

DYNAMICKÉ MĚŘENÍ VÝFUKOVÝCH EMISÍ PEVNÝCH ČÁSTIC ZE SPALOVACÍCH MOTORŮ ZA REÁLNÉHO PROVOZU PŘENOSNOU APARATUROU A JEHO VYUŽITÍ PRO HODNOCENÍ DOPADU LEGISLATIVNÍCH OPATŘENÍ

Michal Vojtíšek

Katedra vozidel a motorů, Fakulta strojní, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17
Liberec, e-mail michal.vojtisek@tul.cz, tel. 774 262 854

Klíčová slova: spalovací motory, emise, velmi jemné částice, měření emisí, měření emisí za provozu, emise za reálného provozu

ÚVOD

Výfukové emise z pístových spalovacích motorů jsou jedním z nejvýznamnějších zdrojů znečištění ovzduší v městských aglomeracích [1-4]. Pravděpodobně nejproblematictější složkou těchto emisí jsou částice, jejichž hlavní složkou je směs převážně sazí o velikosti desítek až stovek nm složitých fraktálních tvarů s velkým povrchem, na kterém jsou zpravidla akumulovány další látky, a převážně aerosolových částic o velikosti jednotek až desítek nm [5]. Zejména proti velmi malým částicím o průměru jednotek až nízkých desítek nm nemá lidský organismus účinné obranné mechanismy, velká část jich proto proniká hluboko do plic a dále buněčnými membránami do krevního oběhu [6-8]. Tyto částice jsou navíc, na rozdíl od emisí z větších stacionárních zdrojů, emitovány v bezprostřední blízkosti lidí. U lidí žijících v blízkosti frekventovaných komunikací byl zjištěno vyšší riziko astma [9] a infarktu [6].

Snížení emisních limitů silničních vozidel ve většině zemí alespoň o řád [10-12] v mnoha zemích včetně ČR nepřináší očekávaný účinek [1]. Jistý podíl na tom má pomalá obnova vozového parku a výskyt motorů s nepoměrně vysokými emisemi. Existují však další, mnohdy opomíjené faktory.

Jedním z nich je narůstající intenzita dopravy [2,13], a s ní narůstající intenzita kongesce (dopravní zácpy). Při provozu vznětových motorů na volnoběh a velmi nízkých zatíženích, typických pro hustý městský provoz, se ochlazuje spalovací prostor a narůstá podíl neúplně spáleného paliva a s ním i emise částic. Zároveň klesá teplota výfukových plynů, a s ní i účinnost většiny katalytických zařízení (oxidační katalyzátory, třicestné katalyzátory, redukční katalyzátory pro redukci oxidů dusíku). Stáním a častými rozjezdy se zvyšuje spotřeba paliva a s ní i emise. Dále při rozjezdu vozidel dochází k přechodovému zatěžování motoru, které je spojeno s nepoměrně vysokými emisemi [14-15]. Zvyšování intenzity dopravy nad kapacitu komunikací proto vede k nepoměrnému nárůstu emisí, zejména organických látek a částic. To je doloženo i vyšším poměrem imisí částic ku imisím oxidů dusíku v blízkosti frekventované komunikace v dopravní špičce [16]. Navyšování intenzity zejména tranzitní dopravy je způsobeno i dalším rozšiřováním silniční sítě [17].

Dalším faktorem je zvyšování podílu lehkých vozů se vznětovými motory a nepoměr mezi homologovanými a skutečnými emisemi zejména u vznětových motorů. Vznětové motory dosahují relativně nízkých emisí oxidů dusíku díky recirkulaci výfukových plynů; tu však nelze použít při dlouhodobém volnoběhu (zanášení motoru) ani při vysokých zatíženích. Nízkých emisí částic je pak dosahováno díky katalytickým zařízením, jejichž účinnost při dlouhém volnoběhu klesá, a díky přeplňování s velkým přebytkem vzduchu. Snaha dosáhnout stále vyšších výkonů ze stále nižších zdvihových objemů motoru však vede k navyšování výkonu zvýšením dávky paliva na úkor snížení přebytku vzduchu a zvýšení emisí částic při maximálním zatížení. V extrémních případech "tuningu" (zpravidla neoprávněného a mnohdy neodborného zvýšení maximálního výkonu motoru zejména navýšením dávky paliva) je pak přebytek vzduchu snížen natolik, že motor viditelně kouří. Žádný ze zmíněných režimů (dlouhý volnoběh a provoz na vysoký výkon) však není součástí homologačního

evropského jízdního cyklu (NEDC). Pomineme-li poměrně liberální limity kouřivosti, tyto režimy proto nejsou žádnými emisními limity ošetřeny, a emise během nich jsou mnohdy vyšší než během jízdy v režimech rámcově spadajících do NEDC.

