ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Kinematika kladkového stavu pro simulaci reálné trati

Roller Rig Kinematics for Real Track Simulation

bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.

Miroslav Thuma

Praha 2015

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní,
Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Technická 4, 166 07 Praha 6 **Akademický rok: 2014/2015**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student: **Miroslav THUMA**

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Kinematika kladkového stavu pro simulaci reálné trati**

název anglicky: **Roller Rig Kinematics for Real Track Simulation**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte stručnou rešerši na téma: „Geometrické uspořádání železničních a tramvajových tratí".
2. Sestavte software, jehož vstupem bude popis obecné trati a výstupem prostorové souřadnice kolejnic.
3. Proveďte transformaci souřadnic kolejnic na pohyb kladek kladkového stavu tak, aby simulace jízdy na kladkovém stavu odpovídala zvolené trati.
4. Vypracujte průvodní technickou zprávu dokumentující výše uvedené činnosti.

Rozsah průvodní zprávy: 20 stran

Rozsah grafických prací: -

Seznam doporučené literatury:

[1] Kolář, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel, skripta ČVUT

[2] ČSN 73 6412, ČSN 73 6360

[3] Odborné časopisy, firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. června 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne: 22. 4. 2015 .....
Student

Doc. Ing. Oldřich VÍTEK, Ph.D.
Vedoucí ústavu

Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 7. dubna 2015

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Janu Kalivodovi, Ph.D. za vedení, poskytnuté konzultace a čas, který tím strávil.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou konzultací poskytnutých vedoucím práce Ing. Janem Kalivodou, Ph.D. a že jsem uvedl všechny zdroje v práci použité.

Anotace

Cílem této bakalářské práce je popsat geometrické uspořádáním železničních a tramvajových tratí a matematicky definovat libovolnou trať. Dále se práce zabývá vytvořením skriptu, který na základě tohoto popisu vytvoří prostorové souřadnice tratě a následně tyto souřadnice transformuje na pohyb kladek kladkového stavu tak, aby simulace jízdy na kladkovém stavu odpovídala zvolené trati.

K sestavení softwaru bylo využito programového prostředí MATLAB od společnosti MathWorks. Výstupem softwaru je soubor dat, který popisuje polohu kladek ve zvoleném souřadnicovém systému v závislosti na dráze a na čase.

Annotation

The aim of this bachelor thesis is to describe the geometrical layout of rail and tram tracks and to mathematical describe any track. Then the thesis deals with creation script capable of generating spatial coordinates of the track and subsequently transforming them to movement of rollers so that the ride simulation corresponds to the chosen track.

To create this script interactive environment MathWorks MATLAB was used. Output of this script is data file describing the roller position in the chosen coordinate system according to the track and time.

OBSAH

1. ÚVOD 8
2. GEOMETRICKÉ USPOŘÁDÁNÍ TRATÍ 9
2.1. Parametry tratí 9
2.2. Rozdělení na úseky 9
2.2.1. Přímý úsek 9
2.2.2. Oblouk 9
2.2.3. Přechodnice 9
2.2.4. Vzestupnice 10
3. POPIS OBECNÉ TRATI 11
3.1. Zadání tratě 11
3.1.1. Příklad zadání tratě 11
3.2. Popis tratě 12
3.2.1. Horizontální část 12
3.2.2. Vertikální část 13
3.2.3. Část převýšení 13
4. TRANSFORMACE SOUŘADNIC NA POHYB KLADEK 16
4.1. Souřadnicový systém kladek 16
4.2. Natočení kladek 16
4.3. Posunutí kladek vůči středu 18
4.4. Polohy kladek v osách x, y, z 18
4.5. Rychlostní profil 19
4.6. Otáčky kladek 20
5. SKRIPT 22
5.1. Ovládání a struktura skriptu 22
5.2. Ukázka výstupů programu 23
6. ZÁVĚR 28
7. ZDROJE 29

8. PŘÍLOHY 30

8.1. Příloha P1 – Zadání trati „Trať 1“ 30

8.2. Příloha P2 – Zadání trati „Trať 2“ 31

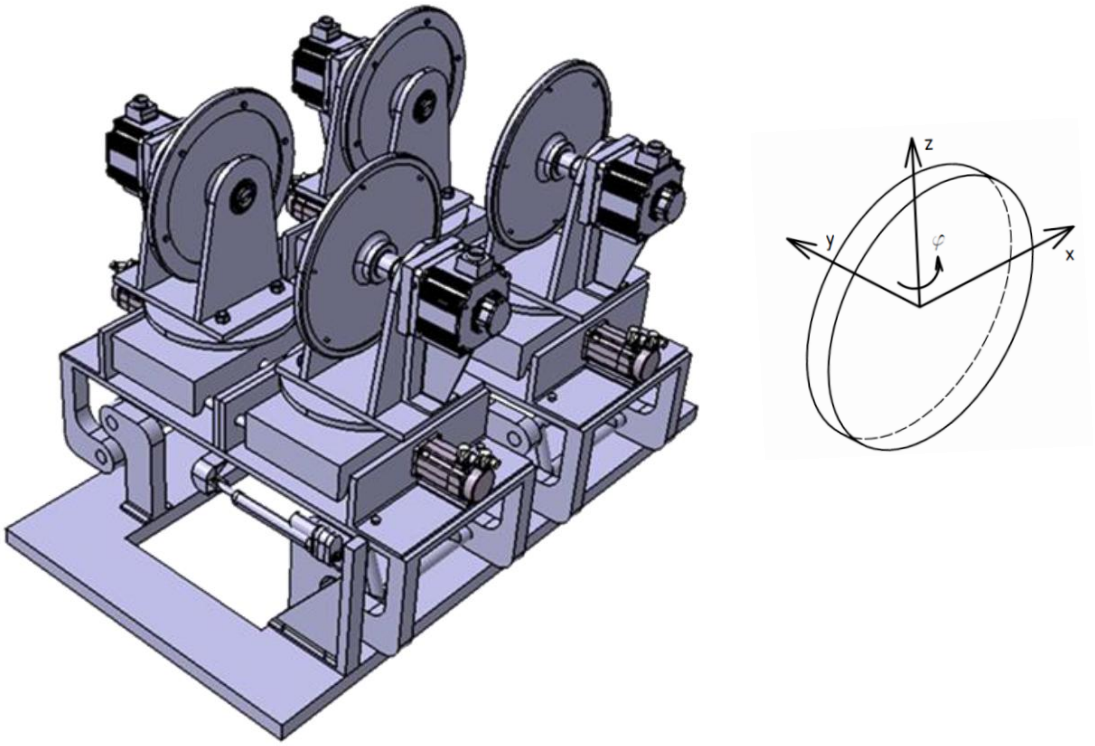
1. ÚVOD

V současné době je na ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel zkušební kladkový stav pro zkoumání chování podvozků kolejových vozidel a zkoušení nových konstrukčních řešení pro vylepšení podvozků. Tento zkušební stav má dva páry kladek, které se mohou vůči sobě natáčet a simulovat tak i jízdu obloukem. Konstrukce současného stavu je však relativně dost omezující v možnostech simulace.

Proto se pracuje na novém kladkovém stavu, který bude mít větší možnosti simulace. V ideálním případě by měla mít každá kladka možnost pohybovat se nezávisle na ostatních.

Cílem práce je umět popsat libovolnou trať pomocí množiny parametrů, na základě těchto parametrů vytvořit prostorové souřadnice tratě a tyto souřadnice následně převést na pohyby kladek tak, aby simulace jízdy na kladkovém stavu odpovídala skutečné zvolené trati.

Dále vypočítané pohyby kladek pro extrémní případy, které budeme chtít simulovat, pomůžou při vlastním konstruování nového kladkového stavu a dimenzování jeho částí.



