

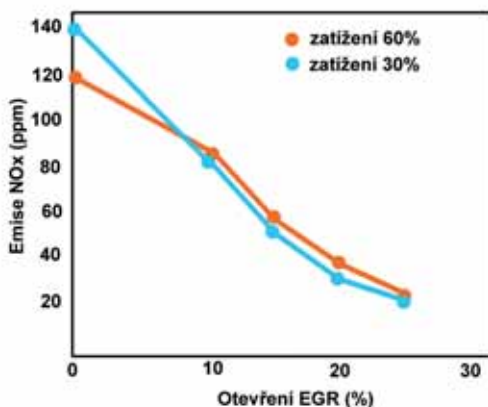
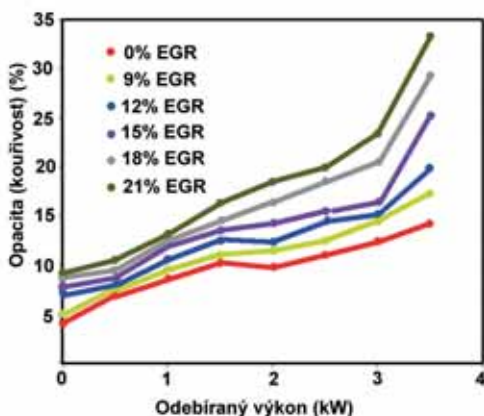
snadné aplikovat např. SCR (Selective Catalytic Reduction), DPF (Diesel Particulate Filter), POC (Particle-Oxidation Catalyst) na vozidla „Off-road“ z důvodů specifických podmínek jejich provozu, tzn. např. pracovního zatížení motoru (vliv na teplotu výfukových plynů, která je důležitá pro činnost těchto zařízení, zejména regenerace filtrů na pevné částice), prašné prostředí, vibrace, zástavbové prostory (DPF a SCR vyžadují velmi velký prostor) atd.

Recirkulace výfukových plynů

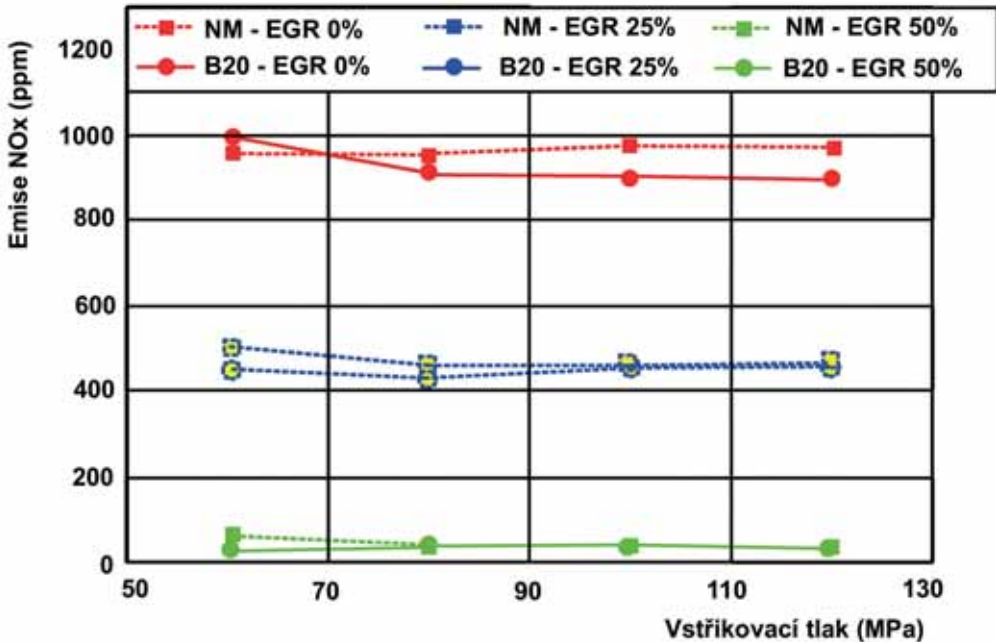
První ze zmíněných řešení problematiky redukce emisí je recirkulace výfukových plynů, která se u traktorových motorů již dlouhodobě používá. Její smysl je založen na tom, že se přivedením části výfukových plynů zpět do spalovacího prostoru sníží množství přivedeného vzduchu a tím i méně kyslíku (to je jeden z důvodů pou-

žívání regulace plnicího tlaku u turbodmychadel nebo varianta s variabilním nastavením lopatek, např. John Deere 8530 při rostoucím zatížení motoru). Přitom musí být jeho množství stále dostatečné pro dokonalé shoření – oxidaci paliva. S volným vzdušným kyslíkem reaguje dusík za vysokých teplot na produkty NO_x , které jsou limitované normami. Druhým faktorem je ta skutečnost, že spaliny mají větší měrnou tepelnou kapacitu než vzduch, tzn. jsou schopny přijmout více tepla ze spalovacího prostoru, a tím snižovat teplotu ve spalovacím prostoru, která ovlivňuje tvorbu NO_x (89) (91). Snižování NO_x s rostoucím podílem výfukových plynů uvádí literatura (91) (101) (102) (89), viz obr. 6.3.1.1.

Problém může být v tom, že dochází k nedostatečnému promíchání spalin s plnicím vzduchem a do jednotlivých válců se dostává rozdílný podíl spalin. Na to poukazuje i autor publikace (91), který tento stav naměřil u čtyřválcového motoru měřením koncentrace CO_2 na sání do každého z válců. Rozdíl v koncentraci CO_2 dosáhl mezi



Obr. 6.3.1.1 - Vliv zatížení motoru a hodnoty vráceného objemu výfukových plynů na emise NO_x (89) (103)



Obr. 6.3.1.2 – Vliv vstřikovacího tlaku, hodnoty EGR a podílu biosložky na emise NO_x (101)

1. a 4. válcem až 76 %. Zajímavé výsledky prezentuje graf na obr. 6.3.1.2, ve kterém je sledován vliv vstřikovacího tlaku, nastavení EGR a hodnoty podílu biodieselu (metylesteru sójového oleje) na emise NO_x . Z něho je jednak patrné, že vstřikovací tlak má v tomto případě malý vliv na NO_x , pouze při 0 % EGR a 20 % biodieselu dochází k poklesu NO_x . Největší vliv má v tomto případě hodnota EGR, s jejímž nárůstem se snižují hodnoty NO_x . Podíl biosložky v motorové naftě má největší vliv při 0 % EGR.

