

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

Ing. Jan Pokorný

**INTERAKCE MOBILNÍCH PRACOVNÍCH STROJŮ A POJÍŽDĚNÉHO
PODLOŽÍ**

INTERACTION BETWEEN MOBILE WORKING MACHINE AND ROLLED
SURFACES

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
Oponenti:

Datum obhajoby: 2010

KLÍČOVÁ SLOVA

simulace jízdy, Multi Body System, budič vibrací, hydraulický okruh, interakce, zemědělský návěs

KEY WORDS

drive simulation, Multi Body System, vibration exciter, hydraulic circuit, interaction, agricultural semi-trailer

UMÍSTĚNÍ ORIGINÁLU DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je uložena v Areálové knihovně, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

© Jan Pokorný, 2010
ISBN 978-80-214
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍL PRÁCE.....	6
3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	7
4 KATEGORIZACE INTERAKCE JEDOUCÍHO STROJE A POVRCHU	10
4.1 Stroje při jízdě nezpůsobují téměř žádné změny povrchu	11
4.2 Stroje při jízdě způsobují zásadní změny povrchu	11
4.3 Jedoucí stroj a povrch na sebe vyváženě vzájemně působí	12
4.4 Shrnutí.....	12
5 MODELOVÁNÍ A SIMULACE.....	13
5.1 Model, simulace a verifikace	13
5.2 Shrnutí.....	14
6 ZEMĚDĚLSKÝ UNIVERZÁLNÍ TRAKTOROVÝ NÁVĚS	14
6.1 Vývoj koncepce univerzálního zemědělského vozu.....	15
6.2 Simulace návěsů o celkové hmotnosti vyšší 21 tun.....	15
6.3 Verifikace výsledků	18
6.4 Odhad životnosti rámu.....	18
6.5 Shrnutí.....	19
7 MALÝ PŘÍVĚS S PRACOVNÍM ZAŘÍZENÍM PRO TLAKOVÉ ČIŠTĚNÍ....	19
7.1 Popis modelu.....	20
7.2 Pevnostní analýza rámu podvozku.....	20
7.3 Souhrn	20
8 VIBRAČNÍ VÁLEC S REGULAČNÍM BUDIČEM VIBRACÍ	21
8.1 Inteligentní stroj – vibrační válec	21
8.2 Regulovatelný budič vibrací	22
8.3 hydraulického okruhu pro pohon regulačního budiče vibrací	22
8.4 Shrnutí.....	24
9 ZÁVĚR.....	25

1 ÚVOD

Pohyb stroje po povrchu je možný díky vzájemnému působení obou subjektů. Dle definice pojmu „Interakce“ se jedná o vzájemné působení s důrazem na oboustrannou aktivitu [65]. Pojíždějící stroj tedy působí svým podvozkem nebo nástrojem na povrch a naopak povrch svými vlastnostmi ovlivňuje jízdu a chování stroje. V některých případech je interakce mezi těmito subjekty zcela zřejmá a v některých případech je nutné pohlédnout na daný vzájemný vztah z jiného úhlu.

Při vývoji podvozků a vozidel bylo s postupem času nutné uvažovat, jakým způsobem se bude chovat stroj na pojížděném povrchu, kde budou jeho limity při jízdě v různých terénech a jaká rychlost bude vhodná pro přepravu osob a různých materiálů. Velký rozmach vývoje samojízdných strojů zažila Evropa okolo 19. století. Do té doby existovaly pouze vozy tažené lidskou nebo zvířecí silou, přičemž dlouhou dobu neexistovalo jakékoliv tlumení a pružení náprav. V roce 1887 John Boyd Dunlop vytvořil první pneumatiku pro tricykkl svého syna [27]. V té době už většina vozů měla odpružení a to zejména pomocí listové pružiny. Místo pneumatik se používaly pouze pogumované obruče. První automobil na pneumatikách byl značky Peugeot a bratři Michelinové se s ním zúčastnili závodu Paříž-Bordeaux-Paříž v roce 1895. Tehdy se ke konci závodu vzdali po výměně všech 22 náhradních duší a byli terčem posměchu [27]. V současnosti je pneumatika používána na téměř všech vozidlech a plné „pneumatiky“ jsou použity jen ve výjimečných případech. Pneumatiky v dnešní době mají celou řadu vlastností, které ovlivňují jízdní vlastnosti strojů a zatížení prvků podvozků i celých jedoucích strojů a v neposlední řadě i zatížení pojížděného povrchu. Výchozími body pro řešení úlohy interakce jedoucího stroje na povrchu jsou vlastnosti pneumatiky, charakteristiky pružení s tlumením společně s hmotnostmi jednotlivých částí stroje.

Objev kola a zvláště pak později pásového podvozku umožnil rozvoj různých pracovních strojů včetně například zemědělské techniky. Zemědělství je jednou z nejstarších činností lidstva, kde se využívalo náradí už od pravěku, avšak až s objevem kola mohlo dojít k výraznějšímu posunu ve vývoji pracovních zařízení a nástrojů. Avšak zemědělství není jediným místem využití kolového či pásového podvozku, kde dochází k interakci stroje s povrchem. Kola jsou v dnešní době nepostradatelná pro dopravu osob, materiálů a strojů. Každý výrobce vozidel chce dosáhnout co nejlepšího komfortu, objemu a rychlosti přepravy a co nejlepších jízdních vlastností vozů.

Při pohledu kolem nás vidíme nespočetné množství strojů, které se pohybují po povrchu a jsou s ním v interakci. Některé stroje působí na povrch pozvolna, jiné silněji a z druhé strany některé povrchy působí na stroje mírně a jiné jej ovlivňují výrazně. Je tedy nutné provést kategorizaci tohoto vzájemného působení mezi pojíždějícím a pojížděným subjektem. Každá z kategorií má svá specifika, ke kterým je potřebné přihlížet při řešení podobné úlohy. V této disertační práci je popsán navržený způsob kategorizace i možné řešení některých kategorií vzájemného působení jedoucího stroje a povrchu.

2 CÍL PRÁCE

Cílem práce je analýza interakce jedoucího pracovního stroje s povrchem s různou mírou sledování změn vlastností povrchů i strojů. Za tímto účelem bude vytvořen systém kategorizace vzájemného působení, který pro zařazení do jednotlivých kategorií využívá sledování různých změn vlastností povrchu. Důležitým aspektem této práce bude sledování silových a i jiných účinků na stroj za účelem dalších analýz vybraných částí stroje a to pokud možno bez nutnosti jeho realizace formou drahých prototypů či modelů.

Jedním z cílů je vytvoření metodického postupu při návrhu mobilního pracovního stroje a nebo jeho jednotlivých dílčích částí jako jeho podvozek, rám či samotné pracovní zařízení a další prvky. Tato metodika by měla popsat děje v rozmezí prvního návrhu zařízení až po výrobu prototypu a verifikaci modelu.

Dalším cílem práce je sledování a rozbor silových účinků na pracovní mechanismy i jiné dílčí části strojů jako rámy, pohony či podvozky. Na základě těchto analýz, lze odvozovat další úvahy zaměřené na pevnost, životnost, požadované charakteristiky například hydraulických systémů.

V této práci budou detailně popsány tři příklady interakce jedoucího stroje a pojižděného povrchu. Tyto příklady budou prostředkem pro zobecnění navržené metodiky. Bude se jednat se o pracovní přívěs o poměrně nízké hmotnosti za osobní automobil, zemědělské návěsy za traktor o vysokých hmotnostech a vibrační válce. Všechny tyto příklady budou řešeny přístupem navrženým v této práci a budou využívat identifikace působících sil, které vznikají vlivem interakce stroje a povrchu, k navazující pevnostní analýze a nebo k analýze chování a požadavků na dílčí prvky těchto celků. Použitá metodika bude následujícího charakteru:

- kategorizace interakce stroje s povrchem
- rozbor silových i jiných účinků na stroj a povrch
- zahrnutí výsledků do navazujících analýz

3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Problematickou interakce jedoucího stroje a povrchu se již zabývala a v současnosti zabývá celá řada velkých jmen a institucí. V nedaleké minulosti vznikl a i dnes vzniká nespočet metodických přístupů pro řešení vybraných detailů této komplexní problematiky. Bez hlubšího pohledu se může jevit interakce stroje s povrchem jednoduchá, avšak při důkladnějším prozkoumání ať už jednotlivých detailů či globálního řešení se ukáže její složitost.

Většina výzkumů je zaměřena pouze na dílčí část interakce stroje a povrchu. Velmi častým tématem je zlepšení jízdních vlastností a pohodlí pro cestující. Změnou nastavení parametrů zavěšení kol (tuhost pružin, tlumiče) se snaží docílit zlepšení mnoho výzkumných týmů [13]. Někteří jdou dále a nemění jen hodnoty, ale i charakteristiky a chování těchto prvků [58]. Výsledkem nejednoho výzkumu je volba aktivních prvků, které využívají složitých algoritmů ke zlepšení jízdního komfortu i jízdní stability [18]. Na oblast komfortu jízdy přímo navazují výzkumy vlivu jízdy stroje na jeho posádku [63]. V roce 1997 se Tatsuro Muro zaměřil na rozdíl mezi 4WD, RWD a FWD pohonem vozidla, při jízdě na písčitém skloněném terénu [33]. Muro se zaměřil na jízdní vlastnosti při jízdě do i z kopce. Cílem navazující práce bylo najít vhodnou polohu těžiště vozu.

Kontakt pneumatiky či pásu s povrchem je často sledován ze strany povrchu, zejména jde-li o půdu v lesích či na polích. Tímto pohledem se zabývá celý vědní obor Terramechanika. J. Wong v roce 2006 provedl výzkum, kde sledoval rozdíly mezi pásovými a kolovými podvozky využívanými ve vojenství [60]. Ten samý autor v roce 1996 společně s C. Liu prezentoval využití softwaru FEM (Final Elements Methods) MSC.MARC pro simulaci interakce pneumatiky s půdou [29]. V roce 2003 H. Nakashima společně s Wongem publikovali vytvořený trojrozměrný model pneumatiky pomocí MKP [34].

Alexandr Grečenko v roce 2003 [14] představil svůj návrh pro hodnocení nejen zemědělských pneumatik podle vlastního parametru, který nazývá „Compaction number rating“. Metodiku pro jeho stanovení upravil a prezentoval později v roce 2009 [15]. V roce 2009 se skupina vědců (Thomas Way, Tadashi Kishimoto a kolektiv) zabývala výzkumem vlivu nahuštění pneumatik a vlivu výšky a šířky pneumatiky na sypnou hustotu poježděného povrchu [59]. Jízda stroje však nezpůsobuje pouze zhutnění pojížděného materiálu. Zvláště v sypkých a nepevněných materiálech zůstávají viditelné stopy v povrchu zvané koleje či rýhy. Tím se zabýval například J. Hambleton (2009) [17], který simuloval tento jev pomocí MKP ABAQUS. Navíc zkoumal i tvoření vlny materiálu před taženým a poháněným kolem. Skupina vědců z USA (Tennessee, Champaign), které vedl Kun Liu (2009) se zabývala vlivem otáčení vozidla na velikost vyjetých kolejí [30].

