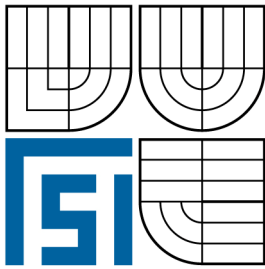


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TURBODMYCHADLA SPALOVACÍCH MOTORŮ TURBOCHARGERS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR HOLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
BRNO 2010

Ing. JIŘÍ ŠKORPÍK, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Holík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Turbodmychadla spalovacích motorů.

v anglickém jazyce:

Turbochargers for internal combustion engines.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se bude zabývat principem, konstrukcí a parametry turbodmychadel používaných k přeplňování spalovacích motorů osobních automobilů.

Cíle bakalářské práce:

- (1) Funkce a význam turbodmychadla používaných u spalovacích motorů.
- (2) Princip činnosti (transformace energie v turbodmychadle), konstrukce a tvary rychlostních trojúhelníků oběžných kol turbodmychadla.
- (3) Základní řady turbodmychadel spalovacích motorů a jejich parametry.

Seznam odborné literatury:

- [1] J. Kadrnožka, Lopatkové stroje, Akademické nakladatelství CERM, 2003, Brno, ISBN 80-7204-297-1.
- [2] J. Macek, V. Kliment, Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory, Vydavatelství ČVUT, 2003
- [3] Katalogy výrobce turbodmychadel.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 22.10.2009

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tématem turbodmychadel spalovacích motorů, nabízí základní systematický pohled na tuto tematiku. Práce je rozdělena do tří hlavních částí. První kapitola se zabývá historií vývoje a užití turbodmychadel. Druhá kapitola se věnuje principu činnosti a transformaci energie v turbodmychadlech. V kapitole třetí jsou zmíněny základní řady turbodmychadel a jejich parametry s důrazem na největší světové výrobce.

Abstract

This bachelor thesis deals with theme of turbochargers for internal combustion engines and shows basic systematic view of this theme. The work is divided into three main chapters. The first chapter deals with historical development and usage of turbochargers. The second chapter attends to working principle and energy transformation in the turbochargers. In the third chapter there are mentioned main types of turbochargers and their parameters and worldwide producers.

Klíčová slova

turbodmychadlo, spalovací motor, přeplňování, transformace energie

Keywords

turbocharger, combustion engine, supercharging, energy transformation

Bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690

HOLÍK, P. *Turbodmyhadla spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

Prohlášení autora o původu práce

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval zcela samostatně a že jsem uvedl všechnu použitou literaturu a jiné podklady.

V Brně dne 25.5.2010

.....
podpis

Poděkování

Rád bych zde poděkoval panu Ing. Jiřímu Škorpíkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za informace a rady poskytnuté v průběhu konzultací. Poděkování za odbornou konzultaci patří také Ing. Jiřímu Klímovi a Ing. Jiřímu Holíkovi.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Historie turbodmychadel.....	9
3. Princip činnosti turbodmychadla	10
3.1 Transformace energie v turbodmychadle	11
3.2 Konstrukce a tvary rychlostních trojúhelníků oběžných kol turbodmychadla	13
3.2.1 Pojem relativní, absolutní rychlost	13
3.2.2 Příklad rychlostního trojúhelníku - axiální turbína.....	14
3.3 Jednotlivé části turbodmychadla.....	15
3.3.1 Turbínové skříně	15
3.3.2 Ložiskové skříně	16
3.3.3 Kompresorové skříně.....	16
3.3.4 Rotory	17
3.3.5 Rozváděcí kola.....	17
3.3.6 Ložiska.....	18
3.3.7 Kompresorová kola.....	18
3.3.8 Turbínová kola.....	19
4. Základní řady turbodmychadel spalovacích motorů a jejich parametry.....	20
4.1 Rozdělení turbodmychadel dle velikosti.....	20
4.1.1 Turbodmychadla pro menší motory.....	20
4.1.2 Turbodmychadla pro větší motory.....	20
4.2.1 ABB	21
4.2.2 PBS Turbo.....	23
4.2.3 MAN B&W Diesel AG.....	26
4.2.4 Garrett	27
5. Závěr	30
6. Seznam použité literatury	31
7. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	32

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá tematikou turbodmychadel, jejich základními typy a parametry. Cílem práce bude prostudovat odbornou literaturu vztahující se k tématu, katalogy výrobců turbodmychadel a pokusit se vytvořit komplexní pohled na turbodmychadla všech výrobců, typů i velikostí. Součástí práce je i tematika konstrukce a tvarů rychlostních trojúhelníků oběžných kol.

Práci lze rozdělit do čtyř větších kapitol. První kapitola se zabývá historií a vznikem turbodmychadel od prvního typu až po současnost. Vyobrazuje taky jejich rostoucí význam s časem.

Druhá kapitola se věnuje principu činnosti turbodmychadla. Zejména transformací energie, konstrukcí a tvarem rychlostních trojúhelníků oběžných kol. Kapitola popisuje i základní části turbodmychadla.

Třetí kapitola obsahuje rozdělení základních řad turbodmychadel. Rozdělení je pojato ze dvou hledisek a to z hlediska velikosti (rozdělení na malé a velké) a výrobce (v potaz jsou bráni pouze světově známí výrobci turbodmychadel).

Poslední kapitola shrnuje práci v závěru, na konci je uveden seznam použité literatury a vysvětlení používaných symbolů.

Motivem pro výběr této tematiky byla praxe v PBS Turbo ve Velké Bíteši a následně v holandské firmě Turbo Engineering v Rotterdamu, kde jsem prováděl servisní práce a seznámil se tak s různými typy turbodmychadel. Díky této praxi jsem měl možnost nahlédnout do prostředí strojovny lodí a vidět, jakým způsobem turbodmychadla pracují a jak a na co jsou využívány.

2. Historie turbodmychadel

První turbodmychadlo vynalezl Švýcar Dr. Alfred J. Buchi mezi léty 1909 a 1912. Dr. Buchi byl vedoucím inženýrem výzkumného oddělení Sulzer Brother (švýcarská firma na výrobu dieselových motorů) a v roce 1915 navrhl první prototyp přeplňovaného dieselového motoru, ale v této době se svým vynálezem neuspěl. Jeho doba měla přijít až s 1. Světovou válkou.

Na konci prvního desetiletí 20. století začala General Electric (nadmárodní společnost se sídlem v americkém městě Fairfield ve státě Connecticut, založená T.A. Edisonem v roce 1876 [2]) vyvíjet turbodmychadla. Jejich turbodmychadlo bylo poprvé použito do dvojplošného letadla LePere. Toto letadlo v roce 1926 stanovilo nový rekord dosažením nadmořské výšky 10 092m.

Turbodmychadla byla několikrát použita u bojových letounů v první Světové válce, což předznamenalo jejich veliký boom, který vyvrcholil na konci 40. let 20. století, nejdříve v Evropě a poté i v USA. V USA vyráběla General Electric turbodmychadla pro vojenská letadla. Ve druhé světové válce jich byly tisíce použity do stíhaček a bombardérů např. do bombardéru B-17.

V roce 1954 byla nastolena revoluční myšlenka užít turbodmychadla pro civilní účely. S touto myšlenkou přišel J. C. "Cliff" Garrett. Podstatou bylo užití turbodmychadel pro přeplňování dieselových motorů osobních automobilů.

Prvními auty, kde byla turbodmychadla použita, byl Chevrolet Corvair Monza a Oldsmobile Jetfire. Na trh byly dodávány od roku 1962. Jejich vysoké pořizovací náklady a nespolehlivost způsobily, že brzy vymizely z trhu.

Více akceptovanými pro civilní sektor se stala turbodmychadla až po první ropné krizi v roce 1973. Do té doby byly ceny aut vybavených turbodmychadlem srovnatelné s cenami auta bez turbodmychadla díky nízké ceně ropy. Zvyšující se regulace emisí vedla na konci 80. let k zvyšování počtu dieselových automobilů a trucků osazených turbodmychadly. Výsledkem je, že dnes téměř každý motor je přeplňovaný turbodmychadlem.

V 70. letech se vstupem turbodmychadel do motorových sportů, zejména do Formule 1, stala auta s přeplňovanými motory velice populární. Z turbodmychadla se stal „módní hit“. Téměř každý benzínový automobil vyrobený v této době byl nabízen s tímto přeplňovaným motorem. Přestože tento motor byl výkonnější, časem se od přeplňovaných benzínových motorů upustilo. Navíc většina zákazníků stále netolerovala tzv. „turbo-lag“, tedy prodlevu reakce turbodmychadla.

