



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Petr Procházka

VYUŽITÍ MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU U
LETECKÝCH PÍSTOVÝCH MOTORŮ

Bakalářská práce

2015



K621..... Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Petr Procházka

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – TUL – Technologie údržby letadel

Název tématu (česky): **Využití měření průtoku vzduchu u leteckých
pístových motorů**

Název tématu (anglicky): The Use of Air Flow Bench - Aircraft Reciprocating Engines

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Úvod
- Základní principy a pojmy
- Základní vztahy proudění vzduchu pístovým motorem
- Funkce měřicího přístroje a práce s ním
- Naměřená data a jejich porovnání
- Aplikace naměřených hodnot
- Závěr

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce


Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)


Seznam odborné literatury: Engine Airflow - Harold Bettes
How to Port and Flow Test Cylinder Heads - David Vizard
Flow Performance Instruction Manual

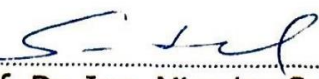
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Novák, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **21. října 2013**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)


Datum odevzdání bakalářské práce: **24. srpna 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


doc. Ing. Daniel Hanus, CSc.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy




prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


Petr Procházka
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 30. prosince 2014

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Martinovi Novákovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce. Dále chci poděkovat mému otci za veškeré informace a možnost poskytnuté při studování dané problematiky, zejména možnost měřit na měřicím přístroji, který byl nezbytnou součástí k vypracování této práce. Zajisté patří dík i celé mé rodině, která mi umožnila studovat po celou dobu mého dosavadního života a vždy mě podporovala.

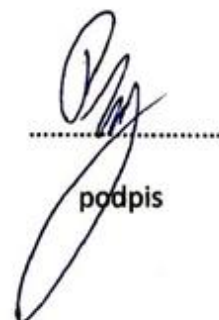
Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze, Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 11. 5. 2015



.....
podpis

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce „Využití měření průtoku vzduchu u leteckých spalovacích motorů“ je měření průtoku vzduchu pístovým motorem za účelem zvýšení výkonu motoru. První část práce je věnována spalovacímu pístovému motoru jako takovému pro lepší pochopení dané problematiky a základním principům výkonu motoru. Největší prostor je v další části věnován samotnému měření průtoku vzduchu pístovým spalovacím motorem a vyhodnocování naměřených hodnot. V závěru práce hodnotím ekonomickou a časovou náročnost, celkovou dokonalost měření a její nedostatky.

Klíčová slova

pístový spalovací motor, air flow bench (přístroj na měření průtoku vzduchu), zvyšování výkonu motoru, naměřená data, úprava hlavy válců motoru, výběr komponentů motoru

ABSTRACT

The subject of my bachelor thesis named „The use of air flow bench – aircraft reciprocating engines “is measurement of air flow through reciprocating engine to increase engine performance. The first part of my project is focused on internal combustion engine for a better understanding of issue and guiding principles of engine performance. The main part is focused on measurement of air flow through internal combustion engine and evaluation of measured values. In the conclusion of my thesis I was evaluating economic and time costs, overall accuracy and shortcomings of measurement.

Keywords

Internal combustion engine, air flow bench, increase of engine performance, measurement data, adjustment of cylinder head, components selection

Obsah

Obsah	4
Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Úvod	10
1 Základní principy a pojmy	11
1.1 Točivý moment, efektivní výkon a otáčky motoru	11
1.2 Průběh točivého momentu	12
1.3 Mechanika tekutin	14
1.4 Horní úvrať motoru (TDC)	15
1.5 Zdvihový objem motoru	15
1.6 Kompresní poměr	17
1.7 Střední pístová rychlost	17
1.8 Rychlost proudění kanály	17
1.9 Mezní vrstva	18
1.10 Curtain Area (CA)	18
1.11 Čtyřdobý spalovací motor	19
1.11.1 Sání	19
1.11.2 Komprese	20
1.11.3 Expanze	20
1.11.4 Výfuk	20
2 Základní vztahy proudění vzduchu pístovými motory	21
2.1 Jednotka průtoku vzduchu (CFM)	21
2.2 Plnicí účinnost	21
2.3 Ztrátový výkon	22
2.4 Tlak v sání motoru	23

3	Funkce měřicího přístroje a práce s ním	24
3.1	Historie měřicích přístrojů a první pokusy s nimi	24
3.2	Princip měřicího přístroje Air Flow Bench	25
3.3	Tipy měřicích přístrojů Air Flow Bench	27
3.3.1	Měřicí přístroj používající pitot-statické trubice	27
3.3.2	Měřicí přístroj používající clonu (orifice plate)	28
3.3.3	Měřicí přístroj používající Venturiův průtokoměr	30
3.4	Základní teorie proudění	31
3.5	Pomůcky a nástroje používané při měření průtoku vzduchu	32
3.5.1	Simulátor válce v bloku motoru a vstupní zaoblená vodítka	32
3.5.2	Průtokové kuličky	33
3.5.3	Tuhnoucí modelovací guma a netuhnoucí modelovací hmota	34
3.5.4	Průtokové hůlky a další pomůcky	34
3.6	Stanovené normy pro testování průtoku vzduchu	35
3.7	Kalibrační normy	36
3.8	Porovnání jednotek CFM v závislosti na testovacím tlaku	37
3.9	Testování hlavy válců	38
3.10	Tvar sacího kanálu hlavy válců	39
3.11	Velikost a tvary ventilů	40
3.12	Tvary ventilových sedel	41
3.13	Poměr průtoků plynu sání a výfuku	41
3.14	Úpravy hlav válců motoru	42
3.15	Testování a úpravy sacího potrubí motoru	42
3.16	Délky a průměry sacího potrubí	44
4	Naměřená data a jejich porovnání	45
4.1	Použitý měřicí přístroj Flow Bench	45
4.2	Naměřená data	46
4.3	Porovnání dat	49

5 Aplikace naměřených hodnot	52
5.1 Výpočet otáček a výkonu na základě naměřených dat CFM	52
5.2 Výběr vačkového hřídele na základě naměřených dat CFM	53
5.3 Počítačové simulace	55
6 Závěr	57
Seznam použitých zdrojů	59

Seznam použitých zkratek

TDC	Top Dead Center
BDC	Bottom Dead Center
CFM	Cubic Feet per Minute
SCFM	Standard Cubic Feet per Minute
OEM	Original Equipment Manufacturer
NIST	National Institute for Standards and Technology
ASME	American Society of Mechanical Engineers
SAE	Society of Automotive Engineers
VW	Volkswagen
CU	Curtain Area
CNC	Computer Numeric Control
MSA	Mezinárodní standardní atmosféra
PC	Personal Computer
PVC	Polyvinylchlorid

Seznam použitých symbolů

M_k	točivý moment pístového spalovacího motoru	[N.m]
F_o	síla působící na ojnicí čep	[N]
r_o	poloměr klikového hřídele	[m]
P_e	efektivní výkon	[W]
n	otáčky motoru	[<i>ot. min</i> ⁻¹]
V_{zv}	zdvihový objem válce	[<i>m</i> ³]
d	průměr válce	[m]
z	zdvih pístu	[m]
V_z	zdvihový objem motoru	[<i>m</i> ³]

i_v	počet válců	[-]
ε	kompresní poměr	[-]
V_{max}	maximální objem válce v dolní úvrati	[m^3]
V_{min}	minimální objem válce kompresního prostoru v horní úvrati	[m^3]
V_k	kompresní objem	[m^3]
c_s	střední pístová rychlost	[$m \cdot s^{-1}$]
v_p	rychlost proudění výfukovými a sacími kanály	[$m \cdot s^{-1}$]
S_p	Plošný průřez kanálu	[m^2]
S_{CA}	plocha mezi ventilem a jeho sedlem	[mm^2]
d_v	průměr ventilu	[mm]
z_v	zdvih ventilu	[mm]
η_V	plnicí účinnost	[-]
m_d	hmotnost přivedené čerstvé náplně	[kg]
m_t	hmotnost teoretické náplně	[kg]
ρ_t	teoretická hustota náplně	[$kg \cdot m^{-3}$]
P_z	ztrátový výkon	[W]
M_z	ztrátový točivý moment	[N.m]
p_z	střední tlak mechanických ztrát	[Pa]
τ	počet pracovních dob motoru	[-]
Q_V	objemový průtok	[$m^3 \cdot min^{-1}$]
Q_m	hmotnostní průtok	[$kg \cdot min^{-1}$]
Q	objemový průtok CFM	[$ft^3 \cdot min^{-1}$]
m_d	hmotnost přivedené čerstvé náplně	[kg]
m_t	hmotnost teoretické náplně	[kg]
ρ	hustota vzduchu	[$kg \cdot m^{-3}$]
S	protékaný plošný průřez	[m^2]
v	rychlost proudění	[$m \cdot s^{-1}$]
p_c	celkový tlak	[Pa]

p_s	statický tlak	[Pa]
ε_s	expanzní součinitel	[-]
C	součinitel průtoku	[-]
d_s	průměr otvoru clony	[m]
D_s	průměr potrubí před clonou	[m]
p_1	tlak před clonou	[Pa]
p_2	statický tlak za clonou	[Pa]
v_1	rychlost proudění před zúžením	[$m \cdot s^{-1}$]
p_1	tlak před zúžením	[Pa]
p_2	tlak v místě zúžení	[Pa]
S_1	plošný průřez před zúžením	[m^2]
S_2	plošný průřez v místě zúžení	[m^2]
P_o	původní testovací tlak	[<i>in. H₂O</i>]
P_p	převedený testovací tlak	[<i>in. H₂O</i>]
q	převáděný objemový průtok CFM	[$ft^3 \cdot min^{-1}$]
P	výkon motoru	[hp]
C_p	koeficient výkonu	[-]
n_p	otáčky motoru při maximálním výkonu	[<i>ot. min⁻¹</i>]
C_n	koeficient otáček	[-]
$SCFM$	Standard Cubic Feet per Minute	[$ft^3 \cdot min^{-1}$]

Úvod

Ačkoliv v dnešním moderním světě disponuje pro běžnou leteckou dopravu většina letadel turbínovými motory, stále existují letadla, kde se tyto motory nepoužívají. Jedná se výhradně o menší letadla, které létají na krátké vzdálenosti v nízkých letových hladinách, a proudový motor by byl zde značně neekonomický. V případech, jako jsou např. akrobatické soutěže nebo rychlostní závody letadel se spalovacími pístovými motory, je kladen důraz na motor s vyhovujícím poměrem váhy a výkonu.

Proto je cílem této práce seznámení se s úpravou pístového spalovacího motoru za dosažením optimálního průběhu výkonu a účinnosti motoru v leteckém průmyslu. Tato práce je zaměřena zejména na úpravu aerodynamických vlastností částí pístového spalovacího motoru, měření průtoku vzduchu sacími a výfukovými kanály hlavy válců motoru a dalšími částmi, kde je vyžadováno co nejvíce optimalizovat proudění plynů a jejich směsí. Tyto úpravy najdou zcela jistě své využití i pro běžné používání letadel s pístovými spalovacími motory, kde optimalizací proudění plynů lze dosáhnout lepší spotřeby a využití výkonu v určitých otáčkách motoru.

Jednotlivé kapitoly obsahují obrázky, grafy a vzorce, které doplňují a objasňují danou problematiku.

1 Základní principy a pojmy

Nejprve bych zde rád objasnil několik základních principů a pojmů, které je nezbytné znát k porozumění účelu mé práce. Mám na mysli především výkon a točivý moment motoru, průběh efektivního výkonu a točivého momentu, popis důležitých parametrů a principu čtyřdobého zážehového spalovacího motoru.

1.1 Točivý moment, efektivní výkon a otáčky motoru

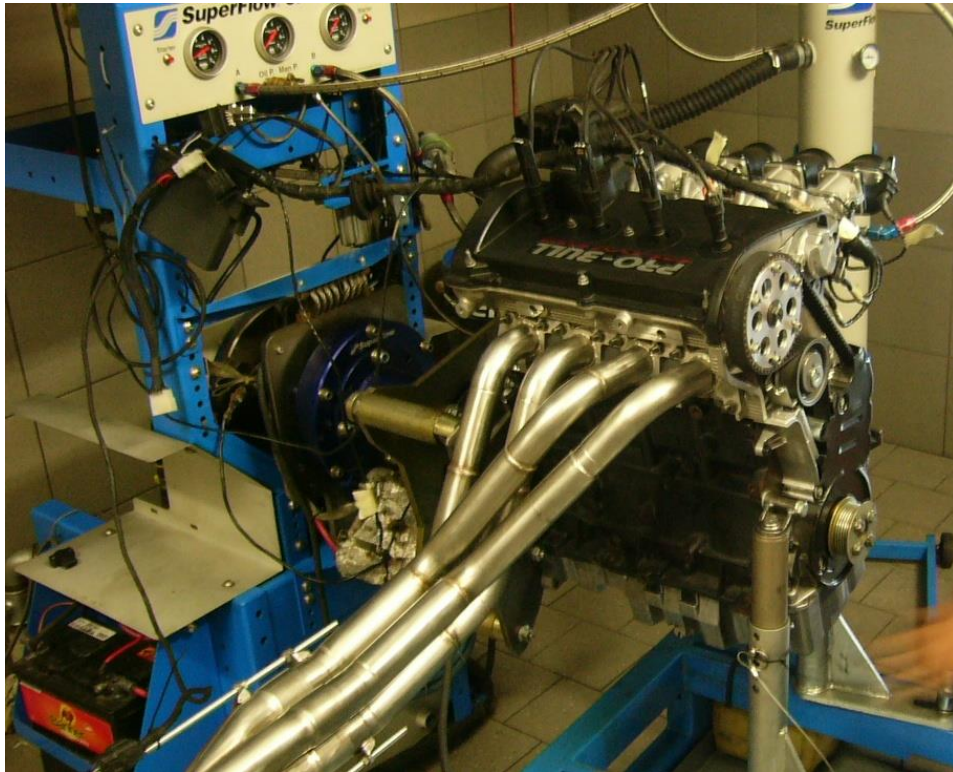
Točivý moment vyjadřuje působení síly na bod vzdálený od osy otáčení. Točivý moment motoru je generován tak, že vlivem expanze směsi vzduchu a paliva ve spalovací komoře vzniká tlak, který vytváří sílu na vrchní část pístu, která je vedena přes pístní čep a ojnicí na klikovou hřídel. Točivý moment u spalovacího pístového motoru je tedy dán součinem síly působící na ojnicí čep F_o a poloměru klikového hřídele r_o . [1]

$$M_k = F_o \cdot r_o \quad [1.1]$$

Průběh efektivního *výkonu* odebíraného na hnací hřídeli P_e se zjišťuje na motorové brzdě (Obr. 1) a je to pouze vypočtená hodnota závislosti průběhu točivého momentu na otáčkách motoru n . Pro výpočet efektivního výkonu motoru v určitém provozním bodě platí jednoduchý vztah:

$$P_e = \frac{M_k \cdot 2\pi \cdot n}{60} \quad [1.2]$$

Z něho jasně vyplívá, že zvýšení efektivního výkonu lze dosáhnout zvýšením otáček nebo točivého momentu, obě veličiny jsou však omezené. [2]



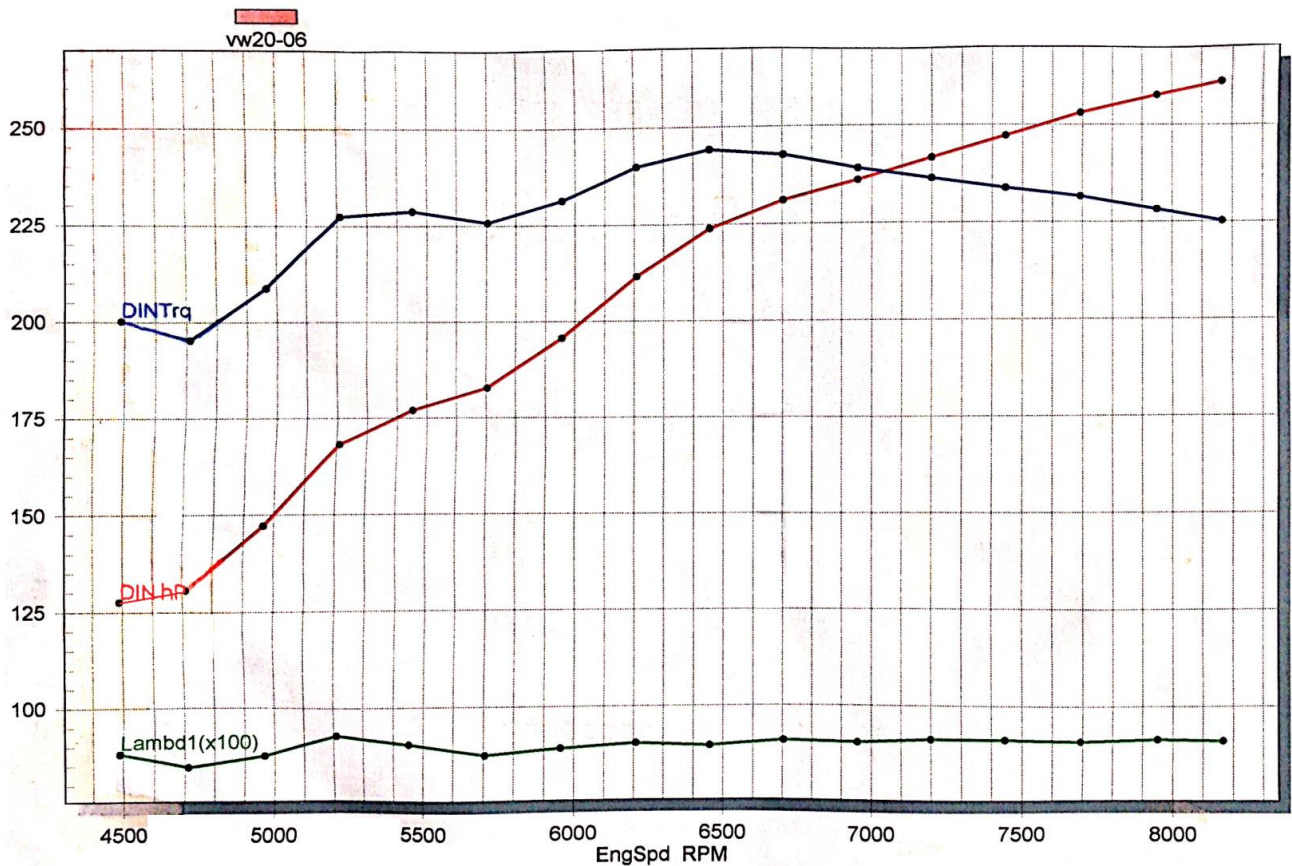
Obr. 1 Uchycený automobilový závodní motor VW 2,0L, 20V (261k); na motorové brzdě [3]

1.2 Průběh točivého momentu

Průběh točivého momentu se měří na vyjmutém motoru včetně příslušenství na motorové brzdě. Pro lepší vysvětlení průběhu točivého momentu v závislosti na otáčkách objasní konkrétní příklad naměřených hodnot na motorové brzdě (Obr. 2).

