



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Rešerše problematiky chlazení brzdových kotoučů na voze Formula Student

Benchmark of brake disc cooling for Formula Student vehicle

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: Bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Nikita Astraverkhau

David Lukeš

Praha 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o vývoji brzdových soustav závodních vozů. Věnuje se chlazení brzdových komponentů u vozů formule 1 a dále se zabývá návrhem brzdového náfuku pro vůz FS.07 týmu CTU CarTech. Tato práce také zahrnuje simulaci proudění vzduchu v navrženém modelu. Výsledkem je brzdový náfuk realizovaný firmou zabývající se 3D tiskem.

Abstract

This bachelor's thesis deals about the development braking system racing cars. Devote to cooling braking components formula one cars and next describes design brake duct for FS.07 car by team CTU CarTech. This thesis also includes the analyses of airflow in the proposed model. The results is brake duct realized by firm dealing with 3D printing.

Klíčová slova

Náfuk, brzdový kotouč, brzdový třmen, návrh, chlazení

Key words

Duct, brake disc, caliper, design, cooling

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem zpracoval samostatně a uvedl v ni všechnu použitou literaturu.

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Nikitovi Astraverkhau za odborné vedení při tvorbě této práce. Děkuji také týmovému kapitánu Lukáši Pacoňi za užitečné rady a informace.

Použité zkratky

FS	Formula Student
CTU	Czech Technical University
GP2, GP3	Grand Prix 2, 3 (Velká cena)
DE	Deutschland (Německo)
PT	Portugal (Portugalsko)
MCAE	Česká firma zabývající se 3D technologiemi

Seznam použitých veličin

<u>Veličina</u>	<u>Značka</u>	<u>Jednotka</u>
Teplota	T	[°C]
Rychlost	v	[m/s]
Čas	t	[s]
Délka	l	[mm]
Hmotnost	m	[kg]
Gravitační přetížení	G	[m/s ²]
Součinitel tření	f	[-]
Síla	F	[N]
Hmotnostní tok	Q _m	[kg/s]
Objemový tok	Q _v	[m ³ /s]
Výkon	P	[W]
Otáčky	n	[min ⁻¹]
Moment	M	[Nm]
Objem	V	[m ³]
Plocha	S	[mm ²]
Tlak	p	[Pa]
Napětí	σ	[MPa]

Obsah

1. Úvod	8
2. Vývoj brzdové soustavy a jeho chlazení	9
2.1. Špalíkové brzdy.....	9
2.2. Pásové brzdy	9
2.3. Bubnové brzdy	10
2.4. Kotoučové brzdy	11
2.5. Kompozitní brzdy.....	12
3. Konstrukce závodních brzd	13
3.1. Aplikace kompozitní brzdy	13
3.2. Hlavní konstrukce brzd	14
3.3. Princip chlazení brzd.....	15
3.4. Srovnání studentské formule s ostatními závodními vozy.....	17
3.5. Chlazení brzd u konkurenčních vozů Formula Student	18
3.6. Tepelný rozptyl z brzdového kotouče	19
4. Návrh chlazení brzdového systému	20
4.1. Představení vozu FS.07	20
4.2. Minulé koncepce náfuků	21
4.3. Návrh náfuků pro vůz FS.07	22
4.4. možné varianty	22
4.5. Výsledek návrhu.....	25
4.6. Kontrakce náfuku	26
4.7. Simulace proudění vzduchu	27
4.8. Realizace návrhu	29
5. Závěr.....	31

1. Úvod

Soutěž Formula Student obnáší pro tým CTU CarTech povinnost vyrobit každým rokem vůz formulového typu. Vývoj formule FS.06, tehdy šestého vozu v řadě, zaznamenal pokrok, kdy zbytečně velká a těžká kola o průměru 13 palců nahradila velikost 10 palců. Tato změna, spolu s velkým předním přitlačným křídlem způsobila, že kolem brzdové soustavy neprudilo dostatečné množství chladného vzduchu k odvodu tepla.

Hlavním cílem práce je návrh vzduchového kanálu, který dokáže ochladit brzdovou soustavu. První část shrnuje historický vývoj brzd a jejich chlazení u závodních vozů. Poté následuje rozbor chlazení brzdových soustav u vozů novodobé formule 1 a Formula Student. Další část práce obsahuje návrh modelu náfuku v programu Catia V5 R21 pro vůz FS.07, na který je také vytvořena virtuální simulace proudění vzduchu v navrženém modelu za pomoci analytického programu Ansys 16.0. Závěr práce představuje konkrétní realizaci modelu pomocí 3D tiskárny a následné poznatky o funkci náfuku.

2. Vývoj brzdové soustavy a jeho chlazení

2.1. Špalíkové brzdy

Špalíkové brzdy byly používány výhradně jen na prvopočátku automobilismu. Špalík byl přitlačován na ocelové kolo a tím umožnil vozu zpomalovat. Toto řešení však bylo po zavedení pneumatik nemyslitelné.

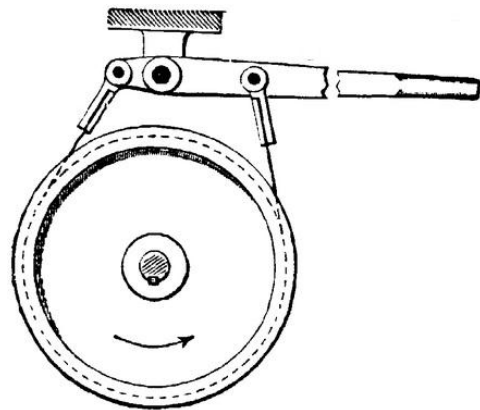
Špalíková brzda následně nacházela uplatnění už jen jako brzda parkovací. Na obr. 1 je závodní vůz Ponhard-Levassor účastníci se roku 1893 závodu Paříž-Rouen. Automobil je zpomalovaný špalíkovými brzdami umístěnými pouze na zadních kolech. (1)



Obr. 1: Vůz Ponhard-Levassor

2.2. Pásové brzdy

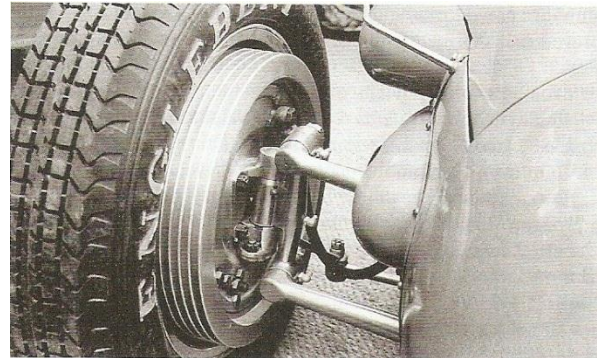
Pásové brzdy se dělí na tři typy: jednoduché, součtové a diferenciální, které jsou neúčinnější (obr. 2). Svou funkcí brzdění spíše pomalejších strojů a celkově špatným odvodem tepla byla pro závodní vozy nevhodná a později nahrazena brzdou bubnovou. Pásová brzda nicméně nacházela uplatnění dlouhou dobu například u zemědělských strojů jako brzda parkovací. (2)



Obr. 2: Diferenciální pásová brzda

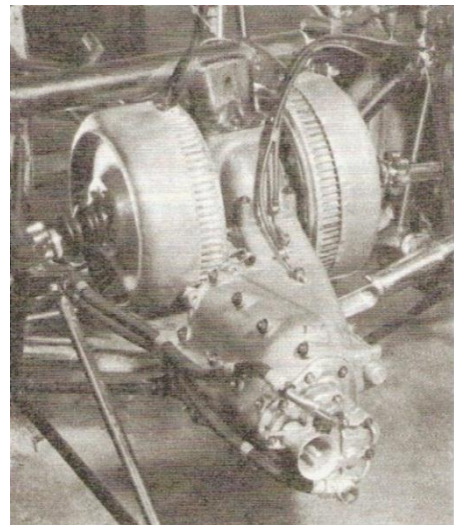
2.3. Bubnové brzdy

Konstrukce bubnové brzdy jsou využívány dodnes a své uplatnění v první polovině dvacátého století nacházela i v závodních vozech. Ústrojí brzdy se nachází v bubnu a je tak chráněno od nepříznivých podmínek okolí. Brzdy jsou hůře dostupné nečistotám z vozovky, či vodě. Hlavní a zásadní nevýhodou je ale nedostatečné proudění chladného vzduchu uvnitř bubnu. Soustava je tak náchylná k přehřátí a tím zhoršuje brzděnou účinnost. Vysokým namáháním se pak buben deformuje což má za následek jak snížení brzděné síly, tak nerovnoměrné opotřebení třecích segmentů. Konstrukce bubnů pro závodní vozy byly chlazeny obvykle řadou žeber jako je tomu u vozu Gordini F2 z roku 1952 na obr. 3. (1)

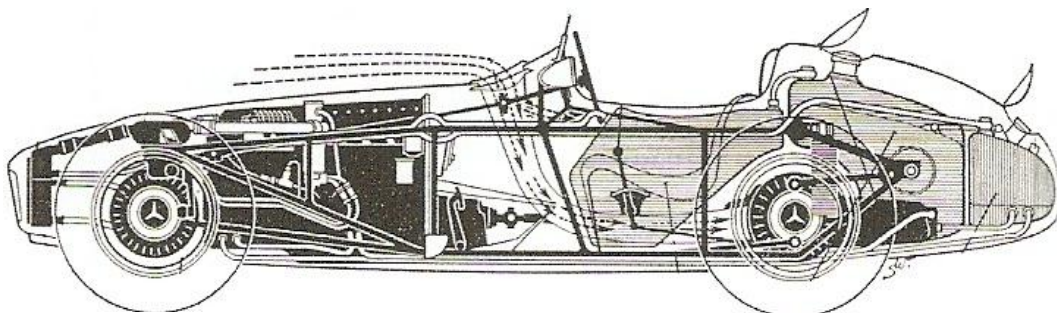


Obr. 3: Zavěšení vozu Gordini F2

Se zajímavou konstrukcí přišel v roce 1954 Mercedes u svého závodního vozu W196. V té době již zastaralé, těžké bubnové brzdy, byly umístěny na nápravách poblíž podélné osy vozu, jak je tomu na obr. 4. Díky této úpravě se zbavili vysoké neodpružené hmoty bubnů a kola tak mohla lépe přenášet dynamiku vozu na vozovku. Chlazení bylo velmi účinné díky proudu vzduchu vedeného skrze automobil až k brzdovým bubnům (obr. 5). Tyto bubny byly žebrovány a chovaly se jako ventilátor.



