



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

TURBODMYCHADLA S ELEKTRICKOU PODPOROU TURBOCHARGERS WITH ELECTRIC SUPPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ ŽÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Žák

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Turbodmychadla s elektrickou podporou

v anglickém jazyce:

Turbochargers with electric support

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza stávajících a budoucích aplikací turbodmychadel s elektrickou podporou.

Cíle bakalářské práce:

Soustředit poznatky o stávajících turbodmychadlech s elektrickou podporou.

Kriticky zhodnotit přednosti a nedostatky stávajících provedení.

Soustředit a kriticky zhodnotit v odborné literatuře nebo patentových spisech publikované perspektivní možnosti realizace elektrické podpory turbodmychadel.

Seznam odborné literatury:

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.

KÖEHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren. Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2002. ISBN 3-528-23108-4.

HAFNER, Karl Ernst a MAASS, Harald. Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschinen. Wien, New York: Springer Verlag, 1995. ISBN 978-3-7091-7468-5.

SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.

Firemní literatura.

Patentové spisy.

Internet.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Václav Píštek, DrSc.

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

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

prof. Ing. Václav Píštek, DrSc.
Reditel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na přeplňování spalovacích motorů a srovnání různých přístupů v tomto odvětví. Zmíněny jsou zde především metody vícestupňového přeplňování a přeplňování s elektrickou podporou. Hlavním předmětem této práce jsou technologie s budoucími aplikacemi.

KLÍČOVÁ SLOVA

přeplňování, turbodmychadlo, kompresor, přeplňování s elektrickou podporou

ABSTRACT

This bachelor's thesis is aimed at supercharging combustion engines and comparison of different approaches in this field. There are mentioned mostly methods of multistage supercharging and turbocharging with electric support. Main subject of this paper is technology with future applications.

KEYWORDS

supercharging, turbocharger, supercharger, supercharging with electric support

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽÁK, O. *Turbodmychadla s elektrickou podporou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 30 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Václava Píštěka, DrSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2015

.....
Ondřej Žák

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Václavu Píštěkovi, DrSc. za jeho ochotu, čas, vstřícný přístup a jeho cenné rady nejen ohledně vypracování bakalářské práce.



OBSAH

Úvod.....	9
1 Historie.....	10
2 Přepřňování spalovacích motorů.....	12
2.1 Mezichladič plnicího vzduchu.....	13
2.2 Kompresor.....	14
2.2.1 Rootsovo dmychadlo.....	14
2.2.2 Lysholmovo dmychadlo.....	15
2.2.3 Spirálové dmychadlo.....	15
2.3 Turbodmychadlo.....	16
2.4 Kombinované přepřňování.....	17
3 Přepřňování s elektrickou podporou.....	19
3.1 Elektrické turbodmychadlo.....	19
3.2 Kompresor s elektrickou podporou.....	21
3.3 Turbodmychadlo s elektrickou podporou.....	23
3.3.1 Kombinace klasického a elektrického turbodmychadla	24
3.3.2 Kapalinou chlazená elektrická podpora turbodmychadla.....	26
3.3.3 Vzduchem chlazená elektrická podpora turbodmychadla.....	27
Závěr.....	28
Použité informační zdroje.....	29



Úvod

Automobily existují v naší společnosti již více než století, jejich obliba snad nikdy neměla klesající tendenci a ani v současnosti tomu není jinak. Přestože z počátku nebyly pohony automobilů jasně dané, netrvalo dlouho a spalovací motory vyhrály nad parními. Jelikož trh s auty je plný konkurence, výrobci se vždy předháněli v tom, aby právě ten jejich motor byl alespoň o malinko lepší než kterýkoliv druhý a tím se snažili zaujmout nejen koncového zákazníka. Navíc automobilový průmysl není ani zdaleka jediný tyto motory využívající.

Vývoj pohonů aut je aktuální neustále, i když parní pohon se zřejmě již nevrátí, alternativ ke spalovacímu motoru je hned několik. Přestože obliba například elektrických vozidel stoupá, bude trvat ještě dlouho, než se alespoň přiblíží úrovni používanosti spalovacích agregátů.

A to všechno navzdory neustále se zpřísnujícím emisním normám a regulím, které nutí výrobce vymýšlet nové cesty k zefektivnění spalování a motorů vůbec. Již delší dobu stoupá obliba přeplňování a i výrobci, kteří se mu dlouhou dobu bránili na něj přistoupili.

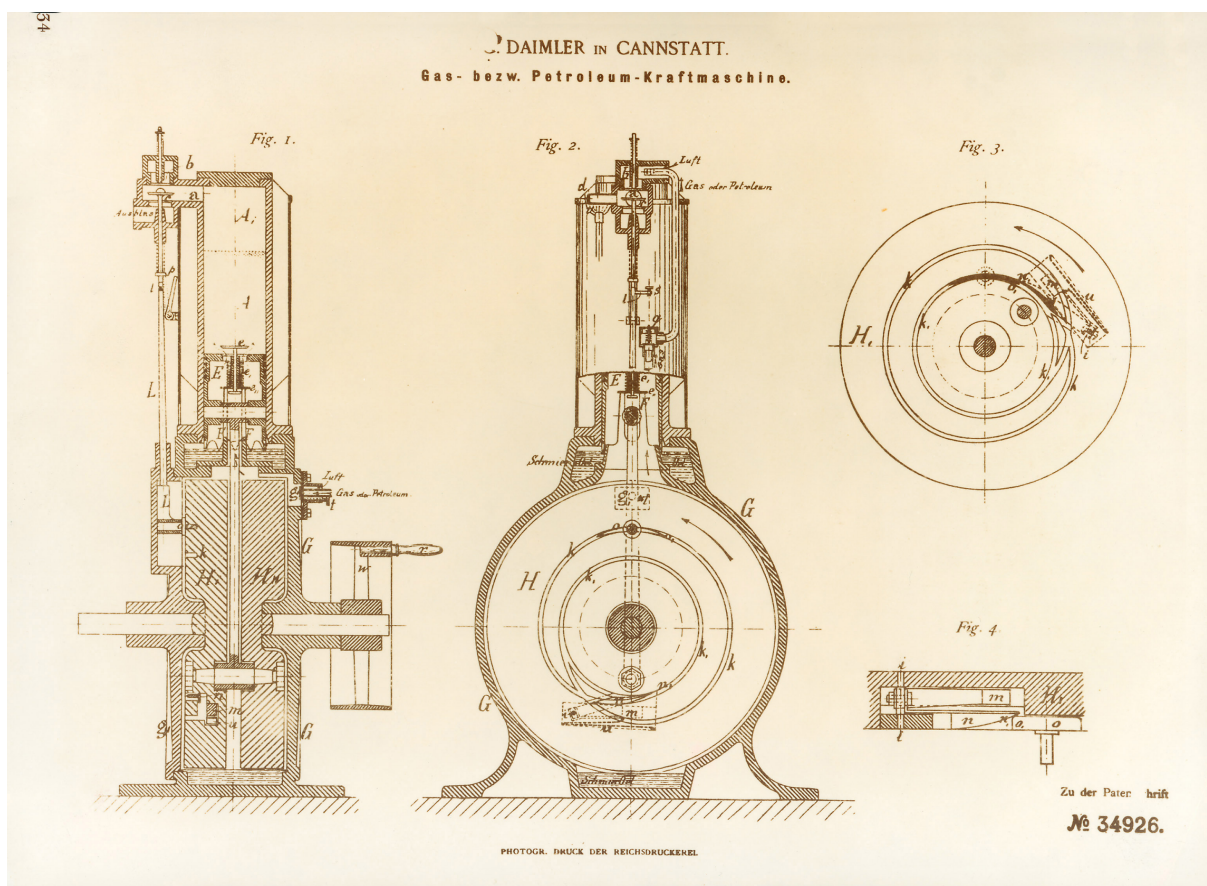
To, že více vzduchu ve válci znamená více kyslíku pro hoření, je zřejmé. Nicméně metod pro navýšení tlaku plnicího vzduchu je hned několik, ty nejdůležitější a nejpoužívanější jsou kompresor a turbodmychadlo. Kompresor využívá přímo mechanickou energii motoru, kdežto turbodmychadlo využívá energii výfukových plynů, která by jinak odcházela bez užitku.

V poslední době se však začaly objevovat i prvky přeplňování podpořené elektrickými součástkami. Nejčastěji to jsou právě turbodmychadla a kompresory, jež jsou propojeny s asynchronními elektromotory. Tímto se dají nejen navýšit otáčky přeplňujícího mechanismu, ale dá se také takto získávat elektrická energie, která se následně uchová ve speciálním akumulátoru nebo se využije pro dobíjení autobaterie. A některá z těchto řešení jsou více či méně popsána v této práci.

1 Historie

Z principu funkce spalovacích motorů je zřejmé, že čím více směsi do válce dostaneme, tím lépe. A pokud nechceme donekonečna zvětšovat velikost válců, bude zřejmě nutné dostávat tam směs pod tlakem. To Gottlieb Daimler věděl už v roce 1885, kdy si nechal přeplňování patentovat. Jeho patent zahrnoval větrák, pumpu nebo kompresor na vhánění více vzduchu do motoru pod tlakem vyšším než atmosférickým.

Jeho mnohem významnějším přínosem ale bylo použití spalovacího motoru s konstrukcí, jaká se uchovala dodnes. Jednalo se o pístový čtyřdobý motor s výkonem 0,8 kW při 650 otáčkách za minutu přezdívaný „Standuhr“ česky „Pendlovky“. Tento motor byl roku 1886 usazen jako pohon motorového kočáru, jež byl vlastně první čtyřkolové vozidlo poháněné benzinovým spalovacím motorem. Zároveň byl použit i jako pohon pro lodní šroub a tak Gottlieb Daimler stvořil i úplně první motorový člun. Za zmínku stojí i tzv. „čichací ventil“, což byl ventil na sání motoru, který svou přezdívkou získal díky charakteristickému zvuku, jež vydával [7].

