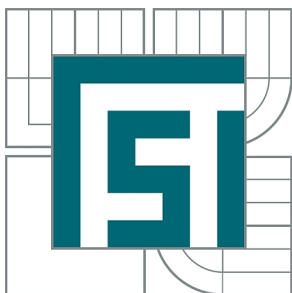


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZKUŠEBNÍ STANOVIŠTĚ PRO ZKOUŠENÍ TURBODMYCHADEL

TURBOCHARGER TEST STAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. FILIP ŠEBESTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID SVÍDA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Filip Šebesta

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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 diplomové práce:

Zkušební stanoviště pro zkoušení turbodmychadel

v anglickém jazyce:

Turbocharger Test Stand

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proved'te konstrukční návrh zkušebního stanoviště pro stanovení základní charakteristiky turbodmychadla.

Cíle diplomové práce:

1. Proved'te dostupnou rešerši zkušebních stanovišť pro zkoušení turbodmychadel.
2. Proved'te konstrukční návrh stanoviště.
3. Navrhněte a sestavte měřicí stanoviště včetně obslužného programového vybavení.
4. Navrhněte metodiku pro stanovení charakteristik turbodmychadla.
5. Proved'te dostupné měření.

Seznam odborné literatury:

- [1] PÍŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J. Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1991
- [2] STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.
- [3] HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.
- [4] Hofmann, Karel. Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory. :Přepřínování spalovacích motorů. / 2. vyd. Brno : VUT Brno, 1985. 134 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Svída, Ph.D.

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

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou testování turbodmychadel. Úkolem práce je provést dostupnou rešerši o zkušebních stanovištích. Dále navrhnout konstrukci měřícího stanoviště. Součástí práce je vytvoření obslužného programového vybavení pro dostupné měření. Vytvořený program bude sloužit jako základ pro kontrolu měřených dat turbodmychadla.

KLÍČOVÁ SLOVA

Turbodmychadlo, spalovací motor, měřící stanoviště, měření, snímač, kompresor, turbína, program.

ABSTRACT

The Diploma thesis deals with the testing of turbochargers. Aim of this work is to perform a search on a test stands. Further suggest the test stand's construction. Part of the work is the creation of software for utility measurements available. The program will serve as a basis for checking the measurement data of the turbocharger.

KEYWORDS

Turbocharger, combustion engine, test stand, measurement, sensor, compressor, turbine, program.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEBESTA, Filip. *Zkušební stanoviště pro zkoušení turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Zkušební stanoviště pro zkoušení turbodmychadel vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 29. května 2015

.....

Bc. Filip Šebesta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Úvod	11
1 Termodynamika oběhů spalovacích motorů.....	12
1.1 Teoretické oběhy spalovacích motorů	12
1.2 Ottův cyklus	12
1.3 Sabate cyklus	14
2 Přepřehování spalovacích motorů	16
2.1 Princip turbodmychadla	16
2.2 Konstrukce turbodmychadla	17
3 Regulace plnicího tlaku	19
3.1 Regulace obtokovým ventilem-wastegate (WG)	19
3.2 Regulace natočením lopatek-VNT (Variable Nozzle Turbine)	20
3.3 Regulace změnou šířky statoru turbíny	21
3.4 Kombinovaná regulace plnicího tlaku	22
3.5 Blow off ventil	23
4 Typy testování turbodmychadel	25
4.1 Mapování	25
4.2 Vyrvalostní testy	27
4.3 Olejové testy	27
4.4 Testy s poškozenou částí turbodmychadla.....	28
4.5 Switching unit	28
4.6 Shaft motion.....	29
5 Konstrukční návrh zkušebního stanoviště	30
6 Měření veličin.....	32
6.1 Teplota	32
6.1.1 Měření teploty	32
6.2 Tlak	33
6.2.1 Měření tlaku.....	35
6.3 Průtok.....	37
6.3.1 Typy průtoku	37
6.3.2 Měření průtoku	38
7 Měření vibrací turbodmychadla.....	39
7.1 Parametry použitých snímačů	40
7.2 Návrh umístění polohových snímačů	42
8 Tvorba měřicího programu	45
8.1 Měřicí zařízení NI cRIO	45

8.2	Program LabVIEW.....	46
8.3	Konstrukce měřicího programu.....	47
8.3.1	Načítání externích hodnot do programu.....	48
8.3.2	Úprava a zobrazení vyčtených dat	49
8.4	Uživatelské prostředí.....	53
8.5	Měřicí stanoviště	54
Závěr		58
Použité informační zdroje		60
Seznam použitých zkratk a symbolů		62

ÚVOD

Automobil i samotný spalovací motor mají hlubokou historii, bohatou na spoustu technických řešení. I když oběma je už několik desítek let, základní princip činnosti se příliš nezměnil. Zdokonalování stávajících konstrukcí se v posledních letech dostává na samotnou hranici možností motoru. Dokud budou na planetě Zemi k dispozici zásoby ropy, lze předpokládat další vývoj spalovacích motorů na uhlovodíková paliva. Jedním z hodnotících kritérií bude účinnost a s ní související spotřeba paliva. Přepřehování je jednou z cest, která vede k účinnějšímu spalovacímu motoru, a proto se s ním budeme setkávat stále častěji.

Přepřehování motoru turbodmychadlem prošlo za poslední dobu užívání dlouhou cestu, i když původní turbodmychadla byla určena jen na závodní použití a posléze přešla do každodenního provozu. Dnes, s neustále se zvyšující pohotovostní hmotností vozidel rostou požadavky na vyšší výkon a naopak rostoucí ceny pohonných hmot tlačí spotřebu paliva na minimum. Celosvětový trend tzv. downsizingu, kdy vysoko objemové motory nahrazují menší motory s jednoduchým nebo vícestupňovým přepřehováním jasně ukazuje cestu, kterou se bude automobilový průmysl dále ubírat.

S rostoucími požadavky na kvalitu, celkovou efektivitu a samozřejmě i ekologickou bilanci se zvyšují také nároky na samotné turbodmychadlo. Za největší pokroky v této oblasti můžeme označit vývoj nových materiálů, přesnější uložení rotující soustavy a v neposlední řadě i regulaci turbodmychadla. Cílem těchto inovací je vyšší rychlosti otáčení, vyšší životnost a zajištění dostatečného výkonu v celém pracovním rozsahu otáček motoru. Všechny tyto požadavky kladou stále větší důraz na samotný vývoj turbodmychadla a také na laboratorní testování parametrů pro jeho celý životní cyklus.

Testování veškerých parametrů turbodmychadla se provádí na zkušebních stanovištích, kde se obvykle nachází motor s turbodmychadlem, připojený na dynamometr tvořící zátěž. K tomuto zkušebnímu stanovišti jsou napojeny různé měřicí a řídicí zařízení, které zpracovávají data ze snímačů. Mezi základní měřené veličiny patří teplota, tlak, průtok a otáčky částí turbodmychadla.

V této práci je zpracován přehled jednotlivých typů turbodmychadel, a to zejména jejich vlastností a nových trendů ve vývoji. Dále jsou zde uvedeny typy testování turbodmychadel, jejich časté závady a nedostatky.

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout konstrukční řešení zkušebního stanoviště pro stanovení základní charakteristiky turbodmychadla. Návrh tohoto stanoviště bylo úkolem studenta Marka Melichara, který se na tomto projektu také podílel. Toto stanoviště bude sloužit k měření turbodmychadel odděleně od motoru, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků. Z toho důvodu bylo zapotřebí dodržet některé požadavky, které byly kladeny už při samotném návrhu. Pro samotné měření bylo zapotřebí navrhnout umístění jednotlivých snímačů k měření vibrací rotoru turbodmychadla. Posledním důležitým cílem bylo provést dostupné měření, kvůli kterému bylo sestaveno obslužné programové vybavení v prostředí LabView.

1 TERMODYNAMIKA OBĚHŮ SPALOVACÍCH MOTORŮ

Hlavním termodynamickým procesem v pístovém spalovacím motoru je přívod tepla do oběhu, realizovaný hořením směsi paliva a vzduchu ve válci pístového spalovacího motoru. Ve válci pístového spalovacího motoru se tento děj uskutečňuje v podmínkách rychle se měnících teplot i tlaků směsi.

Pracovní oběh pístového spalovacího motoru je složen z několika na sebe postupně navazujících termodynamických jevů a procesů. Je vytvořen jako kombinace objemových změn náplně válce, přívodu tepla náplni ve válci motoru (spalování hořlaviny v náplni válce) a výměny náplně válce spojené s odvodem tepla z oběhu. Jednotlivé děje probíhají ve válci v rychlém časovém sledu a s částečným překryvem pochodů a změn v takovém uspořádání, aby se přeměna tepelné energie (uvolněné hořením paliva) na mechanickou práci uskutečňovala s vysokou energetickou účinností.

Významnými termodynamickými ději v pístovém spalovacím motoru jsou přestupy tepla mezi pracovní náplní válce a vnitřními stěnami (válce, pístu, sacího a výfukového potrubí, u přeplňovaných motorů v turbíně, turbodmychadle apod.). Termodynamika těchto dějů ovlivňuje teplotní namáhání dílů ve válcové jednotce a působí i na účinnost přeměny tepelné energie náplně válce na mechanickou práci pístu a na kondenzaci škodlivin ve výfukových plynech.

1.1 TEORETICKÉ OBĚHY SPALOVACÍCH MOTORŮ

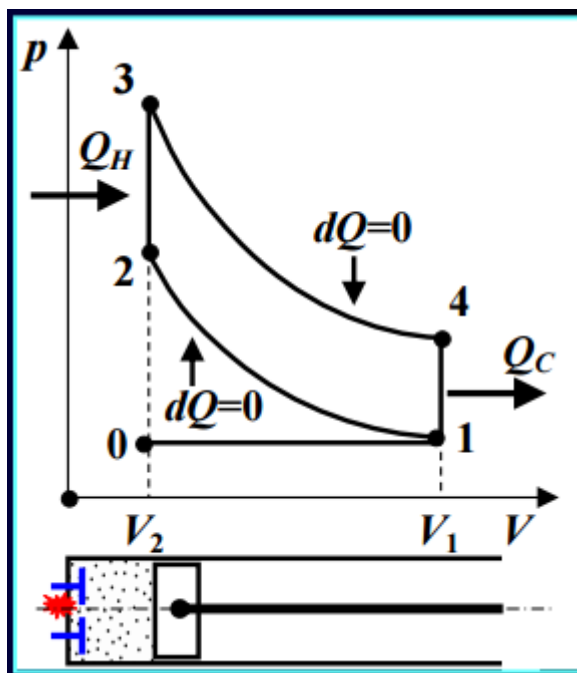
U pístových spalovacích motorů dochází ke spalování, přívodu tepla přímo hořením paliva ve spalovacím prostoru motoru. U zážehových motorů je do spalovacího prostoru nasávána směs vzduchu a par paliva, která je na konci komprese zažehnuta elektrickou jiskrou. U moderních zážehových motorů je palivo vstřikováno do vzduchu v sacím řádu motoru nebo je vstřikováno přímo do spalovacího prostoru motoru podobně, jako u vznětových motorů. Hoření má charakter explozivní a proto je považováno za hoření při konstantním objemu. Teplota směsi nesmí být na konci komprese vyšší, nežli je zápalná teplota směsi. Jedná se o Ottův cyklus, který se jinak nazývá také cyklem izochorickým.

U vznětových motorů je stlačován čistý vzduch, do kterého se pod vysokým tlakem vstřikuje nafta, která se zapálí kompresním teplem. Teplota na konci stlačení musí být vyšší, než je zápalná teplota směsi paliva a vzduchu. Hoření probíhá teoreticky za konstantního tlaku.

Teoretické oběhy jsou takové diagramy, které předpokládají určitá zjednodušení vzhledem k realitě. Uvažujeme, že pracovní látka se nevyměňuje, oběh je uzavřený, spalování je nahrazeno přívodem tepla a výfuk naopak odvodem tepla, všechny změny pracovní látky (ideální dvouatomový plyn) jsou vratné a platí pro ně stavová rovnice.

1.2 OTTŮV CYKLUS

Tento typ vratného pracovního cyklu nejlépe popisuje činnost zážehového spalovacího motoru.



Obrázek 1p-V diagram Ottova cyklu [16]

Uvedený oběh se skládá z těchto stavových změn:

- 1-2 adiabatická komprese
- 2-3 izochorický přívod tepla (spalování)
- 3-4 adiabatická expanze
- 4-1 izochorický odvod tepla (výfuk)

Termickou účinností cyklu můžeme na základě známých stavových veličin (tlak, objem, teplota) určit ze vztahu:

$$\eta_T = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1}, \quad (1)$$

při definovaném kompresním poměru spalovacího zážehového motoru daného vztahem:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

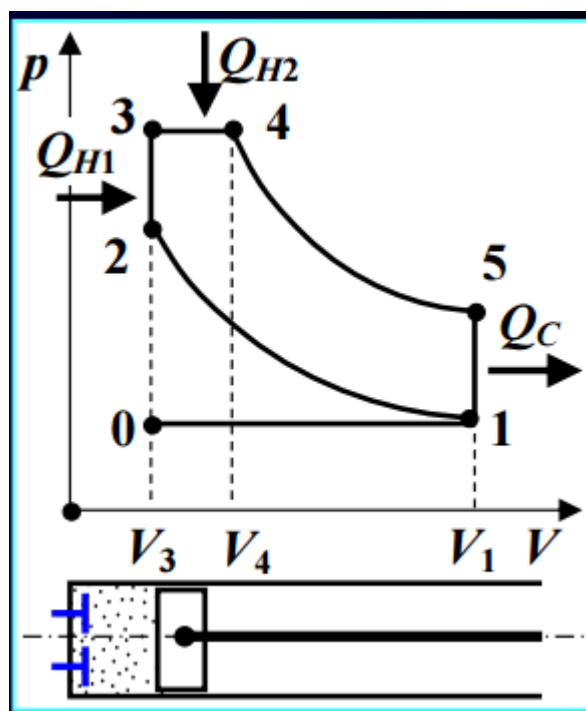
kde

V_1 je objem na začátku komprese,

V_2 je objem na konci komprese.

1.3 SABATE CYKLUS

Pro vznětové motory se v současné době používá smíšený typ vratného pracovního cyklu. Jeho tvar je patrný z následujícího diagramu.



Obrázek 2p-V diagram Sabateho cyklu[16]

Uvedený oběh se skládá z těchto stavových změn:

- 1-2 adiabatická komprese
- 2-3 izochorický přívod tepla (spalování)
- 3-4 izobarický přívod tepla (spalování)
- 4-5 adiabatická expanze
- 5-1 izochorický odvod tepla (výfuk)

Termickou účinnost tohoto cyklu můžeme na základě známých stavových veličin určit ze vztahu:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\Psi \cdot \varphi^{\kappa-1}}{(\Psi - 1) + \kappa \cdot \Psi \cdot (\varphi - 1)} , \quad (3)$$

při součiniteli zvýšení tlaku izochorickým přívodem tepla daného vztahem:

$$\Psi = \frac{p_3}{p_2} \quad (4)$$

a při součiniteli plnění izobarickým přívodem tepla:

$$\varphi = \frac{V_4}{V_3} \quad (5)$$

2 PŘEPLŇOVÁNÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ

Přeplňování spalovacích motorů je jedna z nejpoužívanějších metod sloužící ke zvyšování výkonových parametrů spalovacích motorů. V minulosti byla největší motivací vedoucí k používání přeplňování spalovacích motorů snaha zvýšit výkon spalovacích motorů, zejména se tento způsob používal u vznětových motorů, kde výkon připadající na jeden kilogram je podstatně menší než u benzínových motorů. V současné době je hlavní motivací snižování spotřeby paliva, a tedy i produkce oxidu uhličitého, které je dosaženo zmenšením zdvihového objemu motoru při zachování stejných výkonových parametrů, tzv. downsizing. Motor o menším zdvihovém objemu má menší ztráty třením, menší hmotnost, menší moment setrvačnosti motoru atd. než motor o větším zdvihovém objemu. To se projeví nižší spotřebou paliva. Stejné výkonové parametry jako u motoru s větším zdvihovým objemem jsou dosaženy právě přeplňováním.

Kromě přeplňování, které zvyšuje hodnotu středního efektivního tlaku působící na píst, lze výkon motoru zvýšit už pouze zvětšením objemu motoru nebo zvýšením otáček motoru. Zvětšením zdvihového objemu motoru ať již zvyšováním objemu válce, nebo zvyšováním počtu válců, je spojeno s nárůstem zastavěného objemu a hmotnosti motoru i jeho příslušenství. Zvyšování otáček negativně ovlivňuje životnost, využívá se tedy převážně při ladění závodních motorů automobilů a motocyklů, u kterých není požadována vysoká životnost, např. motory vozů formule 1 byly schopné dosahovat až 20 000 otáček za minutu, ale životnost byla pouze jeden nebo dva závody.[13]

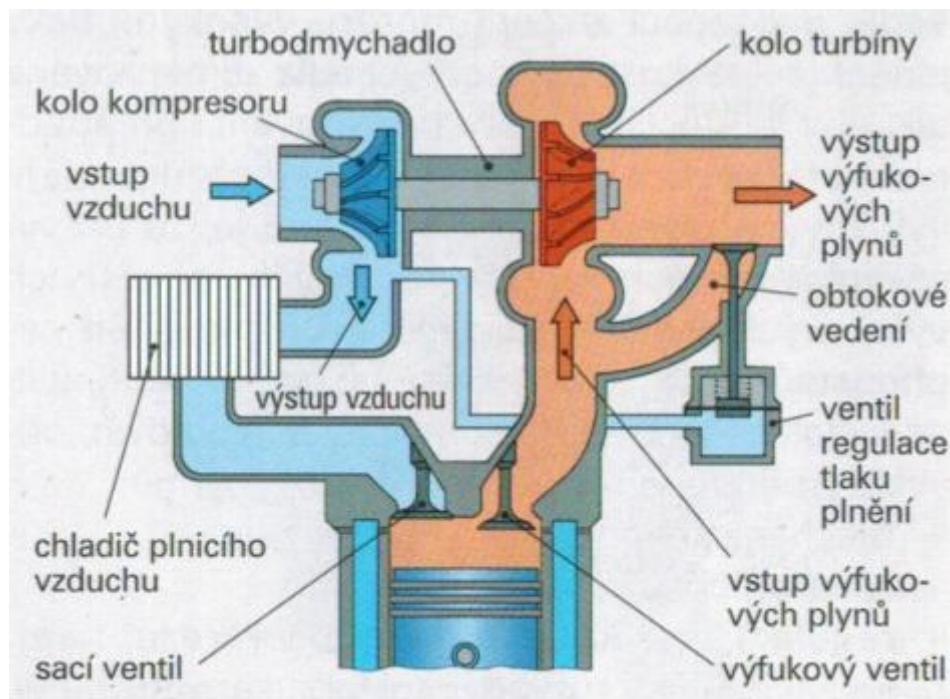
2.1 PRINCIP TURBODMYCHADLA

Turbodmychadlo je dmychadlo poháněné výfukovými plyny. Skládá se ze dvou hlavních částí – dmychadlové a turbínové. Dmychadlo stlačuje vzduch vstupující do motoru a výrazně tak zvyšuje jeho objemovou účinnost oproti klasickému nepřeplňovanému motoru. Turbína pohánějící dmychadlo je roztáčena výfukovými plyny vystupujícími z motoru a je umístěna na stejné hřídeli.