Snižováním teploty ve spalovacím prostoru a NO_x s využitím kombinace vstřikování vody a EGR se zabýval Chadwell a kol. (102). Praktickými zkouškami prokázali snížení NO_x při směšování vody a motorové nafty přímo ve vstřikovací s následným vstříknutím směsi do spalo-

vacího prostoru při kombinaci s EGR, viz obr. 6.3.1.3.

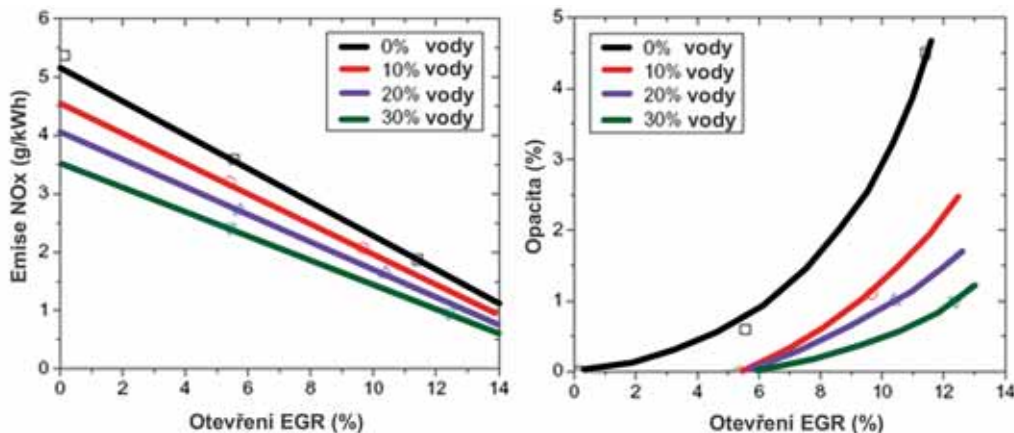
Recirkulace se často označuje německou AGR (Abgasrückführung) nebo anglickou EGR (Exhaust Gas Recirculation) zkratkou. Konstruktivní uspořádání, která se používají u traktorových motorů, lze rozdělit do dvou základních skupin:

- vnitřní,
- vnější.

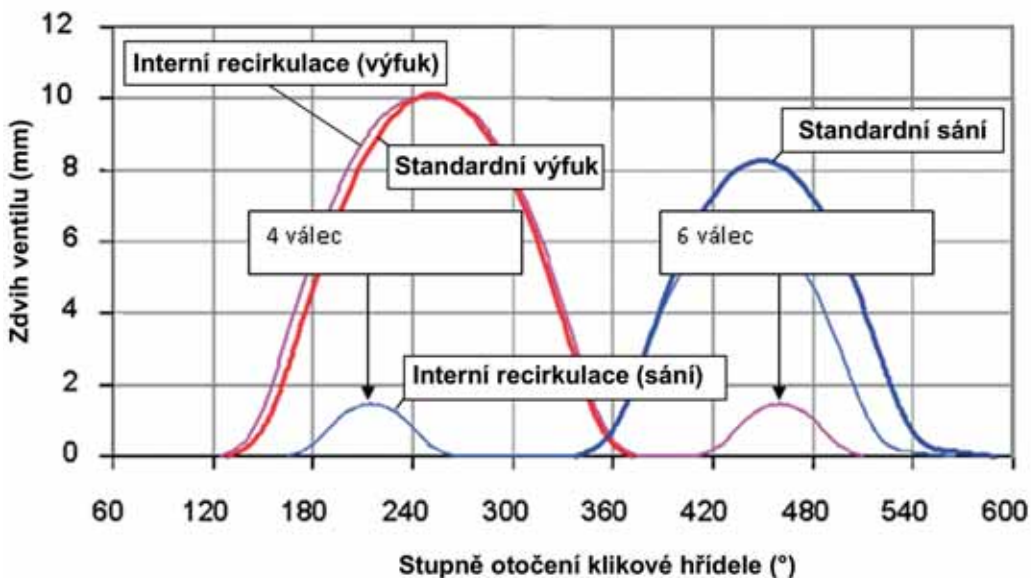
Vnitřní recirkulace je založena na úpravě časování ventilů při okamžiku výfuku. Během výfuku dochází na okamžik k pootevření sacího ventilu a částečnému úniku spalin do sacího prostoru. Příklad tohoto řešení je na obr. 6.3.1.4 u traktoru Case IH. U čtyřválcových motorů dochází k pootevření sacího ventilu během výfuku, zatím-

co u šestiválcových motorů se otevírá na okamžik výfukový ventil během sání motorů. Tento způsob řešení není finančně náročný a nezvyšuje nároky na zástavbový

prostor. Nevýhodou je stále nastavení bez možnosti regulace množství výfukových plynů.



Obr. 6.3.1.3 - Vliv podílu vody v dávce paliva a EGR na NOx a opacitu upraveného spalovacího motoru Volvo při 90% jmenovitém momentu (102)



