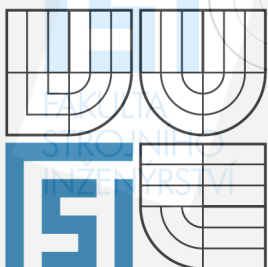


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SOUČASNÝ STAV VÝZKUMU INTERAKCE PNEUMATIKY S PODLOŽÍM

CURRENT SITUATION OF RESEARCH INTO INTERACTION OF TIRE WITH SURFACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ KLEGER

VEDOUČÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN POKORNÝ

BRNO 2010

Abstrakt

Modelování a simulace jsou v současnosti velmi důležitá témata především v automobilovém průmyslu. Těchto simulací se využívá jak při vývoji nových vozidel či při jejich zdokonalování, tak zejména také pro vývoj a testování veškerých aktivních bezpečnostních systémů vozidel jako je systém proti prokluzu kol při brždění ABS, systém proti prokluzu kol při rozjezdu ASR, systém stability vozidla ESP a podobně. Pro všechny tyto systémy a jejich simulace je nutné dobře simulovat interakci kola (pneumatiky) a povrchu.

Díky simulování lze podstatně jednodušeji napodobit jízdní situace a celý systém se přibližuje reálnému chování vozidla na vozovce.

I přes stále přesnější simulace se však vývoj neobejde bez měření a testů reálné pneumatiky a povrchu.

Klíčová slova: pneumatika, simulace, vozidlo, vozovka

Abstract

Modeling and simulation belong to very important tools used in automotive industry of present days. Simulation forms basis for both – new vehicle development and also improvement of vehicles already in production. A key role of simulation may be seen in the development of vehicle active safety features such as “Anti-Block System” (ABS), “Anti-Slip Regulation” (ASR), “Electronic Stability Program” (ESP) etc. As a common feature, all of the listed systems require accurate simulation of the interaction between the tire and the road surface.

Thanks to simulation tools we can model driving situations and behavior of the whole system so that it nearly mimics real behavior of the vehicle on the road.

Nevertheless; despite continuously increasing accuracy of the simulation tools, a development process still cannot be completed without real tests and measurements on tires and road surface characteristics.

Keywords: tire, simulation, vehicle, road surface

Bibliografická citace

KLEGER, O. *Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Pokorný.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma : **Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím** vypracoval samostatně a použil jsem pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Souhlasím, aby absolventská práce byla použita k výukovým účelům na FSI VUT Brno.

V Brně dne

Ondřej Kleger

Poděkování



VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Pokornému, za metodické vedení, rady a připomínky při vlastním zpracování absolventské práce. Dále děkuji své přítelkyni a rodičům za podporu a toleranci během studia.

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

1. ÚVOD	8
2. CO OVLIVŇUJE INTERAKCI PNEUMATIKY S POVRCHEM	9
2.1 Interakce pneumatiky s podložím	9
2.1.1 Karmanova kružnice přilnavosti	9
2.2 Nejčastější aplikace modelu pneumatiky	10
3. SIMULACE INTERAKCE PNEUMATIKY S POVRCHEM	12
3.1 Obecně	12
3.1.1 Matematický model vozidla	12
3.1.2 Prostorový model automobilu	12
3.1.3 Matematický model kola a pneumatiky	14
3.2 Matematické modely pneumatiky používané v softwaru MSC ADAMS	15
3.2.1 Moduly ADAMS/Tire	15
3.2.2 Model pneumatiky 5.2.1	17
3.2.3 Model pneumatiky Fiala	18
3.2.4 Model pneumatiky UA	19
3.2.5 Model pneumatiky Pacejka 89 a 94	20
3.2.6 Model pneumatiky MF-Tyre	20
3.2.7 Model pneumatiky MF-MCTyre	21
3.2.8 Model pneumatiky SWIFT-Tyre	22
3.2.9 Model pneumatiky FTire	22
3.2.10 Přehled modelů pneumatik ADAMS/Tire a jejich užití	24
3.2.11 Používání softwaru ADAMS/Tire	25
3.2.12 Typy kontaktu pneumatiky s vozovkou	26
3.3 Simulace pneumatik Engineering Dynamics Corporation (EDC)	26
3.3.1 Radiální pružný model pneumatiky	27
3.3.2 Model pro simulaci sil na bočnici pneumatiky	27
3.3.3 Model pneumatiky pro simulaci měkké vozovky	28
4. REÁLNÉ TESTY PNEUMATIK	29
4.1 Obecně	29
4.2 Vybrané průzkumy	29
4.2.1 Testy pneumatik na vozidle	29
4.2.2 Experimentální zkoušky nárazu pneumatiky	31
4.2.3 Měření vlivu poloměru otáčení vojenských vozidel na podloží	32
4.2.4 Měření trakce pneumatik zemědělských strojů	33
4.2.5 Hodnocení pneumatiky založené na zhuštění půdy	35
4.2.6 Vliv poměru stran pneumatiky na objemovou hmotnost půdy	37
5. VÝZKUMNÉ INSTITUCE	38
5.1 Vybrané instituce zabývající se převážně simulacemi	38
5.1.1 MSC Software	38
5.1.2 TNO Automotive Industry	38
5.1.3 Delft University	39
5.1.4 Engineering Dynamics Corporation	39

5.2 Vybrané instituce zabývající se převážně reálnými testy	40
5.2.1 ADAC	40
5.2.2 Dekra Automotive	40
5.2.3 TÜV SÜD Group	41
5.2.4 US Army Engineer Research and Development	41
6. ZÁVĚR	42
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

1. Úvod

Automobil si představujeme jako soustavu se čtyřmi koly a karosérií. Tato sestava je spolu spojena zavěšením kol, nápravou, tlumiči a pružinami. Každé těleso má 6 stupňů volnosti, tzn. že je jich poměrně mnoho. Pro popsání takové sestavy je tedy nutno vytvořit stejný počet diferenciálních rovnic, které jsou navzájem provázány. K této soustavě si však můžeme přidat další pohybové rovnice týkající se řídicího ústrojí, hnacího ústrojí, nákladu uloženého na vozidle atd. – a proto počet stupňů volnosti adekvátně narůstá. Z tohoto důvodu se připouštějí určitá zjednodušení.

Ve své práci se budu zabývat modelováním pneumatiky a její interakce s vozovkou a to jak v oblasti pouze simulací, tak v oblasti reálných testů. Matematické modely se obvykle zjednodušují na bodový styk mezi pneumatikou a vozovkou, kde se silové účinky omezují pouze na složku síly působící ve svislém směru, což většinou postačuje u některých modelů vozidla. Při vyšetřování dynamiky vozidla v pohybu však vliv příčných sil u pneumatiky nelze zanedbat (např. brzdění a zrychlování vozidla, zatáčení, přejezdy nerovností,...). Pak síly v příčném směru výrazně namáhají uložení kola a vyvolávají tak jeho zrychlení v daných směrech. Matematické a simulační modely vozidla by tak měli vycházet z odpovídajícího modelu pneumatiky. Tato oblast je předmětem zájmu například MSC Software, která slučuje několik matematických modelů pneumatiky pro počítačovou simulaci kontaktu kola s vozovkou.

Reálné zkoušky jsou nezanedbatelné, zvláště k ověřování výsledků simulací i jejich praktickému použití a to jak pneumatiky v laboratořích, tak přímo na vozidle. Mezi nejčastější zkoušky patří odměřování hlučnosti či tuhosti pneumatiky, přilnavosti k nejrůznějším povrchům (jako je např. nezpevněný povrch – šotolina, sníh, led,...) a také odolnost pneumatiky vůči aquaplaningu (jev, ke kterému dochází při zvýšené rychlosti vozidla po mokré vozovce. Definuje se jako ztráta přilnavosti pneumatiky k vozovce vlivem vody, která se dostala mezi pneumatiku a vozovku). [5] Všechny tyto zkoušky jsou důležité pro aktivní bezpečnost vozu, tedy jeho snadnou ovladatelnost, či pro zkoumání vlivu pneumatik vozidel na zemědělské plochy.

2. Co ovlivňuje interakci pneumatiky s povrchem

Spolehlivé modelování interakce pneumatika - vozovka je velice důležité pro přesné analyzování dynamiky pohybu vozidla.

2.1 Interakce pneumatiky s podložím

Síly působící mezi pneumatikou a vozovkou jsou převážně závislé na mechanických vlastnostech pneumatiky (jako je tuhost, tlumení), na stavu podloží (součinitel tření, struktura povrchu) a pohybu pneumatiky vzhledem k silnici (velikost a směr skluzu). Normálová síla přenáší na vozovku přes pneumatiku hmotnost vozidla. Pneumatika tlumí drobné nerovnosti podkladu. Akcelerací a brzděním vznikají podélné síly. Boční síly se indukují od změny směru vozidla (zatáčení). Správný popis dynamického chování vozidla vyžaduje přesné modelování sil a momentů vznikajících mezi vozovkou a pneumatikou.

Chování pneumatiky vyplývá z několika aspektů, jako je např. nosnost, valivý odpor, schopnost pneumatiky akcelarovat, brzdit, měnit směr jízdy, radiální deformace a pružnost.

Pro přenos sil ve 3 kolmých směrech (F_x , F_y a F_z) a ke zmírnění vlivu nerovnosti vozovky zavádíme sekundární faktory, jako např. radiální, podélné a příčné deformace a skluz. Některé tyto sekundární faktory musíme zavádět do výpočtů pro přesnou kalkulaci působení sil a momentů. Navíc předpokládáme pevné (nedeformovatelné) disky kola. Síly se také mohou měnit z důvodu vibrace mezi pneumatikou a ráfkem vznikající při jízdě. [3]

Než dojde k sériovému zavedení nových řídicích systémů, je nutné rozsáhlé a nákladné zkoušení v reálných podmínkách na testovací trati nebo na zkušebním stavu. Simulace umožňují nahradit skutečné vozidlo matematickým modelem v počítači. Při simulaci se generují signály nahrazující skutečné snímače a komunikační sběrnice (např. CAN), které vstupují do řídicí jednotky. Ta na tyto signály reaguje určitými akčními zásahy, přičemž výstupy z řídicí jednotky zpětně vstupují do matematického modelu. Lze také simulovat situace, které není možné navodit při reálném testování. Další výhodou je opakování zkoušek při stejných provozních podmínkách. Simulace se tak v dnešní době stávají standardním nástrojem pro vývoj a testování řídicích jednotek jak v automobilovém průmyslu, tak i v dalších odvětvích. [7]

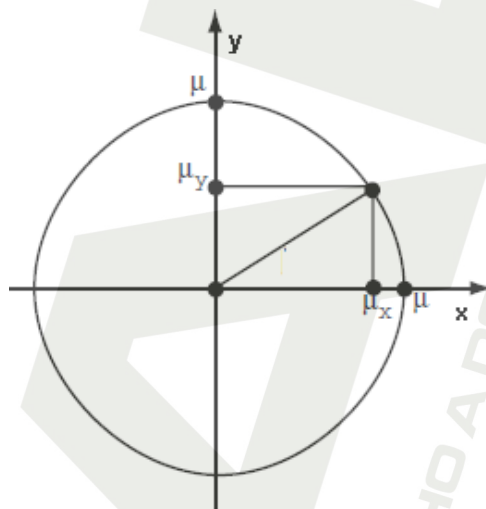
2.1.1 Karmanova kružnice přilnavosti

Karmanova kružnice přilnavosti (obrázek 1) byla představena v 60. letech minulého století jako diagnostický nástroj. Lze ji použít s jakýmkoliv druhem vozidla pro jeho grafickou prezentaci trakčních schopností. [8]

Závodním jezdcům pomáhá kružnice zjišťovat trakční meze vozidla a inženýrům závodních týmů pomůže nastavit podvozek na daný povrch.

