



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH JÍZDNÍHO SIMULÁTORU

DESIGN OF DRIVING SIMULATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. FILIP KUBEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR PORTEŠ, Dr.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Filip Kubeš

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh jízdního simulátoru

v anglickém jazyce:

Design of driving simulator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro účely simulace jízdy v reálném čase navrhnete jízdní simulátor.

Cíle diplomové práce:

- návrh konstrukce simulátoru
- návrh rozhraní mezi software a hardware
- ověření funkce na jednoduchém simulačním modelu vozidla

Seznam odborné literatury:

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 1-56091-199-9.

REIMPELL, J., STOLL, H., BETZLER, J. W. The Automotive Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0-7506-5054-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Porteš, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 19.11.2013





prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan



ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá návrhom konštrukcie pohyblivého jazdného simulátora pre účely simulácie jazdy v reálnom čase. Vlastnému návrhu predchádza analýza už existujúcich riešení jazdných simulátorov. Dôraz je kladený na ergonómiu jazdca v polohách charakteristických pre športové, osobné a nákladné vozidlo, ďalej variabilitu pohybového systému a súčasne na jednoduchosť konštrukcie. Objektom skúmania je tiež dynamika pohybového systému a je vytvorený výpočtový model pre testovanie optimálneho umiestnenia pohyblivých ramien. Ďalej sa práca venuje návrhu rozhrania medzi hardvérovou a softvérovou časťou s cieľom overiť funkciu ovládacieho zariadenia na jednoduchom simulačnom modeli.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

jazdný simulátor, simulácia, dynamika, pohyb

ABSTRACT

The aim of this thesis is the design of a motion driving simulator for real-time simulation of driving experience. The design takes inspiration from an analysis of existing solutions. An emphasis was put on driver ergonomics in positions typical for a sports car, passenger car and truck, then on variability of motion system and simplicity of the whole design. The dynamics of motion system is also a subject of research. The computational model has been created to test the optimal position of moving arms. Another aim of the study is to create an interface between hardware and software, to confirm the function of the control device using a simple simulation model.

KEYWORDS

driving simulator, simulation, dynamics, motion



BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KUBEŠ, F. *Návrh jízdního simulátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr..



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Petra Porteša, Dr. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 30. mája 2014

.....

Filip Kubeš



POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem svojmu vedúcemu Ing. Petrovi Portešovi Dr. za cenné pripomienky a rady k mojej diplomovej práci. Taktiež by som chcel poďakovať Ing. Pavlovi Kučerovi a Ing. Luborovi Zháňalovi za konzultácie, a za ich ochotu a čas, ktorý mi venovali.



OBSAH

Úvod	11
1 Jazdný simulátor a jeho druhy	12
1.1 Čo je jazdný simulátor	12
1.2 Druhy jazdných simulátorov a ich využitie	12
1.2.1 História a využitie jazdných simulátorov	12
1.2.2 Stacionárne simulátory	16
1.2.3 Pohyblivé simulátory	17
1.2.4 Prehľad konštrukčných riešení pohyblivých simulátorov	19
1.3 Nepriaznivé vplyvy simulátora na človeka	27
2 Návrh konštrukcie jazdného simulátora	28
2.1 Zhodnotenie existujúcich riešení a výber vhodného variantu	28
2.2 Požiadavky na konštrukciu	28
2.3 Voľba konštrukčného materiálu	29
2.4 Riešenie dizajnu	30
2.4.1 Prvý koncept	30
2.4.2 Druhý koncept	33
2.4.3 Finálne riešenie	34
2.5 Poloha užívateľa v simulátore	40
2.5.1 Osobné vozidlo	40
2.5.2 Športové vozidlo	41
2.5.3 Nákladné vozidlo	43
2.6 Skúmanie optimálnej polohy pohyblivých ramien	44
2.6.1 Tvorba modelu v MSC Adams	44
2.6.2 Riešenie inverznej kinematickej úlohy	46
2.6.3 Výsledky analýz	48
3 Návrh rozhrania medzi hardvérom a softvérom	57
3.1 Schéma prepojenia	58
3.2 Tvorba matematického modelu	58
3.3 Kompilácia modelu pre NI VeriStand	61
3.4 Načítanie modelu v NI VeriStand a prepojenie s hardvérom	62
3.5 Overenie funkčnosti prepojenia	68
Záver	71
Zoznam použitých skratiek a symbolov	76
Zoznam príloh	77



ÚVOD

V dnešnom svete nám moderné technológie výrazne pomáhajú pri riešení rôznych problémov. V oblasti strojného inžinierstva môžeme vďaka nim zjednodušiť, zefektívniť a skrátiť našu činnosť, znížiť náklady, či zrealizovať niečo, čo by bez týchto technológií nebolo možné. Jedným zo spôsobov je využitie počítačovej simulácie.

Princíp počítačovej simulácie spočíva v nahradení reálneho systému matematickým modelom v počítači, na ktorom sa následne vykonávajú experimenty vo virtuálnom prostredí počítača, s cieľom aplikovať ich výsledky späť na reálny systém. Softvér v ktorom existuje daný model, a v ktorom sa vykonávajú experimenty sa nazýva simulátor. Pojmom simulátor sa takisto môže označovať patričný hardvér, ktorý je spojený so softvérom. Pre automobilové a dopravné inžinierstvo je v ostatnom čase čoraz významnejším jazdný simulátor, a práve tento je predmetom mojej práce.

V úvodnej časti sa práca venuje hlavne využitiu jazdných simulátorov a analýze pohyblivých simulátorov. Pojednáva o výhodách a nevýhodách rozličných typov pohyblivých simulátorov a poskytuje prehľad a popis existujúcich riešení.

Ďalej sa práca delí do dvoch častí. Prvá časť je zameraná na návrh konštrukcie pohyblivého jazdného simulátora pre účely simulácie jazdy v reálnom čase. Cieľom je navrhnuť variabilnú konštrukciu, ktorá by umožňovala simulovať polohu jazdca v športovom, osobnom a nákladnom vozidle. Je riešená ergonómia jazdca pre každú z týchto polôh. V tejto kapitole je tiež riešená dynamika pohybového systému, v súvislosti s testovaním optimálnej polohy pohyblivých ramien.

Úlohou druhej časti práce je navrhnuť rozhranie medzi hardvérovou a softvérovou časťou simulátora. Cieľom je vytvoriť prepojenie medzi ovládacím zariadením a softvérom pre prácu v reálnom čase, a overiť funkciu tohto prepojenia na simulačnom modeli.



1 JAZDNÝ SIMULÁTOR A JEHO DRUHY

1.1 ČO JE JAZDNÝ SIMULÁTOR

Čo najjednoduchšie a najvýstižnejšie môžeme jazdný simulátor definovať ako druh simulátoru, ktorý simuluje jazdu automobilom, prípadne iným cestným dopravným prostriedkom. Matematický model v počítači tvorí samotné vozidlo, a tiež prostredie, v ktorom sa pohybuje. V najjednoduchšom prípade môže užívateľ ovládať model pomocou klávesnice, čo je štandardné vstupné zariadenie počítača, ale pri snahe zdokonaľiť simuláciu a priblížiť užívateľovi realitu čo najviac, sú bežne používané zariadenia, ktoré pripomínajú ovládací mechanizmus vozidla. Jedná sa najčastejšie o elektronické náhrady volantu, pedálov, prípadne rýchlostnej páky, ktoré prostredníctvom daného rozhrania dokážu komunikovať s počítačom a matematickým modelom. Najprepracovanejšie simulátory často používajú kabínu skutočného vozidla, ktorého ovládacie prvky sú pripojené s počítačom.

Dôležitú úlohu potom hrá prepracovanosť modelu, ktorý na základe vstupných signálov určuje správanie sa virtuálneho vozidla. Udáva ako bude vozidlo reagovať na dané zošliapnutie plynového, brzdového pedálu, či natočenie volantu, s cieľom priblížiť sa čo najviac reakciám skutočného automobilu.

Virtuálny model má okrem matematického popisu aj svoju grafickú podobu. Simulácia sa potom pomocou grafického rozhrania zobrazuje v reálnom čase na zobrazovacom zariadení, najčastejšie obrazovke, čo je hlavný výstup simulátora. Ten je obvykle dopĺňaný zvukovými efektmi. Výstupy sú teda smerované primárne na zrakový a sluchový zmysel, pretože nimi človek získava najviac informácií o dianí okolo seba. Pomocou tejto spätnej väzby je užívateľ schopný ovládať model vozidla, ale pri skutočnej jazde vstupuje do hry ďalší významný faktor, a tým sú pohybové a hmatové vnemy. Tie môžu niekedy poskytnúť jazdcovi informácie, na získanie ktorých by zrakové či sluchové vnemy boli nedostačujúce, alebo by ich zrakom, či sluchom zaznamenal príliš neskoro (napr. vibrácie, určité zrýchľovanie, spomaľovanie, alebo strata trakcie ústiaca prípadne do šmyku). Preto zložitejšie a sofistikovanejšie simulátory využívajú pohybový systém, ktorý umožňuje uviesť ľudské telo do pohybu, čím simulujú silové účinky, ktoré by na neho pôsobili v skutočnom vozidle (problematika pohyblivých simulátorov je podrobnejšie rozobraná v kapitole 1.2.3). Jazdný simulátor sa teda snaží vzbudiť v jeho užívateľovi pocit že ovláda skutočné vozidlo.

Prečo jazdný simulátor vôbec vznikol? Aké je jeho využitie? Aké jazdné simulátory poznáme? Aký prínos poskytuje pre automobilový priemysel? Na tieto otázky nájdeme odpovede v nasledujúcich kapitolách.

1.2 DRUHY JAZDNÝCH SIMULÁTOROV A ICH VYUŽITIE

1.2.1 HISTÓRIA A VYUŽITIE JAZDNÝCH SIMULÁTOROV

Jazdné simulátory sa vyvinuli z leteckých simulátorov, ktoré začali svoju históriu na začiatku 20. storočia a slúžili primárne na výcvik pilotov (hlavne v armáde). Zakrátko sa za podobným účelom začínajú objavovať aj jazdné simulátory.

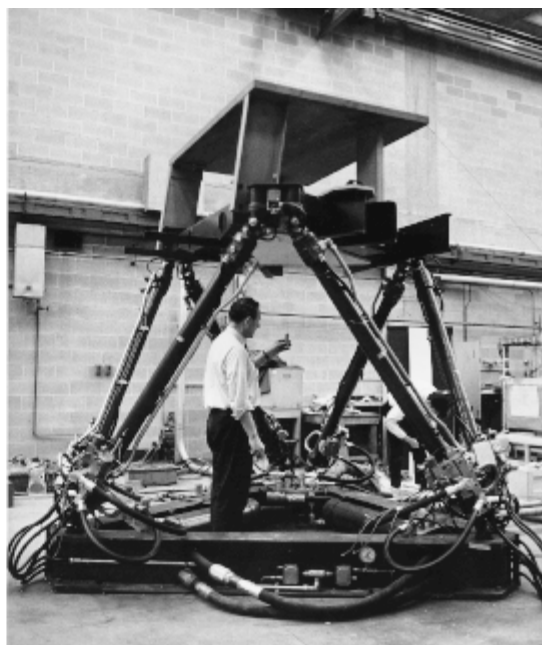
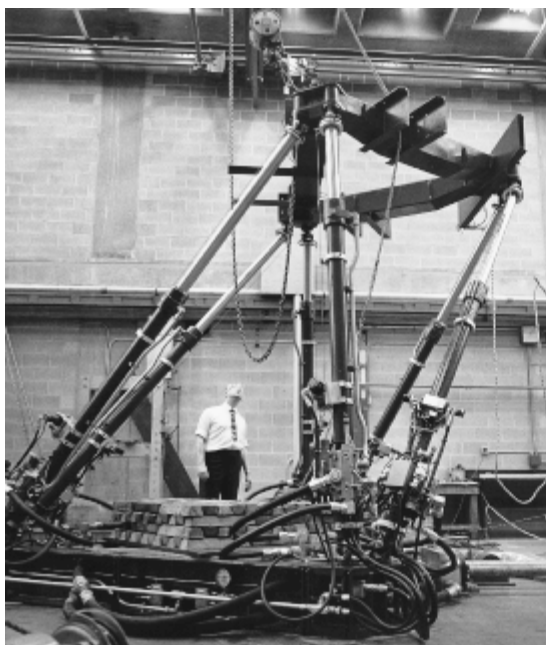


Významným bodom bol príchod oktaédrickej paralelnej kinematickej štruktúry so 6 stupňami voľnosti, o ktorej vývoj a privedenie na svet v 60. rokoch sa najviac zapríčinili Dr. Eric Gough, Klaus Cappel a D. Stewart. [8, 17] Vďaka poslednému zmieňovanému sa stala populárnou a preto sa jej často hovorí „Stewartova platforma“. Bežne sa tiež často označuje ako „hexapod“. Jej vývoj je spojený práve s leteckými simulátormi a postupne sa zakomponovávala aj do jazdných simulátorov.

Prvý jazdný simulátor bol postavený spoločnosťou Volkswagen v 70. rokoch a mal 3 stupne voľnosti. V 80. rokoch sa objavili ďalšie jazdné simulátory a zároveň prvý, ktorý disponoval 6 stupňami voľnosti u vtedajšej automobilky Daimler-Benz. Širšie a častejšie využitie simulátorov nastáva s ďalším rozvojom elektroniky a výpočtovej techniky. [8, 17, 41]



Obr. 1.1 „Hexapod“ [42]



Obr. 1.2 Prvý letecký simulátor využívajúci oktaédrickú paralelnú kinematickú štruktúru [8]



Dnes sa jazdné simulátory využívajú v rade rôznych aplikácií. Okrem spomínaného výcviku jazdcov, ktorý je v dnešnej dobe bežne rozšírený v autoškolách ako pre neprofesionálnych tak aj profesionálnych vodičov, je ďalšou širokou oblasťou a vplyvnou sférou zábavný priemysel. Každý jazdný simulátor obsahuje spomínanú softvérovú časť, ktorej úlohou je sprostredkovať virtuálnu realitu. To je doménou videohier. V súvislosti s nimi môžeme najčastejšie hovoriť o závodných simulátoroch. Ovládanie vozidla môže pre človeka znamenať istú formu relaxu, zábavy, či vzrušenia, najmä pri športovej jazde. Jazda vo vysokej rýchlosti však predstavuje veľké riziko dopravnej nehody a s ňou spojené následky na zdraví a živote človeka. Práve jazdný simulátor dokáže toto riziko eliminovať a preto sa v tejto oblasti stal veľmi populárnym (bezpečnosť jazdného simulátora je kľúčovým faktorom pre využitie vo všetkých aplikáciách). Ku spestreniu zábavy sa používa nenáročný hardvér, ako elektronické volanty a pedále, ktoré môžu byť zakomponované do jednoduchého rámu. Ten býva najčastejšie stacionárny, alebo môže byť spojený s menej náročným pohyblivým systémom. Takéto simulátory nájdu uplatnenie v domácom použití, alebo zábavných parkoch a centrách (obr. 1.8).

Softvér akéhokoľvek jazdného simulátora funguje na rovnakom princípe ako videohra a líši sa len účelom ku ktorému je určený. V súčasnosti existujú hry, ktoré dokážu veľmi presvedčivo priblížiť správanie sa virtuálneho vozidla skutočnému vozidlu a neustálym vývojom prispievajú k zdokonaľovaniu simulátorov aj v ďalších oblastiach využitia. [41]



Obr. 1.3 Ukážka grafického výstupu softvérovej časti jazdného simulátora [21]

Ďalšou širokou sférou využitia je výskum, uskutočňovaný najmä v oblasti interakcie medzi jazdcom a vozidlom a bezpečnosti cestnej premávky. Testuje sa správanie jazdca za rôznych podmienok a v rôznych situáciách (environmentálne a iné vplyvy okolia, jazda v rôznom teréne – diaľnica, mesto, tunel, členitosť vozovky, nespevnené komunikácie). Vďaka jazdnému simulátoru je možné skúmať faktory, ktorých testovanie v skutočnej premávke by bolo nebezpečné, či nelegálne (únava, vplyv omamných látok, manipulácie s rôznymi zariadeniami). Pre účely výskumu sa používajú simulátory od najjednoduchších po tie najprepracovanejšie, ktoré dokážu monitorovať pohyb očí, tela, či srdcový tep. Takéto simulátory vznikajú na univerzitách, či výskumných centrách rôznych automobiliek. [5, 10, 41]



Jazdný simulátor našiel uplatnenie taktiež v automobilovom priemysle. Automobilky ho využívajú pri vývoji nových vozidiel, aby tak v mnohých prípadoch ušetrili čas a finančné prostriedky a aby neustále zdokonaľovali svoje produkty. Môže slúžiť na testovanie dynamiky vozidla (rôzne nastavenia podvozku), testovanie nových systémov (asistenčné systémy, bezpečnostné systémy) skúmanie komfortu posádky, dizajn interiéru (rozmiestnenie ovládacích prvkov, zábavno-informačného systému) a podobne. [13]

Medzi najprepracovanejšie jazdné simulátory, slúžiace pre výskumné a vývojové aplikácie patria simulátory automobiliek Mercedes-Benz (Daimler AG driving simulator), Toyota, Ford, alebo simulátor švédskeho inštitútu VTI, či simulátor NADS-1 na Univerzite Iowa.



Obr. 1.4 Daimler AG driving simulator [11]



Obr. 1.5 Jazdný simulátor automobilky Toyota [47]



Obr. 1.6 Jazdný simulátor švédskeho inštitútu VTI [37]



Jazdné simulátory môžeme rozdeliť na dve základné skupiny, ktorých hlavným rozlišovacím prvkom je prítomnosť pohybového systému. Jedná sa o simulátory stacionárne a pohyblivé. Keďže je táto práca zameraná na konštrukciu pohyblivého simulátora, bude v nasledujúcej rešerši venovaná podrobnejšia analýza práve tejto skupine, a stacionárne simulátory budú iba krátko zhrnuté.

1.2.2 STACIONÁRNE SIMULÁTORY

Tento pojem (z angl. „stationary simulator“, alebo „fixed-base simulator“) označuje simulátory, ktoré nezabezpečujú účelnú zmenu polohy a orientácie človeka (užívateľa) voči zemi. Neobsahujú pohybový aparát, pomocou ktorého by simulovali pohybové vnemy pôsobiace na človeka pri skutočnej jazde, ako v prípade pohyblivých simulátorov. Okrem vizuálnej a zvukovej spätnej väzby, ktorá je samozrejmosťou, môžu byť vybavené vibračnými, alebo inými aktívnymi prvkami. Medzi najvýznamnejšie určite patrí volant so silovou spätnou väzbou, ktorá poskytuje vodičovi presné a neoceniteľné informácie o správaní sa automobilu, na ktoré dokáže veľmi rýchlo reagovať.

Stacionárne simulátory patria medzi najjednoduchšie čo sa týka konštrukcie, priblíženia reality aj ceny. Najčastejšie sa využívajú na zábavu (doma, zábavné parky – v podobe herných automatov). Taktiež ich ale môžeme nájsť v autoškolách, kde slúžia na výcvik vodičov, predtým ako nasadnú do skutočného vozidla. V menšej miere sa využívajú pre výskum a vývoj (napr. NADS MiniSim – obr. 1.7).



Obr. 1.7 NADS MiniSim [45]



Obr. 1.8 Ukážky stacionárnych simulátorov [2, 20]

1.2.3 POHYBLIVÉ SIMULÁTORY

Pohyblivé resp. pohybové simulátory (z angl. „motion simulators“), v porovnaní so stacionárnymi simulátormi, predstavujú vyšší stupeň v rámci priblíženia sa realite. Uvedením jazdca do pohybu sa snažia čo najvernejšie simulovať silové účinky, ktoré by na neho pôsobili pri skutočnej jazde. Jedná sa najčastejšie o odstredivé a zotrvačné sily pri prejazde zákrutou, zrýchľovanie a spomaľovanie, ale aj sily od prejazdu nerovností a členitej vozovky prenášané cez podvozok a následne na jazdca, či simuláciu straty trakcie a následného šmyku.

To je dosiahnuté vďaka pohyblivej konštrukcii, ktorá umožňuje pohyb sedadla, respektíve celého rámu v niekoľkých osách. Podľa toho rozlišujeme simulátory s 2 až 6 stupňami voľnosti. Pohyb je v súčasnej dobe vyvodzovaný prevažne elektrickými systémami – lineárne motory, či aktuátory. Pôvodne sa používali hydraulické, alebo pneumatické systémy, ale vývojom sa postupne prechádzalo k elektrickým systémom, pretože pracujú s vyššou účinnosťou premeny energie, sú tichšie, jednoduchšie na konštrukciu a údržbu, majú presnejšie pohyby a menšiu odozvu. Pri veľkých a ťažkých simulátoroch sa však stále vyskytujú aj hydraulické, či pneumatické systémy. [15]

Pohyblivé simulátory môžeme rozdeliť na nasledujúce tri varianty podľa pohybu jednotlivých častí simulátora [15]:

- A. Pohybuje sa iba sedadlo s jazdcom. Ovládacie ústrojenstvo (volant, pedále, respektíve rýchlostná páka) a výstupné vizuálne zariadenie (obrazovka) sú stacionárne. Nazvime ich „sedadlové“ (z angl. „seat-mover“).
- B. Pohybuje sa sedadlo s jazdcom jednotne s ovládacím ústrojenstvom, ktoré sú uchytené spolu na jednom ráme. Obrazovka je stacionárna.
- C. Pohybujú sa jednotne všetky časti (sedadlo, ovládacie ústrojenstvo aj obrazovka) upevnené na spoločnom ráme. Jedná sa najčastejšie o takzvané „platformové“ simulátory (z angl. „motion platforms“, „motion bases“), využívajúce oktaédrickú



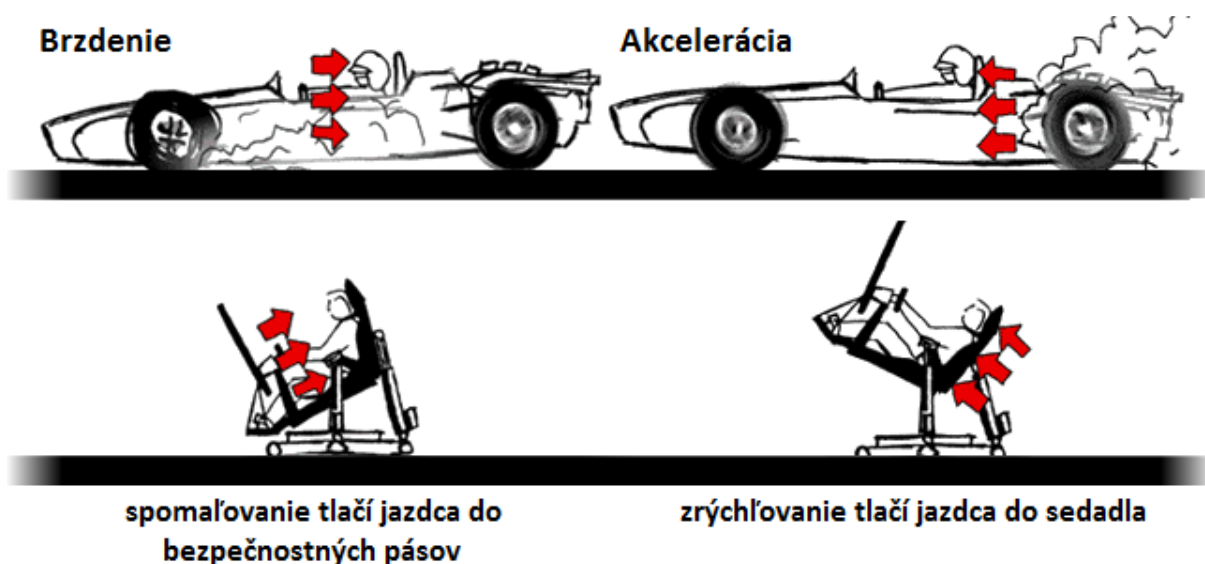
paralelnú kinematickú štruktúru (hexapod), avšak existujú aj jednoduchšie prevedenia s nižším počtom stupňov voľnosti.

Každý z týchto variantov má svoje klady a zápory. Aby sme ich lepšie pochopili, vysvetlíme si najprv, ako funguje vnímanie pohybu nášho tela. Simulátor sa snaží „oklamať“ ľudskú psychiku kombináciou zmyslových podnetov (pohybových, zrakových, sluchových, hmatových). Polohu tela a jeho pohyb v priestore ľudské telo vníma pomocou týchto základných zmyslových orgánov [33, 51]:

- proprioreceptory (vnímajú napätie a pohyb svalov, kĺbov, šliach)
- vestibulárny aparát (centrum rovnováhy nachádzajúce sa vo vnútornom uchu, snímanie pohybu hlavy)
- zrak

Je dôležité aby boli tieto vnemy správne zosynchronizované. Teraz si popíšme ako vyššie spomínané varianty simulátorov pracujú s jednotlivými vnemami, a aké sú medzi nimi rozdiely [6, 14, 15, 19, 28, 31, 39, 40]:

Idea platformových simulátorov spočíva vo predstave že jazdec sa pri jazde pohybuje spolu s vozidlom a pokiaľ má zapnuté bezpečnostné pásy jeho relatívne pohyby voči ovládaciemu ústrojenstvu a zvyšku interiéru sú minimálne. Simulátor sa snaží pôsobiť najmä na vnemy zachytávané vestibulárnym orgánom a to tak, že skutočné zotrvačné a odstredivé sily sú nahradzované zložkou gravitačnej sily, čo je dosahované pomerne veľkými rotáciami kokpitu okolo základnej polohy (Cruden $\pm 25^\circ$, Motion-sim až $\pm 30^\circ$ – pozri ďalej). Pri týchto veľkých rotáciách je nanajvýš vhodné, aby sa obrazovka pohybovala spolu s kokpitom, pretože by to mohlo pôsobiť neprirodzene, aj keď existujú simulátory so stacionárnou obrazovkou, a veľkými maximálnymi uhlami rotácie (napr. Atomic A2 až 27° – pozri ďalej).



Obr. 1.9 Znázornenie simulácie zrýchľovania a spomaľovania naklápaním simulátora [28]



Ani v reálnom vozidle sa vodič tak veľmi nenakláňa oproti vozovke a teda simulátory so stacionárnou obrazovkou majú väčšinou menšie maximálne uhly rotácie, čo ale zároveň znamená vyvodenie menšej zložky gravitačnej sily. Tento fakt sa ale kompenzuje prudkejšími pohybmi simulátora. Ideou teda nie je čo najviac transformovať reálne zrýchlenie na gravitačné zrýchlenie, ale ho vyvolať priamo pohybovým aparátom (motormi). Navyše je dokázané že človek vníma zrýchlenie ako pocitovo väčšie než v skutočnosti je, pokiaľ je na neho aplikované náhle [15]. Je teda snaha realizovať akési šklbnutia, trhavé pohyby na umocnenie pocitu zo silových účinkov. Simulátor sa týmto snaží viac zakomponovať pôsobenie na proprioreceptory.

Tým sa dostávame k „sedadlovým“ simulátorom, ktoré tak isto fungujú na tomto princípe. Navyše pri relatívnom pohybe jazdca voči ovládaciemu ústrojenstvu sa jazdec snaží nestratiť s ním kontakt, a tak vzniká pri týchto pohyboch v jeho svaloch napätie, ktoré je opäť vnímané proprioreceptormi. Toto sa v malej miere deje aj v skutočnom vozidle, a je teda dôležité, aby pohyby sedadla simulátora neboli príliš veľké a nereálne.

