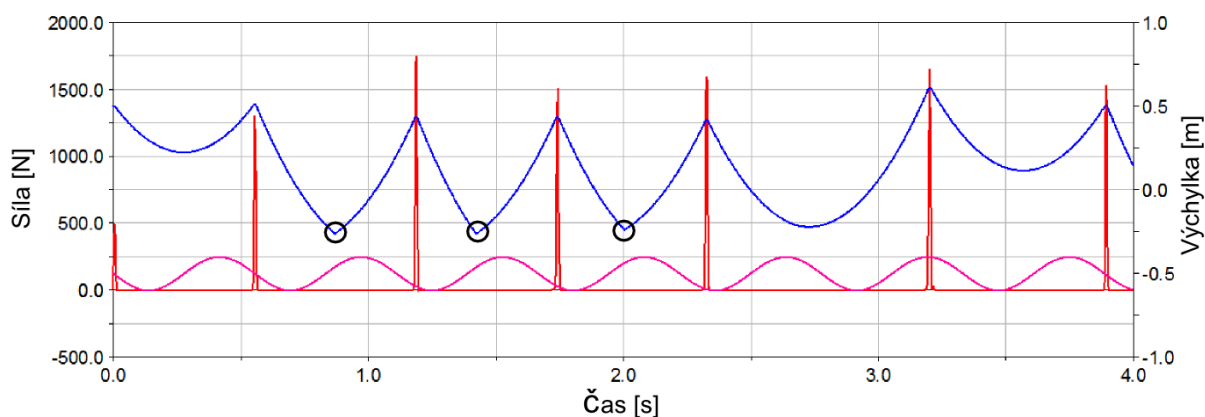


Obrázek 3.6: Závislost síly ve vlákne (SILA_4) na čase

Na obrázku 3.6 je další graf znázorňující časový průběh jedné ze sil umístěné uprostřed vlákna. Tentokrát byly vybrány tři děje, které se liší velikostí frekvence periodického pohybu tělesa 1. Při těchto dějích byla zachována hmotnost vlákna 7 g.

Modrá křivka označuje děj, při jehož průběhu se těleso udávající pohyb pohybuje s frekvencí 1 Hz. Protože je ale frekvence pohybu poměrně malá, obě tělesa se ve svém pohybu po určitém čase sladí a k žádným dalším rázům pak nedochází. Obě tělesa už pak konají stejný periodický pohyb. U síly označené červenou křivkou je situace velmi podobná, přestože se frekvence zvýšila na 1,3 Hz.

Třetí děj označený zeleně probíhá ale jinak. I když opět došlo ke zvýšení frekvence, jejíž hodnota (1,8 Hz) není o tolik větší oproti předešlému ději, průběh síly se výrazně změnil. Zatímco jedno těleso koná neustálý kmitavý pohyb, na těleso na druhém konci vlákna působí síla $F = 15$ N. Frekvence pohybu je ale tak velká, že nedojde ke sladění pohybu obou těles tak, jak tomu bylo v minulém případě. Každé těleso tentokrát koná svůj vlastní pohyb. V důsledku toho dochází nejen k občasnému nárazu obou těles do sebe, ale také k velkým nepravidelným rázům z důvodu prudkého natažení vlákna.



Obrázek 3.7: Graf síly ve vlákně a výchylek obou těles v závislosti na čase

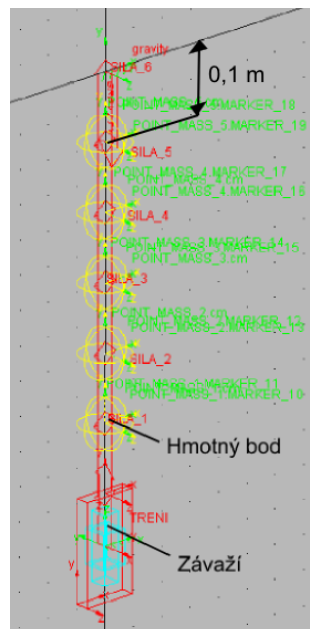
Graf na obrázku 3.7 představuje tři závislosti. Sílu ve vlákně (červeně), výchylku tělesa 2 (modře) a výchylku tělesa 1 (růžově) konající kmitavý pohyb o frekvenci $f = 1,8$ Hz. Z grafu lze vidět, že v okamžiku, kdy dojde k úplnému natažení vlákna a tedy i k zapnutí síly, dochází k náhlé změně směru trajektorie tělesa 2. Vlivem propnutí vlákna těleso 2 náhle změni směr a díky zpětnému rázu se stáhne zpátky. Někdy je ale tento ráz tak prudký, že se těleso 2 dostane k tělesu 1 a může tak dojít k jejich vzájemné srážce. Okamžiky, kdy do sebe narazí obě tělesa, jsou černě označeny v grafu na obrázku 3.7.

3.2 Stand 1: Volný pád závaží

Tento stand je naprosto identický se standem, který byl popsán v kapitole o silovém modelování vláken. Proto tato podkapitola obsahuje už jen popis modelu v ADAMSu a následně srovnání výsledků z modelu s výsledky z experimentálního měření.

3.2.1 Model v ADAMSu

Model je zobrazen na obrázku 3.8. Vlákno je tentokrát tvořeno pěti hmotnými body, mezi kterými je nataženo šest sil typu *Between Two Bodies*. Všechny parametry jako je hmotnost závaží ($m = 3,096$ kg) a délka vlákna ($l = 0,599$ m) zůstávají zachovány. V tomto případě počítáme i s hmotností vlákna, která je $m_v = 1,63$ g. Tato hodnota (přejata z [3]) je rozpočítána mezi jednotlivé hmotné body.



Obrázek 3.8: Model standu v ADAMSu

Předpis jedné ze sil *SILA_4* je

$$IF (DM (MARKER_15, MARKER_16) - 0.1 : 0, 0, -((6*163*10**3)*(DM (MARKER_15, MARKER_16) - 0.1) + ((6*113.94)*(VR (MARKER_15, MARKER_16))))))$$

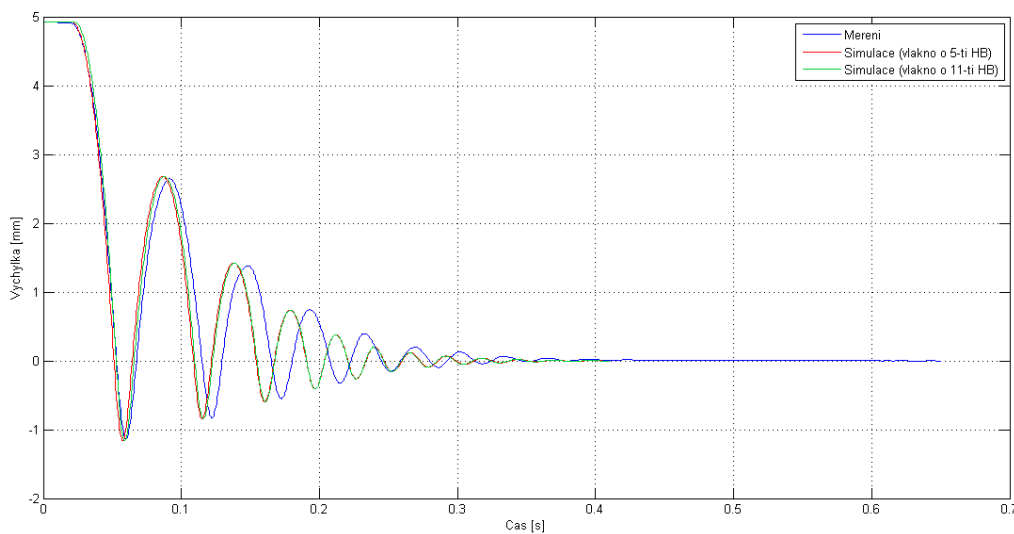
a platí pro sílu, která se nachází mezi markery *MARKER_15* a *MARKER_16*.

Z předpisu je vidět, že je síla sestavena ze stejných funkcí použitých v případě dvou těles propojených vláknem, jedná se tedy o stále stejný princip. Hodnota tuhosti i tlumicího koeficientu (přejaty z [3]) zůstávají zachovány. Protože jsou hmotné body propojeny celkem šesti silami, jsou hodnoty tuhosti opět přepočítány.

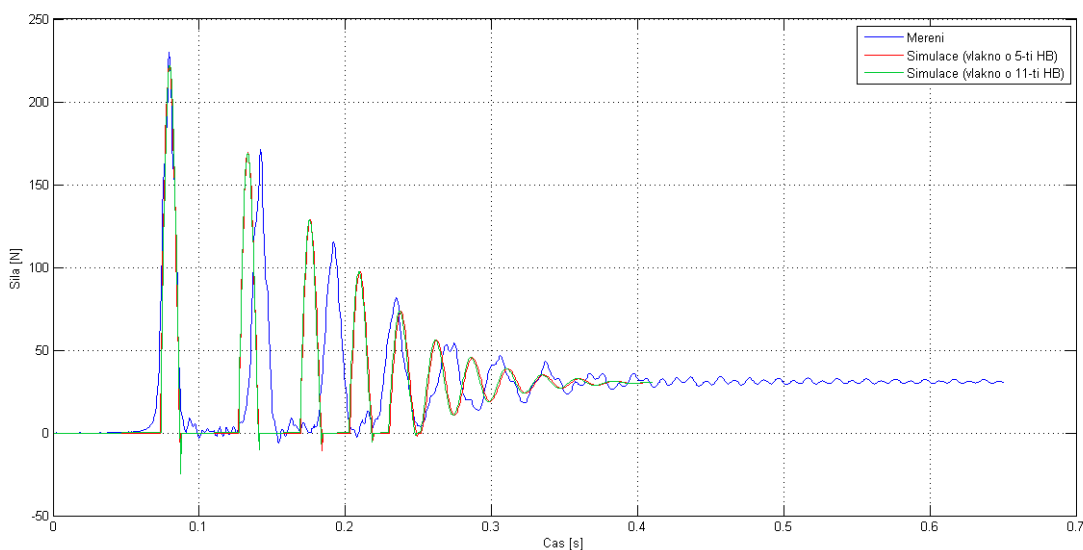
Tření v posuvném vedení je zde řešeno stejně, jako tomu bylo u silového modelu tohoto standu, tedy pomocí funkce *SIGN*.

3.2.2 Srovnání s experimentem

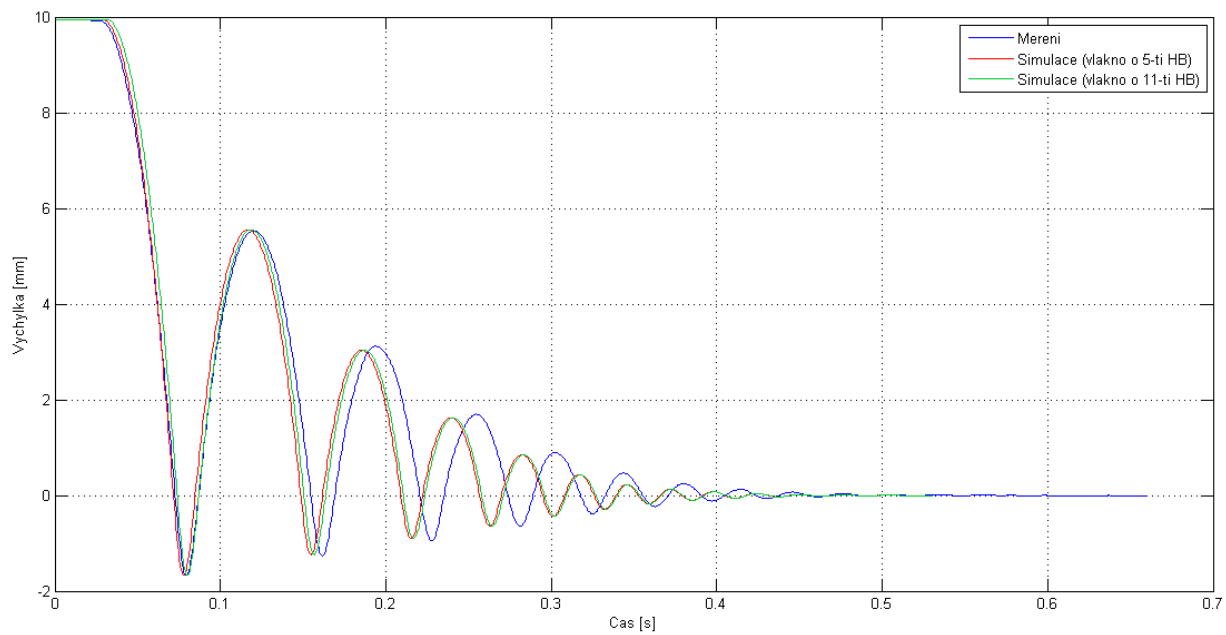
Výsledky z experimentu jsou na obrázcích 3.9 – 3.14. Na tomto standu byl navíc zkoumán možný vliv počtu hmotných bodů na kvalitu výsledků. Proto jsou v grafech celkem tři křivky. Modrá křivka vždy představuje výsledky z měření. Červená křivka představuje simulaci, při níž byl použit model, jehož vlákno je tvořeno 5-ti hmotnými body, a zeleně je pak označena simulace modelu, který má vlákno z 11-ti hmotných bodů. Integrační metoda i v tomto případě zůstala zachována (HASTIFF s dovolenou maximální chybou 10^{-6}).