Karmanova kružnice na obrázku číslo 1 nám vymezuje součinitele tření (síly) ve směru osy x či y (podélném či příčném směru). Přesáhne-li kombinace součinitelů (sil) danou mez (jejich průsečík bude ležet vně kružnice) nastává prokluz kola. Pohybuje-li se jejich průsečík na kružnici samotné, nachází se pneumatika na hranici prokluzu.

Karmanova kružnice nám tedy určuje, jakou maximální sílu můžeme na vozovku přenést, aniž bychom ztratili kontrolu nad vozidlem. Například: jedeme v přímém směru a šlápneme na brzdu tak, že se kola skoro zablokují. Pneumatiky jsou tak nyní na hranici trakce a my jsme se posunuli ve směru osy y na obvod kružnice. Pokusíme-li se při tomto brzdění ještě stočit volant, dostaneme se mimo kružnici a kola nám začnou prokluzovat (nemáme k dispozici boční sílu). Pokud však povolíme brzdu, dostaneme určitou boční sílu potřebnou k zatáčení (dle průsečíku na kružnici).



Obrázek 1 - Karmanova kružnice přilnavosti [3]

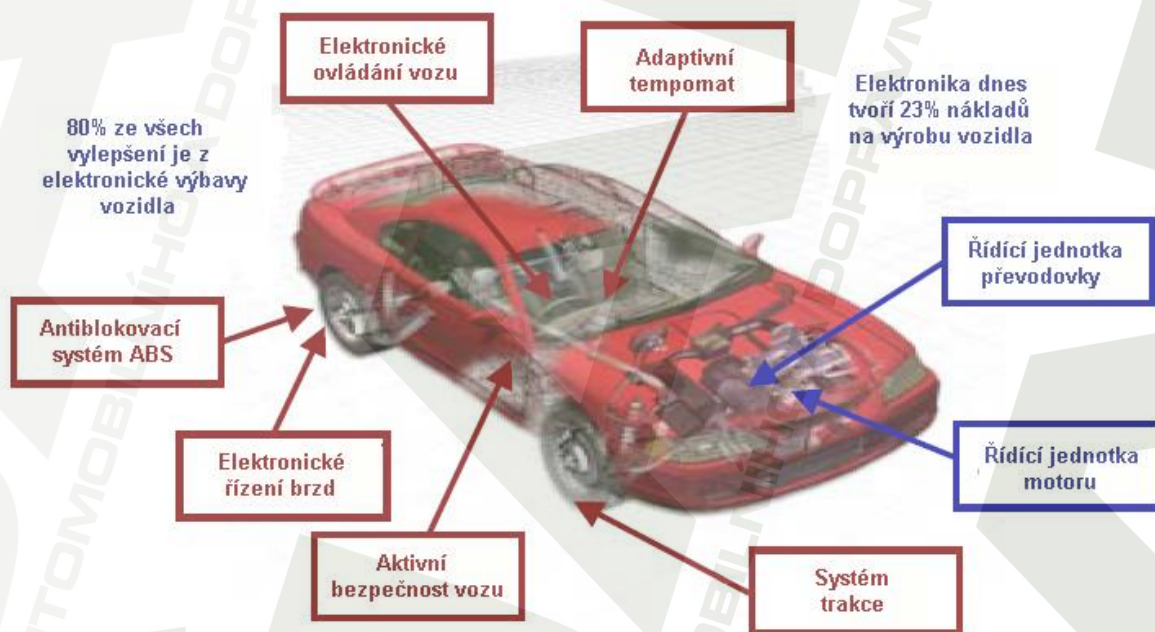
2.2 Nejčastější aplikace modelu pneumatiky

- Ovládání vozidla - řízení
 - Rovnovážný stav v zatáčkách (průjezd zatáčkou)
 - Změna jízdnic pruhů
 - Otáčení
 - Prokluzu kol, brzdění / řízení při zatáčení
 - Udržení přímého směru jízdy
 - Parkování
 - Interakce řidiče s vozidlem

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface

- Řízení podvozku
 - Protiprokluzový systém ABS, systém stabilizace vozidla ESP
 - Adaptivní tempomat
 - Aktivní bezpečnost vozidla
 - Systém trakce
- Jízda
 - Jízda po nerovné silnici (nezpevněný povrch)
 - Frekvence pohybu pneumatiky
 - Interakce s pohonnou jednotkou
- Životnost, odolnost, spolehlivost
 - Výpočet zatížení pneumatiky – vliv huštění pneu
 - Spektrum zatížení [2]



Obrázek 2 - Přehled elektroniky ve voze při jejímž vývoji se užívají matematické modely vozidla [2]

3. Simulace interakce pneumatiky s povrchem

3.1 Obecně

3.1.1 Matematický model vozidla

Při simulaci směrové dynamiky automobilu lze v závislosti na složitosti volit různé matematické modely vozu. Nejjednodušší je jednostopý rovinný model, tedy model s nulovým rozchodem kol. Na rozdíl od dvoustopého je zde uvažována boční a hnací síla působící na nápravu. Boční síla na přední nápravě je např. dána součtem sil působících na přední pravé a přední levé kolo. Model je možné pro zjednodušení linearizovat. To lze uskutečnit pouze při malých hodnotách úhlu směrové úchyly těžiště vozidla a s tím souvisejícího úhlu natočení předních kol.

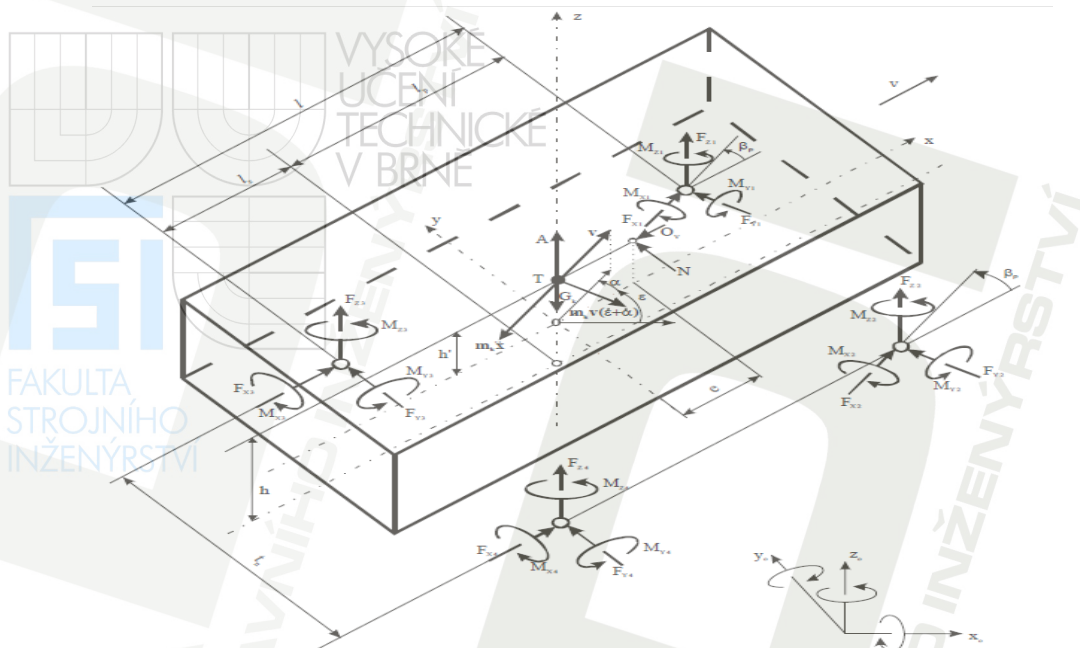
Lepší představu o dynamickém chování vozidla je možné získat pomocí dvoustopého rovinného modelu, u něhož je rozchod kol nenulový. Zde můžeme na rozdíl od jednostopého modelu sledovat průběh rozložení bočních sil při průjezdu zatáčkou.

Rozsáhlejší a složitější variantou je prostorový model. Ten umožňuje komplexně vyšetřovat průběhy ve všech směrech. Lze jej vytvořit jak pro ustálenou, tak i neustálenou rychlost jízdy. To vyžaduje použití modelu pneumatiky a výpočet radiálních sil na jednotlivých kolech. Např. pro důkladnější ověření řídicí jednotky stabilizačního systému ABS je využíván prostorový model vozidla, který je určen pro neustálenou rychlost jízdy. Současně se uvažuje působení podélných, příčných a radiálních sil na každém kole. [6]

3.1.2 Prostorový model automobilu

Prostorový model automobilu (obrázek 3) lze tvořit pro:

- Ustálenou rychlost – uvažujeme jen boční síly působící na jednotlivá kola a nápravu
- Neustálenou rychlost (decelerace, akcelerace,...) – počítáme s podélnými i příčnými silami v místě styku kola s vozovkou - musíme zakomponovat model pneumatiky [1]



Obrázek 3 - Síly a momenty působící na vozidlo [1]

Rovnováha sil ve směru osy x (dle [1]):

$$m\ddot{x} = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} - O_v$$

kde:

- m – klopná hmotnost vozidla [kg]
- \ddot{x} - podélné zrychlení vozidla [$m \cdot s^{-2}$]
- F_{xi} – obvodová síla působící na i-té kolo [N]
- O_v - vzdušný odpor [N]

$$\circ O_v = \frac{1}{2} \cdot S \cdot c_x \cdot \rho \cdot v^2$$

Rovnováha sil ve směru osy y (dle [1]):

$$m\dot{x}(\dot{\epsilon} + \dot{\alpha}) = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} + N$$

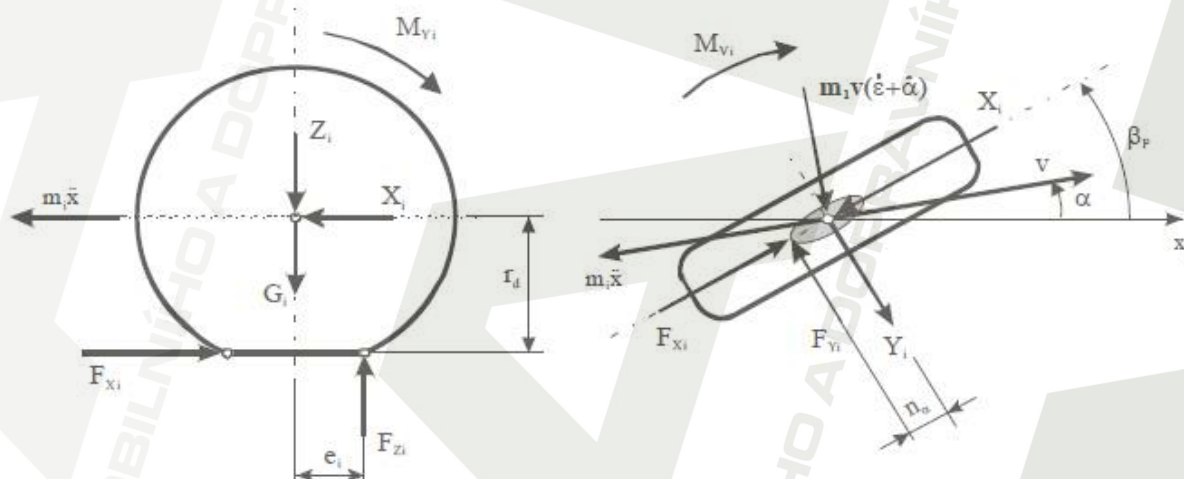
kde:

- \dot{x} - podélná rychlost vozidla [$m \cdot s^{-1}$]
- $\dot{\epsilon}$ - stáčivá rychlost vozidla [$rad \cdot s^{-1}$]
- $\dot{\alpha}$ - úhlová rychlost směrové úchytky [$rad \cdot s^{-1}$]
- F_{yi} – boční vodící síla působící na i-té kolo [N]
- N – boční vzdušná síla [N]

3.1.3 Matematický model kola a pneumatiky

Kola automobilu během jízdy vykonávají rotační a podélný pohyb. Následně lze sestavit dvě pohybové rovnice, které popisují pohyb v podélném směru a rotační pohyb.