Measured Torque and Power

vw20-06,



6/03/11

SuperFlow WinDyn™ V2.8

16:48:17

EngSpd RPM	DIN hp hp	DINtrq CNm	Lambd1 ratio	Man_P Bar	CoolIn degC	Oil_P Bar	Fuel_P Bar	OilIn degC
4 490**	127,7	200,2	0,88	0,00	70	5,5	4,1	0
4 712	130,7	195,3	0,85	0,00	71	5,6	4,1	0
4 965	147,2	208,8	0,88	0,00	70	5,7	4,1	0
5 209	168,2	227,4	0,93	0,00	70	5,8	4,1	0
5 452	177,1	228,7	0,91	0,00	70	5,9	4,1	0
5 704	182,8	225,7	0,88	0,00	70	5,9	4,1	0
5 956	195,7	231,4	0,89	0,00	70	5,9	4,0	0
6 208	211,6	240,0	0,91	0,00	70	6,0	4,0	0
6 457	223,9	244,2	0,90	0,00	70	6,0	4,0	0
6 704	231,1	242,7	0,91	0,00	70	6,1	4,1	0
6 953	236,0	239,0	0,91	0,00	70	6,1	4,1	0
7 198	241,6	236,3	0,91	0,00	70	6,1	4,1	0
7 444	247,1	233,8	0,91	0,00	71	6,0	4,2	0
7 693	253,0	231,6	0,91	0,00	71	5,9	4,1	0
7 950	257,5	228,1	0,92	0,00	71	5,8	4,1	0
8 166**	261,1	225,2	0,91	0,00	71	5,8	4,0	0
Max**								
8 166	261,1	244,2	0,93	0,00	71	6,1	4,2	0

Obr. 2 Výsledek změřeného průběhu točivého momentu v závislosti na otáčkách VW 2,0L, 20V (261k) [3]

Na první pohled je na obrázku 2 výkonová charakteristika zcela jiná, než by odpovídala pístovému motoru použitého v leteckém průmyslu, zejména otáčky motoru zdaleka převyšují hodnoty běžně používaných pístových motorů v letadlech. Tato charakteristika náleží motoru na obr. 1 a jedná se o naladěný motor Volkswagen od firmy PRO-BULL Motorsport, připravený pro použití v automobilových závodech. Pro názornost závislosti točivého momentu na otáčkách motoru a vypočtené hodnoty výkonu však tento příklad bohatě postačí.

V tomto případě začíná točivý moment růst teprve od $4700 \text{ ot. min}^{-1}$ až do $5400 \text{ ot. min}^{-1}$, kde je malý propad vlivem tlakových kmitů, ten však v těchto otáčkách motoru není pro použití v automobilových závodech důležitý. Dále hodnota točivého momentu v závislosti na otáčkách roste až do maximální hodnoty a tou je $244,2 \text{ N.m}$ při $6457 \text{ ot. min}^{-1}$, kde má motor největší zrychlení. Důležité je, že v tomto případě hodnota točivého momentu dále klesá velmi pozvolně a proto výkon se zvyšujícími se otáčky motoru stále roste až do maximální naměřené hodnoty výkonu $261,1 \text{ hp}$ při $8166 \text{ ot. min}^{-1}$. Výkon by pravděpodobně ještě dále rostl, ale z obavy destrukce motoru bylo měření zastaveno.

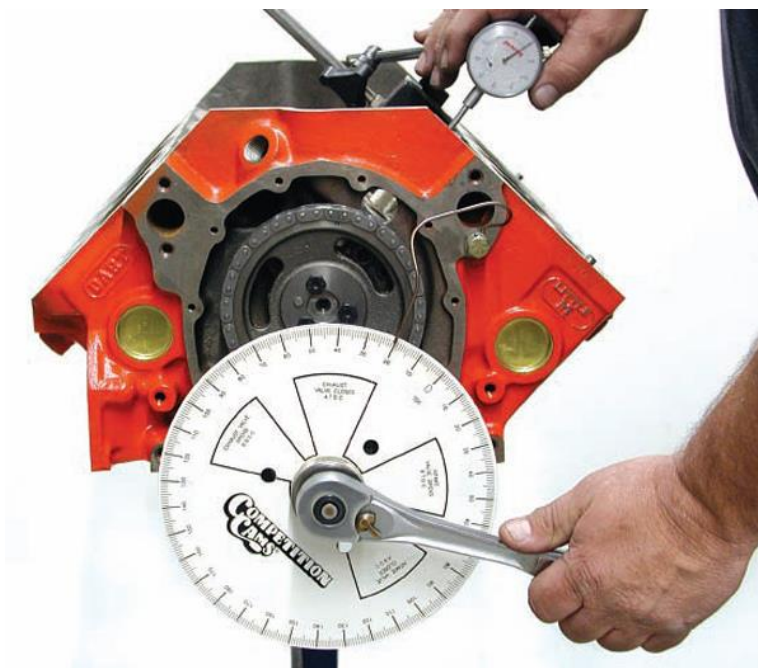
1.3 Mechanika tekutin

Tekutiny tvoří všechny plyny a kapaliny. Od pevných látek, kde jsou jednotlivé molekuly a atomy vázány pevnou vazbou, se liší tím, že mohou „téci“. Proto je nazýváme tekutiny. [4]

Proudění vzduchu skrz pístový spalovací motor proto nespadá jinam, než do mechaniky tekutin, která je důležitou součástí mé práce. Proudění vzduchu je způsobeno rozdíly tlaku, z čehož vyplývá, že pokud bude stejný tlak v sacím systému jako za sacím ventilem v hlavě válců, nebude zde žádné proudění vzduchu a tudíž i žádný výkon. Proto studie rozdílů tlaků, bude zásadní pro pochopení proudění tekutin. [5]

1.4 Horní úvrať motoru (TDC)

Horní úvrať nastane, když je píst v nejvyšším bodě zdvihu motoru a jeho rychlost je nulová. Opakem TDC je BDC, což je dolní úvrať motoru. [5] Nejjednodušší cesta k nalezení TDC je použití mikrometru umístěného buď v otvoru pro zapalovací svíčku, nebo při demontované hlavě válců, přímo na bloku motoru. Horní úvrať a její nalezení je velmi důležitá pro časování vaček motoru a to pomocí úhломěrného kola, které je připevněné ke klikové hřídeli (Obr. 3). [6]



Obr. 3 Hledání horní úvrati motoru (TDC) a připevněné úhломěrné kolo pro časování vaček motoru [6]

1.5 Zdvihový objem motoru

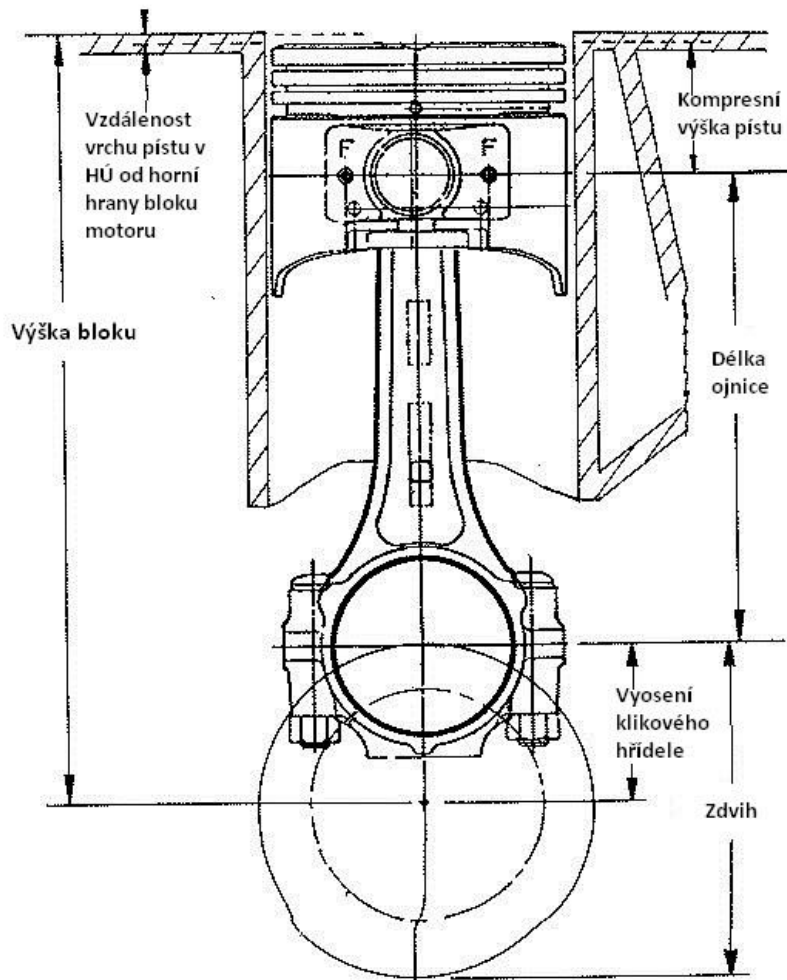
Zdvihový objem motoru je součet zdvihových objemů válců motoru a pro zdvihový objem válce V_{zv} platí vztah:

$$V_{zv} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z \quad [1.3]$$

Z něho vyplývá výpočet pro zdvihový objem motoru V_z :

$$V_z = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z \cdot i_v, \quad [1.4]$$

Kde d je průměr válce, z zdvih pístu a i_v počet válců. Zdvih pístu je vzdálenost mezi horní a dolní úvratí a je dán vyosením klikové hřídele od středu otáčení (Obr. 4). [2]



Obr. 4 Příčný řez blokem motoru [7]

Všeobecně je zdvihový objem úměrný točivému momentu a jeho objem určuje vrtání a zdvih motoru. Kombinace jejich volby vyžaduje určité dovednosti k rozhodnutí.

1.6 Kompresní poměr

Kompresní poměr je poměr maximálního objemu válce v dolní úvrati k minimálnímu objemu válce kompresního prostoru v horní úvrati.

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{zv} + V_k}{V_k} \quad [1.5]$$

V_k je kompresní objem, tj. objem prostoru na spalovací straně pístu v horní úvrati. Kompresní poměr je u zážehových motorů je omezen teplotou vznícení směsi paliva se vzduchem a tedy vznikem detonačního hoření (klepání a samozápaly). [2]

1.7 Střední pístová rychlost

Střední pístová rychlost slouží pro porovnání motorů. Na základě střední pístové rychlosti lze určit kritické otáčky pro daný motor a do jisté míry také udává životnost motoru (opotřebení válců a pístních kroužků, teplotní namáhání). Vyšší hodnoty střední pístové rychlosti zvyšují průtočný odpor. Její hodnotu lze vypočítat následujícím vztahem:

$$c_s = \frac{z \cdot n}{30}, \quad [1.6]$$

kde n jsou otáčky motoru a z je zdvih pístu. [2]

1.8 Rychlost proudění kanály

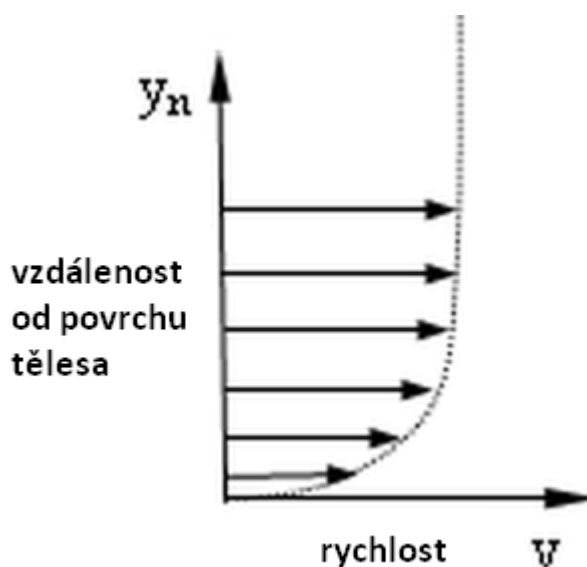
Rychlost proudění výfukovými a sacími kanály, které jsou testovány na měřicím přístroji, je přímo úměrná střední pístové rychlosti a průměru válce a nepřímo úměrná ploše průřezu kanálu. Spočítá se podle tohoto vzorce:

$$v_p = \frac{c_s \cdot d^2}{S_p}, \quad [1.7]$$

kde S_p je plošný průřez kanálu. Rychlost proudění by v ideálním případě neměla přesahovat 55 až 57% místní rychlosti zvuku. [5]

1.9 Mezní vrstva

Mezní vrstva vzniká při obtékání těles vzduchem vlivem viskozity vzduchu. Tato vrstva se projevuje v těsné blízkosti obtékaného tělesa a v případě kanálů uvnitř hlavy válců motoru bývá její tloušťka od 0,76 mm do 2,03 mm. Tyto čísla závisí na tvaru, povrchu a překážkách v cestě proudění uvnitř kanálů. V této vrstvě je výrazný pokles rychlosti proudění a přímo na povrchu je rychlost nulová. Tento jev znázorňuje rychlostní profil (Obr. 5). Existence vertikálního rychlostního gradientu je spojena se vznikem odporové síly. Třením, mezi jednotlivými vrstvami tekutiny s různou rychlostí, vzniká odporová síla působící proti proudu vzduchu. [8]



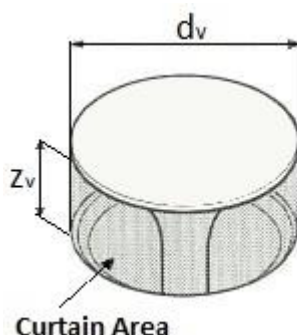
Obr. 5 Rychlostní profil [8]

1.10 Curtain Area (CA)

Tato oblast zůstává v anglickém názvu, protože v českém jazyce pro ni nelze nalézt patřičný ekvivalent. *Curtain Area* (Obr. 6) je plocha mezi ventilem a jeho sedlem při jakémkoliv zdvihu ventilu. Vypočítá se podle následujícího vzorce:

$$S_{CA} = \pi \cdot d_v \cdot z_v , \quad [1.8]$$

kde d_v je průměr ventilu a z_v zdvih ventilu. Je důležité, aby tato plocha byla minimálně stejně velká, jako je plocha kanálu a průtok vzduchu tak nebyl omezován malým zdvihem ventilu. [9]



Obr. 6 Curtain Area [10]

1.11 Čtyřdobý spalovací motor

V této práci se zaměřuji pouze na čtyřdobé spalovací motory, které pracují na čtyřech pracovních fázích – sání, komprese, expanze a výfuk. Na vykonání všech čtyř pracovních fází je potřeba dvě kompletní otáčky klikové hřídele. Níže jsou popsány pracovní fáze zážehového motoru, které se liší od pracovních fází vznětového motoru.

