



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

MODERNÍ METODY SNIŽOVÁNÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU VOZIDEL

MODERN METHODS FOR AERODYNAMIC DRAG REDUCTION OF ROAD VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB ŠARDICKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

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): Jakub Šardický

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:

Moderní metody snižování aerodynamického odporu vozidel

v anglickém jazyce:

Modern methods for aerodynamic drag reduction of road vehicles

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled a vysvětlení principu funkce aktuálně používaných metod pro snížení aerodynamického odporu vozidel, a to u modelů vozidel pro výzkumné účely i u běžných automobilů.

Cíle bakalářské práce:

1. Vysvětlení významu aerodynamického odporu při provozu automobilu.
2. Uvedení vybraných metod snižování odporu u modelů pro výzkumné účely včetně vysvětlení jejich funkce.
3. Uvedení vybraných metod snižování odporu u běžných automobilů

Seznam odborné literatury:

- [1] WASSEN, E., S. EICHINGER a F. THIELE. Simulation of Active Drag Reduction for a Square-Back Vehicle. In: KING, R. Active Flow Control II [online]. 2010 [cit. 2013-11-08]. DOI: 10.1007/978-3-642-11735-0_16. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-11735-0_16
- [2] AIDER, J-L., J-F. BEAUDOIN a J. E. WESFREID. Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators. Experiments in Fluids [online]. 2010, vol. 48, issue 5, s. 771-789 [cit. 2013-11-08]. DOI: 10.1007/s00348-009-0770-y. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00348-009-0770-y>
- [3] SONG, K. S. et al Aerodynamic design optimization of rear body shapes of a sedan for drag reduction. International Journal of Automotive Technology [online]. 2012, vol. 13, issue 6, s. 905-914 [cit. 2013-11-08]. DOI: 10.1007/s12239

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 práce se zaměřuje na shrnutí prvků, které přispívají ke snížení aerodynamického odporu u vozidel. Aerodynamický odpor je přibližně jednou třetinou celkového odporu vozidla. V 21. století je velká snaha eliminovat přebytečné spalování a spotřebu vozu a právě zde hraje odpor vozu velkou část. Pro analýzu se již dnes používají počítačové simulace, které mnohonásobně zvyšují efektivitu a rychlost konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Prvky snižující odpor vozidla

Aerodynamický odpor

OpenFoam

CFD

ABSTRACT

This work is focused on the summary of the elements that contribute reducing aerodynamic resistance of vehicles. Aerodynamic drag is about one-third of the total resistance of the vehicle. Just today, in the 21st century it is a big effort to eliminate excess combustion and consumption of the car, and here plays a big part of the resistance of the vehicle. For analysis are already using computer simulations that greatly increase the efficiency and speed of construction.

KEYWORDS

Elements of reducing the drag of the vehicle

Aerodynamic drag

OpenFoam

CFD



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠARDICKÝ, J. *Moderní metody snižování aerodynamického odporu vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. XY 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 15. května 2015

.....

Jakub Šardický



PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Čavojovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.



OBSAH

Úvod	6
1 Rozdělení jízdních odporů	7
1.1 Odpor valení	7
1.2 Odpor sklonu	8
1.3 Odpor zrychlení	8
1.4 Aerodynamický odpor	9
1.5 Součinitel vzdušného odporu c_d	10
2 Testování odporu vozidla	11
2.1 Aerodynamický tunel	11
2.2 Proudění tekutin pomocí CFD (Computational Fluid Dynamics)	11
2.2.1 Princip a možnosti CFD	12
2.3 OpenFOAM (Computational Fluid Dynamics)	12
2.4 Kontrola simulačních analýz vůči testům v aerodynamickém tunelu	12
3 Proměnlivá hodnota c_d u vozů Porshe	14
3.1 Porsche „Active Aerodynamic“	14
3.1.1 Variabilní přední spoiler	17
3.1.2 Variabilní křídlo	18
4 Aerodynamické optimalizace nových vozů značky Mercedes-Benz	18
4.1 Regulace sání a proudění v podběžích	19
4.2 „The Blue Efficiency“ technologie s hodnotou $C_d=0,22$	20
5 Snížení odporu v prostoru kol	20
5.1 Vyšetřování průtoku oblouku okolo kola automobilu	21
5.2 Analýza:	21
5.3 Kryty ráfků kol	21
5.4 Ostatní testované prvky	21
6 Testování velikosti odporu v závislosti na změně karosérie	23
7 Snižování odporu u velkých vozidel pomocí technologie Active flow control	24
7.1 Testování	25
8 Relativní poměr jízdního odporu	27
Závěr	29
Seznam použité literatury	30
Seznam použitých zkratk a symbolů	31



ÚVOD

Problematikou jízdního odporu a aerodynamiky se řada světových automobilových společností zabývá již desítky let. O této problematice již vyšlo mnoho pojednání a studií jak již o sériově vyráběných vozech, tak i o konkrétních technologiích na automobilech.

Hlavním vývojovým oddělením od 50. let 20. století, byly závodní automobily, kde poměr mezi výkonem, dobrými jízdními vlastnostmi a nízkým jízdním odporem, rozhodoval o výhodách mezi jednotlivými automobily závodníků. Právě kvůli výhodě oproti konkurenci konstrukční kanceláře vyvíjeli nové karoserie, přidávali prvky a přejímali nové technologie i z jiných odvětví (např. leteckého průmyslu) než jen z automobilového.

Tyto řešení, které snižovaly odpor vozidel, byly nadále aplikovány i u jiných společnosti a postupem času i v sériové výrobě osobních a užitkových vozů. Právě teď v 21. století je u automobilů významná snaha snižovat ekologickou stopu vozidla, je tedy sledována spotřeba paliva a emise motoru, které auto produkuje. Tato ekologická stopa je závislá na odporu vozidla.

Ve své práci vysvětlím význam jednotlivých jízdních odporů, princip testování v aerodynamickém tunelu, moderní metody počítačové analýzy a shrnu prvky, které se v současnosti používají ke snížení odporu v sériové výrobě, při testování v aerodynamickém tunelech a počítačových analýzách.

1 ROZDĚLENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ

Jízdní odpor je výslednicí všech sil, které působí proti směru pohybu vozidel. Některé tyto síly působí jen za specifických podmínek. [1] Tyto odpory, či síly, můžeme rozdělit na:

- Valivé síly
- Aerodynamické síly
- Stoupání
- Zrychlení

Rovnováha sil v horizontálním směru:

$$F = Of + Os + Ovz + Oa \quad [N] \quad [1]$$

Kde :

F_x [N] hnací síla v podélném směru

O_f [N] odpor valení

O_s [N] odpor sklonu

O_{vz} [N] odpor vzduchu

O_a [N] odpor zrychlení

Rovnováha sil ve vertikálním směru:

$$F_{zP} + F_{zZ} - G_v = 0 \quad [N] \quad [1]$$

Kde:

F_{zP} [N] síla působící na přední nápravu

F_{zZ} [N] síla působící na zadní nápravu

G_v [N] tíha vozidla

1.1 ODPOR VALENÍ

Odpor valení vzniká jako reakce na deformaci pneumatik při kontaktu kola s tuhou podložkou. [1] Plocha, kterou vytváří styk kola s podložkou, se nazývá stopa. Tato stopa má v ideálním případě tvar elipsy. V přední části elipsy dochází ke stlačování pláště a následně v zadní části stopy dochází k opětovnému návratu do původního tvaru pneumatiky. Při této deformaci dochází ke ztrátám, které se uvolňují formou tepla.

Síly potřebné k deformaci pneumatiky jsou mnohem větší než síly, jimiž působí pneumatika zpět na vozovku při navracení do původního tvaru. Měrné tlaky v přední části stopy



pneumatiky jsou tudíž větší, a proto je výslednice sil ve stopě pneumatiky posunuta o rameno s hodnotou „e“.

$$F_z \cdot e = O_f \cdot r \quad [\text{N.m}] \quad [1]$$

$$O_f = F_z \cdot e / r d \quad [\text{N}]$$

$$e / r d = f$$

kde:

f [1] součinitel odporu valení

Hodnota odporu valení je závislá na mnoha vnitřních a vnějších podmínkách.