Ďalšie rozdiely, výhody a nevýhody medzi jednotlivými variantmi sú zhrnuté v nasledujúcich odrážkach:

- Sedadlové simulátory lepšie simulujú vibrácie od podvozku a krátke a rýchle pohyby, ktoré sa pri platformových simulujú náročnejšie, kvôli väčšej hmotnosti pohybujúcej sa hmoty.
- Platformové simulátory umožňujú udržať pocity väčších zrýchlení dlhšiu dobu, keďže na to využívajú gravitačnú silu. Sedadlové pôsobia veľkými zrýchleniami len krátke časy.
- Pri platformových simulátoroch môže vodič zrakom vnímať pomerne veľký relatívny pohyb voči zemi, čo uberá na presvedčivosti zo simulácie, alebo môže dokonca pôsobiť nepríjemne. Je preto vhodné, aby bolo zorné pole vodiča čo najviac späté so simulátorom, napríklad použitím viacerých, alebo väčších vhodne rozmiestnených obrazoviek, prípadne zakrytie zvyšného výhľadu z kokpitu. Najprepracovanejšie simulátory sú úplne uzavreté a jazdec nemá žiaden vizuálny kontakt s vonkajším okolím.
- Platformové simulátory sú konštrukčne náročnejšie, sú väčšie a teda zaberajú viac priestoru, majú väčšiu celkovú hmotnosť, ale hlavne hmotnosť pohybujúcich sa hmôt, čím vzniká potreba výkonnejších motorov a teda majú väčšiu spotrebu energie, z čoho vyplývajú väčšie cenové náklady na výrobu a prevádzku.

Všetky simulátory majú obmedzený rozsah pohybu a preto sa vždy vracajú do pôvodnej polohy. Tento pohyb však ľudské telo nesmie zaznamenať, a teda musí byť realizovaný so zrýchlením pod hranicou vnímania. Táto hranica predstavuje hodnotu $0,05g$, resp. $0,5^\circ.s^{-2}$ [15, 33].

1.2.4 PREHĽAD KONŠTRUKČNÝCH RIEŠENÍ POHYBLIVÝCH SIMULÁTOROV

Táto kapitola poskytuje prehľad existujúcich konštrukčných riešení pohyblivých jazdných simulátorov. Sú zoradené podľa stupňov voľnosti, ktorými disponujú. Ku každému simulátoru je uvedená jeho stručná charakteristika.



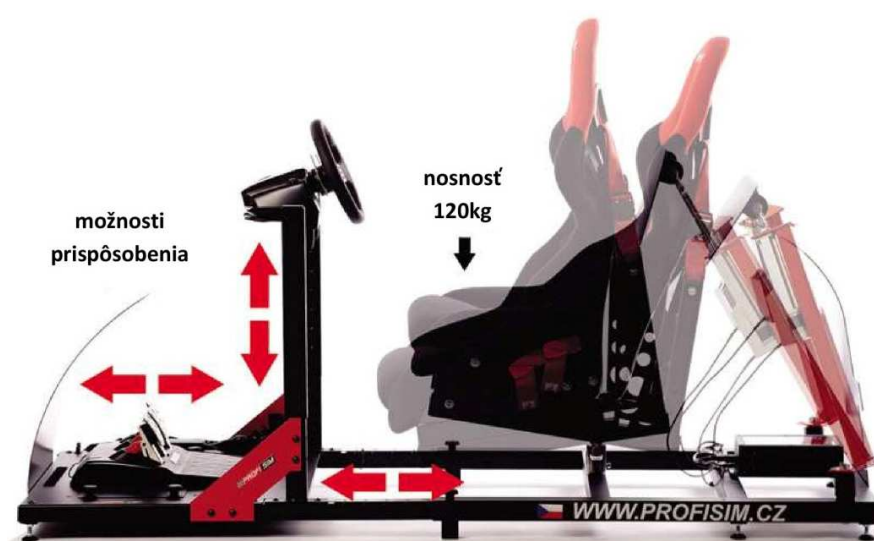
SIMULÁTORY S 2 STUPŇAMI VOLNOSTI

Profisim - Race2

Tento simulátor spadá do vyššie spomínanej kategórie „sedadlových“ simulátorov. Jeho výrobcom je česká firma Profisim s.r.o., zaoberajúca sa návrhom, výrobou a prenájmom pohyblivých simulátorov pre širokú verejnosť.



Obr. 1.10 Profisim – Race2 [38]



Obr. 1.11 Profisim – Race2 [38]



Pohyb sedadla je zabezpečený pomocou dvoch ramien, ovládaných lineárnymi aktuátormi, uchytených sférickými väzbami k základovému rámu a k rámu sedadla. Motory dosahujú rýchlosť pohybu do 400mm/s. Sedadlový rám je ďalej upevnený k základovému cez ďalšiu väzbu realizovanú kardanovým kĺbom, ktorý zároveň tvorí stred klopenia a klonenia pohybu. Konštrukcia má určitú možnosť prispôsobenia ovládacích prvkov (volant, pedále), ako je naznačené na *obr. 1.11*. Je navrhnutá pre jazdcov s hmotnosťou do 120kg. [38]

Simulátor je schopný simulovať silové účinky pri zrýchľovaní, spomaľovaní, prejazde zákrut a určité vibrácie od podvozku.

Atomic A2

Simulátor pohybuje rámom na ktorom je upevnené sedadlo a ovládacie prvky, avšak vizuálne zariadenie nie je jeho súčasťou a je stacionárne, takže simulátor spadá do vyššie uvedenej kategórie B. Je vyrábaný britskou firmou Atomic motion systems, ktorá je zameraná na návrh a výrobu závodných a leteckých simulátorov pre domácu zábavu, alebo komerčné využitie.

Pohyb vyvodzujú 2 aktuátory s rýchlosťou pohybu do 400mm/s, vďaka ktorým sa rám môže otáčať maximálnou rýchlosťou $71,2^{\circ}.s^{-1}$. Maximálny uhol klonenia a klopenia je 27° . Aktuátory sú umiestnené pod sedadlom v jeho prednej časti, čo napríklad na rozdiel od vyššie spomínaného simulátora Race2 pôsobí veľmi kompaktne a znižuje celkové rozmery konštrukcie, avšak čím sú motory bližšie k stredu rotácie, tým je potrebná väčšia sila pre daný pohyb. Preto je simulátor vybavený systémom s označením ForceAssist, ktorý rekuperuje kinetickú energiu pri pohybe a vracia ju späť do systému, čím napomáha elektromotorom k návratu rámu do východiskovej polohy. [3]



Obr. 1.12 Atomic A2 [3]



Konštrukcia umožňuje prispôsobenie volantu, pedálov a radiacej páky užívateľovi. Simulátor simuluje silové účinky pri zrýchľovaní, spomaľovaní, prejazde zákrut a určité vibrácie od podvozku. Udávaná nosnosť je 140kg a hmotnosť celej konštrukcie sa pohybuje okolo 50kg. [3]

BlueTiger motion simulator

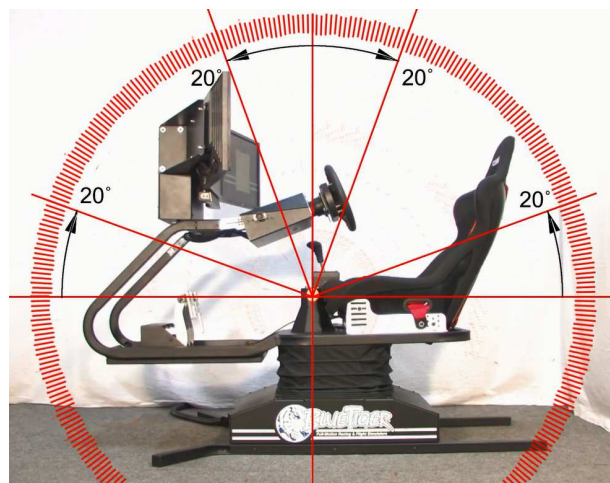
Podobný simulátor ako vyššie spomínaný Atomic A2, s tým hlavným rozdielom, že v tomto prípade je obrazovka (obrazovky) umiestnená na pohyblivom ráme spolu s ovládacím ústrojenstvom a sedadlom, čiže sa jedná o poslednú zmieňovanú kategóriu C. Simulátor tento krát pochádza z dielne americkej firmy BlueTiger.

Na obr. 1.14 môžeme vidieť polohu stredu rotácie, ktorý je umiestnený pred sedadlom, približne pri kolenách jazdca. Maximálny uhol klopenia a klonenia je 20° . O pohyb sa starajú elektromotory, pričom výrobca udáva výkon 700W pri maximálnom zaťažení. [7]

Rovnako ako predchádzajúce simulátory s 2 stupňami voľnosti je tento simulátor schopný simulovať silové účinky pri zrýchľovaní, spomaľovaní, prejazde zákrut a určité vibrácie od podvozku.



Obr. 1.13 BlueTiger simulátor [32]



Obr. 1.14 BlueTiger simulátor – pozícia stredu rotácie a jej maximálne uhly [6]

SIMULÁTOR S 3 STUPŇAMI VOĽNOSTI

Profisim – Race3

Zdokonalená verzia simulátoru Race2 od firmy Profisim, ktorá navyše disponuje možnosťou simulácie straty trakcie a následného pretáčavého šmyku. Systém pohybu sedadla nie je uchytený priamo k základovému rámu, ale k určitému „medzirámu“, ktorý pomocou



d ďalšieho lineárneho aktuátora vykonáva posuvný pohyb po základovom ráme v laterálnom smere (obr. 1.15). Firma Profisim má ešte druhý simulátor so simuláciou šmyku, kde sa celý rám otáča okolo zvislej osi, pomocou rotačnej väzby v jeho prednej časti (obr. 1.16). Jazdec teda zažíva pocit podobný ako pri skutočnom šmyku, ktorý mu výrazne napomáha pri reakciách spojených so stabilizáciou vozidla, alebo zvládnutím požadovaného manévru. [38]



Obr. 1.15 Profisim Race3 – simulácia šmyku pohybom zadnej časti konštrukcie [38]



Obr. 1.16 Simulátor firmy Profisim – simulácia šmyku pohybom celej konštrukcie [38]

SIMULÁTOR SO 4 STUPŇAMI VOĽNOSTI

Motion-sim – 4DOF

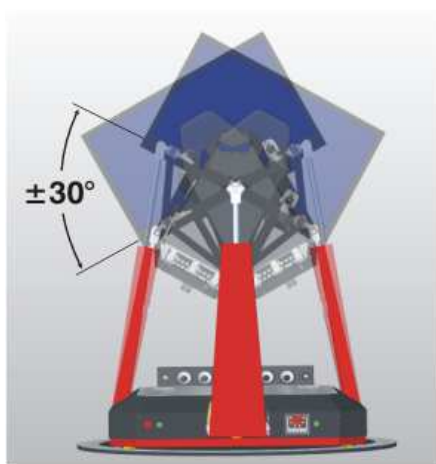
Simulátor disponuje troma pohyblivými ramenami a otočnou základňou, čím dosahuje 4 stupne voľnosti – 3 rotácie a posuv vo vertikálnom smere. Ramená, spolu so základňou, pohybujú celým rámom (vrátane ovládacích prvkov a obrazovky) a môžeme povedať, že



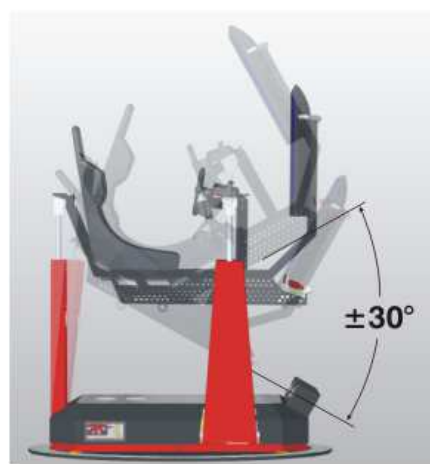
simulátor patrí k takzvaným „platformovým“. Výrobcom je česká firma Motion-sim, ktorá patrí pod spoločnosť Elsaco Kolín.

Každé rameno je uchytené k základni rotačnou väzbou a k rámu dvojicou rotačných väzieb v sérii. Pohyb je vyvodzovaný elektromotormi s výkonom 2kW. Výrobca udáva maximálne statické preťaženie 0,5g a maximálne dynamické preťaženie 2g. Simulátor sa dodáva v dvoch verziách – Fast a Extreme. Na obr. 1.17 sú znázornené limitné hodnoty pre daný pohyb a uvedené maximálne hodnoty uhlových rýchlostí a zrýchlení.

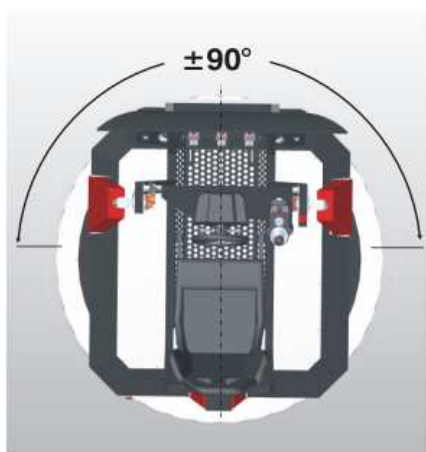
Okrem zotrvačných síl pri zrýchľovaní, spomaľovaní a prejazde zatáčok dokáže simulátor, vďaka trom ramenám, dokonalejšie simulovať pracovanie podvozku pri prejazde členitého terénu. Otočná základňa simuluje šmyk. Môže sa otáčať maximálne o 90° okolo základnej polohy. [31]



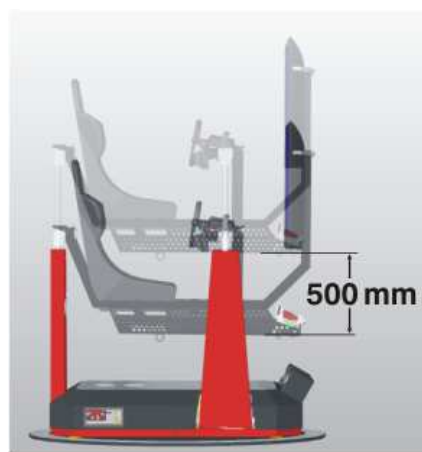
Fast: rýchlosť $41^{\circ} \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $345^{\circ} \cdot s^{-2}$
 Extreme: rýchlosť $52^{\circ} \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $430^{\circ} \cdot s^{-2}$



Fast: rýchlosť $41^{\circ} \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $345^{\circ} \cdot s^{-2}$
 Extreme: rýchlosť $52^{\circ} \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $430^{\circ} \cdot s^{-2}$



Fast: rýchlosť $120^{\circ} \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $600^{\circ} \cdot s^{-2}$
 Extreme: rýchlosť $120^{\circ} \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $600^{\circ} \cdot s^{-2}$



Fast: rýchlosť $0,345m \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $2,9m \cdot s^{-2}$
 Extreme: rýchlosť $0,430m \cdot s^{-1}$, zrýchlenie $3,6m \cdot s^{-2}$

Obr. 1.17 Motion-sim – 4DOF (limity pohybu) [31]



Obr. 1.18 Motion-sim – 4DOF Extreme [44]

SIMULÁTORY SO 6 STUPŇAMI VOĽNOSTI

Cruden – Hexatech

Jedná sa o „platformový“ simulátor, ktorého pohybový systém tvorí oktaédrická paralelná kinematická štruktúra („hexapod“). Je dielom holandskej firmy Cruden.



Obr. 1.19 Cruden – Hexatech [12]



Šesť ramien je poháňaných elektrickými aktuátormi. Ramená sú uchytené k základni a pohyblivému rámu kardanovými kĺbmi. Pohybový systém, podobne ako v prípade simulátora Atomic A2, využíva rekuperáciu energie, čím napomáha návratu simulátora do východiskovej polohy. Celý rám sa môže voči základni naklápať maximálne o $\pm 25^\circ$. Maximálne uhlové zrýchlenia pre klonenie, klopenie a zatačanie činia 400, 500 a $900^\circ \cdot s^{-2}$ v uvedenom poradí. Simulátor tiež disponuje prvkami ako prepracovaný systém spätnej väzby na volante, či napínanie bezpečnostných pásov.

Cruden spolupracuje s radou automobiliek, univerzít, či závodníckych tímov. Za najpútavejšiu oblasť využitia tohto simulátora sa dá považovať Formula 1, kde slúži na výcvik jazdcov a vývoj a nastavenie pretekárskych vozidiel. To je dôkazom vysokej prepracovanosti a schopnosti verne simulovať správanie sa auta na trati. Do simulácie vstupujú tiež faktory ako aerodynamika, či opotrebenie pneumatík. [13]

National Advanced Driving Simulator – NADS-1

Považovaný za najprepracovanejší jazdný simulátor na svete. Nachádza sa na Univerzite Iowa v blízkosti mesta Iowa City v USA. Vývoj a výskum tohto projektu je sponzorovaný rôznymi firmami, armádou a vládou USA. Je zameraný na testovanie správania sa vozidiel, správania sa vodičov, výcvik jazdcov, testovanie nových systémov vo vozidlách (vo veľkej miere bezpečnostných) a oblasť vzdelávania.

Konštrukciu simulátora tvorí uzavretý kryt, ktorý je uchytený pomocou sústavy 6 hydraulických ramien (hexapod) na pojazdnej platforme, ktorá s ním pohybuje translačne v dvoch na seba kolmých osách, na dĺžke približne 20m, v oboch smeroch. Kryt môže navyše rotovať o 660° okolo svojej osi. Celý pohybový systém by mal vernejšie simulovať pohyby vozidla a silové účinky, nastávajúce pri reálnej jazde (v porovnaní napríklad s konštrukciou využívajúcou iba hexapod). Mechanizmus ako taký má spolu deväť stupňov voľnosti, ak nerátame uchytenie samotnej kabíny pre užívateľa (pozri nižšie), ale z hľadiska polohy a orientácie v trojrozmernom priestore sa stále jedná o pohyb v šiestich nezávislých osách. [45]



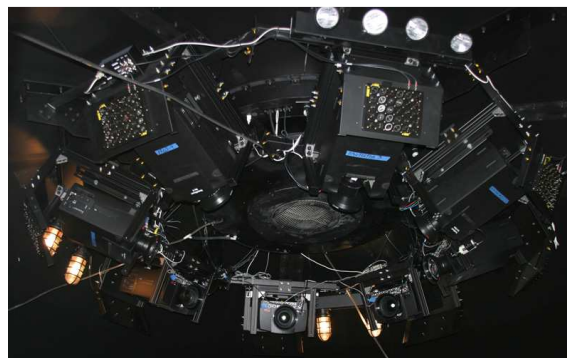
Obr. 1.20 NADS-1 [45]



Samotný užívateľský priestor, ktorý tvorí upravená kabína reálneho vozidla je umiestnený vo vnútri krytu, takže užívateľ nemá vizuálny (a teoreticky ani audiálny) kontakt s vonkajším okolím. Kabína je uchytená k podlahe krytu na štyroch hydraulických aktuátoroch umiestnených namiesto kolies, ktoré simulujú vibrácie od vozovky. Vizualizácia virtuálneho prostredia je zabezpečená pomocou 8 LCD projektorov ktoré premietajú virtuálnu scénu v 360° zornom poli užívateľa, teda po celom obvode krytu. [45]



Obr. 1.21 NADS-1 – vo vnútri krytu [45]



Obr. 1.22 NADS-1 – projekčný systém [45]

1.3 NEPRIAZNIVÉ VPLYVY SIMULÁTORA NA ČLOVEKA

Jedná sa o nepríjemné pocity, ktoré môžu zažívať niektorí užívatelia jazdného simulátora. V prípade pohyblivých simulátorov je najčastejšou príčinou nesúlad medzi vnímaním pohybu zrakom a vestibulárnym aparátom. Pri stacionárnych simulátoroch zasa nastáva situácia kedy jazdec vníma pohyb zrakom na zobrazovacom zariadení, avšak vestibulárny aparát tento pohyb nevníma, pretože v skutočnosti neexistuje. Ďalšie príčiny môžu byť zlé spracovanie vizualizácie, alebo nesprávne odladenie pohybového aparátu simulátora. Jazdec môže očakávať určitý pohyb alebo vizualizáciu, avšak tie sa dostavia neskôr, alebo sú odlišné od očakávaných. Výsledkom môže byť nevoľnosť, bolesti hlavy, bolesti očí, únava, poruchy koncentrácie, dezorientácia, či problémy so svalovou koordináciou.

Samostatnou kategóriou v tejto oblasti je takzvaný „návykový syndróm“ (z angl. „Simulator Adaptation Syndrome“ – SAS). Ak človek používa simulátor dlhšiu dobu, môže si navyknúť na rozdielne správanie sa simulátoru oproti realite (reálnemu vozidlu). Môže sa jednať o nedokonalosť simulácie ako takej, ale aj o rozdielnu odozvu medzi vstupným a výstupným zariadením (oneskorené reakcie výstupného zariadenia na vstupy od jazdca). Keď jazdec začne opäť používať skutočné vozidlo, jeho organizmus bude očakávať, že sa vozidlo bude správať ako simulátor. Pokiaľ sa tak nestane, vodič môže byť zmätený, zníži sa jeho schopnosť ovládať vozidlo a to môže mať neblahé následky. Tiež môže pociťovať strach, stres, či nevoľnosť. Na základe jeho predchádzajúcich skúseností s ovládaním vozidla trvá istú dobu než sa znova prispôsobí reálnym podmienkam.

U týchto problémov samozrejme závisí na individuálnej odolnosti jedinca voči nim, a tiež môže do hry vstupovať vek, prípadne iné faktory. Treba však dodať, že s postupným vývojom simulátorov sú tieto problémy na ústupe. Vďaka výkonnejšej výpočtovej technike, vyspelejším použitým zariadeniam lepšiemu odladeniu a predchádzajúcim skúsenostiam sa vyrábajú stále presvedčivejšie simulátory. [27, 33, 43]



2 NÁVRH KONŠTRUKCIE JAZDNÉHO SIMULÁTORA

Táto kapitola sa venuje prvému hlavnému cieľu mojej práce, ktorým je návrh jazdného simulátora pre účely simulácie jazdy v reálnom čase. Podľa tohto návrhu je zámerom simulátor reálne postaviť a sprevádzkovať, avšak bude potrebné vykonať ešte určité pevnostné analýzy na základe dynamiky pohyblivej časti, ktorá, ako sa ďalej ukáže, nám v tejto fáze nie je dostatočne známa, a preto je potrebný ďalší výskum v tejto oblasti. V budúcnosti je v pláne využívať ho na testovanie riadiacich jednotiek, správania sa vozidla a tiež jazdca za určitých podmienok a prípadne pre simulovanie a analýzu dopravných nehôd.

2.1 ZHODNOTENIE EXISTUJÚCICH RIEŠENÍ A VÝBER VHODNÉHO VARIANTU

Na základe rešerše v predchádzajúcej časti práce môžeme konštatovať, že v súčasnosti existujú rozličné prevedenia jazdných simulátorov s rôznym počtom stupňov voľnosti, pričom medzi tými najjednoduchšími a najprepracovanejšími sú výrazné rozdiely v zložitosti konštrukcie. Všeobecne platí, že čím viac stupňov voľnosti simulátor má, tým je jeho konštrukcia zložitejšia, narastajú jeho rozmery a celková hmotnosť. Z toho ďalej vyplýva vyššia cena a náročnejšie zvládnutie riadenie pohybového systému. Obvykle sa súčasne zväčšuje hmotnosť pohyblivej hmoty, čím rastie energia potrebná na vykonanie daného pohybu, a teda je potrebný výkonnejší pohybový systém (motory).

Ako už bolo uvedené, rôzne simulátory používajú rôzny prístup k ovplyvňovaniu pohybových vnemov človeka. Každý variant má svoje výhody aj nevýhody a zatiaľ asi neexistuje jednoznačná odpoveď na otázku, ktorý z nich je lepší, respektíve ktorý vierohodnejšie simuluje realitu. Dá sa vychádzať z toho, že najprepracovanejšie jazdné simulátory (NADS a pod.) používajú čo najširšie a najrozmanitejšie možnosti pohybu (hexapod, ktorý je prípadne dopĺňaný ďalším pohybovým systémom), avšak, ako uvádza Hirata (2005), podľa niektorých štúdií využitie menej ako 6 stupňov voľnosti u jazdného simulátora môže byť vhodnejšie z hľadiska reálnejšieho zážitku zo simulácie [27]. Dokonca ani v oblasti leteckých simulátorov nepanuje jednoznačný názor na potrebu využitia všetkých 6 stupňov voľnosti [29]. Určite však záleží na konkrétnom účele a úlohe, ku ktorej je simulátor určený, a samozrejme platí, že žiaden pohyb je vždy lepší, ako zle odladený pohyb.

Nakoľko je v pláne navrhovaný simulátor postaviť s využitím finančných zdrojov školy, bolo by za daných podmienok a prihliadajúc k rozsahu diplomovej práce nemysliteľné zaoberať sa príliš zložitými konštrukčnými riešeniami. Po zohľadnení vyššie uvedených okolností bol po dohode s vedúcim práce zvolený variant „sedadlového“ simulátora. Jedná sa teda o simulátor s 2 stupňami voľnosti, s pohyblivým sedadlom a stacionárnym zvyškom rámu, na ktorom sú upnuté ovládacie prvky a obrazovka. Jeho výhodou je jednoduchá konštrukcia, relatívne jednoduché riadenie pohybového systému, malé rozmery, ktoré umožňujú jeho prevádzkovanie napríklad aj v kancelárii a nízka hmotnosť pohyblivej hmoty, čo znižuje nároky na výkon motorov.

2.2 POŽIADAVKY NA KONŠTRUKCIU

Na začiatku boli stanovené požiadavky na jednoduchosť konštrukcie a možnosť určitého prispôsobenia ovládacích prvkov užívateľovi. Neskôr bol zakúpený hardvér (volant,



pedále, radiaca páka a obrazovka) a sedačka, čím vznikla požiadavka na umožnenie montáže konkrétneho zariadenia. V priebehu konzultácii prišiel návrh zo strany vedúceho na vytvorenie takej konštrukcie, kde by sa dala nastaviť poloha jazdca charakterizujúca nielen osobné, ale aj športové a nákladné vozidlo. Na obr. 2.1 – 2.6 je možné vidieť zakúpený hardvér a sedačku.



Obr. 2.1 Volant so spätnou väzbou značky Fanatec



Obr. 2.2 Veniec volantu značky Fanatec



Obr. 2.3 Pedále značky Logitech



Obr. 2.4 Radiaca páka značky Fanatec



Obr. 2.5 Sedačka značky JBR



Obr. 2.6 Monitor značky Hyundai [26]

2.3 VOĽBA KONŠTRUKČNÉHO MATERIÁLU

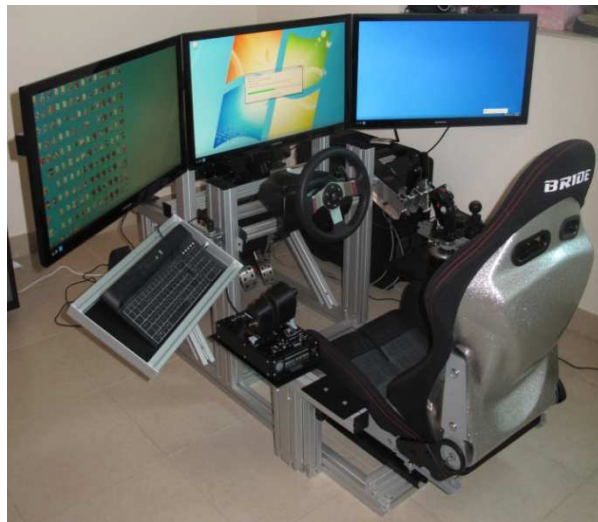
Podľa odporúčenia vedúceho práce bol ako hlavný konštrukčný materiál zvolený stavebnicový systém firmy Bosch Rexroth. Jedná sa o hliníkové profily a prvky, ktorých montáž je založená na princípe podobnom rybinovému spojom. Vďaka tomu disponuje tento systém výhodou vysokej prispôsobivosti, rýchlej montáže a prestavbe v prípade potreby, čo je ideálne pre konštrukciu rámu jazdného simulátora, kde je vysoký dôraz kladený na čo najlepšie prispôsobenie ovládacích prvkov užívateľovi. Použitím tohto systému je možno vytvoriť relatívne ľahkú a pevnú konštrukciu.



