

UNIVERZITA PARDUBICE
Dopravní fakulta Jana Pernera

Měření odporových sil při obtékání těles

Petr Houdek

Bakalářská práce

2009

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr HOUDEK**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Měření odporových sil při obtékání těles**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Metody měření tlaku a tlakových diferencí.
2. Metody měření rychlosti proudění.
3. Modelové měření odporových sil při obtékání těles.
4. Návrh uspořádání experimentálního zařízení.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Koreis J., Koreisová G.: Termomechanika a tepelné stroje Koreis J., Koreisová G.: Hydromechanika 1 Koreis J., Koreisová G.: Hydromechanika 2 Nožička J.: Termomechanika, Praha ČVUT, 1998, ISBN 80-01-01836-9 Pavelek M.: Termomechanika, Brno VUT, 2003 Pavelek M., Janotková.: Vizualizační a optické měřicí metody

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Gabriela Koreisová, Ph.D.

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 31. 5. 2009

Petr Houdek

Tímto bych chtěl poděkovat za zadání, odborné vedení a pomoc v průběhu zpracování práce vedoucí této bakalářské práce Ing. Gabriele Koreisové, Ph.D.

Děkuji prof. Ing. Josefu Koreisovi, CSc., Ing. Zdeňku Maškovi, Bc. Lukáši Hozákovi. za cenné připomínky a ochotnou pomoc.

Rovněž bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu, a za to, že mi umožnili studovat na této škole.

ANOTACE

Práce je věnována návrhu a realizaci experimentálního zařízení pro měření silových účinků vyvolaných působením prouděním vzduchu v okolí zmenšeného modelu automobilu. Pro účely této práce byla zkonstruována aparatura pro měření odporových sil rovnoběžných se směrem toku proudu vzduchu a pro měření sil působících ve svislém směru. Dále je řešena problematika předpovídání silových účinků na skutečný automobil Ferrari F 40 pomocí teorie modelování na základě geometrické a fyzikální podobnosti modelu se skutečným automobilem za použití dat získaných z měření na modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

proudění vzduchu, aerodynamický tunel, měření na modelu, Ferrari F40

TITLE

Metering drag force at circumfluence object

ABSTRACT

This work is dedicated to the design and implementation of experimental device for the measuring of force effects caused by flow of air around a scaled-down car model. An apparatus for the measurement of resistance forces has been designed for the purposes of this work; forces parallel to the direction of flow of air and vertical forces were measured. This work also deals with forecasting of effects of forces acting on real Ferrari F 40, by using the theory of modeling based on geometric and physical similarity of model with the real car; for this, data obtained from measurements on the model are used.

KEYWORDS

flow of air, air tunnel, measurement on model, Ferrari F40

OBSAH

ÚVOD	8
Teoretická část	9
1 Měření tlaku a tlakových diferencí	9
1.1 Definice tlaku	9
1.2 Zařízení pro měření tlaku	9
1.2.1 Deformační tlakoměry	9
1.2.2 Elektrické tlakoměry	11
2 Měření rychlosti proudění vzduchu	12
2.1 Pitotova trubice	12
2.2 Anemometry	13
3. Rozměrová analýza	15
Experimentální část	19
4. Experimentální zařízení	19
4.1 Důvod rozvoje	19
4.2 Uspořádání experimentálního zařízení	20
4.3 Zařízení pro měření vodorovné síly	23
4.4 Zařízení pro měření svislých reakcí	24
5 Modelové měření	26
5.1 Měření vodorovné odporové síly	26
5.1.1 Výpočet tvarového koeficientu C_x	27
5.1.2 Vyhodnocení výsledků	29
5.1.3 Předpověď silových účinků na skutečný automobil	30
5.2 Měření svislých reakcí	30
5.2.1 Měření zatížení plošin bez účinků modelu	30
5.2.2 Zatížení s křídlem o úhlu náklonu 0°	32
5.2.3 Zatížení za použití křídla s úhlem náklonu 20°	33
5.2.4 Zatížení za použití křídla s úhlem náklonu 38°	34
5.2.5 Vyhodnocení výsledků	35
ZÁVĚR	37
POUŽITÁ LITERATURA	38

ÚVOD

Potřeba vývoje vědy související s účinky hmotného tekutého prostředí na tělesa sahá do dávné historie, do dob kdy lidé začínali uvažovat nad možností létání. Ovšem významnější rozvoj nastává s rozvojem techniky a to zejména letectví, kosmonautiky, automobilového průmyslu a v neposlední řadě stavebnictví, profesionálního sportu, textilního průmyslu atd. Obecně v oborech, kde dochází k více či méně významné interakci objektu s hmotným tekutým prostředím. Z důvodu neznalosti chování objektů v plynném prostředí plyne mnoho negativních důsledků. Počínaje borcením stavebních konstrukcí, konče vysokými energetickými ztrátami při pohybu těles po zemi či ve vzduchu. Dříve bezvýznamné a pomíjené problémy se stávají s rozvojem velmi významné a dostávají se do hledí vývojových center producentů těchto produktů.

K zjišťování účinků prostředí na tělesa se užívá celá řada metod a prostředků. Vyznaným prostředkem je aerodynamický tunel. Zařízení schopné vyvinout pohyb vzduchu v uzavřeném prostoru působící na dané těleso. Účinky na těleso vyvolané tímto proudem v tunelu značně ulehčují zkoumání. První aerodynamický tunel na světě vynalezl a postavil roku 1871 člen Britské aeronautické společnosti Francis Herbert Wenham. Následovalo množství objevů v oblasti aerodynamiky. Prvním letadlem stavěným a testovaným za pomoci testů v aerodynamickém tunelu byl parní letoun Flugan švédského vynálezce Carla Rickarda Nyberga. Pracoval na něm od roku roku 1897, ale nikdy skutečně nevzlétl. První nadzvukový aerodynamický tunel postavili konstruktéři nacistického Německa roku 1938 v Pennemünde. Byl určený k testování „záračných zbraní“ třetí říše. Vzduch v něm dosahoval až dvou a půl násobné rychlosti zvuku.^[5]

Teoretická část

1 Měření tlaku a tlakových diferencí

1.1 Definice tlaku^[1]

Tlak je definován vztahem: $p = \frac{dF}{dA}$ (1) kde je p [Pa] tlak, F [N] síla, A [m²] plocha.

Rozlišuje se absolutní tlak, jenž je vztažen k absolutnímu vakuu a tlak diferenční vztažený k jiné rozdílné hodnotě tlaku. Rozlišujeme různá zařízení k měření tlaku dle podmínek použití. Absolutní tlak nízkých hodnot (menší než atmosférický) měříme vakuometry, barometry tlak blížící se hodnotám atmosférického tlaku, manometry tlak vyšší než atmosférický a diferenční tlak pak diferenčními tlakoměry. Jednotkou tlaku dle soustavy SI je jeden pascal. Tato jednotka je odvozená a její hodnota je dána silou jednoho newtonu působící na plochu jednoho čtverečního metru. Též se používají jednotky jiné než soustavy SI. Například 1 bar = 10⁵ Pa, 1 atmosféra (fyzikální) = 1,01325x10⁵ Pa, 1 atmosféra (technická) = 0,980665x10⁵ Pa.

1.2 Zařízení pro měření tlaku^[2]

1.2.1 Deformační tlakoměry

Hlavní prvek deformačních tlakoměru je pružný člen pracující v oblasti Hookova zákona. Jako pružné členy se používají dutě zakřivené trubice, membrány, vlnovce a deformační krabice. Všechny deformační prvky vykazují při působení tlaku poměrně velké přestavné síly, ale poměrně malé deformační změny. Klasické deformační tlakoměry potřebují pro zvětšení citlivosti mechanické zesilovače, jako je např. táhlo s ozubeným segmentem a s pastorkem.

Trubicové tlakoměry

Trubicové manometry jsou nejrozšířenější provozní manometry, Jejich deformačním členem je dutá trubice s uzavřeným koncem, jehož posun je mírou tlaku přiváděného do vnitřku trubice. Trubice může být zahnutá do kruhového oblouku, nebo stočená do válcové nebo ploché spirály. Manometry s trubicí zahnutou do oblouku se středovým úhlem 270 ° se nazývají Bourdonovy manometry. Stoupne-li tlak v trubicí, pak se zvětší síla, působící na plochu trubice na vnějším poloměru zakřivení oproti síle, působící na poloměru vnitřním, což způsobí změnu průřezu trubice a její úměrné napřímení. Rozsah trubicových manometrů

závisí na rozměrech a materiálu trubice a je udán řadou $1,0; 1,8; 2,0; 4,0; 6,0 \times 10^n$, kde $n = 0, 1, 2, 3$ pro jednotky tlaku Pa, kPa a MPa až do rozsahu řádu $0 - 2 \times 10^3$ MPa.

Membránové manometry

Deformačním prvkem membránových manometrů je pružná membrána upjatá po obvodu k pouzdru manometru. Na jednu její stranu působí tlak, případně na obě její strany diferenční tlak, což způsobuje její průhyb ve směru většího tlaku. Tento průhyb je velmi malý (nesmí docházet k trvalým deformacím membrány), a proto má každý membránový manometr zesilovací převod na ukazovatele. Membrány jsou kovové nebo z umělé hmoty. Membrány z umělé hmoty mají vyztužený střed kovovým talířem a jsou doplněny pružinou, protože nemají vlastní tuhost. Z důvodu linearizace závislosti průhybu na přetlaku jsou v membránách vylisované soustředné drážky a v tlakovém prostoru u kovových membrán je vložena pružina. Výhodou membránových manometrů je jejich malá setrvačnost a menší citlivost na otřesy a mírné rázy a dále použitelnost pro měření tlaku suspenzí, protože oproti trubicovému manometru je možno membránový manometr snadněji vypláchnout. Rozsah membránových manometrů je možno volit z již uvedené řady rozsahů u trubicových manometrů, a to od $0 - 2,5$ kPa do maximálně $0 - 2,5$ MPa přetlaku.