Obr. 1.1 – Návrh podoby nového kladkového stavu a naznačení os pohybu

2. GEOMETRICKÉ USPOŘÁDÁNÍ TRATÍ

2.1. Parametry tratí

Každý bod trati lze popsat několika základními parametry. Poloměrem (resp. křivostí), rozchodem, sklonem trati ve směru koleje a příčným sklonem trati – převýšením koleje. Rozchod je vzdálenost kolejnicových pásů. Velikost rozchodu je dána normou ČSN 73 6360-1 pro železniční trati a normou ČSN 73 6412 pro tramvajové trati, normy však v určitých případech dovolují změnu rozchodu, například zvětšit rozchod pro oblouky s příliš malým poloměrem. Převýšení koleje je dáno vzájemným převýšením kolejnicových pásů v daném místě. Na základě těchto parametrů je možné trať rozdělit na úseky s konstantním poloměrem, to jsou rovné úseky a oblouky, a úseky s postupnou změnou poloměru, takzvané přechodnice. Úsek se změnou převýšení se nazývá vzestupnice.

2.2. Rozdělení na úseky

2.2.1. Přímý úsek

Přímý úsek je charakterizován svojí délkou, nekonečným poloměrem, svým rozchodem a sklonem ve směru trati a obvykle má nulové převýšení.

2.2.2. Oblouk

Oblouk je definován svým konečným poloměrem, sklonem, rozchodem a převýšením. V oblouku může být v závislosti na jeho velikosti zvětšen rozchod koleje o hodnotu dle výše uvedených norem ([1] a [2]). Oblouk může mít nenulové převýšení koleje pro kompenzaci odstředivých sil působících na soupravu.

2.2.3. Přechodnice

Přechodnice koleje je úsek, v němž se postupně mění poloměr tak, aby byl zajištěn plynulý přechod mezi úseky s konstantním poloměrem. Dělí se na krajní, tvořící plynulý přechod mezi přímým úsekem a obloukem, a mezilehlé, umístěné mezi dva oblouky stejného směru o různých poloměrech. Mezi oblouky s opačným směrem se vkládají dvě krajní přechodnice, obvykle ještě s vloženým přímým úsekem. Dále se dělí na přechodnice s lineární změnou poloměru a s nelineární změnou poloměru. V další práci se omezíme pouze na krajní přechodnici s lineární změnou poloměru tvaru klotoidy. Tato přechodnice je nejpoužívanější jak u tratí železničních, tak u tratí tramvajových.

2.2.4. Vzestupnice

Vzestupnice je úsek trati, na němž se mění převýšení kolejnicových pásů. Obvykle se projektuje v místě přechodnice. Změna převýšení se realizuje buď změnou výšky vnějšího kolejnicového pásu o danou hodnotu, nebo změnou výšky obou pásů, vnější pás stoupá a vnitřní pás klesá o polovinu dané hodnoty.

3. POPIS OBECNÉ TRATI

3.1. Zadání tratě

S ohledem na praktické využití práce jsme se rozhodli použít obdobný popis tratě, jako vytváří program Simpack Multibody Simulation. Popis trati je formou tabulky textového dokumentu (*.txt), který má 3 hlavní části. Horizontální část udává jaké má trať úseky, jak následují, délku úseků a velikosti příslušných poloměrů. Vertikální část popisuje sklon jednotlivých úseků v promilích. Část převýšení udává hodnotu převýšení kolejnicových pásu jednotlivých úseků. Stejné členění je využito i ve výpočtu. Trať se pro výpočet zadává již ve zmenšeném měřítku 1:3,5.

3.1.1. Příklad zadání tratě

```
! Horizontální část (poloměry v metrech)
   H    STR     15                        'Přímý úsek'
   H    CLO      5     0    57            'Vstupní klotoida'
   H    CIR    100    57                  'Oblouk'
   H    CLO      5    57    0             'Výstupní klotoida'
   H    STR     15                        'Přímý úsek'

! Vertikální část (sklon v promile)
   V    CSL     15     5                  'Konstantní sklon'
   V    PL2      5     5    0             'Změna sklonu'
   V    CSL    100     0                  'Konstantní sklon'
   V    PL2      5     0   -5             'Změna sklonu'
   V    CSL     15    -5                  'Konstantní sklon'

! Část převýšení (převýšení v metrech)
   S    CST     15     0                  'Konstantní převýšení'
   S    LIR      5     0     0.02         'Změna převýšení'
   S    CST    100     0.02               'Konstantní převýšení'
   S    LIR      5     0.02  0            'Změna převýšení'
   S    CST     15     0                  'Konstantní převýšení'

! Změna rozchodu (změna v milimetrech)
   U    CON     15     0                  'Bez změny rozchodu'
   U    LIN      5     0    3             'Změna rozchodu'
   U    CON    100     3                  'Konstantní rozšíření'
   U    LIN      5     3    0             'Změna rozchodu'
   U    CON     15     0                  'Bez změny rozchodu'
```

Tabulka 3.1 – Příklad zadání trati

Pro zadání trati jsou důležité řádky označené písmenem H – Horizontální část, V – Vertikální část, S – Část převýšení a U – Část změny rozchodu. Toto písmeno se musí nacházet na 4. místě v řádku. Na 9 až 11 místě v řádku je trojmístné označení úseku. Velikost ostatních mezer není důležitá. Kromě 4. a 5. sloupce ve Vertikální části, kde je

sklon v promile [‰], a v Části změny rozchodu, kde je změna rozchodu v milimetrech $[mm]$ je vše zadáváno v metrech $[m]$. Druhý sloupec říká, o jaký jde typ úseku, viz Tabulka 3.2. Třetí sloupec určuje délku úseku. Počet úseků v jednotlivých částech může být rozdílný, ale součet délek všech úseků musí být shodný. Ve čtvrtém sloupci je hodnota poloměru, sklonu, převýšení nebo změny rozchodu. Pro přímý úsek se nemusí vyplňovat poloměr. Pokud se v průběhu úseku parametr mění, jde o hodnotu na počátku úseku. V pátém sloupci je hodnota parametru na konci úseku. Pro úseky s konstantními parametry se nevyplňuje. Veškerý text okolo tabulky zadání (prvních pět sloupců řádků s písmeny H, V, S, U) včetně popisků úseků skript nenačte.

Část	Označení v tabulce	Význam	Označení v programu
Horizontální	STR	Přímý úsek	1
	CIR	Oblouk	2
	CLO	Přechodnice	3
Vertikální	CSL	Konstantní sklon	1
	PL2	Lineární změna sklonu	2
Převýšení	CST	Konstantní převýšení	1
	LIR	Lineární změna převýšení	2
Změny rozchodu	CON	Konstantní rozchod	1
	LIN	Lineární změna rozchodu	2

Tabulka 3.2 – Vysvětlivka značení

3.2. Popis tratě

3.2.1. Horizontální část

Na základě zvoleného kroku výpočtu si jednotlivé úseky rozdělíme na určitý počet bodů podle jejich délky a ke každému bodu přiřadíme hodnotu jednotlivých parametrů, odpovídající konkrétnímu bodu. Protože rovný úsek má poloměr v nekonečnu, volíme pro popis místo poloměru křivost, pro kterou platí vztah

$$k = \frac{1}{R} \tag{3.1}$$

Tím získáme spojitý popis zakřivení trati. Křivost přímého úseku je 0. Na přechodnici se křivost lineárně mění od 0 do konečné hodnoty a pro hodnotu v určité vzdálenosti od počátku přechodnice platí vztah

$$k = \frac{L}{L_K} * k_K \tag{3.2}$$

kde L_K je délka celé přechodnice, L je vzdálenost bodu, v němž nás zajímá křivost, od počátku přechodnice a k_K je křivost oblouku na konci přechodnice. V oblouku je křivost dle rovnice (3.1) a pomocí znaménka mínus rozlišujeme smysl oblouku. Levotočivý oblouk je popsán kladnými hodnotami a pravotočivý zápornými hodnotami.

Každému bodu trati je také přiřazena hodnota změny rozchodu, která se načte ze zadávacího souboru.