Opravdový zlom užití turbodmychadel v osobních automobilech nastal v roce 1978. Stalo se tak uvedením prvního přeplňovaného dieselového motoru u osobních automobilů Mercedes-Benz 300SD. Mercedes byl následován VW Golf Turbodiesel, který se dostal na trh v roce 1981.

V dnešní době lze užitím turbodmychadla u dieselových motorů osobních aut dosáhnout téměř srovnatelného výkonu jako u benzínových motorů. Primárně je viděno užití výfukových plynů jako efektivní způsob, jak snížit spotřebu paliva a znečištění prostředí.

3. Princip činnosti turbodmychadla

Turbodmychadlo je zařízení, které stlačuje vzduch a je poháněno výfukovými plyny. Používá se u spalovacích a plynových motorů k zvýšení výkonu motoru tím, že zvyšuje množství vzduchu vstupujícího do motoru. Hlavní výhodou turbodmychadel je, že nabízejí významný nárůst výkonu motoru jen s lehkým nárůstem váhy a ceny motoru.

Turbodmychadlo funguje na podobném principu jako plnicí kompresor, ale zatímco kompresor je poháněn mechanickou energií klikové hřídele motoru, turbodmychadlo je poháněno energií výfukových plynů. Dalším rozdílem mezi plnicím kompresorem a turbodmychadlem je, že turbodmychadlo stlačuje nasávaný vzduch s větší účinností, zatímco plnicí kompresor reaguje okamžitě a není náchylný na tzv. turbo efekt (turob lag) typický pro turbodmychadla.

Turboefekt nastává při nízkých otáčkách motoru, při nichž turbodmychadlo ještě nepracuje, tedy nestlačuje. Projevem tohoto jevu je např. trhaný rozjezd automobilu. Turboefektu se předchází např. dvoustupňovým přeplňováním, vstřikováním spalovací směsi před dmychadlo atd. viz. níže.

Turbodmychadlo je tvořeno turbínou a kompresorem. Turbína je poháněna energií výfukových plynů. Díky tomu, že turbína a kompresor jsou na stejném hřídeli (stejně jak je tomu u proudových leteckých motorů) pohání turbína kompresor.

Plynový kompresor, který je umístěn na sací části motoru, stlačuje vstupující vzduch nad atmosférický tlak. Turbodmychadla tak značně zvyšují objemový výkon motoru v porovnání s motory bez turbodmychadla.

Kompresor zvyšuje tlak vzduchu vstupujícího do motoru, což způsobuje, že do spalovací komory vstupuje větší množství kyslíku. Více kyslíku ve spalovací komoře nutně znamená, že musí být přivedeno i více paliva, aby spalovaná směs měla stále stejný poměr.

Zvyšováním obsahu kyslíku a paliva dosáhneme vyšší objemové účinnosti motoru, což vede i k vyššímu výkonu motoru. Dodávání paliva je zprostředkováno řádným nastavením vstřikovacích ventilů nebo karburátoru.

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 turbodmychadla většinou dosahují účinnosti až 80 %, protože motor musí vykonat určitou práci, aby protlačil plyny přes turbínu.[2].

V automobilovém průmyslu se většinou používají turbodmychadla zvyšující tlak maximálně o 0,8 barů, i když jsou dosažitelné i vyšší tlaky. Typické turbodmychadlo vzhledem ke své konstrukci začne zvyšovat tlak teprve od 2500 otáček motoru za minutu (1800 u turbo-dieselových motorů)[2].

Hlavní nevýhoda užití turbodmychadel pro spalovací motory spočívá v tom, že stlačováním vstupujícího vzduchu dochází k zvýšení jeho teploty. Vysoká teplota plynů je zejména limitující pro benzínové motory. Dopad tohoto efektu lze snížit chlazením plnicího vzduchu.

Nejnovějším hitem je dvoustupňové přeplňování, tedy vysokotlaký a nízkotlaký stupeň. Dvě turbodmychadla jsou zapojená za sebou do „série“. Nízkotlaké turbodmychadlo je větší, vysokotlaké menší. Nízkotlaké pracuje za nízkých otáček

motoru, druhé začne pracovat až při vyšších otáčkách. Díky dvoustupňovému přeplňování se dosáhne většího stlačení vstupujícího vzduchu a tím i navýšení účinnosti, točivého momentu a výkonu motoru. Pomocí dvoustupňového přeplňování se také eliminuje turboefekt – zátah motoru je tak plynulejší a turbodmychadlo pracuje efektivně jak při nízkých, tak při vysokých otáčkách.

Na některé motory se používá i více turbodmychadel (u velkých lodních dieselových motorů i dvacet). Počet závisí zejména na požadovaném stlačení. Někdy se používají turbodmychadla menší, která mají lepší a rychlejší reakci na změnu chodu motoru, ale nižší účinnost. Rychlá reakce se vyžaduje např. u závodních člunů. Větší turbodmychadla se používají na motory, kde chod je stabilnější a tedy i účinnost dmychadla větší. Velikost dmychadla je dána velikostí motoru a zejména jde o kompromis mezi účinností a rychlostí reakce.

3.1 Transformace energie v turbodmychadle

V turbodmychadle probíhá, zjednodušeně řečeno, transformace kinetické energie na mechanickou. Pro turbodmychadlo platí zákon zachování energie, který je dán rovností výkonu turbíny a příkonu kompresoru se započítáním mechanických ztrát. Platí tedy rovnice:

$$P_K = P_T \cdot \eta_{mTD}$$

P_K - výkon turbíny

P_T - příkon kompresoru

η_{mTD} - mechanické ztráty

Po úpravách lze dostat vztahy pro P_K , P_T v následujících tvarech:

$$P_T = \dot{m}_T \cdot c_{pv} \cdot T_{T1,c} \left[\left(1 - \frac{P_{T2}}{P_{T1,c}} \right)^{\frac{\kappa_v - 1}{\kappa_v}} \right] \cdot \eta_{TS}$$

$$P_K = \dot{m}_K \cdot c_{ps} \cdot T_{K1,c} \left[\left(\frac{P_{K2,c}}{P_{K1,c}} \right)^{\frac{\kappa_s - 1}{\kappa_s}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{KS}}$$

Obr. 3.1. Vztahy pro výpočet P_T, P_K [8]

\dot{m}_T - hmotnostní tok turbínou

\dot{m}_K - hmotnostní tok kompresorem

c_{pv} - měrná tepelná kapacita výfukových plynů při stálém tlaku

c_{ps} - měrná tepelná kapacita nasávaného vzduchu při stálém tlaku

$T_{T1,c}$ - teplota před turbínou

$T_{K1,c}$ - teplota před kompresorem

$\frac{P_{T2}}{P_{T1,c}}$ - poměr tlaků na turbíně

$\frac{P_{K2,c}}{P_{K1,c}}$ - poměr tlaků na kompresoru

η_{TS} - účinnost turbíny

η_{KS} - účinnost kompresoru

Ze vztahů vyplývá, že příkon resp. výkon kompresoru a turbíny je funkcí více parametrů. Zejména hmotnostního toku \dot{m} , teploty a poměru tlaků na kompresoru a turbíně.

Celková účinnost turbodmyhadla je dána vztahem:

$$\eta_{TD,c} = \eta_{KS,c} \cdot \eta_T \cdot \beta \cdot \gamma$$

vztah pro výpočet celkové účinnosti [8]

$\eta_{TD,c}$ - celková účinnost turbodmyhadla

$\eta_{KS,c}$ - celková účinnost kompresoru

η_T - účinnost turbíny

β - výkonový součinitel pulzačního provozu

γ - účinnostní součinitel

pro rovnotlaký provoz je $\beta = \gamma = 1$

3.2 Konstrukce a tvary rychlostních trojúhelníků oběžných kol turbodmychadla

Rychlostní trojúhelníky jsou základem pro vyjádření kinematiky proudění v turbodmychadlech. Sestavují se na výhodných místech, nejčastěji se pokládají do rovin tečných k proudové ploše. U axiálních turbodmychadel leží rychlostní trojúhelníky v rovinách tečných k válcové ploše, jejíž osa se shoduje s osou rotace rotoru. U radiálních strojů se rychlostní trojúhelníky sklápí do rovin kolmých na osu rotace.[7]

Vektory rychlostních trojúhelníků jsou dány jejich velikostí a směrem. Sestavují se z:

- a) absolutních rychlostí proudu tekutiny vzhledem ke statorovým částem (rozdávěcí kolo, difuzor) a označují se „ c “.
- b) obvodové rychlosti rotujících součástí (kompresorové, turbínové kolo), označeny „ u “
- c) relativní rychlosti proudu vzhledem k rotujícím částem stroje „ w “.