Navazující model pneumatiky představuje důležitou část celého simulačního schématu automobilu. Síly vznikající mezi pneumatikou a vozovkou mají hlavní vliv na chování pohybujícího se vozidla. Proto je správný model pneumatiky nezbytnou součástí modelu, který je určen pro analýzu a simulaci pohybu vozidla. V dnešní době existuje množství různých variant modelů pneumatiky. Velmi reálné modely jsou většinou příliš komplikované na to, aby je bylo možné použít v různých fázích vývoje. Nepoužitelné jsou také nejjednodušší modely, protože poskytují korektní výsledky pouze např. pro malé hodnoty směrové úchylny kola a nedokážou popisovat situaci, kdy je kolo, resp. vozidlo ve smyku. [7]



Obrázek 4 - Síly a momenty působící na i-té kolo [1]

Pohybová rovnice popisující pohyb v podélném směru (dle [1]):

$$m_i \ddot{x}_i = F_{xi} - X_i$$

kde:

- m_i – hmotnost kola [kg]
- \ddot{x}_i – podélné zrychlení kola [$m \cdot s^{-2}$]
- F_{xi} – obvodová síla [N]
- X_i – reakční síla ve směru osy x [N]

Pohybová rovnice popisující rotační pohyb (dle [1]):

$$J_K \ddot{\varphi}_i = M_{Y_i} - F_{x_i} r_d$$

kde:

- J_K – moment setrvačnosti kola k ose otáčení [kg.m²]
- $\ddot{\varphi}_i$ - úhlové zrychlení kola [rad.s⁻²]
- M_{Y_i} – moment působící na kolo kolem osy y [Nm]
- F_{x_i} – obvodová síla [N]
- R_d – dynamický poloměr kola [m]

3.2 Matematické modely pneumatiky používané v softwaru MSC ADAMS

Matematických modelů pneumatik existuje celá řada. Jednou z hlavních společností zabývajících se modelováním pneumatiky je MSC Software. Tato instituce nabízí několik způsobů zahrnutí interakce pneumatiky s podložím do svých softwarů, které souhrnně nazývá ADAMS/Tire. Tyto modely lze využít k různým účelům:

- Analýza ovládání vozu je důležitá pro nastudování dynamiky vozidla s vazbou na řízení, brzdění a akceleraci. Můžeme tak analyzovat například boční zrychlení vzniklé při jízdě do zatáčky či zrychlování vozu.
- Analýzy odolnosti jsou užitečné pro generování zatížení pneumatiky a tlaku na vozovku a únavové studie, které jsou potřebné jako součást silových a akceleračních výpočtů. Tyto studie pomáhají při výpočtech vlivu životnosti pneumatiky v závislosti na profilu vozovky, jako například díry, obrubníky či retardéry. [3]

Tyto modely umožňují nasimulovat až 20 pneumatik v jednom modelu vozidla. [3]

3.2.1 Moduly ADAMS/Tire

ADAMS/Tire má řadu modulů, které můžeme použít. Tyto moduly dovolují modelovat pryžové pneumatiky na spoustě druhů dopravních prostředků, jako jsou například osobní vozidla, nákladní vozidla či letadla. Moduly umožňují konkrétněji modelovat sílu a točivý moment, který vzniká na pneumatikách při akceleraci, brzdění či zatáčení.

ADAMS/Tire má dostupné tyto moduly [3]:

- ADAMS/Tire moduly začleňují následující modely pro použití studie vozidlové dynamiky

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface



FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

- MF-Tyre
- Pacejka 89 a 94
- model pneumatiky Fiala
- model pneumatiky UA
- model pneumatiky 5.2.1
- ADAMS/Tire FTire model
- ADAMS/Tire SWIFT model
- ADAMS/Tire MF-MCTyre model

3.2.2 Model pneumatiky 5.2.1

Model pneumatiky 5.2.1 je jednoduchým modelem, který požaduje pouze malé množství vstupních informací nebo experimentálních dat k simulaci chování pneumatiky.

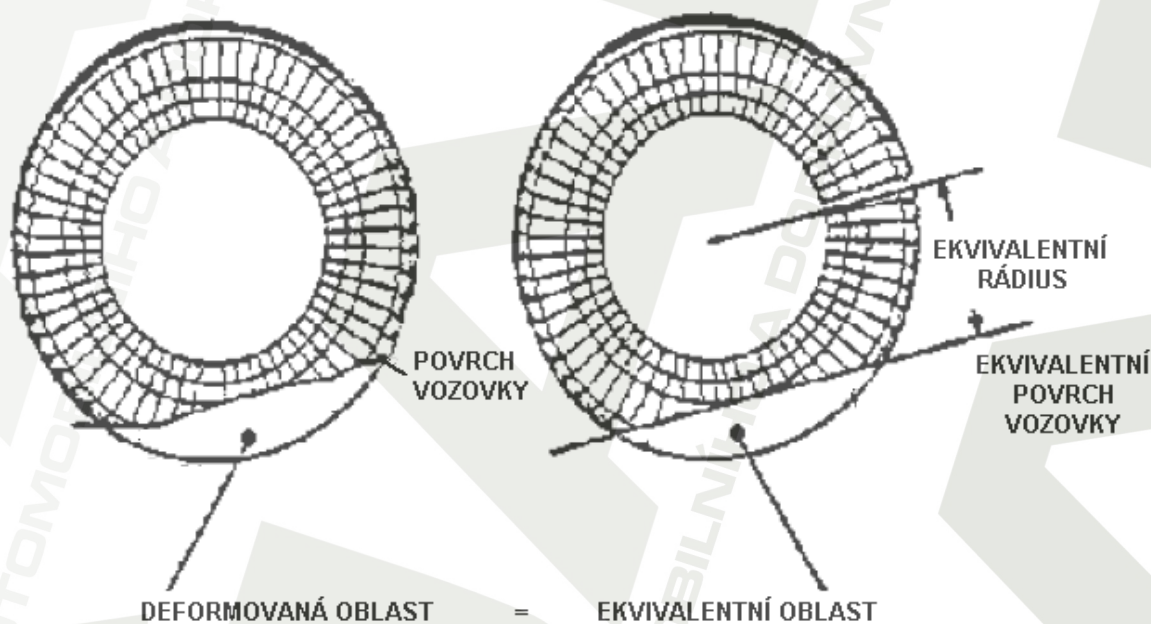
Je prvním počinem ADAMS/Tire. Jméno 5.2.1 označuje jeho verzi, tzn. že se jedná o 5 evolucí programu. [3]

Síly a momenty mohou být počítány dvěma způsoby:

- Pomocí matematických rovnic
- Pomocí interpolace

Tento model rozezná působiště a orientaci působících sil na pneumatiku, jako jsou síly boční, podélné, vertikální (normální) a vyrovnávací moment.

Model používá dvě možnosti znázornění kontaktu pneumatiky s vozovkou: bodový a rovinný styk. Pro rovinný styk s vozovkou se využívá ekvivalentní plocha (náhrada skutečné plochy za ekvivalent) dle obrázku 5.



Obrázek 5 - Ekvivalentní rovinná plocha [3]

Náhrada skutečné plochy vozovky za ekvivalentní plochu je nejlepší pro simulaci relativně velkých překážek, protože předpokládáme, že pneumatika tuto překážku neobklopí těsně. Ve skutečnosti zabrání těsnému obepnutí překážky nárazník pláště pneumatiky. Nastane tak nerovnoměrné rozložení tlaku a vznik mezer mezi pneumatikou a vozovkou. Jestliže je překážka na vozovce větší než styčná plocha pneumatiky (výmoly, obrubníky,...), tak je obklopení pneumatiky relativně dobré. Je-li ale překážka o hodně menší než styčná plocha (dilatační spáry, kamínky,...), tak je obepínání pneumatiky nízké a metoda náhrady

za ekvivalentní plochu tak může více podhodnocovat síly od malých nerovností, což může snížit přesnost výsledku. [3]

3.2.3 Model pneumatiky Fiala

Model pneumatiky Fiala je nejzákladnějším standardním modelem ADAMS/Tire. I přes své omezené schopnosti má tento model především výhodu v počtu vstupních parametrů a těch je „pouhých“ 10 a jsou uvedeny níže.

Předpoklady pro užití [3]:

- Obdélníková stopa pneumatiky
- Rovnoměrný tlak pneumatiky na stopu
- Pneumatika je modelována jako elastická
- Úhel sklonu nemá žádný vliv na síly v pneumatice

Vstupy [3]:

- R_1 – poloměr nezatížené pneumatiky
- R_2 – poloměr kostry pneumatiky
- k_Z – radiální tuhost pneumatiky
- C_S – podélná tuhost pneumatiky
- C_α – boční tuhost pneumatiky vzhledem k úhlu skluzu
- C_γ – boční tuhost pneumatiky vzhledem k úhlu sklonu
- C_r – součinitel valivého odporu
- ζ – poměrné radiální tlumení
- μ_0 – koeficient statického tření
- μ_1 – koeficient dynamického tření

Parametry R_1 , R_2 , k_Z a ζ jsou používány pro výpočet vertikálního zatížení pneumatiky. Výpočet podélných, příčných sil a momentů je počítán z parametrů C_S , C_α , C_r , μ_0 a μ_1 . Parametr C_γ je ignorován.

Uvažované síly a momenty [3]:

- Normálová síla – působí v ose z a dle směrnic SAE je vždy záporná
- Podélná síla – závisí na normálové síle, součiniteli tření, úhlu skluzu,...
- Boční síla – závisí jako podélní síla na normálové síle, součiniteli tření, úhlu skluzu,...
- Moment valivého odporu
- Vyrovnávací moment

U tohoto modelu pneumatiky si můžeme z předem připravených dat nahrát rozměry pneumatiky (její tvar) a ty pak porovnávat s tvarem pneumatiky při průjezdu zatáčkou. Pneumatika se při průjezdu zatáčkou deformuje, odklání se od adekvátního lemu ráfku disku kola. My tak můžeme sledovat změny tvaru kola a porovnávat je s kolem při jízdě v přímém směru. [3]

3.2.4 Model pneumatiky UA

UA je zkratkou místa, kde byl tento model poprvé představen. Jedná se o Univerzitu Arizona (University of Arizona). Model byl vyvinut doktorem Drs. Nikravsehem a Dr. Gimem roku 1988. [3]

Model počítá síly v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou na základě kinematických veličin.

Vstupy [3]:

- κ – podélný skluz. Rychlost skluzu mezi podložím a pneumatikou. Nabývá hodnot -1 až 1 a je záporná během brzdění a naopak kladná při akceleraci.
- α – úhel skluzu. Úhel mezi přímkou ve směru jízdy (procházející středem kontaktní plochy) a osou x.
- γ – úhel sklonu. Úhel mezi rovinou x-z a rovinou kola.
- ρ – deformace pneumatiky
- $\dot{\rho}$ - rychlost deformace pneumatiky
- vstupní parametry pneumatiky

Uvažované síly a momenty [3]:

- F_X – podélná síla v ose x v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou
- F_Y – boční síla v ose y v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou
- F_Z – normálová síla v ose z v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou. Počítána za předpokladu lineární tuhosti pružiny a tlumiče
- M_Y – moment valivého odporu kolem osy y v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou
- M_Z – vyrovnávací moment kolem osy z v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou

Kvalifikace skluzů [3]:

- Koeficient podélného skluzu κ
- Koeficient bočního skluzu – vypočítán z úhlu skluzu α a úhlu sklonu γ
- Komplexní skluz – vypočítán jako odmocnina ze součtu druhých mocnin koeficientů podélného a bočního skluzu
- Součinitel tření – výsledný součinitel tření mezi pneumatikou a vozovkou je funkcí komplexního skluzu a parametrů tření (U_0 a U_1), které se experimentálně získávají z jízdních zkoušek.