Účinky těžké zemědělské i jiné techniky s kolovými podvozky na půdu sledovala nejedna skupina vědců z celého světa. Ve Švédsku se tímto problémem zabývali Birger Danfors [9] (1994) a v roce 2001 prezentoval výsledky z několika polních experimentů J. Arvidsson [5]. Mezinárodní kolektiv, který vedl L. Alakukku (Finsko, Švýcarsko, Anglie, Nizozemí, Portugalsko, Německo) v roce 2003

publikoval příspěvek zabývající se ochranou zemědělské půdy před jejím hutněním způsobeného vlivem provozu těžkých strojů na polích [1].

Oblastí výzkumu interakce stroje a povrchu se mimo jiné zabývá i A. Oida z Japonské univerzity v Tokiu. Oida se v roce 1995 zabýval společně s H. Itoh a M. Yamazaki měřením účinků na 4WD a 4WS traktoru, který jezdil dokola v rýžovém poli [20]. Při tomto měření sledovali rozdíl chování strojů s říditelnou jednou nebo dvěma nápravami. Později (1999) prezentovali numerickou simulaci 4WD a 4WS traktoru pohybujícího se v rýžovém poli [21]. Oida se však zabýval i dalšími stroji. V roce 2002 například publikoval simulaci jízdy vibračního válce s různě profilovaným běhounem [35].

Důležitým bodem výzkumu interakce stroje a povrchu je pro pohyb stroje nejčastěji využívané kolo a přesněji pneumatika. Testů vlivu pneumatik na jízdní vlastnosti je celá řada od mediálně známých testů letních či zimních pneu prováděných různými autokluby (ADAC, DEKRA, atd.) až po odborné testy v laboratorních podmínkách [23]. Vzhledem k současným trendům simulací je však nutné mít k dispozici i virtuální pneumatiky. Existuje několik matematických modelů pneumatik. často používané modely nesou označení Pacejka a byly vytvořeny na základě modelů Magic-Formula. Avšak sám Pacejka, jenž se v této oblasti dlouho pohyboval [37], se přímo na těchto modelech nepodílel. Jedním z nejpropracovanějších modelů je F-Tire. Tento model vyvíjela automobilka Honda a k ní se později přidal i pneumatikářský koncern Continental. Model F-Tire vykazuje výsledky nejvíce odpovídající praxi, avšak pro jeho použití je zapotřebí znát velké množství parametrů simulované pneumatiky [26].

Kolové podvozky a některá jejich úskalí zkoumá Piotr Dudzinsky z Varšavy, který je zaměřený zejména na stavební stroje mimo jiné i s kloubovými rámy. Roku 1986 napsal článek zabývající se více nápravovými stroji s více hnanými nápravami a z toho vyplývajícími kinematickými neshodami mezi jednotlivými koly [11]. V roce 1983 dále uveřejnil příspěvek zaměřený na problematiku otáčení kloubových strojů [10]. Dudzinsky roku 2005 vydal celou knihu zabývající se podvozky stavebních strojů [12].

Po kolových podvozcích jsou pásové podvozky další často používanou variantou řešení pojezdu stroje po povrchu. I zde je zástup výzkumných týmů, řešících průjezdnost různými typy terénů od asfaltu přes sníh [61] až po zeminu. V roce 1996 sestavil D. Wyk a kolektiv matematický model interakce mezi pásovým podvozkem a povrchem [62]. Robert Grisco v roce 2006 publikoval svůj model pro určení trakčních schopností pásových podvozků [16]. Trojrozměrný model pásového podvozku s šesti stupni volnosti každého článku podvozku vytvořil a opublikoval D. Rubinstein (2004) [46]. W. Park a kolektiv (2008) popisoval vývoj vlastního softwaru pro odhad trakčních schopností vozidel s pásovými podvozky [38].

Z hlediska zeminy (povrchu) se pásovými podvozky zabývá M. Berli a kolektiv (2003) [8]. Tato skupina prováděla polní testy na různě vlhkých površích a zjišťovala míru působících vlivů na zhutnění povrchu. Vliv jízdy pásového vozidla na terén popsal roku 2007 kolektiv Q. Li, P. Ayers a A. Anderson [28]. V Itálii roku

1995 Adolfo Marsili vedl studii zaměřenou na sledování rozdílů mezi gumovými a ocelovými pásy podvozků [31]. V České republice se zabývá pásovými podvozky například Milan Chalupa z Univerzity obrany, který řeší rychlostní limity a omezení pásových podvozků [19].

Některé nevýhody běžných pásových podvozků lze odstranit změnou koncepce podvozku a také kombinací pásů a kol. Skupina vědců (Kenji Watanabe, Masanori Kitano, Akihiro Fugishima) se zaměřila na čtyř-pásový říditelný podvozek (4TD, 4TS, FTD, FTS, RTD, RTS) a jeho vlastnosti [57]. Watanabe a Kitano v roce 1986 uveřejnili studii schopností řízení kloubových pásových vozidel [56] a později v širším kolektivu práci o řízení pásových vozidel ve vysoké rychlosti [25].

Zejména ve stavebním průmyslu jsou případy, kdy hutnění povrchu pojíždějícím strojem je žádoucí. Za těmito účely se nejčastěji používá válců. Zhutňování povrchů pomocí válců je proces starý přes jedno století. Z počátku se hutnilo statickými válci, avšak po druhé světové válce se začínalo prosazovat vibrační zhutňování povrchů. Vibračním zhutňováním a dynamickými účinky na podloží se zabývali například Uwe Bathelt [7], D. Barkan [6] a později se touto problematikou zabývali S. Moshin [32], J. Schäffner [48]. Na základě Říhových teorií [47] bylo v roce 1960 odvozeno, že míra zhutnění přímo závisí na intenzitě, kterou je daný povrch hutněný. V roce 1975 byla vytvořena rozsáhlá teoretická publikace o vibrační technice i s výsledky z terénních měření a verifikací modelů [44]. Před rokem 2000 se začínají objevovat práce Rolanda Anderegga, který zpracoval disertační práci na téma nelineární vibrace při dynamickém zhutňování zemin [2]. Na tuto práci navazuje napřed sám [3] a později společně s Kuno Kaufmannem [4]. Simulacemi hutnění zemin se zabývá množství vědeckých pracovníků, mezi nimi například již zmíněný Oida z Kjótské univerzity [35] a nebo v roce 2007 C. Kelln, J. Sharma a D. Hughes [24] z Velké Británie a Kanady.

V české republice se hutněním povrchů zabýval a zabývá kolektiv dnes již bývalého podniku Stavostroj (nyní AMMANN), kde se dodnes vyrábí vibrační válce na vysoké technické úrovni. Na ČVUT se technikou vibračních válců zabývali Věra Voštová a Milan Kašpar [55]. Na VUT se v této oblasti pohyboval Blahoslav Pacas [36]. Později na VUT se touto problematikou zabýval Miroslav Škopán [52], Jaroslav Kašpárek [22] a Michal Vaverka [54].

Všechny zde uvedené výzkumy a práce se zabývají interakcí jedoucího stroje s podložím, avšak vždy pouze z vybraného hlediska. Málokterý výzkum je však zaměřen na sledování namáhání strojních prvků jako například nosného rámu stroje či jím neseného zařízení způsobeného jízdou stroje zejména pak po nerovném povrchu.

4 KATEGORIZACE INTERAKCE JEDOUCÍHO STROJE A POVRCHU

Pohybující se stroj, ať už jde o vozidlo, pracovní stroj (stavební či zemědělský), vždy svým pohybem působí na pojížděný povrch, ve kterém díky tomu dojde k různě zřetelným změnám. Tyto změny povrchu zpětně působí na pojíždějící stroj a opět v různé míře. Avšak vždy lze hovořit o interakci jedoucího stroje a povrchu, i když ne vždy je vzájemné působení „vyvážené“. V některých případech je působení v jednom ze směrů méně intenzivní než působení ve směru druhém. Je zřejmé, že způsob řešení úlohy vozidla na asfaltu bude odlišný od způsobu řešení úlohy vibračního válce na zemině a to bude odlišné od způsobu řešení pracovního pojezdu skrejpru (Obr. 1).



Obr. 1 – Vyvážená a nevyvážená interakce stroje a pojížděného povrchu

Pojem interakce jedoucího stroje a povrchu (podloží) lze vnímat hned z několika hledisek. Málom který výzkum se však zabývá interakcí stroje a podloží se zaměřením na vliv jízdy stroje po nerovnostech na stroj samotný, jeho konstrukci rámu a nebo nesené zařízení.

Na konstrukce vybraných strojů, zejména těch určených pro přepravu, jsou kladeny požadavky typu nízké pohotovostní hmotnosti. Vlivem tohoto požadavku dochází k odlehčování rámu, avšak s tím souvisí změna nosnosti. Proto právě v těchto případech je zapotřebí zabývat se vlivy dynamických účinků vzniklých interakcí stroje a podloží, aby mohlo dojít ke snížení hmotnosti rámu vozu. Jiný případ je u strojů, kde pohotovostní hmotnost není předmětem zájmu, ale je sledován vliv jízdy stroje na pracovní zařízení. Zvláštním příkladem může být stroj, který vykonává při jízdě pracovní úkon a jeho jízdou je ovlivňována schopnost vykonávat daný úkon. Do této oblasti spadá celá řada stavebních či zemědělských strojů, ale také vojenské techniky. V některých případech je dokonce vyšší hmotnost žádoucí z důvodů zvýšení stability či práce schopnosti stroje. Často je tento fakt řešen pomocí přídatného balastu, který zvyšuje univerzalitu stroje.

Je tedy důležité si uvědomit, jak působí pojíždějící stroj na pojížděné podloží a naopak, jak podloží působí na stroj. Vzájemná interakce mezi těmito elementy pak může být „vyvážená“ a nebo naopak „nevyvážená“ („jednostranná“). Rovnováhu vzájemných interakcí lze u některých zařízení vypočítávat pohledem (automobil poskakuje na nerovné komunikaci, která se nehýbe, orající traktor se v rovině kolmé na směr jízdy téměř nehýbe zatímco povrch pole se výrazně mění (Obr. 1). Pro přesnější zhodnocení může posloužit měření fyzikálních veličin a jejich procentuelní poměr k původnímu či ustálenému stavu sledované veličiny (například zrychlení v rovině kolmé na směr jízdy, deformace pružin, sypná hustota materiálu, plasticita zeminy, míra zhutnění apod.).

4.1 STROJE PŘI JÍZDĚ NEZPŮSOBUJÍ TÉMĚŘ ŽÁDNÉ ZMĚNY POVRCHU

Denně po našich silnicích projede miliony automobilů, které svým působením pozvolna mění vlastnosti vozovky. Oproti pomalým změnám vozovky je vozidlo při jízdě po nerovné komunikaci vystaveno silnému působení kinematického buzení, což způsobuje znatelné změny chování vozu. Do této kategorie však patří i další zařízení již ne tak často viditelná v městském a dálničním provozu, jakými jsou například zemědělské a stavební stroje. Kategorii interakcí s minimálními dopady na povrch lze popsat tak, že sledované veličiny na jedoucím voze se mění výrazněji než veličiny sledované na pojížděném povrchu. V této kategorii jsou časté dva směry zaměření výzkumu týkajícího interakce pracovního stroje s pojížděným povrchem.