Absolutní rychlost je vektorovým součtem obvodové a relativní rychlosti ($\vec{c} = \vec{u} + \vec{v}$). Může mít tři prostorové složky. Složka rychlosti ve směru osy rotace se nazývá axiální a označuje se c_a . Složka ve směru rotace se nazývá obvodová a označuje se c_u . Složka rychlosti kolmá na axiální směr a směřující k ose respektive od osy rotace se nazývá radiální a označuje se c_r [9].

Obvodová rychlost u je dána vzdáleností od osy rotace a velikostí úhlové rychlosti: $u = \omega * r$, kde ω je úhlová rychlost a r je vzdálenost od osy rotace. Obvodová rychlost nemá žádné další složky ani radiální ani axiální, leží v rovině kolmé na tyto směry.

Poslední složkou rychlostního trojúhelníku je rychlost relativní, která má tři prostorové složky. Složka rychlosti ve směru osy se označuje w_a , složka ve směru rotace se označuje w_u a složka ve směru radiálním se označuje w_r .

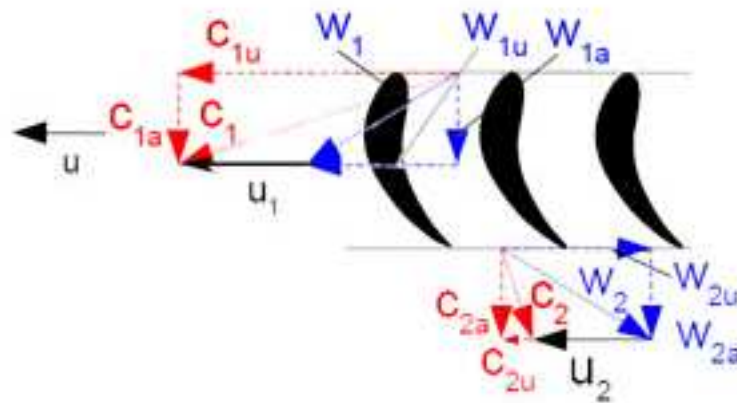
Existuje několik systémů, ke kterým se vztahují směry vektorů. Každý systém se mění podle způsobu měření úhlů v rychlostním trojúhelníku.

3.2.1 Pojem relativní, absolutní rychlost

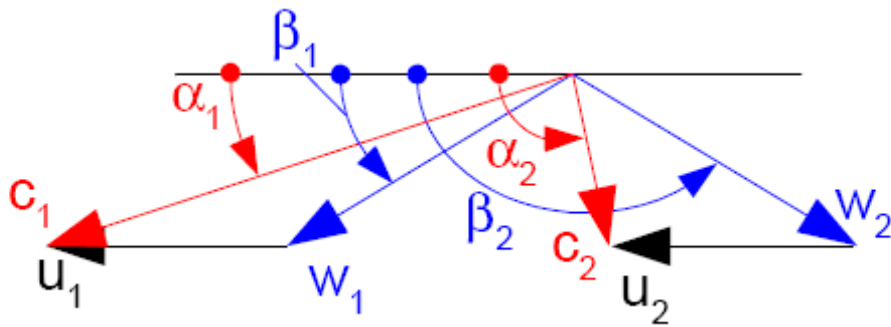
„Relativní rychlost proudu w je rychlost proudu tekutiny vnímána pozorovatelem, který se pohybuje s rotujícím kanálem lopatkového stroje.“ [9]

Absolutní rychlost je rychlost, kterou pozoruje pozorovatel, který se s rotujícím kanálem nepohybuje.

3.2.2 Příklad rychlostního trojúhelníku - axiální turbína



Obr. 3.1 Rychlostní trojúhelník axiální turbíny



Obr. 3.2 Systém kótování úhlů v rychlostním trojúhelníku pro stupeň axiální turbíny. Kde α je úhel absolutní rychlosti, β je úhel relativní rychlosti. [10].

3.3 Jednotlivé části turbodmychadla

3.3.1 Turbínové skříně

Turbínové skříně jsou vyráběny odléváním. U dmychadel pracujících za nižších teplot (užívaných na dieselové motory) jsou turbínové skříně odlévány z tvárné litiny. Pokud jsou dmychadla používána za vyšších teplot (na plynových motorech), jsou turbínové skříně vyrobeny z vysokoteplotních materiálů SiMo, Ni REZIST apod.

Dokončovací práce se provádí na speciálních obráběcích centrech.

Součástí turbínové skříně je i rozváděcí kolo. Některá, zejména menší turbodmychadla, jsou bez rozváděcích kol a to z důvodu snížení ceny turbodmychadla.

Částí turbínové skříně je vstupního hrdlo, jehož funkcí je urychlit a správně nasměrovat proud vstupujících spalin na turbínové kolo. Další částí turbínové skříně je výstupní hrdlo, které slouží k zpomalení proudu odcházejících spalin, čímž dosáhneme jejich vyššího tlaku.

Turbínové skříně mají spirálovitý tvar, kde směrem do středu se zmenšuje jejich vnitřní průměr, úměrně ubývajícímu množství spalin, které postupně odcházejí přes rozváděcí kolo na turbínové kolo. Tvar vychází z výpočtů a zkušeností jednotlivých výrobců.

Pracovní teploty turbínových skříní se pohybují okolo 500 °C u dmychadel pracujících na dieselových motorech a okolo 700 °C u plynových motorů.

Součástí turbínových skříní, zejména u menších turbodmychadel, které se užívají pro přeplňování dieselových motorů automobilů, bývá tzv. „bypass“. Jde o membránu (ventil), který při vysokém plnicím tlaku upustí přebytečné množství spalin do výfukového systému. Díky bypassu je možné využívat dmychadlo již při nízkých otáčkách motoru a zároveň nedochází k přetěžování motoru z důvodu vysokých plnicích tlaků.

K turbínové skříně bývá připojena i výstupní skříň, která jednak zvyšuje tlak a zároveň obsahuje odpadové otvory, přes které vytéká voda, která čistí prostor turbínové skříně. Čištění probíhá po odstavení motoru. Studená voda, která přijde do kontaktu s nečistotami, je rozruší a ty poté spolu s vodou odchází pryč z dmychadla.



Obr. 3.3 – Turbínová skříň [17]

3.3.2 Ložiskové skříně

Ložiskové skříně jsou odlévány z tvárné litiny. Dokončovací operace musí být provedeny velice přesně, a proto se dokončuje na speciálních obráběcích centrech.

Skříně se vyrábějí buď chlazené a nebo nechlazené. Chlazení probíhá olejem a vodou nebo pouze olejem.

Chlazení vodou a olejem se používá zejména u turbodmychadel, která pracují za vyšších teplot, např. turbodmychadla u plynových motorů.

Olejem jsou chlazená např. radiální turbodmychadla, kde chlazení probíhá mazacím systémem motoru. Tato dmychadla jsou dochlazována tzv. domazáváním. Domazávání probíhá až po odstavení motoru, kdy klesne teplota a tlak pod tlak provozní. Olej neplní jen funkci chladící, ale i maznou.

Přes ložiskovou skříň prochází rotor, který je zde uložen v ložiscích. Skříň plní funkci jednak mazací a chladící, zároveň však udržuje rotor v dynamické rovnováze.

K této skříně jsou pevně připojeny (příšroubovány) turbínová a kompresorová skříně, aby při případné havárii turbíny či kompresoru nedošlo k tomu, že se nějaká část dostane mimo dmychadlo a způsobí škody i na okolí. Proto jak ložisková, tak i ostatní skříně jsou vyrobeny z velice pevných materiálů, které by těmto haváriím měly odolat.