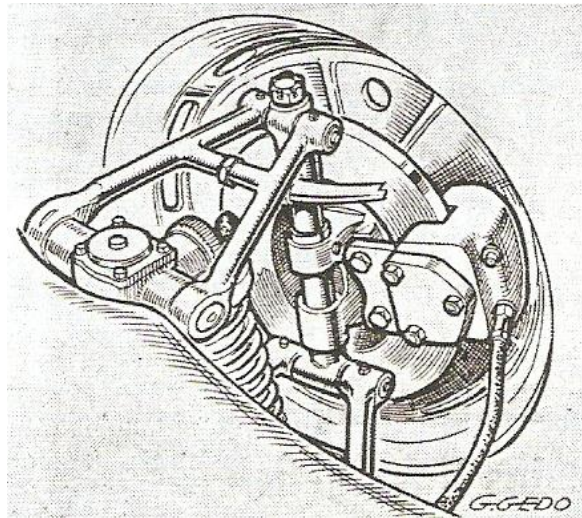
Obr. 4: Umístění brzd vozu Mercedes W196



Obr. 5: Chlazení vozu Mercedes W196

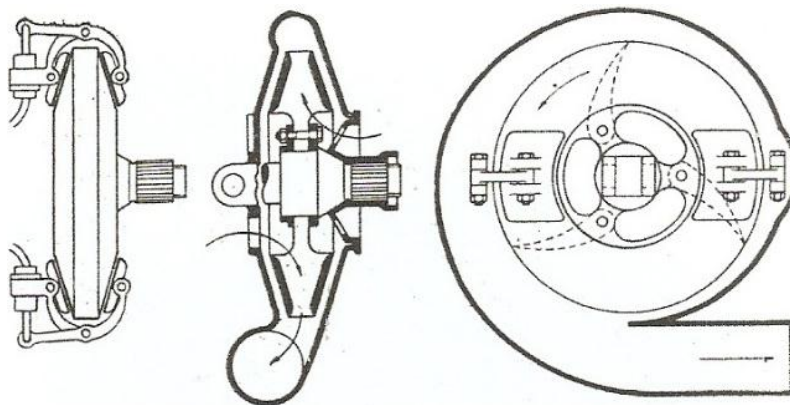
2.4. Kotoučové brzdy

Koncem čtyřicátých let dvacátého století začaly experimenty s kotoučovými brzdami, jejíž konstrukce již byly využívány u letectva. Začátkem padesátých let pak byly zkušebně montovány do vozu Cooper-Alfa na obr. 6. Nesporné výhody tohoto brzdového uspořádání se už koncem padesátých let zasloužily o vytlačení bubnových brzd z řad závodních vozů. Brzdová soustava má podstatně menší hmotnost a konstrukčně je jednodušší. Chlazení brzdového kotouče je mnohem intenzivnější, jelikož je volně přístupný okolnímu chladnému vzduchu. Brzdový tlak je rovnoměrně rozložen po celé délce kotouče a díky své konstrukci není při intenzivním brzdění vlivem vysokých teplot deformován, jako tomu bylo u bubnu, kdy nastával takzvaný „fading“, tedy vadnutí. Asi největší nevýhodou je skutečnost, že kotouč není chráněn vůči nečistotám z vozovky a ostříku vodou. Teploty kotoučů dosahovaly více než 800°C. (1)



Obr. 6: Kotoučová brzda vozu Cooper-Alfa

S inovativní konstrukcí přišlo v roce 1955 Bugatti 251, kdy čtyři brzdové destičky svíraly dutý kuželový kotouč. Ten v sobě měl tříramenný odstředivý ventilátor, který vysával ze středu kola vzduch a skrz kotouč ho vytlačoval mimo brzdovou soustavu pomocí hliníkového náfku, jak je názorně představeno na obr. 7. (1)



Obr. 7: Náfuk vozu Bugatti 251

Vývoj kotoučových brzd se na počátku šedesátých let setkal s problémem příliš velkého toku tepla do náboje kola, což nebylo příznivé pro ložisko. Kotouče ještě neznaly vnitřní ventilační chlazení a nedostatečný odvod tepla způsoboval přehřívání brzdíčů, které mimo jiné zapříčiňovaly vznik bublin v brzdové kapalině. (1)

Rokem 1978 přišla revoluce v materiálu brzd. Brabham (britský závodní tým) tehdy testoval konstrukci kompozitních kotoučů. Používat se ve velké míře začali až rokem 1991 a zanechaly za sebou ocelové sestavy bez povšimnutí a posunuli výkonnosti monopostů o další úroveň výš. Tyto kotouče tvořené uhlíkovými kompozity dokázali odolávat teplotám více než 1000°C. (1)

2.5. Kompozitní brzdy

Brzdy z kompozitního materiálu se skládají z uhlíkových vláken, které doplňují grafitovou maticí. Prvně byl využíván pro čela balistických raket, či u raketoplánů na jeho špičkách a křídlech. (3)

Tento materiál dokáže snášet velmi vysoké teploty a odolávat teplotním šokům. Po aplikaci v brzdých systémech jsou hmotnost a brzdné účinky značně lepší než je tomu u ocelových sestav. (3)

3. Konstrukce závodních brzd

Konstrukce závodních brzd u formulí umožňuje vyvinout ohromné zpomalení, tedy brzdění z vysokých rychlostí za co nejmenší dobu. Brzdy dokáží zpomalit vůz z rychlosti 350km/h na rychlost 80km/h za pouhých 3,5s. Z rychlosti 300km/h k úplnému zastavení postačí doba 4 sekundy, z rychlosti 200km/h je to právě 2,9 sekundy během 65 metrů a z hodnoty 100km/h je doba k zastavení 1,4 sekundy a pouhých 17 metrů. Jelikož pravidla neumožňují používat posilovače brzd, pilot formule 1 musí mít velice dobrou fyzickou kondici. Při zpomalování dokáže řidič svou nohou tlačít na brzdový pedál až 120kg a i tak nezapříčiní ve vysokých rychlostech zablokování kol, jelikož přítlačná křídla vyvolávají obrovský přítlak. Pod těmito vysokými brzdnými silami je řidič vystaven vodorovnému přetížení blízkých 5,4G. (4)

3.1. Aplikace kompozitní brzdy

Kompozitní materiál používaný u brzd formule 1 je víceméně totožný na brzdových destičkách i brzdovém kotouči. Tato sestava podává konstantní výkony po celou dobu závodu a umožňuje při optimální teplotě dosáhnout součinitele tření až víc jak 0,6. Automobily s běžnými ocelovými kotouči dosahují hodnot 0,3. Hmotnost karbonových brzd je také zhruba o polovinu lehčí než konvenční brzdy a to nahrává lepším dynamickým vlastnostem kola. V průběhu závodu může pilot, díky sofistikovanému řešení brzdové soustavy, přestavovat brzdný tlak mezi přední a zadní nápravu. To ovlivňuje ovládání vozu. Brzdný tlak je prioritně nastavován zhruba 50 až 60% v prospěch přední nápravy v závislosti na trati. Redukce zadního brzdného výkonu ovlivňuje opotřebení zadních pneumatik a nepřímo tak zlepšuje trakci. (4, 5)

3.2. Hlavní konstrukce brzd

Formule, tak jako osobní vůz využívá stejných principů brzdového systému, kde hlavní částí je brzdový kotouč rotující stejnou rychlostí jako kolo. Brzdový třmen s brzdovými destičkami, takzvaný brzdič je umístěn stranou kolem brzdového kotouče. Z hlediska těžiště je nejvýhodnější místo pro brzdič v co nejnižší poloze. Pro kvalitní odvodu tepla je ale naopak umístění vhodné co nejvýš. Reálné umístění bývá kompromisem těchto dvou poloh. Když pilot zmáčkne brzdový pedál, brzdová kapalina je tlačena do brzdových válců a výsledkem je tak sevření kotoučů kompozitními destičkami. Vzniklé tření způsobí, že kotouč a celé kolo zpomaluje. Brzdová kapalina je uskladněna ve dvou hlavních brzdových válcích pro přední a zadní nápravu zvlášť. Tím, že má přední a zadní náprava své nezávislé brzdové okruhy, dokáže vůz zpomalovat i když je jeden z nich poškozen. (4)