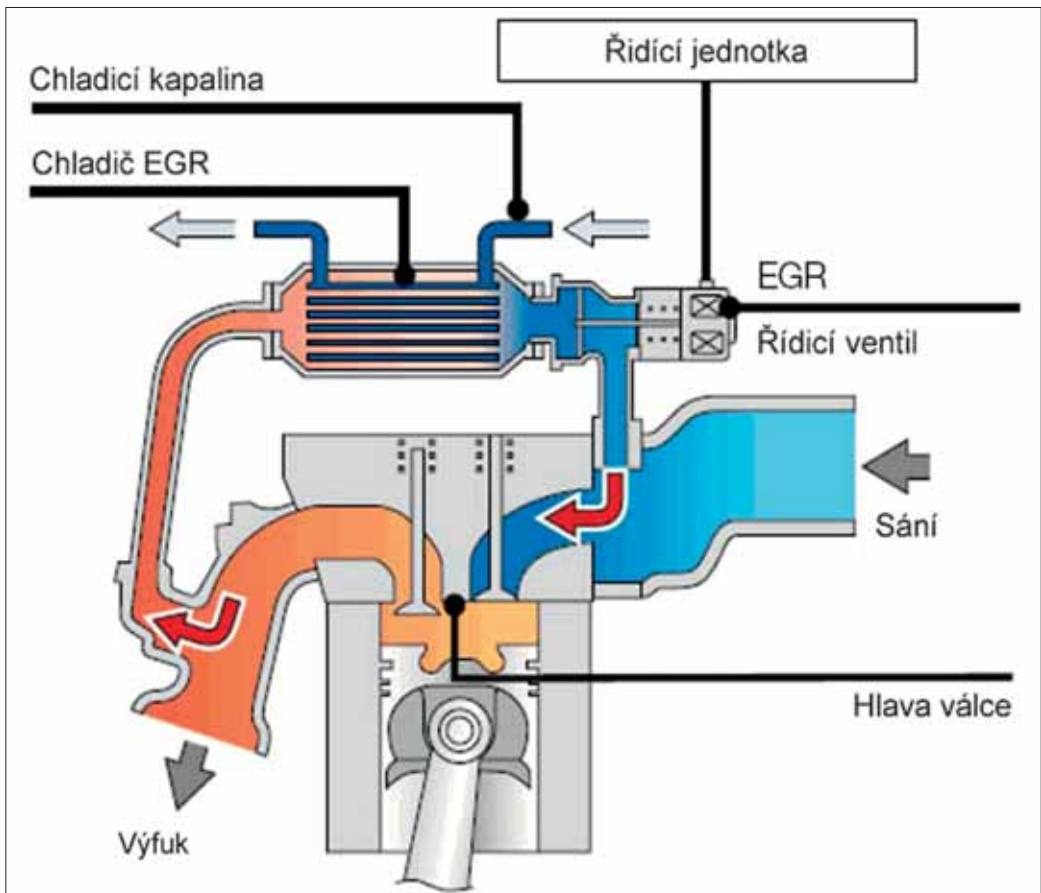
Obr. 6.3.1.4 - Časování ventilů při používání vnitřní recirkulace výfukových plynů (CASE IH)

Druhou skupinu tvoří tzv. vnější recirkulace, u které dochází k odvádění spalin přes tzv. EGR ventil zpět do sání motoru. Modifikace existují v možnosti chlazení odměřeného množství spalin. Rozlišují se tři skupiny:

- EGR bez ochlazování (výfukové plyny neprocházejí přes výměník tepla a tím zvyšují teplotu nasávaného vzduchu, rychlejší přechod paliva z kapalného do plynného stavu),

- EGR plným ochlazením (Výfukové plyny prochází přes výměník tepla. Přitom může docházet ke kondenzaci vody a její dopravě do spalovacího prostoru.),
- EGR s částečným ochlazením (Pouze část výfukových plynů prochází přes výměník, aby se zabránilo vnikání vody do spalovacího prostoru tím, že se bude udržovat teplota vráceného množství plynů nad teplotu varu.) (89).

Řešení vnější recirkulace je vidět na obr. 6.3.1.5.

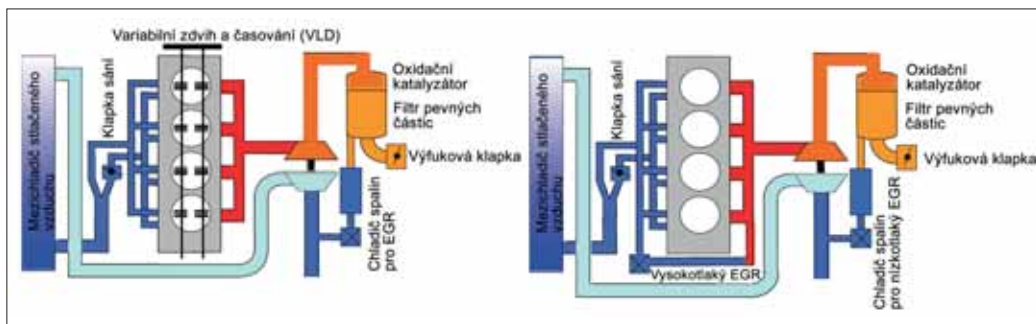


Obr. 6.3.1.5 - Příklad řešení vnější recirkulace výfukových plynů (79)

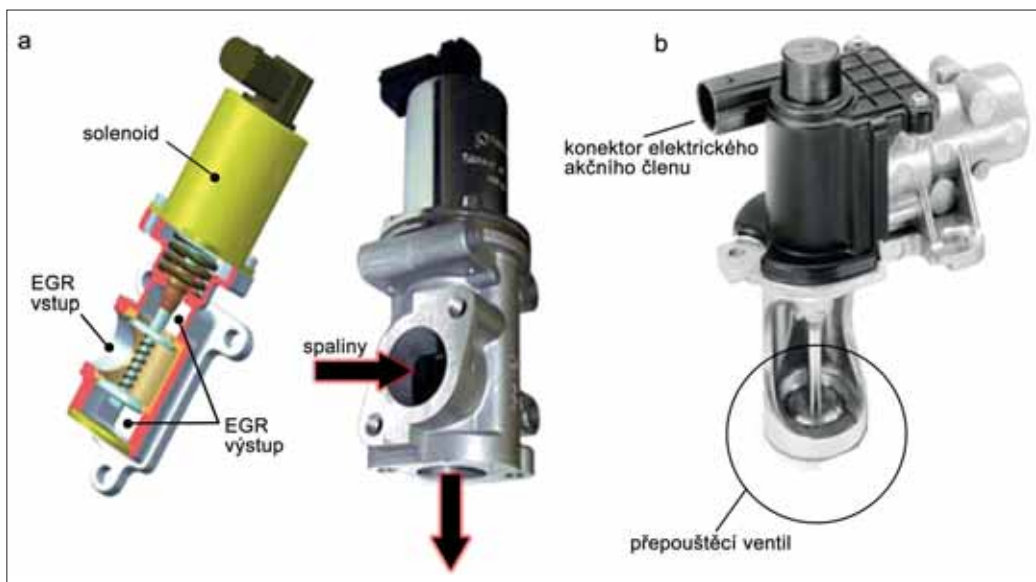
V rámci výzkumu se objevují různé varianty EGR, u kterých se část odměřených spalin ochlazuje a druhá část jde bez ochlazení, nebo sání je neustále spojeno s výfukovým potrubím (výfukové plyny neprocházejí přes výměník) a hlavní část plynů je regulována EGR ventilem. Jedna z experimentálních variant je uvedena na

obr. 6.3.1.6, kde je u obou variant umístěn EGR ventil až za katalyzátorem a filtrem na pevné částice a plyny jsou přiváděny do sání před turbodmychadlo. Navíc u varianty obr. 6.3.1.6 vpravo se používá dvou EGR ventilů.