1.11.1 Sání

Vzduch z okolního prostředí je vtlačován do motoru atmosférickým tlakem, a to jakmile se sací ventily otevřou. Množství vzduchu vtlačovaného při atmosférické výšce 0 m n. m. je stejné jako ve výšce 4300 m n. m., ale co není stejné, je hustota vzduchu a množství kyslíku, který je nezbytný pro dobré hoření směsi vzduchu a paliva a má obrovský vliv na výkon pístového spalovacího motoru. U přímého vstřikování je nasáván během této fáze pouze vzduch. Namísto směsi vzduchu a paliva u karburátorů, nebo nepřímého vstřikování s palivovými vstřikovači umístěnými v sání motoru. [5]

1.11.2 Kompresie

Po zavření sacích ventilů je palivo a vzduch ve správném stechiometrickém poměru stlačeno do mnohem menšího objemu ve spalovací komoře, tím se směs předejde, což napomáhá ideálně k vypařování paliva nebo alespoň k mnohonásobnému zmenšení kapek paliva pro lepší prohoření směsi. Těsně před TDC se tato směs zapálí elektrickou jiskrou svíčky. [5]

1.11.3 Expanze

Jakmile plyny začnou hořet, tlak ve válci prudce vzroste a síla působící na vršek pístu je přes pístní čep, ojnici a ojnicí čep vedena na klikovou hřídel. Toto je síla, která vyvolává točivý moment motoru přenesený na setrvačnick. Je potřeba zmínit že spalovací proces musí probíhat kontrolovaně a v žádném případě zde nesmí být detonace. Plynule hořící palivo pomáhá vytvářet výkon, detonace pouze poškozuje části motoru. [5]

1.11.4 Výfuk

Po expanzi je válec po expandujících a hořících plynech stále na vysoké hodnotě vnitřního tlaku a tak po otevření výfukového ventilu unikají výfukové plyny poměrně rychle, tyto plyny jsou ještě vytlačovány pohybem pístu z dolní úvrati směrem do horní úvrati. V tomto cyklu je velmi důležité časování výfukových ventilů a při správném načasování otevření a zavření lze optimalizovat křivku točivého momentu a tím i křivku výkonu. Jestliže se výfukový ventil otevře příliš brzy, nevyužije se veškerý tlak, který tlačí silou při expanzi píst dolů a unikne výfukovým kanálem. Pokud se výfukový ventil otevře příliš pozdě, motor pracuje sám proti sobě, což vede k nadměrným ztrátám. [5]

2 Základní vztahy proudění vzduchu pístovými motory

V této kapitole bych se rád věnoval základním vztahům proudění vzduchu pístovými motory. Konkrétně jednotkám v jakých se měří průtok vzduchu, plnicí účinnosti, ztrátovému výkonu a tlaku v sání motoru.

2.1 Jednotka průtoku vzduchu (CFM)

Jednotku CFM z anglického názvu *cubic feet per minute* (krychlová stopa za minutu) nebudu převádět do metrické soustavy, protože veškerá literatura, údaje, data a měřicí přístroje pracují s touto jednotkou a její převod by způsobil nepřehlednost. Tato jednotka se samozřejmě musí vztahovat k hodnotě testovacího tlaku, při kterém měření bylo provedeno, to bude podrobněji vysvětleno dále v kapitole 3. CFM udává, kolik objemu vzduchu proteče za minutu určitou cestou, kterou testujeme. Schopnost motoru produkovat výkon je přímo úměrná jeho kapacitě průtoku vzduchu. [11]

2.2 Plnicí účinnost

Plnicí účinnost je bezrozměrné číslo a udává, jak dobře je motor schopný využít teoretické množství vzduchu (hmotnost vzduchu), které mu je k dispozici. Vypočítá se jako poměr hmotnosti čerstvé náplně dopravené do jednoho válce za jeden pracovní oběh, k teoretické hmotnosti čerstvé náplně odpovídající zdvihovému objemu, vypočtené ze stavové rovnice plynu při dané teplotě a tlaku okolí. [12] Pro plnicí účinnost platí vztah:

$$\eta_V = \frac{m_d}{m_t} = \frac{m_d}{V_{zv} \cdot \rho_t}, \quad [2.1]$$

kde m_d je hmotnost čerstvé náplně přivedené do jednoho válce, m_t teoretická hmotnost čerstvé náplně odpovídající zdvihovému objemu jednoho válce, V_{zv} zdvihový objem jednoho válce a ρ_t teoretická hustota náplně. Plnicí účinnost bývá u běžných atmosférických motorů menší jak jedna, u přeplňovaných motorů větší jak 1. Existují ale i atmosférické motory (zejména vysokootáčkové), kde vlivem optimálního využití tlakových kmitů v sacím i výfukovém potrubí, lze dosáhnout plnicí účinnosti větší než jedna. [2]

2.3 Ztrátový výkon

Protože vnitřní proudění vzduchu může probíhat pouze v motoru, který je v chodu, je potřeba si uvědomit, že všechny pohybující se části potřebují určitý výkon k překonání tření a dalších ztrát. A tím je tzv. ztrátový výkon P_z (Obr. 7). Závisí na ztrátovém točivém momentu M_z a otáčkách motoru n :

$$P_z = \frac{M_z \cdot 2\pi \cdot n}{60} \quad [2.2]$$

Ztrátový točivý moment lze vypočítat pomocí středního tlaku mechanických ztrát p_z (který je rozdílem indikovaného a efektivního tlaku a je závislý na střední pístové rychlosti c_s) a zdvihového objemu válce V_{zv} . Vzorec pro ztrátový točivý moment pak vypadá takto:

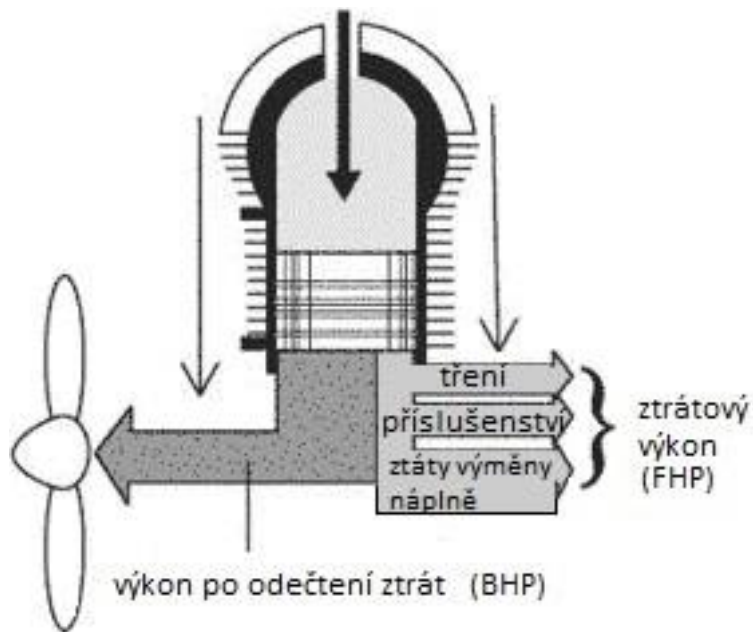
$$M_z = \frac{p_z \cdot V_{zv}}{\pi \cdot \tau} \cdot i_v, \quad [2.3]$$

kde pro čtyřdobý motor $\tau = 4$ a i_v je počet válců.

Tření je závislé na otáčkách motoru a tím i pístové rychlosti, která je popsána v kap. 1. Podíl ztrát jednotlivých skupin v procentech u zážehového motoru je uveden v následující tabulce.

Ztráty	Zážehový motor [%]
Tření mezi pístem s kroužky a válcem	45
Tření ložisek klikového a vačkového hřídele + ventilační ztráty	23
Výměna náplně ve válci	20
Pohon rozvodového mechanismu	6
Pohon příslušenství	6

Tab. 1 Podíl ztrát v pístovém zážehovém spalovacím motoru [2], vlastní zpracování



Obr. 7 Zjednodušené schéma ztrátového výkonu (FHP) [14], přeloženo z AJ

2.4 Tlak v sání motoru

Tlak v sání motoru, který zde zmiňuji, se vztahuje k zážehovým pístovým motorům s karburátory, protože právě od těchto motorů vznikla nejvíce rozšířená (v USA) standardní hodnota testovacího tlaku 70 mbar (28 in. H_2O), používaná při testování průtoku vzduchu měřicími přístroji. Průměrná hodnota podtlaku v celém sání motoru při plném plynu a maximálních otáčkách může být okolo 34 mbar (13.6 in. H_2O) a méně. Skutečný podtlak ΔP v sacím potrubí se mění s rozdílnými zdvihy ventilů a otáčkami motoru. Diferenční tlak ΔP nabývá hodnot mezi 34 mbar (13.6 in. H_2O) a 102 mbar (40.8 in. H_2O), podle toho v jakém místě sání motoru bude diferenční tlak měřen. Průměrná hodnota výše zmíněných diferenčních tlaků je 68 mbar (27.19 in. H_2O), pak hodnota 70 mbar (28 in. H_2O) pro testovací tlak začíná dávat určitý smysl. Nikde však není napsáno, že testovací tlak (28 in. H_2O) je standard pro všechny měřicí přístroje a musí být použit k testování. Slabší měřicí přístroje tak vysoký podtlak ani nejsou schopny vyvinout a proto používají nižší testovací tlak a pomocí matematických přepočtů převádějí naměřené CFM (při slabším testovacím tlaku) na hodnoty vyšších podtlaků. [15]

3 Funkce měřicího přístroje a práce s ním

V anglickém jazyce se pro tento měřicí přístroj používá název Air Flow Bench, nebo jen Flow bench. V této kapitole zmíním něco k jeho historii, princip jak měřicí přístroj funguje, rozdílné typy dnešních měřicích přístrojů, uvedu zde některé pomůcky, nástroje a kalibrační normy používané při práci s ním. Na závěr této kapitoly uvedu testování výfukových a sacích komponentů.

Air Flow Bench je jednoduché zařízení, které měří odpor proudění vzduchu skrz testované komponenty. Měřicí přístroj je založený na některých velmi jednoduchých, základních principech proudění vzduchu. [5]

3.1 Historie měřicích přístrojů a první pokusy s nimi

Kořeny Flow Bench sahají až k světově známým bratrům Wrightovým, kteří uskutečnili první řízený let letadla těžšího než vzduch s vlastním pohonem. Roku 1901 postavili první aerodynamický tunel, který jim pomohl dosáhnout právě výše zmíněného úspěchu. Tento aerodynamický tunel byl vůbec první přístroj v USA určený ke studii proudění vzduchu. Větrný tunel bratrů Wrightových byl poháněn motorem o výkonu 1 hp a dokázal vytvořit proudění vzduchu kolem 11 až 13 $m \cdot s^{-1}$. V dnešní době nejsou neobvyklé měřicí přístroje průtoku vzduchu, které pohání motory až do výkonu 25 hp pro testování hlav válců motoru a sacího potrubí. Rychlost proudění může ve větším průřezu dosahovat rychlosti 35 $m \cdot s^{-1}$, až po rychlost 90 $m \cdot s^{-1}$ a více v menším průřezu. [9]

Vůbec první studie proudění vzduchu, konkrétně pro vývoj motoru byly provedeny výrobci raných leteckých motorů. První měřicí přístroje průtoku vzduchu, využívány subdodavateli (OEM), byli velice drahé, těžkopádné a složité stroje. Mezi první velké firmy v USA, které začali využívat Flow Bench patří Oldsmobile a Pontiac. Chevrolet začal Flow Bench využívat až od sedmdesátých let 20. století. Pro zajímavost Ford Motor Company využil v polovině šedesátých let 20. století svou laboratoř výzkumu proudění vzduchu pístovým spalovacím motorem pro vývoj motoru světoznámé legendy závodu 24 hodin Le Mans, Fordu GT40 (Obr. 8), který neměl v té době konkurenci a Ford s tímto vozem zvítězil čtyřikrát v řadě. [5]



Obr. 8 Ford GT40 – závod 24h. Le Mans 1968 [16]

Zajímavé je, že Flow Bench, který byl použit firmou Ford Motor Company pro tento závodní speciál byl velký jako celá místnost a testovací tlak dosahoval neuvěřitelných 169 mbar (68 in. H_2O). Postupem času bylo zjištěno, že takovýto podtlak je zcela zbytečný a tak začala éra menších měřicích přístrojů a velké firmy, které vlastnily vlastní obrovské měřicí přístroje, si začaly z ekonomického hlediska najímat menší společnosti, specializující se pouze na testování průtoku vzduchu pístovými motory. [5]

3.2 Princip měřicího přístroje Air Flow Bench

Měřicí přístroj se v dnešní době skládá primárně z výkonného elektromotoru, který generuje potřebný diferenční tlak pro testování komponentů pístového motoru, zařízení které měří rychlost proudění vzduchu testovanou částí a zařízení, které měří teplotu a tlak protékaného vzduchu. Pro určení testovacího tlaku, který se dá regulovat, slouží manometr

ve tvaru U-trubice. Nezbytný je ještě druhý šikmý (pro vyšší přesnost) manometr, který je součástí zařízení pro stanovení rychlosti proudění vzduchu. Ze známé rychlosti proudění vzduchu daným průřezem lze spočítat objemový průtok vzduchu Q_V . Zde je důležité si uvědomit jednu věc, a to že objemový průtok $Q_V [m^3 \cdot min^{-1}]$ není to samé jako hmotnostní průtok $Q_m [kg \cdot min^{-1}]$. Právě hmotnostní průtok má obrovský vliv na výkon motoru, ale ten je podle vztahu [3.1] závislý na hustotě vzduchu a ta se s teplotou a nadmořskou výškou mění. Proto jsou součástí měřicího přístroje i korekční teplotní čidla pro stanovení hustoty vzduchu při známé nadmořské výšce a tím i jeho hmotnostního průtoku. Pro porovnání dat s ostatními je však tato reference poněkud zavádějící, protože záleží na místních podmínkách měření a proto se hlavní veličinou stal právě objemový průtok Q_V . [17] [18]

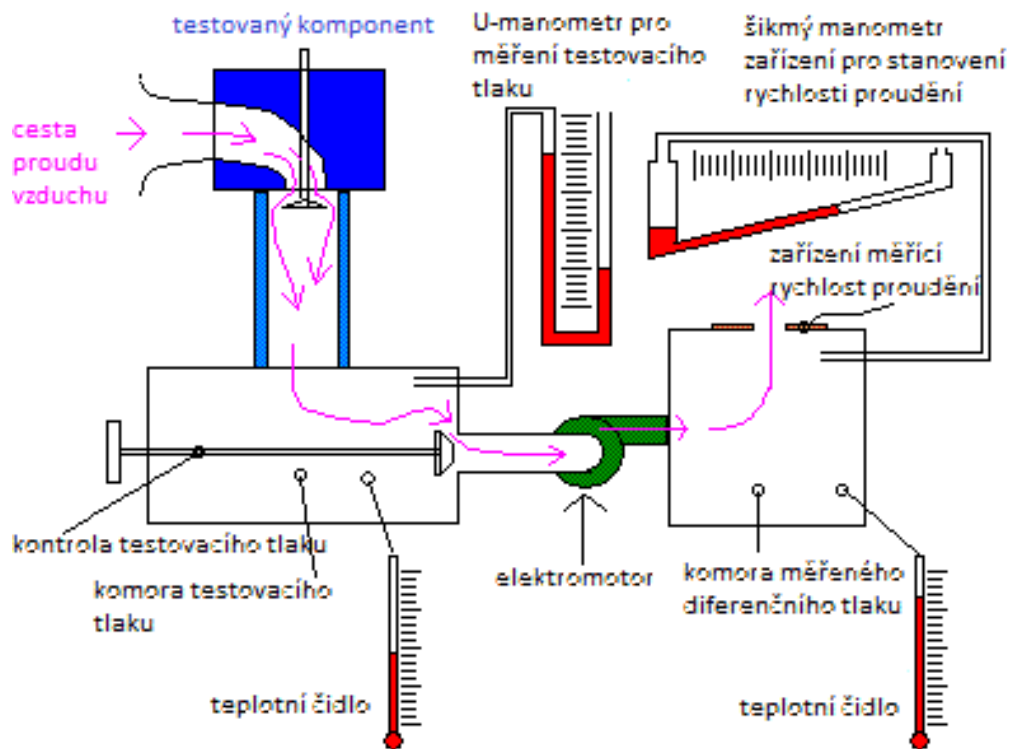
Vztah mezi objemovým a hmotnostním průtokem:

$$Q_m = \rho \cdot Q_V, \quad [3.1]$$

kde ρ je hustota vzduchu při dané nadmořské výšce a teplotě. Objemový průtok Q_V je dán vztahem:

$$Q_V = S \cdot v \cdot 60, \quad [3.2]$$

kde S je protékající plošný průřez a v je rychlost proudění.