3.2.5 Model pneumatiky Pacejka 89 a 94

Tyto modely pneumatiky jsou speciální verzí modelu Magic-Formula. Jedná se o starší model pneumatiky, nicméně mnoho výzkumných institucí využívající ADAMS/Tire má data kompatibilní pouze s modelem Pacejka 89 a 94 a z toho důvodu se začleňuje přímo do modelu MF-Tyre.

Veškeré matematické formulace, používané v tomto modelu jsou odvozeny z publikací Dr. H.B. Pacejky [Pacejka, H.B. and Bakker, E. The magic formula tyre model, tyre models for vehicle dynamic analysis. *Proceedings of the 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis*, ed. H.B. Pacejka, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 1–18, 1993.] a jsou běžně označovány jako metoda (model) Pacejka, však Pacejka se sám osobně na tomto vývoji nepodílel. [3]

Souřadnicové systémy

Souřadnicové systémy používané při modelování a simulaci mohou být někdy matoucí a modely pneumatiky Pacejka 89 a 94 nejsou výjimkou. Souřadnicové systémy tu byly vytvořeny v době vzniku jednotlivých modelů pneumatik, kdy ještě neexistovala řádná uznávaná norma. Následkem toho je model pneumatiky Pacejka 89 uváděn v modifikovaném SAE standartu souřadnic, kdežto model pneumatiky Pacejka 94 už vyhovuje plně standartu SAE. Mezi těmito systémy je rozdíl pouze v orientaci normálové síly a úhlu skluzu [3].

3.2.6 Model pneumatiky MF-Tyre

Model pneumatiky MF-Tyre, známý spíše pod názvem Magic-Formula, byl vyvinut společností TNO Automotive. MF-Tyre je špičkovým modelem pneumatiky pro simulaci ovládání vozu z nabídky ADAMS/Tire.

Každá pneumatika a vozovka má svoji typickou charakteristiku. Charakteristiky lze přesně aproximovat zvláštní matematickou funkcí nazvanou Magic Formula. Parametry formule závisí na pneumatice a podloží a lze je získat z experimentálních zkoušek [3].

Magic-Formula je spíše empirické povahy a obsahuje soubor vzorců, které jsou založeny na fyzikálním základě. Počítá síly F_x , F_y a momenty M_x , M_y , M_z závislé na jednoduchém či kombinovaném skluzu. Používá podélný nebo příčný skluz a jeho úhel (κ , α), odklon kola γ a normálovou sílu F_z jako vstupní veličiny [3].

Historie

Tento model je v současnosti asi nejvíce známý, je založen na modelu Pacejka a prochází neustálým vývojem. Je používán k výpočtům sil a momentů působících na kolo. Ve spolupráci korporace Volvo Car a Delft Univerzity v polovině osmdesátých let se začalo

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface

pracovat na modelu pneumatiky, který přesně popisuje síly vznikající mezi vozovkou a pneumatikou. [4]

První verze MF-Tyre byla představena roku 1987. Základem bylo používání funkcí \sin a \arcsin především pro popis jednoduchého skluzu. Další vývoj umožnil i výpočet kombinovaného skluzu. V druhé verzi programu představené roku 1989 bylo možné simulovat pneumatiku i při průjezdu zatáčkou. [4]

Hlavní obrat ve vývoji tohoto modelu nastala ve spolupráci se známým pneumatikářským výrobcem Michelin (1993). V tu dobu se tento model dostal do širšího podvědomí průmyslu především pro výpočet boční síly a komplikovaného kombinovaného skluzu. [4]

Další vývoj umožnil modelu akceptovat větší hodnoty skluzu a také možnost otáčení pneumatiky při simulaci i opačným směrem. Autoři tento program doporučovali pro jednoduchý výpočet podélné a boční síly. V roce 1997 dostal model nové jméno Delft Tyre 97. [4]

Bayle e.o. navrhl více empirický přístup k řešení, čímž se snížila složitost výpočtů kombinovaného skluzu a tím pádem zvýšila rychlost simulace.

Nejnovější verze kombinuje výhody předchozích verzí a přidává nové aspekty [3]:

- Síly v kombinovaném skluzu jsou počítány dle Bayle
- Zavedeny vzorce popisující klopný moment
- Bylo zdokonaleno přechodné chování pneumatiky v úpravě pro nulovou rychlost
- Parametry používané ve výpočtech byly zvolené jako bezrozměrné pro zlepšení manipulace s pneumatikou

Základem modelu pneumatiky MF-Tyre je rovnice uvedená níže.

$$y(x) = D \sin(C \arctan(Bx - E(Bx - \arctan(Bx))))),$$

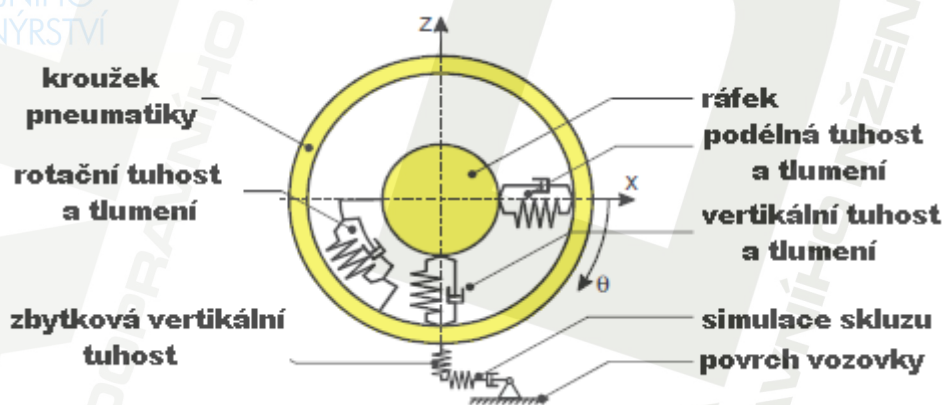
kde B, C, D, E jsou bezrozměrné parametry modelu pneumatiky, B je faktor tuhosti pneumatiky, C je faktor tvaru pneumatiky, D je maximální hodnota a E je faktor zakřivení. [1]

3.2.7 Model pneumatiky MF-MCTyre

Tento model byl opět vyvinut společností TNO Automotive a jedná se o rozšíření modelu MF-Tyre. Rozšíření bylo zaměřeno na výpočty větších odklonů pneumatik a proto se nejvíce hodí pro motocyklové simulace. [3]

3.2.8 Model pneumatiky SWIFT-Tyre

Model pneumatiky SWIFT-Tyre je kombinací modelu MF-Tyre s prstencovým modelem pneumatiky (obrázek 6). Vznikl ve spolupráci technické univerzity Delft a automobilovým centrem TNO. Typickými aplikacemi modelu jsou například trvanlivostní studie, simulace aktivního ovládání podvozku (ABS, ESP) či simulace zatáčení na nerovném povrchu. [3]



Obrázek 6 - Prstencový model pneumatiky [3]

Model MF-Tyre je široce používanou a uznávanou simulací pro zjišťování působení sil a momentů mezi pneumatikou a vozovkou za ustáleného valení. Ovšem při nerovné vozovce jsou frekvence pohybu pneumatiky vyšší a metoda se tak stává méně přesnou, proto ji SWIFT-Tyre kombinuje s prstencovým modelem a výrazně tak zvyšuje frekvenční rozsah chování pneumatiky. Předpokládá se, že se pás pneumatiky chová jako tuhé těleso a tak je možné sledovat v závislosti na vlastnostech pneumatiky kmitočtové pásmo zvláště v bočním i podélném chování. Model byl ověřen až do kmitočtu 120 Hz a rychlosti 40 m/s. [3]

3.2.9 Model pneumatiky FTire

Pružný prstencový model pneumatiky, plně prostorový (3D) nelineární podporovaný mnoha výrobci vozidel i pneumatiky po celém světě. [9]

Model je určen pro simulace komfortní jízdy na nerovné vozovce. Může také sloužit jako fyzikálně založený, vysoce nelineární a dynamický model pneumatiky pro jízdní vlastnosti na mírně nerovném povrchu. Na rozdíl od jiných modelů, vysvětluje většinu složitých jevů pneumatiky na mechanické bázi. Je tak více než jen matematickým modelem a výsledky se nejvíce přibližují i reálným testům. [9]

Vývoj první verze měl v rukou výrobce automobilů Honda (Japonsko). Vývoje se také zúčastnil pneumatikářský koncern Continental (Německo).

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface

Vývojáři specifikují FTire jako model [9]:

- Rychlý
- Důkladný a spolehlivý
- Zaměřený na poskytování jednoduchých údajů
- Neustále vyvíjený
- Přesný, s možností porovnání s realitou
- Nevyžaduje složité předzpracování dat

FAKULTA
STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

3.2.10 Přehled modelů pneumatik ADAMS/Tire a jejich užití [2]

případ / manévr	ADAMS – modely ovládání vozu								specifické modely		
	MF-Tyre	PAC89	PAC94	FIALA	5.2.1.	UA Tire	MF-MC	SWIFT	FTire		
Stání a rozjezd vozu	•	×	×	×	×	×	•	✓	✓		
Parkování	×	×	×	×	×	×	×	×	✓		
Průjezd zatáčkou	✓	•	•	•	•	•	•	•	•		
Změna jízdního pruhu	✓	•	•	•	•	•	•	•	•		
Brzdná dráha s užitím ABS	•	×	×	×	×	×	•	✓	✓		
Brzdění	✓	•	•	•	•	•	•	•	•		
Zatažení na nerovné vozovce	•	×	×	×	×	×	•	✓	✓		
Průjezd nerovností	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓		
Jízda po nerovné vozovce	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓		
Sledování funkce ABS	•	×	×	×	×	×	•	✓	✓		
Stáčení vozu	•	×	×	×	×	×	•	✓	✓		
Vibrace řídicího ústrojí	•	×	×	×	×	×	•	✓	✓		
Monitoring v reálném čase	✓	×	×	×	×	×	×	×	×		
Kontrola zavěšení vozu za jízdy	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
Jízda přes obrubník	×	×	×	×	×	×	×	•	•		
Jízda přes obrubník s kontaktem ráfku	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
Průjezd výmolem	×	×	×	×	×	×	×	•	•		
Zatížení pneumatiky	×	×	×	×	×	×	×	•	•		

×	Model neumožňuje simulovat daný případ
•	Model umožňuje simulovat daný případ
✓	Model je vhodný pro simulaci daného případu
•/✓	Model je vhodný pro simulaci daného případu za určitých podmínek

Model neumožňuje simulovat daný případ

Model umožňuje simulovat daný případ

Model je vhodný pro simulaci daného případu

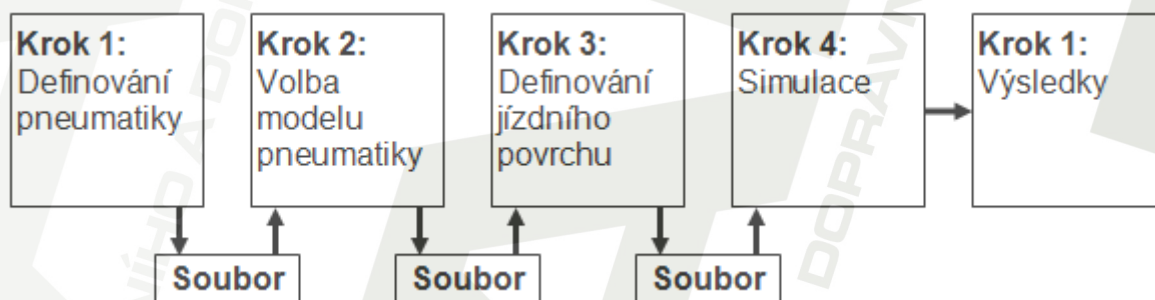
Model je vhodný pro simulaci daného případu za určitých podmínek

3.2.11 Používání softwaru ADAMS/Tire

ADAMS/Tire se aplikuje v pěti krocích (pro přehlednější znázornění slouží obrázek číslo 7). [3]

1. Definování pneumatiky – vytvoří se soubor obsahující nezbytné údaje reprezentující pneumatiku i ostatní části vozidla, jako jsou kola, tlumiče a zavěšení. Hlavním údajem o pneumatice je tzv. GFORCE, které představuje sílu pneumatiky na vozidlový disk a následně na zavěšení vozu.
2. Volba modelu pneumatiky – obsahuje silové a momentové charakteristiky, např. Fiala, Pacejka, UA-Tire, SWIFT-Tyre, MF-Tyre
3. Definování jízdního povrchu – upřesnění povrchu a součinitele tření. Vozovka může být upřesněna jako rovinná (2D) či třírozměrná.
4. Spuštění simulace
5. Generování výsledků

Mezi každým krokem se vytvoří soubor s daty, která popisují přednastavené hodnoty.