Dalším faktorem je nepoměr mezi snížením celkové hmotnosti částic, jež je limitována legislativou, a snížením celkového rizika emitovaných částic na lidské zdraví. Snížení celkové hmotnosti částic bylo dosaženo především snižováním emisí relativně velkých částic sazí (převážně elementární uhlík), zatímco emise velmi malých částic (převážně aerosoly organických látek o velikosti jednotek až nízkých desítek nm) se snížily menší měrou, nebo se nesnížily vůbec nebo i zvýšily. Proto je pro budoucí emisní limity (EURO 6) navrhováno zavedení dalšího omezení emisí částic, například ve formě limitu počtu částic (PMP). Do plánovaného a očekávaného zavedení skutečně nízkoe emisních technologií je však třeba emise částic ošetřit jinými způsoby než dalším snižováním limitů pro nová vozidla.

Pro hodnocení dopadu zmíněných a řady dalších připravovaných nebo zamýšlených legislativních opatření na emise stávajícího parku vozidel a pojízdných strojů (lodě, lokomotivy, stavební stroje) již nepostačuje laboratorní měření emisí na nových motorech, nýbrž je zpravidla nutné sledovat emise v reálném provozu, a to z většího počtu motorů (přínejmenším jednotky až desítky), z důvodu relativně velkého vlivu provozních podmínek a jejich historie na emise, zejména částic, a relativně velkých rozdílů mezi emisními vlastnostmi i jinak obdobných individuálních motorů [18]. Takové možnosti nabízí průběžné měření okamžitých výfukových emisí pojízdného stroje přenosnou aparaturou umístěnou na palubě vozidla, přičemž pod pojem přenosná aparatura spadá specializované zařízení zaplňující polovinu městského autobusu [19] nebo celý návěs [20], ale i relativně malá a jednoduchá zařízení [18,21-22].

APARATURA

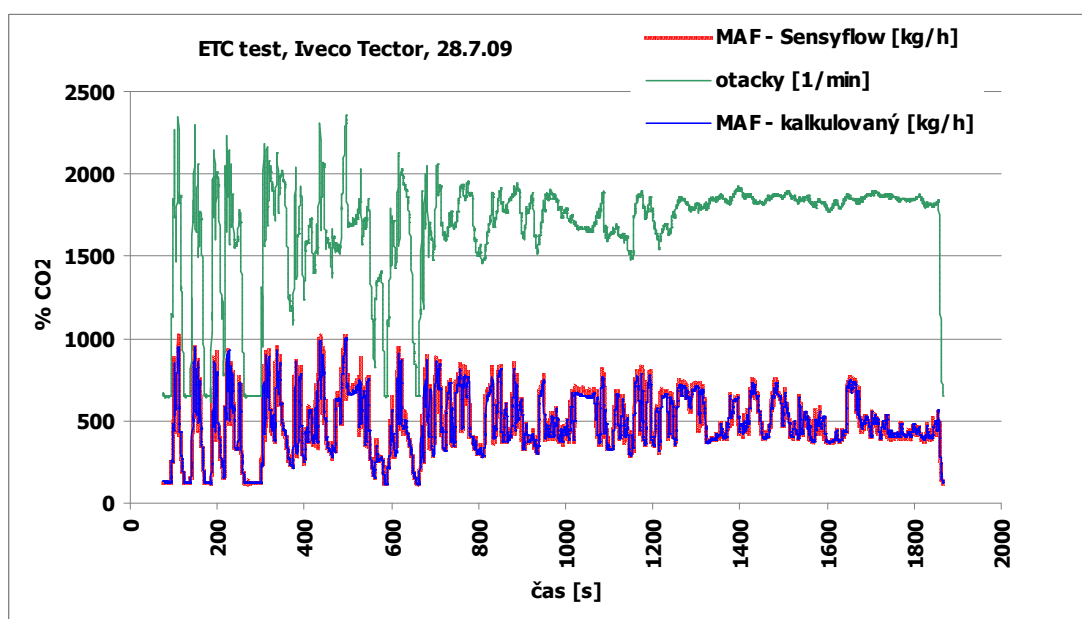
Pro měření emisí za provozu byl autorem sestaven přenosný systém, konstruovaný pro umístění na palubě měřeného vozidla. Tento přístroj monitoruje koncentrace výfukových plynů a celkový průtok výfukových plynů. Tyto dva toky dat jsou synchronizovány, a okamžité hmotnostní toky sledovaných látek nebo skupin látek jsou vypočteny jako součin okamžitého toku výfukových plynů a okamžitých koncentrací daných látek. Obecný princip byl popsán v [18].