K tomu aby vůz zpomalil je zapotřebí převést kinetickou energii na jinou formu. Tato energie tvořená neustálými brzdnými cykly s krátkými rekuperačními periodami se transformuje především na energii tepelnou. Teploty brzdových kotoučů dosahují až 1200°C a stávají se tak nejteplejší součástí formule. Velikost brzdových kotoučů jsou předpisy limitovány tloušťkou 28mm o průměru 278mm. Hmotnost takto objemného kotouče bývá kolem jednoho kilogramu. Vysoké teploty, které vydrží brzdová soustava je výhodná pro lepší tepelnou výměnu, kdy teplejší těleso lépe předává energii svému okolí než těleso chladnější. Na druhou stranu ale opotřebení rapidně stoupá, když je dosažena oxidační teplota zhruba 650°C a více. Aby špičky teplot byly co nejkratší a brzdy neochabovaly je nutno odvádět teplo pryč pomocí přídavného chlazení. Nejlepší brzdový účinek se dostavuje také kolem teploty 650°C, jak je znázorněno na obr. 8 a proto je velmi důležité najít správný kompromis mezi účinností a opotřebením brzd. (4, 6)

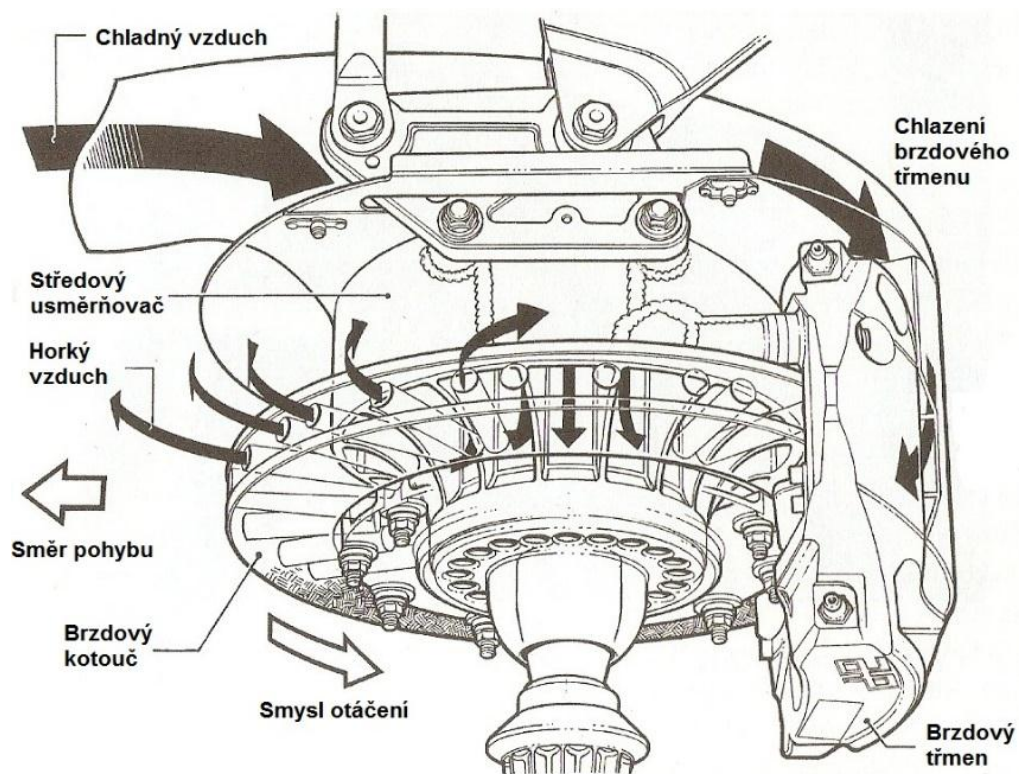


Obr. 8: Efektivní teplota kotouče

3.3. Princip chlazení brzd

Ačkoli mohou kompozitní brzdy snášet vysoké teploty, chlazení je velmi důležité a zaručuje, že výkon brzd je efektivní až do posledního kola závodu. Používá se vzduchové potrubí, které je vytvořeno uvnitř kola a za pohybu formule zajišťuje neustálou dodávku chladného vzduchu pro brzdový systém. (7)

Pro přívod chladného vzduchu se používají vzduchové kanály umístěné na vnitřní straně zavěšení kol. Náfuky jsou upevněny k těhlici kola, která je z části žebrovaná kvůli své menší hmotnosti, což je u neodpružené části vozidla velice důležité. Žebra samozřejmě slouží i k ochlazení svého povrchu díky zvětšené ploše. Tím je ovlivněno i ložisko, které je chladnější a má delší životnost. Celá těhlice je zakryta, aby proud vzduchu tekla usměrněně bez velkých aerodynamických ztrát přímo k brzdám, kde se pak větví a chladí celou brzdovou soustavu. Velká část vzduchu proudí k ose kola, kde je pak vířen z jádra skrz až 1200 ventilačních radiálních děr v brzdovém kotouči. Ty zvětšují plochu a umožňují tak intenzivnější výměnu tepla. Ohřátý vzduch je poté odveden mimo kolovou soustavu do okolí. Vzduch je také veden potrubím k chlazení kritických teplot brzdového třmenu. Princip je názorně předveden na obr. 9. (7)

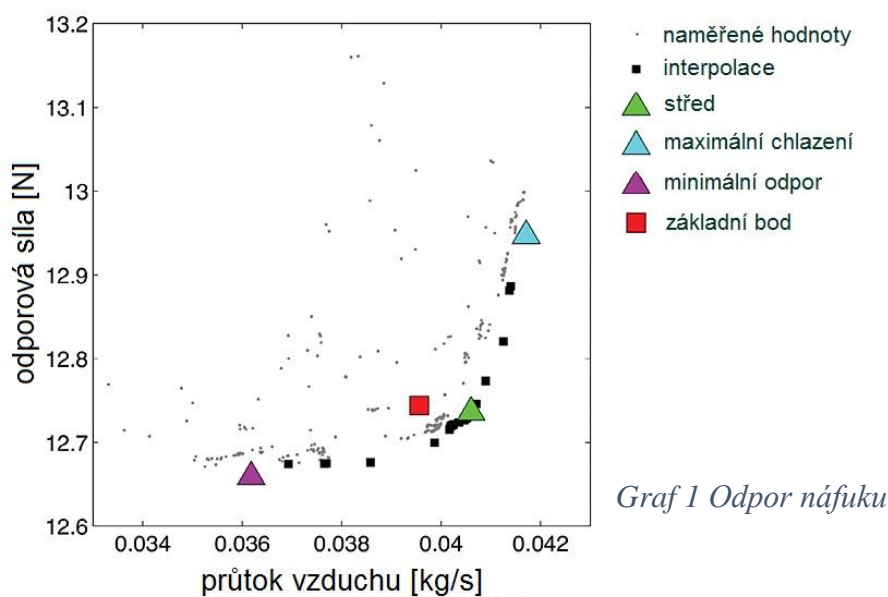


Obr. 9: Princip chlazení brzdové soustavy

Chladný vzduch proudící přímo na třecí plochy není žádaný, protože se tak navyšuje rychlost oxidačních procesů a tím zvyšuje opotřebení. Veškeré parametry, jako teplota nebo například tloušťka obložení, jsou hlídány měřicími sondami uvnitř komponent a dokáží tak informovat o aktuální kondici brzdové soustavy. (7)

Velikost vzduchových kanálů ovlivňuje jak účinnost chlazení brzd, tak i nepříznivě aerodynamiku vozu. Čím větší náfuky jsou, tím větší aerodynamický odpor vzniká (graf. 1). Je tedy potřeba najít tu správnou velikost chladícího kanálu vůči rychlosti opotřebení brzd.

