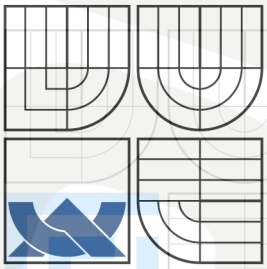
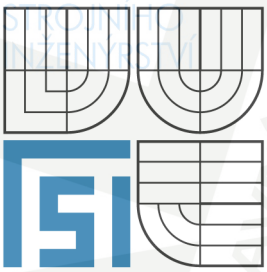


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VYUŽITÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ SPALOVACÍHO MOTORU PRO ZLEPŠENÍ VLASTNOSTÍ MOTORU

USAGE EXHAUST GAS IN COMBUSTION ENGINE FOR IMPROVMENT ENGINE QUALITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR FUSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK RASCH

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Fusek Petr

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

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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:

Využití výfukových plynů spalovacích motorů pro zlepšení vlastností motoru.

v anglickém jazyce:

Usage exhaust gas in combustion engine for improvment engine quality.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracujte soubor informací o využití výfukových plynů spalovacích motorů pro zlepšení vlastností motoru. Zaměřte se na motorová vozidla.

Cíle bakalářské práce:

Popište dnes používané využití výfukových plynů spalovacích motorů a stručně charakterizujte vznik výfukových plynů.
Zhodnoťte teoretické možnosti výfukových plynů z hlediska dopravních prostředků obecně.
Uveďte další metody využití v osobních automobilech.

Seznam odborné literatury:

RAUSCHER, J., Studijní opory spalovací motory
URL < http://www.iae.vutbr.cz/>
ŠTOSS, M., Spalovací motory I, Ediční středisko VUT Brno. 2. vydání. Brno 1992. ISBN 80-214-0417-5

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Rasch

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 9.12.2008

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

Tato bakalářská práce obsahuje souhrn informací, týkající se problematiky využití výfukových plynů spalovacích motorů. Popisuje využití kinetické energie a tepelné energie výfukových plynů, která je odváděna ze spalovacího motoru ven bez využití. Rozbor bude zahrnovat základní technické parametry a popisy daných řešení a jejich využití v praxi. Zhodnocuje teoretické možnosti výfukových plynů, jejich vznik a složení.

Klíčová slova:

spalovací motor, turbodmychadlo, turbocompoudní motor, termogenerátor, výfukové plyny, comprex, recirkulace, parní stroj

Anotation

This bachelor´s thesis contains information on how to use exhaust gas of engines. It describe the usage of kinetic and thermic energy of exhaust gas which is taken from the engine without any usage.

This study includeds basic technical parameters and descriptions of giving analysis and their usage in practice.

This bachelor´s thesis assesses theoretical possibilities of exhaust gas and their occurence and structure

Key words:

Combustion engine, supercharging, turbo-compound engine, thermoelectric generator, exhaust gas, comprex, recirculation, steam engine

Bibliografická citace

FUSEK, P. *Využití výfukových plynů spalovacích motorů pro zlepšení vlastností motoru* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Rasch.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce, pana Ing. Františka Rasche, a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 20. května 2009 .....

Petr Fusek

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce tímto děkuji vedoucímu této práce, panu Ing. Františkovi Raschovi.

Obsah

1. Úvod....8
2. Tepelná bilance spalovacího motoru....9
3. Vznik a složení výfukových plynů....10
   3.1. Složení výfukových plynů....10
4. Přeplňování....12
   4.1. Přeplňování turbodmychadlem....12
      4.1.1. Historie....12
   4.2. Turbodmychadla....13
   4.3. Řízení a regulace plnícího tlaku....14
      4.3.1. Regulace pomocí obtokového regulačního ventilu....14
      4.3.2. Variabilní geometrie lopatek VGT....15
5. Turbocompounding....16
6. Přeplňování tlakovými vlnami – COMPREX....18
7. Kombinace výfukové turbíny a generátoru....19
8. Využití odpadního tepla....21
9. BMW Turbosteamer....23
10. EHR – Exhaust Heat Recovery System....24
11. Recirkulace výfukových plynů....25
   11.1. Rozdělení recirkulace spalin:....25
      11.1.1. Interní recirkulace spalin....25
      11.1.2. Externí recirkulace spalin....25
12. Závěr....27
13. Literatura....28
14. Seznam použitých symbolů a zkratek....30

1. Úvod

Spalovací motor je dnes nejpoužívanější pohonnou jednotkou v osobních a nákladních automobilech, autobusech, stavební technice a jiných dopravních prostředcích. Při spalování paliva je k pohonu vozidla využita jen část chemické energie obsažené v palivu, zbytek energie je ve formě tepla odveden bez užitku ze spalovacího prostoru ven do ovzduší. Využitím této ztrátové energie dosáhneme větší účinnosti spalovacího motoru.

V současnosti je kladen velký důraz na emise výfukových plynů, zejména na produkci oxidu uhličitého CO_2, který je v poslední době nejsledovanějším emisním ukazatelem. Zvýšením účinnosti dosáhneme většího výkonu a točivého momentu motoru a především snížení měrné spotřeby paliva, od které se odvíjí emise oxidu uhličitého CO_2 vylučované spalovacím motorem.

Nevyužité výfukové plyny mají v sobě vysoký podíl kinetické a tepelné energie, která by mohla být dále využita v různých zařízeních.

Teplo vyprodukované spalovacím motorem může být využito např. k přeměně kapaliny na páru, která pak slouží k pohonu parního stroje a ten dále předává výkon na klikový hřídel motoru. Teplo se dá také využít k výrobě elektrické energie pomocí termočlánku a získaná energie může být použita k napájení některých spotřebičů ve vozidle. U moderních rodinných domů nebo jiných objektů se v současnosti používá kogenerační jednotka. Jde o spalovací motor, ke kterému je připojen generátor a ten dodává elektrickou energii do sítě. Odpadním teplem je dům vytápěn a ohřívána užitková voda. Rovněž u velkých zaoceánských lodí se dá odpadním teplem vytápět celá loď.

Výfukové plyny mají na výstupu ze spalovacího prostoru vysokou rychlost a tím i velkou kinetickou energii. Díky ní můžeme např. pohánět výfukovou turbínu, která je spojena s kompresorem, generátorem nebo přímo s klikovým hřídelem. Pomocí kompresoru dopravujeme do spalovacího prostoru čerstvý vzduch s přetlakem a generátorem můžeme vyrábět elektrickou energii potřebnou k napájení elektrických spotřebičů vozidla.

Proudící výfukové plyny obsahují velké množství ztrátové energie a záleží pouze na tom, jakým způsobem ji využijeme a zvýšíme tím účinnost spalovacího motoru.

2. Tepelná bilance spalovacího motoru

Spalovací motor přeměňuje chemickou energii obsaženou v palivu na mechanickou práci. Při této přeměně dochází ke značným ztrátám, proto je při vývoji motoru snaha maximalizovat celkovou účinnost přeměny energie.

Při spalování se mění chemická energie paliva na teplo, které koná užitečnou práci na pístu. Část tepla je odvedena ve formě zbytkového tepla výfukovými plyny, zčásti jej odvádí přestupem stěnami pístu, válce a hlavy chladící kapalina a další část uniká radiací, konvekcí a kondukcí z bloku motoru. Určitý podíl užitečné práce se spotřebuje třením v pístní skupině, ložiskách, rozvodovém ústrojí a přeměňuje se opět na teplo. Část práce je také využita na pohon pomocných zařízení (alternátor, kompresory, čerpadla apod.)

Ztráty	**Benzínový motor [%]**	**Vznětový motor [%]**
Tření píst-válec	45	50
Tření ložisek klikového a vačkového hřídele	23	24
Ztráty na výměně náplně válce motoru	20	14
Pohon rozvodového mechanismu	6	6
Pohon pomocných agregátů	6	6

Tabulka 2.1. *Podíl ztrát jednotlivých skupin u motoru zážehového a vznětového v % ztrátového výkonu* [1]

Během spalování je k pohonu vozidla využito u čtyřdobých zážehových motorů okolo 32 %, u čtyřdobých vznětových okolo 45 % energie. Zbytek je ve formě tepla odveden chlazením a výfukovými plyny.

Teplo přeměněné na výkon		32%
Teplo odvedené chlazením	Teplo odvedené při hoření 6%	28%
	Teplo odvedené při expanzi 7%	
	Teplo odvedené při výfuku 15%	
Teplo odvedené výfukovými plyny a zářením		40%
celkem		100%

Tabulka 2.2. *Celková tepelná bilance zážehového motoru* [1]

Teplo přeměněné na výkon		45%
Teplo odvedené chlazením	Teplo odvedené při hoření 8%	23%
	Teplo odvedené při expanzi 6%	
	Teplo odvedené při výfuku 9%	
Teplo odvedené výfukovými plyny a zářením		30%
Teplo vyvolané třením pístů		2%
celkem		100%

Tabulka 2.3. *Celková tepelná bilance vznětového motoru* [1]

3. Vznik a složení výfukových plynů

Spalování benzínu nebo nafty je oxidační proces, při němž se hořlavé složky paliva (C, H, popř. S) slučují s kyslíkem. Energie obsažená v palivu se změní na teplo a jako oxidant působí okolní vzduch, který obsahuje 21 objemových procent kyslíku.

