



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PŘECHODOVÉ JEVY V AERODYNAMICE VOZIDEL

TRANSITIONAL EFFECT IN ROAD VEHICLE AERODYNAMICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL KROUPA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVIZOR

Ing. ONDŘEJ ČAVOJ

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student(ka): Michal Kroupa

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Přechodové jevy v aerodynamice vozidel

v anglickém jazyce:

Transitional effects in road vehicle aerodynamics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vysvětlení mechanismů přechodových aerodynamických jevu, ke kterým dochází u vozidel např. během poryvu bočního vetru, klonění karoserie nebo při předjíždění.

Cíle bakalářské práce:

1. Popište statický přístup ke zkoumání přechodových jevu, pokud je to možné. Shrňte výsledky, které přináší.
2. Uveďte změny v přechodových jevech, které jsou patrné při aplikaci dynamického přístupu.

Seznam odborné literatury:

[1] THEISSEN, P. Unsteady Vehicle Aerodynamics in Gusty Crosswind [online]. München, 2012 [cit. 2014-10-02]. Dostupné z: <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1096026>. Dizertační práce. Technische Universität München.

[2] CHENG, S.Y., M. TSUBOKURA, Y. OKADA, T. NOUZAWA, T. NAKASHIMA a D.H. DOH. Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [online]. 2013, vol. 122, s. 146-156 [cit. 2014-10-02]. DOI:10.1016/j.jweia.2013.06.010. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610513001256>

[3] UYSTEPRUYST, D. a S. KRAJNOVIĆ. Numerical simulation of the transient aerodynamic phenomena induced by passing manoeuvres. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [online]. 2013, vol. 114, s. 62-71 [cit. 2014-10-02]. DOI: 10.1016/j.jweia.2012.12.018. Dostupné z:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610513000093>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Čavoj

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá přechodovými jevy v aerodynamice vozidel a cílem je vysvětlení a návrh mechanismů těchto jevů. První část zkoumá přechodové jevy během poryvů bočního větru. Druhá část zkoumá nestacionární rozložení povrchového tlaku kolem vozidla během míjení a předjíždění. Závěrečná část se zabývá přechodovými jevy při klopení karoserie.

KLÍČOVÁ SLOVA

boční vítr, přechodové jevy, vozidlo

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with transient phenomena in vehicle aerodynamics with the focus on describing and proposing of unsteady mechanisms. First part investigates transient phenomena during crosswind gusts. Next part deals with unsteady pressure distribution around the vehicle during passing and overtaking manoeuvre. Final part investigates transient phenomena during dynamic pitching motion.

KEYWORDS

crosswind, transient phenomena, vehicle



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KROUPA, M. *Přechodové jevy v aerodynamice vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Čavoj.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Čavoje a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2015

.....

Michal Kroupa



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Čavojovi za pomoc, rady a náměty při vypracování mé bakalářské práce.



OBSAH

| | |
|---|----|
| Úvod | 10 |
| 1 Definice | 11 |
| 1.1 Kvazi-stacionární aproximace | 11 |
| 1.2 Bezrozměrné parametry proudu..... | 11 |
| 2 Boční vítr | 12 |
| 2.1 Nestacionární aerodynamika vozidel během poryvů bočního větru..... | 12 |
| 2.1.1 Metodologie..... | 13 |
| 2.1.2 Numerické vyšetřování standardního poryvu..... | 15 |
| 2.1.3 Návrh nestacionárního mechanismu..... | 17 |
| 2.1.4 Experiment | 18 |
| 2.2 Kvantitativní analýza aerodynamiky vozidla během poryvu bočního větru | 20 |
| 2.2.1 Metodologie..... | 20 |
| 2.2.2 Analýza nestacionárního mechanismu měřením povrchového tlaku | 21 |
| 2.2.3 Kvantitativní analýza rozložení povrchového tlaku na zadní straně | 21 |
| 2.3 Citlivost vozidla na boční vítr..... | 24 |
| 2.3.1 Měřené konfigurace | 24 |
| 2.3.2 Vliv nestacionárních jevů na citlivost na boční vítr | 24 |
| 2.4 Dynamický stáčivý pohyb | 26 |
| 2.4.1 Nastavení | 26 |
| 2.4.2 Vyhodnocení..... | 27 |
| 3 Předjíždění a míjení dvou vozidel | 29 |
| 3.1 Experimentální vyšetřování aerodynamických efektů během míjení a při předjížděcím manévru | 29 |
| 3.1.1 Předjíždění | 29 |
| 3.1.2 Míjení | 31 |
| 3.2 Numerická simulace nestacionárních jevů při předjíždění | 32 |
| 3.2.1 Proces předjíždění..... | 33 |
| 3.2.2 Vyhodnocení..... | 33 |
| 4 Klopení karoserie..... | 37 |
| 4.1 Dynamický klopící pohyb..... | 37 |
| 4.1.1 Vyhodnocení..... | 37 |
| 4.2 Měření aerodynamického vztlaku v tažné nádrži | 38 |
| 4.2.1 Experimentální metoda..... | 38 |
| 4.2.2 Vyhodnocení..... | 39 |
| 4.3 Aerodynamická stabilita silničních vozidel při dynamickém klopícím pohybu..... | 41 |



| | | |
|-------|--|----|
| 4.3.1 | Model..... | 41 |
| 4.3.2 | Rozložení povrchového tlaku na vrchní desce kufru..... | 42 |
| 4.3.3 | Aerodynamický tlumící mechanismus | 43 |
| | Závěr..... | 44 |
| | Seznam použitých zkratk a symbolů | 46 |



ÚVOD

Vývoj automobilů jde dopředu a s tím nevyhnutelně přichází i problémy, se kterými je potřeba se vypořádat. Kvůli stále se zvyšujícím rychlostem, kterých je možné dosáhnout díky silnějším motorům a kvalitnějším silnicím, se objevuje problematika aerodynamické stability vozidla. Navíc kvůli snižování emisí je snaha snížit spotřebu a to je doprovázeno snížením hmotnosti a aerodynamického odporu vozidel, což je dělá citlivějšími na aerodynamická zatížení. Tyto vlastnosti se potom negativně projeví na jízdě stability vozidla, například během poryvů bočního větru, předjíždění a míjení dvou vozidel nebo při brzdění z vysokých rychlostí a snižují komfort, v extrémních situacích i bezpečnost jízdy.

Proto v dnešní době dostává výzkum týkající se jízdě stability stále větší pozornost. Pro snížení nákladů na výrobu vznikají experimentální i numerické metody, které mají za cíl už v brzkém stádiu vývojového procesu spolehlivě předpovědět chování vozidla v těchto podmínkách, se záměrem optimalizovat tvar vozidla a snížit tak jeho citlivost na aerodynamická zatížení vznikající během přechodových jevů. Tato práce se zabývá zkoumáním přechodových jevů, které se v těchto situacích objeví a identifikací nestacionárních mechanismů.



1 DEFINICE

1.1 KVAZI-STACIONÁRNÍ APROXIMACE

Kvazi-stacionární vývoj toku a jeho vlastností znamená, že tok dosahuje stabilního stavu při každém kroku jeho změny, ačkoli sledujeme časově závislý děj. Tento přístup nebere v úvahu nestacionární jevy. Kvazi-stacionární aproximace je hrubý odhad nestacionárního vývoje, založeného na vlastních hodnotách shromážděných během stabilních podmínek. Kvazi-stacionární zatížení je často odvozeno interpolací mezi minimem a maximem stabilního zatížení podle změny úhlu natočení. Protože tento postup je založen na lineární závislosti aerodynamického zatížení a změně úhlů vybočení, je použitelný pouze pro boční sílu, klonící a stáčecí moment. [2]

1.2 BEZROZMĚRNÉ PARAMETRY PROUDU

Při modelování reálných proudových podmínek je potřeba vzít v úvahu bezrozměrné Reynoldsovo a Strouhalovo podobnostní číslo, aby byla zajištěna platnost výsledků. Čísla jsou bezrozměrná pro porovnání výsledků z výzkumů v rozdílných testovacích podmínkách.

REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo je definováno jako poměr setrvačnosti a viskózní síly [1]:

$$\text{Re} = \frac{\rho U L_{ch}}{\mu} = \frac{U L_{ch}}{\nu}, \quad (1)$$

kde ρ je hustota, μ je dynamická viskozita a ν kinematická viskozita. U je charakteristická rychlost a L_{ch} charakteristický rozměr.

STROUHALOVO ČÍSLO

Strouhalovo číslo je definováno jako bezrozměrná frekvence [1]:

$$\text{Sr} = \frac{f L_{ch}}{U}, \quad (2)$$

kde f je frekvence, L_{ch} charakteristická délka a U je charakteristická rychlost používaná pro Reynoldsovo číslo.



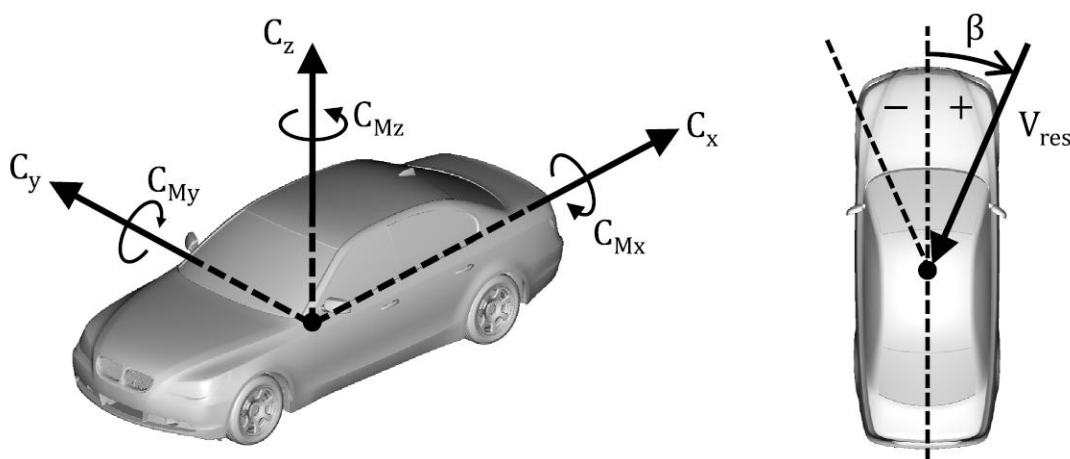
2 BOČNÍ VÍTR

Vývojem aerodynamiky a snižováním hmotnosti se očekává snížení spotřeby, nicméně jednodušší geometrie vozidel, která vytváří nižší odpor vzduchu, zvyšuje aerodynamickou boční sílu a moment stáčení při bočním větru. Stabilita při bočním větru rozhodně ovlivňuje řidičovo vnímání bezpečnosti vozidla, zejména na dálnici při rychlostech 140 km/h a více. Vozidlo, které je citlivé na boční vítr, vyžaduje více zásahů řidiče do řízení a to může způsobit znepokojení ohledně celkové stability a bezpečnosti vozidla, i když z objektivního pohledu není kritická. Je nepravděpodobné, že si zákazník bude vybírat auto kvůli jeho skvělé stabilitě při bočním větru, ale zákazník si jistě nekoupí auto, když se v něm nebude cítit bezpečně.

Tato kapitola se zaměřuje na nestacionární aerodynamické chování vozidla v časově závislých proudových podmínkách. Zabývá se také pochopením a popsáním nestacionárního mechanismu při poryvech bočního větru.

2.1 NESTACIONÁRNÍ AERODYNAMIKA VOZIDEL BĚHEM PORYVŮ BOČNÍHO VĚTRU

Theissen [1] zkoumal aerodynamiku vozidla během poryvu bočního větru. Použitím numerické simulace a experimentů ve větrném tunelu, charakterizoval nestacionární aerodynamické zatížení během poryvů větru. V první části numericky zkoumal aerodynamiku BMW vyšší střední třídy při jednoduchém poryvu větru. Poryv větru byl modelován jako sinusový puls bočního větru, který prochází přes vozidlo. Analyzováním aerodynamických zatížení, byly identifikovány nestacionární jevy na zadní části vozidla. Poryv větru experimentu byl znovu modelován jako sinusová změna úhlu natočení, způsobená natáčením modelu v měřítku 1:2 kolem svojí vertikální osy v proudu vzduchu ve větrném tunelu. Pro experimentální zkoumání byla použita geometrie DrivAer.



Obr. 2.1 Souřadnicový systém [1]



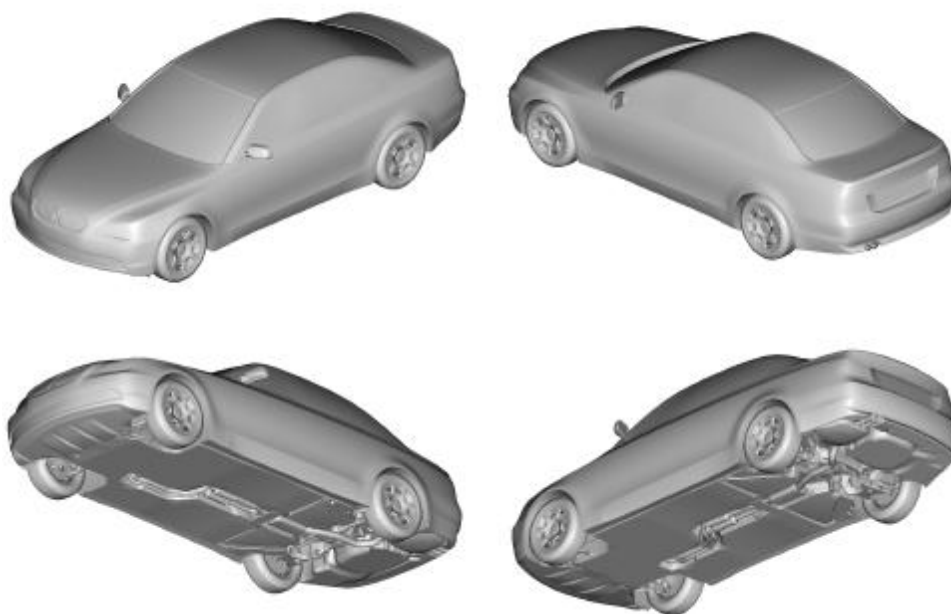
2.1.1 METODOLOGIE

Souřadnicový systém je definován na Obr. 2.1, s osou x směřující dozadu, osou y směřující ke spolujezdci a osou z směřující ze střechy vozidla. Odpovídající koeficienty momentů jsou definovány podle pravidla pravé ruky. Úhel natočení β je definován podle běžně používané definice v aerodynamických tunelech, kde je auto natáčeno kolem osy z , a podle pravidla pravé ruky je nastaven kladný úhel natočení. Boční vítr ze strany pasažéra tedy odpovídá kladnému otočení vozidla.

Pro numerický výpočet byl použit program PowerFlow verze 4.1. Dosažená úroveň přesnosti výsledku závisí na počtu zkoumaných buněk a také na úrovni geometrických detailů. V zásadě je možné tvrdit, že při použitém nastavení byl autor schopen dosáhnout relevantních výsledků.

Poryv větru zde byl implementován jako časově závislá okrajová podmínka rychlosti na vstupu. Rychlost ve směru osy x je konstantní, zatímco rychlost ve směru osy y se mění v závislosti na požadovaném úhlu natočení.

Pro identifikaci možných nestacionárních jevů byl použit detailní model BMW sedan vyšší střední třídy (Obr. 2.2). Geometrie má reálnou horní část těla a také podvozek obsahující například brzdové kotouče, zavěšení a výfukové díly. Pro praktickou simulaci nebylo uvažováno proudění pod kapotou.



Obr. 2.2 Geometrie sedanu BMW střední vyšší třídy [1]

Časově závislé proudové podmínky experimentu byly generovány oscilujícím modelem vozidla kolem jeho osy z , zatímco byl vystaven konstantnímu proudu větrného tunelu. To poskytlo opakovatelné proudové podmínky, které mohou být také modelovány numericky. Pohyb modelu je symetrická sinusoidní oscilace kolem osy z při pevné frekvenci 2 Hz a amplitudě $\pm 3^\circ$. Použité experimentální nastavení poskytovalo časově závislé proudové



podmínky při reálném Reynoldsově a Strouhalově čísle. Během oscilací byl zaznamenáván povrchový tlak na různých místech a rychlost na vybraných místech v úplavu, což je oblast zvířeného proudění tvořící se za vozidlem. Navíc stacionárním měřením za konstantního natočení byla získávána data pro srovnání s nestacionárními výsledky.

Měření probíhalo ve větrném tunelu v Aero laboratoři BMW (Obr. 2.3) při maximální rychlosti 280 km/h. Tunel byl vybaven pohybovým pásem 9 m dlouhým a 3,5 m širokým. Kvůli tomu, že pás nemohl rotovat s modelem požadovanou frekvencí 2 Hz, byl model zvednutý 30 mm nad pás pro zabránění kontaktu mezi nimi. Kvůli pohybu modelu byla kola připevněna k tělu modelu a do měření se nezahrnovala rotace kol. Model byl připojen podpěrou k hexapodu. Hexapod je hlavní část pohybového systému, která dovoluje pohyb modelu v šesti stupních volnosti použitím mechanických pohonů.