Koeficient f stoupá, při vzrůstající rychlosti automobilu. Z důvodů vysoké rychlosti se pneumatiky nestačí po deformaci vrátit do původního stavu.

1.2 ODPOR SKLONU

Odpor sklonu, je jedním z podmíněných odporů. [1] Vzniká z teorie rozkladu silového působení na nakloněné vozovce. Tento odpor se označuje O_s .

U vozidla, které se pohybuje po nakloněné rovině, která svírá s vodorovnou rovinou úhel α se tíhová síla působící na vozidlo, označována G_v rozkládá na složky F_x a F_y .

Síla F_x je rovnoběžná s nakloněnou rovinou. Při jízdě proti stoupání působí proti pohybu vozidla a při jízdě po směru klesání působí po směru pohybu.

Tato síla se dá vyjádřit jako:

$$F = G_v \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad [1]$$

kde:

G_v [N] tíha vozidla

m [kg] hmotnost vozidla

g [m.s⁻²] tíhové zrychlení

1.3 ODPOR ZRYCHLENÍ

Odpor zrychlení vzniká při změně rychlosti vozidla. [1] Tento odpor vzniká z působení setrvačných sil.

Jeho velikost se dá určit pomocí rovnice:

$$O_{zr} = O_{pos} + O_{rot} \quad [\text{N}] \quad [1]$$



Kde:

O_{pos} odpor daný posuvným zrychlením

O_{rot} odpor rotujících částí

Odpor daný posuvným zrychlením celého vozidla je dán vztahem:

$$O_{pos} = mv \cdot a \quad [N] \quad [1]$$

Pro překonání odporu který vzniká v rotujících částech vozidla je při změně rychlosti potřeba dovést na kola kroutící moment M_{zk} , který je dán součtem všech rotujících částí.

$$M_{zk} = M_{zSM} + M_{zPÚ} + \sum M_{zKi} \quad [1]$$

Kde:

M_{zSM} [N.m] Moment pro zrychlení rotujících částí motoru

$M_{zPÚ}$ [N.m] Moment pro zrychlení rotujících částí převodových ústrojí

$\sum M_{zKi}$ [N.m] Moment pro zrychlení rotujících částí motoru

Odpor zrychlení rotujících částí je možno vyjádřit:

$$O_{rot} = M_{zK} / rd \quad [1]$$

Celkový odpor zrychlení O_{zr} je:

$$O_{zr} = mv \cdot a + M_{zK} / rd = \delta \cdot mv \cdot a \quad [N] \quad [1]$$

kde:

δ [1] součinitel vlivu rotujících částí.

1.4 AERODYNAMICKÝ ODPOR

Aerodynamický odpor je soustavu sil, které působí na automobil, které se pohybuje určitou rychlostí prostředím. [1]

Velikost těchto sil ovlivňují tyto faktory:

- Tvar vozidla
- Povrch vozidla
- Rozměry vozidla
- Prostředí, ve kterém se vozidlo pohybuje
- Rychlost prostředí (náporová rychlost)

Tyto síly jsou závislé na dynamickém tlaku, který se určuje pomocí Bernoulliho rovnice, na čelní ploše automobilu S_x a součiniteli odporu c_d .



Odpor vzduchu je pak možno vyjádřit:

$$Ov = pd \cdot Cx \cdot Sx = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot cd \cdot Sx \quad [1]$$

kde:

ρ [kg.m⁻³] hustota vzduchu

v_x [m.s⁻¹] náporová rychlost, tj. rychlost proudícího vzduchu ve směru osy x. Za předpokladu bezvětří tato rychlost představuje rychlost vozidla.

c_d [1] součinitel odporu vzduchu

S_x [m²] čelní plocha vozidla

pd [Pa] dynamický tlak

Pokud předpokládáme průměrné atmosférické podmínky, můžeme vztah upravit takto:

$$Ov = 0,05 \cdot cd \cdot Sx \cdot V \quad [1]$$

Kde:

V [km.h⁻¹] náporová rychlost

S_x je plocha promítnutá z přední roviny automobilu, která je kolmá na vozovku.

Hodnotu čelní plochy S_x lze získat několika metodami:

- Pomocí výkresové dokumentace výrobce
- Pomocí planimetrie
- Přibližným výpočtem:
 - Pro osobní automobil: $S_x = (0,7 - 0,85) \cdot \text{šíře vozu} \cdot \text{výška vozu}$ [m²]
 - Pro nákladní vozy atd. $S_x = (0,8 - 0,95) \cdot \text{šíře vozu} \cdot \text{výška vozu}$ [m²]
- Pomocí moderních počítačových analýz

1.5 SOUČINITEĽ VZDUŠNÉHO ODPORU C_D

Součinitel vzdušného odporu závisí v největší míře na tvaru vozidla. [2] Hodnoty c_d se určují pomocí aerodynamického tunelu, nebo pomocí moderních CAD simulací. Právě tento vysoký koeficient způsobuje u vozidel vysokou spotřebu paliva a právě proto je snaha ho co nejvíce snížit.

Tab. 1 Hodnoty c_d pro různé tělesa [2]

c_d	Položka
0.25	Toyota Prius
0.295	Kulka
0.75	Raketa

1.0	Cyklista
1.0–1.3	Stojící muž

2 TESTOVÁNÍ ODPORU VOZIDLA

2.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Aerodynamický tunel je zařízení, které umožňuje vytvářet vzdušný proud s požadovanými vlastnostmi. [3]

Způsoby měření:

- Na povrch měřeného tělesa připevníme speciální látky či provázky, jež při proudění ukazují směr proudění vzduchu a jeho rychlost.
- Do proudu přidáme barevný dým či barvivo, které následně můžeme filmovat či fotografovat.
- Do tunelu umístíme Pitotovu trubici, pomocí níž měříme statický a dynamický tlak

Typy aerodynamických tunelů

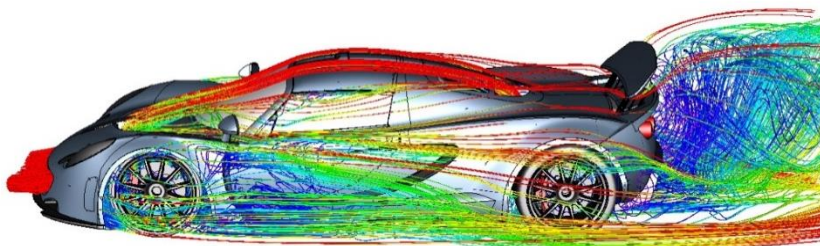
- Otevřený - probíhá v prostoru
- Uzavřený - probíhá v uzavřeném prostoru

Součásti tunelu:

- Měřicí prostor
- Dýza a kolektor – slouží k regulaci rychlosti proudění
- Ohybové lopatky a usměrňovač – slouží k usměrnění proudu vzduchu.

2.2 PROUDĚNÍ TEKUTIN POMOCÍ CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Simulace proudění jsou rychle se rozvíjející obor. [4] Tyto analýzy, které mají počátek v oblasti návrhu konstrukcí letadel, nacházejí v současné době uplatnění v automobilovém průmyslu a i v takových oborech, jako je stavebnictví, výroba klimatizačních jednotek nebo návrh interiérů. K simulacím se například používají programy od společností Autodesk, Solidworks, ANSYS.