Vlnovcové manometry

Deformačním členem vlnovcových manometrů je vlnovec - uzavřená tenkostěnná bezešvá trubka s vyválnovanými příčnými vlnkami. Účinkem tlaku přiváděného do jeho vnitřku se vlnovec úměrně protáhne. Pro měření tlakové difference se přivádí rozdílný tlak do vnitřku vlnovce i do uzavřeného prostoru vně vlnovce. Vlnovce se vyrábějí z beryliové bronzi, tombaku nebo oceli. Materiál se volí podle použitého rozsahu tlaku, který je možno vybrat z již uvedené řady rozsahů $0 - 1$ kPa až do $0 - 40$ kPa. Kvůli lepší linearitě tlakové stupnice bývá uvnitř vlnovce zabudovaná pružina. Velmi rozšířené jsou diferenční manometry nazývané Bartonova cela, které se používají na měření tlakové difference vznikající na škrticích orgánech průřezových průtokoměrů. Je to v podstatě systém dvou vlnovců spojených táhlem a vyplněných kapalinou. Přestavení táhla je mírou působící tlakové difference a přenáší se torzní trubkou na ukazovatele. Proti přetažení chrání vlnovec pružina v minusové komoře manometru. Při měření pulzujících tlaků je možno zavést tlumení jejich amplitudy přiškrcením obtoku. Ve vlnovci v plusové komoře je přepážka s otvory, která umožňuje kompenzaci objemových změn kapaliny způsobených změnou teploty. Torzní trubky se často používá podobně jako deformačních členů k vyvedení pohybu z tlakového prostoru. Je to tenkostěnná kovová

trubice na jednom konci upevněná, na druhém konci uzavřená, Působením tečné síly na obvodu dna se trubice kroutí ve směru síly, tato deformace se převádí na pohyb tyčinky upevněné ke dnu trubice.

Krabicové tlakoměry

Krabicové tlakoměry se používají pro měření malých přetlaků, podtlaků či tlakových diferencí. Měřicím prvkem je krabice tvořená dvěma zvlněnými membránami o průměru 50 až 100 mm. Deformace se přenáší pákovým převodem na ukazovatel.

1.2.2 Elektrické tlakoměry

Princip elektrických tlakoměrů spočívá v transformování mechanické deformace na elektrický signál. Jako snímací zařízení se používají diferenciální kondenzátory, indukční snímače, piezoelektrické snímače a tenzometrické snímače.

Kapacitní manometr

Kapacitní manometr pracuje na principu diferenciálního kondensátoru. V kapacitním snímači tlakové difference jsou změny tlaku přenášeny přes oddělovací membrány na membránu měřicí, která je uložena uprostřed tzv. tlakové komory. Po obou stranách měřicí komory jsou umístěny desky kondensátoru, které spolu s kovovou měřicí membránou tvoří diferenční kondensátor. Dielektrikem a zároveň pomocnou oddělovací kapalinou je silikonový olej. Tento kapacitní snímač umožňuje měření tlakové difference, tlaku, hladiny a průtoku s přesností 0,25 %. Rozsahy tlaku jsou 0 - 1,5 kPa až 0 - 150 kPa, povolená teplota snímače v rozmezí -40°C až +110°C.

Indukční manometr

Indukční manometr je v podstatě deformační manometr (podobně jako kapacitní) s membránou nebo vlnovcem uzpůsobeným pro měření přetlaku nebo tlakové difference. Deformace jsou zde snímány indukčním snímačem.

Piezelektrický manometr

Piezelektrickými manometry je možno měřit tlaky do 100 MPa i výše, vhodné jsou však především pro měření dynamických tlaků. Piezelektrické snímače se zhotovují z malého počtu krystalových výbrusů, obvykle z přirozeného nebo syntetického křemene. Tlak je přiváděn na kovovou membránu jejíž deformace se přenášejí prostřednictvím kovových destiček na dva piezoelementy uspořádané paralelně, takže se jejich náboje sčítají. Izolované elektrické vývody vedou na elektronický zesilovač.

Tenzometrické manometry

Současné tenzometrické snímače tlaku je možno rozdělit do několika skupin podle provedení jejich čidel. Snímače s kovovými tenzometrickými prvky zhotovenými z kovových vláken o průměru od 20 do 30 μm nebo z kovové fólie o tloušťce od 2 do 10 μm. Tyto prvky se obvykle lepí na deformační člen tlakoměru. Snímače s polovodičovými prvky - křemíkovými destičkami o tloušťce 10 - 20 μm, které se také nalepují na deformační člen. Snímače s kovovými nebo polovodičovými prvky spojenými bezprostředně při výrobě s deformačním členem. Snímače s kovovým prvkem napařeným na deformační části. Takový tenzometrický prvek obsahuje izolační, odporovou a kontaktní vrstvu, nebo se jedná o polovodičový prvek vytvořený na křemíkovém substrátu. Snímače s kovovým nebo polovodičovým prvkem v takovém provedení, že tvoří kompaktní celek s deformační částí i měřicím obvodem - Wheatstoneovým můstkem.

2 Měření rychlosti proudění vzduchu^[3]

2.1 Pitotova trubice

Pitotova trubice je jednoduchou sondou měřící rychlost proudění tekutiny. Tato sonda využívá závislosti dynamického tlaku proudící tekutiny na rychlosti proudění. Její konstrukce sestává z trubice zahnuté do pravého úhlu, přičemž rovina vtoku trubice je postavena kolmo na osu proudění tekutiny. U vtoku je rychlost proudění prakticky nulová a veškerá kinetická energie pohybující se tekutiny se pomocí této zahnuté trubice změní na energii potenciální. Sonda tak registruje celkový tlak p_c , který je dán součtem statického tlaku p_s a dynamického tlaku p_d . Statický tlak je tlak vyvozený tekutinou a můžeme si ho představit jako tlak za relativního klidu. Je důsledkem tíhového zrychlení působícího na hmotu tekutiny. U kapalin mluvíme o tlaku hydrostatickém. Vzhledem k zanedbatelné stlačitelnosti kapalin je tento tlak dán rovnicí (2)

$$p_s = h \cdot \rho \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

kde ρ [kg/m^3] je hustota kapaliny, h [m] je svislá výška sloupce kapaliny nad daným místem, g je hodnota zrychlení od účinků gravitačního pole jenž můžeme u povrchu země v daném místě považovat za homogenní a s dostačující přesností za něho dosazovat hodnotu 9,81 [m/s^2]. Tento vztah ovšem nemůžeme použít pro výpočet statického tlaku u plynů jelikož podléhají stlačování se zvyšující se výškou. Proto pro výpočet aerostatického tlaku používáme barometrickou rovnici (3).

$$p_s = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 g h}{p_0}} \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Kde p_s [Pa] je statický tlak v dané výšce, p_0 [Pa] je tlak při mořské hladině ($h=0$), ρ_0 [kg/m^3] je hustota vzduchu pro $h=0$ a konečně h [m] označuje nadmořskou výšku. Pro výpočet hustoty v určité nadmořské výšce slouží podobná rovnice (4).

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 g h}{p_0}} \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

Kde ρ je hledaná hustota v dané výšce h .

Rychlost proudícího vzduchu je potom dána vztahem (5).

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

Doporučená minimální měřitelná hodnota měření dynamického tlaku v plynném prostředí je udávána 6 m/s.

2.2 Anemometry

Miskové anemometry

Princip miskového anemometru byl objeven již v polovině 19. století. Konstrukce se skládá z několika misek tvaru dutých polokoulí nasazených na tři nebo čtyř ramenném kříži otáčejícího se kolem svislé osy. Tato svislá osa okolo které se otáčí misky prochází středem kříže. Snímací zařízení potom registruje otáčky osy, z nichž vypočítá rychlost větru. Misky

jsou umístěny souměrně na koncích ramen kříže. Vítr se na jedné straně kříže opírá do dutiny polokoule, zatím co na straně druhé je proti větru postavena druhá polokoule svou vypouklou stranou, na kterou působí tlak větru menší silou což je dáno právě geometrií misek. Rozdíl působících sil vytváří rotaci kříže. Velkou předností tohoto anemometru je jeho jednoduchost a necitlivost na směr vanoucího větru. Bohužel, pracuje-li bez záznamového zařízení, registruje pouze průměrnou rychlost větru za určitý čas, zatím co silný, ale krátký závan nebude zaznamenán.

Vrtulové anemometry

Jiným provedením mechanického rychlostního anemometru je systém využívající klasickou vrtuli. Zatím co u Robinsonova anemometru je osa otáčení kříže svislá, je u vrtulových anemometrů osa rotace rovnoběžná se směrem větru - vodorovná. Protože se však směr větru mění, musí osa vrtule sledovat jeho změny. Spojením vrtule anemometru a větrné korouhve lze obojí účelně zkombinovat. Směrovka bude jednak udržovat vrtuli stále otočenou proti větru a současně bude ukazovat jeho směr. V případech, kde je směr proudění předem známý (např. ve větracích šachtách) lze i s pevně instalovanou vrtulí anemometru získat uspokojivé výsledky.

Akustické Anemometry

Akustické anemometry využívají principu šíření zvukových vln v atmosféře. Rychlost šíření je ovlivňována směrem a rychlostí proudění vzduchu.