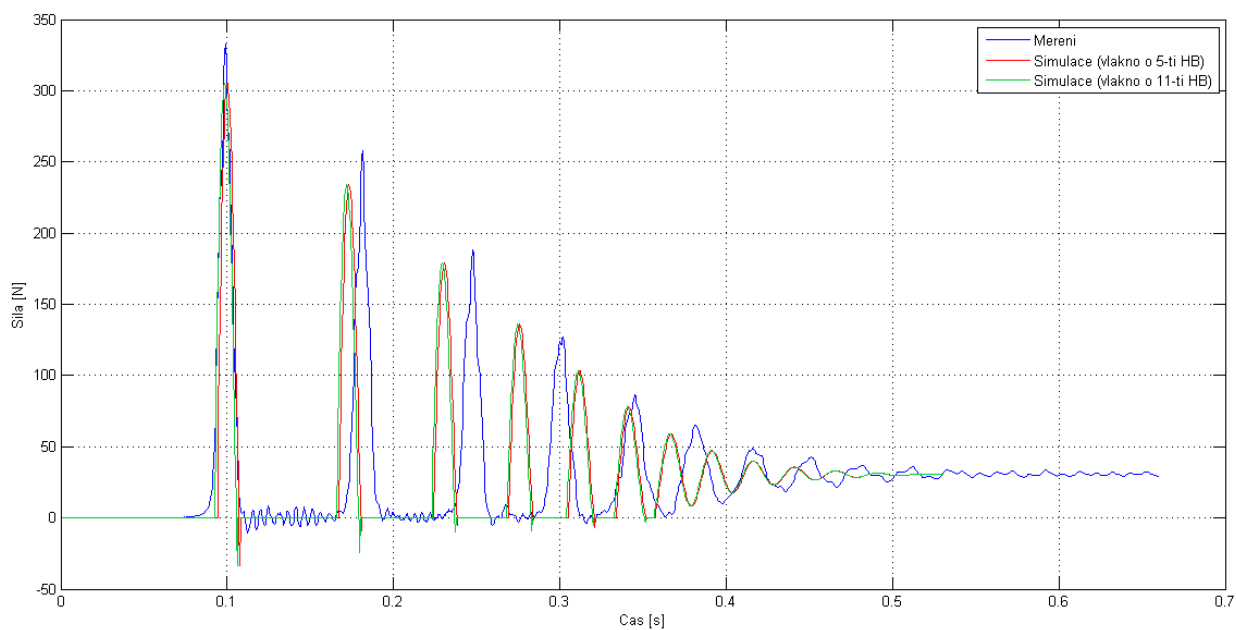
Obrázek 3.9: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5 \text{ mm}$



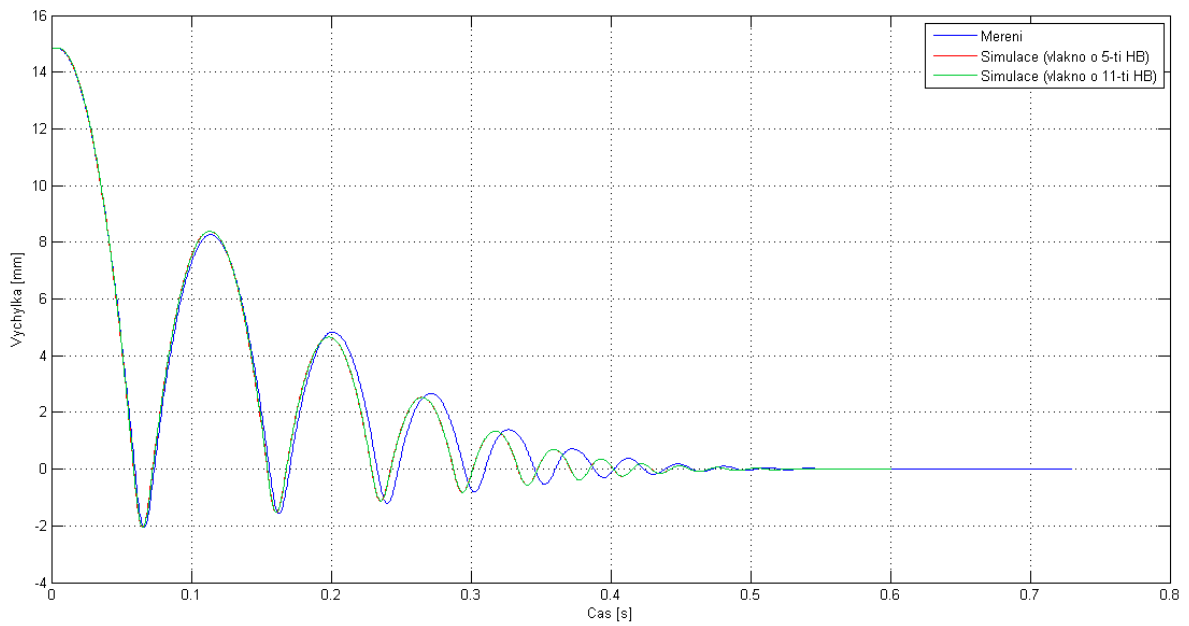
Obrázek 3.10: Graf srovnání síly ve vláknech pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5 \text{ mm}$



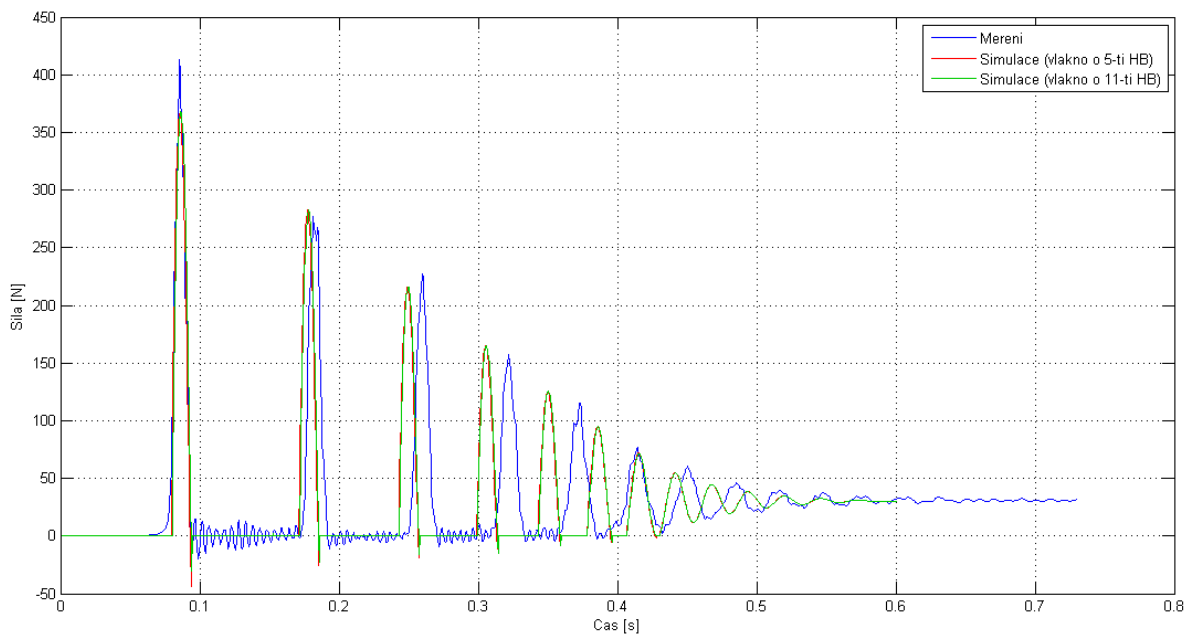
Obrázek 3.11: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 3.12: Graf srovnání síly ve vlákně pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 3.13: Graf srovnání výchylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15$ mm



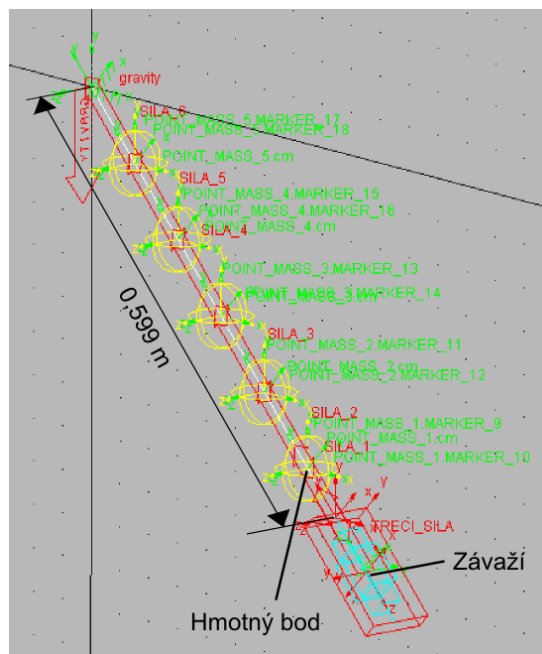
Obrázek 3.14: Graf srovnání síly ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15$ mm

3.3 Stand 2: Šikmý pád závaží

Tato kapitola je věnována již dříve popsanému standu šikmého pádu závaží. Protože je ale stand podrobněji popsán v druhé kapitole, bude následovat rovnou popis modelu v ADAMSu a srovnání výsledků z modelu s výsledky z experimentu.

3.3.1 Model v ADAMSu

Závaží je propojeno s rámem vláknem, které je tvořeno pěti hmotnými body. Hmotnost vlákna zůstává stejná jako v minulém případě a je rozložena mezi všechny hmotné body. Ostatní parametry zůstávají zachovány včetně úhlu nakloněné roviny $\alpha = 45^\circ$. Model je zobrazen na obrázku 3.15, reálný stand je ukázán v kapitole 2 na obrázku 2.21.



Obrázek 3.15 Model šikmého pádu závaží v ADAMSu

Předpis síly $SILA_4$ nacházející se mezi markery $MARKER_{14}$ a $MARKER_{15}$ je

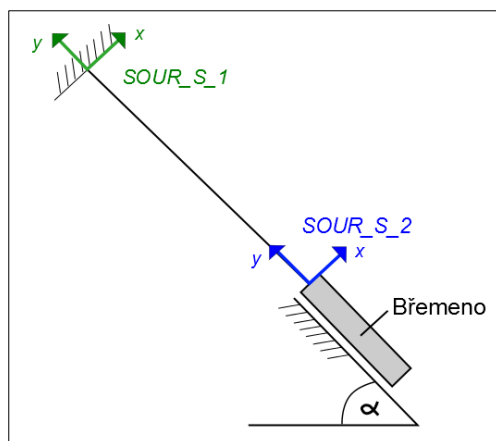
$$IF (DM (MARKER_{15}, MARKER_{14}) - 0.106066 : 0, 0, -((6 * 104 * 10^{**3}) * (DM (MARKER_{15}, MARKER_{14}) - 0.106066) + (5 * 83.47) * (VR (MARKER_{15}, MARKER_{14}))))).$$

Hodnoty tuhosti i tlumení byly převzaty z [3]. Tuhost je v předpisu vynásobena šestkrát, protože vlákno reprezentuje 6 sil za sebou.