Obr. 9 Schéma typického měřícího přístroje Air Flow Bench [17], přeloženo z AJ

3.3 Typy měřících přístrojů Air Flow Bench

Většina měřících přístrojů funguje v zásadě na výše zmíněném principu. V čem se ale liší, je velikost měřícího přístroje Flow Bench a typ zvoleného zařízení měřící rychlost proudění vzduchu, které je součástí měřícího přístroje Flow Bench. Velké profesionální měřící přístroje Flow Bench jsou podstatně výkonnější než malé (po domácku sestavené) měřící přístroje a pracují s vyšším testovacím tlakem. Jejich nevýhodou je velmi vysoká cena a velký příkon elektrického proudu, který je potřebný k jejich provozování. Výhodou jsou přesněji naměřená data. Je však nutno říci, že pro běžné uživatele jsou mnohem dostupnější malé měřící přístroje a právě na jednom z nich budu provádět měření v kapitole 4.

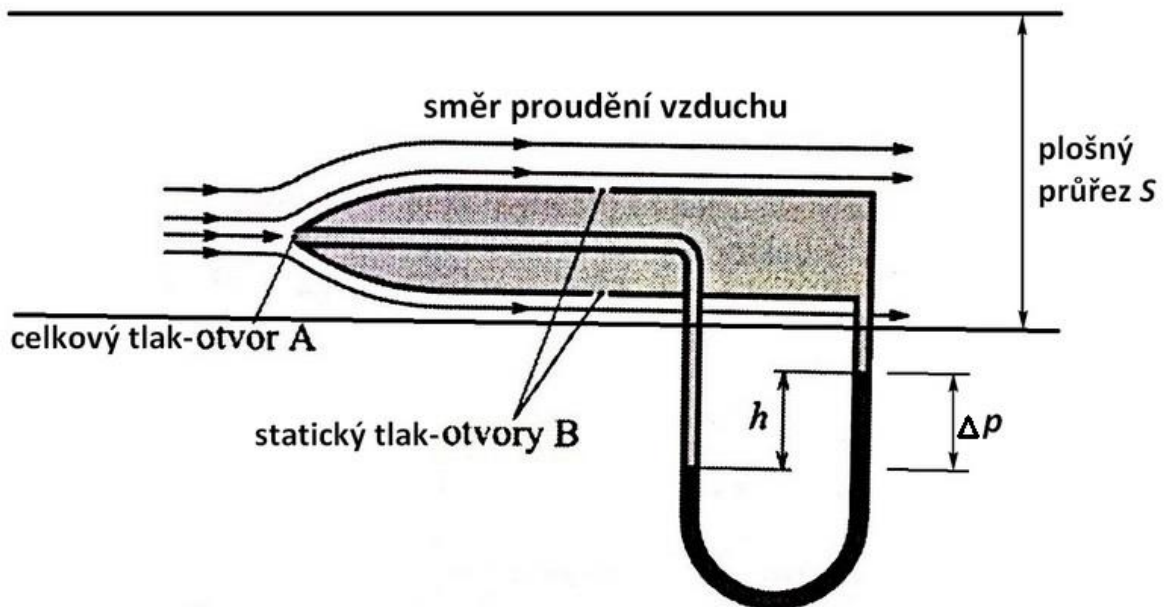
3.3.1 Měřící přístroj používající pitot-statické trubice

Pitot-statické trubice (obr. 10) používané měřícím přístrojem pro výpočet rychlosti proudění vzduchu fungují na jednoduchém principu. Jsou však velice náchylné na úhel, pod kterým je měřen celkový tlak. Pitotova trubice v uspořádání na obrázku se nazývá

Prandtova trubice. Je tvořena dvěma částmi – vnitřní a vnější trubicí. Na boku vnější trubice jsou otvory B, které jsou propojené s jedním koncem U-manometru. Druhý konec manometru je spojen s vnitřní trubicí měřicího zařízení, do které vzduch vstupuje čelním otvorem A. Otvory B měří statický p_s a otvor A měří celkový tlak p_c . Rozdíl těchto dvou tlaků se nazývá dynamický tlak p_d a lze odečíst z U-manometru jako rozdíl tlaku celkového a tlaku statického. Z něho je při známé hustotě vzduchu vypočítána rychlost proudění v . Vzorec pro výpočet rychlosti proudění pitot-statickou trubicí je:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}}, \quad [3.3]$$

kde p_c je celkový tlak, p_s statický tlak a ρ je hustota protékaného vzduchu. [4]



Obr. 10 Pitot-statická trubice [4], vlastní úprava zpracování

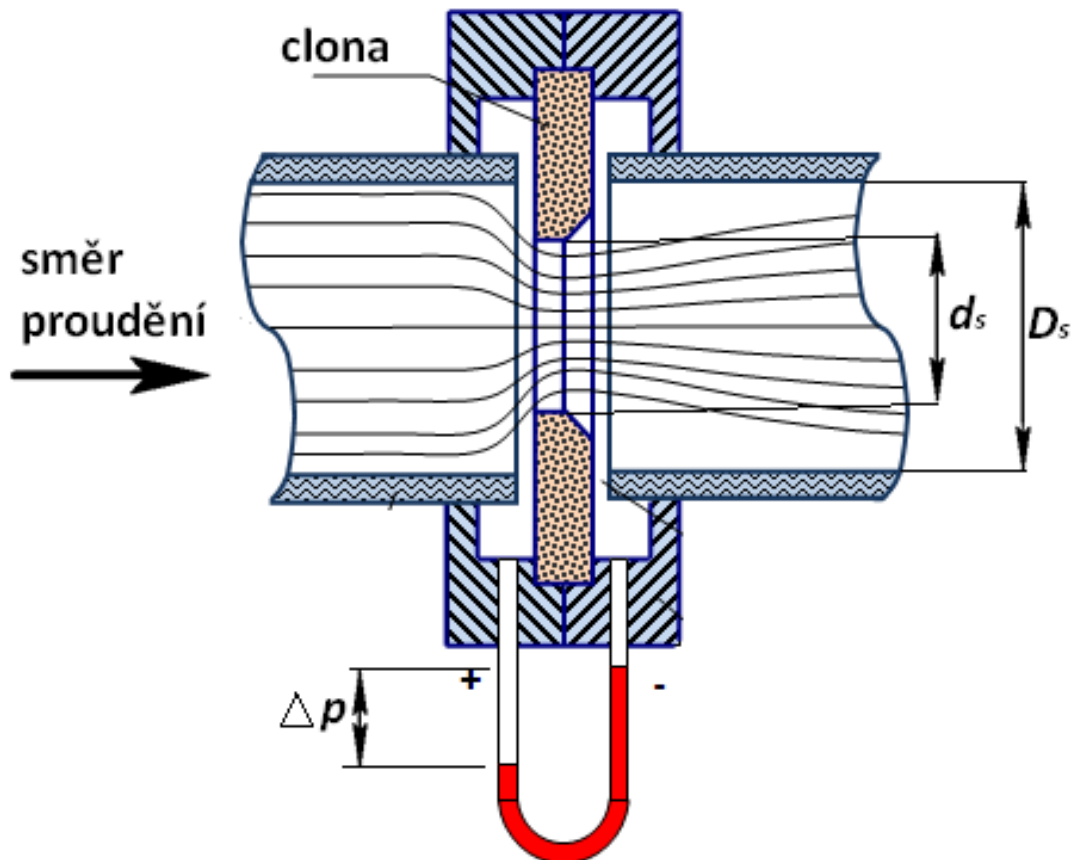
3.3.2 Měřicí přístroj používající clonu (orifice plate)

Měřicí přístroje Flow Bench používající clonu (obr. 11) jsou jedny z nejrozšířenějších. Tyto typy měřicích přístrojů jsou založeny na měření poklesu tlaku kalibrovaným otvorem se známými rozměry. Jejich výhodou je, že jsou málo náchylné na klimatické podmínky a

čistotu vzduchu. Měření objemového průtoku Q_V je založeno na měření tlaků v dostatečné vzdálenosti před a za clonou, tudíž nás opět zajímá diference tlaků Δp . Objemový průtok změřený pomocí clony je dán vztahem:

$$Q_V = C \cdot \varepsilon_s \cdot \left(\frac{d_s}{D_s}\right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad [3.4]$$

kde C je součinitel průtoku, ε_s expanzní součinitel, d_s průměr otvoru clony, D_s vnější průměr trubice ve které probíhá proudění, p_1 tlak před clonou a p_2 statický tlak (atmosférický) za clonou. [19]



Obr. 11 Použití clony (škrcení průtoku vzduchu) [20], vlastní úprava zpracování

3.3.3 Měřicí přístroj používající Venturiův průtokoměr

Měřicí přístroje, které používají pro výpočet rychlosti proudění Venturiův průtokoměr (obr. 12), který vychází opět z Bernoulliho rovnice [3.5] a rovnice kontinuity [3.6]. Princip je velice podobný jako u použití clony, rozdíl je však v měření tlaku v místě zúžení, namísto měření za zúžením. Matematickou úpravou rovnic [3.5] a [3.6] dostaneme výraz [3.7], podle kterého se určí rychlost proudění vzduchu v_1 .

Bernoulliho rovnice:

$$\frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + p = konst, \quad [3.5]$$

kde p je statický tlak v proudící kapalině.

Rovnice kontinuity:

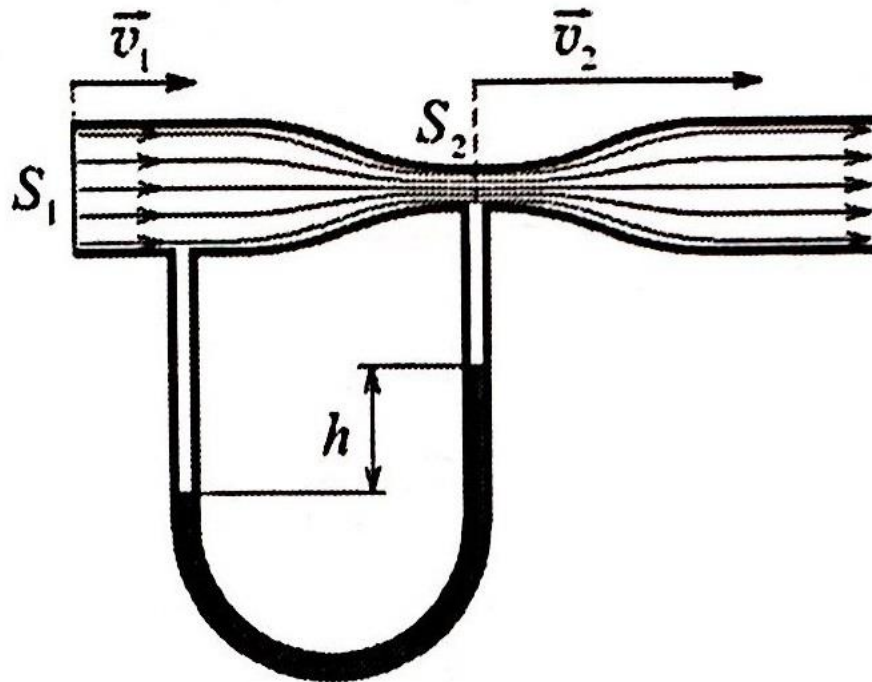
$$S \cdot v = konst, \quad [3.6]$$

kde S je protákaný plošný průřez. Z těchto dvou rovnic po úpravách dostáváme výraz pro rychlost v_1 v plošném průřezu S_1 před zúžením:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2S_2^2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot (S_1^2 - S_2^2)}}, \quad [3.7]$$

kde p_1 je tlak vzduchu před zúžením, p_2 tlak v místě zúžení, S_1 plošný průřez před zúžením a S_2 plošný průřez v místě zúžení. [4]

Venturiho průtokoměry používané v měřicích přístrojích Flow Bench jsou velice přesné přístroje. Jejich nevýhodou je, že jsou velice náchylné na čistotu protékaného vzduchu a jsou velice drahé. [5]



Obr. 12 Venturiův průtokoměr [4]

3.4 Základní teorie proudění

Pro úplný začátek lze obecně určit, co je pro proudění vzduchu žádoucí a čeho se snažíme vyvarovat. To jsem shrnul do jednotlivých bodů níže.

Co není žádoucí:

- aby proudění vzduchu sacím kanálem prudce měnilo směr
- aby se prudce měnil (větší, menší) plošný průřez kanálu S , nebo cesty, kudy proudí vzduch
- ostré hrany v místech vstupu a výstupu proudění vzduchu jako jsou například při testování hlavy válců motoru vstupy kanálů a ostré hrany ventilových sedel.

Co je žádoucí:

- velmi pozvolné změny ve směru proudění vzduchu
- velmi pozvolné změny (větší menší) plošného průřezu S (tvar megafonu s malým rozdílem úhlů)

- používání pomůcek při testování na měřicím přístroji jako jsou zaoblené vstupy sacích kanálů a použití simulátoru výfukového potrubí při testování výfukových kanálů. [5]

3.5 Pomůcky a nástroje používané při měření průtoku vzduchu

3.5.1 Simulátor válce v bloku motoru a vstupní zaoblená vodítka

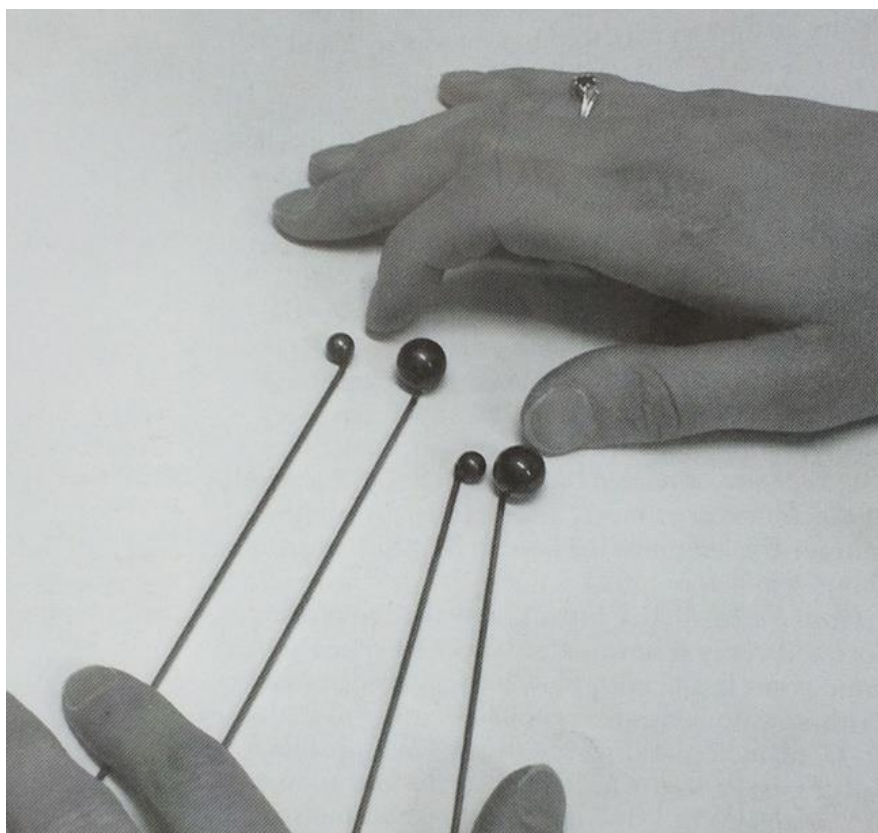
Pro nasimulování reálných podmínek při měření průtoku vzduchu hlavou válců motoru je nezbytné používat simulátor válce v bloku motoru (obr. 13), na který se připevní testovaná hlava válců. Simulátor válce by měl mít průměr s přesností $\pm 0,076$ mm průměru válce v bloku motoru a jeho délka by měla být nejméně 10 cm. Vhodný materiál pro jeho výrobu je např. průhledné plexisklo, protože skrz něj je možné pozorovat různé pomůcky používané při měření. Vstupní zaoblená vodítka (obr. 13) zajišťují hladký přístup proudění vzduchu do sacího kanálu a slouží ke snížení tzv. okrajového efektu na přírubě kanálu, kam je jinak připevněno sání motoru. [9]



Obr. 13 Hlava válců připevněná na simulátor válce a zaoblené vodítka na testovaném sacím kanálu [21]