Přístroj využívá nedisperzních infračervených spektrometrů pro měření koncentrací oxidu uhelnatého (CO) a uhlíkatého (CO₂) a orientační měření koncentrací uhlovodíků (HC), elektrochemických článků s rychlou odezvou pro měření koncentrací oxidu dusnatého (NO) a kyslíku, a dále dvou experimentálních detektorů částic: semikondenzačního integrujícího nefelometru využívajícího dopředného rozptylu laserového paprsku procházejícího koncentrovaným svazkem vzorku s částicemi, a nově doplněné měřicí ionizační komory. Výstup nefelometru je přibližně úměrný hmotnostnímu toku větších částic, a výstup ionizační komory je přibližně úměrný celkové délce částic (pokud by tyto byly srovnány do jedné řady). Z důvodu omezeného prostoru na reálných vozidlech, omezených možností napájení, a poměrně "tvrdých" nelaboratorních podmínek během měření jsou vzorkovány neředěné výfukové plyny aniž by bylo zajištěno isokinetické vzorkování nebo alespoň laminární průtok, a aniž by byl vzorek udržován na konstantní teplotě. Dále nejsou dostatečně sledovány, a tím pádem ani ošetřeny, výkyvy v kritických vlastnostech částic (velikost, fraktální rozměr, hustota, poměr sazí a organických látek, schopnost částic udržet elektrický náboj, apod.), ztráty způsobené termoforetickými jevy, a nukleace a koagulace částic ve vzorkovacím potrubí.

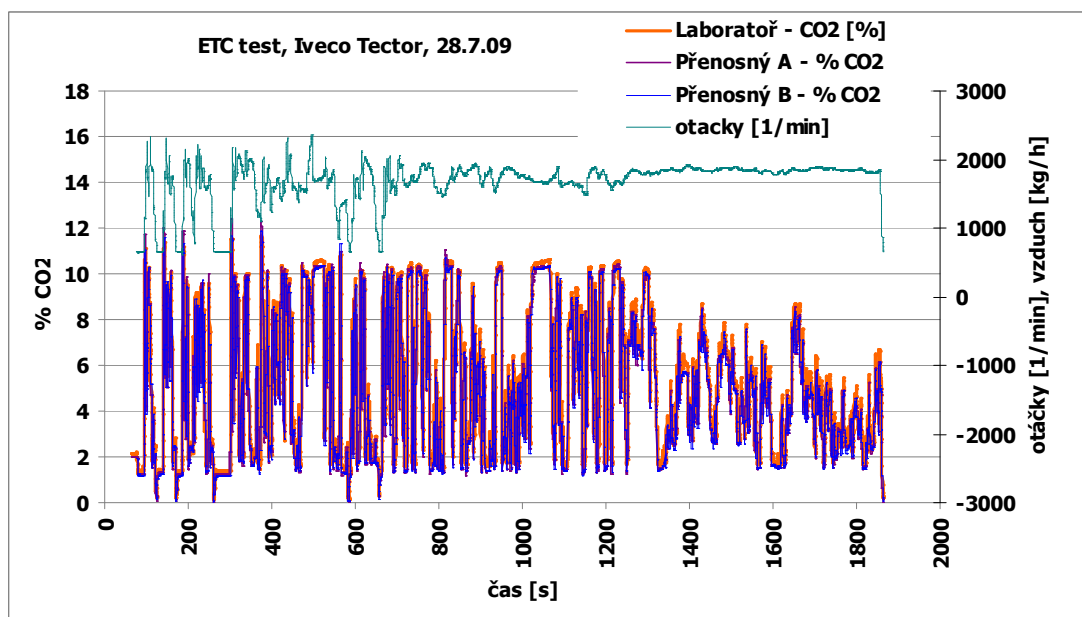
Hmotnostní tok nasávaného vzduchu je vypočten ze stavové rovnice ideálního plynu ze známého zdvihového objemu motoru, složení, teploty a tlaku nasávaného vzduchu, otáček motoru, a dopravní účinnosti motoru, která je získána během laboratorních měření nebo pro daný motor kvalifikovaně odhadnuta. Hmotnostní tok výfukových plynů je pak vypočten na základě toku nasávaného vzduchu a poměru paliva ku vzduchu vypočteného z naměřených koncentrací a známého nebo předpokládaného složení paliva.

