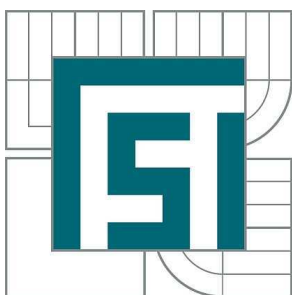


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MODERNÍ ZPŮSOBY PŘEPLŇOVÁNÍ

UP-TO-DATE METHODS OF CHARGING PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ GÓRNISIEWICZ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Górnisiewicz

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:

Moderní způsoby přeplňování

v anglickém jazyce:

Up-to-date Methods of Charging Processes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Osvojení základních pojmů zadaného tématu. Zamyšlení nad budoucností zadaného tématu.

Cíle bakalářské práce:

Vytvoření přehledu základních principů zvyšování výkonu spalovacích motorů a obrázkové dokumentace ilustrující znalost zadané problematiky.

Seznam odborné literatury:

- [1] HOFMANN, Karel. ALTERNATIVNÍ POHONY [s.l.] [s.n.] 2003 73 s Dostupný z WWW: <www.ite.fme.vutbr.cz/opory/Alt.pohony.pdf>.
- [2] VLK, František. Vozidlové spalovací motory. 1. vyd. Brno: Vlk, 2003. 580 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato práce se zabývá moderními metodami přeplňování spalovacích motorů používaných v osobních automobilech současnosti, přičemž důraz je kladen na zážehové motory přeplňované turbodmychadlem. Je zde vysvětlena podstata přeplňování a nejběžnější i méně časté způsoby přeplňování. Dále je vytvořen stručný přehled moderních přeplňovaných motorů a poslední část se věnuje poruchám turbodmychadel. Přeplňování představuje jednu z nejjednodušších možností zvyšování výkonu motoru a umožňuje tak konstrukci malých a relativně velmi výkonných motorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

přeplňování, dmychadlo, turbodmychadlo, turbina, kompresor, motor, downsizing

ABSTRACT

This thesis deals with up-to-date methods of charging processes used in combustion engines of contemporary cars. Major emphasis is put on turbocharged petrol engines. Principles of charging process are explained as well as the most common and extraordinary ways of charging process. Following chapter contains summary of present-day turbocharged and supercharged engines. Final part describes turbocharger failures. Turbo-charging represents an elementary way to increase engine power and allows designing high efficient engines of small dimensions.

KEYWORDS

supercharging, turbo-charging, charger, turbocharger, supercharger, engine, downsizing



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GÓRNIŚIEWICZ, T. *Moderní způsoby přeplňování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....

Tomáš Górnisiewicz



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velmi poděkovat panu Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D., především za jeho vstřícnost, ochotu a trpělivost při zodpovídání mých otázek a pročítání této práce.



OBSAH

Úvod	10
1 Podstata přeplňování	11
1.1 Základní možnosti zvyšování výkonu spalovacího motoru.....	11
1.2 Střední efektivní tlak na píst	12
1.2.1 Dopravní účinnost přeplňovaného motoru	12
1.2.2 Součinitel přebytku vzduchu	13
1.2.3 Indikovaná účinnost.....	14
1.2.4 Mechanická účinnost	14
1.2.5 Hustota plnicího vzduchu	15
1.3 Základní parametry přeplňování	15
1.3.1 Plnicí tlak a poměrné stlačení plnicího vzduchu	15
1.3.2 Hltnost přeplňovaného motoru	16
2 Dmychadla používaná k přeplňování	17
2.1 Dmychadla s mechanickým pohonem od motoru.....	17
2.1.1 Rootsovo dmychadlo	18
2.1.2 Šroubové dmychadlo	20
2.2 Turbodmychadla	22
3 Chlazení plnicího vzduchu	25
4 Regulace turbodmychadla	27
4.1 Pružnost spalovacího motoru.....	27
4.2 Regulace odpouštěním výfukových plynů před turbinou	28
4.3 Regulace natáčením lopatek statoru turbíny	29
5 Vícestupňové přeplňování	31
5.1 Dvoustupňové přeplňování	31
5.1.1 Sekvenční twin-turbo.....	31
5.1.2 Paralelní twin-turbo	33
5.1.3 Turbodmychadlo twin-scroll	34
5.1.4 Twincharger	35
5.2 Třístupňové přeplňování	36
6 Přeplňování elektrickým dmychadlem	37
7 Vybrané moderní přeplňované motory.....	39
7.1 Volkswagen TSI	39
7.1.1 Obecná charakteristika motorů TSI.....	40
7.1.2 Motor 1.8 TSI	40
7.1.3 Motor 3.0 TFSI.....	40



7.2	Renault TCe	41
7.3	Ford 1.0 EcoBoost	41
7.4	Fiat 0.9 SGE.....	41
7.5	Nissan 1.2 DIG-S	42
8	Technické údaje vybraných motorů	44
9	Poruchy turbodmychadel.....	49
9.1.1	Vniknutí cizího tělesa	49
9.1.2	Nedostatečné mazání	50
	Závěr.....	51
	Použité informační zdroje.....	52
	Seznam použitých zkratk a symbolů	55
	Seznam použitých jednotek	57
	Seznam obrázků.....	58



ÚVOD

Přeplňování pístových spalovacích motorů turbodmychadly či kompresory hraje v současnosti významnou roli ve vývoji vozidlových motorů zážehových i vznětových. Ještě na počátku 90. let 20. století však bylo přeplňování výsadou jen několika výjimečných motorů určených především pro sportovní a závodní automobily. Právě během poslední dekády 20. století se ve velké míře prosadila turbodmychadla v dieselových motorech a v posledních přibližně osmi letech zaznamenaly pronikavý vývoj i zážehové přeplňované motory. Důvodem tohoto počínání je snaha automobilek plnit přísné emisní normy Euro 5 a Euro 6 při zachování přibližně stejného výkonu motoru. S tím je úzce spojeno úsilí snížit měrnou spotřebu paliva a také rozměry motorů, což přináší podstatnou úsporu hmotnosti a z toho plynoucí lepší jízdní vlastnosti automobilu.

Podstatou přeplňování spalovacích motorů je zvýšení dodávky vzduchu do spalovacího prostoru, což umožňuje spálení většího množství paliva za stejný čas. Díky tomu lze dosáhnout vyššího výkonu a točivého momentu při nezměněném zdvihovém objemu motoru, potažmo získání obdobných hodnot výkonu a točivého momentu motoru o menším zdvihovém objemu. To tedy znamená zvýšení výkonové hmotnosti motoru při současném snížení měrné spotřeby paliva a emisí škodlivin. Ve výsledku je tím umožněna konstrukce relativně malého motoru s hodnotami výkonu a točivého momentu typickými pro podstatně větší atmosférický motor. To vše při nízké měrné spotřebě paliva. Tato konstrukční „filosofie“ je charakterizována pojmem downsizing. Podstatou downsizingu je využití technologií, jako je například přímé vstřikování paliva, variabilní časování ventilů a zejména přeplňování, ke konstrukci relativně velmi výkonného motoru s nízkým zdvihovým objemem, nízkou hmotností, nízkou spotřebou paliva a nízkými emisemi škodlivin.



1 PODSTATA PŘEPLŇOVÁNÍ

Účelem přeplňování spalovacích motorů je dopravit do válců více vzduchu, a tím umožnit i vyšší dodávku paliva. Přeplňované motory mají vyšší výkon při srovnatelné nižší spotřebě paliva. Vykazují také nižší podíl škodlivin ve výfukových plynech.[1]

Přeplňováním se do pracovního prostoru motoru dostává více vzduchu, a tak je možno zvětšit i množství paliva na jeden pracovní oběh. Tím se zvýší točivý moment motoru a jeho výkon. Přeplňovaný motor má řadu technických a ekonomických výhod oproti motoru s přirozeným sáním:

- výkonová hmotnost [kg/kW] přeplňovaného motoru je příznivější,
- zastavěný prostor přeplňovaného motoru je menší než u nepřepřňovaného motoru o stejném výkonu,
- průběh točivého momentu přeplňovaného motoru je příznivější, zejména při jízdě do kopce (viz obr. 16 a obr. 17 v kap. 4.1),
- lepší vlastnosti při jízdě ve vyšší nadmořské výšce (klesá měrná hustota vzduchu),
- menší měrná spotřeba paliva,
- turbodmychadlo na výfukové plyny přispívá ke zmenšení škodlivin,
- přeplňovaný motor je tišší než motor s přirozeným sáním, který má stejný výkon, mj. proto, že má menší konstrukční objem a tím menší hluk vyzařující povrch; turbodmychadlo působí jako dodatečný tlumič hluku.[1]

Zvyšováním výkonových parametrů pístového spalovacího motoru přeplňováním, zejména turbodmychadlem na výfukové plyny, jsou velmi výrazně ovlivňovány jeho konstrukční, provozní, ekonomické a další faktory. Protože plnicí agregát doplňuje a upravuje celý termodynamický oběh přeplňovaného motoru, je nutné stanovit základní parametry turbodmychadla, stlačení plnicího vzduchu a hmotnostní průtok kompresorem v souvislosti s parametry oběhu i v závislosti na konstrukčních parametrech motoru.[2]

1.1 ZÁKLADNÍ MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU SPALOVACÍHO MOTORU

Efektivní výkon pístového spalovacího motoru je dán vztahem [2]:

$$P_e = iV_H p_e \frac{n}{\tau}, \quad (1)$$

Kde i je počet válců spalovacího motoru, V_H je zdvihový objem jednoho válce, p_e je střední efektivní tlak na píst, n jsou otáčky motoru, τ je otáčkový činitel, vyjadřující počet otáček motoru potřebných pro 1 expanzní zdvih (pro čtyřdobý motor $\tau = 2$).

Ze vztahu (1) plyne, že efektivní výkon motoru je možno zvětšit:

- a) zvětšením jeho konstrukčních rozměrů – počtu válců i nebo zdvihového objemu V_H ,
- b) rychloběžností motoru, tedy zvýšením počtu otáček n , které jsou omezeny druhem a určením spalovacího motoru, rychlostí hoření, ekonomičností, dynamickými a životnostními problémy,
- c) zvýšením středního efektivního tlaku na píst.[2]



Přitom přeplňování spalovacího motoru je možné uplatnit u poslední alternativy. Zvýšení středního efektivního tlaku je možné spálením většího množství paliva, ze kterého se uvolní větší množství energie, které se přivede do oběhu motoru. To pro dokonalé hoření paliva předpokládá dodávku většího hmotnostního množství vzduchu, což je účelem přeplňování.[2]

1.2 STŘEDNÍ EFEKTIVNÍ TLAK NA PÍST

Střední efektivní tlak na píst je určen vztahem [2]:

$$p_e = \frac{H_u}{\sigma_t \lambda_z} \rho_{pl} \eta_d \eta_i \eta_m, \quad (2)$$

kde H_u je výhřevnost použitého paliva, λ_z je spalovací součinitel přebytku vzduchu, σ_t je teoretický směšovací poměr vzduchu a paliva, ρ_{pl} je hustota plnicího vzduchu, η_d je dopravní účinnost motoru, η_i je indikovaná účinnost motoru, η_m je mechanická účinnost motoru.

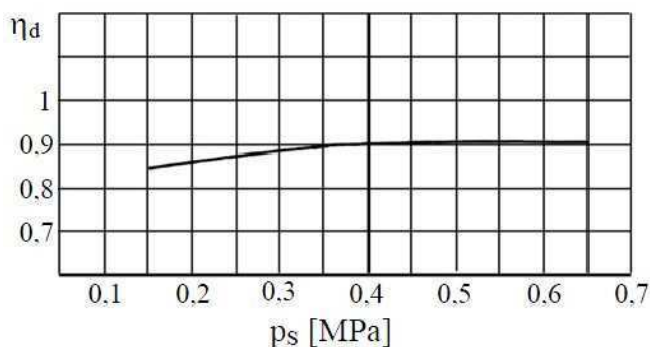
Vezeme-li v úvahu, že pro dané použité palivo je ve vztahu (2) poměr výhřevnosti H_u a teoretického směšovacího poměru paliva se vzduchem σ_t konstantní, pak střední efektivní tlak na píst závisí na η_d , η_i , $1 / \lambda_z$ a ρ_{pl} . [2]

1.2.1 DOPRAVNÍ ÚČINNOST PŘEPLŇOVANÉHO MOTORU

Dopravní účinnost je definována vztahem [2]:

$$\eta_d = \frac{m_z}{V_H \rho_{pl}} = \frac{V_z T_{pl}}{V_H T_{1z}}. \quad (3)$$

Tedy poměrem hmotnosti čerstvé náplně ve válci motoru m_z za stavu na konci plnění (p_{1z} , T_{1z}) k hmotnosti, která byla ve válci při ideálním plnění během celého sacího zdvihu $V_H \rho_{pl}$, tedy za stavu plnicího vzduchu před plnicím ventilem (p_{pl} , T_{pl}). [2]



Obr. 1 Závislost dopravní účinnosti na plnicím tlaku [4]

Jak je patrné z obr. 1, zpočátku při zvyšování plnicího tlaku do hodnoty 0,35 MPa se dopravní účinnost zvyšuje trochu více a nad touto hodnotou zůstává téměř konstantní.



Celkově je možné tvrdit, že se dopravní účinnost v závislosti na plnicím tlaku mění relativně málo. Její závislost na teplotě plnicího vzduchu je také velmi malá.[3]

1.2.2 SOUČINITEL PŘEBYTKU VZDUCHU

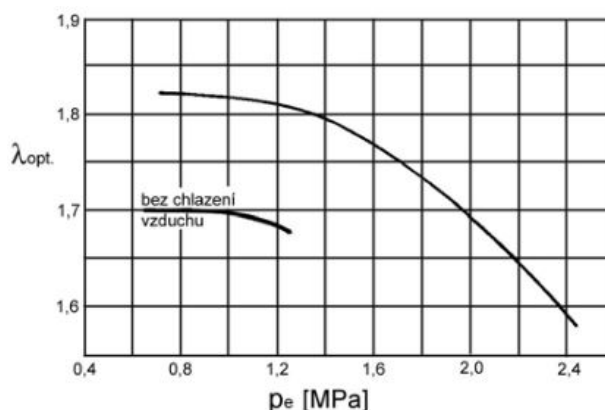
Spalovací motor potřebuje ke svému provozu určitý poměr vzduchu a paliva. V ideálním případě je pro spálení 1 kg benzínu, resp. nafty potřeba 14,7 kg, resp. 14,5 kg vzduchu. Tento ideální směšovací poměr se označuje jako stechiometrická směs. Pro usnadnění popisu jednotlivých režimů byl zaveden součinitel přebytku vzduchu λ_z . Hodnota 1 vyjadřuje ideální poměr, hodnoty větší než 1 náleží chudé směsi, hodnoty menší než 1 vyjadřují bohatou směs. I když v různých provozních režimech práce motoru se využívá různých směsí od chudých ($\lambda_z = 1,05 \div 1,3$) nabízejících nízkou spotřebu při částečných zatíženích až pro bohatou ($\lambda_z = 0,85 \div 0,95$) pro vysoké výkony při plném zatížení, stacionární režim práce motoru se u dnešních motorů pohybuje v úzkém intervalu kolem $\lambda_z = 1$ (směs potřebná pro správnou činnost katalyzátoru). Toto platí motory atmosféricky plněné i pro motory přeplňované.[5]

Součinitel přebytku vzduchu ovlivňuje střední efektivní tlak nepřímo. U přeplňovaných motorů, kde se uvažuje s proplachem spalovacího prostoru při překřížení ventilů, je nutné celkový součinitel přebytku vzduchu λ rozdělit na spalovací součinitel přebytku vzduchu λ_z a proplachovací λ_{pr} , takže je možno napsat [2]:

$$\lambda = \lambda_z + \lambda_{pr} . \quad (4)$$

Pro růst λ , resp. λ_z platí tato omezení:

- z pohledu růstu středního indikovaného tlaku p_i bude růst λ_z výhodný, pokud poroste indikovaná účinnost η_i ,
- z hlediska maximální teploty výfukových plynů T_v před turbinou slouží λ jako regulační činitel,
- z hlediska maximální spalovací teploty je λ rovněž regulačním prvkem.[4]



Obr. 2 Závislost optimální hodnoty λ_{opt} na tlaku p_e [4]

Součinitel λ je významným činitelem k regulaci tepelného namáhání dílů motoru (stěny, písty, ventily apod.) i příslušenství (turbina). Pro čtyřdobé vznětové přeplňované motory je optimální hodnotou $\lambda \cong 1,8$ a to i z pohledu nízkých měrných spotřeb paliva. Existují určité



výpočtové metody ke stanovení optimálních hodnot λ , ale pro praktické účely je zcela dostačující vycházet ze zpracovaných experimentálních měření z více motorů, kde je λ funkcí p_i či p_e . [4]

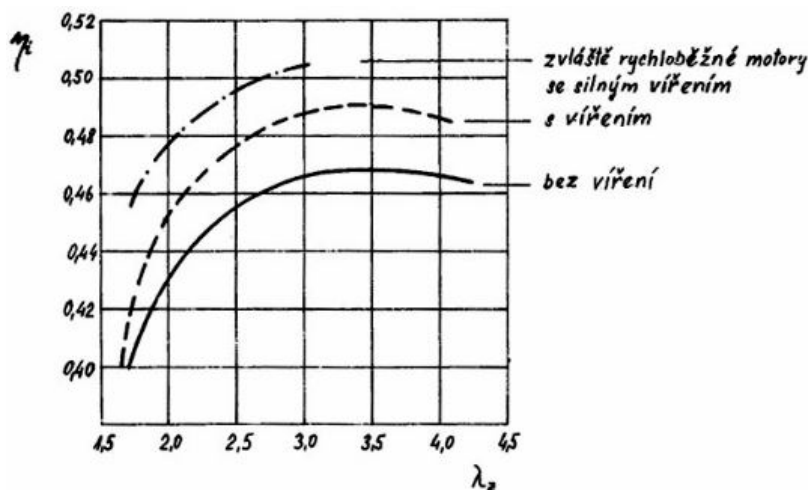
1.2.3 INDIKOVANÁ ÚČINNOST

Indikovanou účinnost můžeme vyjádřit pomocí vztahu [3]:

$$\eta_i = \frac{V_H p_i}{H_u M_{p1}}, \quad (5)$$

přičemž M_{p1} je hmotnostní dávka paliva na jeden cyklus.