Navyše bolo zistené, že takéto systémy už boli využité pre konštrukciu jazdných simulátorov podobného typu. Sú to napríklad japonský Frex SimConMotion (ďalej len „Frex“) a španielsky Total spanish simulator (ďalej len „TSS“), ktoré sa stali hlavnou inšpiráciou pre môj dizajn (obr. 2.7, 2.8).



Obr. 2.7 Frex SimConMotion [18]



Obr. 2.8 Total spanish simulator [46]

2.4 RIEŠENIE DIZAJNU

2.4.1 PRVÝ KONCEPT

Na začiatku by som sa zamerlal na stacionárnu časť simulátora (predná časť, kde sú uchytené ovládacie prvky a obrazovka). Vychádzal som z príkladov simulátora TSS (obr. 2.9), avšak snažil som sa dosiahnuť väčšiu variabilitu pri zmene polohy ovládacích prvkov. Idea bola zabezpečiť nastavenie volantu, pedálov, prípadne obrazovky voči základnej polohe sedačky. Upravovať polohu sedačky voči ovládaciemu zariadeniu, podobne ako je tomu v skutočnom vozidle, by nebolo vhodné, nakoľko tá je spojená s pohybovým systémom.

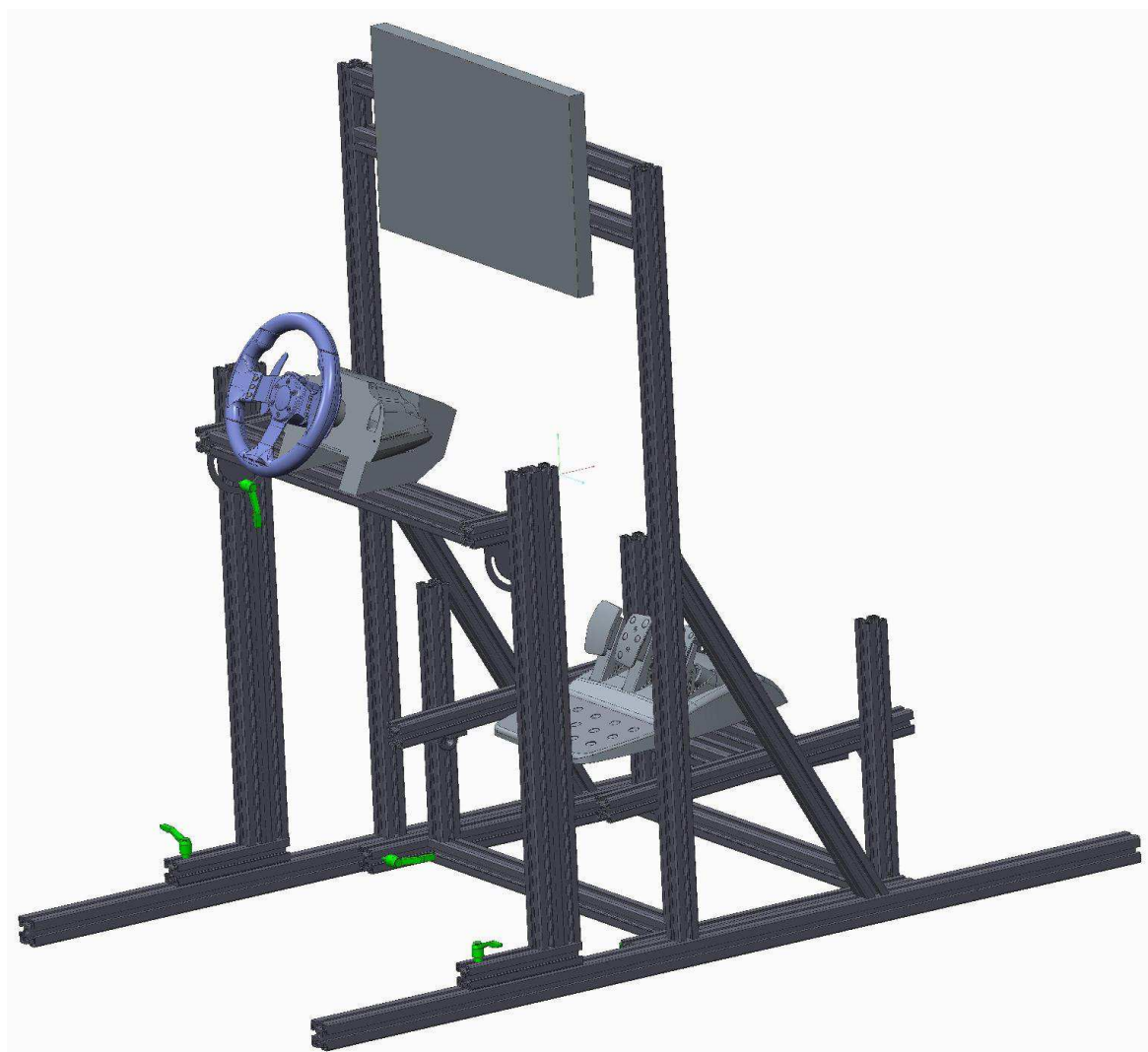
Na obr. 2.10 je znázornené prvé koncepčné riešenie. Jeho detaily sú vyobrazené na obr. 2.11, 2.12. Na obr. 2.13 je symbolizované polohovanie ovládacích prvkov. Nedostatky tohto riešenia sú nasledujúce:

- komplikované polohovanie pedálov – pre zmenu polohy je nutné povoliť a opäť utiahnuť štyri skrutky (vyžaduje náradie)
- nemožnosť polohovať obrazovku spolu s volantom
- veľa použitého materiálu (profilov)

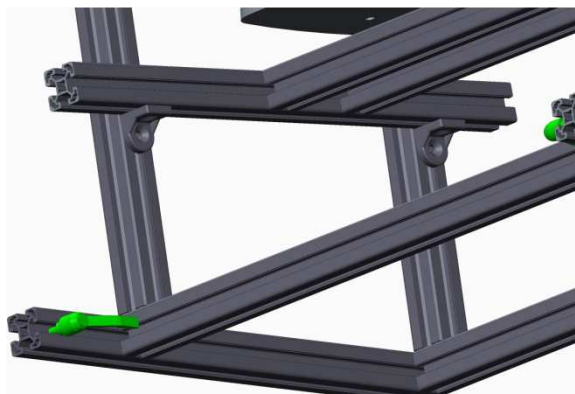
Modely profilov a prvkov firmy Rexroth som prevzal z internetu [48], pričom je zaručená zhodnosť s katalógovými rozmermi skutočných výrobkov. Modely volantu a pedálov som taktiež prevzal z internetu [23], a po doručení zakúpeného zariadenia som model volantu upravil podľa skutočných rozmerov. Model pedálov nebolo potrebné upravovať, nakoľko presne odpovedal zakúpenému typu.



Obr. 2.9 Total spanish simulator – ukážky [35, 46]



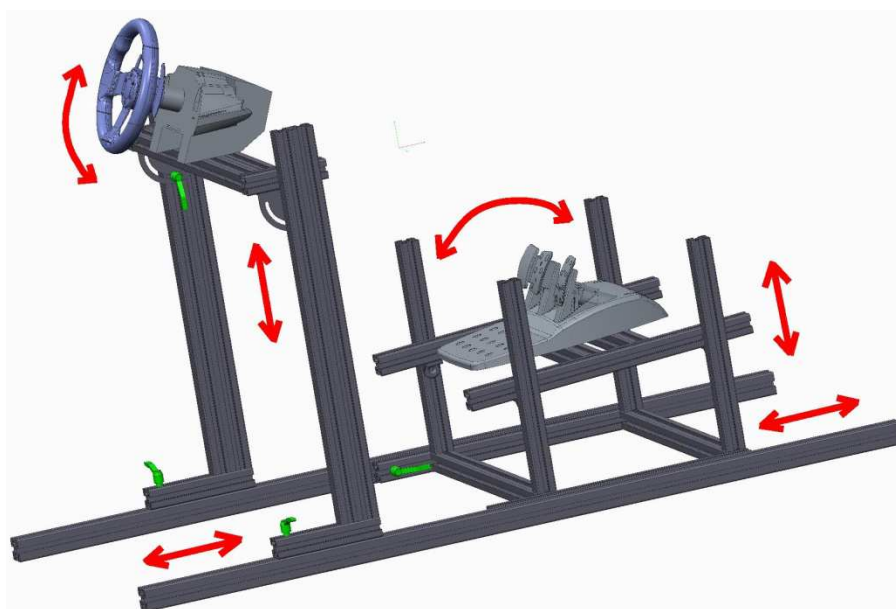
Obr. 2.10 Prvý koncepčný návrh stacionárnej časti simulátora



Obr. 2.11 Detail uchytenia pedálov



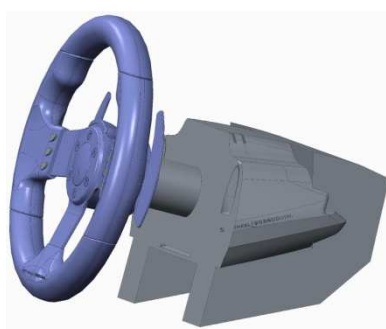
Obr. 2.12 Detail uchytenia volantu



Obr. 2.13 Polohovanie ovládacích prvkov



Obr. 2.14 Prevzatý model volantu [23]



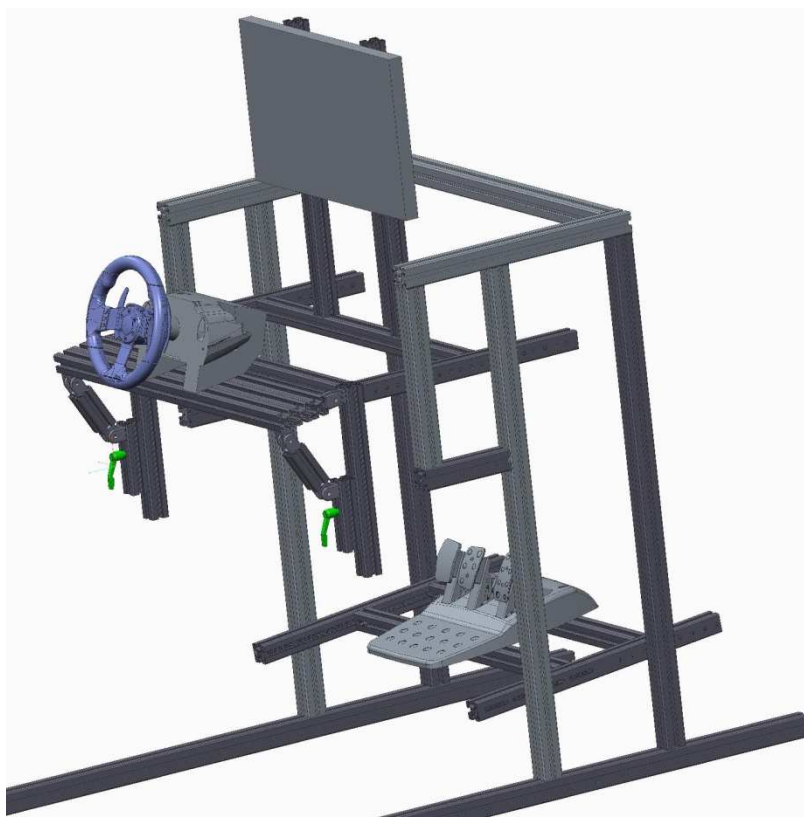
Obr. 2.15 Úprava prevzatého modelu podľa rozmerov zakúpeného zariadenia



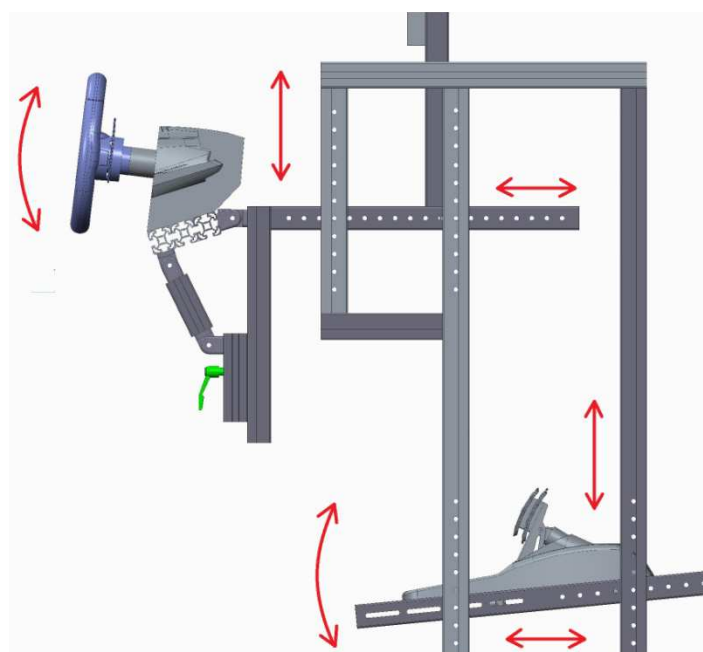
Obr. 2.16 Prevzatý model pedálov [23]



2.4.2 DRUHÝ KONCEPT



Obr. 2.17 Druhý koncepčný návrh stacionárnej časti simulátora



Obr. 2.18 Polohovanie ovládacích prvkov



Ako vidíme na *obr. 2.17*, u nasledujúceho konceptu došlo k výrazným zmenám. V prípade polohovania ovládacích prvkov som prešiel na systém upnutia pomocou dier a kolíkov, pričom zostala zachovaná variabilita nastavenia. Volant a pedále už nie sú uchytené na samostatných posuvných rámoch, ale na spoločnom nehybnom ráme. Obrazovka bola premiestnená zo samostatného rámu na polohovateľnú časť, ku volant. Tým je možné meniť jej polohu spolu s volantom, ale aj relatívne voči nemu. Ešte stále sa však vyskytujú určité nedostatky:

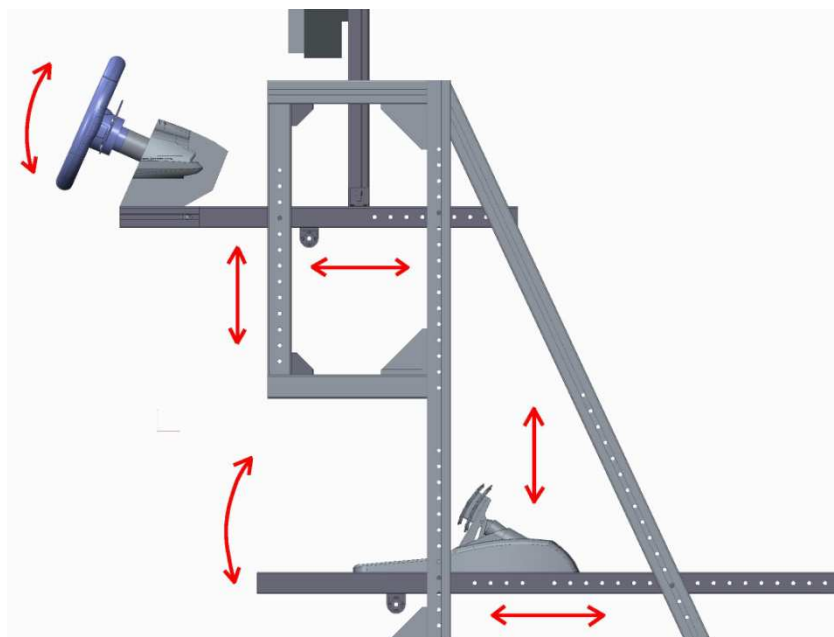
- aby bolo umožnené natočenie pedálov, boli vytvorené podlhovasté otvory, ktoré však nezabezpečovali dostatočnú variabilitu polohovania
- stále je tu určitý priestor na zjednodušenie konštrukcie a úsporu materiálu

2.4.3 FINÁLNE RIEŠENIE

Úpravou druhého konceptu bol vytvorený finálny návrh stacionárnej časti, ktorý je zobrazený na *obr. 2.19*. U pedálov boli podlhovasté otvory nahradené spojovacími prvkami, ktoré sa môžu posúvať v drážke profilu, a tým je zabezpečená dostatočná variabilita polohovania. Rovnaký systém bol následne aplikovaný aj na hornú časť s volantom a obrazovkou. Tým odpadla zložitá konštrukcia natáčania volantu, avšak teraz sa spolu s volantom natáča aj obrazovka. Aby bolo zaistené jej čo najkomfortnejšie natočenie k očiam užívateľa, navrhol som jej upnutie k profilom pomocou štandardizovaného držiaka (*obr. 2.21*), ktorý umožní jej naklopenie v rozsahu $\pm 15^\circ$.



Obr. 2.19 Finálny návrh stacionárnej časti simulátora



Obr. 2.20 Polohovanie ovládacích prvkov



Obr. 2.21 Držiak obrazovky [16]



Obr. 2.22 Kardanový kĺb firmy ML TUNING [30]

Postupne som stacionárnu časť dopĺňoval aj pohyblivou časťou simulátora. Nakoľko tá počas vývoja neprechádzala veľkými zmenami, uvediem na tomto mieste iba jej finálnu podobu.

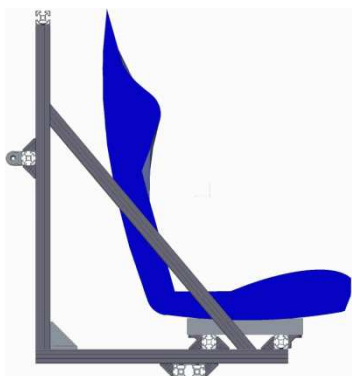
Na obr. 2.23 a 2.24 je sedačkový rám so sedačkou. Ak ho porovnáme napríklad so simulátorom Frex (obr. 2.7), vidíme, že je oproti nemu dosť masívny. Musíme si však uvedomiť, že v prípade Frex-u je rám tesne spojený so sedačkou. To je možné preto, že Frex nepoužíva sedačku s polohovateľným operadlom, ako je tomu v mojom prípade. Na umožnenie sklopenia operadla som teda musel ponechať určitý priestor medzi sedačkou a rámom (obr. 2.25) Maximálne sklopenie sedačky je využité pri polohe jazdca reprezentujúcej športové vozidlo. Pôvodne som pre vyobrazenie sedačky použil prevzatý model z internetu (obr. 2.26). Neskôr som tento model upravil podľa rozmerov zakúpenej sedačky (obr. 2.27), pričom smerodajná bola pre mňa šírka sedačky, na základe ktorej som stanovil výslednú šírku sedačkového rámu.



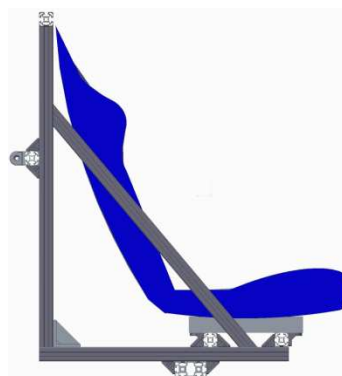
Obr. 2.23 Sedačkový rám – zozadu



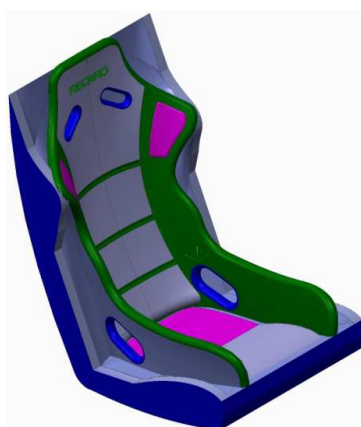
Obr. 2.24 Sedačkový rám – spredu



Obr. 2.25 Polohovateľnosť operadla sedačky



Obr. 2.26 Prevzatý model sedačky [24]



Obr. 2.27 Úprava prevzatého modelu podľa rozmerov zakúpenej sedačky

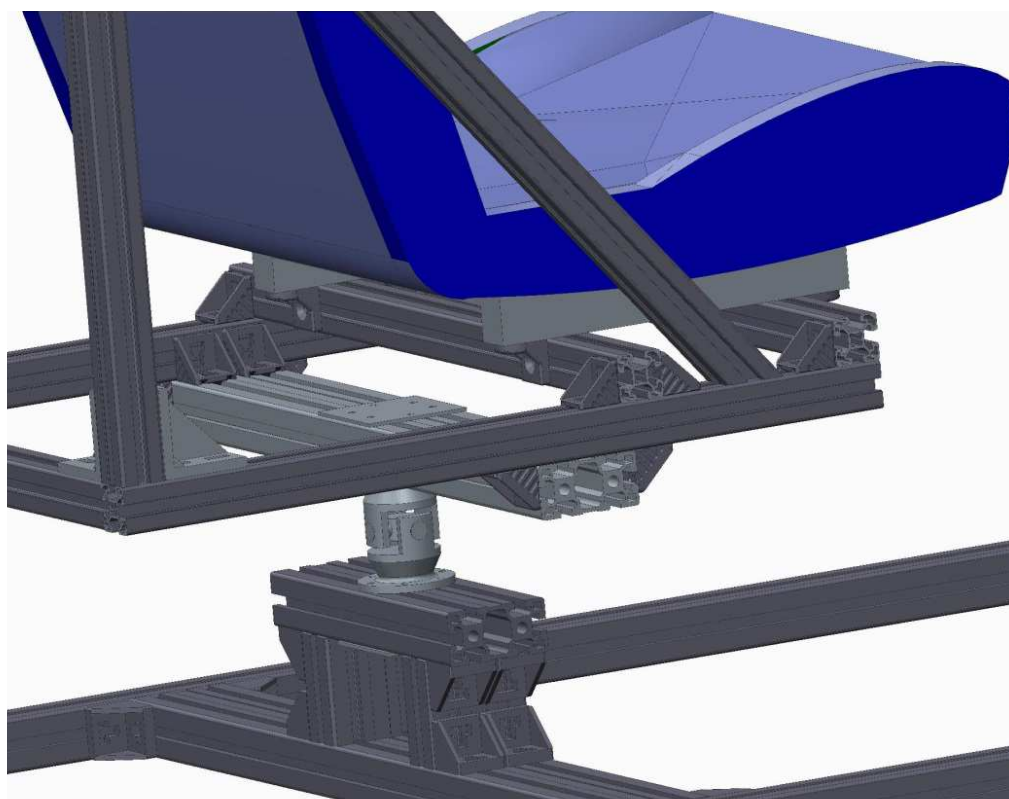


Obr. 2.28 Výsledný tvar reprezentujúci rozmery zakúpenej sedačky



Podľa analýzy existujúcich riešení sa ponúkajú dva bežné spôsoby realizovania väzby medzi sedačkou a základovým rámom, umožňujúcej žiadaný pohyb klopenia a klonenia. Jedným je použitie guľového kĺbu, teda sférickej väzby (napr. simulátor Frex), avšak tá by samotná poskytovala 3 stupne voľnosti a sedačka by okrem klopenia a klonenia mohla tiež rotovať okolo zvislej osi (takzvaný pohyb zatáčania). To je nežiaduce, pretože pomocou dvoch lineárnych aktuátorov na ramenách môžeme riadiť pohyb sedačky iba v dvoch osách a pohyb v tretej ose by ostal voľný. Dvoma aktuátormi by sme teda nedosiahli žiadaný výsledný pohyb a preto je potrebné zatáčaniu zabrániť. V prípade simulátora Frex, je rotácia zamedzená dvoma ťahadlami, umiestnenými medzi pohyblivým a základovým rámom.

Druhým riešením je použitie kardanového kĺbu (napr. simulátor Race2). Ten umožňuje sedačkovému rámu pohyb iba v dvoch osách, a teda nie sú potrebné žiadne prvky navyše. Preto som toto riešenie zvolil aj pre svoj návrh. Kardanový kĺb bude nakupovaná súčiastka a k základovému a sedačkovému rámu bude primontovaný pomocou skrutkových spojov. Nakoľko nebola vykonaná pevnostná analýza, nevolil som konkrétny produkt, avšak mojou predstavou boli výrobky firmy ML TUNING (obr. 2.22), alebo podobné. Vďaka adaptívnej konštrukcii je umožnená zmena polohy kĺbu voči sedačke (jazdcovi), aby bolo možné testovať, aký vplyv bude mať daná poloha na jazdcove pocity a vnímanie simulácie. Na obr. 2.29 je táto väzba znázornená vo svojej východiskovej polohe.

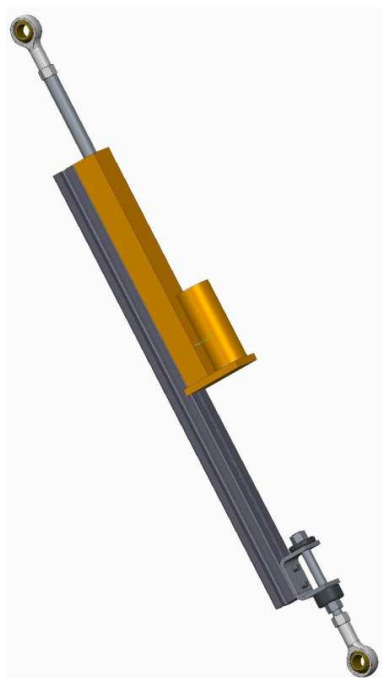


Obr. 2.29 Spojenie sedačkového rámu so základovým rámom pomocou kardanového kĺbu

Posledným prvkom pohyblivej časti simulátora sú ramená s aktuátormi, ktoré uvádzajú sedačkový rám do pohybu. Návrh ramien bol inšpirovaný simulátorom Frex. Rameno tvorí hliníkový profil, na ktorom je pripevnený lineárny aktuátor. K základovému a sedačkovému



rámu je rameno uchytené pomocou sférických väzieb v podobe kĺbových hlavíc. Upnutie spodnej hlavice k profilu ramena som navrhol podobne, ako v prípade Frex-u. Hlavica je naskrutkovaná na závitovú tyč, ktorá je následne maticami zaistená k držiaku z ohnutého plechu. Medzi maticami a držiakom sú umiestnené gumové elementy, ktoré majú za úlohu tlmiť rázy pri prudkom pohybe aktuátorov. Detail spodnej časti ramena je zobrazený na obr. 2.31. Vrchná hlavica je priskrutkovaná priamo k závitovému koncu piestnice aktuátora, čo býva časté štandardné riešenie u mnohých aktuátorov. Nakoľko som opäť nevolil konkrétne produkty, vytvoril som zjednodušené modely aktuátorov a modely kĺbových hlavíc som prevzal z internetu [22] a dodatočne upravil. Upnutie aktuátorov k profilom nie je riešené, nakoľko závisí od voľby konkrétneho aktuátora. Pre konkrétny návrh kĺbových hlavíc by bol potrebný výpočet únavovej bezpečnosti. Voľba aktuátorov vychádza z dynamiky pohybového systému. Tá je riešená v kapitole 2.6, avšak z dôvodu neznalosti konkrétnejších vstupov je táto analýza iba približná a je potrebný ešte ďalší výskum v tejto oblasti.