Součástí ložiskových skříní jsou i tzv. rotorové ucpávky (těsnění). Ty zabraňují pronikání oleje do kompresorové a turbínové skříně. A naopak umožňují vnikat malému množství vzduchu do prostoru ložisek. Nejčastěji se jako rotorové ucpávky používají pístní kroužky nebo labyrintní ucpávky.



Obr. 3.4 – Ložisková skříň [18]

3.3.3 Kompresorové skříně

Kompresorové skříně jsou vyráběny z hliníkových slitin. Pokud jsou však dmychadla užívána pro větší motory s vyšším stlačením, pak je materiálem tvárná litina (např. GGG40), která odolává vyšším tlakům.

V kompresorové skříně je kompresorové kolo, které nasává vzduch. Proud vzduchu poté směřuje na difuzor a přes difuzor odchází spirálovitě stočenou skříní,

která se směrem od středu rozšiřuje (úměrně přibývajícimu vzduchu) do prostoru válců. Funkcí skříně je tedy správné nasměrování vzduchu na kompresor a stlačování vzduchu.

Difuzor zpomaluje proud vzduchu beze ztrát, čímž dostáváme větší tlak a teplotu. Vyrábí se buď lopatkový popř. bezlopatkový difuzor.

Skříň je pevně připojena k ložiskové skříně. Z druhé strany je připojen (našroubován) tzv. tlumič (filtr). Ten jednak čistí vzduch, který je nasávaný kompresorem, od nečistot a prachu a taky tlumí hluk, který vytváří rotující kompresor.



Obr. 3.5 – Kompresorová skříň [19]

3.3.4 Rotory

Materiálem rotoru bývá kvalitní ocel. Rotory turbodmychadel jsou složeny z turbínového kola, hřídele a kompresorového kola. Turbínové kolo je k hřídeli nejčastěji přivařeno třením nebo elektronovým paprskem.

Rotor rotuje vysokými obvodovými rychlostmi v řádu stovek m/s. Je tedy vysoce namáhán odstředivými silami. Tyto síly jsou tlumeny v ložiscích. Celý rotor musí být po zkompletování ve zcela dynamické rovnováze. Vyvažování se provádí na speciálních vyvažovacích zařízeních. Nerovnováha se řeší úběrem materiálu na turbínovém nebo kompresorovém kole.

3.3.5 Rozváděcí kola

Rozváděcí kolo je součástí turbínové skříně. Slouží k tomu, aby ideálně směřovalo proud spalín na turbínové kolo. U menších turbodmychadel rozváděcí kola často nejsou. Vyrábí se odlévaná z vysokoteplotních slitin například na bázi Ni, nebo jsou svařována z voštin, aby byla lehčí. Svařovaná se užívají na dmychadla pro letecké aplikace.

V současné době se vyrábí rozváděcí kola s natáčivými lopatkami. Díky natáčení se mění náběh spalín na turbínu. Nedochozí tak ke ztrátám a dmychadlo pracuje i za nízkých otáček motoru. Naopak při vysokých otáčkách nedochází k přetěžování motoru. Při nízkých otáčkách motoru je proud spalín přivřen natočením lopatek do uzavřenější polohy a dojde tak k zvýšení výkonu motoru. Při vysokých otáčkách se naopak lopatky kola otevrou a nedojde již k zmiňovanému přetěžování motoru. Díky tomuto systému se snižuje spotřeba paliva motoru.



Obr. 3.6 – Rozváděcí kolo [20]

3.3.6 Ložiska

Ložiska jsou v dmychadle uložena v ložiskové skříni, která zajišťuje jejich mazání. Funkcí ložisek je tlumit radiální, axiální nebo oboje síly vzniklé při provozu. Důležitou funkcí je i minimalizace třecích ztrát. Ideální by se jevila valivá ložiska, která tyto ztráty mají minimální. Avšak jejich užití je možné pouze na dmychadla, která pracují s menším stlačením, kdy nevznikají veliké síly. Valivá ložiska mají menší únosnost a nedosahují takové trvanlivosti jako ložiska kluzná. Pro porovnání: životnost valivých ložisek je přibližně 8 000 hodin, zatímco životnost kluzných dosahuje 36 000 hodin. Z tohoto důvodu se v současnosti upřednostňuje užívání ložisek kluzných [11].

Tato hodnota životnosti je naprosto dostačující pro motory, které běží nepřetržitě (např. lodní motory). Proto interval servisních prohlídek je delší, což snižuje náklady na provoz turbodmychadla.

Kluzná ložiska jsou z bronzových nebo hliníkových slitin. Ložiska jsou výběrová, speciální a jsou velice přesná.

3.3.7 Kompresorová kola

Tvar a velikost kompresorového kola vychází z výpočtů, kolo je konstruováno s ohledem na požadované stlačení. Jeho funkcí je axiálně nasávat vzduch z okolí, urychlit jej na maximální rychlost a správně směřovat v radiálním směru na difuzor.

Vyrábí se z hliníkových slitin. Menší kola se vyrábí odléváním. Nejčastěji jde o odlévání s vytavitelným modelem, kde model kola je zhotoven ze speciálního vosku. Modely jsou sestaveny do stromečku. Celý stromeček se obalí keramickou směsí, která tvoří formu. Po zatuhnutí formy se voskový model v peci nataví a odteče pryč. Do vzniklé dutiny se vlévá roztavená slitina kovu. Po ztuhnutí kovu se rozbije keramická forma, jednotlivé modely se oddělí a finálně se opracují např. pískováním. Výsledný odlitek, oproti konvenčním metodám odlévání, je velice přesný.

Větší kompresorová kola jsou vyráběna jako výkovky. U výkovku dochází ke zpevnění materiálu a kola tak mohou pracovat za větších stlačení. Lopatky kola se následně frézují.

Všechna kola musí splňovat vysokou přesnost a kvalitu povrchu a struktury. Kvalita povrchu se kontroluje nedestruktivně – například kapilární metodou.



Obr. 3.7 – Kompresorové kolo [18]

3.3.8 Turbínová kola

Turbínové kolo má za úkol přeměnit mechanickou energii spaliny na kinetickou energii kompresorového kola. Jsou dva základní typy turbín – axiální a radiální. U axiálních proudí spaliny přes turbínu pouze v axiálním směru. Zatímco u radiální spaliny vtékají v dostředivém směru a zároveň v radiálním a odcházejí pře turbínu ve směru axiálním. Do průměru kola 160 mm se užívají pouze radiální turbíny. Nad průměr kola 300 mm pouze axiální. Mezi 160 a 300 mm se užívají obě možnosti.

Turbínová kola jsou vyráběna ze speciálních vysokoteplotních slitin INKONEL 713 nebo 718, nebo GAMA TiAl, což je gama fáze slitiny TiAl (má poloviční hustotu než INKONEL a menší moment setrvačnosti, díky tomu má lepší a rychlejší reakce). Nejčastěji jsou odlévána metodou vytavitelného modelu, výroba je nákladná a složitá.

U axiálních turbodmychadel jsou turbínová kola tvořena diskem a vsazenými turbínovými lopatkami. Lopatky jsou ze speciálních slitin a mají speciální tvar. Stejně jako turbínová kola se lopatky vyrábějí metodou vytavitelného modelu.



Obr. 3.8 – Turbínové kolo [21]

4. Základní řady turbodmychadel spalovacích motorů a jejich parametry

4.1 Rozdělení turbodmychadel dle velikosti

4.1.1 Turbodmychadla pro menší motory

Pro menší motory se vyrábí pouze radiální turbodmychadla, která jsou svou konstrukcí menší, vyznačují se nižší hodnotou stlačení a nízkou hmotností. Úměrně těmto parametrům jsou i levnější a to i díky velkosériové výrobě. Menší turbodmychadla mají rychlejší reakce na změnu chodu motoru, ale mají horší účinnost. Používají se k přeplňování dieselových motorů osobních, sportovních a nákladních automobilů, větších zemědělských strojů a menších výletních a závodních lodí.

K předním výrobcům turbodmychadel této třídy patří Garrett, Borg Warner, KKK, Holset, Schwitzer, Mitsubishi atd.

4.1.2 Turbodmychadla pro větší motory

Pro větší motory se vyrábí jak radiální, tak i axiální turbodmychadla, která jsou větší a těžší. Kvůli větší váze jejich rotoru mají pomalejší reakci na změnu chodu, ale vyznačují se větší účinností, než turbodmychadla menší. Proto se využívají u motorů se stabilnějším chodem.