- Determinace dynamických účinků na stroj
- Optimalizace jízdních a jiných vlastností stroje

4.2 STROJE PŘI JÍZDĚ ZPŮSOBUJÍ ZÁSADNÍ ZMĚNY POVRCHU

Jízda stroje může bez velkých účinků na stroj samotný značně působit na pojížděný povrch. To je v některých případech žádoucí a v jiných naopak velmi nežádoucí. V této kategorii se objevují úlohy, kde je v minimální míře sledován jedoucí stroj a jeho chování a hlavním zájmem je stav povrchu a vliv jedoucího stroje na něj. Tato kategorie postihuje případy, kdy sledované veličiny na stroji se citelně nemění oproti rovnovážnému stavu, kdežto pozorované veličiny povrchu se mění výrazně. U povrchu se velmi často sleduje hloubka stop, změna sypné hustoty, či plasticita zeminy. V této kategorii jsou časté čtyři směry zaměření výzkumu týkajícího interakce pracovního stroje s pojížděným povrchem.

- Minimalizace hutnění povrchu
- Maximalizace hutnění povrchu
- Zdokonalení tvaru nástroje přetvářejícího povrch
- Sledování změn podloží a jeho vlastností

4.3 JEDOUCÍ STROJ A POVRCH NA SEBE VYVÁŽENĚ VZÁJEMNĚ PŮSOBÍ

Vývoj stavebních i zemědělských strojů je v současnosti tlačěn směrem k nižším nákladům na samotný vývoj, výrobu, provoz a údržbu. Vedle snižování nákladů existují tlaky na zvyšování výkonností strojů a kvality odvedené práce. Všechny tyto požadavky vedou ke snížení vlivu lidského faktoru a zvýšení vlivu inteligence a automatizace strojů. Stavební či zemědělský stroj s různě vyvinutou inteligencí potřebuje být zásobován vstupními daty, která musí řídicí jednotka stroje zpracovat a vyhodnotit a teprve na tomto informačním základu stroj mění své chování. Stroj tedy musí být vybaven „smysly“, kterými může sbírat informace o povrchu.

Jedoucí stroj způsobuje svým pohybem změny stavů sledovaných parametrů pojížděného povrchu a ten působí na stroj přes zpětné vazby tvořené snímači různých fyzikálních veličin. Zpětné působení od povrchu může být buďto pomocí mechanické (hydraulické) zpětné vazby, kdy stroj reaguje kupříkladu na zátěž nástroje jeho odklonem, anebo pomocí v současnosti značně využívaného typu zpětné vazby, kterým je elektronický přenos informací od snímačů fyzikálních veličin. Zpracování těchto informací probíhá zpravidla v řídicí jednotce stroje, která zpětně upraví parametry stroje na vhodnější hodnoty. Tím je uzavřen kruh interakce stroje s povrchem (Obr. 2).



Obr. 2 – Regulační smyčka potřebná pro „komunikaci“ povrchu se strojem

4.4 SHRnutí

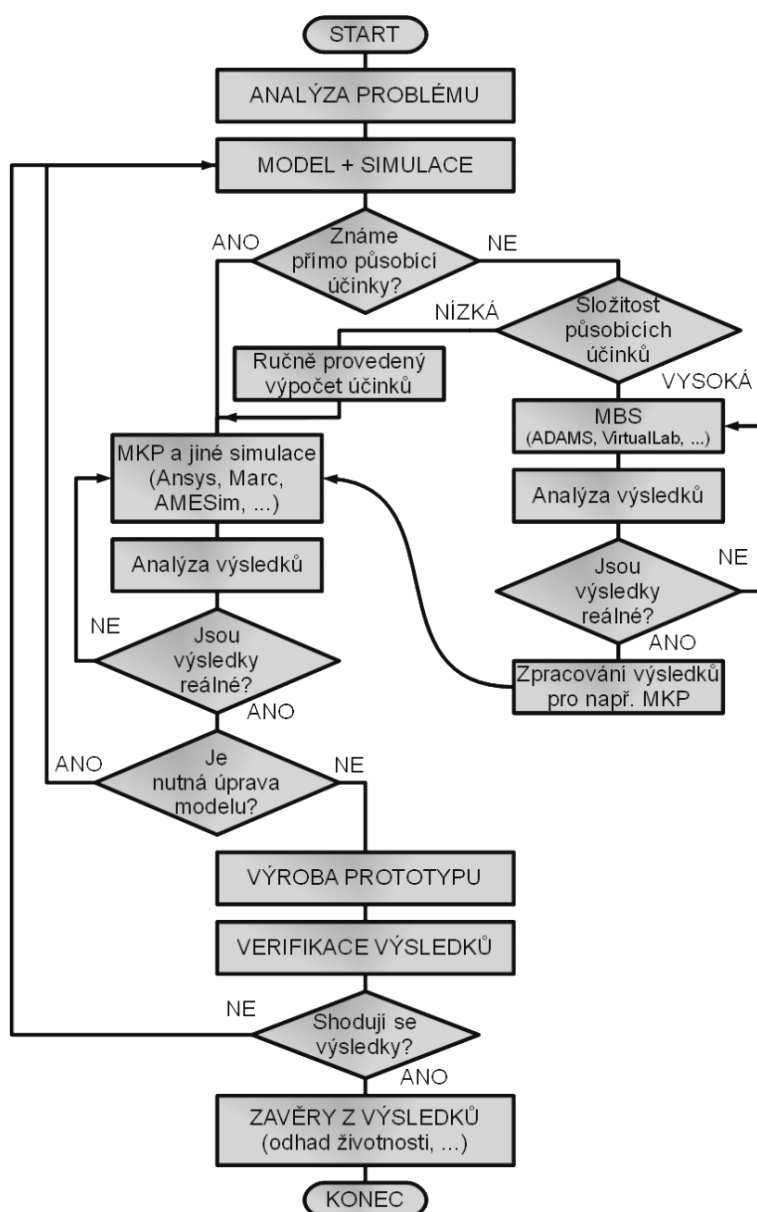
Vyvážená interakce není nutnou podmínkou pro tvrzení, že při jízdě pracovního stroje po povrchu jsou tyto dva subjekty v interakci. V této práci jsou popsány dva případy nevyvážené interakce jedoucího stroje a povrchu o různých složitostech a detailnostech simulačních modelů. Jako poslední je v této práci uveden případ vyvážené interakce, kde je složitost celé úlohy ze zde uvedených nejvyšší.

5 MODELOVÁNÍ A SIMULACE

V dnešní době nelze z ekonomických důvodů každou myšlenku převést do reálného modelu (prototypu), na kterém by byly odladěny všechny nepříznivé stavy. Co se týče dynamických, mechatronických, hydraulických ale i jiných soustav, je vhodné zvláště ty složitější soustavy převést do roviny simulací. Za pomoci výpočetní techniky je možné odstranit řadu potíží už před výrobou prototypu.

5.1 MODEL, SIMULACE A VERIFIKACE

Postup při využití modelů a simulací je vždy závislý na konkrétním případě. Chceme-li však řešit vliv interakcí stroje s povrchem na konstrukci stroje, můžeme využít následující metodiky včetně zahrnutí podpůrných simulací (Obr. 3).



Obr. 3 – Metodika postupu při využití MBS k určení působících účinků

Za model můžeme považovat cokoliv, čím se snažíme napodobit reálnou soustavu. Modelem tak může být hmotný celek (součást) vyrobený v měřítku, ale také virtuální celek v podobě provedené simulace. Účel těchto „napodobenin“ je ukázat a ověřit schopnost celku (součásti) plnit konkrétní funkci při daných požadavcích na něj kladených. Počítačová simulace je experiment s počítačovým modelem. Napřed je tedy nutné vytvořit model, do tohoto modelu dosadit počáteční podmínky a následně s těmito hodnotami provést experiment ve virtuální realitě. Úspěšnost simulace je tedy závislá na kvalitě zpracování modelu a na kvalitě vstupních dat a mimo to také na použitém softwaru a jeho nastavení. Simulace mohou být více či méně úspěšné. Z důvodu možných „nereálných“ výsledků je nutná verifikace, nebo-li ověření simulovaných výsledků a to nejlépe na reálných prototypech apod. Bez tohoto ověření není vhodné na výsledcích simulací zakládat důležité a zásadní předpoklady. Rozdílnost simulovaných a naměřených výsledků však nemusí vždy znamenat chybu modelu. Vždy je nutné provést kritické zhodnocení jak výsledků ze simulace tak i výsledků z měření, kde je možné zanést rovněž celou řadu chyb.

5.2 SHRnutí

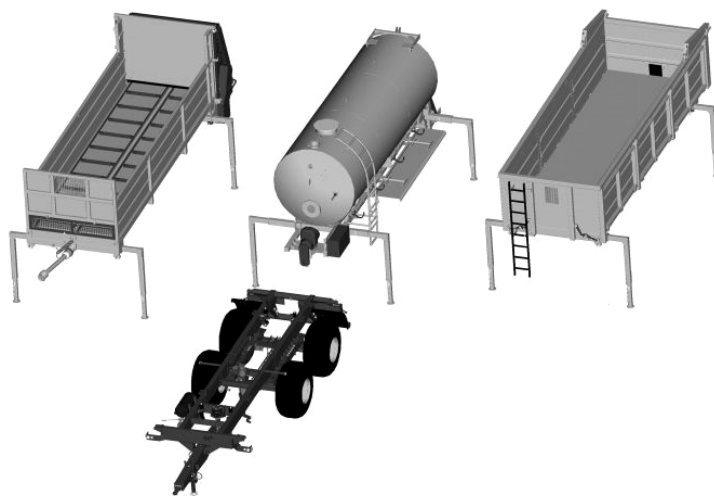
Modelování a simulace se v dnešní době běžně využívá. Nejčastěji je však využíváno aplikací typu MKP a pouze specializované podniky využívají i jiných softwarů, které jsou určeny například pro simulace hydraulických, elektrických a jiných obvodů. V případě obvodů, které způsobují pohyb předmětů a součástí, je za vyšší složitosti systému vhodné využít i „podpůrné“ simulace pohybů daných prvků v tomto systému a to například v systému ADAMS, VirtualLAB a jiných.

Je však nutné mít na paměti fakt, že s touto „podpůrnou“ simulací vstupuje do řešení problému další zdroj možných chyb a je tedy nutné i zde analyzovat výsledky, posoudit jejich vypovídající schopnost a reálnost s ohledem na očekávané výsledky. A samozřejmě je vhodné i tyto výsledky verifikovat na konečném prototypu. Rozhodující pro využití této metodiky je složitost účinků působících na sledovaný prvek stroje.