3.2.2. Vertikální část

Z vertikální části popisu trati určíme převýšení ve směru koleje v metrech vzhledem k počátku. Nejprve každému bodu trati přiřadíme sklon. V úsecích se změnou sklonu se sklon lineárně mění z počáteční hodnoty na začátku úseku do koncové hodnoty na konci úseku. Z toho můžeme určit převýšení mezi dvěma sousedními body trati a celkové převýšení určit přičtením k hodnotě předchozího bodu. Tomu odpovídá vztah

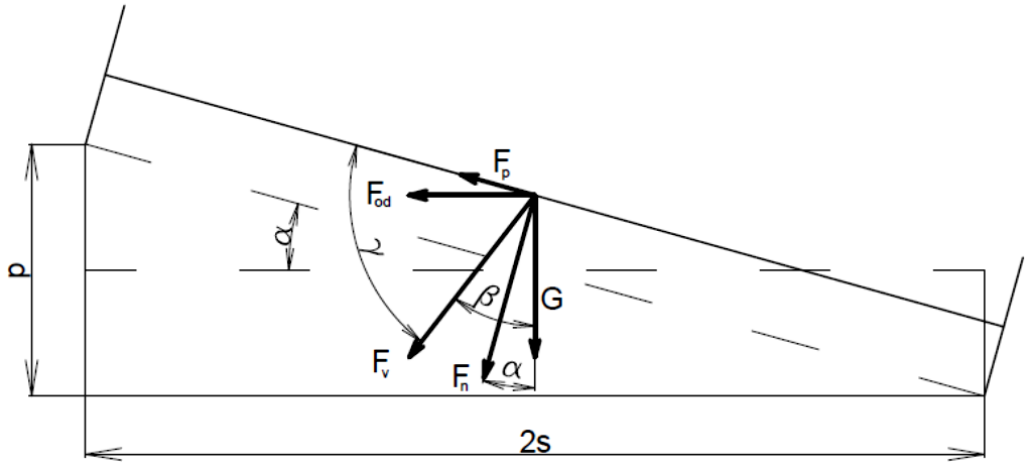
$$ZV_i = ZV_{i-1} + \frac{d * s}{1000} \tag{3.3}$$

Kde ZV_i, resp. ZV_{i-1} je převýšení daného, resp. předchozího bodu trati vzhledem k počátku, d je vzdálenost mezi sousedními body trati (krok výpočtu) a s je sklon v ‰.

3.2.3. Část převýšení

V této části je definováno vzájemné převýšení kolejnicových pásů, které se využívá v obloucích pro kompenzaci odstředivých sil. V přímém úseku je obvykle nulové a na přechodnici se postupně mění až do hodnoty v oblouku. V našem případě budeme uvažovat situaci, kdy vnější kolejnicový pás oblouku se zvedne o polovinu převýšení a vnitřní poklesne o polovinu převýšení.

Reálnou trať však může souprava projíždět různou rychlostí, a proto není odstředivá síla vždy kompenzována ideálně a na podvozek může působit příčná síla (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 – Situace v oblouku s převýšením

Odstředivá síla se spočítá dle vztahu

$$F_{od} = m * \frac{v^2}{R} \tag{3.4}$$

a tíhová síla

$$G = m * g \tag{3.5}$$

výsledná síla potom bude

$$F_V = \sqrt{F_{od}^2 + G^2} = \sqrt{\left(m * \frac{v^2}{R}\right)^2 + (m * g)^2} = m * \sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2} \tag{3.6}$$

Úhel α se spočítá podle

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{p}{2s}\right) \tag{3.7}$$

kde p je převýšení kolejnicových pásů a$2s$ rozchod, úhel β

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{F_{od}}{G}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{m * v^2}{m * g * R}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{v^2}{g * R}\right) \tag{3.8}$$

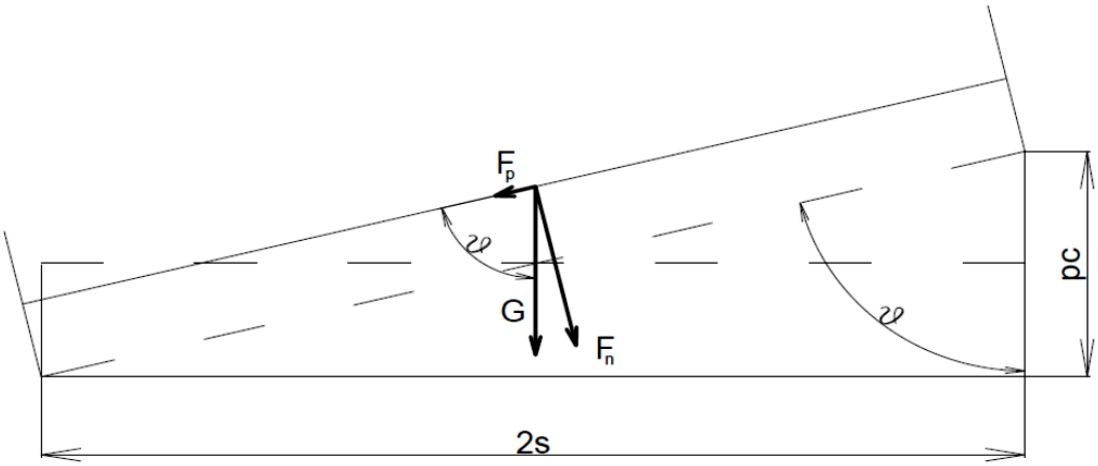
a úhel γ

$$\gamma = \alpha - \beta + \frac{\pi}{2} \tag{3.9}$$

Nevykompenzovaná příčná síla F_p se potom spočítá

$$F_p = F_v * \cos(\gamma) = m * \sqrt{\frac{v^4}{R^2} + g^2} * \cos(\gamma) \tag{3.10}$$

Abychom mohli tento stav nasimulovat na zkušebním stavu, je potřeba skutečné převýšení kolejnicových pásů pozměnit tak, aby se jeho tíha rozložila na normálovou složku F_n a příčnou složku F_p (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 – Korigované převýšení

Úhel υ určíme jako

$$\upsilon = \mathrm{acos}\left(\frac{\mathrm{F_p}}{\mathrm{G}}\right) \tag{3.11}$$

po dosazení a úpravě dostaneme

$$\upsilon = \mathrm{acos}\left(\frac{\sqrt{\frac{\upsilon^4}{R^2} + g^2} * cos(\gamma)}{g}\right) \tag{3.12}$$

Potom můžeme spočítat korigované převýšení

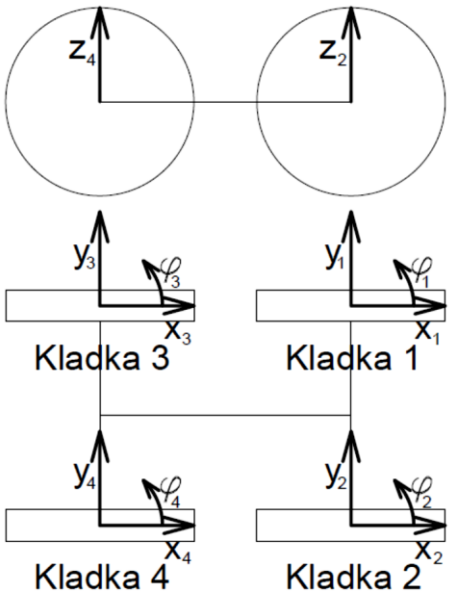
$$pc = -2s * \cot(\upsilon) \tag{3.13}$$

U rozchodu $2s$ je mínus, protože korigované převýšení kolejnicových pásů, jak je patrné z obrázků (Obr. 3.1) a (Obr. 3.2), je na opačnou stranu než převýšení skutečné.

4. TRANSFORMACE SOUŘADNIC NA POHYB KLADEK

4.1. Souřadnicový systém kladek

Pro popis pohybů kladek byly zvoleny souřadnicové systémy a označení, tak jak je vidět na obrázku (Obr. 4.1).