Tření je v modelu řešeno opět pomocí importované spline křivky a pomocí funkce *AKISPL*. Síla, která představuje v modelu tření, má tedy stejný předpis jako u silového modelu

$$AKISPL (VY (SOUR_S_1, SOUR_S_2, SOUR_S_1), 0, TRENI),$$

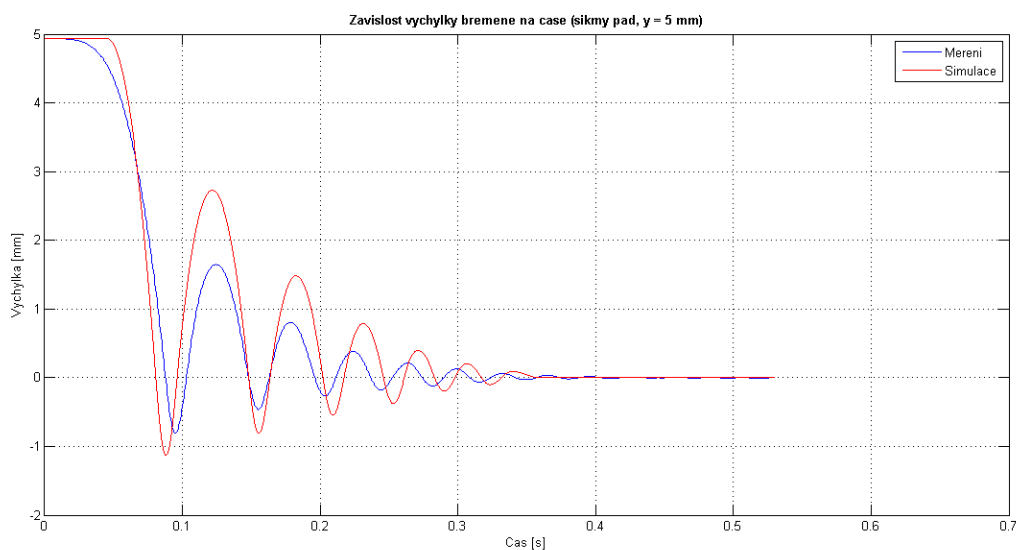
kde *SOUR_S_1* a *SOUR_S_2* jsou markery, jejichž umístění a orientace jsou zobrazeny na obrázku 3.16. Význam parametrů funkce byl již objasněn v kapitole 2.



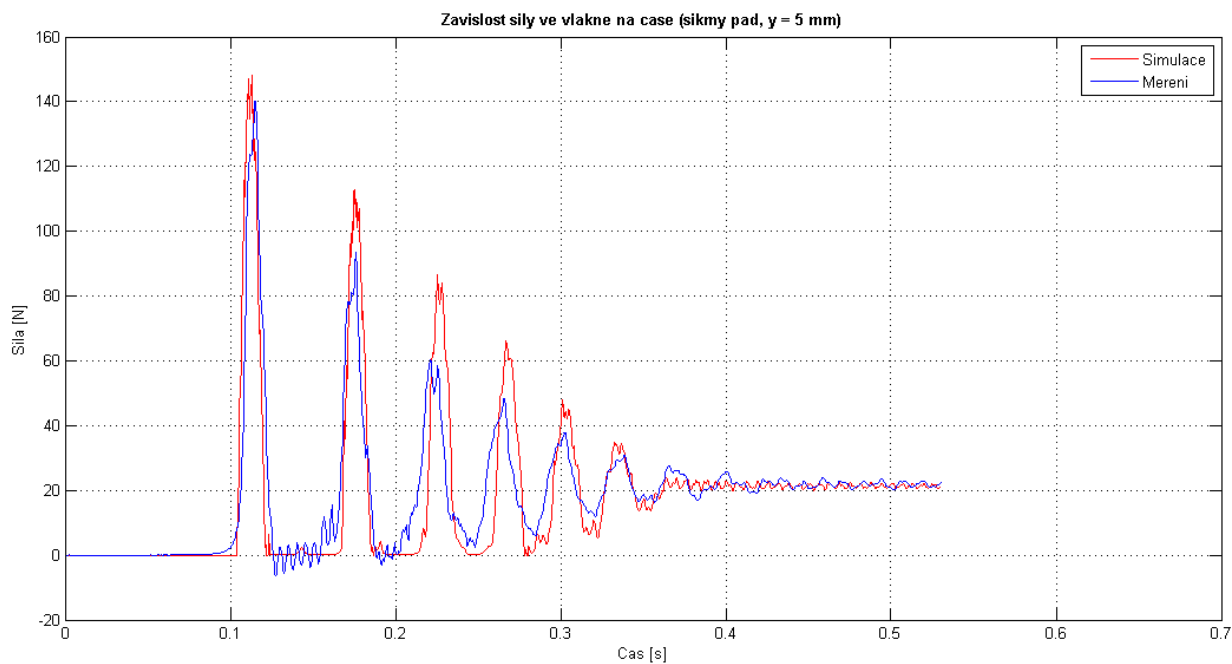
Obrázek 3.16: Schematické zobrazení markerů

3.3.2 Srovnání s experimentem

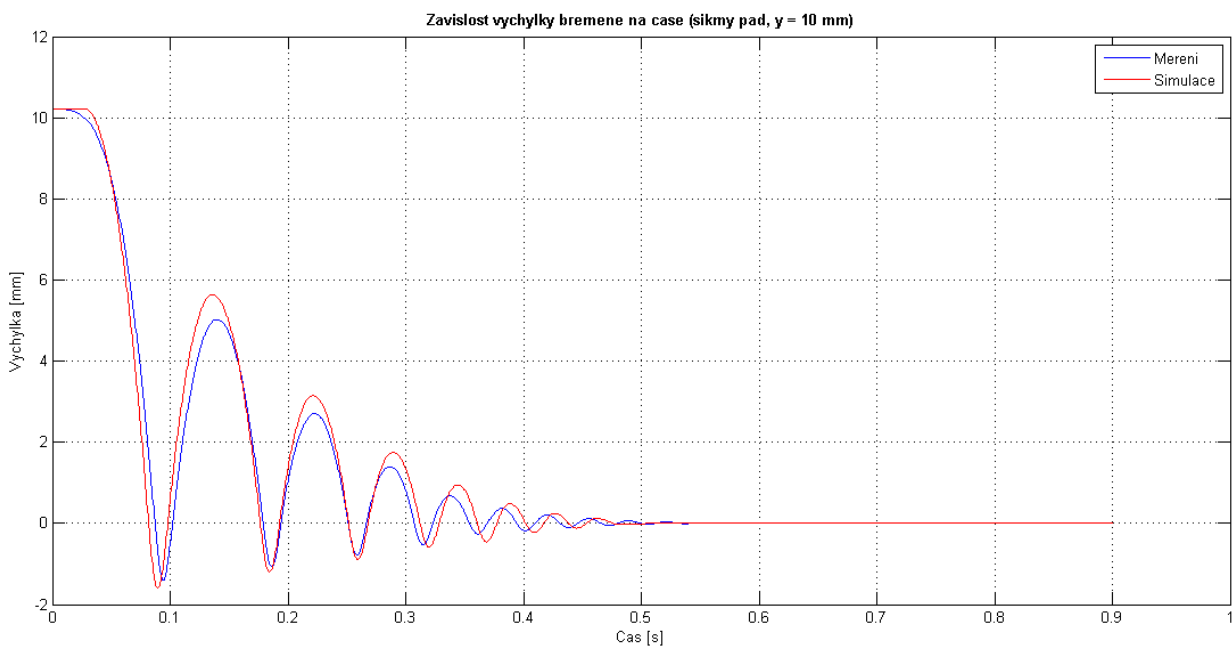
U silového modelu tohoto standu byla zvolena metoda RKF45. V případě použití u modelu pomocí hmotných bodů ale tato metoda selhala z důvodu špatné konvergence. Proto byla použita metoda HASTIFF s dovolenou maximální chybou 10^{-6} . Srovnání výsledků je zobrazeno na obrázcích 3.17 – 3.22.



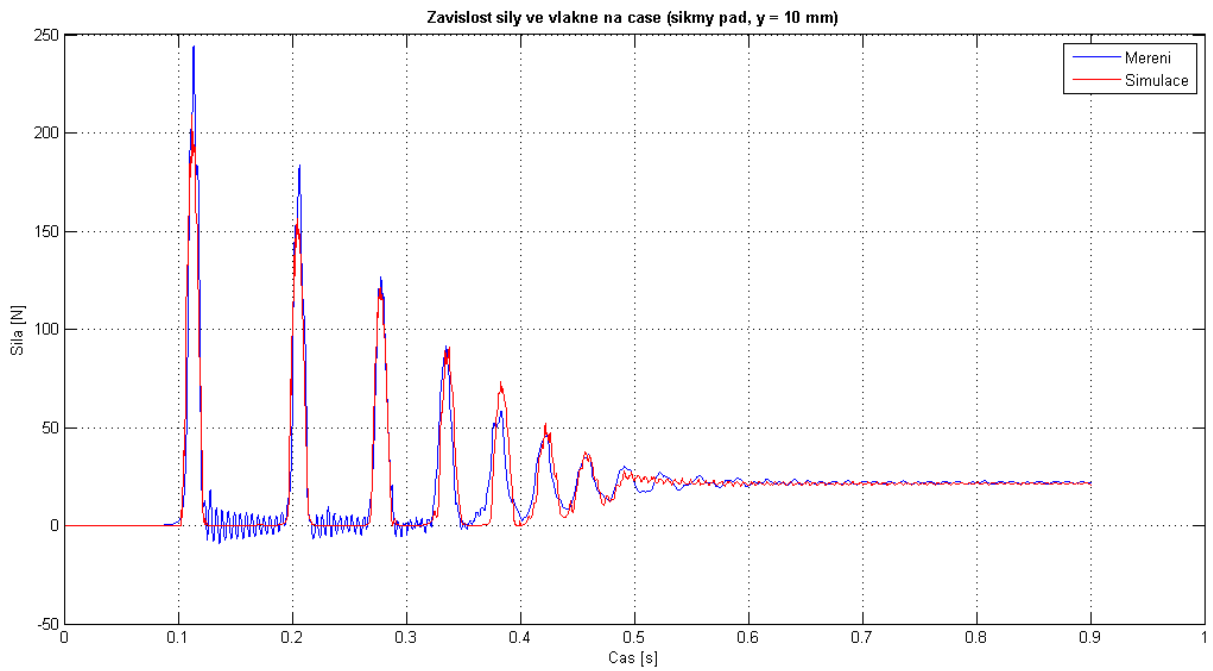
Obrázek 3.17: Graf srovnání vychylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5$ mm