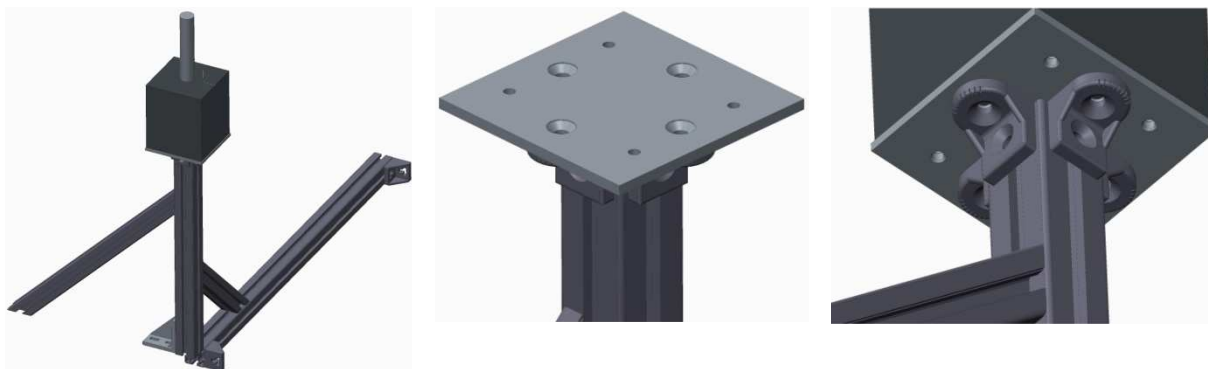


Obr. 2.30 Rameno s aktuátorom

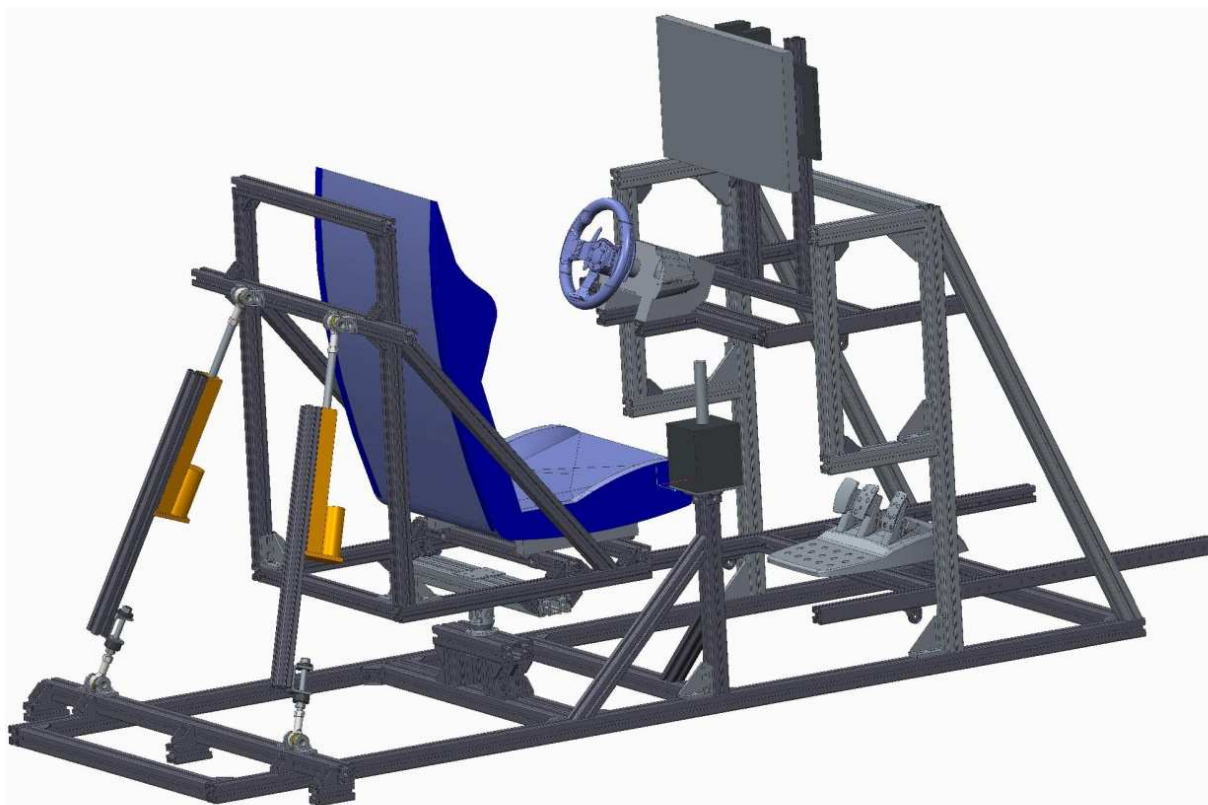


Obr. 2.31 Detail uchytenia kĺbovej hlavice

Nakoniec boli ovládacie prvky doplnené o radiacu páku, samostatne uchytenú k základovému rámu. Radiaca páka je uchytená štyrmi skrutkami k plechu, ktorý je následne pripevnený ďalšími štyrmi skrutkami, cez spojovacie prvky, k profilu (details na obr. 2.32). Jej poloha bola zvolená podľa bežného osobného vozidla, avšak muselo sa zaručiť, aby pri pohybe sedačkového rámu nedochádzalo medzi nimi ku kolízii. Preto bol 3D model vytvorený tiež ako pohyblivá zostava s limitovaným pohybom klopenia a klonenia v rozsahu $\pm 10^\circ$. Tento rozsah bol zvolený na základe dostupnej literatúry, kde sa uvádza, že „sedadlové“ simulátory disponujú rozsahom pohybu do 10° [39], resp. simulátory s fixnou polohou obrazovky vykonávajú pohyb klopenia a klonenia v rozmedzí približne $\pm 5^\circ$ [15]. Kompletná finálna zostava jazdného simulátora je zobrazená na obr. 2.33. Jej odhadovaná hmotnosť je cca 130kg. Maximálna dĺžka je 2600mm, maximálna šírka 1340mm a maximálna výška pre najvyššiu polohu volantu 1655mm.



Obr. 2.32 Uchytenie radiacej páky



Obr. 2.33 Kompletná zostava finálneho návrhu simulátora

Pre návrh konštrukcie boli použité profily a prvky podľa katalógu firmy Rexroth [9]. Ich zoznam pre finálny návrh sa nachádza v prílohe tejto práce. Pre kolmé spojovanie profilov sú uvažované spojovacie prvky typu „uholník“ („Bracket“) a „rýchlopínacia spojka“ („Quick connector“) tak ako sú vyznačené v modeli. Pre spojovanie profilov pod uhlom iným ako 90° sa použijú spojovacie prvky typu „rýchlopínacia spojka, ohybná“ („Quick connector, bendable“). Konce profilov sa môžu uzavrieť záslepkami podľa katalógu.

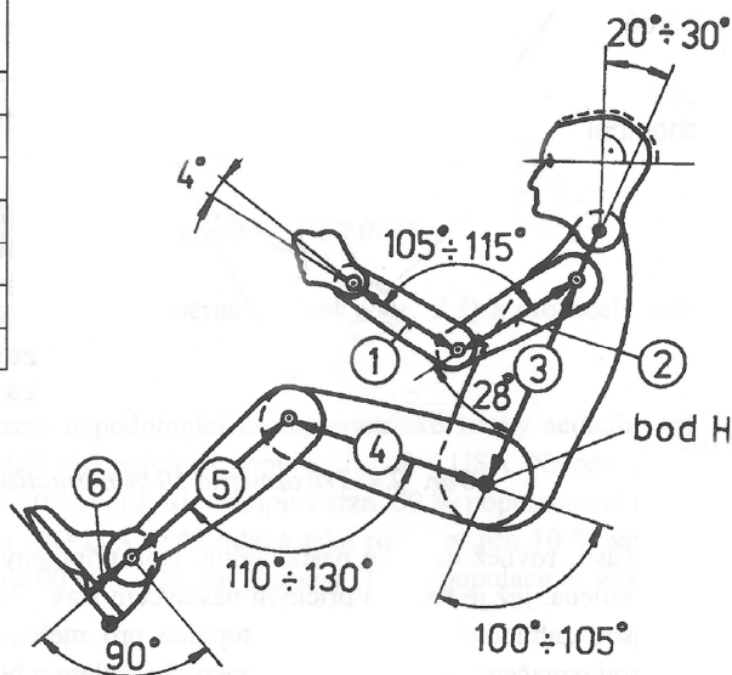
2.5 POLOHA UŽÍVATEĽA V SIMULÁTORE

Významnú úlohu pri návrhu simulátora hrá samozrejme aj ergonómia. Cieľom je zabezpečiť jeho pohodlné ovládanie pre osoby rôzneho vzrastu. Ako už bolo spomínané, snahou je prispôbiť ovládacie prvky a sedačku tak, aby užívateľ zaujal polohu charakteristickú pre osobné, nákladné a športové vozidlo. Každá z týchto polôh je reprezentovaná uhlami medzi jednotlivými časťami ľudského tela. Pre maximálne pohodlie je vhodné dodržiavať určité rozmedzie týchto uhlov, ktoré býva stanovené normami z oblasti ergonómie.

2.5.1 OSOBNÉ VOZIDLO

Ako základná poloha užívateľa v simulátore bola zvolená poloha reprezentujúca osobné vozidlo. Pre tento účel som vychádzal z noriem SAE J833a a VDI 2780 [50], ktoré udávajú odporúčané rozmedzie uhlov častí tela, a telesné rozmery pre kategórie 5% žena (5% žien je menších), 50% človek a 95% muž (5% mužov je väčších) – obr. 2.34. Za východiskovú som zvolil kategóriu 95% muža. V súlade s ňou som vytvoril antropometrický model, podľa ktorého som stanovil základné rozmiestnenie ovládacích prvkov. Volil som priemerné hodnoty uhlov z odporúčaného rozmedzia. Následne bol vytvorený model 5% ženy, a model, presahujúci rozmery 95% muža o rozdiel jeho rozmerov s 5% ženou. Tieto určujú rozsah vzrastu osôb od najmenšej po najväčšiu, pre ktoré je umožnené polohovanie ovládacích prvkov, pri zachovaní odporúčaných uhlov. Na obr. 2.35 – 2.37 sú znázornené polohy jazdca v simulátore, v reze, pre najmenšiu strednú a najväčšiu postavu s príslušným prispôbením volantu a pedálov.

rozměr (mm)	5 % žena	50 % člověk	95 % muž
1	210	237	264
2	236	268	301
3	401	447	493
4	357	404	452
5	418	476	535
6	102	107	120
výška	1500	1650	1849



Obr. 2.34 Rozmery figuríny a rozmedzie uhlov podľa odporúčania SAE J833a a VDI 2780 [50]



Obr. 2.35 Poloha jazdca charakterizujúca osobné vozidlo pre rozmery 95% muža



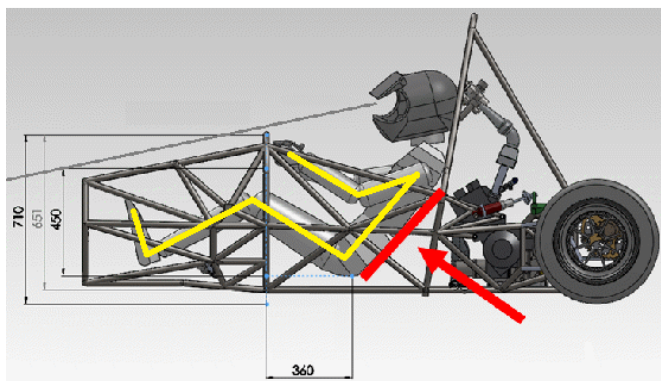
Obr. 2.36 Poloha jazdca charakterizujúca osobné vozidlo pre najmenšiu postavu (5% žena)



Obr. 2.37 Poloha jazdca charakterizujúca osobné vozidlo pre najväčšiu postavu

2.5.2 ŠPORTOVÉ VOZIDLO

Pre stanovenie polohy jazdca charakterizujúcej športové vozidlo som vychádzal z umiestnenia jazdca v závodnom vozidle Formula SAE. Pre tento účel som použil návrh spracovaný na univerzite v Queenslande [1], ktorý je zobrazený na obr. 2.38. Podľa tohto obrázku som v CAD softvéri Creo odmeral príslušné uhly medzi časťami tela, na základe ktorých som vytvoril antropometrické modely, s rovnakými rozmermi ako v prípade osobného vozidla. Po zacomponovaní modelov do simulátora sa ukázalo, že sklon trupu jazdca je pre danú konfiguráciu príliš veľký. Aby sa zbytočne nemusela predlžovať konštrukcia sedačkového rámu, bude sa uvažovať menší sklon trupu. Výsledné polohy jazdca v simulátore, v reze, pre najmenšiu strednú a najväčšiu postavu, s príslušným prispôbením ovládacích prvkov, sú uvedené na obr. 2.39 – 2.41.



Obr. 2.38 Formula SAE – vzor pre tvorbu antropometrických modelov [1]



Obr. 2.39 Poloha jazdca charakterizujúca športové vozidlo pre rozmery 95% muža



Obr. 2.40 Poloha jazdca charakterizujúca športové vozidlo pre najmenšiu postavu (5% žena)

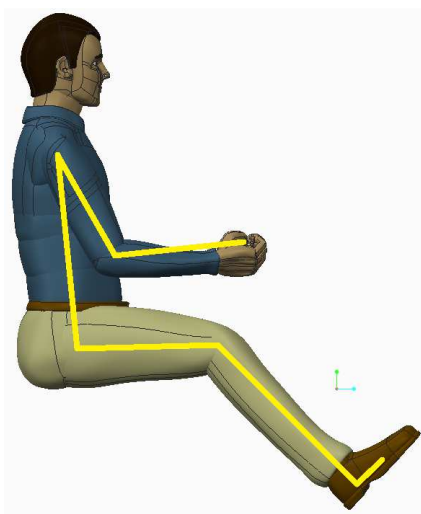


Obr. 2.41 Poloha jazdca charakterizujúca športové vozidlo pre najväčšiu postavu



2.5.3 NÁKLADNÉ VOZIDLO

Pre stanovenie polohy jazdca charakterizujúcej nákladné vozidlo som použil model figuríny priamo zo softvéru Creo, kde som z predvolených možností vybral polohu označenú ako „truck driver“ (vodič kamióna). Bohužiaľ, figurína s ktorou som pracoval neodpovedala rozmermi norme SAE J833a, či VDI 2780 a nemal som k dispozícii existujúcu knižnicu figurín. Preto som zvolil rovnaký postup ako v prípade športového vozidla, kde som odmeral patričné uhly a priradil ich rozmerom podľa spomínaných noriem. Opäť boli vytvorené tri antropometrické modely pre najmenšiu, strednú a najväčšiu postavu (obr. 2.43 – 2.45).



Obr. 2.42 Figurína zo softvéru Creo – vzor pre tvorbu antropometrických modelov



Obr. 2.43 Poloha jazdca charakterizujúca nákladné vozidlo pre rozmery 95% muža



Obr. 2.44 Poloha jazdca charakterizujúca nákladné vozidlo pre najmenšiu postavu (5% žena)



Obr. 2.45 Poloha jazdca charakterizujúca nákladné vozidlo pre najväčšiu postavu

2.6 SKÚMANIE OPTIMÁLNEJ POLOHY POHYBLIVÝCH RAMIEN

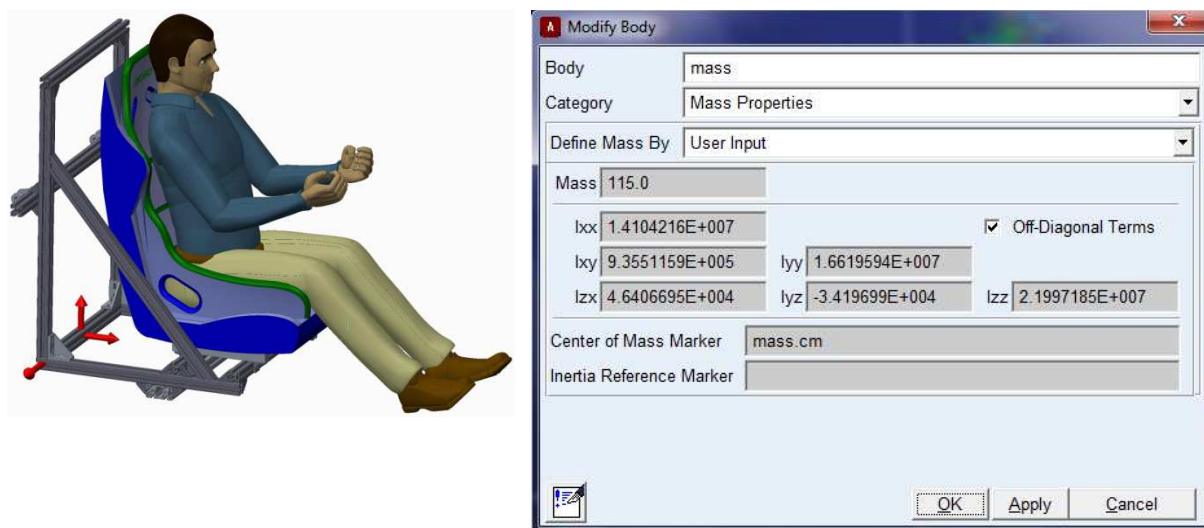
Pri návrhu pohyblivej časti simulátora sa naskytla otázka, ako vhodne umiestniť ramená s aktuátormi. Zjednodušene môžeme vychádzať z momentovej rovnováhy v rovine, kedy na otočenie telesa okolo daného bodu postačí menšia sila, ak je viac vzdialená od tohto bodu (stred rotácie). Ak však aktuátory umiestnime ďalej od kardanového kĺbu, budú musieť vyvodzovať väčšie rýchlosti pre uskutočnenie rovnakého koncového pohybu sedačkového rámu, čiže dosiahnutie rovnakej uhlovej rýchlosti.

Simulátor vykonáva pohyb zložený z dvoch rotácií okolo navzájom kolmých osí a tak sa situácia komplikuje. Preto som pre účely testovania dynamiky pohybového systému, pre rôzne polohy ramien, vytvoril jednoduchý parametrický model v softvéri MSC Adams. Jedná sa o softvér určený pre tvorbu a analýzu dynamických systémov s mnohými telesami (z angl. „MBS – Multibody system“), pracujúci na princípe numerických metód.

2.6.1 TVORBA MODELU V MSC ADAMS

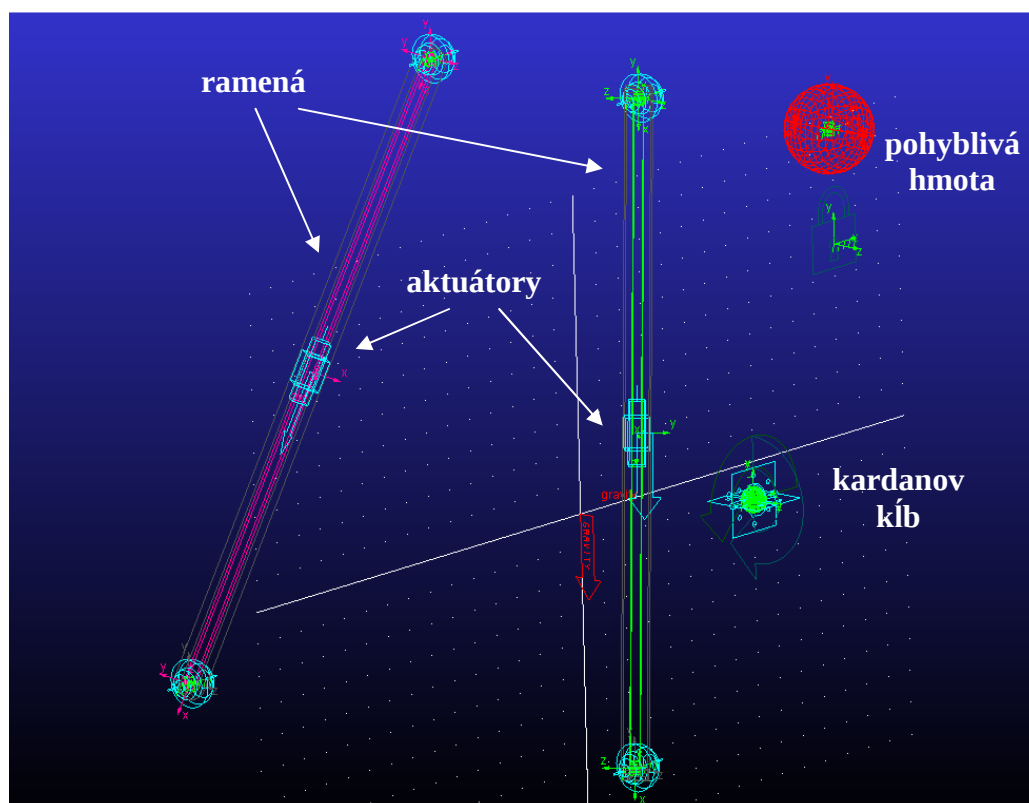
Snahou bolo vytvoriť model, ktorý by reprezentoval pohyblivú časť navrhovanej konštrukcie. Princíp spočíval v nahradení pohyblivej hmoty simulátora, ktorú tvorí sedadlový rám so sedadlom a jazdcom, jedným telesom s rovnakými vlastnosťami. Teleso v softvéri Adams je definované hmotnosťou a tenzorom zotrvačnosti. Pohyblivá hmota bola teda nahradená tuhým guľovým telesom (v Adamse označovanom ako „Sphere“), ktorému bola priradená hmotnosť a tenzor zotrvačnosti podľa 3D modelu z Crea (obr. 2.46). Hmotnosť činí 115kg.

Guľové teleso bolo prichytené k nehybnej časti modelovacieho prostredia – „zemi“ (v Adamse označovanom ako „ground“) pomocou sústavy dvoch rotačných väzieb („Revolute joint“), charakterizujúcich kardanov kĺb, a pomocou pohyblivých ramien. Ramená boli vytvorené z telies, ktoré sú v Adamse označované ako „Link“, pričom jedno reprezentovalo piestnicu aktuátora a druhé zvyšok ramena. Tieto telesá boli navzájom prepojené translačnou väzbou („Translational joint“). S guľovým telesom a zemou boli spojené sférickými väzbami („Spherical joint“).

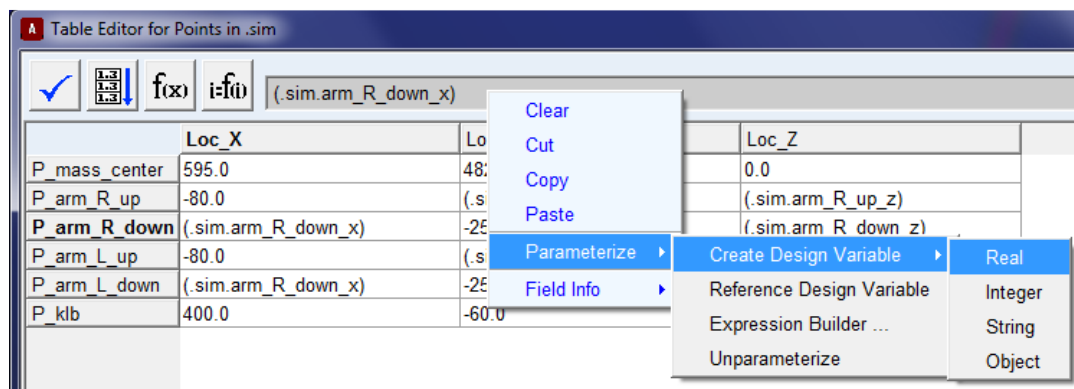


Obr. 2.46 Hmotnostné vlastnosti modelu z Crea boli priradené telesu v Adamse

Keďže išlo o testovanie rôznej polohy ramien, bolo dôležité, aby bol model ľahko modifikovateľný. Z toho dôvodu, som zvolil systém prichytávania telies pomocou vhodne umiestnených bodov. Vďaka tomu sa po zmene súradníc bodov automaticky mení poloha telies a väzieb. Aby bola modifikácia modelu ešte jednoduchšia, boli vybrané body symetricky parametrizované (obr. 2.48).



Obr. 2.47 Model pohyblivej časti simulátora v MSC Adams



Obr. 2.48 Parametrizácia bodov

2.6.2 RIEŠENIE INVERZNEJ KINEMATICKEJ ÚLOHY

Po zostavení modelu bolo mojou snahou uviesť ho do pohybu a následne skúmať sily a rýchlosti potrebné na jeho dosiahnutie. Pohyb modelu je možné vyvolať generátormi pohybu („motion generator“), umiestnenými vo väzbách. Pre simulovanie činnosti aktuátorov som umiestnil generátory pohybu do translačných väzieb. Je zjavné, že ak sa zmení poloha ramien, musia tieto generátory vykonávať iný pohyb, na dosiahnutie rovnakého výsledného pohybu hmoty, reprezentovanej guľovým telesom. Je teda potrebné najskôr stanoviť koncový pohyb a následne zistiť, ako definovať generátory v translačných väzbách na jeho dosiahnutie. Jedná sa teda o riešenie inverznej kinematickej úlohy.

Na určenie koncového pohybu boli ďalšie generátory aplikované do rotačných väzieb. Tu sa však stretávame s problémom, akú podobu má tento pohyb mať. Simulátor počas svojej prevádzky vykonáva zložitý pohyb, ktorý charakterizuje správanie sa vozidla pri jazde. Presvedčivé odladenie pohybového systému vyžaduje rozsiahly výskum a dávku skúseností a je tajomstvom úspechu každého výrobcu jazdných simulátorov. V tejto fáze nemáme dostatočné znalosti o tejto problematike a preto bol po dohode s vedúcim práce pre tento účel zvolený harmonický pohyb klopenia a klonenia. Jeho parametre som volil podľa dostupných informácií o pohybových systémoch existujúcich simulátorov. Ako som uvádzal v kapitole 2.4.3, maximálny rozsah rotácii okolo východiskovej polohy som zvolil na $\pm 10^\circ$. Táto hodnota teda udávala amplitúdu harmonického pohybu. Aby som dosiahol podobné uhlové rýchlosti, ako udávajú výrobcovia u simulátorov zmieňovaných v rešeršnej časti práce, zvolil som frekvenciu pohybu 1Hz. Pre vytvorenie oddeleného pohybu klopenia a klonenia v rámci jednej simulácie, som definoval pohyb generátorov podľa nasledujúcich funkcií:

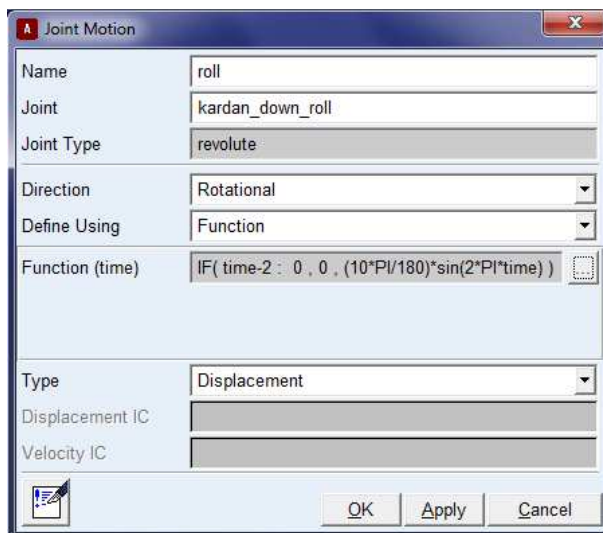
- generátor klopenia: $IF(time-2 : (10*PI/180)*sin(2*PI*time) , 0 , 0)$
- generátor klonenia: $IF(time-2 : 0 , 0 , (10*PI/180)*sin(2*PI*time))$

To znamená, že počas prvých dvoch sekúnd simulácie sa vykonajú dva kmity klopenia, a zároveň generátor klonenia udržiava príslušnú rotačnú väzbu nehybnú. Po uplynutí dvoch sekúnd sa úlohy generátorov vymenia. Ak nastavíme celkový čas simulácie na štyri sekundy, vykonajú sa následne dva kmity klonenia.

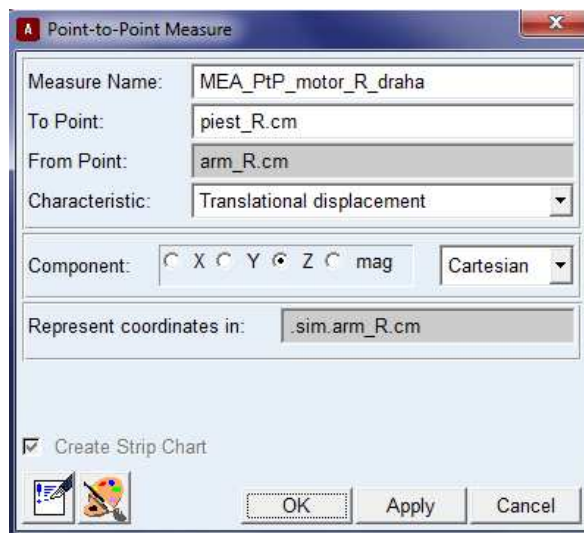
Na meranie kinematických a dynamických veličín počas simulácie slúžia meracie prvky („measure“). Aby som zistil pohyb ramien, vytvoril som meracie prvky typu „point-to-point“



(z bodu do bodu), ktoré sledovali relatívny posuv ťažiskových „markrov“ prvkov „link“, reprezentujúcich piestnice aktuátorov, voči ťažiskovým „markrom“ prvkov „link“, reprezentujúcich zvyšok ramien. Inými slovami boli merané zdvihy aktuátorov. Ukážka definovania meracieho prvku na pravom ramene je na obr. 2.50.