3.5.2 Průtokové kuličky

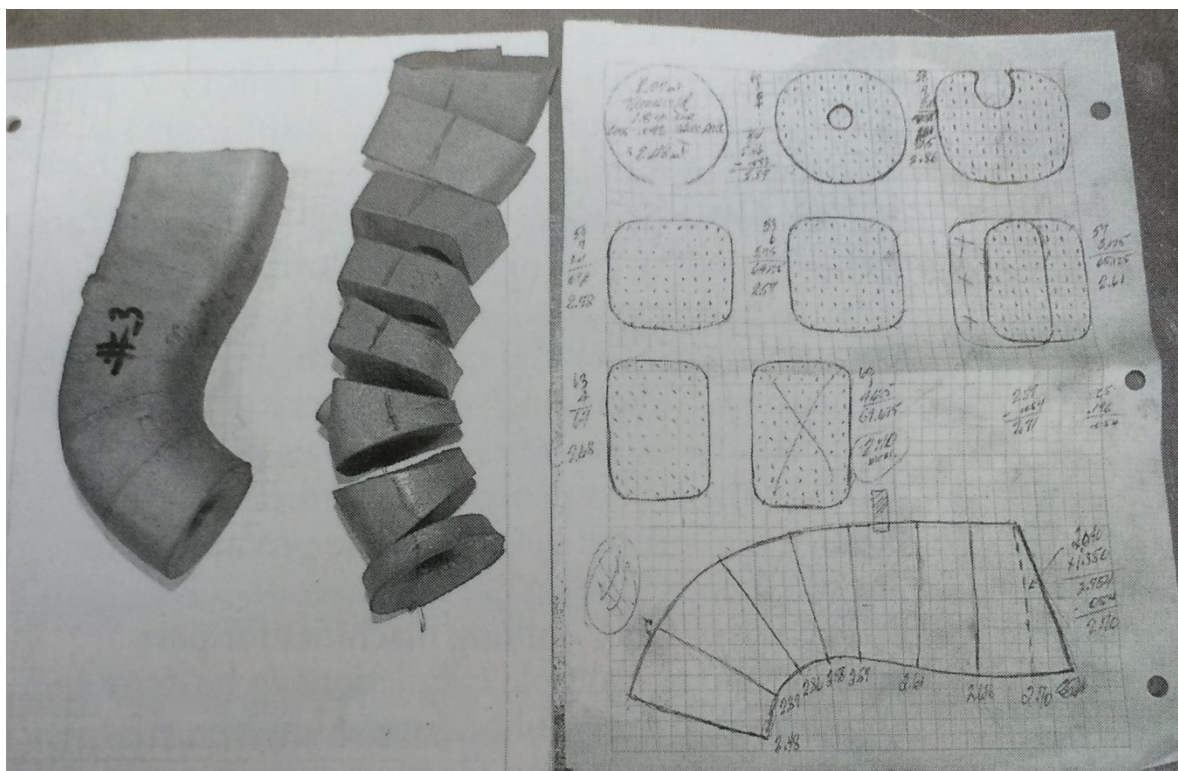
Jedná se o navařená kuličková ložiska různých průměrů na svařovací drát (obr. 14) o průměru alespoň 1,6 mm a 30 cm dlouhý. Kuličky mají průměr od 3,2 mm až po 12,7 mm s rozestupem 1,6 mm. Pomocí průtokových kuliček je možné lokalizovat odtržení proudu vzduchu od povrchu v problémových částech výfukových i sacích kanálů, kde se odtržením proudu od povrchu výrazně zvýší odpor proudění. S pomocí těchto kuliček se problémová část kanálu může upravit tak, aby k odtržení proudu nedocházelo. Použití průtokových kuliček vyžaduje mnohaletou praxi a zkušenost. Obecně lze ale říci, že jemným pohybem průtokové kuličky zkoumáme celý plošný průřez kanálu v konkrétním místě a hledáme tzv. mrtvá místa, kde vlivem nežádoucích jevů popsaných v odstavci 3.4 dochází k odtržení proudu vzduchu a průtoková kulička zde nenarušuje proudění vzduchu. V případě, že průtoková kulička narušuje průtok vzduchu, přenášejí se vibrace svařecím drátem do naší ruky a tím jsme schopni cítit proudění vzduchu i když ho nevidíme. Ideální kanál je takový, kde v každém místě kanálu narušuje nejmenší možná kulička proudění vzduchu. [22]



Obr. 14 Různé velikosti průtokových kuliček [5]

3.5.3 Tuhnoucí modelovací guma a netuhnoucí modelovací hmota

Tuhnoucí modelovací guma a čtverečkový papír je ideální pomůcka pro výpočet plošného průřezu uvnitř kanálu, kam je velice obtížné dostat se jakýmkoliv měřicím přístrojem. Guma se po ztuhnutí uvnitř kanálu vyjme a přiloží na čtverečkový papír, kam je možné obkreslit její obvod a tím zjistit velikost plošného průřezu a teoretickou rychlost proudění uvnitř kanálu. Tímto způsobem lze postupně vytvarovat celý kanál (obr 15.). Netuhnoucí modelovací hmota zase může být využita na změnu tvaru kanálu a následným změřením průtoku vzduchu, dříve než bude ubrán (např. vyfrézováním) nebo přidán (vyvařením) materiál. [5]



Obr. 15 Modelovací guma ve tvaru kanálu a překreslení na čtverečkový papír [5]

3.5.4 Průtokové hůlky a další pomůcky

Velice jednoduchými nástroji, které jsou určeny pro vizualizaci proudění vzduchu při testování, jsou tzv. průtokové hůlky. Jsou vyrobeny ze svařovacího drátu (o stejné šířce a tloušťce jako u použití průtokových kuliček) a z krátkého nylonového provázku, který je uvázan na konci. Délka provázku může být od 10 mm do 13 mm. Tímto jednoduchým

nástrojem lze určit směr proudění vzduchu, nebo kde máme měřit rychlost proudění pomocí ruční pitot-statické trubice. Jsou ale užitečné i k určení laminárního nebo turbulentního proudění, které je možné průtokovou hůlkou názorně lokalizovat. [23]

Existují samozřejmě i další pomůcky při práci s Flow Bench jako jsou např. ruční pitot statické trubice pro určení rychlosti v konkrétním místě sacího nebo výfukového kanálu. Princip jejich funkce je shrnut v odstavci 3.3.1. Velice důležitý nástroj je také zařízení měřící zdvih ventilu (obr. 13) a zařízení, které zdvih ventilu mění. Zdvih ventilu měníme v průběhu testu a sledujeme naměřená data průtoku vzduchu. Nejvhodnější měřicí přístroj pro tuto funkci je hodinkový mikrometr, který poskytuje velice přesná data. [21]

3.6 Stanovené normy pro testování průtoku vzduchu

Oficiálně doposud nejsou stanovené pevné normy pro testování průtoku vzduchu měřicím přístrojem Flow Bench, které musejí být dodržovány všemi, kdo chtějí měřit průtok vzduchu. Z toho důvodu jsou mnohaletou praxí stanoveny alespoň obecná pravidla a zásady při používání měřicího přístroje Flow Bench, aby bylo možné porovnávat naměřená data s ostatními, které jsou shrnuty níže do jednotlivých bodů.

Nejdříve je ale nutné stanovit dva různé způsoby naměřených hodnot:

- a) Naměření surových dat (neupravených) s poznámkami místních atmosférických podmínek (tlak, teplota).
- b) Naměření upravených dat ke standardní mezinárodní atmosféře (MSA).

Obecná pravidla při používání měřicího přístroje Flow Bench:

1. Naměřené hodnoty CFM by měli být naměřeny při testovacím tlaku 70 mbar ($28 \text{ in. } H_2O$). Při použití jiného testovacího tlaku by měli být hodnoty CFM přepočítány na hodnoty testovacího tlaku 70 mbar ($28 \text{ in. } H_2O$).
2. U všech testovaných vstupů sacího kanálu je nutné použití vstupního zaobleného vodítka, které by nemělo mít menší poloměr než 1,9 cm.
3. U všech testovaných výstupů výfukového kanálu je nutné použití simulátorů výfukového potrubí, které musí mít délku alespoň 20,5 cm.

4. Musí být použit simulátor válce v bloku motoru, jehož parametry jsou uvedeny v odstavci 3.5.1.
5. Testovaná hlava válců musí být upevněna přesně na střed simulátoru válce.
6. Test průtoku vzduchu musí probíhat se zapalovacími svíčkami našroubovanými v hlavě válců.
7. Průměr ventilů a dřívků musí být zaznamenán.
8. Zdvih ventilu by měl být měřen kalibrovaným měřicím přístrojem (např. mikrometrem) po 1 mm.
9. Měřicí přístroj air Flow Bench by měl být správně kalibrován. Zvolená metoda kalibrace by měla být poznamenána. [24]

3.7 Kalibrační normy

Kalibrace měřicího přístroje je důležitá pro uživatele, kteří chtějí svá naměřená data porovnávat s ostatními. Pro měření jsou důležité dva parametry. Schopnost měřicího přístroje opakovat měření s podobnými hodnotami a samotná přesnost měření. Opakovatelnost je důležitější než přesnost a je dána kvalitou měřicího přístroje. Přesnost je možné zlepšit kalibrací a je též závislá na kvalitě měřicího přístroje. [9]

Nicméně ve spojených státech, odkud měřicí přístroj Flow Bench pochází, existují celkem tři organizace poskytující kalibraci měřicího přístroje. Jsou to: National Institute for Standards and Technology (NIST), American Society of Mechanical Engineers (ASME) a Society of Automotive Engineers (SAE). Kalibrace jednoho měřicího přístroje organizací NIST vyjde v přepočtu zhruba na 120 000,- Kč (4 700\$). NIST zaručuje přesnost měřicího přístroje po kalibraci s přesností +/- 0,02-0,13%. Je nutné si uvědomit, že pokud máme měřicí přístroj využívající pro měření průtoku vzduchu clonu, cena 4 700\$ je pouze pro kalibraci jedné clony, a těch je pro různé měření potřeba samozřejmě více než jedna. Certifikace organizací NIST je oficiální. Existují ale samozřejmě i dostupnější způsoby kalibrace, které nabízí organizace ASME. ASME nabízí stanovené certifikované otvory (obr. 15) velice podobné clonám, které slouží ke kalibraci měřicího přístroje Flow Bench. Pro kalibraci plného rozsahu měřených hodnot je zapotřebí více rozměrů certifikovaných otvorů organizací ASME. Ke každému certifikovanému otvoru se udává přesnost měřicího

přístroje po kalibraci a metody použití těchto otvorů s podmínkami testovacího tlaku. Pro zajímavost objemový průtok Q_v skrz certifikovaný průměr se spočítá ze vztahu [3.4]. [5]



Obr. 16 Kalibrace měřicího přístroje Flow Bench pomocí certifikovaného kalibračního otvoru.

3.8 Porovnání jednotek CFM v závislosti na testovacím tlaku

Porovnání naměřeného průtoku vzduchu v krychlových stopách za minutu při různém testovacím tlaku je důležité pro uživatele, kteří nemají např. dostatečně výkonný elektromotor, který by generoval potřebný podtlak (testovací tlak) a chtějí svá naměřená data porovnávat s ostatními. Praktické využití má tento převod jednotek i pro převedení CFM při jakémkoliv testovacím tlaku do jednotek standardního testovacího tlaku 70 mbar (28 in. H_2O). Samozřejmě po převedení už data nemohou být tak přesná, protože při vyšším nebo nižším testovacím tlaku se proudění vzduchu nechová stále stejně. Proto není vhodné převádět hodnoty CFM příliš rozdílných testovacích tlaků. [9]

Pro převod jednotek slouží převodní tabulky, které vycházejí z tohoto vzorce:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{P_p}{P_o}\right)} \cdot q, \quad [3.8]$$

kde Q je převedený objemový průtok v jednotkách CFM, P_o je původní testovací tlak použitý při měření objemového průtoku q a P_p je převedený testovací tlak pro porovnání. [5]

3.9 Testování hlavy válců

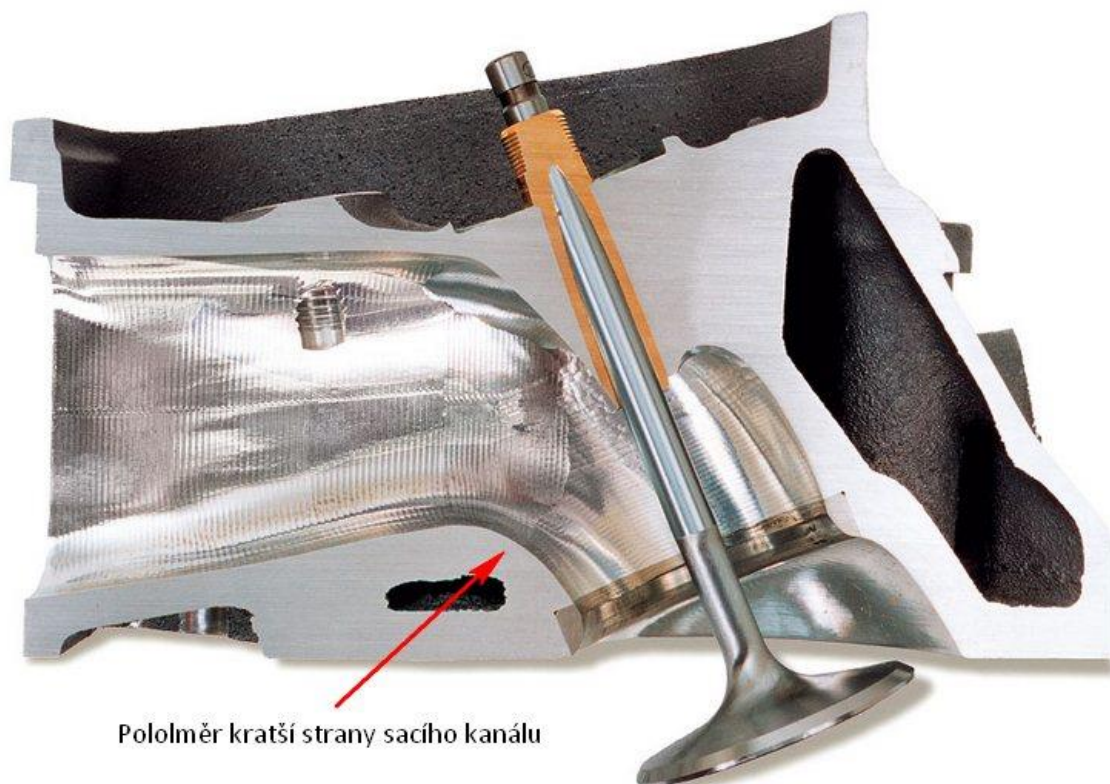
Je důležité vědět, že pro dobré proudění vzduchu je tvar uvnitř kanálu mnohem důležitější než jeho povrchová úprava nebo velikost plošného průřezu. Dobře tvarovaný kanál bude mít i mnohem hladší a čistší zvuk než špatně tvarovaný kanál, kde jsou v některých případech slyšet nepřírozené zvuky, které napovídají pravděpodobně k odtržení mezní vrstvy v některém místě kanálu. Takovéto proudění se nazývá bistabilní a je nežádoucí. Bistabilní proudění je nutné vhodnou úpravou odstranit. V takovém případě je rozumné nejdříve použít netuhnoucí modelovací hmotu a v daném místě kanálu zkusit změnit tvar kanálu, než se na prvním místě rozhodnout pro obráběcí nástroj a ubrat v některém místě materiál. Faktem je, že tvar kanálů ze sériové výroby zdaleka nemusí být výsledkem dobrých hodnot objemového průtoku a je ve většině případů dán výrobními nebo slévárenskými kompromisy a cenou výroby. Testovat na měřicím přístroji a upravovat se dá jakákoliv hlava válců nehledě na značku firmy, která ji nechala vyrobit. Důvod testování hlavy válců je dán podmětem ke zlepšení aerodynamických vlastností testovaného komponentu a téměř vždy je co zlepšovat. Je prokazatelné, že leštění kanálů má smysl jen do určité míry. Moderní trend u některých kanálů je naopak vytvoření nerovností (obr. 17) uvnitř kanálů pomocí CNC strojů (připomínající povrch golfového míčku) pro lepší udržení mezní vrstvy. Samotné testování hlavy válců probíhá tak, že naměřené hodnoty CFM se zapisují s měnícím se zdvihem ventilu. Výsledkem je průtoková křivka. [25] [26]



Obr. 17 Hlava válců LT1, Chevrolet 2014 – upravený sací kanál [26]