Obr. 2.3 BMW větrný tunel [1]

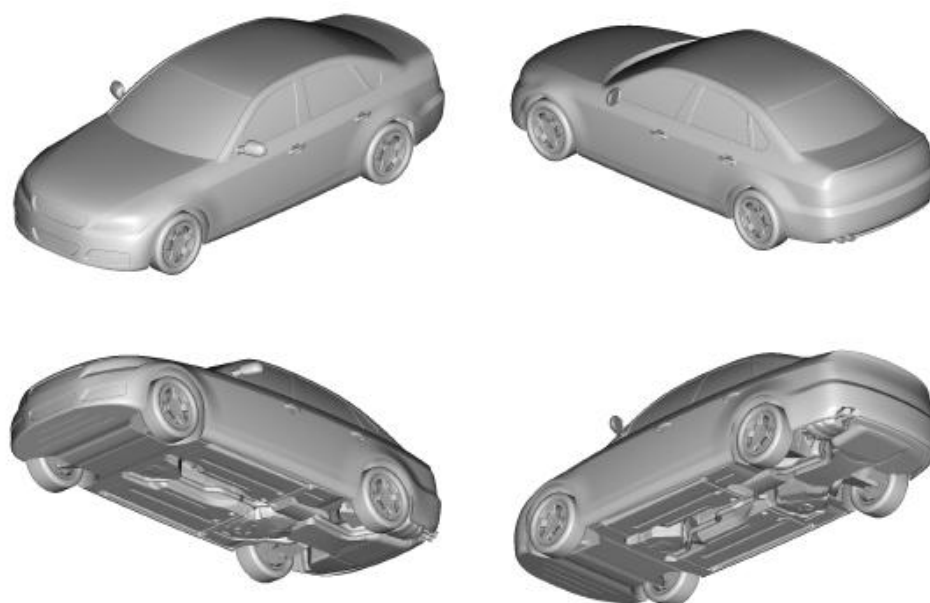
Pro experiment byla použita geometrie DriveAer sedan (Obr. 2.4), která se liší od geometrie BMW předním spoilerem, jiným tvarem disků, zadními světly bez hran a upraveným podvozkem na zadní nápravě. Je také trochu menší než vůz BMW. Má menší celkovou délku, rozvor a průřez. Pro podmínky při bočním větru je průřez ve směru osy y velmi důležitým parametrem. Byla použita lehká konstrukce v 50 % velikosti. Neuvažovalo se proudění pod kapotou.



2.1.2 NUMERICKÉ VYŠETŘOVÁNÍ STANDARDNÍHO PORYVU

Vývoj aerodynamického zatížení byl detailně analyzován pro jednovrcholový poryv větru. Úhel natočení byl od -3° do $+3^\circ$ a zpět na -3° po dobu jedné periody $T = 1$ s.

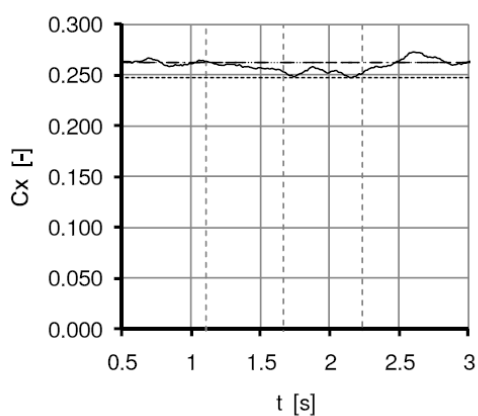
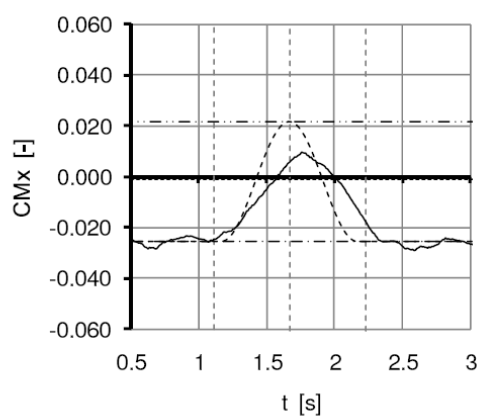
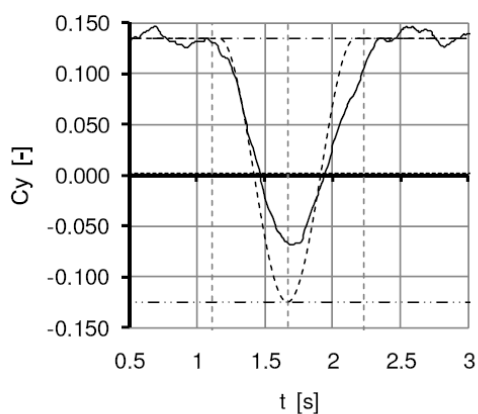
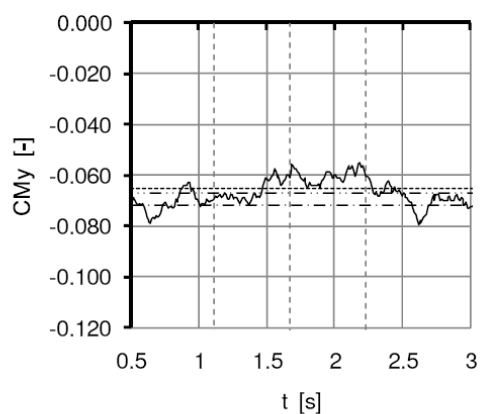
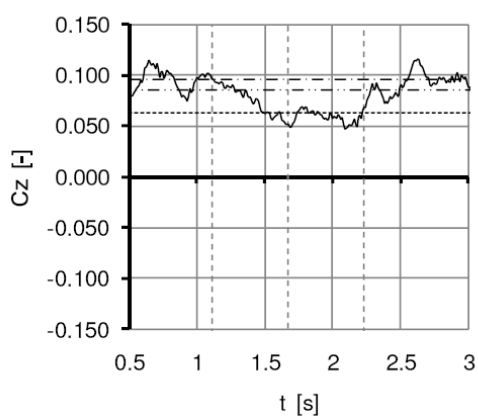
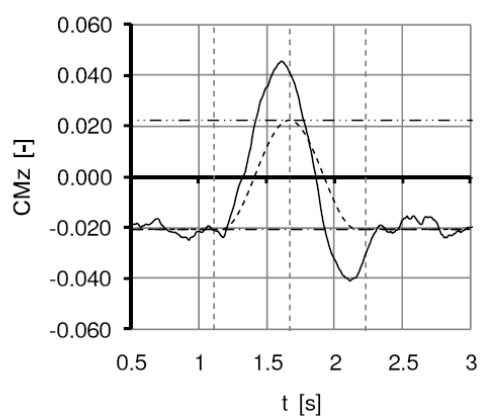
Grafy na Obr. 2.5 ukazují nestacionární vývoj aerodynamických koeficientů zatížení pro aerodynamický odpor C_x , boční síla C_y , vztlaková síla C_z , klonící moment C_{M_x} , klopící moment C_{M_y} a stáčecí moment C_{M_z} . Pro srovnání se stacionárním zatížením byly zahrnuty odpovídající úrovně konstantního natočení -3° , 0° a $+3^\circ$ pro každou složku. Jak bylo popsáno v kapitole 1.1, kvazi-stacionární křivky jsou odvozeny ze stacionárních zatížení. Vertikální tečkované čárky v grafech na Obr. 2.5 znázorňují příchod začátku poryvu na předku vozidla, vrchol poryvu na referenčním bodu vozidla (bod v počátku souřadného systému) a konec poryvu na zadní části vozidla.



Obr. 2.4 Geometrie DrivAer [1]

Chování aerodynamického odporu, vztlaku a klopícího momentu může být shrnuto tak, že během poryvu, nestacionární zatížení směřují k 0° úrovní natočení a mají zpožděný návrat na výchozí úroveň. Chování koeficientů C_x , C_z a C_{M_y} během poryvů může být považováno za nekritické.

Na druhou stranu byly sledovány větší výchylky během poryvu pro boční sílu, klonící moment a moment stáčení. S přichozím poryvem C_y , C_{M_x} a C_{M_z} okamžitě reagují na změny přicházejícího proudu a nejprve směřují k odpovídající úrovni natočení $+3^\circ$, což způsobí protnutí nuly každé z těchto složek. Na vrcholu poryvu boční síla a klonící moment nedosahují kvazi-stacionárních úrovní natočení $+3^\circ$. Kromě toho vykazují opožděný návrat na výchozí úroveň na konci poryvu. Oproti tomu hodnoty nestacionárního momentu stáčení jsou na vrcholu poryvu výrazně nad jeho kvazi-stacionární aproximací a na konci poryvu jsou výrazně pod kvazi-stacionárními hodnotami. Srovnáním nestacionárního zatížení a kvazi-stacionární aproximace je vidět, že nestacionární efekt může být identifikován pro všechny tři složky, pokud jde o amplitudu a časové zpoždění.

(a) Odpor C_x (b) Klonící moment C_{Mx} (c) Boční síla C_y (d) Klopící moment C_{My} (e) Vztlak C_z (f) Moment stáčení C_{Mz}

— Nestacionární - - - - - Kvazi-stacionární - - - - - Poryv Start / Vrchol / Konec
 - - - - - Konstantní natočení -3° - - - - - Konstantní natočení 0° - - - - - Konstantní natočení $+3^\circ$

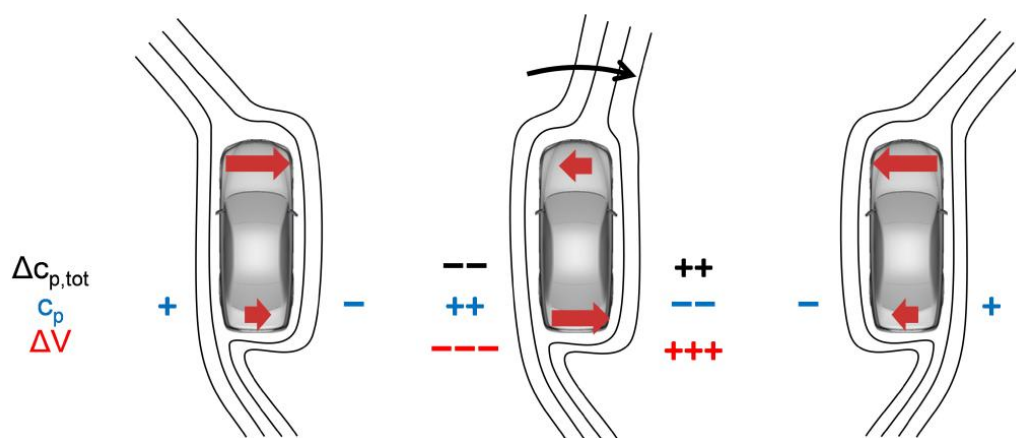
Obr. 2.5 Numerické nestacionární a kvazi-stacionární průběhy aerodynamických zatížení během poryvu bočního větru [1]



Vrchol boční síly a vrchol klonícího momentu dosahuje pouze 55 % a 44 % kvazi-stacionárních hodnot. Na druhou stranu nestacionární stáčecí moment dosahuje 207 % a 198 % kvazi-stacionárních hodnot během vrcholu poryvu a na konci poryvu. Zatímco pro boční sílu a klonící moment je kvazi-stacionární křivka spíše konzervativní aproximací, pro moment stáčení tomu tak není. Všechny tři složky mají časový posun. Zatímco nestacionární boční síla a klonící moment zaostávají za kvazi-stacionárním signálem, nestacionární moment stáčení předchází jeho kvazi-stacionární aproximaci. Časový posun činí $\Delta t = +0,04$ s pro boční sílu, $\Delta t = +0,11$ s pro klonící moment a $\Delta t = -0,08$ s pro moment stáčení.

2.1.3 NÁVRH NESTACIONÁRNÍHO MECHANISMU

Theissen [1] odvodil nestacionární aerodynamický mechanismus a schematicky ho vysvětlil. V Obr. 2.6 je ukázána schematicky jedna změna natočení (například od -3° do $+3^\circ$). Za konstantního natočení -3° proud vstupuje do úplavu ze závětrné strany. V důsledku toho je kapalina zrychlována kolem závětrného zadního rohu, což vede ke snížení tlaku a kladnému příspěvku boční síly a momentu stáčení. Stejný vývoj stacionárního povrchového tlaku na závětrné straně sledoval Wojciak [2]. Pokud se náběh najednou změní na kladný úhel natočení, což je boční vítr zprava, úplav reaguje s určitým časovým zpožděním, zatímco tok kolem předku se přizpůsobí téměř okamžitě. Wojciak [2] také sledoval časové zpoždění mezi kvazi-stacionárním a nestacionárním vývojem tlaku na zadní straně.



Obr. 2.6 Schematický popis proudového pole při konstantním natočení (vpravo a vlevo) a během poryvu větru (uprostřed) [1]

Vančura [3] pozoroval, že přední část vozidla reaguje okamžitě na změnu okolního proudění a zadní část reagovala se zpožděním. Tsubokura [4] zase zkoumal časové zpoždění proudu pod vozidlem vůči proudu nad vozidlem během dynamického natáčení.

Kombinovaný efekt bočního větru zprava a tekutiny, která stále vstupuje do úplavu z pravé strany, způsobuje ještě vyšší rychlosti a nižší tlaky na pravé zadní části vozidla. Na levé straně se vyskytuje inverzní chování, které způsobuje snížení rychlosti a nárůst povrchového tlaku. Proto rozdíl tlaku mezi levou a pravou stranou roste a tím i kladný přírůstek boční síly a momentu stáčení na zadní straně. Ve stejnou chvíli přírůstek na přední straně vozidla změní



směr, což společně s příspěvkem na zadní straně způsobuje menší celkovou boční sílu, ale větší celkový moment stáčení. Nakonec je znovu dosažen kvazi-stacionární stav, když se úplav přizpůsobí okolnímu proudu. Wojciak [2] potvrdil, že kvůli časovému zpoždění, je boční síla při vrcholu natočení snížena v porovnání se stacionárními podmínkami, což způsobí větší amplitudu nestacionárního momentu stáčení oproti kvazi-stacionárnímu vývoji.

Existence nestacionárního jevu během poryvu bočního větru byla potvrzena, což vede k závěru, že pro správné vyhodnocení průběhu aerodynamických zatížení vozidla musí být uvažovány tyto jevy. Pro úplné vyhodnocení tedy nestačí jen průběhy aerodynamických zatížení měřené při stacionárních podmínkách například ve větrném tunelu při konstantním úhlu natočení. Pro vyhodnocení některých složek ovšem kvazi-stacionární aproximace stačí. Theissen [1] při analýze experimentálních výsledků poznamenal, že nestacionární odchylky aerodynamického odporu, vztlaku a klopícího momentu během natáčení modelu jsou malé v porovnání s kvazi-stacionárními hodnotami a mohou být dobře odhadnuty kvazi-stacionární aproximací.

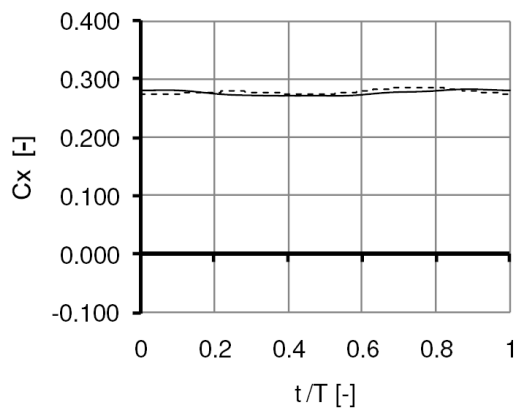
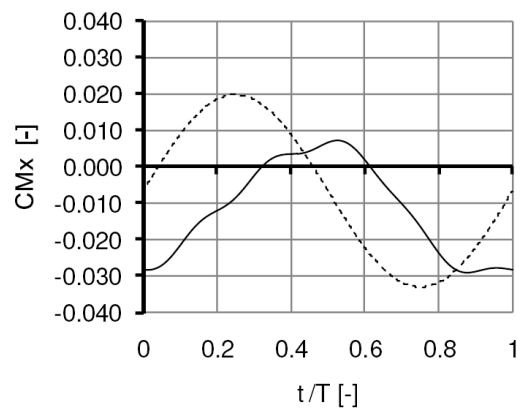
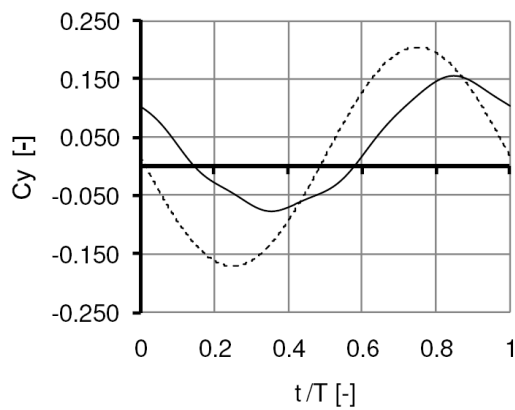
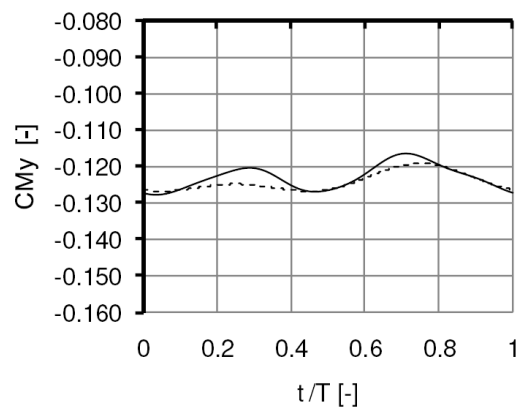
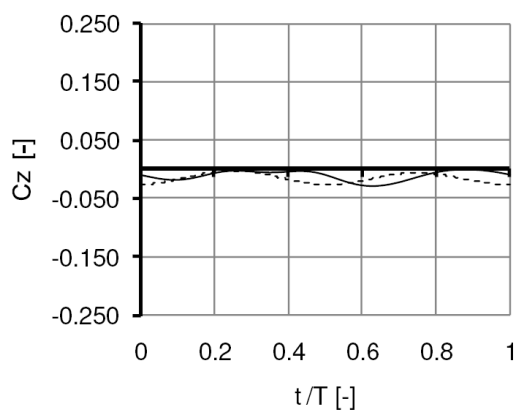
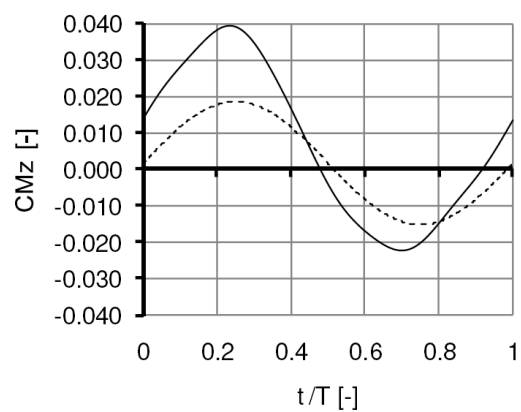
2.1.4 EXPERIMENT

Nestacionární aerodynamická zatížení naměřená během natáčení modelu při frekvenci 2 Hz a úhlu natočení $\pm 3^\circ$ jsou porovnána s odpovídajícím kvazi-stacionárním vývojem z Obr. 2.7. Kvazi-stacionární křivky jsou odvozeny interpolací aerodynamického zatížení měřeného při konstantním natočení podle úhlu natočení.