Termoanemometry

Termoanemometry jsou založeny na závislosti výměny tepla mezi zdrojem a okolním proudícím vzduchem. Princip spočívá v měření ochlazování drátku nebo termistoru. Drátek nebo termistor jsou žhaveny elektrickým proudem známé hodnoty na konstantní hodnotu. Proudící vzduch drátek ochlazuje a pro udržení stálé teploty je třeba zvyšovat žhavicí proud. Změna proudu je pak úměrná rychlosti proudění. Prakticky je drátek zapojen do jedné větve odporového můstku. V úhlopříčce můstku je zapojen regulátor, který je nastavuje napájecí proud tak, aby můstek byl vyvážen. Z velikosti napájecího proudu lze pak určit rychlost proudění.

Na mírně odlišném principu pracují kalorimetrické snímače. Snímač se zároveň ale nepoužívá jako zdroj tepla a snímač v jednom. K měření jsou použity dva teplotní snímače a jedno topné tělísko. Jeden snímač měří aktuální teplotu proudícího vzduchu, druhý je vyhříván topným

tělískem na konstantní teplotní rozdíl vůči prvnímu. Čím vyšší je rychlost proudění vzduchu, tím více tepla je odváděno a tím více je ochlazován druhý teplotní snímač. Aby se udržel konstantní teplotní rozdíl, musí adekvátně vzrůst vyhřívací proud topného tělíška. Velikost vyhřívacího proudu je digitalizována a přiváděna na vstup vyhodnocovací jednotky. V případě použití v aerodynamickém tunelu se zde může jeho průběh dále upravovat na základě známých rozměrů tunelu a vypočte se aktuální rychlost proudícího vzduchu. Kompaktní kalorimetrické senzory jsou schopny měřit rychlost proudění v rozsahu 1m/s až 30 m/s.

3. Rozměrová analýza^[6]

Při jízdě působí na automobil síly, které jsou způsobeny prouděním vzduchu kolem karoserie, a které tedy závisí na tvaru karoserie. Celkovou sílu můžeme rozdělit na tři na sebe navzájem kolmé složky. Složka F_x^* rovnoběžná se směrem jízdy má velikost danou známým vztahem

$$F_x^* = \frac{1}{2} C_x^* S^* \rho_{vz}^* v^{*2} \quad (6)$$

kde C_x^* je tvarový koeficient, S^* je čelní plocha automobilu, ρ_{vz}^* je hustota vzduchu a v^* je rychlost jízdy automobilu, popř. rychlost proudění vzduchu kolem automobilu v aerodynamickém tunelu. Pro ověření tohoto vztahu bychom museli provádět měření na automobilu v aerodynamickém tunelu, což je velice nákladné. Možností, jak se těmto vysokým nákladům vyhnout, je vyrobit zmenšenou verzi automobilu a měření provádět na ní - původní, nezmenšený automobil pak označujeme jako *dílo* a zmenšenou verzi označujeme jako *model*. Pro model pak platí rovnice

$$F_x = \frac{1}{2} C_x S \rho_{vz} v^2 \quad (7)$$

kde význam jednotlivých symbolů je obdobný jako v předchozím vzorci, ovšem tentokrát jde o veličiny platné pro model. Už při prvním pohledu je jasné, že při stejné rychlosti proudění vzduchu naměříme na zmenšeném modelu jinou působící sílu, než na díle.

Vztahy mezi veličinami na modelu a na díle popisuje teorie podobnosti. Tato teorie určuje podmínky, které je potřeba splnit, aby bylo možné přenášet data získaná na modelu na dílo. Podmínky pro aplikování teorie podobnosti jsou

1. geometická podobnost díla a modelu
2. na modelu i na dílu probíhající děje musí být téže fyzikální povahy
3. jednotlivé veličiny si musí být na dílu i na modelu v každém okamžiku úměrné a pro každou veličinu musí mít na všech místech konstanta úměrnosti stejnou hodnotu
4. v bezrozměrném tvaru vyjádřené okrajové podmínky musí být stejné pro dílo i pro model

Podmínka *geometrické podobnosti* díla a modelu je splněna tehdy, pokud je model přesnou zmenšenou kopií díla. Pak pokud pro libovolný rozměr na díle l^* a jemu odpovídající rozměr na modelu l musí platit

$$\frac{l^*}{l} = \lambda \quad (8)$$

kde λ je měřítko délek a platí pro všechny rozměry měřitelné na díle a modelu. Měřítka délek určuje, kolikrát je dílo větší než model. Pro libovolnou plochu, např. pro čelní plochu díla, platí

$$S^* = b.l^{*2} \quad (9)$$

a obdobně pro libovolný objem platí

$$V^* = c.l^{*3} \quad (10)$$

kde b a c jsou konstanty popisující geometrii daného objektu. Z posledních tří vztahů můžeme odvodit vztahy pro měřítka ploch a objemů

$$\frac{S^*}{S} = \frac{\text{konst}.l^{*2}}{\text{konst}.l^2} = \frac{l^{*2}}{l^2} = \lambda^2; \quad \frac{V^*}{V} = \lambda^3 \quad (11, 12)$$

Podmínka, aby na díle i na modelu probíhaly děje stejné fyzikální povahy, je v našem případě modelu v aerodynamickém tunelu zjevně splněna. Z podmínky vzájemné úměrnosti veličin na modelu a na díle pak můžeme odvodit převodní vztahy, pomocí nichž se dá vyčíslit hodnota veličiny na díle pomocí známé veličiny na modelu. Pro následující úpravy definujeme dvě konstanty úměrnosti τ a φ ,

$$\frac{t^*}{t} = \tau, \quad \frac{F^*}{F} = \varphi \quad (13, 14)$$

kde t^* a t jsou určité časy měřené na díle a na modelu; tyto rovnice musí platit pro libovolné časy i síly měřené na odpovídajících si místech na modelu a na dílu. Pro rychlost na díle pak můžeme psát

$$v^* = \frac{dl^*}{dt^*} = \frac{\lambda}{\tau} \frac{dl}{dt} = \frac{\lambda}{\tau} v \quad (15)$$

Zrychlení na díle a^* obdobně vyjádříme pomocí zrychlení na modelu a

$$a^* = \frac{d}{dt^*} \left(\frac{dl^*}{dt^*} \right) = \frac{\lambda}{\tau^2} \frac{d}{dt} \left(\frac{dl}{dt} \right) = \frac{\lambda}{\tau^2} a \quad (16)$$

S použitím definičního vztahu pro sílu $F = m.a$ dále můžeme psát

$$\varphi = \frac{F^*}{F} = \frac{m^* . a^*}{m . a} = \frac{V^* . \rho^* . a^*}{V . \rho . a} = \frac{\rho^*}{\rho} \lambda^3 . \frac{\lambda}{\tau^2} = \frac{\rho^*}{\rho} \frac{\lambda^4}{\tau^2} \quad (17)$$

kde ρ^* je hustota měřená na díle, ρ je hustota měřená na modelu. Protože dále předpokládáme, že na hodnoty sil v našem případě bude mít vliv i tíže, musíme psát pro konstantu úměrnosti φ ještě jeden vztah, a sice

$$\varphi = \frac{F^*}{F} = \frac{m^* . g^*}{m . g} = \frac{V^* . \rho^* . g^*}{V . \rho . g} = \frac{\rho^*}{\rho} \lambda^3 . \frac{g^*}{g} \quad (18)$$

kde g^* a g jsou gravitační zrychlení na díle a na modelu. Při porovnání posledních dvou výrazů dostaneme

$$\frac{\rho^*}{\rho} . \frac{\lambda^4}{\tau^2} = \frac{\rho^*}{\rho} \lambda^3 . \frac{g^*}{g} \quad (19)$$

a za předpokladu, že gravitační zrychlení bude v případě modelu i díla totožné, dostáváme vztah

$$\lambda = \tau^2 \quad (20)$$

Pokud nyní opustíme obecnou rovinu a budeme se soustředit pouze na síly F_x^* a F_x , můžeme psát

$$\varphi = \frac{F_x^*}{F_x} = \frac{0,5 C_x^* S^* \rho_{vz}^* v^{*2}}{0,5 C_x S \rho_{vz} v^2} = \frac{C_x^* \rho_{vz}^*}{C_x \rho_{vz}} \frac{\lambda^4}{\tau^2} = \frac{C_x^* \rho_{vz}^*}{C_x \rho_{vz}} \lambda^3 \quad (21)$$

Pokud budeme předpokládat rovnost hustoty vzduchu i koeficientu čelního odporu v případě díla i modelu, pak koeficient úměrnosti má hodnotu

$$\varphi = \frac{F_x^*}{F_x} = \lambda^3 \quad (22)$$

a pro sílu na díle můžeme tedy psát

$$F_x^* = \varphi F_x = \lambda^3 F_x = \left(\frac{l^*}{l}\right)^3 F_x \quad (23)$$

Pro úplnost uvedeme i vztah pro přímý výpočet v^* , tedy

$$v^* = \frac{\lambda}{\tau} v = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} v = \sqrt{\lambda} v \quad (24)$$

Pokud tedy máme k dispozici model, který je desetkrát menší než dílo, pak $\lambda = 10$. Aby měření, která provedeme na modelu, platila na díle pro rychlosti do 140 km/h, musíme na modelu měřit síly pro rychlosti do hodnoty

$$v = \frac{v^*}{\sqrt{\lambda}} = \frac{140}{\sqrt{10}} \approx 44 \text{ km/h} \quad (25)$$