VÝSLEDKY – VALIDACE APARATURY

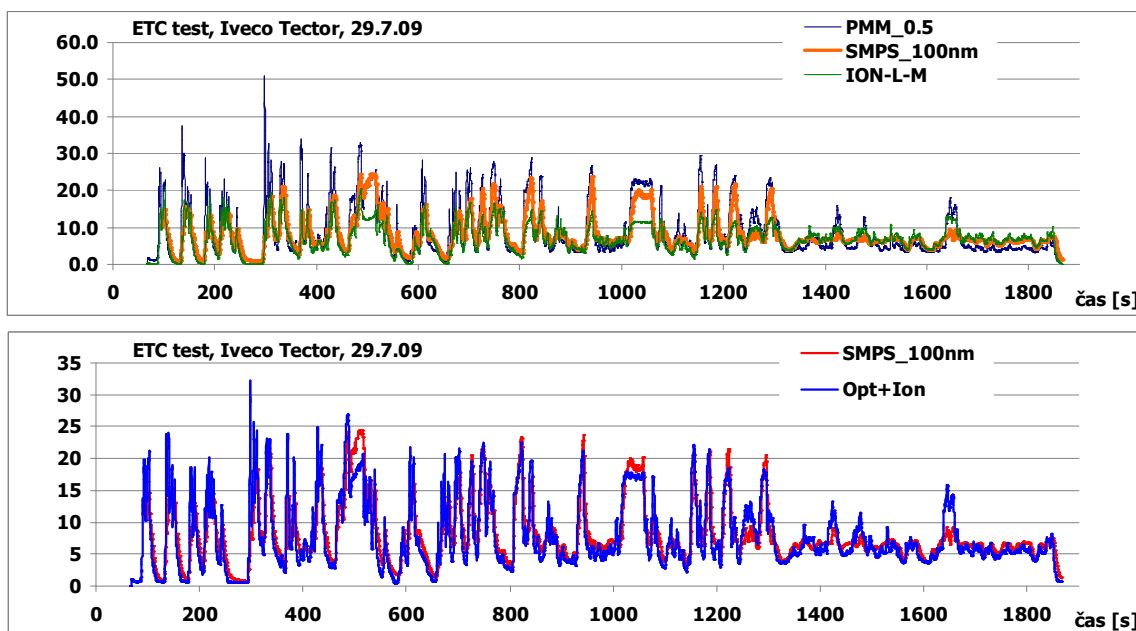
Poslední verze palubního zařízení pro měření emisí byla v červenci 2009 porovnána s laboratorními měřeními během zkoušek v laboratoři TUV-SUD Auto CZ v Praze na přepřihovaném silničním vznětovém motoru Iveco Tector o zdvihovém objemu 6 litrů. Výsledky měření pro dynamický test ETC (Engine transient test) jsou uvedeny na obr. 1-3. Na obr. 1 jsou porovnány hmotnostní průtoky nasávaného vzduchu vypočtené přenosným zařízením a měřené průtokoměrem (Sensyflow, ABB). Na obr. 2 jsou porovnány naměřené koncentrace CO_2 jedním laboratorním a dvěma přenosnými analyzátory. Na obr. 3 jsou porovnány měření koncentrací částic o ekvivalentním průměru elektrické mobility 100 nm, vyselektované klasifikátorem (SMPS, TSI) a měřené kondenzačním čítačem (CPC, TSI) s měřením nefelometrem a ionizační komorou (horní část) a odhadem hmotnostního toku částic získaného lineární kombinací emisí vypočtených z měření nefelometrem a ionizační komorou.