Nestacionární odchylky aerodynamického odporu, vztlaku a klopícího momentu jsou malé a mohou být dobře odhadnuty kvazi-stacionární aproximací. Významné rozdíly mezi kvazi-stacionárními a nestacionárními zatíženími můžeme sledovat pro boční sílu, klonící moment a moment stáčení. Amplitudy nestacionární boční síly a klonícího momentu jsou menší než kvazi-stacionární aproximace a dosahují jen 62 %, respektive 68 % kvazi-stacionárních hodnot. Na rozdíl od amplitudy nestacionárního momentu stáčení, který dosahuje 183 % kvazi-stacionárního odhadu.

Zatímco nestacionární boční síla a klonící moment zaostává za kvazi-stacionární aproximací o $\Delta t/T = +0,12$, respektive $\Delta t/T = +0,22$, nestacionární moment stáčení vykazuje záporné zpoždění $\Delta t/T = -0,04$ ve srovnání s kvazi-stacionární aproximací.

Experiment potvrdil nejdůležitější chování aerodynamických zatížení, které potvrzují existenci nestacionárních efektů pro boční sílu, klonící moment a moment stáčení. Navíc zvětšení nestacionární amplitudy momentu stáčení a zmenšení u boční síly a klonícího momentu je sledováno jak numericky tak experimentálně. Nakonec je potvrzen i časový posun nestacionárních zatížení. Boční síla a klonící moment zaostává za kvazi-stacionárním odhadem, zatímco nestacionární moment stáčení předchází svůj kvazi-stacionární protějšek. Nicméně časové zpoždění boční síly a klonícího momentu sledovaného v experimentu jsou přibližně dvakrát větší než numerické hodnoty, což mohlo být kvůli různému nastavení a odlišné geometrii modelu, jak poznamenal autor.

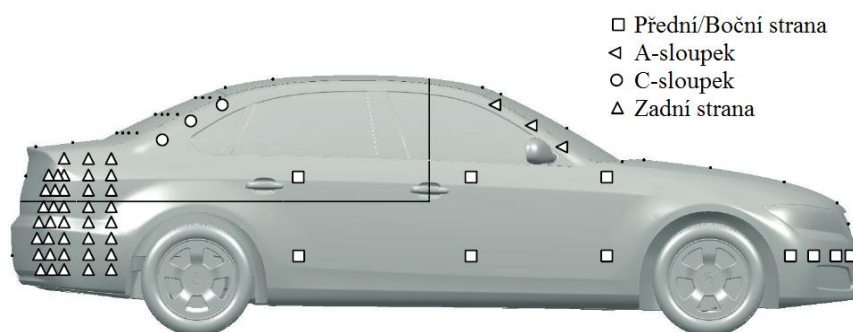
(a) Odpor C_x (b) Klonící moment C_{Mx} (c) Boční síla C_y (d) Klonící moment C_{My} (e) Vztlak C_z (f) Moment stáčení C_{Mz}

----- Kvazi-stacionární ——— Nestacionární

Obr. 2.7 Experimentální nestacionární a kvazi-stacionární průběhy aerodynamických zatížení pro otáčecí pohyb $2 \text{ Hz} \pm 3^\circ$ [1]

2.2 KVANTITATIVNÍ ANALÝZA AERODYNAMIKY VOZIDLA BĚHEM PORYVU BOČNÍHO VĚTRU

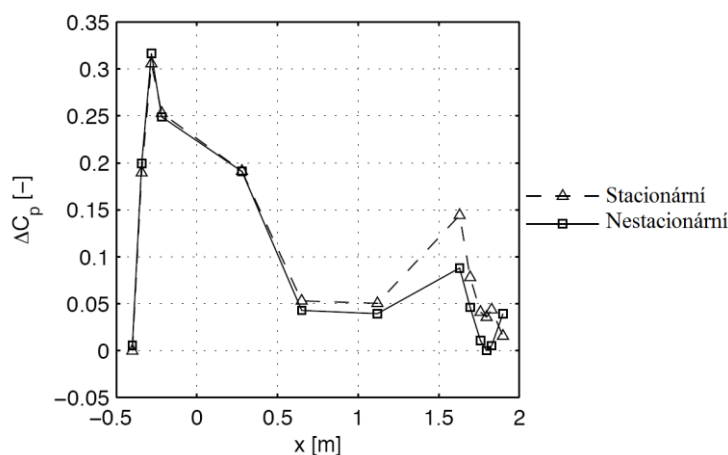
Wojciak [2] zkoumal nestacionární aerodynamiku vozidla ve větrném tunelu. Příslušná nastavení vyvíjel ve spolupráci s Theissenem [1]. Měřil a vyhodnocoval povrchový tlak na různých místech kolem vozidla, zejména na zadní části. Vozidlo bylo vystaveno realistickému Reynoldsovu ($Re = 9,10^6$) a Strouhalovu číslu ($Sr = 0,08$) charakterizujícím přirozené nárazy bočního větru.



Obr. 2.8 Rozložení měřičů povrchového tlaku [2]

2.2.1 METODOLOGIE

Nastavení experimentu je stejné jako v kapitole 2.1.1, kromě informací o měřicím zařízení povrchového tlaku, které zde nejsou zmíněny. Měřiče tlaku jsou na 96 místech rozložených na povrchu vozidla, jak je možné vidět na Obr. 2.8. Povrchový tlak je měřen pouze na straně spolujezdce, na pravé straně modelu. Nejvýznamnější místa pro měření tlaku pokrývají čtverec na boční zadní části vozidla. Další důležitá místa jsou na A-sloupku vpředu, C-sloupku vzadu, také na přední a boční straně ve výšce 65 mm.

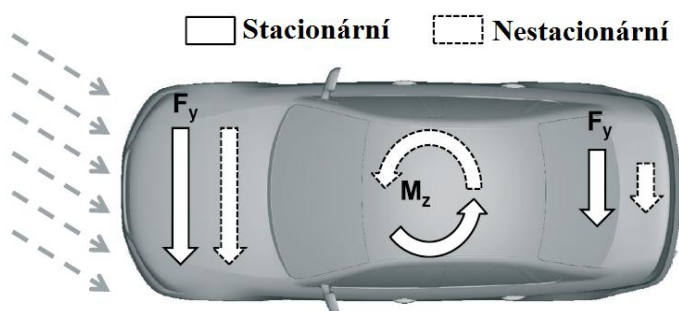


Obr. 2.9 Stacionární a nestacionární rozdíly tlaku mezi návětrnou a závětrnou stranou při $\beta = 3.3^\circ$ [1]



2.2.2 ANALÝZA NESTACIONÁRNÍHO MECHANISMU MĚŘENÍM POVRCHOVÉHO TLAKU

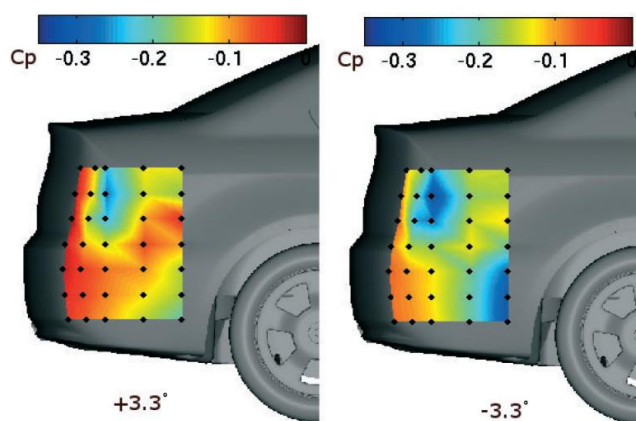
Na Obr. 2.9 je srovnání stacionárních a nestacionárních rozdílů tlaků mezi návětrnou a závětrnou stranou, měřených ve výšce 65 mm při natočení $\beta = 3,3^\circ$. Z toho je vidět, že boční síla na přední části je stejná pro stacionární i pro nestacionární proudové podmínky, protože amplitudy stacionárního a nestacionárního povrchového tlaku jsou stejné. Nicméně, na zadní části je rozdíl mezi nestacionárním tlakem návětrné a závětrné strany menší než v případě stacionárním. Kvůli tomu je nestacionární boční síla na zadní straně menší oproti stacionární síle. Důsledek těchto rozdílů je nestacionární moment stáčení, který je větší než stacionární moment stáčení, na rozdíl od celkové nestacionární boční síly, která je menší než stacionární boční síla, jak je schematicky zobrazeno na Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Zvětšení momentu stáčení kvůli nestacionárnímu rozdílu tlaku [2]

2.2.3 KVANTITATIVNÍ ANALÝZA ROZLOŽENÍ POVRCHOVÉHO TLAKU NA ZADNÍ STRANĚ

Rozdíly mezi nestacionárními a kvazi-stacionárními zatíženími vznikají na zadní straně vozidla. Byl studován povrchový tlak změřený na zadní straně se záměrem zjistit, proč je nestacionární boční síla menší než jeho kvazi-stacionární aproximace v čase největšího momentu stáčení.



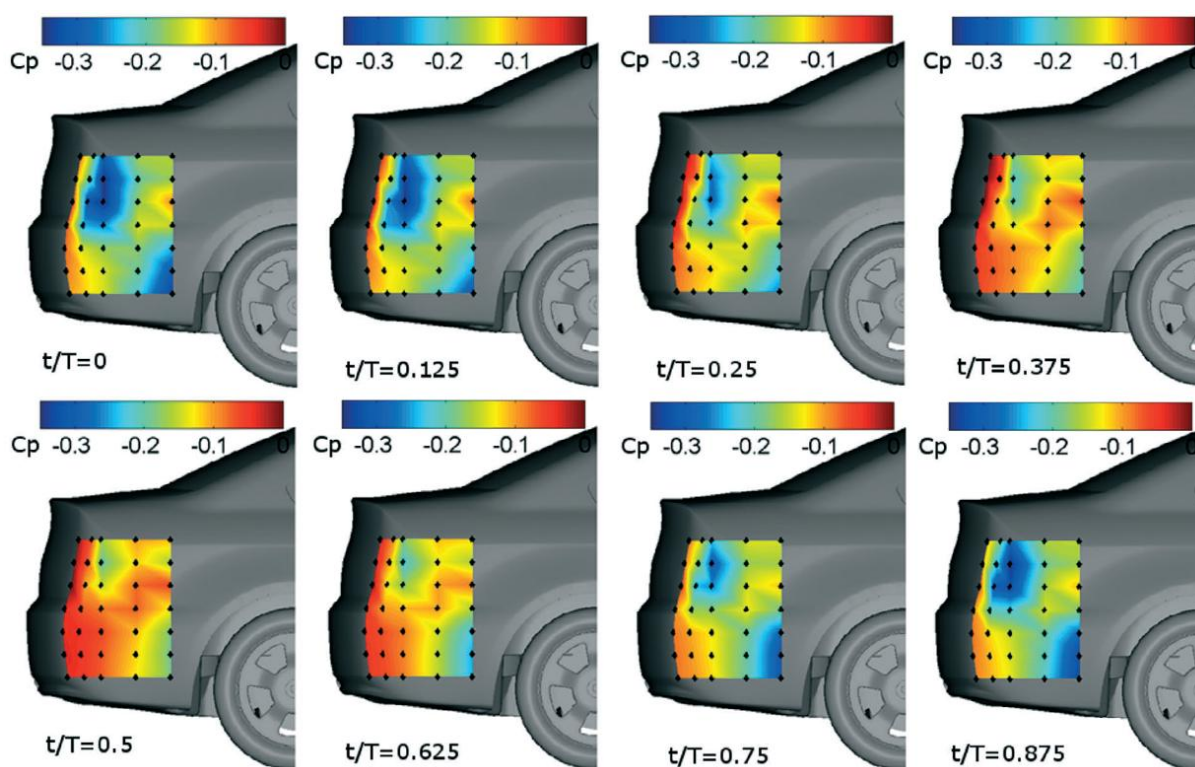
Obr. 2.11 Stacionární rozložení tlaku na návětrné (vlevo) a závětrné (vpravo) zadní straně [2]

Obr. 2.11 ukazuje stacionární rozložení tlaku pro $\beta = \pm 3,3^\circ$. Rozložení tlaku na měřené ploše není homogenní. Na návětrné straně a závětrné straně tekutina zrychluje ve vyšší oblasti směrem k zadním světlům, dokud se proud neoddělí a tlak znovu nestoupne. V nižší oblasti



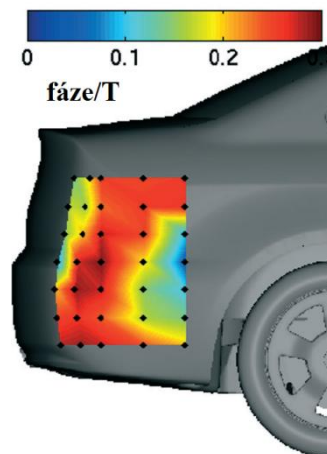
měřené plochy je nízký tlak blízko zadního kola a postupně roste směrem dozadu. Celková hladina tlaku je mnohem vyšší na návětrné straně. Zrychlení proudu ve vyšší střední oblasti a odpovídající pokles tlaku je mnohem intenzivnější na závětrné straně.

Obr. 2.12 ukazuje periodicky zprůměrované rozložení nestacionárního tlaku v různých časových bodech, kde $\beta = +3,3^\circ$ odpovídá $t/T = 0,25$ a $\beta = -3,3^\circ$ odpovídá $t/T = 0,75$. Nestacionární rozložení tlaku na zadní straně vykazuje stejné charakteristiky jako během stacionárních podmínek, což jsou skvrny nízkého tlaku ve vyšší oblasti a za zadním kolem. Velikost a síla skvrn nízkého tlaku vykazují periodické chování. I když je periodické chování očekáváno, tak rozložení tlaku v $t/T = 0,25$ a $t/T = 0,75$ neodpovídá stacionárním podmínkám v $\beta = \pm 3,3^\circ$. Rozložení tlaku při $\beta = +3,3^\circ$ spíše odpovídá nestacionárnímu rozložení tlaku mezi $t/T = 0,375$ a $t/T = 0,5$. Musí zde tedy být časové zpoždění mezi kvazi-stacionárním a nestacionárním vývojem tlaku v této oblasti.



