

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Přepřínování pístových spalovacích motorů a jeho vliv na výkon**

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Autor práce: Filip Jeniš

Praha 2020

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Přepřehování pístových spalovacích motorů a jeho vliv na výkon vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 SB., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla

V Praze dne 12.2.2020

.....

Filip Jeniš

## **Poděkování**

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Petru Jindrovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, podněty a cenné rady, které napomohly vzniku této bakalářské práce.

**Abstrakt:**

Cílem této bakalářské práce je rešerše přeplňování pístových spalovacích motorů osobních automobilů a jeho vliv na výkon. Úvod je zaměřen na historii vývoje, důvody pro přeplňování a popis základních parametrů. Prostřední část práce obsahuje rozdělení používaných systémů a jejich charakteristiku. U jednotlivých způsobů jsou popsány klíčové vlastnosti a konstrukční řešení. Závěrečná část je věnována vybranému aktuálnímu trendu v oblasti přeplňování.

**Klíčová slova:**

přeplňování; turbodmychadlo; kompresor

**Supercharging piston combustion engines and it's effect on engine performance****Summary:**

The aim of this bachelor's thesis is description project of supercharging piston combustion engines on passenger cars and it's effect on engine performance. Introduction part is focused on history of development, reasons for usage and basics parameters. The middle part contain distribution of using systems and their characteristics. Particular systems are described in detail with key features and construction. The last part is dedicated to chosen current trend in supercharging.

**Key words:**

supercharging; turbocharger; compressor

# Obsah

1. Úvod .....	1
2. Historie .....	2
2. Důvody přeplňování .....	5
2.1 Porovnání atmosférického a přeplňovaného motoru .....	5
3. Plnicí tlak .....	7
4. Směšovací poměr .....	8
5. Součinitel přebytku vzduchu .....	8
6. Hustota nasávaného vzduchu .....	9
7. Plnicí kompresor .....	10
7.1 Stlačení plnicího vzduchu .....	10
7.2 Hltnost motoru .....	11
8. Druhy přeplňování spalovacích motorů .....	11
9. Způsoby přeplňování .....	12
9.1 Turbodmychadlo .....	12
9.1.1 Princip činnosti .....	12
9.1.2 Regulace turbodmychadla .....	13
9.1.3 Konstrukce automobilového turbodmychadla .....	17
9.1.4 Twin-scroll turbodmychadlo .....	20
9.1.5 Twin-turbo / Biturbo .....	21
9.2 Mechanické dmychadlo .....	22
9.2.1 Princip činnosti .....	22
9.2.2 Rootsovo dmychadlo .....	22
9.2.3 Lysholmovo dmychadlo .....	23
9.2.4 Regulace kompresorů .....	24
9.2.5 Konstrukce automobilového mechanického kompresoru .....	25
9.2.6 Spirální dmychadlo .....	26
9.2.7 Kompresorem dosažené hodnoty .....	27
9.3 Porovnání turbodmychadla a kompresoru .....	28
9.4 Tlakovzdušný výměník .....	28
9.5 Plnění tlakovými vlnami .....	30
9.6 Kombinace mechanického dmychadla a turbodmychadla .....	31
10. Chlazení stlačeného vzduchu .....	31
10.1 Účinnost chladiče stlačeného vzduchu .....	33
10.2 Schéma okruhu chlazení plnicího vzduchu .....	34

11. Trendy v oblasti přeplňování.....	34
12. Závěr.....	37
Seznam zdrojů informací.....	38
Seznam obrázků a tabulek .....	40
Seznam použitých zkratk .....	42

## 1. Úvod

Může se zdát překvapivé, jak daleko do minulosti sahá přeplňování. Metoda přeplňování pístových spalovacích motorů je stejně stará jako motory samé. [1] Cesta k širokému spektru použití však nebyla rychlá ani snadná. Zpočátku byla využívána pouze ve velmi úzké oblasti u letadlových motorů provozovaných ve vysokých nadmořských výškách. Později u sportovních speciálů a velmi drahých automobilů. [1] Ekonomického významu dosáhla až po dlouhých 30 letech, kdy bylo definitivně potvrzeno, jakým způsobem přispívá ke zvýšení účinnosti motorů. I přes značné úspěchy na poli reálného použití, trvalo dalších několik dekad, než se přeplňování dočkalo masového rozšíření do sériové výroby. [2]

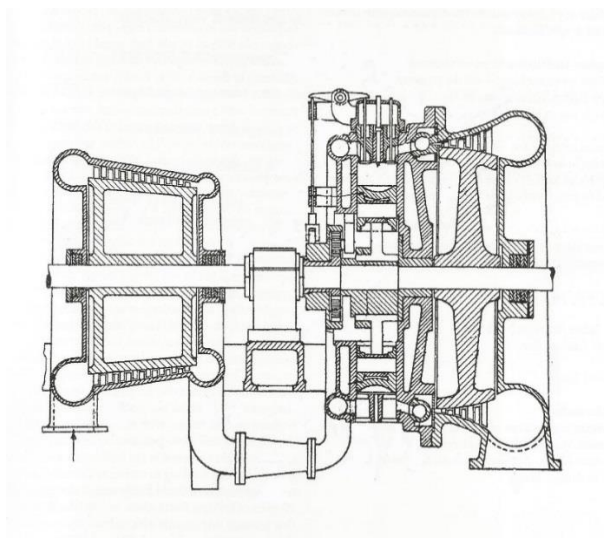
Nyní se těší velké oblibě u výrobců, na které jsou kladeny stále větší provozní nároky a omezení, stejně jako popularitě u spotřebitelů, kterým poskytuje ekonomicky výhodné a výkonné řešení pohonu jejich vozidel. Jednotlivé způsoby přeplňování a metody, kterými přispívají ke zlepšení parametrů spalovacích motorů jsou obsaženy v této práci.

## 2. Historie

Záhy poté, co se inženýrům podařilo zkonstruovat motor disponující alespoň nějakým výkonem, upřeli své úsilí na myšlenku jeho zvýšení. Tehdejší motory byly atmosférické, tedy plnicí tlak vznikal pohybem pístu z horní do dolní úvratě a mohl dosáhnout pouze atmosférické hodnoty tlaku. Dosahovaný výkon byl v řádu jednotek nebo desítek koňských sil. Cestou ke zlepšení bylo zvýšení hodnoty plnicího tlaku vzduchu před vstupem do spalovacího prostoru, které umožňovalo spálení většího množství paliva. [2][3]

Technika přeplňování je známa již z konce 19. století, jejími hlavními průkopníky byli Gottlieb Daimler, Rudolf Diesel a Alfréd Büchi. Německý vynálezce Daimler získal v roce 1885 patent DRP 34926 na přeplňování zážehového motoru spalujícího benzín. O rok později zaregistroval Diesel svůj patent na mechanickým dmychadlem přeplňovaný vznětový motor. V roce 1905 obdržel švýcarský inženýr Büchi patent DRP 204630 na přeplňování pomocí dmychadla, které bylo poháněno prostřednictvím výfukových plynů, na rozdíl od Dieslova mechanického pohonu dmychadla klikovým hřídelem. Büchi svůj vynález neustále vylepšoval z původní mechanické vazby mezi motorem a dmychadlem na termodynamickou (1911-1914). Díky pozdějším úpravám dokázala Büchiho dmychadla dosáhnout mnohem vyšší účinnosti než mechanická dmychadla. V roce 1925 Büchiho přeplňovaný spalovací motor dosáhl 40% navýšení výstupního výkonu, oproti atmosférické verzi. [1][3][4] Na obrázku 1 Büchiho patent DRP 204630.

Obrázek 1 Patent DRP 204630



[1]



Přepřehování našlo své využití velmi rychle. Ve dvacátých letech dvacátého století především v letecké, námořní, železniční dopravě a průmyslových strojích. Při použití na dvou německých lodích, poháněných naftovými motory, bylo dosaženo nárůstu výkonu z původních 1750 na konečných 2500 koňských sil. Tento úspěch položil základy rozšíření téměř do celého světa. Žádosti o licence přicházely od výrobců z Evropy, Spojených států i Japonska. Mezi ně patřila i společnost General Electric, která začala technologii implementovat ve svých dopravních odvětvích. [5]

Následující období druhé světové války, které se vyznačovalo neomezenými příležitostmi pro vývoj nových dopravních, vojenských a průmyslových prostředků, znamenalo velký rozmach použití přepřehování. Americká bojová letadla typu B17, nesoucí mnohatunové nálože k bombardování, byla vybavena motory s turbodmychadly. Využitelnost v letectví pramenila z potřeby dosahovat vyšší letové výšky, kde má kyslík řidší hustotu. Díky nucenému přepřehování bylo možno do motoru dopravit dostatečné množství kyslíku. [5] Jinak tomu bylo v automobilovém průmyslu, kde se vlivem nedůvěry v nové technologie a spolehlivosti dobových atmosférických motorů, prosadit nedokázalo. V poválečných letech se posunul kupředu vývoj technologie výroby. Použité tepelně odolné materiály byly zdokonaleny a postup lití přesnější. [5]

Padesátá a šedesátá léta se vyznačovala pokusy výrobců o použití turbodmychadel v sériové výrobě. V oblasti těžké a nákladní techniky švédští výrobci Volvo a Scania osazují svá nákladní vozidla diesellovými motory s turbodmychadly od společnosti Elliot a Eberspächer. [6] V roce 1954 výrobce Cummins disponuje řadou šestiválcových motorů s turbodmychadlem. [6][7] Aby byly nové motorové jednotky odlišeny od těch klasických, začínají výrobci hojně využívat v názvech písmen TD, z nichž některé obchodní označení přetrvalo do současnosti.

Modely Corvair Monza a Jetfire od automobilek Chevrolet a Oldsmobile, uvedené na americkém trhu v letech 1962 a 1963, byly první sériově vyráběné osobní automobily vybavené přepřehovanými benzínovými motory. Monza, sportovní verze Corvairu, se šestiválcovým motorem umístěným vzadu, který produkoval 95 koňských sil, byl nabízen i ve verzích Spider a Corsa, jejichž motory produkovaly 150 a 180 koňských sil. [2][3] Avšak velká nespolehlivost součástek a častá poruchovost systému, vedly k vyřazení těchto motorů

z nabídky. [2] Pozice atmosférických motorů byla neochvějná díky jednoduchosti a provozní spolehlivosti. Větší výkon byl dosahován zvětšováním zdvihového objemu.

Obzvláště v USA dosahovaly hodnoty objemu na dnešní poměry astronomických hodnot. Motory, obchodně označované jako Big Block s objemem až 7,5 litru a spotřebou až 20 litrů na 100 kilometrů, byly velmi populární. Spotřebu vývojáři neřešili, zásoby suroviny ropy byly dostatečné, a proto byl benzín levný. [8]

Situace se razantně změnila po ropné krizi v roce 1973, kdy se OPEC – organizace států vyvážejících ropu, rozhodla výrazně zdražit cenu a embargem dostupnost vyvážené ropy. To vše v návaznosti na události během války o Sinajský poloostrov a Golanské výšiny. Tyto události však umožnily rozmach turbodmychadel. Vznikla potřeba nižší spotřeby a vyšší účinnosti motorů při nižším objemu. [8] Využitím v motorsportu se podařilo úspěšně vyřešit některé předchozí problémy se spolehlivostí a funkčností. Seriál okruhových závodů Formule 1 v 70. letech ukázal, do jakých hladin je možné výkon posunout. Motory značky Renault s objemem 1,5 litru dosahovaly výkonu přes 1000 koní při malých rozměrech a nízké hmotnosti, tolik potřebné pro kompaktní monoposty F1.[3][7] Nelze opomenout ani závody rally speciálů WRC, vytrvalostní Le Mans či Indianapolis 500. Pro civilní účely přišlo Porsche 911 Turbo nebo Saab, který model 99 v roce 1979 nabízel ve dvou, čtyř dveřové a combi-coupé karosářském provedení. [9] Mercedes Benz 300 SD z roku 1978, následovaný Volkswagenem Golf TD z roku 1981 stály u nástupu turbodmychadel ve vznětových motorech. [2][3]

Po postupném nahrazení karburátorů elektronickým vstřikováním paliva v 80. letech byla cesta ke komerčnímu využití turbo technologie v dostupných vozidlech volná.

Ani po zpopularizování a rozšíření v naftových motorech nebyl systém zcela bez problémů a nežádoucích projevů. Častým jevem byla časová prodleva, reakce turba na sešlápnutí pedálu akceleratoru nebo nedostatečný proud výfukových plynů. [2]

Zvýšené nároky na ekonomickou stránku provozu a odstranění nežádoucích projevů, vedly k nutnosti regulace. [2] Současná doba neslevila z požadavků na nižší spotřebu, lepší ekologičnost a zvyšování výkonu. To vše při snižujícím se počtu válců a objemů.

