

Dr. Ing. Pavel Polach  
Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.  
Tylova 1581/46  
301 00 Plzeň

**R e c e n z n í p o s u d e k**  
diplomové práce

**Interpolation of suspension kinematics for the purpose of vehicle dynamics  
simulation**

(Modelování kinematiky odpružení automobilů s využitím interpolace)

Student: Bc. Václav Houdek

Vedoucí diplomové práce: Ing. Luboš Smolík, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: doc. Ing. Michal Hajžman, Ph.D., Prof. Olivier Verlinden  
(University of Mons, Belgie)

Předložená diplomová práce je zaměřena na snížení výpočetního času při řešení kinematiky v multibody soustavách, a to zavedením interpolace kinematiky. Konkrétní příklady jsou zaměřeny na snížení výpočetního času při simulacích s různými druhy vypružení automobilů. Jsou interpolovány vybrané parametry polohy vypružení. Práce je psána v anglickém jazyce, je rozčleněna do šesti kapitol (včetně úvodu a závěru), obsahuje tři přílohy.

V kapitole „1 Úvod“ je stručně uvedeno seznámení s názvoslovím a účelem multibody dynamiky. Je uveden přehled současného stavu výpočetních přístupů se zaměřením na zohlednění kinematiky modelovaných objektů a na přístupy k jejich matematickému řešení. V této kapitole je uveden hlavní cíl práce, kterým je výzkum v oblasti řešení kinematiky vypružení automobilů, řešení (interpolace) kinematiky vypružení, implementace navržených metod do výpočetních programů a jejich aplikace na reálné vozidlo. Ke splnění tohoto cíle bylo stanoveno pět zásad pro vypracování diplomové práce:

1. Standardní přístupy pro řešení úloh kinematiky náprav.
2. Řešení úlohy kinematiky zavěšení.
3. Stanovení polohy a orientace čepu nápravy s využitím interpolace.
4. Počítačová implementace navržených postupů.
5. Aplikace na reálné vozidlo a doporučení pro další použití.

V kapitole „2 Analýza kinematiky vypružení“ je řešena kinematika typických konstrukčních řešení vypružení přední a zadní nápravy automobilů. Vypružení je modelováno klasickým přístupem multibody dynamiky: pomocí soustavy těles spojených klouby. Kinematická analýza je provedena s využitím systému MATLAB a je provedeno zhodnocení dosažených výsledků.

Kapitola „3 Interpolace kinematiky“ je stěžejní částí diplomové práce. Na základě volby jednoho parametru polohy odvozeny vztahy pro interpolaci kinematiky (při splnění určitých předpokladů). Pro interpolaci jsou využity kubické Hermitovy polynomy. Interpolace je využita pro výpočet posuvů, rotací a jejich derivací. Uvedené příklady se týkají simulací s různými druhy vypružení automobilů. Je provedena analýza výpočetních chyb způsobených zavedením interpolace (vzhledem k přesně vypočítaným hodnotám z předchozí kapitoly).

V kapitole „4 Implementace interpolace kinematiky do softwaru EasyDyn“ je proveden převod výpočetního programu z předchozí kapitoly naprogramovaného v systému MATLAB do programovacího jazyka C++, na němž je založen software EasyDyn (vyvíjený v Univerzitě Mons). Software EasyDyn je založen na řešení diferenciálních rovnic prvního a druhého řádu, tzn. na jiných principech než interpolace kinematiky v předchozí kapitole. V závěru kapitoly jsou dosažené výsledky při využití systému MATLAB a softwaru EasyDyn porovnány.

V kapitole „5 Verifikace modelu vytvořeného v softwaru EasyDyn a aplikace na reálném příkladu“ jsou uvedeny 2 příklady simulací se závěsem kol automobilu vytvořeném na Západočeské univerzitě v Plzni v rámci studentské soutěže „Formula SAE“. Verifikace navržené metody interpolace kinematiky je provedena při uvažování gravitační síly porovnáním výsledků simulací s modely ve třech výpočetních prostředích: model implementovaný do systému MATLAB, model implementovaný do softwaru EasyDyn a model vytvořený v komerčním softwaru ANSYS Mechanical. Ve druhém příkladu je uvažováno působení vlivu vnějších sil (od pružiny a tlumiče) a simulace jsou provedeny se dvěma modely (v softwaru EasyDyn a v softwaru ANSYS Mechanical). V závěru kapitoly jsou dosažené výsledky analyzovány.

Kapitola „6 Závěr“ stručně shrnuje obsah diplomové práce, přístup k interpolaci kinematiky, výsledky dosažené při simulacích s různými druhy vypružení automobilů, výsledky v oblasti rozdílných možností k modelování v systému MATLAB a v softwaru EasyDyn a poznatky z výsledků dosažených při simulacích se zavěšením náprav reálného vozidla „Formula SAE“. Je uveden výhled dalšího rozvoje témat řešených v rámci diplomové práce.