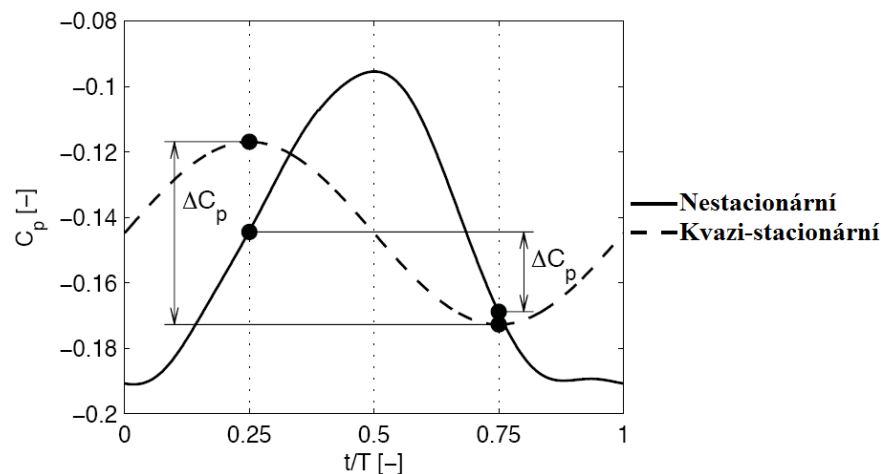
Obr. 2.12 Nestacionární, periodicky zprůměrované rozložení tlaku pro $f = 2 \text{ Hz}$ a $\beta = \pm 3^\circ$, během jedné periody [2]

V Obr. 2.14 je součet průměru všech signálů tlaku na zadní straně. Nestacionární průměr tlaku je vykreslen společně s jeho kvazi-stacionárním vývojem. Nestacionární rozložení tlaku na zadní straně sedanu DrivAer je charakterizováno oblastmi nízkého tlaku za zadním kolem a v blízkosti zadních světel, které jsou mnohem výraznější na závětrné straně. Skvrny nízkého tlaku vykazují periodické oscilace během rotace modelu. Oscilace skvrn nízkého tlaku jsou znázorněny na Obr. 2.12. Amplitudy těchto oscilací se ukázaly být větší než pro kvazi-stacionární změny natočení a vyskytují se se značným zpožděním. Fázové zpoždění je



Obr. 2.13 Fázové zpoždění mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním rozložením tlaku při $f = 2 \text{ Hz}$ a $\beta = 3,3^\circ$ [2]

nejvýraznější v blízkosti zadních světel, kde se objevuje přítok ze závětrné strany do úplavu (Obr. 2.13). Periodické chování přítoku závětrné strany vyvolává periodické oscilace povrchového tlaku na zadní straně, které jsou zvětšené a zpožděné oproti kvazi-stacionárnímu průběhu. I když je amplituda nestacionárního průběhu povrchového tlaku větší než amplituda kvazi-stacionárního průběhu, kvůli časovému zpoždění je rozdíl tlaků ΔC_p mezi návětrnou ($t/T = 0,25$) a závětrnou ($t/T = 0,75$) stranou menší než v kvazi-stacionárním případě (Obr. 2.14). Celková nestacionární boční síla na této měřené ploše je tedy zvětšená, ale kvůli zpoždění je při vrcholu natočení snížena v porovnání se stacionárními podmínkami. To vysvětluje větší amplitudu nestacionárního momentu stáčení oproti kvazi-stacionární aproximaci.



Obr. 2.14 Průměr všech periodicky zprůměrovaných signálů povrchového tlaku na měřené ploše [2]



2.3 CITLIVOST VOZIDLA NA BOČNÍ VÍTR

Vančura [3] se zabýval měřením citlivosti vozidla na boční vítr. Zkouškou citlivosti na boční vítr je hodnocena směrová stabilita vozidla během a bezprostředně po působení bočního větru. Měření bylo provedeno na polygonu Applus IDIANA ve Španělsku vybaveným řadou ventilátorů, které generovaly boční vítr. Pro experiment bylo použito experimentální vozidlo, které vycházelo z modelu Škoda Roomster 1.4 l, 51 kW TDI, na kterém byla nainstalována zařízení pro měření jízdní dynamiky vozidla, měření silových účinků ve stopě pneumatiky všech čtyř kol a měření povrchového tlaku na karoserii vozidla. Citlivost na boční vítr byla řízena úpravou tvaru karoserie vozidla.

2.3.1 MĚŘENÉ KONFIGURACE

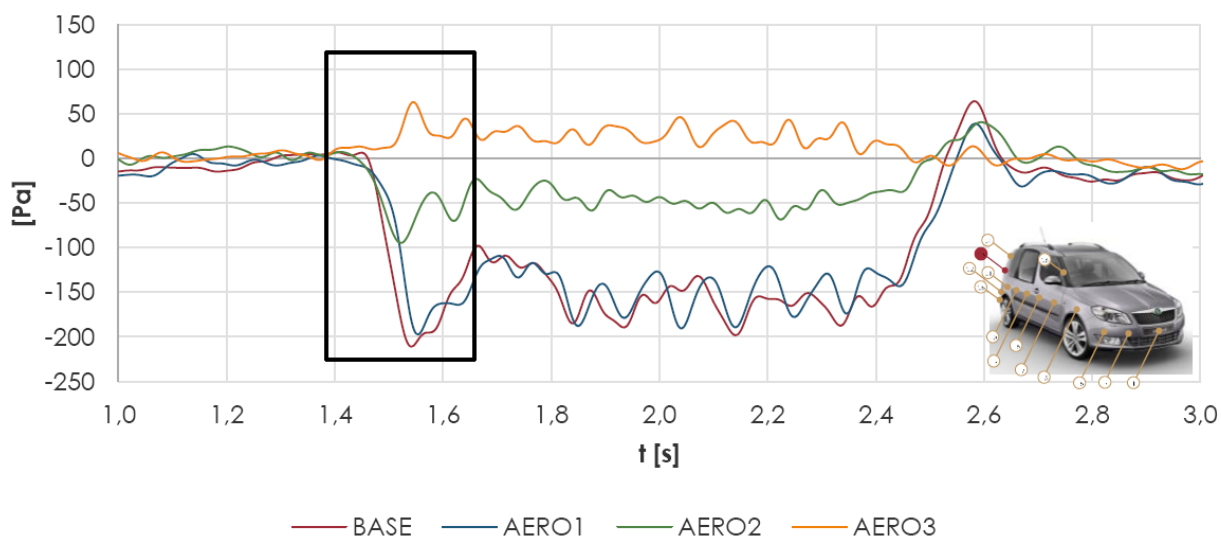
Konfigurace Base je nejvíce podobná sériovému stavu. Aerodynamická konfigurace Aero 1 byla navržena pro zvýšení momentu stáčení se záměrem zvýšit sledovaná kritéria hodnocení citlivosti na boční vítr. Aero 2 mělo snížit moment stáčení a snížit tak sledovaná kritéria hodnocení citlivosti na boční vítr a konfigurace Aero 3 měla extrémně snížit moment stáčení a výrazně snížit sledovaná kritéria hodnocení citlivosti na boční vítr.



Obr. 2.15 Konfigurace Base (vlevo nahoře), Aero 1 (vpravo nahoře), Aero 2 (vlevo dole), Aero 3 (vpravo dole) [3]

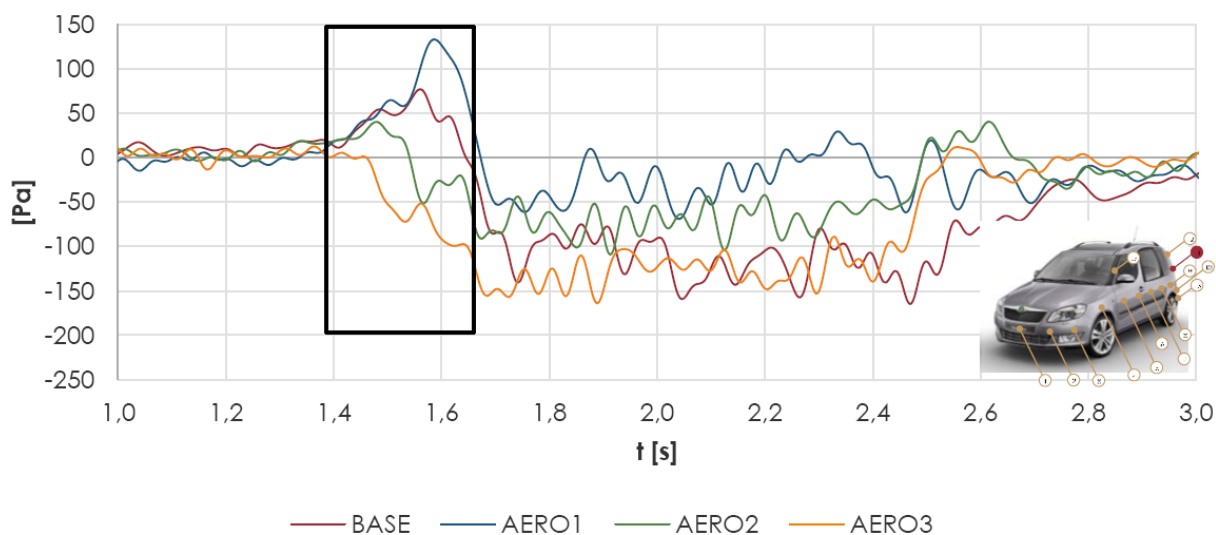
2.3.2 VLIV NESTACIONÁRNÍCH JEVŮ NA CITLIVOST NA BOČNÍ VÍTR

Pomocí snímačů umístěných na vozidle byly naměřeny průběhy tlaků jednotlivých variant karoserie. Porovnání tlaků návětrné a závětrné strany na zadním sloupku je zobrazeno na Obr. 2.16 a Obr. 2.17.



Obr. 2.16 Průběh tlaku na návětrné zadní straně [3]

Z těchto grafů je vidět, že, když je vozidlo náhle vystaveno bočnímu větru od ventilátorů, dojde k přechodovému jevu, který výrazně ovlivní chování vozidla. Na začátku poryvu tlak na zadní části vozidla dosáhne extrémních hodnot a až poté se ustálí na normálních hodnotách, což vede k nárůstu momentu stáčení na začátku poryvu větru.

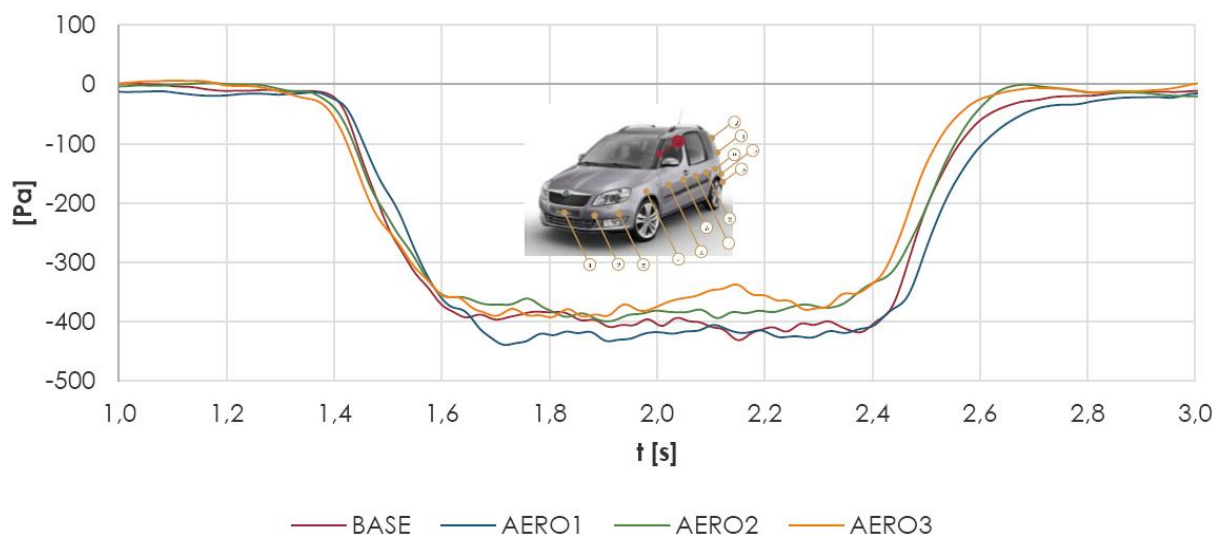


Obr. 2.17 Průběh tlaku na závětrné zadní straně [3]

Úprava Aero 1 způsobila pokles tlaku na závětrné straně (Obr. 2.18), což vedlo k navýšení momentu stáčení. Z tohoto grafu je taky vidět, že přední část vozidla reaguje téměř okamžitě na změnu okolního proudění a tlak na předním sloupku se rychle přizpůsobí v porovnání se zadní částí vozidla. Vančura tedy zjistil, že citlivost na boční vítr lze nejlépe řídit úpravou



tvaru karoserie na zadní části vozidla, zejména osazením zadní části vozidla odtrhovými hranami, jak je tomu u konfigurací Aero 2 a Aero 3.



Obr. 2.18 Průběh tlaku na závětrné přední straně [3]

2.4 DYNAMICKÝ STÁČIVÝ POHYB

Tsubokura [4] zkoumal numericky vývoj nestacionárních aerodynamických zatížení, která působí na vozidlo během změny úhlu natočení, vzhledem ke konstantnímu proudu vzduchu.

2.4.1 NASTAVENÍ

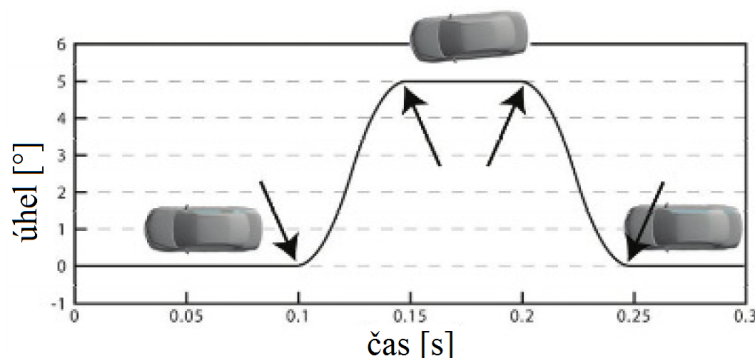
CFD (Výpočetní dynamika tekutin) je metoda, která poskytuje velké množství dat a detailních informací o proudovém poli, což může pomoci pochopit mechanismy, kterými nestacionární síly působí na vozidlo. Tato metoda byla aplikována na sedan Mazda Atenza v plném měřítku. Model obsahuje komoru motoru a komplikovaný tvar podvozku, jak je vidět na Obr. 2.19.



Obr. 2.19 Geometrie sedanu Mazda Atenza [4]

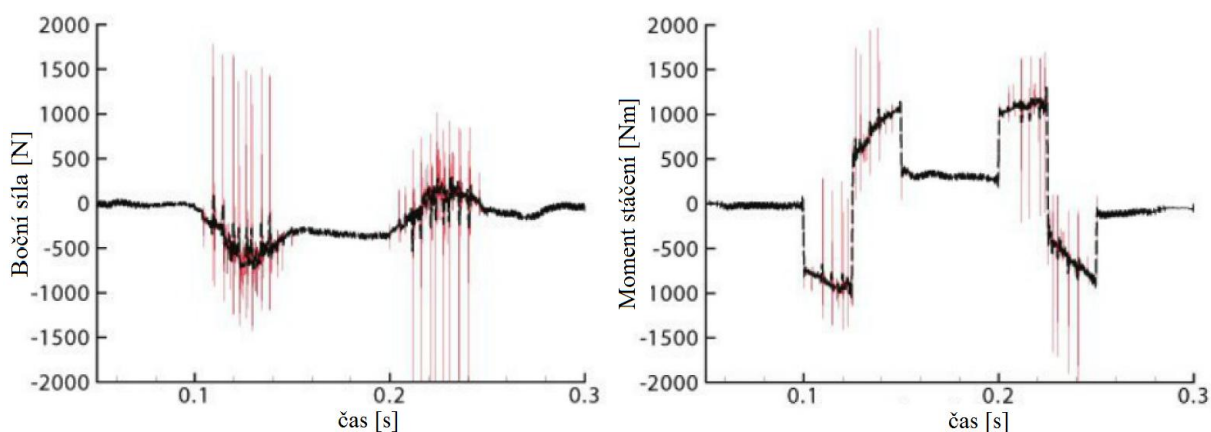
2.4.2 VYHODNOCENÍ

Úhel natočení modelu se mění vůči hlavnímu proudu z 0° na -5° a během 0,05 s proud dosáhne ustáleného stavu. Potom je úhel -5° konstantní po 0,05 s a znovu se vrací na 0° za 0,05 s, jak je vidět na Obr. 2.20.



Obr. 2.20 Průběh natočení vozidla [4]

Boční síla a moment stáčení jsou vykresleny v Obr. 2.21. Červené čáry jsou syrová data a černé čáry jsou filtrovaná data na 1 kHz. Nestacionární jevy jsou zřetelné během dynamické změny úhlu natočení v časech $t = 0,1$ s až $t = 0,15$ s a $t = 0,2$ s až $t = 0,25$ s. Nestacionární síly jsou třikrát až čtyřikrát větší než síly při stacionární poloze (mezi $t = 0,15$ s a $t = 0,20$ s).