Pokud bychom na modelu pro rychlost 44 km/h naměřili hodnotu $F_x = 20 \text{ N}$, pak pro dílo bude pro rychlost 140 km/h odpovídající síla

$$F_x^* = 10^3 \cdot 20 = 20 \text{ kN} \quad (26)$$

Experimentální část

4. Experimentální zařízení

4.1 Důvod rozvoje

Uspořádání zařízení a použité prvky musí plnit funkci snímání účinků ovlivňujících podstatným způsobem jízdní vlastnosti vozidla. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny zejména vodorovnou odporovou složkou síly a svislými reakcemi, jenž jsou přenášeny koly do vozovky. V klidném a bezvětrném prostředí vždy působí vodorovná složka síly právě proti pohybu automobilu. V případě, kdy bychom uvažovali vliv větru může dojít k nepříznivé příčné reakci a případně i k urychlování automobilu v případě, že vektor pohybu větru je orientován ve směru pohybu vozidla. U svislých složek sílových účinků vyvozených interakcí s prostředím není zdaleka tak jednoduchá a jednoznačná identifikace směru a velikosti působení. S měnící se rychlostí se mění i charakteristika vytvářených turbulencí a proudnic v prostoru kolem vozidla. Tyto charakteristiky ovšem není jednoduché zmapovat teoretickou cestou. Zásadní vliv na jejich průběh má tvar karoserie a charakter okolního prostředí, do kterého vozidlo vstupuje. Okolní prostředí těžko ovlivníme, ale u karoserie tato možnost je. Z tohoto důvodu se v automobilovém průmyslu vkládají značné prostředky do vyvíjení experimentálních zařízení pro zkoumání těchto charakteristik. Na obrázku 1 je vzduchový tunel automobilky General Motors schopný vyvinout rychlost proudu až 250 kilometrů za hodinu.



Obr.1 Vzduchový tunel automobilky General Motors^[4]

Zařízení se budují v různých velikostech pro zkoumání automobilů o skutečné velikosti, ale i pro modely zmenšené v určitém měřítku podle skutečného vozidla z důvodů ekonomických. Vývoj i realizace takových zařízení je velice nákladná záležitost. V těchto zařízeních poté dochází k testování vozidel a optimalizaci jejich karosérie ve stádiu návrhu, ale i v průběhu provozu. U vozidel již uvedených do provozu se mohou projevit nedostatky neodhalené ve vývoji a optimalizace pro bezpečný provoz je nevyhnutelná. V praxi se můžeme setkat s návrhy vozidel, které při vyšších rychlostech vlivem vznikajícího vztlaku ztrácejí stabilitu. Použitím vhodných přítlačných křídel může dojít k omezení účinků vztlaku a vytvoření přítlaku o potřebné velikosti k udržení stability. Velikost tohoto přítlaku lze nejlépe sledovat právě v experimentálních zařízeních k tomuto účelu vytvořeným. Snímáním průběhu přítlaku či vztlaku za různých rychlostí vytvořeného proudu vzduchu lze vysledovat kritické hodnoty vztlakových účinků a lze odzkoušet různé varianty doplňkových prvků pro vhodnou úpravu tak, aby nedocházelo ani ke vztlaku a ani k příliš velkému přítlaku. Velký přítlak je nežádoucí z hlediska zvyšování valivého odporu, ale i z hlediska zvyšování vodorovné odporové síly a tím i spotřeby pohonných hmot automobilu. Protože použijeme-li prvek pro zvýšení přítlaku, nevyhneme se zároveň zvýšení vodorovného odporu. Určení silových poměrů je nejdůležitější, ale nikoliv jediný úkol. Se zvyšujícími nároky na komfort se zkoumají i účinky vedlejší jako vliv obtékání na tvorbu hluku, znečišťování karosérie, víření vzduchu za vozidlem, v neposlední řadě i intenzita chlazení zahříváných prostor taktéž úzce souvisí s prouděním vzduchu.

4.2 Uspořádání experimentálního zařízení

Pro měření je použita stávající vzduchová trať o délce 12 metrů v prostorách laboratoří Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice. Trať je tvořena plechovým tělesem o čtvercovém průřezu vnějších rozměrů 250 x 250 mm rozšiřujícím se před průzorem na rozměry 300 x 300 mm. Do tratě je vháněn vzduch radiálním větrákem se škrťací klapkou umožňující změnu polohy pro změnu rychlosti proudění. Na obrázku 2 je zobrazení větráku a klapky.



Obr.2 Radiální větrák s klapkou

Větrák je poháněn asynchronním motorem o výkonu 22 kilowatt. Ústí tratě je vyvedeno z laboratoře do venkovních prostor. Do tratě bude nově instalováno zařízení pro měření vodorovných a svislých reakcí na modelu vozidla vyvozených pohybem prostředí. Na obrázku 3 je vzduchová trať.



Obr.3 Vzduchová trať

Měření proběhne na modelu Ferrari F40 zmenšeném v měřítku 1:10,55. Vnější rozměry modelu jsou 420 x 170 x 105 mm. Model je zobrazen na obrázku 4.



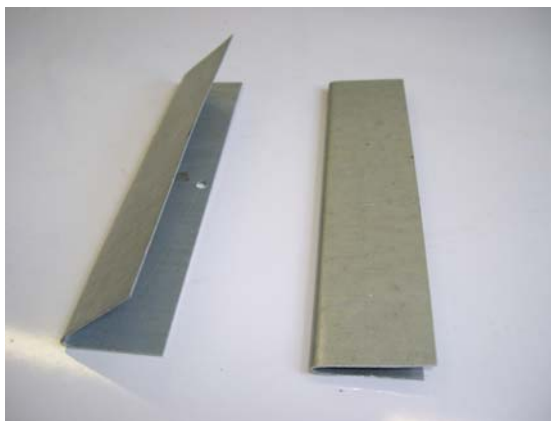
Obr.4 Model Ferrari F40

Účinky na model budou měřeny za použití dvou přitlačných křídel připevněných na původní zadní přitlačné křídlo modelu. Na obrázku 5 je zobrazeno křídlo připevněné k modelu.



Obr.5 Uchycení křídla

Původní křídlo modelu zaujímá rovnoběžný směr s rovinou vozovky. Další dvě křídla budou nastavena pod odchylkou od směru rovnoběžného s vozovkou o úhly 20° a 38° . Podoba křídel je zobrazena na obrázku 6.



Obr.6 Přítlačná křídla

4.3 Zařízení pro měření vodorovné síly

Měření vodorovné odporové síly je realizováno za použití digitální váhy. Na váhu je umístěno závaží svou hmotou násobně převyšující vodorovný silový účinek od reakce automobilu. Tento účinek je prostřednictvím odlehčování závaží odečítán v reálném čase z ukazatele vah. Silový účinek od použitého modelu vozidla je veden tenkým vláknem uchyceným ve středu vozidla ve výšce nárazníku. Vláknem ve vodorovné poloze je přes kladku vedeno do polohy svislé pod těleso tunelu. Na obrázku 7 je znázorněna kladka v tunelu.

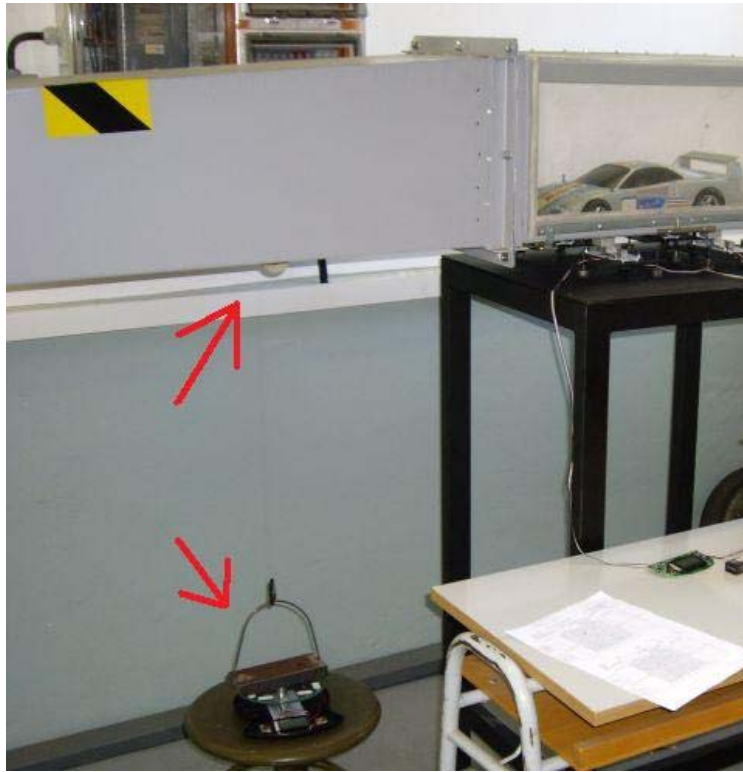


Obr.7 Kladka v tunelu

Pod tělesem tunelu je připevněno k závaží položenému přes střed plošiny váhy. Jako vlákno je použit rybářský vlasec.

Váha pracuje na principu deformace kovového členu, na němž jsou přilepeny tenzometry. Minimální rozlišení váhy je jeden gram a maximální zatížení pět kilogramů. Dle

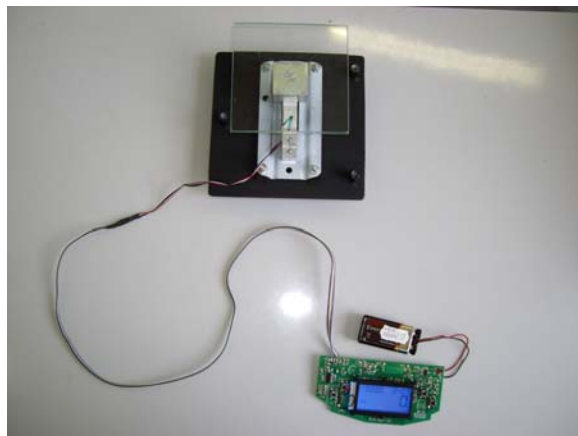
předpokladů by měli být tyto parametry postačující. Na obrázku 8 je znázorněno vyvedení vlákna z tratě přes kladku a připevnění k závaží položenému na váhu.