Podle experimentálních prací je průběh indikované účinnosti η_i v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ_z pro čtyřdobé vznětové přeplňované motory znázorněn na obr. 3.



Obr. 3 Závislost indikované účinnosti η_i na λ_z [4]

Z uvedené závislosti vyplývá, že indikovaná účinnost roste zpočátku s λ_z poměrně prudce a s dále rostoucí hodnotou λ_z se růst η_i zmenšuje a po dosažení své maximální hodnoty při $\lambda_z \cong 3,5$ klesá. Dále je patrné, že se η_i zvyšuje s intenzitou víření vzduchu ve spalovacím prostoru. Zvláště vysokých hodnot dosahuje indikovaná účinnost u velmi rychloběžných motorů se silným vířením, obzvláště u současných přeplňovaných motorů pro osobní vozidla. [3]

1.2.4 MECHANICKÁ ÚČINNOST

Mechanická účinnost se spočte podle vztahu [4]:

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_i}. \quad (6)$$



Mechanické ztráty spalovacího motoru je možné rozdělit takto:

- a) Ztráty nezávislé na zatížení motoru, k nimž patří výkon vynaložený na pohon pomocných agregátů (mazacího, podávacího palivového a chladicího čerpadla, alternátoru, ventilátoru, atd.), třecí ztráty od setrvačných sil, pohon rozvodových orgánů, ventilační ztráty. Tyto ztráty se nebudou s rostoucím stupněm přeplňování téměř vůbec měnit.
- b) Ztráty závislé na zatížení motoru. Do této skupiny patří třecí ztráty, měnící se se zatížením motoru, tedy s tlakem na píst. Tato skupina ztrát se bude s růstem stupně přeplňování nejvíce zvyšovat.
- c) Ztráty spojené s výměnou náplně válce. Tyto ztráty se u přeplňovaných motorů v porovnání s nepřepřňovanými motory podstatně mění.[3]

1.2.5 HUSTOTA PLNÍCÍHO VZDUCHU

Potřebná hustota plnicího vzduchu vyjde nakonec z požadovaného středního efektivního tlaku na píst ze vztahu (2).

Pro hustotu plnicího vzduchu platí také vztah [4]:

$$\rho_{pl} = \frac{p_{pl}}{rT_{pl}}. \quad (7)$$

Z toho je zřejmé, že hustotu plnicího vzduchu lze zvýšit:

- a) zvýšením plnicího tlaku p_{pl} v kompresoru,
- b) snížením teploty T_{pl} ochlazením v chladiči plnicího vzduchu,
- c) kombinací těchto dvou způsobů.[3]

Zvýšení hustoty plnicího vzduchu povede vždy ke zvýšení maximálních spalovacích tlaků a teplot a dotkne se tak hlavních faktorů, které z hlediska teplot a pevnosti omezují pístový spalovací motor. Je proto nutné při stanovení stupně přeplňování vycházet z termického oběhu daného motoru a mít na zřeteli přípustné hodnoty maximálního spalovacího tlaku a teploty.[2]

1.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PŘEPLŇOVÁNÍ

Základními parametry přeplňování jsou v podstatě základní parametry plnicího kompresoru turbodmyhadla či mechanicky poháněného kompresoru. Těmito parametry jsou:

- a) stlačení plnicího vzduchu,
- b) hmotnostní průtok vzduchu kompresorem, který je dán hltností přeplňovaného motoru.[3]

1.3.1 PLNÍCÍ TLAK A POMĚRNÉ STLAČENÍ PLNÍCÍHO VZDUCHU

Tlak plnicího vzduchu p_{pl} před vstupem do motoru se stanoví z požadované hustoty pro dosažení stanoveného středního efektivního tlaku na píst. Ze vztahu (7) tedy vyplývá [3]:



$$p_{pl} = \rho_{pl} r T_{pl} . \quad (8)$$

Při stanovení poměrného stlačení plnicího vzduchu v kompresoru se použije vztah [3]:

$$\Pi_K = \frac{p_{2K}}{p_{0K}} = \left(\frac{\rho_{pl} r T_{0K}}{\rho_{0K}} \right)^n , \quad (9)$$

kde Π_K je poměrné stlačení v kompresoru, T_{0K} je teplota plnicího vzduchu před vstupem do kompresoru, ρ_{0K} je hustota plnicího vzduchu před vstupem do kompresoru, n je exponent polytropy.

Vztah (9) je platný, pokud plnicí vzduch není ochlazován. Protože u moderních přeplňovaných motorů používaných v osobních automobilech se používá chlazení plnicího vzduchu před vstupem do motoru, je nutné uvažovat [3]:

$$p_{pl} = p_{2K} - \Delta p_{ch} \quad (10)$$

$$T_{pl} = T_{2K} - \Delta T_{ch} , \quad (11)$$

kde Δp_{ch} je tlaková ztráta při průtoku chladičem, ΔT_{ch} je snížení teploty vzduchu v chladiči.[3]

1.3.2 HLTNOST PŘEPLŇOVANÉHO MOTORU

Hltnost přeplňovaného čtyřdobého motoru, tedy celkové hmotnostní množství \dot{m}_K , jež dodává kompresor turbodmyhadla a protéká motorem, je možno rozdělit na:

- a) Hmotnostní množství vzduchu, které zůstává uzavřeno ve válci, tedy spalovací množství \dot{m}_Z ,
- b) Proplachovací množství vzduchu \dot{m}_{pr} , které v době překřížení ventilů propláchne spalovací prostor a unikne do výfukového traktu.[2]

Platí tedy [2]:

$$\dot{m}_K = \dot{m}_Z + \dot{m}_{pr} . \quad (12)$$

Tomuto rozdělení odpovídá i rozdělení součinitele přebytku vzduchu, jak je uvedeno v kap. 1.2.2.



2 DMYCHADLA POUŽÍVANÁ K PŘEPLŇOVÁNÍ

K přeplňování vozidlových pístových motorů slouží dmychadla, která dodávají stlačený vzduch do motoru. Dmychadla používaná v současnosti k přeplňování spalovacích motorů v osobních automobilech lze v zásadě rozdělit do dvou skupin:

- 1) dmychadla s mechanickým pohonem od motoru (tzv. kompresory),
- 2) turbodmychadla.

Z tohoto rozdělení je zřejmé, že se jedná o dvě zásadně odlišné skupiny plnicích dmychadel. I když mají mechanicky hnaná dmychadla některé výhody, jako jsou relativně nízké provozní otáčky, malá setrvačnost a poměrně rychlá reakce na zatížení motoru, přesto je jejich používání omezeno. Je to dáno především tím, že příkon pro dmychadlo je nutné odebrat motoru. A o tuto hodnotu se sníží i vlastní výkon motoru. U dmychadel s mechanickým pohonem od motoru se vyskytují nemalé ztráty v pohonech, pružných prvcích a spojkách, které podstatně zhoršují mechanickou účinnost motoru.[6] To jsou důvody, proč se dnes kompresory s mechanickým pohonem od motoru u vozidlových spalovacích motorů nepoužívají v tak hojné míře jako turbodmychadla. Ta jsou rozměrově i váhově nenáročná a při zvyšování výkonu motoru zlepšují i jeho celkovou účinnost, projevující se v menší spotřebě paliva. Nevýhodou turbodmychadel je jejich pomalejší reakce na zatížení motoru.

2.1 DMYCHADLA S MECHANICKÝM POHONEM OD MOTORU

U mechanického přeplňování je dmychadlo poháněno dnes nejčastěji mechanickým ozubeným převodem od klikového hřídele motoru.[5] To znamená, že tato dmychadla zvyšují pasivní odpory motoru, a tím částečně znehodnocují práci vynaloženou na zvýšení výkonu. Je proto nutno se při jejich konstrukci vyvarovat všeho, co by tento stav dále zhoršovalo. V tomto případě nelze očekávat zlepšení účinnosti ani snížení spotřeby paliva. Je proto zapotřebí maximálně šetřit množstvím vzduchu, které je do motoru dodáváno, a které vyžaduje patřičný příkon. Nevelké zvýšení výkonu nevyžaduje větší odvod tepla a je nutné pouze zajistit co nejlepší vypláchnutí spalovacího prostoru od spalin z předchozího cyklu. Proto se u čtyřdobých motorů nesetkáváme s větším překřížením ventilů, tj. s větším časovým úsekem, kdy je současně otevřen sací i výfukový ventil. Z uvedených důvodů je dmychadlem nasávané množství asi 1,2 až 1,4násobek zdvihového objemu motoru za jednotku času a plnicí tlaky zpravidla nepřesahují hodnotu 0,13 MPa, i když dmychadla mají jinak možnost pracovat s vyššími hodnotami, než je uvedeno.[6]

Výhodou mechanického přeplňování je skutečnost, že jisté stlačení vzduchu je k dispozici již od nejnižších otáček motoru. Přímá vazba otáček dmychadla s otáčkami klikového hřídele poskytuje okamžitou odezvu v nestacionárním stavu. Účinnost tedy jen málo závisí na otáčkách a dodávka vzduchu je úměrná otáčkám. Studie ukazují, že mechanické přeplňování nabízí ve srovnání s přeplňováním turbodmychadlem nižší výkonové zisky a také měrná spotřeba nedosahuje parametrů motorů přeplňovaných turbodmychadlem. Tato nevýhoda může být zmírněna odpojováním dmychadla při nižších zatíženích motoru. Mechanická vazba dmychadla s klikovou hřídelí je také zdrojem nadměrného hluku.[5]

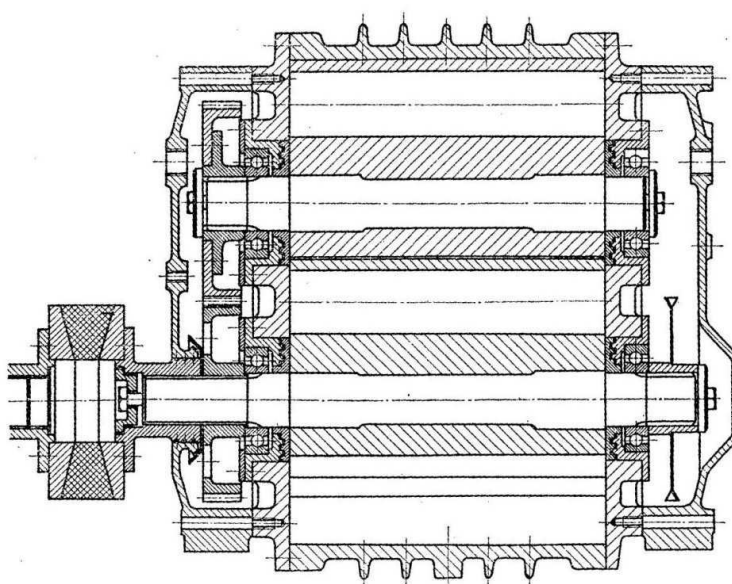
Ve vozidlových motorech se můžeme setkat s různými druhy mechanicky poháněných dmychadel. Mezi nejpoužívanější dnes patří Rootsova nebo šroubová (Lysholmova) dmychadla, patřící do kategorie rotačních objemových dmychadel. Volkswagen v minulosti vyvinul motory s tzv. spirálovým G-dmychadlem, které se však dnes pro svou složitou



konstrukci nepoužívá. V podstatě jediným výrobcem používajícím v současnosti pro přeplňování motorů mechanicky poháněné kompresory je firma Jaguar. Ta osazuje své zážehové vidlicové šestiválce, resp. osmiválce o objemu 3,0 l, resp. 5,0 l Rootsovými dmychadly. U takto výkonných motorů už není nevýhoda velkého příkonu mechanického kompresoru tak podstatná jako u běžně používaných maloobjemových čtyřválcových motorů. Technické specifikace těchto pohonných jednotek jsou obsaženy v tab. 1 v kap. 8.

2.1.1 ROOTSOVO DMYCHADLO

Rootsovo dmychadlo je nejčastěji používaným objemovým dmychadlem u vozidlových spalovacích motorů. S ohledem na jeho tvar bývá též někdy nazýváno zubovým dmychadlem. Od ostatních dmychadel se liší tím, že ke stlačení vzduchu, nejdříve uzavřeného a dopravovaného v prostoru mezi zuby rotoru, dochází naráz až při spojení mezizubového prostoru s výtláčným kanálem. Tato skutečnost je příčinou značného hluku.[3] Výhodou tohoto dmychadla je poměrně malá změna účinnosti v závislosti na otáčkách a přitom dodávka vzduchu je prakticky přímo úměrná otáčkám. Vlastní dmychadlo nemá žádné vzájemně se troucí části, je dobře vyváženo, je kompaktní konstrukce a může pracovat při dostatečně vysokých otáčkách. Nevýhodou je poměrně malá účinnost, závislá na vůli mezi zuby rotoru, značný hluk a tlaková pulzace ve výtlaku, zvláště při malém počtu zubů a přímých zubech.[3] Další nevýhodou je značný hluk a relativní výrobní i montážní náročnost.



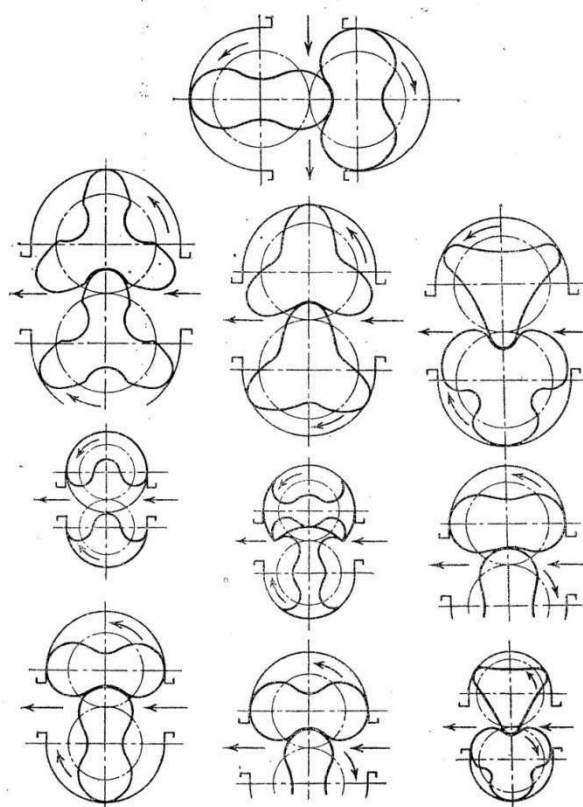
Obr. 4 Řez Rootsovým dmychadlem[6]

Rootsovo dmychadlo se skládá z vlastní skříně, odlité zpravidla z hliníku, někdy z litiny. Skříň bývá žebrovaná, jednak z pevnostních důvodů, jednak pro částečný odvod tepla. Zvláštní chlazení dmychadlo nevyžaduje. Na obou částech skříně jsou mezistěny, které tvoří uložení rotorů a jsou uzavřeny víky, jak je patrné z obr. 4. Rotory dmychadel se skládají z hřídele, na němž jsou umístěny vlastní rotory. Profily rotorů mohou mít nejrůznější tvar, jak je vidět na obr. 5. Zpravidla jsou však dvoukřídlé nebo tříkřídlé se zuby ve tvaru



evolventy. Rotory bývají zpravidla hliníkové a bývají přímo nality na ocelový hřídel. Jiným způsobem spojení je nalisování, popřípadě skolíkování a našroubování.[6]

Zuby rotorů nikdy nepřijdou do záběru a vždy mezi nimi zůstává určitá vůle. Radiální vůle rotorů vůči skříni bývá (0,001 až 0,001 5) vnějšího průměru rotoru d , vůle mezi křídly (zuby) obou rotorů je v rozmezí (0,001 5 až 0,002) d a axiální vůle rotorů ve skříni bývá (0,25 až 0,5) mm. Čím budou větší vůle, tím bude menší objemová účinnost dmyhadla a opačně.[3] Vlastní pohon rotorů zajišťují ozubená kola s převodem 1:1, umístěná na jedné straně dmyhadla. Tato ozubená kola mívají pro menší hlučnost šikmé ozubení a s ohledem na vysoké otáčky a poměrně velká zatížení se většinou kalí a brousí, přičemž se předepisují vysoké třídy přesnosti obrobení. Rotory jsou uloženy zpravidla na valivých ložiskách. Mazání je zajištěno buď trvalým přítokem a odtokem oleje do prostoru ozubených kol a ložisek, nebo je v předním a zadním víku nalit do určité výše olej, jehož hladina se kontroluje olejoznakem nebo zátkou. Vlastní mazání kol obstarává olejová mlha, vytvořená buď ozubenými koly, nebo speciálním kotoučem. Aby se olej nedostal ve větší míře do prostoru vlastního dmyhadla, je za ložisky umístěna speciální, zpravidla labyrintová ucpávka. U menších dmyhadel s malou obvodovou rychlostí hřídele pod (6 až 10) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ lze použít i jednodušší těsnění Gufero.[6]



Obr. 5 Tvary rotorů Rootsových dmyhadel [6]

Protože hluk Rootsových dmyhadel je nežádoucí, dělají se někdy zuby ve tvaru šroubovice. Jednodušší řešení je ponechat zuby rotoru přímé a udělat šikmý nasávací a výtlačný otvor, což však zpravidla vyžaduje více zubů než 2. Méně hlučné jsou také rotory s větším počtem křídel (3 nebo 4). Na hluk má vliv i obvodová rychlost rotorů, a proto je vhodné volit ji co nejmenší, nejlépe menší než 30 m/s. Hluk je možno tlumit také vhodným tlumičem sání,



je však nutné dostatečně dimenzovat průtočné průřezy, protože jinak stoupne podtlak v sání a zhorší se objemová účinnost dmyhadla. Na hlučnost má vliv také dokonalé provedení mechanické části dmyhadla. Protože rotory Rootsova dmyhadla mají značnou setrvačnost, vkládá se do jejich pohonu pružný člen – u malých dmyhadel používaných v osobních automobilech je vhodný pohon řemenem.[6]

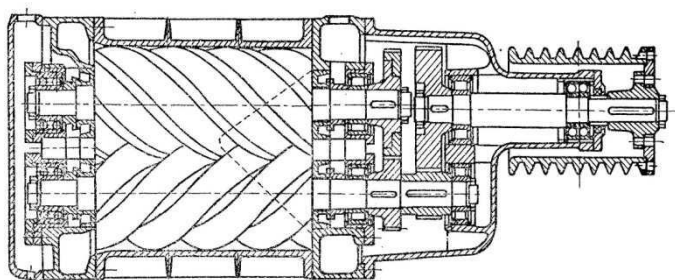
Rootsovo dmyhadlo pracuje takto: vzduch ze sacího potrubí zaplní prostor mezi dvěma sousedními křídly rotoru. Během otáčení se přesouvá v prostoru mezi křídly rotoru dané množství vzduchu, až se rotor natočí tak, že dojde ke spojení s výtlačným potrubím. Při dalším otáčení se zasouvá do prostoru mezi křídly jednoho rotoru křídlo rotoru druhého a vytlačuje tak vzduch, který zde byl, do výtlačného potrubí.[6] Tento princip je znázorněn na obr. 6.