Velká radiální turbodmychadla jsou používána u různých typů dopravních prostředků (lokomotivy, těžká nákladní auta, menší lodě), u motorů na všechny typy paliv (nafta, plyn, těžká paliva) a také u stacionárních motorů. Nejčastěji jde o motory do výkonu 4000 kW na jedno turbodmychadlo.

Axiální turbodmychadla se téměř výhradně používají na dvoutaktní, dieselové lodní motory, které mají stabilnější chod a vyžadují vyšší objem plnicího vzduchu.

Největšími výrobci velkých turbodmychadel jsou ABB, Mitsubishi a MAN Diesel AG.

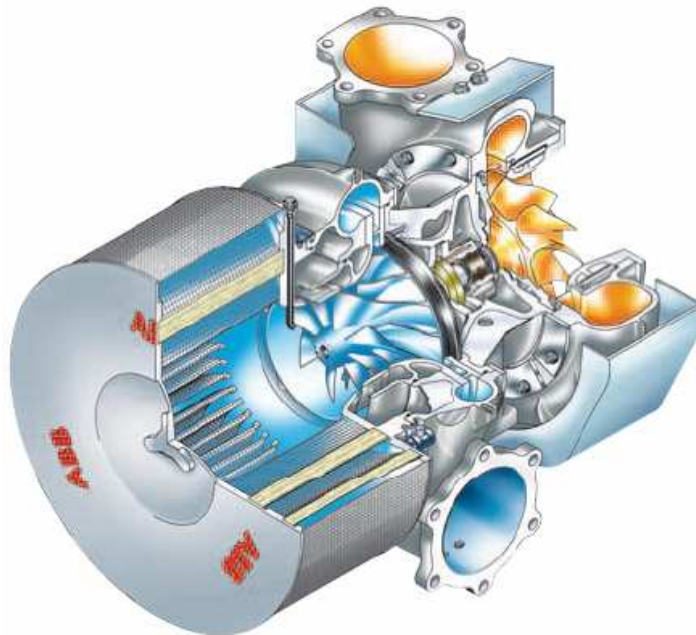
4.2 Rozdělení turbodmychadel podle výrobců

4.2.1 ABB

Společnost ABB je největší výrobce turbodmychadel pro dieselové motory nad 500 kW na světě. Jejich produkce zahrnuje několik výrobních řad, jak axiálních, tak i radiálních turbodmychadel. Produkce společnosti je zaměřena na lodní a železniční dopravu. Dále se pak jejich výrobky uplatňují na stacionárních motorech - plynových i dieselových.

- řada TPS-F

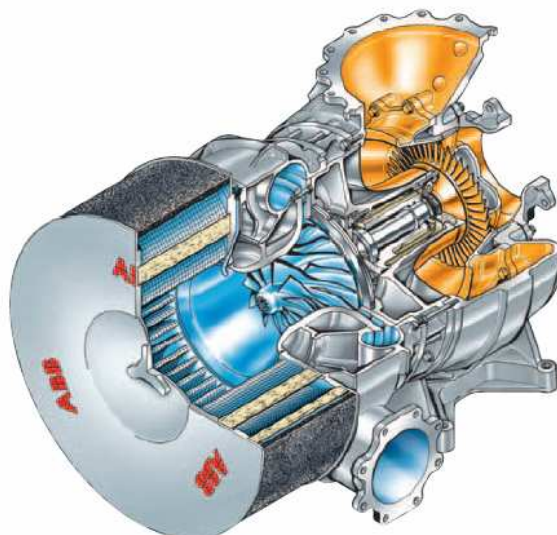
Nejnovější řada firmy ABB. Parametry turbodmychadel řady TPS jsou designovány tak, aby dosahovaly vysokých výkonů, účinností při nízké spotřebě paliva, nízkých provozních nákladů a zároveň aby splňovaly emisní limity. Jsou určeny pro dieselové a plynové motory, jak vysokootáčkové, tak pro motory pracující na střední hodnotě otáček v rozsahu výkonů 400 – 3300 kW na jedno turbodmychadlo. Vnitřní kluzná ložiska jsou mazána systémem od motoru. Ložisková skříň je vyráběná ve dvou verzích a to chlazená olejem nebo vodou [12].



Obr 4.1 – Řez turbodmychadlem řad TPS-F [12]

- řada TPL-A

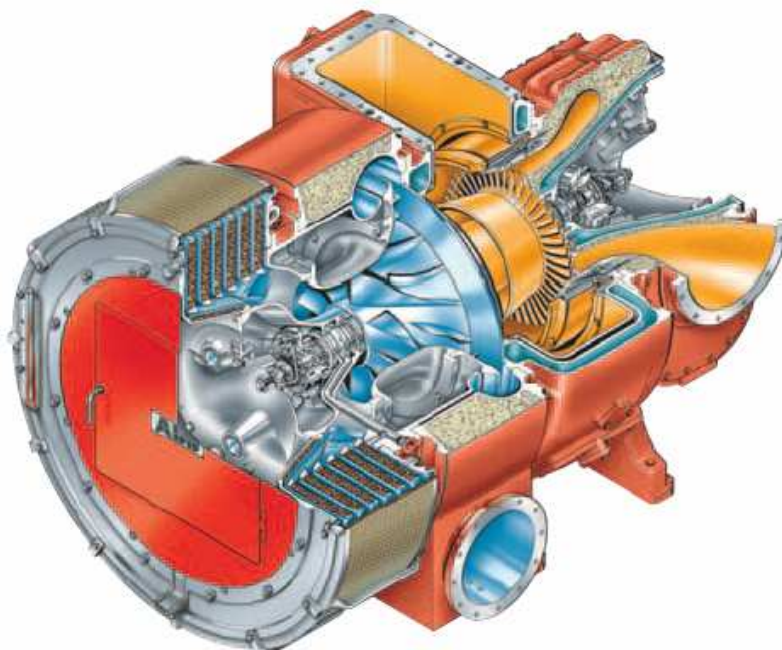
Řada TPL je vhodná pro čtyř-taktní dieselové lodní a elektrárenské motory v rozsahu výkonů od 2500 kW na jedno dmychadlo. Vyznačuje se vysokou účinností a díky uložení rotoru ve vnitřních kluzných ložiscích taky dlouhou dobou mezi jednotlivými prohlídkami. Ložiska jsou mazána systémem od motoru. Vyrábí se s axiální turbínou [12].



Obr. 4.3 – Řez turbodmychadlem řady TPL-A [12]

- řada VTR

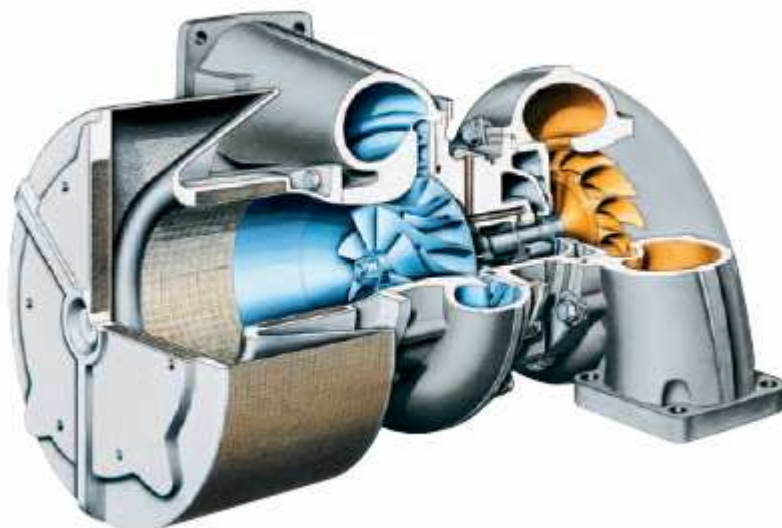
Turbodmychadla této řady jsou designována pro dvou-taktní nízko-otáčkové, čtyřdobé motory se středně velkými otáčkami a vysokootáčkové dieselové a plynové motory v rozsahu výkonů 700 – 18 500 kW na jedno turbodmychadlo. Jsou vhodná pro užití v námořní dopravě a pro stacionární plynové motory. Rotor je pružně uložen ve vnějších valivých ložiscích. Ložiska na turbínové i kompresorové straně mají vlastní chladicí a mazný systém. Řada VTR je vyráběna s axiální turbínou a nechlazenou popř. vodou chlazenou turbínovou skříní [12].