Obr.8 Vyvedení vlákna z tratě

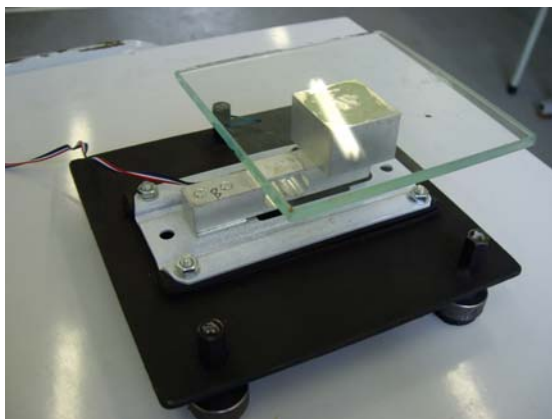
4.4 Zařízení pro měření svislých reakcí

Návrh a realizace zařízení pro měření svislých reakcí je podstatně složitější než zařízení pro měření vodorovné složky účinku na vozidlo. Po mnoha návrzích byla vybrána následující varianta. Pod každé kolo bude umístěna plošina zalicovaná s podlahou tunelu. Na obrázku 9 je zobrazena měřicí jednotka s vyvedením displeje.



Obr.9 Měřicí jednotka s displejem

Skleněná plošina bude uchycena na měřící element schopný vyhodnocovat zatížení vyvozuující kolem stojícím na plošině. Měřící element je deformační člen s nalepenými tenzometry a s vyhodnocovací jednotkou. Toto měřící zařízení bylo součástí digitálních vah, z nichž bylo demontováno a umístěno na ocelové podložky s trojicí stavěcích šroubů. Na obrázku 10 je detail měřící podložky.



Obr. 10 Detail měřící podložky

Účel šroubů je vyrovnání plošin do vodorovné polohy a zalícování s podlahou tunelu. Na obrázku 11 jsou znázorněny čtyři plošiny zalícované s podlahou tunelu.



Obr. 11 Plošiny pro odečítání svislého zatížení

Plošné spoje s displeji a ovládáním jednotlivých snímačů pod koly jsou vyvedeny před těleso tunelu tak, aby bylo možné odečítat zatížení v reálném čase. Kontakty vedoucí od tenzometrů k ukazatelům byly příliš krátké pro vyvedení, proto došlo k jejich prodloužení. K vyloučení chyby způsobené změnou napětí ve vodiči byly odměřeny hmotnosti různých závaží před i po prodloužení vodiče. Nebyly pozorovány změny. Mezi měřící plošinou a okraji otvoru

v podlaze tunelu je vytvořena milimetrová spára v jejímž důsledku není pevné spojení mezi plošinou a podlahou. Tato spára zajišťuje nezkreslování zatížení ke kterému by mohlo dojít v případě fyzického kontaktu plošiny s podlahou. Na obrázku 12 je zobrazeno vyvedení displejů.



Obr. 12 Vyvedení displejů před tunel

Deska plošiny je pro zajímavost vytvořena z křemičitého skla jenž umožňuje náhled na deformační členy s tenzometry.

5 Modelové měření

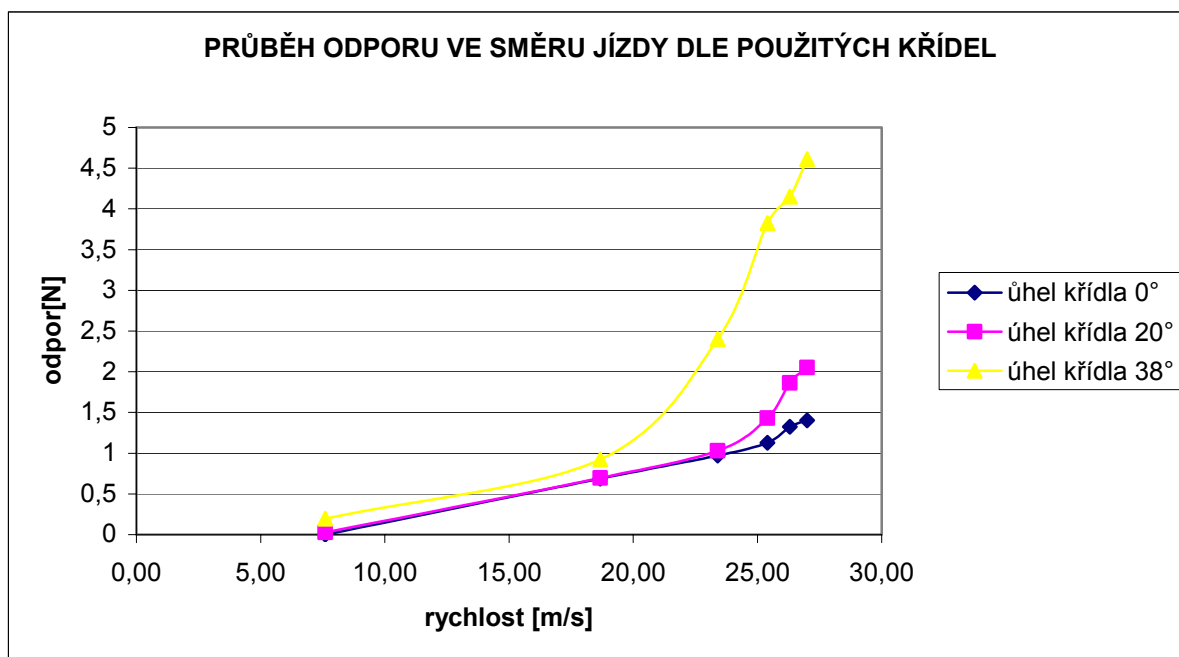
Měření vodorovné síly a svislých sil probíhalo nezávisle pro vyloučení možnosti vzájemného ovlivňování.

5.1 Měření vodorovné odporové síly

Měření probíhalo za použití tří typů přitlačných křídel v zadní části vozu. První pod úhlem náklonu 0° , druhé pod úhlem 20° a třetí s náklonem 38° . Rychlosti byly nastavovány do šesti režimů dle polohy klapky: 7,60 m/s; 18,68 m/s; 23,40 m/s; 25,40 m/s; 26,30 m/s a 27,00 m/s. V tabulce 1 jsou zaznamenány výsledné hodnoty. Též znázorněny graficky v grafu 1.

Tab.1 Výsledky měření vodorovného jízdního odporu

RYCHLOST [m/s]	VODOROVNÝ ÚČINEK [N]		
	křídlo - 0°	křídlo - 20°	křídlo - 38°
7,60	0	0,02943	0,1962
18,68	0,6867	0,69651	0,92214
23,40	0,97119	1,03005	2,40345
25,40	1,12815	1,43226	3,8259
26,30	1,32435	1,8639	4,14963
27,00	1,40283	2,05029	4,6107













Graf 1 Závislost vodorovné odporové síly na rychlosti proudění

5.1.1 Výpočet tvarového koeficientu C_x

Tvarový koeficient C_x je používá ve vztahu pro výpočet vodorovné odporové síly a jeho určení probíhá experimentální cestou. Koeficient zohledňuje vliv tvaru karoserie na obtékání vzduchu. Čím menších hodnot koeficient dosahuje, tím lépe vzduch automobil obtéká. Součinitel má zásadní vliv na spotřebu pohonných hmot automobilu a to hlavně za vyšších rychlostí. Uvádí se že tento vliv nabývá značného významu v rychlostech nad 60 km/h. Vzhledem k tomu, že hodnota C_x určuje podíl trakční síly na překonávání jízdního odporu prostředí, tak je zásadní i z hlediska nejvyšší dosažitelné rychlosti automobilu ale i z hlediska akcelerace ve vyšších rychlostech. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty součinitele C_x pro různé druhy automobilů.

Tab.2 Hodnoty C_x pro různé druhy automobilů^[3]

Automobil - FOTO	C_x	Typ automobilu	Automobil - FOTO	C_x	Typ automobilu
	0.28	Sportovní auto		0.7 - 1.1	F 1
	0.30	Osobní auto		0.9 - 1.5	Nákladní s vlekem
	0.30	Combi		0.66	Autobus
	0.42	Malá dodávka		0.71	Tahač
	0.56	Nákladní skříňové		1.1	Tahač USA

Součinitel C_x je dosazován do rovnice pro výpočet vodorovného odporu prostředí

$$F_x = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot C_x \cdot S \quad [3] \quad (27)$$

kde c_x je tvarový koeficient, S je čelní plocha automobilu, ρ je hustota vzduchu a v je rychlost jízdy automobilu, popř. rychlost proudění vzduchu kolem automobilu v aerodynamickém tunelu. V našem případě je pro nás C_x neznámá, kterou pomocí transformovaného vztahu (27) spočítáme. Hodnoty rychlostí a příslušných působících sil jsou uvedeny v tabulce 1. Hodnota čelní plochy je spočítána jako plocha průmětu automobilu do roviny kolmé na podélnou osu automobilu. U našeho modelu tato plocha odpovídá hodnotě $0,01785 \text{ m}^2$. Hodnota čelní plochy se ovšem změní za použití přídatného zadního přitlačného křídla. Tato plocha je vypočtena z rozměrů křídla a jeho odklonu. U křídla s odklonem 20° je hodnota plochy zobrazené do svislé roviny kolmé k podélné ose automobilu $1,45 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

U křídla s odklonem 38° je hodnota plochy zobrazené do svislé roviny kolmé k podélné ose automobilu $2,68 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Vzhledem k tomu, že původní zadní přitlačné křídlo je umístěno výškově souběžně se střechou automobilu, budou proto tyto plochy průmětů přídatných křídel přičteny k čelní ploše automobilu. Hustota vzduchu taktéž výrazně ovlivňuje výsledky měření. V čase měření byla hodnota naměřené teploty 24°C . Nadmořská výška v místě

měření je přibližně 237metrů nad mořem. S těmito údaji lze vypočítat hodnotu tlaku vzduchu v místě měření dle vztahu

$$P = P_0 \cdot e^{\frac{M_m \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \quad (28)$$

kde P_0 je tlak při hladině moře, M_m je molární hmotnost vzduch, g je gravitační zrychlení, h je nadmořská výška, R je molární plynová konstanta a T je teplota vzduchu ve stupních Kelvina. Tímto můžeme přikročit výpočtu hustoty vzduchu dle vztahu

$$\rho = \frac{P \cdot M_m}{R \cdot T} \quad (29)$$

Po dosazení do předešlých vzorců dostaneme hodnotu tlaku vzduchu $9,82 \times 10^4$ Pa a hodnotu hustoty vzduchu následně $1,155 \text{ kg/m}^3$. V tabulce 3 jsou zobrazeny výsledné vypočtené hodnoty součinitelů C_x při použití různých přitlačných křídel.