Obr. 6 Princip Rootsova dmyhadla [7]

2.1.2 ŠROUBOVÉ DMYCHADLO

Výhodou šroubového dmyhadla je, podobně jako u Rootsova dmyhadla, poměrně malá změna účinnosti v závislosti na otáčkách a dodávka vzduchu je úměrná otáčkám dmyhadla. Ve srovnání s Rootsovým dmyhadlem má vyšší otáčky ((30 až 165) Hz), větší účinnost a podstatně menší hlučnost. Nevýhodou je však jeho obtížná a náročná výroba a velká citlivost na zvětšení vůlí mezi rotory.[6] Z těchto důvodů se dnes šroubová dmyhadla pro přeplňování vozidlových spalovacích motorů používají minoritně.

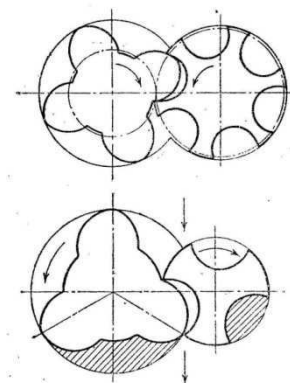


Obr. 7 Řez šroubovým dmyhadlem Lysholm [6]

Šroubové dmyhadlo se skládá z vlastní skříně, ve které jsou valivě nebo kluzně uloženy rotory – viz obr. 7. Vzájemné pootáčení rotorů je zajištěno dvojicí ozubených kol nejčastěji

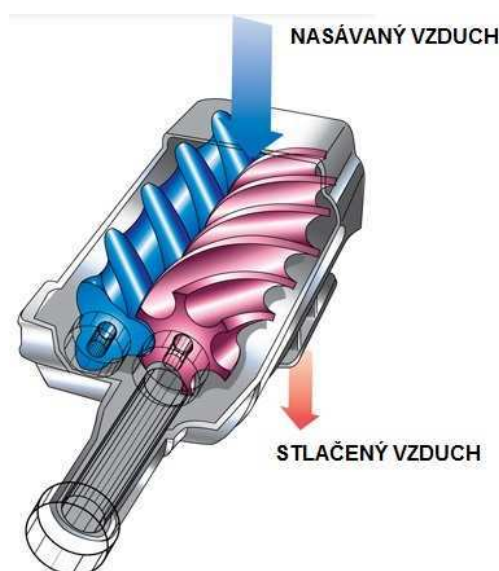


s převodem 1:1 (což však není podmínkou, záleží na počtu zubů dmyhadla). Tvary rotorů, z nichž jeden je hlavní a druhý vedlejší, jsou podobné profilům u Rootsových dmyhadel a jejich příčný průřez představuje ozubená kola se speciálním tvarováním. Přitom hlavní je ten rotor, který má stejný nebo větší průměr než druhý vedlejší rotor.[6] Tvary rotorů jsou vyobrazeny na obr. 8.



Obr. 8 Tvary rotorů šroubového dmyhadla [6]

Podstata činnosti šroubového dmyhadla je vidět na obr. 9. Vzduch se v tomto dmyhadle pohybuje ve směru podélné osy rotace. Vzduch vstupuje sacím potrubím do prostoru mezi zuby rotorů. Po pootočení rotorů se vzduch uzavře mezi rotory a tělesem dmyhadla. Dalším pootáčením se tento prostor stále zmenšuje, až dosáhne nejmenšího objemu při odkrytí výtlačného otvoru. Vzduch přitom stále postupuje směrem osy dmyhadla a postupně se zvyšuje i jeho tlak až na hodnotu tlaku ve výtlačku. Šroubové dmyhadlo patří mezi dmyhadla s vnitřní kompresí.[6]



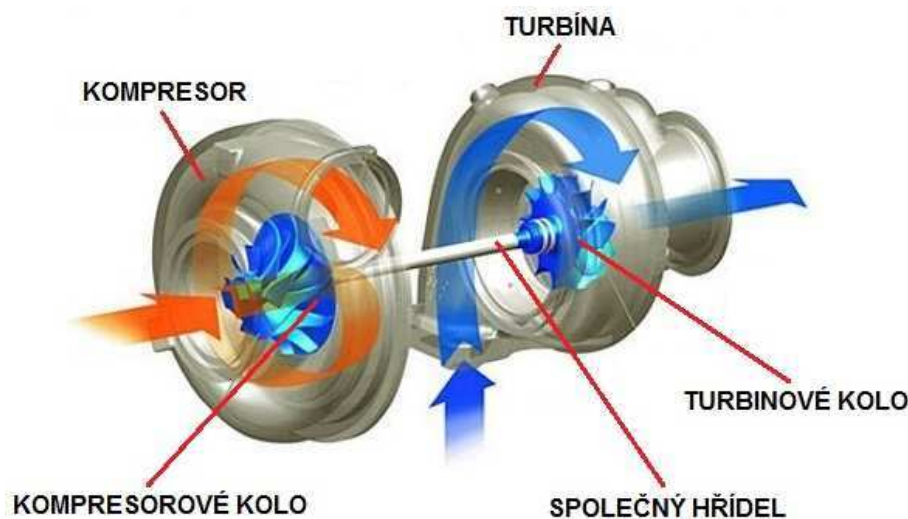
Obr. 9 Princip šroubového dmyhadla [8]



2.2 TURBODMYCHADLA

Dnes nejrozšířenějším způsobem přeplňování vozidlových spalovacích motorů je přeplňování turbodmychadly. Výhodou tohoto řešení je využívání energie výfukových plynů k pohonu agregátu na dodávku plnicího vzduchu. Výfukovými plyny odchází (30 až 40) % energie přivedené do motoru v palivu, a je to právě přeplňování turbodmychadlem, při kterém se částí této energie využívá.[6]

Turbodmychadlo se skládá z kompresoru a výfukové turbíny, které jsou uloženy na společném hřídeli – viz obr. 10. Výfukové plyny jsou vedeny z válce motoru do turbíny na výfukové plyny. Turbína tuto energii zpracuje a prostřednictvím společného hřídele ji předá kompresoru. Kompresor na druhém konci hřídele stlačuje vzduch, který pak proudí přes chladič stlačeného vzduchu do spalovacího prostoru vyšším tlakem, než je okolní atmosférický tlak. Množství plnicího vzduchu pak musí stačit nejen pro naplnění válce, ale i k jeho vypláchnutí.[6]



Obr. 10 Popis konstrukce turbodmychadla [9]

Mezi motorem a turbodmychadlem je pouze vazba prostřednictvím proudících plynů a vzduchu. Práce turbodmychadla a jeho otáčky jsou řízeny podmínkou rovnováhy mezi výkonem turbíny a příkonem kompresoru, a proto je tu celkově dobrý průběh plnicího tlaku v širokém rozsahu otáček motoru. Změní-li se množství výfukových plynů, změní se sice otáčky turbodmychadla, avšak tento stav není na závadu, protože se současně změní i potřebné množství vzduchu. Důsledkem toho je automatické nastavení nových provozních hodnot množství, tlaku a otáček bez jakékoli potřebné regulace. Tato samoregulovatelnost turbodmychadla je příčinou, že v široké oblasti otáčkových i výkonových změn oba dílčí rotační stroje pracují s velkou účinností, které by se při mechanické vazbě s motorem nikdy nemohlo dosáhnout. Proto pracuje-li spalovací motor s turbodmychadlem bez mechanické vazby, pak při poklesu otáček motoru při plném zatížení je pokles plnicího tlaku menší než u motorů s mechanicky poháněnými dmychadly, což se projeví menší měrnou spotřebou paliva, zajištěnou větším přebytkem vzduchu. Pracuje-li motor při konstantních otáčkách a proměnném zatížení, pak rovněž spotřeba se mění pomaleji než u motorů s mechanickým pohonem dmychadla.[6]



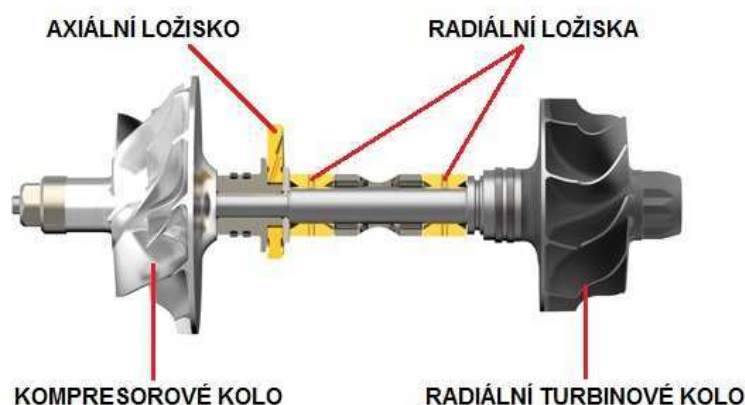
Tím, že turbodmychadlo využívá unikající energie výfukových plynů, lépe využívá paliva přivedeného do motoru, což se projevuje v menší spotřebě. Při stejném indikovaném výkonu má motor s turbodmychadlem ve srovnání s motorem s mechanicky poháněným kompresorem vyšší užitečný výkon. Je to dáno rozdílem mezi příkonem mechanicky poháněného kompresoru a hydraulickými ztrátami v plnicím potrubí, což se projeví zvýšením celkové účinnosti a snížením měrné spotřeby paliva. Kromě toho použití turbodmychadla nevyžaduje konstrukčně složité a výrobně náročné pohony s převody, jako je tomu u mechanicky poháněných kompresorů.[6] Významný důsledek zvyšování výkonu tímto způsobem je také zmenšení hmotnosti a rozměrů motoru. Měrná hmotnost [kg/kW] se sníží při 100 % zvýšení výkonu na 50 %.[1]

Existují dva základní typy turbodmychadel:

- a) turbodmychadla s axiální turbinou,
- b) turbodmychadla s radiální turbinou.

Konstrukce s axiální turbinou se v přeplňovaných vozidlových motorech neuplatňuje, a proto se budeme zabývat pouze konstrukcí s radiální turbinou.

Konstrukce turbodmychadla s radiální turbinou, nazývaného též turbodmychadlo s dostředivou turbinou, je typická letným uložením kol turbíny i dmychadla, která jsou nasazena na společné hřídeli, jak ukazuje obr. 11.[6] Vysoké otáčky turbíny a kompresoru (až $300\,000\text{ min}^{-1}$) a teplotní rozdíl až 1000°C mezi kompresorem a turbínou vyžadují vysoce přesnou výrobu a odolné materiály. Turbinové kolo (obr. 12) je zpravidla vyrobeno z žárovečné niklové slitiny, oběžné kolo dmychadla (obr. 13) je z hliníkové slitiny. Skříň turbíny a skříň ložisek je z temperované litiny, skříň dmychadla z hliníkové slitiny. Některá turbodmychadla dnes bývají chlazena vodou.[10] Skříň dmychadla je třídílná a skládá se z turbinové, ložiskové a dvoudílné dmychadlové skříně. Uspořádání skříní umožňuje rovněž jejich vzájemné natočení. Ložiska turbodmychadla jsou mazána i chlazena olejem protékajícím ložiskovou skříní a dodávaným z motorového okruhu. U jiných konstrukcí je samostatný mazací okruh s dvoukroučovým mazacím kroužkem. U turbodmychadel pro motory osobních automobilů se téměř výhradně používají kluzná ložiska.[6]



Obr. 11 Rotor turbodmychadla s radiálním turbinovým kolem [11]

U radiální turbíny je výstup na menším poloměru než vstup, protože výfukové plyny vstupují na vnějším obvodu kola a vystupují středem. Uplatní se zde i rozdíl kinetické energie na vnějším a vnitřním obvodu kola, vyvolaný jeho rotací. U axiální turbíny tato složka



neexistuje. U turbodmychadla pro malé průtočné množství se uplatní tato výhoda radiální turbíny, protože axiální turbína pro malé množství má nepříznivou účinnost vlivem malé délky lopatek.[6] Výhodou turbodmychadla s radiální turbínou je také jeho relativní jednoduchost a z toho plynoucí nižší cena. Z těchto důvodů se dnes pro přeplňování vozidlových spalovacích motorů používají výhradně turbodmychadla s radiální turbínou.



Obr. 12 Radiální turbinové kolo [12]

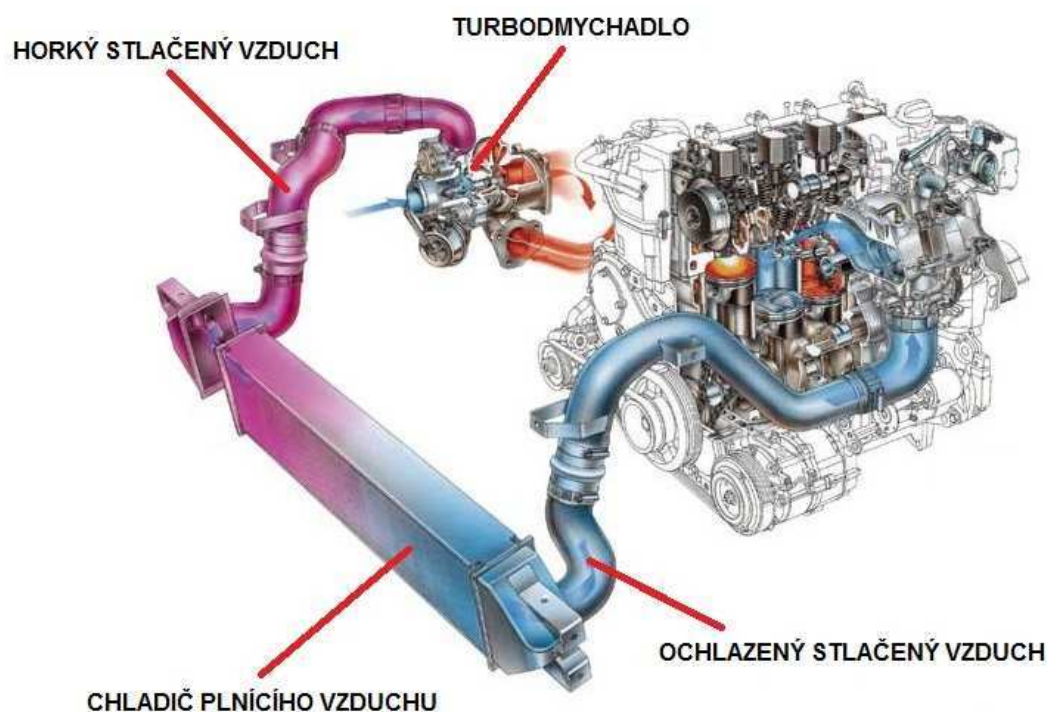


Obr. 13 Kompresorové kolo [13]



3 CHLAZENÍ PLNICÍHO VZDUCHU

Chlazení plnicího vzduchu je nejjednodušší a neúčinnější způsob, jak zlepšit parametry zážehových i vznětových motorů. Střední efektivní tlak na píst p_e , jak vyplývá ze vztahu (2), je přímo závislý na hustotě plnicího vzduchu ρ_{pl} . V důsledku zvýšení plnicího tlaku v kompresoru dochází ke zvýšení hustoty ρ_{pl} a tím i ke zvýšení teploty plnicího vzduchu. Ze vztahu (7) je však patrné, že je potřeba teplotu plnicího vzduchu T_{pl} co nejvíce snížit. To je důvod, proč se mezi dmychadlo a motor umísťuje chladič stlačeného vzduchu (tzv. intercooler), který ochlazuje plnicí vzduch za dmychadlem. Snížením teploty stlačeného vzduchu se zvýší jeho objemové množství, tlačené do válce motoru, a zvyšuje se tak plnicí účinnost motoru. Ochlazení je prováděno na teplotu blízkou teplotě před stlačením.[1] Schéma vřazení chladiče plnicího vzduchu je vidět na obr. 14 a jeho umístění na vozidle je ukázáno na obr. 15.