Závodní okruhy mají různorodé trasování vozovky. Existují tratě, které vyžadují častější brzdné režimy a tím nutnost používat vzduchové chladicí kanály mohutnější. Naopak tratě s kratšími brzdnými režimy mohou používat náfuky s menším průřezem. Největší rozdíl tratí je mezi Montrealem, kde jsou brzdy využívány nejvíce a tratí v Silverstonu, která má naopak nejméně brzdných úseků. Náfuky jsou pak velikostně rozdílné natolik, že změna aerodynamického odporu celé formule je 1,5%. (8, 9, 10)



Graf 1 Odpor náfuku

Při rychlosti 320km/h velikostně průměrnými vzduchovými kanály předních brzd proudí vzduch rychlostí přibližně 0,8 m³/s a to je nezanedbatelná velikost energie vozu využitá k ochlazení brzd. Při nesprávné volbě náfuku menší velikosti, než trať vyžaduje, může dojít k velmi rychlému opotřebení nebo až destrukci brzdového kotouče. Neblahý dopad na výdrž brzdového kotouče mají také dlouhé rovinky tratí, kdy dochází k rozdílu teplot až 1000°C a kotouče tak utrpí teplotní šok. Následkem může být taktéž selhání brzdového disku. (5, 10)

3.4. Srovnání studentské formule s ostatními závodními vozy

Ve světě motorsportu existuje mnoho kategorií formulových závodních vozů, kde na vrcholu je formule 1 (obr. 10), následuje GP2 (obr. 11), GP3 (obr. 12) a poté například formule 4 (obr. 13), která se svými parametry, maximálním výkonem 120kW a hmotností 565kg, blíží studentské formuli (obr. 14). Nicméně filozofie obou vozů je ve finále značně rozcházející se. Zatím co vůz formule 4 je konstruován na vysoké rychlosti, studentská formule se pohybuje rychlostmi patrně menšími zhruba do 100km/h (maximální rychlost je kolem 140km/h) a na závodních okruzích se musí vypořádat s mnohem menšími poloměry zatáček, než je tomu u formule 4. K tomu aby byla studentská formule obratná, napomáhají značně mohutnější přitlačná křídla, než je tomu u monopostů dosahujících vyšších rychlostí. Je tak umožněno v zatáčkách dosáhnout až přetížení 2,8G.

Parametry 2015	Výkon [kW]	Hmotnost [kg]	Hmotnostní výkon [kW/kg]
F1	634	702	0,90
GP2	456	688	0,66
GP3	298	630	0,47
F4	120	565	0,21
FS.07	64	195	0,33

Tab. 1 Výkonnostní parametry 2015



Obr. 10: Mercedes W06



Obr. 11: Vůz GP2



Obr. 12: Vůz GP3



Obr. 13: Formule 4



Obr. 14: Vůz FS.07

3.5. Chlazení brzd u konkurenčních vozů Formula Student

Tým Projecto FST (PT)

Chlazení portugalského týmů za použití upraveného disku kola. Připevněný ventilátor se nachází na okraji kola směrem k formuli. Axiálně tvarované lopatky tak při rotaci kola nabírají chladný vzduch z okolí zavěšení a nutí ho protéct skrz kolo. Hmotnost ventilátoru a moment, kterým působí proti rotaci kola, nepříznivě ovlivňuje dynamické vlastnosti kola. (13)

Tento návrh nezahrnuje použití brzdové soustavy ani zavěšení uvnitř kola s je tak nepoužitelný pro vůz FS.07.



Obr. 15: Axiální ventilátor týmu FST

Tým KA-racing (DE)

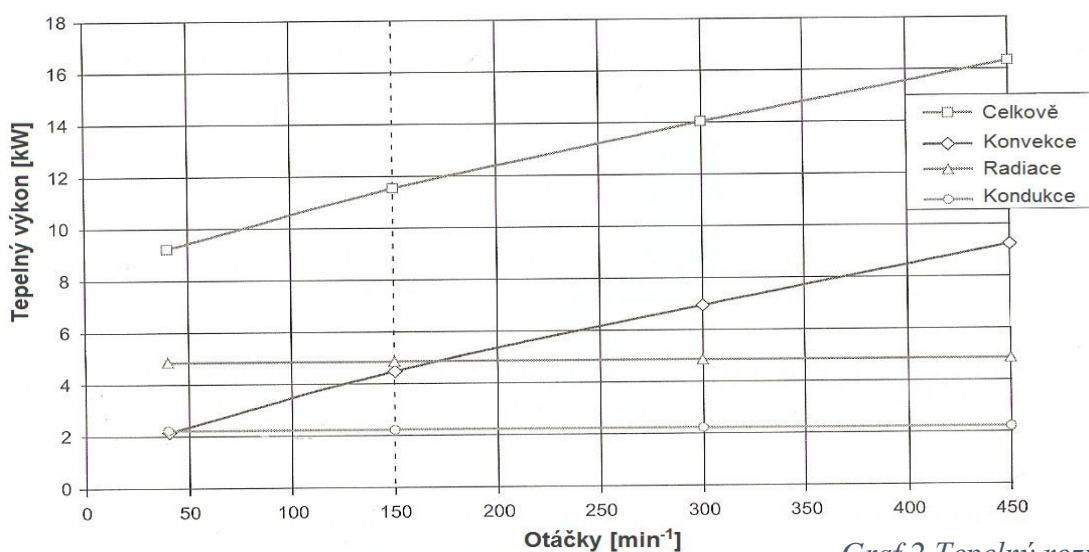
S nedostatečným chlazením brzdové soustavy se potýkal také německý tým u elektrické formule, který po zavedení kol o průměru 10 palců zaznamenal snížený chladicí efekt okolním prostředím. Problém byl vyřešen přidáním brzdového náfuku. Podobné řešení využívá většina týmů, která se potýká s nedostatečným odvodem tepla z brzdové soustavy. (14)



Obr. 16: Náfuk týmu KA-racing

3.6. Tepelný rozptyl z brzdového kotouče

Teplo vzniklé třením mezi brzdovým kotoučem a destičkami je rozptýlováno z míst vzniku za pomoci konvekce (prouděním vzduchu), kondukce (vedením tepla v materiálu) a radiace. Proudění vzduchu kolem brzd je zásadně důležité pro efektivní tepelný odvod při chlazení a to především ve vysokých teplotách kdy je konvekce nejúčinnější. Rozptyl tepelného výkonu je znázorněn v grafu 2, závislý na rotaci kotouče při 600°C. Důležitou vlastností brzdových komponent pro dobré chlazení je vysoká tepelná vodivost k dobrému odvodu tepla z místa vzniku, vysoká teplotní kapacita a velká hustota materiálu důležitá pro absorpci tepelné energie vzniklé třením brzd. (11)



Graf 2 Tepelný rozptyl

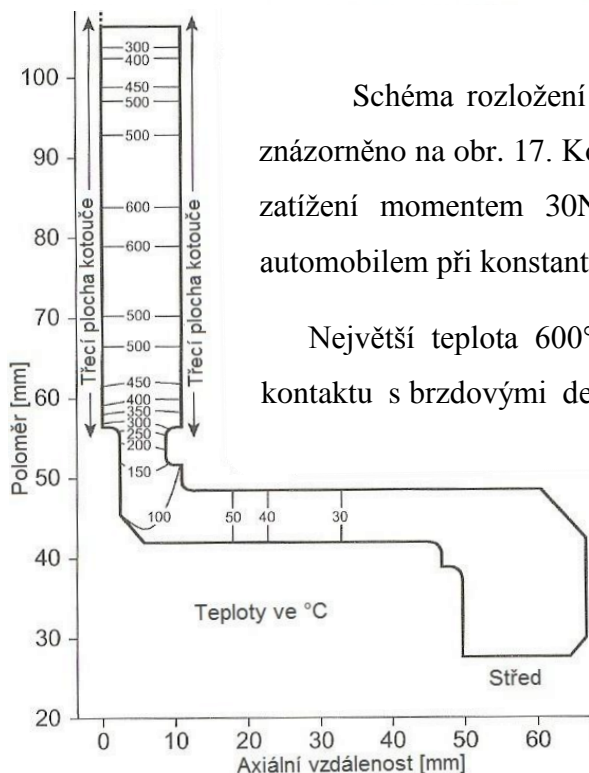


Schéma rozložení teplot na brzděném ocelovém kotouči je znázorněno na obr. 17. Kotouč je vystaven laboratornímu brzděnému zatížení momentem 30Nm, kdy je napodobena jízda osobním automobilem při konstantní rychlosti 50km/h.

Největší teplota 600°C se vytváří podle očekávání uprostřed kontaktu s brzdovými destičkami a teplota se následně kondukcí přenáší rovnoměrně jak do osy kotouče, tak na jeho okraj. (11)

Obr. 17: Rozložení teplot

4. Návrh chlazení brzdového systému

4.1. Představení vozu FS.07

Jedná se o jednosedadlový vůz formulového typu, který je poháněn konvenčním spalovacím motorem Yamaha YZF-R6, jako je tomu u všech předchozích verzí. Tento řadový čtyřválec o objemu 599 cm³ poskytuje 64 kW při 10 400 ot/min. Výkon je omezen restriktorem sání o průměru 20 mm, který je vyžadován pravidly. Motor je příčně umístěn mezi pilotem a zadní nápravou v ocelovém trubkovém rámu. Zavěšení kol je nezávislé, odpružené nastavitelnými tlumiči. Výkon je přenášen na zadní nápravu sekvenčním řetězem a převodovkou s elektropneumatickým sekvenčním řazením. (12)

Brzdy jsou na zadní nápravě kotoučové na zakázku vyrobené o průměru 208 mm s vlastními dvou-pístkovými brzdovými třmeny. Přední náprava je osazena brzdovými kotouči taktéž navržené o průměru 205 mm s čtyř-pístkovými brzdovými třmeny vlastní konstrukce (obr. 18). Brzdy jsou dvou-okruhové s nastavitelným rozložením brzdného tlaku mezi přední a zadní nápravu. (12)

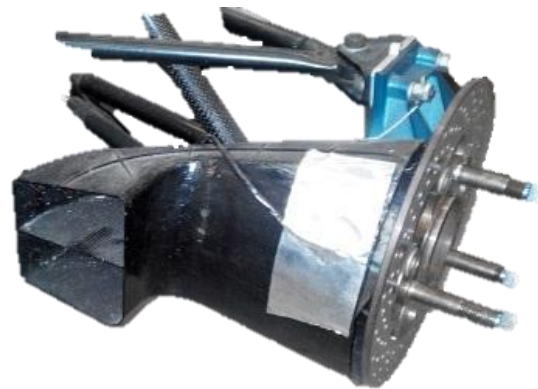


Obr. 18: Kotoučová brzda vozu FS.07

4.2. Minulé koncepce náfuků

Pro studentskou formuli FS.06 byly již dříve navrženy náfuky, které chladily pouze brzdový kotouč (obr. 19). Náfuk byl umístěn hned za předním přítlačným křídlem, kde ale není dostupný velký tlak vzduchu. Ukázalo se, že chlazení brzdového kotouče nestačí. Při velkém brzděném zatěžování se brzdový třmen spolu s destičkami přehřívali a často docházelo k poškození této soustavy a to tak, že těsnění, které vymezuje vůli mezi pístkem a válcem, se vlivem vysokých teplot připékalo. Výsledkem poté byla náročná výměna těsnění za nové.