Tab.3 Hodnoty C_x při použití přitlačných křídel

úhel použitého křídla [°]	čelní plocha S [m2]	hodnota C_x
0°	0,01190	0,29
20°	0,01335	0,36
30°	0,01458	0,75

5.1.2 Vyhodnocení výsledků

Z vypočtených hodnot můžeme pozorovat vysoké narůstání koeficientu C_x s nárůstem úhlu použitého přitlačného křídla. Zvyšující úhel zvyšuje i čelní plochu automobilu. Proudění vzduchu potom klade větší odpor na větší čelní plochu ve směru jízdy. Je patrné, že pokud chceme zvýšit přitlačnou sílu na zadní kola, například z důvodu zvýšení stability, pomocí přitlačného křídla instalovaného nad úroveň střechy, dojde i ke zvýšení odporové síly ve směru jízdy vozidla. Záleží přitom zejména na rozměrech a natočení křídla od roviny rovnoběžné s vozovkou. Hodnota koeficientu C_x u skutečného Ferrari F40 je 0,34. To odpovídá hodnotě pro použité křídlo s úhlem náběhu mezi 0° a 20°. S porovnáním s hodnotou C_x z tabulky 2 je patrné, že Ferrari F40 nemá zrovna nejvýhodnější hodnotu tohoto součinitele s ohledem na to, že se jedná o supersportovní automobil. Vysvětlení se nabízí v tom, že konstruktéři se zaměřili zejména na optimalizaci přitlaku a jízdní stability před odporem rovnoběžným se směrem jízdy, ale i přesto dosahuje tento automobil vynikajících rychlostních i akceleračních výsledků.

5.1.3 Předpověď silových účinků na skutečný automobil

V kapitole o rozměrové analýze jsme si odvodili vztahy pro přepočet silových účinků při dané rychlosti proudění v okolí modelu a v daném měřítku modelu na silový účinek na skutečný automobil při určité rychlosti proudění vzduchu. Došli jsme ke vztahům, které pro náš konkrétní model již můžeme napsat v podobě

$$v_{dila} = \sqrt{10,55} \cdot v_{modelu} \quad (30)$$

$$F_{dila} = 10,33^3 \cdot F_{modelu} \quad (31)$$

Při dosazení do těchto vztahů dojdeme k výsledným hodnotám působení na skutečný automobil jenž jsou shrnuty v tabulce 4.

Tab.4 Účinky vodorovného odporu skutečného automobilu

RYCHLOST [m/s]	VODOROVNÝ ÚČINEK [N]		
	křídlo - 0°	křídlo - 20°	křídlo - 38°
24,69	0	35	230
60,67	806	818	1083
76,00	1140	1210	2822
82,50	1325	1682	4493
85,42	1555	2189	4873
87,70	1647	2408	5414

Z těchto výsledků bychom mohly následně počítat potřebný výkon a kroutící moment motoru pro dosažení požadovaných rychlostí. Samozřejmě by byla potřeba k síle potřebné k překonání odporu prostředí přičíst i sílu pro překonání jiných jízdních odporů.

5.2 Měření svislých reakcí

Měření probíhalo za použití tří typů přitlačných křídel v zadní části vozu. První pod úhlem náklonu 0°, druhé pod úhlem 20° a třetí s náklonem 38°. Rychlosti byly nastavovány do šesti režimů dle polohy klapky: 7,60 m/s; 18,68 m/s; 23,40 m/s; 25,40 m/s; 26,30 m/s a 27,00 m/s.

5.2.1 Měření zatížení plošin bez účinků modelu

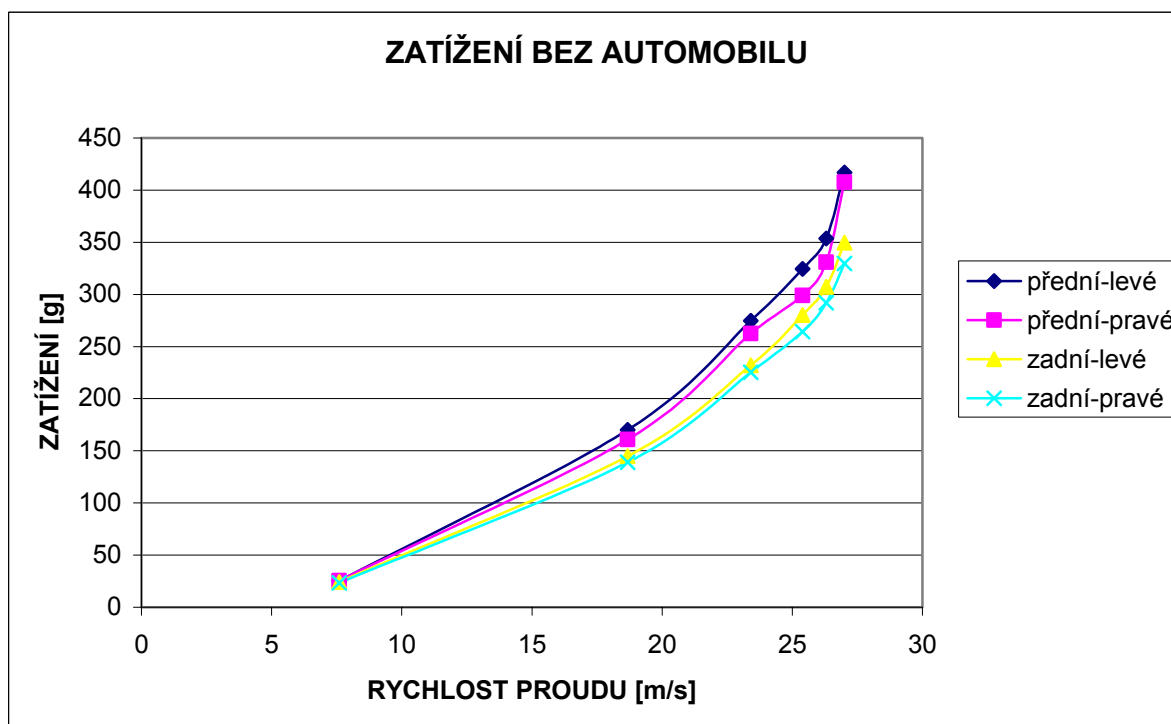
Vzhledem k tomu, že měřicí plošiny mají určitou plochu (100x100 mm), která je mnohem větší, než plocha kterou zaplní styk kol s podložkami, musíme vhodným způsobem eliminovat síly, které budou působit na plochu neobsazenou koly. To provede tak, že budeme měřit zatížení působící na měřicí plošiny bez samotného zatížení od automobilu, ale za

stejných podmínek, jako v přítomnosti automobilu. Toho docílíme použitím vzpěr na které postavíme model tím způsobem, že půdorysně bude ve stejné poloze jako v případě kdy bude stát koly na podložkách, ale výškově bude umístěno cca tři milimetry nad výškovou úroveň podložek. Na obrázku 13 jsou zobrazeny vzpěry pod model.



Obr. 13 Vzpěry pod model

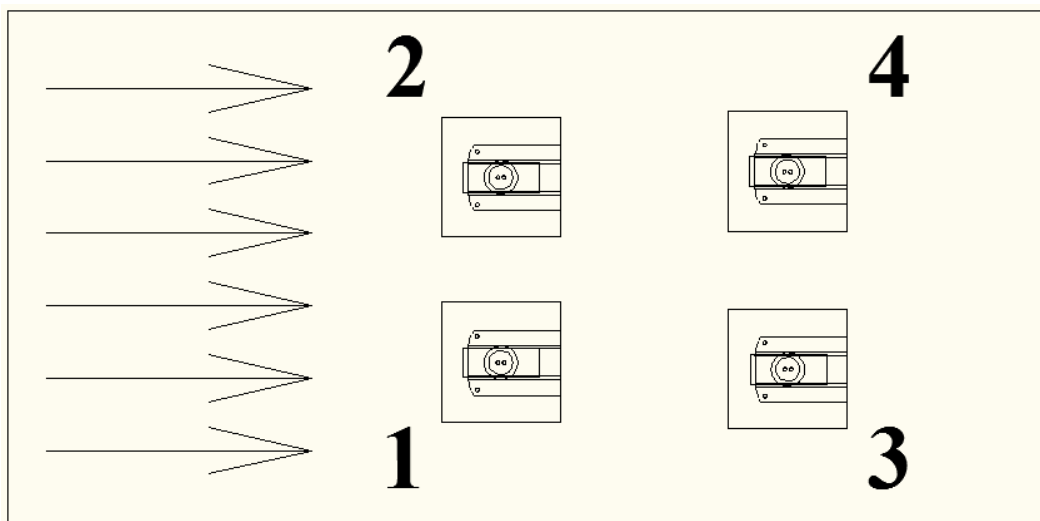
Takto nebude samotný automobil ovlivňovat průběh zatížení plošin. Následně naměříme příslušné hodnoty zatížení destiček ve všech polohách škrťací klapky. Na grafu 2 můžeme vidět průběh zatížení plošin bez působení zatížení od automobilu.