Obr. 14 Vřazení chladiče plnicího vzduchu mezi turbodmychadlo a motor [14]

Výše ochlazení plnicího vzduchu při použití chladiče vzduchu je závislá:

- na velikosti chladiče, tj. na velikosti chladicí plochy,
- na druhu chladicího média, jímž u vozidlových motorů bývá voda nebo vzduch,
- na vstupní teplotě chladicího média,
- na poměru hmotnostního toku chlazeného vzduchu a chladicího média,
- na druhu a účinnosti chladiče.[3]

Chlazení plnicího vzduchu se u přeplňovaných motorů projevuje tímto:

- hustota plnicího vzduchu se zvětší při nepatrném snížení tlaku ztrátou v chladiči.
- Při stejné dodávce paliva se sníží teplotní a tlaková hladina celého oběhu přeplňovaného motoru a tím i maximální spalovací teploty a tlaky.
- Zmenší se tepelné a částečně i mechanické namáhání motoru a tím je z pevnostního hlediska možné zvýšení výkonu motoru.



4. V důsledku snížení teplotní hladiny oběhu motoru a proplachem chlazeného vzduchu se sníží teploty výfukových plynů.
5. Výkon přeplňovaného motoru je méně závislý na teplotě okolí. U motorů bez chlazení plnicího vzduchu se sníží výkon motoru o 1 % při zvýšení teploty v sání kompresoru asi o 3 K.
6. Podle intenzity chlazení plnicího vzduchu se sníží měrná spotřeba paliva o (3 až 5) % při jmenovitém výkonu motoru.
7. Při téže spotřebě paliva se dosáhne zvýšení výkonu motoru o (5 až 6) % vůči motoru bez chlazení plnicího vzduchu.
8. Zvýšení jmenovitého výkonu motoru s chlazeným přeplňováním činí (10 až 35) %.[3]

Instalací chladiče na přeplňovaném motoru dochází v důsledku snížení teploty výfukových plynů k růstu jejich hustoty a poklesu objemového toku turbinou, což by způsobilo, při nezměněné průtočné ploše rozváděcího potrubí turbíny, pokles otáček a tím i pokles stlačení plnicího vzduchu. Proto je nutné, podle intenzity chlazení plnicího vzduchu, zmenšit průtočnou plochu rozváděcího ústrojí tak, aby otáčky rotoru turbodmychadla zůstaly nezměněny.[3]



Obr. 15 Umístění chladiče plnicího vzduchu - Subaru Impreza WRX [15]



4 REGULACE TURBODMYCHADLA

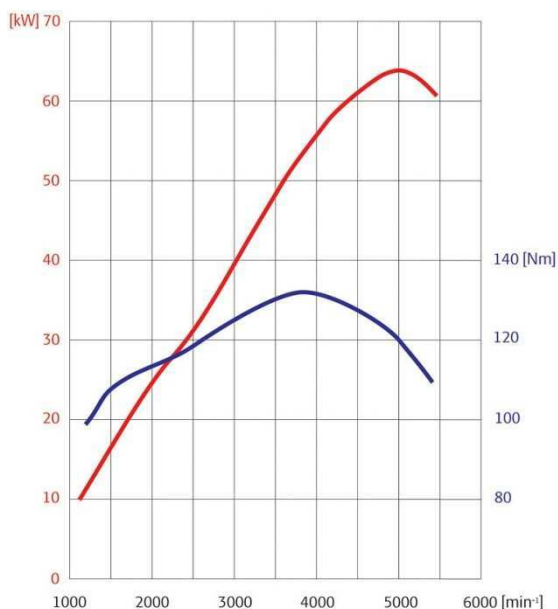
Moderní přeplňované motory používané v osobních automobilech musí dosahovat vysokého krouticího momentu při nízkých otáčkách. Proto je těleso turbiny přizpůsobeno malému hmotnostnímu proudu výfukových plynů, např. plnému zatížení při otáčkách 2000 min^{-1} . S vyššími otáčkami a zatíženími by vlivem vyšších hmotnostních proudů výfukových plynů docházelo k nežádoucímu zvýšení plnicího tlaku, a proto je třeba plnicí tlak omezit, aby nebyl překročen maximální dovolený plnicí tlak.[10] Dalším problémem je setrvačnost turbodmychadla. Ta způsobuje rychlý pokles plnicího tlaku s poklesem otáček motoru, čímž vzniká jakási prodleva před záběrem, tzv. turboefekt. Tím se podstatně zhoršuje akceleraceschopnost vozidla poháněného takto přeplňovaným motorem, neboť odezva motoru na sešlápnutí plynového pedálu je velmi pomalá. Toto jsou hlavní důvody, proč je potřeba regulovat plnicí tlak turbodmychadla.

To lze provést několika způsoby:

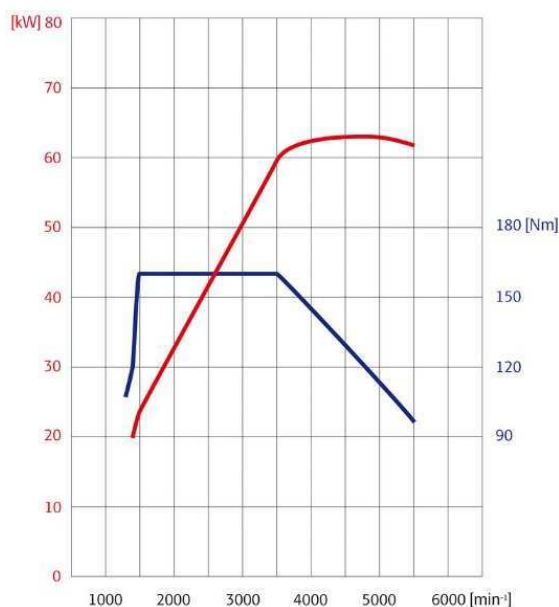
- odpouštěním výfukových plynů před turbinou,
- natáčením lopatek statoru turbiny,
- změnou šířky statoru turbiny (v motorech osobních automobilů se nepoužívá),
- kombinací těchto způsobů s použitím směrové klapky bezlopatkového statoru turbiny.[16]

4.1 PRUŽNOST SPALOVACÍHO MOTORU

Pružnost spalovacího motoru je dána průběhem točivého momentu M_t a efektivního výkonu P_e ve vnější otáčkové charakteristice.[16]



Obr. 16 Charakteristika motoru 1.4 16V [17]



Obr. 17 Charakteristika motoru 1.2 TSI [17]

Obrázky výše ukazují křivky výkonu a točivého momentu motorů koncernu Volkswagen – na obr. 16 atmosférický 1.4 16V (63 kW) a na obr. 17 přeplňovaný 1.2 TSI (77 kW). Porovnáním obou vnějších otáčkových charakteristik jasně vynikne příznivější průběh



výkonu i točivého momentu přepřňovaného agregátu, zejména v nízkých otáčkách. Tato charakteristika je obvyklá u současných motorů přepřňovaných turbodmychadly s elektronickou regulací plnicího tlaku.

Celková pružnost motoru δ je dána součinem otáčkové a momentové pružnosti. Pro celkovou pružnost motoru tedy platí tento vztah:[16]

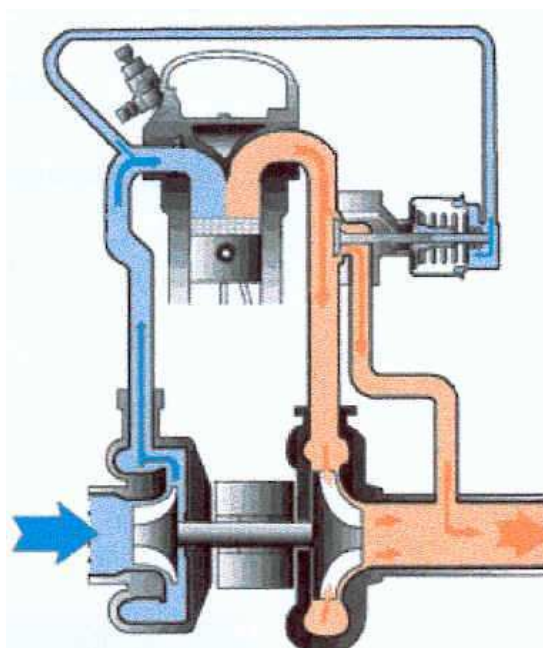
$$\delta = \delta_n \delta_{Mt} , \quad (13)$$

kde δ_n je otáčková pružnost, δ_{Mt} je momentová pružnost.[16]

Je snaha, aby pružnost motoru a to jak otáčková, tak i momentová byla, pro získání co možná maximální akceleračeschopnosti, co největší. U zážehových motorů je v současné době požadavek konstantní momentové pružnosti od co nejnižších otáček a v jejich co největším rozsahu.[16]

4.2 REGULACE ODPOUŠTĚNÍM VÝFUKOVÝCH PLYNŮ PŘED TURBINOU

Odpouštění výfukových plynů je nejvíce používaný a velmi účinný způsob regulace plnicího tlaku, a tím i úpravy rychlostní charakteristiky přepřňovaných motorů. Používá se u zážehových i vznětových motorů.[3] V minulosti používané méně efektivní řešení, kdy je odpouštění již stlačený vzduch ze sání, je dnes nahrazováno odváděním přebytečného toku výfukových plynů při vyšších otáčkách motoru paralelním obtokovým kanálem. Průtočný průřez řídí obtokový ventil, tzv. waste-gate, který je zpravidla zabudován do tělesa turbodmychadla.[10] Princip obtokového ventilu je znázorněn na obr. 18.



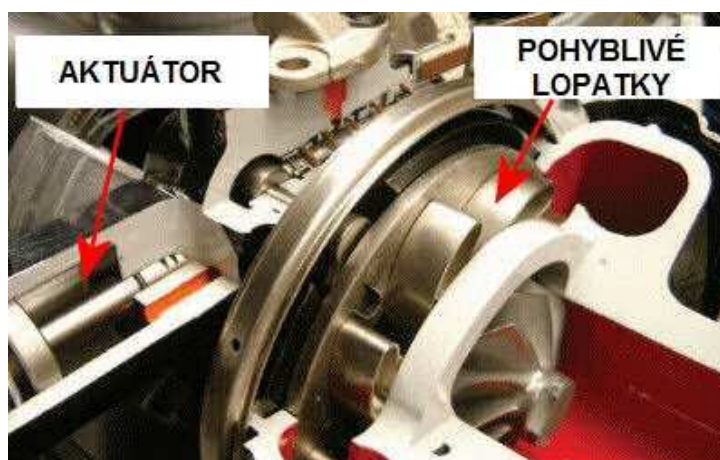
Obr. 18 Princip obtokového ventilu waste-gate [18]



Obtokový ventil je otevírán elektromagnetickým ventilem, který dostává informace z elektronické řídicí jednotky motoru. Ta vyhodnocuje signály snímačů natočení škrtecí klapky, klepání motoru, předstihu zážehu, množství a teploty nasávaného vzduchu, aj. a srovnává aktuální stav s polem charakteristik uloženým v řídicí jednotce motoru. Případné odchylky odstraňuje vhodným regulačním zásahem změnou polohy obtokového ventilu. V kombinaci s regulací klepání motoru jsou získávány nejen požadované dynamické vlastnosti motoru, ale také je udržována teplota výfukových plynů na vhodné (nízké) teplotě. Použitím snímače absolutního tlaku může být regulována hodnota plnicího tlaku nezávisle na tlaku okolního vzduchu, čímž se koriguje nižší atmosférický tlak ve vyšších nadmořských výškách.[10]

4.3 REGULACE NATÁČENÍM LOPATEK STATORU TURBINY

Tento způsob regulace plnicího tlaku využívá skutečnosti, že konstantní objem plynu proudí potrubím tím rychleji, čím menší má potrubí průřez (rovnice kontinuity toku tekutin). Na rozdíl od regulace plnicího tlaku obtokem prochází turbinou stále celý objem výfukových plynů a plnicí tlak je řízen přestavováním vodících lopatek turbíny.[1] Toto řešení regulace plnicího tlaku turbodmychadla je zatím využíváno pouze pro vznětové motory, protože výfukové plyny zážehových motorů mají příliš vysoké teploty. Turbodmychadla vybavená tímto systémem regulace bývají označována písmeny VGT, což znamená *Variable Geometry Turbocharger*. Princip VGT je vidět na obr. 20.



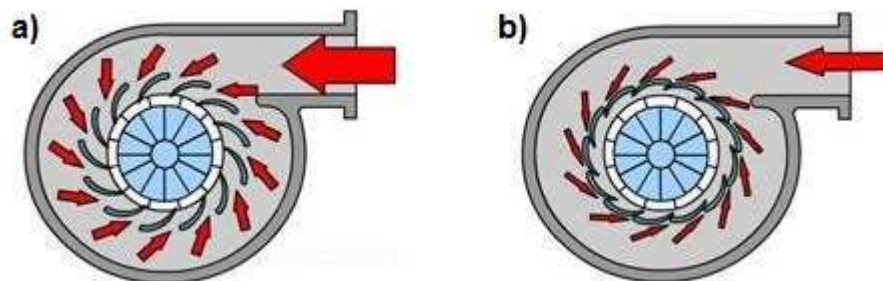
Obr. 19 Řez turbodmychadlem VGT [19]

Pokud motor běží na **nízké otáčky**, je požadován dostatečný plnicí tlak. Pomocí nastavitelných rozváděcích lopatek se zmenší průřez, kterým proudí výfukové plyny na lopatky turbíny – viz obr. 20a. Tlak výfukových plynů před rozváděcími lopatkami se zvýší. Výfukové plyny proudí zúženým místem rychleji, čímž roztáčí turbinové kolo do vyšších otáček. Díky vysokým otáčkám turbíny se i při nízkých otáčkách motoru dosáhne potřebný plnicí tlak. Výsledkem je poměrně vysoký točivý moment v dolním rozsahu otáček motoru.[1]

Když motor běží na **vysoké otáčky**, plnicí tlak nemá být překročen, tzn. musí dojít k omezení maximálního plnicího tlaku. Rozváděcí lopatky turbíny se nastaví tak, že vstupní průřez se zvětší natolik, aby proud výfukových plynů otáčel turbinovým kolem rychlostí potřebnou



pro zachování výkonu turbodmychadla a přitom nebyl překročen maximální dovolený plnicí tlak, jak ukazuje obr. 20b. Tlak výfukových plynů před rozváděcími lopatkami poklesne.[1]



Obr. 20 Princip turbodmychadla VGT a) při vysokých otáčkách motoru b) při nízkých otáčkách motoru [20]



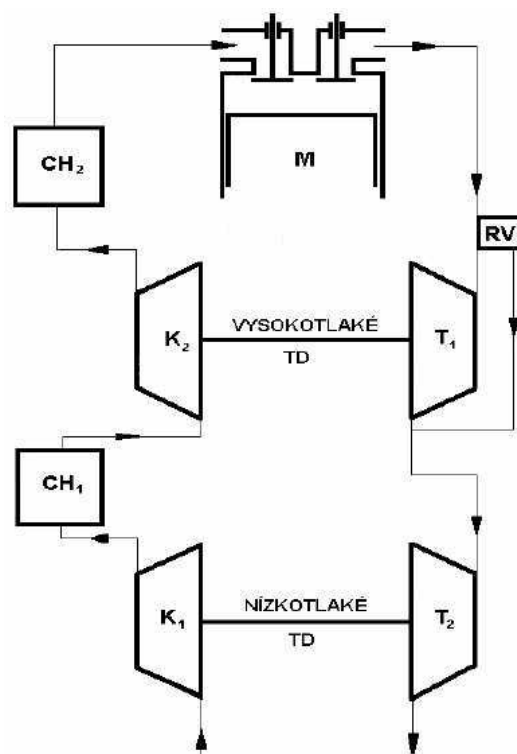
5 VÍCESTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ

Pro dosažení co nejvyšší účinnosti motoru s vysokým stupněm přeplňování je potřeba na straně turbíny co nejlépe využít energii výfukových plynů a na straně dmyhadla co nejvíce snížit práci, potřebnou ke stlačení plnicího vzduchu. Ke zvýšení účinnosti se používá rozdělení komprese a expanze do dvou či více stupňů.[1]

5.1 DVOUSTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ

5.1.1 SEKVENČNÍ TWIN-TURBO

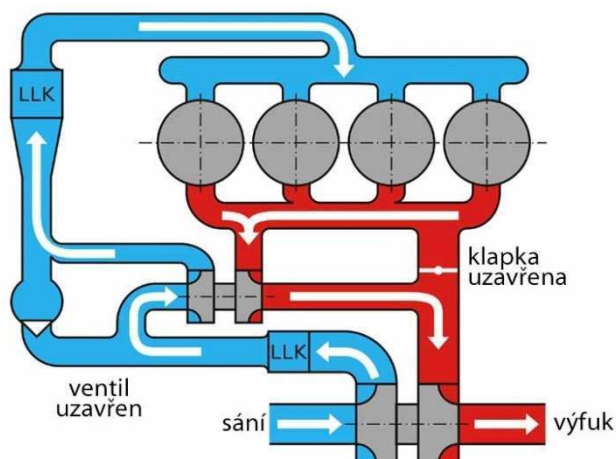
V současnosti se jedná o velmi častý způsob dvoustupňového přeplňování. Používá se pro přeplňování zážehových i vznětových motorů. Podstatou je zapojení dvou nestejně velkých turbodmychadel do série. Jejich regulaci obstarávají obtokové kanály a zpravidla se používá druhý chladič plnicího vzduchu.[21] Schéma dvoustupňového sériového přeplňování je na obr. 21. Mezi současnými automobily tuto technologii využívá kupříkladu Opel ve svém motoru 2.0 CDTi BiTurbo montovaném mj. do modelu Insignia. Technické údaje tohoto motoru lze nalézt v tab. 1 v kap. 8.



