



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU KOMPAKTNÍM VÝMĚNÍKEM VE VĚTRNÉM TUNELU

AIR FLOW MEASUREMENT THROUGH COMPACT HEAT EXCHANGER IN WIND TUNNEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michael Žůrek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Šebela

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Michael Žůrek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Šebela**
Akademický rok: 2022/23

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:

Měření průtoku vzduchu kompaktním výměníkem ve větrném tunelu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Optimalizace průtoku vzduchu přes kompaktní výměník tepla je komplexní téma, které se řeší u sportovních i sériových vozů. Při vyšších rychlostech je podstatný aerodynamický odpor vznikající na výměníku zejména pro sériové vozy. U závodních vozů je primární odvedení tepla z pohonného ústrojí. Ověření za jízdy je komplikované, jelikož dosažení ustáleného stavu je obtížné a složité. Využitím větrného tunelu je možné dosáhnout stabilních podmínek. Práce se zaměří na měření na voze Dragon. Změřeny budou průtoky a tlakové poměry na výměníku. Na základě provedených měření a vyhodnocení dat bude provedeno zhodnocení současného stavu a navržený úpravy pro zlepšení parametrů následující generace vozu.

Cíle bakalářské práce:

Příprava vozu na měření v aerodynamickém tunelu.

Měření průtoku vzduchu kompaktním výměníkem a další měření dostupnými snímači.

Vyhodnocení naměřených dat.

Návrh a úpravy stávajícího konceptu pro zlepšení aerodynamických parametrů vozu.

Seznam doporučené literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of Road Vehicles. Fourth. Würzburg: Butterworth-Heinemann, 1987, 562 s. 4 th. ISBN 978-0-7506-1267-8. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1267-8.50002-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1267-8.50002-6).

TROPEA, Cameron, Alexander YARIN a John F. FOSS. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin: Springer, 2007, 1496 s. ISBN 978-3-540-25141-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce popisuje soutěž Formule Student, přehled používaných aerodynamických prvků, umístění výměníků na těchto monopostech a současném vozu Dragon e2. Další část se zabývá používanými výměníky a jejich aerodynamickým odporem, zejména způsobeným jejich nakloněním a nerovnoměrným prouděním. Následuje popis přípravy a průběhu měření v aerodynamickém tunelu, popis obecných a použitých měřících přístrojů. Byl vytvořen a popsán algoritmus, který byl použit pro vyhodnocení měření a okomentován vliv některých faktorů. Na pravém výměníku byly porovnány metody měření průtoku, jmenovitě měření sondou, tlakovou diferencí a turbinovým průtokoměrem. Na levém výměníku byl pozorován vliv vybraných aerodynamických elementů. Poslední částí je měření alternativní polohy výměníku za zadní nápravou vozu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Větrný tunel, měření průtoku, Formule Student, měření ve větrném tunelu, kompaktní výměník

ABSTRACT

This thesis describes Formula Student competition, overview of used aerodynamic devices, placement of compact heat exchangers on these monoposts and current monopost Dragon e2. Next section examines commonly used compact exchangers and their aerodynamic drag, mainly caused by angling and ununiform flow. Subsequently is described the process of preparation, measurement in wind tunnel and measuring devices. An algorithm was created and described, which was used for evaluation of measurement, influence of some factor was commented. On the right-side compact exchanger, methods of measuring were compared, namely pneumatic probe, pressure difference and turbine anemometer. On left side exchanger were observed influence of various aerodynamic elements. Lastly alternative position behind vehicle rear axle was measured.

KEYWORDS

Wind tunnel, flowrate measurement, Formula Student, wind tunnel measurement, compact exchanger

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽŮREK, Michael. Měření průtoku vzduchu kompaktním výměníkem ve větrném tunelu. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Kamil Šebela. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149363>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Kamila Šebely a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Michael Žůrek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Ing. Kamilu Šebelovi za věcné připomínky a návrhy při zpracování bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat týmu TU Brno Racing a firmě Jaroš. za možnost provést měření.

Především však chci poděkovat mé rodině za podporu během studia.

OBSAH

Úvod	9
1 Formule student	10
1.1 Aerodynamika	10
1.2 Konstrukční varianty	11
1.2.1 Centrální umístění	11
1.2.2 Zadní uchycení	12
1.2.3 Přední uchycení	12
1.3 Aktuální stav	13
2 Chladicí systémy	15
2.1 Kompaktní lamelové výměníky	15
2.2 Aerodynamický odpor kompaktního výměníku	16
2.3 Naklonění výměníku	17
2.4 Neuniformita proudění	17
3 Příprava měření ve větrném tunelu	18
3.1 Aerodynamické tunely	18
3.2 Omezení větrných tunelů	19
3.3 Použitý větrný tunel	21
3.4 Uchycení měřeného vozidla v tunelu	21
4 Postup měření	23
4.1 Měření průtoku	23
4.1.1 Měření sondou	23
4.1.2 Měření tlakové difference	23
4.1.3 Měření turbínovým průtokoměrem	24
4.2 Použitá měřicí aparatura	25
4.2.1 3D Měření sondou	25
4.2.2 Měření tlakové difference	26
4.2.3 Měření turbínovým průtokoměrem	27
4.3 Průběh měření	27
5 Obecné zpracování dat	29
5.1 Základní soubor dat	29
5.2 Algoritmus	30
5.3 Normalizace dat	31
5.4 Vyhodnocení 3D měření	31
5.5 Vliv teploty	32
5.6 Vliv vlhkosti	32
6 Pravý výměník	33
6.1 Pneumatická sonda	33
6.2 Tlaková difference	35
6.3 Turbinový průtokoměr	35
6.4 Nejistoty měření	35

7	Levý výměník.....	36
7.1	Zakrytý výměník	36
7.2	Vypnutý ventilátor.....	37
7.3	Zapnutý ventilátor	37
7.4	Návrhová jízdní výška.....	37
7.5	Odstraněný negativní element	37
7.6	Odstraněné přední křídlo	37
7.7	Horizontálně a vertikálně částečně zakrytý vstup	37
7.8	Nejistoty měření	38
8	Alternativní poloha	39
	Závěr	40
	Použité informační zdroje	41
	Seznam použitých zkratk a symbolů	45
	Seznam příloh.....	46

ÚVOD

Výkon disipovaný výměníkem přímo určuje maximální dlouhodobý výkon každého vozidla. Ztrátový výkon je třeba odvádět především z výkonových komponent, kterými jsou u formule student frekvenční měnič a synchronní motory. Pro zvýšení užitečného výkonu vozu je tedy nutné optimalizovat výkon výměníku. Toho může být dosaženo optimalizací průtoku výměníkem.

Návrh může být směřován na dosažení maximálního průtoku, nebo naopak minimalizaci tlakové ztráty a snížení aerodynamického odporu. Maximální průtok umožní vyšší výkon vozu, kterého je využíváno zejména při dynamické jízdě, snížení odporu zvyšuje maximální dosažitelnou rychlost a snižuje spotřebu, která je palčivým tématem všech vozidel, elektrických i spalovacích. I přes stále rozvíjející se metody numerických simulací je nejvhodnější metodou stanovení průtoku stále používané měření v aerodynamickém tunelu. Úskalím simulací je kombinace velmi drobných plošek neznámé geometrie, zlepšující přestup tepla, a značně rozměrných aerodynamických elementů, které ovlivňují rozložení proudění vstupující na výměník. Měření v tunelu odstraňuje problémy neznámé geometrie i rozdílů velikostí, lépe se přibližuje realitě, přesto má svá specifika. Zásadním problémem je dostupnost a volná kapacita aerodynamických pracovišť. Dále je nutné počítat s vysokou finanční náročností, a proto je třeba měření vhodně předem naplánovat.

Výsledky měření na stávajícím monopostu Dragonu e2 je možné přenést na budoucí generace formulí, nejen na aktuálně vyvíjený monopost Dragon e3. Cílem je maximální chladicí výkon, umožňující nejvyšší kontinuální výkon monopostu, při současném snížení aerodynamického odporu a hmotnosti.

1 FORMULE STUDENT

Formule student je celosvětová soutěž, v Americe známá jako Formula SAE, charakterizovaná sbírkou pravidel, za kterou v Evropě odpovídá organizace Formula Student Germany. Jejím cílem je získat prostředky, navrhnout a vyrobit závodní monopost formulového typu, a tím doplnit teoretické znalosti získané studiem. Celkově je návrhu ponechána značná volnost, pravidla předepisují především bezpečnostní prvky, například pásy, rám či kritické šroubové spoje.

Vozidlo se pohybuje na úzkých, technických tratích, s poměrně nízkou maximální, a především průměrnou rychlostí. Hlavní důraz je kladen na nízkou hmotnost, ovladatelnost a akceleraci. K tomu přispívá malý celkový rozměr vozu, minimální délka je však stanovena pravidly na 1 525 mm [1]. Aerodynamika a chladicí systém formule jsou specifikovány jen málo, aerodynamické prvky musí splňovat poměrně benevolentní obálku, tedy dodržet vzdálenosti od předních a zadních kol a maximální výšku, chladicí systém musí pracovat s destilovanou vodou, vzduchem či olejem [1].

1.1 AERODYNAMIKA

Současné monoposty jsou zpravidla vybaveny rozsáhlým aeropaketem. Stále je možné vidět monoposty bez aerodynamických elementů, zaměřené primárně na nízkou celkovou hmotnost, jedná se však spíše o výjimky. Základní části aerodynamického vybavení vozu zachycuje Obr. 1. Základními prvky aerodynamického balíčku jsou přední a zadní křídlo. Jejich primárním cílem je vytvoření přitlačné síly s co nejmenším možným odporem vzduchu.



Obr. 1 Aeropaket Dragonu e2

Přední křídlo je důležitou částí závodního vozu, protože se jedná o první část vozidla, která přijde do kontaktu s proudem vzduchu a určuje tak aerodynamický profil celého vozu [2]. Křídla však negativně zvyšují celkový útlav vozu, proto bývá využíváno také difuzoru, který generuje přitlačnou sílu téměř bez narušení proudu vzduchu, je-li správně navržen. Střední část vozu bývá vyplněna podlahami, které zpravidla vzduch pouze usměřují, mohou však vytvářet i přitlačnou sílu. Přitlačná síla generovaná předním křídlem a spodní částí karoserie

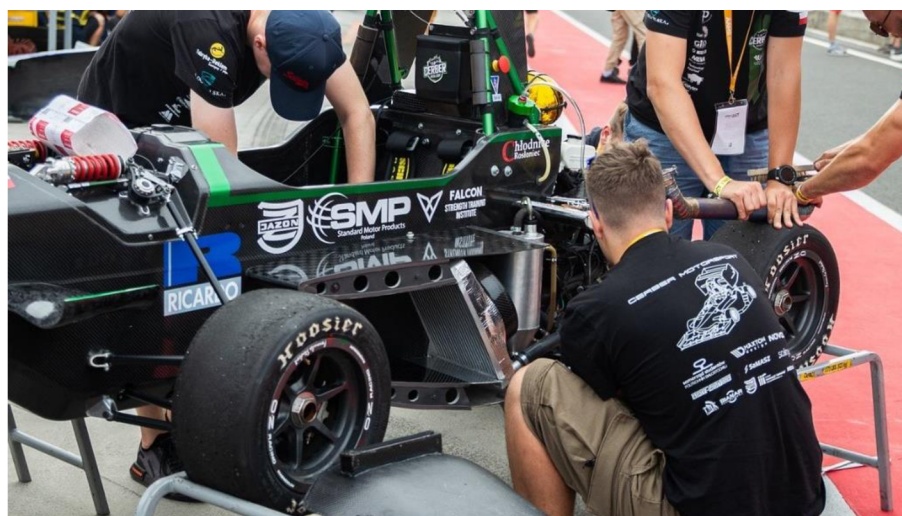
je zvýšena přízemním efektem [3]. Vztlaková síla a její rozložení patří mezi nejvýznamnější prvky, které ovlivňují dynamiku vozidel [4]. V případě závodních vozů se jedná převážně o přítlačnou sílu, která má stejný směr jako vztlaková, ale opačnou orientaci. Ovlivnění aerodynamiky nemusí pocházet pouze z přední části vozu, ale také z rozdílného úplavu vozidla [5]. Prvky v zadní části vozu tedy mohou výrazně ovlivnit chování přední části vozu, například předního křídla.

1.2 KONSTRUKČNÍ VARIANTY

Umístění výměníků může být takřka libovolné, přesto lze pozorovat tři různé trendy. U osobních vozů je vzduch typicky naváděn z oblasti stagnace před vozidlem skrz jeden či více kompaktních výměníků, ale i motorový prostor. Chladicí vzduch je potom vypouštěn do podběhů a způsobuje interference a ztráty [5]. Závodní vozy sledují stejné základní principy, určité požadavky jako hmotnost a zástavbu mají vyšší prioritu než výkonnostní parametry. Vhodné umístění výměníků je důležité, jelikož i přes kvalitní dimenzování může špatná poloha na voze důsledkem nedostatečného proudění negativně ovlivnit chladicí výkon. Důležitými aspekty, které je nutné brát v potaz při návrhu chladicí soustavy, jsou celková hmotnost vozu, aerodynamika a také vzhled. [6]

1.2.1 CENTRÁLNÍ UMÍSTĚNÍ

Prvním z možných je umístění v prostoru mezi koly přední a zadní nápravy, oblíbené v mnoha soutěžích monopostů s otevřenými koly. Oblíbenost plyne z řady výhod, umístění v blízkosti těžiště má za následek nízké momenty setrvačnosti a přispívá k dobrému dynamickému chování vozu, blízkost strukturální části vozu zase usnadňuje zástavbu před a za výměník je možné upevnit usměrňující elementy a vzduchovody, které zrovnoměří nasávaný vzduch, sníží rychlost proudění a tím zmírní odpor vzduchu. Často bývají kapotovány, jak je možné vidět na Obr. 2. Odstraněním kapotáže lze dosáhnout nižší celkové hmotnosti, dochází však ke značnému zhoršení aerodynamických vlastností, zvýšení odporu vzduchu, nevhodným naklopením může vznikat nežádoucí vztlaková síla [7]. Nevýhodou je blízkost zavěšení a odpružení vozidla u vstupního kanálu, tedy ne zcela uniformní proud.



Obr. 2 Centrální umístění výměníků na monopostu týmu Cerber motorsport [34]

1.2.2 ZADNÍ UCHYCENÍ

Další možnou pozicí je umístění za zadní nápravou. Možné je centrální uložení, zpravidla zabudované do difuzoru, viz Obr. 3, nebo uložení po bocích monopostu. Umístění na bocích vozidla nemá žádný zřejmý aerodynamický benefit, jedná se však o variantu, která nejméně ovlivňuje zástavbu zbytku vozidla. Prostor mezi koly je možno lépe využít pro zvyšování přitlaku pomocí podlah. U vozů, kde je pohonná jednotka umístěna za zády pilota je rovněž možné zkrácení a zjednodušení chladicího okruhu. Nejsou-li výměníky integrovány do difuzoru, je obtížně realizovatelný přívodní vzduchovod, pro blízkost komponent zavěšení nebo rámu.