## 2. Důvody přeplňování

Hlavním důvodem pro používání přeplňování vždy byla snaha zvýšit výkonové parametry motoru, ke kterým se v současné době přidávají požadavky na snižování spotřeby paliva a tím ovlivněné produkce škodlivých spalin. Díky přeplňování mohou vývojáři získat stejný výkon z motorové jednotky o menších rozměrech a nižší hmotnosti. Zmenšování objemu turbomotorů tzv. downsizing má vliv na snížení třecích a tepelných ztrát pohyblivých částí motoru, vedoucích k vyšší účinnosti a nižší spotřebě. Menší rozměry umožňují implementaci maloobjemových motorů do různých velikostních tříd automobilů. Tyto pohonné jednotky zajišťují dostatečnou akceleraci i při stoupání, čímž pomáhají plynulosti provozu na dálnicích. Nižší hmotnost působí pozitivně na životnost součástí přední nápravy. [4][10]

Jiným způsobem, jak získat z motoru více výkonu, je zvýšení jeho zdvihového objemu, počtu válců nebo pracovních otáček. Velký objem a počet válců zabírají více místa v motorovém prostoru vozidla. Především u vznětových motorů nejsou žádoucí, vzhledem k jejich vyšší hmotnosti, ve srovnání se zážehovými. Vyšší otáčky znamenají větší třecí ztráty a opotřebení rotačních částí, jejichž důsledkem je snížení životnosti motorové jednotky. [3][4]

### 2.1 Porovnání atmosférického a přeplňovaného motoru

Pro účely srovnání poslouží rozdělení do několika bodů:

- Výkon – přeplňovaný motor má vyšší výkon a točivý moment než atmosférický motor stejných rozměrů díky schopnosti přivést do válce větší množství vzduchu. Více vzduchu umožňuje spálení více paliva, z čehož vyplývá růst výkonu.
- Rozměry – porovnatelných výkonových parametrů atmosférického motoru lze dosáhnout turbomotorem s menším objemem nebo počtem válců tzv. downsizing
- Spotřeba paliva – při podobném výstupním výkonu spotřebuje turbomotor méně paliva. Část výfukových plynů, které normálně odejdou potrubím pryč, je použita ke zlepšení účinnosti motoru. [10] Menší rozměry znamenají menší vnitřní komponenty a z toho vyplývající menší třecí ztráty.

- Nadmořská výška – síla ve vyšších nadmořských výškách je u přeplňovaného motoru vyšší. Znatelný pokles výkonu u nepřeplňovaného motoru je způsobem klesajícím atmosférickým tlakem ve vyšších polohách. U turbomotoru výkon turbíny roste díky poměrně velkému tlakovému rozdílu mezi téměř konstantním před turbínou a nižším okolním tlakem. Nižší hustota kompresorem nasávaného vzduchu je z velké části vyrovnána. Motoru téměř neubývá síla. [4]
- Hluk – menší rozměry se projevují na nižší hlučnosti motoru. Zvukový projev turbomotoru je tišší ve srovnání s atmosférickým. Turbodmychadlo samo plní funkci dalšího tlumiče hluku. [10]
- Hmotnost – poměr výkonu [kW] ku jeho hmotnosti [kg] u stejných motorů vyznívá jasně pro turbomotor
- Motorová jednotka – blok válců, klikový mechanismus a písty musí u přeplňovaných motorů vydržet větší zatížení. V případě turbodmychadel jsou pracovní teploty až 1050 °C [3][4]
- Chlazení – plnění motoru stlačeným vzduchem vede ke zvyšování jeho teploty. Chladicí systém musí být schopen absorbovat více tepla než srovnatelný atmosférický

Tabulka číslo 1 představuje srovnání dvou konkrétních motorů u stejného typu vozidla.

Tabulka 1 Parametry přeplňovaného a nepřeplňovaného motoru

Opel Insignia 1. generace		
Typ motoru	zážehový přeplňovaný	zážehový atmosférický
Válce / ventily	4 / 4	4 / 4
Zdvihový objem [ccm]	1598	1598
Nejvyšší výkon [kw / ot/min]	132 / 5500	85 / 6000
Nejvyšší točivý moment [Nm / ot/min]	230 / 2200–5500	155 / 4000
Zrychlení 0-100 km/h [s]	9,2	12,9
Maximální rychlost [km/h]	220	192

[21]

Z tabulky je zřejmé, že přeplňovaný motor při stejném objemu a počtu válců, vyvine mnohem větší výkon, točivý moment, zrychlení i maximální rychlost. Díky kontrole tlaku nasávaného vzduchu může turbomotor dosáhnout zóny nejvyššího točivého momentu již od nižších otáček.

U těchto motorů je obvyklé, že nejvyššího točivého momentu dosahují v rozmezí otáček, na rozdíl od jednoho bodu, který je typický pro motory atmosférické. [3]

### 3. Plnicí tlak

Efektivní výkon spalovacího motoru je určen vztahem:

$$P_e = i * \frac{V_m * p_e * n}{\tau} \quad [kW] \quad (1.0)$$

kde:

$V_m$  je zdvihový objem motoru [ $\text{dm}^3$ ]

$p_e$  je střední efektivní tlak na píst [Mpa]

$n$  jsou otáčky [1/min]

$\tau$  počet otáček motoru potřebných pro 1 expansí zdvih [-] (1 pro dvoudobý, 2 pro čtyřdobý)

$i$  je počet válců motoru [-]

Ze vztahu (1.0) vyplývají členy vedoucí ke zvýšení výkonu. Zdvihový objem není vhodné zvyšovat kvůli hmotnosti a zástavbovému prostoru motoru. Otáčky jsou omezeny střední pístovou rychlostí a životností součástek. [11]

Nejvhodnější z hlediska efektivity je zvyšování středního efektivního tlaku působícího na píst při spalování paliva. To je možné spálením většího množství paliva, ze kterého se uvolní větší množství energie, jež se přivede do tepelného oběhu motoru, který pro dokonalé spalování paliva předpokládá dodávku většího hmotnostního množství vzduchu, a právě to je hlavním účelem přeplňování. [12]

Rovnice středního efektivního tlaku:

$$p_e = \frac{H_u * \rho_s * \eta_m * \eta_i * \eta_d}{\lambda_e * L_t} \quad [Mpa] \quad (1.1)$$

kde:

$H_u$  je dolní výhřevnost paliva [K/kg]

$\rho_s$  je hustota nasávaného vzduchu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\eta_d$  je dopravní účinnost [-]

$\eta_i$  je indikovaná účinnost [-]

$\eta_m$  je mechanická účinnost [-]

$\lambda_e$  je součinitel přebytku vzduch ve válci motoru [-]

$L_t$  je teoretický směšovací poměr vzduchu a paliva [kg/kg]

[12]

## 4. Směšovací poměr

Automobilové motory využívají k produkci energie proces spalování. Proces spalování je zajištěn určitým množstvím paliva a kyslíku ze vzduchu, které je přivedeno do válce motoru.

Směšovací poměr označovaný také AFR (air to fuel ratio) je určen rovnicí:

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} \quad (1.2)$$

kde:

$m_a$  je hmotnost vzduchu [kg]

$m_f$  je hmotnost paliva [kg] [13]

Úplné spalování je takové spalování, při kterém je spáleno veškeré palivo. To znamená, že ve výfukových plynech nezůstane nespálené palivo. Ideální spalovací neboli stechiometrický poměr vyjadřuje, kolik kilogramů vzduchu je potřeba k úplnému spálení jednoho kilogramu paliva. Tento poměr je 14,7 kg vzduchu ku 1 kg paliva u zážehových motorů a 14,5 ku 1 u vznětových motorů. Jedná se o teoretickou hodnotu. Skutečný poměr se od teoretického liší, jeho hodnota je blízká ideálnímu a udává, v jakém poměru palivo v motoru reálně spalujeme.

[13]

## 5. Součinitel přebytku vzduchu

Součinitel přebytku vzduch Lambda [-] je poměr množství přivedeného vzduchu [kg] ku teoretické potřebnému pro ideální spalování [kg]. Součinitel může dosáhnout hodnoty větší, rovnající se nebo menší než 1.

- 1)  $\lambda > 1$  dochází ke spalování s přebytkem vzduchu tzv. chudá směs. Příliš chudá směs se projevuje vynecháváním spalování nebo neschopností zapálení směsi. Klesá výkon motoru a dochází k jeho velkému opotřebením. Ve výfukových plynech přebývá kyslík.
- 2)  $\lambda = 1$  nasátý vzduch odpovídá teoretické spotřebě. Směs paliva a vzduchu má ideální složení. Spalování se nazývá dokonalé. Ve výfukových plynech není přebytek kyslíku ani nespálené palivo.
- 3)  $\lambda < 1$  je spalována směs s nedostatkem vzduchu tzv. bohatá směs. Nedostatek vzduchu se projevuje zbytkem nespáleného paliva ve výfukových plynech. [13][14]

Při optimální hodnotě Lambda vyplývá z rovnice středního efektivního tlaku (1.1), že ke zlepšení dojde zvýšením hustoty nasávaného vzduchu, dopravní, indikované a mechanické účinnosti. Tedy přeplňováním [11]

## 6. Hustota nasávaného vzduchu

Stlačováním je dosaženo dopravení větší hmoty vzduchu do spalovacího prostoru. Ochlazením v mezichladiči je zvýšena jeho hustota. Zvýšení hustoty nasávaného vzduchu umožňuje vpravení většího množství paliva ke spálení a tím nárůst výkonu. [14]

Dle stavové rovnice je hustota plnicího vzduchu závislá na tlaku i teplotě a zvýšit ji lze:

- a) zvýšením plnicího tlaku v kompresoru
- b) snížením teploty ochlazením v chladiči stlačovaného vzduchu
- c) kombinací obou uvedených způsobů [11][12]

Hustota plnicího vzduchu vychází z rovnice (1.1)

$$\rho_s = \frac{p_e * L_t * \lambda_e}{H_u * \eta_m * \eta_i * \eta_d} \quad [kg * m^{-3}] \quad (1.3)$$

[11] [12]

## 7. Plnicí kompresor

Základními parametry přeplňování jsou v podstatě základní parametry plnicího kompresoru turbodmychadla nebo mechanicky poháněného kompresoru. Těmito parametry jsou:

- a) Stlačení plnicího vzduchu
- b) Hmotnostní průtok vzduchu kompresorem, který je dán hltností přeplňovaného motoru [15]

### 7.1 Stlačení plnicího vzduchu

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

$$\Pi_k = \frac{\rho_{2k}}{\rho_{0k}} = \left( \frac{\rho_{pl} r T_{0k}}{\rho_{0k}} \right)^n \quad (1.4)$$

kde:

$\Pi_k$  je poměrné stlačení kompresoru

$T_{0k}$  je teplota plnicího vzduchu před vstupem do kompresoru

$\rho_{0k}$  je hustota plnicího vzduchu před vstupem do kompresoru

$n$  je exponent polytropy [12] [15]

Vztah 1.4 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: [12][15]

$$\rho_{pl} = \rho_{2k} - \Delta_{pch} \quad (1.5)$$

$$T_{pl} = T_{2k} - \Delta_{Tch} \quad (1.6)$$

kde:

$\Delta_{pch}$  je tlaková ztráta při průchodu chladičem

$\Delta_{Tch}$  je snížení teploty vzduchu v chladiči

$\rho_{pl}$  je tlak plnicího vzduchu před vstupem do motoru [12] [15]



## 7.2 Hltnost motoru

Hltnost čtyřdobého přeplňovaného motoru, tedy celkové množství  $m_k$ , jež dodává kompresor turbodmyhadla a protéká motorem je možno rozdělit na:

- a) Hmotnostní množství vzduchu, které zůstává uzavřeno ve válci, tedy spalovací množství  $m_z$
- b) Proplachovací množství vzduchu  $m_{pr}$ , které v době překřížení ventilů propláchne spalovací prostor a unikne do výfukového traktu. [12][15]

Platí tedy:

$$m_k = m_z + m_{pr} \quad (1.7)$$

## 8. Druhy přeplňování spalovacích motorů

Přeplňování dělíme dle způsobu plnění motoru vzduchem na:

- výfukovými plyny poháněného turbodmyhadla
- mechanickým převodem poháněného dmyhadla tzv. kompresoru
- tlakovzdušného výměníku tzv. Comprex
- tlakových vln v sacím potrubí
- kombinací mechanického dmyhadla a turbodmyhadla [16]

Dle velikosti plnicího tlaku vzduchu přeplňování rozdělujeme:

- nízkotlaké se součinitelem stlačení plnicího vzduchu do 1,5. Dosáhnout lze zvýšení efektivního výkonu o 30 %.
- středotlaké se součinitelem stlačení 1,6 až 2. Navýšení výkonu 30 až 50 %.
- vysokotlaké se součinitelem stlačení v rozmezí 2,1 až 3,5. Výkon může být navýšen až o 100 %.
- zvláště vysokotlaké se součinitelem stlačení 3,6 až 6. Možné zvýšení až 400 % [16]

## 9. Způsoby přeplňování

### 9.1 Turbodmychadlo

V současné době je tím nejpoužívanějším způsobem přeplňování. Používá se u zážehových i vznětových motorů. Uplatnění našlo v autobusech, nákladních vozech a osobních automobilech všech tříd. Každý významný výrobce má ve svém portfoliu motorizací hned několik jednotek s turbodmychadlem. Některé automobilky dokonce zcela upustily od atmosférických verzí a nabízejí už jen turbomotory.