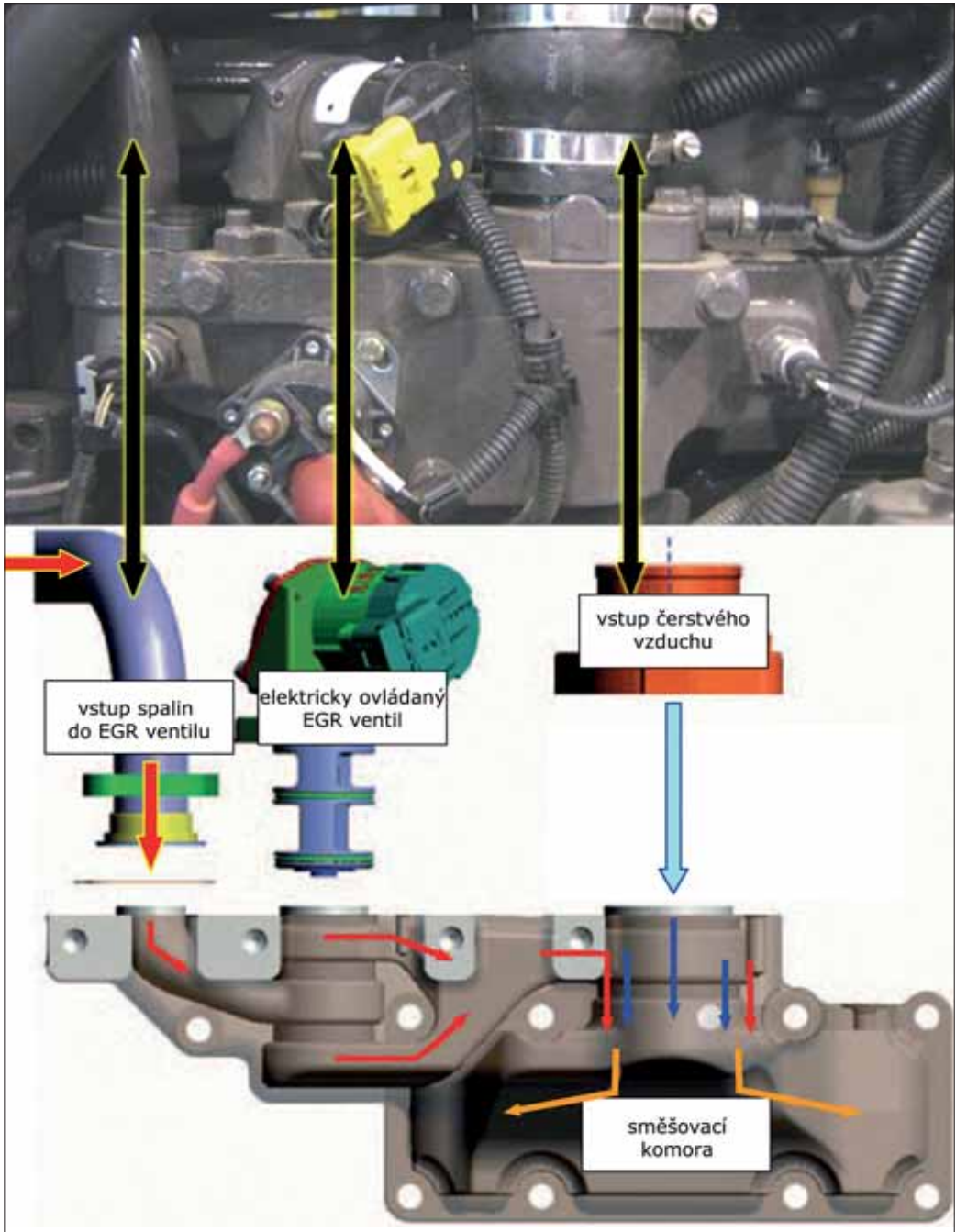
Cílem těchto řešení je snaha o řízení teploty spalování.



Obr. 6.3.1.6 - Experimentální řešení EGR, a - jeden ventil EGR, b - dva ventily EGR (104)



Obr. 6.3.1.7 - EGR ventil pro vznětové motory: a - ovládání pomocí solenoidu, b - ovládání pomocí elektrického aktuátoru (elektromotoru) s převodovkou pro zdvih ventilu (Pierburg)



Obr. 6.3.1.8 – Pohled na uspořádání EGR ventilu v sání motoru traktoru Claas Axion 850 (**Claas**)

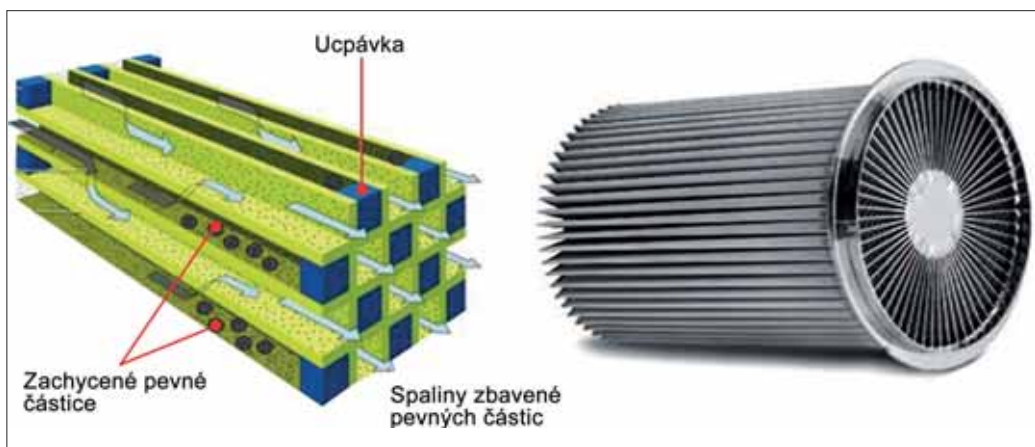
Proces řízení EGR zajišťuje řídicí jednotka, která ovládá EGR ventil, viz obr. 6.3.1.7, podle informací ze senzorů umístěných na motoru, např. teplota chladicí náplně, teplota motorového oleje, teplota nasávaného vzduchu, teplota výfukových plynů, plnicího tlaku, otáček motoru, vstřikovaného množství paliva, polohy stlačení pedálu akceleračního či ručního plynu atd. Na obr. 6.3.1.7 jsou zobrazeny dva typy elektricky ovládaných ventilů EGR.