Obr. 3 Umístění výměníků za zadní nápravou týmu Tallin UAS [35]

1.2.3 PŘEDNÍ UCHYCENÍ

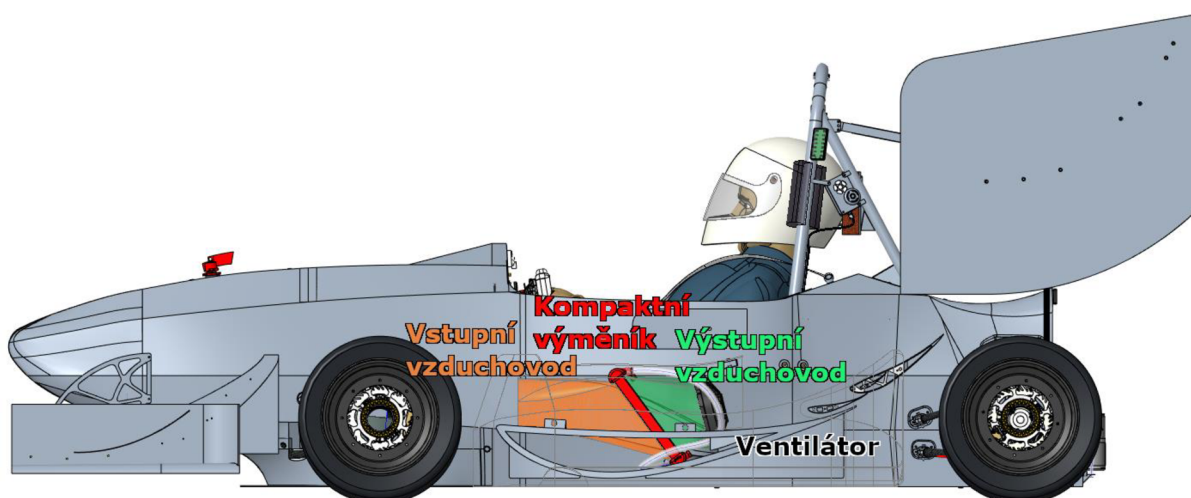
Uchycení v přední části vozu je doménou osobních a závodních vozů, které mají kapotované přední kola. U monopostů formule student jsou kola otevřená, ze strukturálních důvodů je tedy tato varianta využívána jen zřídka. Problém uchycení byl elegantně vyřešen týmem Running snail, viz Obr. 4. Pro přední část vozu je nejlépe splněn předpoklad uniformního proudění, které je předpokládáno ve valné většině analytických i numerických simulací. Chování výměníku v rovnoměrném proudu vzduchu by mělo být nejsnáze predikovatelné, avšak jejich sklonění a blízkost křídla může jejich chování značně ovlivnit. Obtížná je rovněž zástavba vzduchovodů, které bývají využity pro uzpůsobení charakteristiky výměníků.



Obr. 4 Umístění výměníků jako součást předního křídla týmu Running snail [29]

zpravidla s uvažováním náporového chlazení, ventilátor zajišťuje pouze část nutného průtoku. Při návrhu výměníku monopostu Dragon e2 však byl nápor zcela zanedbán [8].

Výměníky bývají dimenzovány podle charakteristiky ventilátoru, který musí být schopen zajistit požadovaný průtok. Omezujícím faktorem je tlaková ztráta kompaktního výměníku, která prudce klesá s jeho velikostí, zvětšuje-li se objem jádra při zachování ostatních geometrických parametrů a hmotnostního průtoku kapaliny. Každý navrhovaný kompaktní výměník by měl být co největší [9]. Velikost výměníku však nemůže být příliš velká, s velikostí roste úměrně i hmotnost, kterou je snaha minimalizovat, a snížením rychlosti proudění dojde ke snížení koeficientu přestupu tepla. V motorsportu bývá proto volen nejmenší výměník, jehož tlakovou ztrátu je schopen ventilátor pokrýt. Přesto však často bývá plocha výměníku z hlediska zástavby příliš rozměrná, což bývá řešeno jeho skloněním. Bylo zjištěno, že při malých průtocích a rozumných úhlech sklonu je tlaková ztráta téměř nezměněna [10]. Výměníky na monopostu Dragon e2 byly proto sklopeny o 36° , viz Obr. 7.



Obr. 7 Umístění kompaktního výměníku na monopostu Dragon e2

Důležitou částí je geometrie výměníku. Skládá se z 26 trubek a 27 vlnovců o délce 230 mm. Společně vytváří plochu 230 mm vysokou, 163,2 mm širokou, hloubka je 25,2 mm. Činná plocha však bývá mnohonásobně vyšší než pouze plocha obdélníku, právě kvůli množství žebířek. Návrhový průtok je $315 \text{ m}^3/\text{h}$ [8].

2 CHLADICÍ SYSTÉMY

Chladicími systémy se rozumí soubor výměníků, chladičů, pump a propojení mezi nimi, jejichž úkolem je zajistit optimální provozní teploty.

Chladicí systémy jsou vitální součástí pro správnou činnost a výkon rozličných strojů a přístrojů. Jeho hlavním účelem je zajištění operační teploty v rozmezí daném výrobcem. Jsou používány v široké škále aplikací ať již v automobilním, leteckém či dokonce nukleárním průmyslu a energetice. Jedním z jeho komponent je tepelný výměník. Jsou navrhovány pro výměnu tepla mezi dvěma tekutinami, z nichž jedna je ze systému s vyšší teplotou a druhá je ze systému s nižší teplotou. V případě automobilních systémů jsou nejčastěji používány kompaktní lamelové výměníky. Tento typ výměníků je používán, protože dosahuje velmi vysokých poměrů teplosměnných ploch ku celkovému objemu, díky husté matici žebrovaných trubek či desek. Používá se zejména pokud je jedním z tekutin plyn. [11]

Chladicí kapalina, vzduch, je naváděn tam, kde je potřeba k odebrání tepla, což často znamená překážku v proudění a lokální ztrátu jeho energie. Lokální, ale i délkové ztráty, které vznikají jeho vedením se projevují jako vnitřní aerodynamické odpory. V dnešní době je proto pozornost věnována nejen vnějšímu aerodynamickému odporu, ale stále víc je zkoumán i odpor zapříčiněný obtékáním vnitřních komponent a chladičového systému [9]. Spolu s dalšími aerodynamickými vlastnostmi je odpor vzduchu nejdůležitějším cílem vývoje, důležité jsou však pro dynamiku vozidel i vztahové síly a jejich rozložení [4].

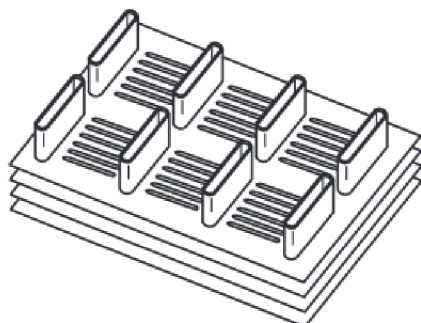
Chladicí vzduch je důležitým faktorem dynamiky vozidel a operační bezpečnosti. Dále je úzce spjat s aerodynamikou vozidla. V posledních letech je stále více úsilí vykládáno na optimalizaci ztrát vznikajících během proudění skrz vozidlo, zejména při naléhavé potřebě snížení spotřeby energie [5], [12]. Jednou z metod je optimalizace průtoku, který není konstantní, ale je variován například pomocí regulace výkonu chladičového ventilátoru [5]. Optimalizace je možná, protože chladičový výkon je často navrhován pro maximální teplotní zatížení, systémy však zpravidla pracují ve zlomku špičkových hodnot po velkou část své životnosti [13].

2.1 KOMPAKTNÍ LAMELOVÉ VÝMĚNÍKY

V automobilním průmyslu, ale i všude tam, kde je třeba přenosu tepla mezi chladicí kapalinou a vzduchem, je nejčastěji využíváno tepelných výměníků, které se skládají z plochých trubek se lamelovými žebry [14]. Tento typ výměníků se označuje jako kompaktní lamelové, a využívají se především pro chlazení motoru a interiéru [14]. Chladičový výkon výměníku je dán jeho geometrickými vlastnostmi a přiváděnými kapalinami. Geometrické parametry výměníku zásadně a přímo ovlivňují výkon výměníku. Jedná se především o tloušťku jádra, vlnovou délku žeber, výšku žeber a průřez vodních kanálů [15]. Geometrie jádra je zachycena na Obr. 8.

Lamelová žebra bývají používána na vzduchové straně, pro zlepšení celkového přestupu tepla [14]. Přesná geometrie výměníků však bývá obtížně zjistitelná, jedná se totiž o patentově chráněné informace výrobců výměníků. Geometrické parametry však není vždy možné libovolně variovat, a je nutné spolehnout se na určitý dodaný typ. Charakteristiky výměníku je možné dále ovlivnit jeho zástavbou. Přestože je teplosměnná plocha na vzduchové straně 5 až 8krát vyšší než na straně kapaliny, je tepelný odpor na vzduchové straně 5 až 10krát vyšší než na straně kapaliny. Každé zlepšení přestupu tepla na vzduchu bude mít výrazné dopady na

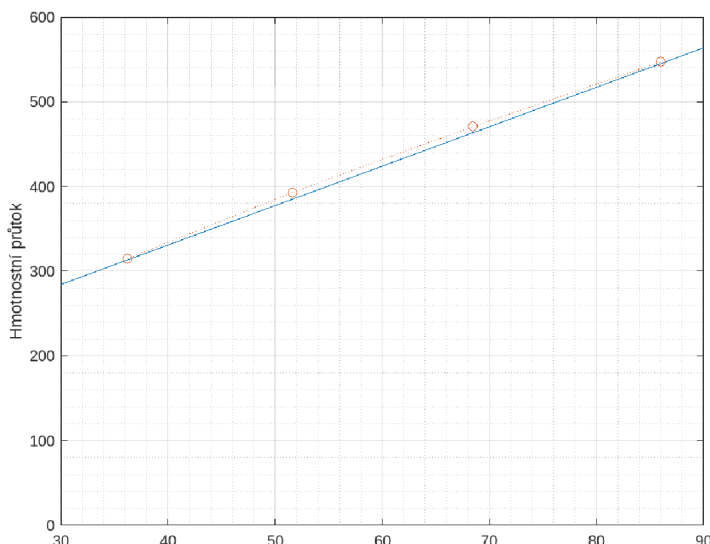
termální výkon každého kompaktního výměníku [14]. Základním předpokladem je homogenní proud vzduchu skrz výměník. Toho může být docíleno zpravidla pouze vhodným vtokovým a odtokovým kanálem [9].



Obr. 8 Detail jádra kompaktního výměníku [32]

2.2 AERODYNAMICKÝ ODPOR KOMPAKTNÍHO VÝMĚNÍKU

Výkon odvedený výměníkem a jím způsobený aerodynamický odpor motorových vozidel je z velké části zapříčiněn velikostí výměníku a průtokem chladicího vzduchu [9]. Aerodynamický odpor chladicího vzduchu je ovlivňován plochou výměníku a je mnohem citlivější na redukci plochy než na její zvýšení. I relativně malé snížení plochy výměníku může vést k výraznému zvýšení odporu, za předpokladu konstantního chladicího výkonu [9]. Příklad závislosti průtoku na tlakové ztrátě je zobrazen na Obr. 9, tento průběh byl naměřen metodou tlakové diference výrobcem na použitém výměníku.



Obr. 9 Závislost hmotnostního průtoku na tlakové ztrátě výměníku

Efektivní chlazení požaduje vhodný návrh průtoku vzduchu skrz aktivní části výměníku. Výměník vystavený otevřenému proudění vykazuje řadu nevýhod, zejména značný odpor vzduchu, dále vzduch stráví kratší čas v kontaktu s žebry výměníku, absorbuje nižší množství energie, čímž je snížena účinnost [15]. Aerodynamický odpor se skládá ze dvou komponent, jednak z viskózního tření v kanále, jednak z interference, který vzniká interakcí vstupujícího a vystupujícího chladicího vzduchu s prouděním kolem vozu [9].

Pro snížení odporu vzduchu mohou být instalovány vzduchovody, které proudění vhodně modifikují. Mohou být uvažovány dva případy. Prvním z nich je ideální přímý kanál před i za výměníkem. Toto uspořádání je možné pozorovat na závodních vozech a letadlech. Druhým je případ, kdy nemůže být dosaženo ideálního kanálu za výměníkem, což se často stává u vozidel s motorem v předu [9]. První uspořádání je nazýváno ideálním, protože vzduchovod za výměníkem zvýší rychlost proudění na rychlost obtékání volného proudu, minimalizuje proto jejich interferenci. Demontáží nebo příliš zakřiveným vzduchovodem ve výstupní části nedojde k vyrovnání rychlostí a může docházet k víření i zpětnému toku. Téměř ideální konfigurace kanálů pro vstupní a výstupní vzduch nejsou vždy realizovatelné [9].

2.3 NAKLONĚNÍ VÝMĚNÍKU

Pokusy s nakloněním vstupu do výměníku byly provedeny již v roce 1942. Bylo zjištěno, že zvýšení tlakového spádu bylo zanedbatelné pro úhly náklonu 0 až 70° a rychlosti do 6 m/s. Při úhlech vyšších než 70° roste hodnota tlakového spádu do nekonečna [10]. Rovněž může docházet k neuniformitám z důvodů naklonění, avšak měření s bavlňkami prokázalo, že proud vzduchu vstupující do výměníku je rovnoměrný pro úhly 0 až 70° [10]. Výměníky byly měřeny výrobcem ve speciálním stavu, kde byl měřen výkon, tlaková ztráta, rozdíl teplot a průtok na vzduchové i kapalinové straně. Nápor vzduchu byl normálový vzhledem k ploše výměníku.

2.4 NEUNIFORMITA PROUDĚNÍ

Neuniformita proudu značně ovlivňuje schopnost výměníku odvádět teplo a bylo pozorováno, že část výměníku není schopná efektivně odvádět teplo [16]. Lokálně vyšší rychlost proudění sice zvyšuje součinitel přestupu tepla, avšak lokálně nižší rychlost snižuje koeficient přestupu tepla natolik, že celkový disipovaný výkon je nižší. Nerovnoměrné proudění mohou způsobit víry, vzniklé obtékáním okolních komponent. Jedná se zejména o kola, vzpěry zavěšení, usměrňující elementy a náběžné hrany samotného vstupu do vzduchovodu.