6 ZEMĚDĚLSKÝ UNIVERZÁLNÍ TRAKTOROVÝ NÁVĚS

Jízda zemědělské techniky po jakémkoliv povrchu je značně specifická hned z několika hledisek. Ve valné většině případů se jedná o značně těžké stroje. Ty dopravní navíc mohou převážet tuny materiálu. Rychlost zemědělských souprav není nijak extrémní a maximum se pohybuje okolo 60 km/h, avšak při hmotnostech těchto strojů je jejich kinetická energie a hybnost značná. Specifický je z druhé strany i terén, po kterém se technika pohybuje. Jde o celou řadu typů nerovností, přes které tyto stroje přejíždí. V agronomické oblasti nejsou výjimkou prudká stoupání či klesání, příkopy, větší schodky a celá řada dalších stochastických nerovností na polních cestách. Na běžných komunikacích, kde tyto stroje jezdí rychlostmi i přes 50 km/h, jsou překážky typů zpomalovacích prahů či náhodně uspořádaných výmolů.

Posledních několik let je patrný trend rostoucích přepravních objemů a s tím souvisejících hmotností souprav. Celý svět je v současnosti tlačěn ke snižování nákladů, kterého je možné v dopravě zemědělských komodit dosáhnout několika způsoby. Těmi základními jsou například udržování techniky v čistém stavu (zejména chladiče a sací otvory), správné huštění pneumatik [51], správná volba velikosti traktorové soupravy. Pro dopravní soupravy je doporučováno využívat dopravních systémů s výměnnými účelovými nástavbami (Obr. 4), které mohou snížit náklady až o 42 % [50]. Použití výměnných nástaveb v praxi vypadá tak, že agronom zaplatí poplatky, pojištění a servis pouze u jednoho více využívaného podvozku a nemusí vynakládat finance na více vozidel. Na tento univerzální podvozek lze umístit korbu, rozmetadlo hnojiv nebo cisternu [42].



Obr. 4 – Výměnný systém Strom [67]

6.1 VÝVOJ KONCEPCE UNIVERZÁLNÍHO ZEMĚDĚLSKÉHO VOZU

V rámci projektu MPO FI-IM4/091 „Nová generace traktorových nosičů nástaveb s výměnnými nástavbami“, měl podnik ZDT s.r.o. Nové Veselí ve spolupráci s ÚADI (Ústav automobilního a dopravního inženýrství) vytvořit nový univerzální vůz včetně nástaveb. Před zahájením vývoje bylo nutné zjistit požadavky uživatelů obdobné techniky a dotázat se jich na jejich preference nabízených vlastností vozu. Během průzkumu bylo osloveno několik náhodně vybraných uživatelů zemědělské techniky. Výměra obhospodařovaných pozemků všech dotázaných podniků byla 84 412 ha. V současnosti se v ČR hospodářství přibližně na rozloze 4 264 tis. ha orné půdy [66], což znamená, že provedený průzkum zahrnul necelé 2 %. Na základě tohoto průzkumu byl sestaven profil ideálního vozu pro různě velké agropodniky.

6.2 SIMULACE NÁVĚSŮ O CELKOVÉ HMOTNOSTI VYŠŠÍ 21 TUN

Determinace zatížení rámu konstrukce podvozku pro výpočet pomocí MKP (Metoda konečných prvků) je závislá na znalosti stavů, které nastávají v reálných podmínkách. Bohužel ne všechny stavy a podmínky lze dopředu odhadnout. Základním předpokladem bývá správné zacházení s technikou. V současnosti jsou

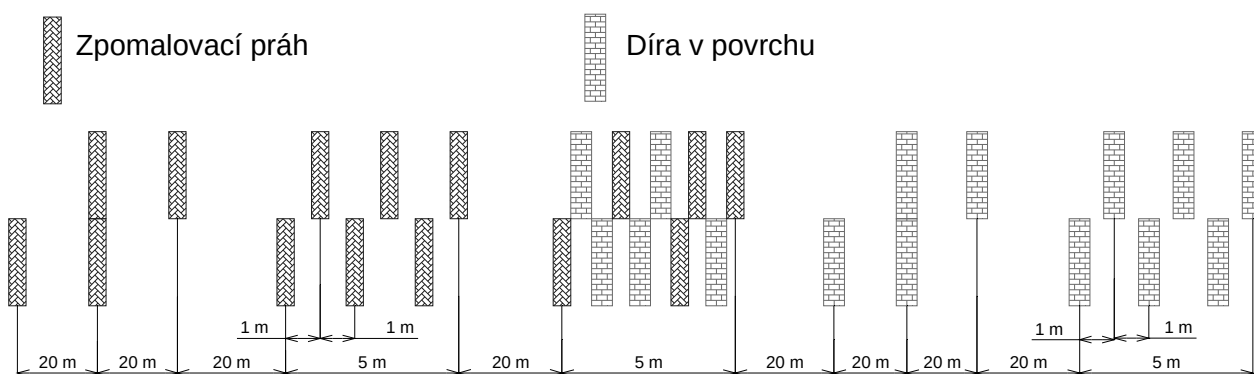
farmáři tlačeni okolnostmi k využívání techniky až na (za) hranici jejích možností. V oblasti zemědělské přepravy to znamená značné přetěžování vozů a jízdu často vyšší než povolenou či dokonce konstrukční rychlostí vozu.

Modely jednotlivých vozidel byly vytvářeny dle reálných předloh. Jako vzor traktoru byl vybrán FENDT 936 pro své hmotnostní parametry. Modely návěsů byly vytvořeny na základě reálných konstrukcí nově navržených vozů. Na tento rám pak byly pomocí vazeb uchyceny další prvky jako korba, oje, zavěšení náprav a podobně. Detailnost modelů lze odvodit od celkového počtu vazeb či stupňů volnosti soustav. Pro simulaci soupravy s třínápravovým vozem byla vytvořena soustava s 36 stupni volnosti a v případě dvounápravového vozu (tandem - Obr. 5) se jedná o soustavu se 34 stupňů volnosti. Nejsložitější oblastí modelů je podvozková část. Všechna kola jsou k rámu přichycena pomocí 8 vazeb. Tedy u třínápravového vozu se jedná 48 vazeb plus navíc 4 vazby mezinápravových vahadélek a 4 kontaktní oblasti simulující dorazy pro pohyb zmíněných vahadélek.

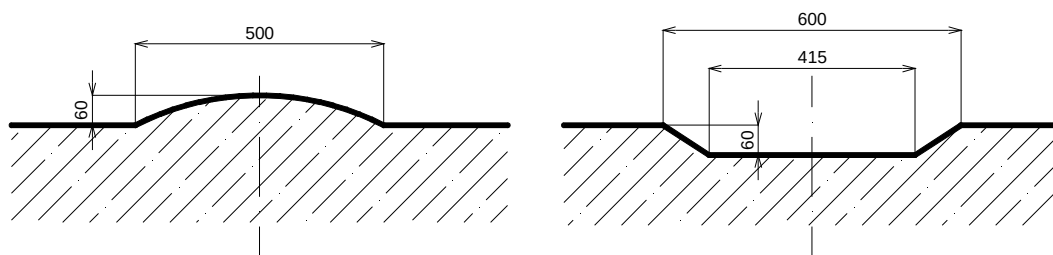


Obr. 5 – Model soupravy s dvounápravovým návěsem o celkové hmotnosti 21 tun

Profilů tratí bylo použito několik s ohledem na předpokládaný terén. Jedna z testovacích tratí byla sestavena z dvou druhů překážek (Obr. 7). Jde o překážky tvaru zpomalovací prahu a tvaru díry. Přesný tvar definuje norma ČSN 30 0560 [64]. Tyto normy jsou však určeny k jinému účelu a proto již neupřesňují například rozteče a uspořádání překážek. Překážky byly uspořádány (Obr. 6) na základě teoretických předpokladů a jiných reálných testovacích polygonů (např. polygon pro testování trolejbusů plzeňské společnosti ŠKODA HOLDING a.s. [43], [49]) [41].

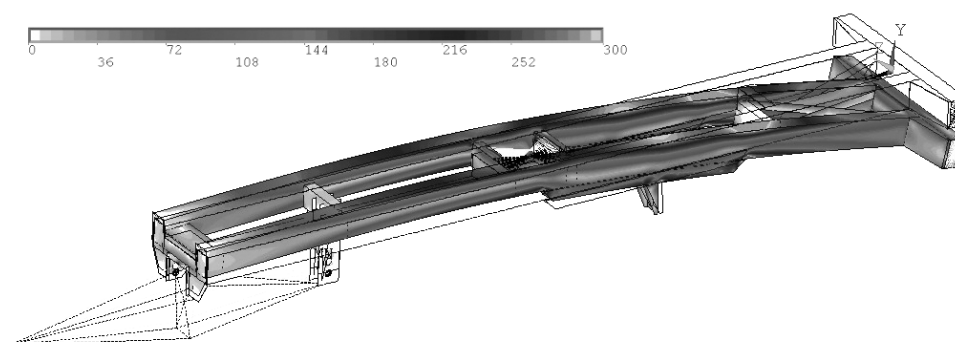


Obr. 6 – Schéma uspořádání překážek na dráze pro simulaci jízdy po silnici [41]



Obr. 7 – Profil překážek pro simulaci jízdy na vozovce [41]

Výsledkem všech simulací jsou zjištěné silové účinky ve vybraných místech na rámech návěsů, které na konstrukci působí. Mezi sledovaná místa uvnitř vozu patří body uchycení korby s materiálem k rámu podvozku, místa pro uchycení oje k rámu a v neposlední řadě jsou pozorovány účinky v místech spojení rámu a zavěšení náprav. Simulací získané zatěžující účinky jsou po ověření implementovány do MKP modelu. Pro implementaci výsledků do softwaru využívající MKP je nutné znát nejnepríznivější a třeba i výrobcem zakázaný, avšak fyzikálně možný zatěžující stav. Za tímto účelem je vhodné využít zkušenosti reklamačního a servisního oddělení výrobce daného produktu.



Obr. 8 – Výsledek MKP výpočtu rámu vozu zatíženého rozjezdem s vyklopenou korbou

Z celé řady testů byl za nejextrémnější vybrán rozjezd s vyklopenou korbou a nalepeným či přimrzlým materiálem uvnitř korby. Tento stav je nejvíce nebezpečný pro rám se zavěšením náprav typu bogie (Obr. 8), protože převalí konec je u tohoto typu největší.

V případě složitějších úloh jakou je například tříosý návěs se naplno uplatňuje předcházející podpurná simulace jízdy i dalších (mimo)provozních stavů. Avšak tato metodika má hlavní nevýhodu v případě, že se jedná o velmi rychlé děje. Mezi ty patří velká část působících účinků, neboť přejezd nerovnosti způsobí pouze krátkodobý vzruch v soustavě. Tento fakt způsobuje, že v ocelové konstrukci rámu podvozku nestihne dojít k plnému zatížení konstrukce vlivem deformace její i okolních částí. V případě řešení takovéto úlohy je nutné sledovat i čas po který zatížení působí. Pokusíme-li se zadat maximální zatížení zjištěné pomocí MBS do lineárního MKP modelu, bude velmi pravděpodobně výsledkem značně vysoké maximum napětí v konstrukci. Proto je vhodné využít nelineárních řešičů s možností zadat celý průběh silového působení zahrnující transientní charakter zatížení.