Preciznější regulaci množství spalin, které se vrací zpět do plnicího potrubí, je ovládnutí pomocí elektrického motoru s vyšší kvalitou zpětné vazby. Pohled na EGR ventil u traktoru Claas Axion 850 je vidět na obr. 6.3.1.8. Množství, které se vrací zpět do sání, lze poměrně přesně stanovit ze známého množství nasávaného vzduchu MAF (Mass Air Flow), příp. lambda sondy a množství vstřikovaného paliva. U traktorových motorů se zatím snímač množství nasávaného vzduchu nepoužívá. Nastavení EGR ventilu je vidět např. v rámci diagnostiky motoru, kde se uvádí poloha otevření tohoto ventilu v %.

Obvykle nedosahuje vyšších hodnot než 40 % a je prováděna především v oblasti částečného zatížení, neboť při max. zatížení je u traktorových motorů mezní hodnota součinitele přebytku vzduchu mezi 1,6 - 1,8 a snížení koncentrace kyslíku by vedlo k nárůstu pevných částic. Agrawal (89) uvádí, že mez je množství 50 % výfukových plynů z důvodů vysoké tvorby pevných částic, což by jinak vyžadovalo filtr na pevné částice. Vliv nárůstu hodnoty kouřivosti při zvyšování průtoku EGR je vidět na obr. 6.3.1.1. S rostoucím otevřením EGR ventilu dochází také k poklesu plnicího tlaku, neboť se snižuje množství spalin, které proudí k turbodmychadlu. I z toho důvodu budou nabývat na významu turbodmychadla s variabilním nastavením lopatek nebo také varianty s dvojicí turbodmychadel.

Filtry pevných částic

Snižování limitů pevných částic a úhlu předvstříku vede výrobce spalovacích motorů k používání filtrů - DPF, které mají za



Obr. 6.3.2.1 – Princip funkce filtru na pevné částice v provedení SMT – sintrovaný kovový filtr

úkol s vysokou účinností pevné částice zachytit. Umísťují se do výfukového potrubí, často ve společném tělese s katalyzátorem. Filtr má voštinovou nebo vláknovou podobu a je vyroben např. ze silikátů, dotovaných např. hliníkem (Cordeirit), spékaných kovů atd. Výfukové plyny se na vstupu filtru rozdělují do mnoha komor, které jsou mezi sebou odděleny porézními stěnami o tloušťce 300 – 400 μm. Jimi musí plyn procházet dál, aby se dostal z filtru ven, a přitom dochází k zachytávání pevných částic uvnitř těchto stěn. Schematicky je zobrazen na obr. 6.3.2.1.

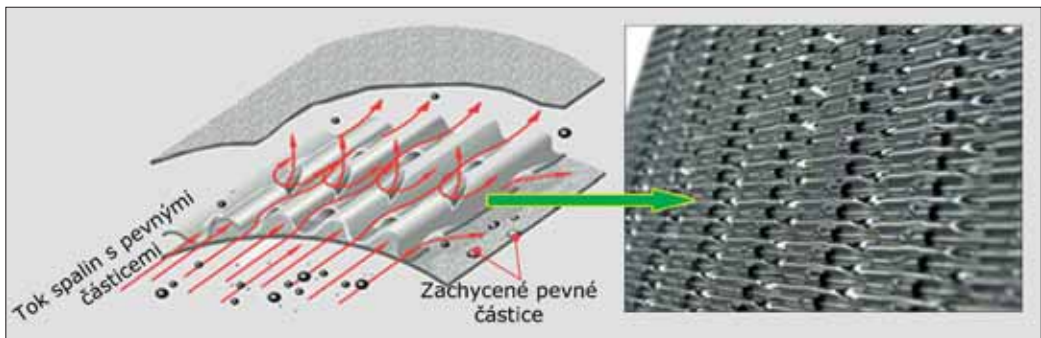
Uvedené řešení se označuje jako uzavřený systém, neboť částice nemají volný průchod přes filtr. Druhé řešení se označuje jako otevřený systém, např. TwinTec, u kterého nemusí proudící plyn překonávat žádnou překážku, čímž se snižuje odpor proudění. Příklad tohoto řešení je uveden na obr. 6.3.2.2. Proud plynu se rozděljuje pomocí tvarovaných výstupků, které ho usměrňují na povrch ze spékaných materiálů, na kterém se pevné částice zachycují.

Zachytáváním částic dochází k jeho postupnému zaplňování, což vyžaduje buď jeho výměnu, nebo použití regenerativ-

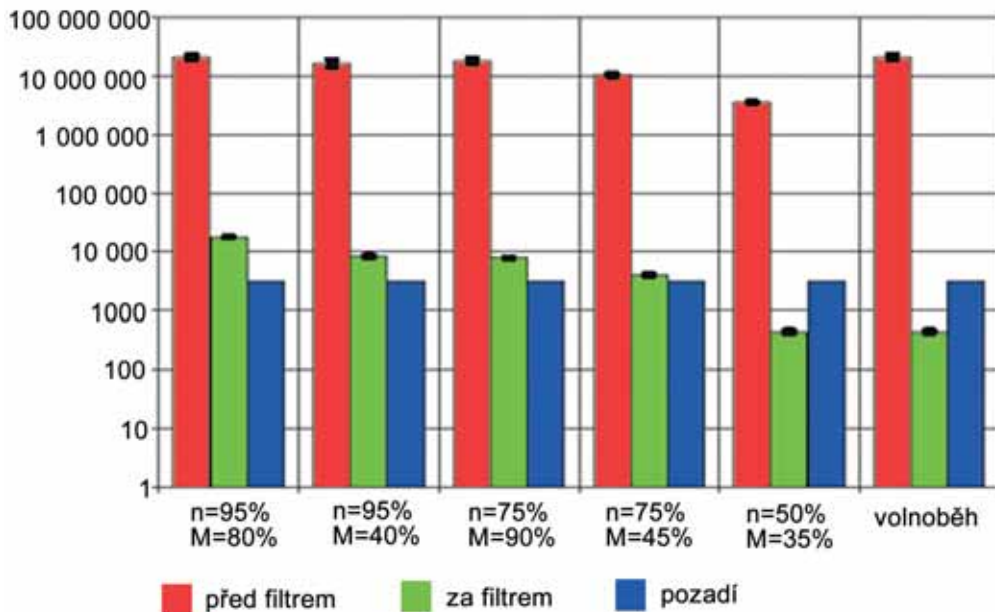
ního systému. Ten umožňuje kontinuální nebo periodické automatické čištění, při kterém dochází ke spalování zachycených částic na CO_2 s malým podílem sazí. Pevné částice, jak již bylo výše zmíněno, tvoří z větší části saze, zbytky paliva a oleje. Aby docházelo ke spalování (vypalování) sazí, musí se teplota výfukových plynů zvýšit nad hodnotu meze zápalnosti, tzn. 600 °C (85) (105). Protože tak vysoká teplota je v praxi obtížně dosažitelná během provozu, musí její velikost „uměle“ navýšit nebo snížit teplotu vznícení sazí. Systémy regenerace lze rozdělit na:

- Aktivní,
- Pasivní.