Při nízkých rychlostech se může projevit recirkulace vzduchu skrze výměník i při použití ventilátoru. Proud chladicího vzduchu se stává nerovnoměrným, může snížit celkový průtok výměníkem a neefektivně využít celkovou teplosměnnou plochu výměníku. Analýza výkonu výměníku je často založena na předpokladech uniformního a průměrného průtoku vzduchu i chladicí kapaliny, často však nejsou tyto požadavky splněny. Na straně kapaliny je možné nerovnoměrnost proudění zanedbat, termální odpor je dostatečně malý. Nerovnoměrnost proudu vzduchu značně ovlivňuje výkon výměníku a měla by být ve výpočtu uvažována. Pro aerodynamickou optimalizaci chladicího systému je proto stále důležitější predikce distribuce chladicího vzduchu pro správné využití všech teplosměnných ploch výměníku. [16]

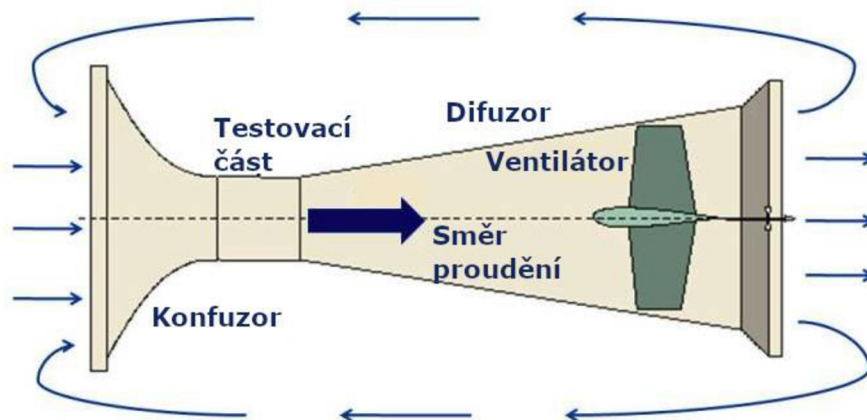
3 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ VE VĚTRNÉM TUNELU

V následujících kapitolách bude popsána problematika aerodynamických tunelů a jejich limitací. Rovněž bude věnována pozornost možnostem uchycení vozidla v tunelu a použité měřicí aparatuře. Poslední část popisuje průběh provedeného měření jako celku.

3.1 AERODYNAMICKÉ TUNELY

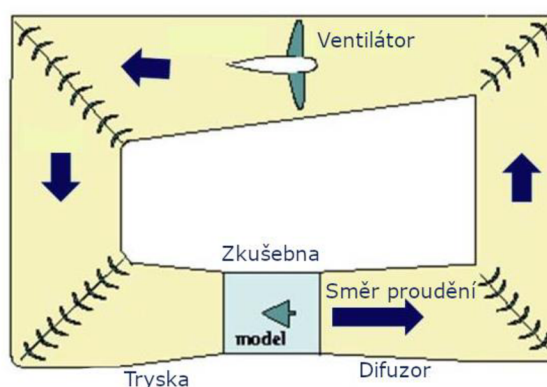
Potřeba kompletního porozumění chování proudění v aerodynamických tunelech roste nejen proto, že se staly esenciálním nástrojem pro vývoj vozidel a jejich certifikaci [17]. Aerodynamických tunelů bývá rovněž využíváno ke zlepšení aerodynamických vlastností vozu na vozovce [18]. Pro malé modifikace modelu je testování v aerodynamickém tunelu rychlejší a levnější než výpočtové modelování, které však umožňuje hlubší náhled do pole proudění, a je rychlejší v případě výrazných modifikací modelu [19].

Základní myšlenka stavby větrného tunelu je jednoduchá: místo sledování letícího letadla či pohybujícího se automobilu měřicí aparaturou, testovací model zůstává stacionární, zatímco vzduch se vůči němu relativně pohybuje [20]. Provádí se klasifikace na dvě základní kategorie. První z nich je tunel otevřený, jehož schéma je zachyceno na Obr. 10, který je levnější na výstavbu, ale nákladnější na provoz. Vzduch je nasáván skrz testovací komoru ventilátorem, poté je nasáván kolem budovy zpět do vstupní části [21].



Obr. 10 Schéma otevřeného tunelu, upraveno [31]

Oproti tomu tunel uzavřený, viz Obr. 11, tvoří uzavřenou smyčku, která ale vyžaduje konstrukci potrubí, s co největším průřezem za účelem omezení ztrát, které rostou s druhou mocninou rychlosti. Ztráty generují teplo, a protože vzduch stále cirkuluje, je nutné zařadit chladičí zařízení. Vyšší náklady na výstavbu ospravedlňuje tato varianta nižšími náklady na provoz, vzduch neztrácí rychlost, není tedy třeba dodávat energii na urychlení vzduchu, pouze energeticky pokrýt třecí ztráty [21]. S třecími ztrátami je spojena mezní vrstva, což je vrstva, kde dochází k velmi prudké změně rychlostí, od nulové rychlosti na stěně až po rychlost volného proudu. Tloušťka mezní vrstvy roste s délkou potrubí, proto bývá přívodní kanál s malým úhlem rozšiřován, aby průřez volného proudu byl konstantní.



Obr. 11 Schéma uzavřeného větrného tunelu, upraveno [36]

Důležitou částí je i zamýšlený účel tunelu, kterému je zpravidla přizpůsobeno i příslušenství tunelu a samotná konstrukce. Mohou být implementovány různé struktury, zmenšující velikost turbulencí, z nichž první jsou lopatky za ventilátorem, které odstraňují víření kolem osy tunelu, dále se může jednat o různé sítě s různou velikostí a geometrií otvorů, ty jsou zpravidla implementovány před samotnou měřicí komorou. Před měřicí komorou bývá rovněž implementována tryska, která zvyšuje rychlost proudění, což je ve většině případů žádoucí pro simulaci vyšších rychlostí vozidla, přidaným benefitem je zmenšení průměru turbulencí, tedy zrovnoměrnění proudu.

Umístěním objektu do proudu vzduchu vznikne mezi stěnou a objektem zúžení a tím dojde urychlení proudění, k čemuž by bez přítomnosti stěny nedošlo. Tento nedostatek bývá řešen drážkami ve stěnách, nebo tzv. $\frac{3}{4}$ tunelem, kde jsou odstraněny boční a horní stěna tunelu, proměnná geometrie však umožňuje zmenšit rozměry tunely na minimum, aniž by došlo k příliš významnému ovlivnění, eliminací zúžení, stěna totiž kompenzuje velikost objektu [21].

3.2 OMEZENÍ VĚTRNÝCH TUNELŮ

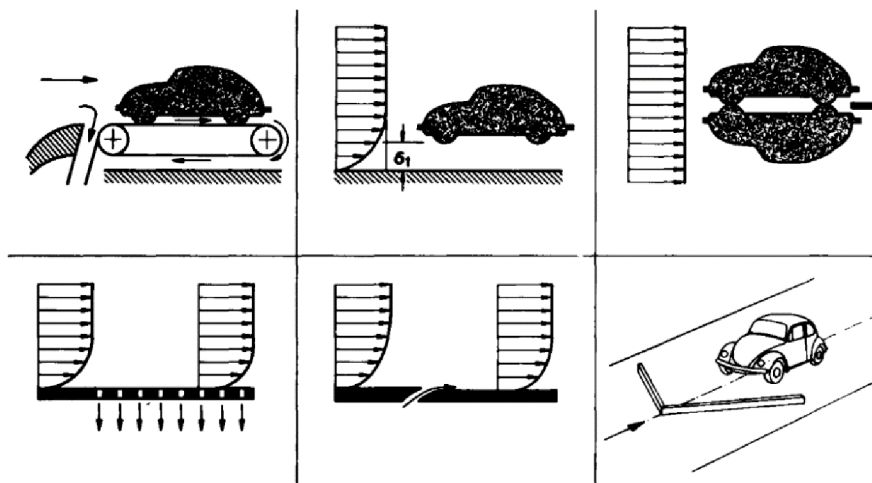
Je známo, že každý větrný tunel ovlivňuje data v něm naměřená. Interakce trysky a kolektoru, otevřeného proudu a gradientu proudění v prázdném testovacím prostoru jsou klíčovými parametry, které ovlivňují výsledky měření [22]. Moderní větrné tunely jsou sofistikovaná testovací zařízení, typicky dosahujících spolehlivých a opakovatelných výsledků. Přesto se může stát, že imperfekce měřidel, modelu a nastavení mohou vést při stejných podmínkách k mírně rozdílným výsledkům [22]. Základním požadavkem při konstrukci větrného tunelu je uniformita proudění, homogenní proud často nepopisuje přesně reálné proudění [18]. Skutečný aerodynamický odpor bude pochopitelně jiný než odpor naměřený v ideálních

podmínkách tunelu. Přesto je složité predikovat difference v měřeních, jelikož vytvoření kontrolovaného nestacionárního měření v reálném provozu je obtížné [18].

Přestože se může zdát, že větrné tunely nemohu nikdy plně simulovat reálné jízdní podmínky (pro přítomnost přízemního efektu, absenci rotace kol, Reynoldsovu číslu atd.), jsou ve skutečnosti primárním nástrojem pro studium aerodynamiky závodních a silničních vozidel [20]. Je známým faktem, že simulace vozovky ve větrném tunelu jsou nutným požadavkem pro aerodynamický vývoj vozidel [4].

Technicky je možné reprodukovat relativní pohyb vozidla a vozovky i relativní pohyb kola a základny. Vhodným způsobem je použití pásu, který se pohybuje od celým testovacím prostorem, na němž se odvalují kola. Tento typ však nebývá pro nákladnost často realizován. Byly proto vyvinuty, a jsou stále zdokonalovány, jednodušší techniky simulace. Principiálně je možné simulovat vozovku dvěma způsoby. Prvním z nich je mechanická separace horizontálního a rotačního pohybu, z nichž jsou simulovány oba, ale odděleně. Pro tyto účely je využíváno úzkého pásu, který unáší kola. I přes limitace je možné tuto metodu označit za reprodukci. Druhou metodou je několik způsobů omezení vlivu mezní vrstvy, vliv rotace kol bývá většinou zanedbán. [23]

Metody omezení vlivu mezní vrstvy jsou například zdvojením podložky, odsáváním vzduchu před či pod modelem, nebo naopak tangenciálním vyfukováním vzduchu pod modelem, viz Obr. 12.



Obr. 12 Metody snížení vlivu mezní vrstvy [23]

Jedním z nejvlivnějších komponent ovlivňujícím aerodynamiku vozidla jsou kola, především u vozidel formulového typu [20]. Nekrytovaná kola mohou zapříčinit až 35 % celkové odporové aerodynamické síly, a rovněž mohou vytvářet vztlakovou sílu [3]. Změna interference úplavu zapříčiněného kolem a podběhem a celkového úplavu vozidla z důvodu simulace vozovky však může být výrazně ovlivněn typem vozidla [24].

U osobních vozidel bývá rozlišován vnitřní a vnější proud vzduchu, vnější obtéká automobil, vnitřní vstupuje otvory v masce do motorového prostoru, obtéká motor či baterii, obstarává chlazení motoru, ventilaci a topení prostoru pro pasažéry, obtéká vnitřní komponenty [23]. Vzduch proudící přes výměník tedy spadá zpravidla do vnitřního proudění. U vozů s otevřenými koly jsou však zpravidla chladiče umístěny po bocích vozu, tedy vystaveny vnějšímu proudění, proto by měl být uvažován vliv rotace kol, který by v případě vnitřního

proudění nehrál významnou roli. Na základě měření se očekává, že rotující kola budou vykazovat nižší vztahové a odporové koeficienty, než stacionární kolo [20]. Pohyb kol bývá řešen podobně jako v případě válcových motorových zkušeben, které mohou být případně integrovány, jedná se však o výjimku. Konstrukční varianty je možné rozlišit na variantu s jedním válcem pod kolem či nápravou, nebo se dvěma válci na kolo. Nevýhodou obou variant je jiný tvar deformované pneumatiky než na rovné vozovce, a ovlivnění proudění rotací válců. Nedostatky odstraňuje použití imitace vozovky ve formě pásu, který otáčí koly a zabezpečuje i vzájemný pohyb vozidla a vozovky. Jedná se ale o vysoce specializované pracoviště, které je náročné nejen na obsluhu, ustavení vozidla, ale i finančně.

3.3 POUŽITÝ VĚTRNÝ TUNEL

Měření bylo provedeno ve větrném tunelu ve firmě Jaroš, jedná se o jediný tunel v české republice specializovaný pro měření v automobilovém průmyslu. Tunel však není zaměřen na simulaci celého vozu, ale zejména jeho přední části. Nejčastěji bývají měřeny brzdy, brzdíče a kanály umožňující jejich chlazení. Pro tyto účely je tunel vybaven prosklenou podlahou, aby bylo možné provádět měření i ve spodní části vozu. Jedná se o tunel uzavřeného typu, vybavený dvěma ventilátory o příkonu 0,2 MW, klimatizací, konvergentní tryskou s možnou změnou výstupního průřezu, viz Obr. 13, a odsáváním mezní vrstvy. Mezní vrstva je odsávána výkonným dmychadlem v přední části tunelu, snižuje její tloušťku až o 75 %. Tryska má šířku 2000 mm a proměnnou výšku, nejčastěji bývá využívána výška 850 mm. Pro přesnější simulace brzd, brzdění a obecné měření je součástí tunelu několik vířivých dynamometrů, které umožňují měření výkonu, ale mohou zajišťovat rotaci kol vozidla. Maximální simulovaná rychlost je až 180 km/h, z praktických důvodů je měření omežováno na maximum 120 km/h, chování při vyšších rychlostech bývá přepočítáno pomocí podobnostních čísel.



Obr. 13 Detail vstupní dýzy použitého tunelu

3.4 UCHYCENÍ MĚŘENÉHO VOZIDLA V TUNELU

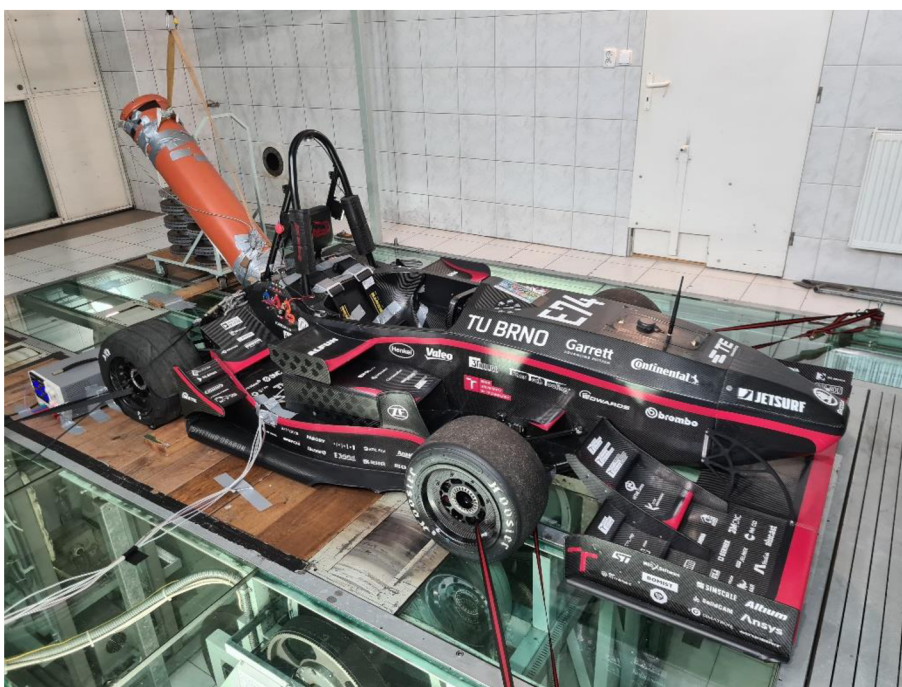
Jakýkoli objekt, vystavený proudění vzduchu v tunelu, musí být dostatečně upevněn. To platí nejen pro měřené objekty, ale rovněž pro samotnou měřící aparaturu. V případě nízkých

rychlostí a vysokých hmotností je možné spolehnout se na třecí sílu mezi podložkou a objektem, a to za předpokladu, že nemůže nastat vznos objektu.