Obr. 1 Počítačová simulace proudění [5]

2.2.1 PRINCIP A MOŽNOSTI CFD

Numerické simulace a analýzy vycházejí z fyzikálního popisu pohybu tekutiny, který je dán základními zákony zachování:

- zákon zachování hmoty
- zákon zachování hybnosti
- zákon zachování energie

Ty lze vyjádřit matematicky pomocí rovnice kontinuity, rovnice přenosu hybnosti a rovnice přenosu energie. Získáváme tak soustavu nelineárních parciálních diferenciálních rovnic. Tato soustava je ještě doplněna o konstituční vztahy, které popisují termodynamické vlastnosti proudící tekutiny. V případě turbulentního proudění jsou jednotlivé členy rozděleny na střední hodnotu a okamžitou flukтуаční složku. Tím se nám v soustavě rovnic objevují další neznámé (korelace fluktuací tlaku a rychlosti). Takto upravené rovnice mají označení RANS rovnice (Reynolds–Average Navier–Stokes rovnice). [4]

Výhody:

- Hodnocení modelů v brzké fázi vývoje
- Náhrada experimentů větrného tunelu
- Velké množství výstupních parametrů
- Velké množství zpracovaných dat
- Velmi krátké časy simulace s porovnáním s klasickým testováním, vysoký integrační proces
- Méně než 3 dny od tvorby geometrie k její analýze
- Vysoká odolnost vůči vstupní podmínkám
- Možnost využití pro nekvalifikovaný personál
- Vysoká přesnost výsledku
- Přijatelné náklady

2.3 OPENFOAM (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

OpenFoam je jeden ze zdarma dosažitelných CFD softwarů vyvinut společností OpenCFD a distribuován společností OpenFoam Foundation. [6] Má velmi velké využití na většině odvětvích inženýrství a vědy, kde ho využívají jak akademické kruhy, tak i soukromé společnosti. Velkou výhodou těchto softwarů je velká škála prvků k řešení všeho od komplexního proudění tekutin, zahrnujíc i chemické reakce, turbulence a převody tepla, až po dynamiku a elektromagnetismus.

2.4 KONTROLA SIMULAČNÍCH ANALÝZ VŮČI TESTŮM V AERODYNAMICKÉM TUNELU

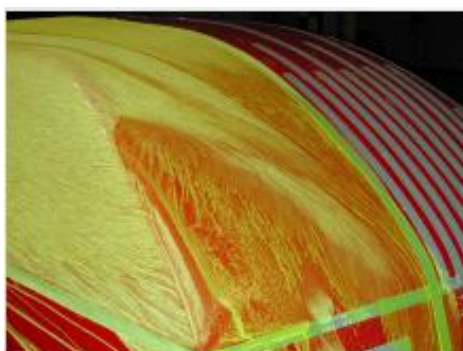
Rozsáhlý program, jehož cílem bylo ověření, zda přesnost simulací proudění simulací odpovídá reálným podmínkám v aerodynamickém tunelu. [7] Spolupráci zaštitili společnosti VW a SEAT.

Byli testovány a kontrolovány:

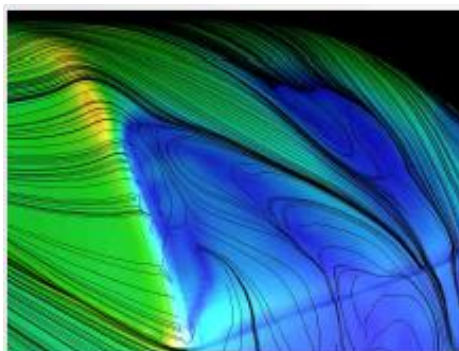
- Prototypové vozy
- Sériové vozy

Tab. 2 Hodnoty c_d , c_{lf} a c_{lr} -testování na tvarovém prototypu [7]

	c_d	c_{lf}	c_{lr}
Experiment	0,271	0,068	0,116
Simulace	0,277	0,066	0,122



Obr. 2 Testování proudění v aerodynamickém tunelu [7]



Obr. 3 Testování proudění v počítačové simulaci [7]

Experiment sériového vozu

Hodnoty analýzy:

- Audi A6 saloon
- Velikost modelu: cca 47 Mb
- Počet hran: 192
- Tvorba sítě: cca 2.5 h
- Simulační čas: cca 25 h

Tab. 3 Příklady hodnot testovaných sériových vozů [7]

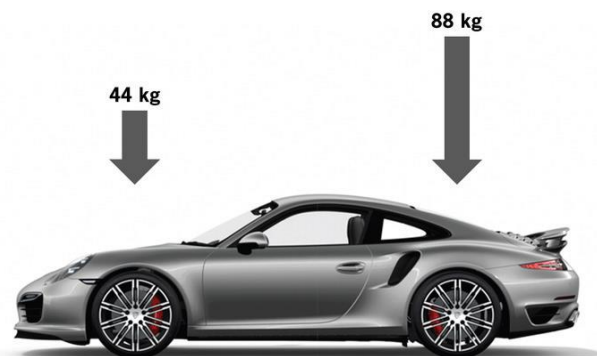
	Δc_d	Δc_{Lf}	Δc_{Lr}
SEAT Ibiza	0,018	-0,017	0,045
VW Golf	0,003	0,034	0,024
VW Passat	0,011	-0,033	0,035
Audi A3	0,007	-0,018	0,034
Audi Q5	-0,001	-0,006	0,047
Audi TT	-0,001	-0,006	-0,051
Audi R8	0,022	0,021	-0,012

3 PROMĚNLIVÁ HODNOTA C_D U VOZŮ PORSHE

Všechny aerodynamické koeficienty uvedené v těchto odstavcích jsou založeny na měření v otevřeném aerodynamickém tunelu společnosti Porsche. [8] Chronologický vývoj aerodynamických koeficientů pro celkový odpor c_d a vztlak c_l napříč různými verzemi a generacemi Porsche je vidět na obrázcích a tabulkách níže.



Obr. 3 Vztlak při rychlosti 300 km/h pro Porsche 997 a 991 v režimu Performance [8]



Obr. 4 Vztlak při rychlosti 300 km/h pro verzi 911 Turbo v režimu Speed [8]

Unikátně aerodynamicky postavené nové 911 Turbo upoutá pozornost díky jeho celkovému konceptu. Verze Turbo se nezaměřila pouze na jeden možný režim v provozu, ale pokrývá aerodynamicky komplexní rozsah jízdy mezi ekologií a jízdou dynamikou, ze kterých jsou normální sériové automobily vyloučeny.

Kromě toho, historický vývoj c_d a c_l jasně ukazuje, že došlo k neustálému zlepšování těchto hodnot. Nová 911 Turbo je první vozidlo, u kterého je možnost přepínat mezi dvěma různými aerodynamickými režimy při zachování stejných hardwarových podmínek.

Tab. 4 Hodnoty c_d , c_{fr} a c_{lr} vozů Porsche [8]

	C_d	C_{fr}	C_{lr}
997	0,31	0,02	-0,03
911 Turbo Speed	0,31	0,02	-0,03
911 Turbo Performance	0,34	-0,05	-0,10

Jak je vidět z předchozí tabulky, tak rozdíl mezi aerodynamickými hodnotami vozu 917 a 911 turbo v režimu Speed je nulový. Právě zásadní rozdíl vzniká při zapojení všech prvků, kterými Turbo disponuje. Při rychlosti 300 km/h (186 mph) produkuje verze 917 přítlak o velikosti 9 kg, verze 911 turbo však díky svým prvkům dokáže generovat přítlak 132 kg v režimu Speed. [8]

3.1 PORSCHÉ „ACTIVE AERODYNAMIC“

S novou 911 Turbo, se poprvé objevila „aktivní aerodynamika“. [8] Cílem tohoto projektu bylo vytvořit systém, který umožňuje přepínat mezi ekologicky optimalizovanou jízdou při zachování rozměrových parametrů z předchozího modelu a výrazně zlepšeným výkonem na

závodním okruhu. Přepínání mezi režimy je provedeno pomocí tlačítka na palubní desce automobilu.

Hlavní prioritou byla neomezená funkční spolehlivost za všech vnějších podmínek, jako jsou léto, zima, déšť, sníh, ať u Mrtvého moře nebo v Andách. Kromě toho by náhodné kontakty s obrubníkem nebo nárazy na nezpevněném terénu neměly vést k poškození.