Obr. 2.49 Ukážka definovania generátora v rotačnej väzbe



Obr. 2.50 Ukážka definovania meracieho prvku na pravom ramene

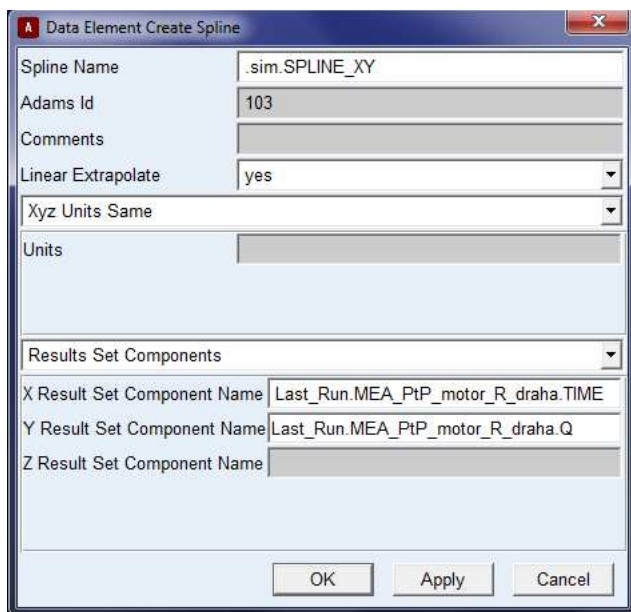
Potom bola vykonaná simulácia, za účelom zistenia pohybu ramien. Čas simulácie bol nastavený na 4s a počet krokov na 400. Pred spustením simulácie bola vykonaná verifikácia modelu samotným programom, ktorá prebehla úspešne. Neboli zistené žiadne nadbytočné väzby a boli potvrdené 2 stupne voľnosti systému.

Dáta získané z meracích prvkov bolo potrebné previesť do podoby vhodnej pre definovanie pohybového generátora. Za týmto účelom bol vytvorený element splajnu, ako je zobrazené na obr. 2.51. Tento element obsahuje dáta získané z výsledkov simulácie daného meracieho prvku („Result set component“). Pohyb generátorov na ramenách bol následne definovaný funkciou v tvare:

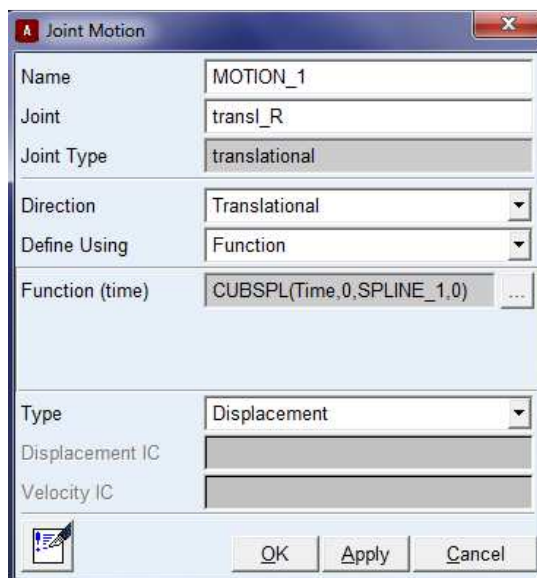
- *CUBSPL(1. nezávislá premenná, 2. nezávislá premenná, názov splajnového elementu, derivačný rád)*

Táto funkcia na báze kubického splajnu interpoluje dáta (body) splajnového elementu. Jedinou nezávislou premennou je v tomto prípade čas. Ukážka zadefinovania translačného pohybového generátora je na obr. 2.52.

Pred opätovným spustením simulácie boli deaktivované pohybové generátory na rotačných väzbách kardanového kĺbu a v činnosti zostali iba generátory reprezentujúce aktuátory. Teraz je už možné skúmať sily, ktoré tieto generátory vyvodzujú. Nakoľko vstupy pre túto simuláciu vychádzajú z výstupov predchádzajúcej simulácie, je potrebné zadať rovnaký čas a počet krokov. Boli ponechané východiskové nastavenia simulácie. Bol zvolený dynamický integrátor GSTIFF pre numerické riešenie diferenciálnych a algebrických rovníc.



Obr. 2.51 Ukážka tvorby elementu splajnu



Obr. 2.52 Ukážka definovania generátora v translačnej väzbe

Okrem síl a rýchlostí sa ponúkala možnosť odmerať tiež maximálny zdvih aktuátorov. Ten však nemôžeme merať pre vyššie popísaný pohyb, pretože v skutočnosti môže dochádzať ku klopeniu a kloneniu zároveň. Zotrvačné sily vo vozidle vychádzajú z kontaktu medzi pneumatikou a vozovkou. Zo smerovej stability vyplýva, že ak nemá dôjsť ku šmyku, nesmie geometrický súčet pozdĺžnych a bočných síl prekročiť určitú hodnotu, ktorá závisí na príľnavosti. Ak predpokladáme rovnakú príľnavosť pneumatiky v pozdĺžnom aj bočnom smere, je táto hranica určená kružnicou (Kammova kružnica príľnavosti) [49]. Z toho sa dá vyvodiť, že aj hranica výslednej zotrvačnej sily, ktorá pôsobí na človeka tvorí kružnicu, a teda hranica pohybu simulátora bude tiež opisovať kružnicu. Preto pohyb pre zistenie maximálneho zdvihu aktuátorov definujeme nasledujúcimi funkciami:

- generátor klopenia: $(10 \cdot \pi / 180) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \text{time})$
- generátor klonenia: $(10 \cdot \pi / 180) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \text{time})$

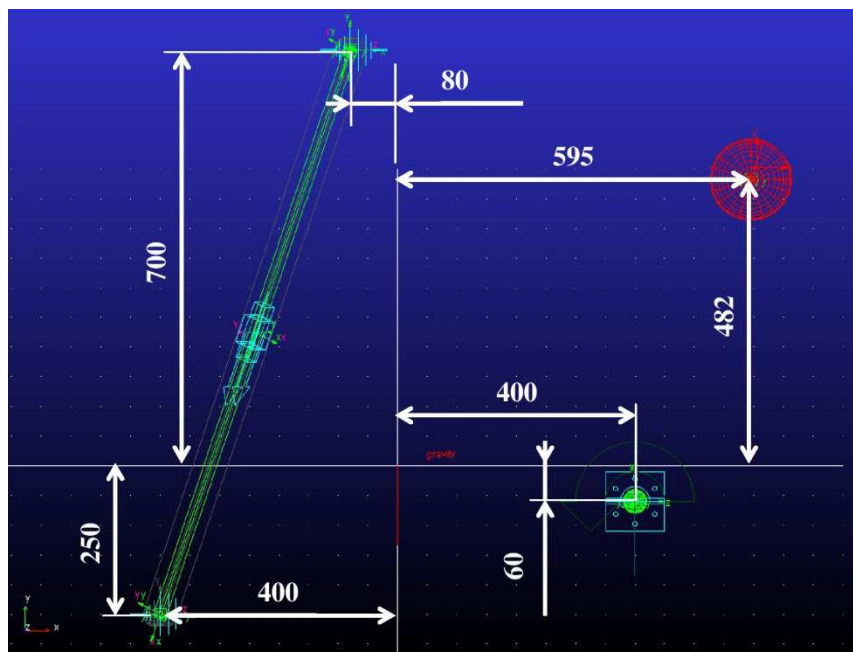
Následne vykonáme simuláciu a určíme zdvih pomocou meracích prvkov.

2.6.3 VÝSLEDKY ANALÝZ

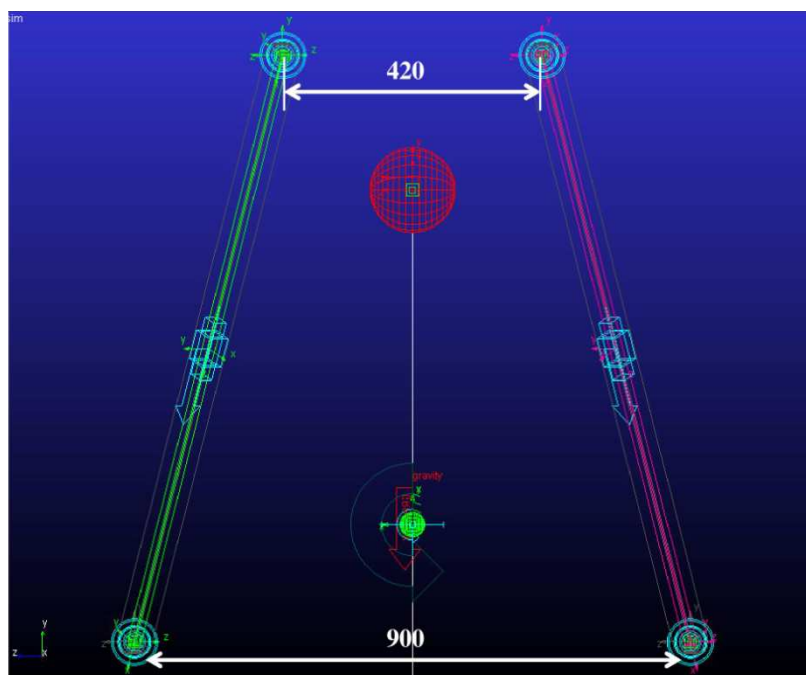
Pre úvodnú analýzu bola stanovená poloha ramien odhadom podľa existujúcich simulátorov. Jednotlivé rozmery sú zakreslené na obr. 2.53, 2.54. Pre túto konfiguráciu bol zaznamenaný časový priebeh sily, rýchlosti a výkonu pre generátor pohybu na pravom ramene. Keďže model aj jeho pohyb bol symetrický, stačilo skúmať veličiny iba na jednom ramene. Taktiež je na obr. 2.55 a obr. 2.56 uvedený časový priebeh uhlovej rýchlosti a translačného zrýchlenia, pre guľové teleso. Tu je potrebné zdôrazniť, že pohyb, tak ako bol definovaný, nie je spojitý. V mieste prechodu medzi pohybom klopenia a klonenia je veľká nespojitosť, ktorá sa následne prejavuje aj v grafoch. Táto skutočnosť však účelu analýzy neprekáža a oblasť v okolí 2s budeme ignorovať. Takisto si nebudeme všimnúť lokálne



výpočtové chyby na začiatku simulácie, spôsobené iteračnými procesmi daného integrátora. Maximálna uhlová rýchlosť teda predstavuje približne $63^\circ \cdot s^{-1}$, čo zhruba odpovedá simulátorom v rešeršnej časti. Maximálne zrýchlenie hmoty činí $4m \cdot s^{-1}$. Maximálny výkon, ktorý je k danému pohybu potrebný je 250W (obr. 2.58).



Obr. 2.53 Konfigurácia ramien pre úvodnú analýzu a poloha ostatných prvkov

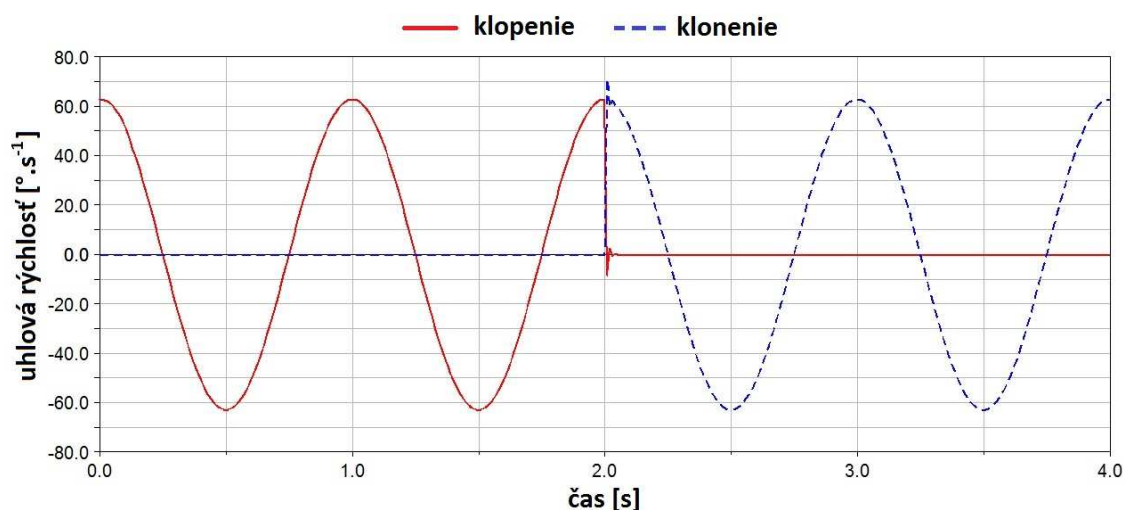


Obr. 2.54 Konfigurácia ramien pre úvodnú analýzu

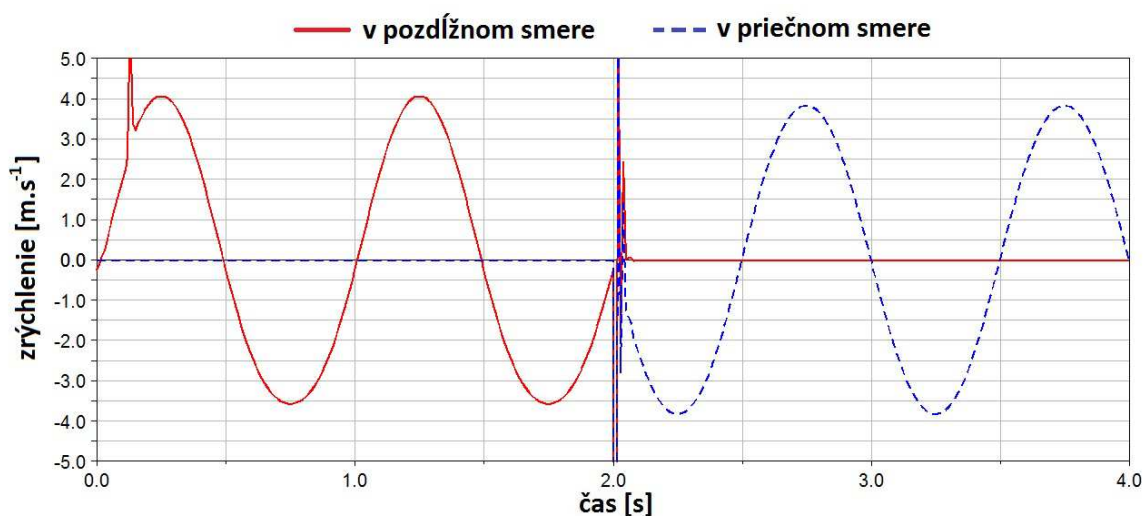


Z obr. 2.57 vidno, že pre pohyb klopenia je potrebná menšia maximálna sila ako v prípade klonenia, avšak naopak väčšia maximálna rýchlosť. Táto situácia nie je vhodná, pretože daný aktuátor je v skutočnosti limitovaný maximálnymi rýchlosťami, ktoré môže vyvolať a maximálnymi silami, ktorými môže byť zaťažený. Ak by sa volil aktuátor na základe tejto analýzy, musel by byť schopný vyvolať maximálnu rýchlosť zhruba $0,75\text{m.s}^{-1}$ a v inom okamihu zase zniesť a vyvolať silu približne 840N , avšak čím vyššie nároky tým robustnejšia a ťažšia konštrukcia aktuátora. Preto bolo mojou snahou nájsť vhodnejšie usporiadanie ramien, pri ktorom by boli sily a rýchlosti pri klopení a klonení viac vyrovnané.

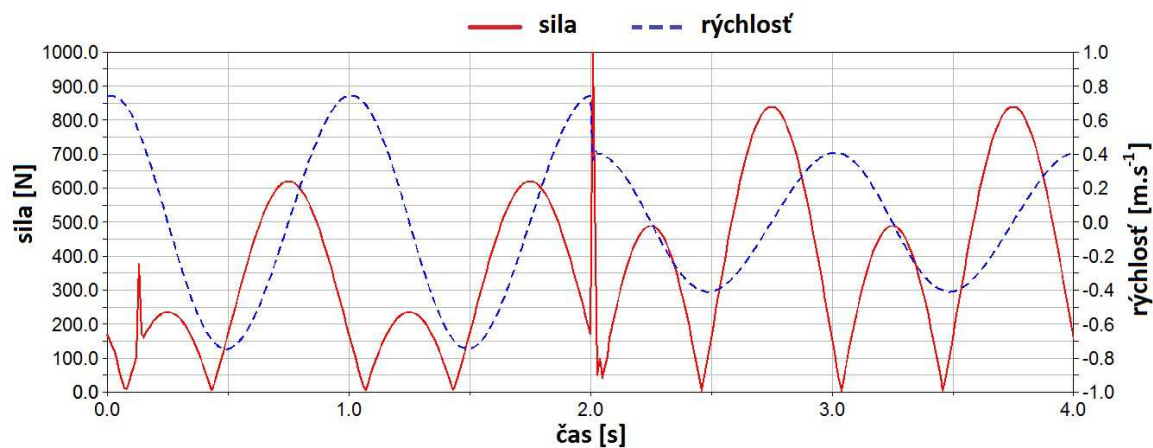
Okrem zaťaženia aktuátorov si však musíme všimnúť aj zaťaženie kardanového kĺbu. Podľa obr. 2.59 vidíme, že pri pôvodnom nastavení ramien bola maximálna sila vo väzbe kĺbu približne 2500N . Pre novú konfiguráciu je to zhruba 2850N , čo je nárast o $12,3\%$. Záležalo by na pevnostnej analýze pre daný kĺb, či je takýto rozdiel podstatný.



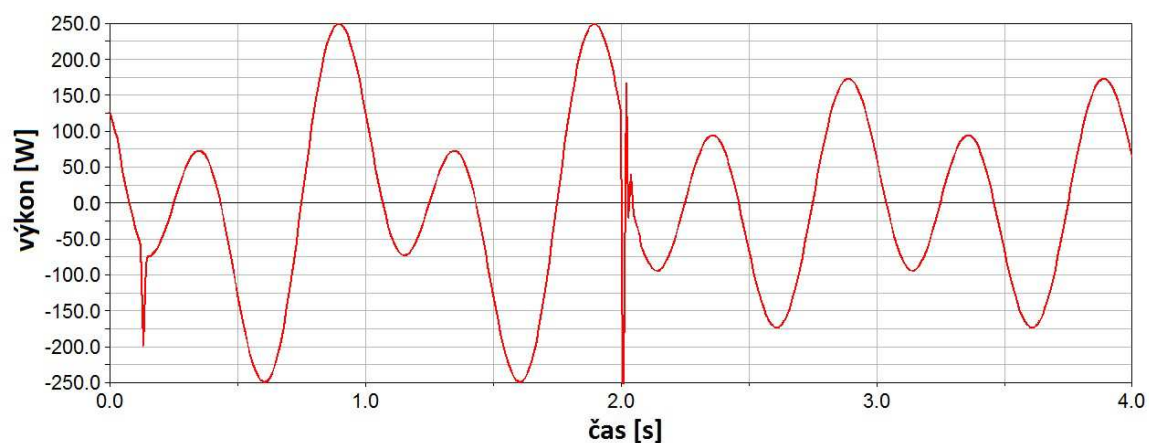
Obr. 2.55 Časový priebeh uhlovej rýchlosti pohyblivej hmoty



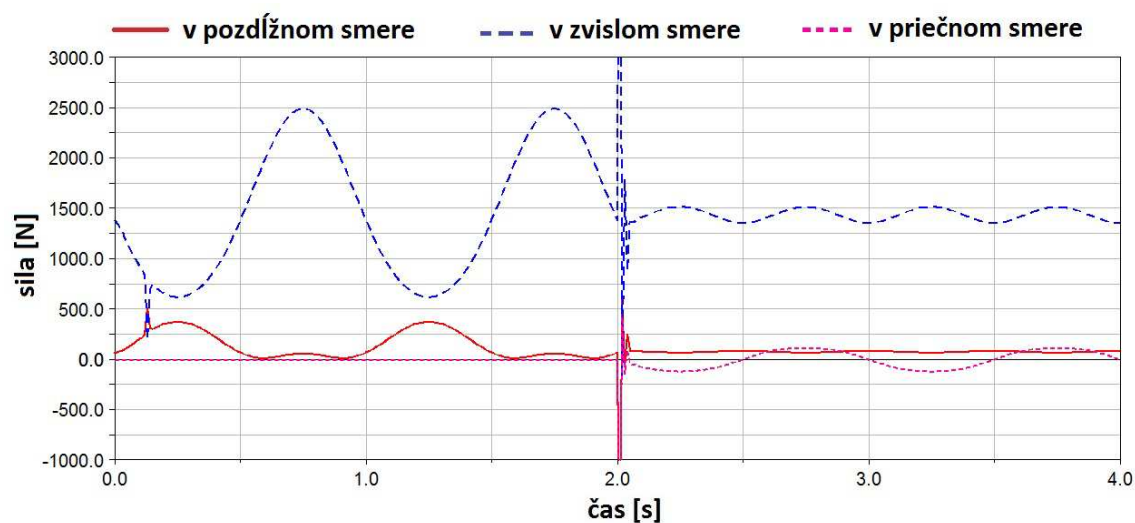
Obr. 2.56 Časový priebeh zrýchlenia pohyblivej hmoty



Obr. 2.57 Časový priebeh sily a rýchlosti na pravom aktuátore, pre úvodnú konfiguráciu ramien



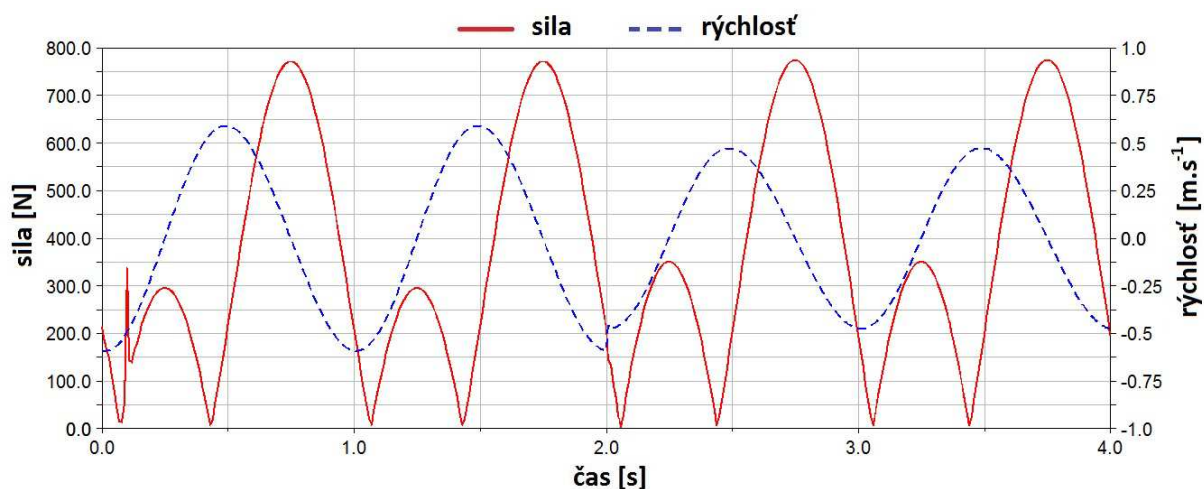
Obr. 2.58 Časový priebeh výkonu pravého aktuátora, pre úvodnú konfiguráciu ramien



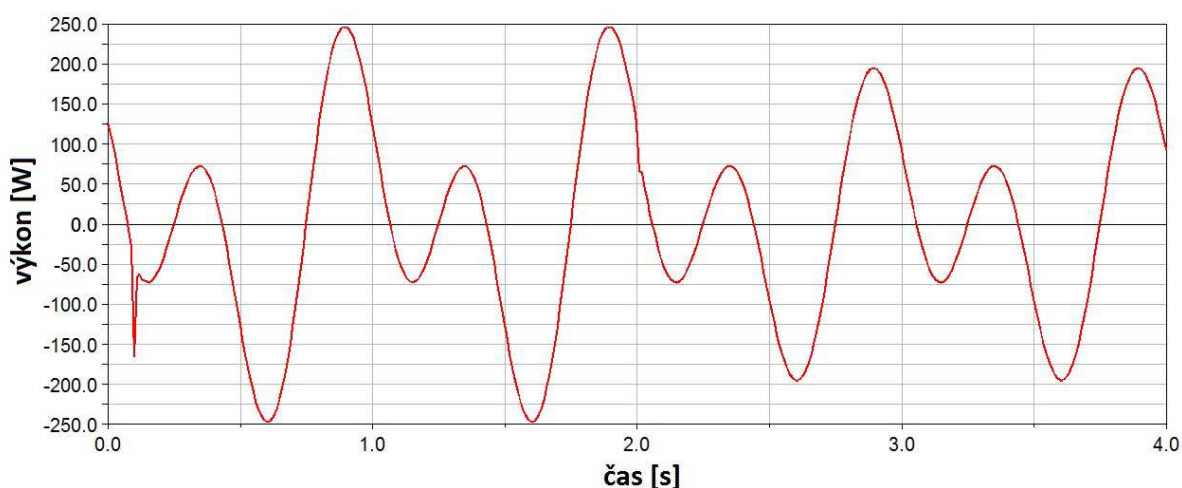
Obr. 2.59 Časový priebeh zložiek sily zaťažujúcej kardanový kĺb, pre úvodnú konfiguráciu ramien



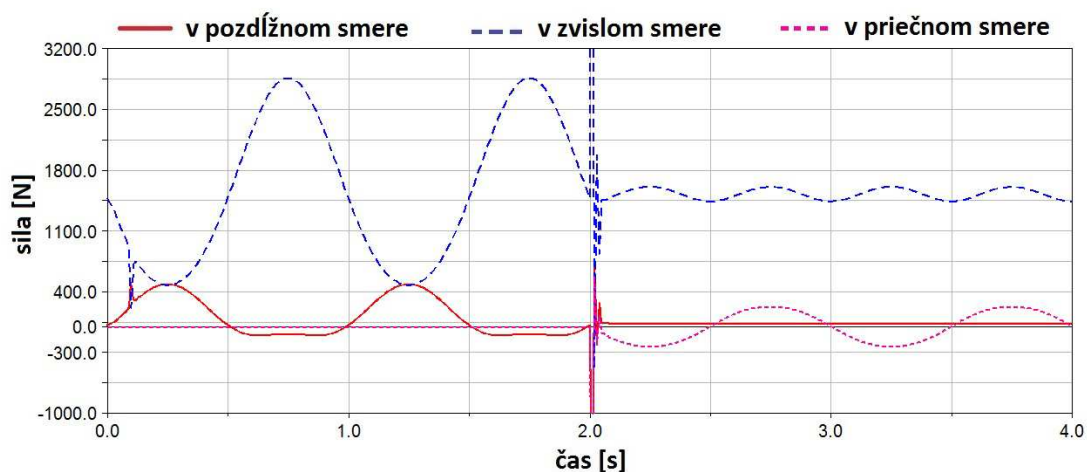
Nakoľko aktuátory používané u podobných simulátorov (napr. Race2) disponujú rýchlosťami okolo $0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, zameral som sa primárne na zníženie maximálnej rýchlosti. Postupoval som preto smerom posúvania upínacích bodov, v ktorých motory pôsobia na sedačkový rám, smerom dolu, a teda bližšie k stredu rotácie. Postupne som menil sklon ramien a laterálnu vzdialenosť od osi symetrie, až som sa dopracoval do stavu, v ktorom maximálna rýchlosť dosahovala okolo $0,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, a maximálna sila približne 775N . Dosiahol som teda zníženie maximálnej rýchlosti o cca 20% oproti východiskovému stavu a zároveň mierne zníženie maximálnej sily (o cca 7,7%). Dá sa povedať, že znižovanie maximálnej rýchlosti znamená predovšetkým skracovanie ramien. Musíme dať pozor na to, aby sa daná konfigurácia dala zrealizovať, teda aby ostal priestor na osadenie konkrétneho aktuátora.