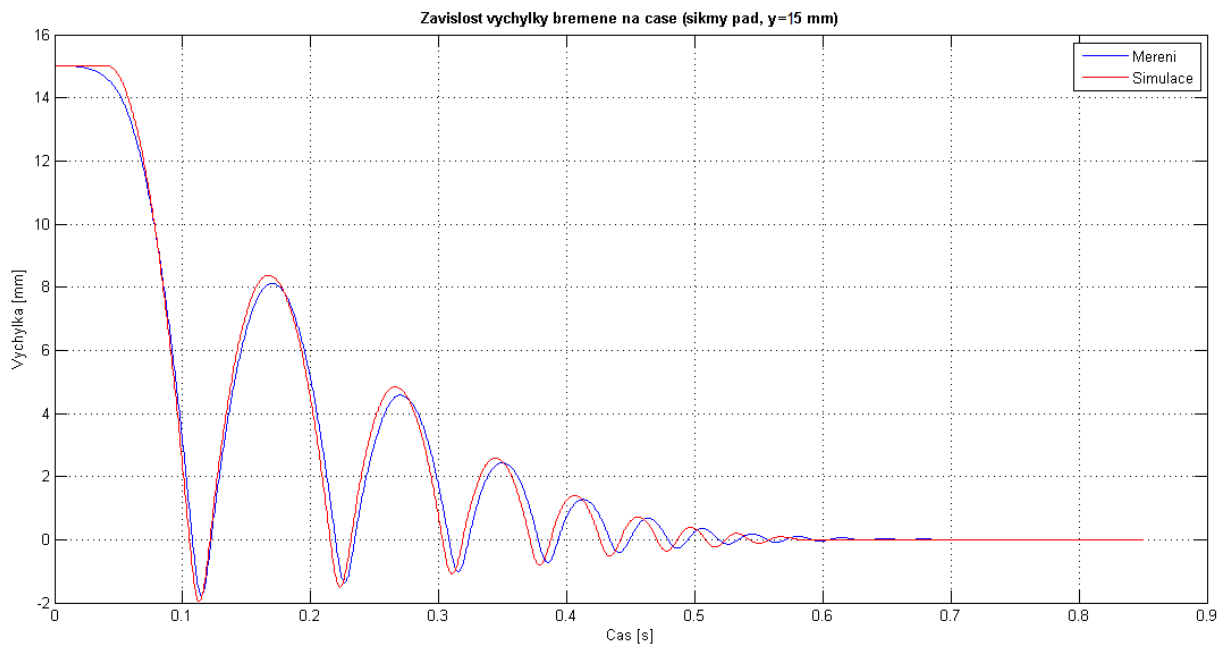
Obrázek 3.18: Graf srovnání síly ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 5$ mm



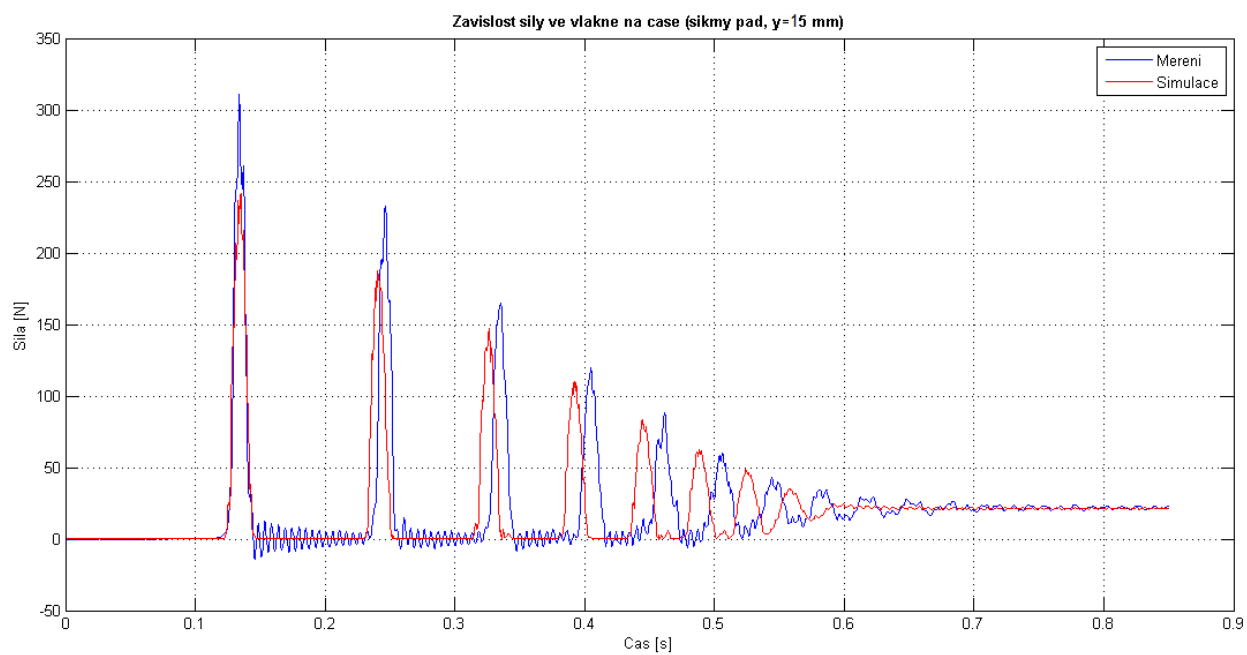
Obrázek 3.19: Graf srovnání vychylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 3.20: Graf srovnání sily ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 10$ mm



Obrázek 3.21: Graf srovnání vychylky břemene pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15$ mm



Obrázek 3.22: Graf srovnání sily ve vlákne pro počáteční podmínku $y_0 \doteq 15$ mm

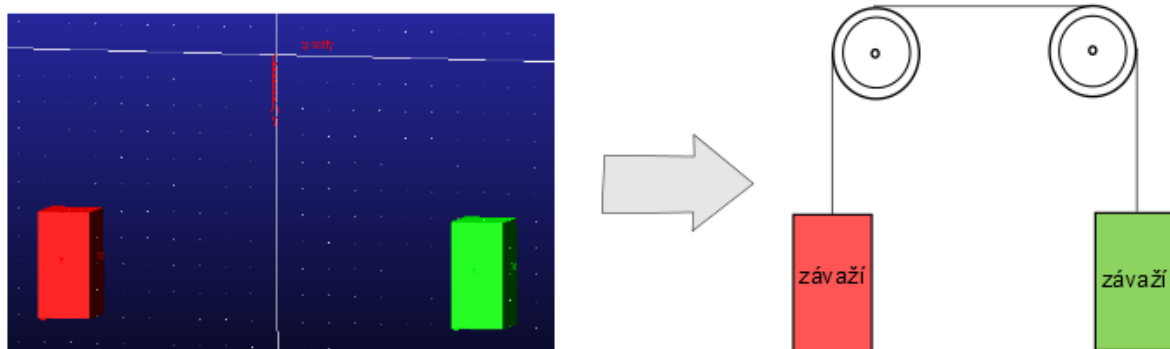
4 Úvod do modulu Machinery/Cable

Modul Adams/Machinery/Cable je v softwaru Adams/View relativní novinkou. Jedná se o novou funkci umožňující vytvořit jakýkoliv systém dvou a více kladek mezi sebou propojených vláknem navazujícím na další tělesa. Vzhledem ke skutečnosti, že je tato novější část ADAMSu méně známá a dosud prakticky na pracovišti KME nevyužívaná, bude tato kapitola zčásti pojata jako ukázkový návod ke tvorbě takového systému mezi sebou propojených těles.

4.1 Návod: jak vytvořit *Cable*

4.1.1 Cíl návodu

Postup vytvoření modelového příkladu pomocí modulu *Cable* bude prezentován na dvou tělesech zobrazených na obrázku 4.1. Cílem bude tyto dvě tělesa propojit vláknem, které bude taženo přes dvě kladky o stejném průměru. Konečná podoba standu je schematicky zobrazena na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Schéma příkladu

4.1.2 Kde najít funkci *Cable*

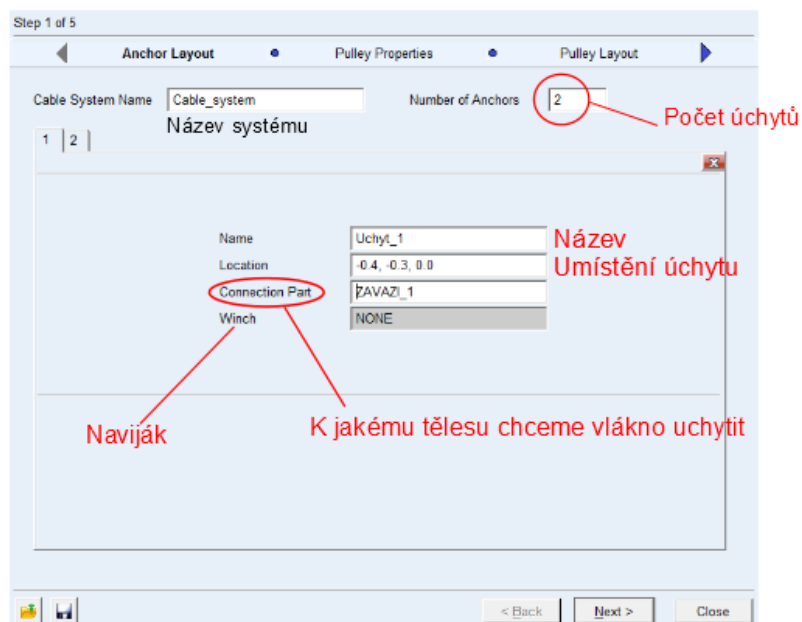
Funkce *Cable* je dostupná ve verzi programu ADAMS z roku 2013. Ikona s označením *Cable* se nachází v horní záložce *Machinery* umístěné mezi záložkami *Plugins* a *Simulation* (obrázek 4.2).



Obrázek 4.2: Umístění funkce *Cable*

4.1.3 Krok 1 z 5: Nastavení úchytů

Po kliknutí na ikonu *Cable* se zobrazí okno provádějící jednotlivými kroky. První krok se týká nastavení počtu a vlastností úchytů vlákna k okolním tělesům. Vysvětlení položek je zobrazeno na obrázku 4.3.



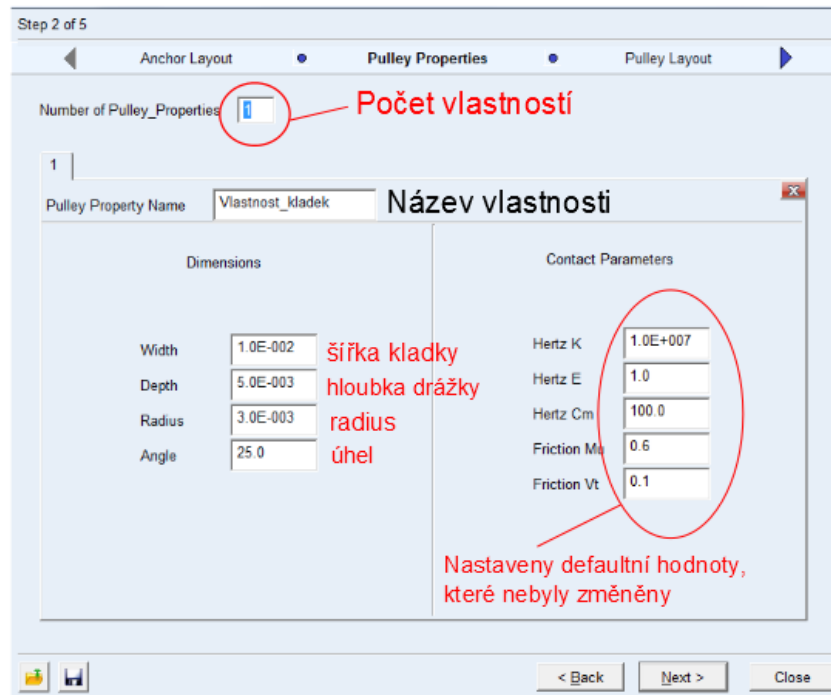
Obrázek 4.3 Krok 1/5

Poznámka:

Vždy je nutno zadat více než 1 úchyt (0 ani 1 úchyt nelze).

4.1.4 Krok 2 z 5: Vlastnosti kladky

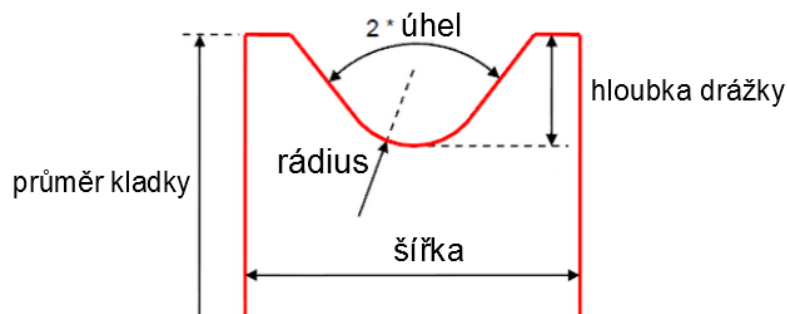
V druhém kroku je nutno nastavit vlastnosti kladek. Vždy je možnost nastavit buď jednu vlastnost pro všechny kladky najednou, nebo i více různých vlastností pro více kladek. V levé části okna (obrázek 4.4) jsou rozměry kladky (šířka, hloubka drážky, rádius drážky a úhel) vyznačeny na obrázku 4.5. Vpravo je pak nastavení kontaktních parametrů.