Obr. 4.1 – Zavedení souřadnicových systémů

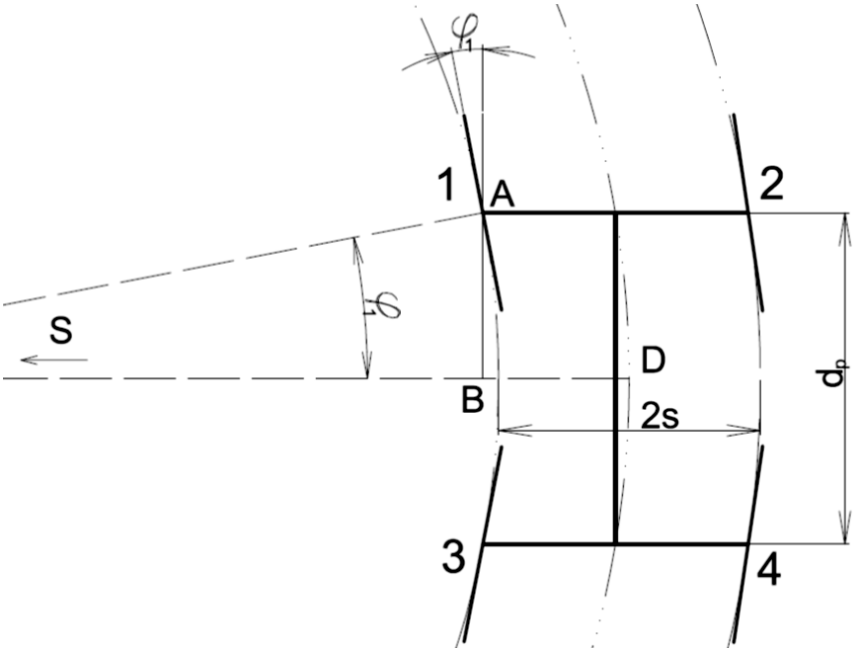
4.2. Natočení kladek

Při výpočtu natočení kladek budeme vycházet z následujících předpokladů:

a) V přímém úseku je natočení nulové, $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 0$.
b) Na přechodnici se lineárně mění natočení kladek od nuly až do hodnoty v oblouku.

Na základě těchto předpokladů stačí určit natočení kladek v obloucích.

Na obrázku (Obr. 4.2) jsou kladky natočeny tak, aby to odpovídalo průjezdu podvozku levotočivým obloukem. Poloha podvozku na trati je určena jeho středem, bod D. Pro určení natočení kladky 1 vyjdeme z trojúhelníku ABS, kde bod S je střed oblouku.



Obr. 4.2 – Natočení kladek v oblouku

Pro úhel natočení φ_1 platí

$$\sin(\varphi_1) = \frac{\overline{AB}}{\overline{AS}} \tag{4.1}$$

Velikost úsečky AB je rovna polovině rozvoru podvozku d_p a úsečky AS

$$\overline{AS} = R - \frac{2s}{2} \tag{4.2}$$

Dosazením těchto dvou vztahů do rovnice (4.1) a vyjádřením $\varphi_1$dostaneme výsledný vztah pro natočení kladky 1 v oblouku

$$\varphi_1 = \operatorname{asin}\left(\frac{d_p}{2R - 2s}\right) \tag{4.3}$$

Obdobně pro natočení kladky 3

$$\varphi_2 = \operatorname{asin}\left(\frac{d_p}{2R + 2s}\right) \tag{4.4}$$

Z obrázku je zřejmé, že natočení kladky 3 je stejné jako kladky 1 pouze s opačným znamínkem a kladky 4 jako kladky 2

$$\varphi_3 = -\varphi_1 \quad \varphi_4 = -\varphi_2 \tag{4.5}$$

Pro pravotočivý oblouk dostaneme stejným způsobem následující vztahy. Pro kladku 1 bude platit

$$\varphi_1 = -\operatorname{asin}\left(\frac{d_p}{2R + 2s}\right) = \operatorname{asin}\left(-\frac{d_p}{2R + 2s}\right) \tag{4.6}$$

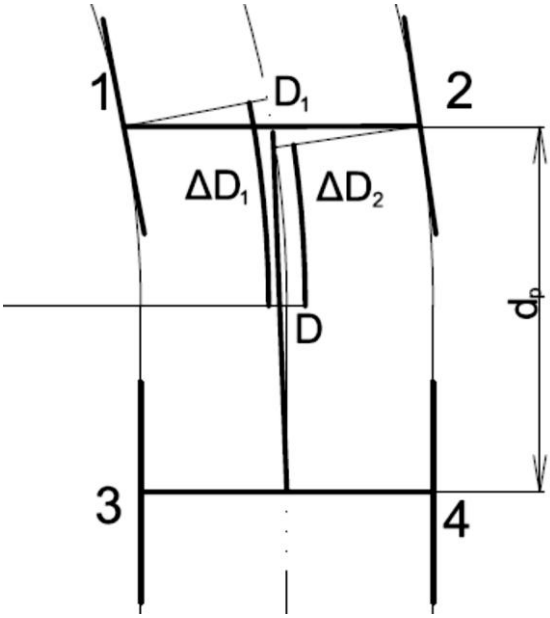
a pro kladku 2

$$\varphi_1 = -\operatorname{asin}\left(\frac{d_p}{2R - 2s}\right) = \operatorname{asin}\left(-\frac{d_p}{2R - 2s}\right) \tag{4.7}$$

Mínus se zde objevuje, protože natočení kladek je na opačnou stranu a podle zavedeného souřadnicového systému jde o záporný úhel. Pro kladky 3 a 4 opět platí vztahy (4.5). Porovnáním vztahů pro natočení kladky 1 pro levotočivý a pravotočivý oblouk zjistíme, že pokud mínus před zlomkem dáme do jmenovatele, liší se vztahy pouze znaménkem u poloměru oblouku. Protože máme znaménkem mínus odlišen pravotočivý oblouk od levotočivého již ze zadání trati, platí vztahy (4.3) a (4.4) pro oba oblouky.

4.3. Posunutí kladek vůči středu

Při výpočtu natočení kladek jsme vše stahovali ke středu podvozku. Jak je patrné i z obrázku (Obr. 4.3), kde pro názornost přechází přímý úsek do malého oblouku bez přechodnice, kladky 1 a 2 se do daného místa dostanou o něco dřív než střed podvozku a kladky 3 a 4 později. Protože vztahujeme polohu podvozku na trati vzhledem k jeho středu, musíme provést předsunutí kladek 1 a 2 oproti středu a zpoždění kladek 3 a 4.



Obr. 4.3 – Nájezd do oblouku

V přímém úseku vychází posunutí kladek pouze z rozměrů podvozku. Pokud tedy je podvozek ve vzdálenosti D od počátku tratě, jsou kladky 1 a 2 o polovinu rozvoru dál od počátku a kladky 3 a 4 o polovinu rozvoru blíže počátku.

V oblouku uvažujeme osu x_1 kladky jako tečnu k oblouku v bodě D_1, který je od středu podvozku napřed o

$$\Delta D_1 = R * \varphi_1 \tag{4.8}$$

Obdobně pro ostatní kladky.

Je tedy jiné posunutí každé kladky v oblouku a v přímém úseku. Posunutí závisí na natočení kladek. To se mění na přechodnici, a proto se musí posunutí měnit také na přechodnici. Ve skriptu je tato změna zahrnuta, ale protože jsou rozměry podvozku výrazně menší než poloměry oblouků je rozdíl mezi posunutím v oblouku a v přímém úseku minimální a lze také uvažovat posunutí po celou dobu konstantní[1].

4.4. Polohy kladek v osách x, y, z

Nyní víme, v kterém bodě trati se kladka nachází pro libovolnou vzdálenost podvozku od počátku. Můžeme tedy určit polohu jednotlivých kladek v závislosti na dráze.