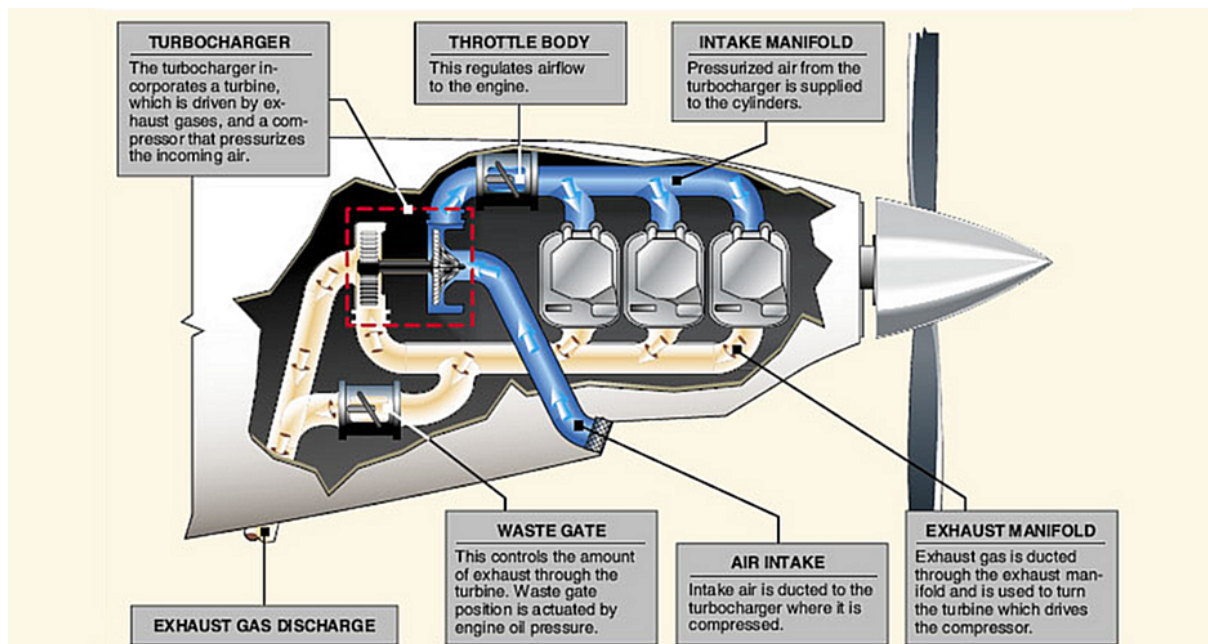


Obr. 1 První benzinový čtyřdobý spalovací motor „Pendlovky“ [7]

První pokusy o přeplňování nebyly realizovány přidruženým kompresorem ani žádným jiným přidavným zařízením. Pro stlačování vzduchu Gottlieb využil část motoru pod pístem, to se ale později ukázalo jako příliš komplikované a tak bylo lepším řešením pro více vzduchu zvětšení sacího potrubí.



Období největšího rozkvětu přeplňování však bylo v období během světových válek a nebylo v souvislosti s automobily. Šlo především o letadla, neboť jejich motory musí fungovat i ve výškách, kde tlak vzduchu je menší a přeplňování bylo jediným způsobem jak udržet relativně vysoký výkon i ve velkých výškách. A jelikož v leteckých bitvách je vždy lepší držet se výš než protivník, je jasné, že žádná ze stran nechtěla zaspát pokrok té druhé.



Obr. 2 Schéma přeplňování leteckého motoru [8]

Vrátíme-li se zpět k automobilovému průmyslu, pak velký rozmach přeplňování byl v Americe v 60. letech, kdy se začali rozmáhat dnes již „klasické ameriky“, většinou s velkými motory podpořenými kompresory. Narozdíl od Evropy, kde vždycky byla oblíbenější turbodmychadla, jejichž velký rozmach je datován do 70. let. Následně pak v 80. letech turbodmychadlem přeplňovaná vozidla ovládla světovou rallye.

K nejaktuálnější historii přeplňování patří především v poslední dekádě rozmach zmenšování objemů motorů a nahrazení výkonové ztráty turbodmychadlem, tzv. „downsizing“. Toto období je výjimečné tím, že turbodmychadlem se nesnaží výrobci nahnat vysoký celkový výkon motoru, jako tomu bývalo dříve, ale jde především o výkon na objem motoru nebo výkon na jednotku spotřeby. To se samozřejmě pozitivně projevuje i snížením množství produkovaných škodlivých emisí, protože celý proces spalování se zefektivňuje.



2 Přepřňování spalovacích motorů

Přestože zastánců atmosférických motorů je pořád mnoho, je přepřňování logický krok směrem vpřed, a to hned z několika důvodů. Zpřísňují se nejen limity pro emise škodlivých látek, ale také se kladou čím dál větší nároky na bezpečnost vozidel a tím se samozřejmě zvyšuje robustnost konstrukce a hmotnost. Pokud chceme zachovat původní dynamiku automobilu, logicky kvůli vyšší hmotnosti budeme potřebovat vyšší výkon.

Ten můžeme zvyšovat zvětšováním motorů, což ovšem vede k dalšímu zvýšení hmotnosti, méně přijatelné spotřebě a samozřejmě nadlimitním emisím. Pak samozřejmě můžeme zvětšit rozsah využitelných otáček, což je cesta, kterou se již dříve vydala automobilka Honda se svým systémem variabilního časování ventilů a nutno říci, že úspěšně. Přichází ale doba, kdy vysokootáčkové motory také nebudou splňovat emisní limity a je možné, že do budoucna dojde i ke zpřísňení limitů pro emise hluku, a to by mohl být také problém.

A pak je tady možnost zvýšení výkonu zvýšením tlaku v sání a tím dodáním více vzduchu do válců. Realizováno to může být více způsoby, nejdůležitější a nejpoužívanější jsou kompresory a turbodmychadla. Z pohledu funkce stroje je i turbodmychadlo kompresorem, protože ke stlačování plynu dochází v obou případech.

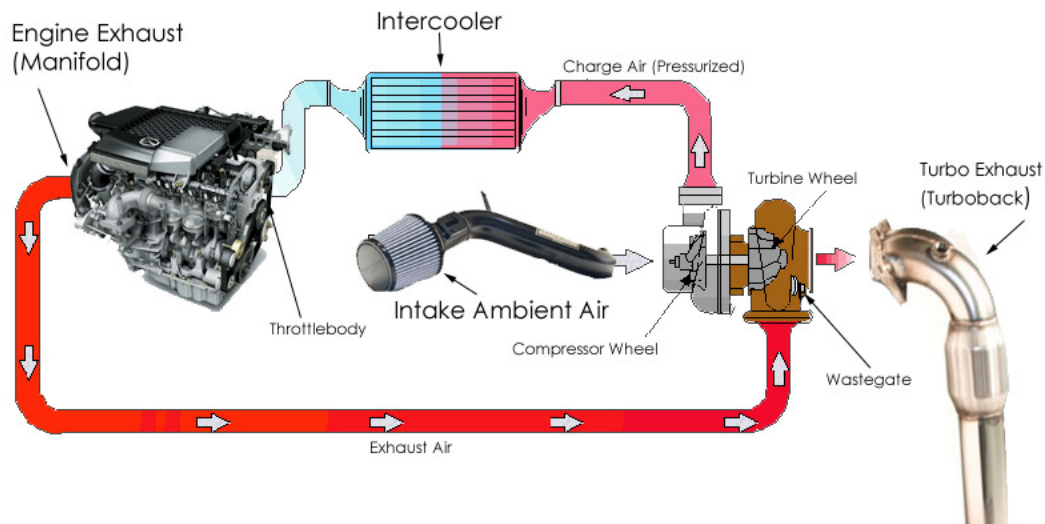
Kompresory jako stroje stlačující plyn dělíme na dva hlavní typy, a to objemové a rychlostní. Objemové fungují na principu snižování objemu pracovního prostoru a tím stlačení plynu, kdežto rychlostní vhání plyn do omezeného prostoru a tím se jeho kinetická energie mění na tlak. Turbodmychadlo je typickým příkladem rychlostního kompresoru a to, co nazýváme jen kompresorem, je kompresor objemový.

Jelikož se vzduch nebo jakýkoliv plyn při stlačování zahřívají, je dobré jej před nasáním do spalovacích komor opět ochladit. To je naštěstí poměrně snadno řešitelné přidáním mezichladiče plnicího vzduchu tzv. „intercooler“ [1]. Snižováním teploty nasávaného vzduchu se zvýší jeho hustota, z čehož profitují zážehové i vznětové motory, u prvních jmenovaných to však má ještě další význam. Benzinové motory, jak je zřejmé z jejich pojmenování, využívají jako palivo benzin, který je za vysokých teplot a tlaků náchylný k samovznícení. Snižováním teploty nasávaného vzduchu pomáhá společně s přímým vstřikováním zamezit předzápalům, což je velmi nežádoucí jev. Správné načasování vznícení směsi je klíčové jak pro funkci motoru, tak pro udržení životnosti jeho součástí.

Další součástí spjatou s přepřňováním je prepouštěcí ventil, především mezi příznivci tuningu nazývaný „Blow off“. Ten je umístěn mezi přepřňujícím prvkem a škrticí klapku. Jeho funkcí je vypouštět přetlak vznikající zavřením škrticí klapky při roztočeném turbodmychadle nebo kompresoru [2]. Tím se zamezí zpětným tlakům, které by vedly k přetěžování a přehřívání přepřňujících prvků, a u turbodmychadel navíc nedojde ke ztrátě jejich otáček. To je výhoda především při prudkém zrychlování, kdy by při přeražení došlo k zabrzdění turbodmychadla a následnému znovunabírání cílového plnicího tlaku během opětovného roztáčení. Prepouštěcí ventil může vést do atmosféry a nebo zpět do sání. Funkce atmosférického ventilu je spjata s klasickým „Tsss“ zvukem při přeražení.

2.1 Mezichladič plnicího vzduchu

Mezichladič je umístěn mezi samotným motorem a prvkem stlačujícím vzduch, použití u kompresoru je méně běžné, použití u turbodmychadel je téměř nutností.



Obr. 3 Schéma umístění mezichladiče [9]

Mezichladiče plnicího vzduchu mohou být vzduchové, které jsou běžnější (Obr. 3), a vodní.

Vzduchové využívají náporu vzduchu na přední část automobilu a bývají umístěny před chladičem motoru. Toto umístění mezichladiče bývá označováno „FMIC“ tedy front mount intercooler. Proudí jím vzduch o venkovní teplotě a chladičem motoru projde vzduch až posléze a mírně teplejší. Takovéto uspořádání je realizováno proto, že mezichladič potřebuje teplotu co nejnižší, aby hustota stlačeného vzduchu byla co nejvyšší, kdežto chladič motoru je na teplotu méně citlivý.

Ještě je možnost umístit mezichladič nad motor a nápor vzduchu zajišťovat tvarovým otvorem v kapotě, tento způsob umístění je označován „TMIC“ - top mount intercooler. Takto zůstane chladič motoru neovlivněn, avšak průtok vzduchu přes mezichladič je nižší. Takto umísťují mezichladič u některých méně výkonných vozů zejména japonské automobilky.

Pak je tu možnost mezichladiče využívajícího vodu jako chladicí médium. Zahřátý stlačený vzduch předává své teplo vodě, která je čerpadlem hnána v okruhu s mezichladičem plnicího vzduchu a vodním chladičem. Výhody spočívají v menších teplotních fluktuacích a ve vhodnějším umístění mezichladiče, což často vede k zmenšení objemu vedení tlakového vzduchu mezi kompresním prvkem a motorem a tak i k rychlejšímu nástupu požadovaného plnicího tlaku.