Pojem kompresor se často používá pro označení mechanicky poháněného kompresoru (většinou pomocí řemene), zatímco turbodmychadlo je poháněno výfukovými plyny. Mechanicky poháněný kompresor používají např. automobilky Jaguar nebo Mercedes-Benz. Jeho nevýhodou je to, že pro svůj pohon využívá část výkonu motoru, ale výhodou je zase absence turboefektu (otáčky kompresoru jsou přímo-úměrné otáčkám motoru).

Turbodmychadlo zvyšuje tlak vzduchu vstupujícího do motoru a tím i jeho měrnou hmotnost. Je tedy možné do motoru nasát při stejných otáčkách a objemu více směsi paliva a vzduchu (pro zachování stejného poměru je třeba zvýšit množství paliva). To je hlavní příčinou výrazného nárůstu výkonu motoru.

Nárůst tlaku se měří v pascálech, barech nebo PSI. Energie uvolněná z paliva navíc vede k většímu celkovému výkonu motoru. Například při teoretické účinnosti 100 % by turbodmychadlo produkující nárůst tlaku 100 kPa (= 1 bar nebo 14,7 PSI) zdvojnásobilo výkon motoru. Turbína ve výfukovém systému ale představuje překážku a kvůli vznikajícím zpětným tlakům tak turbodmychadla většinou dosahují účinnosti kolem 80 %.



Obrázek 3 Princip Turbodmychadla [17]

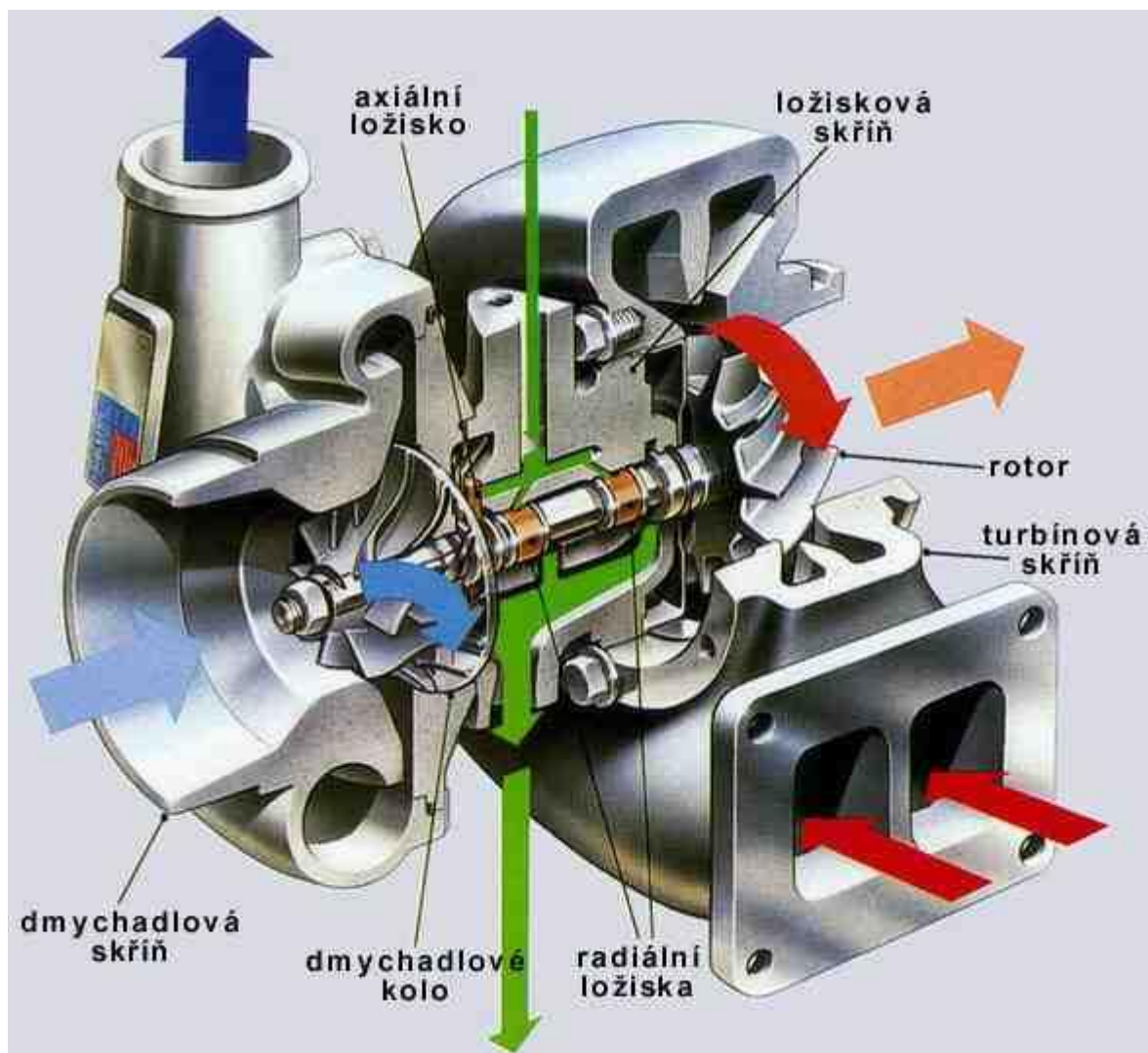
V automobilovém průmyslu se většinou používají turbodmychadla zvyšující tlak maximálně o 80 kPa, i když jsou dosažitelné i vyšší tlaky. Typické turbodmychadlo vzhledem ke své konstrukci začne zvyšovat tlak teprve od 2500 min^{-1} . (1800 min^{-1} u turbodieselových motorů). Mechanicky poháněný kompresor tento problém nemá.

Hlavní nevýhodou velkých plnicích tlaků je, že při stlačování vzduchu dochází k jeho zahřívání (zmenšení hustoty plnicího vzduchu). Tento nárůst teploty palivové směsi je limitujícím faktorem u benzínových motorů, kde příliš vysoká teplota směsi způsobí její samovznícení ve válci ještě předtím, než má být správně zapálena jiskrou. Pro oba typy motorů ale znamená vyšší teplota směsi snížení účinnosti motoru. Tento problém se většinou řeší použitím mezichladiče stlačeného vzduchu (tzv. intercooler), který teplotu opět sníží. [17]

2.2 KONSTRUKCE TURBODMYCHADLA

Dmychadlo se otáčí velmi rychle – $10\,000$ až $200\,000 \text{ min}^{-1}$, v závislosti na velikosti, hmotnosti rotujících částí, nárůstu tlaku a konstrukci turbodmychadla. Tak vysoké otáčky by představovaly problém pro klasická kuličková ložiska, která by mohla explodovat. Proto se používají fluidní ložiska, ve kterých jsou pohybující se části odděleny a zároveň chlazeny tenkou vrstvou oleje. Olej se většinou bere z mazací soustavy motoru a musí být po průchodu turbodmychadlem chlazen olejovým chladičem.

Aby se zabránilo poškození turbodmychadla a motoru při uzavření škrtkové klapky (např. při řazení u manuálních převodovek), kdy vzduch stlačený turbodmychadlem nemá kam proudit, jsou přeplňované motory vybaveny přepouštěcím ventilem. Při uzavření škrtkové klapky za ní vznikne podtlak, který se využije k otevření přepouštěcího ventilu. Přebytečný vzduch se tak vyfoukne ven z motoru nebo zpět do sání. Při tom vzniká charakteristický zvuk.



Obrázek 4 Konstrukce turbodmychadla[18]

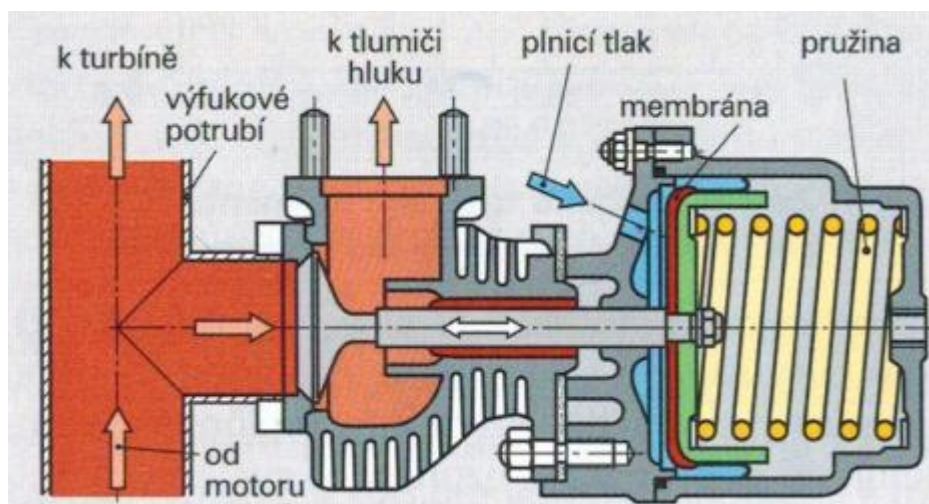
Pro regulaci otáček turbodmychadla a tím i regulaci tlaku se používá systém, který přepouští nadbytečné výfukové plyny za turbínu turbodmychadla, nebo reguluje směr výtoku plynů na kolo turbíny. Ventil je řízen tlakem produkovaným dmychadlem.

3 REGULACE PLNICÍHO TLAKU

Jelikož je v každodenním provozu zapotřebí vysoký výkon v celém pracovním spektru motoru (různý průtok spalin na turbínovém kole), je zapotřebí regulace plnicího tlaku. Toho lze docílit několika způsoby.

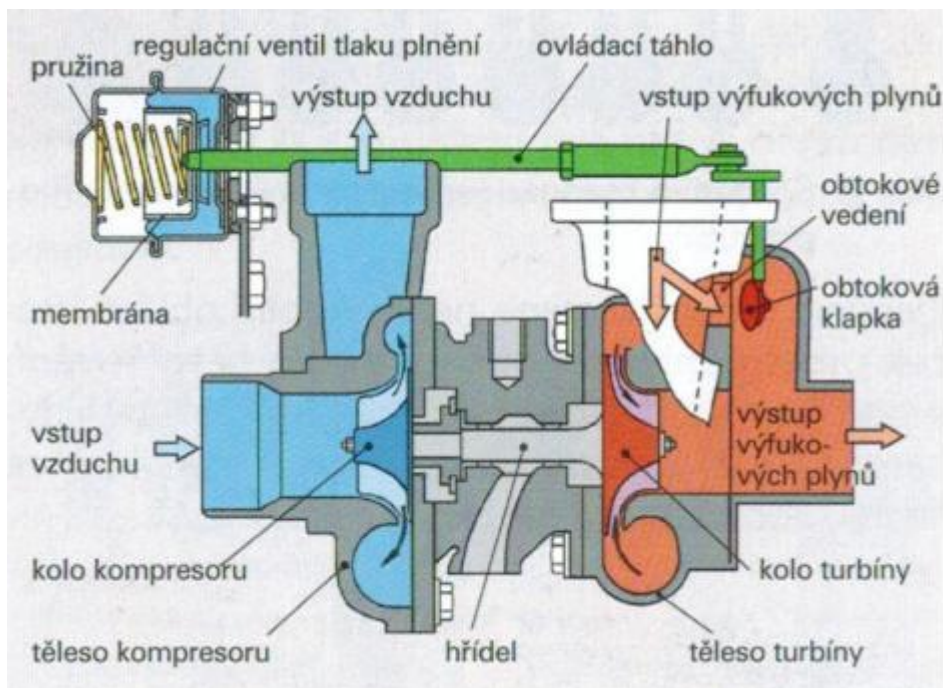
3.1 REGULACE OBTOKOVÝM VENTILEM-WASTEGATE (WG)

Při využití mechanicko-pneumatické regulace se snížení výkonu turbíny dosahuje vedením části výfukových plynů obtokem do výfukového potrubí, tzv. wastegate. Obtok je řízen regulačním ventilem, ovládaným plnicím tlakem turbodmychadla, kdy plnicí tlak působí na membránu tlakového snímače proti síle pružiny (Obrázek 5). Jakmile je plnicím tlakem překonáno předepnutí pružiny, ventil se otevře a odpustí část výfukových plynů. Regulační ventil může být umístěn na libovolném místě výfukové soustavy před turbínou výfukových plynů.



Obrázek 5 Regulace plnicího tlaku obtokem-1. Způsob [17]

Místo ventilu se může použít řídicí klapka, která je spojena s řídicím prvkem, tj. tlakovým snímačem umístěným většinou ve skříni turbodmychadla, jednoduchým mechanismem, obvykle táhlem (Obrázek 6). Dostatečnou vzdáleností tlakového snímače od horkých částí turbodmychadla s regulační klapkou není tepelné zatížení membrány snímače příliš velké a jeho provoz je tak spolehlivější.



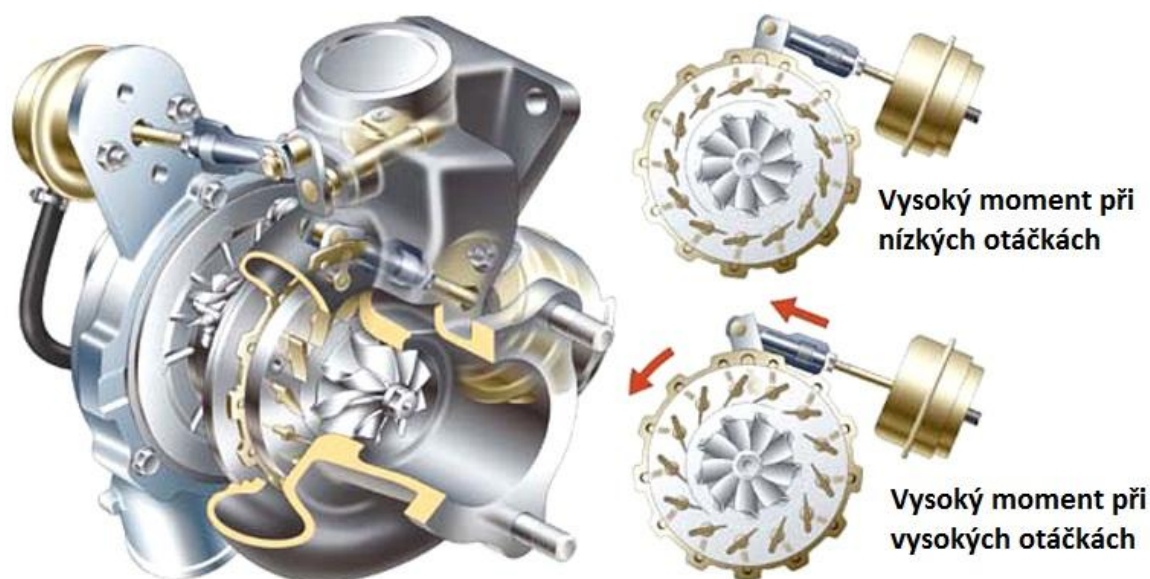
Obrázek 6 Regulace plnicího tlaku obtokem-2.způsob[17]

U zážehových motorů při uzavřené škrticí klapce (brzdění motorem) vytlačuje turbodmychadlo do velkého protitlaku, který brání proudění a rotor s kolem dmychadla je brzděn tak, že při náhlých změnách zatížení dochází ke zpoždění reakce dmychadla. Aby se tento nežádoucí jev omezil a dmychadlo při prudkém přechodu na plné zatížení otevřením škrticí klapky se mohlo otáčet bez omezení, používá se v sací soustavě pojistný obtokový ventil, řízený tlakem v soustavě. Tento ventil při uzavřené škrticí klapce a tudíž při nárůstu tlaku se otevírá a přepouští stlačený vzduch zpět do sání dmychadla - touto způsobu se říká regulace plnicího tlaku obtokovou klapkou. [17]

3.2 REGULACE NATOČENÍM LOPATEK-VNT (VARIABLE NOZZLE TURBINE)

Takto můžeme měnit pouze výstupní plochu ze statoru turbíny a tím i úhel a velikost absolutní rychlosti proudu vstupujícího do rotoru, ovšem průtočná plocha rotoru zůstává nezměněná. Dochází tedy ke změně poměru průtočných ploch statoru a rotoru.

V principu je využíváno zákona kontinuity, který říká, že konstantní objem plynu proudí potrubím tím rychleji, čím menší má potrubí průřez. Tedy ve srovnání s regulací plnicího tlaku, u dmychadla prochází turbínou stále celý objem výfukových plynů. Při nízkých otáčkách motoru je požadován vysoký plnicí tlak, takže je nastavitelnými lopatkami zmenšen průřez, kterým proudí výfukové plyny. Tlak před lopatkami se zvýší, rychlost plynů se v zúženém místě také zvýší a to způsobí nárůst otáček turbodmychadla a tedy zvýšení tlaku kompresoru dmychadla. Ve vysokých otáčkách motoru, kdy je potřeba plnicí tlak omezit, je průtočný průřez v místě rozváděcích lopatek zvětšen, turbodmychadlo se točí nižšími otáčkami a plnicí tlak se také zmenší. Ovládání natočení lopatek bývá řešeno různými pneumatickými nebo elektrickými akčními členy.



Obrázek 7 Regulace plnicího tlaku natočením lopatek [19]

Natáčením rozváděcích lopatek turbíny jsou při regulaci mnohem nižší tlaky a teploty výfukových plynů před turbínou, než při jejich odpouštění. Tento systém je zatím využíván hlavně u vznětových motorů, protože výfukové plyny zážehových motorů mají příliš vysoké teploty.

3.3 REGULACE ZMĚNOU ŠÍŘKY STATORU TURBÍNY

Změna šířky rozváděcího kola turbíny, je na první pohled nejjednodušším způsobem změny geometrie turbíny. Obtížnost plyne z principu věci. Celé rozváděcí kolo s lopatkami, je rovnoměrně po celém obvodu axiálně posouváno v turbínové skříni při teplotách blízcích se 800°C. Přitom se lopatky zasouvají do prstence v druhé stěně, která je opatřena otvory s profilem zasouvajících se lopatek. Z nutnosti vyšších ovládacích sil se pro ovládání používá pístové jednotky ovládané tlakem z brzdového systému vozidla a nikoli jednotky membránové využívající tlaku z výstupu kompresoru. Pro hodnotu regulovaného plnicího tlaku je užito otáček rotoru turbodmychadla, které se snímají uprostřed rotoru v ložiskové skříni bezdotykovým elektromagnetickým snímačem.