[1] Například pro rozvor podvozku 1 m a poloměr oblouku 200 m je kladka 1 v přímém úseku posunuta o 0.5 m a v oblouku by měla být posunuta o 0.502 m. S krokem výpočtu o délce 0.1 m bude tato hodnota zaokrouhlena na 0.5, protože se lze posunout pouze o celý krok.

V ose z se bude realizovat pohyb kladek vyvolaný sklonem trati a převýšením kolejnicových pásů. Pro simulaci převýšení se souřadnice z kladky určí

$$Z = \pm\frac{p}{2} \tag{4.9}$$

kde p je převýšení kolejnicových pásů, $\frac{1}{2}$ je zde z důvodu rozdělení převýšení mezi jednotlivé pásy a $\pm$ zda jde o levotočivý nebo pravotočivý oblouk. Obdobným způsobem se určí souřadnice z pro korigované převýšení

$$Zc = \pm\frac{pc}{2} \tag{4.10}$$

Pro simulaci sklonu trati se budou pohybovat pouze kladky 1 a 2. Polohu pro každý moment určíme z jednoduchých vztahů

$$Z_1 = ZV_1 - ZV_3 \qquad Z_2 = ZV_2 - ZV_4 \tag{4.11}$$

kde ZV_i je výška trati v bodě kladky podle vztahu (3.3). Konečné souřadnice z kladek tedy budou

$$\begin{aligned} Z_1 &= \pm\frac{p}{2} + ZV_1 - ZV_3 & Z_2 &= \pm\frac{p}{2} + ZV_2 - ZV_4 \\ Z_3 &= \pm\frac{p}{2} & Z_4 &= \pm\frac{p}{2} \end{aligned} \tag{4.12}$$

V ose y se bude realizovat rozšíření trati. Změnu rozchodu rozdělíme na oba kolejnicové pásy a se zavedenými souřadnicovými pásy budou platit rovnice

$$\begin{aligned} Y_1 &= \frac{\Delta u}{2} & Y_2 &= -\frac{\Delta u}{2} \\ Y_3 &= \frac{\Delta u}{2} & Y_4 &= -\frac{\Delta u}{2} \end{aligned} \tag{4.13}$$

V ose x se žádný předepsaný pohyb nerealizuje.

4.5. Rychlostní profil

Pro zadání rychlostního profilu podvozku jsme zvolili obdobný formát jako u zadání trati. Pro jednoduché spojení trati a rychlostního profilu je tento zadáván v závislosti na dráze pomocí dvou úseků. Úsek, kdy je rychlost konstantní (CON) a úsek s lineární změnou rychlosti (LIN). Pravidla formátu jsou obdobná jak v 3.1.1. Na 4 místě v řádku musí být velké písmeno S, na 9 až 11 označení úseku. Dále velikost mezer není určena. Třetí sloupec opět udává délku úseku v metrech. Čtvrtý a pátý sloupec udává rychlost v úseku v metrech za sekundu, resp. na začátku a konci úseku. Rychlostní profil se zadává opět již přepočtený do měřítka stavu 1:3,5.

```
! Rychlostní profil (rychlost v metrech za sekundu)
   S    LIN     15     5    2
   S    CON    110     2
   S    LIN     15     2    5
```

Tabulka 4.1 – Zadání rychlostního profilu

Při dodržení stejného kroku výpočtu můžeme každému bodu trati přiřadit konkrétní rychlost a následně vypočítat i dobu, za kterou podvozek do daného místa dojede, podle vzorce

$$T_i = T_{i-1} + \frac{V_i - V_{i-1}}{d} \tag{4.14}$$

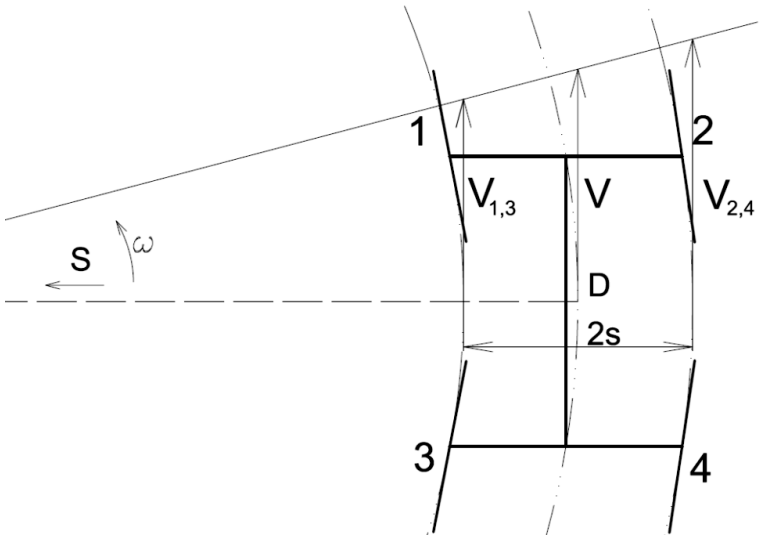
kde T_i, T_{i-1} je čas v aktuálním a předchozím bodu trati a V_i, V_{i-1} rychlost v aktuálním a předchozím bodu trati.

4.6. Otáčky kladek

Nyní, když známe rychlostní profil, můžeme spočítat otáčky kladek. V rovném úseku je rychlost všech kladek stejná a závisí pouze na rychlosti V v daném bodě

$$n = \frac{30\omega}{\pi} = \frac{30}{\pi} * \frac{2V}{d_k} = \frac{60V}{\pi * d_k} \tag{4.15}$$

kde d_k je průměr kladky.



Obr. 4.4 – Určení rychlosti kladek v oblouku

Situace v oblouku je znázorněna na obrázku (Obr. 4.4). Zadaná rychlost V je tečná k ose koleje a rychlost kladek závisí i na poloměru oblouku. Nejprve určíme úhlovou rychlost podvozku v oblouku vzhledem k pólu pohybu (středu oblouku)

$$\omega = \frac{V}{R} \tag{4.16}$$

Následně můžeme vypočítat tečnou rychlost v místě jednotlivých kladek, protože v oblouku je poloměr konstantní nemusíme uvažovat posunutí vůči středu a pro vnitřní kladky (v případě znázorněném na obrázku kladky 1 a 3) platí

$$V_{1,3} = \omega * (R - 2s) \tag{4.17}$$

a pro vnější kladky (2 a 4)

$$V_{2,4} = \omega * (R + 2s) \tag{4.18}$$

V případě pravotočivého oblouku vyjdou vztahy obdobně. Protože máme pravotočivý a levotočivý oblouk rozlišen znamínkem mínus můžeme pro vztahy (4.17) a (4.18) zobecnit pro kladky 1 a 3 na

$$V_{1,3} = |\omega * (R - 2s)| \tag{4.19}$$

A pro kladky 2 a 4 na

$$V_{2,4} = |\omega * (R + 2s)| \tag{4.20}$$

Rychlosti spočítané pomocí těchto vztahů dosadíme do (4.15) a spočítáme otáčky.

Ve vztazích (4.19) a (4.20) R označuje poloměr oblouku v místě středu podvozku.

V případě jízdy přechodnicí se poloměr zakřivení koleje mění, a tudíž je v místě nápravy jiný poloměr oblouku než v místě středu podvozku. Tato odchylka je velmi malá a ve výpočtu není uvažována.

5. SKRIPT

Vztahy uvedené v kapitolách 3 a 4 jsou součástí výpočetního skriptu s názvem „Vypocet_trati.m“, který pro zadanou trať vypočítá požadované pohyby kladek.

5.1. Ovládání a struktura skriptu

Skript musí být vložen do stejné složky s tratí a rychlostním profilem, které chceme načíst. Výpočet se realizuje pouze pomocí souboru s názvem „Vypocet_trati.m“. Po otevření skriptu v editoru MATLABu je možné upravit základní a pro různé trati obvykle neměnné parametry. Tyto parametry se nachází na prvních řádcích skriptu a jsou to: velikost kroku výpočtu, rozchod koleje, rozvor podvozku, vzdálenost míst dotyku kladek a kol a průměr kladek. Další části skriptu jsou pojmenovány podle toho, co dělají (např. přiřazení změny rozchodu ke každému bodu trati). Pro lepší orientaci jsou zde i další popisky.