Nevýhodami pak jsou mírné zvýšení hmotnosti, větší zaplnění motorového prostoru a nutnost pohánět čerpadlo. Někteří výrobci však u svých motorů připojují mezichladič na chladicí okruh motoru, tím pádem odpadá potřeba dalšího vodního chladiče a čerpadla, ale pak je teplota chladicího média mnohem vyšší, než by byla na samostatném okruhu, což je nevýhodou.



2.2 Kompresor

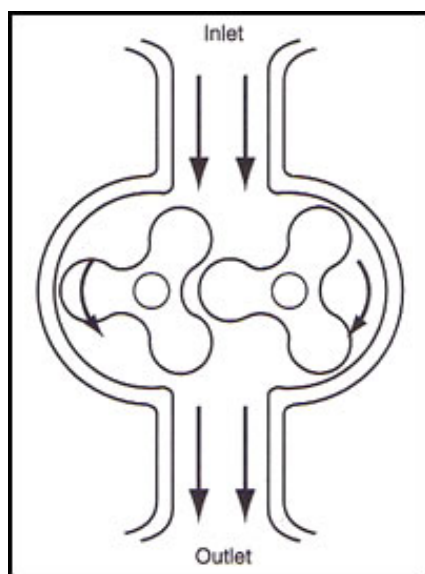
Mechanicky poháněné kompresory využívané pro přeplňování jsou většinou objemového typu, jak již bylo zmíněno. Jejich pohon zajišťuje přímé napojení na klikovou hřídel, většinou přes řemen s tím, že u samotného kompresoru se nachází ozubené soukolí s převodem do rychla. Otáčky kompresoru jsou tedy vyšší než otáčky klikové hřídele.

Velkou výhodou mechanického spojení je, že při sešlápnutí pedálu plynu je plnicí tlak ihned k dispozici a odpadá prodleva, která je typická pro turbodmychadlo. Nevýhodou pak je, že pro pohon kompresoru se spotřebovává výkon motoru.

Objemové kompresory se dále dělí na pístové a rotační. Všechny běžně používané kompresory jsou rotační a je jich také několik různých typů. Ty hlavní jsou Rootsovo, Lysholmovo a spirálové dmychadlo [2].

2.2.1 Rootsovo dmychadlo

V současné době nejrozšířenější mechanický kompresor. Jeho hlavní výhody jsou jednoduchá konstrukce a s tím spojené relativně nízké výrobní náklady. Skládá se ze dvou rotorů na rovnoběžných hřídelích, rotory mohou mít dva až čtyři zuby. Nevýhodou je vyšší odběr výkonu z hřídele a nižší účinnost. Využívá se u většiny kompresorem přeplňovaných motorů.



a)



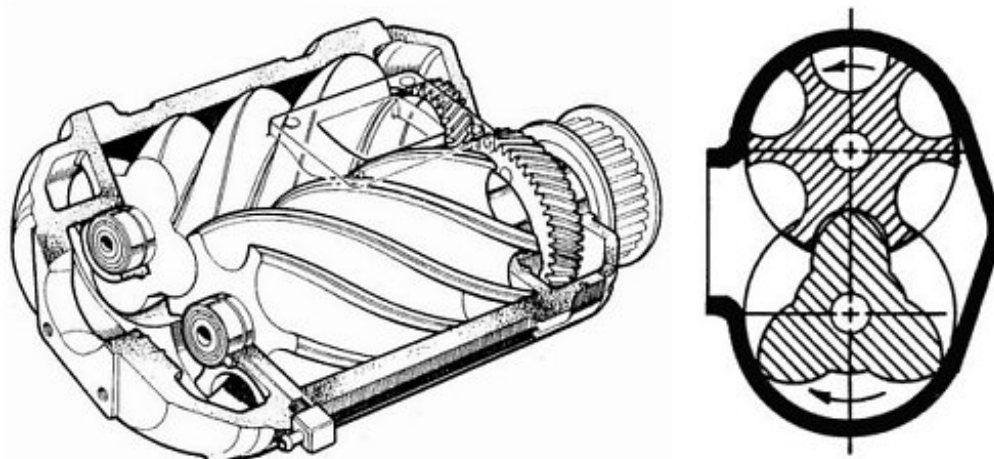
b)

Obr. 4 Rootsovo dmychadlo a) zjednodušené schéma [10] b) vnitřek reálného dmychadla [11]



2.2.2 Lysholmovo dmychadlo

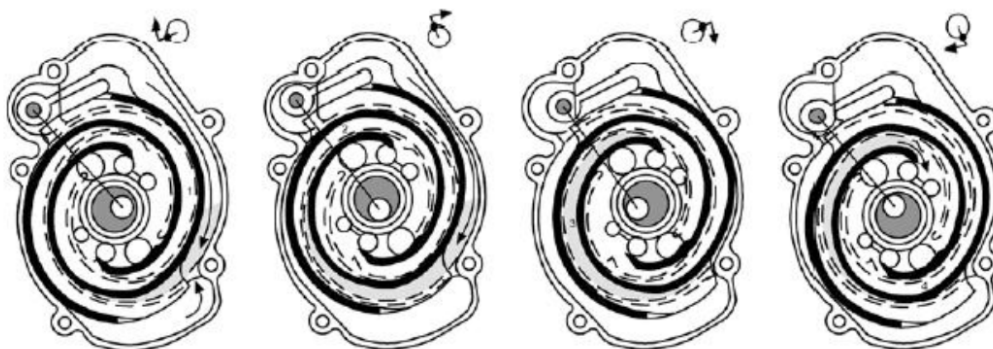
Konstrukčně velmi podobné s rootsovým, opět se jedná o dvourotorové provedení na rovnoběžných hřídelích. Velký rozdíl je v tom, že rotory nemají shodnou geometrii a liší se i v počtu zubů. Výhodou je větší rozdíl vstupního a výstupního tlaku, nevýhodou je nákladná výroba v důsledku složitější geometrie rotorů a vyšší moment setrvačnosti. Využívá se u větších motorů s požadavkem na vysoký výkon, například některé motory AMG nebo Mustang SVT.



Obr. 5 Lysholmovo dmychadlo [12]

2.2.3 Spirálové dmychadlo

Ze všech uvedených dmychadel má spirálové nejmenší moment setrvačnosti. Další výhodou je nízká hlučnost a hmotnost, velkou nevýhodou pak jsou výrobní náklady. Skládá se ze dvou po sobě se odvalujících excentrických spirál. Toto dmychadlo bylo využito v legendárním motoru G60 výrobce Volkswagen a bylo nazýváno „G-ladder“ podle spirál ve tvaru písmena G.

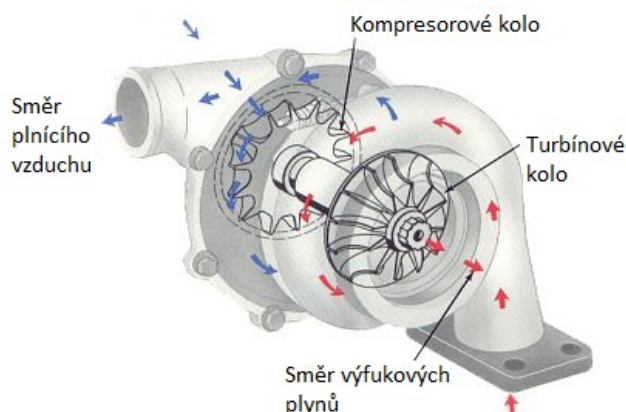


Obr. 6 Spirálové dmychadlo [2]



2.3 Turbodmychadlo

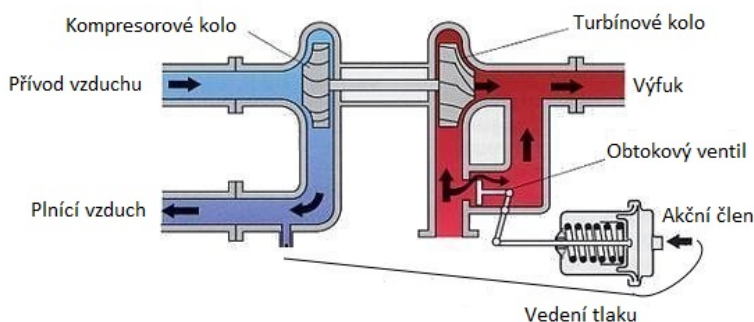
Alternativou ke kompresoru je turbodmychadlo, to není poháněno mechanicky, ale využívá energii výfukových plynů, která by jinak zůstala nevyužita. Neubírá tedy výkon motoru, ale pořád zvyšuje tlak do motoru nasávaného vzduchu, to umožňuje zvyšovat účinnost motoru. Právě proto jsou turbodmychadla v posledních letech tak oblíbená, a to především u malých motorů schopných vyšších výkonů při zachování rozumné spotřeby paliva a nízkých emisí škodlivin.



Obr. 7 Turbodmychadlo [13]

Je tady ale výrazná nevýhoda s pohonem turbodmychadla spojená a to je turboefekt neboli turbodíra. Turboefekt je doba, kterou turbodmychadlo potřebuje, aby se dostalo do otáček, ve kterých bude schopno poskytovat cílový plnicí tlak. Tato doba je delší především u motorů s většími dmychadly, protože menší turbíny mají i menší moment setrvačnosti a roztáčí se tak rychleji. Zároveň však menší turbína není schopna ve vyšších otáčkách požadovaný tlak udržet a tím maximální výkon motorů s malými turbodmychadly nemůže být tak velký jako u motorů s velkými turbínami.

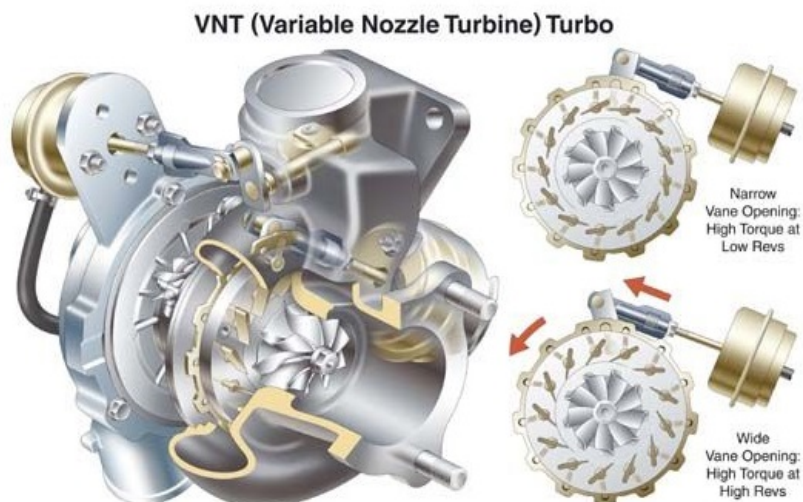
Požadovaných průběhů plnicího tlaku a tím i křivek momentu a výkonu je dosahováno nejen výběrem vhodné velikosti a geometrie lopatek turbodmychadla, ale také regulací. Nejjednodušší a nejpoužívanější regulací turbodmychadla je obtokový ventil. Obtokový ventil neboli „Wastegate“ se zpravidla nachází integrovaný v turbínové části dmychadla, může ale být i odděleně. Nezbytnou součástí je akční člen obtokového ventilu, jež je nastaven na určitý tlak v sání, který když je dosažen, tak začne otevírat obtokový ventil. Výfukové plyny začnou turbodmychadlo částečně obtékat a tlak v sání již dále neroste [1][2].