Obr. 5-6 Režim Start [8]

Porsche poprvé použilo vícestupňový, nastavitelný přední spoiler s dvojitými prvky. Společnost Porsche dostala jako první povolení k použití této technologie výsuvného spoileru pro silniční provoz.

Nové 911 Turbo má také automatický systém, který ovládá a synchronizuje přední spoiler spolu s rozšiřujícím zadním křídlem. Poskytuje tak ideální kombinaci výhod a možnost použitelnosti, jízdní stability, účinnosti a výkonu.

Palubní počítač nabízí řidiči celkem tři různé provozní režimy, které lze částečně aktivovat ručně, většinou se však režim aktivuje automaticky dle aktuálních podmínek motoru a okolí vozu. Každý režim nabízí definované geometrické pozice pro přední spoiler a zadní křídlo v závislosti na příslušných podmínkách



Obr. 7-8 Režim Speed [8]

Různé pozice pro přední spoiler a zadní křídlo jsou uvedeny v předchozích a následujících obrázcích.



Obr. 9-10 Režim Performance [8]

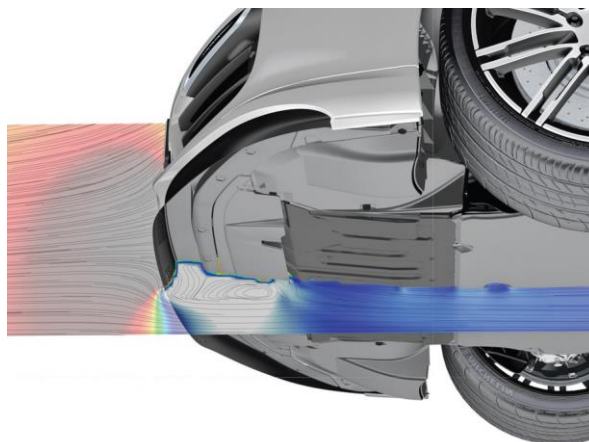
U nové verze 911 Turbo, bylo velkou výzvou zvýšení úhlu přední rampy ve srovnání s předchozím modelem, současně se snižováním výšky přední nápravy. Aerodynamika režimu Sport u současné 911 se pro hodnoty c_f rovná nule a c_{if} 0,02. [9] Cílová hodnota c_{if} byla ve verzi Turbo stanovena na -0,05. Tento rozdíl musel být splněn při zachování konceptu a parametrů vozu. [8]

Současná 911 Carrera (starší verze) je již velmi dobře aerodynamicky navržena. Přední difuzory jsou začleněny do vozidel Porsche již pro několik generací, ale pouze v oblastech kolem podběhů kol a používají se pro dostatečné ochlazení brzd na přední nápravě.

Změna v nové verzi v této oblasti měla za následek zmenšení difuzoru a tak i omezení objemu proudícího vzduchu na brzdy, tím i zvětšení zavazadlového prostoru pro každodenní použití.

Během vývoje konceptu byl pneumaticky se rozšiřující přední spoiler vybrán jako nejlepší kompromis pro všechny požadované vlastnosti. Prodloužení geometrie u předního spoileru mělo za následek zcela nové aerodynamické hodnoty při daných rychlostech. Vývoj celého vozu byl zaměřen na tento přední spoiler.

Přední kola, přední spoilery a přední difuzory byly upraveny a přizpůsobeny pro nové podmínky. A to pro možnost vysunutí předního spoileru a využití proudění, který vytváří nízkotlaký proud vzduchu, který produkuje potřebný podtlak k dosažení požadované přitlaku ve výkonnostním režimu.



Obr. 11 Simulace proudění na přední části vozu [8]

Výhody pro každodenní použitelnost díky novým prvkům na voze:

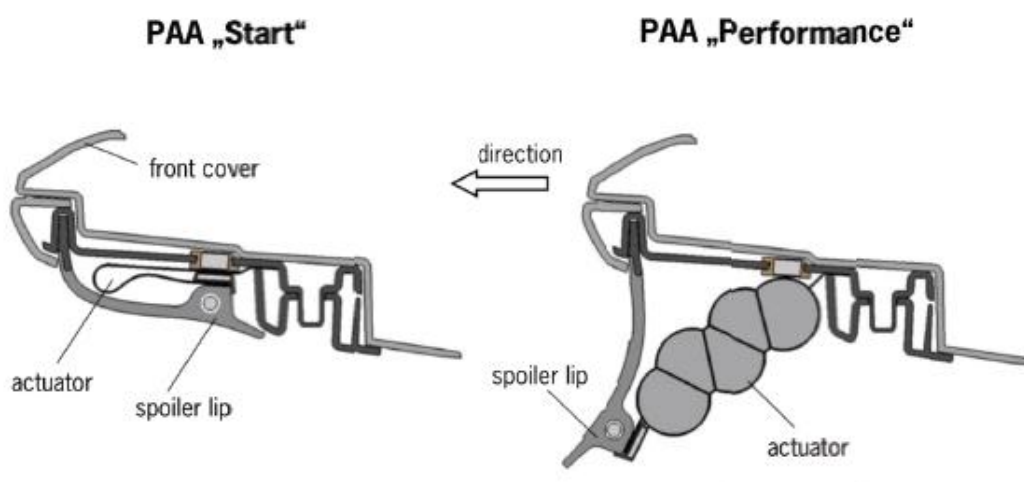
- Byl zmenšen úhel předního spoileru (v režimu start je v pozici zataženo). Právě díky tomuto režimu je auto schopno zdolávat terény
- Pomocí větší vzdálenosti od vozovky a elastičtějšími materiály bylo redukováno riziko poškození předního spoileru
- Vyšší stabilita pro řízení
- Řízení stability bylo zlepšeno ve všech rychlostech z velké části díky variabilnímu přednímu spoileru a zadnímu variabilnímu křídlu
- Lepší účinnost
- Nižší spotřeba paliva díky sníženému aerodynamickému odporu vozidla (c_d) v režimu Speed
- Lepší výkon na okruhu
- V režimu Speed dochází k nárůstu přitlaku, který proudí na vozidlo, tím pomáhá vozidlu zvládat přetížení a zrychlení na trati

3.1.1 VARIABILNÍ PŘEDNÍ SPOILER

Řídicí systém variabilního předního spoileru se v podstatě skládá z pružného, pneumaticky rozvíjejícího se prvku a z pneumatických rozvodů. [8]

Základní elementy předního spoileru, který je vyroben z flexibilního plastu, je spoiler a tři pohony, které ho vysouvají. Každý tento pohon obsahuje pět komor, které mohou být pomocí pneumatických rozvodů naplněny. To že je spoiler rozdělen do tří částí ukazuje, že spoiler může být více variabilní a není tudíž fixován polohou po celé jeho délce. Krajní strany jsou ale vždy synchronizovány.

Pneumatický systém je umístěn pod prostorem kufru za spoilerem. Obsahuje elektricky poháněný kompresor, vzduchový akumulátor a kontrolní jednotku.



Obr. 12 Schéma funkce předního spoileru [8]

3.1.2 VARIABILNÍ KŘÍDLO

Křídlo je prvek v zadní části nové 911 Turbo a má kompletně nový design vůči jeho předchůdci. [8] Předchozí model měl hydraulický systém s pevně daným limitním vysunutím, zadní křídlo u nové 911 Turbo obsahuje dva kompletně nové a oddělené ovládané elektrické motory pro možnost plynulého pokračování nastavování výšky a natočení křídla. Maximální vysunutí křídla při rychlosti 300km/h je 120 mm a maximální úhel natočení 15 stupňů.

Jako přední spoiler, má i zadní křídlo tři základní pozice v závislosti na tom, který režim jízdy je automaticky nastaven řídicí deskou.