Obr 4.4 Řez turbodmychadlem řady VTR [12]

- řada RR

Dmychadla řady RR jsou designována pro vysokootáčkové diesellové motory a pro plynové motory v rozsahu výkonu 500-1800 kW na jedno turbodmychadlo. Jsou zajímavá vysokým výkonem v kontrastu k jejich malým rozměrům. Kluzná ložiska jsou mazána mazacím systémem motoru [12].



Obr. 4.5 – Řez turbodmychadlem řady RR [12].

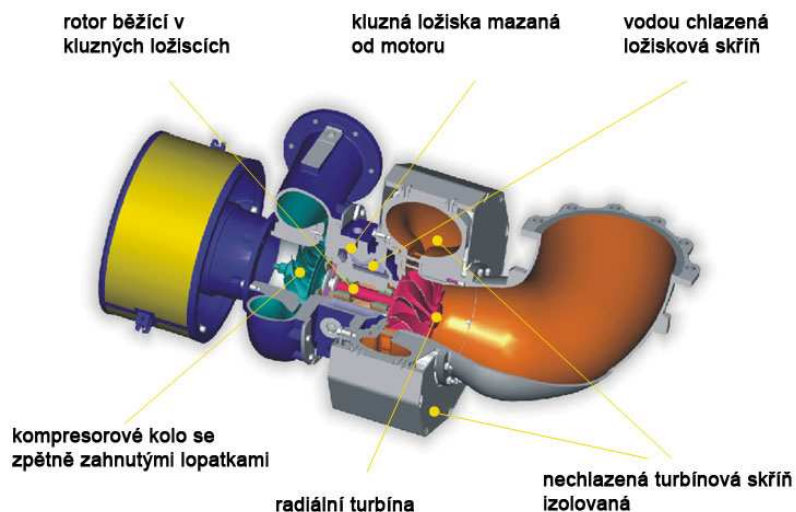
Další výrobní řady firmy ABB jsou: TPS-DE (konstrukčně podobná řadě TPS-F), TPL-B, TPL-C (konstrukcí podobné řadě TPL-A), VTC.

4.2.2 PBS Turbo

Výrobní program společnosti PBS Turbo s.r.o. je tvořen několika skupinami produktů, jsou to zejména turbodmychadla konstrukce PBS a turbodmychadla vyráběná dle licence firmy MAN B&W Diesel AG. PBS Turbo vyrábí jak turbodmychadla s radiální turbínou - výrobní řada (PTR, NR/S, TCR), tak i s axiální (PTD, PDH). Je zároveň největší českou firmou vyrábějící turbodmychadla pro motory nad 300kW. Výrobky firmy jsou užívány nejčastěji na diesellové a plynové motory a to jak pro lokomotivy, lodě, tak i pro stacionární výrobu energie. PBS Turbo vyrábí plnicí turbodmychadla pro motory od 300kW do 4700kW na jedno turbodmychadlo.

- řada PTR

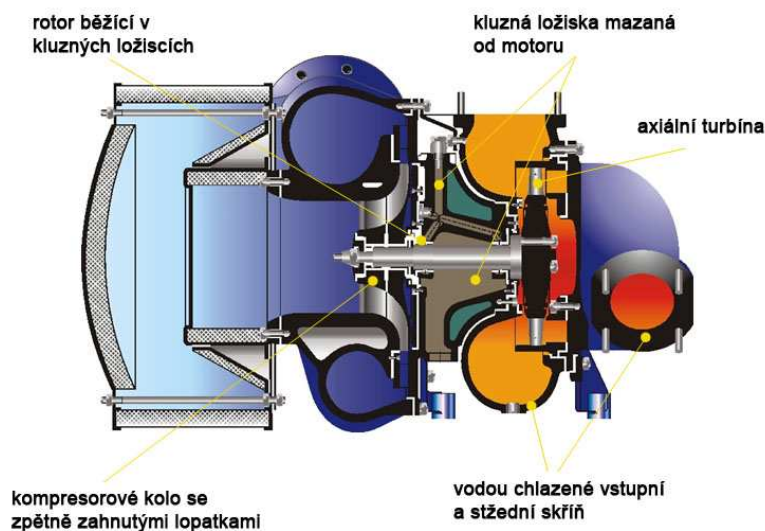
Užívají se pro motory v rozsahu výkonů 400 – 1400kW na jedno turbodmychadlo. Tato řada je osazena radiální turbínou a její použití je vhodné jak na diesellové tak i na plynové motory. Rotor je uložen v kluzných ložiscích, mazání je zajištěno mazacím okruhem od motoru. Ložisková skříň je chlazená vodou, oproti tomu turbínová je nechlazená a pouze tepelně izolovaná [11].



Obr. 4.6 - Řez turbodmychadlem řady PTR [11]

- řada PTD

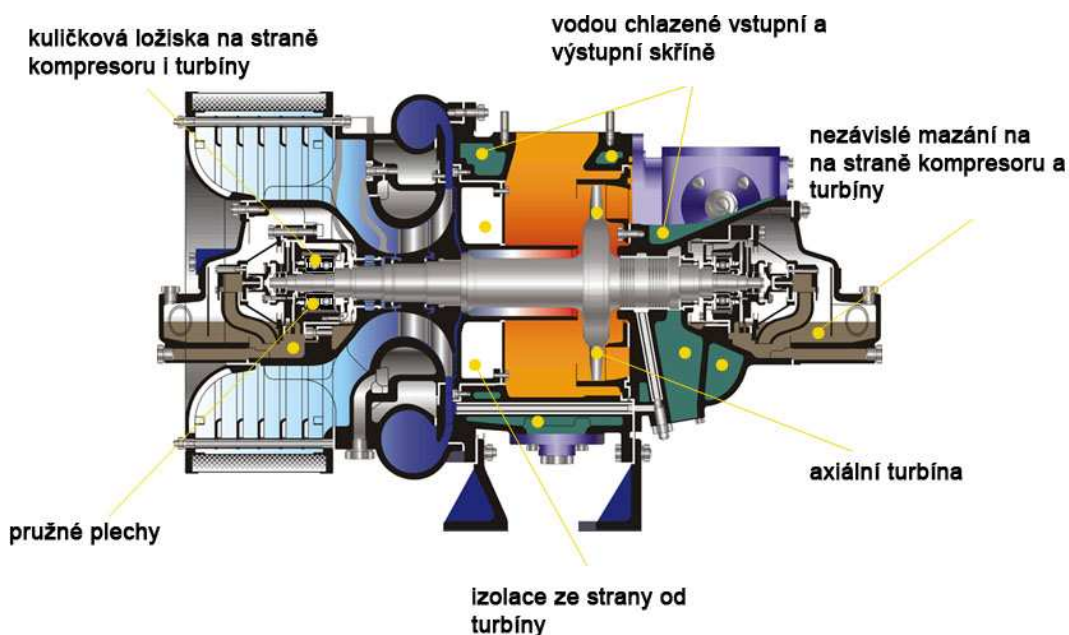
Tato řada je vhodná pro motory od výkonu 400 do 1800kW na jedno turbodmychadlo. Rotor je uložen ve vnitřních kluzných ložiscích, která jsou mazaná mazacím okruhem od motoru. Vstupní (turbínová) a střední (ložisková) skříň jsou chlazené vodou [11].



Obr. 4.7 - Řez turbodmychadlem řady PTD [11].

- řada PDH

Řada vyráběná pro dieselové motory o výkonu od 400 kW do 3000 kW na jedno turbodmychadlo. Jde o turbodmychadlo s axiální turbínou, rotor je uložený ve vnějších kuličkových ložiscích, která jsou mazaná vlastní olejovou náplní a mazání tedy není závislé na okruhu motoru. Vstupní a výstupní skříň jsou chlazené vodou [11].