Obrázek 4.4: Krok 2/5

Kontaktní parametry [5]:

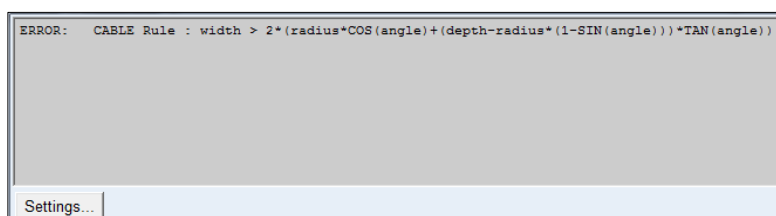
- Hertz K – Hertzův kontaktní parametr týkající se koeficientu tuhosti
- Hertz E – Hertzův kontaktní exponent
- Hertz Cm – Hertzův kontaktní parametr týkající se maximálního tlumení
- Friction Mu – koeficient dynamického tření
- Friction Vt – koeficient týkající se přechodové rychlosti (*transition velocity*)



Obrázek 4.5: Význam jednotlivých rozměrů kladky (převzato a upraveno z [5])

Poznámka:

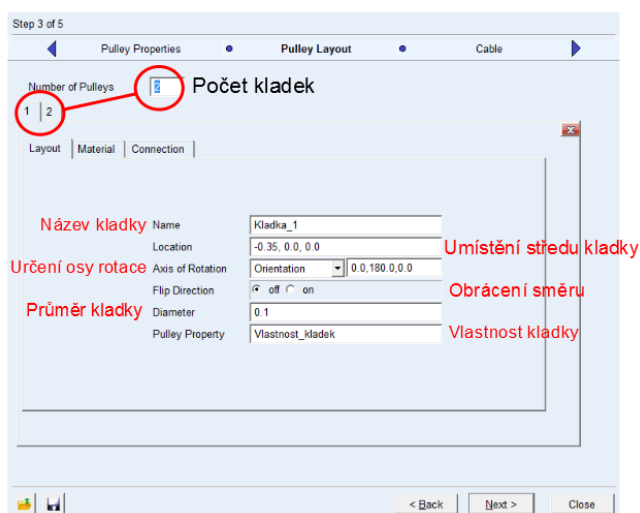
U rozměrů umístěných vlevo na obrázku 4.4 (šířka kladky, hloubka drážky, rádius a úhel) je nutné vždy dodržet správné poměry mezi jednotlivými parametry. Každý rozměr musí také korespondovat s vnějším průměrem kladky. ADAMS správné poměry sice kontroluje zobrazením chyby, ve které je udán vztah udávající poměr nedodržených parametrů (obrázek 4.6), přesto může být správné nastavení všech parametrů někdy komplikovanější.



Obrázek 4.6: Jedna z možných chyb objevující se při zadání špatných hodnot

4.1.5 Krok 3 z 5: Další nastavení kladek

V kroku 3 se nastavují další vlastnosti jako je např. umístění a průměr kladky, nastavení osy rotace, materiál kladky atd. V kolonce pro určení počtu kladek je nutno zvolit vždy 2 nebo více kladek. Volba pouze jedné kladky bohužel není možná. Objasnění všech parametrů záložky *Layout* je na obrázku 4.7. Druhá záložka *Material* slouží k nastavení materiálu (např. pomocí hustoty) a pod záložkou *Connection* se pak skrývá nastavení druhu vazby kladky (nejčastěji *revolute*) a dále také nastavení tělesa, ke kterému chceme kladku navázat (nejčastěji *ground*).



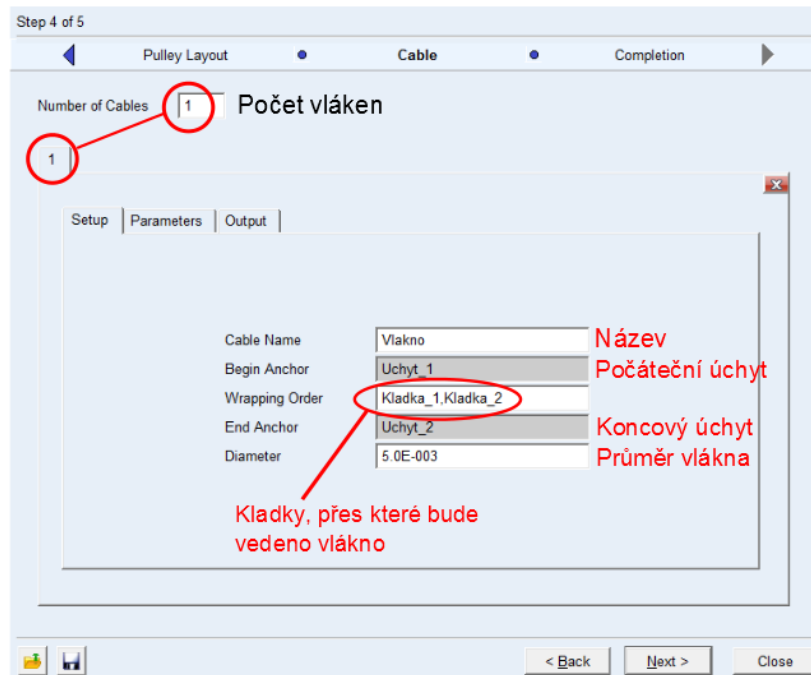
Obrázek 4.7: Krok 3/5

Flip Direction

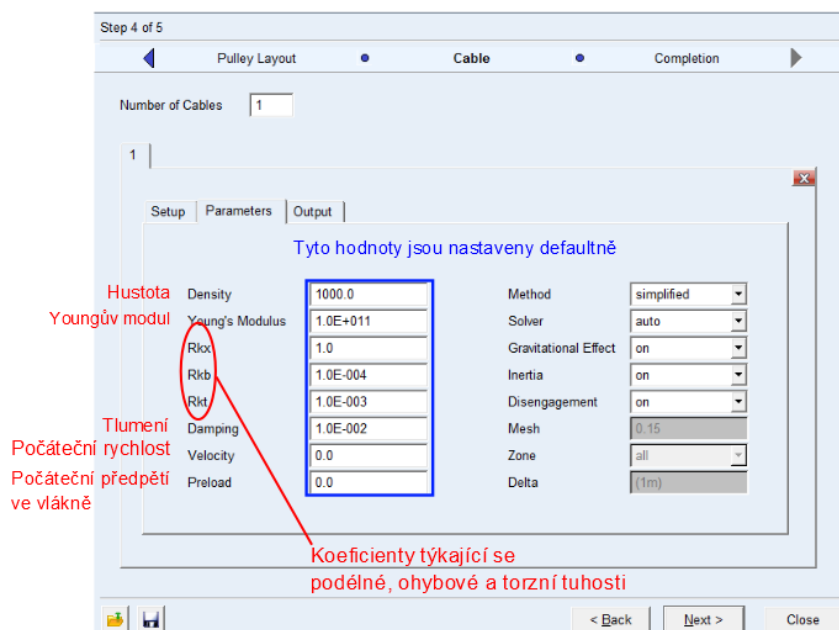
Jedná se o funkci sloužící k úplnému otočení kladky. V tomto případě je vyhovující defaultní nastavení (*off*).

4.1.6 Krok 4 z 5: Vlastnosti vlákna

Čtvrtý krok se týká nastavení vlákna. Popis záložky *Setup* je na obrázku 4.8. V této záložce se nastavují základní parametry vlákna jako např. průměr nebo počáteční a koncový úchyt. Ve vedlejší záložce *Parameters* se stanovují další vlastnosti vlákna částečně vysvětlené v obrázku 4.9.



Obrázek 4.8: Záložka *Setup* kroku 4/5



Obrázek 4.9: Záložka *Parameters* kroku 4/5

Na pravé straně obrázku 4.9 se nachází pokročilé nastavení výpočtové metody. Původně byla nastavena metoda *simplified*, lze ale zvolit i druhou možnou metodu *discretized*. Obě dvě budou následně stručně popsány.

Metoda *simplified*

Jedná se o metodu, která dokáže velmi rychle najít řešení i dobře postihnout zatížení kladek, jsou-li zanedbatelné setrvačné účinky i hmotnost vlákna [5]. Tato metoda také zohledňuje napětí ve vláknech i kontakt mezi kladkou a vláknem (včetně tření) [5]. U této metody je možno dle [5] upravit následující parametry.

- ***Solver (řešič)***
 - *auto*: automatické nastavení parametrů řešiče
 - *none*: nastavení parametrů řešiče uživatelem
- ***Gravitational Effect (vliv gravitace)***
 - *on*: aproximace vlivu hmotnosti vlákna
 - *off*: zanedbání hmotnosti vlákna
- ***Inertia (setrvačnost)***
 - *on*: aproximace vlivu setrvačnosti vlákna
 - *off*: zanedbání setrvačnosti vlákna
- ***Disengagement (uvolnění)***
 - *on*: zohlednění možného uvolnění vlákna od kladky
 - *off*: zanedbání možného uvolnění vlákna od kladky

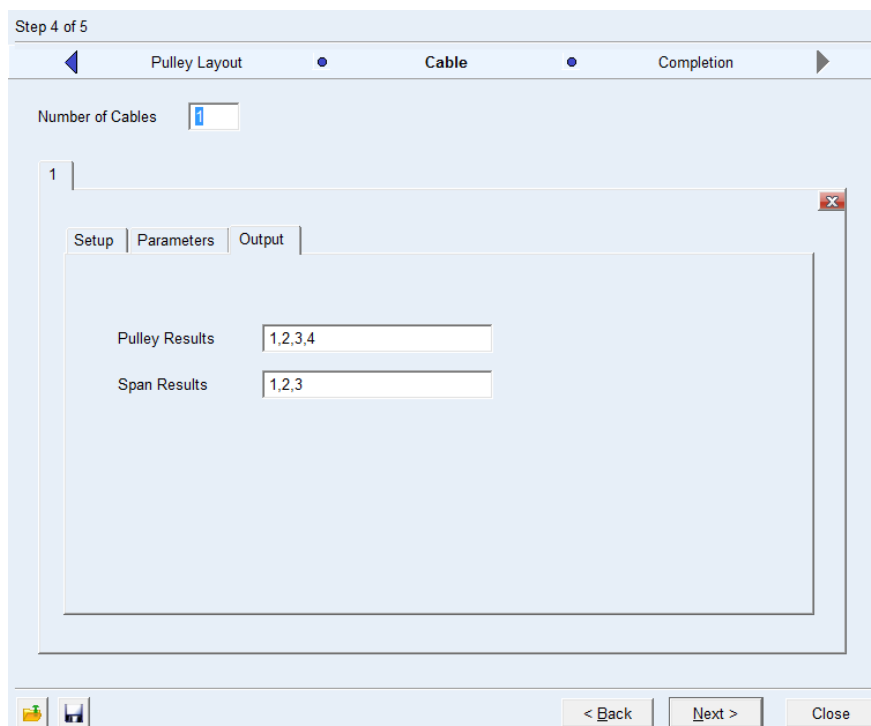
Metoda *discretized*

Za použití této metody je vlákno diskretizováno na elementy (tělesa, vazby a síly), které zohledňují hmotnost, setrvačnost a podélnou, ohybovou i torzní tuhost [5]. Takto diskretizované vlákno pak počítá s přesnými vláknovými vibracemi a silami působící na kladku v případech, kdy mají hmotnost vlákna i jeho setrvačné účinky vliv [5]. Kromě parametrů zmíněných u metody *simplified* je nutno dle [5] nastavit navíc následující položky.