Obr. 21 Schéma sériového dvoustupňového přeplňování; M – motor; K – kompresor; T – turbína; CH – chladič plnicího vzduchu; RV – regulační (obtokový) ventil [16]

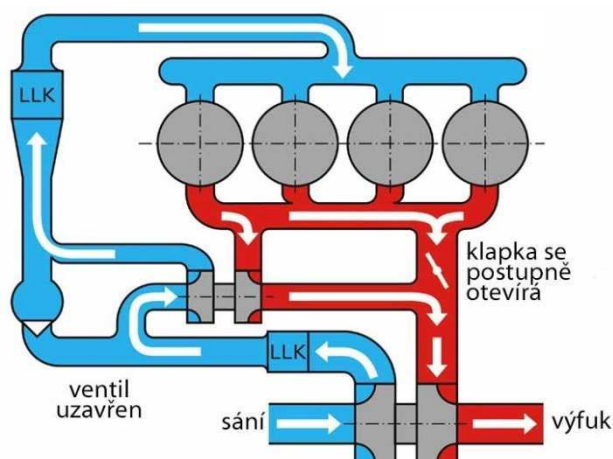
Pracuje-li motor v **nízkých otáčkách** (obr. 22), je klapka ve výfukovém potrubí (zvýrazněno červenou barvou) zcela uzavřena a výfukové plyny urychlují malé (vysokotlaké) turbodmychadlo, které se díky menším rozměrům a tím i menšímu momentu setrvačnosti

snáze roztočí do pracovních otáček. Motor má tedy rychlou odezvu na sešlápnutí plynového pedálu. Velké (nizkotlaké) turbodmychadlo v tomto režimu nepřispívá k zvyšování tlaku v sání. Ventil v sacím potrubí (zvýrazněno modře) tedy zůstává uzavřen a všechny vzduch proudí přes malé dmychadlo. To dosahuje vysokých otáček – až $180\,000\text{ min}^{-1}$. [22]



Obr. 22 Motor twin-turbo v nízkých otáčkách [22]

V pásmu **středních otáček** (obr. 23) dochází k postupnému otevírání klapky ve výfukovém potrubí, takže horké plyny teď již urychlují nejen malé, ale také velké turbodmychadlo. V sacím traktu je celkový přivedený vzduch nejprve stlačen velkým turbodmychadlem a po průchodu prvním chladičem stlačeného vzduchu (v obrázku označen písmeny LLK) vstupuje stlačený vzduch do druhého – malého turbodmychadla. Dále stlačený vzduch prochází druhým chladičem plnicího vzduchu a poté již vstupuje do spalovacího prostoru motoru. Protože velké turbodmychadlo dodává stále nižší tlak než malé turbodmychadlo, zůstává zpětný ventil uzavřen. [22]

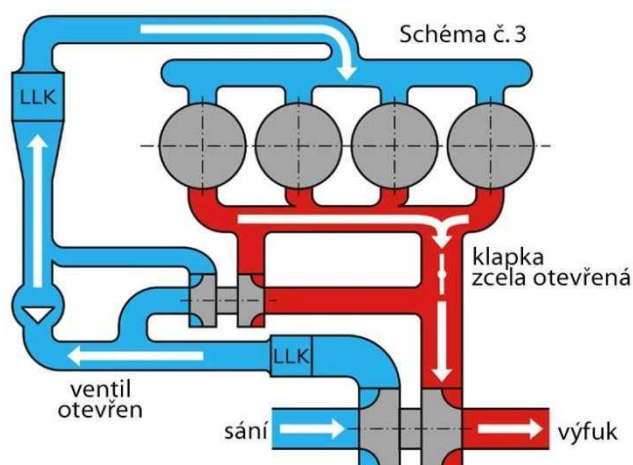


Obr. 23 Motor twin-turbo ve středních otáčkách [22]

V oblasti **vysokých otáček** (obr. 24) dojde k úplnému otevření klapky ve výfukovém potrubí, takže spaliny odcházejí z motoru skrz velké turbodmychadlo. Vysoké otáčky velkého dmychadla a menší otáčky malého dmychadla změní tlakové poměry v sacím potrubí a zpětný



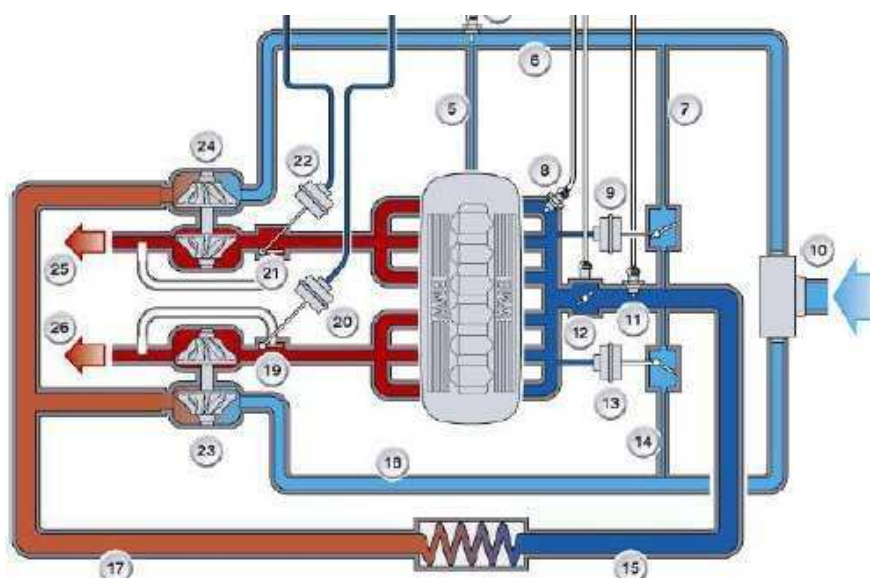
ventil se otevře. Kompresor malého turbodmychadla má nyní nízké otáčky, takže významně nepřispívá k přetlaku v sání.[22]



Obr. 24 Motor twin-turbo ve vysokých otáčkách [22]

5.1.2 PARALELNÍ TWIN-TURBO

Na rozdíl od sekvenčního twin-turba využívá tato metoda dvou stejně velkých turbodmychadel pracujících nezávisle na sobě. Obvyklá konstrukce vypadá tak, že na každé turbodmychadlo jsou přiváděny výfukové plyny z polovičního počtu válců. Proudění stlačeného plicního vzduchu se za oběma turbodmychadly spojí a přes chladič stlačeného vzduchu míří do spalovacího prostoru motoru.[21] Tento princip je znázorněn na obr. 25.



Obr. 25 Schéma motoru BMW N54 twin-turbo [21]

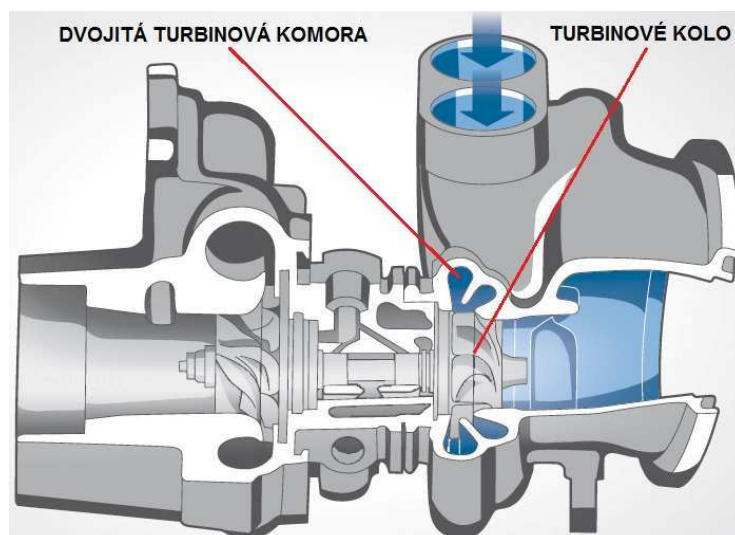
Výhoda paralelního twin-turba oproti jednomu velkému turbodmychadlu spočívá zejména ve zmírnění turboefektu. To je umožněno rozdělením proudu výfukových plynů do dvou větví, díky čemuž nedochází k interferenci pulsací v obou větvích a je možno využít jejich



kinetické energie k roztočení turbodmychadel. Další věc je, že dvě menší dmychadla vyvinou větší přetlak než jedno velké turbodmychadlo.[21] V praxi se lze s tímto způsobem přeplňování setkat, kromě již zmíněného a dnes už nepoužívaného motoru BMW N54, například ve voze Mercedes-Benz SL 63 AMG vybaveným motorem AMG 5.5 l V8 biturbo. Technické údaje této pohonné jednotky jsou uvedeny v tab. 1 v kap. 8.

5.1.3 TURBODMYCHADLO TWIN-SCROLL

V tomto případě je přetlak v sání vyvíjen pouze jedním turbodmychadlem. To je vybaveno dvojitou turbinovou komorou, přičemž proud výfukových plynů z motoru je rozdělen do dvou větví, z nichž každá ústí do jedné části turbinové komory, jak ukazuje obr. 26. Například při přeplňování čtyřválcového motoru s pořadím zapalování 1-3-4-2 obvykle v jedné větvi proudí spaliny z prvního a čtvrtého válce a v druhé větvi pak spaliny z druhého a třetího válce. Proudění plynů v obou větvích tak působí na lopatky turbinového kola turbodmychadla nezávisle na sobě, jelikož jsou odděleny přepážkou integrovanou do turbinové skříně. Tím je zajištěno, že se oba proudy navzájem neovlivňují a nedochází k jejich interferenci. Výhodou tohoto řešení je využití kinetické energie pulsací v obou větvích k roztočení turbinového kola. Díky tomu lze dosáhnout většího překřížení ventilů, než by tomu bylo v případě jednokomorového turbodmychadla. To má za následek lepší proplachovací efekt – při současném otevření sacích i výfukových ventilů pomáhá proud výfukových plynů nasávání čerstvého vzduchu do spalovací komory, čímž roste účinnost motoru. Právě vyšší účinnost motoru, zejména v nízkých otáčkách, spolu s rychlejšími reakcemi motoru na sešlápnutí akcelérátoru jsou hlavními přínosy turbodmychadla twin-scroll.[23]



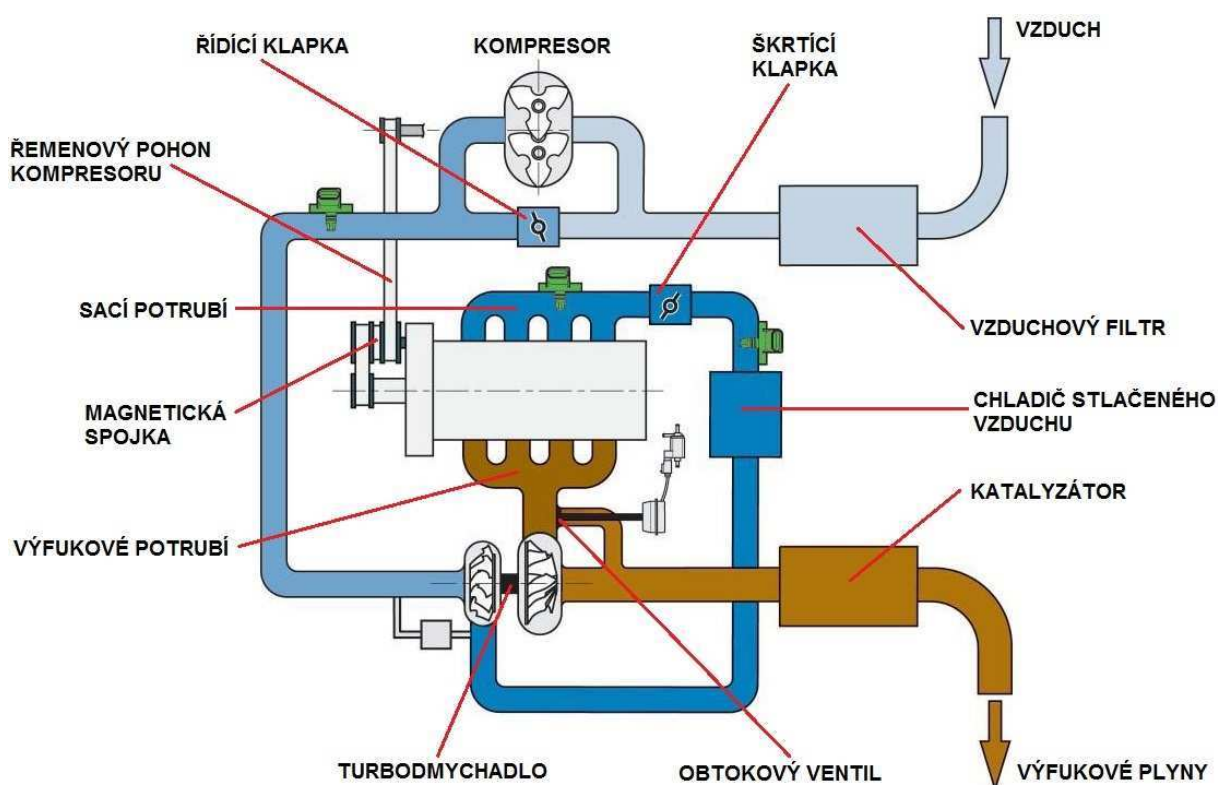
Obr. 26 Řez turbodmychadlem twin-scroll [24]

Dvoukomorová turbodmychadla dnes ve svých vozech používá zejména automobilka BMW. Jako příklad je možné uvést zážehový šestiválcový motor BMW N55B30M0 vybavený jedním turbodmychadlem twin-scroll a montovaný do modelů M135i Coupé, 335i, 535i nebo X6 M. Technické specifikace tohoto motoru je možné nalézt v tab. 1 v kap. 8.

5.1.4 TWINCHARGER

Jedná se o relativně velmi moderní systém dvoustupňového přeplňování. Poprvé byla tato technologie použita v osmdesátých letech 20. století v rallyovém speciálu Lancia Delta S4. Pro přeplňování motorů v běžných osobních automobilech se začala používat až v roce 2005, kdy Volkswagen vyvinul motor 1.4 TSI. V současné době kromě Volkswagenu nevyrábí žádná jiná automobilka pohonné jednotky vybavené touto technologií. Následující popis se proto bude věnovat pouze motoru VW 1.4 TSI.

Princip systému twincharger je patrný z obr. 27 a spočívá v sériovém zapojení mechanicky poháněného kompresoru a turbodmychadla. Použit je Rootsův kompresor od firmy Eaton, který je poháněn mechanicky řemenem od klikového hřídele. Díky tomu kompresor již od volnoběžných otáček motoru žene stlačený vzduch do turbodmychadla, které se tak dostává mnohem dříve do pracovní optimální rychlosti a účinnosti. Teprve z turbodmychadla míří vzduch do válců. Výhoda je zřejmá – turbodmychadlo vyvíjí potřebný přetlak mnohem dříve, než je tomu u běžných turbomotorů, čímž je účinně potlačen turboefekt. Při dosažení $2\,400\text{ min}^{-1}$ odpojí elektromagnetická spojka kompresor a přeplňování motoru od této chvíle zajišťuje pouze turbodmychadlo. Kompresor je uveden do činnosti již jen při prudké akceleraci, ale pouze do $3\,500\text{ min}^{-1}$. [25]



Obr. 27 Schéma motoru Volkswagen 1.4 TSI twincharger [25]

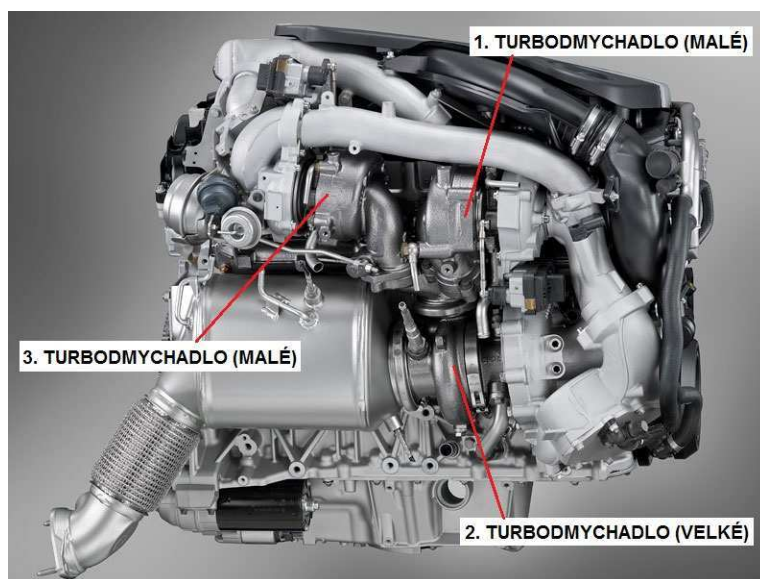
Technické údaje motoru 1.4 TSI twincharger jsou uvedeny v tab. 1 v kap. 8. Za pozornost stojí hodnoty maximálního výkonu, resp. točivého momentu 132 kW , resp. 250 Nm , které se blíží hodnotám obvyklým u turbodmychadlem přeplňovaných motorů s objemem kolem $1,8\text{ l}$. Velkou výhodou této pohonné jednotky je velmi široké pásmo využití maximálního točivého momentu a jeho dostupnost již v nízkých otáčkách.