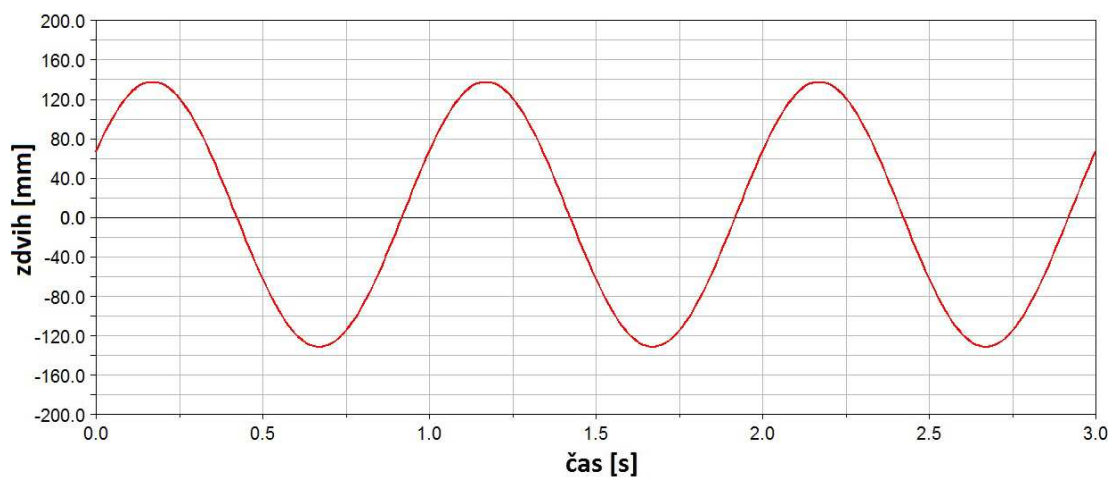
Obr. 2.60 Časový priebeh sily a rýchlosti na pravom aktuátore, pre finálnu konfiguráciu ramien



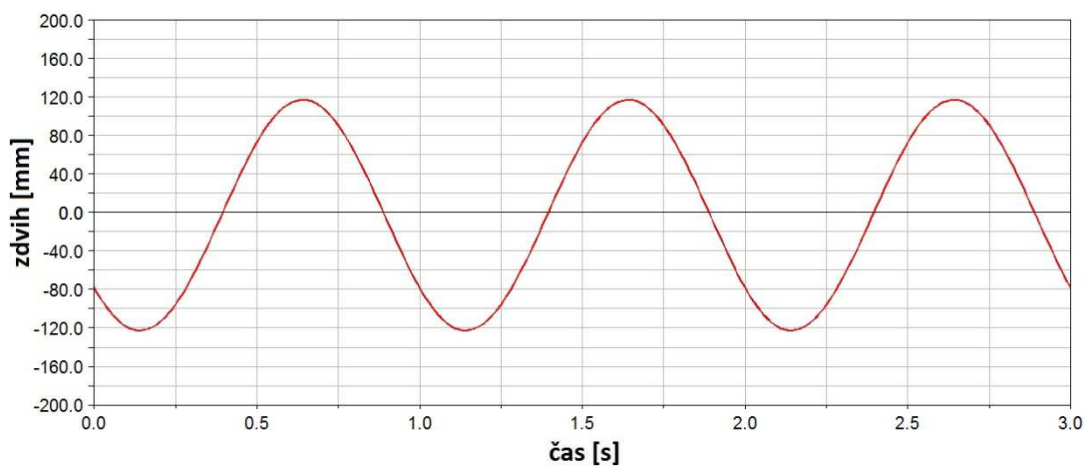
Obr. 2.61 Časový priebeh výkonu pravého aktuátora, pre finálnu konfiguráciu ramien



Obr. 2.62 Časový priebeh zložiek sily zaťažujúcej kardanový kĺb, pre finálnu konfiguráciu ramien



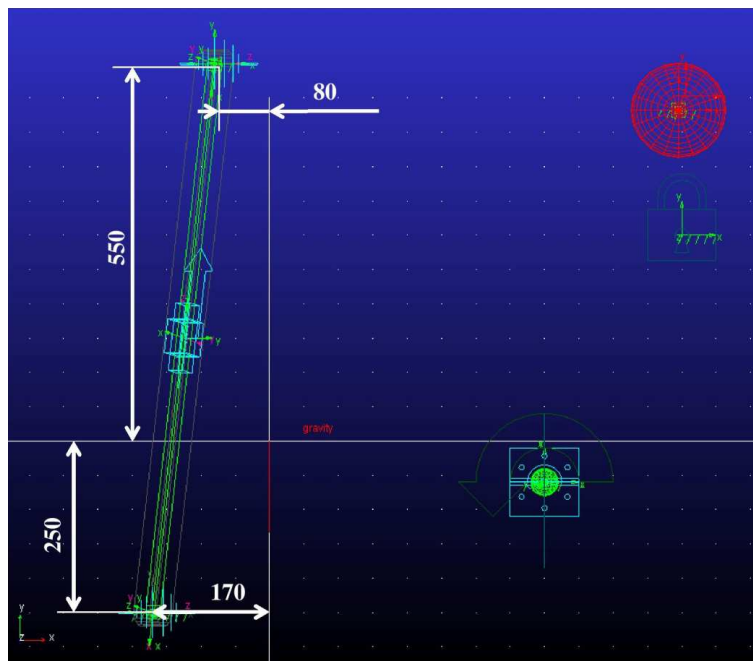
Obr. 2.63 Časový priebeh zdvihu pravého aktuátora pre úvodnú konfiguráciu ramien



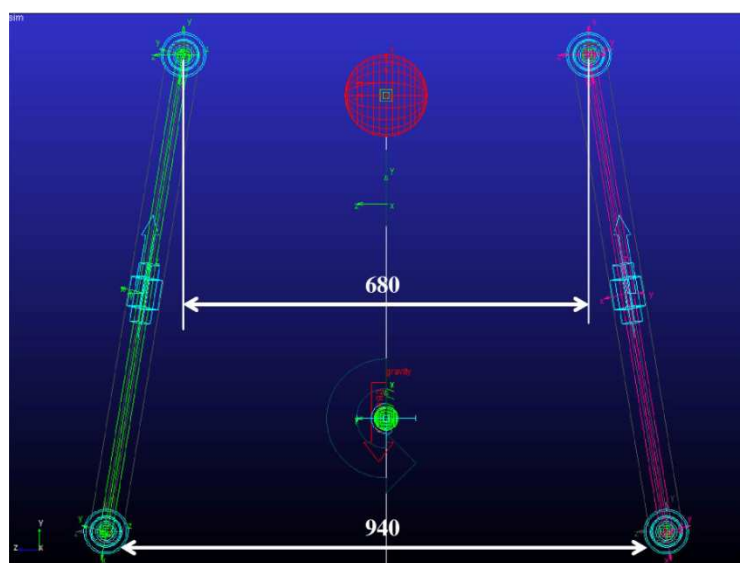
Obr. 2.64 Časový priebeh zdvihu pravého aktuátora pre finálnu konfiguráciu ramien



Na záver je potrebné dodať, že celá analýza je iba približná, z dôvodu spomínanej neznalosti správneho pohybu. Konkrétne hodnoty nemôžeme brať ako finálne, avšak pre účely testovania vhodnej konfigurácie ramien nám ide skôr o sledovanie pomerov medzi nimi. Analýza poskytuje určité východiskové riešenie umiestnenia ramien a konštrukcia je navrhnutá tak, aby bolo možné toto nastavenie v prípade potreby meniť v určitom rozsahu. Tiež je dôležité podotknúť, že analýza bola vykonávaná pre danú pozíciu kardanového kĺbu. Nakoľko tá ovplyvňuje užívateľove pocity zo simulácie jazdy, jej zmena sa nedá testovať len vo virtuálnom prostredí, ale sú potrebné informácie z reálnych experimentov.



Obr. 2.65 Konfigurácia ramien pre finálnu analýzu



Obr. 2.66 Konfigurácia ramien pre finálnu analýzu



Aj keď táto problematika dynamiky a odladenia pohybového systému simulátora ešte vyžaduje značný výskum, táto práca poskytuje funkčný model na jej budúce testovanie. Po vložení relevantnejších vstupov, získaných napríklad z experimentov na reálnom vozidle, je výstupy možné použiť pre voľbu vhodných aktuátorov, alebo do pevnostnej analýzy.

Na obr. 2.69 je znázornená finálna zostava pre novú konfiguráciu ramien. Prípadná zmena celkovej dĺžky ramien je uvažovaná tak, že sa k navrhnutým profilom napoja ďalšie profily pomocou „koncových spojok“ (podľa katalógu [9]), aby bola dosiahnutá požadovaná dĺžka.



Obr. 2.67 Úvodná konfigurácia ramien



Obr. 2.68 Finálna konfigurácia ramien



Obr. 2.69 Kompletná zostava návrhu simulátora pre finálnu konfiguráciu ramien



3 NÁVRH ROZHRAINIA MEDZI HARDVÉROM A SOFTVÉROM

Druhým cieľom tejto práce bolo sprostredkovať prepojenie medzi ovládacím ústrojenstvom simulátora (volant, pedále a rýchlostná páka) a počítačom na prácu v reálnom čase (ďalej len „RTC“ – z angl. „real-time computer“). Nakoľko zakúpené zariadenie v danom čase nebolo schopné komunikovať s RTC, ale iba s osobným počítačom (ďalej len „PC“) prostredníctvom USB rozhrania a ovládačov kompatibilných s Microsoft Windows, bolo pre účely mojej práce nahradené jednoduchým zariadením vytvoreným na UADI (*obr. 3.1*). Toto zariadenie pozostáva z otočných a posuvných potenciometrov a spínačov, napájaných z elektrickej siete. Udávaný rozsah potenciometrov je 0 – 9V a zopnutý spínač dodáva na výstup napätie 5V. Otočné potenciometre nahradili volant a tri pedále, a spínač simuloval dvojstupňovú prevodovku, pričom vypnutý znamenal zaradenie prvého rýchlostného stupňa a zapnutý zaradenie druhého rýchlostného stupňa. Cieľom bolo simulovať natočenie volantu, mieru stlačenia jednotlivých pedálov, radenie medzi prvým a druhým rýchlostným stupňom a výsledky graficky zobrazovať v reálnom čase na obrazovku PC.

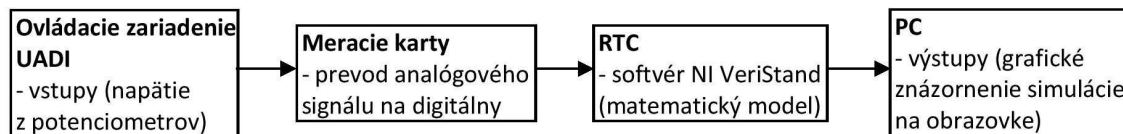
RTC bol zvolený z toho dôvodu, že klasický osobný počítač s operačným systémom Microsoft Windows pracuje naraz s dátami z viacerých zdrojov (aplikácii), pričom priorita spracovania týchto dát sa v čase mení, a teda pre danú aplikáciu by nedokázal udržať konštantnú frekvenciu spracovávaní dát - konštantný krok simulácie. RTC túto nevýhodu nemá, pretože používa vlastný operačný systém a rieši v čase iba tú úlohu, ktorú mu užívateľ zadá. Konkrétne sa jedná o zariadenie od spoločnosti National Instruments, s označením NI 3110. Disponuje 1,66 GHz procesorom Intel Core Duo, pamäťou RAM s kapacitou 1GB a pevným diskom s kapacitou 80GB [34]. Ovládacie zariadenie bolo k nemu pripojené cez sústavu meracích kariet, od tej istej spoločnosti, s označením NI 9159.



Obr. 3.1 Ovládacie zariadenie

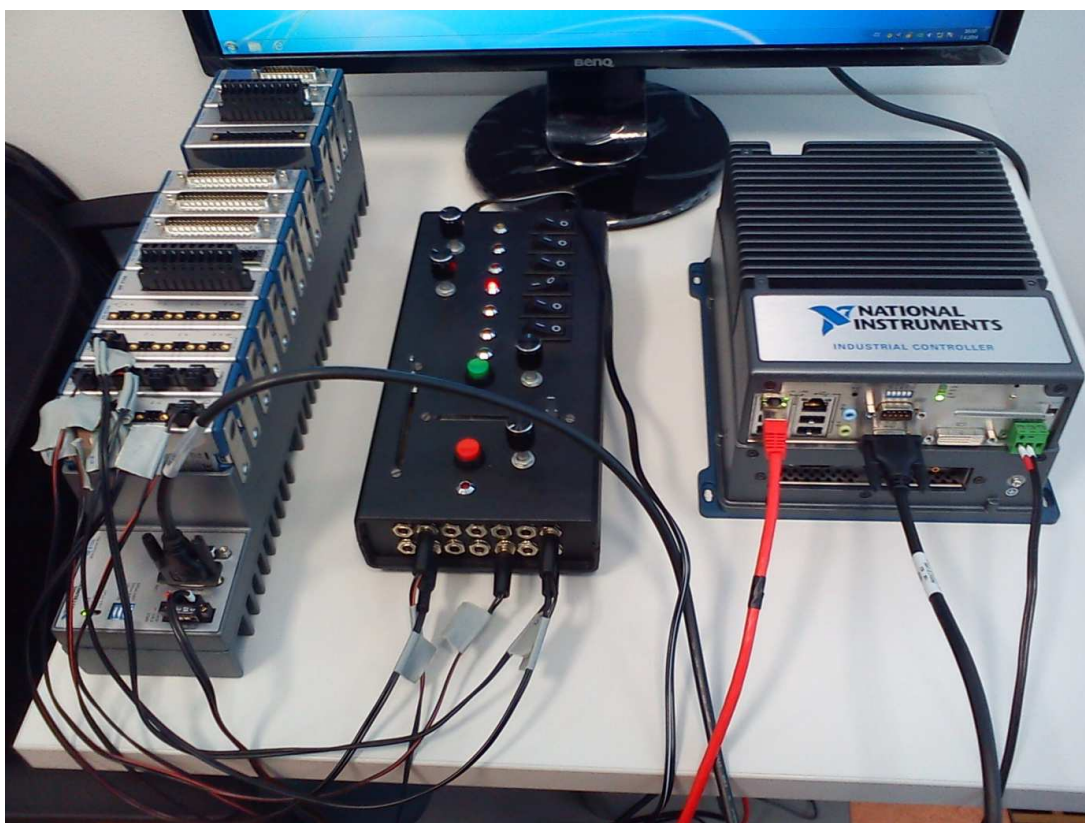


3.1 SCHÉMA PREPOJENIA



Obr. 3.2 Schéma prepojenia zariadenia pre simuláciu

Pootočením potenciometra, respektíve prepnutím spínača sa zmení napätie v rámci možného rozsahu. Analógový signál napätia vstupuje do meracích kariet, kde sa zmení na digitálne dáta. Tie slúžia ako vstupy pre matematický model uložený v RTC, ktorý ich prepočítava na požadované výstupné hodnoty (matematickému modelu je samostatne venovaná nasledujúca kapitola). Výstupy sú v programe NI VeriStand, prepojením cez PC, zobrazované na obrazovke. Samotný PC slúži iba ako komunikačný prostriedok medzi užívateľom a RTC a sprostredkováva grafické rozhranie, avšak celá simulácia (výpočty) prebieha na RTC.



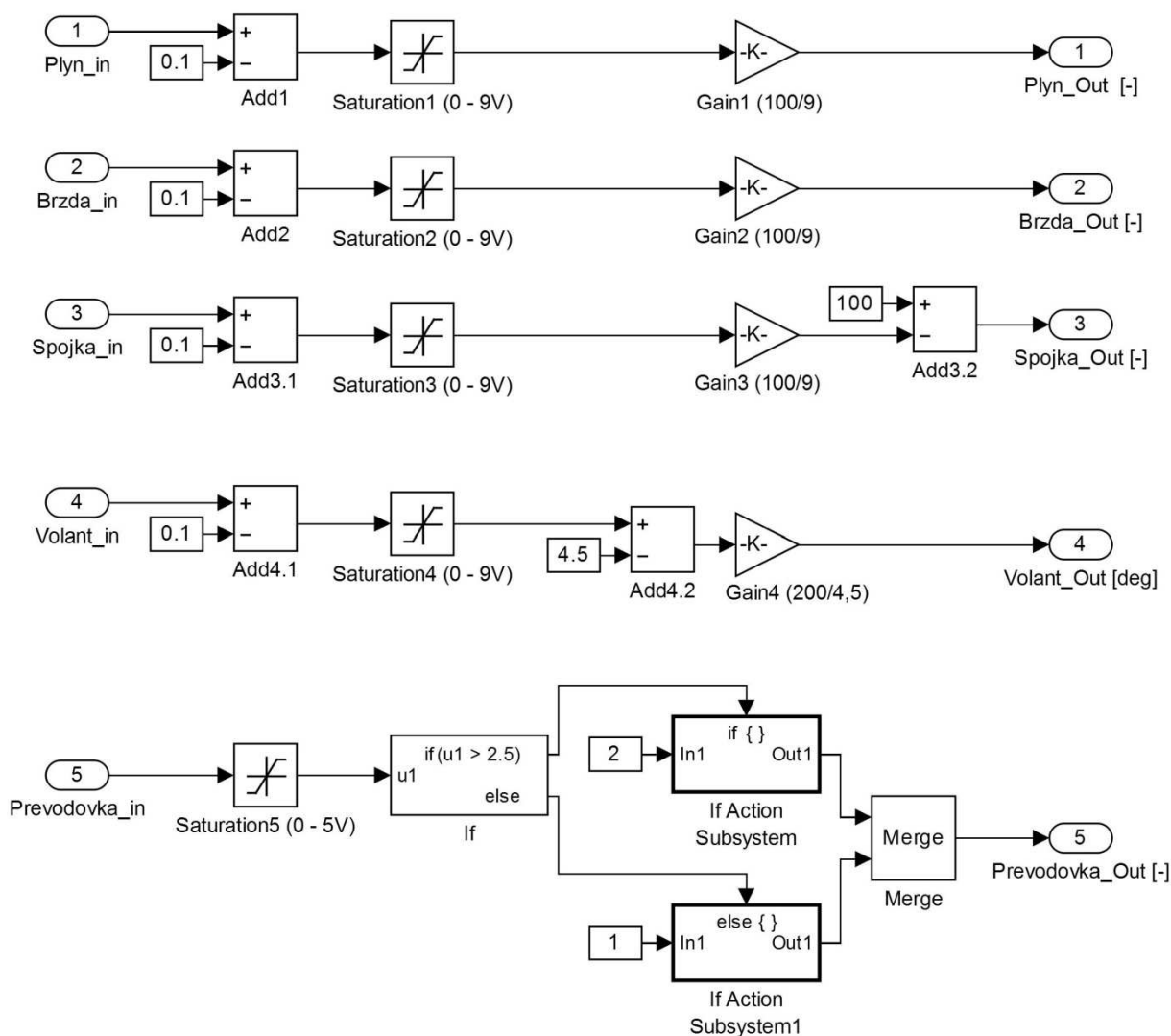
Obr. 3.3 Realizácia prepojenia (zľava – meracie karty, ovládacie zariadenie, RTC)

3.2 TVORBA MATEMATICKÉHO MODELU

Matematický model je sústava diferenciálnych rovníc, ktorá popisuje daný dynamický systém. Určuje akým spôsobom má RTC prepočítavať vstupné hodnoty (zdigitalizovaný



signál z potenciometrov) na požadované výstupné hodnoty (natočenie volantu, stlačenie pedálov, radenie). Pre tvorbu matematického modelu bol zvolený programovací jazyk MATLAB a jeho nadstavba Simulink, ktorá slúži práve na časové riešenie dynamických systémov. Výhodou Simulinku je užívateľsky zjednodušená tvorba modelu pomocou grafických výkonných blokov, ktoré nahrádzajú matematický zápis rovníc. Na obr. 3.4 je znázornená grafická podoba matematického modelu v prostredí MATLAB Simulink, ktorý bol vytvorený pre túto aplikáciu.



Obr. 3.4 Grafická schéma matematického modelu v prostredí MATLAB Simulink

Model tvorí päť vstupov a každému prislúcha osobitný výstup. Máme teda päť nezávislých vetiev, samostatne pre každý pedál, volant a prevodovku. Vo vetvách pre pedále a volant, ktoré prijímajú vstupy z potenciometrov, je najprv signál upravený tak, aby sa pohyboval v rozmedzí hodnôt 0 až 9. Jedná sa o to, že neupravený signál na vstupe sa nepohybuje presne v rozsahu 0V až 9V, ale, ako sa dozvieme ďalej, dolná aj horná hranica je posunutá k mierne vyšším hodnotám. Tieto hodnoty môžeme určiť práve využitím simulácie na RTC zariadení, a to tak, že si necháme zobraziť hodnoty na vstupe do matematického



modelu. Najprv boli teda tieto hodnoty stanovené odhadom, a až na základe výsledkov z prvej simulácie bol model upravený do konečnej podoby, ako ho vidíme na *obr. 3.4*. Limitné hodnoty vstupného signálu pri natočení potenciometrov do oboch krajných polôh sú uvedené na *obr. 3.18*. Problémom je, že tieto hodnoty nie sú stále, ale mierne sa menia v závislosti na nastavení odporov na ostatných potenciometroch, prípadne ďalších rušivých vplyvoch, a to v rádoch desiatín až tisícín pre daný potenciometer. Preto bolo potrebné ponechať istú vôľu medzi nameranými hodnotami napätia a zvolenými limitujúcimi hodnotami vloženými do modelu. Celkovo to teda funguje tak, že pomocou sčítavacích blokov, označených ako „Add“, odčítame od privádzaného signálu hodnotu 0,1, čím dostaneme pre dolnú hranicu hodnoty tesne pod 0 (nie však nižšie ako -0,1), a pre hornú hranicu hodnoty tesne nad 9 (maximálne okolo 9,1). Následne tento rozsah obmedzíme pomocou blokov označovaných ako „Saturation“ na vyššie spomínané hodnoty 0 až 9. Ak bude vstupná hodnota pre tento blok mimo stanovený rozsah, nastaví sa na najbližšiu limitnú hodnotu. Tým zaistíme, aby sme pri natočení potenciometrov do krajných polôh dostali do nasledujúceho výpočtu vždy hodnoty 0 až 9.

Ďalej si rozoberieme jednotlivé pedále. Za „Saturation“ blokmi nasledujú bloky pre zosilnenie signálu, ktoré sú v Simulinku označované ako „Gain“. Slúžia na vynásobenie privádzaného signálu konštantou. Keďže v prípade plynového a brzďového pedála má byť výstupom simulácie ich stlačenie v percentách, násobíme privádzaný signál v rozmedzí hodnôt 0 až 9 konštantou 100/9. Spojkový pedál chceme naprogramovať tak, aby výstupný údaj klesal z hodnoty 100 až na 0 pri úplnom stlačení. Výsledkom teda nebude percentuálna hodnota stlačenia pedála, ale môžeme to interpretovať ako percentuálnu hodnotu zopnutia samotnej spojky, za predpokladu, že by spojka mala lineárny charakter. Preto za blok zosilnenia s konštantou 100/9 zaradíme sčítavací blok, ktorý bude privádzaný signál odčítat' od konštanty o hodnote 100.

Prechádzame na vetvu pre výpočet natočenia volantu. Výsledkom má byť natočenie volantu v stupňoch, v rozmedzí -200° – 200° . Preto za „Saturation“ blok zaradíme sčítavací blok, ktorý bude od privádzaného signálu odčítat' hodnotu 4,5, čo je polovica z maximálnej hodnoty, ktorú možno privádzať. Tým dosiahneme posunutie nulovej hodnoty do stredu otočného rozsahu potenciometra, a teda jeho otočením z jednej krajnej polohy do druhej dostaneme na výstupe hodnoty v rozsahu -4,5 až 4,5. Teraz už stačí iba vynásobiť získaný signál, pomocou zosilňovacieho bloku, konštantou 200/4,5 a dostaneme natočenie volantu v požadovanom rozsahu.

Nakoniec si popíšeme poslednú vetvu, ktorej výstupom je hodnota zaradeného rýchlostného stupňa. Blok „Saturation“ má vzhľadom k ďalšiemu výpočtu iba informatívny charakter. Ako už bolo spomenuté, jedná sa o simuláciu dvojstupňovej prevodovky ovládanej pomocou spínača, pričom vo vypnutom stave má byť na výstupe modelu hodnota 1, pre zaradenie 1. rýchlostného stupňa a v zapnutom stave hodnota 2, pre zaradenie 2. rýchlostného stupňa. Na tento účel použijeme blok s podmienkovým príkazom „If“, ktorý definujeme tak, aby signál s hodnotou väčšou ako 2,5 viedol na prvý výstup bloku a akýkoľvek iný signál (čo je logicky signál s hodnotou menšou, alebo rovnou ako 2,5) viedol na druhý výstup bloku. Následne na oba výstupy zvlášť napojíme bloky s označením „If Action Subsystem“, pričom prvému bloku pripojíme na vstup konštantu o hodnote 2 a druhému o hodnote 1. Na záver signály zlúčime pomocou bloku „Merge“, aby sme dostali jeden výsledný signál, ktorý privedieme na výstup modelu.

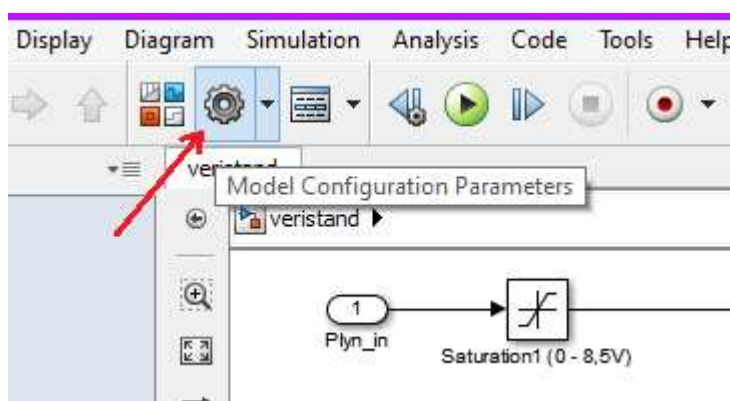


3.3 KOMPILÁCIA MODELU PRE NI VERISTAND

Aby bolo možné vytvorený matematický model v Simulinku použiť v prostredí NI VeriStand, je potrebné ho tzv. „skompilovať“ (preložiť jeho zdrojový kód do podoby, s ktorou VeriStand dokáže pracovať). Konkrétne sa jedná o vytvorenie dynamicky spojenej knižnice (súbor s príponou .dll – z angl. „dynamic-link library“).

Najprv nastavíme kompilátor zadáním príkazu *mex -setup* do príkazového okna MATLAB-u. Po zobrazení výzvy na lokalizáciu nainštalovaných kompilátorov túto výzvu potvrdíme. Následne vyberieme kompilátor Microsoft Visual C++ 2008 Express Edition with SP1 (pozn: kompilátor sa v ponuke zobrazí len v prípade, že bol predtým nainštalovaný).

Ďalej pristúpime k nastaveniu parametrov simulácie. Ak máme otvorený model v Simulinku, nastavenia vyvoláme kliknutím na príslušnú ikonu na paneli nástrojov podľa obr. 3.5.