Obrázek 8 Regulace plnicího tlaku změnou šířky statoru[14]

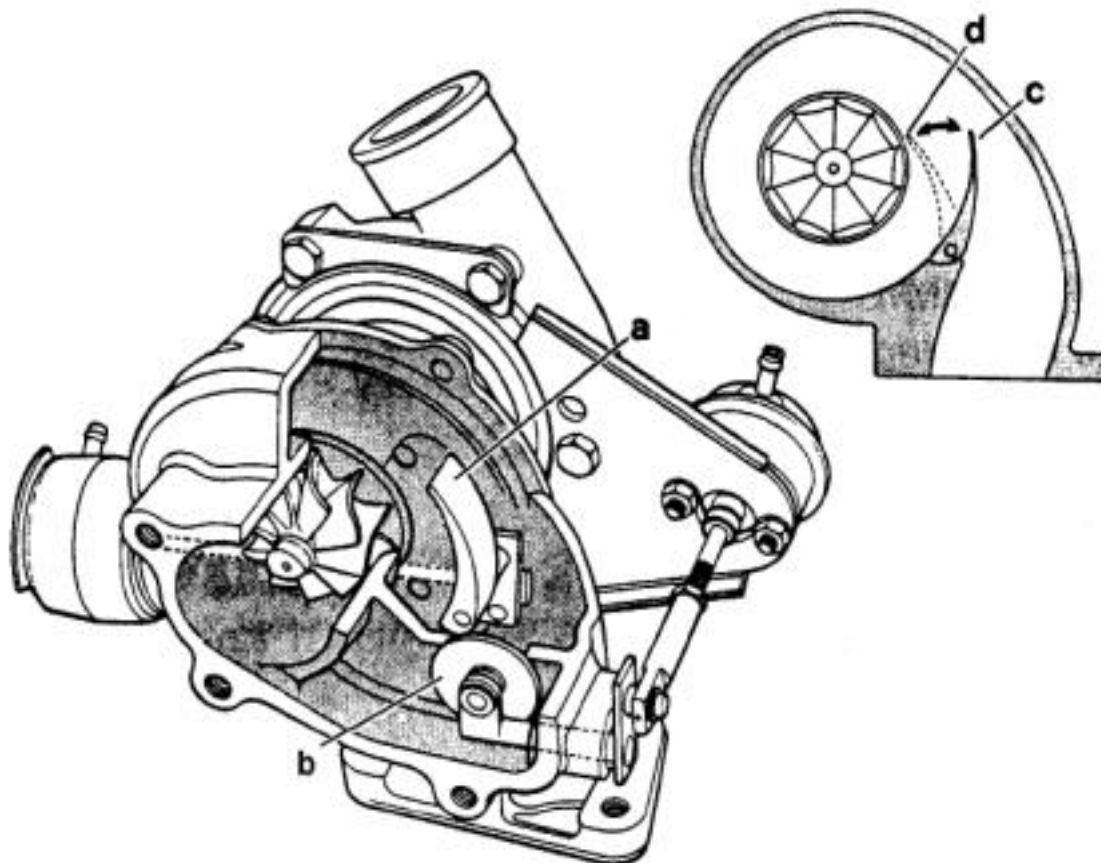
Z hlediska parametrů to je originální řešení, protože proti ostatním způsobům regulace, zde protéká celý hmotnostní průtok turbínou při optimálním úhlu náběhu proudu do oběžného kola a turbína tak má stále vysokou účinnost. Zvětšení ztrát je způsobeno pouze zvýšenými třecími ztrátami ve statoru a náhlým rozšířením kanálu mezi statorem a rotorem turbíny.

Tento způsob regulace byl poprvé použit pro užitková vozidla Iveco Cursor na regulovaných přeplňovaných vznětových motorech. V současné době se tato regulace používá nejen pro přeplňování vznětových motorů užitkových vozidel, ale i vznětových a zážehových motorů vozidel osobních. [14]

3.4 KOMBINOVANÁ REGULACE PLNÍČÍHO TLAKU

Ve snaze snížit tlaky a teploty výfukových plynů před turbínou, a přitom maximálně zvýšit akceleraceschopnost motoru vyvinula firma Garrett turbodmychadlo s použitím bezlopatkové rozváděcí skříně, která má řídicí směrovou klapku "a". Pro úpravu víru v rozváděcí skříně a tím i úhlu náběhu na vstupu do rotoru turbíny je doplněna odpouštěcí klapku "b".

K dosažení minimálního momentu setrvačnosti rotoru turbíny byl průměr oběžného kola turbíny snížen na 32 mm. Tím pádem nemůže turbínou projít celý hmotnostní průtok produkováný motorem. Od polohy "d" do polohy "c" řídicí směrová klapka zvětšuje obvodovou složku rychlosti v bezlopatkové rozváděcí skříni a současně odpouští klapkou "b" přebytečný hmotnostní tok. Tím se docílí stejného efektu, jako při natačení rozváděcích lopatek, ovšem v kombinaci s odpouštěním.



Obrázek 9 Kombinovaná regulace plnicího tlaku [14]

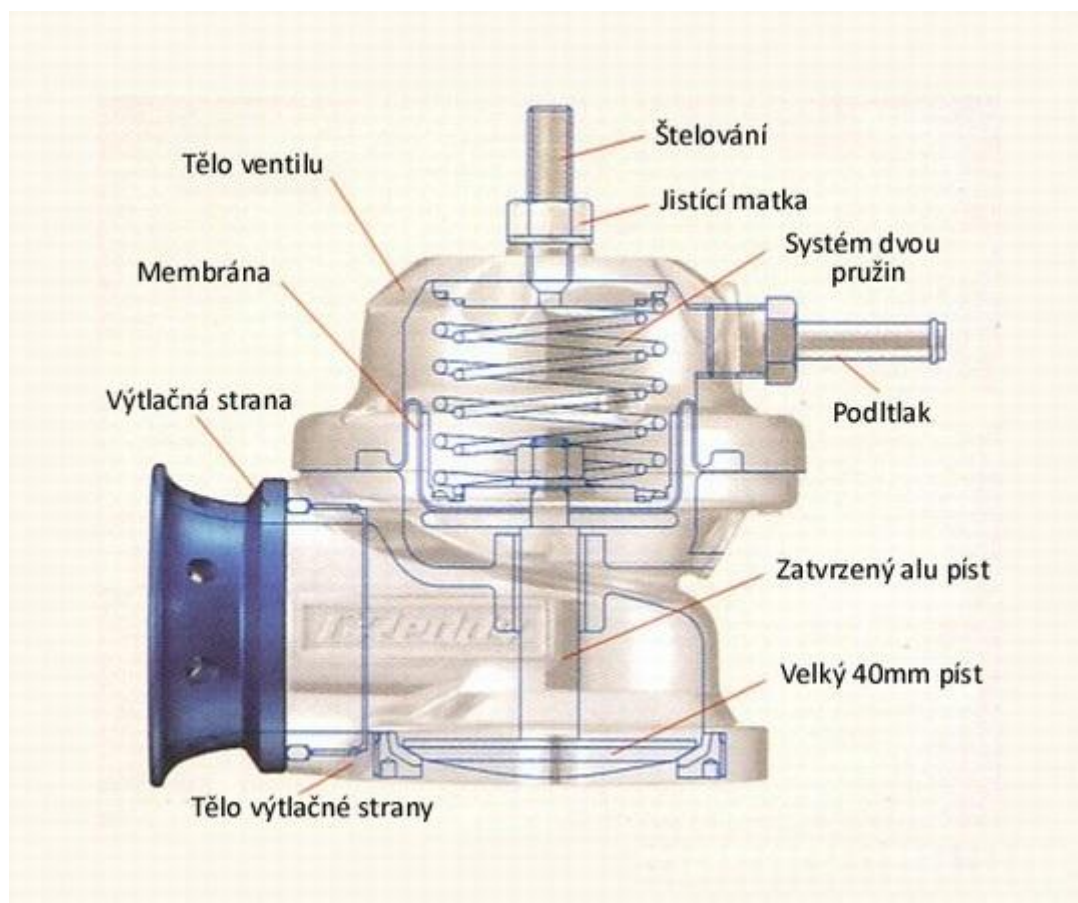
Tato kombinace s odpouštěním a použitím co nejmenších průměrů oběžných kol turbíny se používá u všech druhů regulací plnicího tlaku změnou geometrie turbíny. Uvedený způsob regulace turbodmychadlem Garrett VAT 25 byl poprvé použit při přeplňování motoru XU10J4TE vozu Peugeot 405 T16 s očekávanými výsledky. [14]

3.5 BLOW OFF VENTIL

Blow off ventil neboli BOV je ventil, přes nějž se odpouští přebytečný tlak mezi turbodmychadlem a škrtkicí klapkou a zamezuje se tak zbytečnému brzdění a přehřívání turba. Při sundání nohy z plynu se uzavře škrtkicí klapka, ale turbo se dál setrvačností točí. Tlak, který i nadále produkuje, se hromadí v potrubí, kvůli čemuž dochází k přehřívání a brzdění turba. Použití blow off ventilu tento přebytečný stlačený vzduch odpouští a zamezuje tak

vzniku takzvané turbodíry, tedy efektu, kdy po opětovném sešlápnutí plynového pedálu chvíli trvá, než se turbo opět roztočí do pracovních otáček.

Impuls na vypuštění přebytečného tlaku dostává BOV na základě impulsu z podtlakové hadičky, tedy při sundání nohy z plynu. V případě open loop modelů doprovází vypouštění stlačeného vzduchu sykavý zvukový efekt, který je slyšet ve chvíli, když řidič sundá nohu z plynu a řadí další rychlost. Druhou variantou je takzvaný closed loop BOV, který stlačený vzduch odpouští zpět do sacího traktu. V tom případě není doprovázen oním sykavým zvukem, který majitelé výkonných vozů s turbodmychadly často preferují.



Obrázek 10 Schéma blow off ventilu firmy Greddy[20]

Výhodou blow off ventilu je kromě ochrany turba před nadměrným tlakem stlačeného vzduchu také zrychlení reakce turba na sešlápnutí plynu.

4 TYPY TESTOVÁNÍ TURBODMYCHADEL

Při samotném vývoji turbodmychadel se dnes používá mnoho metod a postupů testování. Nejdříve se udělá teoretický výpočet a návrh v simulačních programech na PC, poté se poměrně dlouhou dobu testuje turbodmychadlo jako celek, popřípadě jeho jednotlivé komponenty na zkušebních zařízeních a to zejména na tzv. Gasstandech (GS).

Po náročném testování se tyto zjištěné poznatky z testu vyhodnotí a v případě, že testované turbodmychadlo nebo jeho části neodpovídají zvoleným požadavkům, se upraví a celý test se absolvuje znovu. Tak to jde tak dlouho, dokud turbodmychadlo nebo jeho části nesplňují veškeré požadavky výrobce, zákazníka, resp. zadavatele testu.

Poté se pokračuje testováním přímo na konkrétních motorech, které jsou na zkušebně a je zde opět simulován nějaký děj, nebo průběh jako za reálného provozu. Motory jsou připojeny k výkonové aktivní brzdě.

Samotný test lze rozdělit na 3 základní části

- Zahřívací fáze – slouží k postupnému najetí/dosažení požadované teploty na turbínové straně a ustálení požadovaných nejnižších otáček samotného testu. Slouží dále k ohřevu celého objemu oleje, chladicí kapaliny a k ustálení teplot a tlaků těchto kapalin. Dále také k ustálení teploty nasávaného vzduchu.

- Samotný test – samotné testování se odvíjí zejména od požadavků zadavatele testu, typu testu a očekávaných výsledků. Mezi jednotlivými kroky v testování jsou opět časové rampy na ustálení všech měřených hodnot, poté probíhá hlavní ukládání a opět další krok, to se opakuje v celé sekvenci testování.

- Chladicí fáze – Opět v několika sestupných krocích, zejména pro celkové vychlazení materiálu turbodmychadla, oleje, chladicí kapaliny a měřících zařízení. Poté nastává chladnutí přirozenou cestou, nebo mimo sekvenci, roztočením turbodmychadla přes hořák, ale pouze stlačeným vzduchem.

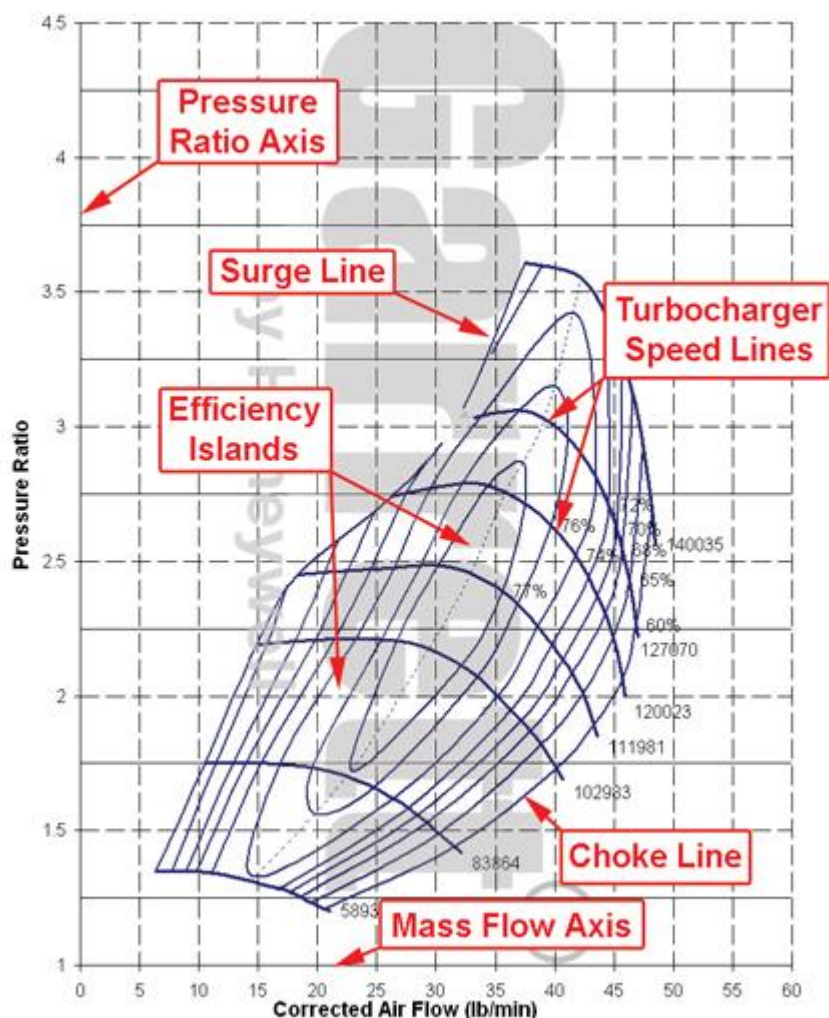
V této práci se zaměřím na samotné testování přímo na vznětovém motoru Zetor.

4.1 MAPOVÁNÍ

Kompresorové a turbínové mapy jsou speciální listy pro turbodmychadla, charakterizující výkon turbodmychadla. Tyto speciální listy umožňují správně zvolit kombinaci kol a krytů pro jejich konkrétní aplikaci. Kompresorové a turbínové mapy pro turbodmychadla jsou ve své podstatě ekvivalentní s dyno-listem motoru. Mapy i dyno-list poskytují informace o výkonu v širokém rozsahu provozních podmínek.

Typické kompresorové a turbínové mapy pro turbodmychadla jsou generovány na běžícím turbodmychadlu, které je řádně připevněné v Gasstandu v testovací buňce. Plynový stojan (Gasstand) obvykle spaluje zemní plyn, který pohání turbodmychadlo. Testovací buňka s Gasstandem poskytuje kontrolovaný a konzistentní prostředí pro opakovatelné testování.

Bylo by možné testovat jednotlivé části turbodmychadla zvlášť, například strana kompresoru jde testovat relativně snadno, avšak jednotlivé díly jsou navzájem ovlivňovány a docházelo by ke zkreslování jednotlivých map a tudíž je logické a pohodlné provádět testování společně v podobě turbodmychadla.



Obrázek 11 Vzorová kompresorová mapa turbodmychadla[15]

Generování kompresorových a turbínových map vyžaduje přesné měření hmotnostních toků, teploty, tlaku a rychlosti hřídele turbodmychadla. Mapy jsou obvykle vytvořeny spuštěním turbodmychadla při konstantní rychlosti a změně poměru tlaků na straně kompresoru. To může být provedeno například tím, že omezuje průtok na výstupu kompresoru. Každá čára charakterizující rychlost otáčení hřídele turbodmychadla, kterou měříme pomocí speedsenzoru, který je zašroubován skrze kompresorovou skříň a směřuje na lopatky kompresorového kola, má na mapě kompresoru odpovídající čáru mapy turbíny.

4.2 VYTRVALOSTNÍ TESTY

Jedná se o dlouhodobější testování, které často simuluje limitní stavy turbodmychadla to cyklicky. V samotné sekvenci takový test vypadá asi tak, že turbodmychadlo má na vstupu do turbínové části teplotu spalin okolo 620 °C a 100 000 min⁻¹. Po několika vteřinách na těchto hodnotách nastává 30-ti sekundové zvýšení otáček až na 285 000 min⁻¹ a teplota na vstupu do turbínové části je stanovena na 1050 °C, nastává výdrž 5 minut a poté následuje snížení na původní hodnoty. Tedy na turbínové části teplota spalin 620 °C a 100 000 min⁻¹. Tento děj se opakuje 50 hodin bez přerušení.

Po 50-ti hodinách testu nastává celkové vychlazení, zmíněné výše. Po vychlazení probíhá demontáž turbodmychadla a kompletní revize. Kontroluje se zejména opotřebení WG nebo VNT regulace, trhliny v turbínové skříni a odřený ovládacího rodu a pinu. Po kompletní fotodokumentaci a naměření trhlín a vůlí se turbodmychadlo opět složí a namontuje zpět na testovací zařízení. Spustí se test na dalších 50 hodin.

Tento děj se opakuje až do dosažení zadaných hodin testu, například 800 hodin. Poté se vyhodnotí výsledky a vše se řádně zdokumentuje.