Obr. 8 Zapojení obtokového ventilu wastegate [14]



Další z možností regulace turbodmychadla je poněkud komplexnější a je to variabilní geometrie turbíny neboli „VGT“ či „VTG“ nebo „VNT“. Tento systém je velmi podobný regulaci turbín ve vodních elektrárnách, spočívá v možnosti volit úhel, pod jakým výfukové plyny přitékají na turbínu. Průběh plnicího tlaku pak můžeme upravovat mnohem přesněji.



Obr. 9 Variabilní geometrie turbíny [15]

2.4 Kombinované přeplňování

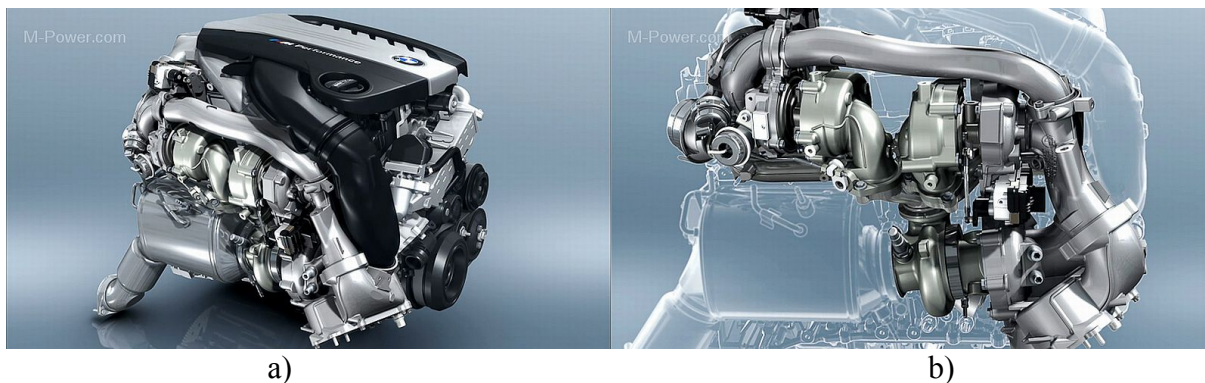
Možností, jak odstranit neduhy různých řešení, případně skloubit klady, je kombinované přeplňování. Znamená to dát dohromady více různých kompresních prvků za účelem celku s vlastnostmi samostatnými prvky nedosažitelnými. Nejčastěji to je kombinace malého a velkého turbodmychadla, což odstraňuje turboefekt velkého, a nedochází ke ztrátě tlaku ve vysokých otáčkách, jako by tomu bylo při použití pouze menšího z nich. Použití různých velikých turbodmychadel se neomezuje pouze na dvě, může jich samozřejmě být i více.

Kromě použití vícero turbodmychadel se ještě otvírá možnost kombinace turbodmychadla a kompresoru. Takové řešení eliminuje díky kompresoru turbodíru zcela. Zároveň však eliminuje i ztrátu výkonu způsobenou kompresorem, neboť ten může být ve vyšších otáčkách spojkou od hřídele odpojen [17].

V této kategorii jistě stojí za zmínku vznětový třílitrový řadový šestiválec firmy BMW podporovaný hned třemi turby (Obr. 10). Jeho označení je N57 D30 a je to první sériově vyráběný motor se třemi turby. Motor produkuje až neuvěřitelných 280 kW při 4400 otáčkách za minutu a 740 Nm při 2000-3000 otáčkách za minutu. Dvě turbodmychadla jsou malá a s variabilní geometrií lopatek, třetí turbo je velké [16].

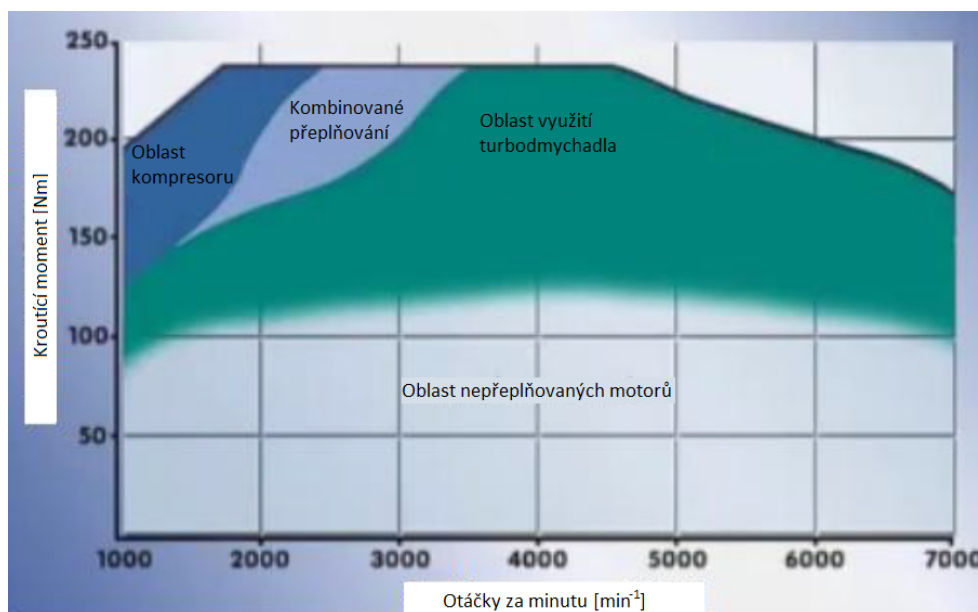
První malé turbodmychadlo pokrývá oblast hned nad volnoběžnými otáčkami, kolem 1500 otáček už se dostává do hry i velká turbína, která je důležitá i ve vyšších otáčkách. Třetí turbo je standardně obtékáno, zapojuje se až na hranici 2700 otáček za minutu a stará se o co možná nejpriznivější momentovou charakteristiku, která je tak až do 3000 otáček plochá.

BMW již dříve vytvořilo motor s nesterjné velkými turbodmychadly, ale až do roku 2012, kdy představilo třídmychadlový motor, zůstávalo u koncepce dvou turbín.



Obr. 10 Motor se třemi turbodmychadly (a) a rozmístění turbodmychadel na motoru (b) [16]

Další z motorů, co stojí za zmínku, je dvakrát přeplňovaný zážehový motor od Volkswagenu. Tento motor s označením 1,4 TSI je malý řadový čtyřválec spalující benzín a je typickým představitelem zmenšování motorů při zachování výkonu tzv. „Downsizing“. Na tomto motoru je kombinováno rootsovo dmychadlo s turbodmychadlem. Výkon některých jeho verzí je až 132 kW při 6200 otáčkách za minutu a točivý moment 250 Nm v rozmezí 2000-4500 otáčkách za minutu.



Obr. 11 Graf kroucího momentu motoru 1,4 TSI [17]

Téměř od volnoběžných otáček dodává kompresor cílový plnicí tlak, při vyšších otáčkách se přidává turbodmychadlo a když pak dokáže samo cílový tlak udržet, kompresor je odpojen přes elektromagnetickou spojku. Výchozí konfigurace je taková, že kompresor je odpojen, k jeho připojení řídicí jednotkou dochází až při sešlápnutí plynového pedálu v nižších otáčkách [17].

Zásadní výhodou zůstává velikost motoru, protože malé motory mají menší setrvačné síly a menší vnitřní tření, díky tomu si motor zachová nadprůměrnou účinnost. A s velikostí klesá i hmotnost a to je pro dynamiku vozidla dobrou zprávou.



3 Přepřínování s elektrickou podporou

Jak již bylo zmíněno, poptávka po zvyšování efektivit motorů je vysoká a zvyšování výkonu u menších motorů se ukázalo jako cesta. Výhody malých motorů jsou především v malých ztrátách, to je způsobeno menším třecím odporem, menšími momenty setrvačnosti a celkově v nižší hmotnosti celého motoru.

Atmosférické plnění při zvyšování výkonů již v úvahu nepřipadá, otázkou zůstává, jakým způsobem přepřínování řešit. Kompresor i turbodmychadlo mají své nedostatky, kompresor spotřebovává výkon motoru a turbodmychadlo trpí na již zmíněný turboefekt. Jak bylo ukázáno na příkladech, tyto nedostatky se dají poměrně dobře potlačit správnou kombinací některých prvků.

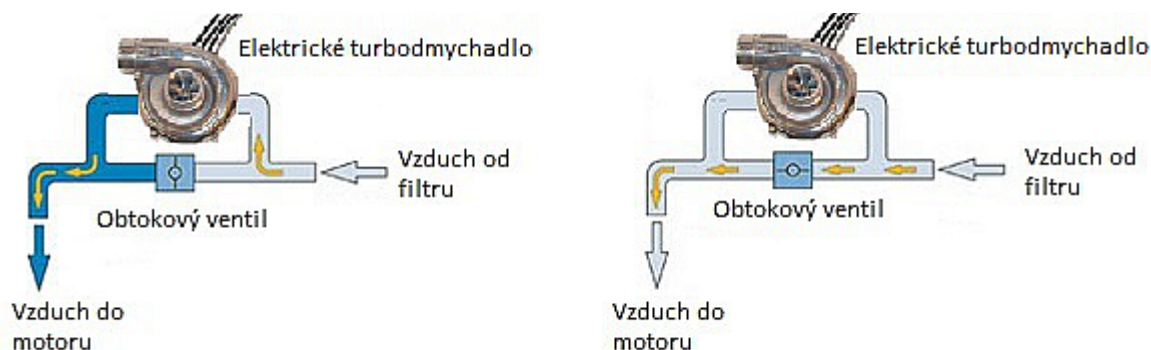
To ale neznamená, že se vývoj přepřínování nevydá jinou cestou, která v současné době také vypadá velmi slibně. Jedná se o elektrickou podporu přepřínování, jež s sebou nese výhody jinými metodami nedosažitelné. Především se jedná o možnost získávání elektrické energie z kinetické energie rotujících součástí, jejichž zpomalování ničemu nevádí nebo je dokonce žádoucí.