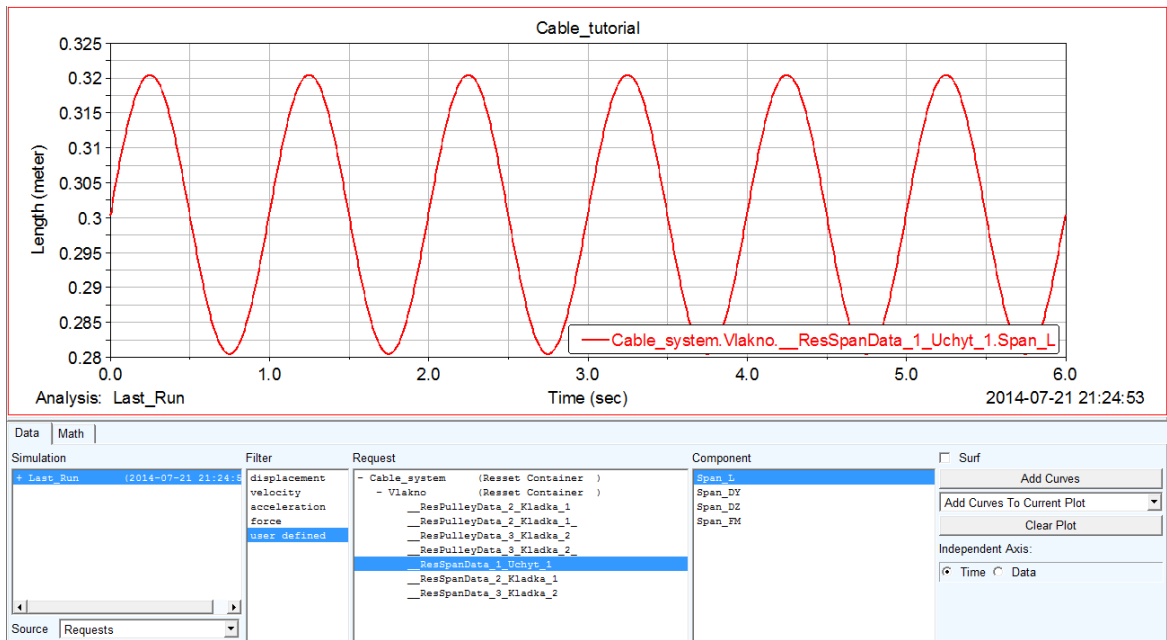
- ***Mesh***
 - kolonka pro definici délky elementu vlákna
- ***Zone (oblast)***
 - *forward*: předpoklad možného kontaktu jen v případě pohybu vlákna vpřed
 - *centered*: předpoklad možného kontaktu při pohybu vlákna vpřed a zpět v okolí kladky
 - *backward*: předpoklad možného kontaktu jen v případě pohybu vlákna zpět
 - *all*: předpoklad všech oblastí kontaktu
- ***Delta***
 - délka vlákna, na které je předpokládán kontakt s kladkou s ohledem na *oblast*

Třetí záložka *Output* (obrázek 4.10) bude vyplněna jen tehdy, pokud bude nutno u kladek, úchyťů i u jednotlivých úseků vlákna sledovat další průběhy veličin. U úchyťů a kladek je možno dle [5] zaznamenat veličiny jako např. složky sil ve spojení, podélná rychlost vlákna, nebo úhel natočení a úhlová rychlost dle lokální osy z. Mezi veličiny, které je možné v průběhu simulace vyhodnocovat v jednotlivých úsecích vlákna (buď mezi kladkami, nebo mezi kladkou a úchytem), patří např. délka úseku, nebo průběh tahové síly na tomto úseku [5].

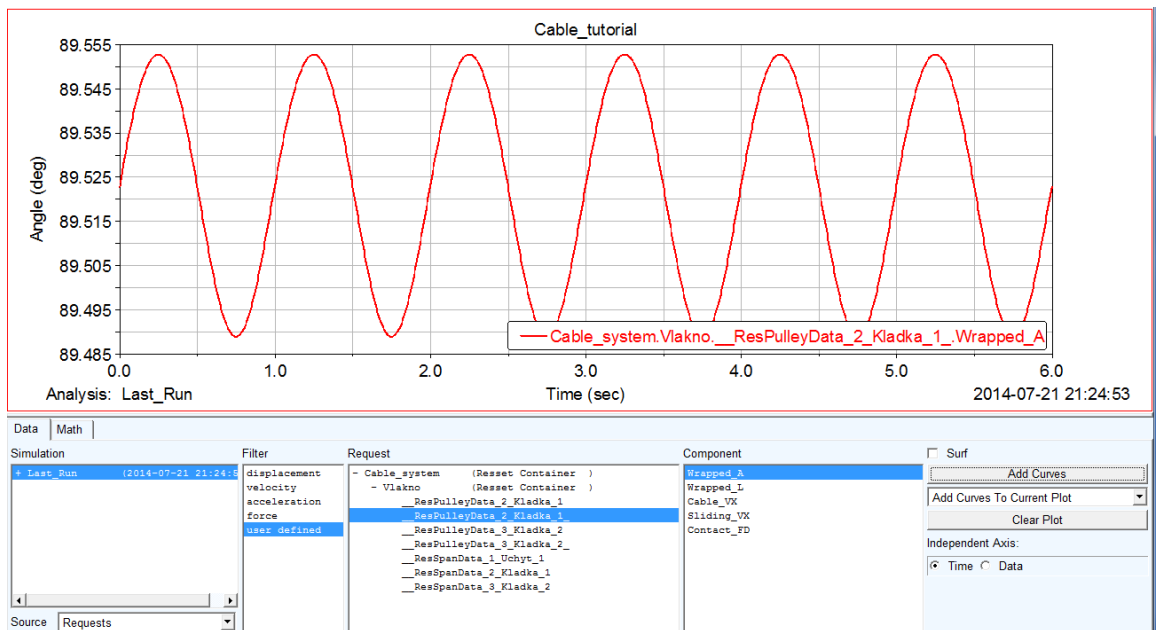
Nastavení se provádí zadáním čísel do kolonky *Pulley Results* (pro kladky a úchyty) a do kolonky *Span Results* (pro úseky vlákna). Pokud by bylo tedy potřeba znát další dodatkové veličiny, v prvním rámečku by byla čísla 1,2,3,4, protože jsou v modelu dvě kladky a dva úchyty. V druhé kolonce by pak měla být čísla 1,2,3 z důvodu celkového počtu tří úseků vlákna (obrázek 4.10). Všechny průběhy je pak možné najít v *PostProcessoru* pod volbou *Requests* v záložce *Source*. Příklady některých dodatkových průběhů jsou na obrázcích 4.11 a 4.12.



Obrázek 4.10: Záložka *Output* kroku 4/5



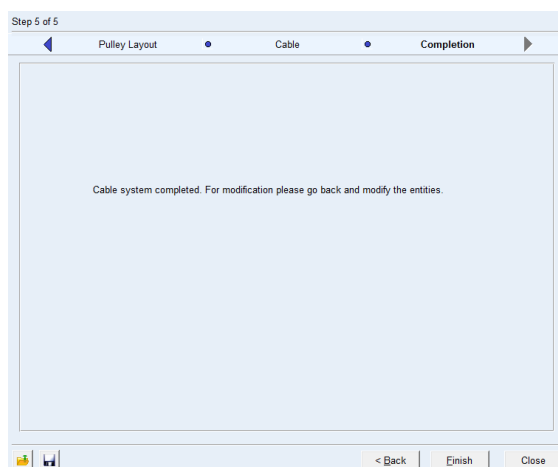
Obrázek 4.11: Průběh úhlu obtočení levé kladky vláknem v závislosti na čase



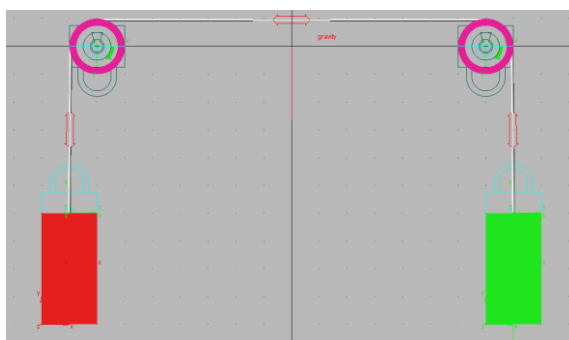
Obrázek 4.12: Průběh délky úseku vlákna od levého úchyty k levé kladce v závislosti na čase

4.1.7 Krok 5 z 5: Dokončení

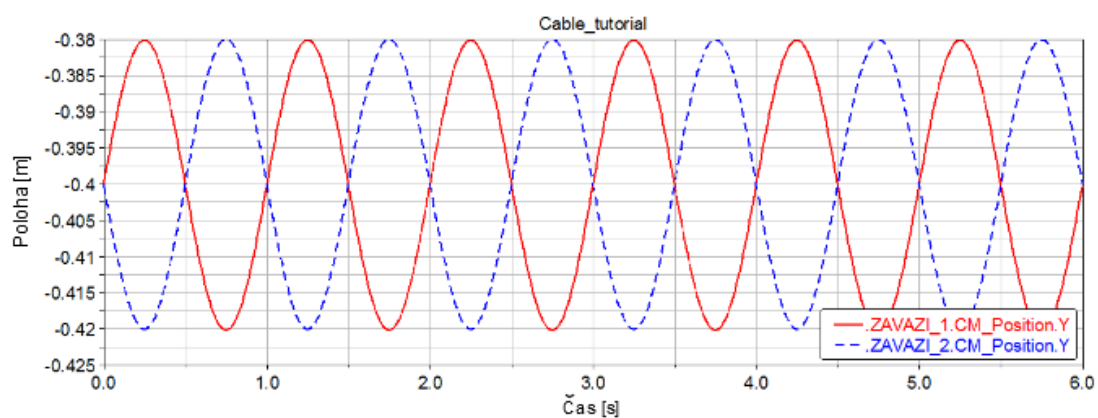
Krok 5/5 je už jen oznámení o úspěšném vytvoření systému *Cable* (obrázek 4.13).



Obrázek 4.13: Krok 5/5



Obrázek 4.14: Konečná podoba modelu v ADAMSu

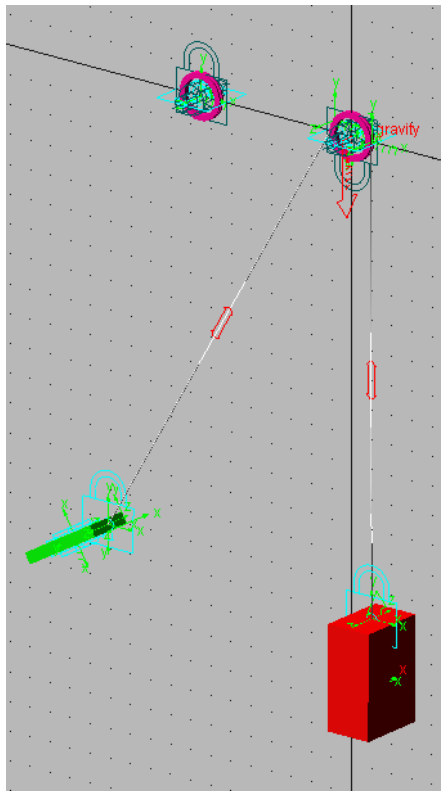


Obrázek 4.15: Graf závislosti poloh obou závaží na čase (druhému závaží byl předepsán sinusový pohyb s amplitudou 0,02 m a periodou 1 s)

4.2 Aplikace systému *Cable* na stand s kladkou

Zatímco u silového modelu standu s kladkou bylo vytvoření všech předpisů sil časově náročné a celkem komplikované, tentokrát tomu tak není. Vytvořit správně *Cable* je ve srovnání se stanovením předpisů silových účinků rychlejší.

Při konstruování potřebných částí systému se ale vyskytl problém. Jak již bylo řečeno výše, ADAMS/View vyžaduje při stanovení počtu kladek vždy minimální počet 2. Vytvořit systém jen s jednou kladkou tedy nebylo možné. Proto bylo nutno zadat dvě kladky, jednu umístit na požadované místo a druhou umístit na jiné místo mimo model. Stand je zobrazen na obrázku 4.16, na kterém je vidět přítomnost druhé kladky nemající v modelu žádný význam. Na celkovou funkčnost modelu při spuštění simulace ale tento nedostatek nemá žádný vliv.