5.2 TŘÍSTUPŇOVÉ PŘEPLŇOVÁNÍ

Technologii třístupňového sekvenčního přeplňování vyvinula automobilka BMW na konci roku 2011. Základem je vznětový šestiválec o objemu 2 993 cm³, který byl osazen třemi nestejně velkými turbodmychadly, jejichž rozmístění ukazuje obr. 28. Takto vzniklý motor nese označení N57S a jeho technické údaje lze nalézt v tab. 1 v kap. 8.[26]

První malé turbodmychadlo se roztáčí již od volnoběžných otáček. Díky kompaktním rozměrům a variabilní geometrii lopatek má malou setrvačnost a tomu odpovídající rychlou odezvu. Velké turbodmychadlo se připojuje v 1 500 min⁻¹. Součinnost jednoho malého a velkého dmychadla zajišťuje dosažení maximálního točivého momentu od 2 000 min⁻¹. Třetí turbodmychadlo je opět malé a vybavené variabilní geometrií lopatek. Nachází se v samostatném kanálu výfukových svodů, který se otevírá podtlakově ovládanou klapkou. Tento kanál obchází první (malé) a míří přímo na druhé (velké) turbodmychadlo. Klapka se otevírá při výrazném sešlápnutí plynového pedálu v otáčkách nad 2 700 min⁻¹. Kompaktní konstrukce a stavitelné lopatky statoru opět přispívají k nízké setrvačnosti a tedy rychlému a hladkému připojení turbodmychadla. V této chvíli funguje celý systém paralelně – nestejně velká dvojice dmychadel pokračuje v dodávce stlačeného vzduchu do sání, avšak s rostoucími otáčkami už nedokáže využít všechnu energii výfukových plynů, protože první turbodmychadlo již dosáhlo maximálního přetlaku. Proto je zde třetí dmychadlo, které zajišťuje potřebné stlačení plnicího vzduchu.[26]



Obr. 28 Rozmístění turbodmychadel na motoru BMW N57S [26]



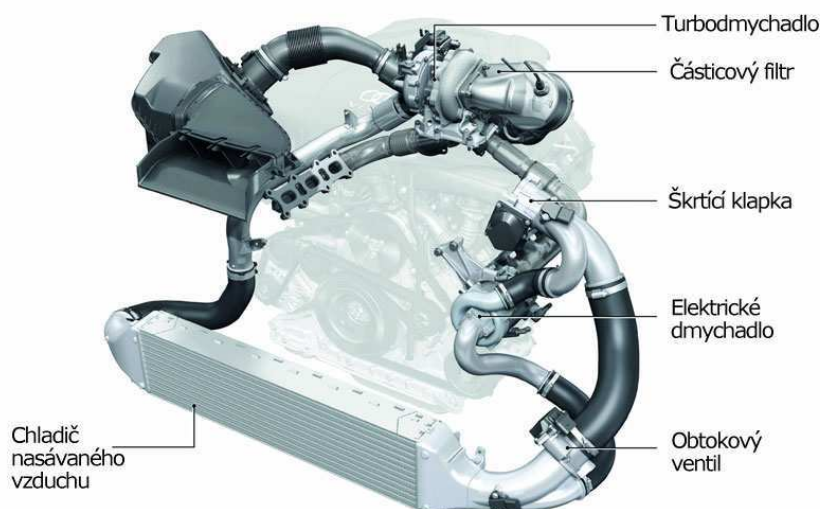
6 PŘEPLŇOVÁNÍ ELEKTRICKÝM DMYCHADLEM

Tato technologie, zvaná VTES (*Variable Torque Enhancement System*), byla původně určena pro těžká užitková vozidla. Do stádia použitelného pro přeplňování motorů osobních vozidel ji v roce 2012 dovedla firma CPT.[27]



Obr. 29 Elektrické dmyhadlo VTES [28]

VTES používá k přeplňování radiální kompresor poháněný elektrickým reluktančním motorem bez permanentních magnetů. Kompresor (viz obr. 29) je velmi podobný tomu na klasickém turbodmychadle, není ale potřeba řešit extrémní tepelnou ani mechanickou odolnost, neboť kompresor není vystavován vysokým teplotám výfukových plynů. V plném výkonu navíc pracuje jen zlomky sekund. Hlavní výhodou je nezávislost dmyhadla na tlaku výfukových plynů. Výsledkem je tak okamžitá odezva – elektromotor o výkonu 1,7 kW roztočí dmyhadlo na $70\,000\text{ min}^{-1}$ za méně než 350 ms. To je dříve, než se do plných otáček dostane klasické turbodmyhadlo na výfukové plyny, a dokonce i dříve než v případě systému twin-turbo.[27]



Obr. 30 Schéma motoru Audi electric biturbo [28]

Jednou z prvních aplikací je Audi electric biturbo. Prototyp vznětového šestiválce přeplňuje kromě klasického výfukového turbodmyhadla ještě na samostatné větvi umístěné elektrické dmyhadlo, jak je vidět na obr. 30. Elektrické dmyhadlo pracuje těsně po sešlápnutí plynu



nebo v nízkých otáčkách, při standardních podmínkách se obtokový ventil uzavře. Nedávno si podobnou technologii nechalo patentovat BMW a uvažuje o jejím nasazení v budoucí generaci modelu M3.[27]



7 VYBRANÉ MODERNÍ PŘEPLŇOVANÉ MOTORY

V této kapitole je vytvořen stručný přehled přeplňovaných motorů používaných v současných osobních automobilech. Jelikož v dnešní době zaznamenávají pronikavý vývoj hlavně zážehové přeplňované motory, následující řádky se věnují právě jim. Rozsah této práce však nedovoluje zabývat se všemi motory, a proto je pozornost zaměřena zejména na moderní maloobjemové přeplňované zážehové motory konstruované podle zásad downsizingu, přičemž budou uvedeny hlavně motory, které ve svých třídách do značné míry určují směr vývoje, či jsou určitým způsobem výjimečné. Technické údaje všech zde zmíněných motorů lze nalézt v tab. 1 v kap. 8.

7.1 VOLKSWAGEN TSI

Zkratka TSI označuje přeplňované zážehové motory s přímým vstřikováním paliva vyráběné koncernem Volkswagen. Samotná zkratka TSI je však velmi matoucí – jednak má více významů (v závislosti na použitém dmychadle) a navíc označování není v rámci značek koncernu VW jednotné (například Audi používá písmena TFSI). Další komplikací je použití zkratky FSI znamenající *Fuel Stratified Injection*, což je anglický výraz pro vrstvenou palivovou směs. Koncern Volkswagen však tento způsob tvorby směsi již před několika lety nahradil konstrukčně jednodušší homogenní směsí.

Zkratka TSI (či TFSI) tedy může znamenat:

- a) TSI – *Twincharged Stratified Injection* – motor 1.4 TSI twincharger,
- b) TSI – *Turbocharged Stratified Injection* – motory s přímým vstřikováním paliva přeplňované výfukovým turbodmychadlem,
- c) TFSI – *Turbo Fuel Stratified Injection* – značení používané firmou Audi pro motory s přímým vstřikováním paliva přeplňované výfukovým turbodmychadlem nebo mechanicky poháněným kompresorem.

Prvním zástupcem této skupiny motorů se v roce 2005 stal dvojitě přeplňovaný 1.4 TSI twincharger popsáný v kap. 5.1.4. Od roku 2008 se vyrábí také stejně označované pohonné jednotky přeplňované však pouze turbodmychadlem. Volkswagen se tak stal prvním, kdo začal masově realizovat myšlenku downsizingu a dnes již atmosférické motory s objemem menším než 3 l v Evropě prakticky nenabízí, výjimku tvoří pouze jednotky 1.0 MPI a 1.2 HTP. Pohonné jednotky TSI se montují do vozů téměř všech značek koncernu a vyrábějí se v těchto objemových variantách:

- 1.2 TSI,
- 1.4 TSI twincharger,
- 1.4 TSI,
- 1.8 TSI,
- 2.0 TSI,
- 2.5 TFSI,
- 3.0 TFSI (přeplňovaný pouze mechanickým kompresorem),
- 4.0 TFSI.



7.1.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA MOTORŮ TSI

Motory TSI přeplňované pouze turbodmychadlem se aktuálně vyrábějí v jejich druhé generaci označované EA211. Všechny verze mají hliníkový motorový blok, monolitické víko hlavy válců s integrovanými vačkovými hřídeli a rozvodem DOHC. Značně poruchové rozvodové řetězy používané v první generaci (EA111) byly u motorů 1.2 TSI a 1.4 TSI nové generace nahrazeny řemenovým převodem. Turbodmychadlo tvoří jeden montážní modul s katalyzátorem a je vybaveno elektricky řízeným obtokovým ventilem waste-gate. Hlava válců má integrované sběrné potrubí. Sací potrubí zase tvoří jeden celek s integrovaným chladičem stlačeného vzduchu. Palivo je dodáváno systémem common-rail prostřednictvím šestiotvorových trysek a až třemi vstřiky během jednoho spalovacího cyklu. Všechny motory používají čtyřventilovou techniku s proměnným časováním ventilů. Přímé vstřikování paliva FSI ochlazuje spalovací prostory a motory tak mohou pracovat s vyšším kompresním poměrem. Chlazení motoru je řešeno pomocí dvou okruhů – zvlášť pro blok a zvlášť pro hlavu motoru.[29] Takové řešení společně s integrovaným sběrným potrubím v hlavě válců zvyšuje termodynamickou účinnost motoru. Výfukové plyny totiž předávají teplo chladicí kapalině, což v první fázi urychluje její zahřívání a tím i zahřívání motoru po studeném startu, ve druhé pak ochlazuje vypouštěné zplodiny.[30]

7.1.2 MOTOR 1.8 TSI

Motor 1.8 TSI se oproti ostatním pohonným jednotkám vyznačuje několika odlišnostmi. Největší z nich je kombinace přímého (FSI) a nepřímého (MPI) vstřikování paliva. Proto jsou použity dva vstřikovače na válec. Při startování a ve vysoké zátěži je aktivní pouze přímé vstřikování. Při nízké zátěži se směs vstřikuje nepřímě – do sacího potrubí těsně před ventil, kde je vzduch nejrozvířenější a dobře se mísí s palivem. Motor disponuje variabilním časováním sacích i výfukových ventilů a výfukové ventily mají navíc variabilní zdvih. Odlišností oproti jednotkám 1.2 TSI a 1.4 TSI je použití ozubeného řetězu pro pohon ventilových rozvodů. Ke kultivovanosti chodu motoru přispívají také dva vyvažovací hřídele.[30]

7.1.3 MOTOR 3.0 TFSI

Teto zážehový vidlicový šestiválec o objemu 2 995 cm³ je ve skupině TSI zcela výjimečný. Navzdory jeho označení zde přeplňování nezajišťuje turbodmychadlo, nýbrž mechanicky poháněný kompresor umístěný mezi obě řady válců. Konkrétně se jedná o Rootsovo dmychadlo se dvěma čtyřkřídlými rotory, které dosahují otáček až 23 000 min⁻¹. Kompresor dokáže vyvinout přetlak až 0,8 bar. Do pouzdra dmyhadla je integrována soustava dvou hliníkových chladičů plnicího vzduchu typu voda-vzduch, která je napojená na samostatný okruh chladicí kapaliny. Rozsáhlá soustava protihlukových opatření tlumí typický hluk kompresoru na minimum. Regulaci plnicího tlaku zajišťuje obtokový ventil. Kliková skříň, dimenzovaná pro vyšší tlaky, se vyrábí ze slitin hliníku a křemíku. Obě řady válců svírají úhel 90°. Motor disponuje přímým vstřikováním – palivo je dodáváno systémem common-rail pod tlakem až 150 bar a až třemi vstřiky během jednoho pracovního cyklu.[31]



7.2 RENAULT TCe

Označení TCe (*Turbo Control Efficiency*) používá značka Renault pro své přeplňované benzinové motory. První motor s tímto označením byl 1.2 TCe vyvinutý v roce 2007. Tehdy nabízel ve své třídě výjimečný výkon a hospodárny provoz.

V roce 2011 Renault představil zcela nový motor **1.2 TCe** s označením TCe 115 Energy. Jedná se o přeplňovaný zážehový čtyřválec s objemem 1 198 cm³, hliníkovým blokem motoru a přímým vstřikováním paliva GDI. Ventilové rozvody pohání ozubený řetěz Morse napínaný hydraulickým napínákem. Motor rovněž disponuje hydraulicky řízeným variabilním časováním obou vačkových hřídelí. K přeplňování se používá malé vodou chlazené turbodmychadlo s nízkou setrvačností integrované do sběrného potrubí. K nízké spotřebě paliva přispívá také například olejové čerpadlo s variabilním průtokem, které upravuje tlak oleje v závislosti na potřebách motoru, a systém start/stop. Také dobíjení baterie je regulované a soustředí se na okamžiky, kdy není motor příliš zatížen.[32]

Nejnovějším zástupcem řady TCe Energy je motor **0.9 TCe** označovaný Energy TCe 90. Tento tříválec o objemu 899 cm³ disponuje proměnným časováním ventilů a je přeplňován nízkotlakým turbodmychadlem, které pomáhá eliminovat turboefekt a motor se díky němu chová spíše jako atmosférický.[32]

7.3 FORD 1.0 EcoBOOST

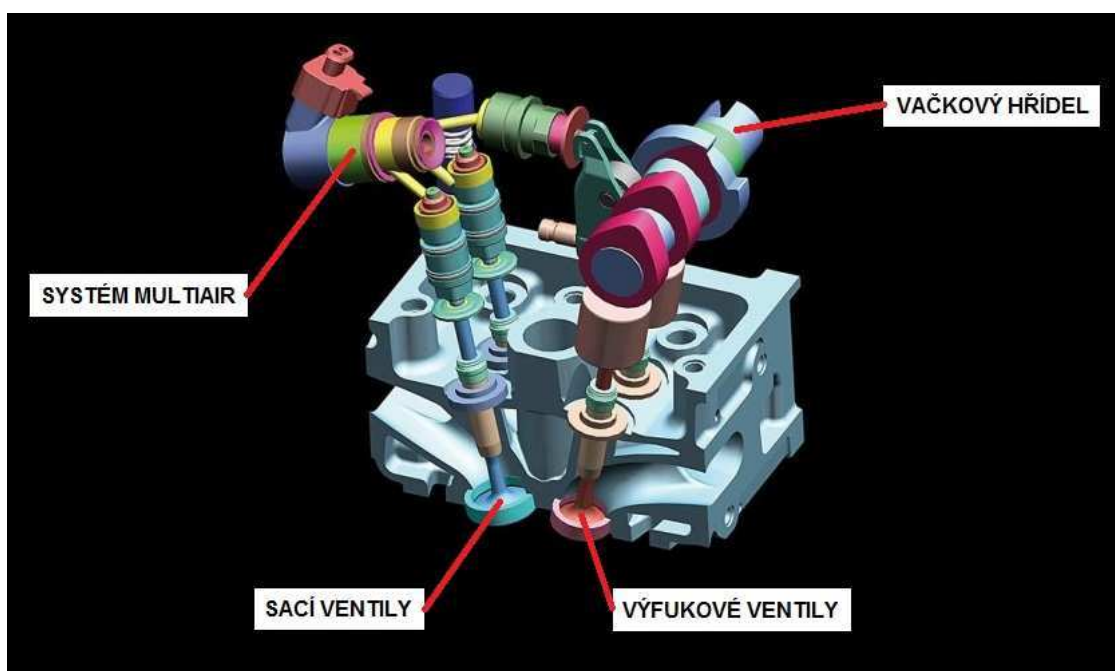
Tento motor vznikl roku 2012 a ve své době šlo o unikátní a průkopnickou konstrukci. Automobilka Ford se tak stala prvním, kdo začal montovat tříválcové do vozů nižší střední třídy, v tomto případě do modelu Focus třetí generace. Blok motoru je vyroben z litiny, která za cenu vyšší hmotnosti snižuje tepelnou kapacitu i výrobní náročnost. Výfukové svody jsou integrovány do hlavy válců a jsou chlazeny separátním okruhem. To zrychluje zahřívání po studeném startu, v další fázi ochlazuje výfukové plyny a omezuje tepelné zatížení turbodmychadla. To je navíc vybaveno pláštěm z tepelně odolného materiálu, díky čemuž může dosahovat otáček až 247 000 min⁻¹. Absence EGR ventilu je vyvážena plynulým časováním sacích i výfukových ventilů. Ventilové rozvody pohání mokrá ozubený řemen s intervalem výměny 240 000 km. Z důvodu dosažení co nejnižší hmotnosti byla maximálně zjednodušena konstrukce celého motoru, což se projevilo například na způsobu vyvážení – místo obvyklých vyvažovacích hřídelí, je použit dynamicky vyvážený asymetrický setrvačnick a na druhé straně motoru podobně upravené spodní rozvodové kolo. Úlohu přeplňování zastává neobvykle malé výfukové turbodmychadlo značky Continental.[33] Pohonná jednotka 1.0 EcoBoost nahradila v nabídce Fordu starší atmosférický agregát 1.6 Duratec. Nový tříválec má oproti čtyřválcí 1.6 zřetelně vyšší točivý moment s mnohem lepším průběhem – maximum točivého momentu 170 Nm leží v rozmezí (1 500 až 4 500) min⁻¹. Maximální výkon je nyní rovněž vyšší – až 92 kW oproti 85 kW u atmosférického motoru.