Většinou se jedná o napojení elektromotoru na celek turbodmychadla nebo kompresoru, například firma Turbodyne se ale vydala ještě trochu jiným směrem.

3.1 Elektrické turbodmychadlo

Turbopac firmy Turbodyne je turbodmychadlo s turbínovou stranou nahrazenou vysokootáčkovým elektromotorem. Jedná se o již dříve existující zařízení v nedávné době vylepšené o několik možností chlazení elektromotoru, z nichž všechny využívají tlak vzduchu na kompresorové straně. Výhodou tohoto zařízení je široká škála jeho využití. Svě uplatnění totiž může najít napříč téměř všemi průmyslovými odvětvími [19].

Výhodou využití u spalovacích motorů je absence turboefektu, částečně i z důvodu nezařazení mezichladiče mezi turbínu a motor. Nevýhodou pak velká spotřeba elektrické energie. Není to ale velkou nevýhodou, neboť na rozdíl od klasického turbodmychadla se tento typ netočí neustále. Ve výchozím stavu dochází k obtékání dmychadla a v sání je pouze atmosférický tlak, až potřeba vyššího výkonu dmychadlo aktivuje a obtok se zavře. Odběr proudu může být víc než dostatečně kompenzován generátorickou turbínou poháněnou energií výfukových spalin.



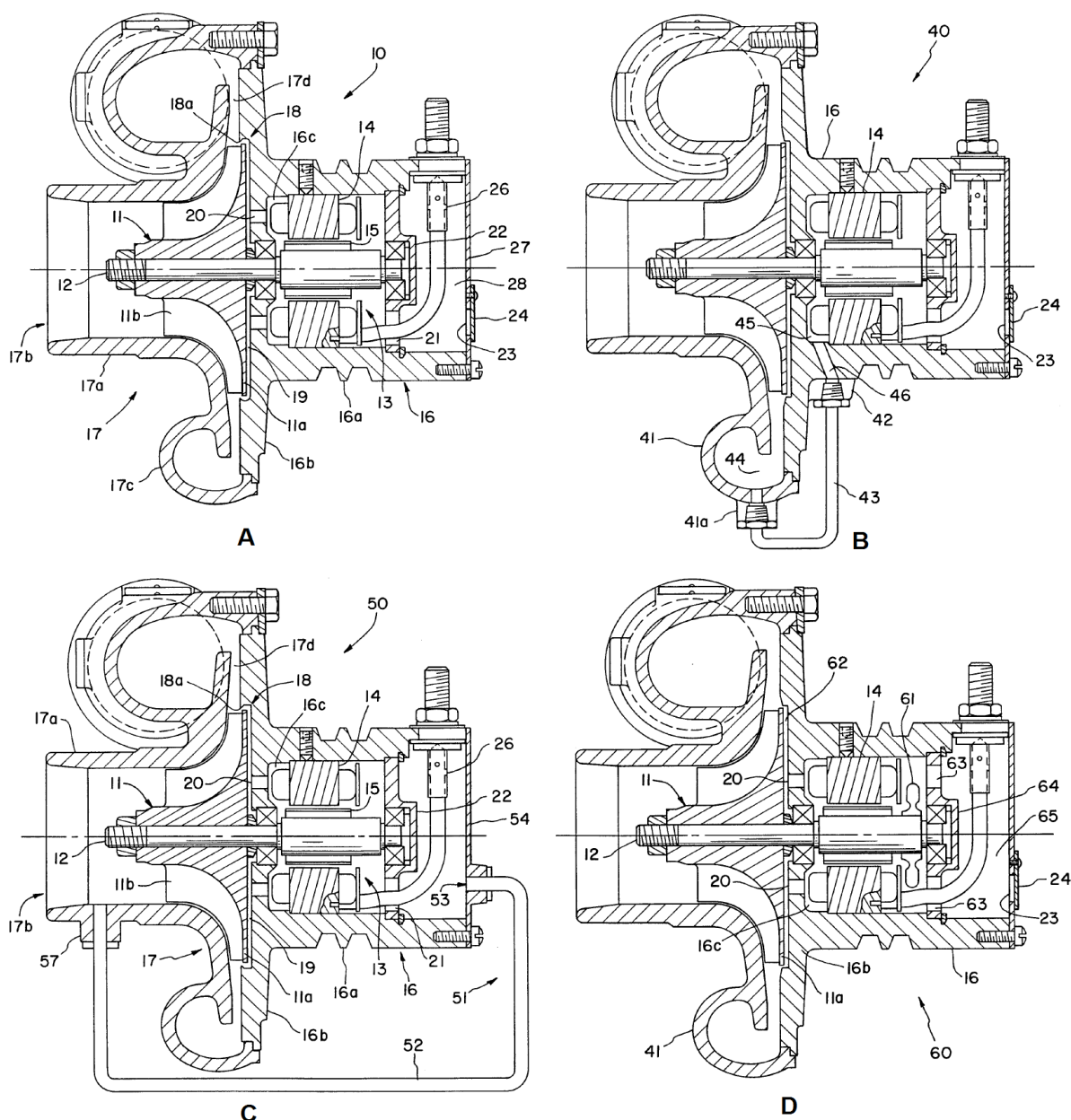
Obr. 12 Schéma zapojení elektrického turbodmychadla [18]



Na obrázku 13 je vyobrazení jednotlivých alternativ. Podrobněji se podíváme na variantu A. Hřídel (12) spojuje kompresorové kolo (11) s motorem (13). Tok vzduchu vytvářený kompresorovým kolem je částečně zachytáván prstencovou hranou (18a) a prochází výřezem (18) a prostorem (19) k otvorům (20), kde chladí vinutí motoru (14). Následně odchází otvorem (21) v ložiskovém členu (22) do dutiny (28). Motorovou skříň vzduch opouští zpětným ventilem (24) na zadní stěně (27).

Výhoda tohoto řešení chlazení je v místě odebrání proudu vzduchu, protože zde je vzduch zahřátý teprve zhruba o polovinu celkového přírůstku teploty vzduchu na výstupu turbodmychadla.

Dalšími možnostmi jsou pak odběr vzduchu pro chlazení z místa vyššího tlaku (varianta B), recirkulace vzduchu přidaným vedením (52) zpět před kompresorové kolo (varianta C) nebo podpora chlazení malým ventilátorem (61) umístěným přímo na hřídeli motoru (varianta D). Všechna níže uvedená vyobrazení jsou řezy v ose hřídele [6].

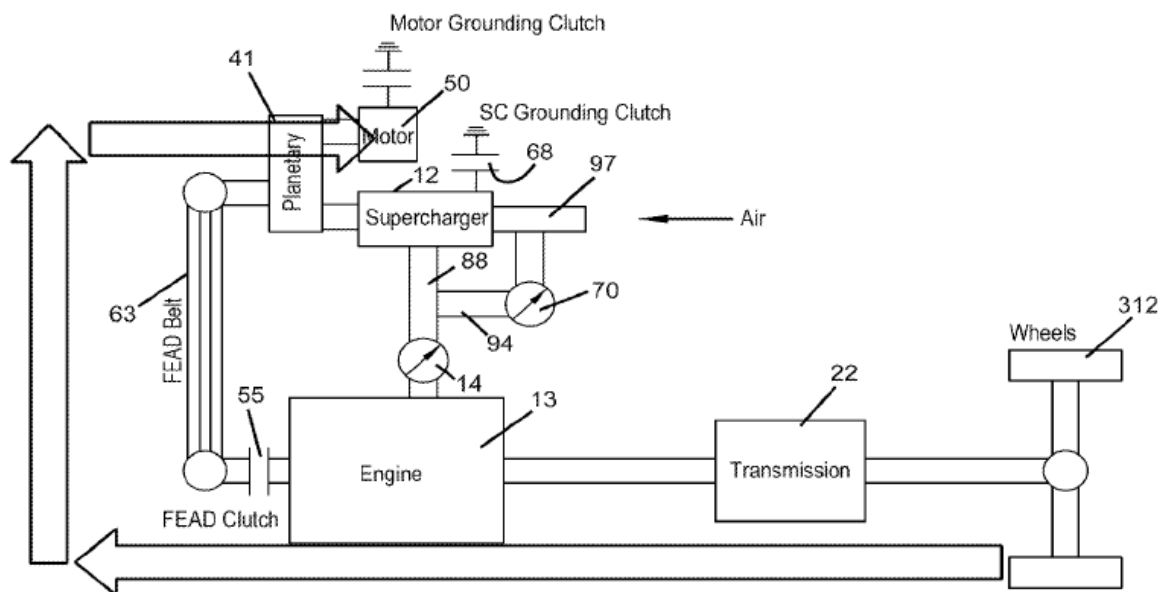


Obr. 13 Alternativy elektrických turbodmychadel s integrovaným chlazením elektromotoru [6]



3.2 Kompresor s elektrickou podporou.

Další způsob přepínání je spíše vylepšeným dříve známým způsobem přepínání pomocí kompresoru. Společnost Eaton využila již dříve vytvořeného kompresoru TVS (Twin Vortices Series) a přidala k němu systém elektrické podpory a proměnlivé rychlosti EAVS (Electrically assisted variable speed). Jak výrobce uvádí, jde o skloubení výhod kompresoru s proměnlivou rychlostí a možnosti regenerace energie. TVS, což je Rootsovo dmychadlo se speciálním designem rotorů [12], je propojen s elektromotorem a řemenicí pomocí planetové převodovky a spojky, řemenice je spojena přímo s klikovou hřídelí [3].



Obr. 14 Schéma zapojení EAVS TVS (šipka ukazuje režim rekuperace energie) [3]

Výhody jsou brzký náběh cílového plnicího tlaku a možnost aplikovat systém na širokou škálu velikostí motorů, od těch s méně než litrovým objemem až po pětilitrové. Náběh plnicího tlaku je v tak nízkých otáčkách, že se posouvá spektrum využitelných otáček ještě níž.

To umožňuje nejen zmenšování motoru „downsizing“, ale i posun pracovních otáček k nižším „downspeeding“, což je v souladu s aktuálními trendy ve vývoji motorů. Posunutí do nižšího spektra pracovních otáček pomáhá přiblížit motor ještě více k bodu téměř ideální spotřeby a tedy i vysoké úspornosti. Zároveň umožňuje prodlužování převodů a tak možnost jet vyšší rychlostí při nižších otáčkách motoru, což také příznivě ovlivňuje spotřebu.

Další výhodou jsou kompaktní rozměry, při testování pro systém stačilo místo vzniklé po odstranění alternátoru a startéru. Ty totiž již nebudou potřeba, jejich funkci elektromotor spolehlivě supluje. Samozřejmostí je pak integrace systému start-stop, který vypíná motor například při čekání na křižovatce opatřené semaforem a tím šetří palivo především v městském provozu, což ještě více přispívá k úspornosti motoru [20].