Spalovací motor potřebuje ke svému provozu určitý poměr vzduchu a paliva. V ideálním případě je pro spálení 1 kg benzínu (nafty) potřeba 14,7 kg (14,5 kg) vzduchu. Převedeme-li hmotnostní poměr na objemy, ke spálení 1 litru paliva budeme potřebovat řádově 10.000 litrů vzduchu. Tento ideální směšovací poměr se někdy označuje jako stechiometrická směs. Pro usnadnění popisu jednotlivých režimů byl zaveden součinitel přebytku vzduchu – lambda. Hodnota 1 vyjadřuje ideální poměr, hodnoty větší než 1 náleží chudé směsi, hodnoty menší než 1 vyjadřují bohatou směs. I když v různých provozních režimech práce motoru se využívá různých směsí, od chudých (lambda 1,05 - 1,3) nabízejících nízkou spotřebu při částečných zatíženích, až pro bohatou (lambda 0,85 - 0,95) pro vysoké výkony při plném zatížení, stacionární (ustálený) režim práce motoru se u dnešních motorů pohybuje v úzkém intervalu kolem lambda = 1 (směs potřebná pro správnou činnost katalyzátoru). Toto platí pro motory atmosféricky plněné i pro motory přeplňované. [7]

3.1. Složení výfukových plynů

Dusík N2
Dusík ve výfukových plynech pochází z nasávaného vzduchu.

Kyslík O_2
Volný kyslík pochází ve výfukových plynech z nasávaného vzduchu.
Ve zvětšené míře se volný kyslík vyskytuje ve výfukových plynech zážehových motorů tehdy, jedná-li se o spalování chudé směsi s přebytkem vzduchu (vzdušný součinitel $\lambda > 1$).

Oxid uhličitý CO_2
Oxid uhličitý vzniká dokonalým spálením (oxidací) uhlíku (C) obsaženého v palivu prostřednictvím kyslíku (O_2), který se nachází v nasávaném vzduchu.

Vodní páry H_2O
Voda vzniká slučováním vodíku (H_2) obsaženém v palivu s kyslíkem (O_2) obsaženém v nasávaném vzduchu.

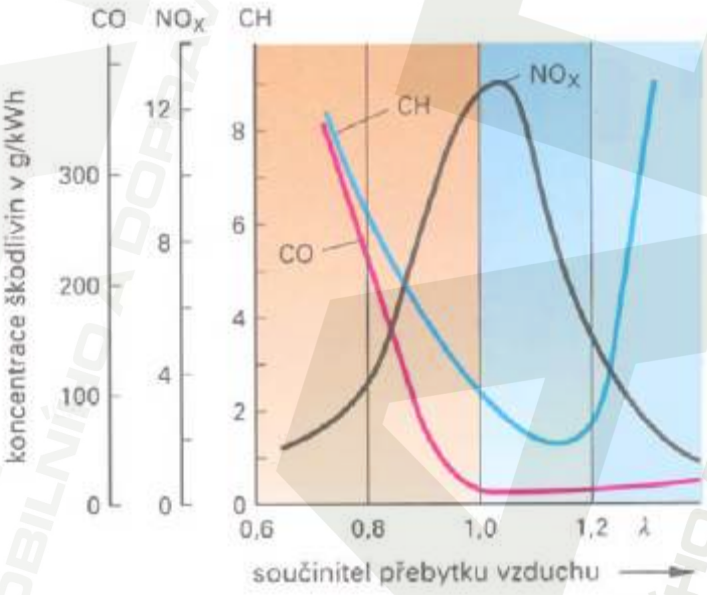
Oxidy dusíku NO_X
směs oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO_2).
Dusík se dostává do spalovacího prostoru v čerstvém vzduchu. Chemickou sloučeninu vytváří dusík (N_2) a kyslík (O_2) ve spalovacím prostoru za vysokých teplot a tlaků. Čím větší je teplota a tlak ve spalovacím prostoru motoru, tím více se tvoří NO. NO se pak slučuje se vzdušným kyslíkem (O_2) a vzniká NO_2.

Oxid uhelnatý CO
Tento škodlivý plyn vzniká spalováním bohaté směsi ($\lambda < 1$). Vzhledem k nedostatku kyslíku (O_2) v bohaté směsi dochází k nedokonalému spalování uhlíku (C), který je obsažen v palivu, na oxid uhelnatý (CO).

Uhlovodíky HC
Ve výfukových plynech se objevují jednak nespálené uhlovodíky a jednak uhlovodíky jako produkt nedokonalého spalování zápalné směsi.

Oxid siřičitý SO_2
Oxid siřičitý (SO_2) vzniká slučováním síry (S) s kyslíkem (O_2) obsaženým v nasávaném vzduchu. Síra (S) je obsažena v palivu, přičemž limitní hodnoty jsou vyšší u motorové nafty než u benzinu. Sloučením SO_2 s vodou (H_2O) vznikají sirné kyseliny.

Pevné částice PM
Saze vznikají ve vznětových motorech při plném zatížení v důsledku krakování (štěpení uhlovodíkových řetězců), vysoké teploty a místního nedostatku vzduchu.



Obr. 3.1. *Závislost hlavních škodlivin na součiniteli přebytku vzduchu λ u zážehových motorů* [6]

4. Přeplňování

Účelem přeplňování spalovacích motorů je zvýšení množství vzduchu, a tím i dodávky paliva do spalovacího prostoru za jednotku času. Výsledkem je vyšší točivý moment a výkon u objemově srovnatelných motorů, resp. dosažení obdobných parametrů výkonu a točivého momentu z menšího zdvihového objemu. Současně tedy klesá měrná spotřeba (udává množství spotřebovaného paliva v gramech na kWh) i výkonová hmotnost (vyjadřuje poměr hmotnosti motoru k nejvyššímu výkonu motoru). Uvedené vlastnosti tedy dovolují stavbu objemově malého motoru, který má výkonové parametry podstatně většího motoru při dosažení nízké spotřeby.

Přeplňování nabízí řešení jedné zásadní nevýhody spalovacího motoru. Tou jsou nízké hodnoty točivého momentu při nízkých (v praxi nejčastěji využívaných) otáčkách motoru. Zvýšení plnících tlaků znamená také vyšší maximální tlaky ve spalovacím prostoru, a tedy i větší zatížení pro klikový hřídel a jeho ložiska nebo samotný píst. Limitem stlačení směsi ve válci (tj. kompresního poměru) je také klepání motoru nebo samozápaly. Optimální využití oktanového potenciálu paliva dnes řeší řídící jednotka, například řízením předstihu zážehu motoru, který bývá podstatně zmenšen proti atmosférickým motorům.[7]

4.1. Přeplňování turbodmychadlem

Přeplňování turbodmychadlem je dnes nejpoužívanější způsob využití výfukových plynů. Přeplňují se vznětové i zážehové motory. Výkon motoru lze takto zvýšit o 20 – 90 % při poměrně mírném zvýšení spotřeby paliva.

Přeplňování může být:
Nízkotlaké s přetlakem 0,029 – 0,049 MPa
Středotlakové s přetlakem 0,049 – 0,078 MPa
Vysokotlaké s přetlakem více jak 0,078 MPa [2]

4.1.1. Historie

V letech 1909 – 1925 navrhl švýcarský konstruktér Alfred Bűch první výfukové turbodmychadlo. Přeplňování turbodmychadlem se krátce před II. světovou válkou dostalo do letadel (bombardéry B17) a lodních motorů. Prvními přeplňovanými osobními automobily se staly Chevrolet Corvair Monza a Oldsmobile Jetfire v roce 1963. Jejich nespolehlivost je přes revoluční konstrukci přivedla k rychlému stažení z trhu.

V 70. letech se turbodmychadlo dostalo do světa motoristického sportu a popularitu mu zajistily závody formule 1. Velké automobilky, které chtěly získat na prestiži, nabízely koncem 70. let alespoň jeden vrcholný model s přeplňováním. K průkopníkům turbodmychadel patřilo Porsche, které mělo svůj model 911 Turbo na trhu už v roce 1975 a od té doby je Turbo vrcholným reprezentantem řady 911. Do běžných vozů přivedl tento způsob přeplňování Saab, když v roce 1976 představil svůj první přeplňovaný čtyřválec.

Přeplňované motory z přelomu 70. a 80. let byly zpravidla konstruovány s cílem zvýšení výkonu, ale současně měly vyšší spotřebu. Pokračující ropná krize tehdejším přeplňovaným motorům nepřála a majetnější řidiči sportovních vozů s turbodmychadlem si jen těžko zvykali na (tehdy ještě velkou) turbo-prodlevu.

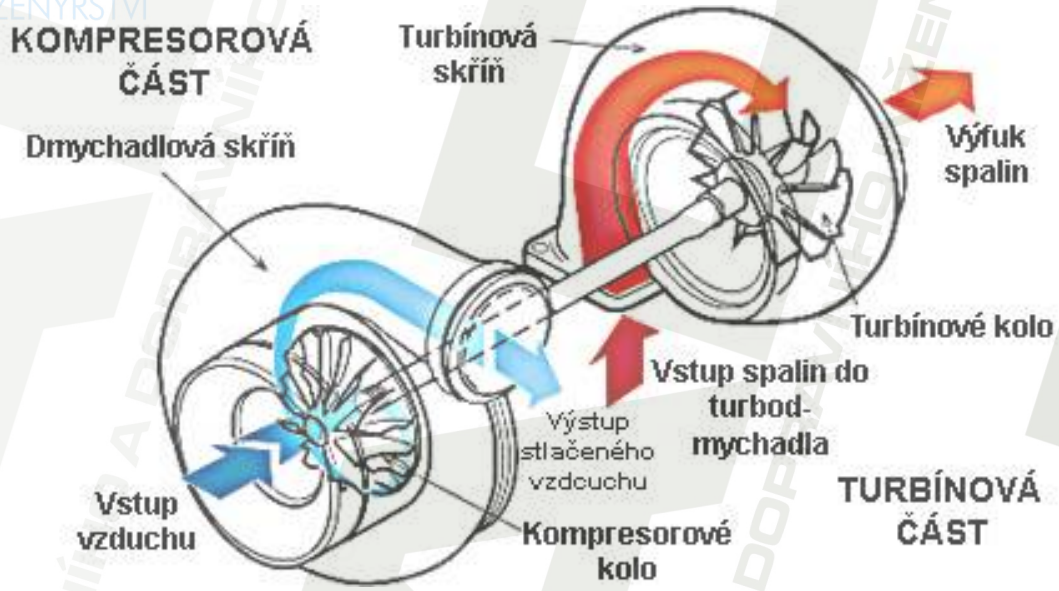
Novým impulsem se měl stát přeplňovaný vznětový motor, který přivedl na trh jako první Mercedes. Šlo o model 300 SD z roku 1978, který byl v roce 1981 následován prvním

přeplňovaným dieselovým Volkswagenem Golf. Dalšími skoky kupředu byly na začátku 90. let motory TDI se zavedením proměnné geometrie lopatek dmychadla, stejně jako integrace elektroniky do řízení vznětových motorů.