Fixační aparatura má být co nejtěžší a co nejméně zasahovat do proudění. Dle požadavků může uchycení sloužit i k aktivnímu pohybu, tedy ke klopení, klonění a kývání. Obvyklejší než realizace pohybu modelu bývá měření sil a momentů v jednotlivých osách pro vyhodnocení aerodynamických sil.

V automobilovém průmyslu a zejména motorsportu je využíváno větší množství metod. Pro nedostatečně tuhé uchycení se nyní již téměř nepoužívá fixace pomocí drátů. Další možností je strukturální trn vedený zezadu, z ní je odvozeno uchycení z boku, ke středům kol, opět pomocí strukturálních trnů. V současné době je nejpoužívanější uchycení shora, které nabízí dobrou kombinaci mezi tuhostí, ovlivněním proudění a možností ovládání a měření vozidla. [21]

Větrný tunel, ve kterém bylo měření provedeno, disponuje systémem pro rotaci kol, je však uzpůsoben pro osobní vozidla, proto jej nebylo možné bez konstrukčních úprav implementovat. Rovněž nebylo možné využít žádné z výše uvedených technik, sloužících pro upevnění vozu, především pro absenci strukturálních bodů jak na vozidle. Pro fixaci bylo využito všech čtyř kol, které byly upnuty smyčkou, tak, že v půdorysu vytvářely písmeno X, viz Obr. 14, čímž byl znemožněn boční i dopředný a zpětný pohyb. Jakmile bylo vozidlo upevněno, bylo možné pokračovat s přípravou měření. Na přípravu nejsnadnější bylo měření speciální sondou, která byla upevněna na robotickém rameni.



Obr. 14 Uchycení monopostu Dragon e2 ve větrném tunelu

4 POSTUP MĚŘENÍ

V první řadě je představeno několik způsobů měření průtoku, kterých je v praxi široce využíváno, dále je pozornost zaměřena na různě uzpůsobené metody, které byly aplikovány při měření v aerodynamickém tunelu. V poslední části kapitoly je nastíněn průběh měření.

4.1 MĚŘENÍ PRŮTOKU

Tato kapitola pojednává o obecném měření průtoku, zejména v uzavřených potrubích. Pozornost byla zaměřena na metody, ze kterých vychází metody použité při měření ve větrném tunelu.

4.1.1 MĚŘENÍ SONDOU

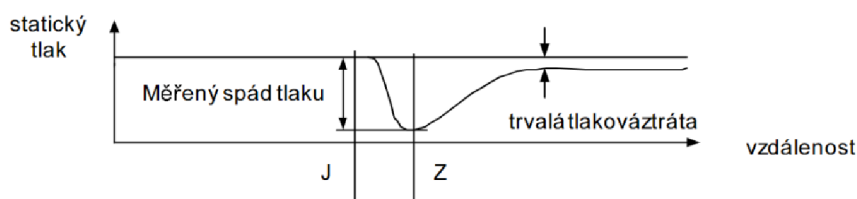
V dnešní době je Pitotova sonda nejčastěji využívána pro vyhodnocení rychlosti letadel. Lze ji však velmi dobře využít i pro měření průtoku. Měřena je rychlost proudění, často v několika místech plochy. Je tak možné změřit vektorového pole, průtok je poté vypočítáván na základě místní nebo průměrné rychlosti proudění [25].

Pro měření objemového průtoku v uzavřených potrubích by měly být splněny následující předpoklady. Kapalina by měla mít konstantní hustotu a nepřekračovat Machovo číslo 0,25. Dále by teplota měla být neměnná na celém měřeném průřezu, průřez by měl být zcela zaplněn a proudění by mělo být časově nezávislé. Princip měření se skládá ze změření rozměrů kanálu, kolmo k jeho ose, za účelem zjištění jeho průřezu, poté definování pozice bodů, ve kterých bude měření provedeno, jejich počet by měl být dostatečný pro adekvátní určení rychlostního profilu. Dalším krokem je měření diferenčního tlaku mezi totálním a statickým tlakem pomocí Pitotových sond a měření hustoty tekutiny. Posledním krokem je stanovení lokálních a střední rychlosti, a nakonec stanovení průtoku. [26]

Měření sondou je velmi časově náročné, proto je využíváno k měření průtoku jen zřídka. Poskytuje však velmi hodnotou informaci o rozložení proudění na průřezu, což dovoluje vyhodnocení rovnoměrnosti proudění a předpokladů týkajících se profilu proudění.

4.1.2 MĚŘENÍ TLAKOVÉ DIFERENCE

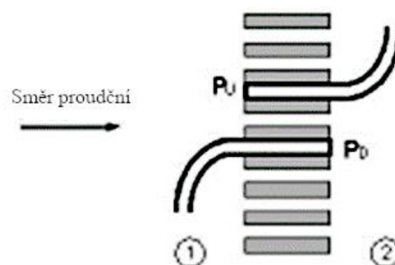
Obvykle je využíváno normalizovaných clon, dýz a Venturiho trubic. Druhé dvě zmíněné se používají pro snížení tlakové ztráty, které mohou být v případě clon značné. Určení průtoku z tlakové ztráty naměřené na místě zúžení průřezu potrubí je založen na Bernoulliho rovnici a je doposud velmi často užívanou metodou měření průtoku v průmyslových aplikacích [25]. Tekutina se při průtoku škrtícím orgánem zrychluje a energie pro toto zrychlení se získá poklesem statického tlaku v místě zúžení, viz Obr. 15. Minimum statického tlaku je v místě s maximální rychlostí proudění [25]. Čím nižší je tlaková ztráta, tím obtížnější je měření, tedy vyšší nároky na přesnost a rozlišení tlakových snímačů. Průtokoměry pracující na principu



Obr. 15 Průběh tlaku na cloně [25]

tlakového rozdílu využívají princip zachování energie v proudící tekutině. Prouděním tekutiny vzniká kinetická energie vyvolávající vzrůst dynamického a pokles statického tlaku, celkový tlak však zůstává zachován. Informaci o rychlosti proudění je získávána pomocí dynamického tlaku [25]. Přes poměrnou dokonalost a propracovanost konstrukcí je měření průtoku založené na vyhodnocení tlakové diference, na ústupu [25].

Metoda měření tlakové diference je jednoduchou a neintruzivní metodou měření průtoku, vyžadující několik sond měřících tlak před a za výměníkem. Systém měření tlaků je založen na páru tlakových sensorů, lokální rychlost proudu je interpretována na základě rozdílu tlaků, viz Obr. 16. Je předpokládáno, že takto uspořádané sondy snímají tlak na proudnicích podobného charakteru, přičemž tlak před výměníkem bude přibližně celkový a tlak za výměníkem bude přibližně statický. Tlakový spád na výměníku lze považovat za součet tlakového spádu na vstupu, tlakového spádu zapříčiněného urychlením proudu, tlakového spádu způsobeného třením na jádře výměníku a tlakového spádu na výstupu. Protože tvar žeber výměníku není proudnicový a proudění je značně komplexní, neexistuje jednoduchá teorie popisující tlakový spád na jádře výměníku, vyjma numerických simulací empirických řešení. Pro měření tlakového spádu bylo použito několika hadic pro vedení tlaku a diferenciální snímač tlaku, která by měl být součástí každého aerodynamického pracoviště. Při měření byl indikován zpětný proud opouštějící jádro výměníku, v místech, kde úplav nárazníku směřoval zpět. Po vizualizaci proudění bylo dokázáno, že proud nebyl zpětný, ale rychlosti byly extrémně nízké. Rozdíly v měřeních pomocí diference tlaku a turbinových průtokoměrů jsou přisuzovány nemožnosti správně pokrýt měřenou plochu turbínami, a špatné odezvě turbín na neuniformní proud vzduchu. Nicméně výsledky obou technik zřetelně zobrazují změny v konfiguraci chladicího vzduchu. Výsledky měření byly srovnány s ostatními metodami a byla pozorována dobrá shoda. [16]



Obr. 16 Instalace tlakových sond [16]

4.1.3 MĚŘENÍ TURBINOVÝM PRŮTOKOMĚREM

Využívají se nejen pro měření průtoku v potrubích. Měření průtoku turbinovým principem sice patří k nejstarším metodám, avšak díky výzkumu v oblasti letecké a raketové techniky lze dosáhnout vysoké přesnosti i dlouhodobé provozní spolehlivosti. Mechanická vazba s proudící tekutinou při činnosti turbíny je bezpečným a přímým způsobem měření objemového průtoku [25]. Běžnou praxí určování proudění skrze kompaktní výměník je laboratorní kalibrace aparatury turbinových průtokoměrů a provedení jízdních testů. Tato technika bývá využita pro studium nehomogenity proudění skrze výměník, a pro vylepšení proudění v přední oblasti automobilu [27]. Turbinové průtokoměry však musí být dostatečně miniaturizovány, toto měření průtoku je proto nákladné a není jej možné realizovat kontinuálně při provozu automobilu [27]. Pro stanovení průtoku přes kompaktní výměník je běžnou praxí použití mříže turbinových průtokoměrů. Rychlost otáčení každého z nich indikuje průměrnou rychlost vzduchu v daném mezikruží, která je úměrná celkové axiální

rychlosti. Průtokoměry je třeba nejprve kalibrovat, mohou však poskytnout informaci o široké škále průtoků [16].

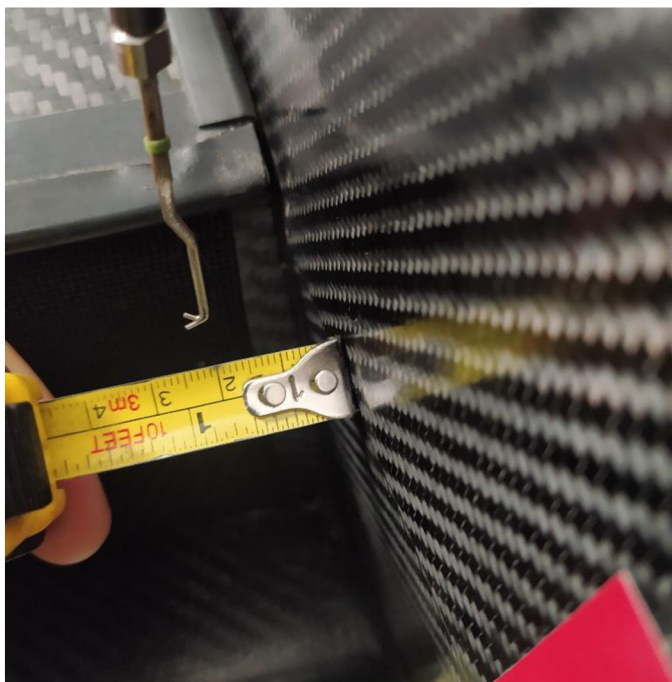
4.2 POUŽITÁ MĚŘÍCÍ APARATURA

Měřicí aparatura byla uzpůsobena pro potřeby měření. Vychází však z obecných principů, zmíněných výše. Důvodem odchylek je charakter měření, zejména krátkého vzduchovodu, jehož průřez je spojitě proměnný. Dalším parametrem byla dostupnost měřících zařízení. Jedná se o tři různá zařízení, každé z nich bylo aplikováno pro svoji specifickou vlastnost.

Pro generaci tlakové ztráty při měření tlakové diference byl použit samotný kompaktní výměník. Posledním měřícím aparátem byl turbínový průtokoměr, zhotoven pro účely rychlého měření průtoku.

4.2.1 3D MĚŘENÍ SONDOU

Speciální sonda je odvozena od sondy Pitotovy, která měří rozdíl celkového a statického tlaku, z něž do dopočítána rychlost v daném směru, viz Obr. 17. Tato sonda pomocí měřícího algoritmu snímá 8 tlaků, z nichž je dopočítána nejen rychlost, ale její prostorový vektor. Samotná sonda umožňovala měření v prostoru, proto byla umístěna na robotickém manipulátoru, pohybujícím se v kartézském souřadném systému. Byla zvolena obdélníková plocha, z důvodu jednoduché tvorby sítě, nejlépe pokrývající plochu vstupu do vzduchovodu, a zvolen počáteční bod měření, co nejbliže vozidlu, ale s určitou bezpečnou vzdáleností, s ohledem na obtížně ovladatelné rameno a snadno poškoditelnou sondu. Byl zvolen souřadnicový systém s osou x podél směru vozidla, osa y směrem od vozidla a osa z nahoru. Šířka obdélníku 190 mm byla rozdělena na 16 bodů, výška 110 mm byla rozdělena na 10 bodů, rychlost byla tedy měřena v 160 diskretních bodech. Měřena byla rychlost 0 km/h, 60 km/h a 80 km/h.



Obr. 17 Detail měřící sondy

Tato sonda byla použita pro zjištění vektorového pole. Průběh rychlostí po průřezu ukazuje, jak rovnoměrně je proudění rozloženo. Vyhodnocení bylo provedeno především vizuálně.

4.2.2 MĚŘENÍ TLAKOVÉ DIFERENCE

Byly instalovány tři sondy měřící statický, absolutní tlak, před výměník a tři za výměník. Vyšší množství sond je vhodné pro zachycení celkové tendence, a ne pouze lokálních změn tlaku zapříčiněných například víry, které mohou způsobovat lokální snížení tlaku ve svém středu. Tlakový snímač nebyl upevněn přímo v přívodním kanále, ale byly umístěny v blízkosti strojovny tunelu, tlak byl přiveden pomocí hadiček malého průměru, které málo ovlivnily proudění. Nevýhodou chladiče oproti normalizované cloně v potrubí je jeho obdélníkový tvar s ostrými rohy, kterým je přizpůsobeno i přívodní potrubí. V rozích totiž mohou vznikat náhodné fluktuace tlaku, turbulence a víry, které nemají stacionární charakter a mohou způsobovat chybu měření. Tlaková ztráta může být měřeno v podstatě dvojí, statický tlak v blízkosti clony dosáhne lokálního minima, poté se ustálí na určité hodnotě, zpravidla nižší než na vstupu. Instalovanou měřící aparaturu zachycuje Obr. 18.