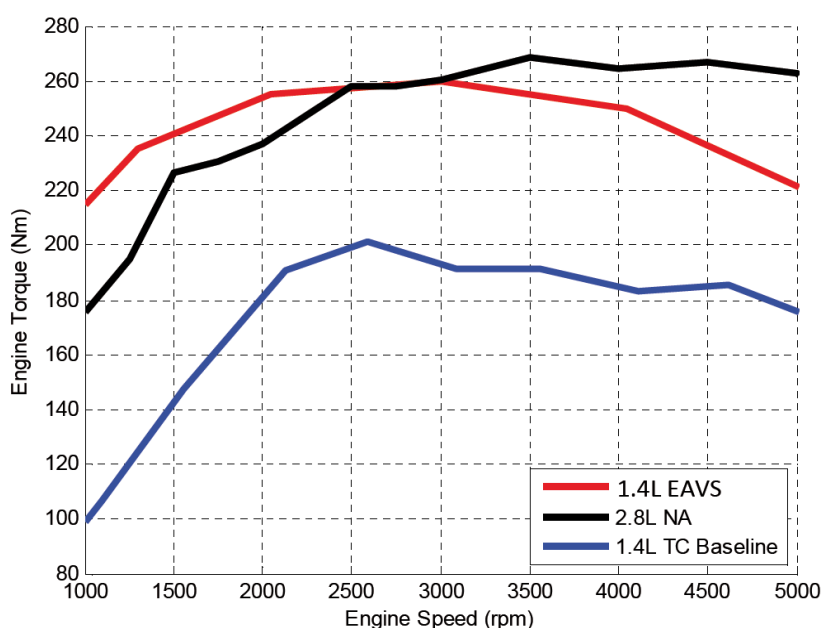


Následující tabulka ukazuje spotřebu srovnatelných motorů; atmosférického o objemu 2,8 litru, motorem o objemu 2,4 litru se start-stop systémem a dalším s objemem 1,4 litru a systémem EAVS. HWY představuje spotřebu v dálničním provozu, FTP75 je starší americký testovací cyklus pro indikaci spotřeby v městském provozu, US06 je jeho novější obdoba. Spotřeba je udávána v mílech ujetých na jeden galon.

Tab. 1 Srovnání spotřeby motorů s a bez EAVS [20]

	2.8L NA	2.4L	EAVS 1.4L
FTP75	22.0	25.7	30.44
US06	26	27.6	28.83
HWY	35.6	45.5	52.04

Kompresor s proměnlivou rychlostí a podporou elektromotoru zajišťuje nejen brzký náběh točivého momentu, ale i jeho přívětivý průběh přes celé spektrum otáček. V následujícím grafu můžeme vidět srovnání průběhů točivých momentů motoru o objemu 1,4 litru se zmiňovaným kompresorem (červená) a dalších dvou motorů; atmosférický o objemu 2,8 litru (černá) a turbodmychadlem přeplňovaný o objemu 1,4 litru (modrá).



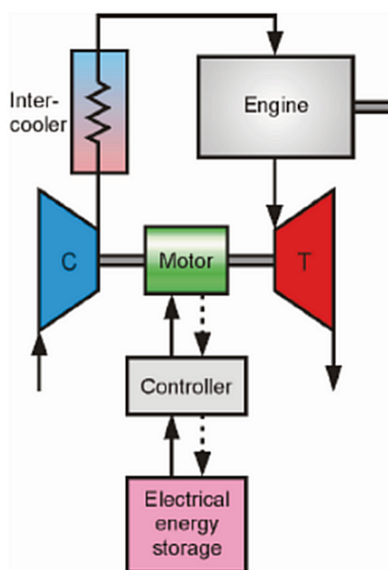
Obr. 15 Srovnání průběhů točivých momentů s a bez EAVS [20]

Kompresor podpořený elektromotorem, jež zastává zároveň i funkci alternátoru a startéru, přináší nový vítr do plachet mechanickému přeplňování, protože konkurenceschopnost kompresorů na poli downsizingu byla donedávna nevalná. Tento systém však vypadá velmi slibně a předpokládám, že jeho obdobu si budeme moci brzy vyzkoušet v nějakém sériově vyráběném voze.



3.3 Turbodmychadlo s elektrickou podporou

Koncepce klasických turbodmychadel s kompresorovou i turbínovou stranou podpořená navíc elektromotorem je cílem výzkumů mnoha výrobců turbodmychadel už téměř desetiletí. Mnoho z nich se snaží plně odhalit vytušený potenciál a odstranit případné neduhy. Nejvýraznější nevýhodou klasických turbodmychadel je již dříve zmíněný turboefekt a osazení hřídele dmychadla elektromotorem tento problém odstraňuje. Navíc může být motor využit i jako regulace turbodmychadla a k získávání elektrické energie při nadbytku energie výfukových spalin, kdy motor přejde do generátorického režimu.



Obr. 16 Schéma přepínání Turbodmychadlem s elektrickou podporou [21]

Na použité elektromotory jsou kladeny vysoké nároky, musí totiž operovat ve velmi vysokých otáčkách a k tomu za zvýšených teplot [4]. Zvýšení teploty nezpůsobuje jen zahřívání vzduchu jeho kompresí, ale především vysoké teploty výfukových plynů, které část své energie předávají turbíně.

Právě řešení problému s odvodem tepla z oblasti elektromotoru je předmětem zájmu výzkumů a experimentů a to především u zážehových motorů, které mají teplotu výfukových spalin o něco vyšší než vznětové motory. To není způsobeno výhřevností paliva, ta je u nafty sice nižší, ale zanedbatelně. Je to způsobeno vyšší účinností vznětových motorů, kterým tak stačí vstříkovat do válců méně paliva.

Vznětový motor hrál hlavní roli, když si automobilka Audi nadělila dárek k 25. výročí motorů TDI. Konkrétně se jedná o koncept RS 5 TDI s třilitrovým V6 motorem [24].

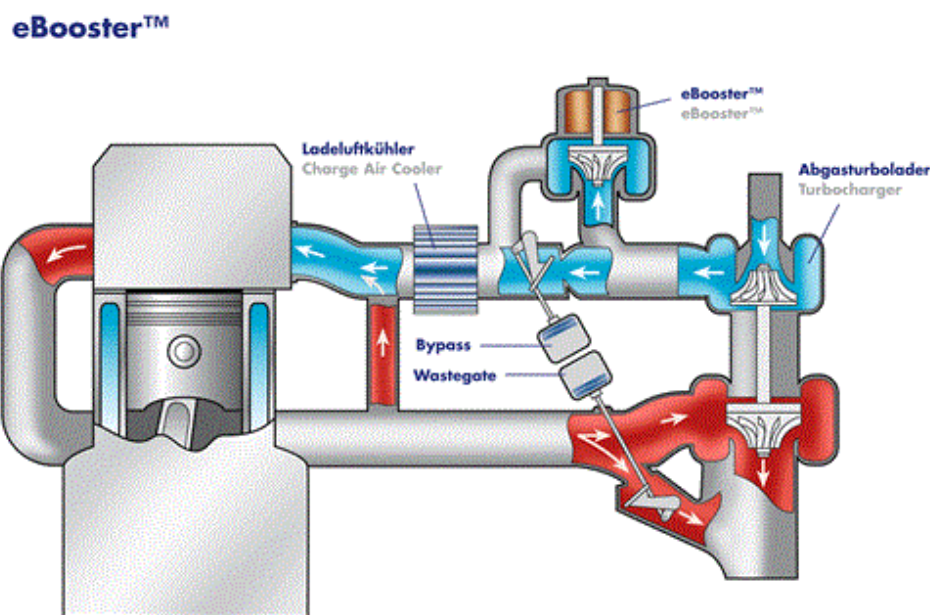


Obr. 17 Audi RS 5 TDI [24]



3.3.1 Kombinace klasického a elektrického turbodmychadla

Audi RS 5 TDI je živoucím důkazem, že z technologií vyvinutých pro úsporu paliva a snížení emisí mohou profitovat i výkonnější a větší motory, dokonce motory pro sportovní vozy. Technologie zde uplatněná je eBooster společnosti BorgWarner vyvinutá pro zlepšení dynamiky malých dieselových motorů. Přepínání je realizováno klasickým turbodmychadlem a dmychadlem čistě elektrickým.



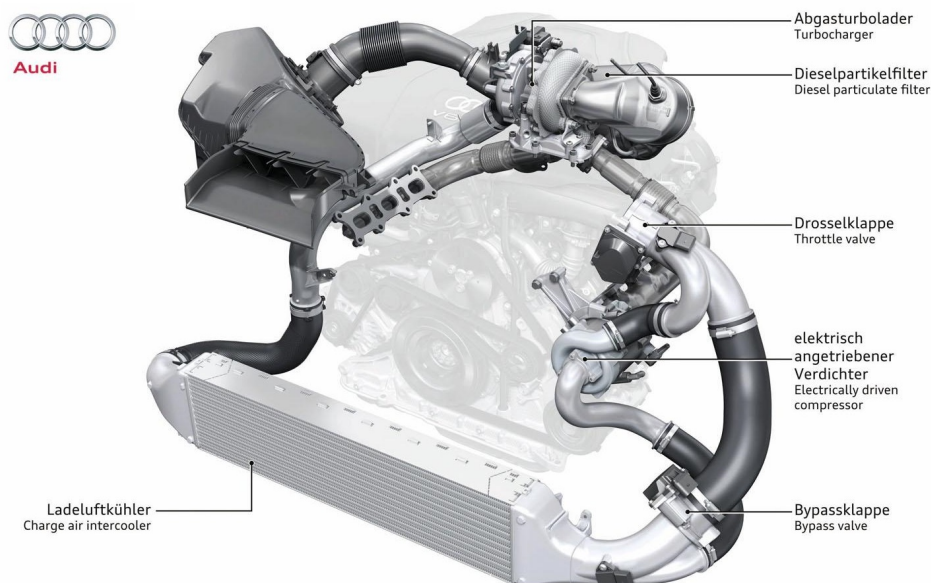
Obr. 18 Schéma přepínání využitím technologie eBooster [23]

Klasické turbodmychadlo navíc disponuje variabilní geometrií turbíny, což se v posledních letech stalo u vznětových motorů téměř standardem. Navíc regulace v případě TDI není řízena podtlakovým akčním členem, jak bývá běžné, ale táhlem od elektromotorku ovládaného přímo řídicí jednotkou.