Dnešní přeplňované motory využívají potenciál turbodmychadla pro snižování spotřeby paliva (tzv. "downsizing"- zmenšování objemu motoru, při zachování výkonu díky turbodmychadlu a současné snížení spotřeby) a s tím související omezení emisí (CO_2). [7]

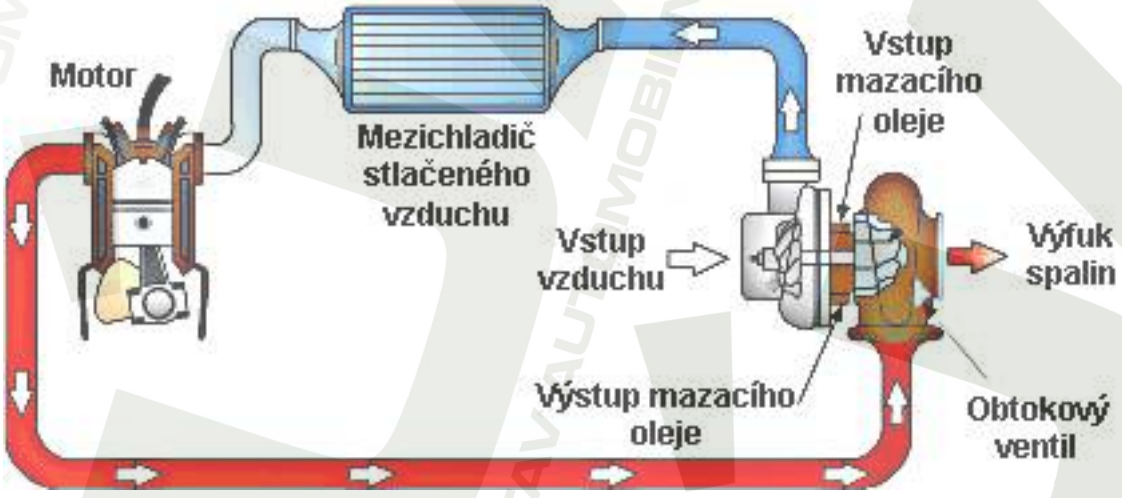
4.2. Turbodmychadla

Turbodmychadlo se skládá z kompresoru a výfukové turbíny, které jsou uloženy na společném hřídeli.



Obr. 4.1. *Turbodmychadlo* [5]

Výfuková turbína převádí část energie výfukových plynů na rotační energii a pohání kompresor. Do kompresoru je nasáván vzduch a ten jej dopravuje přes chladič stlačeného vzduchu a sací potrubí do spalovacího prostoru motoru.



Obr. 4.2. *Schéma přeplňovaného motoru s mezichladičem stlačeného vzduchu* [5]

Kompresor stlačuje vzduch, který proudí do spalovacího prostoru vyšším tlakem než je okolní atmosférický tlak. Hřídel turbodmychadla je uložen v kluzných ložiskách mazaných olejovým systémem motoru. Vysoké oběžné rychlosti turbíny a dmychadla (až 200.000 ot./min) a teplotní rozdíl až 1000°C mezi kompresorem a turbínou vyžadují vysoce přesnou výrobu a odolné materiály. Turbínové kolo je zpravidla vyrobeno z žárupevné niklové slitiny, oběžné kolo dmychadla je z hliníkové slitiny. Skříň turbíny a skříň ložisek je z temperované šedé litiny, skříň dmychadla z hliníkové slitiny. Některá turbodmychadla dnes bývají chlazena vodou. [2]

4.3. Řízení a regulace plnícího tlaku

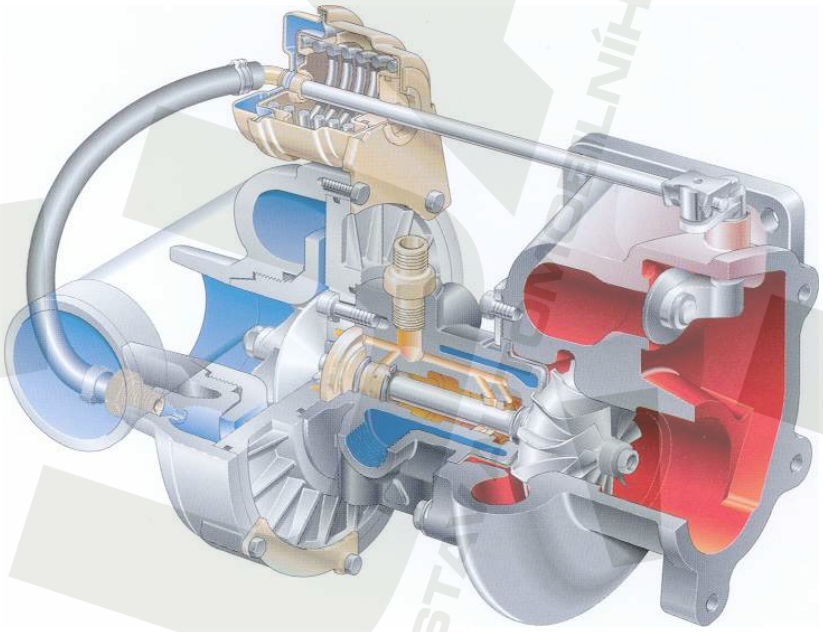
Moderní přeplňované motory mají maximum momentu položeno do nízkých otáček motoru (kolem 2000 ot/min). Aby toho bylo dosaženo, je těleso turbodmychadla dimenzováno na malé hmotnostní toky výfukových plynů, odpovídající nízkým otáčkám. S vyššími otáčkami a zatíženími by docházelo k nežádoucímu zvýšení plnícího tlaku, a proto je třeba plnící tlak omezit.

4.3.1. Regulace pomocí obtokového regulačního ventilu

Jedná se o často používaný způsob regulace, zejména u nákladních automobilů. Turbodmychadlo je navrženo tak, aby již při nízkých otáčkách dodávalo velké množství vzduchu. Jakmile plnící tlak dosáhne určité hodnoty, otevře se obtokový regulační ventil a část výfukových plynů je přepouštěna mimo turbínu přímo do tlumiče výfuku. Tím se omezuje další zvyšování plnícího tlaku, které by vedlo k velkému namáhání motoru.

Při použití u zážehových motorů musí být v případě zavřené škrtící klapky při brzdění motorem, propojena plnící a sací větev dmychadla odlehčovacím ventilem, aby nedošlo k poškození dmychadla tlakovými pulsacemi.

Regulace plnícího tlaku může být čistě pneumatická, ale u motorů s elektronicky řízeným vstřikováním bývá pneumatické ovládání řízeno elektronicky přes převodník.



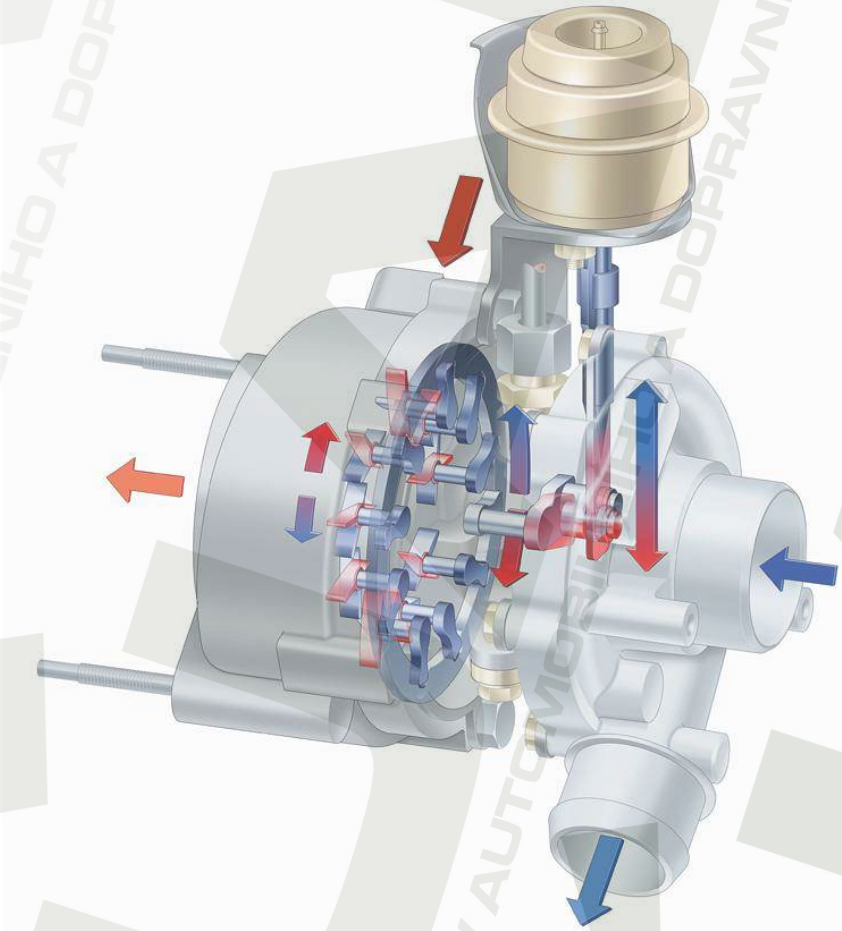
Obr. 4.3. *Turbodmychadlo s regulací obtokovým ventilem*[8]

4.3.2. Variabilní geometrie lopatek VGT

Tento způsob regulace je používán stále častěji, protože turbodmychadlo může mít menší rozměry a plnící tlak je regulován v celém rozsahu otáček. Regulace je v současnosti řízena elektronicko–pneumaticky.