První generace náfuků na brzdy pro vůz FS.06 měla poměrně veliký sací otvor (cca. 6400mm^2). Pro nevelkou tvarovou složitost a jeden ohyb nebyly příliš velké aerodynamické ztráty. Upevnění náfuku bylo provedeno nerozebíratelným spojem a to přilepením přímo na těhlici kola. Toto řešení nebylo příliš vyhovující, kdy je tímto připevněním například znemožněn dobrý přístup k snímači otáček kola.



Obr. 19: Náfuk vozu FS.06

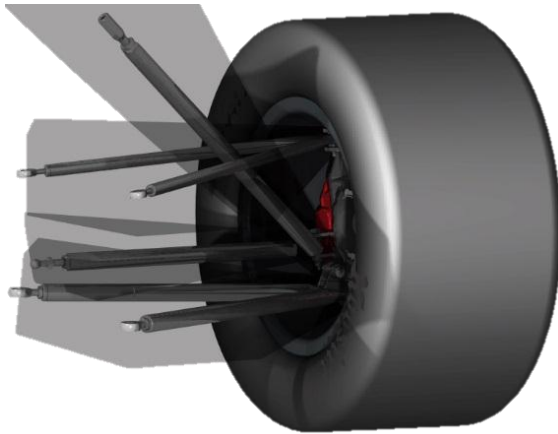
Pro formuli FS.07 byl upraven náfuk koncepce první tak, že odpadl princip lepeného spoje. Uchycení bylo pomocí šroubů, které plní hlavní funkci při upevnění těhlice k hornímu a spodnímu ramenu nápravy. Chlazení bylo ale stejných parametrů jako u první generace a funkce brzdového třmenu tak byla stále hodně tepelně namáhána. Navíc byla konstrukce úchytů poddimenzována a nevydržela kombinaci dynamického a tepelného namáhání od těhlice. Destrukce úchytu je patrná na obr. 20.



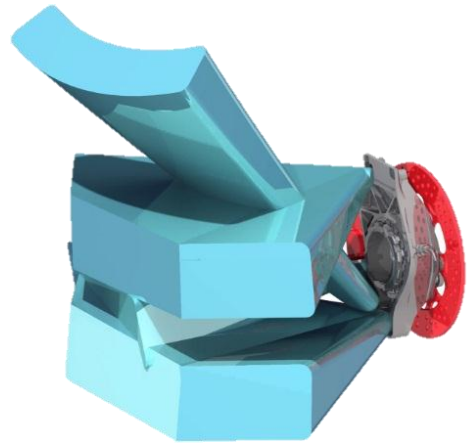
Obr. 20: Náfuk vozu FS.07

4.3. Návrh náfuků pro vůz FS.07

Při umístění náfuku na tělo těhlice vznikne takzvaná obálka (obr. 22), tedy prostor, který uzavře maximální výchylky pohyblivých ramen a celého zavěšení. Odhalí se tak zbylý prostor, který již nekoliduje s žádnými pohyblivými částmi formule. V těchto místech je možné navrhovat vzduchové potrubí, které bude chladit brzdový systém.



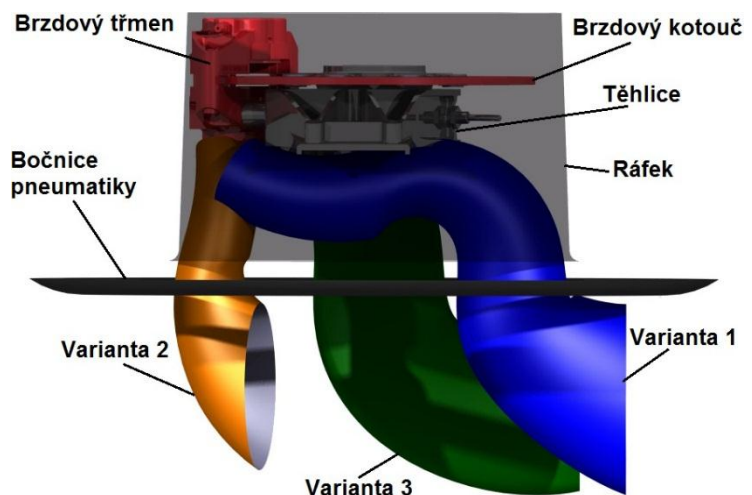
Obr. 21: Zavěšení kola



Obr. 22: Obálka zavěšení

4.4. možné varianty

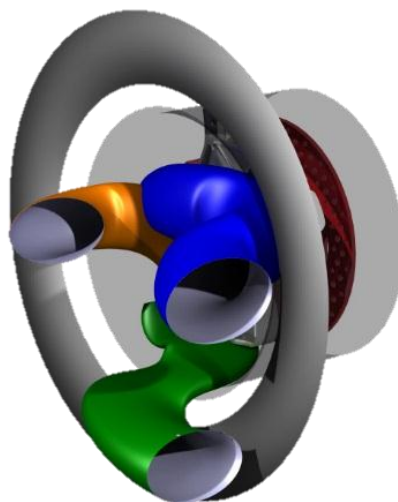
Prioritní chlazení brzdového třmenu umožní několik variant tvaru vzduchového kanálu. Jako první návrh lze umístit náfuk začínající uprostřed zavěšení kol před přítlačným křídlem, ústící vnitřkem kola. Po vyhnutí v dráze tyče odpružení se vzduchové potrubí dostane až k brzdovému třmenu. Vznikne tak náfuk, který je poměrně dlouhý a těžký. Dvojitým zahnutím je taktéž ne příliš příznivý pro proudění, které tak bude mít značný aerodynamický odpor.



Obr. 23: Kolová soustava

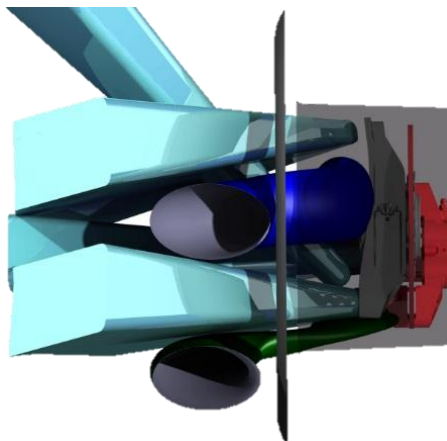
Druhým možným způsobem, kam náfuk umístit je takový, kdy počátek je až za tyčí odpružení a stáčí se rovnou k brzdovému třmenu. Vznikne tak konstrukce relativně malá a lehká, svým tvarem ne příliš odporová vůči proudícímu vzduchu.

Třetí typ by mohl být umístěn pod zavěšením, tedy začínající pod přitlačným křídlem a poměrně malým průřezem mezi spodním ramenem a ráfkem zakončený u brzdového třmenu. Vznikne náfuk dvakrát zalomený o střední velikosti a hmotnosti.