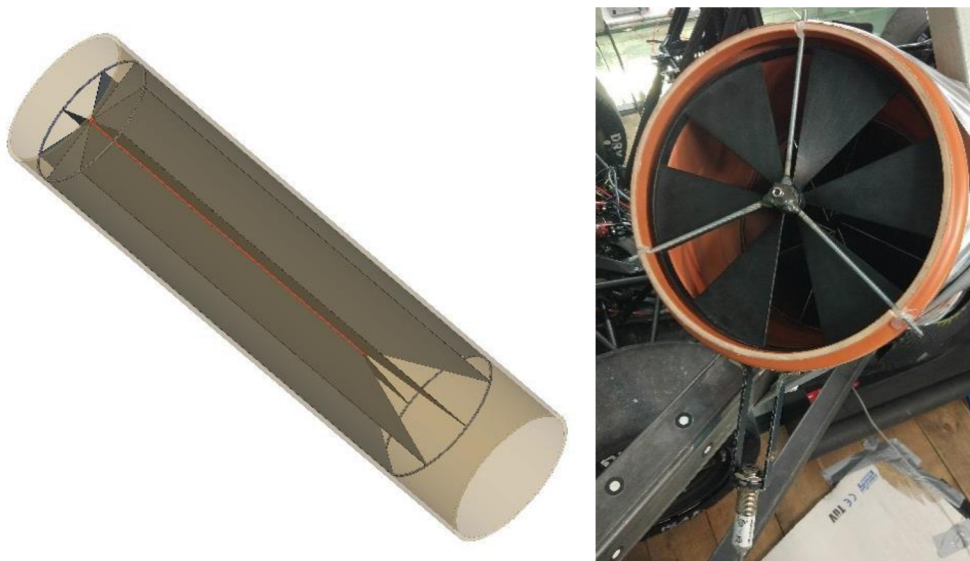


Obr. 18 Aparatura pro měření rozdílu tlaků

Měření tlakové difference bylo realizováno ze dvou důvodů. Jedním z nich je malé ovlivnění proudění kolem vozu a rovněž samotného průtoku výměníkem. Druhým důvodem byla známá charakteristika změřená touto metodou u výrobce. Metrologické podmínky byly odlišné, významnější vliv je však očekáván zastavením výměníků na monopost. Nejdůležitějšími změnami je naklonění výměníků, měřeny byly kolmo na proudění, aplikace vzduchovodů a nerovnoměrné proudění ovlivněné obtékáním dalších částí vozu.

4.2.3 MĚŘENÍ TURBINOVÝM PRŮTOKOMĚREM

Turbinový průtokoměr, kterým bylo měření realizováno, byl speciálně zhotoven pro tyto účely, je uzpůsoben pro měření integrálního průtoku, tedy průtoku skrze celý výměník. Není možné rozhodnout, jakým způsobem je proudění rozloženo. Měřicí aparatura se skládá z dlouhého tubusu o světlosti 250 mm, který je opatřen uklidňovačem proudění typu Étoile [28], na jehož konci je turbína, jejíž otáčky jsou měřeny, viz Obr. 19. Frekvence otáčení je poté úměrná objemovému průtoku. Hlavní nevýhodou turbinového průtokoměru je skutečnost, že průtok nelze měřit úplně od nuly [25].



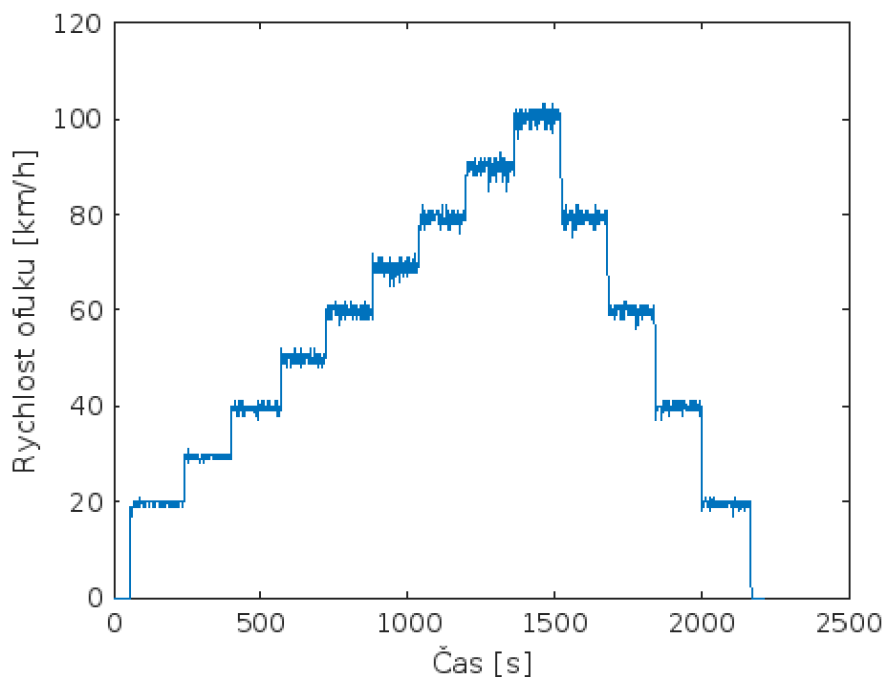
Obr. 19 Měřicí aparatura turbinového průtokoměru [33]

Velkou výhodou turbinového průtokoměru je rychlá a přesná informace o průtoku. Za přesnou je považována proto, že kalibrace aparatury byla provedena za stejných metrologických podmínek jako zbytek měření. Nevýhodou je značné ovlivnění proudění okolo vozidla.

4.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Po ustavení vozidla v tunelu bylo možné přistoupit k samotnému měření. Bylo třeba postupovat podle pokynů a návrhů operátorů tunelu, jedná se totiž o vysoce specializované pracoviště. Byl navržen jednotný testovací cyklus, skládající se z měření průtoků během různých rychlostí ofuku. Měření průtoku probíhalo staticky, pro každou rychlost bylo proudění měřeno po dobu pěti minut, pro odstranění nestacionárních jevů a snížení vlivu náhodných chyb. Všechny průtokoměry neposkytovaly důvěryhodnou informaci při nízkých rychlostech ofuku, proto bylo zpravidla měření zahájeno až při rychlostech 20 km/h. Při konfiguracích s nízkým průtokem i ve vyšších rychlostech byla počáteční rychlost vyšší. Od počáteční hodnoty byly rychlosti navyšovány s krokem 10 či 20 km/h, až po dosažení rychlosti 100 km/h, poté byla rychlost opět krokově snižována. Vzniklý průběh měření měl proto tvar pyramidy, což zachycuje Obr. 20.

Celkovým záměrem bylo zjištění co největšího počtu činitelů, které ovlivňují průtok výměníkem. Přitom byl brán ohled na finanční náročnost měření, proto byly vedlejší časy měření, tedy čas, během kterého bylo provedeno ustavení další varianty, co možná omezeny. Byly proto vybrány parametry, které ovlivňují proudění, ale jejich variace nevyžadují náročné úkony. Část parametrů byla měřena přímo, další část nepřímou, individuální přínos daného elementu je vyjádřen pouze relativně. Nepřímým měřením je označeno měření, kde je přínos daného aerodynamického elementu zjištěn tak, že bylo provedeno měření bez něj, a toto měření bylo porovnáno s návrhovým stavem. Na pravém výměníku byl takto měřen vliv turbínové aparatury. Toto měření bylo doplněno o vliv ventilátoru a zakrytého vstupu. Rovněž bylo měření v návrhovém stavu opakováno během různých dní, aby byla ověřena opakovatelnost měření. Měření samotných prvků bylo realizováno na levém výměníku, kdežto pravý výměník byl určen pro porovnání jednotlivých metod. I na levém výměníku byl otestován vliv ventilátoru, zakrytého vstupu a opakovatelnosti měření. Dále byl změřen vliv jízdní výšky, návrhové, a vyšší než návrhové, která byla důsledkem nezatíženého vozu, předního křídla, negativního elementu, a dvou různých snížení vstupní plochy vzduchovodu. Přehledněji je průběh měření zaznamenán v tabulce přílohy 1.



Obr. 20 Průběh testovacího cyklu

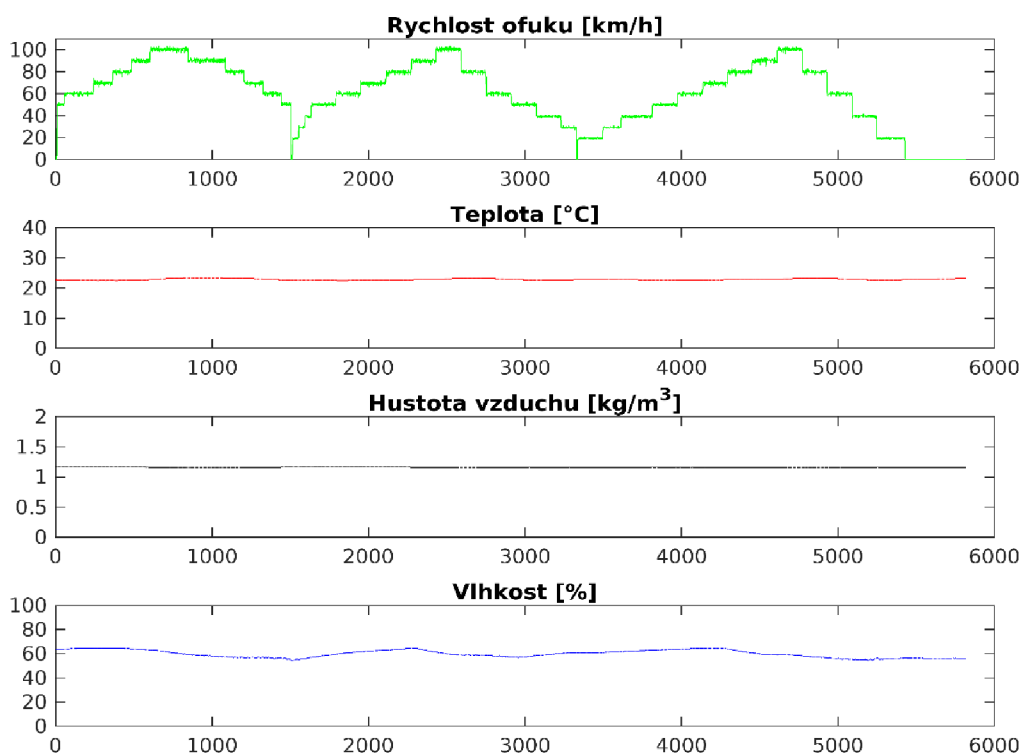
5 OBECNÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

V dnešní době je stále důležitější sběr dat a měření co možná největšího počtu veličin daného technického procesu. Množství dat s sebou nese zvýšené nároky na zpracování, archivaci, ale především zhodnocení. Velmi vhodným nástrojem je grafické znázornění. Je však nutné nalézt vhodné grafické zpracování, které bude dobře popisovat změřená data, a zároveň umožní jednoznačné zhodnocení. Pro kategorické zpracování dat byl vytvořen algoritmus, který je nastíněn v následujících podkapitolách.

5.1 ZÁKLADNÍ SOUBOR DAT

Pro veškerá měření je důležité správné zvolení měřicí techniky a snímané veličiny, zejména je nutný vhodný rozsah, přesnost a vzorkovací frekvence. Měřicí technika byla zapůjčena z technického vybavení aerodynamického tunelu, je proto předpokládáno, že nastavení bylo správně provedeno. Pro omezení velikosti ukládaných souborů byly jednotlivé veličiny časově průměrovány, a uloženy byly body, které mají charakter průměrné hodnoty, nikoli okamžité hodnoty. Toto opatření nejen snižuje velikost souborů, ale rovněž omezuje vysokofrekvenční šum.

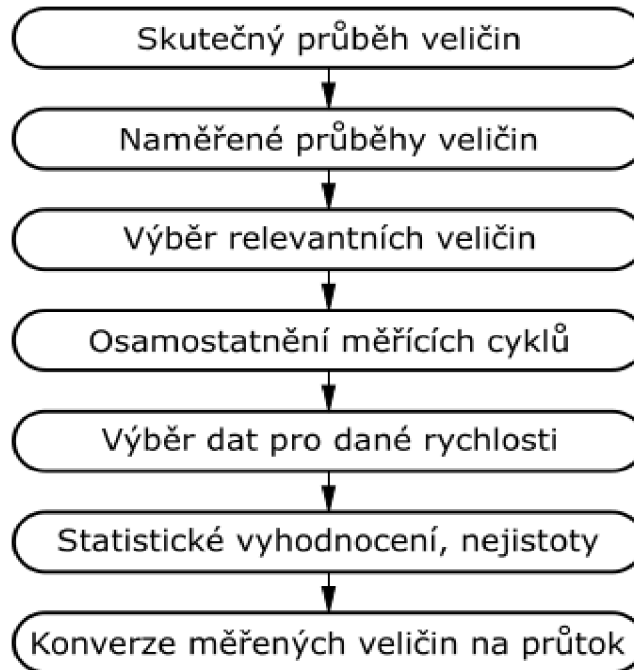
Přesto je nutné další zpracování. Výsledkem celodenního měření byla vždy rozsáhlá tabulka, zachycující množství naměřených hodnot a veličin, které ne vždy zachycovaly proběhlé měření. Výhodou sofistikovaného řídicího systému je, že předpokládá budoucí zpracování dat. Pro orientaci je zejména vhodné datum a čas měření, a neméně důležité jsou jednotky jednotlivých veličin. Přestože je řádkové zobrazení přehledné, má velmi nízkou vypovídající hodnotu. Pro lepší orientaci je vhodné zobrazení několika veličin v grafu, který odhalí, jak je nutno dále při zpracování postupovat, viz Obr. 21. Dalšího snížení výpočetní náročnosti bylo dosaženo odstraněním průběhů veličin nesouvisejících s provedeným měřením. Pro tyto účely, a pro odstranění interpunkce bylo použito nástrojů v programu Microsoft Excel.



Obr. 21 Průběhy určitých veličin v závislosti na čase

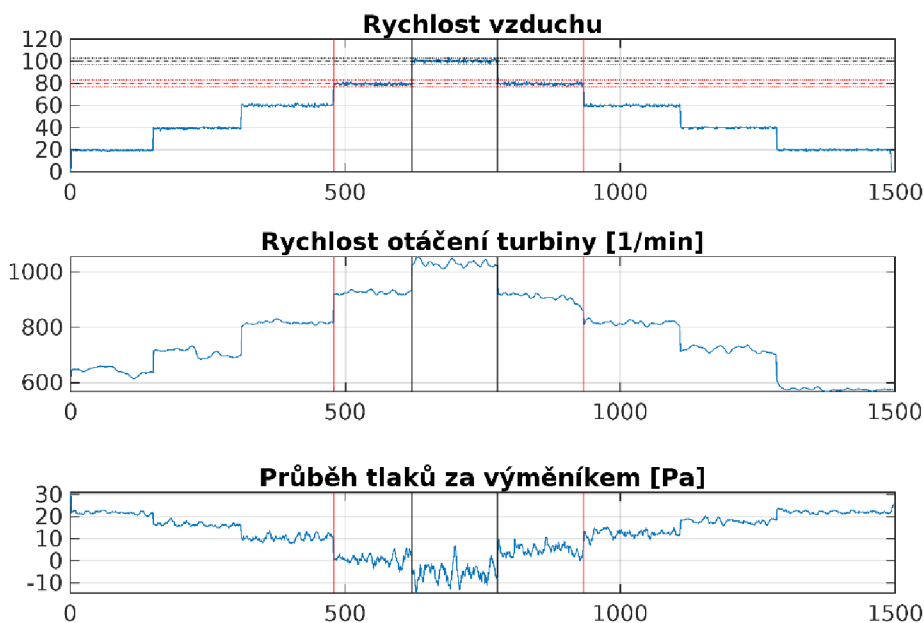
5.2 ALGORITMUS

Po importu upravených souborů do programu Matlab byly izolovány jednotlivé měřicí celky, a uloženy do příslušných proměnných. Tímto krokem byly rovněž odstraněny části, během kterých byla sbírána data, ale docházelo k přestavení měřicí aparatury. Tak bylo dokončeno filtrování dat, a další operace proto mohly být automatizovány a prováděny kategoricky, stejně pro všechna měření, schéma zachycuje Obr. 22 Schéma postupu měření.