Obr. 1: Porovnání hmotnostního toku nasávaného vzduchu vypočtené přenosným palubním zařízením a tokem měřených laboratorním průtokoměrem během cyklu ETC (Engine Transient Cycle).



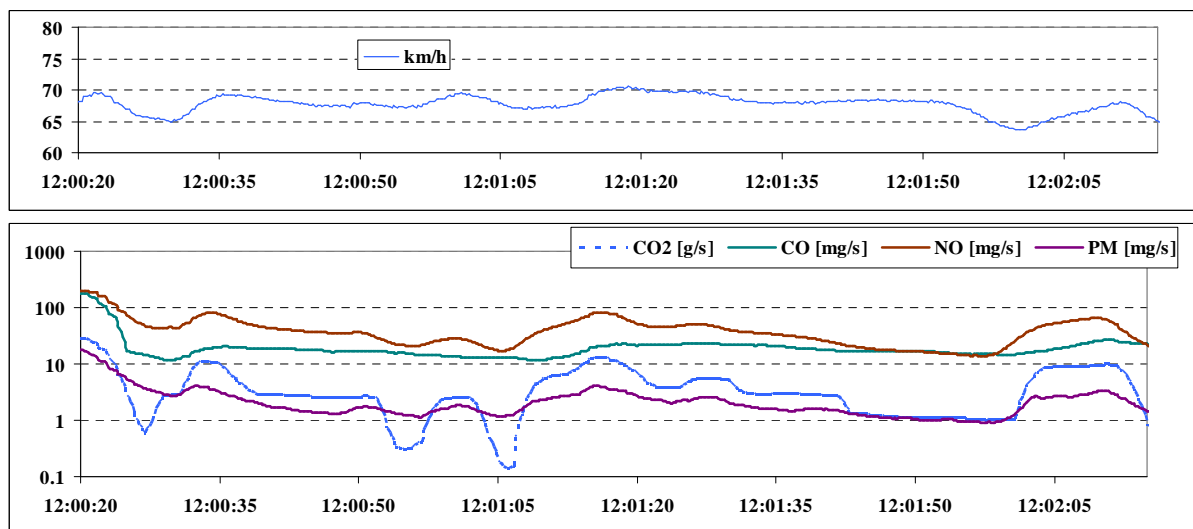
Obr. 2: Porovnání koncentrací CO_2 měřených přenosným palubním zařízením a laboratorním analyzátořem během cyklu ETC (Engine Transient Cycle).



Obr. 3: Porovnání emisí částic: laboratorní měření částic o velikosti 100 nm klasifikátorem SMPS a čítačem CPC, měření nefelometrem (PMM) a ionizační komorou (Ion), na dolním grafu pak lineární kombinace výstupů z nefelometru a ionizační komory.

VÝSLEDKY – MĚŘENÍ NA VOZIDLECH

S tímto analyzátořem, bez měřicí ionizační komory, byla v roce 2008 a 2009 podniknuta řada měření emisí na několika osobních automobilech a jednom autobusu a předběžné měření na jedné lokomotivě. Výsledky z těchto měření byly publikovány v předchozích dílech [14,23,24]. Jedním z nejvýznamnějších poznatků jsou trendy v emisní charakteristice moderních vznětových motorů v lehkých silničních vozidlech, kde je patrné, že emise dvou nejkritičtějších látek – oxidů dusíku (NO_x) a částic (PM) – byly výrazně vyšší v režimech vyšších zatížení motoru než v režimech odpovídajících evropskému homologačnímu cyklu NEDC. Rovněž tak emise PM byly vyšší při vyšších zatíženích v menších otáčkách. Podobné trendy byly pozorovány u čtyř z pěti měřených vozidel [14]. Z měření dále vyplývá, že agresivní jízda má za následek emise částic, které jsou, v přepočtu na jednotku spotřebovaného paliva, několikrát vyšší než během klidné jízdy [23].



Obr.4: Okamžité výfukové emise během "ustálené jízdy při 70 km/h". Autobus SOR C10.5, přepřlňovaný vznětový motor Iveco Tector.