Například, v režimu Speed je přední spoiler vysunut v úhlu 7.8 stupňů a zadní křídlo v 7 stupních 25mm vysunutí. V režimu Perfomence je to 6.7 stupňů a 7 stupňů s vysunutím 107mm. [8]



Obr. 13 Variabilní křídlo [8]

4 AERODYNAMICKÉ OPTIMALIZACE NOVÝCH VOZŮ ZNAČKY MERCEDES-BENZ

Kromě estetického hlediska exteriéru se společnost Mercedes-Benz také rozhodla k vozidlům dodávat rozsáhlý balíček nástrojů ke snížení odporu. [8] V tomto balíčku byla pozornost zaměřena na rozvoj prvků, které snižují celkový odpor vozů v sériové výrobě. Tyto prvky by měli být vhodné také pro vozy různých karoserií s různou jízdní výškou a velikostí kol.

Mezi prvky, které snižují aerodynamický odpor vozu, patří například kryty na spodní části automobilu nebo automatické uzávěry vzduchu, který prochází chladičem a motorem. Velkou část vývoje těchto regulací bylo provedeno právě díky počítačovým simulacím, zbytek byl testován v aerodynamickém tunelu.

4.1 REGULACE SÁNÍ A PROUDĚNÍ V PODBĚZÍCH

Uzávěrky sání jsou běžné i v jiných automobilech. [8] Regulace je zde prováděna pomocí řídicí desky automobilu, která pomocí senzorů zjišťuje vnitřní podmínky v motoru a vnější podmínky mimo vůz. Jednotka snižuje průtok skrze chladicí systém pomocí radiálních žeber mezi chladičem a ventilátorem. Deska je tak schopna snížit průtok vzduchu, pokud není motorem vyžadován. S uzavřeným uzávěrem se odpor automobilu sníží přibližně o 4% z celkové odporu vozidla.



Obr. 14 Přední mřížka vozu, červeně zvýrazněné jsou regulační klapky [8]

Jedním z dalších cílů bylo snížení odporu vozidla pomocí redukce tvorby vírů v okolí kol, počínaje předními koly. Jedním z opatření jak vzniku těchto vírů zabránit bylo vytvoření 4 drážek v podběhu kol, které tvoří proudění vzduchu pod motorovým prostorem a stabilizují tok.

Inovace nového předního spoileru účinně zabraňuje přebytečnému přítoku vzduchu do podběhů a okolí kol. Každý zub a zářez je optimalizována tak, aby se zabránilo proudění vzduchu proudícího skrze automobil vnikat do dutin okolo kol, kde by mohli tvořit víry, ale také poskytovat dostatek vzduchu pro chlazení brzd.

Při počítačových analýzách vznikalo velké množství miniaturních vírů a smyček, které v celkovém odporu vozidla tvoří významnou část. Výsledkem jsou minimalizované turbulence v předních kolech, což znamená hladší proudění vzduchu na podvozků a zadních kolech.



Obr. 15 Detailní pohled na podběh kola [8]

Pomocí podvozkovým krytům, dílčímu rámu, pružinovým vazbám difuzoru a pomocí optimalizované polohy tlumiče hluku bylo možné zachovat stejné podmínky pro vznik malých turbulencí v celé spodní části automobilu. I zde při testování vznikali jen miniaturní víry.

4.2 „THE BLUE EFFICIENCY“ TECHNOLOGIE S HODNOTOU $C_D=0,22$

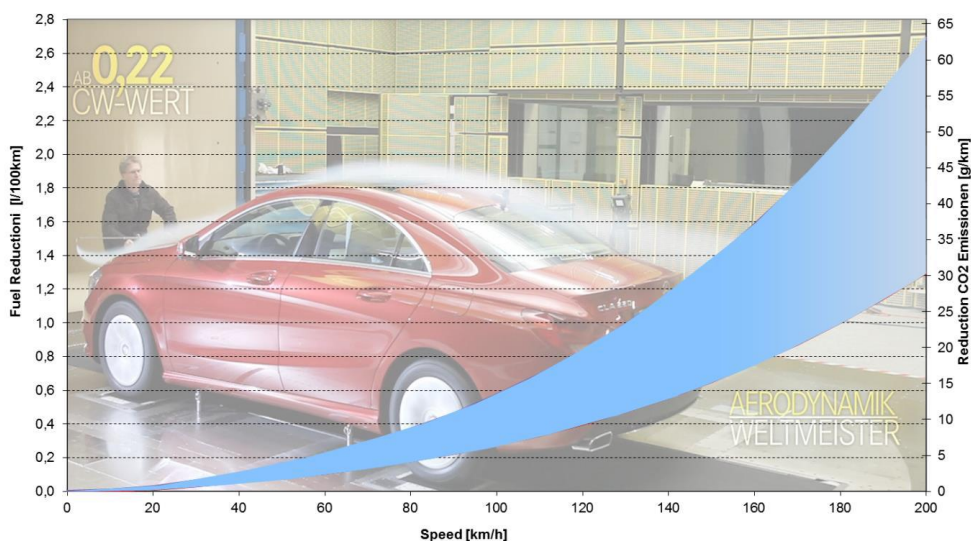
První kroky ve snižování odporu c_d asi o hodnotu 0,10 u technologie „Blue Efficiency Edition“ byly zahájeny pomocí klasických aerodynamické opatřeními, jako jsou snížený podvozek, snížený průtok skrze motorový prostor a další. [8]

Významným prvkem snižujícím hodnotu c_d je kombinace 15" kola s podhledy na předních kolech. Právě tyto podhledy, které regulují proudění vzduchu, dodaly největší přínos ke snížení odporu. Vzduch proudící do dutiny předních kol je korigován pomocí dvou opatření:

- Plochami umístěných v přední části spoileru
- Snížením výšky podvozku

Spolu se sníženým podvozkem podhledy snižují turbulence v okolí dutiny kol. Spoiler snižuje přítok vzduchu do prostoru kol a redukuje tak možnost vzniku vírů.

Kombinace těchto aerodynamických doplňků bylo testováno pomocí počítačových simulací a aerodynamického tunelu.



Obr. 16 Graf závislosti rychlosti na spotřebě a redukci spalin [8]

5 SNÍŽENÍ ODPORU V PROSTORU KOL

Podběhy a celý prostor kol zabírají zhruba 25% z celkového aerodynamického odporu vozidla. Řešení zakrytím kolového prostoru je již dlouhou dobu známo, z estetických důvodů se však do sériové výroby nedostává. [9]

5.1 VYŠETŘOVÁNÍ PRŮTOKU OBLOKU OKOLO KOLA AUTOMOBILU

Cílem bylo zjistit, proudění vzduchu kolem předního a zadního podběhu kol pomocí počítačových simulací a aerodynamického tunelu a snížit tak odpor vozu a zlepšit design předního a zadního blatníku. Dále vyzkoušet různé variace podběhů a zjistit dosažené hodnoty sníženého, či zvýšeného odporu vozu. [9]

5.2 ANALÝZA:

Použit CFD postup k analýze různých variací designů

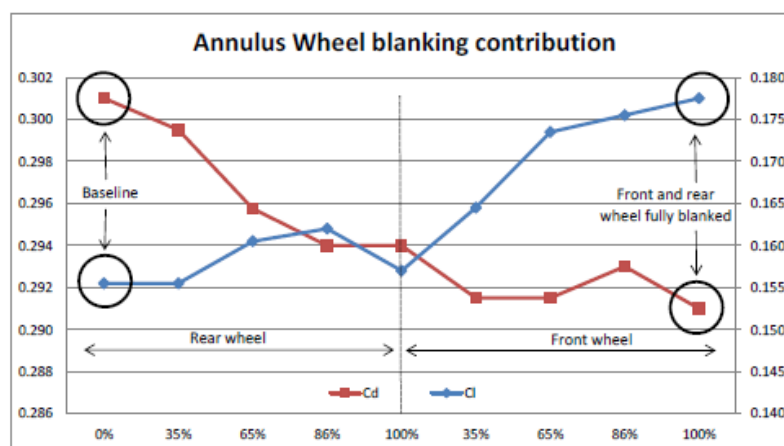
- Geometrie byla vytvořena s komerčními CAD balíčky
- Řešeno pomocí OpenFOAM
- Síťování a proces výpočtu zabral enormní množství času, proto k umožnění dalších návrhů a změn se vše automaticky v průběhu ukládalo.