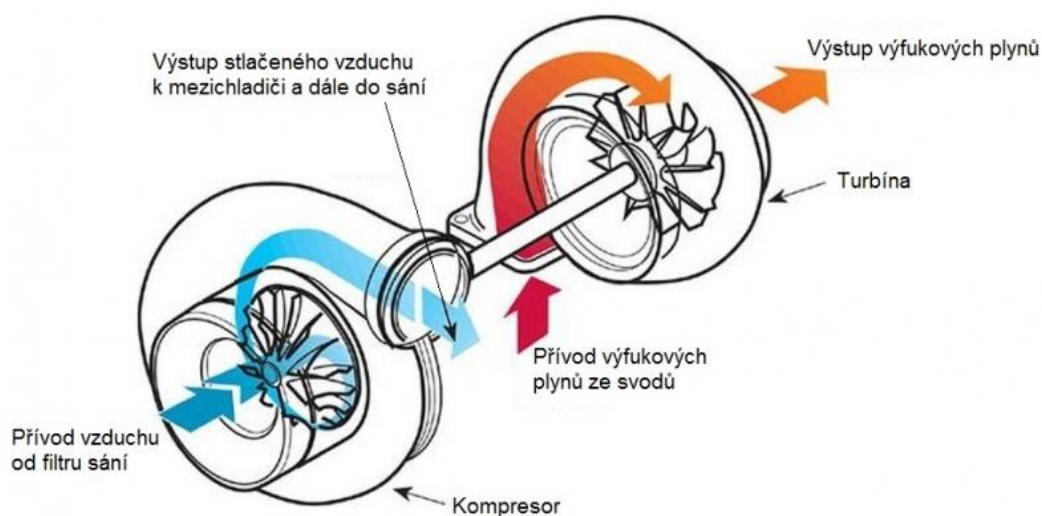
#### 9.1.1 Princip činnosti

Dnešní osobní a nákladní automobily jsou poháněny téměř výhradně čtyřdobými pístovými motory, které jsou ovládány sacími a výfukovými ventily. U atmosférických motorů je vzduch do válce nasáván přirozeně během sacího taktu. U motorů vybavených turbodmychadlem je nasáván vzduch před vstupem do spalovacího prostoru stlačen. Motor nasává stejný objem vzduchu, ale díky jeho stlačení je do válce dopravena větší hmotnostní náplň. V důsledku toho lze spálit více paliva, což vede ke zvýšení výkonu motoru při stejném objemu a otáčkách. [4][17]

Pro stlačení nasávaného vzduchu je využita část energie výfukových plynů ze spalovacího procesu. Za normálních podmínek odcházejí veškeré výfukové plyny výfukovým potrubím pryč z motoru bez jakéhokoliv užítku. U turbomotoru výfukové plyny pohánějí lopatkové kolo turbíny, které je uloženo na stejném hřídeli s lopatkovým kolem kompresoru. Lopatkové kolo kompresoru se otáčí stejně jako kolo turbíny a stlačuje nasávaný vzduch před vstupem do motoru. Mezi turbodmychadlem a motorem není mechanická vazba. [4]

Proces využití výfukových plynů v turbínové části ke stlačení vzduchu v kompresorové části znázorňuje obrázek číslo 2.

Obrázek 2 Pohon turbíny a stlačení vzduchu



[2]

### 9.1.2 Regulace turbodmychadla

Jak bylo uvedeno v kapitole 4.1.1, výfukové plyny roztáčí turbínu spojenou s kompresorem pomocí hřídele. Z toho vyplývá, že kompresor a turbína se otáčejí stejně. Čím více řidič stlačuje pedál akcelérátoru za účelem dosažení vyšší rychlosti, tím více roste zatížení motoru. Rostoucí výkon motoru znamená více spalin zrychlujících turbínu a s tím spojené větší množství stlačovaného vzduchu. Regulace udržuje hranice efektů, které jsou žádoucí a technicky proveditelné. Vysoké otáčky motoru nejsou žádoucí z důvodu vysoké spotřeby paliva. Pro ekonomický provoz je potřeba, aby motor pracoval v nižších otáčkách a současně turbodmychadlo plnilo válec dostatečným množstvím vzduchu. Aby se předešlo prodlení v reakci turbodmychadla na stlačení pedálu akcelérátoru, způsobené nedostatečným plnicím tlakem, je potřeba regulace, která zajistí roztočení turbíny při nízkých otáčkách. [4]

#### Obtokové potrubí

Pro tento způsob je zavedený název Wastegate (odpadní brána). Wastegate slouží k regulaci maximálního plnicího tlaku turbodmychadla a ochraně systému před přetížením a následným poškozením. U zážehových motorů hrozí detonační spalování vlivem růstu teploty směsi paliva se vzduchem. V tomto případě se volí menší turbína, která zabezpečí vyšší plnicí tlak, a tedy i vyšší dodávku vzduchu do motoru v nízkých pracovních otáčkách. [11] Toto konstrukční řešení pracuje tak, že nejvyššího točivého momentu je dosahováno při přednastaveném maximálním

plnicím tlaku. Při docílení maximální velikosti plnicího tlaku, způsobené prouděním zvýšeného množství spalin, je v regulačním ventilu tzv. aktuátoru stlačením otevřena membrána obtokového potrubí. Výfukové plyny jsou vedeny obtokovým potrubím mimo turbínu a bez využití odcházejí výfukovým potrubím pryč. Tímto odpuštěním je snížen výkon turbíny, a i dodávka vzduchu. [5] Ovládání wastegate ventilu je na obrázku 3

Obrázek 3 Ovládání regulace obtokem



[3]

Tlakový signál z kompresorové části je prostřednictvím vzduchového vedení – 1 přiváděn do aktuátoru – 2 umístěného na straně turbíny. Uvnitř utěsněného aktuátoru se nachází membrána, která pomocí tlaku plnicího vzduchu působí silou proti rovnající se síle pružiny. Jakmile je přiváděný tlak zvýšen, pružina je stlačena a připojené závitové táhlo s kloubkem – 3 otevře klapku – 4 a tím umožní průchod spalin mimo turbínu.

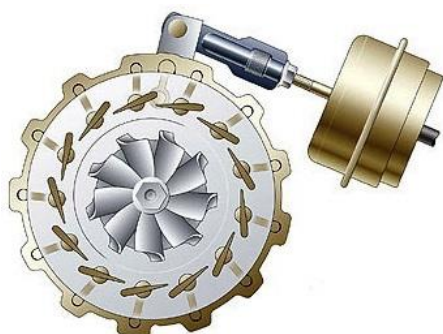
### Geometrie turbíny

Regulace změnou geometrie kola turbíny je dominantní u dieselových motorů. U benzínových motorů se až donedávna používala především regulace wastegate, avšak s příchodem downsizingu se ve velké míře používá i zde. S rostoucími otáčkami roste i tlak a teplota výfukových plynů před turbínovým kolem, které omezují další navyšování výkonu. Z těchto důvodů je od regulace obtokem upouštěno ve prospěch regulace pomocí geometrie. [4]

### a) Natáčení lopatek turbíny

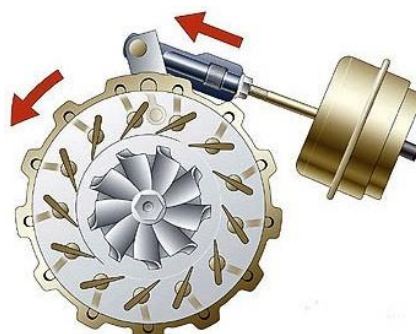
U dnešních motorů nejpoužívanější. Regulace pomocí natáčivých lopatek rozváděcího kola je výhodnější, poněvadž zde v průběhu regulace nerostou teploty a tlaky plynů před turbínou tak rychle, jako při odpouštění výfukových plynů před turbínou. Tyto výhody jsou však vykoupeny vyšší cenou turbodmychadel. [19] Proměnná geometrie lopatek umožňuje mnohem lepší využití energie výfukových plynů a získávání točivého momentu, potřebného pro rychlejší akceleraci než systém s obtokovým vedením. Doba odezvy turbodmychadla u přechodových fází zatěžovaného motoru je kratší. Výkon turbíny je nastavován na jejím lopatkovém kole změnou úhlu a rychlosti přítoku plynů. [4] Toho je dosaženo pomocí lopatek s možností změny úhlu natočení, jak ukazuje obrázek 4 a 5.

Obrázek 4 Úhel natočení v nízkých rychlostech



[4]

Obrázek 5 Úhel natočení ve vysokých rychlostech



[5]

- Při nízkých rychlostech a malém množství proudících výfukových plynů, je potřebný plnicí tlak dosažen pomocí natočení lopatek, čímž dojde ke zúžení vstupního průřezu plynů obr. vlevo. [4] Turbína se otáčí rychleji, takže se rychleji otáčí i kompresor. Plnicí tlak je k dispozici už v nízkých otáčkách bez výkonových výkyvů. [18]
- Při vysokých rychlostech a větším množství proudících plynů jsou lopatky v rozevřené pozici, čímž je vstup plynů rozšířen obr. vpravo. Rychlost proudících plynů se sníží. Otáčky turbíny a kompresoru klesnou, soustava je chráněna před přetížením a potřebný plnicí tlak zůstává zabezpečen. [18]

### b) Změna šířka statoru turbíny

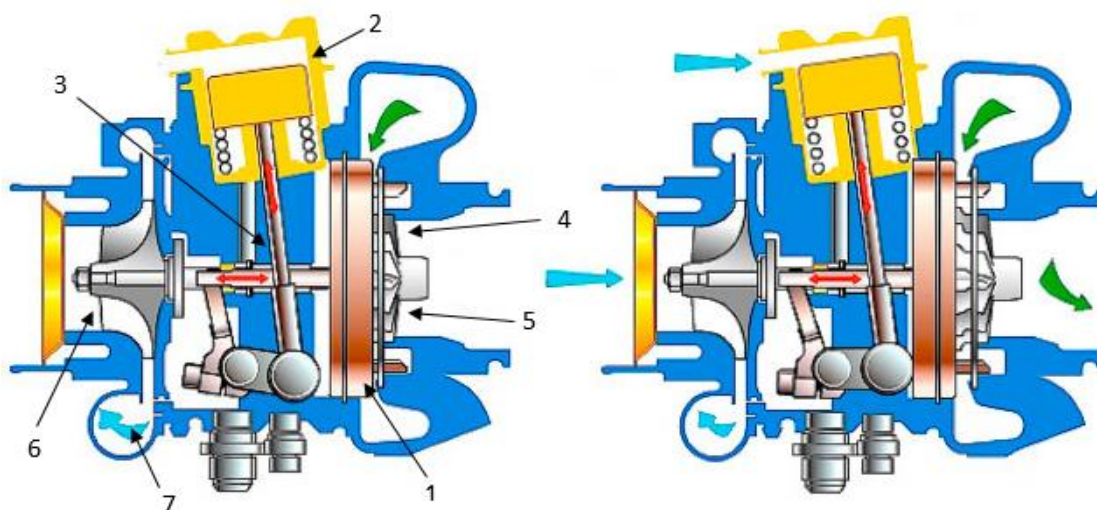
Tento způsob je velmi podobný výše uvedenému způsobu, avšak lopatky kola se nenatáčí. Ke změně velikosti průtoku výfukových plynů dochází změnou šířky rozváděcího kola turbíny. Náročnost vyplývá z jeho principu. Celé rozváděcí kolo s lopatkami je nutno rovnoměrně, po

celém obvodě axiálně, posouvat v turbínové skříni při teplotách až 800 °C, a přitom lopatky zasouvat do prstence v druhé stěně, která má vytvořené otvory s profilem zasouvaných lopatek.

[12] Proces posuvu znázorňuje obrázek 6.

Stator turbíny obsahuje prstenc s lopatkami pevně fixovanými ve stálém úhlu - 1. Poloha prstence je nastavena pneumatickým aktuátorem – 2. Posunutí po hřídeli je realizováno mechanickým táhlem s kloubky – 3. Posunutí po hřídeli je realizováno mechanickým táhlem s kloubky – 3.

Obrázek 6 Regulace změnou šířky statoru turbíny



[6]

- Při nízkých rychlostech je prstenc s lopatkami posouván axiálně směrem doprava, kde se lopatky zasunují do otvorů se stejným profilem-4. Výsledkem je zvýšení rychlosti průtoku výfukových plynů, které vyvolá rychlejší otáčení turbíny-5, kompresu-6 a nárůst plnicího tlaku-7. [18]
- Při vysokých rychlostech motoru se prstenc nachází v pozici nejdále vlevo a průřez průtoku plynů je maximálně otevřen. Nastává opačná situace, otáčky turbíny i kompresoru klesají. [18]