Obrázek 7 - Znázornění použití metodiky ADAMS/Tire [3]

```
-----
$
MDI HEADER
FILE_TYPE      = 'rdf'
FILE_VERSION   = 2.0
FILE_FORMAT    = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
'Example of 521-Tire, point follower flat road'
$-----
-units
[UNITS]
LENGTH         = 'mm'
FORCE          = 'newton'
ANGLE          = 'radians'
MASS           = 'kg'
TIME           = 'sec'
$-----
definition
[MODEL]
METHOD         = '5.2.1'
$-----
parameters
road_profile_type = FLAT
initial_height   = 0
```

Obrázek 8 - Ukázka souboru (hlavička) modelu pneumatiky 5.2.1. pro definování jízdního povrchu [3]

3.2.12 Typy kontaktu pneumatiky s vozovkou

Bodový styk	<ul style="list-style-type: none">• Používaný pro moduly ovládání vozu• Určeno pro 2D model vozovky• Metoda uvažuje pouze jeden jediný kontaktní bod mezi pneumatikou a podložím
Rovinný styk	<ul style="list-style-type: none">• Používaný pro moduly odolnosti pneumatiky• Užívá se ekvivalentní plocha – náhrada skutečné vozovky za ekvivalent (dle obrázku 5)
Ekvivalentní prostorová metoda	<ul style="list-style-type: none">• Používaný pro 3D model vozovky• Metoda pracuje s jedním kontaktním bodem a vertikální odchylkou pneumatiky od předpokládaného válcového tvaru

3.3 Simulace pneumatik Engineering Dynamics Corporation (EDC)

Společnost EDC začínala vyvíjet software pro simulace havárií, který se stal postupem času standardem při vyšetřování dopravních nehod. Od roku 1991 začala firma pracovat na softwaru s 3D prostředím, jenž se prosazuje dodnes v průmyslu při konstrukci, vývoji i studii pohybu vozidel. [24]

Při vyšetřování ztráty kontaktu pneumatiky s vozovkou se často setkáváme s vozovkami nepravidelných tvarů, jako například silnice složená z kostek, měkkých povrchů (například jízda po poli) či přeježdění obrubníků. V závislosti na úhlu nájezdu na překážku či na typu povrchu se výrazně ovlivňuje trajektorie pohybu vozidla. Chceme-li tedy správně pochopit, jak došlo ke ztrátě kontaktu pneumatiky s vozovkou, musíme vědět jak ovlivňuje povrch jízdu vozu. [10]

Modely pneumatik od EDC se zaměřují na interakci pneumatiky s nepravidelným tvarem povrchu. Modely kromě nehomogenního tlaku působícího na vozovku dokáží také simulovat síly a momenty v bočnici pneumatiky, která např. naráží na obrubníky, nebo třeba převrácení vozidla díky bočnímu najetí na překážku. Prakticky většina starších simulací kontaktu kola s vozovkou počítá pouze s rovným a dokonale tuhým povrchem. [10]

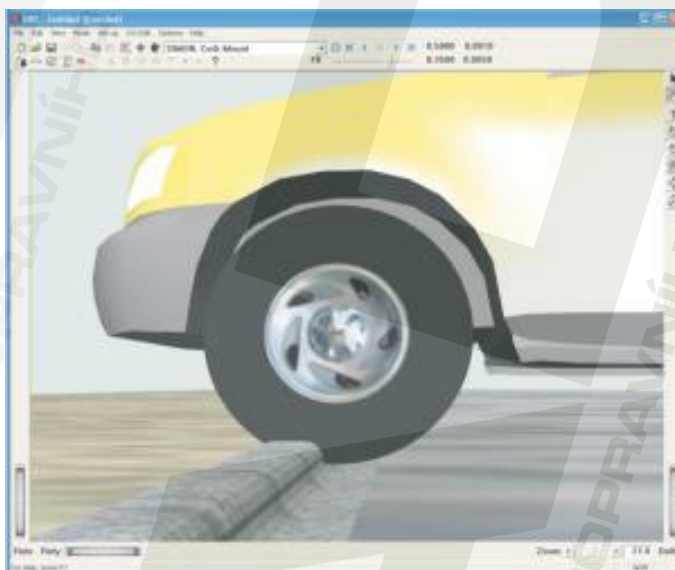
Nový model pneumatiky obsahuje 3 komponenty. [10]

- Radiální pružný model pneumatiky
- Model pro simulaci sil na bočnici pneumatiky
- Model pneumatiky pro simulaci měkké vozovky

3.3.1 Radiální pružný model pneumatiky

Tento model je schématicky znázorňován jako série pružin ležících v rovině pneumatiky umístěných radiálně od středu kola.

Model je používán například pro simulaci nárazu pneumatiky do obrubníku. Starší modely pneumatiky často simulaci ukončily hlášením „Náraz ráfku“. Tohle nastávalo, byl-li obrubník stejně vysoký jako profil pneumatiky. Je-li obrubník ještě vyšší, tak začíná nový radiální pružný model pneumatiky počítat i s deformací ráfku. Model také úspěšně simuluje přejezd obrubníku při malých rychlostech (obrázek 9). [10]

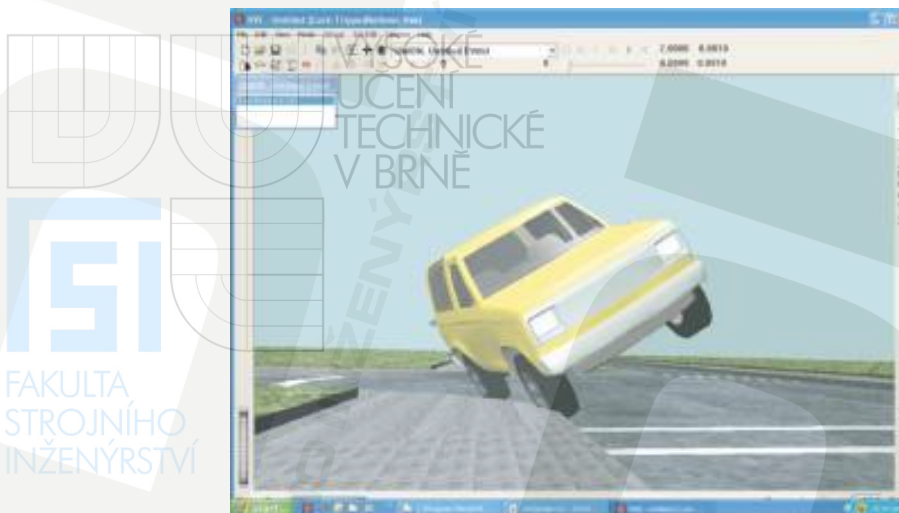


Obrázek 9 - Radiální pružný model pneumatiky simulující přejezd obrubníku [10]

3.3.2 Model pro simulaci sil na bočnici pneumatiky

Jedná se o rozšířený radiální pružný model pneumatiky. Každá radiální simulovaná pružina tedy obsahuje další pružinu umístěnou axiálně, která znázorňuje bočnici pneumatiky.

Model je používán například pro simulaci bočního nárazu pneumatiky na překážku a následného možného převrácení vozu. Výsledek této simulace je zobrazen na obrázku 10, kde je modelována rychlost vozu 56 km/h a úhel kontaktu mezi pneumatikou a překážkou je 90°. [10]

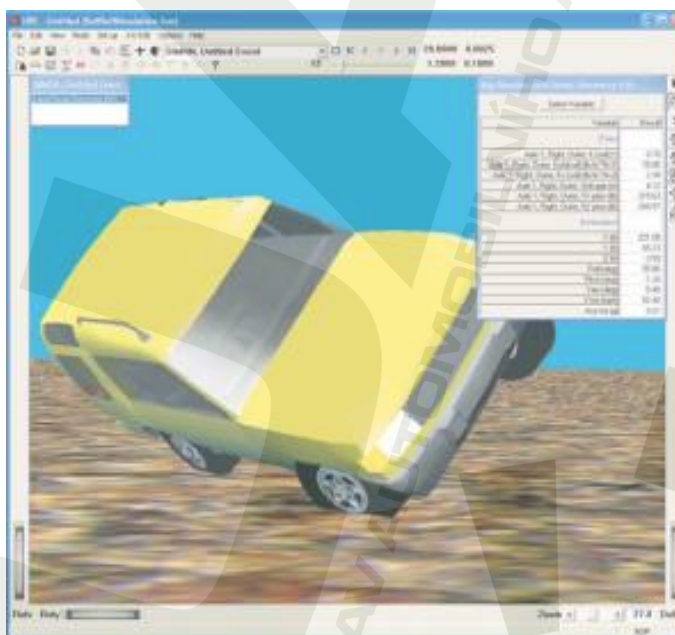


Obrázek 10 – Simulace bočního nárazu na obrubník s možností převrácení vozu [10]

3.3.3 Model pneumatiky pro simulaci měkké vozovky

Tento model je založen na výzkumu M.G. Bekkera z University of Michigan. Cílem práce mělo být předpovídání výkonů a tažných sil lunárního vozidla na měsíci. Model počítá vniknutí pneumatiky do podloží na základě empirických vztahů vyvinuté profesorem Bekkerem.

Model je používán pro simulaci pohybu vozidla v měkkém terénu. Na obrázku 11 je znázorněný výstup simulace, kdy vozidlo opouští silnici a vjíždí do zoraného pole. Síly, vznikající ponořením pneumatik do měkkého podloží, způsobují zpomalení vozidla a při zatáčení vzniká klopný moment snažící se vůz převrátit. [10]



Obrázek 11 - Simulace převrácení vyvolané smykem na měkkém podloží [10]

4. Reálné testy pneumatik

4.1 Obecně

Další nedílnou součástí výzkumu pneumatik jsou reálné testy ve skutečných podmínkách. Pneumatika je tedy vystavována povětrnostním podmínkám a individuálnímu chování jezdce. Sem patří například mediálně známé testy letních či zimních pneumatik, testy nejrozličnějších vzorků, směsí či rozměrů pneumatik, které pořádá především známý německý autoklub ADAC. Můžeme také zkoumat vliv poloměru otáčení na poškození půdy, což je důležité především pro zemědělské stroje, které se pohybují po polích.

Reálné testy pneumatik se však neodehrávají pouze na silnicích či nezpevněných površích, ale také v laboratořích, kde se především zkoumá vliv pneumatiky na ztuhnutí půdy, nejrozličnější testy hlučnosti či tuhosti pneumatik a nárazových zkoušek. Tyto zkoušky sice nejsou tak objektivní jako zkoušky pod „širým nebem“, ale lze tak přesněji stanovit podmínky reprodukovatelnosti měření.

4.2 Vybrané průzkumy

4.2.1 Testy pneumatik na vozidle

Tyto testy pneumatik především poukazují na přilnavost pneumatik za nejrozličnějších povětrnostních podmínek, jako je například suchá, mokrá či sněhem pokrytá silnice. Dále se testy zaměřují na jejich hlučnost, valivý odpor, opotřebení či odolnost vůči aquaplaningu, který je popsán v úvodu. V našich podmínkách jsou nejznámější společnosti pro testování pneumatik např. již dříve zmíněný německý autoklub ADAC, německá DEKRA, či další německý institut TÜV SÜD Automotive, nebo náš Autoklub České Republiky.