Cílem výzkumu byla možnost řídit tok uvnitř podběhu způsobem, který by produkoval co nejmenší celkový odpor vozu prostřednictvím následujících přístupů:

- Různé vzory předních a zadních podběhů
- Využití záslepek na kola a podběhy
- Pomocí vnitřní sítě v kolech
- Přední podběh toku

5.3 KRYTY RÁFKŮ KOL

Tato studie ukázala významné snížení aerodynamického odporu až o 65% (týká se jen odporu, které vytváří kola). Toto řešení je schůdnou cestou k úpravě toku v podběhu kol. [9]



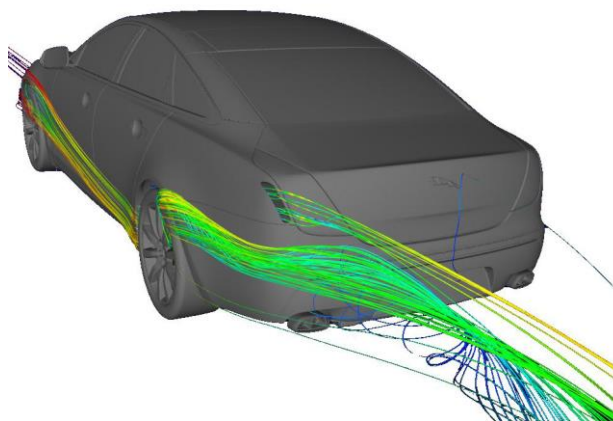
Obr. 17 Graf závislost procentuálního zakrytí na hodnotě C_d a C_l [9]

5.4 OSTATNÍ TESTOVANÉ PRVKY

Dalším testovaným prvkem, byly otvory v podběžích kol. Byly proto tedy testovány různé verze podběhů. Průtoky uvnitř různých designů předních podběhů jsou značně odlišné. V aerodynamickém tunelu bylo naměřeno malé zlepšení 1-2% z celkového odporu. [9]

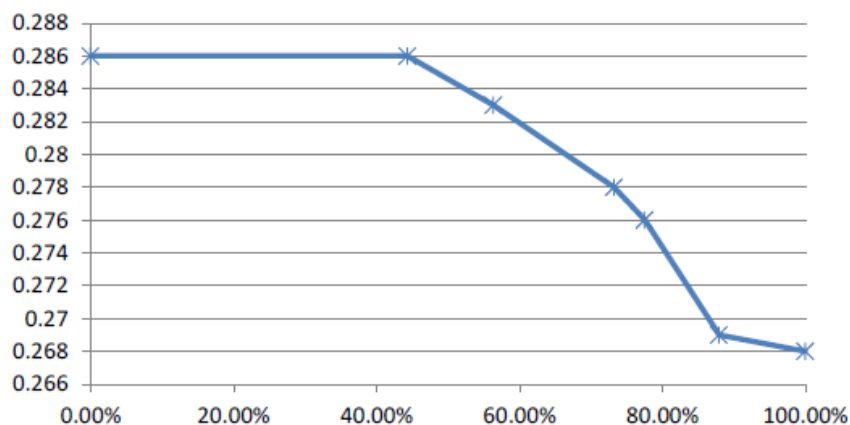
Omezení průtoku k předním podběhům ukázaly pozitivní výsledky, v aerodynamickém tunelu se ukázalo zlepšení odporu vozidla o 1,5% .

Podobné vlastnosti toku bylo vidět během testování otevřených podběhů u předních a zadních kol. Testování v aerodynamickém tunelu ukázalo snížení odporu o 2,3 procenta z celkového odporu vozu.



Obr. 18 Simulace proudění skrze otevřené podběhy [10]

Dalším významným prvkem ke snížení odporu, bylo kompletní zakrytí kolového prostoru z vnější karoserie vozu, jak bylo zvykem u vozů minulého století. Následný graf ukazuje poměr mezi procentuálním zakrytím a celkovým odporem vozu. Významné snížení aerodynamického odporu začíná na 40 % zakrytí prostoru



Obr. 19 Graf závislosti procentuálního zakrytí kol na hodnotě C_d [9]

Testování ve větrném tunelu ukázalo celkové potenciální snížení aerodynamického odporu až o 5,5% při integraci všech prvků z následující tabulky.

Tab. 5 Procentuální snížení aerodynamického odporu v závislosti na různých prvcích [9]

Concept	Improvement (CFD)	Improvement (Aerod. tunel)
Wheel blanking	7%	3,6%

(fully blanked)		
Wheel blanking (65% blanked)	6,7%	2,3%
Front wheel arch duct	1,5%	1%
Front horizontal wheel arch blanking	3,0%	1,5%
Rear wheel arch duct	2,4%	2,3%
Rear wheel arch duct with rear cavity	8,9%	3,6%

6 TESTOVÁNÍ VELIKOSTI ODPORU V ZÁVISLOSTI NA ZMĚNĚ KAROSÉRIE

Cílem tohoto projektu bylo testování velmi jednoduchých aerodynamických modelů vozů ze 70 let 20. století (běžně se využívají i mnohem jednodušší modely), na kterých byli následně upravovány a měněny některé plochy, jejich rozměry a úhly. [10]

Byly testovány tři varianty vozů:

- Fastback (tvarově odpovídá Fordu Mustang)
- Notchback (tvarově odpovídá Škodě 120)
- Squareback (tvarově připomíná pohřební vozy)

Tab. 6 Hodnoty c_d , c_l , c_{lf} a c_{lr} vozů [10]

Varianta	c_d	c_l	c_{lf}	c_{lr}
Fastback	0.230	0.028	0.004	0.024
Notchback	0.276	0.033	-0.016	0.049
Fastback	0.329	-0.303	-0.024	-0.279

V následující části následuje tabulka, která zachycující změny v odporu vozidla v závislosti na úhlech jednotlivých ploch vozidel.

Tab. 7 Hodnoty ostatních parametru při testování [10]

		Boat Tailing angle								
		0	2,5	5	7,55	10	12,5	15	17,5	19
Rear screen slope angle	0	0,0%	-3,8%	-7,0%	-10,5%	-14,6%	-18,4%	-21,3%	-21,9%	-22,8%
	5	-12,0%	-15,8%	-18,4%	-20,8%	-22,8%	-24,0%	-24,6%	-24,6%	-24,6%
	10	-14,9%	-21,9%	-22,5%	-25,7%	-26,6%	-26,6%	-26,3%	-25,4%	-25,4%
	15	-20,5%	-25,4%	-26,6%	-26,9%	-26,9%	-27,5%	-24,6%	-28,9%	-26,6%
	20	-24,9%	-25,7%	-26,6%	-26,9%	-26,9%	-26,3%	-26,6%	-27,5%	-27,2%

22	-27,2%	-27,5%	-28,7%	-29,2%	-27,8%	-28,1%	-26,6%	-26,6%	-28,1%
25	-25,1%	-27,2%	-26,0%	-26,0%	-27,8%	-27,5%	-26,3%	-26,3%	-26,9%
30	-17,0%	-14,6%	-14,6%	-14,6%	-14,6%	-14,6%	-14,0%	-12,9%	-12,9%
35	-14,3%	-13,7%	-13,2%	-12,3%	-12,3%	-11,3%	-11,7%	-11,1%	-10,5%

Poznatky z tohoto testování byly následně použity pro testování na sériově vyráběných vozech.