### 9.1.3 Konstrukce automobilového turbodmychadla

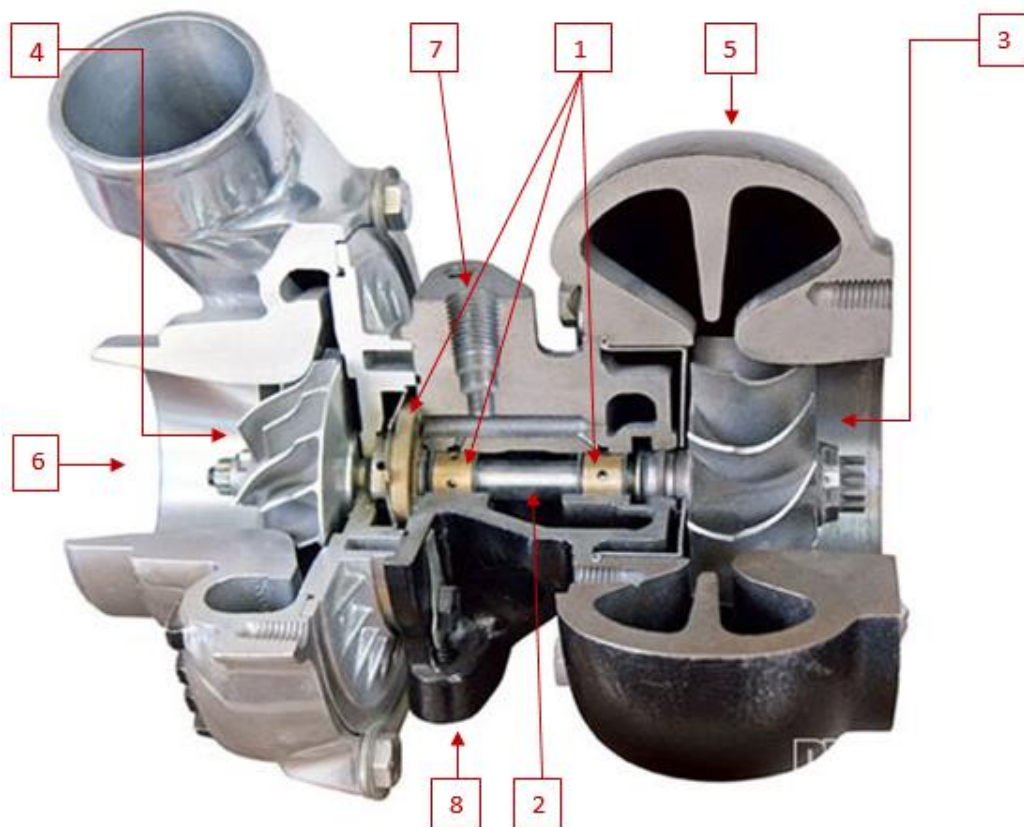
Turbodmychadlo je zařízení bez mechanické vazby na motor vozidla, avšak využívá energii výfukových plynů ze spalovacího procesu motoru. Jedná se o termodynamickou vazbu. Aby mohlo být turbo na jedné straně poháněno výfukovými plyny a pumpovalo vzduch do saní na straně druhé, musí být blízko samotného motoru. Vzhledem k instalaci pohonné jednotky do motorového prostoru vozidla, nelze instalovat turbodmychadlo za motor nebo mimo motor, jak tomu bylo v minulosti u lodních nebo průmyslových motorů. [4]

Turbodmychadlo je instalováno na motoru vozidla, kde je připojeno k výfukovým svodům. Pomocí svodů vstupují výfukové plyny do turbínové části. Obrázek 7 představuje řez dílem.

Hlavní část, označovaná jako jádro, obsahuje ložiskové pouzdro, ložiska radiální, axiální -1 a společný hřídel - 2, na kterém jsou umístěny kola turbíny - 3 a kompresoru - 4. Kolo turbíny je na straně výfukové - 5 a kolo kompresoru na straně nasávaného vzduchu - 6.[4]

Přívod - 7 čerstvého mazacího oleje nezbytného pro funkčnost ložisek je umístěn mezi turbínovou a kompresorovou skříní. Na protější straně se nachází přepad - 8.

Obrázek 7 Řez turbodmychadlem



[7]

### Kompresorová část

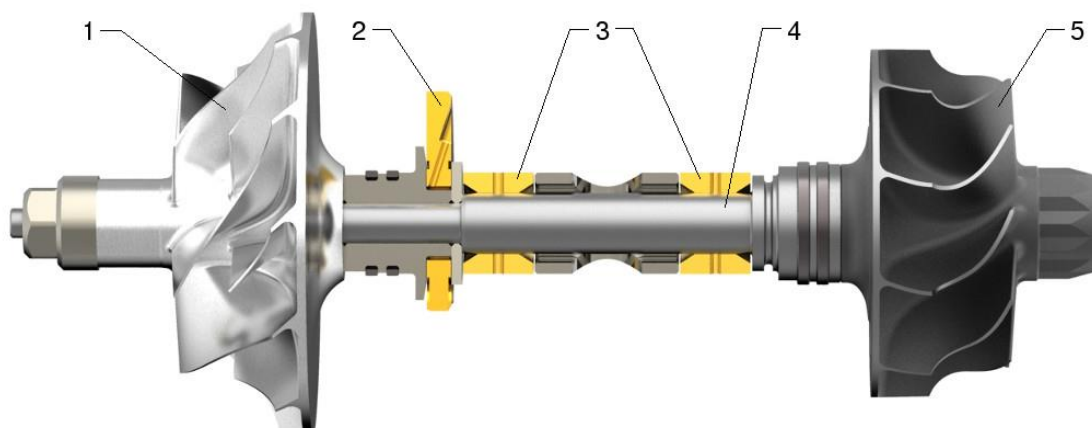
Uvnitř kompresorové skříně se nachází lopatkové kolo kompresoru obr., ke kterému proudí vzduch v axiálním směru a v radiálním směru jej opouští. Kompresor nasává čerstvý vzduch vedením od vzduchového filtru, stlačuje jej a s přetlakem dopravuje skrz sací potrubí do válce. [4] Kompresorová skříň je obvykle vyrobena z hliníku. Slitiny hliníku se používají na výrobu lopatkového kola. U moderních turbomotorů je kolo kompresoru frézováno ze slitiny kovaného hliníku. [20] Některá nákladní vozidla mají turbodmychadla s kolem vyrobeným z titanové slitiny, například tahač DAF XF 105.

### Turbínová část

Turbínová skříň obsahuje kolo turbíny obr., do jehož lopatek v radiálním směru tlačí proud výfukových plynů jdoucích ze svodů, a od něhož v axiálním směru odchází plyny výfukovým potrubím směrem k tlumiči. Materiálem turbínového kola je vůči teplu odolná slitina niklu. [4] Ve volutě turbíny je tlak plynů konvertován na kinetickou energii. Transformace kinetické energie na spojující hřídel probíhá na turbínovém kole, které je navrženo tak, že téměř veškerá kinetická energie je konvertována v době, kdy výfukové plyny opouští kolo. Průtok plynů na obvodě kola je prostřednictvím difuzéru, uloženého ve spirálové turbínové skříni, zrychlen, a směřován rovnoměrně k lopatkám kola. [21]

### Hlavní část (jádro)

Obrázek 8 Hřídel kompresorového a turbínového kola



[8]



Sestava obrázek 8 společného hřídele-4 s koly kompresoru-1 a turbíny-5 operuje při rychlostech 120 000 až 300 000 otáček za minutu, v případě závodních speciálů i přes 300 000 otáček za minutu. Při takto vysokých rychlostech otáčení hřídele jsou kladeny vysoké nároky na jeho uložení v jádru. Uložení hřídele je zajištěno pomocí ložisek-3, v nichž se hřídel otáčí. Ložiska používaná pro turbodmychadla jsou dělena na kluzná a valivá. [4][20]

Hřídel se otáčí v kluzných ložiskách s nízkým třením mazané hydrodynamickým olejovým filmem. U turbodmychadel běžných osobních automobilů je hřídel obvykle uložena ve dvojicích radiálních-3, které absorbují síly radiálně a jednom axiálním ložisku-2 absorbujícím sílu v podélném směru hřídele, jak ukazuje obr. Ložiska jsou vybavena mazacími kanály, které umožňují přístup mazacímu oleji dovnitř ložisek, ten vede k vytvoření olejového filmu mezi ložisky a hřídelí. Toto konstrukční řešení ložisek bývá nazýváno tzv. plně plovoucí. Mazací systém turbodmychadla je připojen k mazacímu okruhu motoru. Vzhledem k širokému rozmezí teplot mazacího oleje od hodnot pod bodem mrazu po nominální, musí být zaručen průtok oleje v každém teplotním bodě. Průtok je zajištěn přesnou vůlí mezi ložiskem a hřídelí. Valivá ložiska oproti kluzným zlepšují účinnost turbodmychadla a mají lepší výkonnost při přechodných režimech jako je akcelerace. [20] Jejich hlavními nevýhodami jsou dlouhodobá spolehlivost a vyšší hlučnost.

Jádro a ložiskové uložení musí být velmi dobře utěsněny proti ztrátám mazacího oleje a oboustrannému proniknutí vzduchu a plynů. K tomuto účelu slouží pístní kroužky, které jsou natrvalo a pevně zasazeny do ložiskového uložení a neotáčejí se. [4]

#### Blow off /pop off ventil

Benzinové turbomotory jsou vybaveny tímto ventilem za účelem ochrany kola kompresoru před náhlým přetížením plnicím vzduchem. K tomuto jevu dochází, když turbomotor pracuje pod zatížením a řidič náhle uvolní pedál akcelérátoru. Tím dojde ke změně polohy škrtkovací klapky ze zcela otevřené na zcela uzavřenou v krátkém čase. Avšak v tomto okamžiku se kolo kompresoru stále otáčí, čímž dochází k hromadění tlaku vzduchu v potrubí. Tento tlakový vzduch se zastaví o zavřenou škrtkovací klapku a vytváří silný odpor, kterému čelí kompresor. Odpor zpomaluje celé turbodmychadlo a může jej poškodit. Při následujícím opětovném sešlápnutí pedálu akcelérátoru dochází k časové prodlevě, než brzděné turbo znovu dosáhne potřebných otáček. Blow-off ventil chrání systém před těmito situacemi tím, že přebytečný

tlakový vzduch odpustí mimo turbodmychadlo nebo zpět do přívodu nasávaného vzduchu. Pokyn k odpuštění přichází k blow-off ventilu prostřednictvím tlakové hadičky. [4][22]

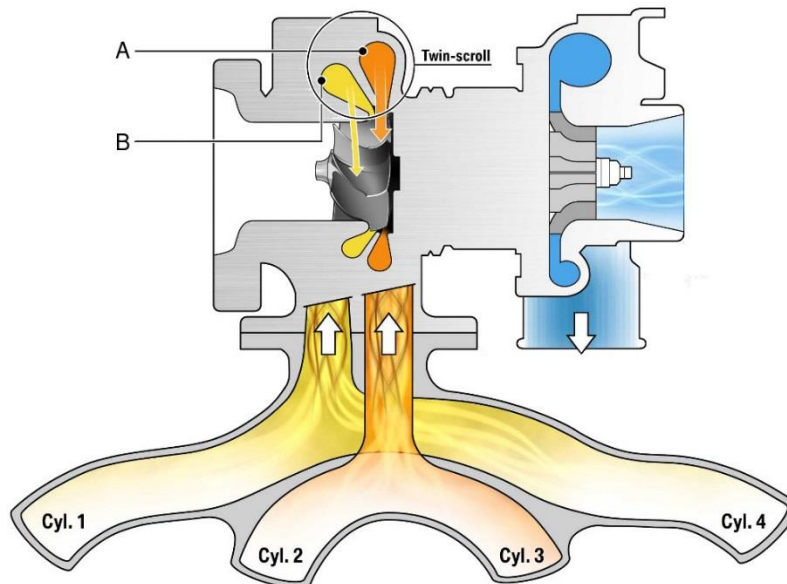
#### 9.1.4 Twin-scroll turbodmychadlo

Twin-scroll nebo také Twin-power je označení pro turbodmychadla se speciálním provedením turbínové skříně. Jedná se o turbínu se dvěma přívodními kanály, jejíž výfukové svody jsou rozděleny na dvě větve. V případě čtyřválcového motoru s pořadím zapalování 1-3-4-2 jsou výfukové plyny z prvního a čtvrtého válce spojeny do jednoho kanálu potrubí. [4] Plyny z druhého a třetího válce sdílejí společně druhý kanál.

Výhoda odděleného toku plynů se projevuje v eliminaci tlakového rušení mezi jednotlivými válci v době, kdy je plynů opouštějí. [4] Díky tomu je dynamická energie jednotlivých pulzů dopravena k turbínovému kolu bez prolínání s ostatními. Výsledný tok plynů z každé skupiny válců je více homogenní než v případě standardního provedení výfukového potrubí. [23]

Schéma proudění spalin u čtyřválcového motoru je na obrázku 9.

Obrázek 9 Twin – scroll turbo a výfukové svody



[9]

- A. Větší kanál dopravuje proud spalin na vnější hranu lopatek turbínového kola, díky čemuž se turbodmychadlo otáčí rychleji [24]
- B. Menší kanál dopravuje zbylý proud spalin na vnitřní část lopatek turbínového kola a tím zlepšuje reakce turbodmychadla [24]

#### Porovnání standardního a Twin-scroll turbodmychadla

- Energie plynů vstupujících do turbíny je vyšší u systému Twin-scroll, díky využití tlakových vln [23]
- Twin-scroll dosahuje lepšího výkonu během nižších až středních rychlostí a při akceleraci
- Standardní koncepce projevuje lepší efektivitu při vysokých rychlostech a zatížení. Nižší pořizovací náklady a jednodušší konstrukce výfukového potrubí hrají také v její prospěch [4][23]

#### **9.1.5 Twin-turbo / Biturbo**

Twin-turbo nebo jinak obchodně značeno Biturbo je systém přepínání, zahrnující paralelní zapojení dvou turbodmychadel, která jsou použita v celém rozsahu zatížení motoru a rychlostí. V případě šestiválcového motoru každé turbodmychadlo plní pouze tři válce. [4] Biturbo konstrukce umožňuje použití dvojice menších turbodmychadel, namísto jednoho většího a tím snížit momenty setrvačnosti k překonání. Výsledkem je zlepšení odezvy systému. Výfukové plyny jsou rovnoměrně rozděleny tak, že každá z dvojice turbín je poháněna jejich polovinou. K regulaci sloužící ventil wastegate má také každé z turbodmychadel vlastní. Celkový objemový průtok a tlak plnicího vzduchu je výsledkem přivedeného a stlačeného vzduchu z obou kompresorů. Každé turbo má vlastní chladič stlačeného vzduchu. Snaha o dosažení synchronizace vede k rozdílným řešením konstrukce sacího a výfukového systému. V případě sekvenčního biturba nejsou turbíny poháněny výfukovými plyny neustále. Druhé turbodmychadlo je zapojeno v případě nároku na odpovídající výkon. [4]

## 9.2 Mechanické dmyhadlo

Tento způsob přeplňování je preferovaný především u zážehových motorů, avšak s masovým rozmachem použití turbodmychadel, počet jejich aplikací pro automobilové motory stále klesá. K pohonu dmyhadla je nutno vynaložit část užitečného výkonu motoru (až 20 kW), v závislosti na plnicím tlaku a otáčkách. [25] Z tohoto důvodu se mechanické kompresory používají u vysoce výkonných velkoobjemových motorů, kde tento odběr neovlivňuje výkonové parametry vozidla.