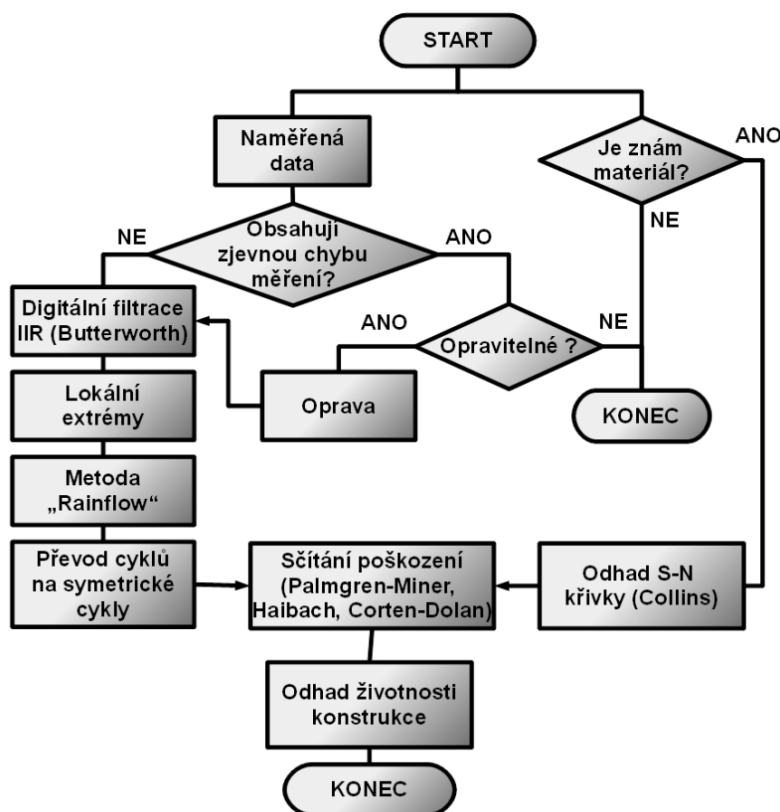
6.3 VERIFIKACE VÝSLEDKŮ

Na základě provedených simulací a MKP analýz byly vytipovány provozní stavy, kterým by měl být reálný prototyp podroben za účelem ověření správnosti nasimulovaných výsledků a také za účelem ověření předpokládaných vlastností konstrukce podvozku i celého vozu. Měření bylo prováděno v okolí Nového Města na Moravě, kde byl vůz v testovacím provozu. Trasa jízd vedla po veřejných a obslužných zpevněných a byl do trasy zahrnut i úsek s polní nezpevněnou cestou. Trasa mimo jiné zahrnovala i průjezd dezinfekční jámou.

Zmíněná trasa byla projeta celkem 3x s různými hmotnostmi soupravy. V prvním případě byl vůz prázdný. Celá souprava vážila 17260 kg. Po té byl vůz naložen na hmotnost 22560 kg. Tato souprava projela celou trasu včetně dezinfekční jámy a na zpáteční cestě byl proveden test silného brzdění. Souprava z rychlosti 50 km/h zastavila během 4 sekund. Následně byl vůz naložen na 28720 kg celkové hmotnosti. Celá souprava vážila 37560 kg. I s touto soupravou byl projet celý okruh včetně dezinfekční jamy a bylo zkoušeno i prudké brzdění. V závěru byly zkoušeny stavy související s vyprazdňováním korby.

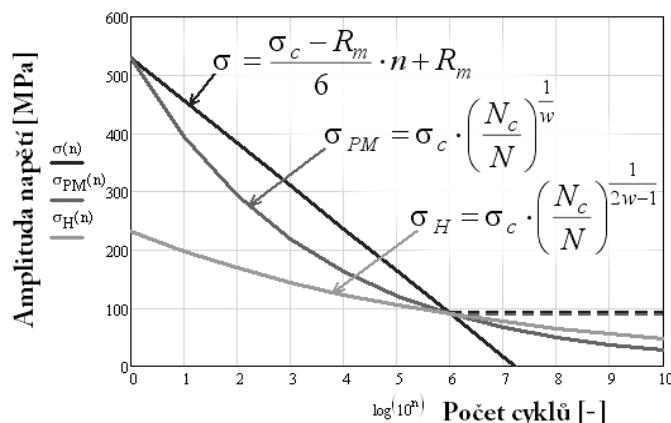
6.4 ODHAD ŽIVOTNOSTI RÁMU

Pro analýzu a prognózu životnosti byla vyhodnocena všechna data. Avšak s ohledem na největší zatížení konstrukce při jejím přetížení (při celkové hmotnosti vozu 29 tun) byla primárně využita tato série dat. Průběh analýzy lze popsat metodickým postupem (Obr. 9).



Obr. 9 – Postup při odhadování životnosti konstrukce rámu podvozku

Algoritmus „Rainflow“ má výstup v podobě tří sloupců (počet kmitů, střední hodnota kmitu, amplituda kmitu). Cykly po přepočtení na symetrický cyklus se následně sčítají pomocí Palmgren-Minerova pravidla. Avšak existují i jiné metodické přístupy pro sčítání cyklů. Vzhledem k malým rozkmitům je pro odhad životnosti konstrukce rámu podvozku využito Haibachova přístupu (Obr. 10).



Obr. 10 – Haibachova hypotéza ($N_c = 10^6$ cyklů)

Vzhledem k účelu vozu lze předpokládat pracovní cyklus (jízda s naloženou korbou, vyklápění, jízda s prázdnou korbou). Za podmínek přetížení vozu, rychlé agresivní jízdy v kombinaci s jízdou dle předpisů a přepravní vzdálenosti cca 8 km bude počet těchto pracovních cyklů do poškození rámu podvozku přibližně 130 000. Počet těchto cyklů bude klesat s okolními podmínkami působícími na vůz.

6.5 SHRnutí

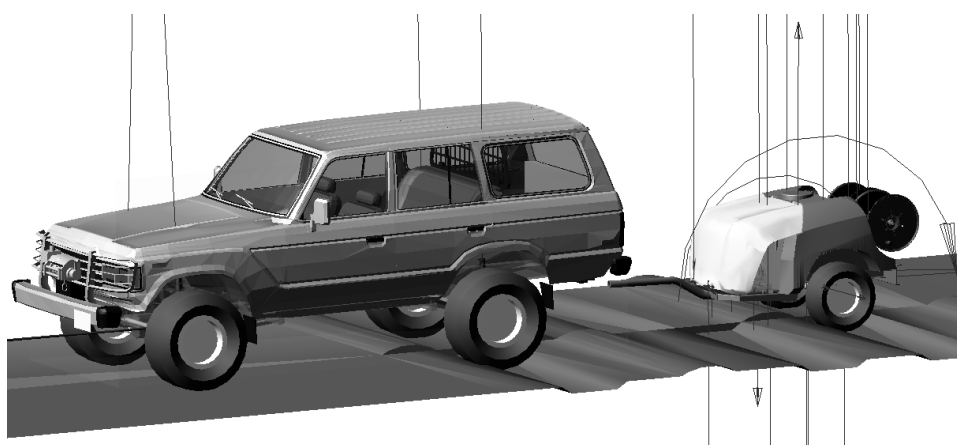
Na tomto příkladu lze vyzorovat využití metodických postupů navržených nejen v této práci ale i dalších všeobecně známých. Na začátku je úloha kategorizována a podle toho je navržen postup řešení. V tomto případě bylo z důvodu složitosti zejména podvozkové části přistoupeno k „podpurné“ simulaci pomocí MBS (ADAMS). Tento krok se nejvíce osvědčil při řešení tandemového a tridemového zavěšení náprav.

7 MALÝ PŘÍVĚS S PRACOVNÍM ZAŘÍZENÍM PRO TLAKOVÉ ČIŠTĚNÍ

Čištění tlakovou vodou je v dnešní době využíváno stále častěji. Tímto způsobem lze čistit odpadní potrubí, různé plochy od chodníků přes ploty až po zdi. Některé z těchto pracovních zařízení jsou vybaveny pro čištění olejových úkapů na vozovkách. Řadu zde popsaných služeb zajišťují i menší společnosti, které nemají zdroje a ani využití pro běžně vídané velké stroje, které bývají umístěny na nákladních vozech. To je důvod proč vyvíjet tyto pracovní zařízení i v menším měřítku. Nosičem takového zařízení pak bývá speciálně navržený podvozek, který nese pohonnou jednotku s vysokotlakým čerpadlem, nádrž a další nutné vybavení pro práci zařízení.

7.1 POPIS MODELU

Na celý návěs lze pohlížet jako na dynamickou soustavu o n stupních volnosti s kinematickým buzením, které tvoří překážky (nerovnosti) na vozovce. Při zjednodušení celku nádrže na hmotné těleso bez proměnlivého těžiště, což odpovídá po okraj naplněné nádrži, se simulace výrazně zjednoduší. Avšak i po tomto zjednodušení je nutné se pro navazující práce podrobně zabývat vybranými detaily, jako uchycení náprav a motorové desky k rámu a v neposlední řadě rozložení hmotnosti nádrže na opěrné plochy rámu. Model pro simulaci jízdy byl vytvořený v simulačním prostředí ADAMS. Model čističe byl zapřáhnut za větší osobní automobil a s celou soupravou (Obr. 11) byla projeta překážková dráha různými rychlostmi. Simulovaná souprava včetně jednoduchého tažného vozidla má 49 stupňů volnosti, 29 vazeb a obsahuje 48 pružin, z nichž většina tvoří tzv. pružné vazby.



Obr. 11 – Model soupravy terénního vozu s čističem SMART

7.2 PEVNOSTNÍ ANALÝZA RÁMU PODVOZKU

Výsledky první verze rámu ukázaly nepřiměřené zatížení rámu, které je do jisté míry chybné z důvodu krátkodobého (transientního) zatížení konstrukce vysokou silou. Tento problém by mohl být řešen pomocí nelineárního řešiče, který je schopen uvažovat i transientní charakter zatížení konstrukce. Z důvodu značného, avšak krátkodobého přetížení působícího na návěs během jízdy po nerovnostech byly přehodnoceny maximální působící zrychlení dle [45]. Výsledkem bylo zjednodušení MKP analýz na pouhé čtyři stavy (zrychlení, brzdění, průjezd zatáčkou, statický stav), přičemž působící hodnoty zrychlení byly nižší a vzhledem k délce trvání jednotlivých akcí (zrychlování, zpomalování jízda zatáčkou) je lze použít při statickém MKP výpočtu.