Emise PM byly u dvou vozů Škoda Octavia se vznětovými motory vyšší než u staršího vozu Škoda Favorit s benzinovým motorem bez elektronického řízení a bez katalytického zařízení, a to i tehdy, když se porovnávala agresivní jízda s vozem Favorit s klidnou jízdou s vozy Octavia [23].

Dalším obecným jevem pozorovaným v reálném provozu je neexistence "ustáleného režimu" chodu motoru. To je znázorněno na příkladu na obr. 4, kde při jízdě příměstského autobusu "ustálenou" rychlostí 70 km/h byl pozorován rozptýl jednoho řádu ve spotřebě paliva i okamžitých emisích.

DISKUZE

Přenosná palubní zařízení umožňují sledovat okamžité hodnoty a průběhy výfukových emisí spalovacích motorů v dopravních prostředcích a mobilních strojích. Přesnost a opakovatelnost takových měření je předmětem dalších šetření a diskuze. I když se jejich přesnost nemusí vyrovnat přesnosti složitějších a nákladnějších laboratorních aparatur, v mnohých případech naměřené rozdíly mezi jednotlivými vozidly nebo mezi různými provozními podmínkami jsou natolik podstatné, že mnohanásobně převyšují nejistotu měření. Získané poznatky, doplněné o poznatky z měření na jiných institucích a z laboratorních měření, umožňují rychlé a poměrně nenákladné shromažďování podkladů pro legislativní opatření. Zmíněné výsledky například ukazují na (často neúměrně) zvýšené emise částic při přechodových režimech, při dopravních zácpách, při agresivní jízdě, při rychlé jízdě, a při nahrazení starších zážehových motorů na moderními vznětovými motory. Dále zmíněné výsledky ukazují na zvýšené emise částic lehkých vozidel se vznětovými motory při velmi vysokých rychlostech. Lze též očekávat, že dalším navyšováním výkonu motoru např. "chiptuningem" se emise částic při vyšších zatíženích v mnoha případech ještě dále zvýší.

Proto například přínos omezování provozu starších automobilů jejich nahrazováním novějšími vozy (poplatek za převod staršího vozidla, šrotovné, zákaz vjezdu starších vozidel bez katalyzátorů do středů vybraných měst) ke snížení emisí částic může být sporný. Starší benzinové motory bez katalyzátorů mají, jsou-li v dobrém technickém stavu (lze předpokládat že vozy v neuspokojivém stavu jsou zachyceny pravidelnými emisními kontrolami), nižší emise částic než většina současně provozovaných vznětových motorů (s výjimkou vozů vybavených zachycovači částic s uzavřenými komůrkami, které se zpravidla vyznačují tím, že na vnitřním povrchu výfukové trubice nejsou žádné viditelné nánosy sazí). Ve stávajících a navrhovaných legislativních opatřeních naopak chybí zákaz navyšování výkonu a dalších úprav motorů způsoby, které vedou ke zvýšení emisí, nebo razantní snížení kongesce (vedoucí k nepoměrně velkému snížení výskytu přechodových režimů a tím i emisí částic) opatřeními snižujícími intenzitu dopravy – například zásadní zvýšení mýtného v problematických lokalitách a/nebo v dopravních špičkách, nebo jiný druh zpoplatnění vjezdu do vybraných lokalit obecně nebo ve vybraných periodách. Snížení intenzity dopravy, a tím i nepoměrného snížení emisí částic, lze dosáhnout i plošným zpoplatněním provozu vozidel (a pouze do menší míry zpoplatněním jejich pouhého vlastnictví), například zvýšením a/nebo zavedením mýtného nebo jeho obdoby, nebo zvýšením spotřební daně na ropná motorová paliva.

Vzhledem k omezenému množství dat, k velké rozdílnosti emisí mezi jednotlivými motory i provozními režimy a k neopakovatelnosti reálného provozu lze jen obtížně výsledky kvantifikovat. Cílem práce je proto spíše poukázat na pozorované trendy a na možnosti měření palubními zařízeními.