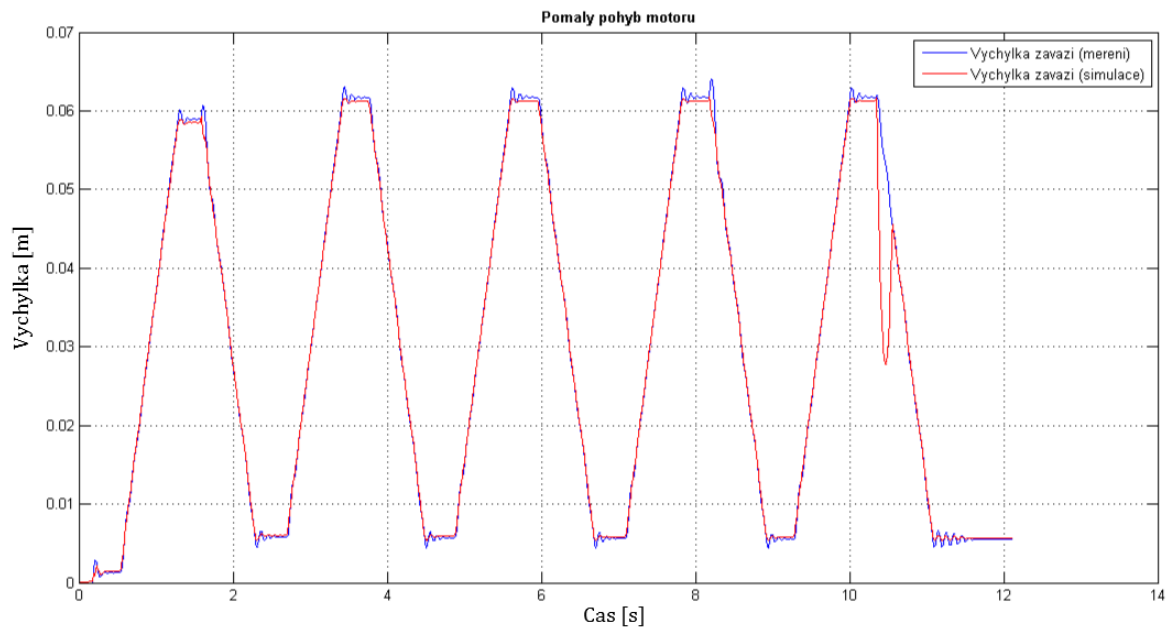
Obrázek 4.16: Model standu v ADAMSu

4.2.1 Srovnání s experimentem

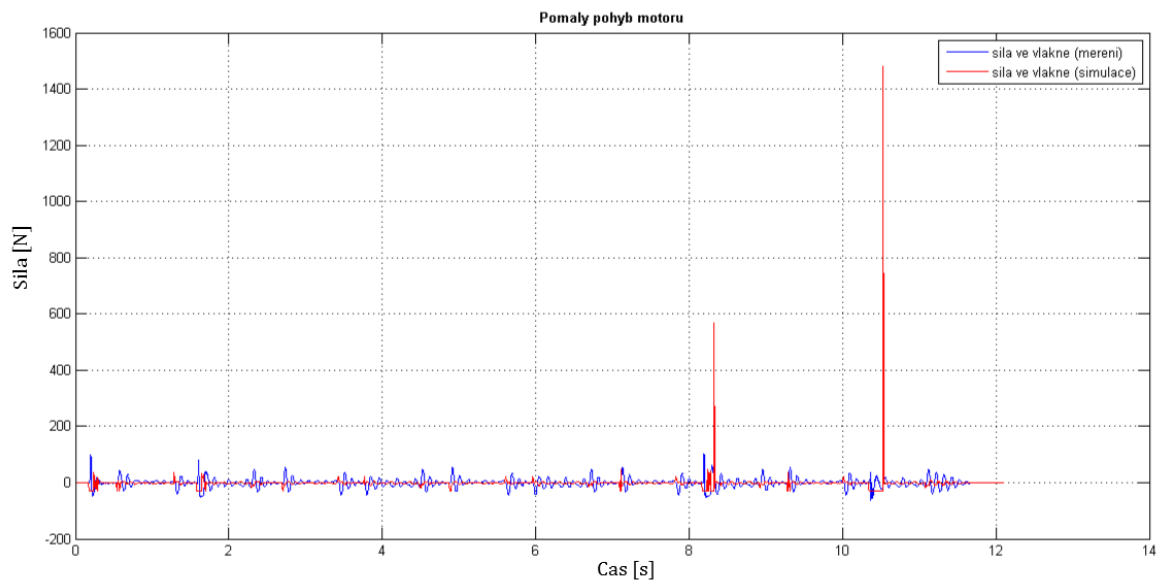
Za účelem srovnání kvality výsledků byly v modelu využity obě výpočtové metody *simplified* i *discretized*. Stejně jako u silového modelu, i tentokrát byly vybrány dva děje, které se odlišovaly ve frekvenci pohybu motoru. V obou dějích byla zaznamenána výchylka závaží spolu se silou ve vláknech u motoru.

Srovnání (výpočet metodou *simplified*)

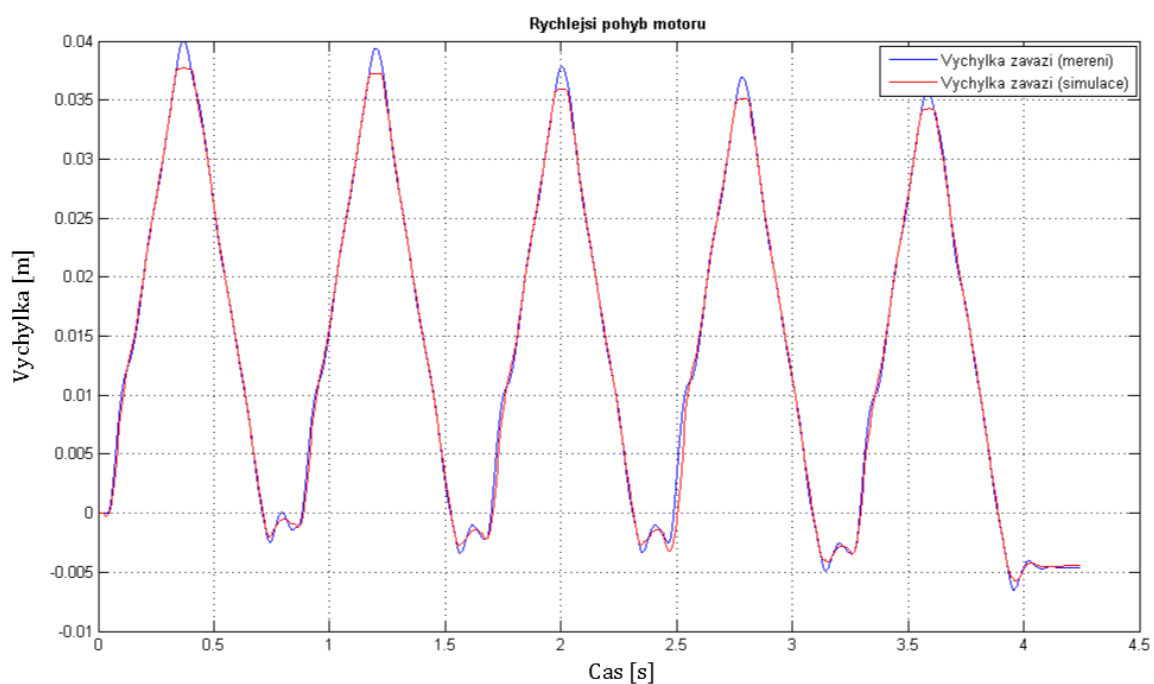
Simulace je označena červeně, modré křivky jsou výsledky z experimentu.



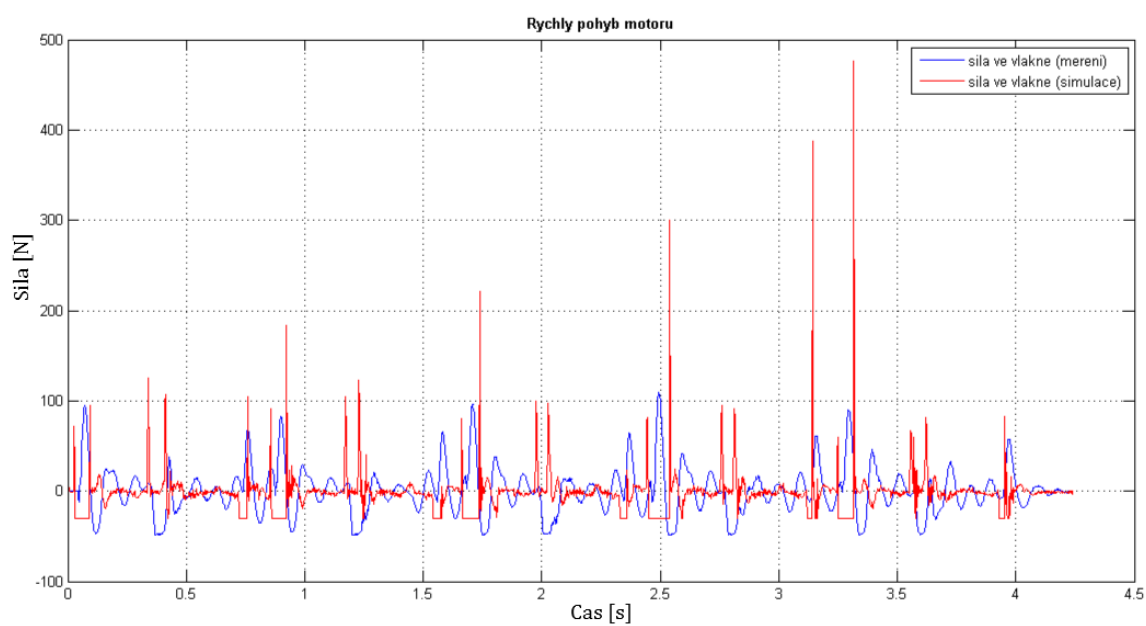
Obrázek 4.17: Graf srovnání výchylek zavaží při pomalém pohybu motoru (metoda *simplified*)



Obrázek 4.18: Graf srovnání síly ve vlákne u motoru při pomalém pohybu motoru (metoda *simplified*)



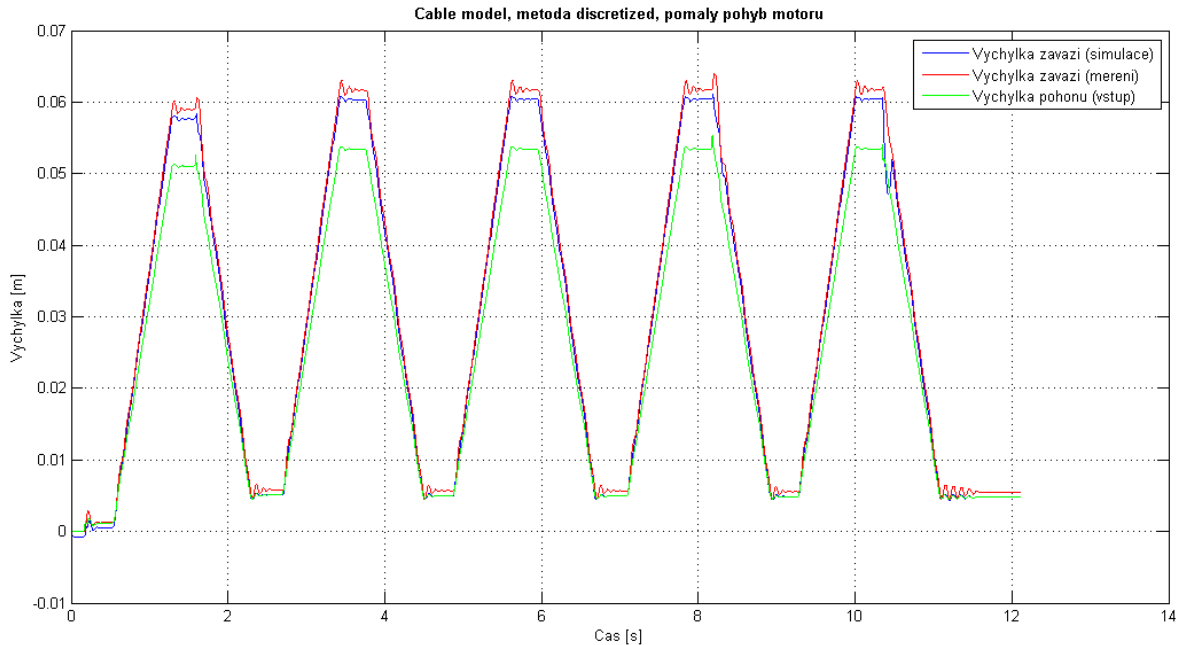
Obrázek 4.19: Graf srovnání výchylek závaží při rychlém pohybu motoru (metoda simplified)