Po spuštění skriptu se otevře dialogové okno pro vybrání a načtení popisu trati. Po načtení trati se otevře další dialogové okno pro načtení rychlostního profilu. Dále probíhá výpočet bez potřeby dalších vstupů. Po ukončení výpočtu se vykreslí závislosti žádaných parametrů v závislosti na dráze a na čase v šesti samostatných oknech v tomto pořadí:

1) Vykreslení trati v rovině xy
2) Natočení kladek
3) Otáčky kladek
4) Posunutí v osách z kladek bez korekce pro příčnou sílu
5) Posunutí v osách z kladek s korekcí pro příčnou sílu
6) Posunutí v osách y kladek změnou rozchodu

Všechny vypočítané hodnoty jsou stejně velké řádkové vektory. Jsou v hlavním okně MATLABu v seznamu proměnných. Vstupní data jsou označena následovně:

1) Vzdálenost bodu trati od počátku D
2) Křivost v daném bodě R
3) Změna rozchodu DU
4) Převýšení trati vzhledem k počátku ZV
5) Převýšení kolejnicových pásů ZS
6) Rychlost V

Výstupní data mají značení následující:

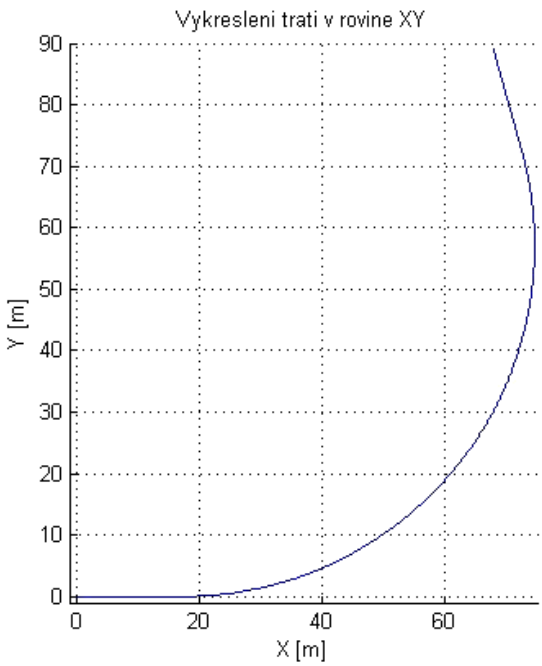
1) Čas T
2) Natočení kladek $FI1,\ FI2,\ FI3,\ FI4$
3) Otáčky kladek $N1,\ N2,\ N3,\ N4$
4) Posunutí kladek v ose z bez korekce pro příčnou sílu $Z1,\ Z2,\ Z3,\ Z4$
5) Posunutí kladek v ose z s korekcí pro příčnou sílu $Zcor1,\ Zcor2,\ Zcor3,\ Zcor4$
6) Posunutí kladek v ose y změnou rozchodu $Y1,\ Y2,\ Y3,\ Y4$

Vektory všech dat jsou stejně velké a jednomu bodu trati odpovídá jeden společný index pro všechny vektory.

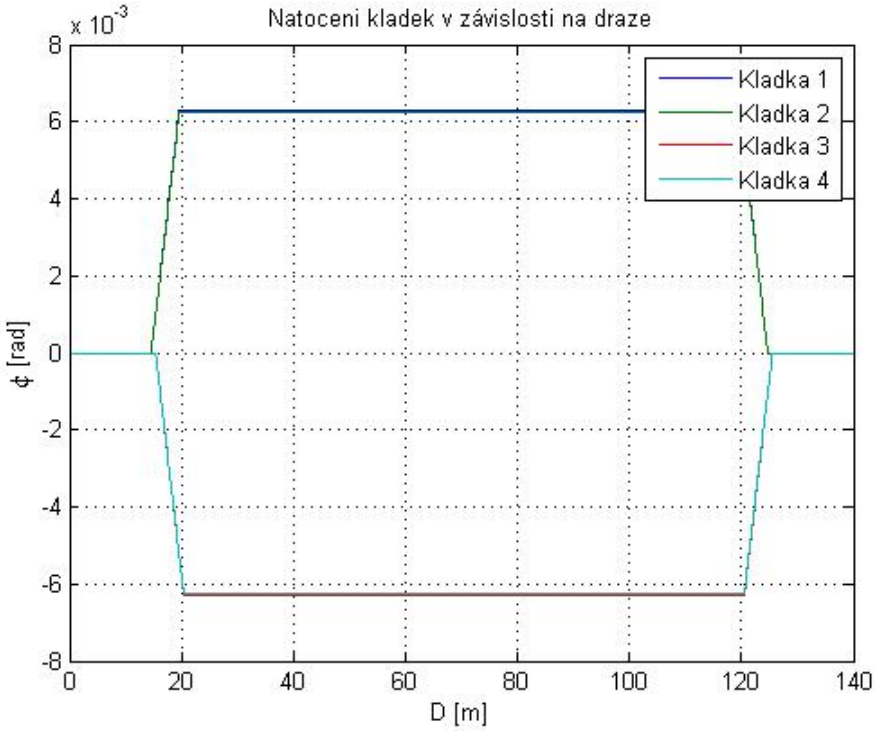
Na závěr je nabídnuta možnost uložit vypočtené hodnoty. Do souboru s koncovkou .mat se uloží data jako výše zmíněné vektory jednotlivých vstupních a výstupních parametrů pro každý bod trati. Soubor je se zadaným názvem uložen do složky se skriptem.

5.2. Ukázka výstupů programu

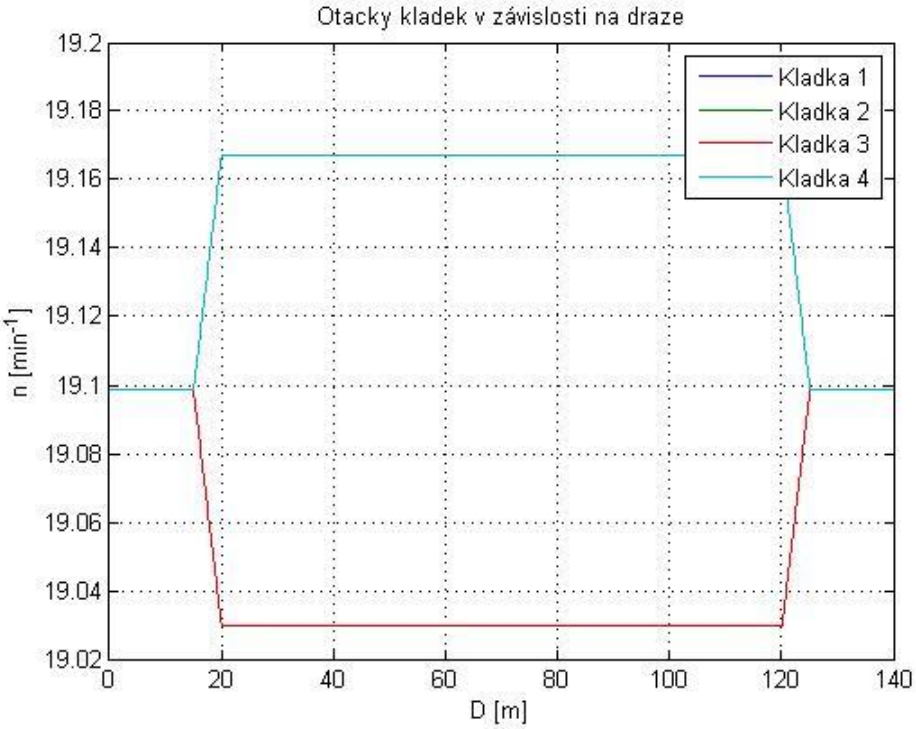
Následující grafy jsou pro trať (Příloha P1). To je přímý úsek, přechodnice, oblouk, přechodnice, přímý úsek. Trať je vodorovná, bez převýšení v oblouku a bez změny rozchodu. Rychlost je po celou dobu konstantní.