7.4 FIAT 0.9 SGE

Automobilka Fiat představila revoluční motor TwinAir (obchodní označení motoru 0.9 SGE) v modelu Fiat 500 v roce 2010. Jedná se o přeplňovaný zážehový dvouválec o objemu 875 cm³ vybavený technologií MultiAir, což je elektrohydraulický systém ovládání sacích



ventilů. Jeho podstata spočívá v odstranění mechanické vazby mezi sacími ventily a vačkovou hřídelí. Ta je nahrazena elektrohydraulickým členem schopným otevírat sací ventil do značné míry nezávisle jak na poloze vačkové hřídele, tak i na ostatních válcích. Ventil je jednoduše vytlačován krátkým vysokotlakým vedením. Schopnost nezávislého otevírání ventilu zkvalitňuje a zpřesňuje plnění motoru. Také mechanická konstrukce motoru je jednodušší, neboť odpadá potřeba druhé vačkové hřídele a složitého mechanismu variabilního časování, které je obvyklé u konvenčních motorů. Hlavním přínosem celého systému je schopnost dřívějšího uzavření sacího ventilu a tím zabránění úniku již nasátého vzduchu zpět do sacího potrubí. Včasným uzavřením spalovacího prostoru se zvýší množství vzduchu ve válci a citelně roste účinnost.[34] Schéma systému MultiAir je znázorněno na obr. 31. Využitím těchto technických řešení se podařilo dosáhnout velmi nízké spotřeby paliva – 3,96 l/100 km. Emise CO₂ dosahují hodnoty 95 g/km, což je momentálně nejnižší hodnota mezi zážehovými motory. Mezi další výhody motoru 0.9 SGE patří zejména jeho kompaktní rozměry – oproti srovnatelně výkonnému čtyřválcí je o 23 % kratší – a z toho vyplývající nízká hmotnost 85 kg.[35]



Obr. 31 Systém Fiat MultiAir [34]

7.5 NISSAN 1.2 DIG-S

Tento přeplňovaný zážehový tříválec o objemu 1 198 cm³ je příkladem downsizingu ve třídě malých vozů. Zde se tříválce běžně používají již od 80. let, avšak přeplňování bylo donedávna zcela výjimečné. Jedním z prvních, kdo s ním začal, byl právě Nissan, když v roce 2011 představil svůj nový motor 1.2 DIG-S. Zkratka DIG znamená *Direct Injection Gasoline*, tedy přímé vstřikování benzínu. Písmeno S značí *Supercharger* (mechanicky poháněný kompresor).[36] V době masového používání turbodmychadel je tedy tato pohonná jednotka dozajista unikátní.



Blok motoru je převzatý z atmosférické jednotky 1,2 l. Výsledkem snahy konstruktérů maximálně snížit tření uvnitř motoru je velmi hladký povrch vačkových hřídelí a pístních kroužků, resp. zdvihátek ventilů vyrobený za použití nanotechnologií, resp. uhlíkového potahu DLC.[36] Variabilní časování sacích ventilů je využito k aplikaci tzv. Millerova cyklu, který upravuje konvenční čtyřdobý Ottův cyklus tím, že ponechá sací ventily déle otevřené, čímž se fáze komprese rozděluje na dvě samostatné části: první část, kdy je ventil otevřený, a druhá, kdy je zavřený. S touto dvoudílnou fází komprese se Millerův cyklus v podstatě stává pětidobým cyklem a je ideálně vhodným pro technologii přímého vstřikování paliva. Když se na počátku komprese píst pohybuje směrem nahoru, má díky stále otevřenému sacímu ventilu menší odpor, čímž se snižují čerpací ztráty.[37] Vytlačení části směsi ze spalovacího prostoru kompenzuje kombinace vysokého kompresního poměru 13:1 a mechanicky poháněného dmychadla. Kompresor je osazen spojkou, která jej odpojuje v nízkých rychlostech při malé zátěži. V takových případech motor nemusí roztáčet dmychadlo, které pro svou činnost ubírá část výkonu motoru. Nissan touto cestou odstranil hlavní nevýhodu mechanicky poháněného kompresoru a přiblížil se účinnosti turbodmychadla s obtokovým ventilem.[36]



8 TECHNICKÉ ÚDAJE VYBRANÝCH MOTORŮ

V následující tabulce jsou uvedeny technické údaje motorů popsaných v této práci. Motory jsou v tabulce řazeny podle zdvihového objemu. Jelikož by nemělo smysl věnovat se specifikacím všech výkonových variant těchto motorů, bude tabulka zohledňovat vždy pouze nejvýkonnější variantu daného motoru, která je v současnosti vyráběna.

Tab. 1 Technické údaje vybraných motorů [38]

Motor	0.9 SGE	0.9 TCe	1.0 EcoBoost	1.2 TSI
Výrobce	Fiat	Renault	Ford	Volkswagen
Typ motoru	zážehový	zážehový	zážehový	zážehový
Dmychadlo	1 x TD	1 x TD	1 x TD	1 x TD
Zdvihový objem (cm ³)	875	899	999	1197
Vrtání (mm)	80,5	72,2	71,9	71,0
Zdvih (mm)	86,0	73,1	82,0	75,6
Kompresní poměr (-)	10,0 : 1	9,5 : 1	10,0 : 1	10,5 : 1
Počet válců / ventilů (- / -)	2 / 8	3 / 12	3 / 12	4 / 16
Uspořádání válců	řadové	řadové	řadové	řadové
Ventilový rozvod	DOHC	DOHC	DOHC	DOHC
Maximální výkon / otáčky (kW / min ⁻¹)	63 / 5500	66 / 5000	92 / 6000	77 / 4500 ÷ 5500
Točivý moment / otáčky (Nm / min ⁻¹)	145 / 1900	135 / 2500	170 / 1400 ÷ 4500	175 / 1400 ÷ 4000
Spotřeba paliva (l / 100 km)	4,2 ¹⁾	4,5 ²⁾	5,1 ³⁾	4,9 ⁴⁾

¹⁾ Ve voze Fiat Punto.

²⁾ Ve voze Renault Clio.

³⁾ Ve voze Ford Focus.

⁴⁾ Ve voze Škoda Octavia.



Tab. 1 Technické údaje vybraných motorů (pokračování)

Motor	1.2 DIG-S	1.2 TCe	1.4 TSI	1.4 TSI
Výrobce	Nissan	Renault	Volkswagen	Volkswagen
Typ motoru	zážehový	zážehový	zážehový	zážehový
Dmychadlo	1 x MK	1 x TD	TD + MK	1 x TD
Zdvihový objem (cm ³)	1198	1198	1390	1395
Vrtání (mm)	78,0	72,2	76,5	74,5
Zdvih (mm)	83,6	73,2	75,6	80,0
Kompresní poměr (-)	13,0 : 1	10,0 : 1	10,0 : 1	10,5 : 1
Počet válců / ventilů (- / -)	3 / 12	4 / 16	4 / 16	4 / 16
Uspořádání válců	řadové	řadové	řadové	řadové
Ventilový rozvod	DOHC	DOHC	DOHC	DOHC
Maximální výkon / otáčky (kW / min ⁻¹)	72 / 5600	85 / 4500	132 / 6200	103 / 4500 ÷ 6000
Točivý moment / otáčky (Nm / min ⁻¹)	142 / 4400	190 / 2000	250 / 2000 ÷ 4500	250 / 1500 ÷ 3500
Spotřeba paliva (l / 100 km)	4,1 ⁵⁾	5,3 ⁶⁾	6,2 ⁷⁾	5,3 ⁸⁾

⁵⁾ Ve voze Nissan Micra.

⁶⁾ Ve voze Renault Megane.

⁷⁾ Ve voze Škoda Fabia RS.

⁸⁾ Ve voze Škoda Octavia.



Tab. 1 Technické údaje vybraných motorů (pokračování)

Motor	1.8 TSI	2.0 CDTi	2.0 TSI	2.5 TFSI
Výrobce	Volkswagen	Opel	Volkswagen	Audi
Typ motoru	zážehový	vznětový	zážehový	zážehový
Dmychadlo	1 x TD	2 x TD	1 x TD	1 x TD
Zdvihový objem (cm ³)	1798	1956	1984	2480
Vrtání (mm)	82,5	83,0	82,5	82,5
Zdvih (mm)	84,1	90,4	92,8	92,8
Kompresní poměr (-)	9,6 : 1	16,5 : 1	9,6 : 1	10,0 : 1
Počet válců / ventilů (- / -)	4 / 16	4 / 16	4 / 16	5 / 20
Uspořádání válců	řadové	řadové	řadové	řadové
Ventilový rozvod	DOHC	DOHC	DOHC	DOHC
Maximální výkon / otáčky (kW / min ⁻¹)	132 / 5 100 ÷ 6200	143 / 4000	155 / 4500 ÷ 6200	265 / 5500 ÷ 6700
Točivý moment / otáčky (Nm / min ⁻¹)	250 / 1250 ÷ 5000	400 / 1750 ÷ 2500	280 / 1500 ÷ 4200	465 / 1650 ÷ 5400
Kombinovaná potřeba paliva (l / 100 km)	5,2 ⁹⁾	4,9 ¹⁰⁾	8,6 ¹¹⁾	9,0 ¹²⁾

⁹⁾ Ve voze Audi A3.

¹⁰⁾ Ve voze Opel Insignia.

¹¹⁾ Ve voze Volkswagen Passat Alltrack 4Motion.

¹²⁾ Ve voze Audi TT RS plus Coupé.



Tab. 1 Technické údaje vybraných motorů (pokračování)

Motor	N55B30M0	N57S	3.0 TFSI	3.0 V6 S/C
Výrobce	BMW	BMW	Audi	Jaguar
Typ motoru	zážehový	vznětový	zážehový	zážehový
Dmychadlo	1 x TD twin-scroll	3 x TD	1 x MK	1 x MK
Zdvihový objem (cm ³)	2979	2993	2995	2995
Vrtání (mm)	84,0	84,0	84,5	84,5
Zdvih (mm)	89,6	90,0	89,0	89,0
Kompresní poměr (-)	10,2 : 1	16,0 : 1	10,3 : 1	10,5 : 1
Počet válců / ventilů (- / -)	6 / 24	6 / 24	6 / 24	6 / 24
Uspořádání válců	řadové	řadové	vidlicové	vidlicové
Ventilový rozvod	DOHC	DOHC	DOHC	DOHC
Maximální výkon / otáčky (kW / min ⁻¹)	225 / 5800 ÷ 6000	280 / 4000 ÷ 4400	228 / 5500 ÷ 6500	254 / 6500
Točivý moment / otáčky (Nm / min ⁻¹)	400 / 1200 ÷ 5000	740 / 2000 ÷ 3000	440 / 2900 ÷ 4500	450 / 3500 ÷ 5000
Kombinovaná potřeba paliva (l / 100 km)	7,9 ¹³⁾	6,3 ¹⁴⁾	8,2 ¹⁵⁾	9,6 ¹⁶⁾

¹³⁾ Ve voze BMW 335i.

¹⁴⁾ Ve voze BMW M550d xDrive.

¹⁵⁾ Ve voze Audi A6 Avant quattro.

¹⁶⁾ Ve voze Jaguar XJ.



Tab. 1 Technické údaje vybraných motorů (pokračování)

Motor	4.0 TFSI	AJ-V8 R	M157
Výrobce	Audi	Jaguar	Mercedes-Benz (AMG)
Typ motoru	zážehový	zážehový	zážehový
Dmychadlo	2 x TD	1 x MK	2 x TD
Zdvihový objem (cm ³)	3993	5000	5461
Vrtání (mm)	84,5	92,5	98,0
Zdvih (mm)	89,0	93,0	90,5
Kompresní poměr (-)	10,1 : 1	9,5 : 1	10,0 : 1
Počet válců / ventilů (- / -)	8 / 32	8 / 32	8 / 32
Uspořádání válců	vidlicové	vidlicové	vidlicové
Ventilový rozvod	DOHC	DOHC	DOHC
Maximální výkon / otáčky (kW / min ⁻¹)	412 / 5700 ÷ 6700	404 / 6500	415 / 5500
Točivý moment / otáčky (Nm / min ⁻¹)	700 / 1750 ÷ 5500	680 / 3500	900 / 2250 ÷ 3750
Kombinovaná potřeba paliva (l / 100 km)	9,8 ¹⁷⁾	12,3 ¹⁸⁾	9,9 ¹⁹⁾

¹⁷⁾ Ve voze Audi RS6 Avant.

¹⁸⁾ Ve voze Jaguar XKR-S GT.

¹⁹⁾ Ve voze Mercedes-Benz SL 63 AMG Performance Package.



9 PORUCHY TURBODMYCHADEL

Dříve bylo přeplňování výsadou pouze několika výjimečných motorů, dnes se bez něj neobejde žádný dieselový motor a velmi rychle stoupá také počet zážehových motorů přeplňovaných turbodmychadly. Je proto potřeba se věnovat i poruchám postihujícím turbodmychadla. Samo o sobě je turbodmychadlo velmi spolehlivá strojní součást nevyžadující žádnou speciální péči, je však potřeba provádět základní údržbu týkající se zejména výměny oleje. Důvody vyřazení turbodmychadla z provozu jsou zpravidla:

- a) vniknutí cizího tělesa,
- b) nedostatečné mazání.[39]

9.1.1 VNIKUTÍ CIZÍHO TĚLESA

Tím jsou míněny jakékoliv nečistoty ve výfukovém a sacím potrubí. Typickým příkladem je matice zapomenutá pod vzduchovým filtrem, která je při dosažení dostatečného tlaku nasáta do kompresoru. Její kontakt s roztočeným kompresorovým kolem má za následek jeho rozlomení, jak je vidět na obr. 32. Méně časté je poškození turbinového kola – například odlomeným kouskem ventilu.[39] Takto poškozenou turbínu ukazuje obr. 33.



Obr. 32 Prasklé kompresorové kolo [40]



Obr. 33 Poškozené turbinové kolo [40]

Velmi nebezpečný je také písek a prach nasávaný přes sportovní filtr s většími otvory, případně sportovním sáním zcela bez filtrace. Jemné lopatky kompresorového kola se postupně obroušují a v extrémním případě zmizí úplně – viz obr. 34.[39] Směs prachu, písku a kovových částic z kompresorového kola pak způsobuje škody ve spalovacím prostoru motoru.



Obr. 34 Obroušené lopatky kompresoru [40]



9.1.2 NEDOSTATEČNÉ MAZÁNÍ

Nedostatečné mazání rotoru turbodmychadla bývá zpravidla způsobeno nekvalitním olejem či jeho nedostatkem. Důležité je dodržování výměny oleje v předepsaných intervalech a dodržování jeho specifikací – nevhodný je nejen příliš hustý, ale i málo teplotně odolný olej. Často se však nejedná o problém samotného turbodmychadla, ale nějaké vedlejší součástky nebo motoru. Nutná je občasná kontrola vzduchového filtru. Je-li ucpaný, vytváří podtlak před turbodmychadlem a vysává z něj olej. Komplikace může způsobit i ucpané odvětrávání klikové skříně motoru. Pak se nedostane olej z ložiska turbodmychadla a je odtud vytlačován do turbiny nebo kompresoru. Tato závada se často vyskytovala u motorů Volkswagen 2.5 TDI. Samotnou hřídel rotoru dmychadla dokáže přehřát nedostatek oleje, což je chronický problém staršího motoru Volkswagen 1.8 T. Ten má přívod maziva k turbodmychadlu umístěn příliš blízko výfukového potrubí, takže se olej přímo v olejovém potrubí přepaluje a vzniklé uhlíkové usazeniny jej ucpávají. Stejná závada se týká pohonné jednotky 1.6 HDi, montované do vozů Peugeot, Citroën, Ford, Volvo a Fiat.[39]

Zhruba v polovině případů jsou problémy s mazáním způsobeny samotným dmychadlem. Fatální následky může mít zastavení motoru ihned po velké zátěži – typicky rychlá jízda po dálnici. V takovém případě se olej z velmi horkého turbodmychadla odpaří a při opětovném nastartování pracuje dmychadlo chvíli bez maziva. Po dynamické jízdě je tedy nutné motor nechat určitou dobu běžet na volnoběh, aby se turbodmychadlo stačilo dostatečně ochladit. Velmi nebezpečný je také neodborný zásah do řídicí jednotky motoru – tzv. chiptuning. To může vést k roztočení rotoru turbodmychadla až na $300\,000\text{ min}^{-1}$, což je mnohem vyšší hodnota, než na jakou bylo dmychadlo konstruováno. Při takto vysokých otáčkách se lopatky kompresorového, resp. turbinového kola vlivem odstředivé síly roztahují a může dojít až ke kontaktu s kompresorovou, resp. turbinovou skříní a jejímu vybrušování. Někdy se zase stane, že nové turbodmychadlo ihned selže. To už bývá chybou mechanika, který při montáži zapomene dmychadlo naplnit olejem a po nastartování motoru je ihned zatíží, případně neuvolní ucpaný přívod maziva, který zničil předchozí turbodmychadlo.[39] Oba tyto případy mají za následek zadření nebo i roztržení kluzných ložisek rotoru dmychadla, jak je patrné z obr. 35.



Obr. 35 Zadřený rotor a ložiska turbodmychadla [40]



ZÁVĚR

Technologie přeplňování v současné době představuje nedílnou součást konstrukce moderních dieselových i zážehových motorů používaných v osobních automobilech. Všechny vznětové motory jsou již dnes vybaveny minimálně jedním turbodmychadlem. Na druhé straně razantně přibývá také zážehových přeplňovaných motorů konstruovaných „v duchu“ downsizingu, jenž ve velké míře nahrazují pohonné jednotky s atmosférickým plněním. Ty se již na evropském trhu uplatňují pouze minoritně – zejména ve třídách malých vozů, minivozů a dále v luxusních, sportovních a supersportovních automobilech jako například Rolls-Royce či Ferrari. V ostatních třídách automobilů zastávají atmosférické motory většinou úlohu pouze základních motorizací pojících se s nejnižšími stupni výbavy. Drtivá většina prodávaných automobilů je tedy vybavena přeplňovaným motorem.