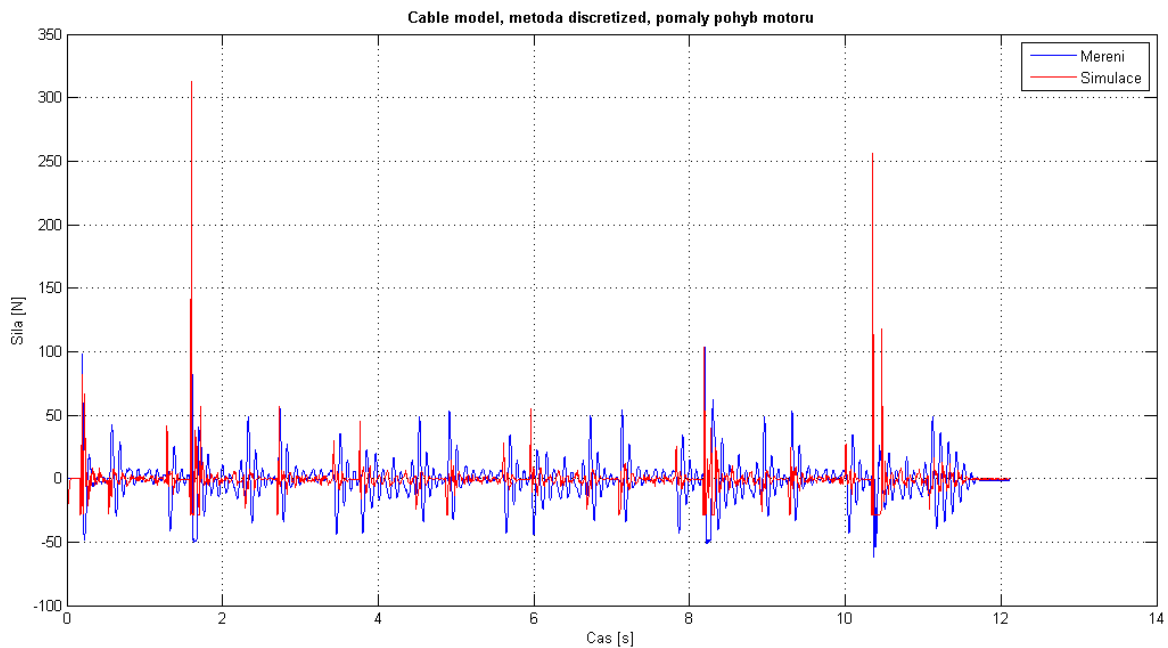
Obrázek 4.20: Graf srovnání síly ve vlákne u motoru při rychlém pohybu motoru (metoda simplified)

Srovnání (výpočet metodou *discretized*)

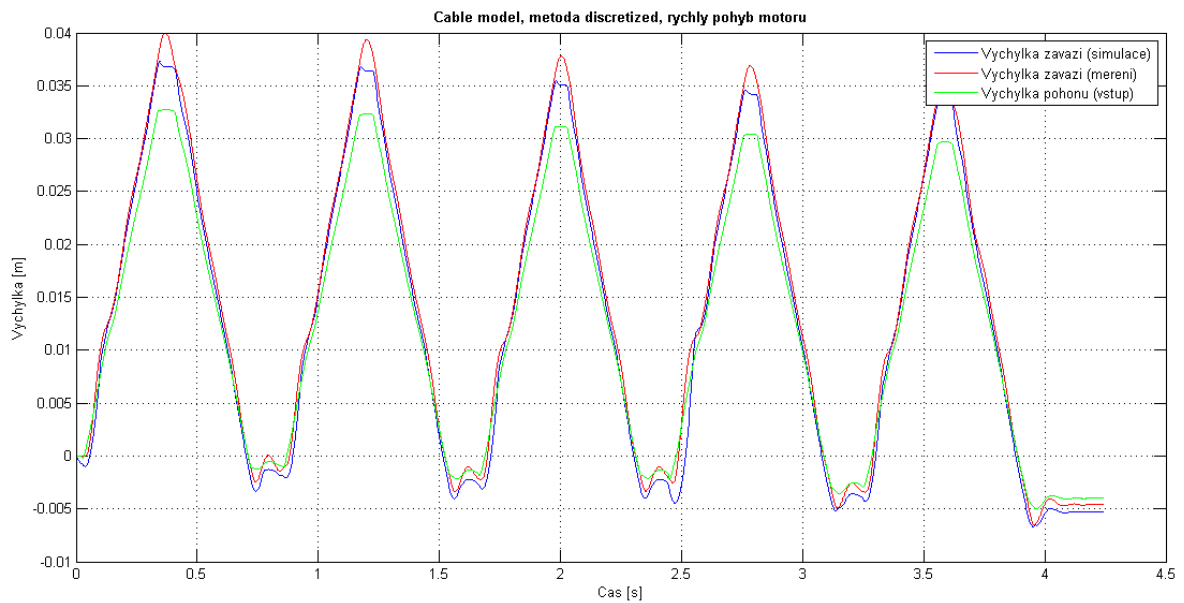
Modré křivky představují výsledky ze simulace, červené výsledky z měření (výjimka je pouze na obrázku 4.22, kde jsou barvy křivek přehozené). V grafech výchylek je navíc zelená křivka, která představuje výchylku motoru (uvedeno v legendě).



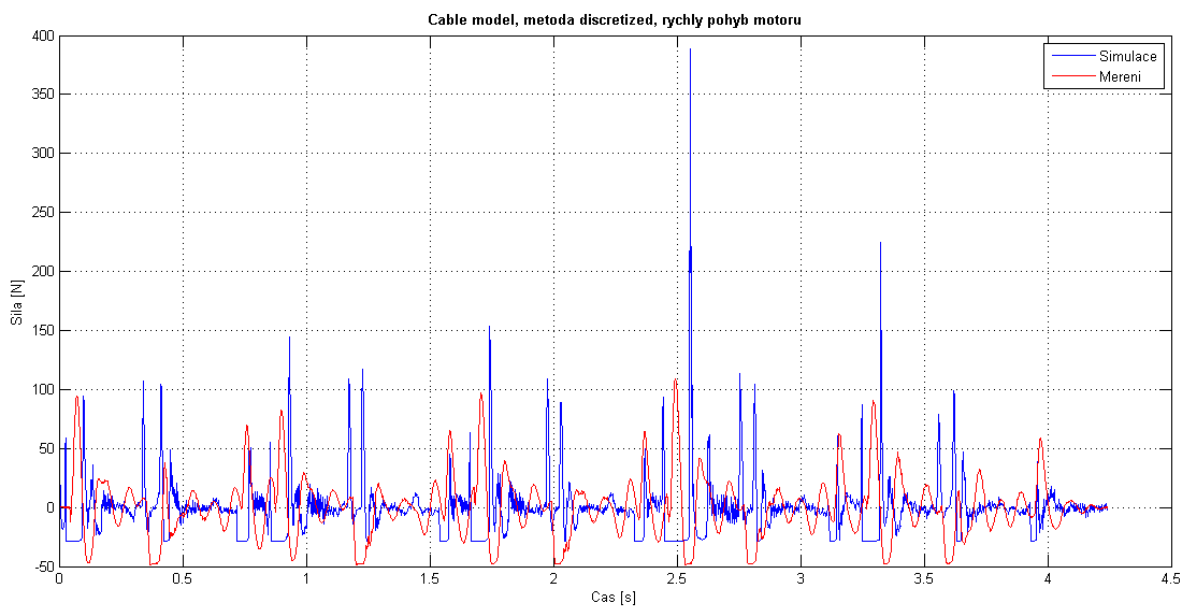
Obrázek 4.21: Graf srovnání výchylek závaží a motoru při pomalém pohybu motoru (metoda *discretized*)



Obrázek 4.22: Graf srovnání síly ve vlákne u motoru při pomalém pohybu motoru (metoda *discretized*)



Obrázek 4.23: Graf srovnání výchylek závaží a motoru při rychlém pohybu motoru (metoda discretized)



Obrázek 4.24: Graf srovnání síly ve vlákně u motoru při rychlém pohybu motoru (metoda discretized)

5 Závěr

Tato práce je věnována problematice tvorby modelů vláken pro návrh vláknových mechanismů. Bylo zde představeno několik možností tvorby modelu vlákna spolu se srovnáním s výsledky ze změřených experimentů.

Výhoda modelu vlákna pomocí jedné nelineární síly spočívá v jednoduché konstrukci samotné síly. Složitost funkčního předpisu pro výpočet síly ale do jisté míry závisí na složitosti soustavy těles, ve které se vlákno vyskytuje. Pokud se jednalo pouze o pád závaží, předpis síly bylo možno stanovit jednoduše. V případě systému dvou těles a vlákna taženého přes kladku už bylo stanovení předpisů silových účinků daleko složitější, ale výsledky jsou stále uspokojivé. Srovnání výsledků získaných z výpočtových modelů a z měření je ovlivněno tím, že pády závaží na vlákne jsou z hlediska dynamiky velmi extrémním případem a při experimentálním vyšetřování dochází k různým rázům ve vedení, které není možné postihnout výpočtově.

Model vlákna vytvořený pomocí hmotných bodů má oproti předchozímu modelu výhodu v možnosti zachování hmotnosti vlákna. Tato přednost v modelu měla v některých případech pozitivní vliv na kvalitu výsledků prezentovaných ve srovnání s experimentem. Bylo zjištěno, že kvalitu výsledků v tomto případě neovlivnil počet hmotných bodů reprezentujících vlákno, což ale nemusí platit obecně pro jiné aplikace.

Přednost modelu vlákna pomocí funkce *Cable* je v jeho rychlé konstrukci a v postihnutí více vlastností vlákna. Po dokončení několika kroků lze snadno vytvořit systém vláken a kladek o požadovaných vlastnostech. Některé výsledky týkající se standu s kladkou dokazují, že takto vytvořený systém dokáže lépe postihnout pohyb závaží než silový model, a to v případě rychlého pohybu motoru. Vliv na kvalitu výsledků měla volba výpočtové metody (*simplified/discretized*). Mírným nedostatkem tohoto způsobu konstrukce vlákna je nutnost nastavení minimálního počtu dvou kladek v systému.

Všechny vytvořené modely jsou uloženy na CD přiloženém k práci.

Literatura

- [1] Slavík, J. – Stejskal, V. – Zeman, V.: *Základy dynamiky strojů*. ČVUT, Praha, 1997.
- [2] Shabana, A.A.: *Dynamics of Multibody Systems*. Cambridge UP, New York, 1998.
- [3] Polach, P. – Hajžman, M. – Václavík, J.: Experimental and Computational Investigation of a Simple Fibre-mass System. *Proceedings of the 19th International Conference Engineering Mechanics 2013*, CD-ROM. Institute of Thermomechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, Svatka, 2013.
- [4] Polach, P. – Hajžman, M. – Václavík, J. – Šika, Z. – Svatoš, P.: Model parameters influence of a simple mechanical system with fibre and pulley with respect to experimental measurements. *CD-ROM Proceedings of ECCOMAS Thematic Conference Multibody Dynamics 2013 on Advances in Computational Multibody Dynamics*, Zagreb, 2013.
- [5] Dokumentace a manuály k programu MSC.ADAMS.