7.3 SOUHRN

Z příkladu je patrné, že bez zahrnutí efektu krátkodobého zatížení není možné vždy brát v úvahu dosažených výsledků. V každém případě je nutné přihlídnout k době, po kterou sledované síly působí a také k odchylce těchto sil od ustáleného (ne nutně statického) stavu. Studie rovněž využila metodického přístupu, který je

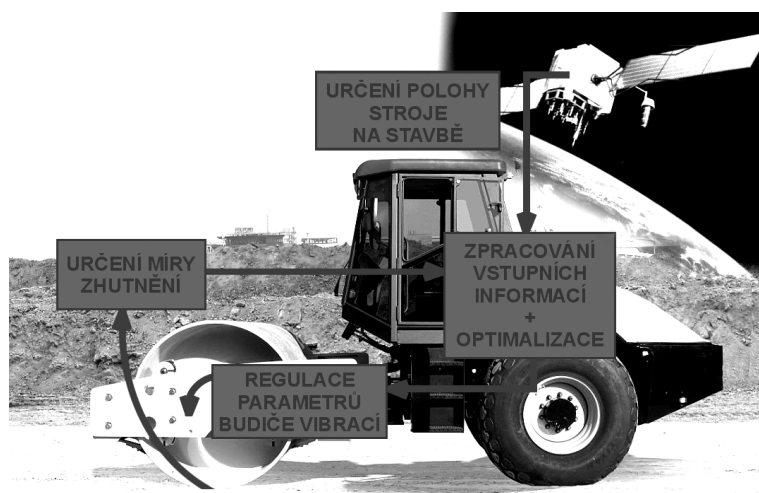
navržen v této práci. Na začátku byly provedeny simulace v předpokládaném (mezi)pracovním prostředí, na základě kterých byly vytvořeny zatěžující stavy konstrukce. Ta byla následně testována pomocí MKP, přičemž po přihlédnutí ke krátkodobému zatížení konstrukce těmito stavy a po srovnání se zatěžujícími stavy navrženými na základě literatury byl tento přístup opuštěn. Jedním z dalších důvodů k tomuto kroku byla relativní jednoduchost namodelování vnějších účinků oproti například modelu tříosého návěsu z předchozí kapitoly. Je tedy patrné, že v této práci navržený přístup je výhodný zvláště pro složitější modely a to hlavně z pohledu počtu vnějších působících účinků.

8 VIBRAČNÍ VÁLEC S REGULAČNÍM BUDIČEM VIBRACÍ

Prudký rozvoj stavitelství a dopravy v současné době způsobil, že stavební stroje pracují všude kolem nás. V průběhu posledních let je patrný silný zájem o vyloučení lidského faktoru jako zdroje možných chyb při různých stavebních procesech. Proto v dnešní době mají stavební stroje různě vyvinutou inteligenci, díky které zvyšují svou spolehlivost, kvalitu a kvantitu provedené práce. Drtivá většina těchto strojů již dnes používá různé technologie, které mají za cíl optimalizovat pracovní proces a snížit náklady na provoz stroje. Díky těmto technologiím směřuje vývoj zemních strojů k automatickým či poloautomatickým strojům, které přizpůsobí své chování v závislosti na interakci pracovního nástroje a přetvářeného materiálu. Stroje vybavené těmito pokrokovými technologiemi dnes nazýváme inteligentními stavebními stroji.

8.1 INTELIGENTNÍ STROJ – VIBRAČNÍ VÁLEC

Pro svou funkci potřebuje inteligentní vibrační válec spojit celou řadu technologií (Obr. 12), které jednotlivě neovlivní jeho vlastnosti, ale v součinnosti mohou výrazně snížit provozní náklady a zvýšit kvalitu práce. V současnosti bývá kladen důraz na nízkou spotřebu, vysokou produktivitu a vysokou životnost stroje.



Obr. 12 – Potřebné vykonávané procesy inteligentního vibračního válce [40]

Inteligentní stroj potřebuje moci řídit své parametry a tím ovlivňovat i své chování. V případě kontinuálně pracujících strojů, jako jsou stroje pro stavbu komunikací (hutnící stroje, grejdry, skrejpry a finišery), bývá řízení pracovních parametrů závislé na vlivech, které se kontinuálně mění při práci. U těchto strojů je důležité sledovat parametry stroje i okolí pomocí senzorů a na základě jejich měření přizpůsobit působící sílu, polohu nástroje, výkon motoru apod. [40].

Základním „hardwarem“ inteligentního vibračního válce je budič vibrací s možností regulace působící síly. To umožňuje řízený budič vibrací s dvěma rotujícími nevyvážky. Takovýto budič vibrací může být s přímkovým nebo kruhovým vektorem vibrace tj. s nesousledným či sousledným vzájemným otáčením nevyvážek. Řízený budič vibrací se vyznačuje vyšší konstrukční složitostí a mimo jiné pohon obou nevyvážek v potřebné přesnosti vůči sobě je sám o sobě dosti komplikovaný.

8.2 REGULOVATELNÝ BUDIČ VIBRACÍ

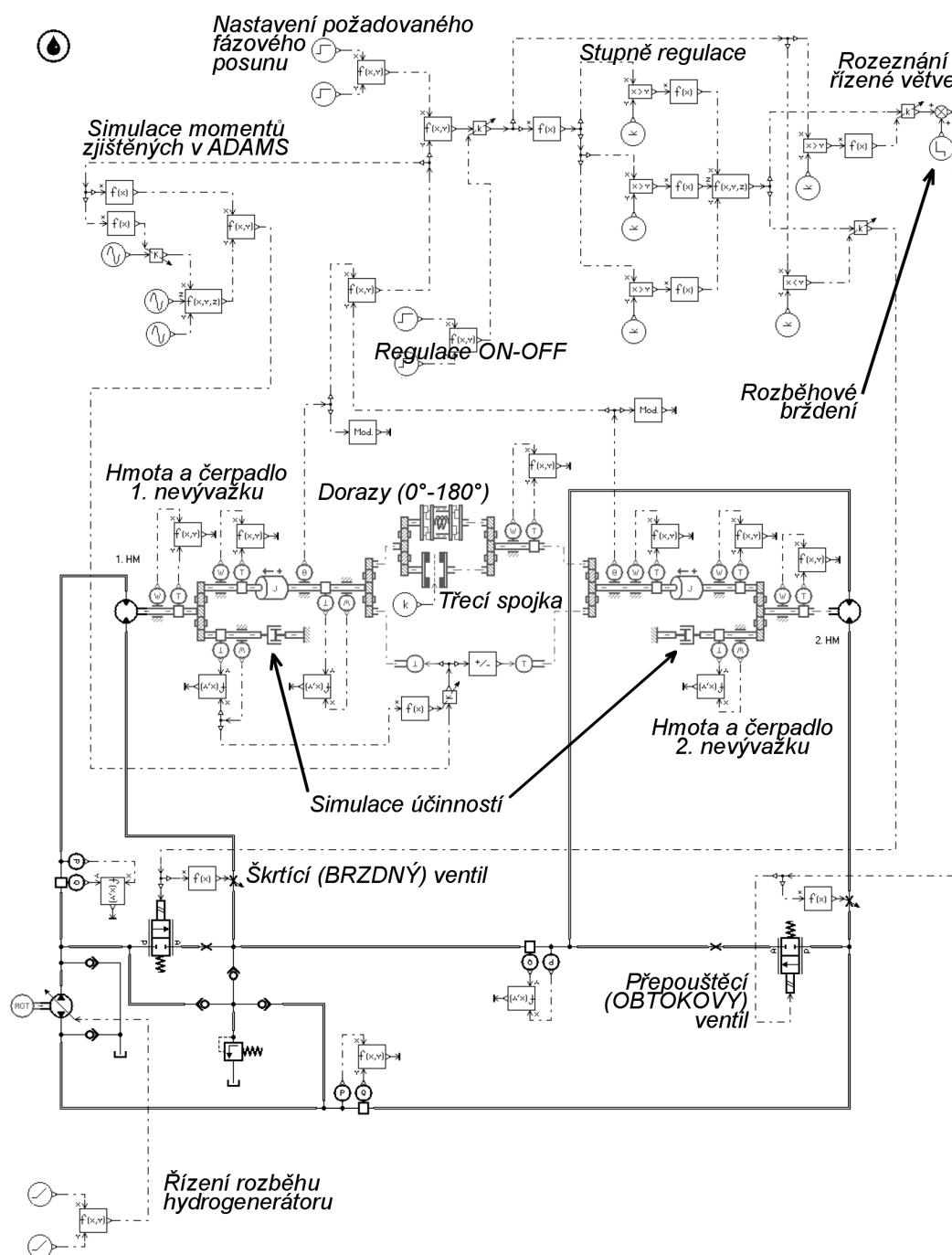
Proces vibračního hutnění podloží je z fyzikálního hlediska v důsledku heterogenního charakteru materiálu velmi složitý. K hutnění rozsáhlejších povrchů se využívají výhradně válce s vibračními běhouny, ve kterých je dosaženo hutnícího účinku pomocí setrvačných hmot otáčejících se nevyvážek. Výjimku tvoří pouze vybrané asfaltové povrchy, kde bývá využito pneumatikových válců. Vibrační běhouny mají uvnitř rotující nevyvážek, který vyvolává odstředivou sílu. Vlivem této síly dochází k výraznému zvýšení efektivity stroje. Velikost odstředivé síly ovlivňuje hmotnost nevyvážky a vzdálenost jeho těžiště od osy otáčení. Hmotnost nevyvážky i jeho poloha vůči ose otáčení je převážně neměnná. Frekvence otáčení nevyvážky je v ideálním případě svázána s druhem hutnících prací, protože na základě dosavadních poznatků je prokázáno [53], že pro různé povrchy a jejich stavy zpracování jsou vhodné různé frekvence vibrací, různá intenzita vibrací a v případě některých budičů dokonce i směr vibrací. Z toho vyplývá, že pro optimální využití možností stroje je nutné regulovat otáčky nevyvážky a výslednou odstředivou sílu od nevyvážky nezávisle na sobě.

V dnešní době existuje více možností jak toho dosáhnout. Jednou z nich je regulace směru vektoru vibrací a další možností je regulace velikosti vektoru vibrací. V prvním případě se nevyvážky otáčejí proti sobě a pootáčením celého systému se určuje směr vibrací (přímkový vektor vibrací). V druhém případě se otáčejí nevyvážky společně (kruhový vektor vibrací) a mění se jejich fázové posunutí.

8.3 HYDRAULICKÉHO OKRUHU PRO POHON REGULAČNÍHO BUDIČE VIBRACÍ

Hydraulický systém se u stavebních strojů používá velmi často. Vibrační válce jich využívají k řízení, pojezdu, pohybu přídatných zařízení a v neposlední řadě k pohonu budiče vibrací. Do části okruhu sloužící k pohonu budiče však vstupují

od nevývažků pro hydraulický obvod nepříjemné vibrace a tedy pulsace tlaků v kapalině. Tyto pulsace se projevují snížením stability regulační smyčky a nepřesností regulace samotné.



Obr. 13 – Model původního hydraulického pohonu budiče vibrací - návrh AMMANN [39]

Jedním z prvních a funkčních systémů je okruh se sériově zapojenými hydromotry a řízením pomocí přiškrcování (Obr. 13). Protože na skutečném prototypu předcházejících verzí docházelo k nevyžádanému samovolnému vzájemnému fázovému posunu nevývažků, byla do některých vývojových verzí přidána třecí spojka mezi oba nevývažky. Tím se zvýšila stabilita při otáčení

excentrů stejnými otáčkami, protože spojka zastavila nežádoucí vzájemný přesun nevývažků. Avšak při regulaci vzájemné polohy excentrů je rozdíl mezi statickým a dynamickým součinitelem tření na obtíž a způsobuje špatně kontrolovatelný vzájemný prokluz obou nevývažků. Problémem tohoto systému je regulace založená na škrčení. Seškrčení musí být navíc dostatečné pro překonání statického momentu na třecí spojce. To má ale za následek po překonání tohoto momentu skokovou změnu velikosti odporu na spojce, a to až o 30%. Škrčení navíc způsobuje přehřívání celého obvodu.