Obr. 20 Testování na silničních vozech [10]

Při testování silničních aut se prokázalo následující snížení aerodynamického odporu pomocí:[10]

- Zpětné optimalizace geometrie: snížení o 2%
- Krytí podvozku: 2-5 %
- Snížení interakcí spodního toku s koly a blatníky: 1%
- Snížení je možné dosáhnout pomocí průduchů v podběžích: 1%

7 SNIŽOVÁNÍ ODPORU U VELKÝCH VOZIDEL POMOCÍ TECHNOLOGIE ACTIVE FLOW CONTROL

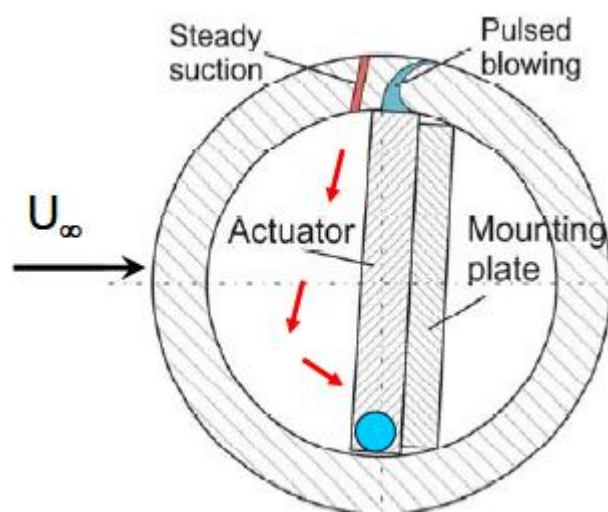
Aerodynamický odpor je příčinou více než dvě třetiny spotřeby paliva velkých nákladních automobilů při dálniční rychlosti. Vzhledem k funkčnosti těchto vozů byl vždy aerodynamický tvar vyměněn za maximální přepravní objem. To vede k masivně oddělenému toku na závětrné straně vozidla. [11]

Aktivní kontrola toku (AFC) je rychle rostoucí, multidisciplinární věda a technologie zaměřena na pozměňování stavu přirozeného toku pomocí malé, stabilní lokální injekce vzduchu, která stav toku mění na více žádoucí.

Princip spočívá v připojení kompaktního a relativně levného zařízení na zadní stranu návěsů nákladních vozů. Tok vzduchu, který vzniká v prostoru mezi jednotlivými částmi vozu je přeměrován do závětrné strany vozu, zvyšuje tak protitlak, čímž výrazně snižuje celkový odpor vzduchu. Předběžné výsledky ukazují, že snížení aerodynamického odporu je možná až

o 10% . Současná studie je zaměřena na použití aktivního řízení toku (AFC) jako doplňkové zařízení, které je připojené k zadní části nákladních vozidel. Snížení odporu těžkých silničních vozidel může vést k nové efektivitě přepravy. Současný výzkum je obzvláště atraktivní, protože poskytuje cenný příspěvek k pomalejšímu produkci skleníkových plynů a významné snížení emisí.

Výše uvedené fluidní zařízení je kombinací ejektoru a fluidního zesilovače. Po dokončení vývoje pohonu a přizpůsobení rozsahu rychlostí pro nákladní automobily se začalo s experimenty na kruhovém válci. Studie vedly ke zjištění výrazného snížení aerodynamického odporu v důsledku zpoždění hranice separační vrstvy za vozem.



Obr. 21 Schématický průřez kruhového válce (na obrázku je vidět otvor pro sání, pohon a výstupní tryska) [11]

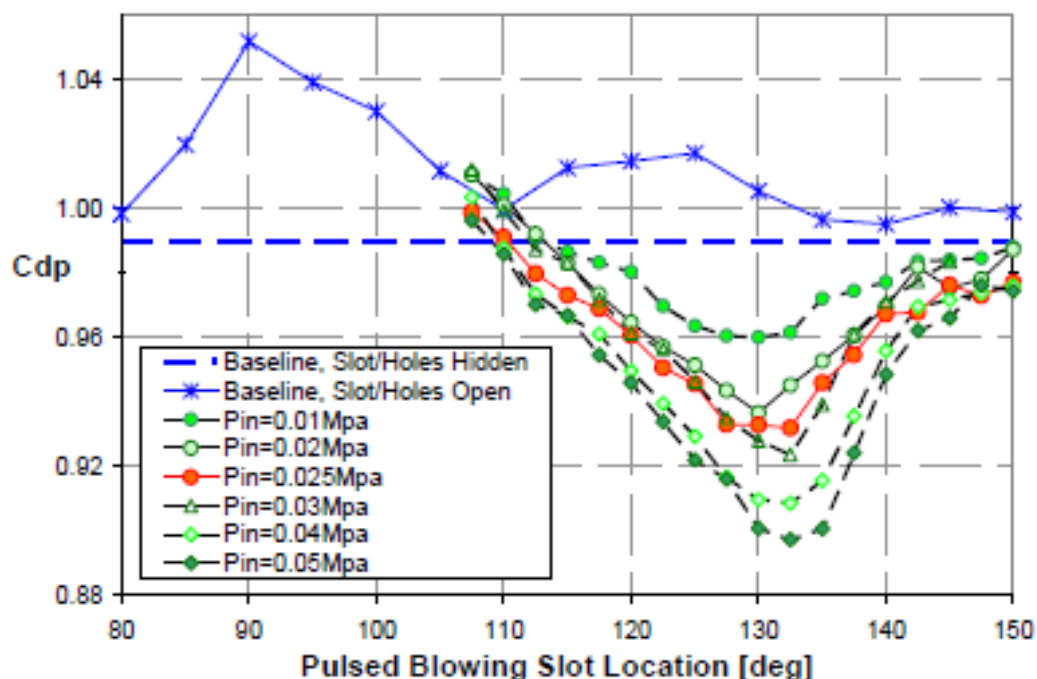
7.1 TESTOVÁNÍ

Na obrázku níže je schématicky znázorněn příčný řez modelu 2D vozíku s kruhovým válcem na pravé straně v horním rohu na zádi. Svislá vzdálenost při testování mezi modelem a podlahou byla ponechána v rozsahu 50-55 mm za účelem kompenzace růstu hraniční vrstvy. Tento předpoklad byl později při testování ověřen (v testování nebyla zahrnuta rychlost podloží). Tyto účinky se zdají být sekundární, protože testování se zaměřilo na zadní horní roh. [11]



Obr. 22 Schéma testovaného modelu (vpravo nahoře připojen AFC válec)[11]

Velký důraz byl kladen na ustanovení optimální polohy děr. Na základě přechozích testování byl úhel mezi sacími otvory a pulzními stanoven na 15° .



Obr. 23 Graf závislosti C_{dp} (c_d) koeficientu na úhlu natočení pro různé hodnoty vstupních tlaků. [11]

Byla provedena komplexní sada pokusů a testování s cílem snížit aerodynamický odpor u velkých nákladních automobilů o hodnotu až 20% v závislosti na jeho poloze.

Tato snaha zahrnovala:

- Vývoj, modelování a úprava technologie, vytvoření pohonu pro provoz s nízkou rychlostí
- Komplexní zkoušky v aerodynamickém tunelu, kde se testovali účinky snížení aerodynamického odporu na kruhovém válci pod vlivem různých okrajových podmínek
- Návrh a testování modelu 2D kamionu s a bez simulované silnice, s a bez kontroly válce
- Hodnocení energetické účinnosti válce

Bylo zjištěno, že optimální místo pro polohu sací otvory, je asi 15 až 20 ° po směru proudění proudu od středové osy válců.

Jeden válec umístěn v horní zadní hraně simulovaného přívěsu je schopen asi 10% snížení odporu vzduchu. Ale pokud započítáme výkon, který je potřeba pro používání této technologie je úspora okolo 6-7%. Když byly dva válce aplikovány na dvou vertikálních okrajích v oblasti zádi přívěsu, bylo prokázáno snížení aerodynamického odporu o 20%.

Toto by mělo vést k čistým úsporám paliva alespoň 10%. Významné zvýšení účinnosti technologie se očekává při zvětšení testovaného modelu na reálné silniční velikosti.

V současnosti probíhá testování této technologie na menších 3D modelech a vozech.