### 9.2.1 Princip činnosti

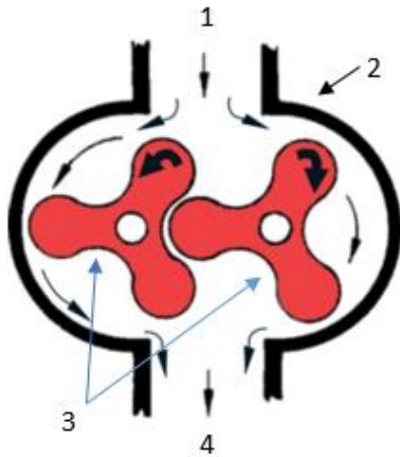
Přeplňování mechanickým dmyhadlem plní u automobilových spalovacích motorů stejnou funkci jako turbodmyhadlo. Rozdíly však nalezneme především v konstrukci a ve způsobu pohonu. V případě mechanického kompresoru není k pohonu využita energie výfukových plynů, ale mechanický převod přímo od klikového hřídele motoru. Pohon dmychadel od klikového hřídele motoru je zajišťován ozubenými koly, ozubenými řemeny a u malých dmychadel i klínovými řemeny. [16]

### 9.2.2 Rootsovo dmyhadlo

Je z mechanických dmychadel tím nejstarším. Název nese dle konstruktérů bratří Rootsů, kteří jej používali jako vzduchový dopravník v důlních šachtách. Později bylo upraveno pro použití ve spalovacích motorech. Toto dmyhadlo patří do skupiny kompresorů s vnější kompresí. Ke stlačení nedochází v pracovním prostoru, ale až za ním. [16] Jeho konstrukce je tvořena párem dvou nebo tří-zubových rotačních pístů uspořádaných na dvou rovnoběžných oddělených hřídelích. [1] Rotační písty jsou tvarovány tak, aby se vzájemně doplňovaly ve všech polohách. Hřídele jsou uloženy ve společné skříni.

Princip plnění je na obrázku 10.

Obrázek 10 Princip Roots



Čerstvý vzduch od vzduchového filtru – 1 vstupuje do skříně kompresoru – 2. Zde se jeden rotační píst otáčí ve směru hodinových ručiček a druhý opačně -3, čímž uzavírají vzduch mezi sebe a skříní. Dmyhadlo vykonává funkci pumpy, která vzduch dopravuje do sacího potrubí – 4 Tento způsob vstupu a výstupu je velmi prostý, avšak neefektivní. Protože vzduch vstupující do skříně naráží na zuby rotačních pístů, které se otáčejí proti jeho směru. [26][27]

[10]

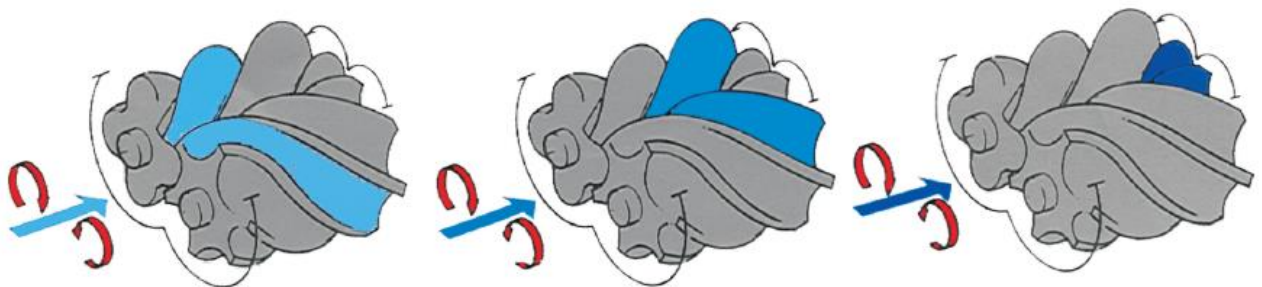
Řešením problému se stala změna konstrukce, která spočívá v přívodu vzduchu z přední strany namísto z vrchu. A výstupu zdola skříně dmyhadla na opačné straně, než je přívod.

### 9.2.3 Lysholmovo dmyhadlo

Bývá také označováno jako dvou šroubové (twin screw) a je podobné typu Roots. Rozdíl je ve tvaru dvojice rotorů, které jsou v případě typu Lysholm více zakroucené a mají konický úkos. Z toho vyplývá, že tyto šroubové kompresory mají vnitřní stlačení vzduchu, což je činí efektivnějšími pro vysokotlaké přeplňování. Nevýhodou interního kompresního poměru jsou vyšší ztráty při běhu naprázdno. [16] Šroubovicový celoplošný tvar rotorů klade vysoké nároky na přesnost výroby a tím navyšuje pořizovací cenu. [1]

Dvojice oddělených hřídelů je osazena hlavním a vedlejším rotorem. Hlavní hřídel na obrázku 11 se čtyřmi zuby je díky otáčení velmi úzce spleten s vedlejším hřídelem, který má zubů šest. Hlavní hřídel se otáčí 1.5krát rychlostí vedlejšího hřídele. [1] Obrázek 11 ukazuje průběh vnitřního stlačování vzduchu kompresoru typu Lysholm.

Obrázek 11 Princip Lysholm



[11]

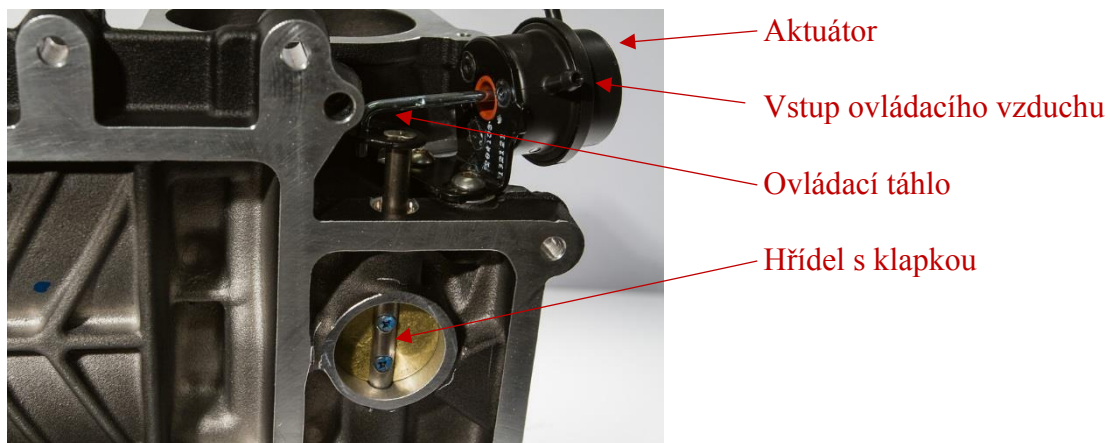
- 1) Sání (vlevo)– čerstvý vzduch od filtru je nasáván do zadní části kompresoru. Hlavní a vedlejší rotor se otáčejí v opačném smyslu než u typu Roots, což zabezpečí, že nedojde k tzv. pumpování [27]
- 2) Stlačení (uprostřed)– vzduch je vnitřně stlačen v prostoru mezi těsně přiléhajícím hlavním a vedlejším rotorem. Pokračující otáčení rotorů redukuje prostor zabíraný vzduchem. Vzduch je dále posouván do přední části kompresoru [27]
- 3) Výpusť (vpravo) – jakmile projde stlačený vzduch po celé délce šroubovicových rotorů, opouští vzduch kompresor výstupním potrubím, nebo zůstává ve stlačeném stavu mezi rotory do té doby, než bude potřeba motor plnit stlačeným vzduchem. [27]

### 9.2.4 Regulace kompresorů

Kompresory typu Roots jsou díky vnějšímu stlačování vzduchu jednoduše regulovatelné prostřednictvím obtokového Wastegate ventilu. Klapka obtoku je na obrázku 12.

Vnitřní stlačování vzduchu u kompresoru typu Lysholm zvyšuje jejich efektivitu, ale způsobuje, že regulace pomocí obtoku není účinná, neboť Lysholm kompresor bude stlačovat vzduch, dokud bude poháněn. Jediný způsob eliminace ztrát při ustálené jízdě je odpojit jeho pohon spojkou. [26]

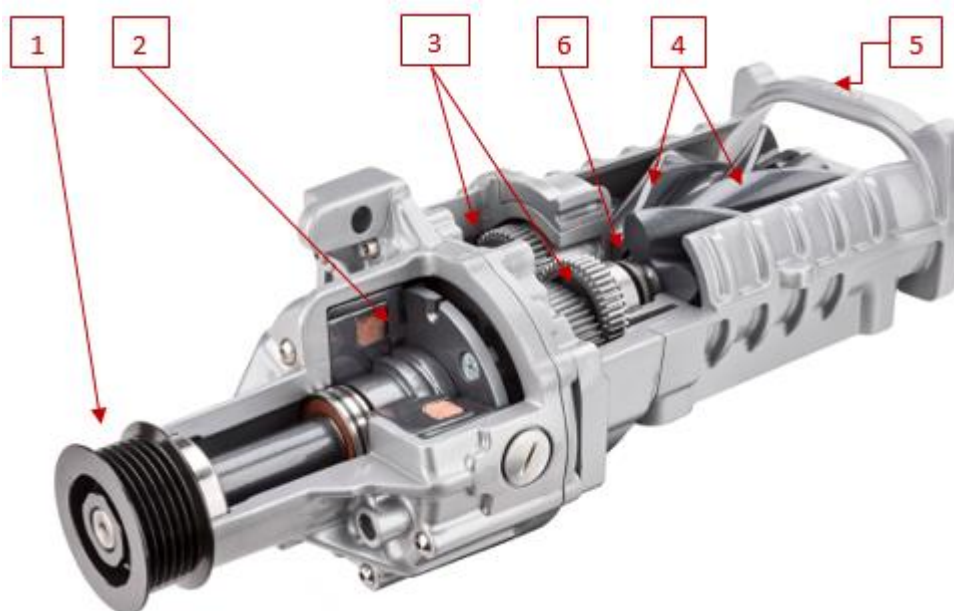
Obrázek 12 Regulace kompresoru



[12]

## 9.2.5 Konstrukce automobilového mechanického kompresoru

Obrázek 13 Kompresor



[13]

1. Řemenice – drážkovaná řemenice, na niž je nasazen řemen pohonu od klikového hřídele motoru, je pevně instalována na otáčejícím hřídeli.
2. Elektromagnetická spojka – integrovaná spojka použitá při kombinovaném přeplňování s turbodmychadlem se zapíná pouze tehdy, když je potřeba dalšího navýšení výkonu. Díky tomu jsou redukovány ztráty vznikající při ustáleném stavu nebo jízdě v režimu bez velkého zatížení. Spojka je navržena tak, aby poskytovala plynulý a okamžitý záběr. [28]
3. Ozubená kola – čelní soukolí s přímými zuby slouží k převodu náhonu od hřídele s řemenicí na dvojici rotorů. Soukolí mohou být zdvojena pro snížení hlučnosti kompresoru.
4. Rotory – dvojice rotorů jsou u moderních výkonných kompresorů zkrouceny nejčastěji v úhlu 160 a 170 stupňů. Rotory jsou opatřeny práškovým povlakem pro optimalizaci vůle. [28]
5. Vstup a výstup – vstup nasávaného vzduchu od filtru v axiálním směru je v přední části skříně. Výstup vzduchu v radiálním směru je zespodu na opačné straně, než je vstup.
6. Těsnění – těsnění odolávající vysokému tlaku zvyšuje schopnost využití nasávaného vzduchu. [28]



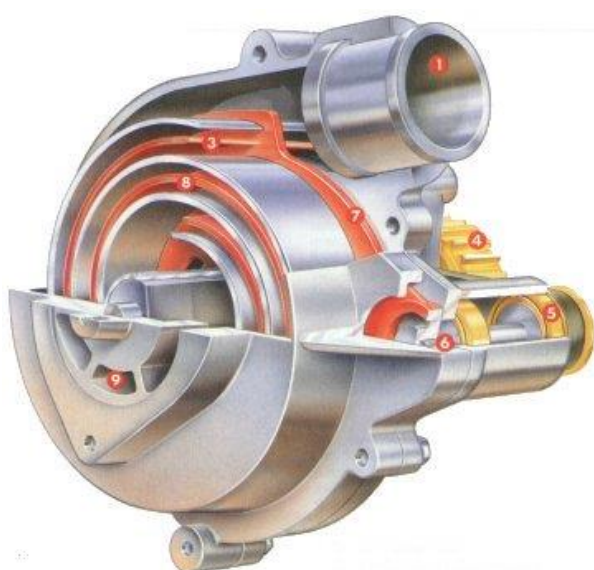
## 9.2.6 Spirální dmychadlo

Spirální dmychadlo bývá ve spojení s výrobcem Volkswagen nazýváno jako G dmychadlo. Motor s tímto typem dmychadla výrobce používal pro vysoce výkonné varianty svých modelů. Název je odvozen od tvaru funkční součásti. Konstrukce je podobná turbodmychadlu s tím rozdílem, že k pohonu neslouží výfukové plyny, nýbrž mechanický převod od motoru. Toto řešení nevyžaduje turbínovou část.