Přestože RS 5 TDI má ohromující dynamiku, která dokonce předčí původní verzi s atmosférickým osmiválcovým motorem o objemu 4,2 litru, a spotřeba se udává mezi 5 a 6 litry na 100 kilometrů [24], budeme si muset na podobné sériově vyráběné vozidlo ještě chvíli počkat. Navíc technologie eBooster se daleko pravděpodobněji prvně usadí v menších motorech, které budou vynikat především spotřebou a ekologičností.

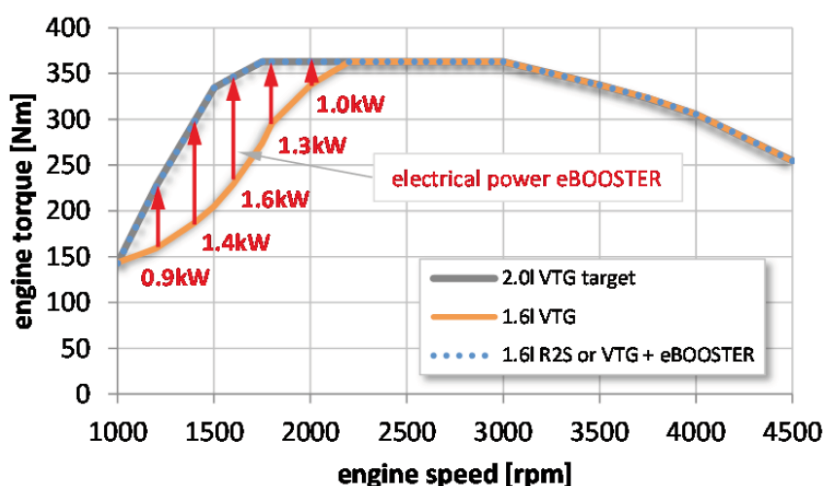
Spolupráce dvou turbodmychadel vychází z aplikace dvou různě velkých turbín, kde větší z nich pokrývá horní spektrum otáček a menší se snaží eliminovat turboefekt většího. Menším turbodmychadlem je zde plně elektrické, které se roztáčí znatelně rychleji než klasické, tím úplně pokryje oblast roztáčení velkého turbodmychadla a navíc oblast vlastního roztáčení má minimální, protože to probíhá téměř okamžitě.

Umístěno je v tomto případě až za mezichladičem, těsně před škrtkou klapkou. Tím se minimalizuje objem vzduchu za dmychadlem. Kolem něj prochází obtok s klapkou, která je v nízkých otáčkách zavřená a plně se otevře až v době, kdy klasické dmychadlo začne dodávat cílový tlak. Poloha obou turbodmychadel a tlakového vedení plnicího vzduchu na motoru TDI V6 je patrná z obrázku 19.



Obr. 19 Umístění turbodmychadel na motoru TDI V6 [24]

Vznětový šestiválec s eBoosterem sice ve své výkonové kategorii patří mezi menší motory, celkově je pořád nadprůměrný, a v dnešní době zmenšování zvláště. Navíc většina kombinací spalovacích motorů s elektrickými zařízeními na podporu spalování je zaměřena na spotřebu a ekologii. A ani u této tomu není jinak. Při instalaci na malý řadový čtyřválec o objemu 1,6 litru dosahuje dynamiky srovnatelné s dvoulitrovým motorem osazeným turbodmychadlem s VGT [23]. Vytvořit pružný malý diesellový motor byla vždy výzva. Na následujícím grafu je srovnání průběhu točivého momentu motoru 1,6 využívající eBooster, motoru 1,6 a motoru o objemu 2 litry oba využívající jednoho Turbodmychadla s VGT regulací.



Obr. 20 Srovnání průběhu točivého momentu s a bez využití eBoosteru [23]

Dalo by se říci, že elektrické turbodmychadlo plně kompenzuje prodlevu náběhu větší turbíny na menším motoru. To je samozřejmě výhodou, protože menší naftové motory budou zřejmě v brzké době hojně používány především díky jejich místy až neskutečně nízké spotřebě. To jde ruku v ruce s točivým momentem v nízkých otáčkách, protože úspora paliva je často úměrná schopnosti motoru rozhybat vozidlo bez nutnosti jeho vytáčení.

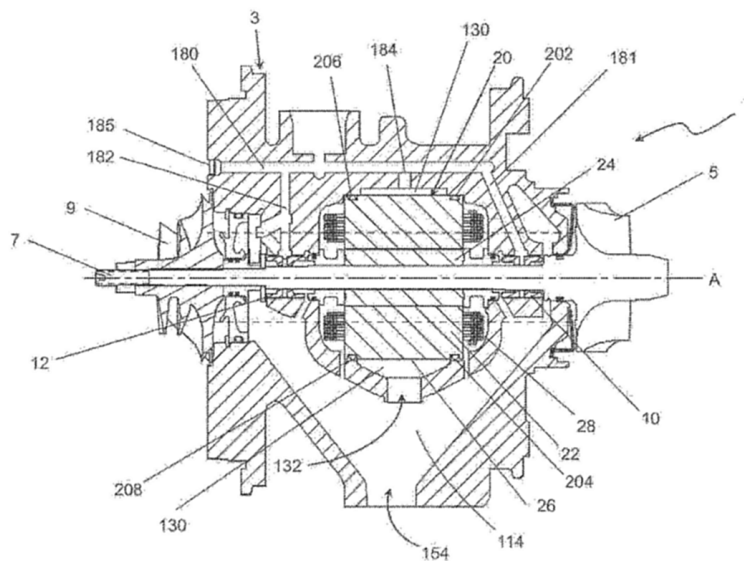
3.3.2 Kapalinou chlazená elektrická podpora turbodmychadla

Nejjednodušší koncepcí elektrické podpory turbodmychadel je integrace elektromotoru přímo na hřídel dmychadla mezi kompresorovou a turbínovou stranu [4]. Zde však dochází k vystavení elektromotoru vysokým teplotám. Nabízí se jednoduché řešení využití tepelného štítu a zvětšení vzdálenosti od tepelného zdroje. Prodloužení hřídele však zvýší její vnitřní namáhání a tepelný štít, který je dostačující pro vznětové motory už u zážehových motorů stačit nemusí.

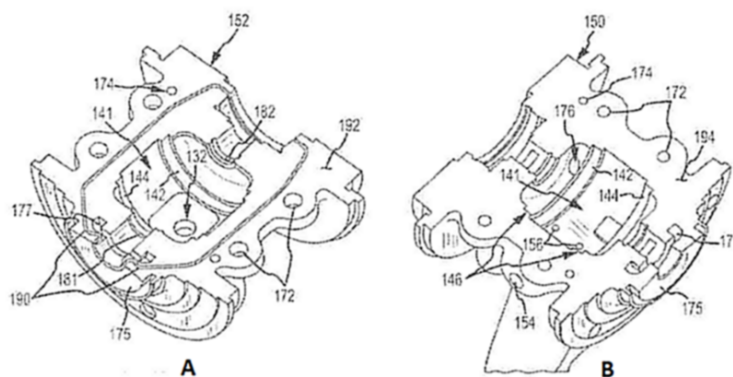
Že jsou teploty výfukových plynů u zážehových motorů vyšší, již bylo zmíněno výše. Kromě nižší účinnosti a vyšší spotřeby paliva také motory spalující benzín dosahují vyšších provozních otáček a tak je i průtok spalin turbínou větší.

Na způsob jakým chránit elektromotor mezi oběžnými koly přišla společnost BorgWarner. Jedná se o jednoduché pouzdro elektromotoru protékané chladícím médiem, což většinou bude olej. Na obrázku 21 vidíme řez celým turbodmychadlem v rovině osy hřídele. Na obrázku 22 je horní a spodní část motorového pouzdra.

Hřídel (7) spojuje kompresorové kolo (9) a turbínové kolo (5) s rotorem (24) elektromotoru (20). Stator (22) je chlazen olejem protékajícím olejovým vedením (180), kterým je rozváděn do kluzných ložisek (10, 12) a kruhové chladicí komory (130). Tepelný štít (177) je od zbytku motorového pouzdra (3) oddělen dutinou (175) [5].



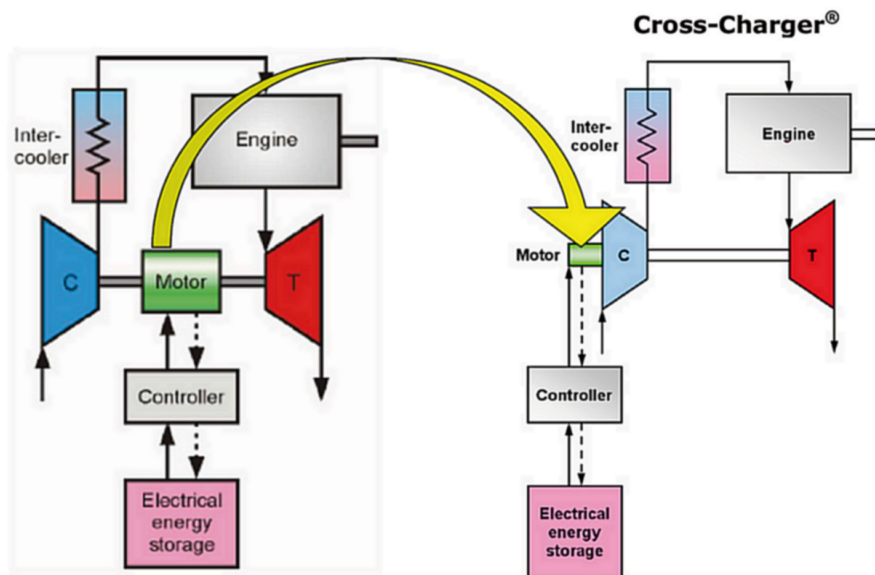
Obr. 21 Řez sestavou Turbodmychadla s olejovým chlazením elektromotoru [5]



Obr. 22 Spodní (A) a horní (B) část motorového pouzdra [5]

3.3.3 Vzduchem chlazená elektrická podpora turbodmychadla

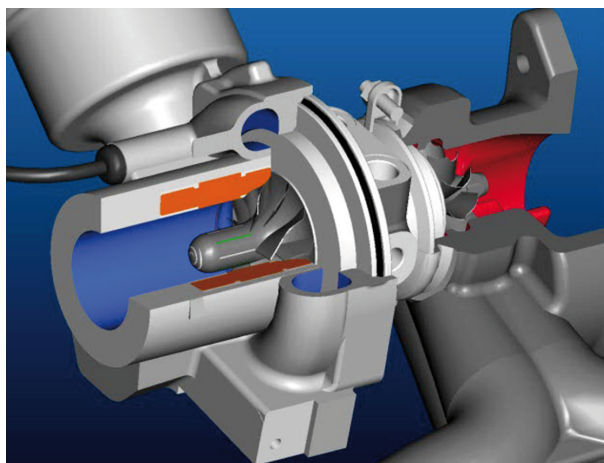
Poněkud méně komplexní je chlazení elektromotoru vzduchem, v tomto případě spíše polohou, elektromotor byl přemístěn z tepelně zatěžované oblasti mezi oběžnými koly do oblasti před kompresorovým kolem, kde je navíc chlazen proudem nasávaného vzduchu. Zmíněné řešení vzniklo v kooperaci G+L innotec a AVL List a jmenuje se Cross-Charger.