4.3 OLEJOVÉ TESTY

Při tomto druhu testu se posuzuje výdrž ložisek v extrémních případech, nebo mnoho cyklických opakování. Jde o testy s nízkým tlakem oleje, cyklujícím tlakem oleje nebo s přehřátým olejem, kde se jeho teplota pohybuje v rozmezí 150-175 °C. Speciální částí olejových testů je testování s použitím kontaminovaného oleje. Takový olej obsahuje jemné piliny kovu, bronz, křemičitý písek, naftu a karbonové „spečence“.

Jedním z dalších typů olejových testů je test, při kterém se turbodmychadlo roztočí na požadované otáčky a zahřeje se na provozní teplotu, po ustálení se hodnot se vypne hořák a mazání turbodmychadla, tímto se simuluje vypínání přeplňovaného motoru.

Olej se nechá několik minut zapékat a pak se hořák i mazání opět zapne a turbodmychadlo se roztočí opět do plných otáček a zahřeje se na provozní teplotu. Olej se zapéká v těsnících kroužcích na hřídeli a v ložisku, poté většinou dojde ke ztrátě těsnosti těsnících kroužků a olej začne unikat do rozpálené turbínové skříň. Následuje vzplanutí a možné přetočení turbodmychadla. [9]



Obrázek 12 Ukázka zapečeného oleje v těsnících kroužcích [7]

4.4 TESTY S POŠKOZENOU ČÁSTÍ TURBODMYCHADLA

Většinou se jedná o turbodmychadla z výrobní linky. Schválně je implementována například chyba z výrobní linky, vadná montáž, otřep po obrábění, větší vůle, nesouosost či jiné vady, které by mohly ovlivnit chování turbodmychadla. Testuje se jednak typ projevu této chyby a jednak výdrž a vliv na výkonnostní charakteristiku.

4.5 SWITCHING UNIT

Další typ testu je opět na výdrž, při kterém je použito zařízení s názvem switching unit, které má dvě větve pro dva vstupy do turbínových částí.

Testují se tedy dvě turbodmychadla najednou. Jde o to, že se střídavě přepínají jednotlivé větve a turbodmychadla se pohybují v maximálních parametrech cyklicky za sebou. To simuluje jednotlivé náběhy do maximálního zatížení turbodmychadla.

Po předem stanovených hodinách testu se opět dělá kompletní revize všech částí turbodmychadla a vše je zdokumentováno.

4.6 SHAFT MOTION

Shaft motion neboli rotační pohyb rotoru je ovlivněn silami pulzujících plynů na turbíně. Prostřednictvím vlastní zbytkové nerovnováhy a prostřednictvím mechanických vibrací motoru je simulováno vibrování tohoto rotoru. Dochází ke vzniku velkých amplitud, což může mít za následek vznik vůle v ložisku. To může vést k nestabilitě, a to zejména, když má mazací olej příliš nízké tlaky a teplota oleje je příliš vysoká. V nejhorším případě může dojít ke kovovému dotyku a abnormálnímu mechanickému opotřebení.

Pohyb rotoru se měří a zaznamenává pomocí bezkontaktních snímačů umístěných v sacím prostoru kompresoru. V kompresorové skříni jsou připraveny otvory na umístění polohových senzorů. Po zkvalitování sond a zapojení sond do speciálního měřicího modulu, se sondy namontují směrem ke hřídeli (rotoru), jak je uvedeno na Obrázek 13. Za všech okolností a na všech provozních místech, by amplitudy rotoru neměly překročit 80% maximálních možných hodnot. Pohyb rotoru nesmí vykazovat žádnou nestabilitu.



Obrázek 13 Umístění polohových senzorů v kompresorové skříni[7]

5 KONSTRUKČNÍ NÁVRH ZKUŠEBNÍHO STANOVISTĚ

Zkušební stanoviště na měření turbodmychadel bylo navrženo a posléze i vyhotoveno Ústavem automobilního a dopravní inženýrství, fakulty Strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně. Úkolem zkušebního stanoviště je měření veličin, a to především měření teploty, tlaku a hmotnostního průtoku turbodmychadla. Hlavní důvod pro vznik tohoto stanoviště byla možnost měření turbodmychadla odděleně od spalovacího motoru, aby nedocházelo ke zkreslování měření. Mezi hlavní prvky, které by ovlivnily měření turbodmychadel umístěných na motoru, patří zejména vibrace, hluk a přenos teplot.

Hlavní prostor určený k umístění zkušebního stanoviště je protihluková komora, která se nachází v dílnách ústavu Automobilního a dopravního inženýrství. Do této místnosti jsou vyvedeny veškerá příslušenství potřebná pro správný chod turbodmychadla. Motor, který bude svými výfukovými plyny pohánět testované turbodmychadlo, je umístěn vedle této místnosti a je přímo spojen s aktivní brzdou. Výfukové plyny se do turbodmychadla dostávají potrubím, které spojuje turbodmychadlo s motorem. Dále je k turbodmychadlu přivedeno potrubí pro nasávaný vzduch a odvod výfukových plynů z turbodmychadla. Přívod a odvod oleje, sloužící k mazání a chlazení turbodmychadla, je vyveden zvlášť.

Při tvorbě samotného návrhu konstrukce zkušebního stanoviště bylo zapotřebí věnovat pozornost několika důležitým požadavkům.

Požadavky na konstrukci zkušebního stanoviště:

- Délka a šířka stojanu je uzpůsobena velikosti dveří v protihlukové komoře, a to z důvodu manipulace se zkušebním stanovištěm.
- Velikost spodní části zkušebního stanoviště odpovídá přibližně velikosti europalety. Samotné stanoviště je přizpůsobené k přesunu za pomoci paletového vozíku, popř. k naložení do užitkového vozu a následného převezení.
- Stojan je připevněn k podlaze v protihlukové komoře, aby nedocházelo k jeho pohybu.
- Možnost upevnění turbodmychadla horizontálním i vertikálním způsobem ke zkušebnímu stanovišti.
- Celková tuhost a pevnost zkušebního stanoviště.
- Ve spodní části stojanu je umístěn plech zachycující nečistoty z turbodmychadla.
- Možnost regulace výšky samotného upevnění turbodmychadla.
- V blízkosti měřeného turbodmychadla je umístěna plocha pro upevnění snímačů pro jednotlivá měření.
- Možnost připevnění turbodmychadel různých velikostí a značek výrobců pomocí přírub.

- Levné pořizovací náklady.
- Odpovídající uchycení přírub turbodmychadel k samotnému stojanu, a to z důvodu velkého tepelného namáhání.
- Vhodné umístění jednotlivých snímačů pro zjišťování charakteristik turbodmychadla a jejich správná těsnost.

6 MĚŘENÍ VELIČIN

6.1 TEPLOTA

V přírodních a technických vědách a jejich aplikacích je to skalární intenzivní veličina, která je vzhledem ke svému pravděpodobnostnímu charakteru vhodná k popisu stavu ustálených makroskopických systémů. Teplota souvisí s kinetickou energií částic látky.

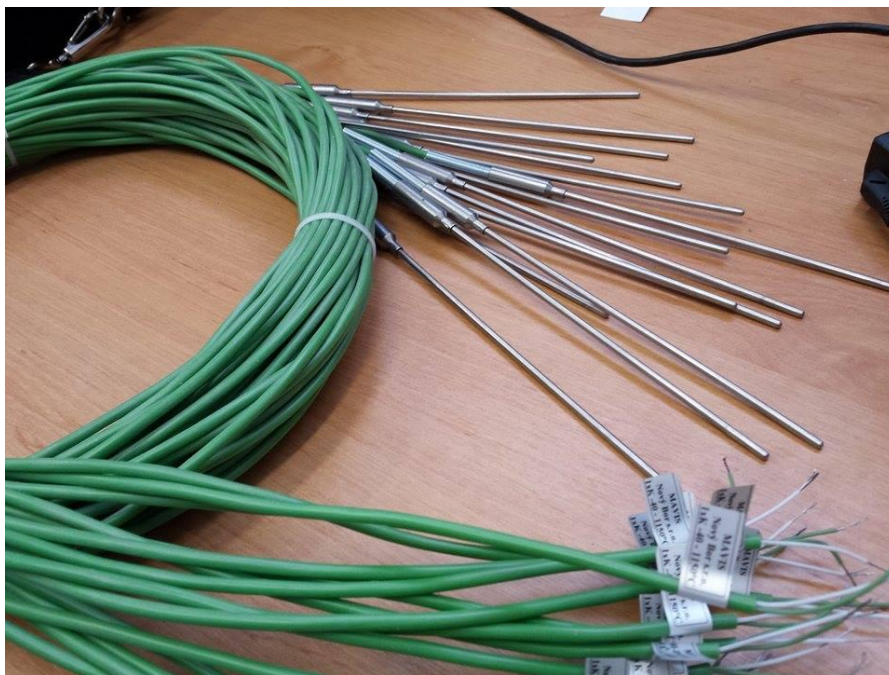
Teplota je charakteristika tepelného stavu hmoty. Je základní fyzikální veličinou soustavy SI s jednotkou kelvin (K) a vedlejší jednotkou stupeň Celsia (°C). Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly (0 K; -273,15 °C), ke které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze jí dosáhnout. Teplota je ústředním pojmem termiky a klíčovou veličinou pro popis tepelných jevů. Projevuje se i v mnoha dalších fyzikálních jevech a závisí na ní mnohé makroskopické mechanické, elektromagnetické i chemické vlastnosti látek. Termodynamickou teplotu je zvykem označovat T (K) a Celsiovu t (°C).

Vzájemný vztah stupnic je

$$T = T_0 + t = 273,16 + t \quad . \quad (6)$$

6.1.1 MĚŘENÍ TEPLOTY

K měření jednotlivých teplot při zjišťování charakteristik turbodmychadla byly použity plášťové K termočlánky MTC 11 od české firmy Mavis (Obrázek 14). Výstupním signálem snímače je termoelektrické napětí úměrné k měřené teplotě (měří se změna napětí, která je závislá na změně odporu).



Obrázek 14 K termočlánky MTC 11

Parametry:

Tabulka 1 parametry teplotních snímačů [21]

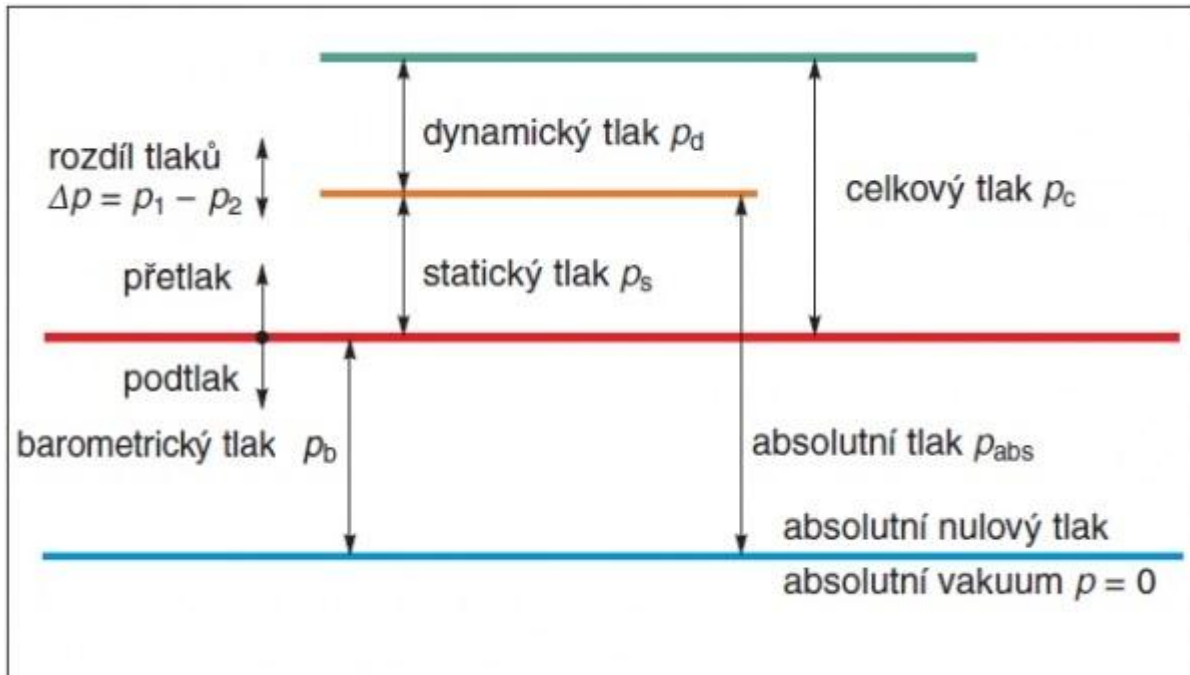
Měřicí rozsah	-40 ... 1150 °C
Průměr pláště	≤ 3 mm
Materiál pláště	Inconel 600 (2.4816)
Provedení hlavice	s pevně připojeným kompenzačním vedením
Další	volitelná jmenovitá délka snímače
	ohebné (tvarovatelné) tělo snímače
	volitelné provedení měřicího konce
	volitelný typ a délka kompenzačního vedení
	třída přesnosti 1

6.2 TLAK

Tlak je fyzikální veličina, vyjadřující poměr velikosti síly F [N], působící kolmo na rovinnou plochu S [m²]

$$p = \frac{F}{S} \quad . \quad (7)$$

Hlavní jednotkou tlaku v soustavě SI je pascal. Hodnota tlaku se obvykle udává proti dvěma základním vztažným hodnotám, a to k absolutnímu nulovému tlaku nebo k barometrickému tlaku (tlak vzduchu v daném místě měření), anebo se měří rozdíl (diference) tlaků, z nichž žádný se neshoduje s barometrickým tlakem.



Obrázek 15 Definice tlaků [23]

Definice tlaků:

- **absolutní tlak** – tlak měřený od absolutní tlakové nuly
- **barometrický tlak** – tlak vzduchu v daném místě měření
- **přetlak** - měří se od barometrického tlaku, jeho hodnota je vyšší, než je hodnota barometrického tlaku
- **podtlak** - měří se od barometrického tlaku, jeho hodnota je nižší, než je hodnota barometrického tlaku
- **celkový tlak** – je roven součtu dynamického a statického tlaku
- **dynamický a statický tlak** - součet statického a dynamického tlaku je konstantní (Bernoulliho rovnice), a proto, pokud se proud vzduchu nepohybuje, je statický tlak maximální a dynamický tlak nulový.

V případě pohybu pak stoupá dynamický tlak a statický o tutéž hodnotu klesá. S rostoucí rychlostí roste i dynamický tlak.[23]

Změna dynamického tlaku může sloužit k měření rychlosti průtoku (Pitotova trubice)

$$p_d = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (8)$$

kde

ρ je střední hustota proudícího média [kg/m³]

w je rychlost proudění [m/s].

6.2.1 MĚŘENÍ TLAKU

K měření tlaku byly použity piezodoporové snímače tlaku od firmy Kistler. Snímač s označením Kistler 4007BA5FS (Obrázek 16) byl použit na „chladnější“ straně turbodmyhadla a snímač s označením Kistler 4049A10S s integrovaným vodním chlazením (Obrázek 17) byl použit na „teplejší“ straně turbodmyhadla.



Obrázek 16 Snímač Kistler 4007BA5FS



Obrázek 17 Snímač Kistler 4049A10S

Tyto snímače tlaku využívají plně aktivní čtyři ramena (Wheatstone most). Ve snímačích využívající Wheatstoneový můstek je implantovaný prvek umístěný v měřicím křemíku pro generování elektrického signálu, který je úměrný aplikovanému tlaku.

Tabulka 2 Technická data – typ 4007BA5FS [22]

Rozsah měření	bar	0 ... 5	0 ... 20
Přetížení	bar	15	30
Napájecí zdroj	mA	1	
Výstupní signál	mV	60 (nominální)	
Hystereze	% FSO	< 0,2	
Linearita	± % FSO	< 0,2	
Min./max. teplota	°C	-40 ... 200	
Frekvence	kHz	>100	
Citlivost zrychlení	mbar/g	< 0,1	
Utahovací moment	N.m	1,5 ... 2,5	
Hmotnost	g	50	
*FSO = Full-Scale Output (angl. překlad: z měřicího rozsahu)			

Tabulka 3 Technická data – typ 4049A10S s integrovaným vodním chlazením [22]

Rozsah měření	bar	0 ... 5	0 ... 10
Přetížení	bar	15	25
Výstupní signál	mV	100 (nominální)	
Linearita	% FSO	$\leq \pm 0,1$	
Referenční teplota	°C	60	
Teplota senzoru, min./max.	°C	0/120	
Frekvence	kHz	>60	

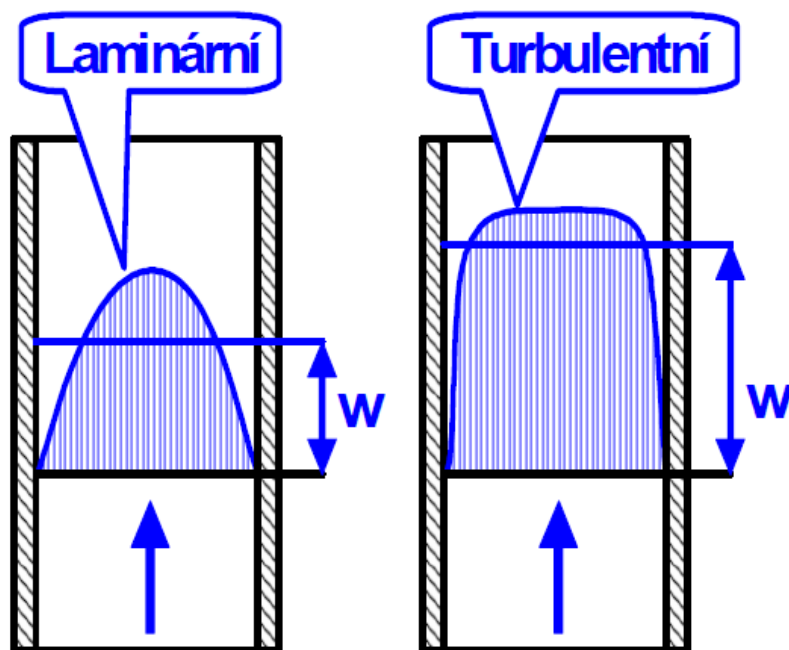
Požadovaný průtok chladicí kapaliny	l/min	$\geq 0,3$
Montážní moment senzoru	N.m	20
Hmotnost (bez konektoru a kabelu)	g	30
*FSO = Full-Scale Output (angl. překlad: z měřicího rozsahu)		

6.3 PRŮTOK

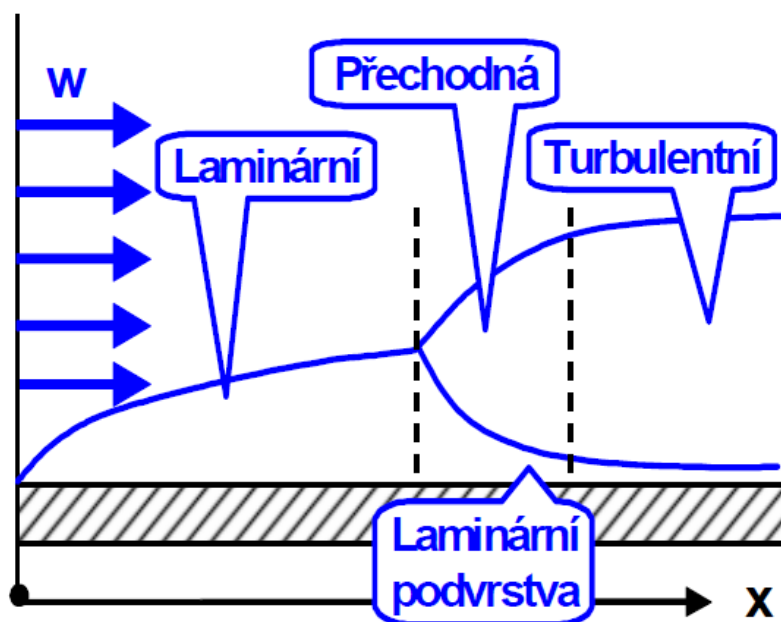
Při testování turbodmychadel jsou průtoky vzduchu měřeny na bázi hmotnostní metodiky. Veškerá proudění plynných medií jsou měřena hmotnostními průtokoměry. Tato práce se bude zabývat hmotnostním průtokoměrem pro kompresorovou stranu turbodmychadla.