Chování a vlastnosti pneumatik záleží především na směsi, ze které je pneumatika vyrobena, dezénu (vzorku), rozměru, rychlostní kategorii. Odlišné je také chování pneumatik na různých značkách a typech automobilů.

Testy probíhají nejčastěji na osobních vozidlech (většinou známějších a bližších veřejnosti) řízenými zkušenými jezdci (nezřídka bývalými závodníky) na zkušebních polygonech a to jak za sucha, mokra či na sněhu. Dále jsou testy odjížděny v horských terénech (úzké horské silničky) se zatáčkami, různým klesáním, stoupáním. Pro zajištění konstantních teplotních podmínek probíhají zkoušky převážně v noci. [11]

Na zkušebních polygonech jsou hlavními testovacími disciplinami zejména aquaplaning, brzdění na suchu, brzdění na morku, ovladatelnost na suchu (obrázek 13), ovladatelnost na mokru, či jejich komfort, hlučnost a opotřebení. Brzdění je měřeno jak decelerometry, tak přímo vzdáleností, na které je schopen vůz na daném povrchu zastavit. Ovladatelnost je nejčastěji usuzována z času, za jaký je schopen testovací jezdec odjet vytyčenou trasu. Komfort je subjektivní hodnocení jezdců v názoru na pohodlnost cestování a hlučnost je měřena například spektrálními analyzéry. [11] Opotřebení je měřeno hloubkou

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface

deženu a měří se při jízdě v normálním provozu na několika autech s několika řidiči, aby se eliminovaly odlišnosti řidičů a vozidel.

Z testů plynou především doporučení, jaké pneumatiky jakého výrobce a dezénu jsou nejvhodnější pro jízdu na sněhu, či na suchou nebo mokrou vozovku (zimní/letní pneumatiky), jaké pneumatiky nejlépe odolávají vodě (průjezd hlubokou vodou a následná ovladatelnost vozu) a také, jaké pneumatiky jsou nejšetrnější vůči životnímu prostředí, což je měřeno spotřebou paliva vozidla a také jejich opotřebením – v testech se např. potvrdilo, že pneumatiky, které se pomalu opotřebují a mají tedy malý valivý odpor, pozitivně ovlivňují spotřebu paliva. Mají však horší výsledky při testech na namoklé silnici. [12]

	Název pneu	Sucho	Mokro	Sněh	Led	Komfort	Hlučnost	Valivý odpor	Opotřebením	Hodnocení
1.	Continental Conti Premium Contact 2	100	100	0	0	100	100	100	0	★★★★★
2.	Kleber Dynaxer HP2	99.7	95.3	0	0	95	103	110.8	0	★★★★
3.	Barum Bravuris 2	98.8	95.3	0	0	97.5	101.2	113.7	0	★★★★
4.	Debica Furio	95.9	93.8	0	0	95	106.7	102.9	0	★★★★
5.	Kumho KH15	96.4	91.5	0	0	97.5	103	108.9	0	★★★★
6.	Kormoran Gamma G2	95.3	91.6	0	0	95	102	95.9	0	★★★
7.	Sava Intensa	93.3	92.1	0	0	78.6	101	92.3	0	★★★
8.	Nankang Toursport XP61	96.1	85.1	0	0	97.5	104	102.5	0	★★★
9.	Kleber Dynaxer HP2(ojetá)	99.1	82.1	0	0	71.4	0	0	0	★★
10.	Firestone F-590(ojetá)	98.8	70.9	0	0	97.5	102	0	0	★★
11.	GoodYear Ultra Grip 6(ojetá zimní)	93.1	67.6	0	0	97.5	101	0	0	★★

Obrázek 12 - Typický výsledek testu letních pneumatik o rozměru 195/65 R15 [13]



Obrázek 13 - Test pneumatik - zkouška ovladatelnosti vozidla [12]

4.2.2 Experimentální zkoušky nárazu pneumatiky

Při návrhu vozidla se zvažují nejrůznější faktory, jedním z nejdůležitějších je bezpečnost. Existuje několik konstrukčních řešení pro zlepšení pasivní bezpečnosti automobilu, jako například správný návrh deformačních zón. Nicméně řidič se snaží nehodě zabránit, či alespoň zmírnit její následky, proto je důležité, aby pneumatiky takto extrémní situace (a následně vznikající zatížení) vydržely. Studie ukazují, že značná část nehod vzniká právě destrukcí pneumatiky, která nevydrží značné zatížení. Navíc je z průzkumů zjištěno, že většina vozů jezdí s podhuštěnými pneumatikami, které tak nemají výrobcem předpokládané mechanické vlastnosti a jízda s nimi může vést k častější ztrátě kontroly nad vozidlem. [14]

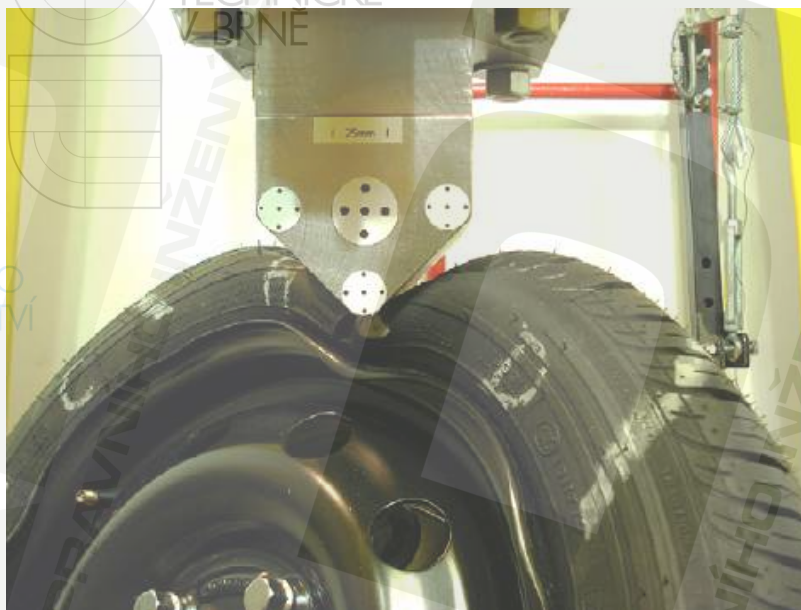
Klíčovou otázkou při navrhování pneumatik je její schopnost vydržet intenzivní zatěžování. Proto jsou důležité experimentální zkoušky, kterým mohou sloužit jako porovnání počítačové modely, které však nedokáží s takovou přesností nasimulovat složitou strukturu pneumatiky.



Obrázek 14 - Plošina pro nárazové zkoušky pneumatik [14]

Pro experimentální zkoušky nárazu pneumatiky byla vyvinuta speciální testovací plošina, (obrázek 14) na které se zkoumá vliv příčného zatížení na pneumatiku. Plošina drží danou pneumatiku ve stanové poloze a naráží do ní předmět válcového tvaru s různou energií a rychlostí (obrázek 15). Výsledky dopadů snímají vysokorychlostní kamery a laserové měřiče rychlosti. Měření bylo možné získat rázové síly a místní deformace ráfku. Srovnáním experimentů s matematickými modely pak prokázalo, že tímto způsobem lze

předvídat vliv hmotnosti a huštění pneumatiky na její odolnost v extrémních případech nárazů. Jelikož je pneumatika pevně uchycena na plošině, neuvažujeme pérování vozu. [14]



Obrázek 15 - Znázorněný náraz vnikajícího válcovitého tělesa do pneumatiky [14]

4.2.3 Měření vlivu poloměru otáčení vojenských vozidel na podloží

Vyjeté koleje v půdě vznikají pod koly vozidel a závažně ovlivňují jak vegetaci v půdě (poškozením kořenového systému rostliny), tak chování dopravního prostředku. Zohledňuje se především šířka a hloubka vyjetých kolejí. Vzniká tzv. „index vyjeté koleje“, který je založen na údajích její šířky a hloubky. Koleje vznikají zhutňováním půdy, jejím vytlačováním od vertikálního zatížení vozu, prokluzem kol či vlivem boční síly při zatáčení. Pro testy provedené Kin Liuem a jeho týmem v Arizoně bylo použito lehké obrněné vozidlo (LAV – 13930 kg, obrázek 16) a vysoce mobilní víceúčelové dvoustopé vozidlo (HMMWV – 2608 kg, u nás známé jako vojenské vozidlo Hummer, obrázek 16) při různých rychlostech. Pro kvalifikaci byl použit systém GPS i ruční odměřování a zapisování každých 5-7 metrů podél trati. Výsledky polních pokusů ukazují, že hloubka, šířka i index vyjetých kolejí roste s poklesem poloměru otáčení, zvláště, je-li poloměr otáčení menší než 20 m. Rychlost tyto údaje ovlivňuje pouze za vozidlem LAV. Zároveň je také hloubka vyjetých kolejí ovlivněna počtem přejezdů, deformací a velikostí pneumatik, hmotností vozidla, či pevností zeminy, což pro změnu dokladovaly profesori Braunack a Williams při testování s obrněným transportérem M113 či tankem Leopard ve svém příspěvku: Braunack MV, Williams BG. The effect of initial soil water content and vegetative cover on surface disturbance by tracked vehicles. *Journal of Terramech* 1993;30(4):299–311. [15]

Reálnými testy zohledňujícími vliv vozidla (pneumatik) na podloží se však zabývá spousta výzkumných center, z nejznámějších např. NATO, se svým „Reference Mobility model“, pro nejsilnější pojízdné stroje (tanky), který silně koreloval rozměry vzniklých kolejí

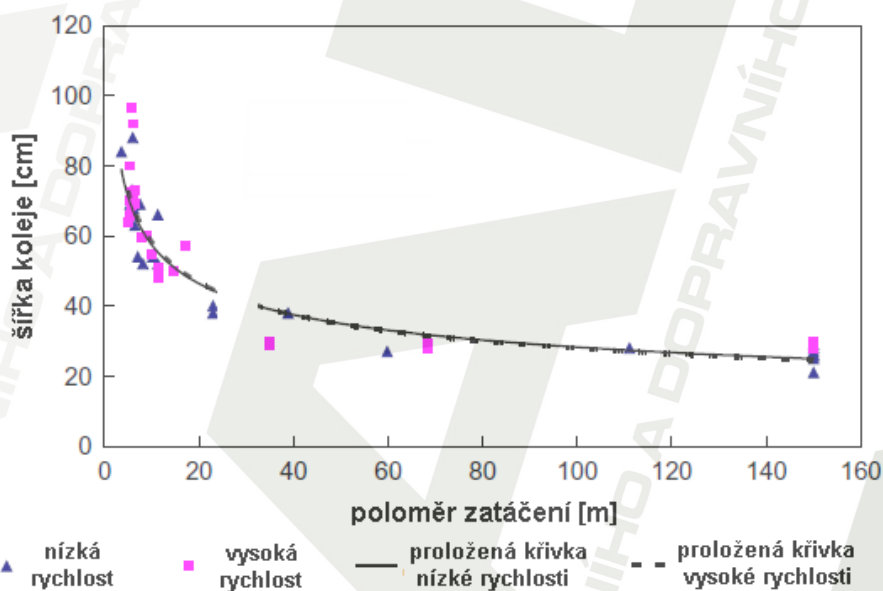
Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface

v závislosti na trakci a pohybu vozidla. U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC), však simuloval interakci vozidla s podložím na základě modelu VTI (Vehicle Terrain Interface model), kde se zabývali především závislostí natočení volantu.