Turbodmychadla VGT využívají zákona kontinuity toku tekutin, který říká, že konstantní objem plynu proudí potrubím tím rychleji, čím menší má potrubí průřez. Tedy ve srovnání s regulací plnícího tlaku, u dmychadla VGT prochází turbinou stále celý objem výfukových plynů.

Při nízkých otáčkách motoru je požadován vysoký plnící tlak, takže je nastavitelnými lopatkami zmenšen průřez, kterým proudí výfukové plyny, tlak před lopatkami se zvýší, rychlost plynů se ve zúženém místě také zvýší, a to způsobí roztočení turbodmychadla, a tedy zvýšení plnícího tlaku na sací straně. Ve vysokých otáčkách motoru, kdy je třeba plnící tlak omezit, je průtočný průřez v místě rozváděcích lopatek maximálně zvětšen, tlak se tedy zmenší a turbodmychadlo se tak točí nižšími otáčkami.

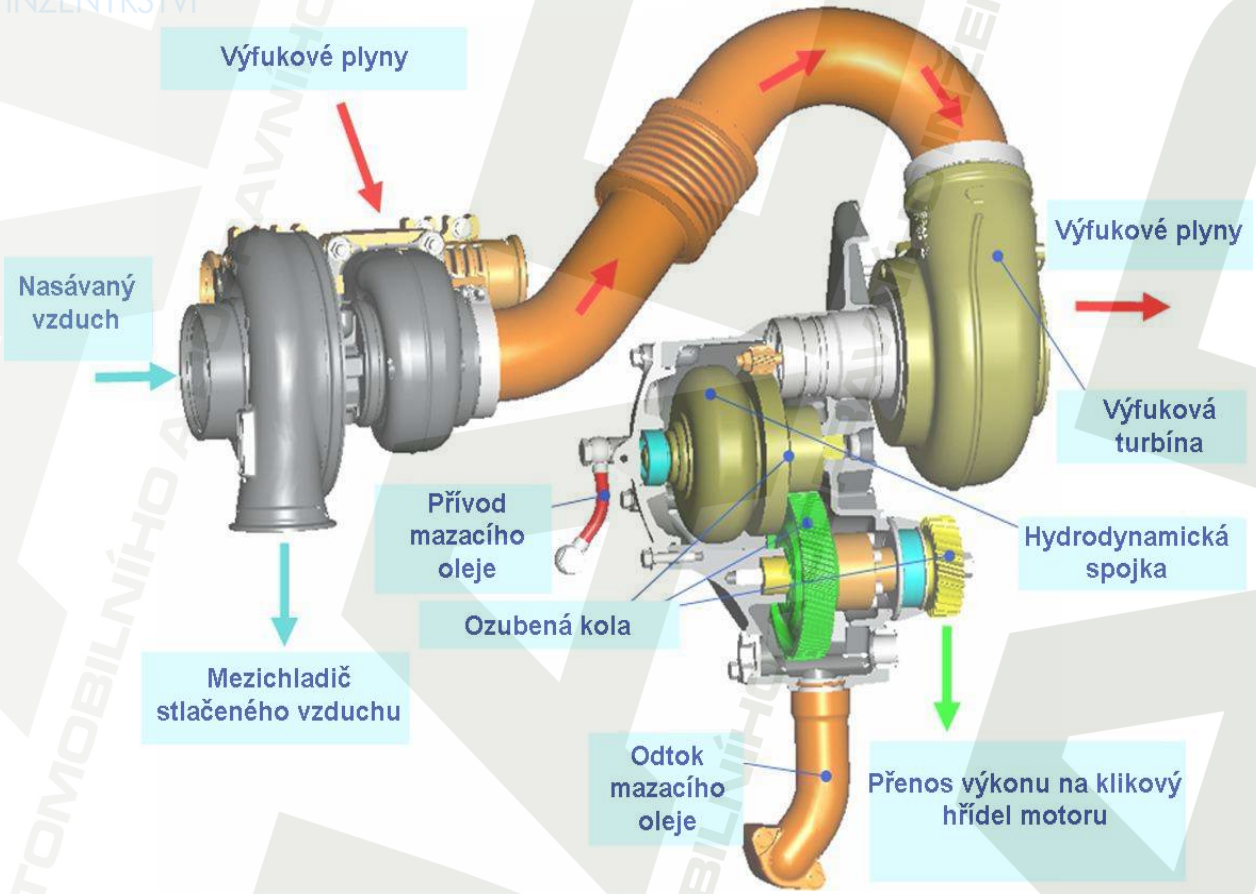


Obr. 4.4. *Turbodmychadlo s variabilní geometrií lopatek* [8]

5. Turbocompounding

Turbocompounding byl poprvé využit v leteckých motorech v roce 1940, bohužel u spalovacího motoru osobního automobilu bylo velmi složité přenést energii přímo na kola, a tak se tato technologie ukázala jako nepoužitelná.

V roce 1980 vyvinula Scania systém, při kterém je výkon turbíny přenášen přes ozubená soukolí a hydrodynamickou spojku přímo na klikový hřídel motoru. Hydrodynamická spojka přizpůsobuje otáčky turbíny otáčkám motoru.



Obr. 4.1. *schéma turbocompoudního motoru* [2]

V okamžiku, kdy výfukové plyny opouštějí spalovací prostor, jejich teplota dosahuje 700°C, po výstupu z turbodmychadla je tato teplota snížena přibližně na 600°C. Tento rozdíl znamená, že část energie je využita pro uvedení turbíny turbodmychadla do pohybu a zbývající teplo odchází bez využití výfukovým potrubím.

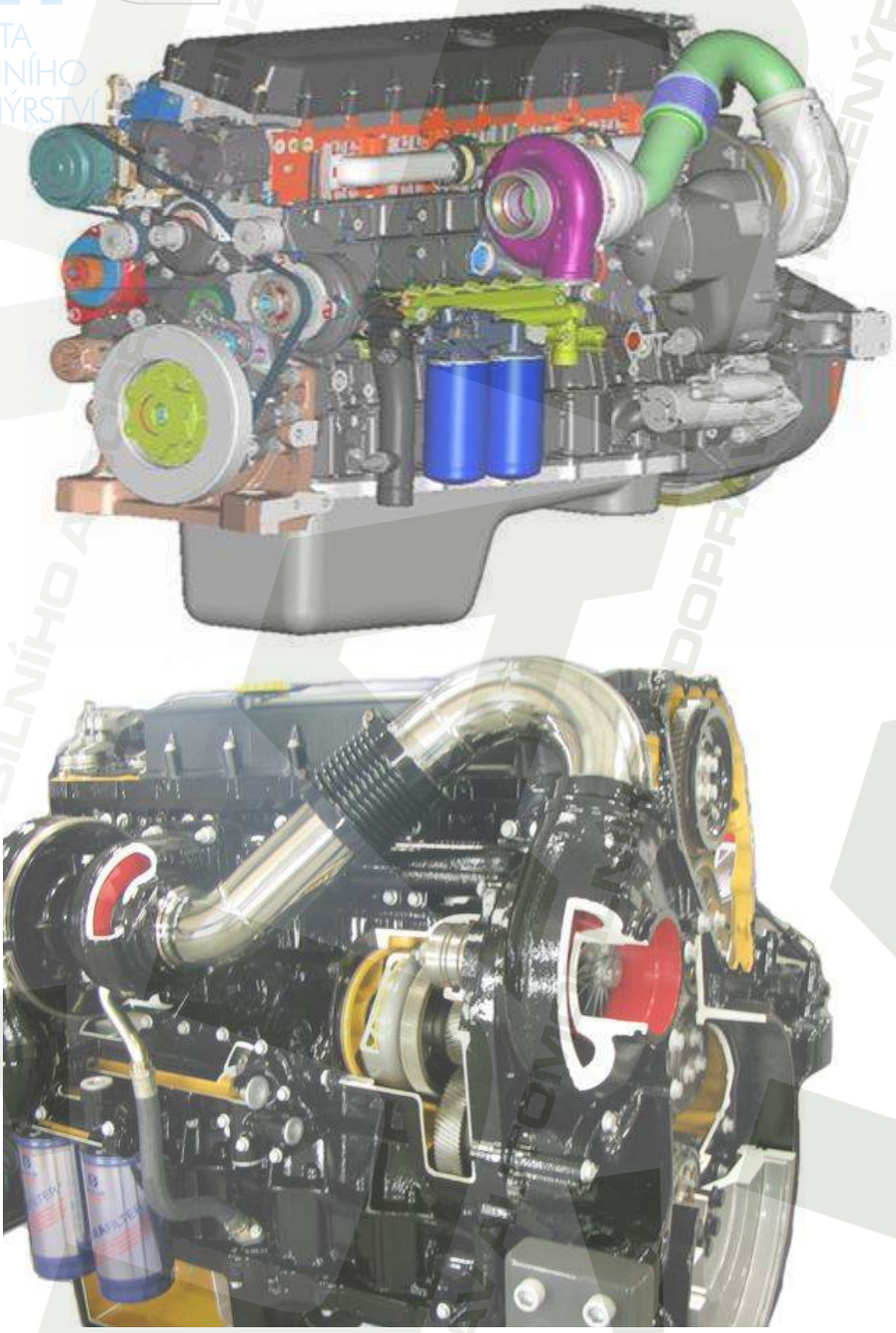
Turbocompounding využívá vysoký podíl kinetické energie obsažené ve výfukových plynech pomocí výkonové turbíny. Turbína je stejného typu, jako se nachází v turbodmychadle a je umístěna ve výfukovém potrubí za turbodmychadlem. Výfukové plyny procházejí turbodmychadlem a to dodává stlačený vzduch do spalovacího prostoru. Plyny dále pokračují do výkonové turbíny v turbocompoundu. Otáčky v turbocompoundu jsou okolo 50 000 – 55 000 min^{-1}. Výkon je přenášen pomocí ozubeného soukolí do hydrodynamické spojky, která přizpůsobuje obvodové rychlosti mezi klikovým hřídelem a turbínou. Přes hydrodynamickou spojku a převod klikového hřídele je výkon přenášen na setrvačník motoru

a do převodovky. Teplota výfukových plynů za výkonovou turbínou se pohybuje okolo 500°C.