6.3.1 TYPY PRŮTOKU

Průtok můžeme rozdělit na laminární a turbulentní. O laminárním či turbulentním průtoku vždy rozhoduje Reynoldsovo číslo. Všechny použité metody měření (teplota, tlak, průtok) jsou v našem případě měřeny za předpokladu laminárního proudění.



Obrázek 18 Typy průtoku [24]



Obrázek 19 Vliv Reynoldsova čísla na typ průtoku [24]

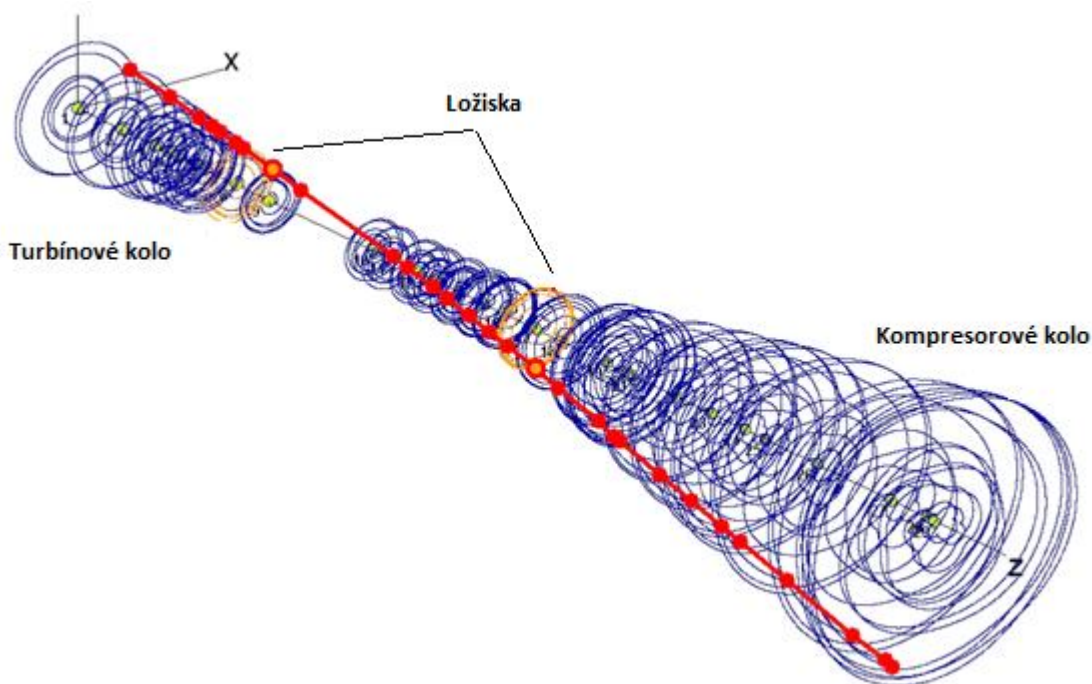
6.3.2 MĚŘENÍ PRŮTOKU

K měření hmotnostního průtoku bylo použito měřicí zařízení, které je součástí měřicího zařízení SuperFlow FS-902. Hmotnostní průtokoměr je založen na principu hot-film anemometrie. Referenční vyhřívaná plocha je proudem vzduchu ochlazována. Změna výkonu pro vyhřátí referenční plochy je úměrná velikosti proudění. Na základě tohoto principu umožňuje přímé stanovení hmotnostního průtoku při dané změně teploty média. Vezmeme-li v úvahu standardní hustotu plynného média, můžeme přímo určit standardní objemový průtok, a to bez dalších kompenzací tlaku a teploty.

7 MĚŘENÍ VIBRACÍ TURBODMYCHADLA

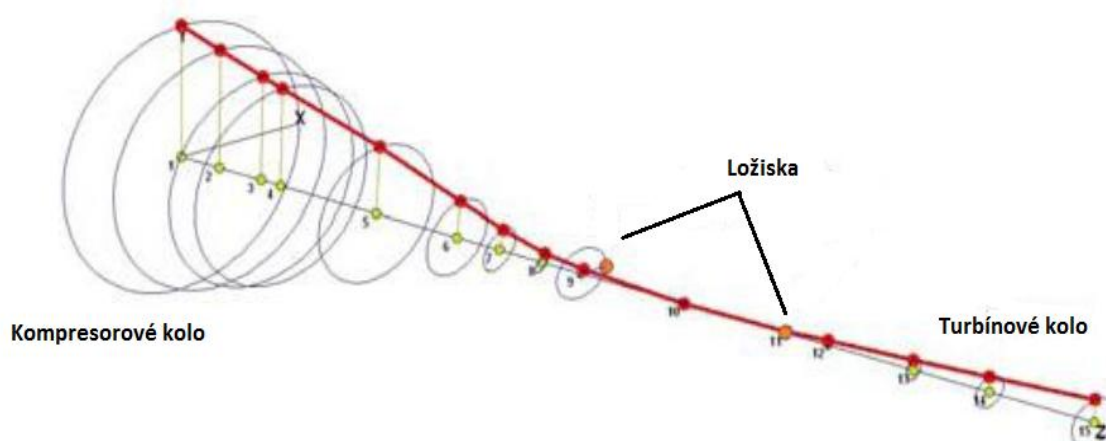
Zdrojem největších vibrací turbodmychadla je bezpochyby rotorová soustava. To je dáno jednak její vysokou rychlostí otáčení, dále velkými změnami teplot a tím pádem teplotní dilatací jednotlivých dílů a také způsobem uložení, kdy se nejčastěji používají kluzná ložiska, která nemají přímý kontakt. To klade jednak velké požadavky na kvalitu mazacího oleje (správné složení, kvalitní distribuce při všech motorových režimech, čistota) a také na kvalitu výroby těchto ložisek. Také rychlé vypnutí motoru po velké zátěži může způsobit „zapékání“ oleje ve žhavých ložiskách, které se postupně zanášejí a tím zvyšují tření a následně vibrace. Proto se doporučuje ponechat motor po velké zátěži běžet pár minut na volnoběh a tím docílit zchlazení oleje v ložiskách.

Podle [] se rotorová soustava může obvykle nacházet ve dvou stavech nestability. V prvním případě dochází ke kuželovému subsynchronnímu pohybu, kdy se turbínové a kompresorové kolo pohybují po kružnicích kolem rovnovážné polohy (Obrázek 20). Tento pohyb je nezávislý na rychlosti otáčení a nastává obvykle v celém otáčkovém spektru.



Obrázek 20 Kuželový subsynchronní pohyb rotoru [10]

Naopak druhý stav nestability se objevuje až při vyšších otáčkách (40 000 ot/min a výše) a je na nich přímo závislý. Dochází k synchronnímu kuželovému pohybu s dominantní kompresorovou stranou (Obrázek 21). To způsobuje namáhání hřídele na ohyb a také větší namáhání kompresorového ložiska.



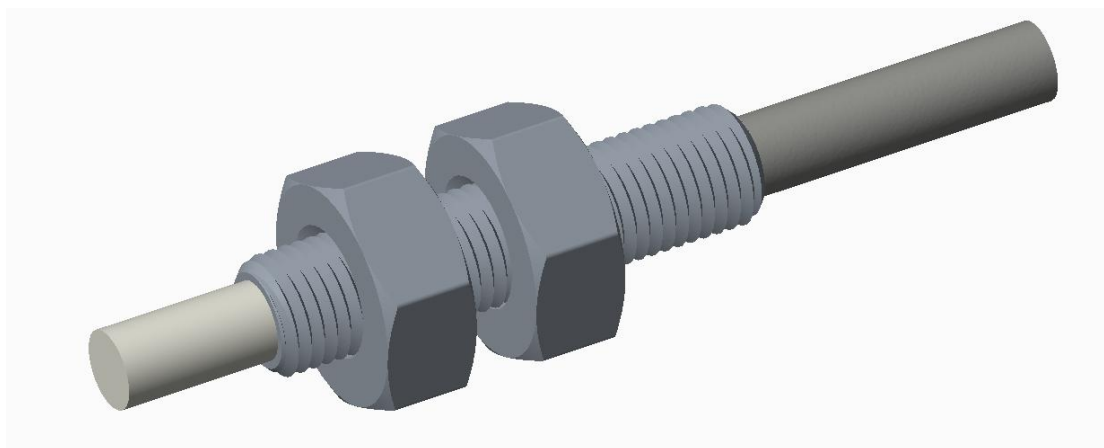
Obrázek 21 Synchronní kuželový pohyb rotoru [10]

7.1 PARAMETRY POUŽITÝCH SNÍMAČŮ

Pro měření vibrací rotorové soustavy turbodmychadla bylo použito snímačů od firmy Micro-Epsilon s označením Eddy NCDT 330x (bezkontaktní snímače). Systém měření funguje na bázi vířivých proudů, aniž by došlo k fyzickému kontaktu. Používá se pro měření na objektech sestávající z elektricky vodivých materiálů, které mohou mít feromagnetické nebo non-feromagnetické vlastnosti.

Vysokofrekvenční střídavý proud protéká cívkou, která je zalitá v krytu čidla. Elektromagnetické pole z cívky indukuje vířivé proudy v elektricky vodivý měřicí objekt, kde střídavý proud mění odpor cívky. Tato změna impedance dodává elektrický signál úměrný vzdálenosti měření objektu od senzoru. Optimální přesnost se dosahuje pro všechny kovové měřicí objekty a každé montážní prostředí.

Výstupem měření je napětí, tak které odpovídá vzdálenosti kovového předmětu od čela čidla.



Obrázek 22 Polohový senzor Micro-Epsilon

Mezi základní parametry takovýchto snímačů pak patří rozsah měření, linearita, frekvenční a teplotní rozsah a také váha samotného snímače, neboť pro správné měření vibrací je zapotřebí dodržet pravidlo, že váha snímače musí být minimálně 10x menší než samotný měřený vzorek.

Pro samotné měření byly použity snímače s modelovým označením EU 05. Shrnutí jeho vlastností můžeme vidět v Tabulka 4.

Tabulka 4 Technická data [25]

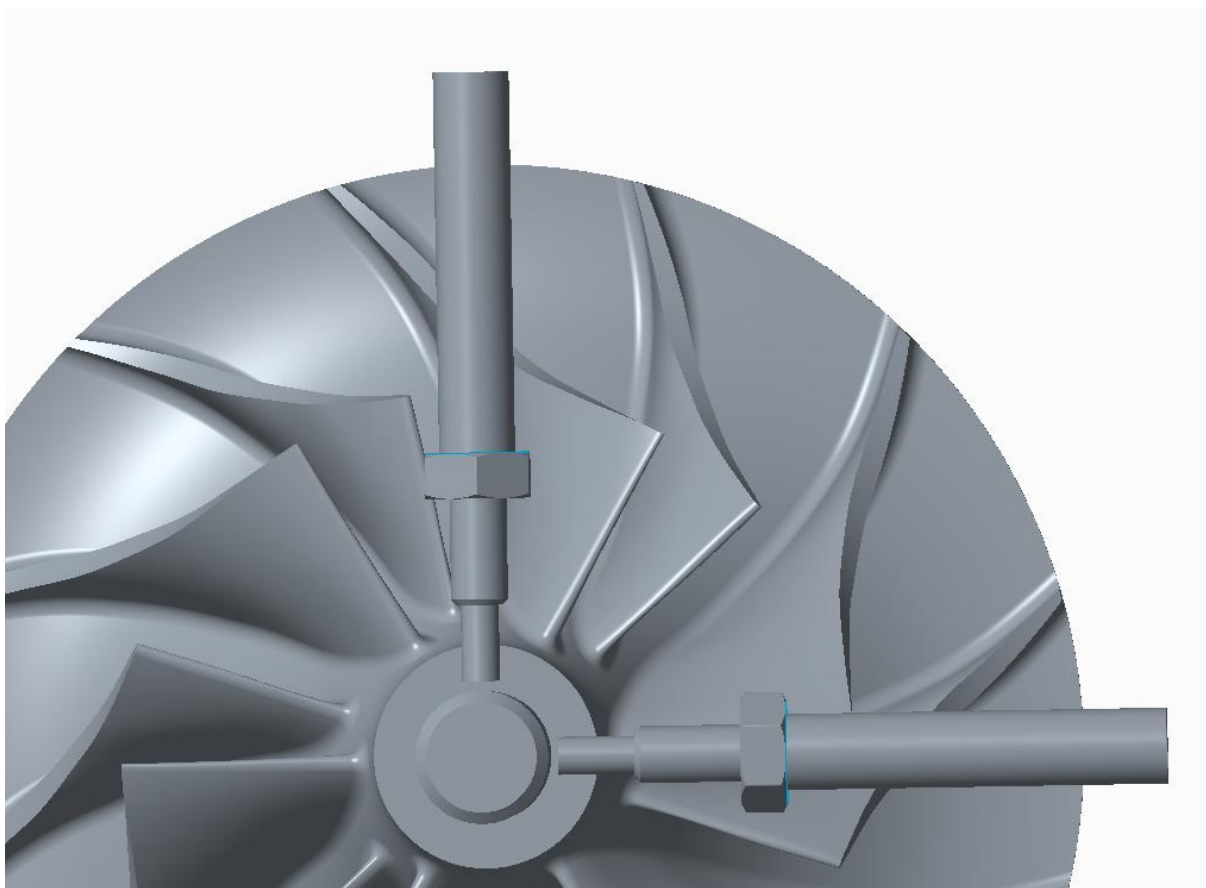
Měřicí zařízení	model	DT3300
	napájecí zdroj	± 12 VDC / 100mA, 5.2 VDC / 220mA
Senzor		EU 05
Rozsah měření	mm	0.5
Linearita	μm	± 1
Řešení	do 25 HZ	≤ 0.01 % FSO
	μm	0.05
	do 2.5 kHz	≤ 0.01 % FSO
	μm	0.05
	do 25/100 kHz	≤ 0.02 % FSO
	μm	1
Frekvenční odezva		25 Hz/ 2500Hz / 25 kHz / 100 kHz (-3db)
Teplotní kompenzace		10 ... 100 °C
Měřicí teplota	senzor/kabel	-40 ... 200 °C
	měř. zařízení	5 ... 50 °C
Teplota skladování	senzor/kabel	-25 ... 150 °C
	měř. zařízení	-25 ... 75 °C
Délka kabelu		3 m (± 0.45 m) – volba: do 15 m
Výstupní signál	volitelně: 0...5 V, 0...10 V, ± 2.5 V, ± 5 V, ± 10 V, min. zatížení 1 kOhm 4...20 mA	
Elmag. kompatibilita	DIN EN 61326-1 : 2006 – 10 a DIN 61326-2-3 : 2007 - 05	
Měřicí funkce	koncové snímače, Auto – Zero funkce, amplituda, maximum, minimum, průměr, možnost uložení až 3 konfigurací, kalibrace	

*FSO = Full-Scale Output (angl. překlad: z měřicího rozsahu)

7.2 NÁVRH UMÍSTĚNÍ POLOHOVÝCH SNÍMAČŮ

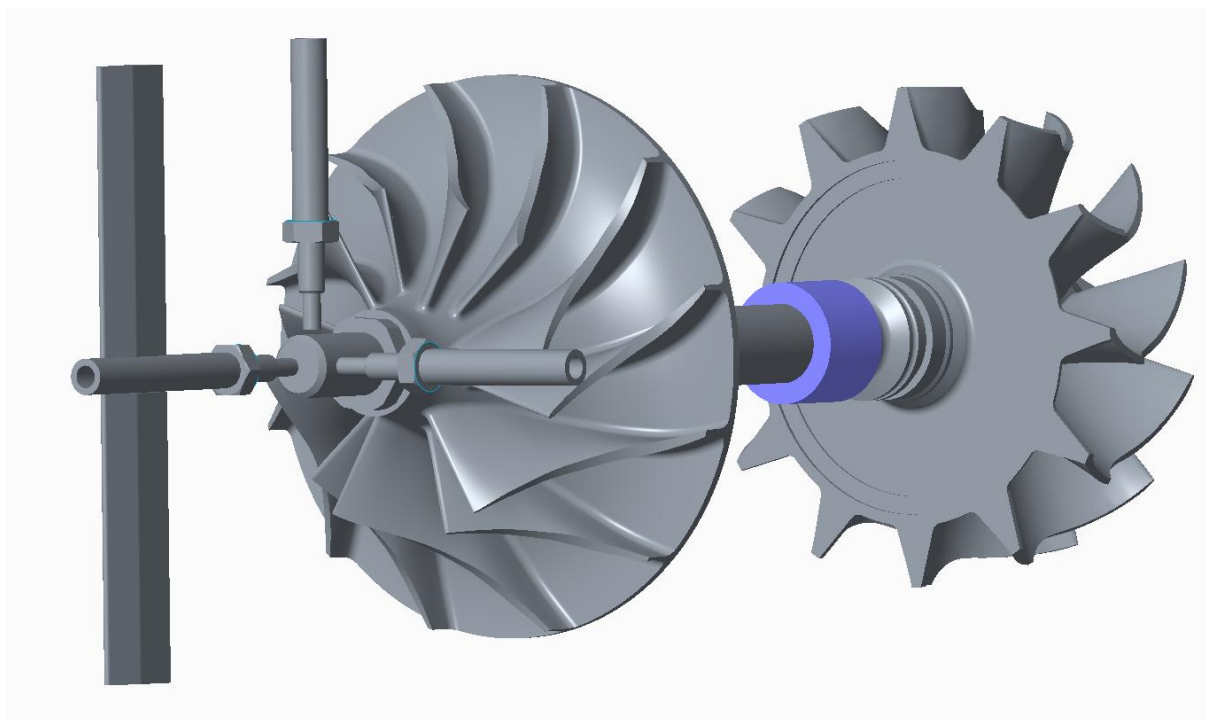
Jak již bylo zmíněno výše, pro měření vibrací turbodmychadla bylo použito třech snímačů od firmy Micro-Epsilon s označením Eddy NCDT 330x (typ EU 05). Každý z těchto tří snímačů měří vychýlení rotoru turbodmychadla v jiné ose souřadného systému.