Ve dvoudílné skříni dmychadla jsou na každé straně dvě spirálovité přepážky. Uvnitř této nepohyblivé skříně je výtlačný díl dmychadla, jenž má rovněž na obou stranách po dvou spirálovitých přepážkách zapadajících do mezer přepážek skříně. Výtlačný díl vykonává krouživý pohyb, ale neotáčí se. Mezi pevnými a pohybujícími se přepážkami na obou stranách vznikají čtyři pracovní komory plynule „putující“ ke středu dmychadla.

Výtlačný díl je uložen na výstředném čepu hřídele poháněného dvojitým klínovým řemenem od klikového hřídele motoru. Aby se neotáčel, je uložen ještě na jednom výstředníkovém hřídeli, jenž je s hlavním spřažen rovněž klínovým řemenem s převodovým poměrem 1:1, takže celá pohyblivá soustava tvoří paralelogram. [16]

Obrázek 14 Spirální dmychadlo



- 1 – vstup sacího vzduchu
- 2 – vnější pevná spirála (skříň)
- 3 – vnitřní spirála
- 4 – hnací pastorek
- 5 – řemenice pro pohon od motoru
- 6 – excentrické uložení pohyblivého dílu
- 7 – pohyblivý díl
- 8 – těsnící břit
- 9 – výstup stlačeného vzduchu

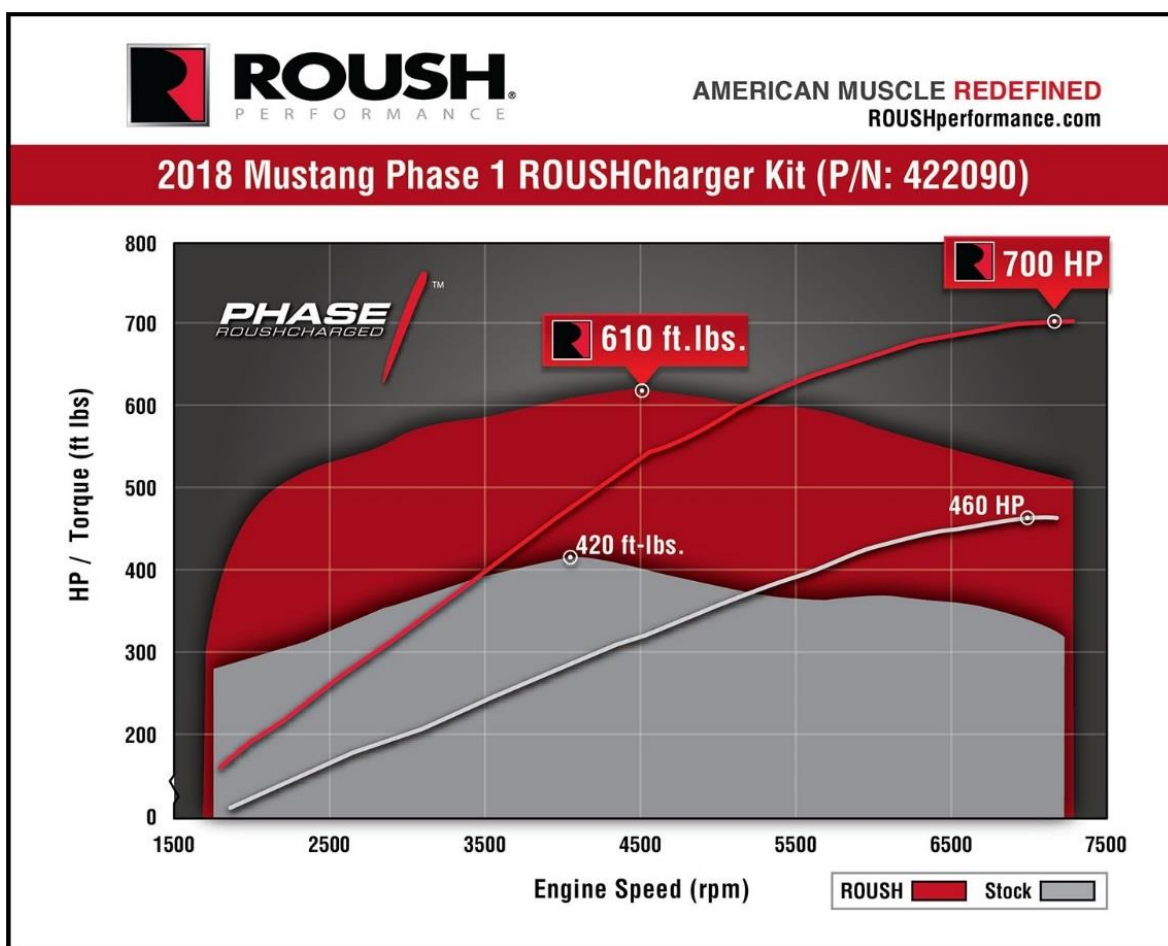
[14]



## 9.2.7 Kompresorem dosažené hodnoty

Graf v tabulce číslo 2 ukazuje jakého zlepšení výkonových parametrů lze dosáhnout přeplňováním mechanicky poháněným kompresorem. Jedná se o osobní automobil značky Ford model Mustang GT, jehož pohonnou jednotkou je zážehový, vidlicový, atmosféricky plněný osmiválec. Již verze z výroby produkuje maximální výkon 460 koňských sil a 569 Nm (= 420 ft-lbs) točivého momentu. Instalací kompresoru jsou však výkonové parametry rapidně zvýšeny až na výkon 700 koňských sil a 827 (= 610 ft-lbs) Nm točivého momentu. Těchto úctyhodných hodnot dosahuje tovární motor o stále stejném počtu válců a objemu motoru. Montáž kompresoru však vyžaduje nákladnou instalaci celé zástavbové sady.

Tabulka 2 Výkonový graf kompresoru



[22]

### 9.3 Porovnání turbodmychadla a kompresoru

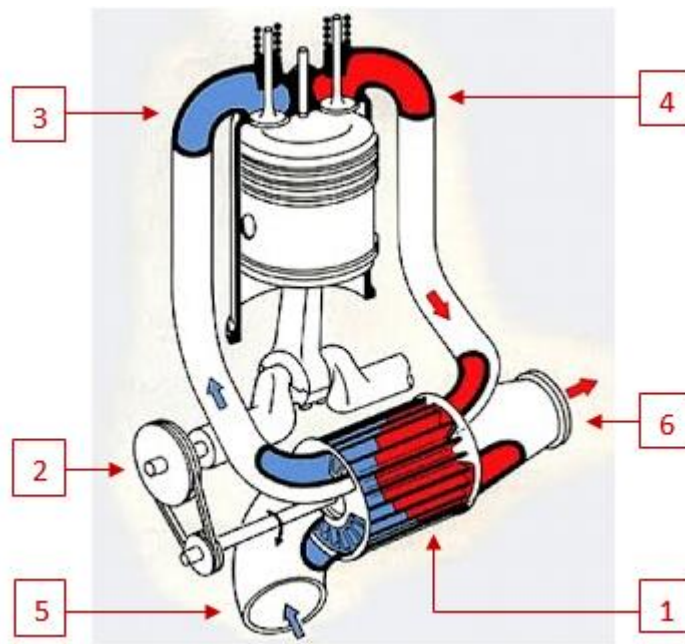
- Turboefekt – mechanický kompresor nemá časovou prodlevu na sešlápnutí pedálu akceleračního. Odezva je na rozdíl od turbodmychadla okamžitá
- Zapojení s motorem – turbodmychadlo vyžaduje složitou úpravu výfukového potrubí. Kompresor může být připojen k motoru z boku nebo shora. Přístup pro servisní a údržbové úkony je v případě kompresoru jednodušší.
- Mazání – kompresor není mazán olejem z mazacího okruhu motoru jako turbodmychadlo, proto je možné motor po jízdě ihned vypnout. Turbodmychla, která jsou závislá na oleji z motoru, je nutné tzv. dochládit. To znamená před plánovaným zastavením zvolnit tempo jízdy a po zastavení nechat motor běžet alespoň 30 vteřin na volnoběh, aby měl mazací olej možnost zchladnout.
- Pohon – turbodmychadlo je poháněno výfukovými plyny na rozdíl od kompresoru, který odebírá výkon z motoru. Odběr může dosáhnout až 20% efektivního výkonu motoru.
- Pořizovací náklady – přepřínování kompresorem klade zvýšené nároky na odolnost komponentů motoru. Výroba motoru navrženého pro spojení s kompresorem je dražší.

### 9.4 Tlakovzdušný výměník

Nedostatky výfukovými plyny poháněného turbodmychadla, v oblasti akcelerace a navyšování točivého momentu, daly dostatek důvodů pro hledání způsobů využití energie plynů ke zvýšení plnicího tlaku, které by tyto nedostatky eliminovalo. [1] Jedním ze způsobů je využívání přímé výměny tlakových pulzů mezi proudy spalin a vzduchu, na němž je založen tlakovzdušný výměník comprex. [16] Princip působení je založen na odrazovém chování tlakových vln v potrubí. Pozitivní nebo negativní tlaková vlna proudící v potrubí bude na otevřeném konci potrubí změněna na opačnou a bude zesílena tak, aby zdvojnásobila svou amplitudu na uzavřeném konci potrubí. [1] Hlavní části systému jsou na obrázku 15.

Pohon rotoru výměníku - 1 je uskutečněn mechanicky řemenem přímo od klikového hřídele motoru - 2. Plnicí - 3 a sběrné - 4 potrubí jsou připojeny z obou stran skříně výměníku. Plnicí potrubí dopravuje stlačený vzduch do válce a výfukové přivádí spaliny z motoru do rotoru výměníku. Ve spodní části skříně přivádí sací potrubí - 5 čerstvý vzduch a na straně opačné výfukové potrubí - 6 odvádí spaliny směrem k tlumiči výfuku. [16]

Obrázek 15 Tlakovzdušný výměník



[15]

Spaliny z výfukového potrubí přicházejí otvorem na čele statoru výměníku do kanálků rotoru a vytlačují vzduch do plnicího potrubí. Válec motoru je plněn stlačeným vzduchem. Vlivem otáčení rotoru narazí po určité době proud spalin na čelní plochu statoru, od níž se odrazí. Směr proudění se otočí a spaliny odcházejí z kanálků rotoru do výfukového potrubí. Současně za odraženou vlnou vzniká v kanálku rotoru podtlak, který nasává čerstvý vzduch ze sacího potrubí. Kanálek je naplněn vzduchem pokračujícím otáčením rotoru. Aby byla odstraněna část vzduchu smíšená se spalinami, pokračuje proudění ve směru nasávaného čerstvého vzduchu a do výfukového potrubí je odváděn výplachový vzduch. Při dalším pootočení je vzduchem naplněný kanálek uzavřen čelem statoru, čímž je proudění zastaveno. Následujícím pootočením je znovu vzduch vytlačován spalinami do plnicího potrubí. [16]

Dosahované výkonové parametry jsou srovnatelné s přeplňováním turbodmychadla, systém však rychleji reaguje na změny provozních režimů, je však rozměrnější, což komplikuje jeho zástavbu ve vozidle. [11]

## 9.5 Plnění tlakovými vlnami

Čerstvé plyny proudící v sacím potrubí mají určitou pohybovou energii. Otevřením sacího ventilu se vyvolá zpětná tlaková vlna. Tato vlna se pohybuje proudem plynů zpět rychlostí zvuku a naráží na otevřeném konci sacího potrubí na klidné prostředí, odkud se odrazí a vrací se zpět k sacímu ventilu. V případě, že tato vracející se vlna zasáhne sací ventil v momentě, kdy je otevřen, způsobí zlepšení plnění válce. Frekvence vlnění závisí na délce sacího potrubí a rychlosti proudění, vyplývajících z otáček motoru. [25]

### Pulzační přeplňování

Aby byl tento způsob využit naplno, je potřeba speciální konstrukce sacího potrubí motoru. Konstrukce sacího potrubí je řešena jeho dvoustupňovou proměnlivou délkou. Vhodnou volbou délky sacího potrubí se kmity v sacím potrubí ovlivňují tak, aby se tlaková vlna pohybovala otevřeným sacím ventilem dovnitř motoru a zlepšovala jeho naplnění. [25] Na obrázku číslo 16 je kombinace krátké a dlouhé délky potrubí. Dlouhá sací potrubí jsou optimální pro nízké otáčky motoru, krátká pro vysoké. [16] Změna délky je řízena prostřednictvím klapek nebo rotačního šoupátka, jež jsou ovládána elektropneumatikou nebo elektricky. [25]

Obrázek 16 Sací potrubí



[16]

## 9.6 Kombinace mechanického dmyhadla a turbodmyhadla

Kombinace těchto dvou systémů přeplňování vede k dalšímu snižování objemu spalovacích motorů. V současné době je tento způsob spojen hlavně s výrobcem osobních automobilů Volkswagen. Motor o objemu 1.4 litru s označením TSI se vyskytuje v mnoha modelech koncernu. Použití kompresoru a turbodmyhadla umožnilo podstatné zmenšení rozměrů motoru. Downsizing redukuje třecí síly uvnitř motoru a pohyblivé hmoty. Snižování spotřeby paliva je prostě ztrát výkonu nebo točivého momentu.