Výhodou turbocompoundního motoru je vyšší točivý moment, výkon a nižší spotřeba paliva ve srovnání s identickým motorem bez turbocompoundu.

Tyto motory se používají především u strojů, které pracují v konstantním režimu otáček, proto tento systém není vhodný do běžného automobilového provozu.

Turbocompoundní technologii používají automobilky Scania a Volvo ve svých tahačích, využití se našlo i v zemědělství, např. v samojízdné řezačce New Holland FR9060, v pásovém traktoru Case Steiger 485 a jiných strojích.



Obr. 5.2. *Turbocompoundní motor IVECO Cursor* 13TCD [9]

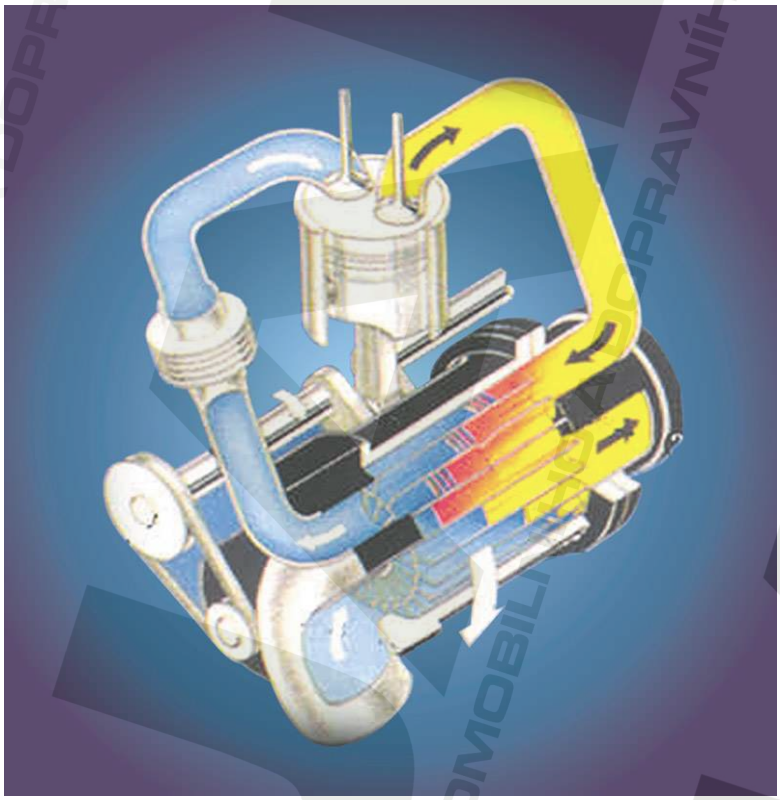
6. Přeplňování tlakovými vlnami – COMPREX

Ke stlačování vzduchu se využívá tlaku výfukových plynů, které působí na vzduch v komorách oddělených lopatkami rotoru. Rotor je poháněn ozubeným řemenem od klikového hřídele.

Výfukové plyny ze spalovacího prostoru vstupují do komory mezi lopatkami rotoru, ve které se nachází čerstvý vzduch. Vzduch je v komoře stlačen tlakovou vlnou výfukových plynů ke krátce uzavřenému výstupu. Pootočením rotoru se komora otevře a stlačený vzduch vstupuje do plnícího potrubí motoru. Komora se otáčením uzavírá, plyny se odrážejí a odcházejí do výfukového potrubí. V komoře se vytvoří podtlak a je znovu nasáván vzduch. Tento děj se neustále opakuje. Rovnoměrného plnění dosáhneme co nejvyšším počtem komor.

Výhodou tohoto systému je rychlá reakce na změnu jízdního režimu a minimální příkon potřebný pro pohon rotoru, nevýhodou je velký zástavbový prostor.

Sériově byl systém Comprex použit ve voze Mazda 626 se vznětovým motorem o objemu 2 l, výkon motoru byl pouze 55 kW. [3],[4]

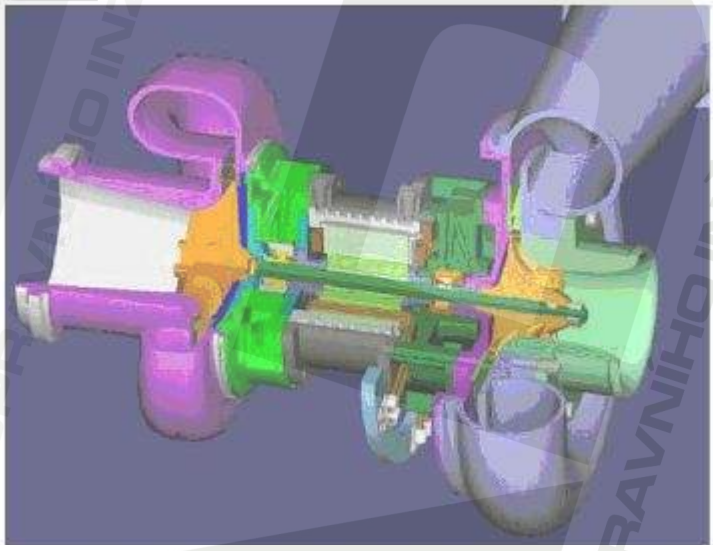


Obr. 6.1. *Comprex* [3]

7. Kombinace výfukové turbíny a generátoru

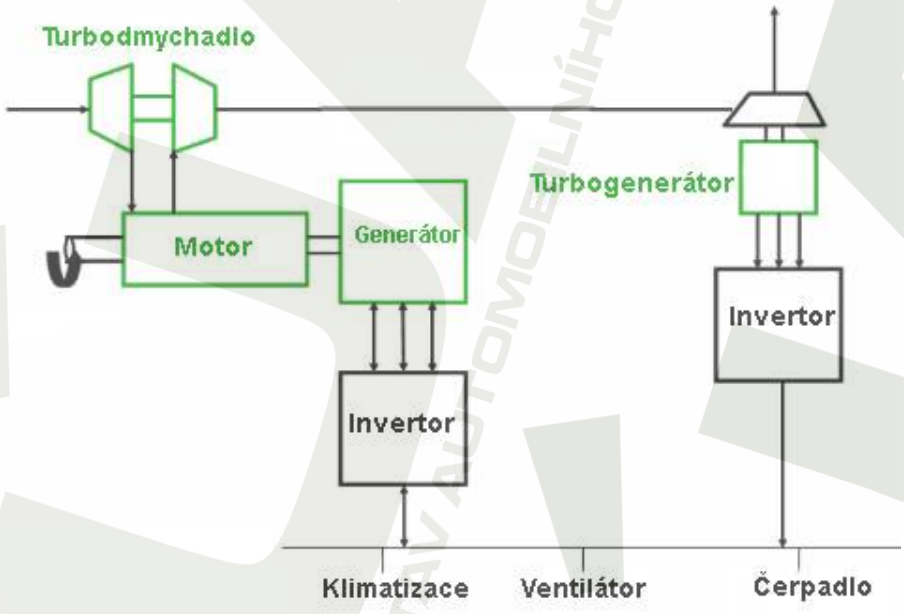
Tato technologie by mohla být využita k napájení všech spotřebičů ve vozidle. Ve spojení s hybridním pohonem by mohla být energie ukládána do akumulátorů, nebo by jí byl přímo napájen elektromotor sloužící pro pohon vozidla.

Řešení firmy Caterpillar spočívá v integraci generátoru do tělesa turbodmychadla. Generátor je umístěn mezi výfukovou turbínu a kompresor.

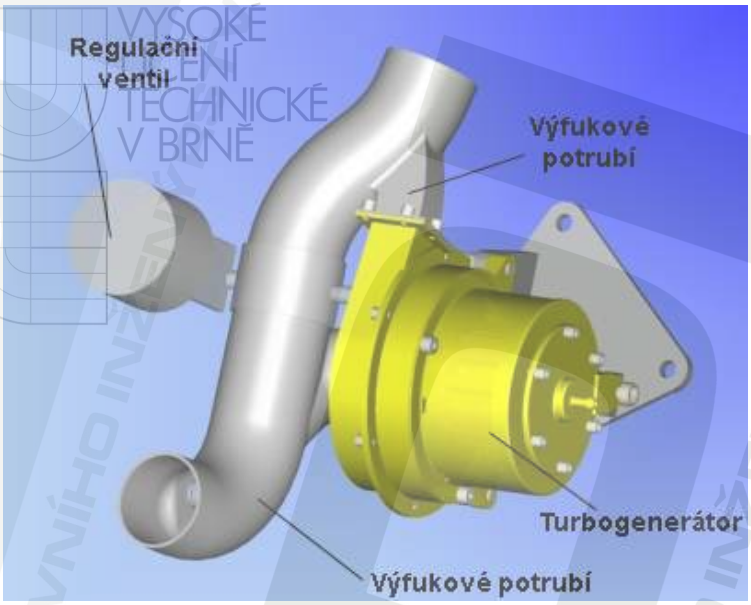


Obr. 6.1. *Kombinace turbodmychadla a generátoru firmy Caterpillar* [3]

Firma John Deere vyvinula odlišné řešení, kdy je za klasickým turbodmychadlem umístěna další výfuková turbína s generátorem. Turbína je umístěna paralelně s výfukovým potrubím.