První dva snímače určené pro měření vibrací v ose x a y jsou umístěné kolmo k rotoru turbodmychadla. Tyto senzory jsou zašroubovány do trubky s vnitřním závitem a zajištěny kontra maticí proti pohybu snímače. Samotná trubka se snímačem je vložena do předem vyvrtané díry v kompresorové části turbodmychadla (Obrázek 23).



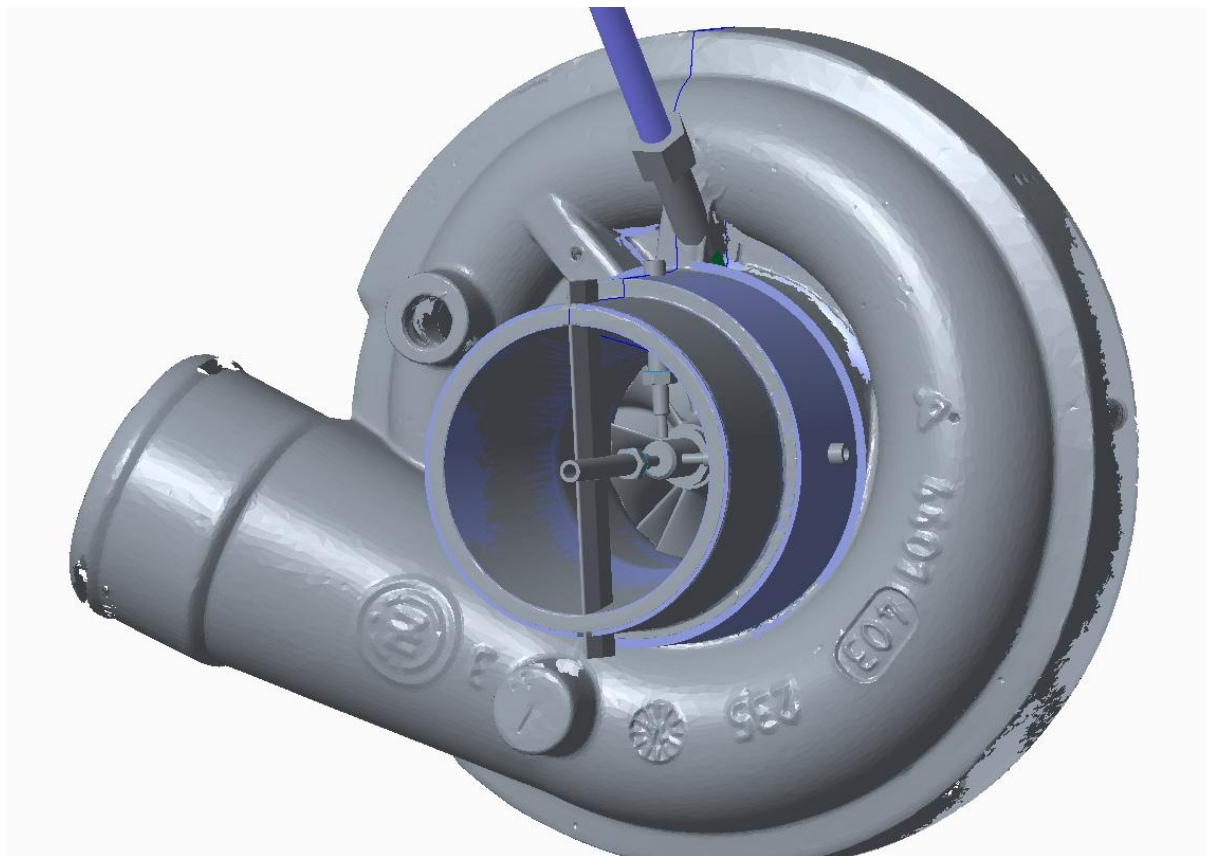
Obrázek 23 Umístění polohových snímačů v ose x a y

Třetí snímač slouží k zachycení vibrací rotoru turbodmychadla v axiálním směru, tedy v ose z. Tento senzor je také zašroubován do trubky s vnitřním závitem a zajištěn kontra maticí. Trubka se snímačem je umístěna rovnoběžně se samotným rotorem a jsou k ní přivařeny „křídla“ pro přichycení ke kompresorové části turbodmychadla. Tyto „křídla“ mají aerodynamický tvar, aby měly co nejmenší odpor vzduchu a nebránily tak k nasávání vzduchu do turbodmychadla.



Obrázek 24 Umístění polohového snímače v ose z

Z důvodu správné zástavby všech snímačů, bylo zapotřebí provést sken skříně kompresoru pomocí bezkontaktního 3D skeneru, který je na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství k dispozici.



Obrázek 25 Sken skříně kompresoru

8 TVORBA MĚŘICÍHO PROGRAMU

Pro vlastní měření byla zvolena hardwarová platforma cRIO společně s grafickým programováním v prostředí LabVIEW od společnosti National Instruments. Toto řešení poskytuje skvělou vzájemnou komunikaci mezi samotným programem a měřicími kartami. Dále poskytuje ucelenou soustavu pro sběr dat a tvorbu vlastních uživatelských prostředí, přičemž zachovává velkou variabilitu a rozšiřitelnost.



Obrázek 26 Logo programu LabVIEW

8.1 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ NI cRIO

Pro naše měření byl zvolen systém od firmy National Instruments cRIO. Samotný cRIO systém se skládá ze zdroje napětí, chlazení, komunikační sběrnice, sloty - připojení dalších modulů a rychlým FPGA polem. Poslední a nejdůležitější částí jsou měřicí karty, které se vkládají do jednotlivých slotů. Těchto měřicích karet existuje velké množství, od vstupně-výstupních karet (různý počet analogových a digitálních vstupů), přes komunikační karty (např. protokoly CAN, PROFIBUS).



Obrázek 27 Řídící a měřicí počítač NI cRIO [26]

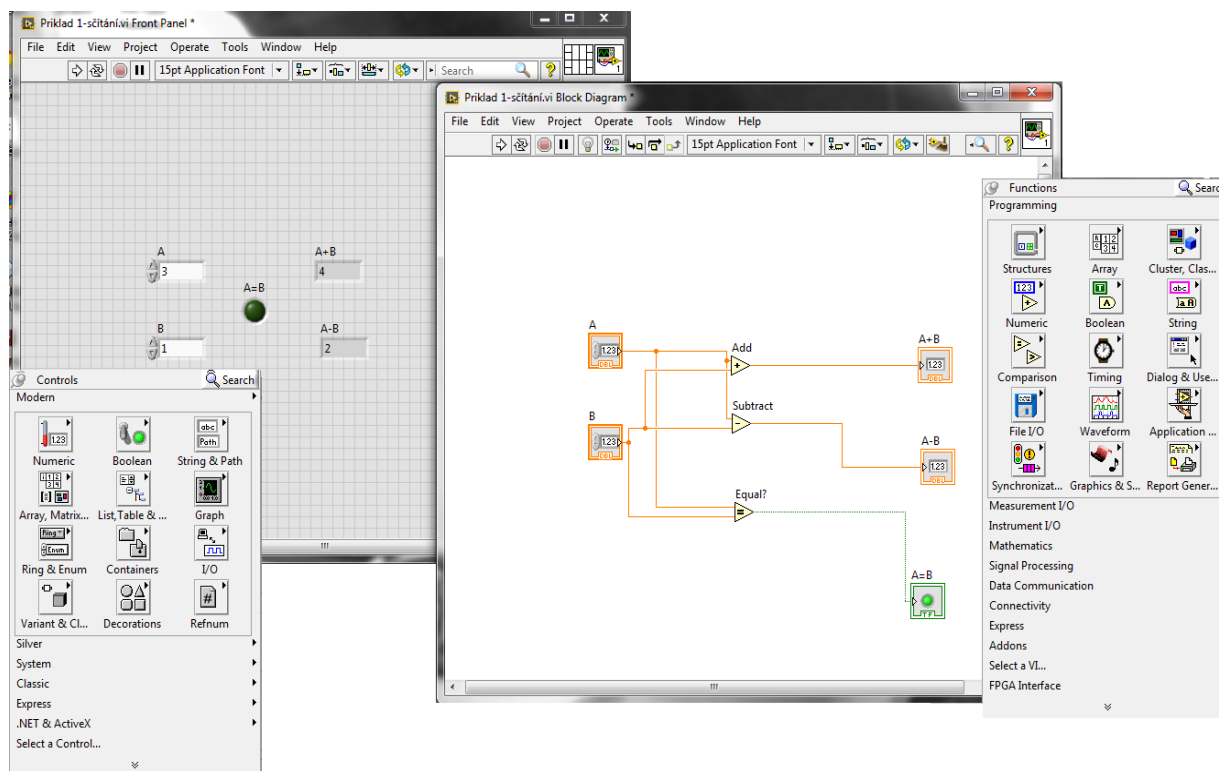
8.2 PROGRAM LABVIEW

LabView je software pro řízení experimentů, sběr dat z měřicích karet, kamer atd. a zpracování těchto dat v reálném čase. Prostředí LabVIEW, někdy nazývané též jako G-jazyk (tedy „grafický“ jazyk), je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů různé složitosti, ale také k programování složitých systémů.

Hlavním cílem virtuální instrumentace zahrnuté v programu LabView je nahrazení technických prostředků virtuálním řešením za přispění programových prostředků a zejména pak grafickými a vizuálními prostředky a zprostředkovat tak maximální názornost. Toto řešení umožňuje rychlé navrhování nových aplikací i provádění změn v konfiguraci.

Po samotném spuštění programu LabView vybereme z nabídky položku *New VI* a ocitneme se v samotném vývojovém prostředí (Obrázek 28). Každé VI se skládá ze dvou částí: Z uživatelského rozhraní, kterému se v terminologii LabVIEW říká **čelní panel VI** a z **blokového diagramu**, který je zdrojovým kódem VI.

Tvorba samotného programu spočívá v jednoduchém přetahování grafických objektů nebo funkcí (palety *Controls* a *Functions*) z knihoven na pracovní plochu programu. Zdroje dat, funkce a jednotlivé výstupy se pak spojí dráty (symbol cívky s nití) reprezentující datový tok, přičemž je možné přidávat různé rozhodovací funkce (např. IF) nebo zahrnout část kódu do smyčky (např. FOR nebo WHILE).



Obrázek 28 Příklad uživatelského prostředí

Výsledný program je poté možné zkompileovat do jednoho spustitelného souboru, případně připravit celou instalaci. Možné je také program nahrát do nabízeného realtime kontroléru a následně jej nechat běžet automatizovaně bez zásahu uživatele. Díky velmi kvalitní podpoře ze strany National Instruments, kdy přímo samotný program LabVIEW obsahuje několik desítek základních příkladů a další tisíce je možné nalézt na webových stránkách, je tato platforma doporučována jak naprostým začátečníkům, tak i pokročilým tvůrcům, neboť díky velkému množství funkcí a možnosti propojení není problém ani tvorba měřících nebo ovládacích programů se stovkami vstupů a výstupů, nebo se složitými a časově náročnými výpočty.

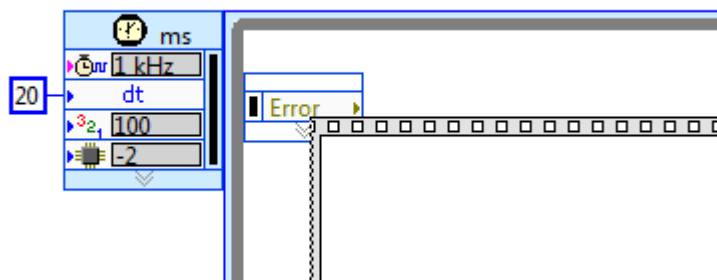
8.3 KONSTRUKCE MĚŘÍCIHO PROGRAMU

Programování softwaru jsem rozdělil do několika částí. Vývoj programu probíhal v softwaru společnosti National Instruments, v softwaru LabVIEW. Tento programovací software neexistuje v české jazykové mutaci, z tohoto důvodu jsem přizpůsobil stavbu a popis jednotlivých schémat ve zdrojovém kódu do anglické podoby.

Zdrojový kód je složen z několika programových struktur typu Timed Loop. Každá z těchto struktur umožňuje běh jednotlivé smyčky programu. Tato programová stavba zajišťuje rychlou orientaci v jednotlivých sekcích programu, minimalizuje nároky na výkon počítače a umožňuje velmi rychlou modifikaci zdrojového kódu dle našich požadavků.

8.3.1 NAČÍTÁNÍ EXTERNÍCH HODNOT DO PROGRAMU

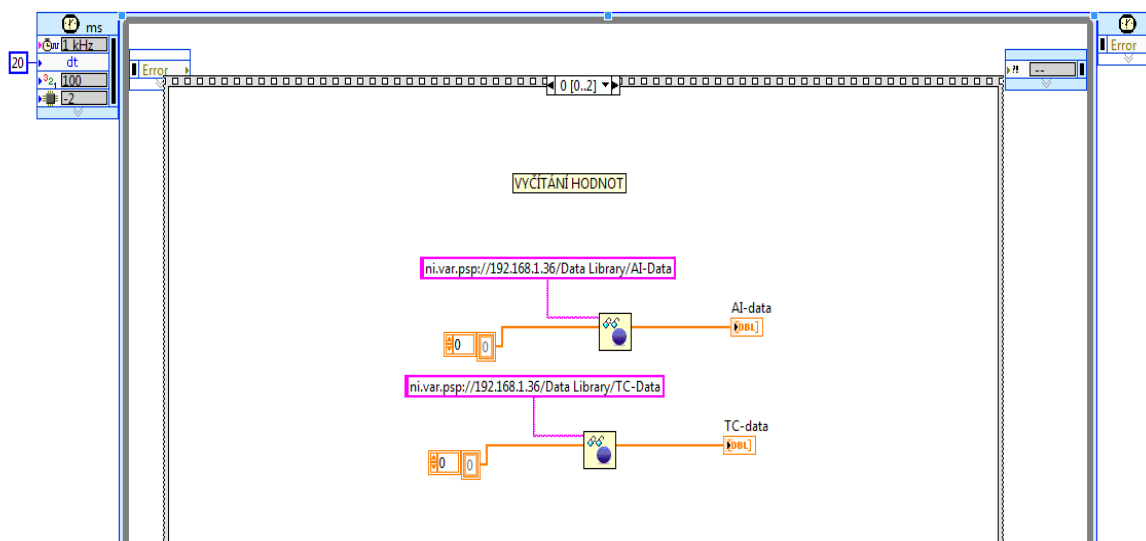
V první fázi tvorby programu bylo zapotřebí vytvořit část programu, který by dokázal načíst příslušný tok dat (data sdílená pomocí síťových sdílených proměnných). Načítání příslušných hodnot do programu bylo realizováno pomocí místní počítačové sítě ústavu Automobilního a dopravního inženýrství. Pro načtení hodnot bylo použito funkce *Functions-Data Communication-Shared Variable-Read Variable*. Nastavená frekvence vyčítání hodnot byla 50 Hz (smyčka po 20 ms). (Obrázek 29)



Obrázek 29 Nastavení parametrů smyčky Timed Loop

Pomocí vstupu *Shared Variable refnum in* určíme cestu k příslušnému souboru s hodnotami. Datový typ vyčítaných hodnot zvolíme pomocí vstupu *Data type* a výsledné hodnoty zobrazíme pomocí výstupu *Data out*.