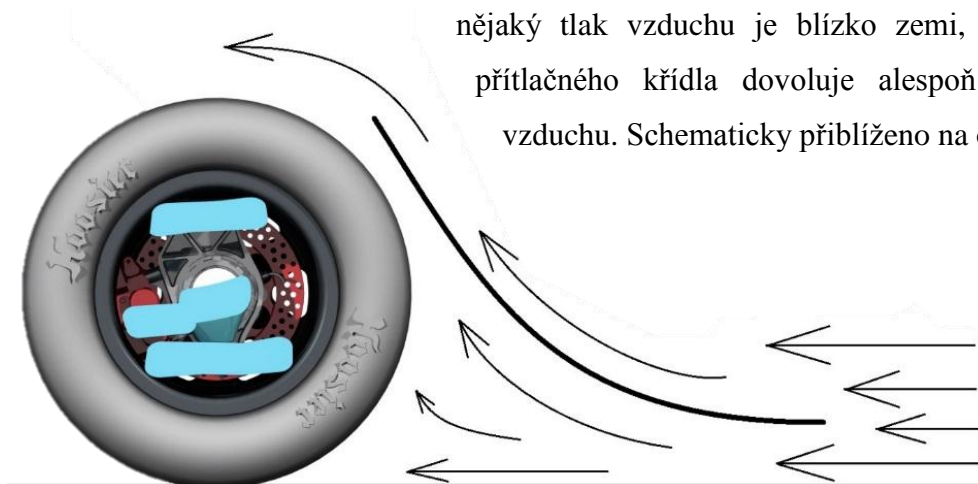
Obr. 24: Varianty náfuků

Při návrhu je třeba brát v úvahu tři největší aspekty (obr. 27), které budou rozhodovat o efektivní funkci vzduchového potrubí. Jelikož je náfuk připevněn k těhlici, jedná se o neodpruženou hmotu a tak je třeba dbát na co nejmenší hmotnost. Druhou podmínkou pro správnou funkci je tvarová složitost, kdy příliš mnoho záhybů a změn průřezu nepříznivě zvyšuje aerodynamický odpor při protékání vzduchu náfukem. A jako třetí aspekt je celkové umístění náfuku. Pozice za přitlačným křídlem není příliš rozumná, jelikož je zde málo proudivého vzduchu. Jediné místo, které dovoluje

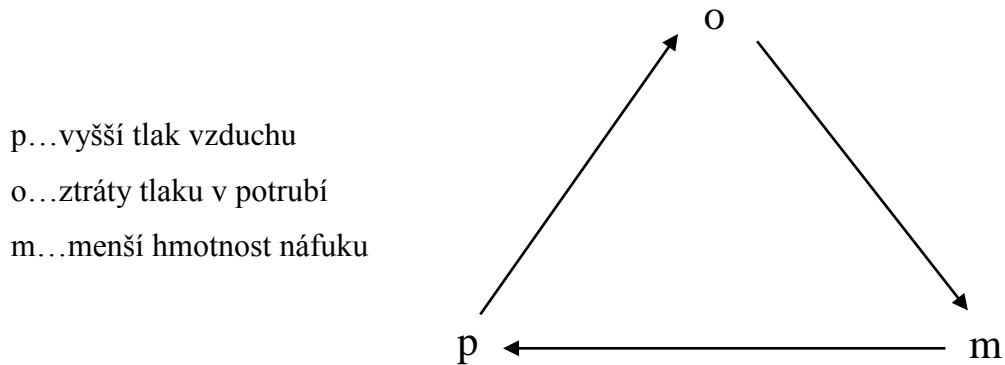


Obr. 25: Náfuky s obálkou

nějaký tlak vzduchu je blízko zemi, kde absence přitlačného křídla dovoluje alespoň nějaký tok vzduchu. Schematicky přiblíženo na obr.26.



Obr. 26: Směr toku vzduchu



Obr. 27: Aspekty návrhu

Z nasbíraných poznatků můžeme vyvodit výsledky navržených náfuků. U prvního typu je jedinou možnou výhodou jeho veliký průřez a potenciálně vysoký průtok nasátého vzduchu. Umístění před přitlačným křídlem ale tuto výhodu anuluje. Vysoká hmotnost je taktéž nevýhodná. Druhý typ náfuku je podstatně menší což prospívá jeho hmotnosti. Pozice je za přitlačným křídlem zhruba ve vzdálenosti 300 mm a tím bude stále velmi snížený tok vzduchu. Třetí možný typ náfuku je umístěn pod přitlačným křídlem a vzniká zde potenciálně větší tok vzduchu oproti předešlým řešením, i přesto že proudy vzduchu blízko zemi jsou hodně turbulentní. Svým umístěním se jedná o variantu s nejnižším těžištěm. Komplexnost náfuku vytváří poměrně značný aerodynamický odpor. Všechny varianty se nachází za přitlačným křídlem, proto se sací otvory náfuků nachází v oblastech podtlaku.

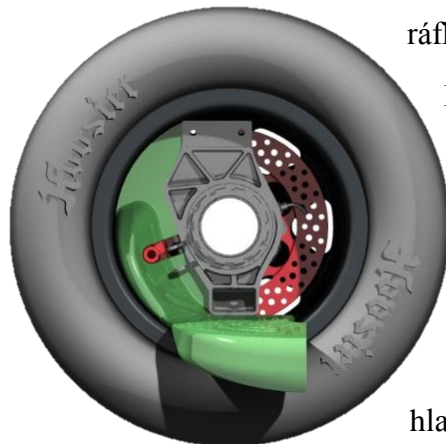
Většina formulových náfuků se ubírá stylem varianty 1, nicméně návrh 3 nabízí poměrně zajímavé hodnoty toku vzduchu a proto se bude práce ubírat stylem právě této atypické varianty.

Varianta náfuku	Modrá (varianta 1)	Oranžová (varianta 2)	Zelená (varianta 3)
Tlak vzduchu	menší	menší	větší
Aerodynamické ztráty	střední	menší	střední
Velikost	větší	menší	střední

Tab. 2 Porovnání variant

4.5. Výsledek návrhu

Výsledkem je model (obr. 28) navržený v programu Catia V5 R21. Toto vzduchové potrubí napodobuje návrh číslo tři a respektuje zadané podmínky uchycení a primární chlazení brzdového třmenu. Povrch je částečně žebrovaný, kvůli větší tuhosti. Zbylá místa, která náfuk



Obr. 29: Umístění náfuku

ráfkem nebyla možnost proudění vzduchu zpět k formuli (obr. 29). Veškerý proud je tedy nucen protéct kolem brzdového třmenu.



Obr. 28: Navržený náfuk

Uchycení je provedeno na třech bodech, kdy první hlavní je sešroubování přímo k těhlici u spoje spodního ramena (obr. 30). Ostatní dvě jsou přišroubovány k brzdovému třmenu, jehož hlavním smyslem je uchycení brzdiče k těhlici (obr. 31).



Obr. 30: Upevnění k těhlici



Obr. 31: Upevnění k brzdovému třmenu



Obr. 32: Řezy v místech uchycení

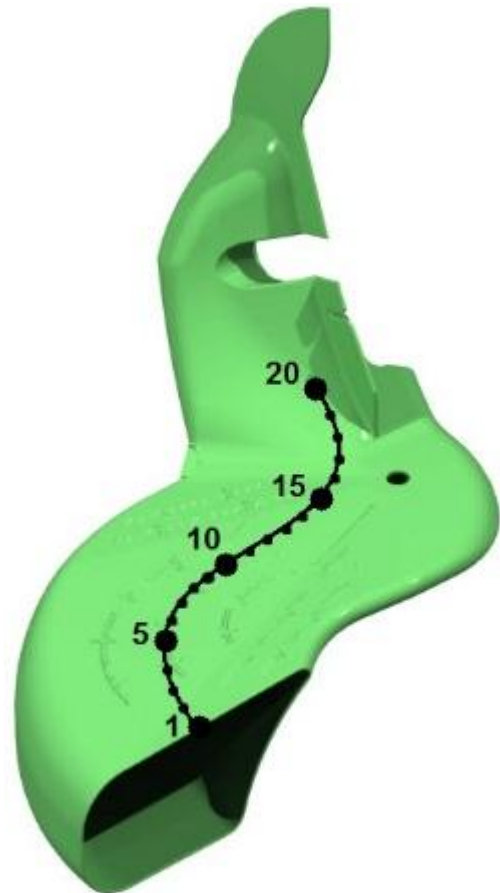
4.6. Kontrakce náfuku

Proměnlivost průřezu náfuku (graf 3) na jeho délce byla zjištěna za pomoci programu Catia V5, kde byly odečteny hodnoty průřezů na daných pozicích (obr. 33). Sací otvor má průřez 5200mm^2 (pozice 1). Při ústění do vnitřku kola se otvor poměrně značně zmenšuje až na hodnotu 1900mm^2 (pozice 12). Průřez poté nepatrně kolísá až do pozice 20, kde je již náfuk otevřený a vzduch je tak přístupný brzdovému třmenu. Kontrakce nejmenšího průřezu oproti sacímu otvoru je až 63%.