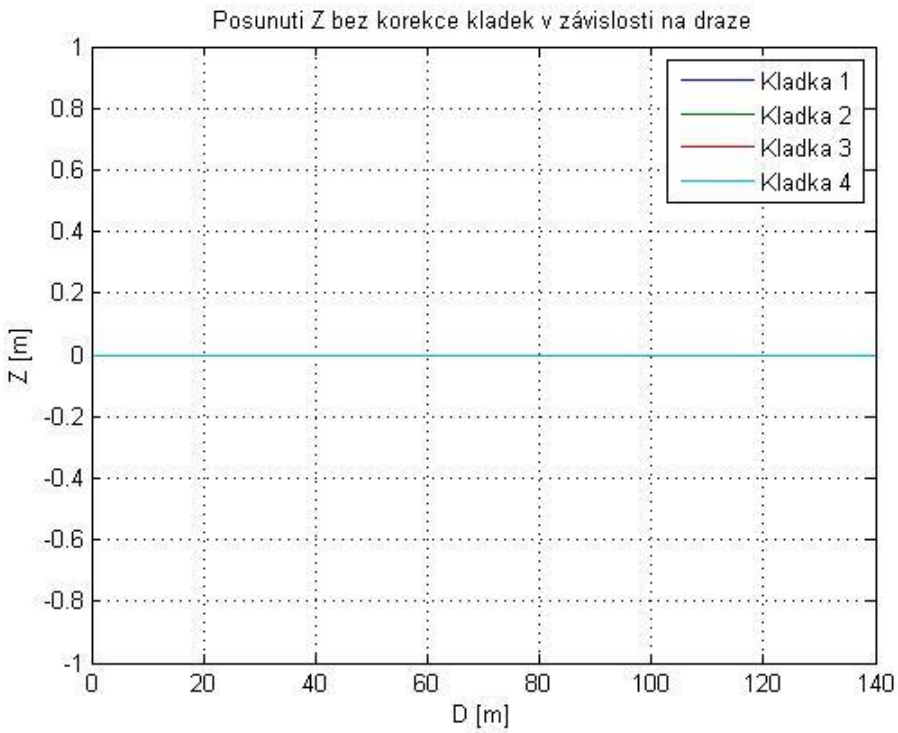
Obr. 5.1 – Vykreslení trati do souřadnicového systému



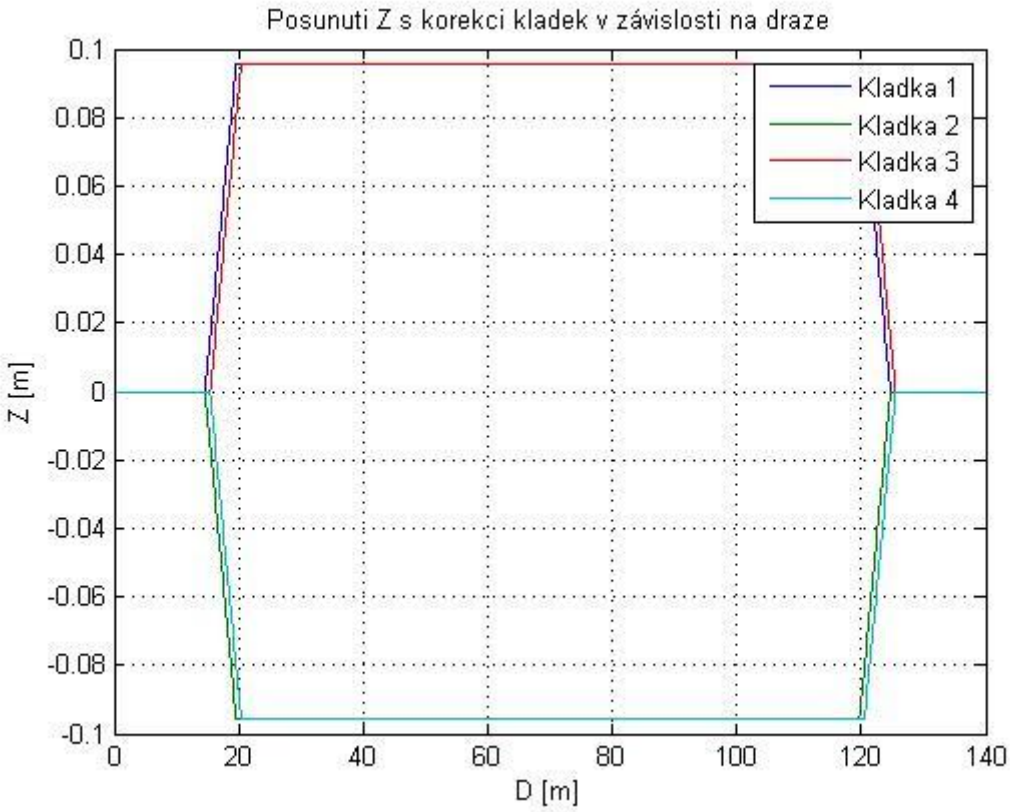
Obr. 5.2 – Natočení kladek v závislosti na dráze



Obr. 5.3 – Otáčky kladek v závislosti na dráze.

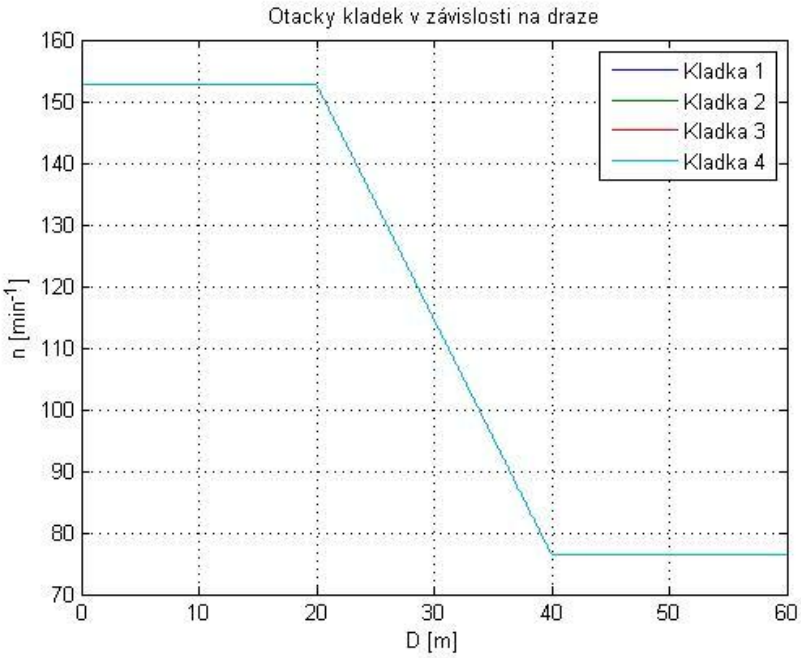


Obr. 5.4 – Posuny kladek v ose z způsobené převýšením kolejnicových pásů v oblouku trati