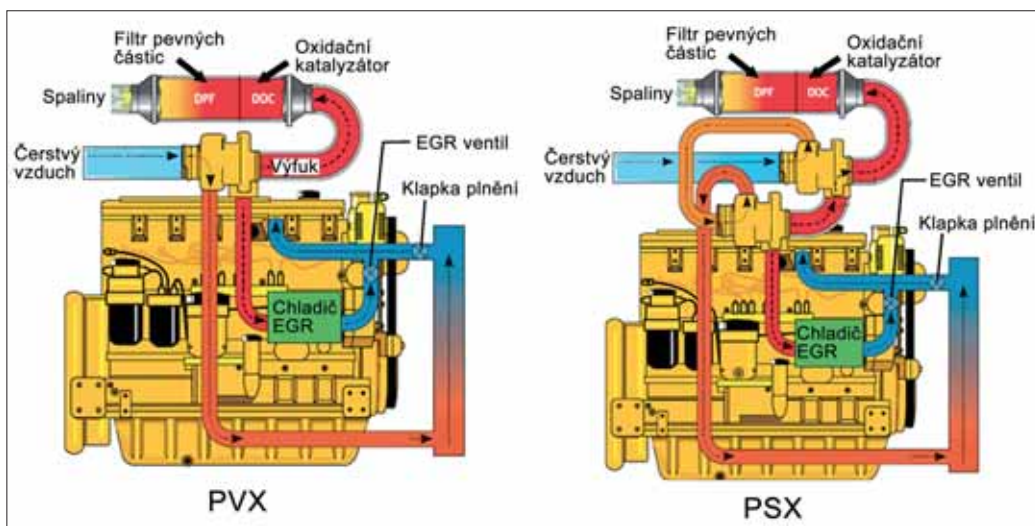
Aktivní systémy jsou charakteristické převáděním dodatečné energie pro zvýšení teploty spalin např. pomocí topné spirály, hořením paliva v komoře filtru (hořák), opožděným vstřikem paliva se spálením ve spalovacím prostoru, opožděným vstřikem paliva se zapálením v katalyzátoru, zatímco pasivní systémy používají taková opatření např. s předřazeným oxidačním katalyzátorem, filtry s aktivní vrstvou (platina) CDPF (Catalyzed Diesel Particulate Filter), přidáváním aditiv do paliv atd., která snižují tep-



Obr. 6.3.2.2 – Otevřený systém filtrace pevných částic (www.twintec.de)



Obr. 6.3.2.3 – Účinek filtru na pevné částice u traktorového motoru při různém zatížení (procentuální hodnota otáček vzhledem ke jmenovitým, procentuální hodnota točivého momentu vzhledem k maximálnímu) (91)



Obr. 6.3.2.4 – Technická opatření pro splnění normy Tier 4 Interim platí pro USA/Úroveň III platí v EU u motorů společnosti John Deere (John Deere)

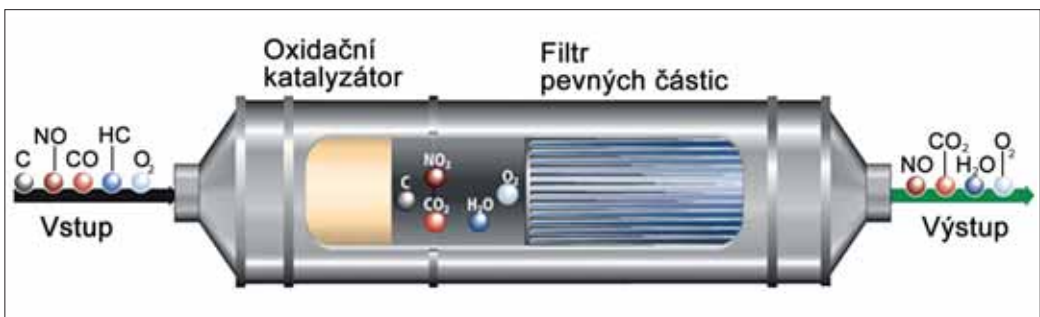
lotu vznícení sazí na 250 °C – 300 °C (87) (91), 450 °C – 500 °C (85) a jejich spalování tak probíhá kontinuálně. Doba regenerace se pohybuje řádově v několika minutách podle použitého systému, delší čas až 1h je třeba např. u elektrické topné spirály. Životnost filtru se pohybuje mezi 80 000 – 120 000 km u silničních motorových vozidel. Doba mezi regeneracemi se u traktorů pohybuje mezi 8 až 30 provozními hodinami v závislosti na zatížení a otáčkách motoru (105). Účinnost dnešních filtrů se pohybuje nad hranici 99%, což je také vidět na obr. 6.3.2.3, kde jsou vyneseny hodnoty pevných částic před a po filtraci, včetně množství částic v okolním vzduchu.

Podle asociace výrobců spalovacích motorů EMA (Engine Manufacturers Association) lze u traktorů použít systém regenerace s přidáváním aditiv, oxidační katalyzátor s CRT technologií nebo filtr s aktivní vrstvou (EMA/Euromot). Z důvodů omezených zástavbových se jeví jako výhodnější používání buď CRT technologie, nebo filtru s aktivní vrstvou. Využití oxidačního katalyzátoru s CRT technologií společně s filtrem na pevné částice používá např. firma John Deere na motorech s označením Powertech PVX a PSX, viz obr. 6.3.2.4.

Oxidační katalyzátor

Oxidační katalyzátor (DOC) s principem činnosti CRT, viz obr. 6.3.3.1, (Continuously Regenerating Trap) umožňuje kontinuální regeneraci filtru při nižších teplotách, než je teplota vznícení sazí. Oxidační katalyzátor vytváří podmínky pro reakci limitovaných složek CO, C_xH_y a NO (95% z NO_x) s kyslíkem, to vede k jejich přeměně na méně škodlivé CO₂, CO₂ + H₂O a NO₂. Pomocí vyššího obsahu NO₂ (působí jako oxidační činitel) ve výfukových plynech lze spalovat saze při nižších teplotách 300 °C – 450 °C. Při teplotách pod 300 °C probíhá oxidace sazí velmi pomalu a naopak nad teplotou 450 °C dochází k rozpadu NO₂. Proces regenerace probíhá účinně tehdy, jestliže je poměr NO₂ / sazím větší než 8:1 (85), 20:1 (EMA/Euromot), 12:1 (106). Při používání filtrů vznikají problémy s jejich postupným zanášením od zbytků motorového oleje (především aditiv), který neshoří na CO₂ a ve filtru dále zůstává.