Po řadě neúspěšných simulací se sériovým zapojením obou hydromotorů byla vytvořena nová koncepce, kde jsou hydromotory zapojeny paralelně. Pohon označený NG IV (New Generation IV) byl vyvinut na základě tří předchozích řešení. NG IV byl založený na paralelním zapojení hydromotorů a regulace je u tohoto systému řešena pomocí „plnicího obvodu“. Další významnou odlišností od všech předcházejících simulací je použití jiných funkcí kroutících momentů vstupujících od setrvačných hmot nevývažků. Zatímco pro řešení předešlých simulací byl uvažován stav zavěšeného běhounu, u NG IV byly použity výsledky simulace běhounu v interakci s podložím.

8.4 SHRNUTÍ

Na této úloze si lze povšimnout, že ne vždy musí na rozbor působících sil navazovat analýza FEM. V této konkrétní úloze nebyl dokonce zpočátku rozbor působících sil požadován. Počátečním cílem byla pouhá simulace hydraulického pohonu navrženého ve společnosti AMMANN. Během procesu vývoje simulačního modelu se prokázalo jako naprosto nevyhovující zanedbání vlivu úderu běhounu do podloží. Z tohoto a i dalších důvodů byly vyvíjeny modely hutnění a následně také modely zahrnující vzájemný kontakt hutněného povrchu a běhounu včetně budičem vibrací. Z těchto modelů byly použity zjištěné poznatky ohledně chování jednotlivých dílů i některé veličiny, zejména pak kroutící momenty, které vznikají vlivem setrvačných hmot nevývažků.

9 ZÁVĚR

Práce měla za cíl analyzovat vliv interakce jedoucího pracovního stroje po povrchu na dílčí části stroje jako například konstrukci rámu stroje samotného a nebo jeho pohon či podvozek a nebo nesené pracovní zařízení. Tímto zaměřením se tato práce zásadně odlišuje od řady provedených výzkumů zabývajících se interakcí jedoucího stroje a pojížděného povrchu. Při jízdě stroje po povrchu lze vždy hovořit o interakci mezi strojem a povrchem, avšak vzájemné působení není vždy vyvážené z hlediska sledovaných vlastností obou subjektů. Na základě této úvahy je v práci definován pojem „vyvážená“ interakce, přičemž je nastíněn možný způsob náhledu na tuto problematiku. Vyvážení interakce dvou subjektů je závislé na velikosti změn pozorovaných vlastností daných subjektů.

V práci uvedeno několik případových studií. Práce obsahuje studii vlivu jízdy na rám zemědělského návěsu. V této rozsáhlé kapitole je mimo jiné popsán i samotný průběh návrhu takového vozu. Návrh začínal průzkumem trhu a od toho se odvíjela koncepce vozu a jeho vyměnitelných nástaveb. S navrženou konstrukcí byly provedeny simulace jízd, přičemž výstupy z těchto simulací sloužily jako podklady pro MKP analýzy. Na závěr byly výsledky ověřeny měřením napjatosti a zrychlení na reálném prototypu. Práce dále obsahuje podobný projekt taženého tlakového čističe. Výrazně odlišný přístup je možné pozorovat u poslední studie. Její podstatou je navržení hydraulického obvodu pro pohon regulačního budiče vibrací vibračního válce. Vibrační pohyb běhounu a jeho „úder“ do podloží zpětně působí na budič vibrací, který u hydraulického pohonu způsobuje v kapalině silné pulsace, díky kterým je regulace systému značně obtížná.

Vzhledem k faktu, že obsah této práce se ve všech zde uvedených případových studiích opírá o simulace a modelování, zahrnuje práce i kapitolu stručně vysvětlující zmíněnou problematiku. V této kapitole jsou popsány některé poznatky získané během vytváření výpočetních modelů. Mezi ně patří například postup modelování a také využití podpůrných simulací.

Výsledkem této práce je zhodnocení a rozbor interakce jedoucího stroje po povrchu dle vybraných sledovaných hledisek. Jsou vytvořeny kategorie, do kterých lze daný případ interakce pracovního stroje a pojížděného povrchu zařadit a podle kterých pak lze dále přistupovat k řešení vybrané úlohy. Dalším výsledkem této práce je postup modelování a simulování soustav zvláště složitěji provázaných pomocí mechanických, hydraulických a nebo elektrických vazeb. Tento postup spolu s kategorizací interakce pracovních strojů s povrchem byl využit na třech případových studiích, které jsou taktéž výsledkem a obsahem této práce.

Přínos této práce pro teorii je zejména v oblasti rozčlenění a identifikace interakcí stroje s povrchem a nastínění možných přístupů, k dané úloze. Dále je to návrh a popis metodiky při modelování složitějších soustav s využitím podpůrných simulací. Konkrétní příklady a jejich zde uvedené výsledky jsou značným přínosem pro praxi a zejména pro konstrukční a vývojová pracoviště zabývající se danou problematikou.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ALAKUKKU, L., et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. *Soil & Tillage Research*. 2003, s. 145-160. ISSN 0167-1987.
- [2] ANDEREGG, Roland. *Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern*. VDI Fortschrittberichte, Reihe 4: Bauingenieurwesen Nr. 146. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998.
- [3] ANDEREGG, Roland. ACE Ammann Compaction Expert – Automatic Control of the Compaction. *Le Compactage des Sols et des Materiaux granulaires*. Proceedings, Presses de l'école nationale des ponts et des chaussees. Paris, 2000, pp. 83-89.
- [4] ANDEREGG Roland – KAUFMANN Kuno. Feedback control systems in automatic compaction and compaction control. *Transportation Research Board*, 2004
- [5] ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden : I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil & Tillage Research*. 2001, 1, s. 67-78. ISSN 0167-1987.
- [6] BARKAN D.D. Application of the vibratory method in the construction of sand and concrete piles, *Proc.Sci. Res.Inst. Foundations* No.22
- [7] BATHELT, Uwe. Das Arbeitsverhalten des Rüttelverdichters auf plastisch-elastischem Untergrund, *Bautechnik Archiv*, 1956, Heft 12, Verlag Wihelm Ernst & Sohn Berlin
- [8] BERLI, M., et al. Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research*. 2003, 1, s. 57-66. ISSN 0167-1987.
- [9] DANFORS, Birger. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil & Tillage Research*. 1994, s. 135-144. ISSN 0167-1987.
- [10] DUDZIŃSKI, Piotr. Problems of turning process in articulated terrain vehicles. *Journal of Terramechanics*. 1983, 19, 4, s. 243-256. ISSN 0022-4898.
- [11] DUDZIŃSKI, Piotr. The problems of multi-axle vehicle drives. *Journal of Terramechanics*. 1986, 23, 2, s. 85-93. ISSN 0022-4898.
- [12] DUDZIŃSKI, Piotr. *Lenksysteme für Nutzfahrzeuge*. Berlin : Springer, 2005. 202 s. ISBN 3-540-22788-1.
- [13] ELS, P.S., et al. The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*. 2007, 44, 6, s. 303-317. ISSN 0022-4898.

- [14] GREČENKO, Alexandr. Tire load rating to reduce soil compaction. *Journal of Terramechanics*. 2003, 40, s. 97-115. ISSN 0022-4898.
- [15] GREČENKO, Alexandr; PRIKNER, Patrik. Progress in tire rating based on soil compaction potential. *Journal of Terramechanics*. 2009, 46, 5, s. 211-216. ISSN 0022-4898.
- [16] GRISCO, Robert; PERUMPRAL, John; ZOZ, Frank. An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils. *Journal of Terramechanics*. 2006, 43, s. 225-236. ISSN 0022-4898.
- [17] HAMBLETON, J.P.; DRESCHER, A. Modeling wheel-induced rutting in soils: Rolling. *Journal of Terramechanics*. 2009, 46, 4, s. 35-47. ISSN 0022-4898.
- [18] HUANG, Chiou-Jye; LIN, Jung-Shan; CHEN, Chung-Cheng. Road-adaptive algorithm design of half-car active suspension system. *Expert Systems with Applications*. 2009, 10, ISSN 0957-4174.
- [19] CHALUPA, Milan; VEVERKA, Josef; VLACH, Radek Počítačové modelování dynamických dějů na vozidlovém pásu. In *Dynamika tuhých a deformovatelných těles 2009*, 2009. ISBN 978-80-7414-153-9.
- [20] ITOH, H.; OIDA, A.; YAMAZAKI, M. Measurement of forces acting on 4WD-4WS tractor tires during steady-state circular turning in a rice field. *Journal of Terramechanics*. 1995, 32, 5, s. 263-283. ISSN 0022-4898.
- [21] ITOH, H.; OIDA, A.; YAMAZAKI, M. Numerical simulation of a 4WD-4WS tractor turning in a rice field. *Journal of Terramechanics*. 1999, 36, s. 91-115. ISSN 0022-4898.
- [22] KAŠPÁREK, Jaroslav. *Optimalizace hutnících účinků vibračních válců*. Brno, 2008. 124 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] KAWASE, Yoshiyuki; NAKASHIMA, Hiroshi; OIDA, Akira. An indoor traction measurement system for agricultural tires. *Journal of Terramechanics*. 2006, 43, 3, s. 317-327. ISSN 0022-4898.
- [24] KELLN, Curtis; SHARMA, Jitendra; HUGHES, David. A finite element solution scheme for an elastic-viscoplastic soil model. *Computer and Geotechnics*. 2008, 35, 4, s. 524-536. ISSN 0266-352X.
- [25] KITANO, Masanori, et al. Lane-change maneuver of high speed tracked vehicles. *Journal of Terramechanics*. 1988, 25, 2, s. 91-102. ISSN 0022-4898.
- [26] KLEGER, Ondřej. *Současný stav výzkumu pneumatiky s podložím*. Brno, 2010. 44 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Jan Pokorný.