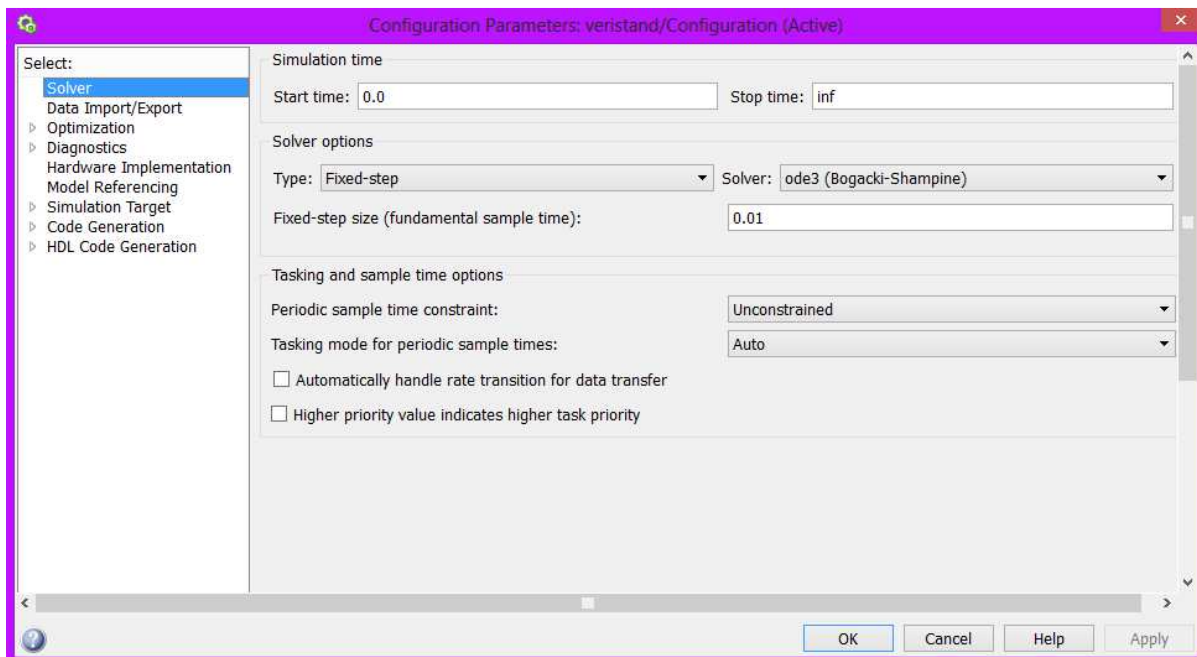


Obr. 3.5 Vyvolanie nastavení simulácie

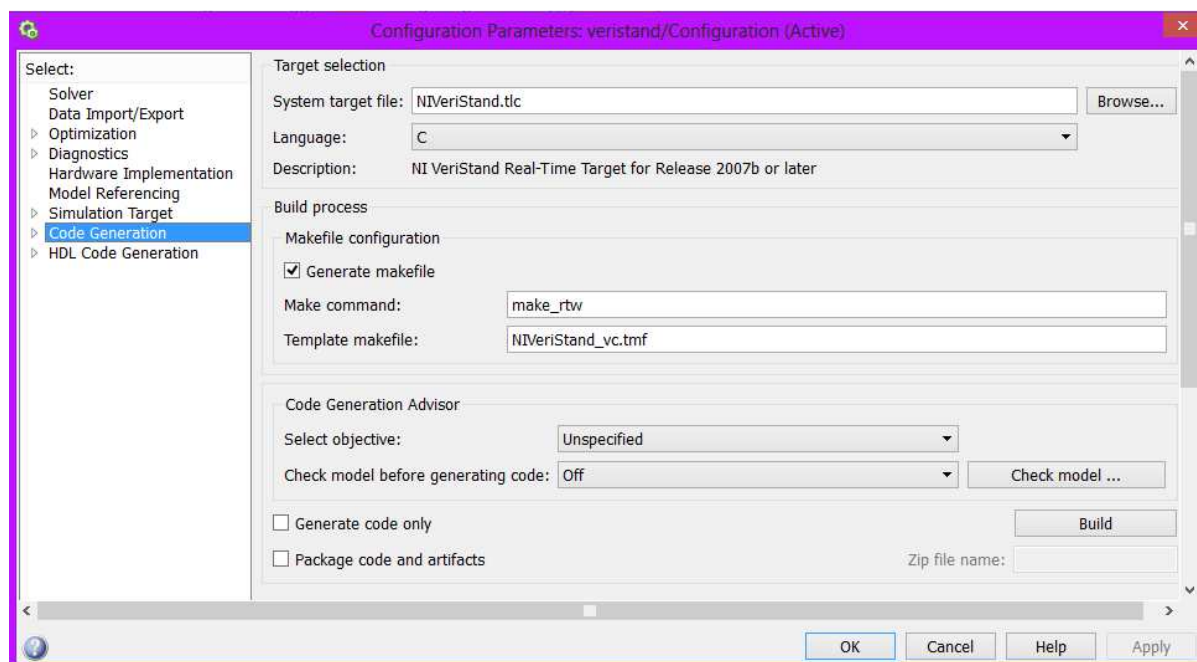
Zobrazí sa nám okno nastavení. V ponuke vľavo zvolíme položku „Solver“. Tu nastavíme parametre podľa obr. 3.6. Pre nekonečný čas simulácie nastavíme kolónku „Start time“ na hodnotu 0 a „Stop time“ na hodnotu *inf*. Pre pevný krok simulácie nastavíme kolónku „Type“ na hodnotu *Fixed-step*. V kolónke „Solver“ nastavíme riešič – numerickú metódu na riešenie diferenciálnych rovníc ktoré popisujú matematický model. Zvolíme riešič *ode3 (Bogacki-Shampine)*, ktorý by mal byť prednastavený. Veľkosť kroku nastavíme v kolónke „Fixed-step size“. Pre daný účel bol zvolený krok 0,01s. Ostatné nastavenia ponecháme predvolené.

Nakoniec sa v ponuke vľavo presunieme na položku „Code Generation“ (obr. 3.7). Tu v kolónke „System target file“ zvolíme cieľové prostredie, pre ktoré sa má vygenerovať zdrojový kód modelu. V tomto prípade zvolíme položku *NIVeriStand.tlc* (pozn: položka *NIVeriStand.tlc* sa v ponuke zobrazí iba ak bol predtým softvér NI VeriStand s potrebnými komponentami správne nainštalovaný a program MATLAB ho rozpozná). Zvyšok ponecháme predvolený a pre vygenerovanie kódu klikneme na tlačidlo „Build“.

Po úspešnom ukončení procesu sa súbory kompilácie uložia do pracovného adresára MATLAB-u, kde nájdeme aj model v podobe dynamicky spojenej knižnice.



Obr. 3.6 Nastavenie simulácie



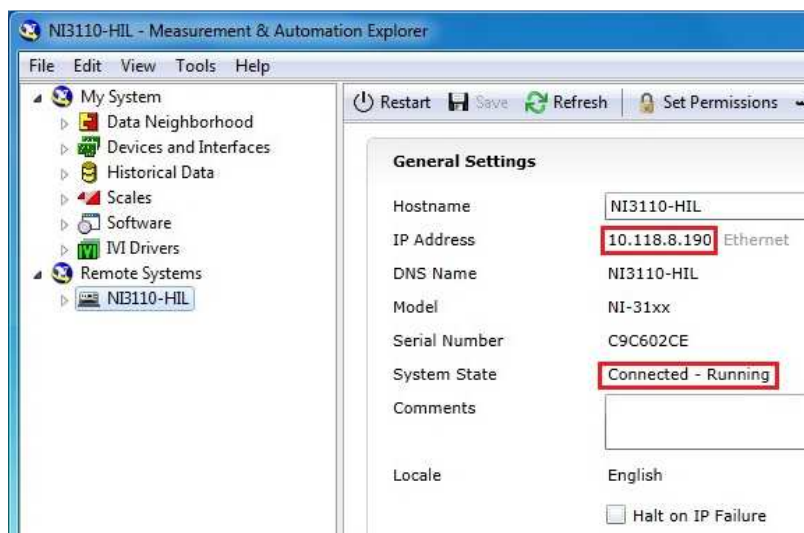
Obr. 3.7 Definovanie cieľového prostredia

3.4 NAČÍTANIE MODELU V NI VERIStand A PREPOJENIE S HARDVÉROM

Predtým ako sa presunieme do samotného prostredia NI VeriStand, je potrebné zabezpečiť komunikáciu medzi PC a RTC. Tá funguje prostredníctvom sieťového protokolu TCP/IPv4. V programe NI Measurement & Automation Explorer (tiež označovaný ako NI MAX) zistíme IP adresu RTC zariadenia (tú budeme neskôr zadávať do NI VeriStand). Na

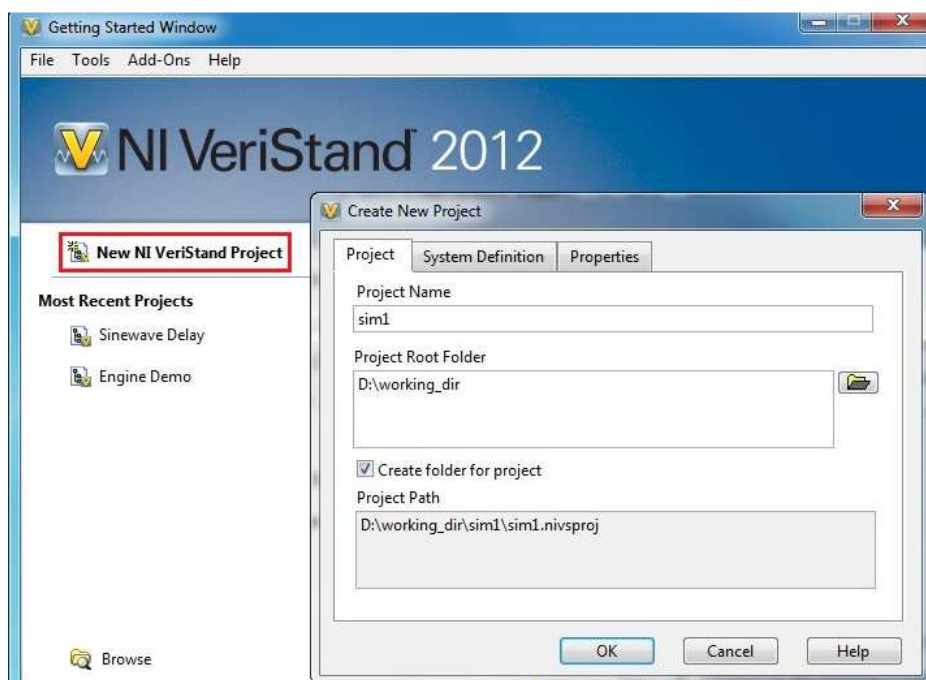


základe nej v nastaveniach protokolu vo Windows nastavíme statickú IP adresu PC. Potom v programe NI MAX realizujeme prepojenie RTC s PC. Funkčné prepojenie signalizuje nápis *Connected – Running* (obr. 3.8).



Obr. 3.8 Prepojenie PC a RTC v programe NI MAX

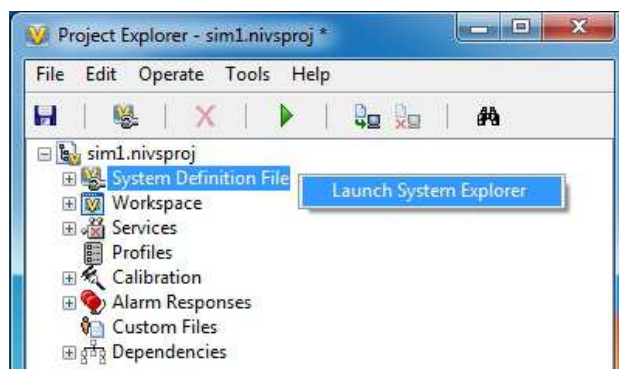
Teraz už začneme vytvárať projekt v NI VeriStand, v ktorom prepojíme skompilovaný matematický model s ovládacím zariadením a následne rozbehneme simuláciu na RTC zariadení s grafickou interpretáciou výstupných veličín.



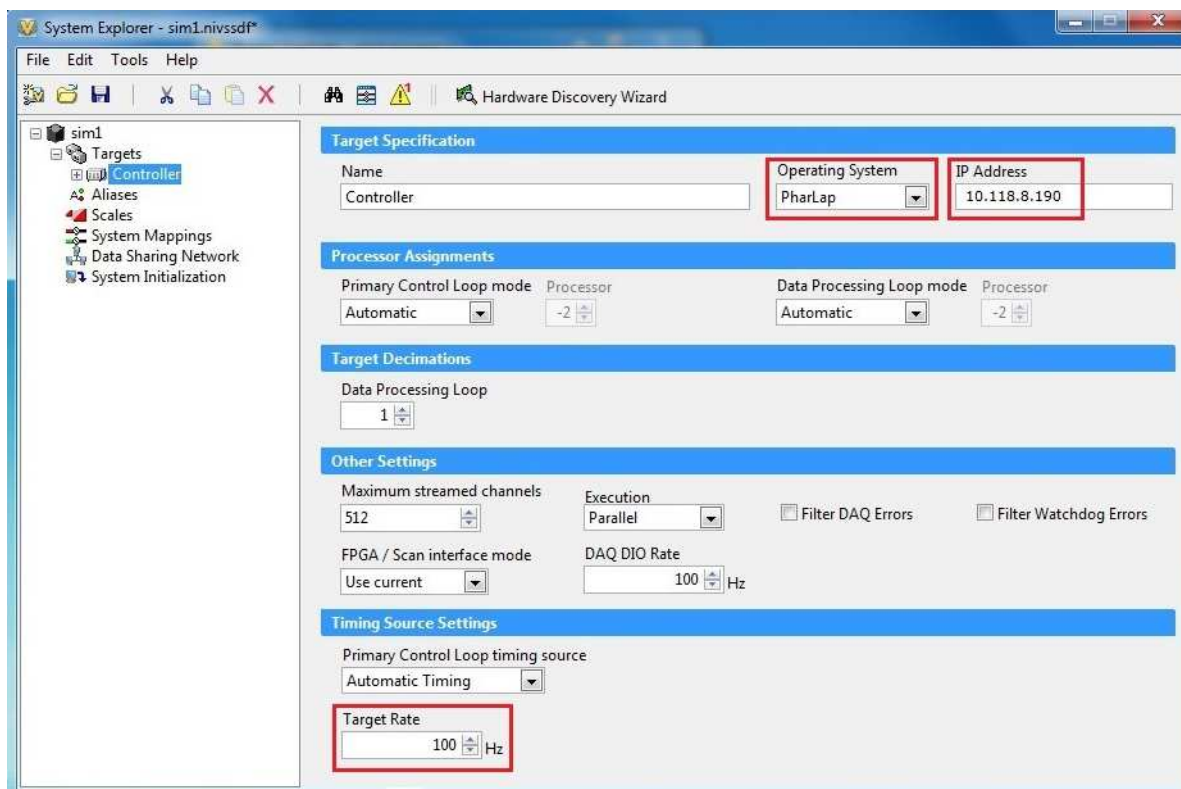
Obr. 3.9 Vytvorenie nového projektu v NI VeriStand



Po spustení softvéru vytvoríme nový projekt kliknutím na položku „New NI VeriStand Project“ a vo vyvolanom okne zadáme jeho názov a pracovný adresár (obr. 3.9). Po potvrdení sa nám zobrazí okno nového projektu. Pravým tlačidlom myši klikneme na položku „System Definition File“ a potvrdíme voľbu „Launch System Explorer“ (obr. 3.10). Dostaneme sa k hlavným nastaveniam simulácie. Tu podľa obr. 3.11 nastavíme operačný systém *PharLap* a IP adresu RTC, ktorú uďával program NI Measurement & Automation Explorer. Taktiež musíme prispôbiť frekvenciu RTC, s akou bude simulácia prebiehať, a to podľa zvolenej veľkosti kroku, ktorú sme nastavili v Simulinku. Pre veľkosť kroku 0,01s vyplýva počet krokov 100 za sekundu, takže zadáme frekvenciu 100Hz.



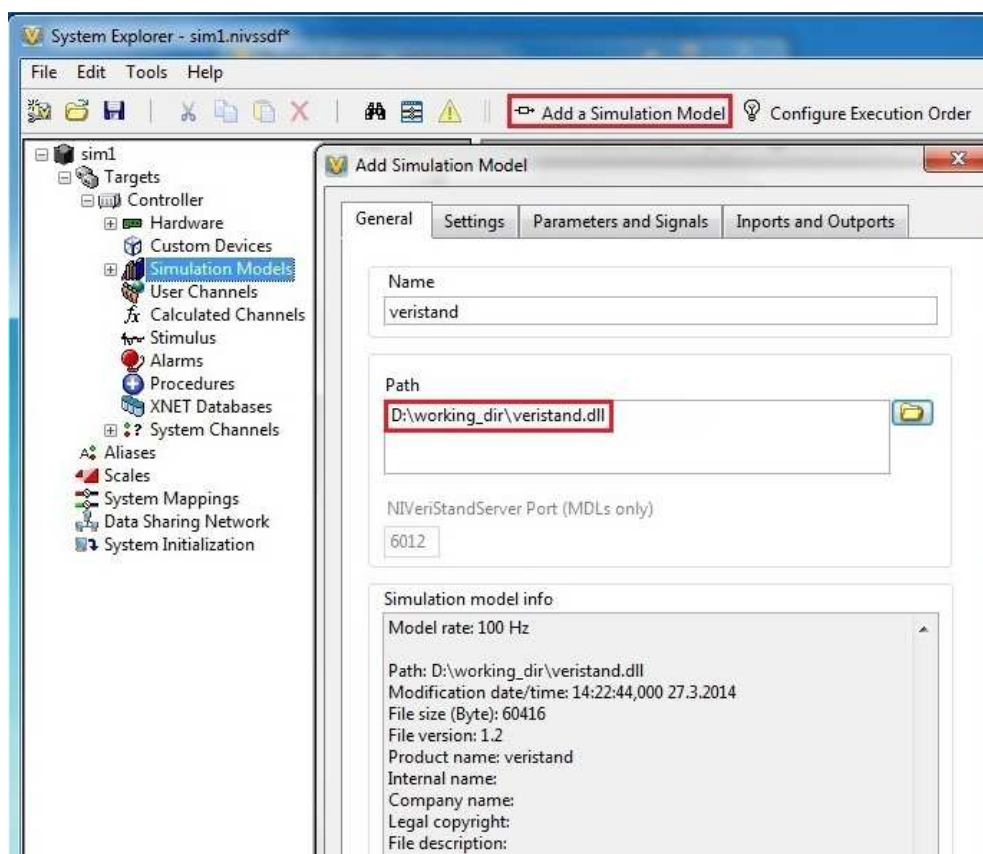
Obr. 3.10 Vyvolanie nastavení simulácie



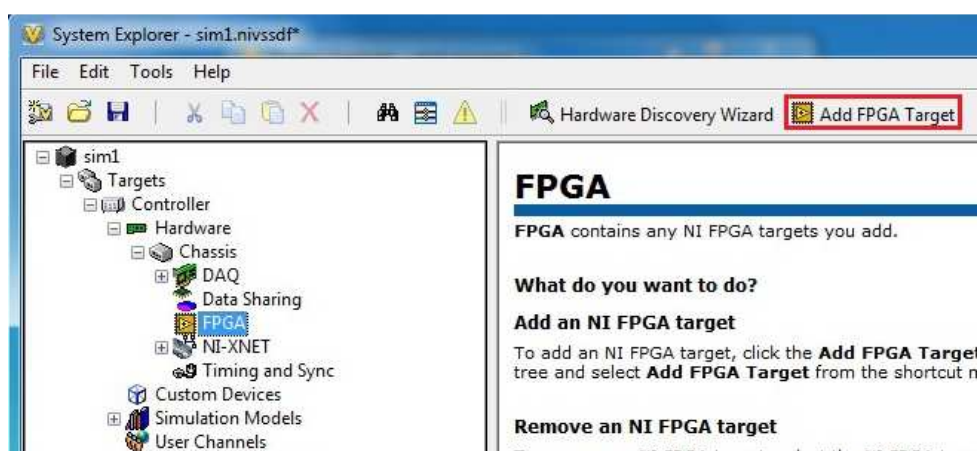
Obr. 3.11 Nastavenie RTC zariadenia



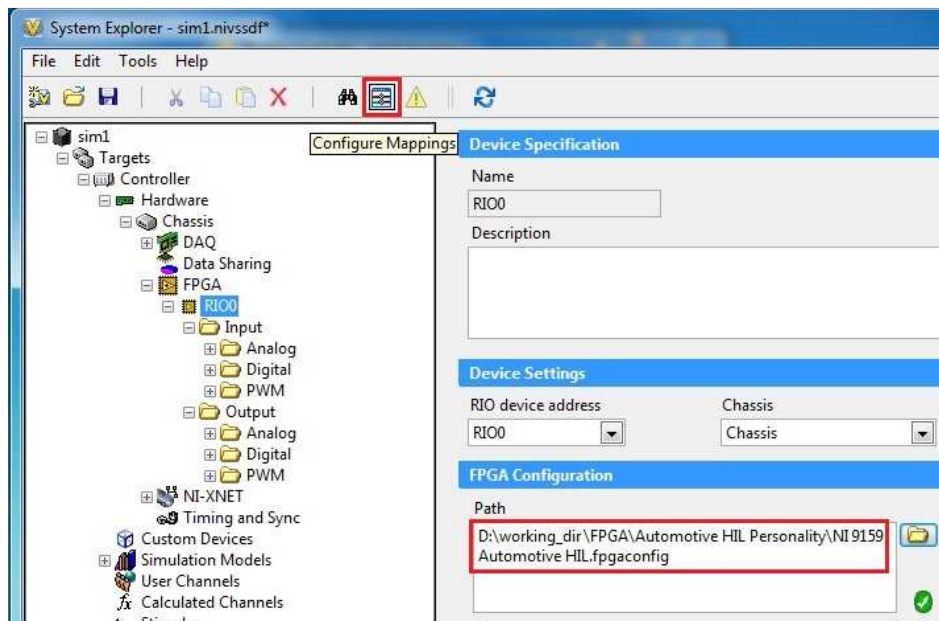
Ďalej pokračujeme vložení samotného matematického modelu. Po rozbalení stromovej ponuky RTC zariadenia (v tomto prípade označovaného ako „Controller“) vľavo, označíme položku „Simulation Models“ a klikneme na tlačidlo s názvom „Add a Simulation Model“ na paneli úloh hore. Vo vyvolanom okne zadáme cestu ku skompilovanému modelu vo formáte .dll (obr. 3.12).



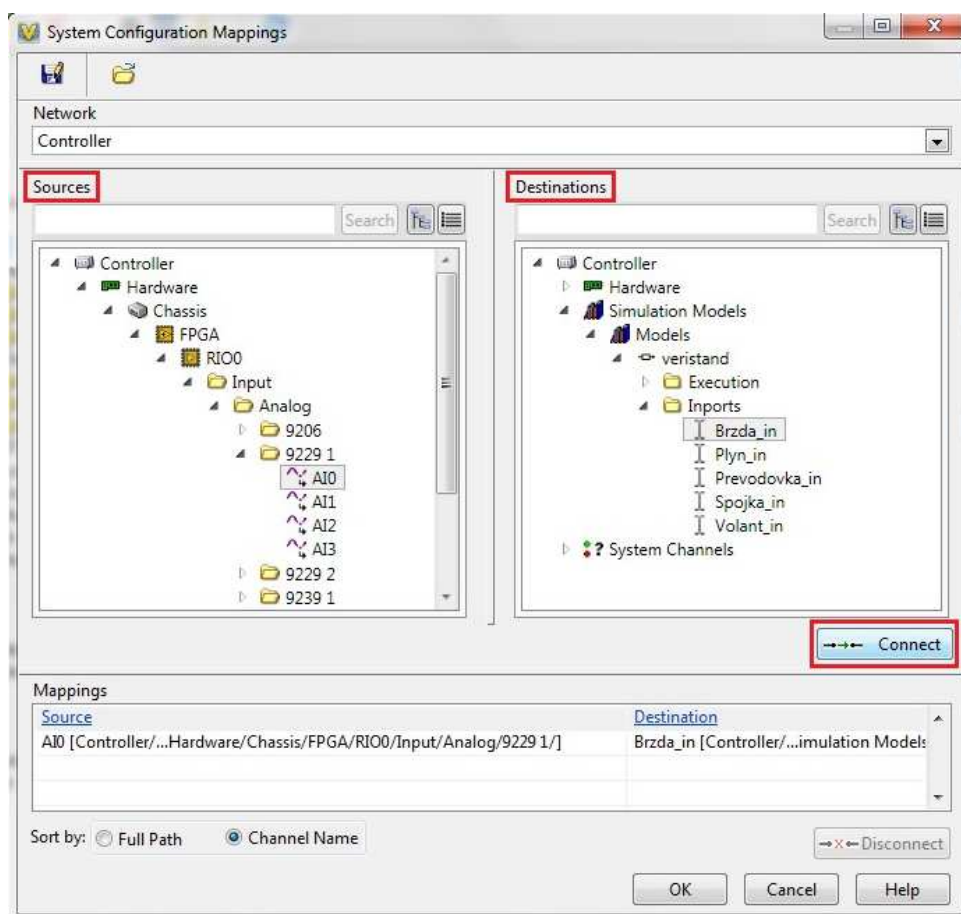
Obr. 3.12 Vloženie matematického modelu



Obr. 3.13 Pripojenie meracích kariet



Obr. 3.14 Konfigurácia meracích kariet

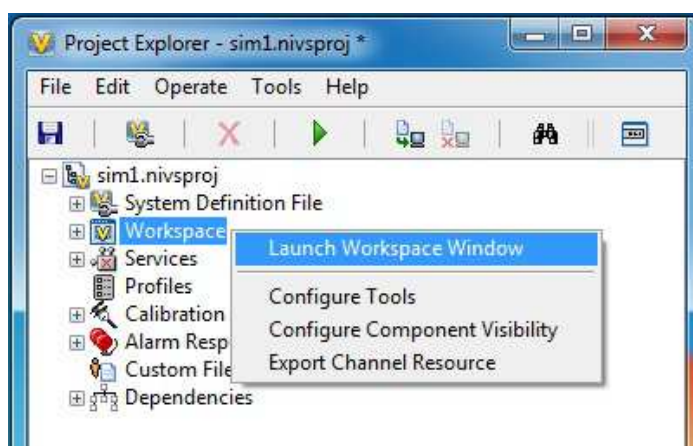


Obr. 3.15 Prepojenie meracích kariet s matematickým modelom

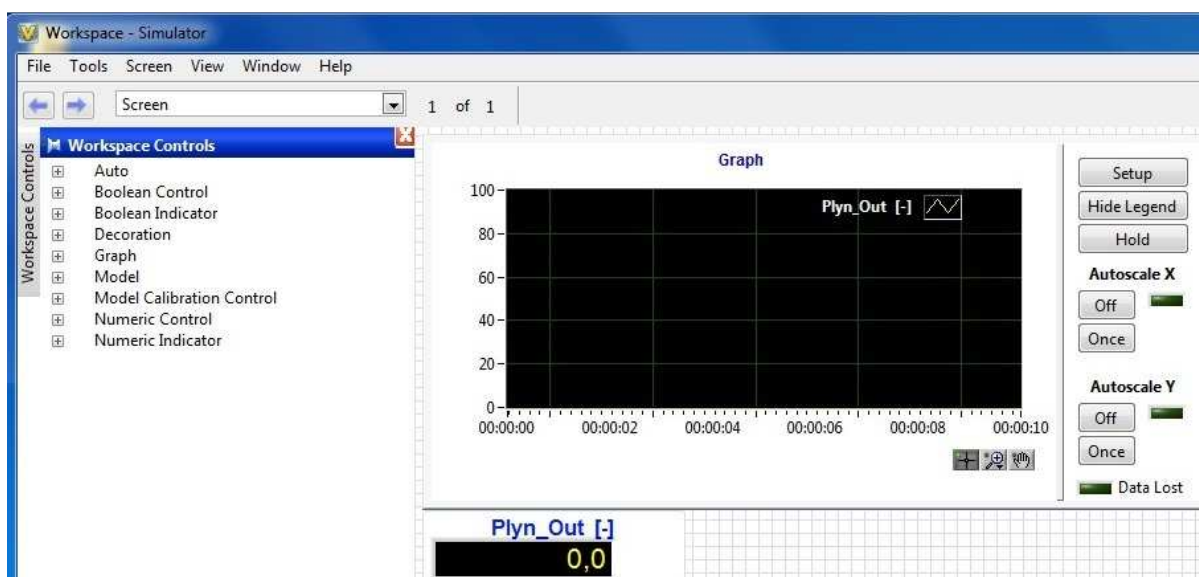


Po vložení modelu je ďalej potreba spojazdniť komunikáciu medzi RTC a ovládacím zariadením, cez meracie karty. Presunieme sa v stromovej ponuke postupne cez položky „Hardware a Chassis“ na položku „FPGA“ a na paneli nástrojov zvolíme „Add FPGA Target“ (obr. 3.13). Systém identifikuje jediné pripojené zariadenie na FPGA čip a v nasledujúcom okne určíme cestu k jeho konfiguračnému súboru (v tomto prípade mi bol súbor poskytnutý UADI). Potom pomocou tlačidla „Configure Mappings“, na paneli nástrojov, prejdeme k samotnému prepojeniu meracích kariet (a teda ovládacieho zariadenia) so vstupmi matematického modelu (obr. 3.14).