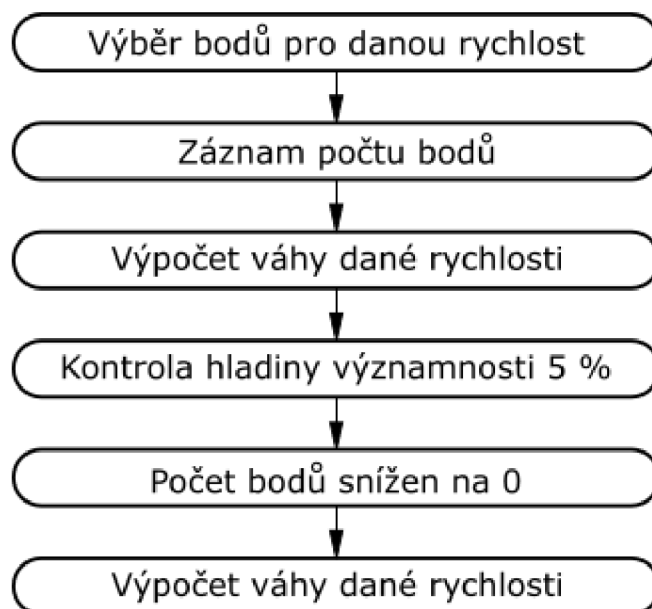
Obr. 22 Schéma postupu měření

Jako vhodný grafický výstup byl zvolen graf závislosti průtoku na rychlosti ofuku. Záznam rychlosti ofuku byl proto zvolen jako maska pro výběr dat pro vyhodnocení průtoku. Bylo využito skutečnosti, že rychlost byla vždy ustálena na násobcích čísla deset, s minimální hodnotou nula a maximální 100. Pro každý násobek bylo stanoveno okolí, které pokrývalo regulační odchylku nastavené rychlosti, a byly vybrána data pro tuto rychlost, viz Obr. 23.



Obr. 23 Výběr dat pro vzorek rychlostí

Byl zaznamenán počet změřených bodů pro tuto rychlost, pro všechny rychlosti v měřícím cyklu byly stanoveny relativní váhy. Jako hranice významnosti byla stanovena hodnota 5 %. Pokud byl počet bodů pro danou rychlost natolik malý, že nepřesáhl 5 % z celkového počtu, byl snížen na nulu, a nebyl dále uvažován, viz schéma na Obr. 24. To proto, že byly vybrány body i pro rychlosti, na kterých nedošlo k ustálení, proto byl jejich počet výrazně menší. Pomocí vah byl ošetřen vliv počtu bodů, nezáleží, jak dlouho docházelo k ustálení, za předpokladu, že byla tato doba přibližně stejně dlouhá pro všechny rychlosti.



Obr. 24 Filtrace nežádoucích hodnot

5.3 NORMALIZACE DAT

Algoritmem byl získán průběh tlaků a otáček turbíny, bylo však nutné převedení na společnou veličinu, kterou byl hmotnostní průtok. Zpracováním dat výrobce výměníků bylo možné vytvořit závislost tlakové ztráty na hmotnostním průtoku. Naměřená data byla diskrétního charakteru, byla proto proložena křivkou. Nejjednodušší volbou prokládací křivky je lineární funkce [18]. Tato závislost platí pro nezastavěný výměník umístěný kolmo na proudění, nebylo však snahou tuto závislost modifikovat koeficienty tak, aby odpovídala nové situaci, ale posoudit z dalších výsledků měření, jak byla charakteristika ovlivněna. Charakteristika turbínového průtokoměru byla změřena v samotném větrném tunelu. Protože byla provedena za stejných metrologických podmínek, je považována za přesnější.

5.4 VYHODNOCENÍ 3D MĚŘENÍ

Systém měření pomocí pneumatické sondy byl značně odlišný od obou již zmíněných. Pro výrazně delší časy měření byl zvolen jen omezený počet rychlostí, konkrétně tři – 0, 60 a 80 km/h. Rovněž byla měřena pouze návrhová varianta se zapnutým ventilátorem. Bylo změřeno 160 bodů v obdélníkové síti, v každém z bodů byly změřeny tři složky rychlosti v prostoru. Hodnota průtoku byla získána jako součin průměrné rychlosti ve směru osy x na vstupní ploše a plochy obdélníku. Pro doplnění celkové představy byly vytvořeny grafy měrné kinetické energie, která byla získána jako polovina velikosti vektoru rychlosti.

5.5 VLIV TEPLoty

Během měření ve větrném tunelu je generováno množství tepla, z důvodů třecích ztrát. Tento jev je obzvláště významný u uzavřených tunelů, v nichž dochází ke zvýšení teploty vzduchu. Teplota vzduchu ovlivňuje zásadně všechny jeho vlastnosti, měrnou hmotnost, kinematickou i dynamickou viskozitu a měrnou vlhkost. Změna měrné hmotnosti je velmi významná, se zvyšující se teplotou se zvyšuje i objem vzduchu, a tedy klesá hustota. Při měření turbinovým průtokoměrem byl měřen právě objemový průtok, vliv teploty byl potlačen kontinuálním měřením měrné hmotnosti a správnou funkcí klimatizačního zařízení, které bylo schopné potlačit nárůst teploty, viz Obr. 21.

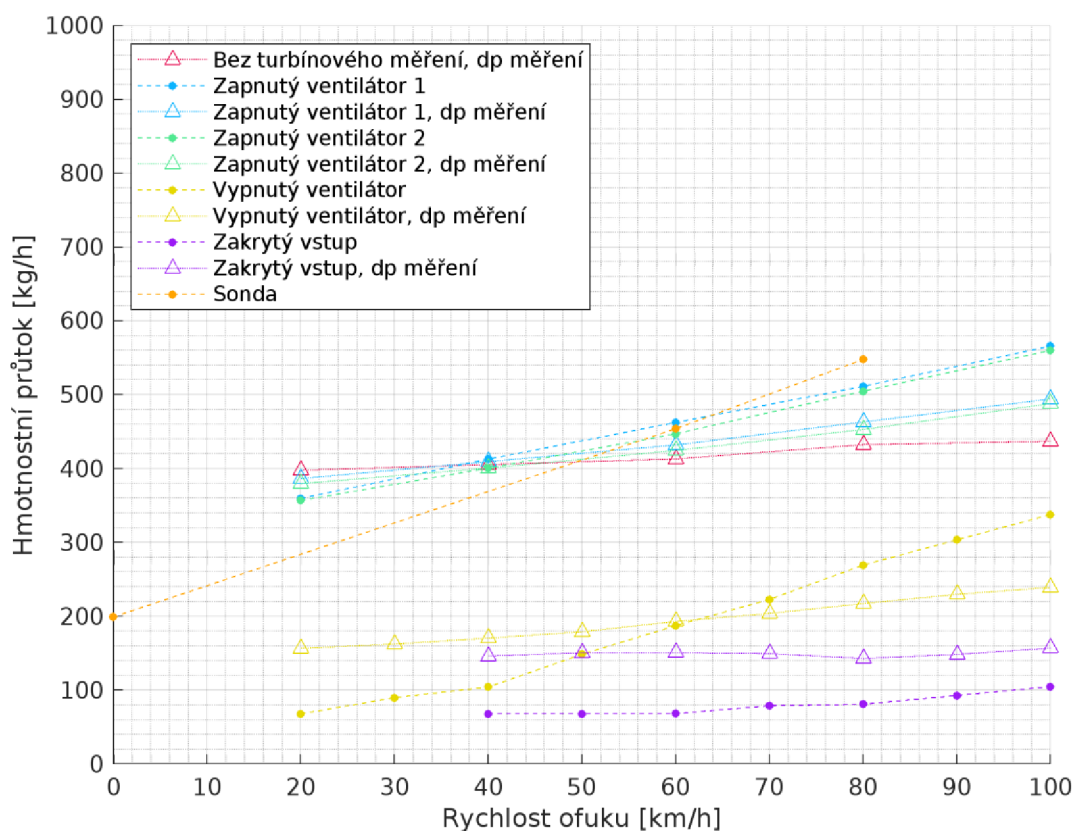
5.6 VLIV VLHKOSTI

Průběh vlhkosti na Obr. 21 ukazuje výraznější výkyvy. Výraznější je však rozdíl mezi vlhkostí při měření výměníku u výrobce, kde dosahovala hodnoty 5 %, a hodnotou naměřenou v tunelu. Při měření výkonu výměníku by taková změna byla výrazná, z důvodů odlišných tepelných kapacit vzduchu a vodní páry, měření však probíhalo izotermicky, bez přestupu tepla. Vliv vlhkosti na celkový průtok je velmi malý, bude proto zanedbán.

6 PRAVÝ VÝMĚNÍK

Měření pravého výměníku bylo zaměřeno na porovnání metod měření průtoku přes kompaktní výměník. Výsledky měření zachycuje Obr. 25. Pro lepší porovnání metod bylo provedeno několik konstrukčních úprav, na nichž je možné pozorovat jejich chování. Zcela zřetelný je vliv ventilátoru, který zajišťuje majoritní podíl celkového průtoku.

Měření se zakrytým vstupem a vypnutým ventilátorem vykazují zcela jiné charakteristiky než měření turbínovým průtokoměrem, a přestože byl proveden velký počet měření, a výsledky jsou statisticky podmíněny, lze spekulovat o správnosti měření, jelikož o měření tlakové diference i turbínovém průtokoměru je známo, že neposkytují věrohodné informace o nízkých průtocích. Lépe situaci vystihují měření se zapnutým ventilátorem. Měření byla opakována během dvou různých dní, pro ověření opakovatelnosti měření, rozdíl mezi měřeními je 1,9 % pro turbínové měření a 1,86 % pro měření tlakové diference. Z měření vyplývá, že turbínový průtokoměr ovlivňuje nejen proudění vzduchu kolem vozu, ale samotný průtok výměníkem, mírně zvyšuje statický průtok, snižuje však efekt náporu vzduchu při vyšších rychlostech.

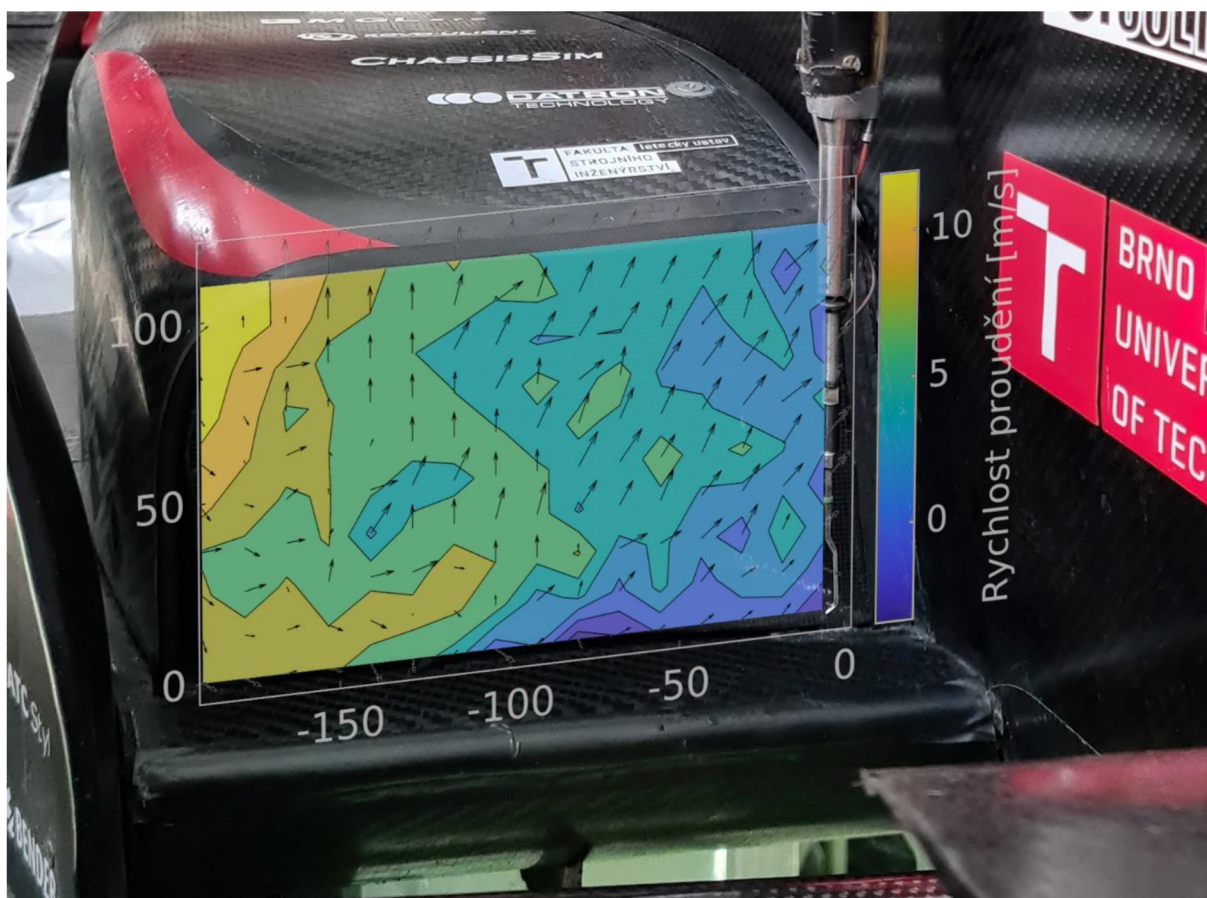


Obr. 25 Hmotnostní průtok v závislosti na rychlosti ofuku

6.1 PNEUMATICKÁ SONDA

Zobrazení prostorových vektorů rychlostí je možné dvěma způsoby, prvním z nich je vrstevnicový graf, zachycující rychlosti v ose vozu, překrytý šipkami, které zobrazují zbylé dvě složky vektoru, druhým způsobem je vrstevnicový graf měrné kinetické energie. Pneumatická sonda pracuje na principu rozdílu tlaků, který vzniká pohybem vzduchu. Je-li

rychlosti nízká, roste nejistota měření. Při měření rychlosti kolem 2 m/s je nejistota až 50 %. Při vyšších rychlostech nejistota klesá, až na hodnotu 10 % při rychlostech 10 m/s. Není vhodné vyhodnocování absolutní velikosti průtoku, přesto poskytuje cenné informace. Při měření ve vyšších rychlostech je možné pozorovat, především na grafech měrné kinetické energie, nižší rychlosti na vstupu chladicího kanálu než rychlost vzduchu obtékající vozidlo viz Obr. 26. Měření při nulové rychlosti vykazuje jiné charakteristiky, zejména je možné pozorovat vliv ventilátoru, viz příloha 2. Vektory rychlostí směřují shora dolů, vrstevnice rychlostí v ose vozu utvářejí soustředné kružnice. To odpovídá představě, že si ventilátor nasává vzduch i z prostoru nad bočníci vozu. Měření při vyšších rychlostech ukazuje oblast stagnace v místě napojení podlah vozu k rámu, identifikace charakteru proudění v tomto místě je problematická, zejména kvůli vysoké nejistotě měření.