$$Z = \frac{S_o - S_U}{S_o} * 100$$

$$Z = \frac{5200 - 1900}{5200} * 100$$

$$Z = 63,46\%$$

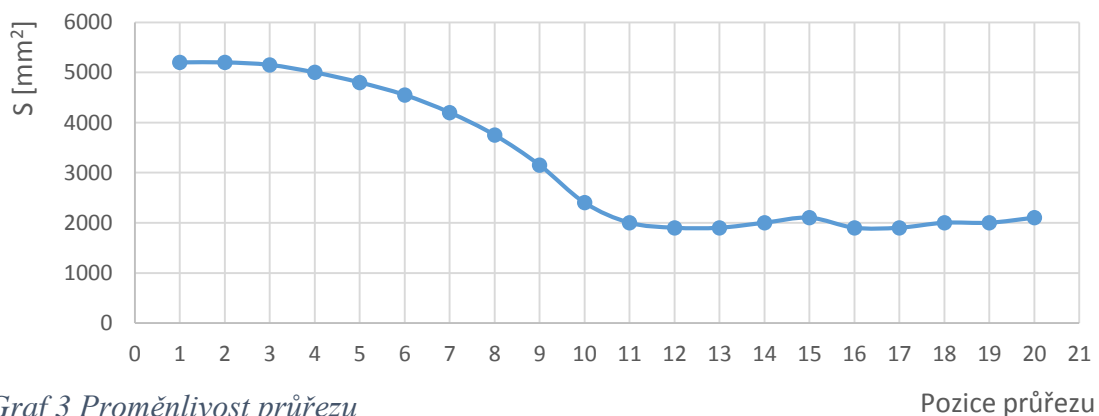


Obr. 33: Místa měřených průřezů

Z...Kontrakce

S_o ...Sací průřez

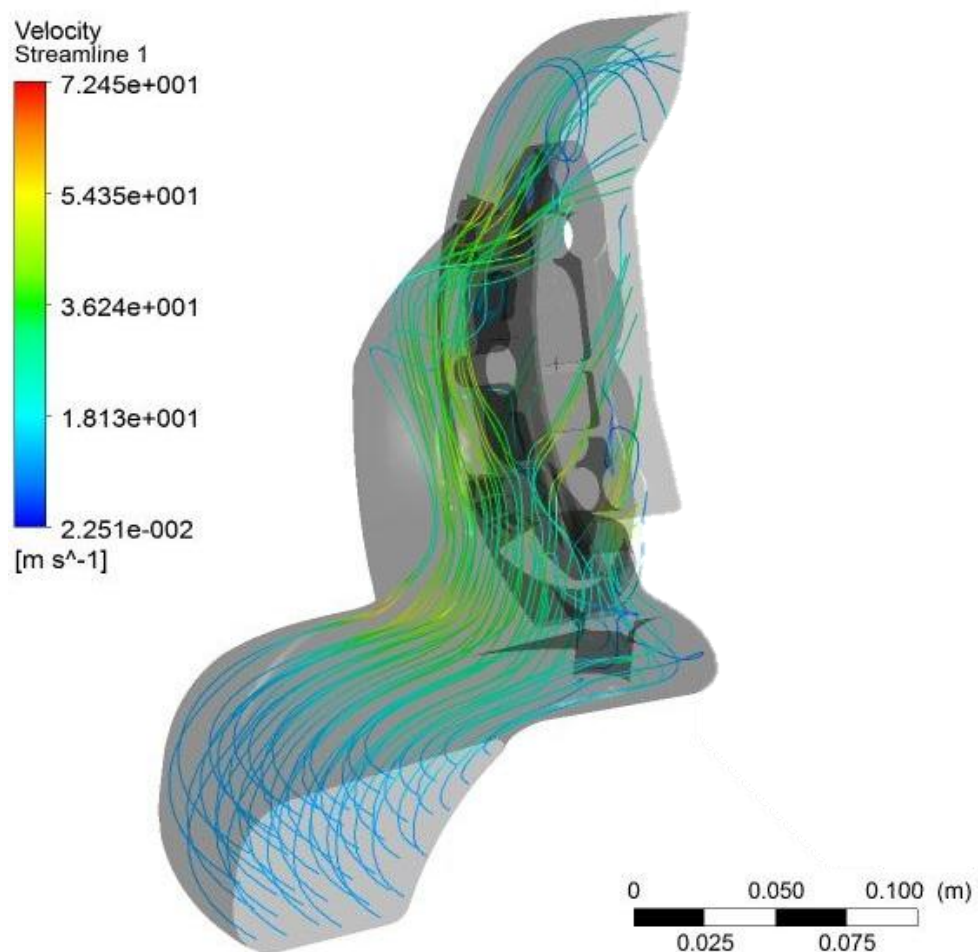
S_U ...Nejmenší průřez



Graf 3 Proměnlivost průřezu

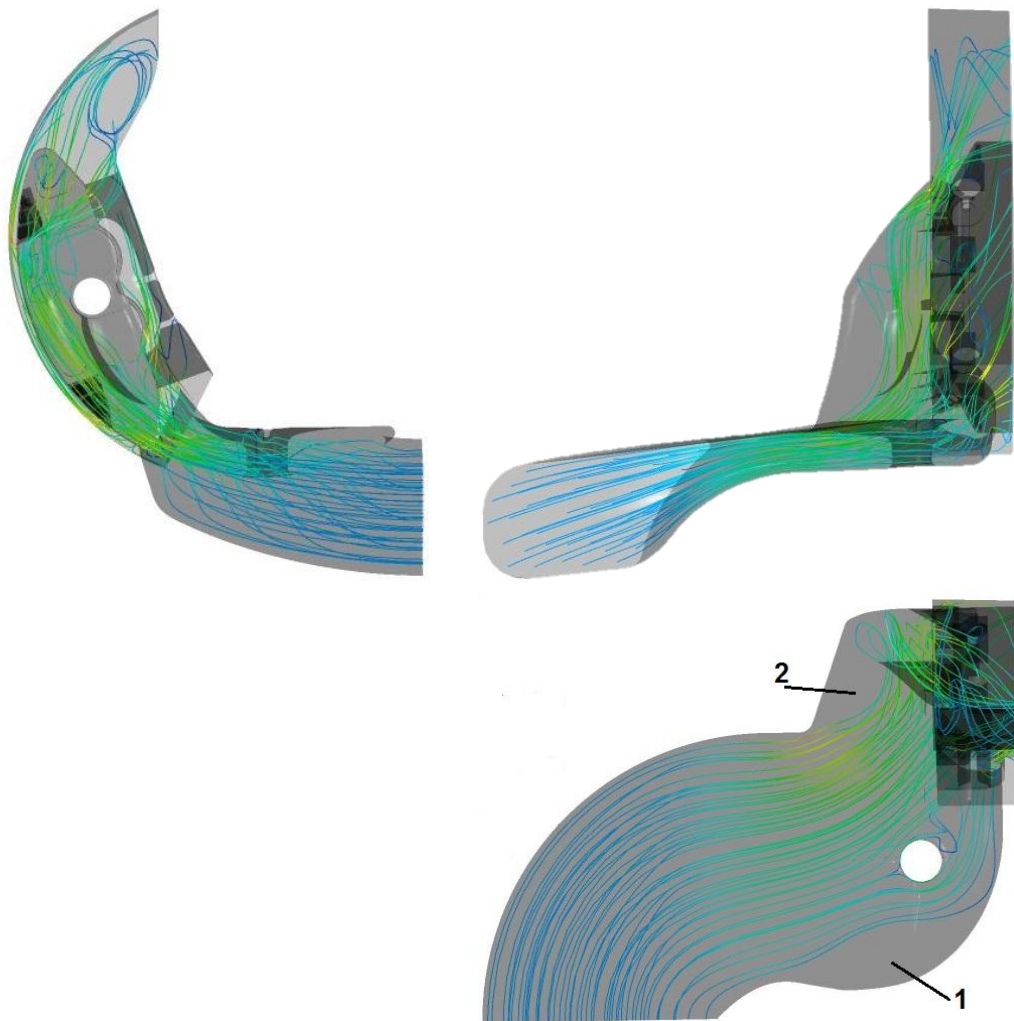
4.7. Simulace proudění vzduchu

Simulační nástroje umožňují získat relativně rychlou informaci o proudění v prostorovém modelu. K vytvoření analýzy je potřeba zadat vstupní hodnoty jako je typ a rychlost tekutiny, výstupní a vstupní otvor a apod. Výsledkem jsou vymodelované proudnice, které odhalí problematická místa navrhovaného modelu. Vzhledem k složitosti programu a pro nedostatečné zkušenosti, není zaručena správnost výsledku. Prostory pro zlepšení proto jistě jsou. K simulaci byl použit program Ansys R16.0 a model náfuku z Catia V5 R21.



Obr. 34: Proudění vzduchu v náfuku

Provedená simulace odhalila místa, kterými proud vzduchu neteče a je tedy vhodná korekce modelu za účelem dokonalejšího proudění vzduchu nebo snížení hmotnosti. Hlavní místa přebytečných částí jsou označena na obr. 35. Nejcitelnějším bodem, kde dochází k velké změně rychlosti a tím nárůstu odporového tlaku proudu je místo v nejmenším průřezu při vstupu náfuku dovnitř kola. Konstrukce zavěšení kola nicméně neumožňuje větší profil, který by napomohl lepšímu proudění. Poté co se proud vzduchu vypořádá se záhyby vzduchového potrubí, pokračuje dále při obtékání brzdového třmenu. Následně probíhá proudění na brzdový kotouč, kde simulace končí.



Obr. 35: 3 pohledy simulovaného modelu

4.8. Realizace návrhu

Po schválení navrženého modelu konstruktéry studentské formule, přišla na řadu jeho realizace (obr. 36). Ta se uskutečnila za pomoci 3D tiskárny firmy MCAE jako to bylo u předchozích generací náfuků a dalších komponentů formule.

Materiál plastu je PC-ISO (polykarbonát), biokompatibilní termoplast.

Teplotní výdrž 127°C.

Teplota měknutí 139°C

Teplota skelného přechodu 161°C.

Pevnost v tahu 57MPa,

pevnost v ohybu 90MPa.

Youngův modul v tahu 2000MPa.