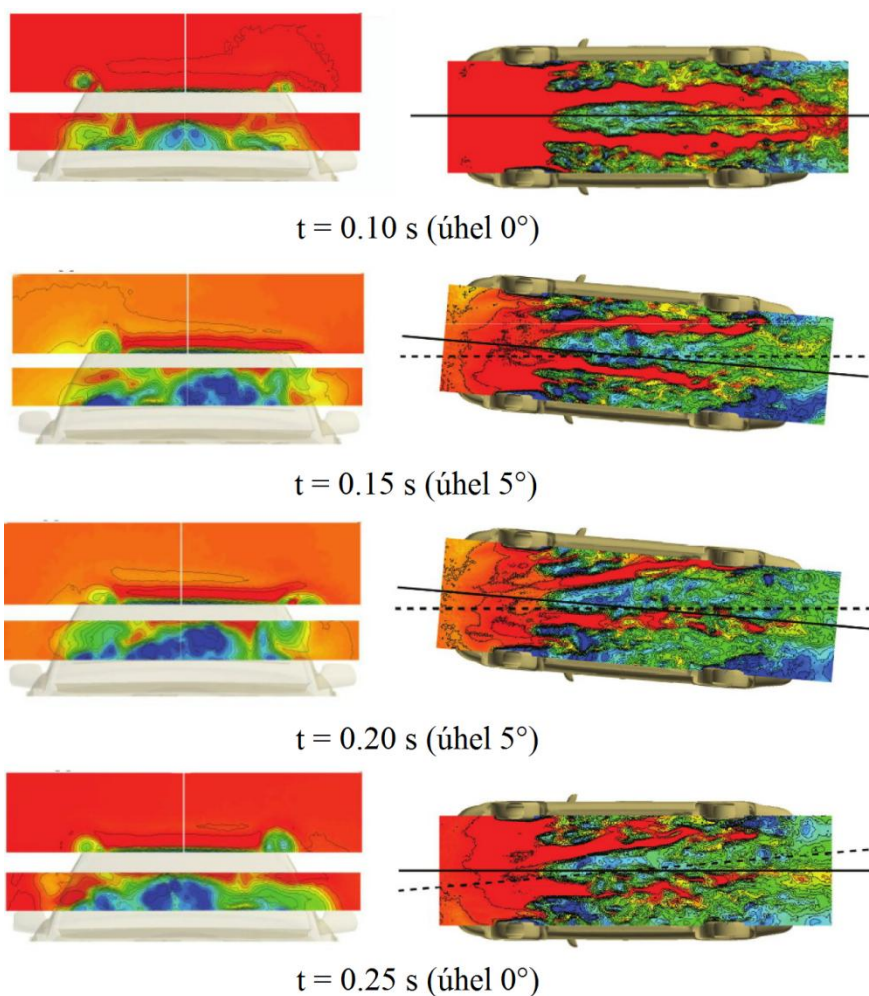


Obr. 2.21 Průběh boční síly (vlevo) a momentu stáčení (vpravo) [4]

Na Obr. 2.22 jsou zobrazena proudová pole kolem vozidla ve čtyřech reprezentativních časech ($t = 0,1$; $0,15$; $0,2$; $0,25$ s). Pod vozidlem se tvoří dva proudy vycházející z komory motoru. Dva víry se tvoří na předních sloupcích a jdou přes střechu nad zadní okno. V čase $t = 0,1$ s přímo před dynamickou změnou úhlu jsou tyto víry téměř symetrické vzhledem ke střední ose vozidla. V čase $t = 0,15$ s, když úhel natočení dosáhne -5° , víry nad zadním oknem ztratí symetrii a pravý vír se přesune dolů vedle bočního okna. Téměř stejná asymetrie je sledována v čase $t = 0,2$ s, kdy je úhel natočení -5° konstantní po 0,05 s. Symetrie vzhledem ke střední ose vozidla je znovu obnovena, když se úhel natočení vrátí zpět na 0°



v čase $t = 0,25$ s. To ukazuje, že přední část vozidla reaguje rychle na změnu úhlu natočení. Na druhou stranu, reakce proudu pod vozidlem na změnu úhlu natočení je pomalejší. V čase $t = 0,15$ s zrovna poté, co úhel natočení dosáhl -5° , je proud stále symetrický vzhledem ke střední ose vozidla, v porovnání s proudem v čase $t = 0,20$ s poté, co byl úhel -5° konstantní po $0,05$ s. Stejným způsobem je proud stále asymetrický i přes to, že už byl dosažen úhel natočení 0° v čase $t = 0,25$ s. Tyto výsledky ukazují, že v porovnání se stacionárními situacemi, kdy je úhel natočení fixní po nějakou dobu (např. při 0° v čase $t = 0,10$ s, nebo při -5° v čase $t = 0,20$ s), se objevuje drastický přechod během dynamické změny úhlu natočení. Kromě toho, časové rozdíly reakcí na úhel natočení mezi proudem nad vozidlem a pod vozidlem budou přispívat k zesílení nestacionárních sil, které působí na vozidlo.



Obr. 2.22 Zobrazení proudového pole nad zadním oknem (vlevo) a pod vozidlem (vpravo), během dynamické změny úhlu natočení [4]



3 PŘEDJÍŽDĚNÍ A MÍJENÍ DVOU VOZIDEL

Vozidlo vystavené přechodnému proudovému poli vykazuje asymetrické rozložení tlaku, které dočasně narušuje pohyb vozidla. Některá z těchto narušení, která mohou nastat během míjení nebo předjíždění dvou vozidel, ovlivňují aerodynamiku, dynamiku, řízení vozidla a mohou snížit bezpečnost a komfort jízdy. Asymetrické rozložení tlaku způsobí dočasnou změnu boční síly a momentu stáčení. Pochopení rozložení tlaku během působení přechodných proudových polí je nezbytné pro správnou optimalizaci tvaru vozidla se záměrem snížit moment stáčení.

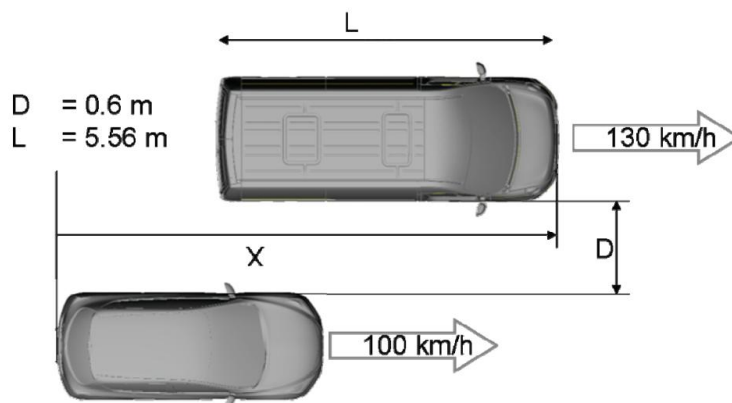
Tato kapitola se zabývá zkoumáním rozložení tlaku kolem vozidla během předjíždění a míjení dvou vozidel.

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ AERODYNAMICKÝCH EFEKTŮ BĚHEM MÍJENÍ A PŘI PŘEDJÍŽDĚCÍM MANÉVRU

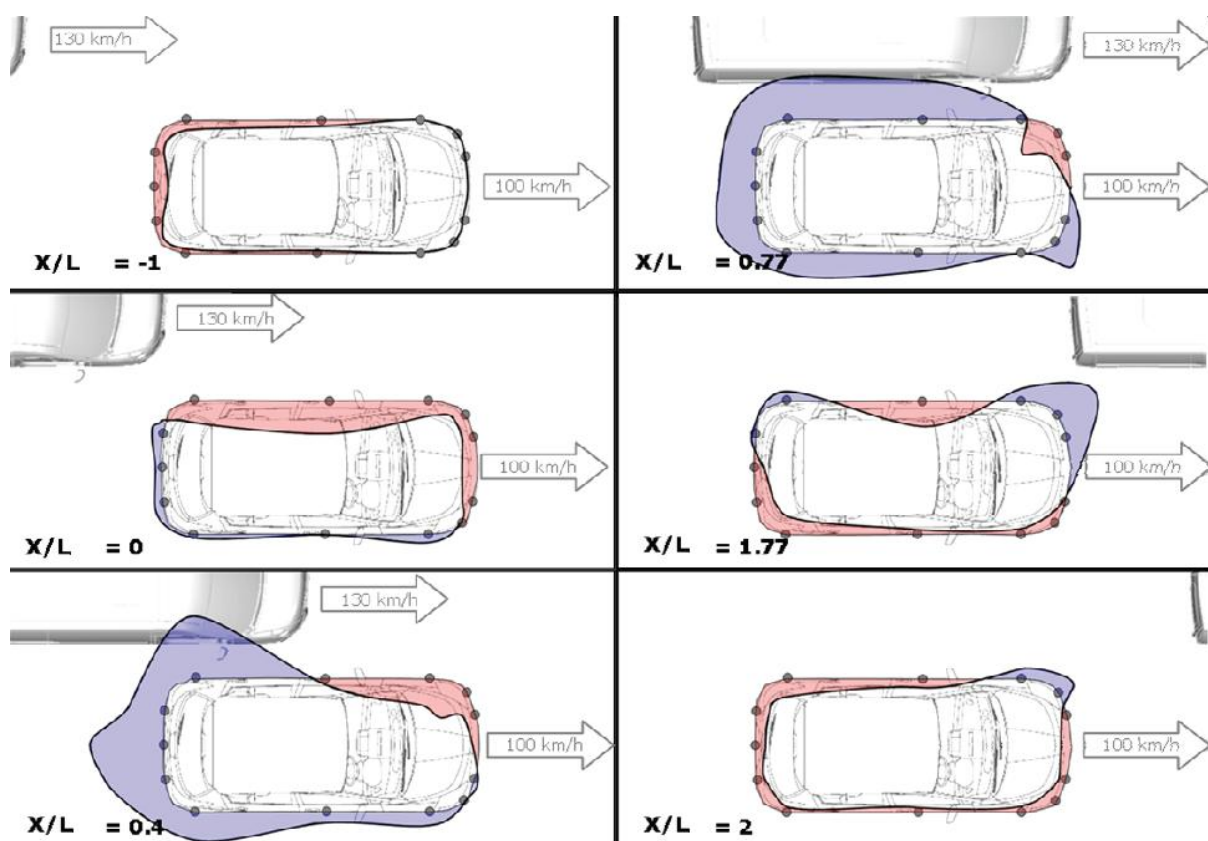
Kremheller [5] provedl jednoduchý experiment, při kterém změřil povrchový tlak během míjení dvou vozidel a při předjížděcím manévru. Napřed velká dodávka (Nissan NV400) předjíždí rychlostí 130 km/h hatchback (Nissan Tiida), který jede 100 km/h. Při druhém testu se dodávka a hatchback míjí, přičemž oba jedou proti sobě rychlostí 100 km/h. Mezi nimi je udržována stejná vzdálenost, kterou kontroluje vnější kamera připevněná na vozidlech sledující vodící čáru a snímač vzdálenosti měřící relativní vzdálenost mezi vozidly. Na hatchbacku jsou nainstalovány tlakové převodníky (které převádí tlak na analogový elektrický signál) měřící tlak na přední části, na boku přilehlém k dodávce a na zadní straně.

3.1.1 PŘEDJÍŽDĚNÍ

Hatchback s rychlostí 100 km/h byl předjížděn dodávkou jedoucí 130 km/h. Vzdálenost mezi nimi byla přibližně 0,6 m. Obr. 3.1 ukazuje orientaci vozidel, jejich vzdálenost D a délku X měřenou od zadní části auta k přední části dodávky.



Obr. 3.1 Schéma předjíždění [5]



Obr. 3.2 Zjednodušená ilustrace povrchového tlaku kolem vozidla měřená během předjíždění [5]

$X/L = -1$

Dokud je dodávka za autem, rozložení tlaku auta je symetrické, i když vlna vysokého tlaku před dodávkou jemně zvyšuje tlak na autě.

$X/L = 0$

Když se přední část dodávky dostane na úroveň auta, vysoký tlak před dodávkou působí na vnitřní stranu auta a tlačí ho pryč od dodávky. Oblast nízkého tlaku na vnitřní straně dodávky snižuje tlak na zadní část auta.

$X/L = 0,4$

Dodávka je na cestě kolem auta a nejkritičtější změna v rozložení tlaku nastane, když vysoký tlak před dodávkou působí na levý přední roh auta a nízký tlak na boku dodávky působí na zadní levý roh auta, což vede ke zvýšení momentu stáčení. Auto je tlačeno pryč od dodávky.

$X/L = 0,77$

Kladný tlak na levém předním rohu auta klesá, když je přední část dodávky a vozidla na stejné úrovni. Tlak na stranách auta klesá. Auto je tlačeno směrem k dodávce. Mezi autem a dodávkou se zvýší rychlost a sníží tlak.



$$X/L = 1,77$$

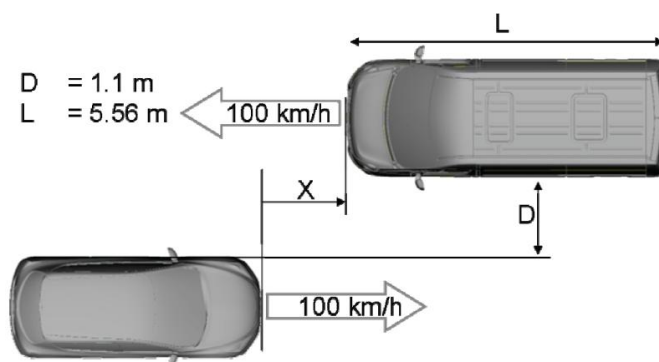
Zadní část dodávky a přední část auta jsou teď na stejné úrovni a úplav dodávky ovlivňuje levou přední část auta. Na pravé zadní části auta se tvoří oblast vysokého tlaku, která působí proti momentu stáčení.

$$X/L = 2$$

Rozložení tlaku na autě se stává opět symetrickým, když je dodávka vzdálena dvě délky od auta. Pouze úplav dodávky stále lehce působí na levý přední roh auta.

3.1.2 MÍJENÍ

V tomto případě hatchback jedoucí rychlostí 100 km/h se míjel s protijedoucí dodávkou, která měla rychlost také 100 km/h. Vzdálenost mezi nimi byla $D = 1,1$ m. X vyznačuje vzdálenost mezi přední částí auta a přední částí dodávky, jak je vidět na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Schéma míjení [5]

$$X/L = -2$$

Napřed jsou od sebe vozidla vzdálena dvě délky. Tlak na všech stranách je lehce zvýšený kvůli přicházející vlně vysokého tlaku před dodávkou. Nicméně rozložení tlaku je stále symetrické.

$$X/L = -0,5$$

Vozidla jsou ve vzdálenosti jedné poloviny délky dodávky od sebe a vlna vysokého tlaku před dodávkou působí na levou přední stranu auta. Auto je odtlačováno od dodávky.

$$X/L = 0$$

Levá přední strana auta stále zažívá vysoký tlak, zatímco na pravé přední straně se tvoří oblast nízkého tlaku.

 **$X/L = 0,8$**

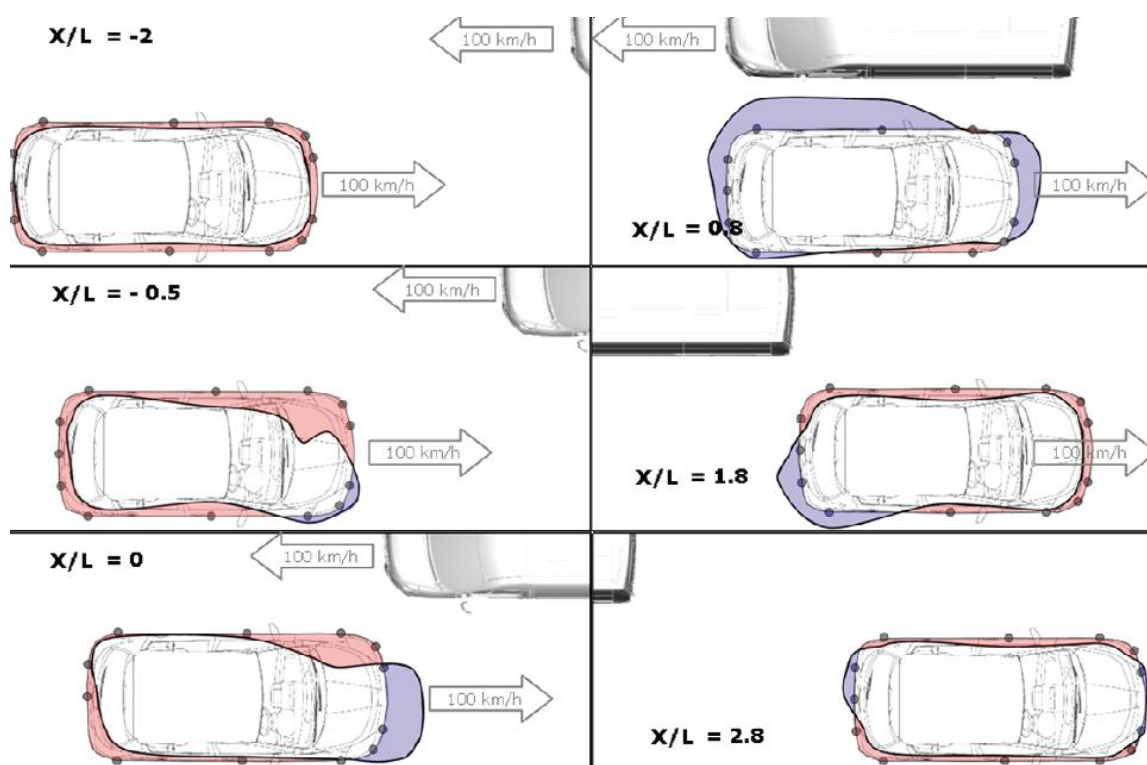
Když je dodávka na stejné úrovni jako auto, tak tato oblast nízkého tlaku expanduje přes celou vnitřní stranu až na zadní část auta. V této fázi je mezi vozidly vysoká rychlost proudění a nízký tlak, který přitahuje auto k dodávce.