Obr. 26 Znáornění proudění na vstupu do vzduchovodu

6.2 TLAKOVÁ DIFERENCE

Měření tlakové difference bylo aplikováno ze dvou důvodů. Prvním z nich je nízké ovlivnění proudění kolem vozu, stejně jako nízké ovlivnění průtoku výměníkem. Ovlivnění proudění však nemůže být provedeno, protože nebylo provedeno měření bez tlakové aparatury. Druhým důvodem byla známá charakteristika výměníku, který byl změřen výrobcem. Toho měření bylo provedeno za jiných podmínek, a především bez jakékoli zástavby. Porovnáním s turbínovým měřením lze identifikovat změnu parametrů, ke kterým došlo zastavením výměníku na monopost.

6.3 TURBINOVÝ PRŮTOKOMĚR

Turbinový průtokoměr byl použit pro stanovení samotného průtoku, zejména proto, že jeho kalibrace byla provedena během měření, tedy za stejných metrologických podmínek. Touto kalibrací bylo zajištěno snížení systematické chyby, snížení náhodné chyby bylo omezeno vysokým počtem měření. Nevýhodou tohoto měření je nevyužitelný princip superpozice, protože aplikací průtokoměru dojde ke změně rozložení proudění kolem vozu, a průtok naměřený aparaturou je jiný než skutečný. Rozdíl však není markantní, a lze je v praxi zanedbat. Je-li měření koncipováno jako relativní, totiž když je porovnáván rozdíl mezi dvěma variantami, změřenými stejným průtokoměrem, je rozdíl téměř eliminován.

6.4 NEJISTOTY MĚŘENÍ

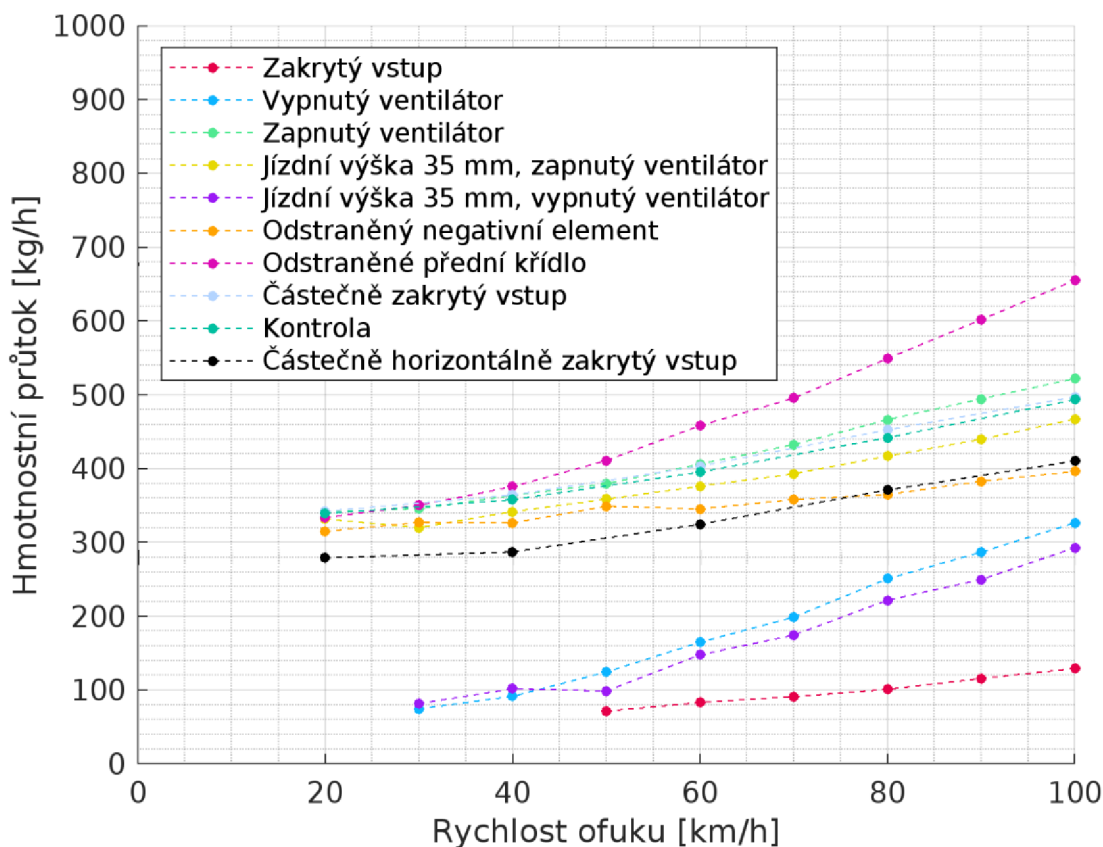
Pro měření je důležité znát hodnoty nejistot měření. Byla stanovena nejistota typu A, pro neznámou specifikaci měřidel však bylo nutné pouze odhadnout nejistotu typu B, byla použita typická hodnota pro tento typ měření, 0,6-2 % rozsahu měřidla pro tlakovou diferenci, pro turbínový průtokoměr 1 % z údaje. Byl použit koeficient rozšíření $k=2$, pro pravděpodobnost pokrytí 95 %, dle ČSN EN ISO 14253-1:2014.

Tab. 1 Nejistoty měření [kg/h]

	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
I.	18,63	-	18,63	-	18,65	-	18,68	-	18,83
II.	5,13	-	6,05	-	6,91	-	7,76	-	8,7
III.	18,63	-	18,64	-	18,65	-	18,7	-	18,89
IV.	5,08	-	5,83	-	6,63	-	7,64	-	8,59
V.	18,63	-	18,63	-	18,65	-	18,69	-	18,85
VI.	-	0,83	0,97	1,59	2,2	2,8	3,59	4,17	4,77
VII.	-	18,63	18,63	18,64	18,66	18,67	18,72	18,78	18,91
VIII.	-	-	-	-	0,55	0,59	0,6	0,7	0,85
IX.	-	-	18,66	18,68	18,69	18,72	18,8	18,85	19,37

7 LEVÝ VÝMĚNÍK

Měření na levém výměníku bylo provedeno za účelem porovnání konstrukčních variant, viz Obr. 27. Na první pohled je možné odlišit měření se zapnutým ventilátorem, které vykazují násobně vyšší hodnotu statického průtoku, na úkor průtoku náporového. Jedná se ale o návrhový stav, optimalizovaný pro charakter jízdy vozidla. Přední křídlo negativně ovlivňuje průtok výměníkem, jelikož usměrňuje co možná největší část vzduchu před vozidlem nad vozidlo za účelem vytvoření přitlačné síly. Pro kompenzaci tohoto efektu je využito negativního elementu, který má profil křídla, netypicky pro automobilový průmysl stejně orientovaný jako křídlo letadla, tedy vytvářející vztlak. Vztlaková síla však není rozhodující, primárním účelem tohoto elementu je usměrnění vzduchu zpět do vzduchovodu. Horizontálně a vertikálně částečně zakrytý vstup ukazuje, že primárním elementem určujícím pracovní bod ventilátoru je kompaktní výměník, konkrétně jeho tlaková ztráta, a nikoli plocha vstupu. Přesto je možné pozorovat určité snížení hodnoty statického i dynamického průtoku.



Obr. 27 Hmotnostní průtok v závislosti na rychlosti ofuku

7.1 ZAKRYTÝ VÝMĚNÍK

Je zřejmé, že i při zakrytém vstupu do vzduchovodu dochází k průtoku přes výměník. Není tedy zcela utěsněn, jak doporučuje odborná literatura, avšak experimenty naznačují, že to není vždy nutné. Z pohledu chlazení nemá tato varianta žádný význam, může však hrát podstatnou roli při minimalizaci odporu vzduchu. Aerodynamický efekt by však bylo nutné měřit, což nebylo provedeno.

7.2 VYPNUTÝ VENTILÁTOR

Absence ventilátoru má za následek dostatečný průtok vzduchu přes výměník pouze při nejvyšších rychlostech. Bylo by vhodné ventilátor zcela odstranit, protože jeho přítomnost zvyšuje celkovou tlakovou ztrátu a odporovou sílu, jelikož je však hodnota průtoku tak nízká, že nemá smysl se s ní dále zaobírat, je vliv statického ventilátoru zanedbatelný.

7.3 ZAPNUTÝ VENTILÁTOR

Zapnutý ventilátor dodává požadovaný průtok vzduchu i při částečném zakrytí vstupu do vzduchovodu. Tato varianta je brána jako vztažná, jedná se o návrhový stav. Ventilátor byl zvolen tak, aby pokrýval průtok požadovaný pro maximální chlazený výkon, nápor vzduchu je využíván pro snížení teploty okruhu. Maximální teplota okruhu je předepsána maximálními teplotami chlazených součástí, jejich nižší teplota proto zvyšuje celkovou tepelnou kapacitu, která pokrývá výkonové špičky.

7.4 NÁVRHOVÁ JÍZDNÍ VÝŠKA

Vlivem neobsazeného vozu byla jeho jízdní výška ve dvou předcházejících případech vyšší, než je návrhový stav. Chyba byla odstraněna a měření opakováno pro zapnutý i vypnutý ventilátor. Pouhou změnou jízdní výšky by nemělo docházet k výraznému ovlivnění průtoku. Výška vstupu do vzduchovodu není náchylná na polohu. Důsledkem změny proudění je proto pravděpodobně aerodynamický element, jehož činnost je závislá na jízdní výšce. Takovým elementem je zejména přední křídlo, které využívá přízemního efektu. Změnou jízdní výšky dojde ke zlepšení jeho činnosti, proud vzduchu je strmější, čímž se sníží množství vzduchu, které vstupuje do vzduchovodu.

7.5 ODSTRANĚNÝ NEGATIVNÍ ELEMENT

Negativní element má profil křídla, které je orientováno stejně jako na letadle. Negativním je nazýván proto, že na závodních vozech jsou křídla orientována naopak, je totiž žádoucí síla přitlačná, nikoli vztlačková. Důvodem jeho instalace je snaha o zpětné usměrnění vzduchu, ovlivněné předním křídlem. Přední křídlo usměrňuje proud vzduchu vzhůru, ten potom zcela mine vstup do chladiče. Důsledkem je nízká hodnota náporového chlazení, která stoupá jen málo s rostoucí rychlostí ofuku.

7.6 ODSTRANĚNÉ PŘEDNÍ KŘÍDLO

Demontáží předního křídla bylo dosaženo vůbec nejlepšího náporového i celkového průtoku, který byl dosažen při nejvyšší rychlosti ofuku. Jeho odstranění je však nežádoucí, jelikož vytváří přitlačnou sílu a vhodně upravuje centrum aerodynamických sil, čímž zlepšuje ovladatelnost. Nižší hodnota průtoku je v případě jeho instalace ospravedlnitelná.

7.7 HORIZONTÁLNĚ A VERTIKÁLNĚ ČÁSTEČNĚ ZAKRYTÝ VSTUP

Částečné zakrytí vstupu do vzduchovodu snižuje vstupní plochu, čímž sníží vstupní rychlost na výměníku. Nižší vstupní rychlost způsobuje nižší tlakovou ztrátu, menší plocha vstupu však omezuje maximální hodnotu průtoku. Horizontálním zakrytím vzniká vstupní plocha tvaru obdélníku, který má výrazně delší jednu stranu. Tento tvar má nižší hydraulický průměr. Vertikálním zakrytím vzniká téměř čtvercová plocha, sice nižšího průřezu, důsledkem nižších rychlostí a tlakových ztrát pracuje ventilátor v jiném pracovním bodě, proto je celkový průtok

vyšší. Pro lepší zhodnocení této úpravy by bylo vhodné měřit ovlivnění odporu vzduchu celého vozu.

7.8 NEJISTOTY MĚŘENÍ

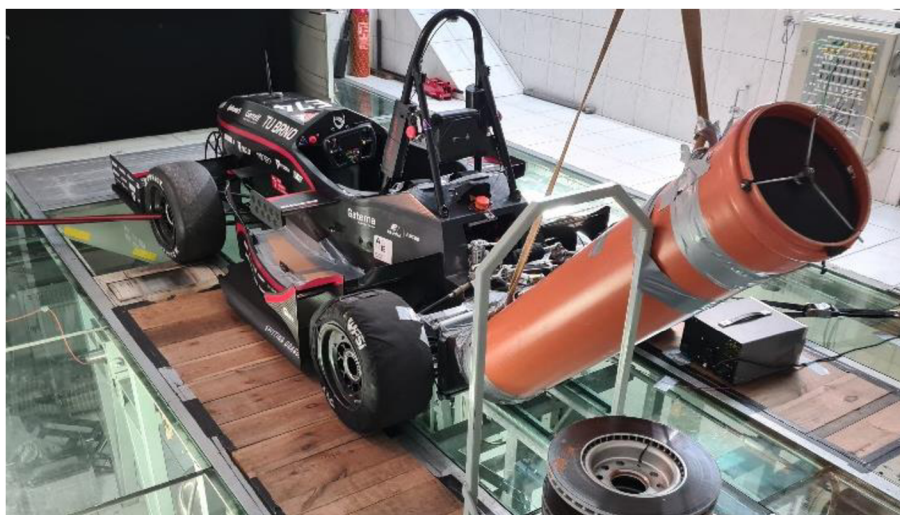
Pro měření je důležité znát hodnoty nejistot měření. Byla stanovena nejistota typu A, pro neznámou specifikaci měřidel však bylo nutné pouze odhadnout nejistotu typu B, byla použita typická hodnota pro tento typ měření, 1 % z údaje. Byl použit koeficient rozšíření $k=2$, pro pravděpodobnost pokrytí 95 %, dle ČSN EN ISO 14253-1:2014.