Obr. 7.2. *Schéma umístění turbogenerátoru John Deere* [12]



Obr. 7.3. *Umístění turbogenerátoru ve výfukovém potrubí* [12]

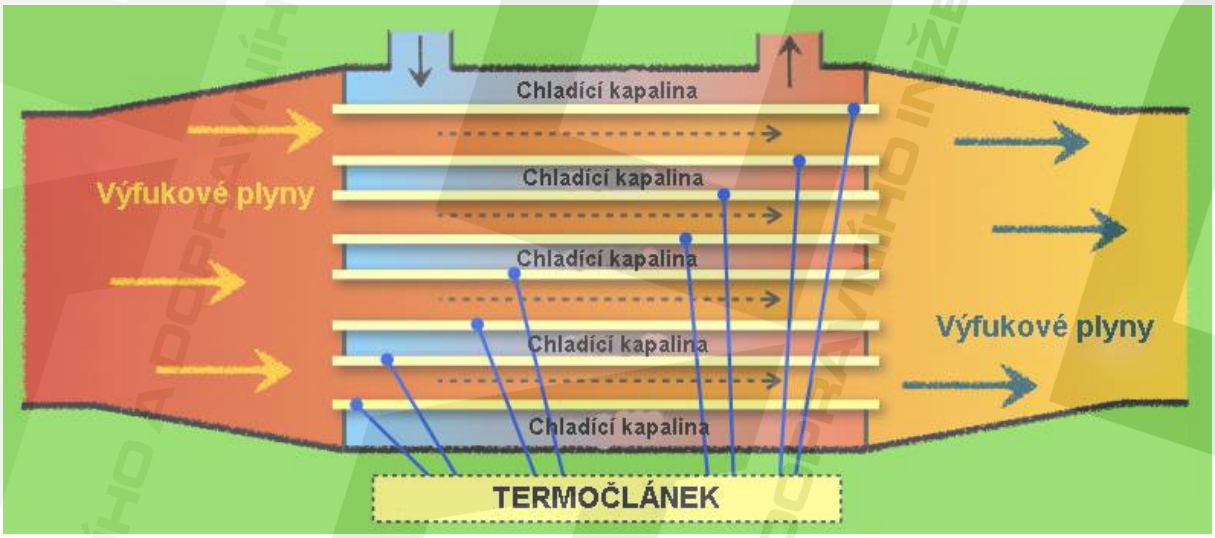
Účinnost turbogenerátoru je asi 8O%, účinnost klasického alternátoru je kvůli vysokým ztrátám pouze 60%. Při plném zatížení motoru je přebytečná energie ukládána do akumulátorů, naopak při volnoběhu a velké spotřebě energie je energie spotřebičům dodávána z akumulátoru.

Vzhledem k tomu, že systém je poměrně jednoduchý a je částečně založen na stávajících technologiích, mohl by být implementován do osobních a nákladních automobilů, autobusů a jiných vozidel během několika let.

Úspora paliva se v reálném provozu pohybuje okolo 5 – 10 %.

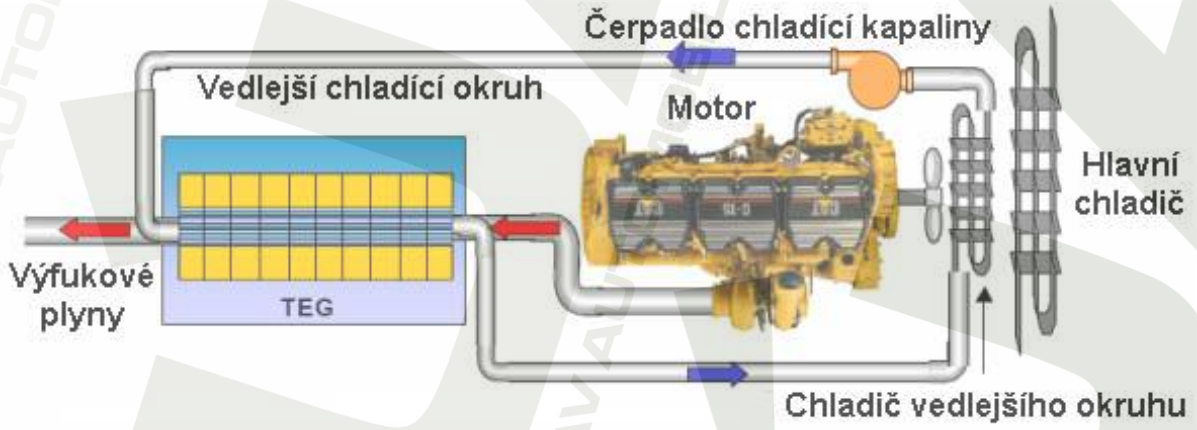
8. Využití odpadního tepla

Provoz automobilu vyžaduje elektrickou energii, která se získává řetězcem procesů, při nichž dochází ke značným ztrátám. Chemickou energii obsaženou v palivu je třeba nejprve v motoru přeměnit na energii mechanickou, a teprve poté pomocí alternátoru získat energii elektrickou. Snahou je tedy dopracovat se k elektrické energii procesem s větší účinností. U BMW pro to využívají systém s palivovými články APU (Auxiliary Power Unit) jako zdroj elektrické energie pro dobíjení akumulátoru, druhou zkoumanou možností je využití odpadního tepla motoru.



Obr. 8.1. *Schéma termoelektrického generátoru* [10]

Při využití odpadního tepla jde o přímou přeměnu tepelné energie na energii elektrickou. V tomto případě jde o technologii používanou již skoro čtyřicet let pro získávání elektrické energie k provozu kosmických sond. Termoelektrický proces tvorby elektrické energie využívá vlastnosti termoelektrických polovodičových prvků, u nichž elektrické napětí vytváří teplotní spád.



Obr. 8.2. *Schéma termoelektrického generátoru v kombinaci s přeplňovaným motorem Caterpillar* [12]

Ještě před pár lety měly tyto termoelektrické generátory účinnost jen několik procent, takže pro automobily vhodné nebyly. Výkon těchto modulů ovšem díky velkému pokroku ve vývoji vhodných materiálů pokročil natolik, že se situace podstatně změnila a řeší se, jak se s integrací termoelektrických generátorů do automobilu vypořádat.

Zatímco v kosmických sondách slouží za zdroj tepla například rozpadající se radioaktivní prvky, v automobilu se nabízí odpadní teplo motoru. Termoelektrický generátor byl tedy přidán do výfukového systému, přičemž jeho průtočné průřezy musely být samozřejmě přizpůsobeny tak, aby nedošlo k ovlivnění charakteristik spalovacího motoru.

Odvedené teplo by mohlo chybět při některých fázích provozu katalyzátorů a filtrů pevných částic. Tento problém se vyřešil obrácením základního pracovního procesu, kdy je termoelektrickému generátoru elektrický proud dodáván a katalyzátor je pro účinné snížení škodlivých emisí zahříván. Jakmile spaliny dosáhnou potřebné teploty, proces se znovu vrátí k výrobě elektrické energie. Aktuálně systém termoelektrického generátoru podává u BMW výkon okolo 200 W, rychlý vývoj nových materiálů by jej měl zvýšit na 1000 W. Koncern Volkswagen udává výkon svého generátoru až 600 W. V budoucnu lze počítat s poklesem spotřeby paliva v běžném provozu kolem 5 %. Termoelektrický generátor je také ideálním doplněním již praktikovaného procesu rekuperace, kdy je při brzdění nebo během jízdy setrvačností akumulátor dobíjen elektrickou energií, získanou z pohybové energie automobilu. [11]

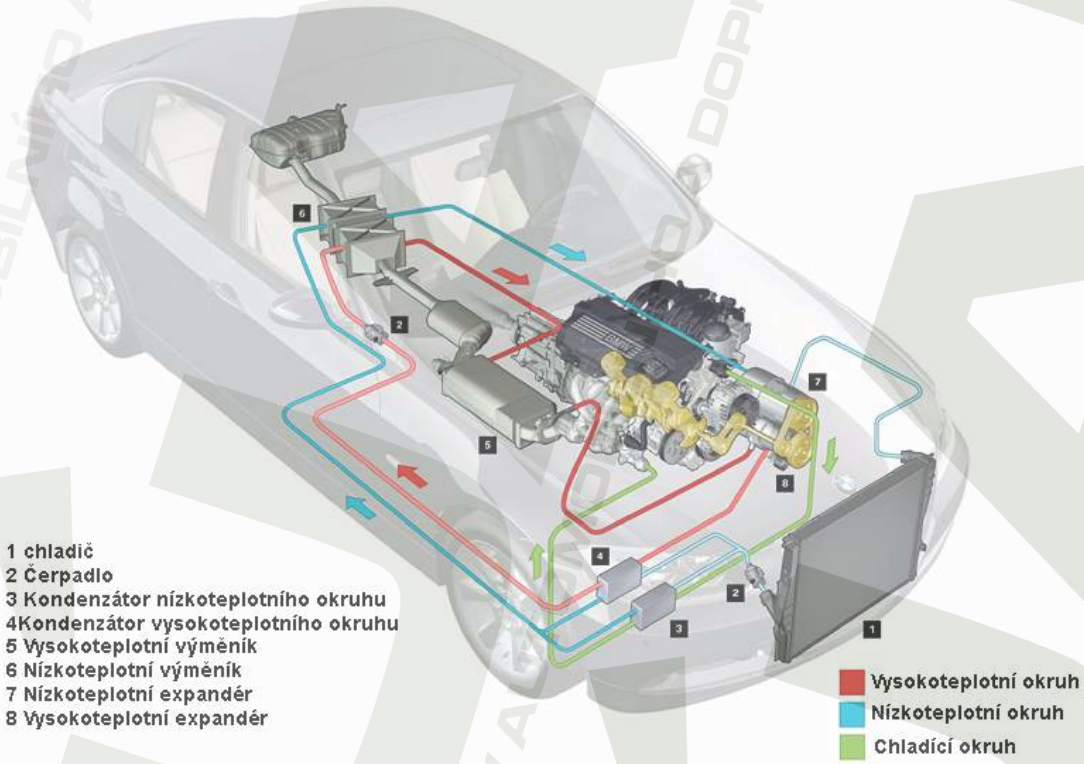
Obr. 8.3. *Umístění termoelektrického generátoru ve vozidle* BMW 5 [11]