 $X/L = 1,8$

Když jsou vozidla ve větší vzdálenosti od sebe, působí na zadní část auta pouze úplav dodávky, který lehce snižuje tlak.

 $X/L = 2,8$

Když jsou vozidla od sebe vzdálena jednu a půl délky auta, dodávka už nemá vliv na auto.

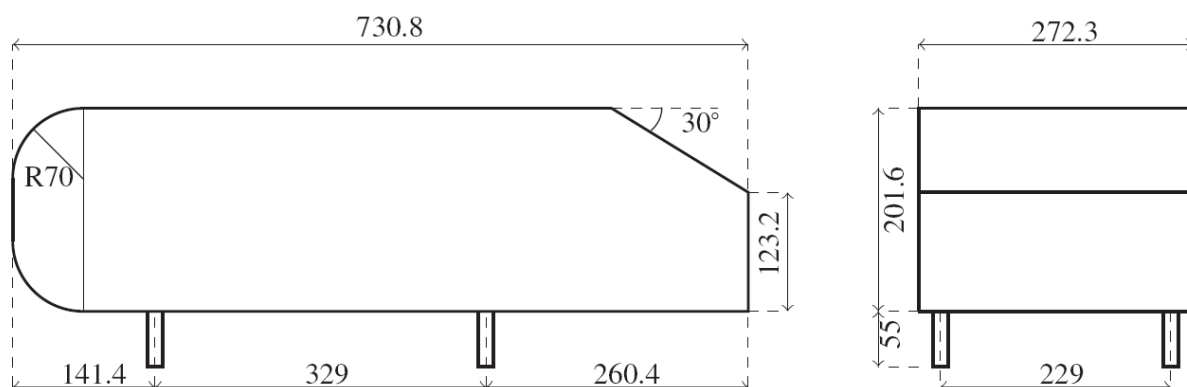


Obr. 3.4 Zjednodušená ilustrace povrchového tlaku kolem vozidla měřená během míjení [5]

3.2 NUMERICKÁ SIMULACE NESTACIONÁRNÍCH JEVŮ PŘI PŘEDJÍŽDĚNÍ

Uyestruyst [6] použil třídimensionální numerickou metodologii pro simulaci dynamického procesu předjíždění dvou vozidel. Jeho analýza umožnila vysvětlit vliv aerodynamických zatížení působících na vozidlo během tohoto manévru.

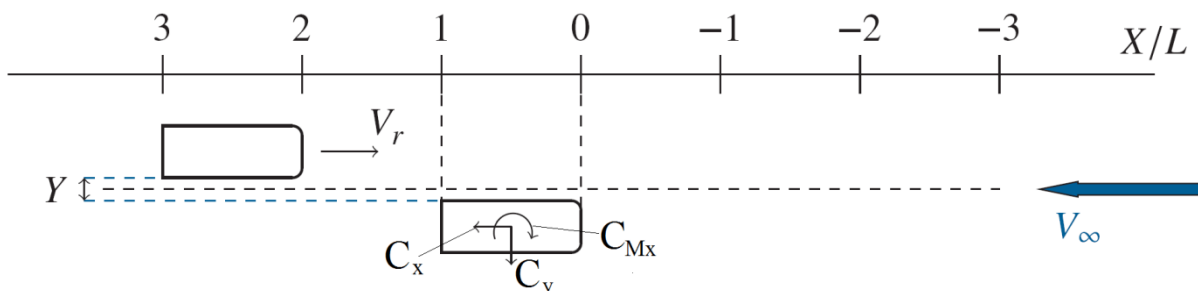
Zjednodušená geometrie modelu (Obr. 3.5) má zaoblené přední hrany a ostré zadní hrany. Zadní část modelu je podobná vozidlu typu hatchback s úhlem sklonu 30° . Reynoldsovo číslo založeno na výšce modelu je $Re = 390000$, pro rychlost 30 ms^{-1} .



Obr. 3.5 Zjednodušená geometrie vozidla [6]

3.2.1 PROCES PŘEDJÍŽDĚNÍ

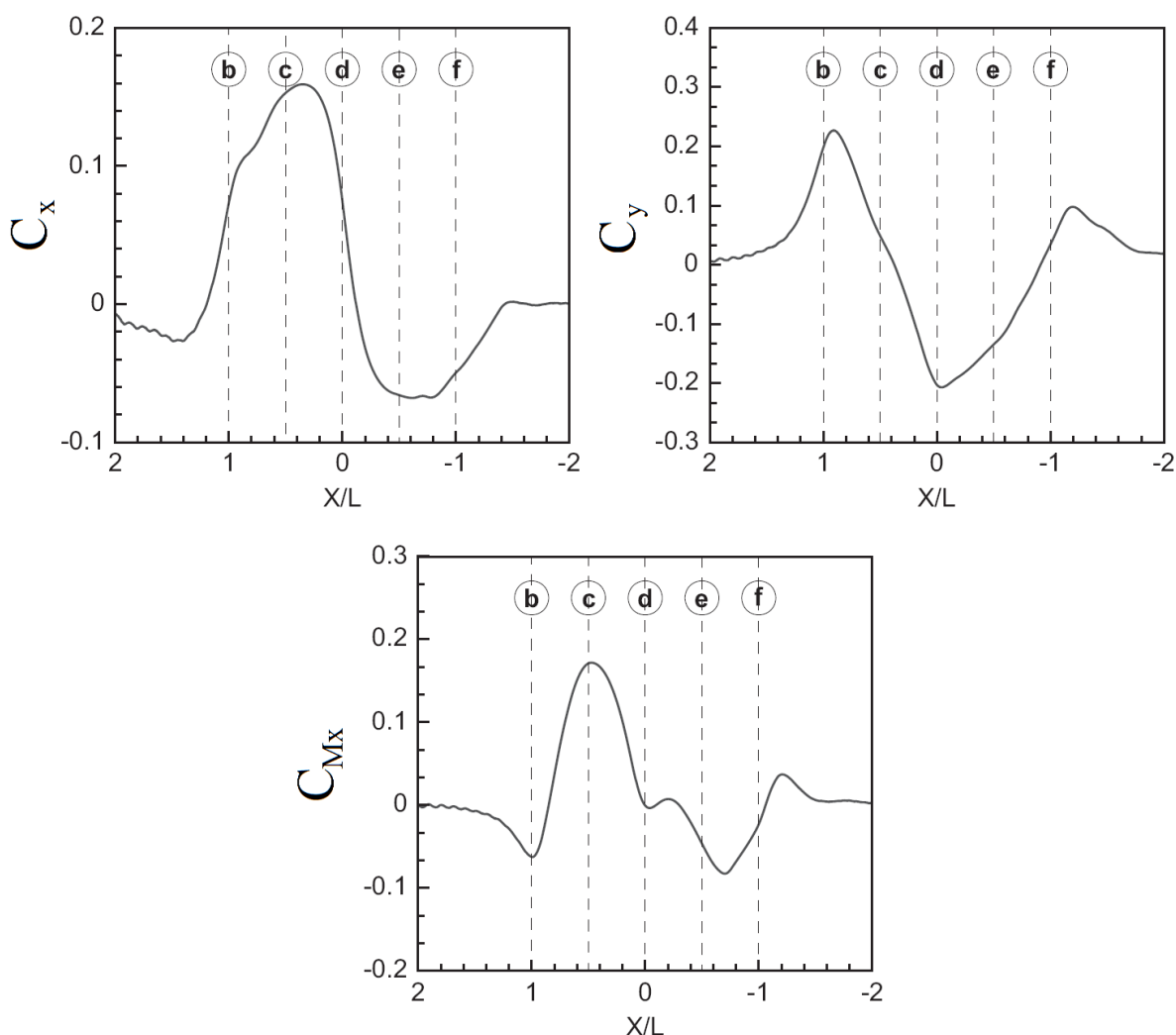
Obr. 3.6 ukazuje schéma předjíždění s vyznačenými vzdálenostmi a směry jednotlivých koeficientů aerodynamického zatížení. Jeden model je stacionární (model A) umístěný uprostřed délky větrného tunelu a druhý pohybující se model (model B) je na začátku výpočtu umístěn 5 délek za modelem A a 5 délek před modelem A na konci výpočtu. Jako vstupní podmínka je nastavena rychlost V_∞ odpovídající rychlosti modelu A. Model B je uveden do pohybu relativní rychlostí V_r . Vzdálenost mezi modely je označena Y a délka modelu je L .



Obr. 3.6 Pozice vozidel a směry koeficientů aerodynamických zatížení [6]

3.2.2 VYHODNOCENÍ

Obr. 3.7 ukazuje numerické výsledky získané pro koeficient vztlakové síly, boční síly a momentu stáčení. Na těchto třech grafech je pět svislých přerušovaných čar popsanych jako (b), (c), (d), (e) a (f) odpovídajících kritickým pozicím, pro které jsou změny podstatné a stojí za vysvětlení. Tyto pozice jsou vybrány stejně jako na Obr. 3.8. Na levé straně Obr. 3.8 jsou zobrazeny povrchové tlaky v těchto kritických pozicích. Pozice $X/L = 2$ ukazuje stacionární stav tlaku modelu A bez vlivu modelu B. Pravá strana obrázku ukazuje proudová pole kolem obou modelů.



Obr. 3.7 Průběh koeficientu aerodynamického odporu (vlevo nahoře), boční síly (vpravo nahoře) a momentu stáčení (dole) [6]

Průběh mezi $X/L = 2$ a $X/L = 1$ (b)

Na tomto úseku aerodynamický odpor nejprve pozvolně klesá a potom prudce roste. Vysoký tlak před modelem B zvyšuje tlak na zadní boční části modelu A. Potom záporný tlak na předku modelu B snižuje tlak na zadní straně modelu A. Snižuje se tím více, čím blíže jsou oba modely, kvůli zrychlení toku. Toto snížení tlaku na zadní části modelu A vysvětluje náhlé zvýšení aerodynamického odporu v místě (b), (Obr. 3.7). Boční síla roste vlivem vysokého tlaku před modelem B. Tento tlak se projeví na vnitřní straně modelu A. Moment stáčení na tomto úseku pozvolna klesá.

Průběh mezi $X/L = 1$ (b) a $X/L = 0,5$ (c)

Aerodynamický odpor stále roste kvůli nízkému tlaku, který stále působí na zadní část modelu A. Boční síla chvíli roste, než dosáhne maxima a poté začne klesat. Zlom nastane, když přední část modelu B předjede zadní část modelu A. Nízký tlak na přední části modelu B snižuje tlak



na vnitřní straně modelu A a to způsobí klesání boční síly. Kombinovaný vliv nízkého tlaku na boční zadní polovině modelu A a vysoký tlak na boční přední polovině modelu B vede k maximálním hodnotám momentu stáčení v místě (c), což je právě ve chvíli, když je přední část modelu B přesně v polovině délky modelu A (Obr. 3.7, Obr. 3.8). Kremheller [5] také zjistil, že moment stáčení dosahuje maximálních hodnot, když je přední část předjíždějícího vozidla v polovině předjížděného vozidla.

Průběh mezi $X/L = 0,5$ (c) a $X/L = 0$ (d)

Aerodynamický odpor lehce roste a potom klesá. Boční síla klesá až do záporných hodnot. Model B minul střední oblast modelu A a převažuje vliv nízkého tlaku. Model A je vtahován před model B. Vliv nízkého tlaku na vnitřní straně modelu A je nejvyšší, když jsou oba modely bok po boku, což je pozice (d). K zjištění, že boční síla dosahuje minima, když jsou obě vozidla bok po boku, došel taky Kremheller [5]. V této pozici dosahuje boční síla minimálních hodnot. Moment stáčení klesá od (c) do (d) na hodnoty kolem nuly kvůli snížení vlivu vysokého tlaku na boční straně modelu A.

Průběh mezi $X/L = 0$ (d) a $X/L = -0,5$ (e)

Aerodynamický odpor stále klesá až na hodnoty nižší, než jsou jeho stacionární hodnoty. Přední část modelu B předjede přední část modelu A. Nízký tlak na přední části modelu B sníží tlak na přední části modelu A a to způsobí pokles aerodynamického odporu. Boční síla roste ze záporných hodnot a modely se začnou navzájem odpuzovat. Moment stáčení lehce roste za pozicí (d) a potom znovu klesá. Nízký tlak působí na přední polovinu modelu A a tato část je tlačena před model B.

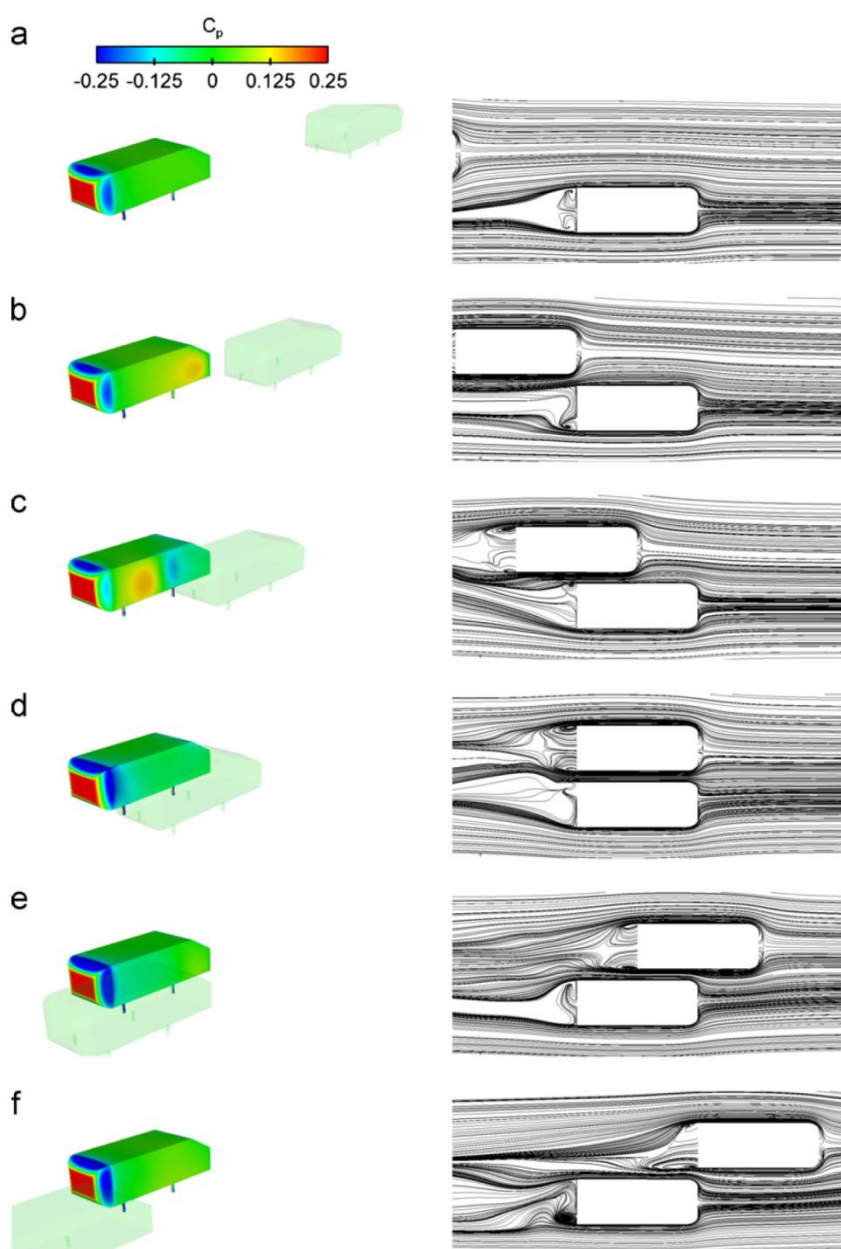
Průběh mezi $X/L = -0,5$ (e) a $X/L = -1$ (f)

Aerodynamický odpor zůstává konstantní zhruba do $X/L = 0,8$, potom začne růst. Vliv modelu B se snižuje a aerodynamický odpor se vrací zpět na jeho stacionární hodnoty. Boční síla stále roste. Moment stáčení lehce klesá a potom znovu roste.

Průběh mezi $X/L = -1$ (f) a $X/L = -2$

Aerodynamický odpor roste do jeho stacionárních hodnot. Boční síla a moment stáčení ještě vyrostou lehce do kladných hodnot, než se vrátí na nulu. Nakonec se všechny hodnoty vrátí na jejich stacionární hodnoty a model B nemá dále vliv na model A. Asymetrické rozložení tlaku kolem vozidla se tedy stane opět symetrickým, když jsou obě vozidla v dostatečné vzdálenosti.

Rozložení tlaku na předjíždějícím vozidle má velký vliv na rozložení tlaku předjížděného vozidla jak během předjíždění, tak i během míjení. Kremheller [5] zjistil, že vlna vysokého tlaku z přední strany dodávky a nízký tlak ze zadní části dodávky vytváří náhlou změnu v rozložení tlaku auta, což vede k narušení jízdní stability.