Obr. 36: Vytištěné náfuky

Náfuk byl namontován na vůz FS.07 a stihl ještě dvakrát vyjet na polygon v Mostě, kde se primárně testoval motor. Daly se tak vyvodit částečné závěry o tom, jak tento náfuk plní svou funkci chlazení. Na brzdiči a ráfku byly nalepeny teplotní pásky (obr. 37), které dokáží zaznamenat nejvyšší teplotu na daném místě vzniklé. Teplotní pásky nalepené na voze byly s rozsahem 116 až 154°C a bohužel nezaznamenaly žádnou hodnotu. Teplota na daných místech byla tedy menší. Důvodem může být nedostatečné zatížení brzdové soustavy a krátké brzdící cykly v kombinaci s dostatečným chlazením novým náfukem.



Obr. 37: Teplotní páska

Odhalily se také dva hlavní nedostatky. Tím že je sací část náfuku umístěna příliš blízko vozovce, naráží na jeho hrany nečistoty a to především kamínky, které plast poškozují. Druhá slabina se ukázala jako málo pevné uchycení k brzdovému třmenu. Úchyty jsou poměrně miniaturní a v kombinaci s omezenou pevností plastu se v těchto místech vytváří praskliny.

K utlumení těchto nedostatků je vhodné upravit navržený model zmohtnutěním úchyťů a sacího otvoru. Dalším možným řešením obou problémů je použití lepšího materiálu, uhlíkových vláken, které ovšem 3D tiskárna není schopna realizovat. Po úpravách náfuku by mohl být vytištěný model použit jako jádro pro oblaminování. Výsledkem tak může být podstatně pevnější a tvrdší náfuk z uhlíkových vláken, odolnější proti působení vnějších vlivů.

Na obr. 39 je znázorněn upevněný náfuk na voze FS.07. Je zde vidět odštípnutý kus plastu v místě nejmenšího zaoblení, způsobený vířenými kamínky. Na obr. 38 je názorná ukázka umístění sací části náfuku pod přitlačným křídlem.



Obr. 38: Náfuk pod přitlačným křídlem



Obr. 39: Náfuk umístěný na FS.07

5. Závěr

V mé bakalářské práci jsem se snažil objasnit fungování chlazení brzdných systémů u závodních vozů formulových kategorií. Následně jsem navrhl vzduchové potrubí, které respektuje geometrické parametry studentské formule FS.07. Schválený náfuk byl podroben počítačové analýze proudění vzduchu. Výsledný model byl poté realizován firmou MCAE za pomoci 3D tisku. Zkoušením na polygonu se ukázalo, že náfuk má potenciál ochladit brzdovou soustavu, není proto ale nasbíráno dostatek průkazných hodnot.

Seznam použitých zdrojů

- (1) **Pauer, Václav.** *Vývoj konstrukce závodních vozů.* Praha: Granda Publishing, a.s., 2011. ISBN 978-80-247-3015-8.
- (2) Internetová encyklopedie. *Band brake.* [online] http://www.wikiwand.com/en/Band_brake
- (3) Web zaměřující se na techniku motocyklů. *Karbonové brzdy.* [online] 6. 3. 2016. <http://www.okruhari.cz/cs/technika-motocyklu-karbonove-brzdy>
- (4) Web zaměřující se na techniku F1. *Brake systém.* [online] 3. 6. 2008. <http://www.f1technical.net/articles/2>
- (5) Web zaměřující se na automobilovou techniku. *Tajemství brzd F1.* [online] 18. 10. 2015. <http://www.autoforum.cz/technika/tajemstvi-brzd-formule-1-jak-funguji-nejlepsi-brzdy-sveta/>
- (6) Web zaměřující se na techniku F1. *Brzdy pro sezonu 2015.* [online] 1. 4. 2015. <http://f1news.autoroad.cz/technika/50349-brzdy-pro-sezonu-2015-vyssi-brzdny-moment-pokroky-v-chlazen-i-v-materialech>
- (7) **Wright, Peter.** *Formula 1 technology.* Warrendale: SAE International, 2001. ISBN 0-7680-0234-6.
- (8) Web zaměřující se na technické aplikace. *Optimizing the Design of an F1 Brake Cooling Duct.* [online] 17. 4. 2012. <http://www.designworldonline.com/optimizing-the-design-of-an-f1-brake-cooling-duct/>
- (9) Web zaměřující se na závodní vozy. *Brake systems.* [online] 23. 7. 2014. <http://www.racecar-engineering.com/technology-explained/f1-2014-explained-brake-systems/3/>
- (10) *Brzdový kanálek F1.* [online] <http://www.jenpromuze.cz/supercars/pitstop/5942-brzdovy-kanalek-f1-spolyka-420-litru-vzduchu-za-sekundu>
- (11) **Day, Andrew.** *Braking of road vehicles.* Eastbourne: Elsevier International, 2014. ISBN 978-0-12-397314-6.
- (12) Web týmu CTU CarTech. [online] <http://cartech.cvut.cz/vuz/>
- (13) **Garcia, G.** *Computational Simulation of the Flow Around a Rim of Competition* [online] <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142129660/Resumo.pdf>

- (14) Internetový článek. *Racecar Engineering*. [online] 9. 2013. http://www.amzracing.ch/sites/default/files/media/20130901_racecarengineering.pdf
- (15) Obrázkové uložení [online] 12. 8. 2014. <http://www.cars-pics-db.com/photo/panhard-levassor-type-a/10/default.html>
- (16) Web zaměřující se na techniku F1. *Mercedes presents F1 W06 Hybrid*. [online] 1. 2. 2015. <http://www.f1zone.net/news/mercedes-presents-f1-w06-hybrid/44966/>
- (17) Web zaměřující se na vozy GP2. *SIROTKIN AND RAPAX TOGETHER FOR THE 2015 SEASON*. [online] 17. 2. 2015. http://www.gp2series.com/News-Room/News/2015/02_Feb/Sirotkin-and-Rapax-together-for-the-2015-season/
- (18) Web zaměřující se na techniku F1. *GP3 switches to NA V6 for 2013*. [online] 7. 9. 2012. <http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=13134>
- (19) Web zaměřující se na automobily. *Mygale 2015 Formula 4*. [online] 26. 2. 2015. <http://www.goauto.com.au/mellor/mellor.nsf/story2/1458C4219282D39FCA257DF8001BC997>
- (20) Web zprostředkávající měřicí technologie. *THERMAX 8 LEVEL STRIPS*. [online] <http://www.tmchallcrest.com/products/labels/irreversible/thermax-1/thermax-8-level-strips>
- (21) Web zabývající se 3D technologiemi. *Spolupráce MCAE systems a CTU CarTech*. [online] 24. 2. 2015. <http://www.mcae.cz/spoluprace-mcae-systems-a-ctu-cartech>

Seznam obrázků

Obr. 1: Vůz Ponthard-Levassor (15).....	9
Obr. 2: Diferenciální pásová brzda (2)	9
Obr. 3: Zavěšení vozu Gordini F2 (1).....	10
Obr. 4: Umístění brzd vozu Mercedes W196 (1).....	10
Obr. 5: Chlazení vozu Mercedes W196 (1)	10
Obr. 6: Kotoučová brzda vozu Cooper-Alfa (1)	11
Obr. 7: Náfuk vozu Bugatti 251 (1).....	11
Obr. 8: Efektivní teplota kotouče (4)	14
Obr. 9: Princip chlazení brzdové soustavy (7).....	15
Obr. 10: Mercedes W06 (16)	17
Obr. 11: Vůz GP2 (21).....	17
Obr. 12: Vůz GP3 (22).....	17
Obr. 13: Formule 4 (23).....	17
Obr. 14: Vůz FS.07 (16)	17
Obr. 15: Axiální ventilátor týmu FST (13)	18
Obr. 16: Náfuk týmu KA-racing (14)	18
Obr. 17: Rozložení teplot (11)	19
Obr. 18: Kotoučová brzda vozu FS.07	20
Obr. 19: Náfuk vozu FS.06 (21)	21
Obr. 20: Náfuk vozu FS.07.....	21
Obr. 21: Zavěšení kola.....	22
Obr. 22: Obálka zavěšení.....	22
Obr. 23: Kolová soustava.....	22
Obr. 24: Varianty náfuků	23

Obr. 25: Náfučky s obálkou.....	23
Obr. 26: Směr toku vzduchu.....	23
Obr. 27: Aspekty návrhu.....	24
Obr. 28: Navržený náfuk	25
Obr. 29: Umístění náfuku	25
Obr. 30: Upevnění k těhlici.....	25
Obr. 31: Upevnění k brzdovému třmenu	25
Obr. 32: Řezy v místech uchycení	25
Obr. 33: Místa měřených průřezů	26
Obr. 34: Proudění vzduchu v náfuku	27
Obr. 35: 3 pohledy simulovaného modelu.....	28
Obr. 36: Vytištěné náfučky.....	29
Obr. 37: Teplotní páska (20).....	29
Obr. 38: Náfuk pod přítlačným křídlem	30
Obr. 39: Náfuk umístěný na FS.07	30

Seznam tabulek

Tab. 1 Výkonnostní parametry 2015	17
Tab. 2 Porovnání variant.....	24

Seznam grafů

Graf 1 Odpor náfuku (17)	16
Graf 2 Tepelný rozptyl (11)	19
Graf 3 Proměnlivost průřezu.....	26

Seznam příloh

- (1) 3D model náfuku (formát .CATPart a .stp)
- (2) Simulace proudění vzduchu navženého modelu (formát .wmv)
- (3) Materiálový list PC-ISO (formát .pdf)