Průběh oxidů dusíku NO_x před oxidačním katalyzátorem a za filtrem na pevné částice při spalování metylesteru řepkového oleje je uveden na obr. 6.3.3.2. Z něho je zřejmé, že celkové množství NO_x se po průchodu katalyzátorem a filtrem nezmění, ale

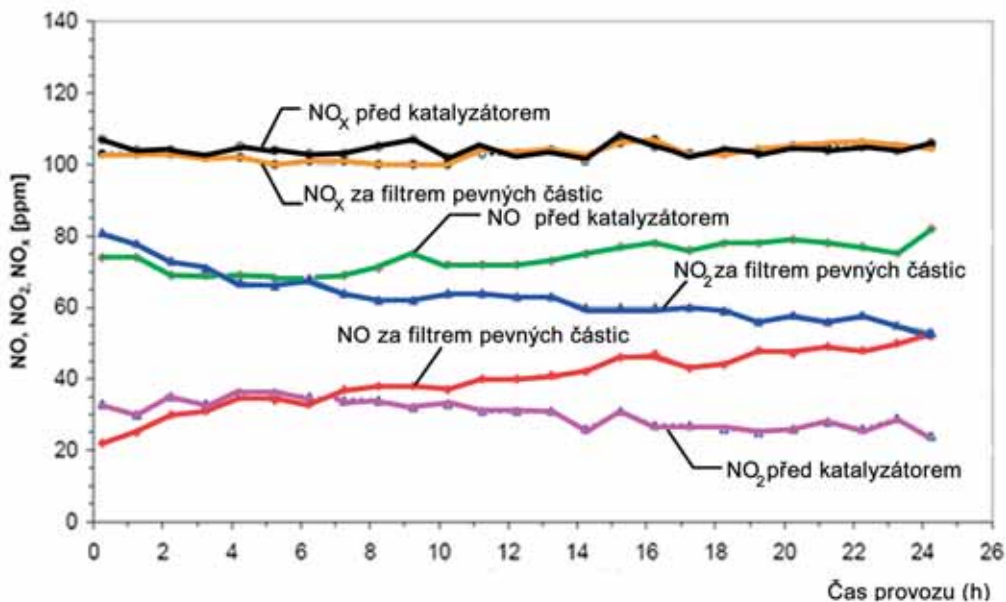


Obr. 6.3.3.1 – Kombinace oxidačního katalyzátoru a filtru na pevné částice

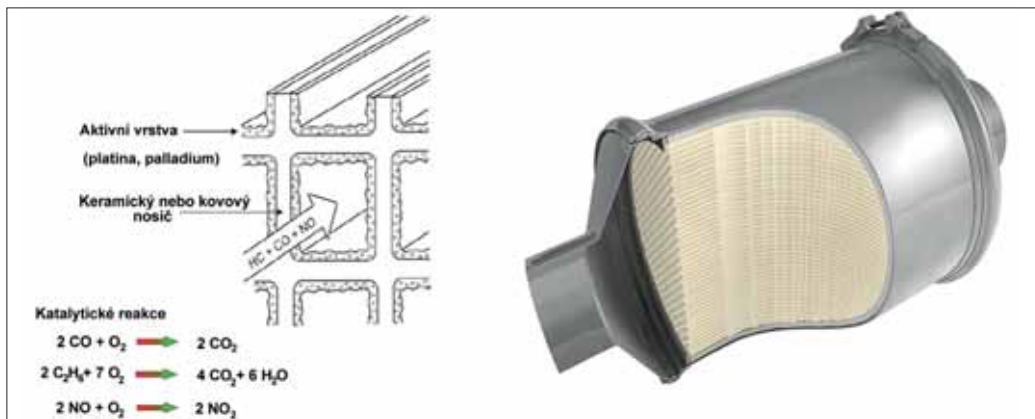
dochází k postupnému zvyšování NO v důsledku oxidace sazí ve filtru. Stejně měření bylo provedeno pouze s filtrem na pevné částice. Po 24h zkoušce se na filtru zachytily

saze o hmotnosti cca 10,4 g a tlakový rozdíl na filtru byl 3 kPa.

Oxidační katalyzátor umožňuje snižovat plynné emise CO a HC až o 90 % při dostateč-



Obr. 6.3.3.2 - Průběh jednotlivých složek NO_x před a po průchodu oxidačním katalyzátorem a filtrem na pevné částice (technologie CRT a přidávání aditiv) (106)



Obr. 6.3.3.3 - Schematický pohled na oxidační katalyzátor včetně chemických reakcí (108)