Kompresor pracující na principu Roots dmyhadla je poháněn mechanicky pomocí klínového řemenu od klikového hřídele motoru. Kompresor přináší do systému okamžitý nástup plnicího tlaku a generování točivého momentu již v nízkých rychlostech. Aktivace je uskutečněna pomocí magnetické spojky. Kompresor je připojen od minimální potřeby točivého momentu až do hodnoty 2400 otáček za minutu. V tomto rozmezí není turbodmyhadlo využíváno. Jeho využití přichází v intervalu od 2400 do 3500 otáček za minutu. V tomto intervalu je kompresor připojován dle potřeby. Pojede-li vozidlo delší dobu konstantní rychlostí a bude potřeba náhlé, prudké akcelerace. V tomto případě je aktivován kompresor a zabezpečeno, že nedojde k prodloužení reakce vinou zpoždění turbodmyhadla. Od otáček 3500 zabezpečuje turbodmyhadlo plnicí tlak ve všech režimech samo. Turbodmyhadlo je regulováno wastegate ventilem, kompresor pomocí klapky. [4][29]

## 10. Chlazení stlačeného vzduchu

Hmotnostní naplnění válce čerstvou směsí nebo vzduchem přímo ovlivňuje výkon motoru, protože při stlačování vzduchu dochází k jeho zahřátí. Zahřátý vzduch má větší objem než studený, proto je vhodné zařazení chladiče do sacího vedení. [16] Chladič stlačeného vzduchu nebo-li intercooler, snižuje teplotu stlačeného vzduchu na úroveň vhodnou pro navýšení výkonu. Snižováním teploty roste hustota nasávaného vzduchu a více kyslíku může vstoupit do spalovacího prostoru. Do chladnějšího vzduchu je vstřikováno větší množství paliva. Výsledným efektem je více výkonu. Za základní pravidlo je považováno, že snížení teploty plnicího vzduchu přibližně o 10 °C navýší výstupní výkon motoru přibližně o 3 %. Stlačení prostřednictvím turbodmyhadla nebo mechanického dmyhadla ohřívá vzduch k teplotám 130–150 °C, a v případě vysoce přeplňovaných vznětových motorů teplota atakuje až 220 °C. Teplota takto zahřátého vzduchu může být použitím chladiče odpovídající velikosti snížena

přibližně na 50 až 60 °C. U vysoce výkonných motorů s vysokým stupněm přeplňování je chladič stlačeného vzduchu ostříkáván vodou, což vede k dalšímu snižování teploty. Příkladem je motor 2.5 litru turbo vozidla Subaru Impreza STI. [4] Chlazení plnicího vzduchu patří mezi efektivní způsoby zvyšování výkonu motoru a snižování měrné spotřeby paliva, a to bez ohledu na to, že zcela logicky z pohledu teoretické účinnosti termodynamického cyklu je chlazení nevýhodné. [11]

Rozdělení dle použitého média:

- a) systém vzduch-voda chladičí médium tvoří voda s aditivy
- b) systém vzduch-vzduch (nejpoužívanější) chladičí médium tvoří proud vzduchu

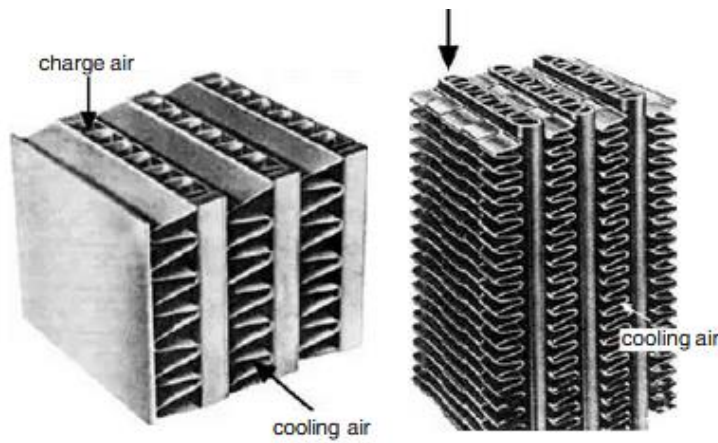
Pozitivní vlivy chlazení intercoolerem:

- Výkon - zvýší hustotu plnicího vzduchu, do něhož lze vpravit více paliva.
  - Zatížení - klesá tepelné zatížení motoru, což umožňuje zvýšení výkonu vzhledem k jeho pevnosti
  - Okolní teplota - závislost přeplňovaného motoru na teplotě okolí je nižší
  - Spotřeba – chlazením je výkon navýšen o 5-6 % při stejné spotřebě. Dle stupně chlazení je spotřeba při jmenovitém výkonu snížena o 3-5 %
  - Detonační spalování – nižší hodnoty spalovacích teplot a tlaků při stejné dávce paliva. Nižší teplota směsi paliva se vzduchem snižuje riziko výskytu detonačního spalování.
- [16]

Konstrukce chladiče

Chladič plnicího vzduchu se skládá z množství ploch sloužících k přenosu tepla, které směřují plnicí vzduch a chladičí proud způsobem, že nedochází k mísení chladičího média s přenášeným teplem. Aby toho bylo dosaženo, jsou v příslušných kanálech voštiny uspořádány tak, aby zvětšovaly jejich povrchy a tím se zvýšil přenos tepla. Proto jsou vyrobeny z materiálu, který účinně vede teplo. [1] Z důvodu využívání náporového vzduchu, bývá chladič umístěn v přední části vozidla. Vzduch zachycený ve voštinách předává své teplo proudícímu vzduchu. Obrázek číslo 17 reprezentuje dva nejčastější způsoby uspořádání voštin.

Obrázek 17 Voštiny chladiče plnicího vzduchu



Plnicí vzduch – charge air

Chladící vzduch – cooling air

[17]

## 10.1 Účinnost chladiče stlačeného vzduchu

Účinnost intercooleru je charakteristika používaná k posouzení kvality chlazení plnicího vzduchu. Je definována poměrem mezi skutečným a maximálně možným odvodem tepla. [1]

$$\eta_{ch} = \frac{(T_2 - T_2')}{(T_2 - T_{ch})} * 100 \quad [\%] \quad (1.8.)$$

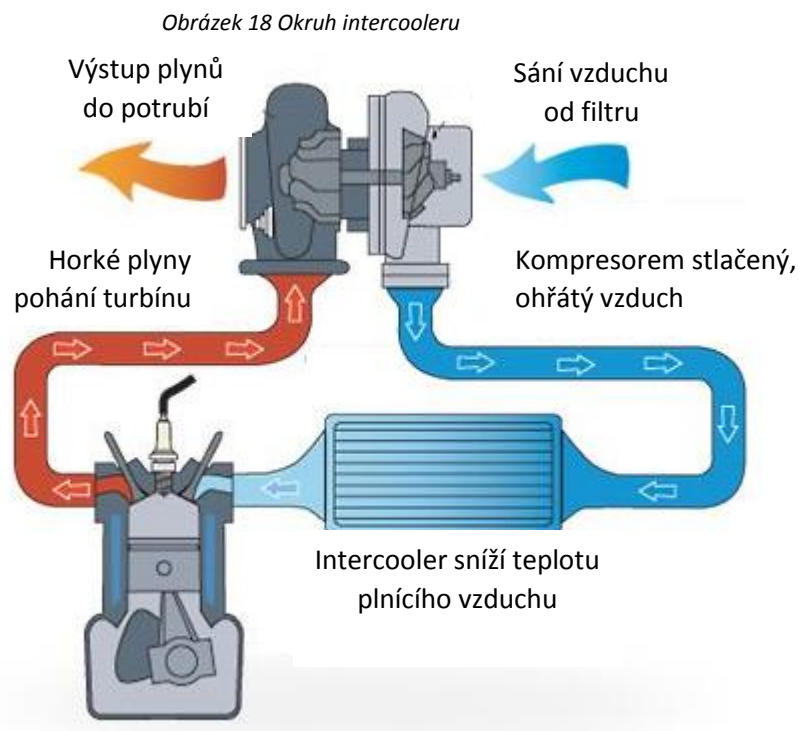
kde:

$T_2$  je teplota plnicího vzduchu před chladičem [ °C ]

$T_2'$  je teplota plnicího vzduchu za chladičem [ °C ]

$T_{ch}$  je chladící teplota [ °C ] [1]

## 10.2 Schéma okruhu chlazení plnicího vzduchu



[18]

## 11. Trendy v oblasti přeplňování

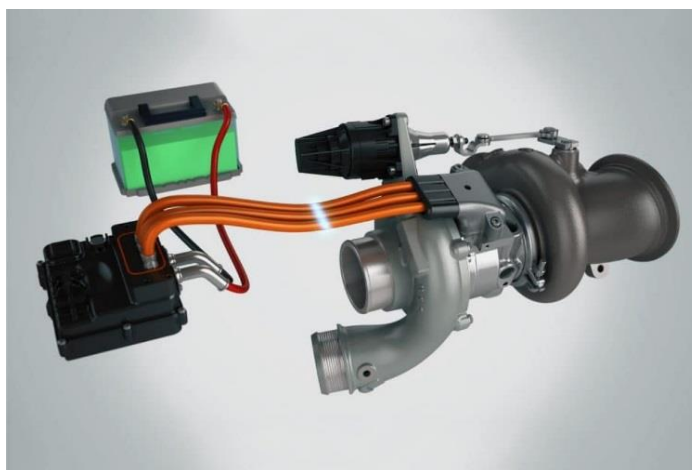
Konvenční turbodmychadla poháněná výfukovými plyny mají dvě podstatné slabiny v podobě tzv. turboefektu a limitujících otáček. Turboefekt se projevuje zpožděním v reakci turbodmychadla na sešlápnutí pedálu akcelérátoru, což má za následek pomalou reakci motoru. To je způsobeno nedostatkem plnicího vzduchu v nízkých otáčkách. Maximální otáčky turbodmychadla jsou limitovány únosností jeho ložisek. Otáčky jsou proto regulovány, což má za následek nevyužití plného potenciálu energie výfukových plynů. Pro přeplňování je využita jen jejich část. [30][31][32]

Elektrické turbodmychadlo tzv. e-turbo dokáže reagovat na oba uvedené nedostatky. Konstrukce spočívá v umístění generátoru na společnou hřídel mezi kompresorovou a turbínovou skříň dmychadla. Generátor je zařízení, které dokáže otáčky turbodmychadla zvyšovat i snižovat. Je-li turbo pod velkým zatížením plnicího vzduchu, přichází u konvenčního systému regulace přepuštěním do obtokového potrubí, avšak v případě e-turba nastupuje funkce generátoru, který přebytečnou kinetickou energii plynů převede na energii elektrickou. Tato energie je ukládána do 48 V vysokonapěťového akumulátoru. [30][31][32]



Při potřebě okamžitého zvýšení výkonu v nízkých otáčkách, typicky pokud řidič prudce sešlápně pedál akcelérátoru naplno, generátor sám roztáčí turbodmychadlo, aby se snížila prodleva v reakci motoru. K roztáčení generátor používá energii, která byla uložena do akumulátoru při volnějším režimu. Typicky pokud řidič sníží tlak na pedál akcelérátoru, následkem čehož vozidlo začne zpomalovat. Obrázek číslo 19 ukazuje propojení e-turba, sběrače, vedení a akumulátoru. [32]

Obrázek 19 Garrett e-turbo

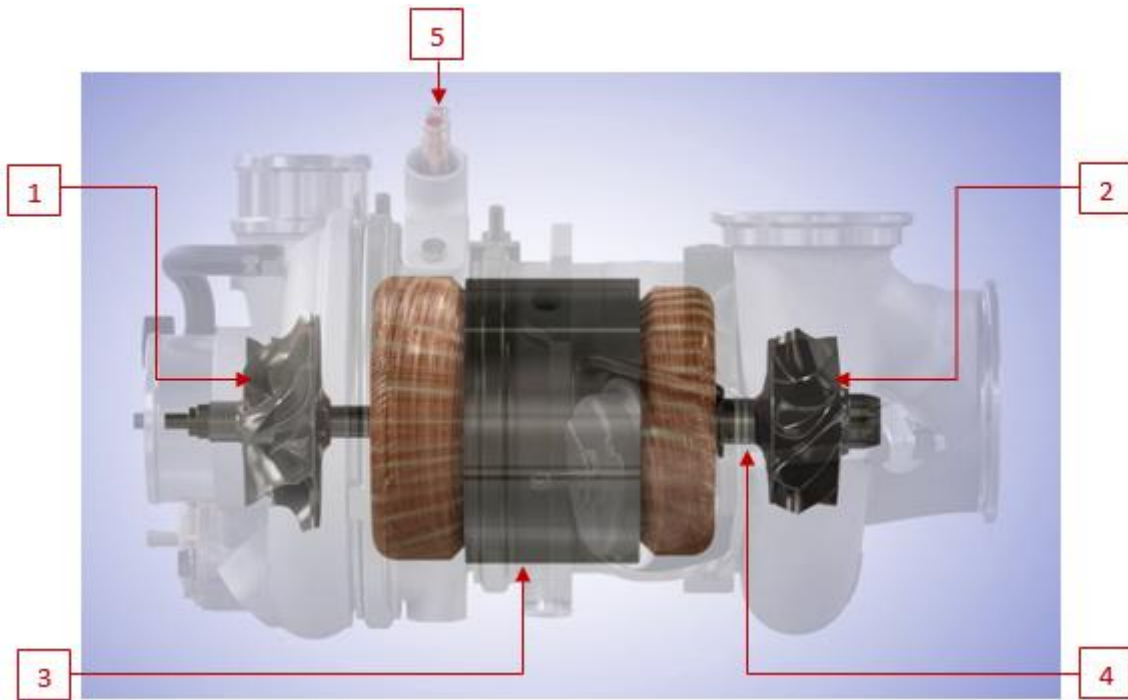


[19]