Graf 2 Zatížení plošin bez působení automobilu

Na grafu můžeme pozorovat minimální odchylky od zatížení plošin. Křivky zatížení předních plošin a zadních plošin jsou si velice podobné. V dalším kroku proběhlo měření účinků s plným zatížením. To znamená odstranění vzpěr a postavení modelu koly na plošiny. Kola byla na plošinách při měření vystředěna, tomu již odpovídala poloha plošin tak, aby to bylo možné a počítalo se s rozměry modelu již při návrhu a určení polohy umístěné plošin. Z důvodu budoucí možné záměny modelu za model o jiném rozvoru a rozchodu kol byly plošiny navrženy jako destička o rozměrech 100 x 100 mm. Jiný model by sice neměl kola vystředěna na středy plošin, ale testování vah prokázalo, že i při umístění měřeného objektu do krajní polohy plošiny nejsou odchylky od měření ve středu plošiny vyšší, než jedno promile z měřené hodnoty. Tímto jsme si tedy zajistili budoucí možnost pro testování různých modelů a případně jejich porovnávání, vyhodnocování a porovnávání úprav tvaru karoserie či doplňků vhodných pro zvyšování stability vozidla.

Po změření plného zatížení destiček s účinkem modelu můžeme z rozdílu hodnot měřených se zatížením modelu a bez zatížení modelu určit reakce kol vyvolaných účinkem proudu vzduchu na karoserii vozidla. Na obrázku 14 je znázorněno označení plošin. Šipky značí směr proudu vzduchu.



Obr.č. 14 číselné označení plošin

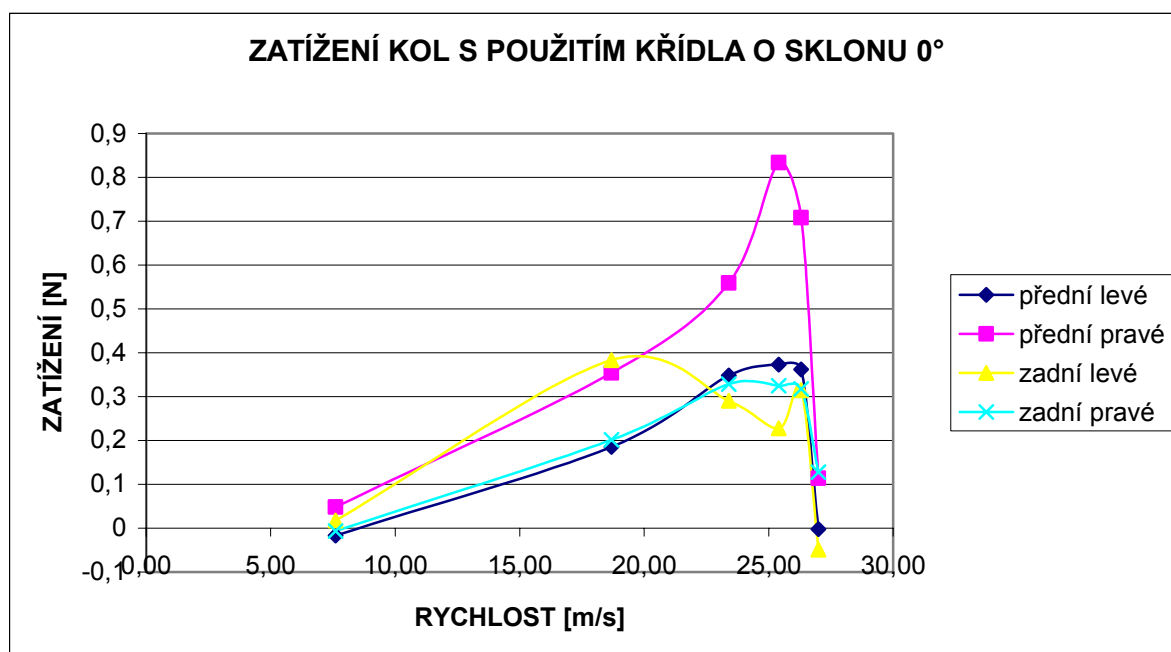
5.2.2 Zatížení s křídlem o úhlu náklonu 0°

Po změření a zaznamenání hodnot při všech měřených rychlostech dostaneme výše zmíněným výpočtem hodnoty reakcí kol působících na plošiny. V tabulce 5 jsou uvedeny výsledky vypočtených hodnot zatížení jednotlivými koly.

Tab. č. 5 Zatížení jednotlivými koly s použitím křídla s úhlem náběhu 0°

RYCHLOST [m/s]	ZATÍŽENÍ NA KOL [N] - KŘÍDLO 0°			
	1	2	3	4
	přední levé	přední pravé	zadní levé	zadní pravé
7,60	-0,016677	0,048069	0,017658	-0,006867
18,68	0,185409	0,354141	0,383571	0,201105
23,40	0,348255	0,55917	0,290376	0,328635
25,40	0,37278	0,83385	0,227592	0,324711
26,30	0,361989	0,708282	0,314901	0,317844
27,00	-0,001962	0,113796	-0,04905	0,12753

S minusovým znaménkem jsou uvedeny hodnoty záporné, tedy hodnoty značící odlehčení plošin. Z těchto hodnot je následně sestaven graf 3 kde je patrný průběh zatížení kol.



Graf 3 Zatížení od jednotlivých kol s použitým křídlem o sklonu 0°

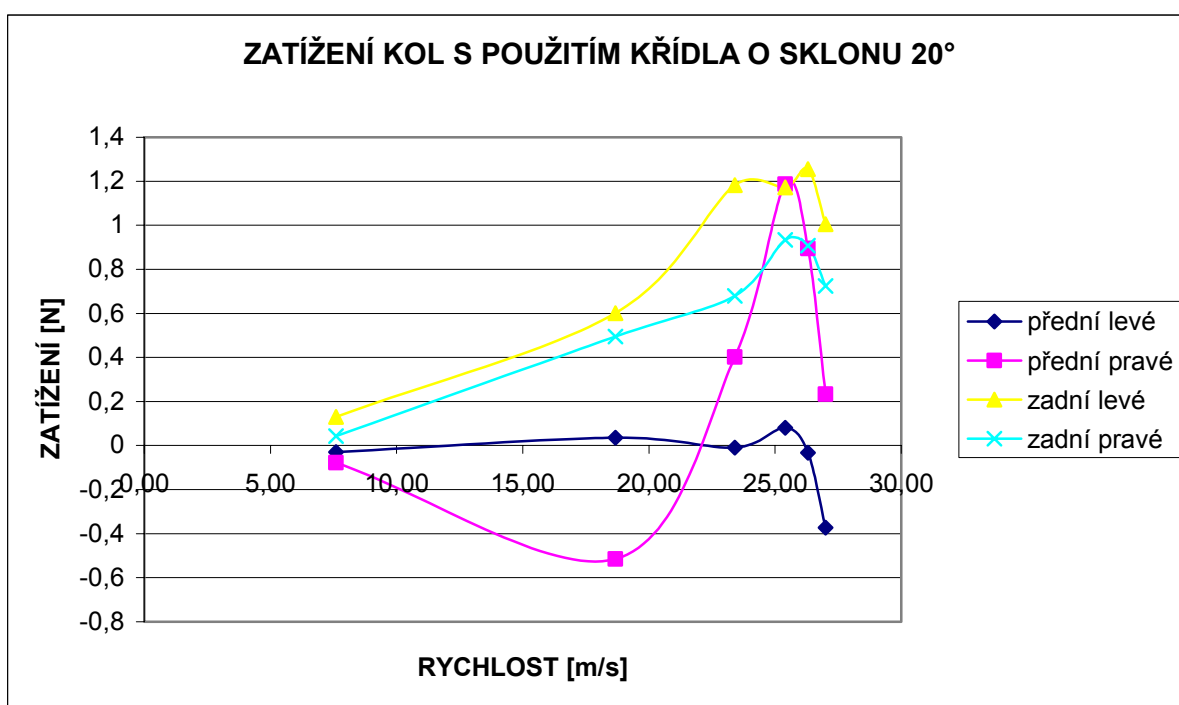
5.2.3 Zatížení za použití křídla s úhlem náklonu 20°

Po změření a zaznamenání hodnot při všech měřených rychlostech dostaneme výše zmíněným výpočtem hodnoty reakcí kol působících na plošiny. V tabulce 6 jsou uvedeny výsledky vypočtených hodnot zatížení jednotlivými koly.

Tab. č. 6 Zatížení jednotlivými koly s použitím křídla s úhlem náběhu 20°

RYCHLOST [m/s]	ZATÍŽENÍ NA KOL [N] - KŘÍDLO 20°			
	1	2	3	4
	přední levé	přední pravé	zadní levé	zadní pravé
7,60	-0,030411	-0,077499	0,130473	0,043164
18,68	0,035316	-0,515025	0,601353	0,494424
23,40	-0,00981	0,40221	1,182105	0,678852
25,40	0,080442	1,186029	1,172295	0,933912
26,30	-0,033354	0,893691	1,254699	0,907425
27,00	-0,37278	0,233478	1,004544	0,724959

S minusovým znaménkem jsou uvedeny hodnoty záporné, tedy hodnoty značící odlehčení plošin. Z těchto hodnot je následně sestrojen graf 4 kde je patrný průběh zatížení kol.