Obr. 3.8 Povrchový tlak na předjížděném modelu (vlevo) a proudové pole během předjíždění (vpravo) [6]



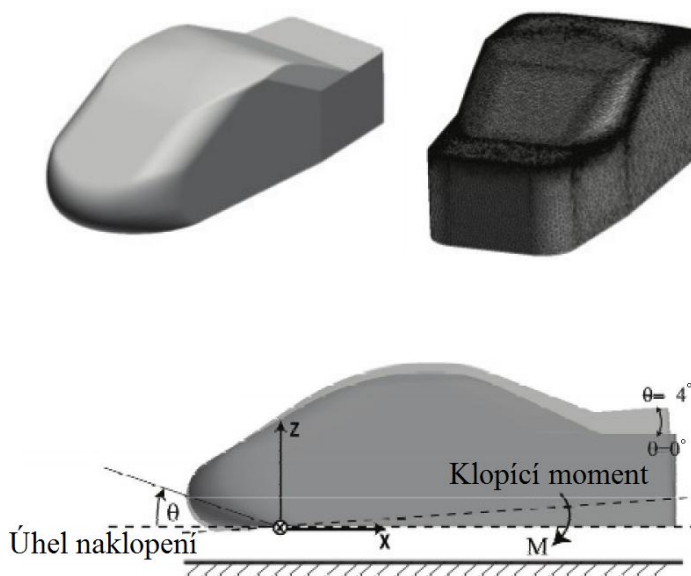
4 KLOPENÍ KAROSERIE

Při klopícím pohybu karoserie vozidla se objeví nestacionární aerodynamické jevy, které významně ovlivní stabilitu vozidla. Klopící pohyb vznikne například při brzdění z vysokých rychlostí nebo akcelerací. Mechanismy, kterými působí aerodynamická zatížení na vozidlo během tohoto pohybu, jsou zkoumány experimentálním měřením, ale i pomocí výpočetní dynamiky tekutin (CFD).

Tato kapitola zkoumá průběhy nestacionárních aerodynamických zatížení během dynamického klopícího pohybu.

4.1 DYNAMICKÝ KLOPÍCÍ POHYB

Tsubokura [4] kromě dynamického natáčení vozidla při konstantním proudu vzduchu zkoumal numericky také vývoj nestacionárních aerodynamických zatížení, která působí na vozidlo během dynamického klopícího pohybu. Zkušební model (Obr. 4.1) byl oproti reálnému sedanu v měřítku 1:20.



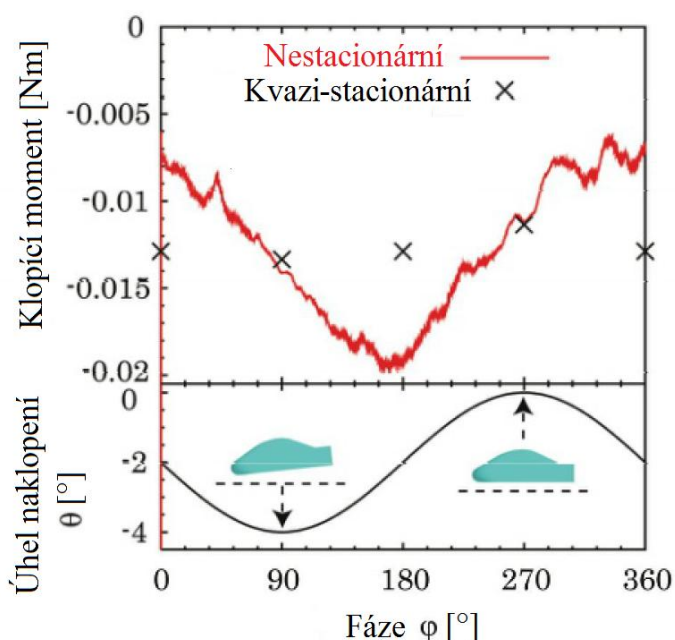
Obr. 4.1 Zjednodušená geometrie (nahore) a koordinační systém (dole) [4]

4.1.1 VYHODNOCENÍ

Fázově zprůměrovaný klopící moment působící na vozidlo během dynamického klopícího pohybu je na Obr. 4.2 zobrazen pro nestacionární případ. Výsledky jsou zprůměrované přes osm period oscilace klopení. Pro srovnání je také vykreslen kvazi-stacionární klopící moment pro stacionární úhly natočení (0° , -2° a -4°). V kvazi-stacionárním případě je klopící moment větší při $\theta = 0^\circ$ ($\varphi = 270^\circ$) a menší při $\theta = -4^\circ$ ($\varphi = 90^\circ$), přičemž jejich rozdíl je pouze $0,002 \text{ Nm}$. Na druhou stranu se během dynamické oscilace objeví veliká nestacionární síla. Moment dosahuje maxima $-0,008 \text{ Nm}$ při $\theta = -2^\circ$ a $\varphi = 0^\circ$ a minima $-0,019 \text{ Nm}$ při stejném úhlu natočení $\theta = -2^\circ$, ale při fázi $\varphi = 180^\circ$.



Důležitou vlastností je rozdíl fáze mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním případem. Nestacionární případ dosahuje maxima klopícího momentu, když se zadní část modelu zvedá ($\theta = -2^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) a minima, když zadní část klesá ($\theta = -2^\circ$, $\varphi = 180^\circ$). Tento fakt vede k důležitému výsledku, že nestacionární klopící moment způsobený nuceným klopením způsobuje stabilizování klopení vozidla. Cheng [8] sledoval chování vírů tvořících se na sloupcích a zjistil, že víry předních A-sloupků mají tendenci zesilovat oscilace klopení, zatímco víry zadních C-sloupků mají tendenci je tlumit, tedy stabilizovat. To se shoduje s výsledky, kterých dosáhl Tsubokura [4]. Aerodynamická stabilita během dynamického klopení tedy nemůže být hodnocena na základě kvazi-stacionární analýzy, ale je nutné použít dynamickou analýzu.



Obr. 4.2 Nestacionární a kvazi-stacionární průběh klopícího momentu během dynamického klopení [4]

4.2 MĚŘENÍ AERODYNAMICKÉHO VZTLAKU V TAŽNÉ NÁDRŽI

Ogawa [7] se zaměřil na získání hodnot nestacionárního aerodynamického vztlaku na přední a zadní části vozidla. Použil vibrující model ve 40 % měřítku, který byl tažen v tažné nádrži, zatímco vykonával klopící pohyb. Také provedl CFD s dynamickou sítí pro vykreslení statického tlaku během dynamického pohybu.

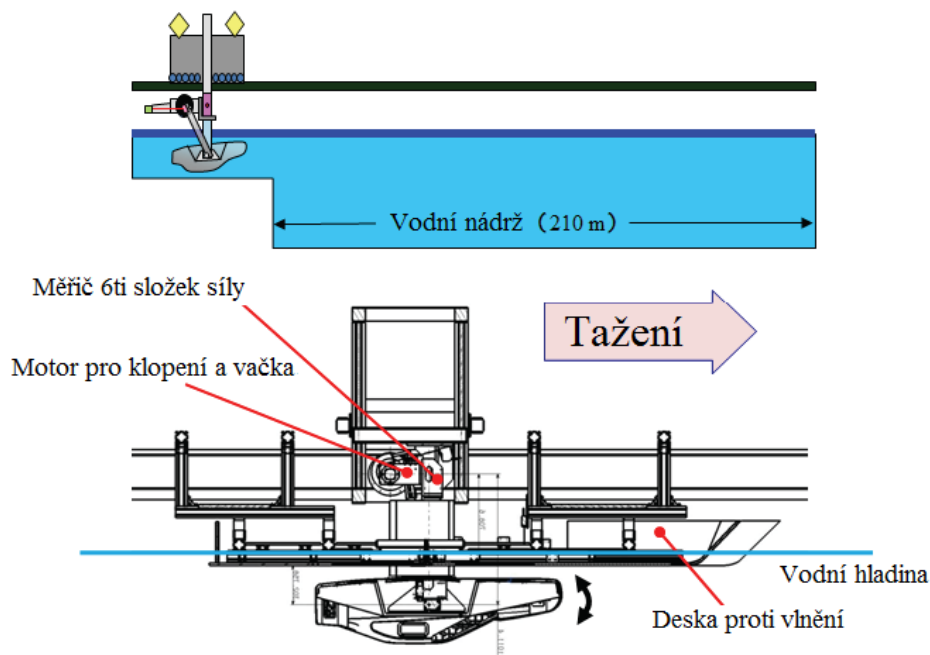
4.2.1 EXPERIMENTÁLNÍ METODA

Tato metoda byla použita pro vyhodnocení efektu nestacionárního aerodynamického vztlaku. Testování ve vodě umožňuje vytvořit proudové podmínky podobné těm ve vzduchu. Vlivem vibrací modelu vzniknou setrvačné účinky, které mohou být snadno z výsledků odečteny.

Obr. 4.3 ukazuje model, přehled tažné nádrže a testovací zařízení. Nádrž je 200 m dlouhá, 10 m široká a 5 m hluboká. Tažné zařízení obsahuje měřič šesti složek síly a připevněný model, který je tažen převráceně (střechou dolů) pod vodou. Pro snížení vlnění na hladině je



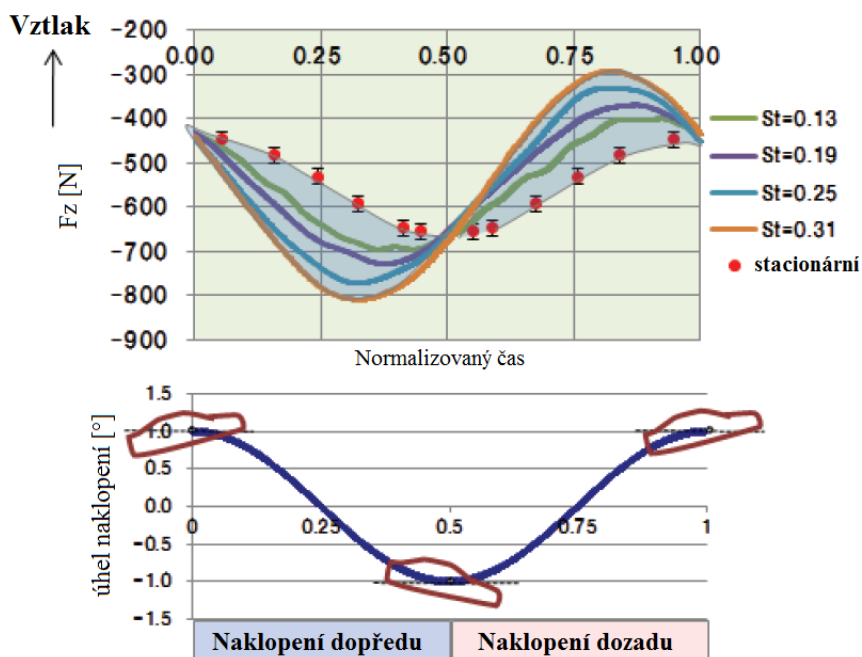
přípevněna deska o rozměrech 4,5 m × 1,8 m, 100 mm pod hladinou vody. Tím je simulován efekt vozovky, který ovlivňuje vozidlo. Zařízení, které drží vozidlo, je přípevněno k motoru a vačce na základně. Rotace vačky způsobuje klopící sinusoidní pohyb modelu s amplitudou úhlu 1° kolem osy instalované poblíž těžiště modelu. Pro eliminaci setrvačných účinků způsobených vibrací modelu byla výstupní data pro vibrace na vzduchu odečtena od výstupních dat pro tažení ve vodě. Tato čísla byla potom použita jako naměřená data.



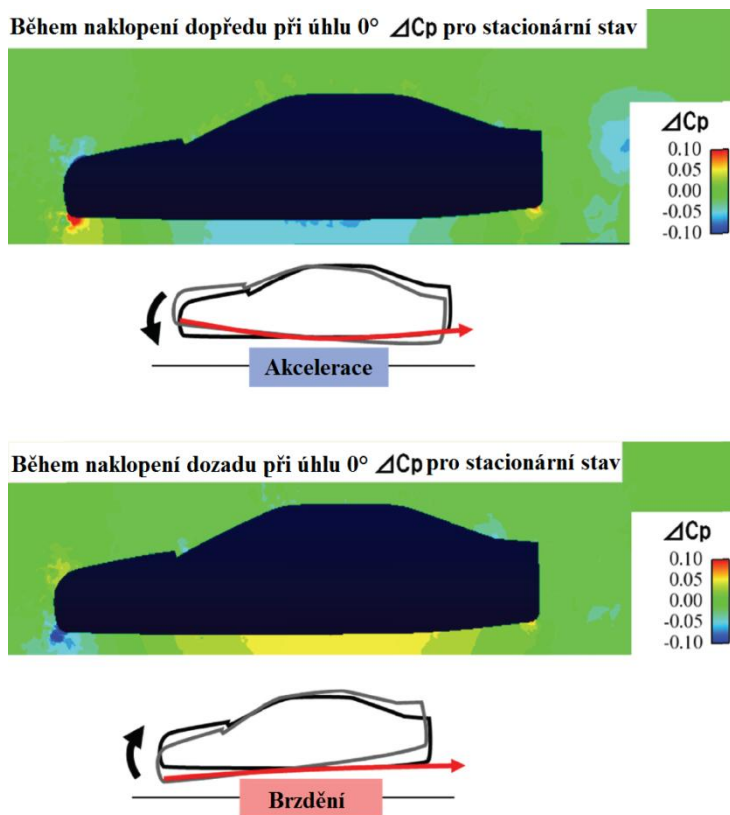
Obr. 4.3 Přehled tažné nádrže [7]

4.2.2 VYHODNOCENÍ

Byla naměřena změna nestacionárního aerodynamického vztlaku v závislosti na úhlu stoupání a Strouhalově čísle (0,13 – 0,31). Strouhalovo číslo vozidla v reálné velikosti při rychlosti 160 km/h ve duchu a s frekvencí klopení 1 Hz, je 0,11. Strouhalovo číslo je popsáno v kapitole 1.2. Obr. 4.4 ukazuje časovou změnu pro každou frekvenci klopení. Červené tečky ukazují hodnoty naměřené při stacionárním úhlu naklopení. Při zvyšování frekvence se fáze amplitudy odchyluje dále od stacionárních hodnot. Obr. 4.5 ukazuje nestacionární CFD statický tlak při naklopení dopředu a dozadu. Bylo zjištěno, že nestacionární statický tlak na podlaze spadl pod stacionární statický tlak během naklopení dopředu a stoupá nad stacionární hodnoty statického tlaku při naklopení dozadu. Během naklopení dopředu kapalina pod podlahou teče z vyšší pozice na přední straně vozidla. Zatímco se tekutina pohybuje, zadní strana auta se zvedá a tekutina pod podlahou vytéká zesponu vozidla na vyšší pozici, než kdyby se zadní část nezvedla. Tekutina pod podlahou se tedy chová, jako kdyby měla podlaha konvexní tvar (Obr. 4.5 nahoře). Tok se zrychluje a snižuje se statický tlak. Při naklopení dozadu se tekutina chová, jako kdyby měla podlaha konkávní tvar (Obr. 4.5 dole). Tok se zpomaluje a stoupá statický tlak. Nestacionární vztlaková síla je tedy způsobena iluzí zakřivení tvaru podlahy (znázorněno červenými křivkami na Obr. 4.5).



Obr. 4.4 Průběh vztlakové síly v závislosti na naklonění a Strouhalově čísle [7]

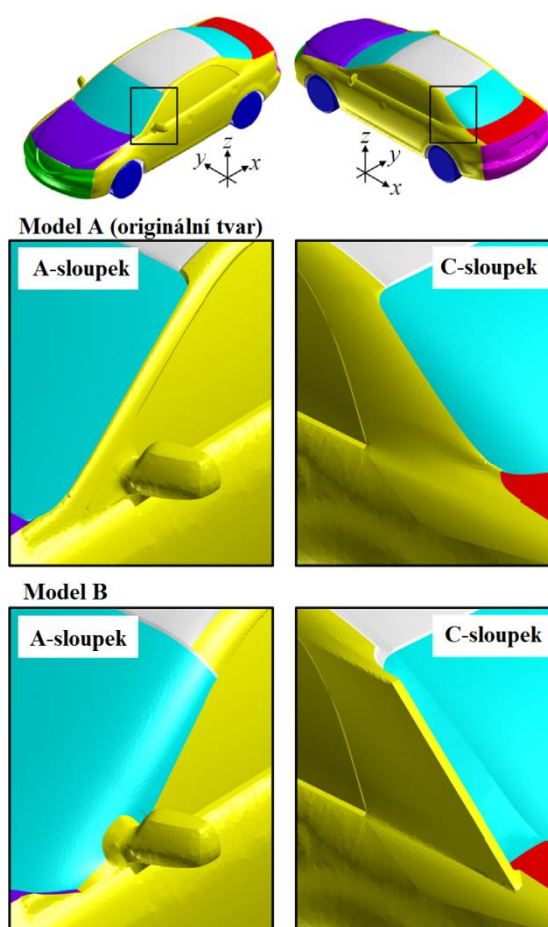


Obr. 4.5 Rozdíl stacionárního tlaku během naklápění dopředu a dozadu [7]



4.3 AERODYNAMICKÁ STABILITA SILNIČNÍCH VOZIDEL PŘI DYNAMICKÉM KLOPÍCÍM POHYBU

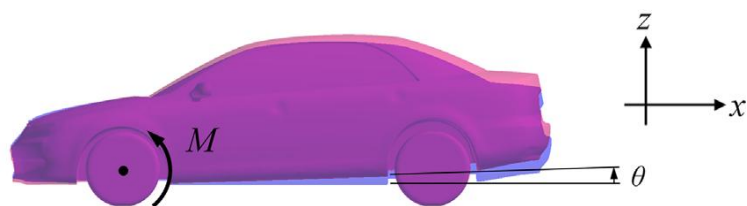
Cheng [8] numericky zkoumal mechanismus aerodynamického tlumení oscilací klopení u vozidla typu sedan. Použil software FrontFlow/red verze 2.8. Vytvořil dva modely vozidla typu sedan, aby na nich studoval vliv geometrie vrchní části těla vozidla na aerodynamickou stabilitu během dynamického klopení. Zjistil, že vír způsobený A-sloupkem a C-sloupkem mají opačnou tendenci k tomu, jak ovlivňují aerodynamickou stabilitu při klopení. Tvoření vírů na A-sloupcích zkoumal také Tsubokura [4] při numerickém zkoumání aerodynamických zatížení během dynamického otáčení.