9. BMW Turbosteamer

Turbosteamer pracuje na principu parního stroje. Ve dvou okruzích je kapalina měněna na páru teplem výfukových plynů. Primárním zdrojem energie je vysokoteplotní okruh, který prochází výměníkem umístěným ve výfukovém potrubí blízko za motorem. Teplota páry ve vysokoteplotním okruhu se pohybuje okolo 550°C a její tlak je až 4 MPa. Vyrobená pára směřuje do expandéru, který je napojen přímo na klikový hřídel motoru. Přivedená pára expanduje a předává energii klikovému hřídeli. Během této práce se teplota páry sníží na 150 až 200°C.

Další část energie výfukových plynů přebírá z velké části nízkoteplotní okruh, ve kterém cirkuluje etanol. Teplota v tomto okruhu dosahuje asi 105°C a tlak až 0,4 MPa. To však nestačí k pohonu druhého expandéru, a proto je do okruhu zařazen průchod výměníkem na konci výfukového potrubí, kde je ještě dost nezužitkované energie. Teplota v nízkoteplotním okruhu pak dosahuje asi 150°C a pára z tohoto okruhu také pomáhá roztáčet klikový hřídel motoru. Celkově lze tímto způsobem, podle BMW, zvýšit účinnost spalovacího motoru asi o 15 %.

Komponenty prototypového systému byly zkoušeny na přeplňovaném zážehovém čtyřválci BMW 1,8 l. Úspora paliva v reálném provozu má dosáhnout asi 1,5 l/100 km, výkon motoru se přitom zvýší o 10 kW a točivý moment asi o 20 Nm. [14]



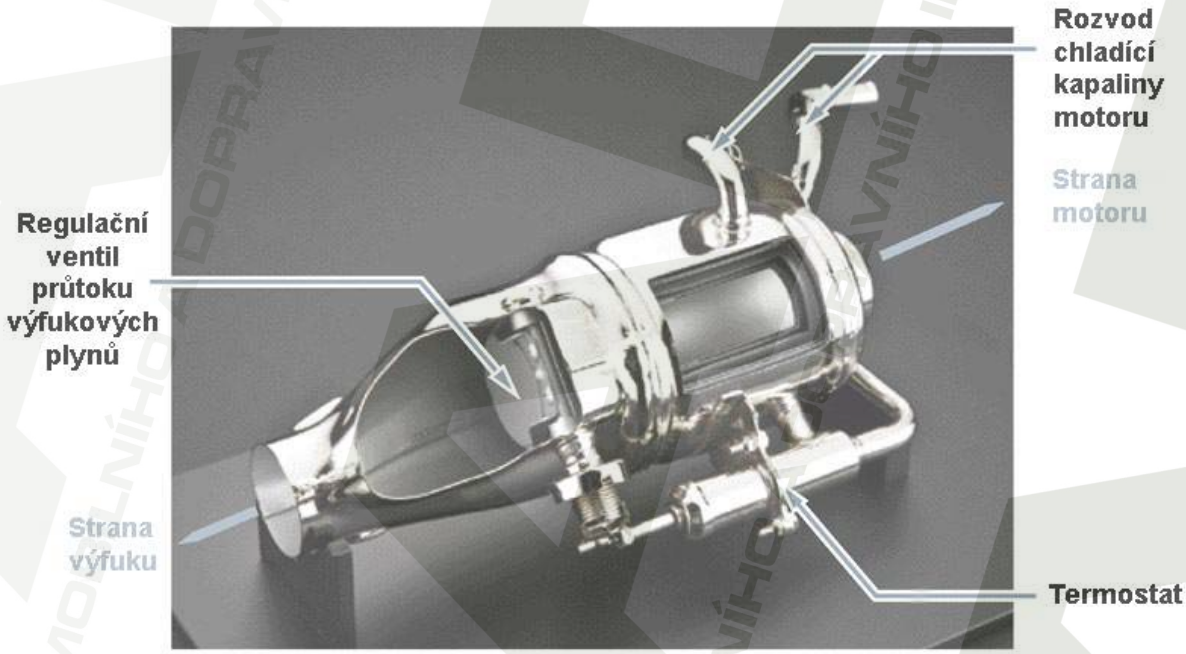
Obr. 9.1. *integrace parního stroje do vozidla* [13]

10. EHR – Exhaust Heat Recovery System

Jde o rekuperaci tepla z výfukových plynů, při které se využívá tepla výfukových plynů k ohřátí chladící kapaliny bezprostředně po spuštění motoru. Tuto technologii využívá firma Lexus ve svých hybridních automobilech.

Díky rekuperaci tepla se zkracuje doba, za kterou spalovací motor dosáhne provozní teploty. Poté, co se spalovací motor zahřeje na provozní teplotu, je možné jej dříve vypnout a využívat k pohonu vozidla pouze elektromotor.

Při zkouškách za chladného počasí, u modelu Lexus RX 450h, došlo k ohřátí chladící kapaliny se systémem EHR o 10 minut dříve než bez něj. Díky tomu došlo ke zlepšení spotřeby v městském provozu o 15 %. [15]



Obr. 10.1. *EHR systém* [13]

11. Recirkulace výfukových plynů

Recirkulace výfukových spalin je velmi účinnou metodou snižování oxidů dusíku (NOx) u zážehových i vznětových motorů. Výfukové plyny se chovají jako inertní plyny, nezúčastňují se tedy spalování zápalné směsi. Snížením podílu kyslíku v nasávaném vzduchu a také díky poměrně velké schopnosti výfukových plynů pohlcovat teplo, dochází ke snížení špičkové teploty ve spalovacím prostoru. Ta je hlavní příčinou tvorby oxidů dusíku.

Zvyšováni podílu zbytkových plynů může do určité hodnoty pozitivně působit na přeměnu energie a tím i na spotřebu paliva. Další zvýšení výfukových plynů redukuje maximální spalovací teplotu, a to vede ke snížení oxidů dusíku. Pokud dojde ke zvýšení podílu výfukových plynů nad určitou hranici, dochází k nedokonalému spalování a tím ke zvýšení emisí uhlovodíků a spotřeby paliva. [3]

11.1. Rozdělení recirkulace spalin:

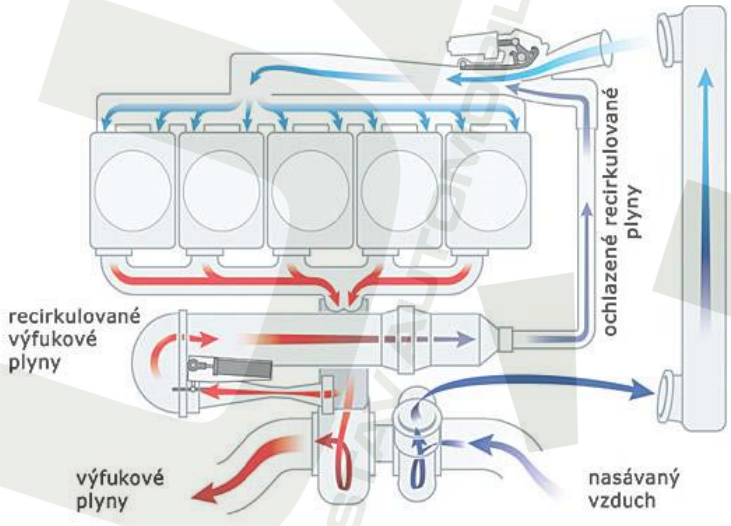
- Interní recirkulace spalin
- Externí recirkulace spalin

11.1.1. Interní recirkulace spalin

Množství zbytkových plynů zůstávajících ve válci je ovlivněno variabilním časováním ventilů. Při překrytí ventilů je část výfukových plynů vrácena ze spalovacího prostoru zpět do sacího potrubí. Podíl plynů, který bude při následném sání vrácen spolu s čerstvou směsí do spalovacího prostoru, závisí na době překrytí ventilů.

11.1.2. Externí recirkulace spalin

Jde o zpětné vedení části výfukových plynů do sání a následně do spalovacího prostoru. Ve spojovacím potrubí je umístěn ventil recirkulace spalin, který reguluje množství výfukových plynů přiváděných zpět do sání. Tyto ventily zpětného vedení výfukových plynů jsou v odborné literatuře často označovány jako AGR - ventily (z něm. Ab-Gas-Riickfůhr - Ventil), popř. EGR - ventily (z angl. Exhaust Gas Recirculation).