8 RELATIVNÍ POMĚR JÍZDNÍHO ODPORU

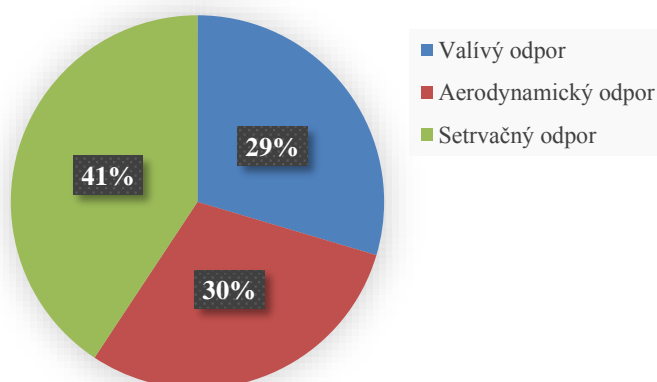
V této části bych rád poukázal na relativní poměr mezi odpory, které způsobují celkový jízdní odpor při zlepšování aerodynamického odporu vozu ve všech jízdních cyklech a pro následné snížení spotřeby. [7]

Příspěvky do zatížení motoru a tvorby CO₂ emisí během jízdního cyklu:

- Inertní síly v důsledku zrychlení hmotnosti vozidla
- Odpor valení pneumatik
- Pomocné systémy v automobilu
- Aerodynamický odpor

Poměry mezi jednotlivými částmi záleží na aktuální dynamice a rychlosti vozu.

Relativní podíl na jízdní odpory na příkladu Audi R8 s motorem V8 FSI (hodnoty byly zjištěny pomocí OpenFOAM softwaru).



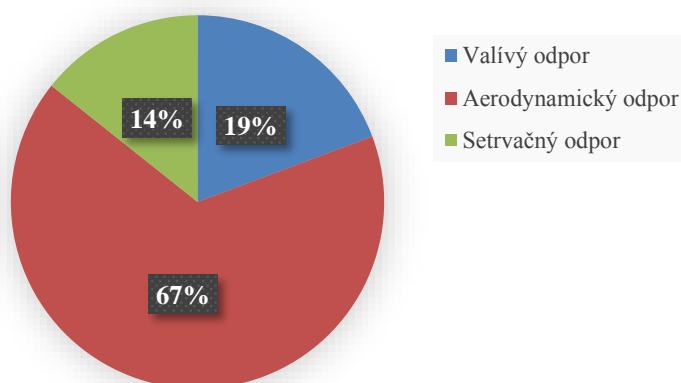
Obr. 24 Graf relativních poměrů odporů [7]

Důležitost aerodynamiky také záleží na řešení konceptu pohonu vozu, největší ztráty vznikají, při zrychlení a následné změně rychlosti vozidla.

Další analyzované hodnoty byly pro automobil Audi R8 elektro, který nabízí významný posun v důležitosti aerodynamiky a alternativních konceptů pohonu a jízdních cyklů.

Změny vůči předchozímu příkladu:

- Audi e-tron (elektrický pohon)
- Rekuperace brzděné energie s 50% účinností
- Audi "real word" jízdní cyklus (pro vyšší rychlosti)



Obr. 25 Graf relativních poměrů odporů [7]

Hodnoty získané z analýzy ukazují relativní zvýšení příspěvku jízdního odporu o hodnotu 124% v důsledku rekuperace energie a jízdního cyklu.



ZÁVĚR

Na závěr mojí bakalářské práce bych chtěl podotknout, že se mi podařilo splnit všechny cíle své práce, a to vysvětlit aerodynamický odpor a jeho důležitost, shrnout vybrané prvky, které snižují aerodynamický odpor a používají se jak v sériové výrobě vozů, tak i při testování.

Ze všech technologií a prvků zmíněných v mé bakalářské práci shledávám nejpřínosnější přímé měnění karoserie již při výrobě automobilu, takovéto změny dosahují snížení odporu v desítkách procent.

Další prvek, který považuji za důležitý je změna a usměrnění proudění vzduchu na již sériových vozech, ať již díky spoilerům, úpravě prostoru okolo kol nebo zakrytí mezikruží. Tyto prvky mohou v součtu snížit aerodynamický odpor až o 10%.

Technologie, jako aktivní kontrola proudění vykazují velké úspory tam, kde byl velmi zanedbán aerodynamický tvar, jakožto u nákladních vozů. Bohužel tato technologie vyžaduje přídavný pohon a tudíž dražší pořizovací cenu.

I díky těmto technologiím je nejnižší hodnota aerodynamického odporu limitována. Současný vývoj se prioritně zabývá snižováním ekologické stopy vozů, kde právě aerodynamický odpor je velkou částí. Proto i zde bude v budoucnu pokračovat vývoj a testování těchto prvků a technologií.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] PRACHAŘ, R. *Jízdní odpory vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2010. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Rochla.
- [2] Aerodynamic Drag, Data for Airfoils, Wings, Aircraft, Automobiles. Internet Archive Wayback Machine [online]. 2004 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20070715171817/http://aerodyn.org/Drag/tables.html>
- [3] HROMADA, M. *Aerodynamické tunely v oblasti automobilního průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.J
- [4] SOUČKOVÁ, Natálie, Petr KOLÁŘ a Antonín TUČEK. *Simulace proudění tekutin pomocí CFD* [online]. 2012 [cit. 2015-05-23]. ISSN 1802-6168. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3604-simulace-proudeni-tekutin-pomoci-cfd.html>
- [5] DÁLE Jones. Lotusenthusiast [online]. [cit. 23.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://lotusenthusiast.net/wp-content/uploads/2009/09/cfd1.jpg>
- [6] *OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.openfoam.com/>
- [7] DR. MONI, Islam. *Application of OpenFOAM Technology for Vehicle Aerodynamics Development* [online]. 12. 11. 2009 [cit. 23.5.2015]. Dostupný na www.https://www.idaj.co.jp/icsc2013/04_iconCFD/img/islam_aerodynamics_development_using_open_source_cfd.pdf
- [8] FKFS, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren a Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen IVK. *Progress in vehicle aerodynamics and thermal management*. Renningen: Expert-Verl, 2013. ISBN 9783816932536. J
- [9] SABRAZAT, Nick. *LCVTP Aerodynamics Wheel Arch Flow Investigation*. 2011
- [10] SABRAZAT, Nick. *LCVTP Aerodynamics Reference car finding*. 2011
- [11] [ECI, Engineering Conferences International]. *The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains*. Online-Ausg. Berlin: Springer, 2008. ISBN 9783540850700.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

F_x	[N]	Hnací síla v podélném směru
O_f	[N]	Odpor valení
O_s	[N]	Odpor sklonu
O_{vz}	[N]	Odpor vzduchu
O_a	[N]	Odpor zrychlení
F_{zP}	[N]	Síla působící na přední nápravu
F_{zZ}	[N]	Síla působící na zadní nápravu
G_v	[N]	Tíha vozidla
f	[1]	Součinitel odporu valení
G_v	[N]	Tíha vozidla
m	[kg]	Hmotnost vozidla
g	[m.s ⁻²]	Tíhové zrychlení
O_{pos}	[N]	Odpor daný posuvným zrychlením
O_{rot}	[N]	Odpor rotujících částí
M_{zSM}	[N.m]	Moment pro zrychlení rotujících částí motoru
$M_{zPÚ}$	[N.m]	Rotujících částí převodových ústrojí
ΣM_{zKi}	[N.m]	Moment pro zrychlení rotujících částí motoru
δ	[1]	Součinitel vlivu rotujících částí.
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota vzduchu
v_x	[m.s ⁻¹]	Náporová rychlost,
C_d	[1]	Součinitel odporu vzduchu
S_x	[m ²]	Čelní plocha vozidla
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota vzduchu
v_x	[m.s ⁻¹]	Náporová rychlost
C_{lr-}	[1]	Součinitel odporu vzduchu pro zadní nápravu
c_{lf}	[1]	Součinitel odporu vzduchu pro přední nápravu
p_d	[Pa]	Dynamický tlak
C_l	[1]	Koeficient tažné síly