3.10 Tvar sacího kanálu hlavy válců

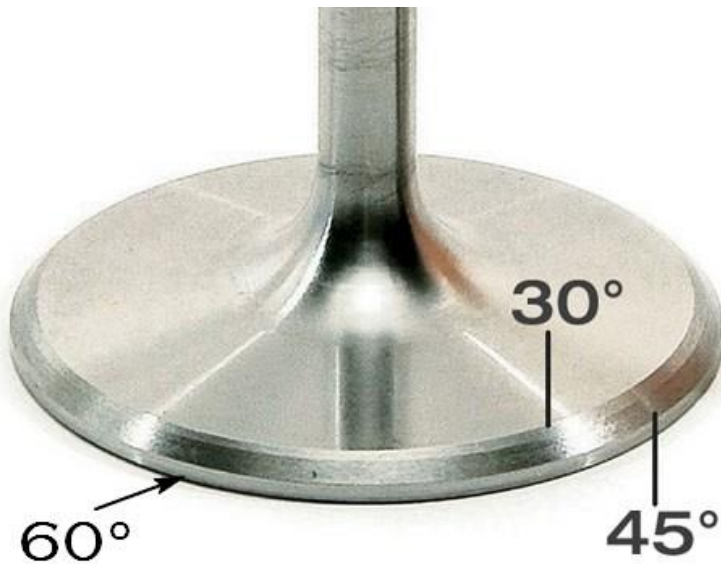
Tvar vstupu sacího kanálu může být jakýkoliv, ale nejvíce používaný je obdélníkový tvar se zaoblenými rohy, kde delší bývá vertikální strana obdélníku (vstup má delší výšku než šířku). Velmi důležitá část sacího kanálu je tam, kde se začíná sací kanál ohýbat směrem do spalovací komory. Tato část se nazývá poloměr kratší strany sacího kanálu (obr. 18) a bývá velmi náchylná k odtržení mezní vrstvy. Ideální sací kanály jsou takové, které mají tento ohyb co nejmenší a jsou v rámci konstrukčních možností narovnané až do ústí spalovací komory. U běžných hlav válců je z hlediska velkých kompromisů běžné, že v oblasti poloměru kratší strany sacího kanálu dochází vlivem prudkého ohybu k odtržení mezní vrstvy a právě zde je vhodné poloměr kratší strany sacího kanálu upravit tak, aby k odtržení nedocházelo, a tím je možné zvýšit průtokový objem sacím kanálem. Další kritické místo kde dochází k velkým výstupním ztrátám prodění vzduchu, je výstup proudu vzduchu ze sacího kanálu do spalovací komory. Postupná změna průřezu vede k menším výstupním ztrátám než náhlá změna průřezu. Z toho důvodu se věnuje tolik úsilí optimálnímu tvarování ventilových sedel, ventilů a spalovací komory. [5]



Obr. 18 Poloměr kratší strany sacího kanálu [27]

3.11 Velikost a tvary ventilů

Kvalitní ventil má 3 úhly zkosení (obr. 19), pokud ne, nejedná se o kvalitní firmu, která tyto ventily nabízí. Tři úhly zkosení musí zahrnovat i ventilové sedlo. Na ventilu se rozlišuje vrchní řez ten má úhel od 15° do 30° , sedlový řez v úhlu 45° nebo 46° a spodní řez pod úhlem 60° . Tvar a velikost ventilů má podstatný vliv na proudění vzduchu kolem nich. Nejlepší způsob jak najít vhodný tvar je testování na měřicím přístroji Flow Bench. Průměr ventilu by měl být podstatně větší než průměr ventilového sedla, aby bylo možné tvar ventilu upravit tak, aby byly minimalizovány výstupní ztráty. Např. pro průměr sedla 50 mm, by měl být použit ventil o průměru minimálně 52,6 mm. Větší průměry ventilů mají menší výstupní ztráty a pro menší hmotnost jsou vyráběny z titanu, mají však své výhody a nevýhody. Jejich výhodou je, že při malém zdvihu může být dosaženo až o 10% lepšího průtoku vzduchu. Mezi nevýhody patří vyšší váha oproti menším ventilům a cena. [9]



Obr. 19 Tři úhly zkosení dosedací plochy ventilu [28]

3.12 Tvary ventilových sedel

Tvar ventilových sedel může být upraven stejně jako u ventilů pro optimalizaci průtoku vzduchu. Při malém zdvihu ventilu má vliv tvar ventilu a styčná plocha sedla na průtok vzduchu a se vzrůstajícím zdvihem se tento vliv mění. Z toho důvodu musí být zvolen určitý kompromis při volbě tvaru sedla ventilu. Obvyklý je i zaoblený tvar sedla ventilu. Velmi důležitý parametr je koncentricita ventilového sedla s vodítkem ventilu a nesmí být větší než 0,025 mm až 0,040 mm včetně vůle mezi dříkem a ventilovým vodítkem. Pokud bude koncentricita větší než udaná mez, hrozí poškození ventilu a tím i celého motoru. [9]

3.13 Poměr průtoků plynu sání a výfuku

Poměr průtoků sání a výfuku není pevně stanoven, nicméně dobře upravené hlavy válců mají průtok výfukových plynů 60% až 75% (1,66-1,43:1) průtoku sání. Méně zkušení úpravci hlav rádi pracují na zlepšení průtoku plynů výfukovým kanálem, protože je zde podstatně jednodušší úprava, než tomu bývá u sacích kanálů. [5]

3.14 Úpravy hlav válců motoru

V dnešní době hliníkových hlav válců je možné pro velké úpravy hlav vyvařit celé spalovací komory (obr. 20) a kanály dle potřeby. Po vyvaření se materiál opracuje pomocí CNC stroje, což je velmi časově výhodné při velké produkci, nebo pomocí obráběcích nástrojů. Na takovéto velké úpravy je nutná mnohaletá zkušenost a praxe a nemůže být prováděna někým, kdo chce pouze vidět létat třísky. Důležitý je tvar, ne velikost kanálu. [5]



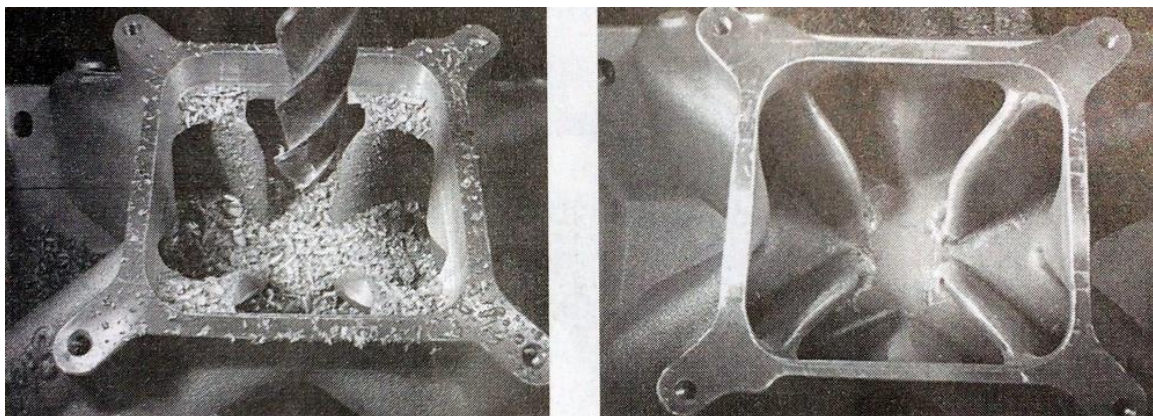
Obr. 20 Vyvařené spalovací komory před obráběním na CNC stroji [29]

Je důležité zmínit, že existují měřicí přístroje Flow Bench, které dokážou simulovat proudění směsi vzduchu a paliva. V sacím kanálu mohou být taková místa, kde se kapky paliva oddělí od proudu vzduchu a zůstávají na stěnách sacího kanálu. To je možné pozorovat pomocí barviva v použité tekutině v průběhu i při testu a nepatrnými změnami lze tyto oblasti zmenšit či úplně odstranit pro lepší hoření paliva. [5]

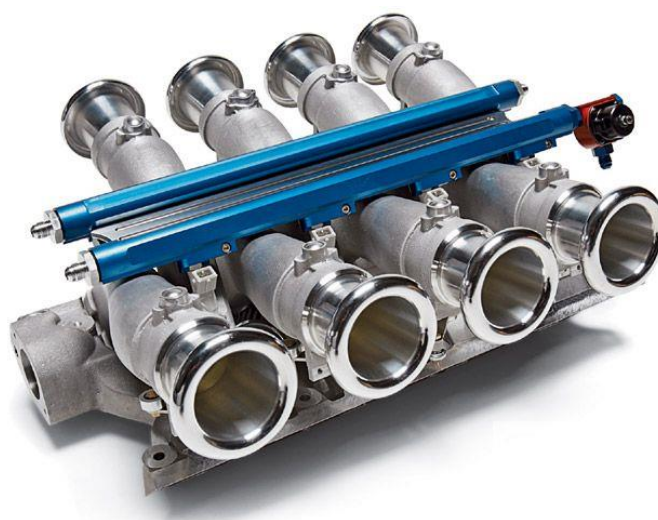
3.15 Testování a úpravy sacího potrubí motoru

Testování běžného sacího potrubí s jedinou objemovou komorou je velice náročné z důvodu simulace stejného proudění vzduchu ve všech potrubích, ze kterých se sací potrubí skládá. Ve většině případů je sací potrubí navrženo z mnoha odlévacích kompromisů na úkor proudění vzduchu a není neobvyklé, že sériové sání snižuje průtok vzduchu až o 15% a více. Vhodná úprava tyto ztráty může snížit na pouhých 5%. Testování

sacího potrubí na měřicím přístroji Flow Bench je ideální provádět při namontovaném sacím potrubí k hlavě válců. Při testování sacího potrubí je nutné zadělat např. páskou nebo zavřením sacích ventilů v hlavě válců ty sací potrubí, které nejsou při testování využívány pro daný válec. Velice žádoucí je, aby bylo dosaženo stejného průtoku vzduchu pro všechny sací potrubí pro daný válec. Obvyklé je, že po provedení úpravy sacího potrubí se stále liší naměřené hodnoty průtoku vzduchu pro jednotlivé válce o 10% a více. Žádoucí je snížit tyto odchylky na 3% a méně, což může být velice problematické. Úpravy sacího potrubí mohou být různé. V zásadě se dá upravovat délka a průměr sacího potrubí nebo tvar a velikost společné objemové komory vyvařením (obr. 21) a následným opracováním, nebo vytvořením zcela nové objemové komory. Nejlepších výsledků je však možno dosáhnout víceklapkovým sáním s klapkou pro každý válec zvlášť. (obr. 22) [24]



Obr. 21 Změna tvaru vyvařené objemové komory sacího potrubí [5]



Obr. 22 Víceklapkové sání s palivovým vstřikováním pro motory Chevrolet LS1 [30]

3.16 Délky a průměry sacího potrubí

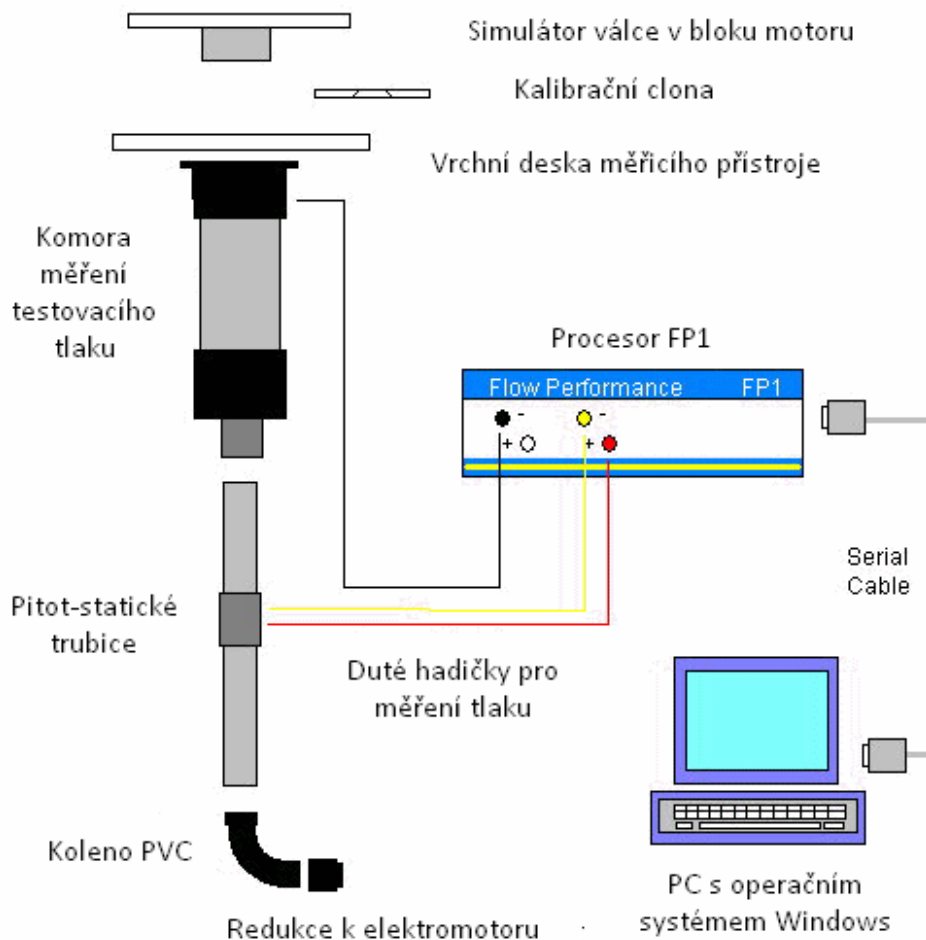
Délka a průměr sacích potrubí mají nezanedbatelný vliv na výkon motoru. Vhodnou délkou a průměrem sacího potrubí je možné měnit křivku krouticího momentu při určitých otáčkách motoru a tím optimalizovat průběh výkonu dle vlastních požadavků. Náhlou změnou, kdy se sací ventily otevřou nebo zavřou, se šíří rychlostí zvuku přetlaková nebo podtlaková vlna od hrany ventilového sedla sacím potrubím k ústí prudké změny objemu. U sání s jednou objemovou komorou je toto místo právě objemová komora a u víceklapkového sání je to konec zaobleného zakončení sacího kanálu. Zde se mění vlna z přetlakové na podtlakovou nebo naopak z podtlakové na přetlakovou. Cílem je vhodnou délkou sání zajistit, aby se přetlaková vlna vracela do otevřeného sacího kanálu a tím podpořila tzv. rezonanční přeplňování a podtlaková vlna aby se vrátila k zavřenému sacímu kanálu. Existuje řada výpočtů pro určení délky sání motoru, které se značně liší mezi sebou. Z toho důvodu zde nebudu žádný výpočet uvádět jako správný. Jisté však je, že pro různé otáčky motoru se bude optimální délka sacího potrubí měnit, z čehož vyplývá, že délka sání se volí pro otáčky motoru, které budou v rozmezí maximálního krouticího momentu a maximálního výkonu motoru. U letadlových pístových motorů to nebude více než $4500 \text{ ot. min}^{-1}$. Délka sacího potrubí musí být brána v úvahu s délkou sacího kanálu v hlavě válců, protože podtlaková vlna se šíří od hrany ventilového sedla. [5]

4 Naměřená data a jejich porovnání

Na závěr své bakalářské práce jsem provedl měření měřicím přístrojem Flow Bench od firmy Flow Performance, využívající k měření průtoku vzduchu pitot-statické trubice. Jako testovaný komponent byla použita aftermarketová hlava válců Small Block Chevy 190cc Street Head od firmy Airflow Research. Měření bylo provedeno po kalibraci měřicího přístroje pomocí clony s daným objemovým průtokem. Měření bylo pětikrát opakováno a výsledky zprůměrovány. Výsledky naměřených hodnot jsem uvedl do grafu.