Obr. 4.6 Konfigurace A-sloupků a C-sloupků modelu A (nahore) a modelu B (dole) [8]

4.3.1 MODEL

Obr. 4.6 ukazuje dvě konfigurace modelu vozidla typu sedan. Model B je upraven zaoblením A-sloupku a opatřen hranatějším C-sloupkem. Model B byl navržen pro dosažení vyšší aerodynamické stability. Toho bylo dosaženo úpravou originální konfigurace tvaru sloupků modelu A. Na Obr. 4.7 je znázornění aerodynamického klopícího momentu M a úhlu naklopení θ .

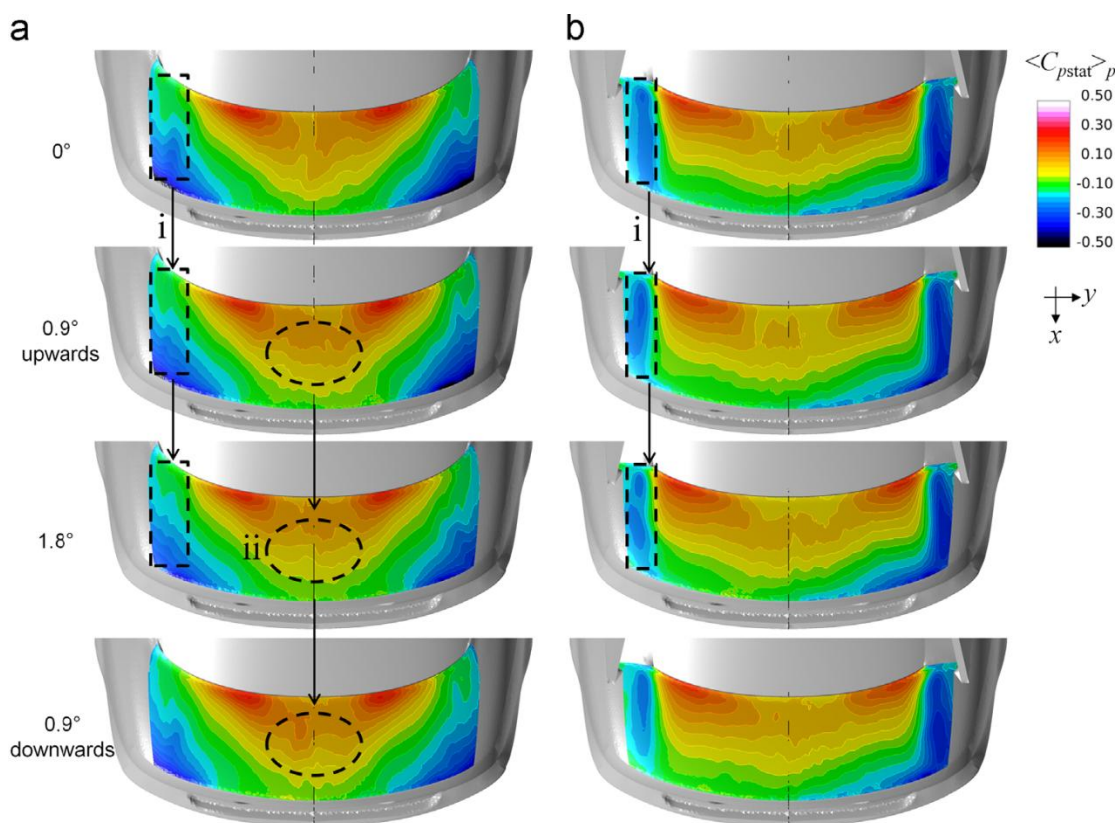


Obr. 4.7 Schematické zobrazení klopícího momentu a úhlu naklonění [8]

4.3.2 ROZLOŽENÍ POVRCHOVÉHO TLAKU NA VRCHNÍ DESCE KUFRU

Během zvedání zadní části ($\varphi = 0$ až 180°), se víry C-sloupku ztenčují kvůli snížení úhlu sklonu. Povrchový tlak na kufro způsobený vírem C-sloupku roste s úhlem θ (označeno "i" na Obr. 4.8).

S nakloněním modelu dochází ke změně úhlu sklonu A-sloupku a to způsobí zesílení víru A-sloupku modelu A. Nad kufrem rotují proti sobě víry A-sloupku a C-sloupku, které navzájem interagují. Jejich interakce způsobuje boční proud procházející mezi nimi. Tento efekt je výraznější při větších úhlech θ . Oba víry se k sobě přiblíží, protože vír C-sloupku se zvedne spolu s kufrem.



Obr. 4.8 Rozložení fázově zprůměrovaného povrchového tlaku na desce kufro pro model A (a) a model B (b) [8]

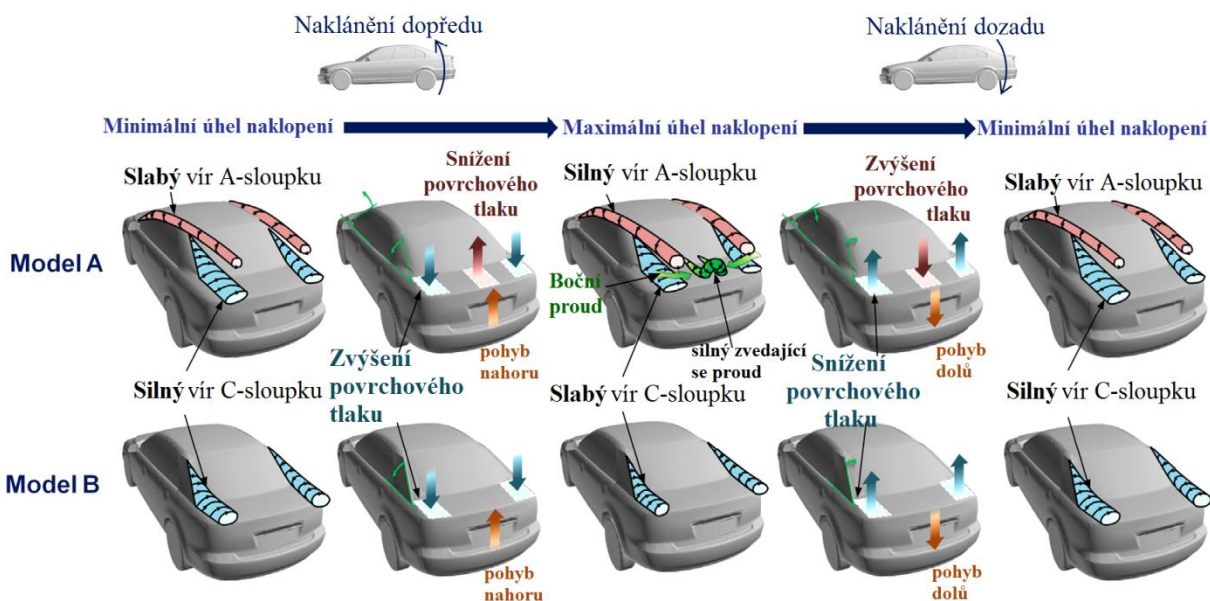


Silný boční proud podporuje formování proudů, zvedajícího se z prostřední části kufru (označen zeleně na Obr. 4.9). Proto povrchový tlak v prostřední části kufru klesá s rostoucím úhlem θ (označeno "ii" v Obr. 4.8), kvůli silnému zvedajícímu se proudu.

U modelu A tedy dochází k růstu povrchového tlaku na stranách kufru od víru C-sloupku a pokles povrchového tlaku v prostřední části kvůli zvedajícímu se proudu. Tyto tlaky se navzájem vyvažují. Během klesání zadní části ($\varphi = 180^\circ$ až 360°) probíhá vývoj inverzně.

4.3.3 AERODYNAMICKÝ TLUMÍCÍ MECHANISMUS

Obr. 4.9 shrnuje mechanismus aerodynamického tlumení oscilací klopení vozidla typu sedan. V případě obou modelů se vír C-sloupku ztenčuje s rostoucím úhlem θ . Vír C-sloupku způsobuje povrchový tlak na stranách kufru. Tento tlak roste během zvedání zadní části a zmenšuje se během klesání zadní části. To způsobuje, že vozidlo má tendenci potlačit oscilace klopení modelu – stabilizace. U modelu A vír A-sloupku roste s úhlem θ . Povrchový tlak v prostřední oblasti kufru klesá během zvedání zadní části a roste během klesání zadní části a je způsoben proudem, který se zvedá z plochy kufru. To způsobuje, že vozidlo má tendenci zesílit oscilace klopení modelu A – destabilizace.



Obr. 4.9 Mechanismus aerodynamického tlumení klopících oscilací [8]

Víry A-sloupku mají tendenci zesílovat oscilace klopení, zatímco víry C-sloupku mají tendenci je tlumit. U modelu A bylo zjištěno, že destabilizační tendence způsobená A-sloupkem má menší vliv než stabilizační tendence způsobená C-sloupkem. Vozidlo se zaobleným A-sloupkem a hranatým C-sloupkem (model B) vykazuje vyšší aerodynamické tlumení než vozidlo s opačnou konfigurací A- a C-sloupků (model A).



ZÁVĚR

Přechodové, tedy nestacionární jevy, byly pozorovány během poryvů bočního větru, předjíždění a míjení dvou vozidel a při klopení karoserie. Ve všech těchto případech byly sledovány zásadní rozdíly mezi nestacionárním a kvazi-stacionárním průběhem aerodynamických zatížení. Z toho tedy vyplývá, že pro správné vyhodnocení průběhu aerodynamických zatížení nestačí pouze měření při stacionárních podmínkách. Je nezbytné zahrnout nestacionární jevy pro správný odhad chování vozidla v těchto případech.

Sledováním proudových polí a měřením povrchových tlaků na vozidle vystaveném poryvu bočního větru byl identifikován a popsán nestacionární mechanismus. Tento mechanismus je způsoben zpožděnou reakcí úplavu na změnu úhlu natočení, zatímco přední část reaguje na změnu okamžitě. Výsledkem je nestacionární průběh aerodynamických zatížení, která jsou odlišná od kvazi-stacionárních zatížení měřených během stacionárních podmínek. Aerodynamický odpor, vztlak a klopící moment vykazují jenom malé odchylky od kvazi-stacionární aproximace a mohou být považovány za nekritické. Na druhou stranu boční síla, klonící moment a moment stáčení, které jsou relevantní pro dynamiku vozidla během bočního větru, vykazují velmi velké odchylky v porovnání s kvazi-stacionárními hodnotami. Amplituda nestacionárního momentu stáčení je větší a amplituda nestacionární boční síly je menší oproti kvazi-stacionární aproximaci zatížení. Navíc nestacionární aerodynamické zatížení vykazuje významné časové zpoždění v porovnání s kvazi-stacionární aproximací. Nestacionární boční síla a klonící moment ukázaly kladné časové zpoždění. Naproti tomu nestacionární stáčivý moment vykazuje záporné časové zpoždění.

Při předjížděcím manévru a míjení obě vozidla vytváří proudy, kterými se navzájem ovlivňují. To dočasně způsobí asymetrické rozložení tlaku, což vede k nestacionárnímu průběhu aerodynamického odporu, boční síly a momentu stáčení, které se drasticky liší od stacionárních hodnot. Když je přední část předjížděcího vozidla v polovině délky předjížděného vozidla, na zadní polovinu vnitřní strany předjížděného vozidla působí záporný tlak a na přední část působí kladný tlak, což způsobí maximální hodnoty momentu stáčení. Boční síla dosahuje minima, když jsou obě vozidla bok po boku. Rozložení tlaku se opět stane symetrickým, když jsou obě vozidla v dostatečné vzdálenosti.

Nestacionární aerodynamické jevy byly sledovány také při klopícím pohybu karoserie. Při zkoumání vírů tvořících se na sloupcích vozidla bylo zjištěno, že víry předních A-sloupků mají tendenci zesilovat oscilace klopení, zatímco víry zadních C-sloupků mají tendenci je tlumit, přičemž vliv destabilizačního účinku vírů A-sloupku je nižší než stabilizační účinek C-sloupků. Nestacionární klopící moment tedy dosahuje maxima, když se zadní část zvedá a působí proti směru pohybu a dosahuje minima, když zadní část klesá, přičemž působí také proti směru pohybu. Klopící moment způsobený nuceným klopením způsobuje stabilizování klopícího pohybu vozidla. Při klopícím pohybu byl také zjištěn nestacionární průběh vztlakové síly. Tento průběh je způsoben iluzí zakřivení tvaru podlahy. Navíc s rostoucím Strouhalovým číslem se její hodnoty vzdalují od stacionárních hodnot.

Dnes je výzkum těchto jevů teprve na začátku. Zatím dochází k postupnému vybavování moderních aerodynamických tunelů potřebným měřicím zařízením. Nejprve je tedy snaha navrhnout tvar vozidla pro snížení vlivu těchto jevů.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] THEISSEN, Pascal. *Unsteady Vehicle Aerodynamics in Gusty Crosswind* [online]. 2012, München [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1096026>. Dizertační práce. Technische Universität München.
- [2] WOJCIAK, Johannes. *Quantitative Analysis of Vehicle Aerodynamics during Crosswind Gusts* [online]. 2012, München [cit. 2015-5-7]. Dostupné z: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1095887/1095887.pdf>. Dizertační práce. Technische Universität München.
- [3] VANČURA, J. *Citlivost vozidel na boční vítr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 102 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc..
- [4] TSUBOKURA, M., T. NAKASHIMA, K. KITO a Y. SASAKI. Development of an Unsteady Aerodynamic Simulator Using Large-Eddy Simulation Based on High-Performance Computing Technique. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* [online]. 2009, s. 168-178 [cit. 2015-05-07]. DOI: 10.4271/2009-01-0007. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2009-01-0007/>
- [5] KREMHELLER, A. Experimental investigation of aerodynamic effect during overtaking and passing maneuvers. *The International Vehicle Aerodynamics Conference* [online]. 2014, Woodhead Publishing, s. 31-41 [cit. 2015-05-07]. ISBN 9780081002452.
- [6] UYSTEPRUYST, David a Siniša KRAJNOVIĆ. Numerical simulation of the transient aerodynamic phenomena induced by passing manoeuvres. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [online]. 2013, s. 62-71 [cit. 2015-05-07]. DOI: 10.1016/j.jweia.2012.12.018. ISSN 01676105. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610513000093>
- [7] OGAWA, Atsushi. Quantitative Representations of Unsteady Aerodynamic Effects on Flat Ride of Vehicles. *Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management: Proceedings of the 9th FKFS-Conference* [online]. 2013, Expert-Verlag GmbH, s. 79-90 [cit. 2015-05-07]. ISBN 9783816932536.
- [8] CHENG, S.Y., M. TSUBOKURA, Y. OKADA, T. NOUZAWA, T. NAKASHIMA a D.H. DOH. Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [online]. 2013, s. 146-156 [cit. 2015-05-07]. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.06.010. ISSN 01676105. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167610513001256>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

| | | |
|------------|----------------------------|--|
| C_{Mx} | [-] | koeficient klonícího momentu |
| C_{Mx} | [-] | koeficient klopícího momentu |
| C_{Mx} | [-] | koeficient momentu stáčení |
| C_p | [-] | povrchový tlak |
| C_x | [-] | koeficient aerodynamického odporu |
| C_y | [-] | koeficient boční síly |
| C_z | [-] | koeficient vztlakové síly |
| D | [m] | vzdálenost mezi vozidly |
| f | [Hz] | frekvence |
| F_z | [N] | vztlaková síla |
| L_{ch} | [m] | charakteristický rozměr |
| L | [m] | délka vozidla |
| Re | [1] | Reynoldsovo číslo |
| Sr | [-] | Strouhalovo číslo |
| T | [s] | perioda |
| t | [s] | čas |
| U | $[m \cdot s^{-1}]$ | charakteristická rychlost |
| V_∞ | $[m \cdot s^{-1}]$ | rychlost modelu A |
| V_r | $[m \cdot s^{-1}]$ | relativní rychlost modelu B |
| X | [m] | délka od zadní části auta k přední části dodávky |
| Y | [m] | vzdálenost mezi vozidly |
| β | [°] | úhel natočení |
| φ | [°] | fáze |
| μ | $[N \cdot s \cdot m^{-2}]$ | dynamická viskozita |
| ν | $[m^2 \cdot s^{-1}]$ | kinematická viskozita |
| θ | [°] | úhel naklopení |
| ρ | $[kg \cdot m^{-3}]$ | hustota |