Důvodem takového rozmachu motorů spolupracujících s turbodmychadlem či mechanicky poháněným kompresorem je, kromě již zmíněných výhod downsizingu, také fakt, že pomocí přeplňování se konstruktérům podařilo výrazně zlepšit průběh točivého momentu v nízkých otáčkách motoru. Moderní turbomotory tak vykazují mnohem lepší pružnost v porovnání s podobně výkonnými agregáty s atmosférickým plněním. Pásmo nízkých otáček je velmi důležité, neboť motor při běžné jízdě pracuje právě zde a je kladen požadavek na dostatek výkonu a točivého momentu pro potřebu razantní akcelerace. Z tohoto důvodu se při konstrukci přeplňovaného motoru navrhuje turbodmychadlo tak, aby pracovalo optimálně v oblasti nízkých otáček. Nevhodné chování turbodmychadla ve vyšších otáčkách je pak korigováno jeho regulací, jak je popsáno v kap. 4. Je také potřeba zdůraznit, že přeplňovaný motor se musí ideálně již od počátku vyvíjet spolu s dmychadlem tak, aby byla jejich spolupráce maximálně efektivní. Při osazení již existujícího atmosférického motoru turbodmychadlem se zpravidla nepodaří dosáhnout tak optimálních parametrů jako při použití předešlého postupu.

Nevýhodou přeplňovaných motorů je však jejich větší konstrukční náročnost a zejména mnohem výraznější závislost spotřeby paliva na stylu jízdy, než je tomu u atmosférických pohonných jednotek. I přes tato negativa se turbomotory těší čím dál větší oblibě, což lze pozorovat i ve vrcholných disciplínách motoristického sportu – Formuli 1 a šampionátu WRC. Právě ve Formuli 1 budou počínaje sezónou 2014 tradiční atmosférické osmiválce s objemem 2,4 l nahrazeny turbodmychadly přeplňovanými šestiválci s objemem pouhých 1,6 l.

V nejbližší budoucnosti lze dle mého názoru očekávat další snižování zdvihového objemu motorů při současném zvýšení jejich výkonové hmotnosti. Bude však třeba vyřešit větší namáhání všech částí motoru, neboť se zvyšováním výkonu pomocí přeplňování se pojí velké tlaky působící uvnitř motoru a dmychadla. Určitý potenciál skýtá i použití elektrických dmychadel popsaných v kap. 6. Zatím se však nepodařilo uvést je do sériové výroby. Další možností uplatnění přeplňovaných motorů je tzv. hybridní pohon, tedy spolupráce spalovacího motoru a elektromotoru. Průkopníkem této technologie byla v posledních letech zejména značka Toyota se svým modelem Prius. Dnes se konstrukcí hybridních pohonných ústrojí zabývá velká část výrobců automobilů. Hybridní pohon se zdá být vhodným řešením do doby, než bude možný přechod na jiná paliva, než je benzin, nafta či etanol.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4.
- [2] HOFFMAN, Karel. *Radiální kompresor při turbopřeplování*. Brno: VUT FSI, 1978. 131 s. Habilitační práce.
- [3] HOFFMAN, Karel. *Turbodmychadla a vozidlové turbíny: Přeplování spalovacích motorů*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1981, 134 s.
- [4] BARTONÍČEK, Ladislav. *Přeplování pístových spalovacích motorů*. [online]. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004, 77 s. [cit. 2013-03-12]. ISBN 80-708-3800-0. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/PZP-preplnovani-PSM.pdf>
- [5] LÁNÍK, Ondřej. Přeplování (1. díl): Teorie+mechanické přeplování. In: *Auto.cz* [online]. 20.7.2004 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/preplnovani-1-dil-teorie-mechanicke-preplnovani-16778>
- [6] ZAPLETAL, Miroslav, Karel MIFFEK a Vladimír KLIMENT. *Přeplování naftových motorů*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1966, 242 s.
- [7] Basics of Supercharging. In: *AA1Car.com: Automotive Diagnostic & Repair Help* [online]. [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://www.aa1car.com/library/supercharge.htm>
- [8] Positive Displacement Supercharger Info. In: *Mustang Forums: Unofficial Ford Mustang Enthusiast Forum* [online]. [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://mustangforums.com/forum/pipes-boost-and-juice/92444-positive-displacement-supercharger-info.html>
- [9] *Gizmodo* [online]. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://cache.gizmodo.com/assets/images/12/2009/02/turbo-5-470-0209.jpg>
- [10] LÁNÍK, Ondřej. Přeplování (2. díl): Turbodmychadla. In: *Auto.cz* [online]. 2004, 26.7.2004 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/preplnovani-2-dil-turbodmychadla-16765>
- [11] Products: Rotor/Bering. *Bosch Mahle TurboSystems* [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.bmturbosystems.com/en/produkte/laufzeuglagerung.html>
- [12] Turbine Wheel Clipping. *TIMSTURBOS.COM: turbochargers, rebuilding, fabrication* [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://timsturbo.com/servicesrebulding/rebuilding-up-grades/turbine-wheel-clipping>
- [13] *Forced Inductions* [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.forcedinductions.com/>
- [14] Intercooler sul 1.4HDI. In: *Leone Rampante: 206 CLUB ITALIA* [online]. [cit. 2013-04-20] Dostupné z: <http://www.leonerampante.com/forum/lofi/version/index.php?t5489.html>



- [15] Engine Modifications. In: *ClubWRX.net: The Subaru Impreza WRX/STI Enthusiast Community* [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.clubwrx.net/forums/engine-modifications/134350000-front-mount.html>
- [16] HOFFMAN, Karel. Regulované přepřínování vozidlových motorů. In: *Katedra vozidel a motorů: Technická univerzita v Liberci* [online]. Brno: VUT FSI Brno, 2000 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/Hofmann_Preplnovani.pdf
- [17] Křivky výkonu a toč. Momentu. In: *ŠKODA Forum* [online]. 2011, 26.4.2011 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://forum.skodahome.cz/topic/7712-krivky-vykonu-a-toc-momentu/>
- [18] Waste-gate. In: *Auteoch.com: Automotive Components, Automotive Technology* [online]. 2013, 17.4.2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.auteoch.com/8/previous/2.html>
- [19] Turbocharger. In: *Formula 1 Dictionary* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/turbocharger.html>
- [20] VGT – operating principles. In: *Auto Repair Manual Forum* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.autorepairmanuals.ws/f152/hyundai-step-ii-2007-vgt-system-variable-geometry-turbocharger-3874/>
- [21] Turbocharging. In: *AutoZine: The promised land for car enthusiast* [online]. [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: http://www.autozine.org/technical_school/engine/Forced_Induction_3.html
- [22] LÁNÍK, Ondřej. Opel Twin Turbo: dva stupně ke zlaté. In: *Auto.cz* [online]. 2004, 26.3.2004 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/opel-twin-turbo-dva-stupne-ke-zlate-17089>
- [23] TWIN SCROLL TURBOCHARGERS. In: *PERFORMANCE SPECIALTIES: FOR THE PERFORMANCE ENTHUSIAST* [online]. 2011, 10.9.2011 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://performancespecialties.wordpress.com/2011/08/10/twin-scroll-turbochargers/>
- [24] BMW N20 twin-scroll turbocharger diagram. In: *EuroCar News* [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.eurocarnews.com/4/0/1191/5411/bmw-n20-twin-scroll-turbocharger-diagram/gallery-detail.html>
- [25] Nový motor VW 1.4 TSI. *Auto Tip*. Praha: Ringier Axel Springer Praha, a. s., 2005, roč. 15, č. 19, s. 50-51. ISSN 1210-1087.
- [26] BUREŠ, David. BMW M Performance: Diesel se třemi turby už známe, ale jak vypadá?. In: *Auto.cz* [online]. 2012, 24.3.2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/bmw-m-diesel-65874>
- [27] ČERMÁK, Ladislav. Elektrické dmychadlo. *Auto Tip*. Praha: Ringier Axel Springer Praha, a. s., 2012, roč. 22, č. 21, s. 62. ISSN 1210-1087.



- [28] ČERMÁK, Ladislav. Technika v automobilech: Elektrické dmychadlo. In: *Auto.cz* [online]. 2012, 23.11.2012 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/elektricke-dmychadlo-jde-o-setiny-71431>
- [29] SAJDL, Jan. TSI (Twincharged Stratified Injection). In: *autolexicon.net* [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/tsi-twincharger-stratified-injection/>
- [30] ČERMÁK, Ladislav. Audi 1.8 TSI. *Auto Tip*. Praha: Ringier Axel Springer Praha, a. s., 2011, roč. 21, č. 17, s. 43. ISSN 1210-1087
- [31] LÁNÍK, Ondřej. Audi má nový motor 3.0 TFSI: T jako kompresor. In: *Auto.cz* [online]. 2008 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/audi-kompresor-manovy-motor-3-0-tfsi-t-7183>
- [32] SAJDL, Jan. TCE (Turbo Control Efficiency). In: *autolexicon.net* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/tce-turbo-control-efficiency/>
- [33] ČERMÁK, Ladislav. Ford Focus 1.0 EcoBoost. *Auto Tip*. Praha: Ringier Axel Springer Praha, a. s., 2012, roč. 22, č. 5, s. 20-21. ISSN 1210-1087.
- [34] SAJDL, Jan. TwinAir (MultiAir). In: *autolexicon.net* [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/flat-multiair/>
- [35] KOVAŘÍK, Tomáš. Fiat 500 TwinAir. *Auto Tip*. Praha: Ringier Axel Springer Praha, a. s., 2010, roč. 20, č. 15, s. 24-25. ISSN 1210-1087.
- [36] VAVERKA, Lukáš. Nissan 1,2 DIG-S: Tříválec s kompresorem podrobně. In: *Auto.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/nissan-1-2-dig-s-trivalec-s-kompresorem-podrobne-60143>
- [37] NISSAN MICRA 1,2 DIG-S. In: *Nissan Newsroom Česká Republika* [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://newsroom.nissan-europe.com/cz/cs-cz/Media/Media.aspx?mediaid=76381>
- [38] *carfolio.com: The Car Specifications Site* [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.carfolio.com/>
- [39] ČERMÁK, Ladislav. Poruchy turbodmychadel. *Auto Tip*. Praha: Ringier Axel Springer Praha, a. s., 2012, roč. 22, č. 6, s. 74-75. ISSN 1210-1087.
- [40] ČERMÁK, Ladislav. Dieselová pro a proti VI: Typické poruchy turbodmychadel. In: *Auto.cz* [online]. 2012 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/dieselova-pro-proti-vi-poruchy-turbodmychadel-66573>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AMG	[-]	Aufrecht-Melcher-Grossaspach
BMW	[-]	Bayerische Motoren Werke
CDTi	[-]	Common rail Diesel Turbo Injection
DIG-S	[-]	Direct Injection Gasoline – Supercharged
DOHC	[-]	Double Overhead Camshaft
GDI	[-]	Gasoline Direct Injection
HDi	[-]	High pressure Direct Injection
HTP	[-]	High Torque Performance
H_u	$[J \cdot kg^{-1}]$	výhřevnost paliva
CH	[-]	chladič plicího vzduchu
i	[-]	počet válců motoru
K	[-]	kompresor
M	[-]	motor
MK	[-]	mechanicky poháněný kompresor
\dot{m}_K	$[kg \cdot s^{-1}]$	celkové hmotnostní množství dodávané kompresorem
M_{p1}	[kg]	hmotnostní dávka paliva na jeden cyklus
MPI	[-]	Multi Point Injection
\dot{m}_{pr}	$[kg \cdot s^{-1}]$	proplachovací hmotnostní množství vzduchu
m_Z	[kg]	hmotnost čerstvé náplně ve válci motoru
\dot{m}_Z	$[kg \cdot s^{-1}]$	spalovací hmotnostní množství vzduchu
n	$[s^{-1}]$	otáčky motoru, exponent polytropy
p_{0K}	[Pa]	tlak plicího vzduchu před vstupem do kompresoru
p_{1Z}	[Pa]	tlak ve válci na konci plnění
p_{2K}	[Pa]	tlak plicího vzduchu na výstupu z kompresoru
p_e	[Pa]	střední efektivní tlak na píst
p_i	[Pa]	střední indikovaný tlak
p_{p1}	[Pa]	tlak před plicím ventilem
r	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	plynová konstanta vzduchu
RV	[-]	regulační ventil
SGE	[-]	Small Gasoline Engine
T	[-]	turbína
T_{0K}	[K]	teplota plicího vzduchu před vstupem do kompresoru



T_{1Z}	[K]	teplota čerstvé náplně ve válci na konci plnění
TCe	[-]	Turbo Control efficiency
TD	[-]	turbodmychadlo
TDI	[-]	Turbocharged Direct Injection
TFSI	[-]	Turbo Fuel Stratified Injection
T_{pl}	[K]	teplota plnicího vzduchu před plnicím ventilem
TSI	[-]	Twincharged Stratified Injection, Turbocharged Stratified Injection
VGT	[-]	Variable Geometry Turbocharger
V_H	[m ³]	zdvihový objem jednoho válce
VTES	[-]	Variable Torque Enhancement System
VW	[-]	Volkswagen
V_Z	[m ³]	objem čerstvé náplně ve válci motoru
WRC	[-]	World Rally Championship
δ	[-]	celková pružnost motoru
δ_{Mt}	[-]	momentová pružnost motoru
δ_n	[-]	otáčková pružnost motoru
Δp_{ch}	[Pa]	tlaková ztráta při průtoku chladičem
ΔT_{ch}	[K]	snížení teploty vzduchu v chladiči
η_d	[-]	dopravní účinnost motoru
η_i	[-]	indikovaná účinnost motoru
η_m	[-]	mechanická účinnost motoru
λ_Z	[-]	spalovací součinitel přebytku vzduchu
Π_K	[-]	poměrné stlačení v kompresoru
ρ_{0K}	[kg·m ⁻³]	hustota plnicího vzduchu před vstupem do kompresoru
ρ_{pl}	[kg·m ⁻³]	hustota plnicího vzduchu
σ_t	[-]	teoretický směšovací poměr vzduchu a paliva
τ	[-]	otáčkový činitel



SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK

bar	bar
cm ³	centimetr krychlový
g/km	gram na kilometr
Hz	hertz
K	stupeň Kelvina
kg	kilogram
kg/kW	kilogram na kilowatt
kW	kilowatt
l	litr
l/100 km	litr na 100 kilometrů
min ⁻¹	otáčky za minutu
mm	milimetr
MPa	megapascal
ms	milisekunda
m·s ⁻¹	metr za sekundu
Nm	newtonmetr
°C	stupeň Celsia



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Závislost dopravní účinnosti na plnicím tlaku [4].....	12
Obr. 2 Závislost optimální hodnoty λ_{opt} na tlaku p_e [4].....	13
Obr. 3 Závislost indikované účinnosti η_i na λ_z [4].....	14
Obr. 4 Řez Rootsovým dmychadlem [6].....	18
Obr. 5 Tvary rotorů Rootsových dmychadel [6].....	19
Obr. 6 Princip Rootsova dmychadla [7].....	20
Obr. 7 Řez šroubovým dmychadlem Lysholm [6].....	20
Obr. 8 Tvary rotorů šroubového dmychadla [6].....	21
Obr. 9 Princip šroubového dmychadla [8].....	21
Obr. 10 Popis konstrukce turbodmychadla [9].....	22
Obr. 11 Rotor turbodmychadla s radiálním turbinovým kolem [11].....	23
Obr. 12 Radiální turbinové kolo [12].....	24
Obr. 13 Kompresorové kolo [13].....	24
Obr. 14 Vřazení chladiče plnicího vzduchu mezi turbodmychadlo a motor [14].....	25
Obr. 15 Umístění chladiče plnicího vzduchu - Subaru Impreza WRX [15].....	26
Obr. 16 Charakteristika motoru 1.4 16V [17].....	27
Obr. 17 Charakteristika motoru 1.2 TSI [17].....	27
Obr. 18 Princip obtokového ventilu waste-gate [18].....	28
Obr. 19 Řez turbodmychadlem VGT [19].....	29
Obr. 20 Princip turbodmychadla VGT [20].....	30
Obr. 21 Schéma sériového dvoustupňového přeplňování [16].....	31
Obr. 22 Motor twin-turbo v nízkých otáčkách [22].....	32
Obr. 23 Motor twin-turbo ve středních otáčkách [22].....	32
Obr. 24 Motor twin-turbo ve vysokých otáčkách [22].....	33
Obr. 25 Schéma motoru BMW N54 twin-turbo [21].....	33
Obr. 26 Řez turbodmychadlem twin-scroll [24].....	34
Obr. 27 Schéma motoru Volkswagen 1.4 TSI twincharger [25].....	35
Obr. 28 Rozmístění turbodmychadel na motoru BMW N57S [26].....	36
Obr. 29 Elektrické dmychadlo VTES [28].....	37
Obr. 30 Schéma motoru Audi electric biturbo [28].....	37
Obr. 31 Systém Fiat MultiAir [34].....	42
Obr. 32 Prasklé kompresorové kolo [40].....	49
Obr. 33 Poškozené turbinové kolo [40].....	49
Obr. 34 Obroušené lopatky kompresoru [40].....	49
Obr. 35 Zadřený rotor a ložiska turbodmychadla [40].....	50