Obrázek 16 – Vlevo HMMWV vozidlo, vpravo LAV [15]



Obrázek 17 - Ukázka výstupu z měření - závislost šířky vyjeté koleje na poloměru zatáčení u vozidla HMMWV při nízké rychlosti (3 m/s) a „vysoké“ rychlosti 9 m/s [15]

4.2.4 Měření trakce pneumatik zemědělských strojů

Reálnými zkouškami interakce pneumatiky s podložím se zabývají nejrůznější studie, včetně čím dál více vyspělejších počítačových simulací. Avšak tyto simulace se musí ověřovat za kontrolovaných půdních podmínek. Trakční výkon zemědělské pneumatiky byl měřen přímo pomocí traktoru na poli, či testeru s jedním kolem v laboratorních podmínkách. Však porovnání těchto dvou testů ukázalo difference způsobené většinou rozdílným stavem půdy. Faktorů ovlivňujících výkonnost pneumatik je spousta a jsou složité, takže je obtížné určit míru jejich vlivu. Přestože má krytý systém (laboratorní podmínky) tu nevýhodu, že se jedná spíše o umělé prostředí, tak je na druhou stranu jeho velikou předností snadné dodržování složení a struktury půdy. Chceme-li tedy získat spolehlivá a přesná data

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

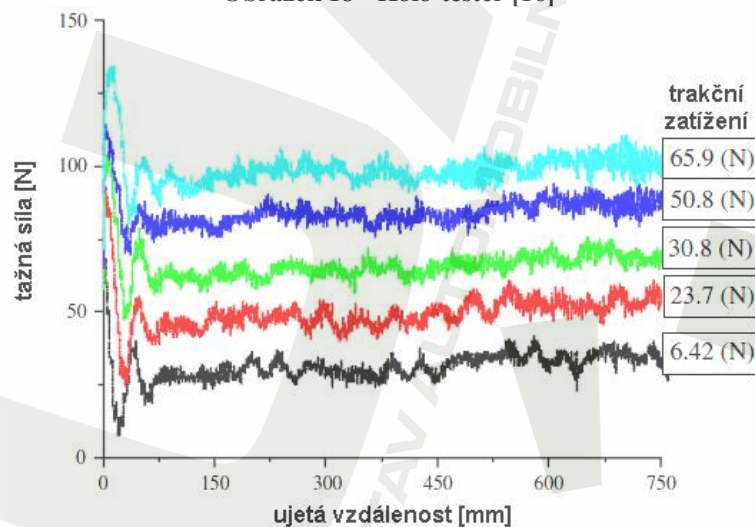
Current situation of research into interaction of tire with surface

pro ověřování simulačních výpočtů, musíme jednoduše kontrolovat vlastnosti půdy jako je např. vlhkost či jednotvárnost a struktura. [16]

Pro spolehlivé reálné studování interakce pneumatiky s podložím byl vyvinut měřicí trakční systém experty z univerzity Kyoto v Japonsku (Kawase, Nakashima, Oida), který umožňuje vytvoření kontrolovaných půdních podmínek. Systém se skládá z jednoho kolo-testeru (obrázek 18), míchacího a zhutňovacího zařízení pro přípravu půdy, samostatné půdy a zařízení pro měření tažných sil. Jako zemina byl použit písek, používaný např. pro filtraci vody o průměru zrnka 0,6 mm. Pneumatika byla průměru 545 mm, šířky 126 mm s tlakem 120 kPa klasického traktorového vzorku (do šípu). Při testu byl měřen krouticí moment, tažná síla, poloha závěsného oka pneumatiky, cestovní vzdálenost (SWT) a úhel natočení pneumatiky. Měření bylo reprodukovatelné ve všech experimentálních podmínkách i v všech měřených veličinách, jako například závislost skluzu na pohybu pneumatiky, závislosti skluzu na tažné síle. Bylo zjištěno, že točivý moment pneumatiky ovlivňuje polohu závěsu oka pneumatiky a tento jev byl odměřen i v oblastech skluzu. [16]



Obrázek 18 - Kolo-tester [16]



Obrázek 19 - Ukázka výstupu z měření - závislost tažné síly na ujeté vzdálenosti při různých trakčních zatíženích [16]

4.2.5 Hodnocení pneumatiky založené na zhutnění půdy

Obecným trendem v ochraně půdy je snížení rizik způsobených zhutněním povrchu vlivem přejezdu těžkých dopravních prostředků a zařízení. Alexandr Grečenko provedl v roce 2009 pokusy (analytická práce a dohled nad experimentem, Prikner zpracoval a provedl experimenty) a sestavil tzv. CC faktor, který reprezentuje velikost zhutnění půdy pneumatikami. CC hodnotí hmotnost suché půdy podél svislého sloupce 20-50 cm pod povrchem země. Důležitou vlastností faktoru CC je, že provádí laboratorní přesné bezkontaktní měření tlaku v zemině pod pneumatikou (obrázek 20). [17]

Cílem jejich výzkumu je navrhnout, vysvětlit a stanovit způsob jakým lze hodnotit poškození půdy jejím zhutňováním vlivem těžkých vozidel, čímž se zabýval výše jmenovaný Grečenko. Výzkum analyticky a experimentálně vytvořil rozsáhlou databázi funkcí zhutnění (suchá hustota půdy jako funkce hloubky pod středem otisku modelu tlačného talíře) a vytvořil spojitost mezi zhutněním půdy tlačným talířem a reálným kolem. Zmíněný faktor CC byl tedy vyvinut pro vyčíslení rizik spojených se zhutňováním půdy, což je užitečné při rozhodování o maximálních rozměrech pneumatik pro off-road vozidla. CC se opírá o vztah mezi účinností zhutnění půdy kolem a přítlačným talířem, a je zaměřen na jeden typ půdy. Pro zajištění opakovatelnosti měření musí být půda pečlivě kontrolována včetně dodržování její dané struktury - zhutňovač v laboratoři musí hlinité půdy rovnoměrně zhutnit na požadovanou hustotu a jednotnou vlhkost. [17]

Metoda:

- naplnění nádoby 5ti cm vrstvou zeminy
- rovnoměrné zhutnění vrstvy specifickým sledem tlaků (65, 70, 80, 80, 80, 80, 50 a 97 kPa) na kritickou hodnotu ($\rho_{dl} = 1420 \text{ kg/m}^3$) pomocí tlačného talíře
- opakování kladení vrstev zeminy a zhutňování, až do úplného naplnění nádoby
- požadovaná konzistence půdy
- takto upravenou zeminu vložíme do testeru
- na zeminu se položí testovací pneumatika, zatíží se a čtyřikrát po povrchu projede
- vzniklá stopa je ekvivalentem skutečné stopy vozidla na poli

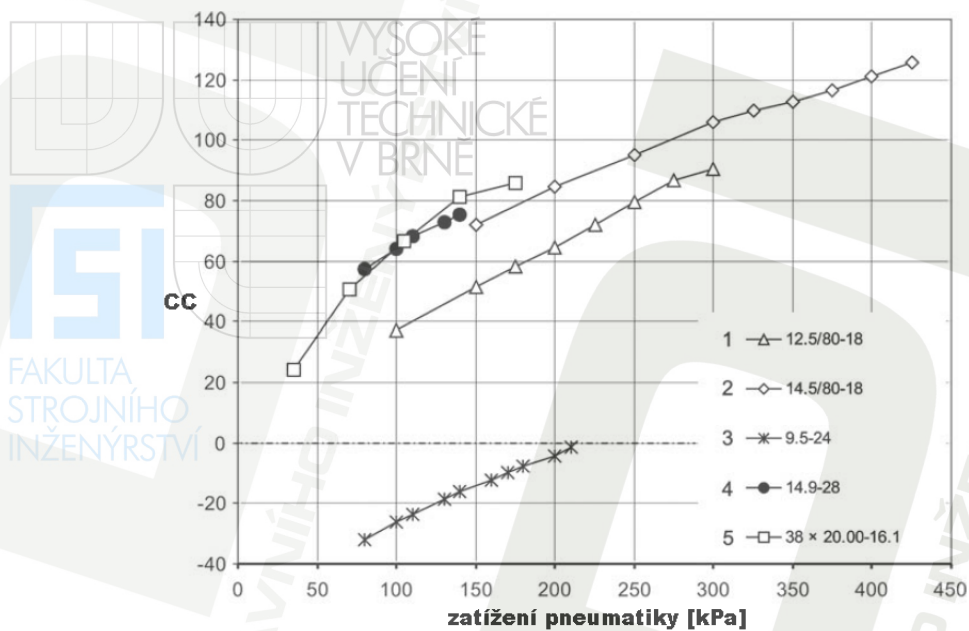
$$CC = 1000 \cdot [(\rho_{ds} / \rho_{dl}) - 1] \quad [17]$$

kde:

ρ_{ds} – suchá hmotnost - průměrná hustota ze čtyř hloubek (20, 30, 40 a 50 cm) pod povrchem pneumatikou zhutněné zeminy
 ρ_{dl} – kritická hodnota hustoty

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface



Obrázek 20 - Ukázka výstupu z měření – závislost indexu CC na zatížení 5ti druhů pneumatiky [17]

Použité pneumatiky:

12.5/80-18 – zemědělské stroje

14.5/80-18 – pneumatika na přívěsu

9.5-24 – malý traktor – nejvýhodnější hodnota CC

14.9-28 – velký traktor

38x20.00-16.1 – zemědělské stroje

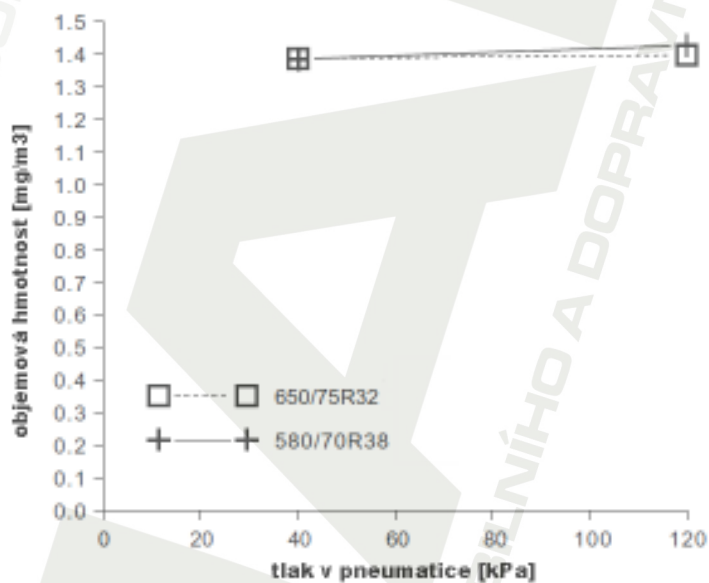


Obrázek 21 - Zkušebna - zleva: zhuťovač, PC, měř. zařízení, stav s pneumatikou a vzorkem půdy [17]

4.2.6 Vliv poměru stran pneumatiky na objemovou hmotnost půdy

V roce 2009 Thomas R. Way a jeho tým provedl měření vlivu různých rozměrů pneumatiky na zeminu. V testu byly použity pneumatiky ze zemědělského traktoru o rozměrech 580/70 R38 s poměrem výšky profilu k šířce pneu 0,756 a 650/75 R32 s poměrem 0,804, které byly zkoušeny ve dvou dynamických zatíženích a při dvou nahuštěních (tlak v pneumatice) na písčítých a jílovitých hlínách s pevným podložím. Objemová hmotnost byla měřena těsně nad podložím ve středu stopy kola i na jeho okrajích. [18]

Z testů vyplynulo, že se objemová hmotnost půdy zvyšovala s dynamickým zatížením kola při konstantním tlaku v pneumatice a se zvyšujícím tlakem při konstantním zatížení kola. Při porovnání středu a kraje stopy kola bylo zjištěno, že objemová hmotnost půdy na okraji stopy je výrazně nižší než na středu stopy. Jako výsledek z celého měření byl poznatek, že zhutňování půdy na kritickou mez s největší pravděpodobností nenastane, bude-li se pohybovat poměr výšky profilu k šířce pneumatiky v rozmezí 0,75 až 0,8. [18]



Obrázek 22 – Ukázka výstupu z měření – závislost objemové hmotnosti na tlaku v pneumatice [18]