- [27] KUBA, Adolf. *Jak přišli koně pod kapotu*. Vydání I. Praha : Nakladatelství dopravy a spojů, 1988. 192 s. 31-003-88-05-109.
- [28] LI, Q.; AYERS, P. D.; ANDERSON, A. B. Modelling of terrain impact caused by tracked vehicles. *Journal of Terramechanics*. 2007, 44, s. 395-410. ISSN 0022-4898.
- [29] LIU, C.H.; WONG, J.Y. Numerical simulations of tire-soil interaction based on critical state soil mechanics. *Journal of Terramechanics*. 1996, 33, 5, s. 209-221. ISSN 0022-4898.
- [30] LIU, Kun, et al. Influence of turning radius on wheeled military vehicle induced rut formation. *Journal of Terramechanics*. 2009, 46, 4, s. 49-55. ISSN 0022-4898.
- [31] MARSILI, Adolfo; SERVADIO, Pieranna. Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils. *Soil & Tillage Research*. 1996, s. 37-45. ISSN 0167-1987.
- [32] MOSHIN, S. H. Untersuchungen des dynamischens Verhaltens von Stampfsystemen. *Baumaschine und Bautechnik*. 1967, 14, 1, s. 11-17.
- [33] MURO, Tatsuro. Comparison of the traffic performance of a two-axle four wheel drive (4WD), rear wheel drive (RWD), and front wheel drive (FWD) vehicle on loose sandy sloped terrain. *Journal of Terramechanics*. 1997, 34, 1, s. 37-55. ISSN 0022-4898.
- [34] NAKASHIMA, H.; WONG, J.Y. A three-dimensional tire model by the finite element method . *Journal of Terramechanics*. 1993, 30, 1, s. 21-34. Available online 13 February 2003. ISSN 0022-4898.
- [35] OIDA, A.; MOMOZU, M. Simulation of soil behavior and reaction by machine part by means of DEM. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. 2002, IV., ISSN 2070-0237.
- [36] PACAS, Blahoslav, et al. *Teorie stavebních strojů*. 2. nezměněné. Praha : SNTL, 1986. 244 s. 411 - 33725.
- [37] PACEJKA, Hans B. *Tyre and Vehicle Dynamics*. [s.l.] : Butterworth-Heinemann Ltd, 2002. 627 s. ISBN 9780750651417.
- [38] PARK, W. Y., et al. Prediction of the tractive performance of a flexible tracked vehicle. *Journal of Terramechanics*. 2008, 45, s. 13-23. ISSN 0022-4898.
- [39] POKORNÝ, Jan Dynamika budiče vibračního běhounu s řízeným vektorem vibrací. In *Dynamika tuhých a deformovatelných těles 2007*, 2007. s. 282. ISBN 978-80-7044-914-1.
- [40] POKORNÝ, Jan; VAVERKA, Michal; KAŠPÁREK, Jaroslav. Technologie inteligentních vibračních válců a jejich využití a propojení. *Stavební technika*. 2009, 8, 1, s. 42-45. ISSN 1214-6188.

- [41] POKORNÝ, Jan, et al. Simulace jízdy traktorové soupravy po nerovné silnici. *Mechanizace zemědělství*. 2010, 15, 4, s. 69-72. ISSN 0373-6776.
- [42] POKORNÝ, Jan; KAŠPÁREK, Jaroslav Průzkum zákaznických preferencí předcházející vývoji zemědělských přípojných vozidel. In *Mezinárodní Baťova konference : 6. ročník*. Zlín, 2010. s. 1-6. ISBN 978-80-7318-922-8.
- [43] POLACH, Pavel; HAJŽMAN, Michal The investigation of trolleybus vertical dynamics using advanced multibody model. In *Dynamika tuhých a deformovatelných těles 2008*, 2008. s. 161-170. ISBN 978-80-7414-030-3.
- [44] PÖSCH, H.; IKES, W. *Verdichtungstechnik und Verdichtungsgeräte im Erdbau*. Ed. Verlag Ernst u. Sohn, Berlin, 1975
- [45] PTÁČEK, Petr; KAPLÁNEK, Aleš. *Přeprava nákladu v silniční nákladní dopravě*. Brno : CERM, 2002. 111 s. ISBN 80-7204-257-2.
- [46] RUBINSTEIN, D.; HITRON, R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles. *Journal of Terramechanics*. 2004, 41, s. 163-273. ISSN 0022-4898.
- [47] ŘÍHA, J. *Technologie stavebních dílců - technologické subsystémy*. Brno, 1978.
- [48] SCHÄFFNER, J. H. Zeitlicher Verlauf und Klassifizierung dynamischer Verdichtungsvorgänge. In *Hinblick auf bodenmechanische und baupraktische Probleme*. 1964.
- [49] SOUKUP, Josef, et al. *Kmitání mechanických soustav - Vozidel*. první. Ústí nad Labem : PrintActive s.r.o., 2008. 274 s. ISBN 978-80-7414-020-4.
- [50] SYROVÝ, Otakar. *Jak uspořít na dopravě* [online]. VÚZT Praha, 2006 [cit. 2010-03-29]. 12 s. Dostupné z WWW: <<http://www.vuzt.cz/doc/energetika/doprava.pdf?menuid=185>>.
- [51] SYROVÝ, Otakar. *Vliv technických opatření na úsporu energie* [online]. VÚZT Praha, 2008 [cit. 2010-03-29]. 7 s. Dostupné z WWW: <<http://www.vuzt.cz/doc/rocenka2007/vliv.pdf>>.
- [52] ŠKOPÁN, Miroslav; KAŠPÁREK, Jaroslav Analyse von Verdichtungseffekten bei veränderlichem Vibrationsvektor. In *Baumaschinentechnik 2004 : Forschung, Entwicklung, Innovation*. 2004. s. 315-322.
- [53] ŠKOPÁN, Miroslav; POKORNÝ, Jan Modelling of drive for vibration exciter. In *33rd international conference of departments of transport, handling, building and agricultural machines 2007*. 2007. ISBN 978-80-227-2709-9.
- [54] VAVERKA, Michal; POKORNÝ, Jan Positioning and controlling methods of continuously working construction machines. In *Současnost a perspektiva těžby a úpravy nerudných surovin IV*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. s. 189-193. ISBN 978-80-248-1396-7.

- [55] VOŠTOVÁ, Věra; KAŠPAR, Milan; VONDRÁČKOVÁ, Terezie. Moderní prvky ve zhutňování zemin. *Stavební technika*. 2004, 3, 1, s. 4-7. ISSN 1214-6188.
- [56] WATANABE, Keiji; KITANO, Masanori. Study on steerability of articulated tracked vehicles : Part 1. Theoretical and experimental analysis. *Journal of Terramechanics*. 1986, 23, 2, s. 69-83. ISSN 0022-4898.
- [57] WATANABE, Keiji; KITANO, Masanori; FUGISHIMA, Akihiro. Handling and stability performance of four-track steering vehicles. *Journal of Terramechanics*. 1996, 32, s. 285-302. ISSN 0022-4898.
- [58] WATANABE, Kotaro, et al. Development of a new-type suspension spring for rally cars. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, 1, s. 132-134. ISSN 0924-0136.
- [59] WAY, Thomas R., et al. Tractor tire aspect ratio effects on soil bulk density and cone index. *Journal of Terramechanics*. 2009, 46, 5, s. 27-34. ISSN 0022-4898.
- [60] WONG, J.Y.; HUANG, Wei. "Wheels vs. tracks" - A fundamental evaluation from the traction perspective. *Journal of Terramechanics*. 2006, 43, 9, s. 27-42. Available online 18 October 2004. ISSN 0022-4898.
- [61] WONG, J. Y. Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations. *Journal of Terramechanics*. 2009, 46, s. 141-155. ISSN 0022-4898.
- [62] WYK, D. J.; SPOELSTRA, J.; KLERK, J. H. Mathematical modelling of the interaction between a tracked vehicle and the terrain. *Appl. Math. Modelling*. 1996, 20, 11, s. 838-846. ISSN 0307-904X
- [63] YU, Ke; LUO, Albert C.J. The periodic impact responses and stability of a human body in a vehicle traveling on rough terrain. *Journal of Sound and Vibration*. 2003, 3, s. 267-286. ISSN 0022-460X.
- [64] ČSN 30 0560. *Pérování vozidel : Měření dynamických součinitelů při jízdě vozidla přes překážky*. Praha : Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1971. 19 s.
- [65] Interakce. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 30.6.2010, last modified on 17.7.2010 [cit. 2010-07-17]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Interakce>>.
- [66] Ministerstvo zemědělství ČR. *EAgri : Zemědělství* [online]. 2008 [cit. 2008-02-15]. Zemědělská výroba. Dostupné z WWW: <<http://eagri.cz/public/eagri/zemedelstvi/>>.
- [67] *Strom Export* [online]. [cit. 2010-07-17]. Výměnný systém TC. Dostupné z WWW: <<http://www.stromexport.com/index.php?idx=2195>>.

AUTOROVO CV

Jméno a příjmení: Ing. Jan Pokorný
Datum narození: 26. 6. 1982
Rodinný stav: svobodný
Adresa: Werichova 21
Olomouc, 779 00



Vzdělání:

- 2006 – 2010 Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství
- Ústav automobilního a dopravního inženýrství
- disertační práce na téma Interakce mobilních pracovních strojů a pojižděného podloží
- 2001 – 2006 Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství
- Ústav dopravní techniky - obor Dopravní, manipulační a zemědělské techniky
- DP na téma Úprava rypadlo-nakladače pro třídící lopatu
- 1997 – 2001 Střední průmyslová škola strojnická, Olomouc
- obor Strojírenství, maturitní zkouška s vyznamenáním
- v roce 2000 a 2001 reprezentace školy na celostátní soutěži v AutoCADu (11. a 13. místo)

Odborná praxe:

- 2007 – 2010 ZDT Nové Veselí s.r.o. (spolupráce na projektu)
2009 – 2010 EUROM s.r.o. (spolupráce na projektu)
2006 – 2009 AMMANN Group (spolupráce na projektu)
2006 – 2010 FSI – VUT (výuka předmětů na)
2005 – 2006 STAVES s.r.o.
2000 – 2002 Zámečnictví GROZA s.r.o.

Zájmy:

veslování, cyklistika, počítačové technologie, zemní a zemědělské stroje

Kontakt:

e-mail: Jenpok@seznam.cz

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vzájemnou interakcí jedoucího mobilního pracovního stroje s pojížděným podložím se zaměřením na chování stroje a jeho konstrukčních celků při jízdě po povrchu, přičemž v práci jsou zahrnuty i pracovní stroje, které současně s jízdou mění stav povrchu, které mění podmínky nejen pro jízdu, ale i práci stroje.

Interakce pracovního stroje a pojížděného povrchu je v této práci kategorizována a na základě těchto kategorií je navržen postup a metody k řešení jednotlivých úloh. V této práci jsou uvedeny tři případové studie. Vzhledem ke značnému využití simulačních programů je v práci uvedena také použitá metodika při vytváření simulačních modelů.

V práci uvedené tři případové studie zahrnují komplexní řešení hydraulického pohonu budiče vibrací vibračního válce, dále příklad jedoucího malého přívěsu s pracovním zařízením se zaměřením na sledování zatěžovacích účinků na rám podvozku. Třetím příkladem je řešení rámu podvozku zemědělského vozu. Tato případová studie je nejrozsáhlejší kapitolou práce díky zahrnutí průzkumu trhu na počátku vývoje i verifikace nasimulovaných dat pomocí měření na reálném prototypu na konci vývoje rámu podvozku.

ABSTRACT

This dissertation thesis is concerning with an interaction between mobile working machines and rolled surfaces. Machines and their constructions parts behavior were observed. There are some machines that can change state of surface. And due to these change of surface the machine is in different conditions for drive and also for works.

The interaction of working machines and rolled surfaces was categorized in this work and for each category here is a methodic work flow for solution of various cases. Three examples are described in this work. Some simulating programs were used for all cases and therefore there is a methodic work flow for creating and simulating of models.

Three described examples include a complex solution of hydraulic drive for vibration exciter of vibration roller, small cleaner of canalizations with aim on load case to frame of this cart. The third example describes solution of undercarriage frames of agricultural semi-trailers. This example is the most extensive chapter from this work due to including of marketing research at the beginning of development and also verification of simulated results with results from real prototype tests at the end of development of these undercarriage frames.