4.1 Použitý měřicí přístroj Flow Bench

K měření byl použit měřicí přístroj zakoupený v USA od firmy Flow Performance, který bylo nejdříve nutné sestavit a zabudovat do nábytku. Tento měřicí přístroj využívá k měření rychlosti proudění pitot-statické trubice, které jsou připojeny na procesor FP1, který odesílá hodnoty CFM spolu s hodnotami testovacího tlaku do počítače. Podtlak potřebný k měření generuje elektromotor z průmyslového vysavače o výkonu 3,5 kW. Procesor FP1 převádí hodnoty CFM při jakémkoliv testovacím tlaku na hodnoty CFM při testovacím tlaku 70 mbar (28 in. H_2O), což je jednotka standardního testovacího tlaku. Na procesor FP1 je možné připojit i ruční pitot-statickou trubici pro měření rychlosti v jakémkoliv místě kanálu. Schéma použitého měřicího přístroje znázorňuje obr. 23. [11]



Obr. 23 Schéma měřicího přístroje Flow Bench od firmy Flow Performance [11], přeloženo z AJ

4.2 Naměřená data

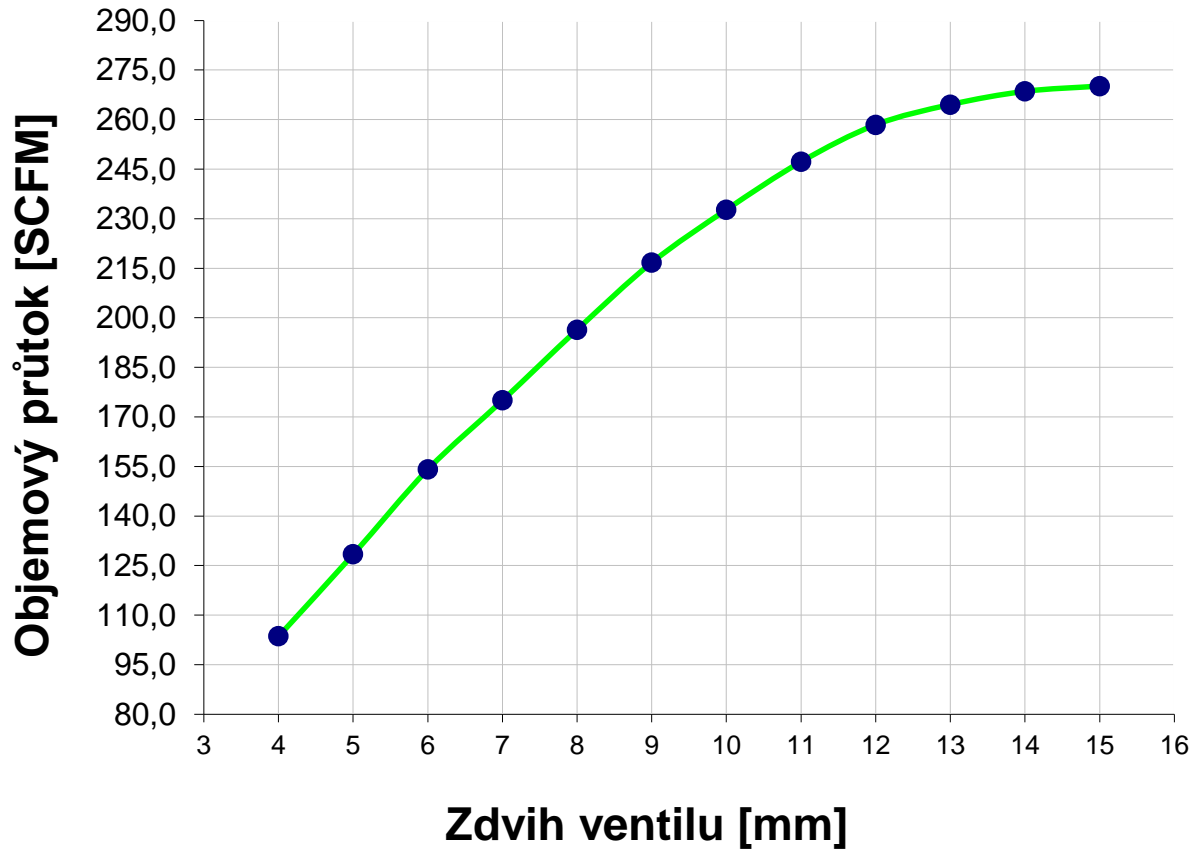
Naměřená data jsou uvedena do tab. 2 níže. Měření průtoku vzduchu bylo provedeno se simulátorem válce v bloku motoru o průměru 106 mm. a se vstupním zaobleným vodičkem z netuhnoucí modelovací hmoty. Měření bylo provedeno pouze sací kanál z důvodu velké komplikace přizpůsobení měřicího přístroje na měření výfuku. Uvedené hodnoty CFM jsou přepočítány ke standardnímu testovacímu tlaku 70 mbar ($28 \text{ in. } H_2O$) a zaznamenány jsou i skutečné hodnoty použitého testovacího tlaku a zdvih sacího ventilu při měření průtoku vzduchu. Elektromotor nezahrnuje možnost regulace otáček, čímž jsou způsobeny vysoké hodnoty testovacího tlaku při malém zdvihu ventilu. Naměřené hodnoty CFM jsou opraveny na podmínky mezinárodní standardní atmosféry MSA při teplotě 15°C a tlaku 1013,25 hPa, tudíž jsou v tabulce naměřeny hodnoty SCFM (standard cubic feet per minute). Zdvih

ventilu byl měřen hodinkovým mikrometrem a pro zajímavost i rychlost proudění vzduchu uprostřed sacího kanálu ruční pitot-statickou sondou při maximálním zdvihu ventilu (obr. 24).

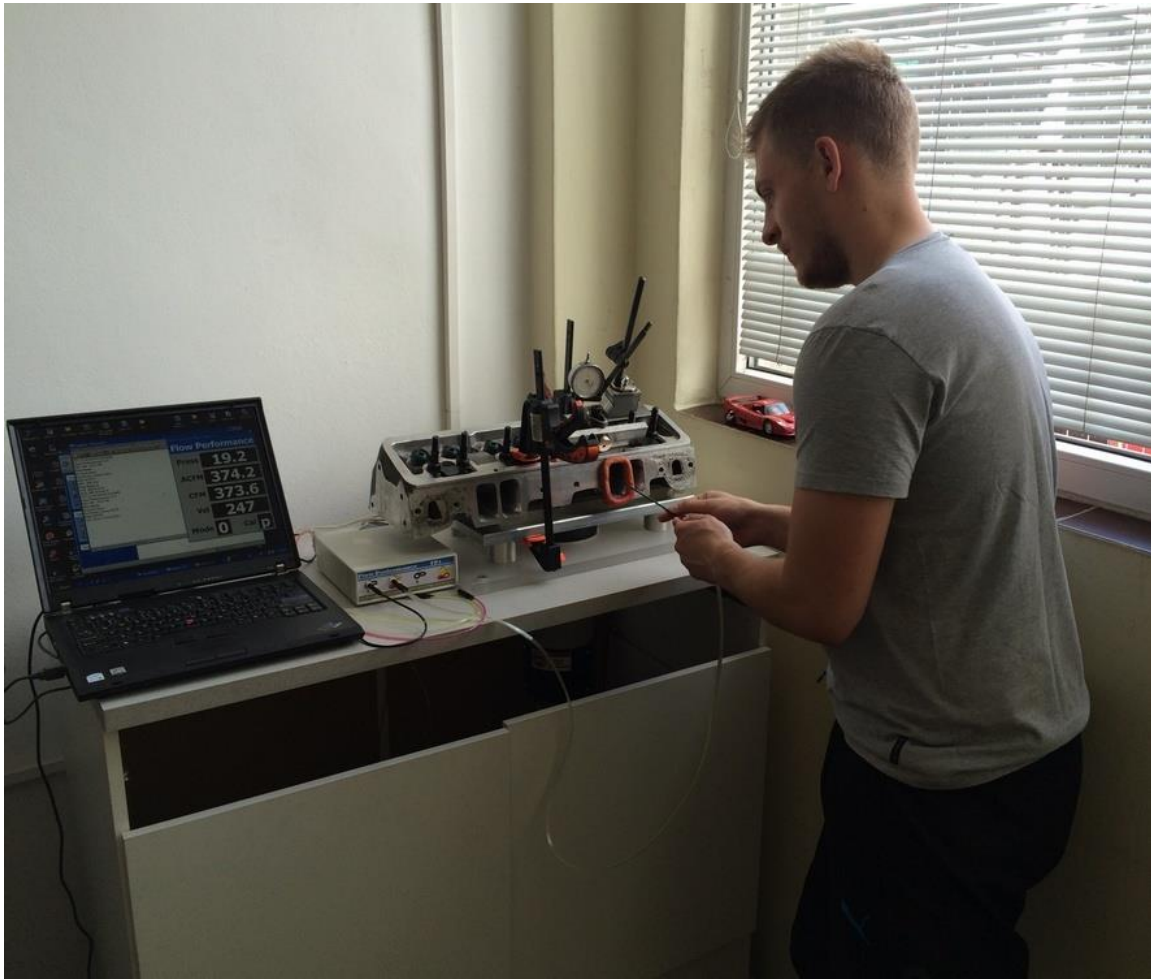
Zdvih ventilu [mm]	Testovací tlak [in. H ₂ O]	Objemový průtok [SCFM]
4	31,9	103,6
5	27,8	128,4
6	23,9	154,1
7	21,3	175,0
8	19,1	196,4
9	17,2	216,7
10	15,8	232,7
11	14,6	247,2
12	13,7	258,4
13	13,2	264,5
14	12,9	268,5
15	12,9	270,1

Tab. 2 Naměřené hodnoty na měřicím přístroji Flow Bench, vlastní zpracování

Small Block Chevy 190cc Street Head Airflow Research



Graf 1 Závislost objemového průtoku na zdvihu ventilu, vlastní zpracování



Obr. 24 Měření rychlosti proudění vzduchu v sacím kanálu

4.3 Porovnání dat

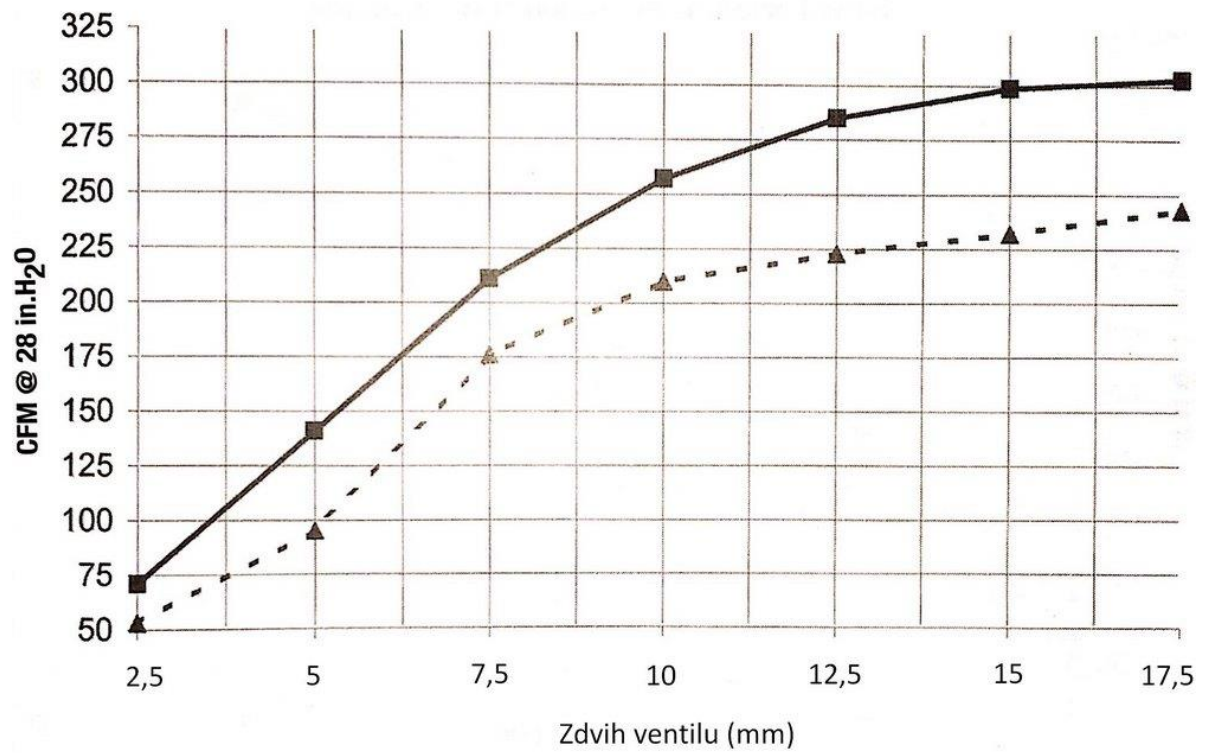
V mém případě mám možnost porovnat naměřené hodnoty průtoku vzduchu dle katalogových hodnot aftermarketového prodejce testované hlavy válců Airflow Research, kde se hodnoty liší pouze v rámci jednotek (viz. tabulka 3 níže). Testovanou hlavu válců nemá smysl dále upravovat, protože se již prodává jako upravená a kanály jsou obrobene pomocí stroje CNC. Není ani v mých možnostech jakoukoliv hlavu válců upravit a naměřit nová data pro porovnání před a po úpravě. Porovnání dat může být provedeno před a po úpravě anebo mezi různými úpravci hlav válců mezi sebou. Pro porovnání s testovanou hlavou, na které jsem provedl měření, uvádím naměřené hodnoty jiného aftermarketového výrobce hlavy válců Cheavy Small Block 10X od firmy Brodix (obr. 25). Plná čára znázorňuje objemový průtok sacího kanálu a přerušovaná čára výfukového kanálu. Hlava válců Brodix byla obrobena také pomocí CNC stroje, má však jinou velikost a tvar kanálů.

Zdvih ventilu [mm]	Objemový průtok – katalogová data [SCFM]	Objemový průtok – vlastní naměřená data [SCFM]
4	102	103,6
5	127	128,4
6	153	154,1
7	173	175,0
8	196	196,4
9	215	216,7
10	233	232,7
11	248	247,2
12	260	258,4
13	265	264,5
14	270	268,5
15	272	270,1

Tab. 3 Porovnání katalogových a naměřených dat [31], vlastní zpracování

Rozdílnost naměřených a katalogových dat je způsobena pravděpodobně odlišnými podmínkami měření a typem (a s tím související přesností) použitého měřicího přístroje Flow Bench. Přesnost měření je však v tomto měřítku více než dostačující.

CNC 23° Small Block Chevy 10X Brodix Head



Obr. 25 Graf závislosti objemového průtoku na zdvihu ventilu [5], přeloženo z aj

5 Aplikace naměřených hodnot

Je mnoho způsobů jak využít naměřená data. Jeden z nejjednodušších je pouhé porovnání před a po úpravě a sledovat jak se mění objemový průtok testovaným komponentem. Naměřená data ale mohou být využita i pro hrubou kalkulaci výkonu motoru na základě objemového průtoku, nebo při jakých otáčkách motoru bude mít pístový spalovací motor nejvyšší výkon. Další využití naměřených dat zcela určitě lze využít při výběru vhodného vačkového hřídele, nebo jako jeden z parametrů při počítačové simulaci (např. použití softwaru DYNAMOTION 5 Professional).

5.1 Výpočet otáček a výkonu na základě naměřených dat CFM

Výpočty odhadů maximálního výkonu při určitých otáčkách motoru, jsou založeny na mnohaleté zkušenosti motorářů a jsou překvapivě relativně přesné. Nicméně zaleží na mnoha aspektech výběru komponentů motoru a proto tyto výpočty slouží jen pro představu a odhad. Výpočet odhadovaného výkonu je dán vzorcem [5.1] a výpočet otáček při maximálním výkonu vztahem [5.2]. [5]

$$P = C_p \cdot Q \cdot i_v, \quad [5.1]$$

kde P je výkon motoru v koňských silách, C_p je koeficient výkonu, Q je objemový průtok v jednotkách CFM a i_v je počet válců. Koeficient výkonu je uveden v tabulce níže.

Testovací tlak [in. H ₂ O]	Koeficient výkonu C_p
3	0,787
5	0,608
10	0,430
15	0,350
20	0,304
20,4	0,301
25	0,272
28	0,257
30	0,248
35	0,230

40	0,215
45	0,203
50	0,192
55	0,183
60	0,176

Tab. 4 Koeficient výkonu k použitému testovacímu tlaku [5], vlastní zpracování

Výpočet pro otáčky maximálního výkonu P je dán vztahem:

$$n_p = \frac{C_n \cdot i_v \cdot Q}{V}, \quad [5.2]$$

Kde n_p jsou otáčky motoru při maximálním výkonu, C_n je koeficient otáček a V je zdvihový objem motoru v krychlových palcích. Koeficient otáček je udává tab. 5.