Graf 4 Zatížení od jednotlivých kol s použitým křídlem o sklonu 20°

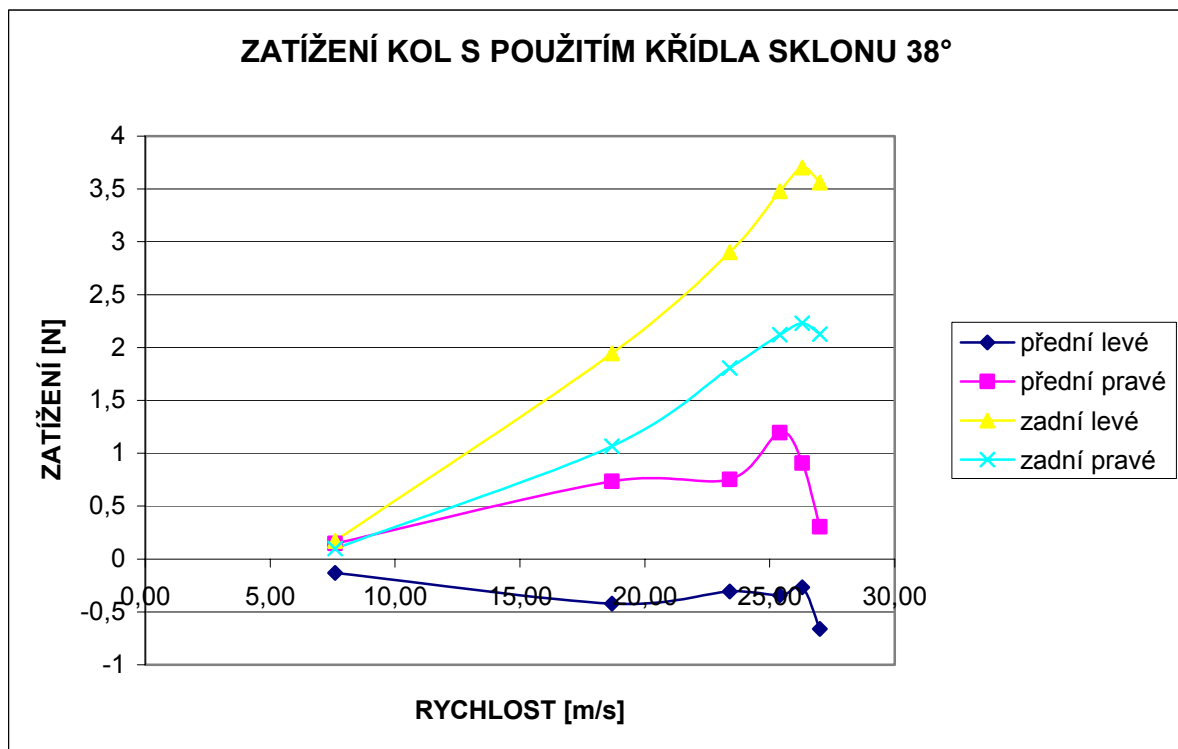
5.2.4 Zatížení za použití křídla s úhlem náklonu 38°

Po změření a zaznamenání hodnot při všech měřených rychlostech dostaneme výše zmíněným výpočtem hodnoty reakcí kol působících na plošiny. V tabulce 7 jsou uvedeny výsledky vypočtených hodnot zatížení jednotlivými koly.

Tab. č.7 Zatížení jednotlivými koly s použitím křídla s úhlem náběhu 38°

RYCHLOST [m/s]	ZATÍŽENÍ NA KOL [N] - KŘÍDLO 38°			
	1	2	3	4
	přední levé	přední pravé	zadní levé	zadní pravé
7,60	-0,130473	0,14715	0,171675	0,0981
18,68	-0,420849	0,73575	1,944342	1,066347
23,40	-0,308034	0,753408	2,899836	1,806021
25,40	-0,34335	1,194858	3,480588	2,11896
26,30	-0,266832	0,906444	3,704256	2,230794
27,00	-0,661194	0,30411	3,560049	2,125827

S minusovým znaménkem jsou uvedeny hodnoty záporné, tedy hodnoty značící odlehčení plošin. Z těchto hodnot je následně sestaven graf 5 kde je patrný průběh zatížení kol.



Graf 5 Zatížení od jednotlivých kol s použitým křídlem o sklonu 38°

5.2.5 Vyhodnocení výsledků

Zatížení za použití křídla s úhlem náklonu 0°

Z grafu můžeme vyčíst malé hodnoty přítlaku nebo vztlaku v malých rychlostech, pozvolný nárůst přítlaku při stoupání rychlosti a při maximální rychlosti opět propad hodnot přítlaku.

Zatížení za použití křídla s úhlem náklonu 20°

Z grafu můžeme vyčíst malé hodnoty přítlaku nebo vztlaku v malých rychlostech, přítlak působící na zadní kola a vztlak na přední kola. K pozvolnému nárůstu přítlaku dochází se zvyšováním rychlosti na zadní kola a na předních kolech dochází na levém ke stagnaci a na pravém k zvýšení vztlaku, později k dramatickému nárůstu přítlaku a v nejvyšší rychlosti opět k propadu přítlaku. K propadu přítlaku dochází v nejvyšší rychlosti i u ostatních kol.

Zatížení za použití křídla s úhlem náklonu 38°

Z grafu můžeme vyčíst opět malé hodnoty přítlaku nebo vztlaku v malých rychlostech, ale strmý nárůst přítlaku na zadní kola, na předním pravém kole malý nárůst přítlaku a na předním levém kole malé hodnoty vztlaku. Z tvaru křivek proložených body je patrné, že vyšší přítlak působící na instalované křídlo o velkém sklonu 38° vyvolává moment, jenž se snaží nadzvedávat kola na předních nápravách.

ZÁVĚR

Porovnáním tvarového koeficientu C_x vypočteného pomocí hodnot získaných z výsledků měření silových účinků proudu vzduchu ve směru toku a za daných rychlostí proudu s tvarový koeficientem skutečného Ferrari F40 zjistíme, že hodnoty jsou téměř totožné. Hodnota tohoto koeficientu skutečného automobilu je 0,34 a hodnota u modelu za použití křidel s úhlem náběhu 0° a 20° se pohybuje v rozmezí 0,29 až 0,36. Úhel náběhu křídla jenž bylo použito při měření účinků u skutečného automobilu, ani jiné geometrické charakteristiky tohoto křídla nejsou známi. U použití křídla s úhlem náběhu 38° došlo k dramatickému nárůstu hodnoty tvarového koeficientu C_x vlivem zvýšení obsahu průmětu čelní plochy o plochu křídla.

Z měření svislých složek silových účinků vyplývá výrazná citlivost na charakter proudění v okolí modelu, zejména na přesný směr toku proudu k podélné ose automobilu, i minimální změny tohoto směru mohou vyvolat velké změny ve svislých silových účincích. Tyto změny jsou zřejmě způsobeny změnami turbulentního charakteru proudění vzduchu v tělese tunelu. Změny charakteru proudění jsou pravděpodobně umocněny čtvercovým tvarem průřezu tělesa tunelu a malými rozměry tunelu proti modelu automobilu. Pro zvýšení přesnosti a významu měření svislých účinků bude nutno instalovat do tunelu usměrňovače proudu tak, aby se omezily výkyvy turbulencí na minimum. Dále z výsledků měření svislých silových účinků vyplývá, že zadní přitlačné křídlo ovlivňuje nejenom přítlak na zadních kolech ale i přítlak na kolech předních. Přítlak na přední kola je tímto účinkem naopak snižován a může dojít k narušení stability. Z toho vyplývá potřeba současné aerodynamické optimalizace celé karoserie a nikoliv pouze dílčí části, jenž by mohla způsobit narušení stability projevující se v mezních situacích za provozu vozidla.

Pomocí rozměrové analýzy byly odvozeny vztahy pro přepočítání silových účinků rovnoběžných se směrem toku proudu z modelu na skutečný automobil. Tyto účinky jsou shrnuty v tabulce 4. Na základě přepočtu těchto účinků by se mohlo přistoupit k předběžnému návrhu charakteristik motoru pro dosažení požadované maximální rychlosti vozidla a zrychlení vozidla. Do výpočtu by se musely zahrnout samozřejmě i ostatní jízdní odpory.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Ústav fyziky a měřicí techniky* [online]. Poslední revize 19. 6. 2008 [cit. 2009-28-03] Dostupné z :
< http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/MET_TLAKU.pdf>.
- [2] *Kvetakov.net* [online]. c2008 [cit. 2009-29-03] Dostupné z :
< www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/ls/ISAME/MTVKap6.pdf>.
- [3] JANALÍK,J. *Obtékání a odpor těles*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. 108s
- [4] *automotorevue.cz* [online]. c2003-2009 [cit. 2009-25-05] Dostupné z :
<<http://www.automotorevue.cz/auto/technika/aerodynamicke-laboratore-gm-vetrny-tunel.html>>.
- [5] VTMSCIENCE [online]. c2006-2008 [cit. 2009-25-05] Dostupné z :
<<http://www.vtm.cz/clanek/kdy-byl-postaven-prvni-aerodynamicky-tunel>>.
- [6] METZMEIER,E. *Inženýrská příručka pro stavbu strojů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. 911 s.