#### Klíčové benefity systému:

- Konstrukce - e-turbo nepotřebuje elektricky poháněný kompresor, jelikož samo dokáže motoru dodávat potřebný vzduch v nízkých otáčkách dříve, než konvenční turbodmychadlo. Umístěním na společném hřídeli je dosaženo úspory prostoru. Tato úspora umožňuje použití většího kompresoru a turbíny, což vede k získání dostatečného navýšení výkonu a naopak snížení objemu motoru. [32][34]
- Prodleva – e-turbo významně snižuje zpoždění motoru. Vyšší hodnoty točivého momentu v nízkých otáčkách a kratší čas dosažení potřebného točivého momentu
- Energie – energie odpadních výfukových plynů je převedena na elektrickou energii
- Downsizing – maloobjemové motory mohou dosáhnou výjimečných úrovní točivého momentu a odezvy. [34]
- Akumulátor – velikost akumulátoru je snížena díky dobíjecímu efektu – 1 kW umožňuje získat 8 až 10 kW výkonu [34]
- Spotřeba – spotřeba u downsizingových motorů je nižší díky redukci zatížení alternátoru [34]

Obrázek 20 Borgwarner e-turbo



[20]

Obrázek číslo 20 Borgwarner e-turbo. V případě potřeby asistence je výkon dodáván na lopatkové kolo kompresoru – 1. Pokud je proud výfukových plynů na kole turbíny větší, než je potřeba, je přebytečný výkon přeměňován a sbírán ve formě energie – 2. Motogenerátor slouží buď jako motor nebo generátor – 3. Úsporná konstrukce celého systému v jednom celku, kdy motogenerátor je umístěn na hřídeli spojující kompresorovou a turbínovou skříň – 4, ke které je připojeno vedení napětí – 5. [34]

## 12. Závěr

Přepřehování neodmyslitelně patří k současné kultuře vývoje moderních pístových spalovacích motorů. Ruku v ruce s technologickým pokrokem v automobilovém průmyslu i zlepšování parametrů pohonných jednotek urazilo velký kus cesty a neustále se zdokonaluje. V této práci jsem se věnoval představení jednotlivých způsobů přepřehování spalovacích motorů používaných u osobních automobilů. V úvodní části je čtenář seznámen s historickým průběhem vývoje přepřehování, jeho pozitivními přínosy a výhodami ve srovnání s motory atmosférickými. Následuje popis funkce systémů a jejich součástí včetně popisu důležitých parametrů pomocí matematických rovnic. Nejpoužívanější způsoby přepřehování jsou porovnány mezi sebou.

V poslední, avšak pro budoucí vývoj velmi důležité kapitole, jsem uvedl systém e-turba, který dle všech známých předpokladů bude hrát velkou roli v následujících letech. Dle autorova názoru bude e-turbo konstruktéry častěji používaným a v provozních parametrech lepším, než systém kombinovaného přepřehování s elektricky poháněným kompresorem tzv. e-booster, který je spojen především s automobilkami Audi a Mercedes Benz. Výše zmíněné technologii elektrického turbodmychadla se usilovně věnují přední výrobci Borgwarner, Garrett, Mitsubishi, IHI a BMTS. [33]

Neustávající snaha o vylepšení systémů přepřehování vlastně přispívá k prodloužení životnosti konvenčních spalovacích motorů. Posouvání hranic dosahovaných výkonů a snižování spotřeby pohonných hmot, tolik důležité z hlediska životního prostředí, udržují tyto motory ve hře spolu s pomalu se rozvíjejícími alternativními pohony. Vývoj turbodmychadel slibuje pokračování této éry i v následujících letech, avšak již s velmi malým podílem tradičních atmosférických a kompresorem přepřehovaných motorů. Podíl nepřepřehovaných motorů u nových vozidel je minimální a kompresorem plněné jednotky jsou postupně vytlačovány i z dříve populárních lokalit USA a Austrálie.

## Seznam zdrojů informací

- [1] HIERETH, Hermann a P. H. W. PRENNINGER. *Charging the internal combustion engine*. New York: Springer, c2007. ISBN 978-3-211-33033-3.
- [2] History. *Borgwarner Turbo Systems* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerHistory.aspx>
- [3] How turbocharging works. *X-engineer* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/turbocharging-works/>
- [4] KÖHLER, Mario. *Turbochargers in the workshop*. Bad Wörishofen: Krafthand Medien, 2017. ISBN 978-3-87441-158-5.
- [5] MILLER, Jay K. *Turbo: real world high-performance turbocharger systems*. North Branch, MN: CarTech, c2008. ISBN 978-1-932494-29-7.
- [6] TRHOŇ, Tomáš. Turbodmychadlo-historie a současnost. *Katalog automobilů* [online]. 2007 [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <http://clanky.katalog-automobilu.cz/47-turbodmychadlo-historie-a-soucasnost/>
- [7] History of Turbocharging. *Turbosmart.com* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.turbosmart.com/news/history-of-turbocharging/>
- [8] Oil crisis. *Britannica.com* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/topic/oil-crisis>
- [9] Saab 99 (1976). *Netcarshow.com* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.netcarshow.com/saab/1976-99/>
- [10] Advantages of exhaust gas turbocharging. *Borgwarner Turbo Systems* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerAdvantages.aspx>
- [11] BARTONÍČEK, Ladislav. *Přeplňování pístových spalovacích motorů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-708-3800-0.
- [12] HOFMANN, Karel. *Alternativní pohony*. Brno: VUT v Brně (Fakulta strojního inženýrství), 2003.
- [13] Air-fuel ratio, lambda and engine performance. *X-engineer* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/air-fuel-ratio-lambda-engine-performance/>
- [14] HROMÁDKO, Jan. Charakteristiky motorových paliv. *Slideplayer* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11659461/>
- [15] HOFMANN, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: přeplňování spalovacích motorů: určeno pro posl. fak. strojní. 2., nezm. vyd.* Praha: SNTL, 1985
- [16] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

- [17] Principles of turbocharging. *Borgwarner Turbo Systems* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerPrinciples.aspx>
- [18] Variable geometry turbocharger (VGT). *X-engineer* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/variable-geometry-turbocharger-vgt/>
- [19] HOFMANN, Karel. *Regulované přeplňování vozidlových motorů: Separát*. Brno: s.n., 2000.
- [20] How turbochargers work. *X-engineer* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/how-turbochargers-work/>
- [21] Design and function of a turbocharger. *Borgwarner Turbo Systems* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerCompressor.aspx>
- [22] Blow off ventil. *Zakruta.cz* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.zakruta.cz/slovník-pojmu/pojem/blow-off-ventil/>
- [23] Twin-scroll turbochargers. *X-engineer* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/twin-scroll-turbochargers/>
- [24] Twin-scroll turbocharger. *Press.bmwgroup.com* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/photo/detail/P90107380/bmw-efficientdynamics-twin-scroll-turbocharger-11-2012>
- [25] GSCHEIDLE, Rolf. *Průručka pro automechanika*. 2. upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2002. ISBN 80-859-2083-2.
- [26] Forced induction. *Autozine technical school* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Forced\\_Induction\\_1.html](http://www.autozine.org/technical_school/engine/Forced_Induction_1.html)
- [27] Twin screw vs Roots. *Kenne Bell* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <http://kennebell.net/tech/supercharger-tech/twin-screw-vs-roots/>
- [28] TVS technology everview. *Eaton.com* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/engine-solutions/superchargers/tvs-overview.html>
- [29] Self study program. *Volkspage.net* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <http://www.volkspage.net/technik/ssp/>
- [30] Garrett E-Turbo promises more power, better efficiency and less lag. *Newatlas.com* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://newatlas.com/garrett-turbo-promises-more-power-and-efficiency-less-lag/>
- [31] Garrett E-Turbo, the turbine power will be launched in 2021. *Carcar.news* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://carcar.news/2019/10/25/garrett-e-turbo-the-turbine-power-will-be-launched-in-2021/>

[32] E-turbo. *Autobible.euro.cz* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/e-turbo-miri-formule-1-seriovych-aut-ctyrvalcum-by-mohlo-dat-pres-400-koni/>

[33] Garrett Electric Turbochargers Headed To Production In 2021. *Forbes.com* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2019/10/17/garrett-electric-turbochargers-headed-to-production-in-2021/#604d90a180a6>

[34] E-turbo product sheet. *Borg Warner* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: [https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/eturbo-product-sheet.pdf?sfvrsn=93bccf3c\\_17](https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/eturbo-product-sheet.pdf?sfvrsn=93bccf3c_17)

## Seznam obrázků a tabulek

[1] Alfred Buch's patent. In: *High power media* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.highpowermedia.com/blog/3896/turbocharging-the-formula-one-way>

[2] Auto fórum, In: *Autoforum.cz* [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/zivot-ridiceje-stale-nutne-pred-vypnutim-motoru-dochlazovat-turbo-je-z-nekolika-duvoduobrazek2>

[3] Turbocharger wastegate. In: *Freeasestudyguides.com* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.freeasestudyguides.com/engine-turbocharger-wastegate.html>

[4] Narrow vane opening. In: *X-engineer.org* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/variable-geometry-turbocharger-vgt/>

[5] Wide vane opening. In: *X-engineer.org* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/variable-geometry-turbocharger-vgt/>

[6] Sliding nozzle turbocharger. In: *X-engineer.org* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/variable-geometry-turbocharger-vgt/>

[7] What is a turbocharger. In: *Eagleridgegm.com* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.eagleridgegm.com/what-is-a-turbocharger-and-how-does-it-work/>

[8] Shaft. In: *Mahle-aftermarket* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.mahle-aftermarket.com/eu/en/products/turbochargers/product-information/>

[9] Twin-scroll turbocharger. In: *Press BMW Group* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/photo/detail/P90107380/bmw-efficientdynamics-twin-scroll-turbocharger-11-2012>

[10] Roots charger. In: *Kennebell.net* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <http://kennebell.net/tech/supercharger-tech/twin-screw-vs-roots/>

- [11] Lysholm charger. In: *Kennebell.net* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <http://kennebell.net/tech/supercharger-tech/>
- [12] Roushcharger M90. In: *Roushperformance.smudmug* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://roushperformance.smugmug.com/RPP-Parts/ROUSHcharger-Kits/Supercharger-Components/>
- [13] Integrated clutch feature. In: *Eaton* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/engine-solutions/superchargers/tvs-overview.html>
- [14] G-lader. In: *Alfabb.com* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.alfabb.com/bb/forums/975196-post10.html>
- [15] Rsrc. In: *Dydaktykamotoryzacja* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: [https://sites.google.com/site/dydaktykamotoryzacja/\\_/rsrc/1298758447452/rodzaje-doladowania-i-budowa-osprzetu-doladowujacego/doladowanie/1.bmp?height=320&width=261](https://sites.google.com/site/dydaktykamotoryzacja/_/rsrc/1298758447452/rodzaje-doladowania-i-budowa-osprzetu-doladowujacego/doladowanie/1.bmp?height=320&width=261)
- [16] GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 2. upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2002. ISBN 80-859-2083-2.
- [17] HIERETH, Hermann a P. H. W. PRENNINGER. *Charging the internal combustion engine*. New York: Springer, c2007. ISBN 978-3-211-33033-3.
- [18] Intercooler system. In: *Ipinimg.com* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://i.pinimg.com/originals/d8/a0/4d/d8a04db79d9c90aaa30afa359c0e8b4c.jpg>
- [19] Garrett e-turbo. In: *Newatlas.com* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://newatlas.com/garrett-turbo-promises-more-power-and-efficiency-less-lag/>
- [20] Explore our technologies. *Borg Warner* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: [https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/eturbo-product-sheet.pdf?sfvrsn=93bccf3c\\_17](https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/eturbo-product-sheet.pdf?sfvrsn=93bccf3c_17)
- [21] Opel Insignia. In: *Auto.cz* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/opel-insignia-od-zacatku-sedmero-motoru-vsechny-splnuji-euro-5-6295>
- [22] 2018 Mustang Phase 1. In: *Roushperformance.com* [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: [https://www.roushperformance.com/media/catalog/product/cache/13/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/2/0/2018-roush\\_supercharger\\_graph\\_v2\\_1500x1034.jpg](https://www.roushperformance.com/media/catalog/product/cache/13/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/2/0/2018-roush_supercharger_graph_v2_1500x1034.jpg)

## **Seznam použitých zkratek**

Význam zkratek:

USA – United States of America

OPEC – Organization of the Petroleum Exporting Countries

WRC – World Rally Championship

GT – Grand Turismo

RPM – Revolutions per minute

HP – Horse power

STI – Subaru Technica International

IHI – Ishikawajima-Harima Heavy Industries

BMTS – Bosch Mahle Turbo Systems

TSI – Twincharger Stratified Injection

°C – Celsius stupeň

% - Procento

kW – Kilowatt