Na základě obsahu diplomové práce lze konstatovat, že stanovené zásady pro vypracování diplomové práce byly dodrženy a hlavní cíl byl dosažen. Je zřejmé, že se student výborně orientuje v problematice modelování (vázaných) mechanických systémů se zaměřením (nejen) do oblasti dynamiky vozidel.

Teoretické poznatky uplatnil při využití interpolace kinematiky do rychlejších výpočetních přístupů než je klasický přístup multibody dynamiky využívající soustavu těles spojených klouby. Uplatnil své odborné poznatky při programování vědeckého problému v systému MATLAB, osvojil si používání nejen komerčního softwaru ANSYS Mechanical, ale i „univerzitního“ softwaru EasyDyn (vyvíjeného v Univerzitě Mons). Prokázal tím svoji adaptabilitu na různé přístupy k řešení odborných problémů, protože filozofie tvorby výpočetních modelů a přístupů k jejich řešení je v těchto programových prostředcích zcela odlišná.

Následující dvě „sady“ poznámek nemají nijak snižovat hodnotu diplomové práce, ale mají být pouze komentářem pro případnou další odbornou práci studenta.

Poznámky upozorňující:

1. V úvodu anotace diplomové práce je uvedeno: „This thesis aims at the reduction of the computation time during the kinematic solution of multibody systems. Especially during

vehicle simulations, including cornering test, bump test or moose test, only some parameters of the suspension are optimized, and the simulation is repeated many times.“ Druhá věta je zavádějící, protože diplomová práce se ani uvedenými simulacemi ani modelem (celého) vozidla nezabývá.

2. V některých případech je řazení textu v diplomové práci poněkud nepřehledné. Např. na začátku podkapitoly „3.6 Závěry a doporučení“ jsou uvedeny komentáře k obr. 3.28 a 3.29: „Next, we discuss the behaviour of  $e_e$  – the error in translation on the step size (figure 3.28). After some research on the suspensions we find out that the maximum of  $e_e$  depends on the step value with exponential growth (figure 3.29).“. Na konci této podkapitoly je opět komentář k těmto obrázkům: „In the next figures we can see the dependence of value  $e_e$  on the step size and the  $z$  coordinate of the wheel support – figure 3.28 and the maximum value of  $e_e$  on the step value – 3.29.“. Tyto komentáře k obrázkům by měly být sloučeny do jednoho „místa“.
3. V některých případech není uveden význam proměnných/parametrů v rovnicích: např.  $\ddot{F}(\xi)$  v rovnici (2.57), prvky matice  $\mathbf{R}_{0,A}^{i,i+1}$  v rovnicích (3.37) a (3.38) atd.
4. Uvedení některých obrázků se zdá být zbytečné. Např. závislosti uvedené na obr. 2.5 až obr. 2.7 jsou pro čtenáře diplomové práce (bez uvedení alespoň stručného komentáře) nic neříkající.
5. V textu diplomové práce nejsou žádné odkazy na obr. 3.7 až obr. 3.11, obr. 3.14 až obr. 3.18, obr. 21 až obr. 25, obr. 5.1 (spíše se jedná tabulku – viz dále u 4. odrážky formálních připomínek), obr. 5.3 až obr. 5.18 a na tabulky 3.1 a 3.2.
6. V textu diplomové práce nejsou odkazy na literaturu [12] a [22].

Poznámky formální:

1. V rovnici (2.65) má být místo  $\mathbf{J} = (\mathbf{x})$  správně  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ .
2. Na str. 41 má být správně odkaz na „fig. 3.12“ místo na „fig. 3.28“.
3. Na str. 42 chybí v popisu obr. 3.13, že se jedná o „Norm“.
4. Místo popisu „Fig. 5.1“ mělo být spíše použito „Table 5.1“.
5. Odkazy na obrázky nejsou v textu diplomové práce psány jednotně: někdy „figure x.y“, někdy ve zkratce „fig. x.y“. To samé platí pro odkazy na rovnice („equation“ nebo „eq.“).
6. A 2 překlepy na závěr: Na str. 71 u literatury [16] ve třetím řádku má být místo „Faculé“ správně „Faculté“ a na str. 73 na konci má být místo „followng“ správně „following“.

Na studenta mám jeden doplňující dotaz:

1. Bylo by možné provést v jednom výpočtu interpolaci kinematiky pro více parametrů než 1? Pokud ano, za jakých podmínek?

Diplomová práce Bc. Václava Houdka má vysokou úroveň. Kromě prokázaných znalostí z oblasti problematiky vázaných mechanických soustav student prokázal i programátorské

schopnosti ve výpočetním systému MATLAB, softwaru EasyDyn a komerčním softwaru ANSYS Mechanical. Velice pozitivně je nutné hodnotit, že práce byla vytvořena v rámci mezinárodní spolupráce. Je zjevné, že student má výborné schopnosti pro tvůrčí a inovativní práci. Diplomovou práci hodnotím známkou **v ý b o r n ě** a doporučuji ji k obhajobě před komisí pro státní závěrečné zkoušky na Katedře mechaniky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

V Plzni, dne 16. 7. 2020