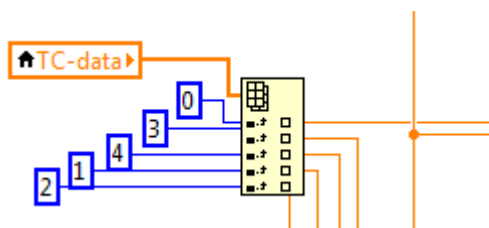
Kód načítací struktury je následující:



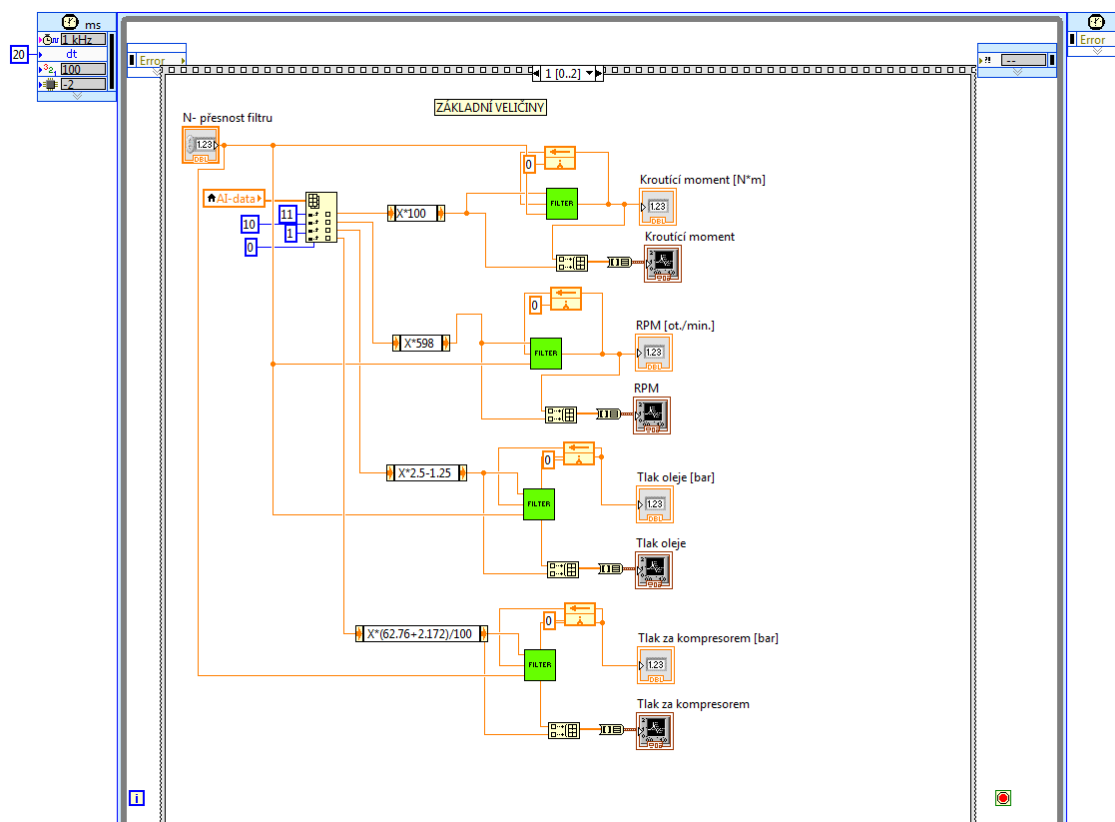
Obrázek 30 Kód vyčítací struktury

8.3.2 ÚPRAVA A ZOBRAZENÍ VYČTENÝCH DAT

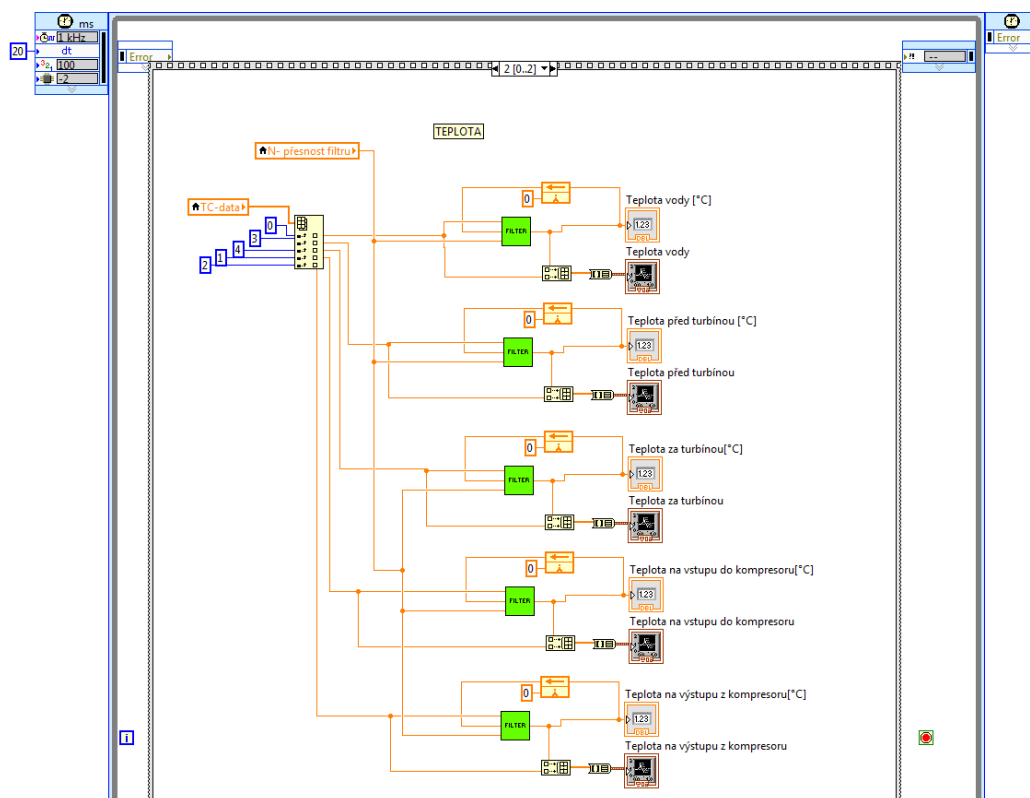
V další fázi programu se pouze vyčítají a inicializují data pro následné grafické zobrazení. Dochází zde k transformaci datového pole, tedy převodu zápisu dat inicializovaných jako řádky do sloupců. Ze všech vyčtených hodnot si zde pomocí funkce *Array-Index Array* vyberu jen některé a s těmito hodnotami budu nadále pracovat (Obrázek 31). V dalším kroku je zapotřebí upravit jednotlivé hodnoty do požadovaného tvaru, což docílíme při použití funkce *Numeric-Expression Node*. Výsledné hodnoty vypíšeme do grafického editoru jako *Numeric Indicator* a zároveň tyto hodnoty vykreslíme do grafu funkcí *Graph-Waveform Chart*.



Obrázek 31 Výběr důležitých vyčítacích hodnot

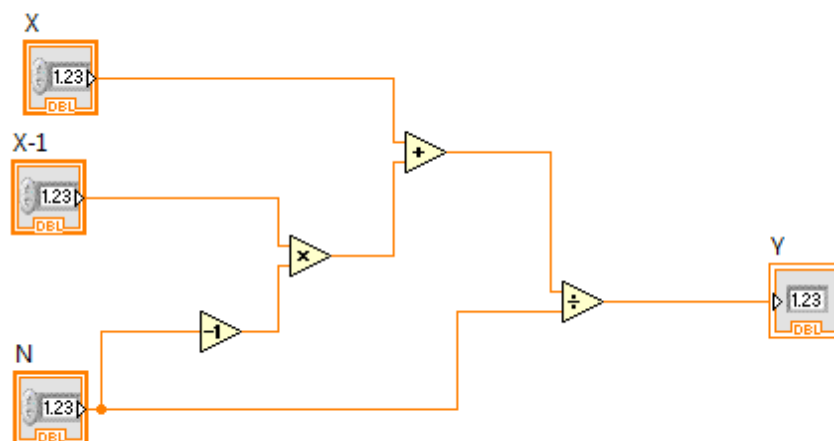


Obrázek 32 Zobrazení základních veličin



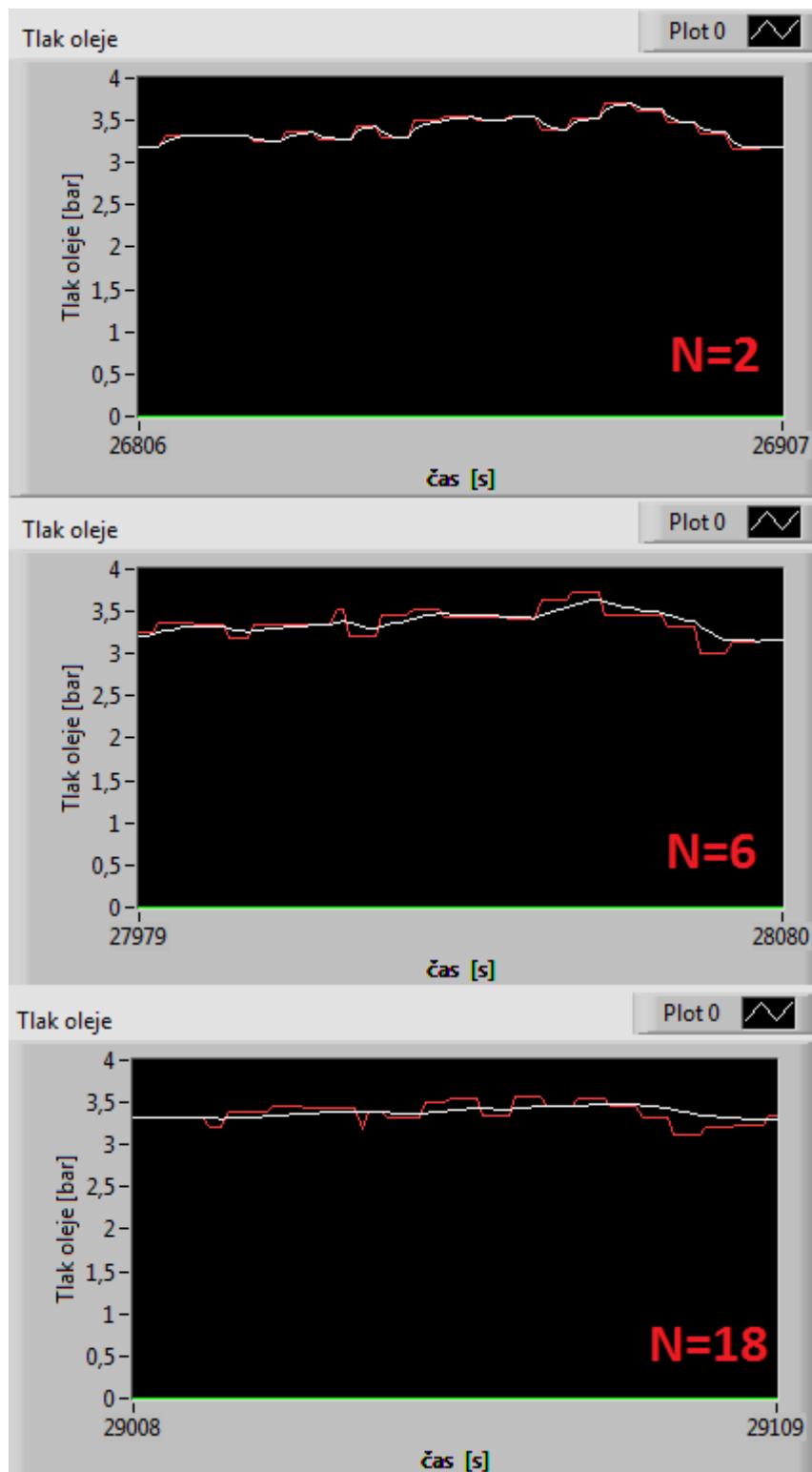
Obrázek 33 Zobrazení jednotlivých teplot

Pro hladší vykreslení průběhů jednotlivých hodnot byl vytvořen podprogram (exponenciální průměrování) s názvem Filter (Obrázek 34), který má za úkol filtrovat měřené hodnoty dle naší zvolené přesnosti. Výhoda tohoto filtru je v tom, že pracuje v reálném čase bez nutnosti pamatování celého měřeného průběhu. Hodnota přesnosti filtru je volena v grafickém editoru za pomoci funkce *Numeric-Numeric Control*. Hodnota přesnosti filtru je zároveň jeden ze tří vstupů programu Filter. Dalším vstupem jsou samotné doposud nefiltrované vyčtené hodnoty. Třetím, a tedy posledním vstupem jsou vrácené, už zfiltrované hodnoty. Tyto hodnoty jsou vráceny za pomoci funkce *Structures-Feedback Node*.



Obrázek 34 Struktura programu Filter

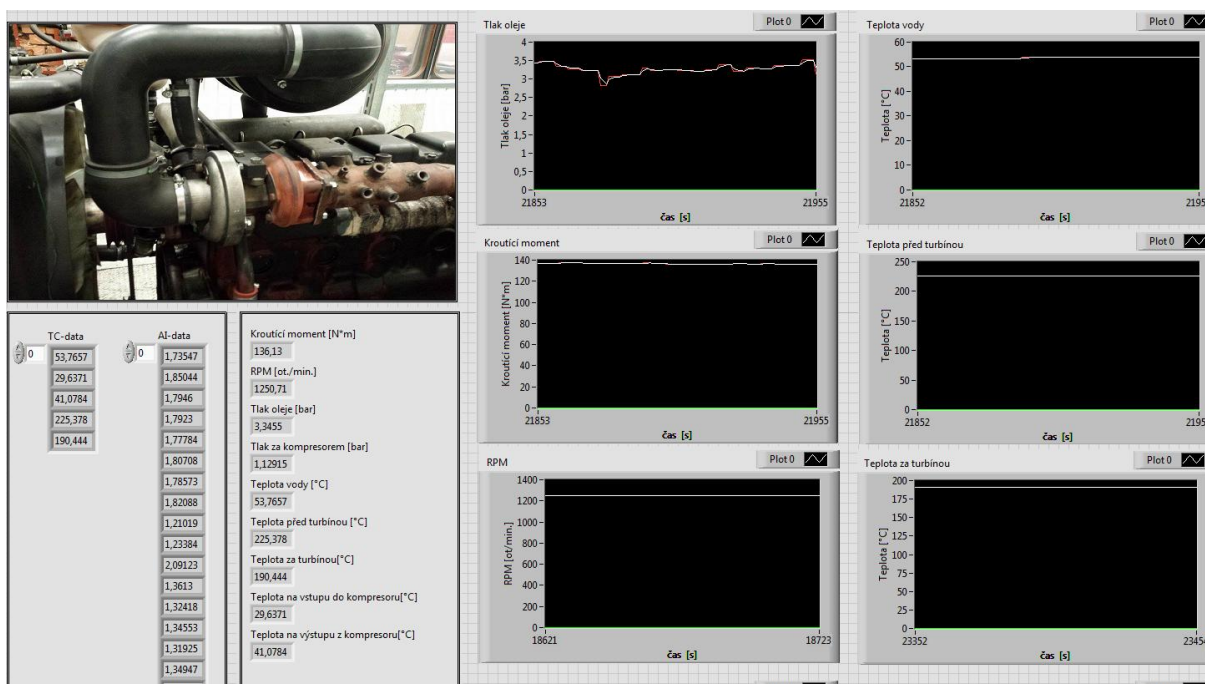
Na (Obrázek 35) můžeme vidět, filtraci měřené veličiny při změně vstupní hodnoty (N-přesnost filtru) podprogramu Filter. Čím větší je tato hodnota, tím hladší je průběh křivky vyčítaných hodnot.



Obrázek 35 Průběh tlaku oleje při různých přesnostech filtru

8.4 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ

Kvalitní uživatelské prostředí jakéhokoliv softwaru je samozřejmostí a vytváří celkový dojem programu. Pro programátora, či vývojáře to v konečné fázi není jednoduchý úkol. K tvorbě uživatelského prostředí jsem přistoupil následovně. V levém horním rohu je umístěn obrázek měřeného turbodmychadla umístěného na motoru Zetor v testovací komoře Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Pod tímto obrázkem jsou vloženy dva rámečky, přičemž jeden z nich obsahuje kompletní vyčtená data (teploty z termočlánků a zbývající měřené veličiny ve formě napětí) a druhý obsahuje jen námi vyfiltrované hodnoty. Pod těmito rámečky je vložen *Numeric Control* pro volbu přesnosti programu Filter, který je popsán výše. V pravé části uživatelského rozhraní jsou umístěny grafy vyfiltrovaných hodnot. V každém z těchto grafů jsou dvě křivky, kde první z nich vykresluje nefiltrované hodnoty (červená křivka). Druhá z těchto křivek vykresluje již zfiltrované hodnoty (bílá křivka). Součástí programu je výstup měřených dat do textového souboru. V dalších letech by bylo vhodné program doplnit řízením zkušebního pracoviště.



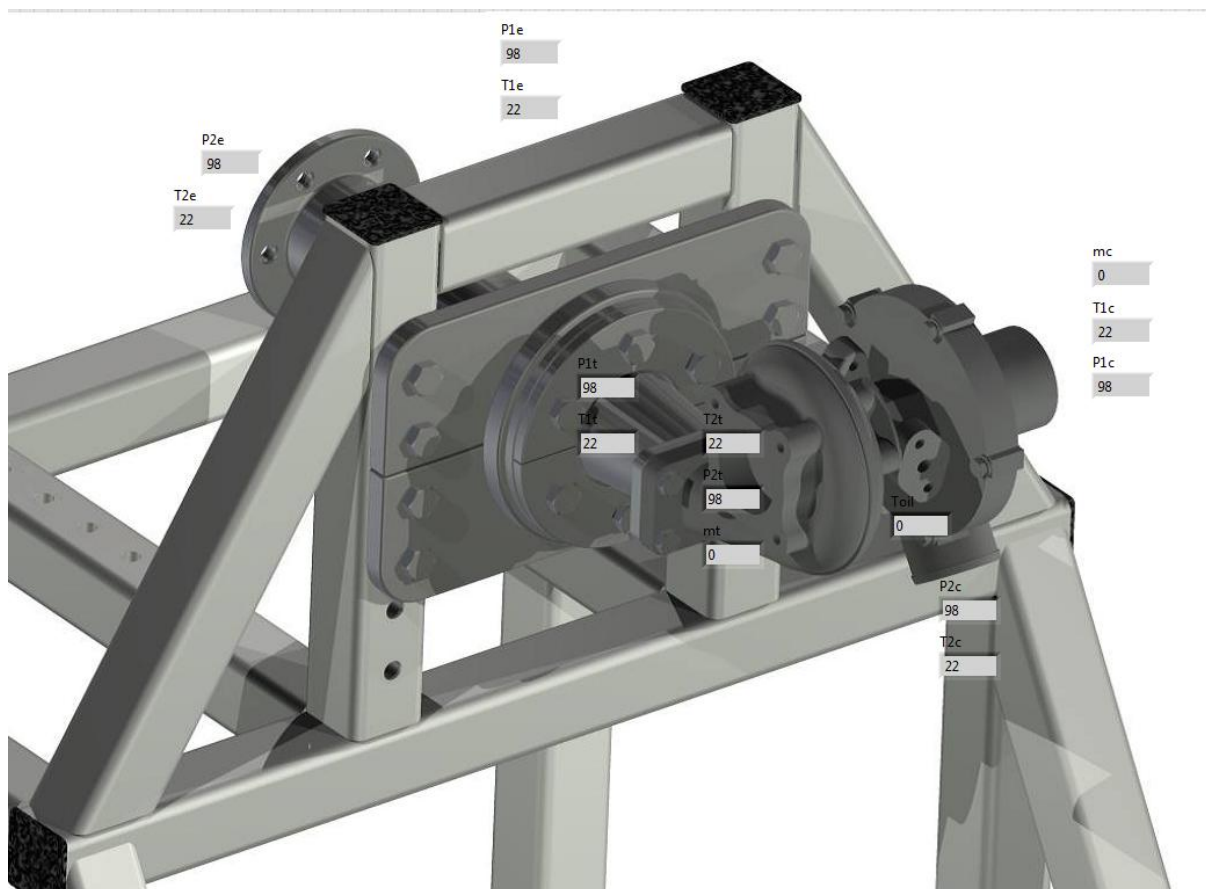
Obrázek 36 Uživatelské prostředí

Turbo_Zetor – Poznámkový blok

Datum D.M.Y	Čas H:M:S.ms	EX_Flow g/s	Int_Flow g/s	p0 kPa	pk1 kPa	pk2 kPa	pt1 kPa	pt2 kPa	tk1 C	tk2 C	tt1 C	tt2 C
4.5.2015	15:26:36.02	0.0	0.0	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	22.5	22.5	22.5	22.5
4.5.2015	15:26:36.04	0.0	0.0	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	22.5	22.5	22.5	22.5
4.5.2015	15:26:36.06	0.0	0.0	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	22.5	22.5	22.5	22.5