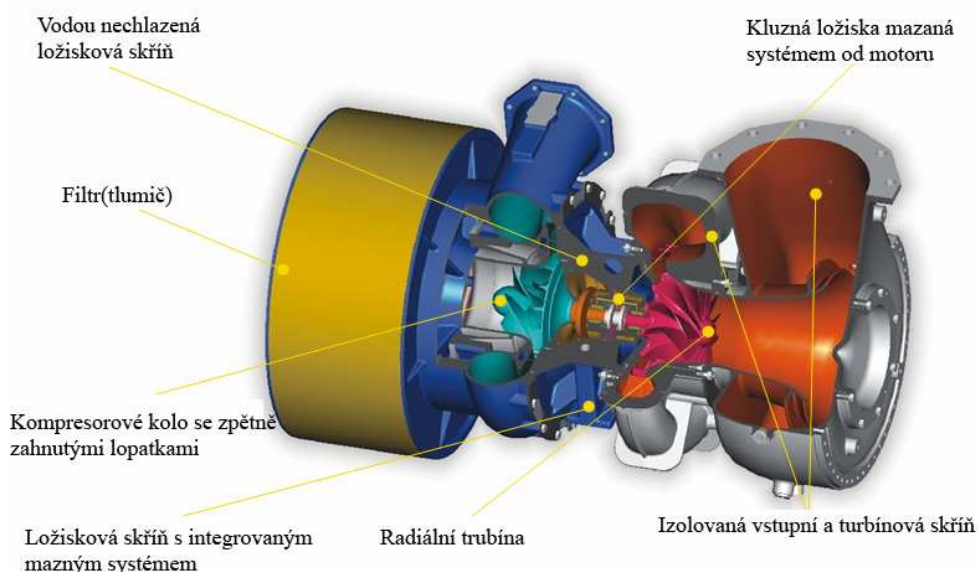


Obr. 4.8 – Řez turbodmychadlem PDH [11].

- řada TCR

Řada TCR je vhodná pro všechny typy motorů s různými druhy paliv o výkonu 390 – 5000kW na jedno turbodmychadlo. Rotor je uložený ve vnitřních kluzných ložiscích mazaných od mazacího systému motoru. Radiální turbínové kolo je optimalizováno pomocí metody CFD. Turbínová a výstupní skříň jsou efektivně izolovány [11].

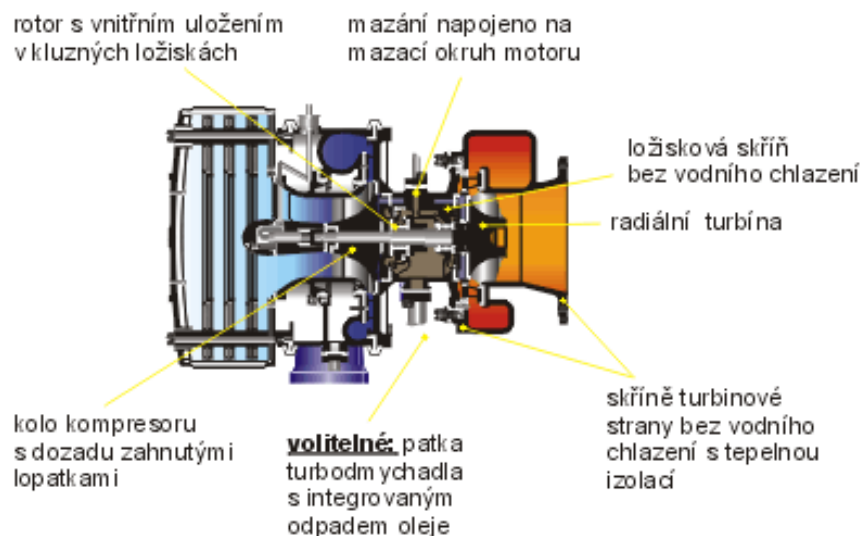
CFD (Computational Fluid Dynamics) je nástroj využívající počítače k simulacím chování systémů, které zahrnuje proudění tekutin, sdílení tepla a jiné doplňující procesy. Je založena na řešení rovnic mechaniky tekutin ve výpočtové oblasti se specifikovanými okrajovými, respektive počátečními podmínkami [15].



Obr. 4.9 – Řez turbodmychadlem TCR [11]

- řada NR/S

Turbodmychadla řady NR/S jsou vhodná pro diesellové, plynové motory i motory na těžká paliva s výkonem od 350 do 1700 kW na jedno turbodmychadlo. Jde o turbodmychadlo s radiální turbínou, rotor je uložený ve vnitřních kluzných ložiscích, která jsou mazaná systémem od motoru. Vstupní a výstupní skříně jsou tepelně izolovány [11].



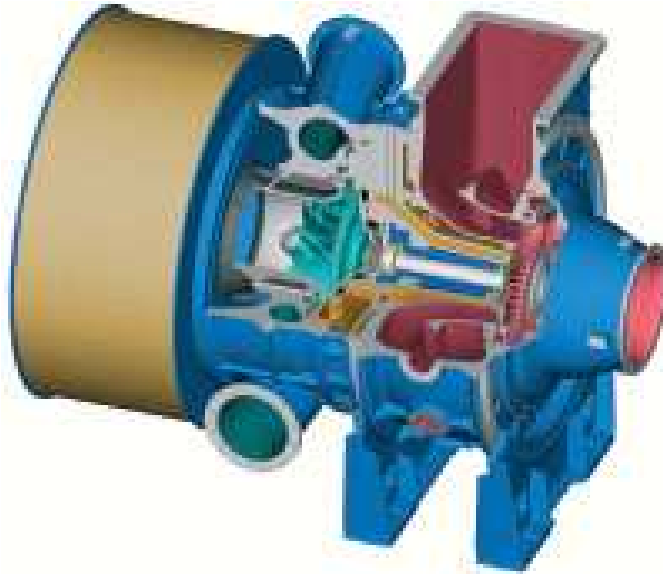
Obr 4.10 - Řez turbodmychadlem NR/S [11]

4.2.3 MAN B&W Diesel AG

Společnost MAN B&W Diesel AG (dále jen MAN) je německý strojírenský holding, který se zabývá zejména výrobou autobusů a nákladních automobilů. Společnost byla založena v roce 1898. Výrobní program MAN zahrnuje několik řad axiálních i radiálních turbodmychadel [16].

- řada TCA

Turbodmychadla řady TCA jsou vhodná pro dvoutaktní i čtyřtaktní motory na různé typy paliv o výkonu 5400 – 29700kW na jedno dmychadlo. Rotor je uložen ve vnitřních kluzných ložiscích mazaných mazným systémem od motoru. Řada TCA je s axiální turbínou, výstupní i turbínová skříň jsou nechlazené vodou, ale efektivně izolovány [16].



Obr. 4.11 – Řez turbodmychadlem TCA [16]

K dalším výrobním řadám MAN patří: NR/R, NA (jde o starší typy turbodmychadel), NR/S, TCR – viz výše u společnosti PBS Turbo.

4.2.4 Garrett

Firma Garrett vznikla v roce 1936, kdy ji v Los Angeles založil Cliff Garrett. Firma dodává turbodmychadla předním výrobcům automobilů např. Audi, BMW, DaimlerChrysler, Fiat, Ford, Peugeot, Renault, Saabu a Volkswagen atd. Turbodmychadla Garrett jsou často užívána také na závodní auta.

Garrett ve spolupráci s firmou Honeywell vyrábí revoluční turbodmychadla, jak po funkční tak konstrukční stránce. Zaměřuje se na motory od 100kW do 1000kW. Některé typy však slouží k přeplňování motorů o výkonu i přes 3000kW.

Výrobní řady lze rozdělit na tři základní: Small Frame GT, Medium Frame GT a Large Frame GT. Rozdílem mezi těmito třemi řadami je ve velikosti celkové konstrukce a turbínového, kompresorového kola.

- Small frame GT

Patří sem turbodmychadla s označením GT12 až GT22. Konstrukce umožňuje jejich užití na motory motocyklů a závodních aut o výkonu 37-208kW. Axiální ložiska jsou chlazená olejem a vodou. Součástí turbodmychadel této řady je i regulační ventil [14].