Obr. 23 Schéma přemístění elektromotoru před kompresorovou část [21]

Toto řešení nabízí několik zlepšení oproti konvenčním turbodmychadlům, především se tedy jedná o eliminaci turboefektu, vylepšeno bylo ale i turbodmychadlo jako celek. Došlo k posunutí těžiště do středu mezi ložiska, tím je jejich zatěžování rovnoměrnější. Zároveň došlo k snížení momentu hybnosti, což také vede k rychlejšímu roztáčení a dřívějšímu náběhu cílového plnicího tlaku [22].

Při roztáčení turbodmychadla se elektromotor zapojuje jen na tři sekundy a ukázalo se, že i doba kratší by na roztočení na potřebné otáčky stačila. Motor tedy delší dobu než v motorickém pracuje v generátorickém režimu, což se projeví i na pozitivní energetické bilanci [21].



Obr. 24 Cross-Charger [21]



Závěr

Vývoj jde neustále kupředu a ve všech oblastech, přeplňování je toho jasným důkazem. Není tomu tak dávno, co automobil s motorem s jakýmkoliv turbodmychadlem se považoval za pokrokový, a není náhoda, že právě slovo „turbo“ se stalo pro mnoho lidí synonymem pro rychlost. Vzhledem k nekončící touze po rychlosti a výkonech bylo kombinované přeplňování nebo použití více turbodmychadel jasným dalším krokem.

Automobilismus se začal rozmáhat v obrovském měřítku a tak dalším logickým krokem byl začátek regulace jeho dopadů na životní prostředí. Protože se stoupajícím množstvím vozidel brázdících silnice celého světa stoupl i celkový dopad na ovzduší, bylo zřejmé, že emisní normy se budou zpříšňovat a tak je tomu i dnes. Přesto, že automobily celosvětově tvoří jen nepatrný zlomek škodlivin vypouštěných do ovzduší, situace ve velmi lidnatých městech s velkou hustotou dopravy je hraniční.

Zpříšňující se emisní limity jsou možná tou správnou cestou ke snížení škodlivin v ovzduších měst, ale jejich dopad na vývoj pohonných ústrojí automobilů nemusí být vždy pozitivní. I zmenšování objemů motorů má určitou hranici únosnosti, kdy se může stát, že se zákazník rozhodne koupit si raději bazarové auto s „ještě pořádným motorem“ než vozidlo s aktuální tříválcovou jednotkou o malém objemu, jejíž výkony jsou stejné, ale v kultivovanosti chodu ztrácí. To je ovšem příklad ze segmentu nižší třídy. Je velmi nepravděpodobné, že by do větších a komfortnějších aut výrobci dávali „malinké“ motory s méně kultivovaným chodem.

I velké motory se budou jistě zmenšovat, ale jen do určité míry. Jejich spotřeba a emise budou samozřejmě v normě a k tomu se využije určitá úroveň hybridizace pohonu. Ať už zapojení plnohodnotného elektromotoru přímo na hnací ústrojí nebo elektrická podpora přeplňování. Směr, kterým se současné trendy v přeplňování vydávají, vypadá docela slibně a věřím, že brzy přinese ovoce v podobě sériově vyráběných vozidel s některou ze zajímavých a účinných technologií. Nicméně jestli tomu tak opravdu bude, ukáže až čas.

Zajímavý však zůstává i segment sportovních vozů, který se navzdory silné fanouškovské základně atmosférických motorů udává směrem přeplňování a hybridizace. Na rozdíl od automobilů pro každodenní použití nevyužívá technologie až tak ke snížení spotřeby a emisí, jako ke zvýšení výkonů a posouvání limitů motorů ještě blíže k hranici jejich možností. Což ovšem jde stejně ruku v ruce se zvyšováním účinnosti motorů a nakonec je snížení spotřeby a emisí nevyhnutelným vedlejším produktem zvyšování výkonu na jednotku objemu.

Ale ani atmosférickým motorům ještě neodzvonilo. Dobrým příkladem byla spolupráce automobilek Toyota a Subaru za vzniku decentního kupé poháněného čtyřválcovým motorem s protiběžnými písty. Nebo další japonské automobilky Honda a Mazda, které i nadále věří v zachování atmosférických motorů napříč širokým spektrem modelů.

Kam se bude ubírat vývoj dál není jisté, ale zatím to vypadá, že hlavně milovníci pokrokových technologií a neotřelých technických fines se mají na co těšit. A to nejen z důvodu dobrovolného vývoje pokračujícího na poli motorů a jejich periférií, ale ani emisní limity nevypadají, že by se v brzké době měli přestat zpříšňovat. Rozhodně se pokrok nevydává jedním směrem a tak zůstane i určitá pestrost nabídky zachována.



Použité informační zdroje

- [1] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Vlastním nákladem, 2003. ISBN 80-238-8756-4
- [2] HIERETH, Hermann, Petr PRENNINGER. *Charging the Internal Combustion Engine*. New York: Springer, 2007. ISBN 978-3-211-33033-3.
- [3] EATON CORPORATION (US). *Electric energy generation using variable speed hybrid electric supercharger assembly*. Vynálezci: Robert P. BENJEY, Vasilios TSOURAPAS. Spojené státy americké. Patentový spis, US 2015/0066272 A1. 2014-11-26.
- [4] BORGWARNER INC. (US). *Electrically assisted turbocharger*. Vynálezci: Paul DEIMER, Augustine CAVAGNARO, Michael BUCKING. Patentový spis, WO 2013/103546 A1. 2012-01-06.
- [5] BORGWARNER INC. (US). *Fluid cooled electrically-assisted turbocharger*. Vynálezci: Augustine CAVAGNARO, Michael BUCKING. Patentový spis, WO 2013/126232 A1. 2013-02-11.
- [6] TURBODYNE SYSTEMS INC. (US). *Motor-driven centrifugal air compressor with internal cooling airflow*. Patentový spis, WO 99/13223 A1. 1999-03-18.
- [7] 3 April 1885: Gottlieb Daimler applies for a patent for his “grandfather clock” engine. *Daimler global media site* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://media.daimler.com/dcmmedia/0-921-1088718-1-1277530-1-0-1-0-0-1-12639-0-0-1-0-0-0-0-0.html?TS=1432539706617>
- [8] Turbocharged Systems. *Aircraft Engine Overhaul – Victor Aviation* [online]. ©2013 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: http://www.victor-aviation.com/Turbochargers_Valves.php
- [9] Intercooler Article On Sizing/Design/Implementation. *B15U.com - A Nissan Sentra Forum* [online]. ©2015 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: <http://www.b15u.com/threads/23-Intercooler-Article-On-Sizing-Design-Implementation>
- [10] I motori a combustione interna. *Astra Club Italia Forum - Opel Astra J (2010), Opel Astra H (2004) e tanto altro!* [online]. ©2000-2010 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.astrclubitalia.it/Forum/viewtopic.php?f=5&t=39363>
- [11] Monthly Archives: May 2013. *Lock the welder* [online]. 2013-04-20 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <https://lockthewelderdotcom.wordpress.com/2013/05/>
- [12] Info on Roots vs. TVS vs. Twin Screw vs. Centrifugal from Autozine. *BMW M3 forum (E90 E92)* [online]. ©2000-2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.m3post.com/forums/showthread.php?t=842979&page=8>



- [13] JÄÄSKELÄINEN, Hannu, Magdi K. KHAIR. Turbocharger Fundamentals. In: *DieselNet: Diesel Emissions Online* [online]. ©2012 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: https://www.dieseln.net.com/tech/air_turbocharger.php
- [14] Co to jest wastegate? *Technika Jazdy Samochodem | motoryzacja dla ambitnych* [online]. ©2003-2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.technikajazdy.info/quiz-motoryzacyjny/co-to-jest-wastegate/>
- [15] Variable Nozzle Turbine (VNT) or Variable Geometry Turbo (VGT). *Fastmotoring.com | Motor news in speed* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.fastmotoring.com/index.php/2010/10/variable-nozzle-turbine-vnt-or-variable-geometry-turbo-vgt/>
- [16] MIHÁLIK, Miro. BMW tri-turbo diesel: takto funguje systém trojitého přeplňování. In: *Autoforum.cz* [online]. 2012-02-27 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/bmw-tri-turbo-diesel-takto-funguje-system-trojiteho-preplnovani/>
- [17] VW TSI twincharger. *YouTube* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=20qqavckWdw>
- [18] Twincharged Mini? *Mini Cooper :: North American Motoring* [online]. 2011-04-04 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.northamericanmotoring.com/forums/drivetrain-cooper-s/207581-twincharged-mini.html>
- [19] Turbopac™ 3000 Series. *Turbodyne* [online]. ©2013 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.turbodyne.net/products/turbopac3000/>
- [20] TSOURAPAS, Vasilios, Robert P. BENJEY. *Eaton's Electrically Assisted TVS® Supercharger with Variable Speed, Mild-Hybrid and Engine Start/Stop Functionalities*. 23 s. [cit. 2015-05-25].
- [21] GÖDEKE, Holger, Kurt PREVEDEL. *Realisierung eines Hybrid-Turboladers, Einsatz neuester Elektromotorentechnik im Turbolader*. 22 s. [cit. 2015-05-25].
- [22] Turbo-by-wire. *G+L innotec* [online]. ©2014 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: [http://www.gl-innotec.de/index.php?id=31&L=1&tx_ttnews\[year\]=2014&tx_ttnews\[month\]=07&tx_ttnews\[day\]=07&tx_ttnews\[tt_news\]=13&cHash=dd4f6063de854fd20c1df08633ab8b38](http://www.gl-innotec.de/index.php?id=31&L=1&tx_ttnews[year]=2014&tx_ttnews[month]=07&tx_ttnews[day]=07&tx_ttnews[tt_news]=13&cHash=dd4f6063de854fd20c1df08633ab8b38)
- [23] SPINNER, Gerd, Sascha WEISKE, Stefan MÜNZ. *BorgWarner's eBooster® - the new generation of electric assisted boosting*. 11 s. [cit. 2015-05-25].
- [24] GEIGER, Thomas. AUDI RS5 TDI: Tschüs zum Turboloch! In: *Autobild.de* [online]. 2014-05-28 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.autobild.de/artikel/audi-rs-5-tdi-concept-vorstellung-5135710.html>