Obrázek 37 Ukázka výstupu do textového souboru

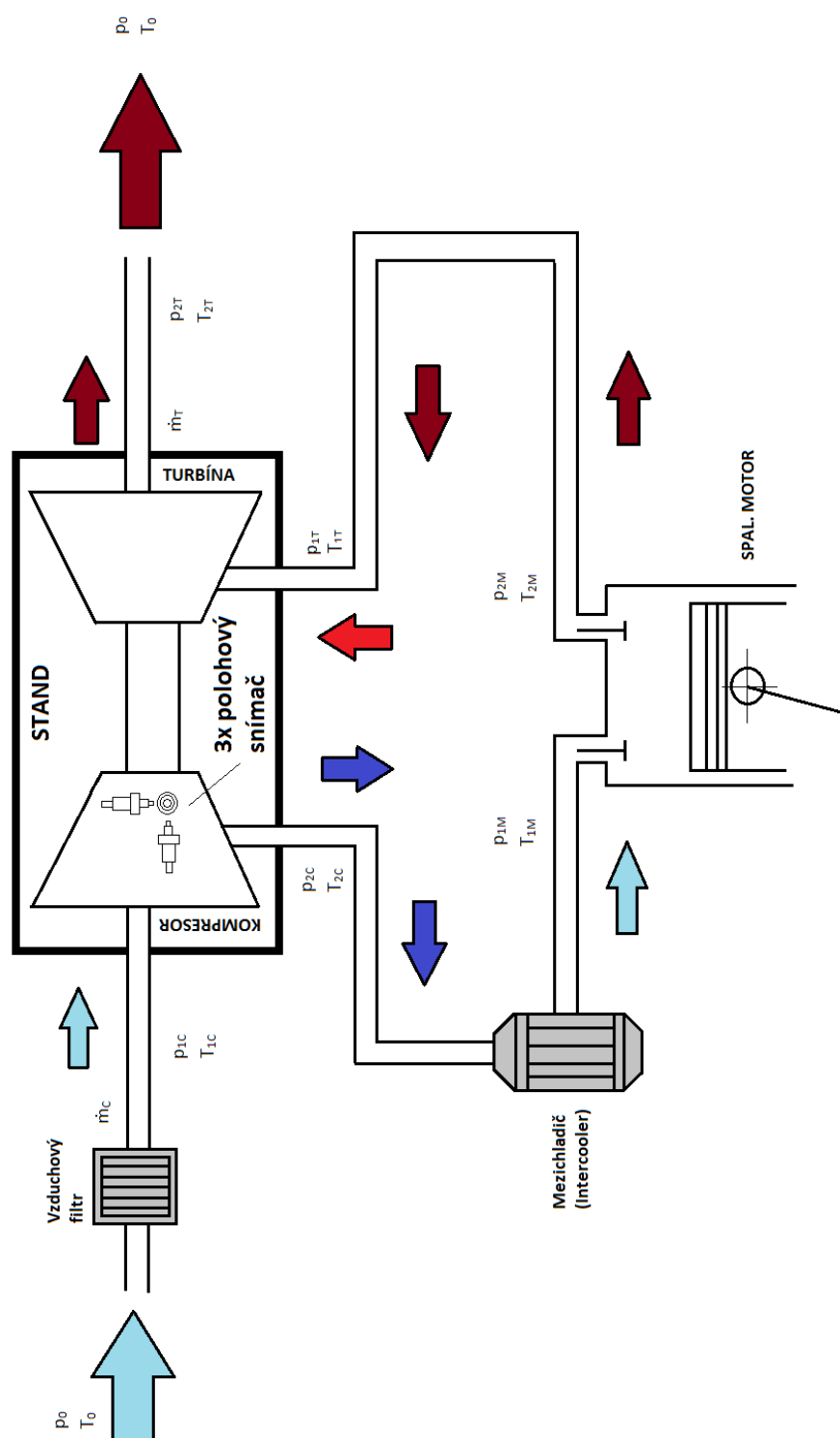
Protože v době psaní diplomové práce nebylo k dispozici funkční stanoviště, byl program odladěn na brzdovém stanovišti Zetor – motor/turbodmychadlo. Zde byla ověřena správná funkčnost a program byl modifikován na budoucí stanoviště.



Obrázek 38 Modifikace měřicího programu (uživatelské prostředí)

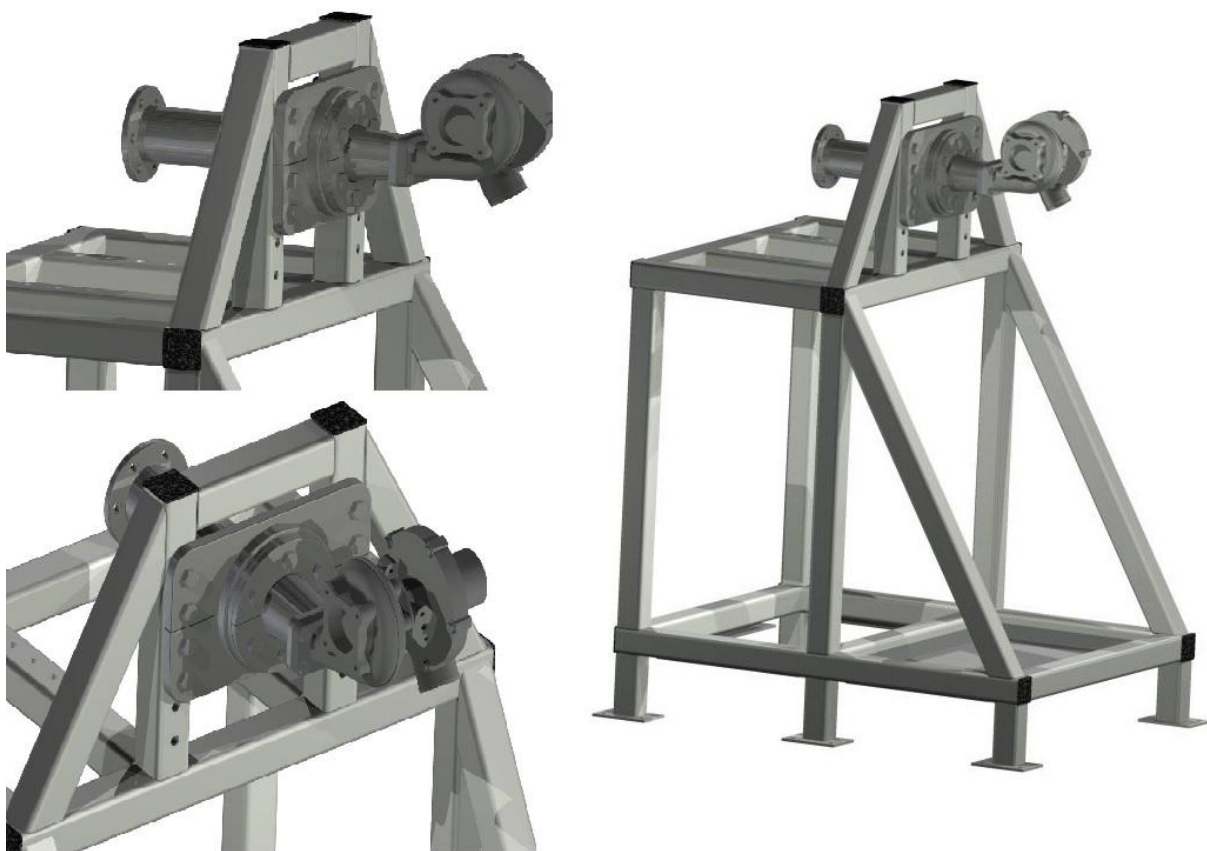
8.5 MĚŘICÍ STANOVIŠTĚ

Pro samotný výpočet turbodmychadla jsou důležité jednotlivé hodnoty teplot, tlaků a hmotnostních toků. Tyto základní veličiny ovlivňují požadované parametry přepřínovaného motoru. Veškeré důležité hodnoty pro náš konkrétní případ jsou vyznačeny ve schématu na Obrázek 39.



Obrázek 39 Schéma měřených veličin

Pohled na měřicí stanoviště:



Obrázek 40 Měřicí stanoviště



Obrázek 41 Měřicí stanoviště - zadní pohled



Obrázek 42 Měřicí stanoviště - současný stav

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit kompletní vybavení pro měření turbodmychadel, které bude zejména využíváno v laboratořích Ústavu automobilního a dopravního inženýrství, fakulty Strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně. Nejdříve bylo zapotřebí provést dostupnou rešerši o turbodmychadlech, zkušebních stanovištích a o různých typech testování turbodmychadel. Následně byly popsány měřené veličiny, díky kterým získáváme jednotlivé charakteristiky částí turbodmychadla. Hodnoty těchto veličin byly získány pomocí snímačů, u kterých byl popsán princip a parametry, včetně jejich vhodného umístění. Dále byla vybrána vhodná hardwarová platforma, včetně měřících karet, a to s ohledem na požadavky měření. Důležitá byla i jednoduchá rozšiřitelnost a univerzálnost systému.

Diplomová práce byla rozdělena na několik jednotlivých částí, z nichž první byl konstrukční návrh stanoviště. Samotný konstrukční návrh byl vytvořen studentem Markem Melicharem, který na tomto projektu také pracoval. Zkušební stanoviště má sloužit zejména pro měření charakteristik turbodmychadla odděleně od spalovacího motoru, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků. Měřící stanoviště je přizpůsobeno i pro měření vibrací a hluku jednotlivých komponent turbodmychadla. K tomu měření je k dispozici v dílnách Ústavu automobilního a dopravního inženýrství protihluková komora, která je pro tuto zkoušku ideální. Při tvorbě měřícího staniště bylo zapotřebí dodržet několik požadavků. Mezi nejdůležitější požadavky patřily celková tuhost stanoviště, snadná manipulovatelnost, optimální rozměry pro převoz do protihlukové komory, možnost uchycení turbodmychadla horizontálním i vertikálním způsobem a mnoho dalších.

V další části práce bylo navrženo umístění jednotlivých snímačů, a to zejména pro měření vibrací rotoru turbodmychadla. První dva snímače, zachycující pohyb ve směru kolmém k rotoru turbodmychadla, jsou osazeny v trubce s vnitřním závitem. Tato trubka je přivařena ke kompresorové části turbodmychadla. Samotný snímač je zabezpečen proti pohybu kontra maticí. Poslední, tedy třetí snímač sloužící k měření pohybu ve směru rovnoběžném s osou rotoru turbodmychadla, je rovněž osazen v trubce s vnitřním závitem, avšak jeho uchycení zde bylo náročnější. Muselo se dbát především na jeho rozměry a tvar, aby nedošlo k omezení průtoku vzduchu do turbodmychadla. Proto byl tento snímač upevněn v kompresorové části turbodmychadla za pomoci aerodynamických křídel, které zajišťovali jeho celkovou stabilitu a tuhost.

Hlavním cílem samotného autora bylo provést dostupné měření a vytvořit obslužné programové vybavení k tomuto měřicímu stanovišti. Měřící program byl vytvořen v programovacím softwaru firmy National Instruments LabVIEW.

V této diplomové práci je uveden popis tvorby programu, který zachycuje jednotlivé kroky vzniku samotných částí programu. V prvním kroku byl obecně popsán postup při tvorbě jedné z funkcí programu, která slouží k načítání dat. Dále proběhla samotná úprava vyčtených hodnot. Je zde také popsán postup pro zobrazení vyčtených dat.

Bylo vytvořeno uživatelské prostředí pro analýzu všech měřených veličin.

Program je plně modulární, takže je možné budoucí přidání dalšího načítacího zdroje, popřípadě vložení uživatelských algoritmů. Je zde také možnost přidat i další analýzy naměřených dat podle požadavků budoucích měření. Samozřejmostí je výstup formou textového souboru.

Při zjišťování potřebných informací k diplomové práci byly využity nejen primární zdroje formou konzultací s vedoucím práce, které sloužily k vypracování samotného jádra práce, ale také odborná literatura a internet.

Diplomová práce byla samotnému autorovi velkým přínosem, zejména v oblasti měření a testování turbodmychadel. Získal jednak nové informace o turbodmychadlech, zkušebních stanovištích a v poslední řadě se naučil pracovat se softwarem LabVIEW.

Byly splněny všechny body zadání.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] PÍŠTĚK, Václav. *Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991, 129 s.
- [2] STONE, Richard. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.
- [3] HEISLER, Heinz. *Advanced Engine Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.
- [4] Hofmann, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory. :Přepřehování spalovacích motorů. / 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1985. 134 s.*
- [5] MACEK, Jan a Vladimír KLIMENT. *Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory: (přepřehování spalovacích motorů)*. Vyd. 4. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006, c1988, 206 s. ISBN 80-01-03529-8.
- [6] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [7] KNOP, P.: *Měření a výkonnostní charakteristiky turbodmychadla* [Bakalářská práce.] Brno: MZLU, ICV, 2013. 71 s.
- [8] NAUNDORF, Detlef and Holger BOLZ. *Turbocharger Test Stand with a Hot Gas Generator for HighPerformance Supercharging Systems* [online]. [cit. 2014-11-20]. Dostupný z WWW:
< http://www.testsystems24.com/uploads/tx_press/MTZ_10_08_Turbocharger_Test_Stand_01.pdf>.
- [9] *Turbocharger testing*. [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupný z WWW:
< <http://www.turbodynamics.co.uk/services/testing/>>.
- [10] MATZAN Eugene, *Detecting Premature Bearing Failure. Machinery Lubrication magazine* [online]. 2007. Dostupný z:
<<http://dyrobes.com/dyrobes/features/>>.
- [11] GUNTER, Edgar J., CHEN, Wen Jeng. *Dynamic analysis of turbocharger in floating bushing bearings*. In ISCORMA-3, Cleveland, Ohio, 19-23 September 2005. [online]. 2005 [cit. 2015-03-05]. Dostupný z:
<http://www.rodyn-inc.com/ISCORMA3_Gunter%26Chen_TurbochargerVer2.pdf>.
- [12] *Turbo speed sensor*. [online]. 2013 [cit. 2015-01-17]. Dostupný z WWW:
< http://www.micro-epsilon.cz/press/publication/pub-en--2013-11_Micro-Epsilon_-_June_2013.pdf>.

- [13] *Vliv přeplňování na výkon spalovacích motorů*. [online]. 04.05.2014 [cit. 2015-01-19]. Dostupný z WWW:
< <http://www.dfens-cz.com/view.php?cislocclanku=2014050405>>.
- [14] *Turbodmychadlo I* [online]. 06.10.2008 [cit. 2014-11-06]. Dostupný z WWW:
< <http://www.autoznanosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html>>.
- [15] *Compressor Maps* [online] [cit. 2015-01-14]. Dostupný z WWW:
< http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/compressor_maps>.
- [16] *Termomechanika* [online] [cit. 2014-10-10]. Dostupný z WWW:
< http://otp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/12_Motory.pdf>.
- [17] *Princip turbodmychadla* [online] [cit. 2014-10-08]. Dostupný z WWW:
< <http://www.flexamiauto.cz/teorie/>>.
- [18] *Konstrukce* [online] [cit. 2014-11-21]. Dostupný z WWW:
< <http://brickweb.wz.cz/technika/turbo.htm>>.
- [19] *Variable nozzle turbine (VNT) or variable geometry turbo (VGT)* [online] [cit. 2014-11-21]. Dostupný z WWW:
< <http://www.fastmotoring.com/index.php/2010/10/variable-nozzle-turbine-vnt-or-variable-geometry-turbo-vgt/>>.
- [20] *Blow off ventil* [online] [cit. 2015-01-07]. Dostupný z WWW:
< <http://tuning-individual.cz/eshop/blow-off-ventil-rs-type-greddy-style-p-23958.html>>.
- [21] *Termočláňkové snímače teploty plášťové* [online] [cit. 2015-01-24]. Dostupný z WWW:
< <http://www.mavis.cz/produkty/plastove-bez-jimky>>.
- [22] *Kistler sensor for pressure measurement* [online] [cit. 2015-01-26]. Dostupný z WWW:
< <http://www.kistler.com/cz/en/products/components/pressure-sensors/>>.
- [23] *Základní pojmy a definice* [online] [cit. 2015-02-11]. Dostupný z WWW:
< <http://www.woehler.cz/cz/hlavni-menu/odborne-informace/obecne/tlak> >.
- [24] *Vznik aerodynamických sil* [online] [cit. 2015-02-14]. Dostupný z WWW:
< <http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>>.
- [25] *Snímače vzdálenosti, měření polohy* [online] [cit. 2015-02-15]. Dostupný z WWW:
< http://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/eddy-current-sensor/eddyNCDT_3300/index.html>.
- [26] *Conference & exhibition releases* [online] [cit. 2015-02-19]. Dostupný z WWW:
< <https://instsignpostconf.wordpress.com/2013/08/08/niweek-national-instruments-redesigns-ni-compactrio-from-the-inside-out/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

BOV	[-]	<i>blow off ventil</i> , přepouštěcí ventil
cRIO	[-]	řídící a měřicí zařízení, které pracuje v reálném čase od firmy NI
Downsizing	[-]	snížování objemu motoru
FSO	[-]	<i>Full-Scale Output</i> , z měřicího rozsahu
Gasstand	[-]	měřicí stanoviště pro testování turbodmychadel
LabView	[-]	software firmy National Instruments
NI	[-]	firma National Instruments
PSI	[-]	<i>pound per square inch</i> , jednotka tlaku
VI	[-]	<i>virtual instrument</i> , vývojové prostředí v programu LabView
VNT	[-]	<i>variable nozzle turbine</i> , variabilní změna sklonu lopatek
Wastegate (WG)	[-]	přívěra obtoku turbínové skříně
$\dot{m}_C$	[kg/s]	hmotnostní tok kompresorem
$\dot{m}_T$	[kg/s]	hmotnostní tok turbínou
p_0	[kPa]	tlak okolí
p_{1C}	[kPa]	absolutní tlak na vstupu do kompresoru
p_{1M}	[kPa]	absolutní tlak na vstupu do motoru
p_{1T}	[kPa]	absolutní tlak na vstupu do turbíny
p_{2C}	[kPa]	absolutní tlak na výstupu z kompresoru
p_{2M}	[kPa]	absolutní tlak na výstupu z motoru
p_{2T}	[kPa]	absolutní tlak na výstupu z turbíny
T_0	[K]	teplota okolí
T_{1C}	[K]	absolutní teplota na vstupu do kompresoru
T_{1M}	[K]	absolutní teplota na vstupu do motoru
T_{1T}	[K]	absolutní teplota na vstupu do turbíny
T_{2C}	[K]	absolutní teplota na výstupu z kompresoru
T_{2M}	[K]	absolutní teplota na výstupu z motoru
T_{2T}	[K]	absolutní teplota na výstupu z turbíny