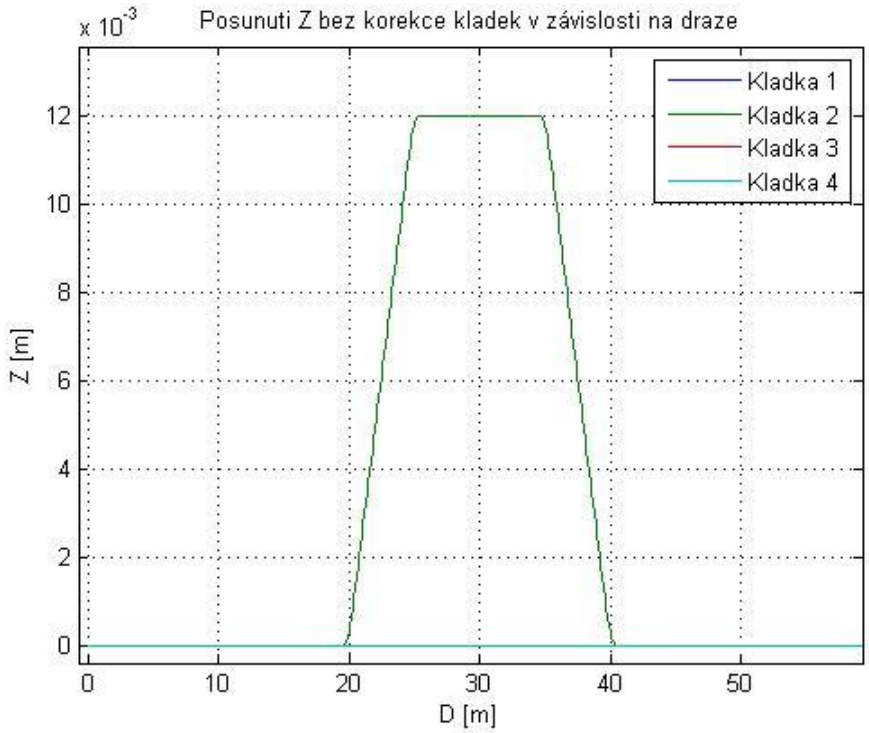


Obr. 5.5 – Posuny kladek v ose z způsobené korigovaným převýšením pro vyvolání příčného zatížení

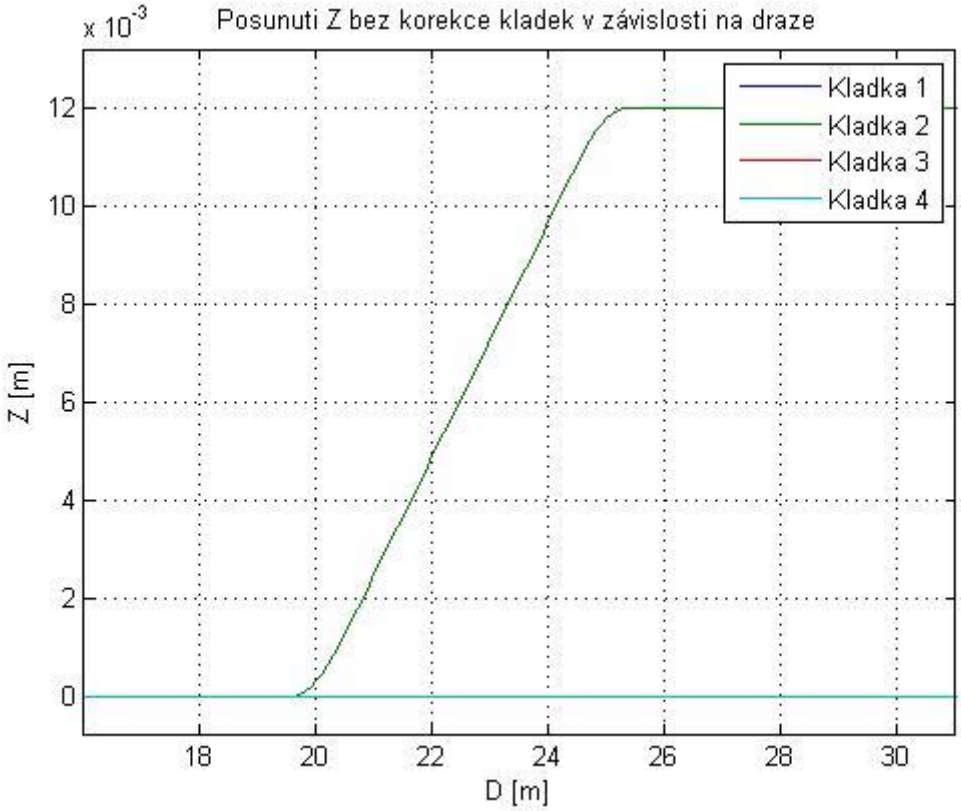
Následující závislosti jsou pro trať z přílohy (Příloha P2). Jde o jediný přímý úsek. Trať je vodorovná, poté začne stoupat se sklonem 15 ‰ a poté je opět vodorovná. Rychlost je nejdříve konstantní, poté klesá a v závěru je opět konstantní.



Obr. 5.6 – Závislost otáček na dráze pro rychlostní profil se změnou rychlosti



Obr. 5.7 – Posun kladek ve směru osy z pro změnu převýšení



Obr. 5.8 – Přiblížení změny sklonu trati z Obr. 5.7

6. ZÁVĚR

Podařilo se popsat trať z geometrického hlediska v souladu s normami pro železniční a tramvajové tratě. Dále se podařilo tento popis transformovat na pohyby kladek a nyní dokážeme pro libovolnou trať a rychlostní profil určit v každém bodě a čase polohu, rychlost a zrychlení jednotlivých kladek tak, aby simulace na kladkovém stavu odpovídala jízdě vozidla po této trati. Všechny výstupní veličiny lze po provedení výpočtu uložit a dále s nimi pracovat, např. je použít k řízení simulace na kladkovém stavu.

V další práci je možné zkoumat vlastnosti nerovností a nepřesností reálné tratě a tyto nepřesnosti implementovat do výpočtu souřadnic kladek.

7. ZDROJE

[1] ČSN 73 6360-1. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha.*ICS: 45.080, Říjen 2008. Český normalizační institut.

[2] ČSN 73 6412. *Geometrické uspořádání koleje tramvajových tratí.* MDT: 625.143:625.4, Červen 1995. Český normalizační institut.

[3] KOLÁŘ, Josef. *Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009. 276 s. ISBN 978-80-01-04262-5.

[4] *MATLAB Documentation* [online]. The Mathworks, Inc. Dostupné z: http://www.mathworks.com/help/index.html

8. PŘÍLOHY

8.1. Příloha P1 – Zadání trati „Trať 1“

```
! Horizontální část (poloměry v metrech)
   H    STR    15                          'Přímý úsek'
   H    CLO    5       0    57             'Vstupní klotoida'
   H    CIR    100     57                  'Oblouk'
   H    CLO    5       57    0             'Výstupní klotoida'
   H    STR    15                          'Přímý úsek'

! Vertikální část (sklon v promile)
   V    CSL    140     0                   'Konstantní sklon'

! Část převýšení (převýšení v metrech)
   S    CST    140     0                   'Bez převýšení'

! Změna rozchodu (změna v milimetrech)
   U    CON    140     0                   'Bez změny rozchodu'
```

8.1 – Zadání trati „Trati 1“

```
! Rychlostní profil (rychlost v metrech za sekundu)
   S    CON    140    0.5
```

8.2 – Rychlostní profil „Rychlost 1“

8.2. Příloha P2 – Zadání trati „Trať 2“

```
! Horizontální část (poloměry v metrech)
   H    STR    60                          'Přímý úsek'

! Vertikální část (sklon v promile)
   V    CSL    20     0                    'Konstantní sklon'
   V    PL2    5      0   15               'Změna sklonu'
   V    CSL    10    15                    'Konstantní sklon'
   V    PL2    5     15    0               'Změna sklonu'
   V    CSL    20     0                    'Konstantní sklon'

! Část převýšení (převýšení v metrech)
   S    CST    60     0                    'Bez převýšení'

! Změna rozchodu (změna v milimetrech)
   U    CON    60     0                   'Bez změny rozchodu'
```

8.3 – Zadání trati „Trať 2“

```
! Rychlostní profil (rychlost v metrech za sekundu)
   S    CON    20    4
   S    LIN    20    4     2
   S    CON    20    2
```

8.4 – Rychlostní profil „Rychlost 2“