5. Výzkumné instituce

5.1 Vybrané instituce zabývající se převážně simulacemi

5.1.1 MSC Software

Společnost byla založena před 47 lety. Za její dosavadní historii se stalo její součástí spoustu známých výzkumných center, jako např. Patran, Adams, SimDesigner atd. Centrální pobočka se nachází v Kalifornii. Celkově firma zaměstnává více než 1000 lidí ve 23 zemích po celém světě včetně České Republiky. [19]

MSC se zabývá širokým spektrem simulační problematiky: letecký a vojenský průmysl, transportní a automobilový průmysl, zemědělská technika, zdravotnictví, jaderná technika, obnovitelné zdroje energie, elektronika apod. [19]



Obrázek 23 - Budova společnosti MSC Software v Kalifornii [20]

5.1.2 TNO Automotive Industry

Nizozemská společnost TNO sídlí v městě Eindhoven. Zaměstnává přibližně 45 000 lidí. Jedná se o veliký koncern 14ti výzkumných center zabývajících se výzkumem, vývojem, testováním a výrobou. Největším z částí koncernu je právě Automotive industry, který je zaměřený na automobilový průmysl a tvoří právě 25% z celé TNO. [21]

Svoje aktivity rozděluje do těchto oblastí:

- Aktivní bezpečnost – laboratoře pro výzkum a vývoj dynamiky vozidla (např. matematické modely pneumatiky SWIFT-Tyre, MF-MCTyre)
- Pasivní bezpečnost – zkoušky airbagů, bezpečnostních pásů, crash testy,...
- Vývoj a testování motorů – benzínové, dieselové, alternativní pohony, emise
- Homologace automobilů

5.1.3 Delft University

Technická Univerzita v městě Delft v Nizozemí byla založena roku 1842 jako Královská akademie králem Villiemem II. Univerzita spolupracuje s velkým počtem vzdělávacích a výzkumných center, např. s již dříve zmíněným TNO (model pneumatiky SWIFT), v Nizozemí i dalších zemích. Škola má pověst vysoce kvalitního vzdělávacího a výzkumného centra. [22]

Univerzita se skládá z několika fakult pro studium letectví, architektury, geologie, elektrotechniky, matematiky, průmyslového designu, atd. [22]



Obrázek 24 - Budova univerzity v nizozemském městě Delft [23]

5.1.4 Engineering Dynamics Corporation

Tato soukromá americká společnost má své základy v Oregonu, město Beaverton od roku 1980. Zakladateli jsou považováni Terry D. Day a Randall L. Hargens. Firma vyvíjí a prodává simulační software do 28 zemí světa. [24]

Hlavní náplní práce institutu jsou simulace motorových vozidel, především se zaměřením na jejich bezpečnost, od softwaru pro rekonstruování havárií až po simulace dynamiky vozidla a kontaktu pneumatik (Radiální pružný model pneumatiky, Model pro simulaci sil na bočnici pneumatiky, Model pneumatiky pro simulaci měkké vozovky). [24]

5.2 Vybrané instituce zabývající se převážně reálnými testy

5.2.1 ADAC

ADAC je významná nezávislá německá společnost založená roku 1903. Je největším autoklubem v Evropě mající přes 15 miliónů členů. Zastřešuje nejrůznější aktivity spojené s motoristy od pořádání závodů (ADAC Rally Deutschland), automobilových setkání, cestovního ruchu... Její nejznámější aktivitou pro většinu motoristů jsou však testy pneumatik a jejich srozumitelné hodnocení a doporučení na nejrůznější povrchy, hodnotí spolehlivost automobilů, pořádá ekologické testy, zajišťuje servis vozidel atd.



Obrázek 25 - Hlavní budova autoklubu ADAC [25]

5.2.2 Dekra Automotive

Německá společnost s 80ti letou praxí sídlící ve Stuttgartu se zabývá bezpečností nejen v automobilovém průmyslu, ale také ve zdravotnictví, stavebnictví apod. Instituce se dělí na čtyři skupiny: DEKRA Automotive, DEKRA Automotive International, DEKRA Industrial a DEKRA Personnel. [26]

DEKRA Automotive se zabývá bezpečností v automobilovém průmyslu, a ta podobně jako dříve zmíněný ADAC pořádá např. bezpečnostní akce, testy pneumatik, hodnocení bezpečnosti vozidel atd.

V České republice se historie DEKRA Automobil píše od roku 1963 v Praze, kdy bylo na rozhodnutí ministerstva založeno „Projekčně konstrukční a vývojové pracoviště silniční a městské dopravy“. Od roku 1968 do roku 1993, kdy byla zprivatizována a hlavním akcionářem se stala DEKRA Stuttgart, je společnost známa jako ÚSMD (Ústav silniční a městské dopravy). Nyní se zaměřuje například na typové zkušebnictví, poradenství a školení pro přepravu nebezpečných nákladů či kontrola značkových autoservisů. V současnosti zaměstnává více jak 140 lidí. [27]

5.2.3 TÜV SÜD Group

TÜV SÜD je vedoucí společností v oblastech inspekce, certifikace a testování systémů, procesů, výrobků a služeb. Rozsah aktivit zahrnuje také konzultační, schvalovací, expertní činnosti a vzdělávání ve všech odvětvích průmyslu a služeb. TÜV SÜD Group byla založena v Mnichově před 140 lety. Dnes má více než 600 poboček po celém světě. [28]

TÜV SÜD Central Eastern Europe s. r. o. reprezentuje TÜV SÜD Group v regionu střední a východní Evropy. Centrála TÜV SÜD CEE se nachází v Praze. V České republice je TÜV SÜD Group zastoupena od roku 1995 společností TÜV SÜD Czech s. r. o. [28]

Počátky firmy TÜV SÜD sahají až do poloviny 19. století, kdy 6. ledna 1866 vzniklo z iniciativy výrobců parních kotlů Technické kontrolní sdružení. Cílem této iniciativy bylo chránit lidi a majetek před riziky vznikajících z nové neprobádané oblasti techniky. [28]



Obrázek 26 - Budova TÜV SÜD v Mnichově [28]

5.2.4 US Army Engineer Research and Development

Jedná se o jedno z největších výzkumných a vývojových center na světě financované americkou vládou, pro podporu strojírenství, životního prostředí a v neposlední řadě armády. Společnost byla založena roku 1999. Nyní má 4 pobočky ve městech Hanover, Champaign, Alexandria a Vicksburg. [29]

6. Závěr

Při vývoji automobilů, především jejich jízdních vlastností, je velice důležitý výzkum kontaktu pneumatiky s podložím. Pro tento úkol je podstatný přesný a reprodukovatelný výsledek každého, jak simulovaného, tak reálného testu. Ze simulovaných zkoušek bych vyzvednul především modely pneumatik FTire a SWIFT od MSC Software, které dokáží modelovat většinu jízdních situací a jsou užívány předními výrobci pneumatik (Continental Michelin). Dále jsou velice názorné modely od Engineering Dynamics Corporation (jako Radiální pružný model pneumatiky, Model pro simulaci sil na bočnici pneumatiky a Model pro simulaci měkké vozovky). Tento software dokáže na svém výstupu podat i kvalitní grafický výstup chování 3D modelu vozidla v dané jízdní situaci.

Simulace jsou významné obzvláště v rané části vývoje, kdy se odehrává nespočet testů a variant měření a reálné testy by takto byly velice nákladné a zdlouhavé. Přesto všechno jsou reálné testy nezanedbatelné pro ověřování výsledků simulací. Pro laickou veřejnost jsou asi nejznámější zkoušky pneumatik přímo na voze, které provádí například německý autoklub ADAC. Motoristé na základě výsledků z těchto testů dostávají doporučení na používání pneumatik a také například důkazy jejich vazby na ovladatelnost či cestovní spotřebu paliva. Pro zemědělství jsou důležité zkoušky vlivu pneumatiky na zhutnění půdy, které může na polích s rostlinami vést k jejich devastaci. Hodnocení odolnosti pneumatiky vůči průrazu je skutečně významné, neboť průjezd vozidla výmolem a následné eventuální poškození běhounu, kostry či boku pneumatiky často vede k nekontrolovatelnému chování automobilu a riziku zranění osob.

Dle mého názoru je velice důležité, aby se obě dvě hlavní možnosti výzkumu interakce pneumatiky s podložím, to jest simulace i reálné testy, vzájemně propojovaly. I přes stále inteligentnější software a modelování, zůstanou reálné zkoušky nezastupitelným prvkem při vývoji vozidel.

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] - KLEČKA, Radim. Ověření systému řízení jízdy automobilu metodou HIL simulací. *XXXII. Seminar ASR '2007 "Instruments and Control"*, 2007, VŠB-TUO, Ostrava, ISBN 978-80-248-1272-4
- [2] - OOSTEN, Jan: New tires modeling feature in MSC.ADAMS, MSC software, 2004
- [3] - Mechanical Dynamics, Incorporated: Using ADAMS/Tire, 2002
- [4] - OZDALYAN, B.: Development of slip kontrol anti-lock braking system model, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 9, 2008
- [5] - Aquaplaning In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 8.5.2009, 24.4.2010 [cit. 2010-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Aquaplaning>>
- [6] - http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37011
- [7] - http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37011
- [8] - <http://www.auto-ware.com/setup/fc1.htm>
- [9] - http://www.cosin.eu/prod_FTire
- [10] - DAY, Terry D.: Simulation of Tire Interaction with Curbs and Irregular Terezin, WP2005-6, 2005, Engineering Dynamics Corporation
- [11] - <http://news.autoroad.cz/nezarazeno/21709-asdf/>
- [12] - http://auto.idnes.cz/test-letnich-pneumatik-levne-spatne-brzdi-na-mokru-f83-/pneu.asp?c=A100310_190831_pneu_fdv
- [13] - <http://www.barum-pneu.cz/testy.php?test=24>
- [14] - NEVES, R.R.V; MICHELI, G.B.; ALVES, M. An experimental and numerical investigation on tyre impact. *International Journal of Impact Engineering* [online]. 2009, 685-693, [cit. 2010-05-05]
- [15] - LIU, Kin; AYERS, Paul; HOWARD, Heidi. Influence of turning radius on wheeled military vehicle. *Journal of Terramechanics* [online]. 2009, 49-55, [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <www.sciencedirect.com>
- [16] - KAWASE, Yoshiyuki; NAKASHIMA, Hiroshi; OIDA, Akira. An indoor traction measurement. *Journal of Terramechanics* [online]. 2005, 317-327, [cit. 2010-05-05]. Dostupný z WWW: <www.sciencedirect.com>

Současný stav výzkumu interakce pneumatiky s podložím

Current situation of research into interaction of tire with surface

[17] - GREČENKO, Alexandr; PRIKNER, Patrik. Progress in tire rating based on soil compaction potential. *Journal of Terramechanics* [online]. 2009, 211-216, [cit. 2010-05-08]. Dostupný z WWW: www.sciencedirect.com

[18] - WAY, Thomas R., et al. Tractor tire aspect ratio effects on soil bulk density and cone index. *Journal of Terramechanics* [online]. 2009, 27-34, [cit. 2010-05-09]. Dostupný z WWW: www.sciencedirect.com

[19] - <http://www.mssoftware.com/About-Us/Default.aspx>

[20] - <http://www.nexusd.com/property.php>

[21] - <http://www.automotive-industry.eu/nl/page/wb/automotive-industry>

[22] - <http://www.tudelft.nl>

[23] - <http://fa.its.tudelft.nl/~veraar/ewi.gif>

[24] - <http://www.edccorp.com/about.html>

[25] - <http://www.vs-furniture.com/498.0.html?&L=1&FL=10>

[26] - <http://www.dekra.com/en/dekra>

[27] - <http://www.dekra-automobil.cz/index.php?file=sidlo.php>

[28] - http://www.tuv-sud.cz/cz/o_firme

[29] - <http://www.erd.c.usace.army.mil>