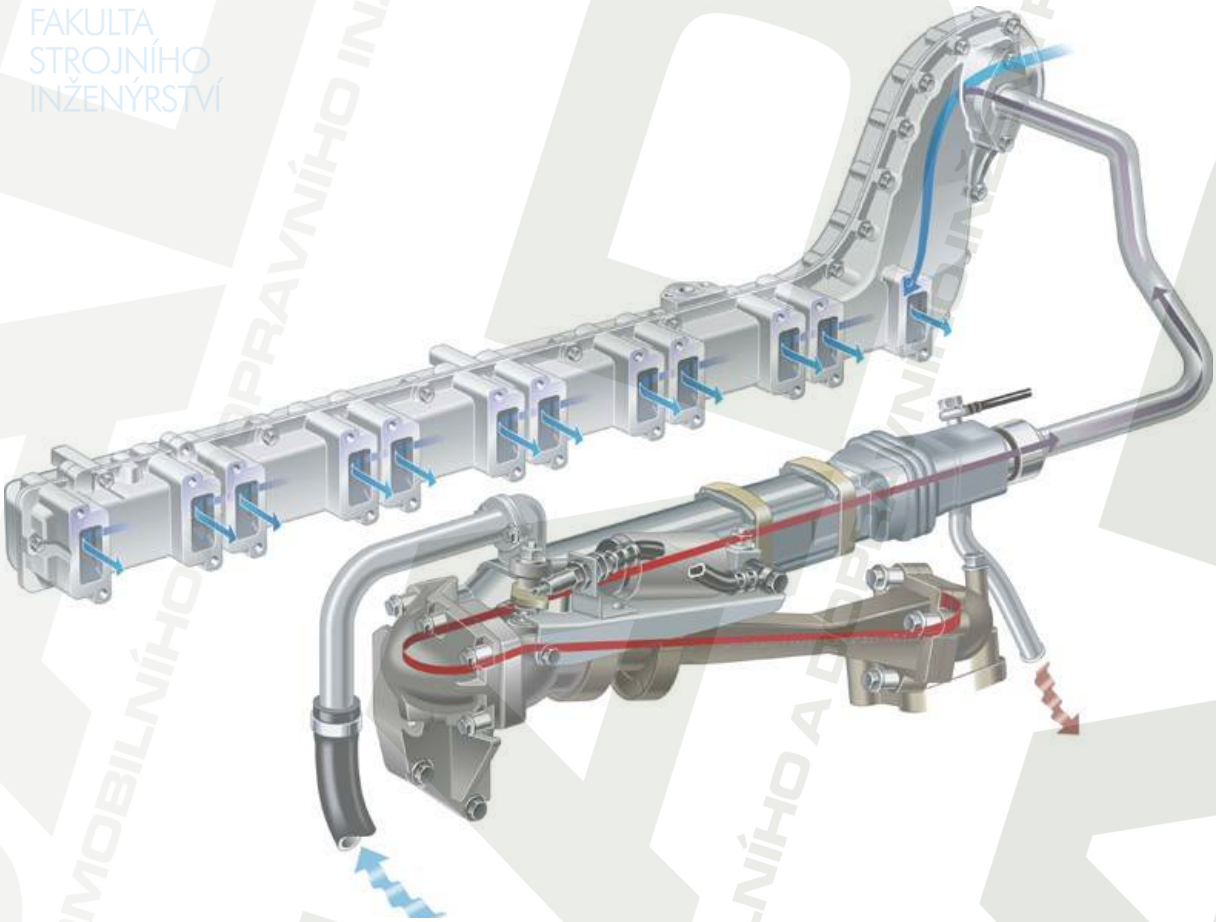


Obr. 11.1. *Schéma recirkulace palivových spalin* [16]

Ventil EGR je ovládán podtlakem. Používají se jednoduché membránové ventily, popř. jednomembránové ventily se snímačem teploty nebo s potenciometrem snímání jejich polohy.

V současnosti se pro řízení recirkulace výfukových plynů používají čím dál častěji hlavně elektromagnetické EGR - ventily. Tyto ventily pracují až desetinásobně větší rychlostí a mohou být přesněji ovládány řídicí jednotkou. Jelikož se tyto elektromagnetické ventily obejdou bez podtlaku, jsou i konstrukčně jednodušší.

Výfukové plyny vedené zpět do sání musí být ochlazovány v tepelném výměníku. Ten je většinou ochlazován kapalinou chladící soustavy motoru.



Obr. 11.2. *Chlazení výfukových plynů* [16]

U motorů s přímým vstřikováním benzínu přispívá recirkulace spalin v pracovních režimech s chudou směsí k tak velkému snížení emisí Nox, že je možné redukovat další opatření k dodatečnému čištění spalin.

12. Závěr

Budoucnost klasického spalovacího motoru je v poslední době hodně diskutovaným tématem, je zde ale ještě velký prostor pro zlepšování jeho konstrukce a tím i zvýšení jeho účinnosti. Existuje mnoho možností, jak využít odpadní energii motoru, ale některé jsou bohužel velmi složité a náročné na výrobu nebo údržbu. Rovněž vysoké náklady na vývoj a tím i vysoká cena zařízení, znemožňují zavedení do sériové výroby. Některé technologie mohou být zavedeny s příchodem nových materiálů.

Nejvíce rozšířenými v sériové výrobě se stala turbodmychadla využívající kinetickou energii proudících plynů. Díky jejich jednoduchosti a dlouhé životnosti, při správném zacházení, se začala používat převážně ve vznětových motorech. Dnes jsou turbodmychadly ve velké míře osazovány i zážehové motory, které nahrazují větší atmosférické, jde o tzv. "downsizing".

Za turbodmychadlem mají proudící plyny pořád dostatek kinetické energie a toho se využívá u compoudních motorů, kdy je výkon z turbíny přenášen přímo na klikový hřídel. Bohužel tyto motory našly uplatnění pouze u strojů pracujících v konstantním režimu otáček, např. tahače, bagry, zemědělské stroje.

Odpadní teplo se dá zužitkovat v termočlánku k výrobě elektrické energie, zde jsou překážkou stávající materiály a vysoká cena zařízení. Dosud zkoušené termočlánky podávaly výkon okolo 200 W, což je velmi málo k pokrytí spotřeby celého vozidla. V dopravních prostředcích najdou široké uplatnění a určitě se časem dostanou do sériové výroby.

Nejstarším vynálezem využívajícím k pohonu tepelnou energii je parní stroj. Ten by se dal v dnešní době použít v kombinaci se spalovacím motorem. Ovšem toto řešení bude poměrně nákladné a velmi náročné na údržbu, a proto se mi možnost zařazení do sériové výroby zdá nereálná.

Dle mého názoru má každá z uvedených technologií své klady a zápory a záleží pouze na výrobcích, jak se jim podaří s integrací těchto zařízení do dopravních prostředků vypořádat. I když se dnes hodně mluví o elektrickém pohonu a jiných alternativních pohonech, spalovací motor bude hrát i nadále značnou roli v automobilovém průmyslu.

13. Literatura

[1] RAUSCHER, Jaroslav. *Spalovací motory : Studijní opory*. Brno : [s.n.], 2005. 235 s.

[2] VLK, František. *Příslušenství vozidlových motorů : Vstřikování paliva vstřikovací systémy plnění a přeplňování snižování škodlivin Chlazení a mazání*. Brno : [s.n.], 2002. 338 s. ISBN 80-238-8755-6.

[3] ŠTOSS, Milan. *Spalovací motory I*. 2. vyd. Brno : VUT Brno, 1992. 263 s. ISBN 80-214-0417-5.

[4] RAUSCHER, Jaroslav. *Spalovací motory : Studijní opory*. Brno : [s.n.], 2005. 153 s.

[5] NICE, Karim . *How Turbochargers Work : Turbocharger Design* [online]. 2005 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <http://auto.howstuffworks.com/turbo2.htm>.

[6] ŠTĚTINA, Josef. Prezentace - Cykly spalovacích motorů. *Seminář aplikované termomechaniky* [online]. 2009 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/sat/SeminatAT2009-04.pdf>.

[7] LÁNIK, Ondřej. *Přeplňování (1. díl): teorie+mechanické přeplňování* [online]. 2004 [cit. 2009-01-20]. Dostupný z WWW: <http://news.auto.cz/technika/preplnovani-1-dil-teorie-mechanicke-preplnovani.html>.

[8] *Turbodmychadla* [online]. 2005 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.uadi.fme.vutbr.cz/opory/prislusenstvi/prisl_prez_2007/zvys_vykonu_turbodmychadla.ppt>.

[9] Popis novinky Case Steiger 485. *AGRICS*. 2008, č. 1, s. 14.
Dostupný z WWW: <http://www.agrics.cz/>

[10] ROSEBRO, Jack . *Ford Conducts Design of Experiment Investigating Thermoelectric Energy Regeneration* [online]. 2009 , 4 May 2009 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <http://www.greencarcongress.com/2009/05/ford-teg-20090504.html#more>.

[11] SIURU, Bill. *Waste Exhaust Heat Generates Electricity to Make Cars Efficient* [online]. 2009 , 04/06/2009 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <http://www.greencar.com/articles/waste-exhaust-heat-generates-electricity-cars-efficient.php>.

[12] Dostupný z WWW: <http://www.heat2power.net/>

[13] Dostupný z WWW: http://www.motortrend.com/features/editorial/112_0606_technologue_hybrid_qa/index.html

[14] BISKUP, Pavel. Nové cesty. *Automobil*. 10.11.2006, č. 11, s. 60.

[15] Technologie RX 450h. *Technologie RX 450h*. 2009, č. 1, s. 7.
Dostupný z WWW: <http://www.lexus.cz/>

[16] Dostupný z WWW: <http://stavebni-technika.cz/clanky/motory-euro-4-egr-nebo-scr/>

14. Seznam použitých symbolů a zkratek

λ	součinitel přebytku vzduchu
N_2	dusík
O_2	kyslík
CO_2	oxid uhličitý
H_2O	vodní páry
NOx	oxid dusíku
CO	oxid uhelnatý
HC	uhlovodíky
SO_2	oxid siřičitý
PM	pevné částice
VGT	variabilní geometrie lopatek
APU	Auxiliary Power Unit
EHR	Exhaust Heat Recovery
AGR	Ab-Gas-Riickfůhr
EGR	Exhaust Gas Recirculation