V nasledujúcom okne priradzujeme výstupy meracích kariet (ľavé okno s titulkom „Sources“) odpovedajúcim vstupom matematického modelu (pravé okno s titulkom „Destinations“), podľa toho ako sme pripojili ku kartám výstupy s potenciometrov (obr. 3.15).



Obr. 3.16 Vytvorenie pracovného prostredia (Workspace)



Obr. 3.17 Ukážka pracovného prostredia



Posledným krokom, pred zahájením simulácie, je vytvorenie grafického prostredia, v ktorom sa budú zobrazovať výsledky simulácie. Vrátime sa do okna, ktoré sa nám zobrazilo po vytvorení nového projektu. Tento krát klikneme pravým tlačidlom myši na položku „Workspace“ a vyberieme voľbu „Launch Workspace Window“ (obr. 3.16). Otvorí sa nám okno pracovného prostredia. Rozbalením záložky „Screen“ na paneli nástrojov a zvolením položky „Edit Mode“ sa prepne do módu pre úpravu. Zo stromovej ponuky vľavo potom vyberieme vhodné prvky na zobrazovanie časového priebehu výstupných veličín. Pre prehľadnú interpretáciu boli zvolené grafy a číselné indikátory. Každému určíme prepojenie s konkrétnym výstupom matematického modelu. U grafov vhodne nastavíme rozsah zvislej osi. Vodorovnú os nastavíme podľa toho, v akom časovom rozsahu chceme sledovať priebeh danej veličiny. Ukážka pracovného prostredia je na obr. 3.17.

Okrem znázornenia výstupov nesmieme zabudnúť na zobrazenie vstupných hodnôt, kvôli kalibrácii modelu. Opäť použijeme číselné indikátory.

3.5 OVERENIE FUNKČNOSTI PREPOJENIA

Funkčnosť prepojenia a správne zostavenie matematického modelu overíme simuláciou. Opäť sa vrátime do úvodného okna a simuláciu spustíme pomocou ikony v tvare zelenej šípky na paneli nástrojov (obr. 3.16). Po jej spustení sa automaticky presunieme do vytvoreného pracovného prostredia, kde na základe zobrazovaných hodnôt a grafických priebehov vypočítaných veličín overíme funkčnosť prepojenia a modelu.

Na obr. 3.18 sú znázornené číselné indikátory, udávajúce hodnoty signálu napätia na vstupoch modelu pre vetvy pedálov a volantu, pri natočení potenciometrov do oboch krajných polôh. Na obr. 3.19 sú znázornené číselné indikátory zobrazujúce hodnoty všetkých vypočítaných veličín pri natočení potenciometrov (resp. prepnutí spínača) do oboch krajných polôh. Na obr. 3.20 – 3.24 sú znázornené časové priebehy všetkých vypočítaných veličín, získané otočením potenciometrov (resp. prepínaním spínača) z jednej krajnej polohy do druhej.



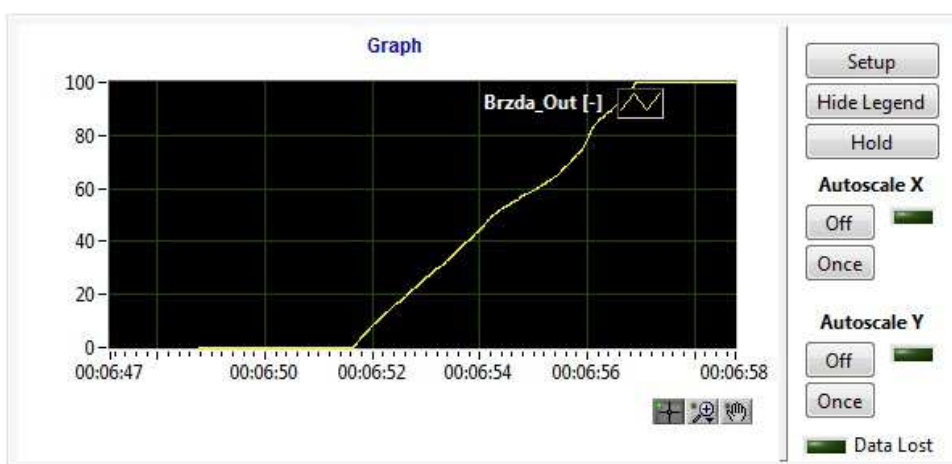
Obr. 3.18 Hodnoty signálu na jednotlivých vstupoch modelu (vľavo – jedna krajná poloha, vpravo – druhá krajná poloha)



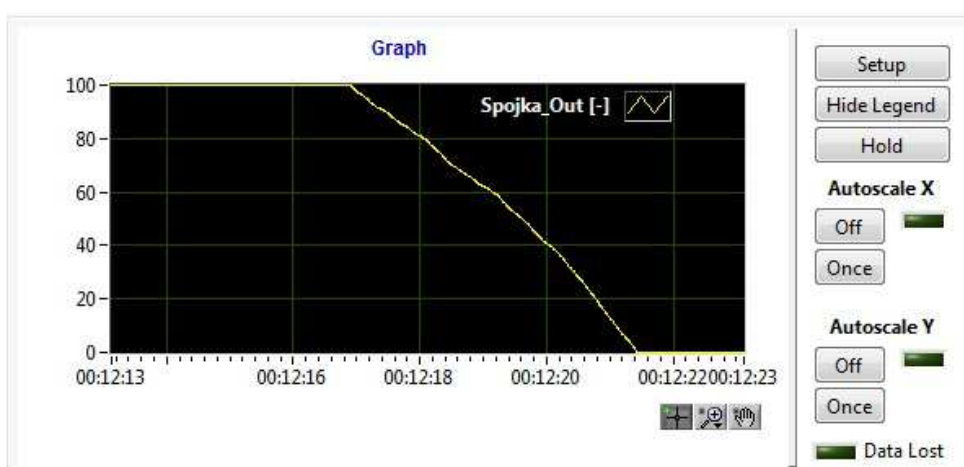
Obr. 3.19 Hodnoty signálu na jednotlivých výstupoch modelu (vľavo – jedna krajná poloha, vpravo – druhá krajná poloha)



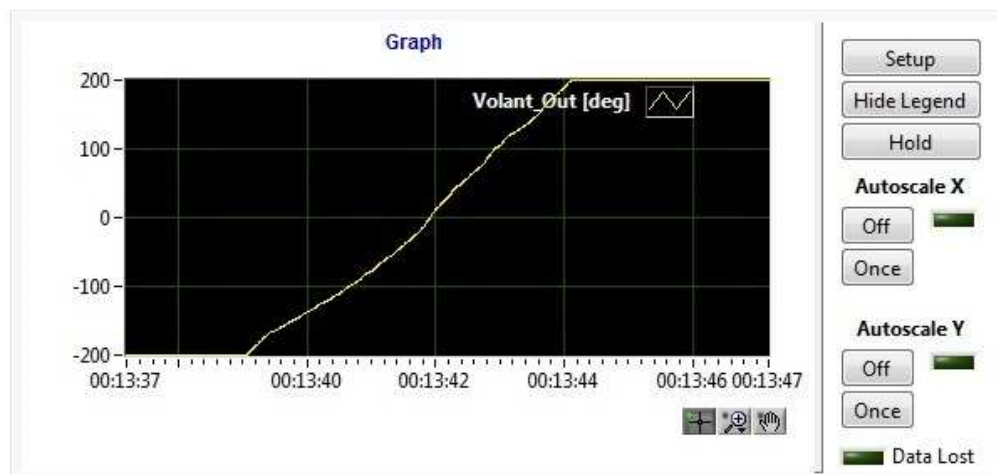
Obr. 3.20 Časový priebeh výstupného signálu pre plynový pedál



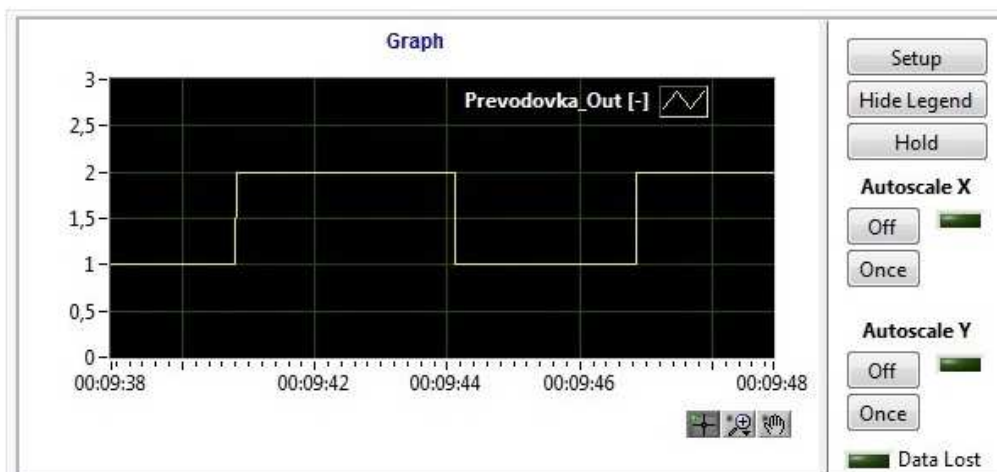
Obr. 3.21 Časový priebeh výstupného signálu pre brzdový pedál



Obr. 3.22 Časový priebeh výstupného signálu pre spojkový pedál



Obr. 3.23 Časový priebeh výstupného signálu pre volant



Obr. 3.24 Časový priebeh výstupného signálu pre prevodovku

Zo zobrazených číselných hodnôt a časových priebehov, môžeme potvrdiť správnu funkciu výpočtového modelu, nakoľko výsledky naplňajú požadovaný stav. Simulácia prebiehala hladko, s rýchlou odozvou na meniace sa vstupy, čo potvrdzuje vytvorenie funkčnej a spoľahlivej komunikácie medzi hardvérom a softvérom.



ZÁVER

Výsledkom tejto diplomovej práce je vytvorený návrh konštrukcie jazdného simulátora pre účely simulácie jazdy v reálnom čase. Na základe analýzy už existujúcich riešení bol po dohode s vedúcim práce zvolený variant pohyblivého simulátora s 2 stupňami voľnosti, ktorý spadá do kategórie takzvaných „sedadlových“ simulátorov. Konštrukcia mala zaručovať určitú variabilitu v nastavení pohybového systému a prispôbení ovládacích prvkov užívateľovi, čo bolo dodržané. Pri návrhu bola zohľadnená ergonómia v polohách jazdca charakteristických pre osobné, športové a nákladné vozidlo, pričom bol braný v úvahu široký rozsah vzrastu osôb. Takisto bola splnená požiadavka na umožnenie montáže zakúpeného zariadenia.

Splnený bol aj druhý cieľ práce, a síce návrh rozhrania medzi softvérovou a hardvérovou časťou simulátora. Výsledkom je funkčné prepojenie ovládacieho zariadenia s počítačom na prácu v reálnom čase, ktoré boli zvolené na tento účel. Jeho funkčnosť bola overená na výpočtovom modeli, ktorý simuloval stlačenie pedálov, natočenie volantu a radenie rýchlostných stupňov. Výsledky simulácie potvrdzujú spoľahlivú komunikáciu hardvéru a softvéru s rýchlou odozvou na meniace sa vstupy.

Navyše bol vytvorený simulačný model na báze sústavy mnohých telies („Multibody system“) za účelom testovania dynamiky a vhodného umiestnenia ramien pohybového systému simulátora. Nakoľko odladenie pohybu simulátora je v tejto fáze pre nás veľkou neznámou, neboli pre analýzu k dispozícii dostatočne presné vstupy a konkrétne hodnoty nemôžeme brať ako konečné. Analýza však poskytuje určité východiskové riešenie umiestnenia ramien a konštrukcia je navrhnutá tak, aby bolo možné toto nastavenie v prípade potreby meniť v určitom rozsahu. Pre získanie hodnotnejších vstupov by som navrhoval v budúcnosti vykonať experimenty na reálnom vozidle, ako napríklad snímanie priebehu zrýchlení pri daných jazdných manévroch. U moderných vozidiel využívajúcich rôzne bezpečnostné a asistenčné systémy sa určité veličiny dajú získať priamo z palubnej diagnostiky cez zbernicu CAN. Po vložení reálnejších vstupov do modelu, je výstupy možné použiť napríklad pre voľbu vhodných aktuátorov, alebo do pevnostnej analýzy, ktorú je potrebné urobiť pred samotnou stavbou simulátora.

Konštrukciu simulátora by bolo vhodné ďalej rozšíriť o pohybový systém, umožňujúci simuláciu straty trakcie ústiacej do pretáčavého šmyku, podobne, ako je tomu napríklad u simulátorov firmy Profisim.



POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] ABDEL-MAGIED, Y. *Design of FSAE Spaceframe Chassis* [online]. The University of Queensland, 2012 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <<http://dc436.4shared.com/doc/sLkkVdjV/preview.html>>
- [2] Arcade Party Rental. *Nascar Team Racing Simulator* [online]. c2010 [cit. 2014-01-21]. Dostupné z: <http://www.arcadepartyrental.com/nascar_racing.php>
- [3] *Atomic A2 Technical specification* [online]. [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <<http://joyridesimulators.com/uploads/Downloads/Atomic%20A2%20technical%20specification.pdf>>
- [4] Atomic Motion Systems. *Atomic - Gallery* [online]. c2013 [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <<http://joyridesimulators.com/gallery-2>>
- [5] BLANA, E. *A Survey of Driving Research Simulators Around the World* [online]. Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1996 [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: <http://eprints.whiterose.ac.uk/2110/1/ITS170_WP481_uploadable.pdf?origin=publication_detail>
- [6] BlueTiger. *Media* [online]. c2009 [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <<http://www.bluetiger.com/media.html>>
- [7] BlueTiger. *What is a Motion Simulator* [online]. c2009 [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <<http://www.bluetiger.com/simulator.html>>
- [8] BONEV, I. *The True Origins of Parallel Robots* [online]. 24.1.2003 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <<http://www.parallelemic.org/Reviews/Review007.html>>
- [9] Bosch Rexroth AG. *Basic Mechanic Elements* [online]. Stuttgart, 2013. 424 s. Dostupné z: <https://brmv2.kittelberger.net/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/3842540392_2013_02_EN_MGE13.0_Media.pdf?db=brmv2&lvid=1172010&mvid=10601&clid=20&sid=7FFE23633AEB266B3535D2691C0133CE.borex-tc&sch=M&id=10601,20,1172010>
- [10] BOUCHNER, P. *Driving Simulators for HMI Research* [online]. Praha, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Dopravní, Ústav řídicí techniky a telematiky, 2007 [cit. 2014-01-15]. Dostupné z: <http://www.lss.fd.cvut.cz/publications/on-line-publications/bouchner_phd.pdf>
- [11] CLARK, J. Mercedes-Benz Driving Simulator. *eMercedesBenz* [online]. 21.11.2012 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z : <<http://www.emercedesbenz.com/autos/mercedes-benz/corporate-news/mercedes-benz-driving-simulator/>>
- [12] Cruden Hexatech's Ultimate Racing Simulators. *2dayBlog* [online]. 31.12.2009 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <<http://www.2dayblog.com/2009/12/31/cruden-hexatechs-ultimate-racing-simulators/>>



- [13] CUNNINGHAM, J. Simulators provide physical link to virtual analysis. *Eureka* [online]. 09.11.2009 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <<http://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/technology/simulators-provide-physical-link-to-virtual-analysis/20664/>>
- [14] CXC Simulations. *How it Feels* [online]. c2013 [cit. 2014-01-26]. Dostupné z: <<http://www.cxcsimulations.com/products/motion-pro/how-it-feels/>>
- [15] DENNE, P. *Motion Platforms Or Motion Seats?* [online]. 2004 [cit. 2014-01-18]. Dostupné z: <<http://www.advancedmotion.net/pdf/cyber2.pdf>>
- [16] DIPOL. *Držák LCD/Plazma TV Signal PLB-4N 23" - 40"* [online]. c1996-2014 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.dipolnet.cz/drzak_lcd-plazma_tv_signal_plb-4n_23_-_40__E93112.htm>
- [17] FISCHER, M. *A Survey of State-of-the-art Motion Platform Technology and Motion Cueing Algorithms* [online]. German Aerospace Centre, Institute of Transportation Systems, 2007 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://elib.dlr.de/49535/2/AU_FS_MSC07-mfi_ExtendedAbstract_070910_final.pdf>
- [18] ForoCoches. *Mi proyecto de cockpit* [online]. 27.07.2009 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <<http://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=800775&page=27>>
- [19] Frex. *SimConMOTION* [online]. aktualiz. 18.11.2008 [cit. 2014-01-25]. Dostupné z: <<http://www.frex.com/gp/motion/motionpage1.html>>
- [20] Gameracer. *RockerRacer Driving Simulator Frame* [online]. [cit. 2014-01-21]. Dostupné z: <<http://www.gameracer-raceseats.nl/GRRRA001>>
- [21] Gamerstasia. [Test] City Car Driving Simulator. In: *Youtube* [online]. 14.9.2012 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <<https://www.youtube.com/watch?v=OUVTQKEA52M>>
- [22] GrabCAD. *3/4" Rod End* [CAD model]. Súbor vo formáte .step, vyžaduje CAD softvér. 19.04.2012 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <<http://grabcad.com/library/3-4-rod-end>>
- [23] GrabCAD. *Logitech G27* [CAD modely]. Súborný vo formáte .step, vyžaduje CAD softvér. 01.12.2013 [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: <<http://grabcad.com/library/logitech-g27-1>>
- [24] GrabCAD. *recaro profi spa racing seat* [CAD model]. Súbor vo formáte .step, vyžaduje CAD softvér. 15.08.2011 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: <<http://grabcad.com/library/recaro-profi-spa-racing-seat>>
- [25] HANCOCK, P.A. et al. *The use of driving simulation for the assessment, training and testing of older drivers* [online]. Minneapolis: University of Minnesota, 1990 [cit. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://conservancy.umn.edu/bitstream/157096/1/HFRL_NIA90-91.pdf>



- [26] HardwareCanucks. *Hyundai X224W 22" Widescreen LCD Monitor* [online]. c2008-2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <<http://techwiki.hardwarecanucks.com/product/1MDEyMTE/Hyundai-X224W-22-quot-Widescreen-LCD-Monitor/#pics>>
- [27] HIRATA, T. *Development of Driving Simulation System: MOVIC-T4 and its Application to Traffic Safety Analysis in Underground Urban Expressways* [online]. Tokyo Institute of Technology, Department of Civil Engineering, 2005 [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://www.enveng.titech.ac.jp/yai/hirata_d_thesis.pdf>
- [28] JIE, T.H. *Design of Visual Simulator for 2DOF Motion Platform* [online]. Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2012 [cit. 2014-01-24]. Dostupné z: <http://portal.fke.utm.my/fkelibrary/files/teohhanjie/2012/259_TEOHHANJIE2012.pdf>
- [29] JOHNSON, M. *Flight Simulation: Motion verse Stationary* [online]. aktualiz. 13.08.2012 [cit. 2014-01-19]. Dostupné z: <<http://aviationknowledge.wikidot.com/aviation:flight-simulation-motion-verse-stationary>>
- [30] ML-Tuning. *Klouby do 25 kNm* [online]. c2008 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.kardan.cz/kardany/klouby_do_25_knm>
- [31] *Motion-sim.* [online]. [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <<http://www.motion-sim.cz/>>
- [32] Motion Based Simulators. *Bringing Simulation Into Your Future!* [online]. [cit. 2014-01-27]. Dostupné z: <http://www.motionbasedsimulators.com/content/order/special_offers.htm>
- [33] Motion simulator. In *Wikipedia* [online]. aktualiz. 26.05.2014 [cit. 2014-01-15]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Motion_simulator>
- [34] National Instruments. *NI 3110: Dual-Core Industrial Controller with Windows OS* [online]. c2014 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/206847>>
- [35] NoGripRacing. *Total Spanish Simulator (New Company)* [online]. c2000-2014 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <<http://www.nogripracing.com/forum/showthread.php?p=1749131>>
- [36] ONUFER, J. *Sluchové ústrojenstvo* [online]. [cit. 2014-01-22]. Dostupné z: <<http://people.tuke.sk/jozef.onufer/sluch%20a%20poloha.pdf>>
- [37] PIATKIEWITZ, P. *Motion System Tuning of the VTI Driving Simulator IV* [online]. 25.05.2011 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <<http://www.vectioneer.com/archives/636>>
- [38] *PROFI SIM.* [online]. c2010-2013 [cit. 2014-01-23]. Dostupné z: <<http://www.profisim.cz/>>
- [39] SimCraft. *How are SimCraft's motion simulators different than seat-mover (FREX-like) systems?* [online]. c2013 [cit. 2014-01-25]. Dostupné z: <<http://www.simcraft.com/modules/smartfaq/faq.php?faqid=30>>



- [40] SimXperience. *Stage 4 Motion Simulator Kit* [online]. c2013 [cit. 2014-01-25]. Dostupné z: <<http://simxperience.com/Products/MotionSimulatorKits/Stage4MotionSimulatorKit.aspx>>
- [41] SLOB, J. *State-of-the-Art Driving Simulators, a Literature Survey* [online]. Eindhoven University of Technology, Department Mechanical Engineering, Control Systems Technology Group, 2008 [cit. 2014-01-15]. Dostupné z: <<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/9611.pdf>>
- [42] Société de Recherches at Développements Automobiles - CAR&D. *Some 20th century remarkable inventions* [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <<http://www.car-d.fr/inventionsremarquables.php?lng=en&PHPSESSID=c68ff50aa3fda0bb4213ce79ef0bb97b>>
- [43] STRAUS, S.H. *Driving Simulators: Yesterday and today* [online]. Arizona Department of Transportation, 2005 [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: <<http://www.esracorp.com/559DRIVINGSIMULATORS.pdf>>
- [44] TECHBOX. *motion-sim 4DOF EXTREME 3D – fotogaléria* [online]. c2010-2014 [cit. 2014-01-22]. Dostupné z: <<http://www.techbox.sk/fotogaleria/1121/motion-sim-4dof-extreme-3d.html>>
- [45] The University of Iowa. *The National Advanced Driving Simulator: NADS-1* [online]. c2014 [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: <https://www.nads-sc.uiowa.edu/sim_nads1.php/>
- [46] *Total spanish simulator* [online]. c2012 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <<http://www.totalspanishsimulator.com/wp/en/>>
- [47] Toyota's driving simulator: Not all fun and games. *Motor Trend* [online]. November 2007 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.motortrend.com/auto_news/112_news260711_toyotas_driving_simulator/>
- [48] TraceParts. *BOSCH REXROTH - Linear Motion and Assembly Technologies* [CAD modely]. Súborny vo formáte .step, vyžaduje CAD softvér. [cit. 2014-01-13]. Dostupné z: <[http://www.tracepartsonline.net/%28S%28c3kqrmjrzupqv1yw203zvouy%29%29/content.aspx?ClsID=/F_BOSCH/BOSCH.1/&tp=1&st=0&Lang=sk&Class=BOSCH&fwsid=GLLOBALV3&ttl=Basic+Mechanic+Elements](http://www.tracepartsonline.net/%28S%28c3kqrmjrzupqv1yw203zvouy%29%29/content.aspx?ClsID=/F_BOSCH/BOSCH.1/&tp=1&st=0&Lang=sk&Class=BOSCH&fwsid=GLOBALV3&ttl=Basic+Mechanic+Elements)>
- [49] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: František Vlk, nakladatelství a vydavatelství, 2003. 433s. ISBN 80-239-0024-2
- [50] VLK, F. *Stavba motorových vozidel*. Brno: František Vlk, nakladatelství a vydavatelství, 2003. 499s. ISBN 80-238-8757-2
- [51] ZAMORA, A. *Anatomy and Structure of Human Sense Organs* [online]. c2014 [cit. 2014-01-22]. Dostupné z: <<http://www.scientificpsychic.com/workbook/chapter2.htm>>



ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

NADS	National advanced driving simulator
RTC	Real-time computer
SAS	Simulator adaptation syndrome
UADI	Ústav automobilního a dopravního inženýrství



ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1 – Zoznam použitých prvkov stavebnicového systému Bosch Rexroth

P1



Príloha 1 – Zoznam použitých prvkov stavebnicového systému Bosch Rexroth

• Profily

Profil	Katalógové číslo	Dĺžka [mm]	Počet kusov
45x45L	3 842 992 425	2600	2
		1340	1
		1080	2
		850	4
		510	2
		500	1
		300	4
		100	3
45x45L s opracovaním koncov	3 842 992 954	1185	2
		550	1
		300	1
45x90	3 842 990 300	850	1
		680	1
		310	1
		90	2
40x40L	3 842 993 120	960	1
		900	2
		700	2
		680	3
		620	2
		600	1
		450	2
		100 ¹	8
40x40L s opracovaním koncov	3 842 993 125	770	3
	3 842 993 124	150	2
40x40L 3N	3 842 993 191	1100	2
		600	2
40x80L s opracovaním koncov	3 842 993 135	770	1

¹ Profily pre prípadné predĺženie ramien.

Celkové množstvo materiálu profilov činí 36,88m.



- **Spojovacie prvky**

Typ prvku	Katalógové číslo	Počet kusov
Uholník 45/45 (včetně upevňovacej sady)	3 842 523 561	31
Uholník 40/40 (včetně upevňovacej sady)	3 842 529 383	24
Uholník 45/90 (včetně upevňovacej sady)	3 842 523 570	6
Uholník 40/80 (včetně upevňovacej sady)	3 842 529 386	5
Rýchloupínacia spojka 90°	3 842 535 466	12
Rýchloupínacia spojka, ohýbná	3 842 535 635	12
Uholník R40x43 (včetně upevňovacej sady) ¹	3 842 518 424	8
Uholník R35x38 (včetně upevňovacej sady)	3 842 532 274	12
Koncová spojka (včetně upevňovacej sady) ²	3 842 532 196	8
Skrutka s hlavou T	3 842 528 715	4
Matica s nákrúžkom	3 842 345 081	4

¹ Jeho použitie záleží od návrhu klbových hlavíc. Ak by nevyhovoval, musel by sa nahradiť podobným prvkom.

² Spojka pre prípadné predĺženie ramien.

pozn: Zoznam vychádza z katalógu firmy Bosch Rexroth – Basic Mechanic Elements, dostupného z: <https://brmv2.kittelberger.net/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/3842540392_2013_02_EN_MGE13.0_Media.pdf?db=brmv2&lvid=1172010&mvid=10601&clid=20&sid=7FFE23633AEB266B3535D2691C0133CE.borex-tc&sch=M&id=10601,20,1172010>