Obr. 4.12 – Turbodmychadlo řadyGT12 [14]

- Medium Frame GT

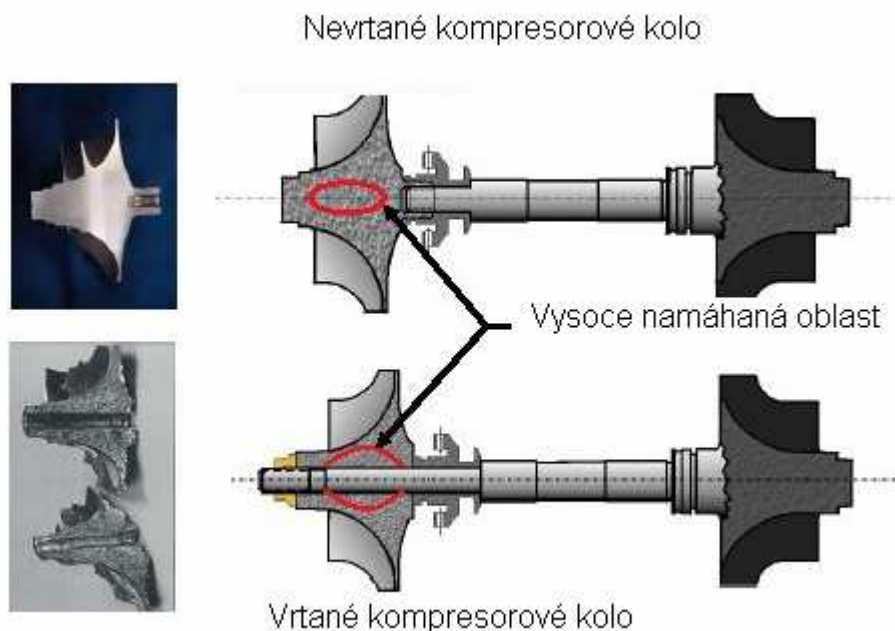
Do této řady patří turbodmychadla GT30 až GT45. Užívají se pro motory o výkonu 100 - 480kW. Řada Medium Frame GT nabízí širokou škálu dmychadel s axiálními ale i s kuličkovými ložisky. Ložiska jsou chlazená vodou a olejem [14].



Obr. 4.13 – Turbodmychadlo řady GT35 [14]

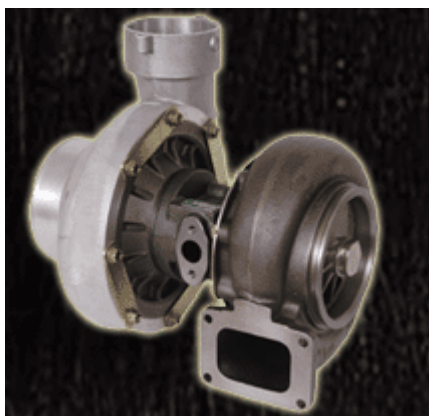
- Large Frame GT

Výrobní řada Large Frame zahrnuje turbodmychadla GT47 až GT70. Pro výrobu těchto turbodmychadel je použita technologie nevrtaného kompresorového kola, která výrazně prodlužuje jeho životnost v podmínkách extrémně vysokých tlaků. Oblastí nejvyššího namáhání kompresorového kola totiž neprochází díra, tudíž zde nedochází ke koncentraci napětí, a proto kompresorové kolo má delší životnost [14].



Obr. 4.14 – Porovnání vrtaného a nevrtaného kompresorového kola [13]

Large frame GT řada nachází uplatnění u dieselových motorů o výkonech 400 – 1100kW. Tato dmychadla jsou vhodná pro větší motory např. pro závodní tahače, tedy auta, která vyžadují větší stlačení a rychlou reakci turbodmychadla. Ložiska jsou větší kuličková tzv.CHRA, jsou chlazená vodou a olejem [14].



Obr.4.15 – Turbodmychadlo řady GT60 [14]

Dalšími světoznámými výrobci turbodmychadel jsou: MITSUBISHI, SIEMENS, Napier, Borg Warner, Honeywell a mnoho dalších.

5. Závěr

V této práci jsem se snažil podat základní ucelený a systematický pohled na tematiku turbodmychadel.

V úvodu práce jsem se věnoval stručnému historickému přehledu ve vývoji turbodmychadel a jejich využívání pro vojenské a později civilní účely. Dále jsem stručně popsal princip činnosti turbodmychadel, jejich užití k přeplňování různých typů motorů s poukázáním na dané výhody a nevýhody.

V kapitole Transformace energie v turbodmychadlech uvádím základní rovnice pro výpočty výkonu a účinnosti turbodmychadel. V následující části se věnuji konstrukci a tvarům rychlostních trojúhelníků oběžných kol turbodmychadel a uvádím příklad rychlostního trojúhelníku axiální turbíny.

Značná pozornost je upřena na popis jednotlivých částí turbodmychadel, popis funkcí turbínových a ložiskových skříní, kompresorových a turbínových kol, rotorů a rozváděcích kol.

V závěrečné kapitole rozdělují turbodmychadla dle jejich velikosti a dle jejich světově významných výrobců a uvádím základní výrobní řady a jejich parametry.

Při sběru informací a materiálu jsem vycházel ze zkušeností získaných během mé praxe v PBS Turbo a v Turbo Engineering. Práci jsem rovněž konzultoval s design managerem Jiřím Klímem z PBS Turbo Velká Bíteš, který mi poskytl informace ohledně konstrukce a materiálu turbodmychadel.

Turbodmychadla jsou významným prvkem v automobilní a lodní dopravě, jsou nedílnou součástí stacionárních motorů využívaných k výrobě elektrické energie a nabízejí další škálu možností jejich využití v nejrůznějších oblastech. Používají se k zvýšení výkonu motorů, umožňují úsporu pohonných hmot, snížení teplot spalovacích plynů a emisí. Vývoj turbodmychadel směřuje k stále dokonalejším typům.

Rád bych nadále pokračoval ve sbírání informací, materiálů a praktických zkušeností v oblasti turbodmychadel a využil všechny získané podklady pro napsání navazující diplomové práce.

6. Seznam použité literatury

- [1] http://www.turbo-tec.eu/cz/turbosprezarki_historia.php
- [2] http://cs.wikipedia.org/wiki/General_Electric
- [3] <http://www.turbo-owners.com/forum/general-tech/168-turbocharger-history.html>
- [4] <http://www.spiritus-temporis.com>
- [5] <http://www.pbsturbo.cz/>
- [6] <http://www.turbos.bwauto.com/products/turbochargerTurbine.aspx>
- [7] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopátkové stroje*. 1. vyd., upravené, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2003. 178 s. ISBN 80-7204-97-1.
- [8] MACEK, Jan, KLIMENT, Vladimír. *Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory*. 4. vydání, Nakladatelství ČVUT, 206 s. ISBN 80-01-03529-8
- [9] http://oei.fme.vutbr.cz/jskorpik/#Lopatkove_stroje
- [10] <http://oei.fme.vutbr.cz/jskorpik/273.html>
- [11] Katalogy firmy PBS Turbo, s.r.o.
- [12] Katalogy firmy ABB
- [13] <http://www.mjauto.cz/turbogarret.htm>
- [14] <http://www.turbobygarrett.com>
- [15] <http://www.civ.cvut.cz/ESF/info/PMT/node2.html>
- [16] Katalogy firmy MAN B&W Diesel AG
- [17] www.dieselperformance.com
- [18] www.turbochra.net
- [19] www.turbo-trucks.com
- [20] www.turbokts.com
- [21] www.treadstoneperformance.com

7. Seznam použitých zkratk a symbolů

P_K - výkon turbíny [kW]

P_T - příkon kompresoru [kW]

η_{mTD} - mechanické ztráty [-]

\dot{m}_T - hmotnostní tok turbínou [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]

\dot{m}_K - hmotnostní tok kompresorem [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]

c_{pv} - měrná tepelná kapacita výfukových plynů při stálém tlaku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

c_{ps} - měrná tepelná kapacita nasávaného vzduchu při stálém tlaku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

$T_{T1,c}$ - teplota před turbínou [$^{\circ}\text{K}$]

$T_{K1,c}$ - teplota před kompresorem [$^{\circ}\text{K}$]

$\frac{P_{T2}}{P_{T1,c}}$ - poměr tlaků na turbíně [-]

$\frac{P_{K2,c}}{P_{K1,c}}$ - poměr tlaků na kompresoru [-]

η_{TS} - účinnost turbíny [-]

η_{KS} - účinnost kompresoru [-]

$\eta_{TD,c}$ - celková účinnost turbodmyhadla [-]

$\eta_{KS,c}$ - celková účinnost kompresoru [-]

η_T - účinnost turbíny [-]

β - výkonový součinitel pulzačního provozu [$^{\circ}$]

γ - účinnostní součinitel [$^{\circ}$]

u – obvodová rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

c – absolutní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

w – relativní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

ω – úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

r – vzdálenost od osy rotace [m]