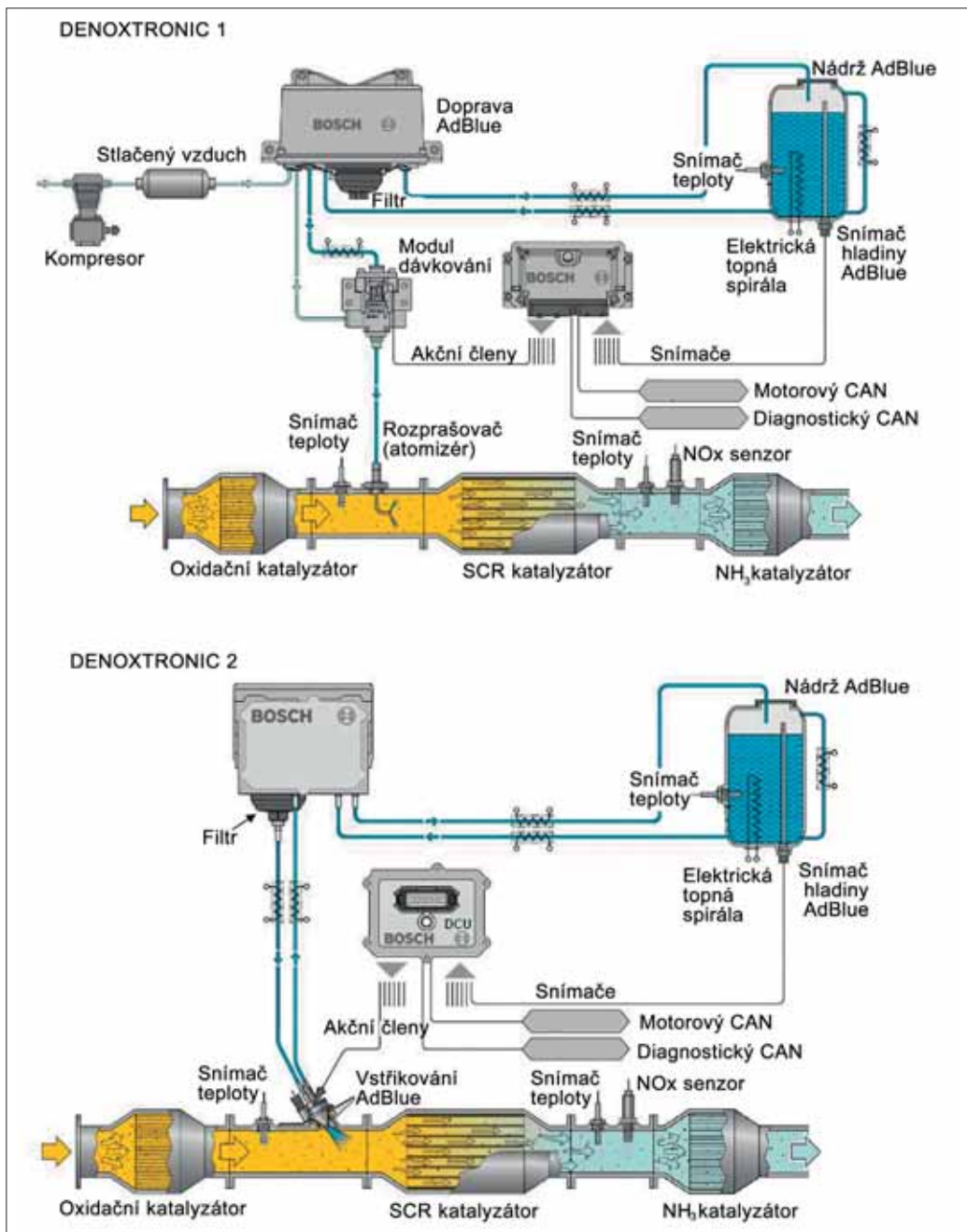
ku kyslíku ve výfukových plynech, tzn. $\lambda > 1$ (35) (107). Vedle toho může také omezovat HC unášené na pevných částicích. Tvoří ho nerezový obal, ve kterém je uložen nosič (kovový nebo keramický) s aktivní vrstvou, viz obr. 6.3.3.3. Uvnitř monolitu se nachází velké množství tenkostěnných, axiálně řazených kanálků (0,15 – 0,3 mm), kterými proudí výfukové plyny. Počet kanálků se pohybuje mezi 62 – 65 na 1 cm² (15). V příčném průřezu mají kanálky nejčastěji obdélníkový nebo čtvercový průřez. Povrch nosiče je potažen nosnou porézní vrstvou z oxidu hlinitého (Al₂O₃), která zvětšuje účinnou plochu. Na ní je nanášena účinná (katalytická) vrstva z ušlechtilých kovů, platiny nebo paládia. Šířka kanálků je přibližně 1 mm, což postačuje k činnosti katalyzátoru. Tím, že dochází k přeměně NO na NO₂, zvyšuje se i molekulární hmotnost NO_x jako limitované složky.

Snižování množství oxidů dusíku pomocí selektivní katalýzy

SCR katalyzátor (Selective Catalytic Reduction – selektivní katalytická redukce) je zařízení určené ke snižování NO_x ve výfukových plynech. Jeho používání úzce souvisí s nastaveným režimem řízení spalovacího motoru. Jak již bylo řečeno v části o emisích, opatření ke snižování sledovaných emisních složek jdou proti termické účinnosti spalovacího motoru. To se týká především NO_x a HC, u kterých je velmi obtížné dosáhnout současného snížení vzhledem ke vzájemné rovnováze (18). Obecně platí, že snižováním teploty ve spalovacím prostoru dochází k poklesu NO_x, tento problém se řeší opožděným vstříkáváním

paliva. To má ale za následek zvýšenou produkci HC a pevných částic, a proto je třeba používat opatření, např. filtr na pevné částice, recirkulaci atd. Nižší termická účinnost se pak projevuje mimo zmíněné emise také vyšší spotřebou paliva (109). Druhé řešení pro snižování NO_x je používání SCR katalyzátoru ve výfukovém potrubí, případně tlumiči výfuku (MAN), a motor přitom může být provozován v oblasti, kde produkuje vyšší množství NO_x. Celé řešení vychází z použití SCR katalyzátoru, ve kterém s pomocí amoniaku NH₃ dochází k reakci s oxidy dusíku a jejich přeměně na dusík N₂ a vodní páru H₂O. Amoniak je toxická látka, a z toho důvodu se získává až chemickou cestou po vstříknutí kapaliny „AdBlue“ do výfukového potrubí. Kapalina AdBlue je složena z 32,5 % z močoviny (CO(NH₂)₂) a zbylou částí je demineralizovaná voda, která se po vstříknutí odpaří a využije se dále při chemických reakcích. Amoniak se získá ve výfukovém traktu během termolýzy a hydrolyzy.

Někteří výrobci spalovacích motorů používají ještě směšovače spaliny – AdBlue (MAN) nebo tlakový vzduch – AdBlue (Mercedes), do kterých je AdBlue dávkováno. Při teplotě -11 °C dochází ke krystalizaci AdBlue, a proto musí být zajištěn ohřev, např. pomocí topných spirál, při teplotách nad 25 °C se naopak rozkládá. SCR katalyzátor se používá v kombinaci s např. oxidačním katalyzátorem nebo oxidačním katalyzátorem s filtrem na pevné částice, to je také předpoklad pro splnění emisních limitů s posledním stupněm IV. Při použití oxidačního katalyzátoru se zvyšuje množství NO₂, které se může spotřebovávat při použití filtru k oxidaci pevných částic. Nadbytečné množství NO₂, které se nespotřebuje k oxidaci, tak bude zvyšovat množství NO_x a motor tak nemusí splnit přísnější



Obr. 6.3.4.1 - Systém SCR od firmy Bosch pod označením Denoxtronic 1 (a), dávkování do tlakového vzduchu a Denoxtronic 2 (b), pro vozidla bez tlakového vzduchu (114)