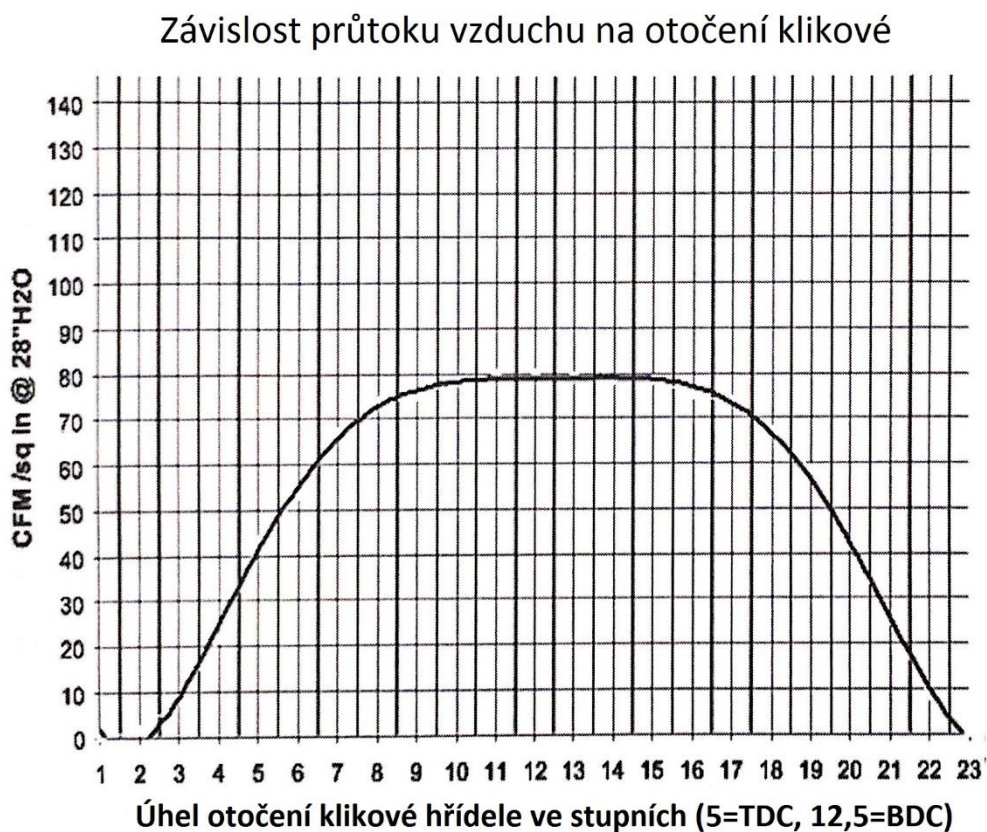
Testovací tlak [in. H_2O]	Koeficient otáček C_n
3	3453
5	2828
10	2000
15	1633
20	1414
20,4	1400
25	1265
28	1196
30	1155
35	1069
40	1000
45	943
50	894
55	853
60	817

Tab. 5 Koeficient otáček k použitému testovacímu tlaku [5], vlastní zpracování

5.2 Výběr vačkového hřídele na základě naměřených dat CFM

Ve většině případů je možné vybírat daný vačkový hřídel na základě rozsáhlých databází výrobců vačkových hřídelí pro konkrétní typ motoru. To však pro někoho nemusí být dostačující. Vačkový hřídel lze vybírat i na základě naměřených hodnot průtoku vzduchu

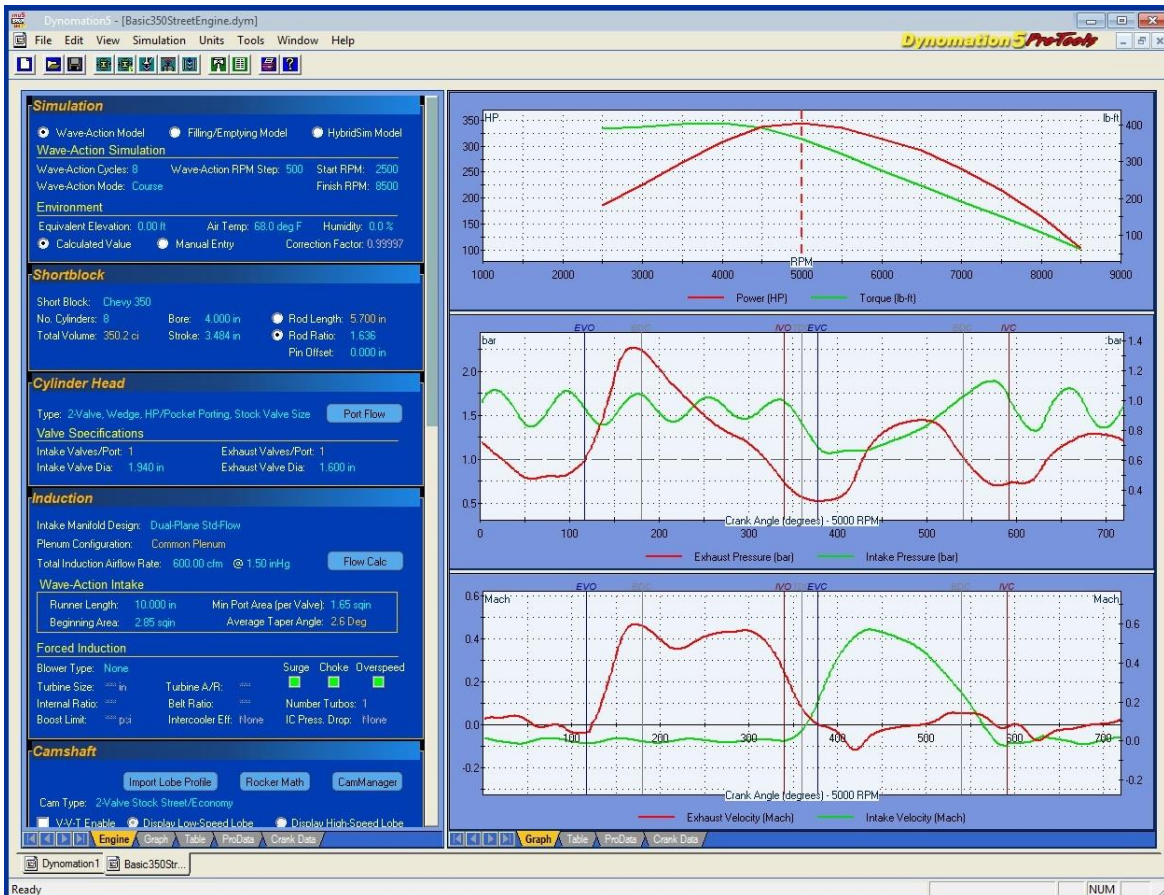
CFM vztaženým ke konkrétnímu plošnému průřezu 1 inch čtverečný. Na základě této hodnoty [$CFM/in.^2$] a úhlu otočení klikového hřídele lze klasifikovat sání motoru pomocí grafu (obr. 26). Z něho vyplývá součinitel C_v , který se vypočítá z plochy pod křivkou. Vyšší hodnota součinitele značí vyšší aerodynamickou kvalitu testované hlavy válců. Součinitel C_v testované hlavy válců se mění s rozdílným testovacím tlakem, proto je nutné zaznamenat, při jakém testovacím tlaku byla číselná hodnota součinitele C_v vypočítána, nebo rovnou převést na standardní testovací tlak 70 mbar [$28 in. H_2O$]. Nejdůležitější cyklus je načasování zavření sacího ventilu, kterým lze maximalizovat rezonanční přeplňování, které je v daných otáčkách motoru žádoucí. Časování zavírání a otevírání ventilů lze provádět pomocí úhlu natočení vačkového hřídele a jejím tvarem. Tvar vačkového hřídele se vybírá na základě otáček, objemu a průtoku vzduchu pístovým spalovacím motorem. [5]



Obr. 26 Graf závislosti průtoku vzduchu sacím kanálem na úhlu otočení klikové hřídele [5], přeloženo z AJ

5.3 Počítačové simulace

V dnešním moderním světě jsou stále více a více populární počítačové softwary, které jsou schopny předpovědět a simulovat nejrůznější výstupní data motoru. Tyto poskytnutá data počítačovým softwarem mohou dosahovat přesnosti $\pm 2\%$ až $\pm 10\%$. Záleží však především na kvalitě zadaných parametrů motoru, kterých je velké množství. Takovýchto počítačových softwarů je celá řada a není nic neobvyklého, že velmi dobré simulační softwary dosahují ceny stovek tisíců dolarů a pro normální uživatele jsou proto nedostupné. Existují ale i levnější, cenově dostupné simulační softwary, které lze používat na běžných počítačích a jedním z nich je např. Dynomation 5 Professional (obr. 27), který jsem měl možnost vyzkoušet v praxi. Do tohoto softwaru se zadají všechny parametry motoru, včetně naměřeného průtoku vzduchu pomocí měřicího přístroje Flow Bench a software vypočítá všechny výstupní hodnoty motoru včetně tlakových kmitů v sání a výfuku motoru. Úpravami parametrů motoru lze tyto hodnoty měnit a sledovat výsledné změny. Takovýto software může ušetřit při přesném zadání hodnot velmi mnoho vynaloženého času a peněz. Realita a skutečnost není vždy to samé a někdy může být velmi obtížné převést teorii do praxe. [9] [24]



Obr. 27 Ukázka výstupních dat motoru po zadání paramerů motoru do softwaru Dynomation 5 [24]

6 Závěr

V závěru mé bakalářské práce bych rád zhodnotil celkovou efektivitu práce s měřicím přístrojem Air Flow Bench pro letecký průmysl, časovou a ekonomickou náročnost a uvedu zde výhody a nevýhody, které jsem měl možnost zjistit při studiu dané problematiky.

Jsem přesvědčen, že využití měřicího přístroje Air Flow Bench v leteckém průmyslu je zcela oprávněné, navzdory tomu, že byl původně určen pro motory závodních automobilů. U leteckých pístových spalovacích motorů je výkon motoru oproti automobilům velmi omezen maximálními otáčkami motoru z důvodu maximálních otáček vrtule a životnosti motoru. Proto je nezbytné dosažení optimálního průběhu točivého momentu a výkonu jiným způsobem, než výběrem komponentů pro vysoké otáčky motoru jako je tomu v jiných odvětvích. Jedním z nich je právě možnost optimalizace proudění vzduchu sacími kanály a výfuk plynů výfukovými kanály v souvislosti s optimálními délkami sacího a výfukového potrubí a výběru náležitých komponentů jako je například výběr vačkového hřídele a tak dále. Nemá však smysl upravovat pouze jednu konkrétní věc, například hlavu válců motoru, která bude mít dobrá čísla objemového průtoku, ale je nezbytné upravit a sladit pístový spalovací motor jako celek, aby mohlo být dosaženo požadovaných výsledků na motorové brzdě.

Úpravy motoru na základě naměřených dat průtoku vzduchu jsou pro jednotlivce, kteří chtějí měřicí přístroj používat zcela jistě velmi časově náročné, což jsem si mohl sám při měření vyzkoušet a je potřeba praxe a mnoho měření, než bude dosaženo reálných výsledků, které by se dali považovat za dobré. Dříve bylo možné použití měřicích přístrojů Air Flow Bench pouze v továrních podmínkách z důvodu astronomických cen měřicích přístrojů a příslušenství při práci s nimi. Proto se mi velmi líbí, že v dnešní době už je možné toto měření provádět v podstatě v domácích podmínkách a malé měřicí přístroje Air Flow Bench jsou cenově dostupné pro běžné uživatele, kteří se chtějí touto problematikou zabývat, což byl také důvod pro realizaci této práce.

Nevýhoda použití měřicího přístroje oproti použití stále se rozrůstajících simulačních softwarů, je velká časová náročnost přípravy před samotným měřením a také fakt, že se

měření provádí (nebo převádí) pouze na jednu průměrnou hodnotu testovacího tlaku a to podtlaku při testování sání, nebo přetlaku při testování výfuku v pístovém spalovacím motoru, což může být oproti počítačové simulaci, kde je možné sledovat hodnoty tlaku v každém okamžiku poněkud zavádějící, protože se fyzika proudění plynů uvnitř motoru s proměnlivým diferenčním tlakem mění.

Výhodu měřicího přístroje Air Flow Bench vidím v tom, že je možné bez jakýchkoliv přesných parametrů motoru provést měření průtoku vzduchu a sledovat reálné hodnoty objemového průtoku, protože to u simulačního softwaru bez přesných hodnot není možné. Výhodou je také znatelná větší cenová dostupnost oproti profesionálním simulačním programům, které dokáží spočítat hodnoty průtoku vzduchu při zadání výchozích parametrů.

Nicméně do budoucna jsem přesvědčen o tom, že měřicí přístroje Air Flow Bench budou stále více a více nahrazovány postupem času dostupnějšími a přesnějšími počítačovými softwary.

Seznam použitých zdrojů

- [1] AUTOZNALOSTI.CZ (2015): *Výkon a krouticí moment* [Online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z <<http://www.autoznanosti.cz/index.php/motor/31-vykon-a-kroutici-moment.html>>.
- [2] VLK, F. (2003): *Vozidlové spalovací motory*. Brno, ISBN 80-238-8756-4
- [3] Firma PRO-BULL Motorsport (2010): Motor VW 2,0L. Materiál firmy.
- [4] MALÁ, Z., NOVÁKOVÁ, D., VÍTŮ, T. (2009): *Fyzika I*. Nakladatelství ČVUT Praha, ISBN 97 8-80-01-04220-5
- [5] BETTES, H. (2010): *Engine Airflow*.
- [6] MUSCLE CAR DIY (2015): *Camshaft math to design competitive performance engines*. [Online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z <<http://www.musclediy.com/performance/camshaft-math-design-competitive-performance-engines/>>.
- [7] MACKERLE, J. (1980). *Motory závodních automobilů*. Praha, DT 621.431.73:629.114.82
- [8] LETECKÝ ÚSTAV VUT V BRNĚ (2013): *Obecná aerodynamika*. [Online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z <<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>>.
- [9] VIZARD, D. (2012): *How to Port & Flow Test Cylinder Heads*.
- [10] AUTOBLOG.COM (2005): OHC vs. OHV - the definitive rant. [Online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z <<http://www.autoblog.com/2005/12/08/autoblog-feature-ohc-vs-ohv-the-definitive-rant/>>.
- [11] FLOW PERFORMANCE LLC (2006): *Instruction Manual*.
- [12] EPI INC. (2012): *Volumetric Efficiency and Engine Airflow*. [Online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z <http://www.epi-eng.com/piston_engine_technology/volumetric_efficiency.htm>.
- [13] HROMÁDKO, J. (2010): *Přednáška č. 1 – Spalovací motor jako zdroj energie*. Prezentace PowerPoint.

- [14] THE FREE DICTIONARY (2005): *Friction horsepower*. [Online]. [cit.2015-05-10]. Dostupné z <<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/friction+horsepower>>.
- [15] PLINT, M., MARTYR, A. (1995): *Engine Testing Theory and Practice*.
- [16] FYI DESIGN DEPARTMENT (2009): *1968 Ford GT40*. [Online]. [cit.2015-05-11]. Dostupné z <<http://fyidesigndept.com/car-design/1968-ford-gt40>>.
- [17] EN.WIKIPEDIA. (2015): *Air Flow Bench*. [Online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z <http://en.wikipedia.org/wiki/Air_flow_bench>.
- [18] JANDORA, R. (2006): *Hydrodynamika*. [Online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z <<http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm>>.
- [19] HNILIČKOVÁ, V. (2010): *Měření průtoků plynů*. VUT v Brně, bakalářská práce.
- [20] EN.WIKIPEDIA. (2015): *Venturi effect*. [Online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z <http://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_effect>.
- [21] CORVETTE FORUM (2013): *American Heritage LS7 Cylinder Heads*. [Online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z <<http://www.corvetteforum.com/forums/c6-z06-discussion/3528584-american-heritage-ls7-cylinder-heads-pics-and-data.html>>.
- [22] THORPEDEV.COM (2013): *Flow balls*. [Online]. [cit.2015-05-24]. Dostupné z <<http://www.thorpedev.com/flow-balls.html>>.
- [23] THORPEDEV.COM (2013): *Flow wand*. [Online]. [cit.2015-05-24]. Dostupné z <<http://www.thorpedev.com/flow-wand.html>>.
- [24] DYNOMATION 5 PROFESSIONAL MOTION SOFTWARE (2009): *Instruction manual*.
- [25] STINGRAYFORUMS.COM (2013): *LT1 Heads ported for 19% increase*. [Online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z <<http://www.stingrayforums.com/forum/stingray-corvette-performance/2257-lt1-heads-ported-19-increase.html>>.
- [26] SPERRY, K. (1989): *Engine Airflow Development Guide for Combustion Air Handling Devices*.
- [27] HOT ROD ENGINE TECH (2012): *Port Pointers*. [Online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z <<http://hotrodenginetech.com/porting-pointers/>>.
- [28] JOHN MAHER RACING: *The importance of 3 angle valve job*. [Online]. [cit. 2015-06-01]. Dostupné z <<http://johnmaherracing.com/tech-talk/3-angle-valve-job/>>.

[29] ENDYN (2011): *Fabrication*. [Online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z <<http://www.theoldone.com/Facility/index.htm>>.

[30] HOMEBUILT AIRPLANES: *LS1 Engine for Aircraft?* [Online]. [cit. z 2015-06-05]. Dostupné z <<http://www.homebuilairplanes.com/forums/chevy/3681-ls1-engine-aircraft-6.html>>.

[31] AIRFLOW RESEARCH (2003): *Master Catalog and Technical Guide*.