Tab. 2 Nejistoty měření [kg/h]

	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
X.	-	-	-	0,52	0,57	0,64	0,76	0,96	1,16
XI.	-	1,29	1,35	1,61	2,09	2,58	3,39	3,97	4,62
XII.	4,75	4,83	5,13	5,4	5,86	6,31	6,89	7,37	7,84
XIII.	4,6	4,4	4,76	5,05	5,35	5,63	6,05	6,42	6,9
XIV.	1,4	1,42	1,52	1,5	1,96	2,3	2,99	3,42	4,11
XV.	4,34	4,54	4,53	4,9	4,85	5,06	5,19	5,49	5,73
XVI.	4,68	4,96	5,39	5,98	6,81	7,44	8,38	9,29	10,23
XVII.	4,79	-	5,16	-	5,83	-	6,68	-	7,46
XVIII.	4,8	-	5,12	-	5,76	-	6,56	-	7,45
XIX.	3,74	-	3,88	-	4,52	-	5,31	-	6

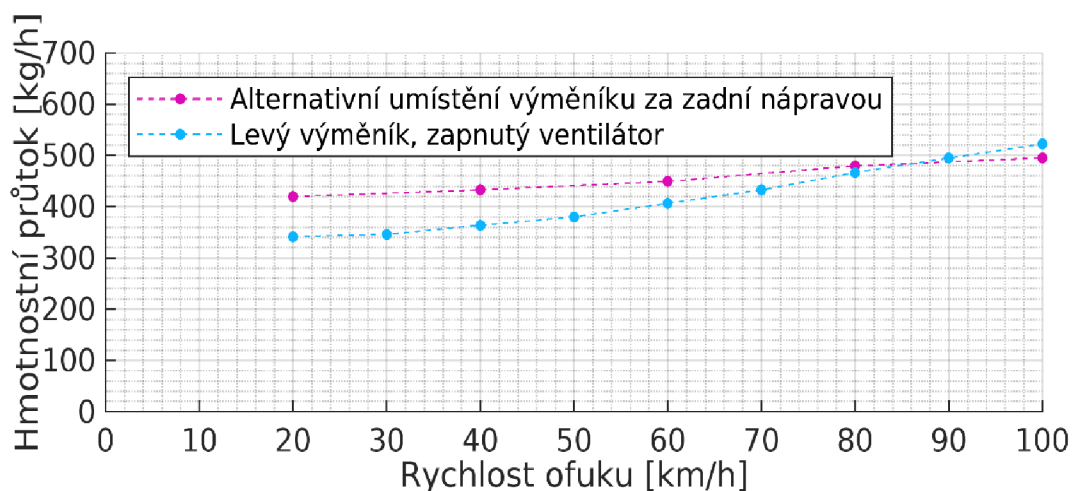
8 ALTERNATIVNÍ POLOHA

Tato poloha je jediným měřeným stavem, který vyžadoval konstrukci strukturálního uchycení výměníku. Bylo proto nutné pečlivě zvolit pozici, protože snahou bylo provést měření vyžadující náročné ustavení v co nejmenším počtu. Jediným provedeným měřením bylo proto uchycení za zadní nápravou, viz Obr. 28, kde byl výměník i turbínový průtokoměr improvizovaně uchycen k dostupným strukturálním částem. Dokonalejší uchycení nebylo realizováno z časových důvodů.



Obr. 28 Umístění výměníku za zadní nápravou

Alternativní poloha za zadní nápravou vykazuje velmi nízký vliv náporového chlazení, tedy malé zvýšení celkového průtoku při zvyšování rychlosti ofuku, statická hodnota průtoku je však nejvyšší ze všech měření, viz Obr. 29. Ventilátor pracuje v nejnepříhodnějším pracovním bodě, dosahuje proto nejvyšších průtoků. Protože je návrh ventilátorů a výměníků uvažován bez náporu vzduchu [8], zdá se nejnepříhodnějším využít tuto variantu. Nebyla však změřena rovnoměrnost proudění, která nebude pravděpodobně příliš výhodná, ve spodní části vozu je totiž koncentrován úplavový rozdíl rychlostí mezi koly a zadním křídlem [3]. Rovněž vzduch obtéká řadu elementů, což jen zhoršuje rovnoměrnost. Nejistoty byly vyhodnoceny jako v minulých kapitolách, dle ČSN EN ISO 14253-1:2014, a jejich hodnoty jsou 6,1813, 6,4014, 6,6903, 7,2084, 7,4803 kg/h.



Obr. 29 Hmotnostní průtok v závislosti na rychlosti ofuku

ZÁVĚR

Průtok výměníkem je ovlivňován zástavbou, je však obtížné predikovat, jakého charakteru. Pro získání lepšího pochopení funkce vybraných elementů bylo provedeno měření průtoku. Na pravém výměníku bylo porovnáno několik metod měření, jmenovitě pneumatická sonda, měření tlakové ztráty a turbinový průtokoměr. Měření pneumatickou sondou bylo primárně použito pro vyhodnocení nerovnoměrnosti proudění, které bylo provedeno pouze vizuálně. Měření tlakové diference bylo realizováno ze dvou důvodů, jednak kvůli nízkému ovlivnění proudění kolem vozidla, jednak proto, že touto metodou byl nezastavěný výměník změřen u výrobce. Turbinový průtokoměr byl kalibrován v rámci měření za stejných metrologických podmínek, naměřený průtok touto metodou byl proto považován za nejpřesnější.

Naměřená data byla očištěna a statisticky zpracována, poté zobrazena v grafech. První série měření byla zaměřena na pravý výměník, tedy na porovnání měřících metod. Bylo pozorováno ovlivnění charakteristik výměníku jeho zástavbou, charakteristika získaná od výrobce výměníků neodpovídala hodnotám průtoku výměníkem změřeným turbinovým průtokoměrem. Měření při vypnutém ventilátoru a zakrytém vstupu se ukázalo jako nevhodné, příliš nízké rychlosti bylo obtížné změřit. Odstraněním objemné aparatury bylo zjištěno, že ovlivňuje nejen rozložení proudění kolem vozidla, ale rovněž hodnotu samotného průtoku, a to při nízkých i vysokých rychlostech. Měření na levém výměníku bylo soustředěno na zjištění vlivu vybraných komponent. Zcela zásadní význam má ventilátor, který zabezpečuje dostatečný průtok i při stojícím vozidle, bez něj by bylo adekvátního průtoku dosaženo až při rychlostech 100 km/h, kterých není v praxi často dosahováno. Výrazný dopad má také přední křídlo, které mimo generování přitlačné síly usměrňuje proud vzduchu nad vozidlo, čímž omezuje vliv náporového chlazení. Pro omezení tohoto efektu je využíváno negativního elementu, který skutečně zvyšuje množství vzduchu protékající výměníkem, zejména při vyšších rychlostech. Rovněž byla změřena jízdní výška vyšší než návrhová, i tímto měřením byla zjištěna nová skutečnost. Poloha vstupu do vzduchovodu v prostoru by neměla ovlivňovat množství vzduchu vstupující do výměníku, z měření však vyplývá zásadní ovlivnění. Tato skutečnost je vysvětlována lepší funkcí předního křídla, které využívá přízemního efektu a je proto závislá na jízdní výšce. Předposlední sérii měření bylo měření částečně zakrytého vstupu, horizontálně a vertikálně, což snížilo průřez vstupní části. Přestože byla plocha vstupu výrazně omezena, nedošlo k výraznému poklesu průtoku.

Bylo by proto vhodné provést další měření, kombinované s měřením aerodynamických sil, nebo dojezdové zkoušky, snížením vstupní plochy totiž může výrazně snížit celkový odpor vozidla. Na závěr bylo provedeno měření alternativní polohy výměníků za zadní nápravou, které bývá využíváno zejména ze zástavbových důvodů. Měření odhalilo výhodnou charakteristiku, především v nižších rychlostech, pro které je chlazení navrhováno.

Budoucí monoposty proto mohou být navrhovány s ohledem na výsledky měření, nový monopost Dragon e3 byl navržen podle předběžných výsledků a byl osazen výměníky za zadní nápravou. Zdá se, že touto úpravou je dosaženo nižší hmotnosti zkrácením okruhu a nižší polohy těžiště, za cenou zvýšení momentu setrvačnosti. Nutnou podmínkou je však zachování dostatečného průtoku i při nízkých rychlostech.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Formula Student Rules 2023. In: *Formula Student Germany* [online]. 2023 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [2] F1 playbook. In: *McLaren Racing - Official Website* [online]. [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.mclaren.com/racing/f1-playbook/front-wing/>
- [3] NEWBON, Joshua, David SIMS-WILLIAMS a Robert DOMINY. Aerodynamic Analysis of Grand Prix Cars Operating in Wake Flows. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2017, **10**(1), 318-329 [cit. 2023-03-15]. ISSN 1946-4002. Dostupné z: doi:10.4271/2017-01-1546
- [4] YANO, Shujiro, Victor SENFT, Minoru TERAMURA, Mitsuru SHINGAI a Atsushi OGAWA. *Pad Correction Estimation around 5 Belt Wind Tunnel Wheel Belts Using Pressure Tap Measurement and Mathematical Pressure Distribution Model* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2022-01-0902
- [5] KUTHADA, Timo, Felix WITTMEIER, Benjamin BOCK, Christoph SCHOENLEBER a Alexander LINK. The Effects of Cooling Air on the Flow Field around a Vehicle. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2016, **9**(2), 723-732 [cit. 2023-03-20]. ISSN 1946-4002. Dostupné z: doi:10.4271/2016-01-1603
- [6] MALOVANÝ, Daniel. *Návrh vodního chladiče pro formulový motor*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] MAREK, Jiří. *Chladicí systém Formule Student*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] KRMÍČEK, Antonín. *Chladicí systém Formule Student*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] WOLF, Thomas. *The Effect of Radiator Size on Cooling Air Flow Requirements and Cooling Drag* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2022-01-5060
- [10] NICHOLS, Marc R. Investigation of flow through an intercooler set at various angles to the supply duct. *NACA wartime report*. 1942, 0-20.
- [11] DE LIMA, Bruno, Rafael DE OLIVEIRA, Luiz DE OLIVEIRA MORAES, Gustavo ARAÚJO a Gabriel DE ALMEIDA CARVALHO. *Analysis of a Heat Exchanger for the Cooling Systems of a Vehicular Prototype* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2017-36-0347
- [12] WOOD, Andrew, Martin PASSMORE, David FORBES, Daniel WOOD a Adrian GAYLARD. Base Pressure and Flow-Field Measurements on a Generic SUV Model. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2015, **8**(1),

233-241 [cit. 2023-03-15]. ISSN 1946-4002. Dostupné z: doi:10.4271/2015-01-1546

- [13] SYED, Zaker, Richard MILLER a John WAGNER. *Multiple Heat Exchangers for Automotive Systems - A Design Tool* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2022-01-0180
- [14] NAWANI, Rachit, Saurabh SUMAN a Yogendra KUSHWAH. *Parametric Analysis of Impact of Geometrical Parameters on Thermal Performance in Compact Heat Exchangers* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2020-28-0025
- [15] KAMATH, Sachin, Prajwal M P, Shashank S N, Vinay DAMODARAN, Anand S R a Prakash KULKARNI. *CFD and Experimental Optimization of Formula SAE Race Car Cooling Air Duct* [online]. - [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: doi:10.4271/2013-01-0799
- [16] NG, Eton, Simon WATKINS, Peter JOHNSON a Lindsay MOLE. *Use of a Pressure-Based Technique for Evaluating the Aerodynamics of Vehicle Cooling Systems* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2002-01-0712
- [17] LJUNGSKOG, Emil, Simone SEBBEN a Alexander BRONIEWICZ. *Uncertainty Quantification of Flow Uniformity Measurements in a Slotted Wall Wind Tunnel* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2019-01-0656
- [18] FEI, Xiao, Timo KUTHADA, Andreas WAGNER a Jochen WIEDEMANN. *The Effect of Unsteady Incident Flow on Drag Measurements for Different Vehicle Geometries in an Open Jet Wind Tunnel* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2022-01-0894
- [19] WITTMEIER, Felix. The Recent Upgrade of the Model Scale Wind Tunnel of University of Stuttgart. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2017, **10**(1), 203-213 [cit. 2023-03-20]. ISSN 1946-4002. Dostupné z: doi:10.4271/2017-01-1527
- [20] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: design for speed*. Revised 2nd edition. [Cambridge]: Bentley Publishers.com, 2006. ISBN 08-376-0142-8.
- [21] How WIND TUNNELS Work - F1 explained - Sauber F1 Team. In: *Sauber motorsport channel* [online]. [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KC0E0wU6inU>
- [22] HUPERTZ, Burkhard, Karel CHALUPA, Lothar KRUEGER, Kevin HOWARD, Hans-Dieter GLUECK, Neil LEWINGTON, Jin-Hyuck CHANG a Yong-su SHIN. *On the Aerodynamics of the Notchback Open Cooling Drive: A Detailed Investigation of Wind Tunnel Data for Improved Correlation and Reference* [online]. - [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: doi:10.4271/2021-01-0958
- [23] *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. 4th ed. Warrendale: SAE International, 1998. ISBN 07-680-0029-7.

- [24] ELOFSSON, Per a Mark BANNISTER. *Drag Reduction Mechanisms Due to Moving Ground and Wheel Rotation in Passenger Cars* [online]. - [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: doi:10.4271/2002-01-0531
- [25] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0156-X.
- [26] *Měření průtoku tekutin v uzavřených profilech - Metoda měření rychlostního pole pomocí Prandtlových trubíc*. 1. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.
- [27] SCOTT, Timothy, David HOFMANN a Ronald MOORE. The Electric Fan as a Cooling Package Air Flow Meter. *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* [online]. 2012, **5**(2), 513-519 [cit. 2023-03-20]. ISSN 1946-4622. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-0954
- [28] *Měření průtoku obecné principy*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [29] Monopost Running Snail Racing Team. In: *Formula Student Czech Republic* [online]. Most: Formula Student Czech Republic, 2022 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://fsczech.smugmug.com/Photo/2022/Saturday/i-N8K7K28/A>
- [30] Monopost TU Brno Racing. In: *Formula Student East* [online]. Hungaroring: Formula Student East, 2022 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/fseast/52309605117/in/album-72177720301587143/>
- [31] Open return wind tunnel. In: *National Aeronautics And Space Administration* [online]. Washington D.C.: NASA, 2021 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>
- [32] LEE, Ho Sung. *Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells* [online]. 1. Hoboken: Wiley, 2010 [cit. 2023-03-24]. ISBN 978-047-0496-626. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1002/9780470949979.ch5>
- [33] ŠEBELA, Kamil. *Chladicí systém Formule Student*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [34] Monopost Cerber motorsport. In: *Formula Student East* [online]. Hungaroring: Formula Student East, 2022 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://flickr.com/photos/fseast/52310785044/in/album-72177720301577449/>
- [35] Monopost UAS Tallin. In: *Formula Student Czech* [online]. Most: Formula Student Czech, 2022 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://fsczech.smugmug.com/Photo/2022/Wednesday/i-vdCHgV3/A>
- [36] Closed wind tunnel. In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Washington D.C.: NASA, 2021 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z:



<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

k [-] Koeficient rozšíření



SEZNAM PŘÍLOH

- P1 Tabulka provedených měření
- P2 Grafy vektorových polí

Příloha 1 Tabulka provedených měření

	Pravý výměník, číslo měření	Levý výměník	Alternativní poloha
Turbinový průtokoměr	Zapnutý ventilátor, II.	Uzavřený vstup, X.	Zapnutý ventilátor
	Zapnutý ventilátor, IV.	Vypnutý ventilátor, XI.	
	Vypnutý ventilátor, VI.	Zapnutý ventilátor, XII.	
	Uzavřený vstup, VIII.	Jízdní výška 35 mm, zapnutý ventilátor, XIII.	
		Jízdní výška 35, vypnutý ventilátor, XIV.	
		Odstraněn negativní element, XV.	
		Odstraněno přední křídlo, XVI.	
		Částečně uzavřený vstup, XVII.	
		Kontrola částečně uzavřeného vstupu, XVIII.	
Horizontálně částečně uzavřený vstup, XIX.			
Tlaková diference	Bez turbínového průtokoměru, I.		
	Zapnutý ventilátor, III.		
	Zapnutý ventilátor 2, V.		
	Vypnutý ventilátor, VII.		
	Uzavřený vstup, IX.		
Sonda	Rychlosti 0, 60, 80 km/h		

Příloha 2 Grafy vektorových polí