ZÁVĚR

Přenosná palubní zařízení umožňují sledovat (kvalitativně a do jisté míry i kvantitativně) okamžité hodnoty a průběhy výfukových emisí spalovacích motorů v dopravních prostředcích a mobilních strojích. Při vhodném výběru měřicího zařízení, vozidel a zkušebních podmínek lze očekávat, že poznatky získané z interpretovaných výsledků měření, doplněné o poznatky z měření na jiných institucích a z laboratorních měření, mohou umožnit poměrně rychlé a relativně nenákladné shromažďování podkladů, které mohou být využity pro posouzení vlivu provedených nebo zamýšlených legislativních opatření na výfukové emise.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byla vytvořena v rámci projektu "Metodika pro kvantifikace a vyhodnocení bezpečnostních a environmentálních vlivů dopravy" (CG912-058-520, MDČR) a "Výzkumné centrum spalovacích motorů Josefa Božka II" (1M6840770002, MŠMT). Autor děkuje ing. Richardu Vackovi za umožnění a realizaci porovnávacích měření, která byla provedena v laboratořích TUV-SUD Auto CZ, Praha.

LITERATURA

1. Czech Statistical Yearbook, 2001-2007. Czech Bureau of Statistics, online at http://www.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/statisticke_rocenky_ceske_republiky.
2. Statistical Environmental Yearbook of the Czech Republic. Ministry of Environment of the Czech Republic, 2000-2007, online at <http://www.env.cz/AIS/web.nsf/pages/statisticke-rocenky>
3. Smolík, J.; Bízek, V.; Ždímal, V.; Ondráček, J.; Ondráčková, L.; Andělová, L.: Příspěvek dopravy k místnímu znečištění ovzduší. Proceedings of the Ovzduší 2009 conference, April 26-29, 2009, Brno, Czech Republic, pp. 62-66.
4. Adamec, V.: Vliv emisí pevných částic z dopravy na zdraví obyvatel. Doprava, 2005, č.5, s.11-13.
5. Kittelson, D. B., W. F. Watts, and J. P. Johnson 2006. "On-road and Laboratory Evaluation of Combustion Aerosols Part 1: Summary of Diesel Engine Results," Journal of Aerosol Science, 37, 2006, pp. 913-930.
6. Mayer, A. 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, 2007.
7. Gehr, P.; Blank, F.; Rothen-Rutishauser, B.: Fate of inhaled particles after interaction with the lung surface. Paediatric Respiratory Reviews, Vol. 7, Suppl. 1, 2006, pp. S73-S75.
8. Peters, A.: Epidemiology on Health Effects of Solid Nanoparticles. Proceedings of the 12th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, Switzerland, June 2008.
9. Kuenzli, S.: Chronic pulmonary effects of ambient nano-PM: Lessons learned from PM. 13th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich, Switzerland, June 2009.
10. http://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards
11. http://ec.europa.eu/enterprise/automotive/directives/vehicles/2007_46_ce.html
12. <http://www.dieselnets.com/standards/>
13. Ročenka dopravy 2008. <http://www.sydos.cz/cs/rocenka-2008/index.html>
14. Vojtíšek-Lom, M.; Fenkl, M.; Dufek, M.; Mareš, J.: Off-cycle, real-world emissions of modern light-duty diesel vehicles. SAE Technical Paper 2009-24-0148. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 2009.
15. De Vlieger, D., De Keukeleere, D., Kretschmar, J.G.: Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. Atmospheric Environment, Vol. 34, 27, 2000, pp. 4649-4655.
16. Adamec, V.: Výroční zpráva projektu MDČR 1F54H/098/520 - Prašnost dopravy a její vlivy na imisní zatížení ovzduší suspendovanými částicemi. Centrum dopravního výzkumu, Brno, 2008.
17. Noland, R.B.; Cowart, W.A.: Analysis of Metropolitan Highway Capacity and the growth in vehicle miles of travel. Transportation 27, 2000, 363-390.
18. Vojtíšek-Lom, M., Cobb, J.T.: On-road light-duty vehicle emission measurements using a novel inexpensive on-board portable system. Sborník konference 8th CRC On-road vehicle emissions workshop, San Diego, California, USA, 1998.
19. Lenaers G., Pelkmans L. and Debal P. (2003): The Realisation of an On-board Emission Measuring System Serving as a R&D Tool for Ultra Low Emitting Vehicles. Int. J. Veh. Design, Vol.31, No. 3, pp 253-268.
20. Miller, J.W.; Cocker, D.; Johnson, K.C.; Park, C.S.; Welch, W.A.; Norbeck, J.M.: Use of a Mobile Laboratory to Measure HDD Real World Emissions from a Number of Standard and Non-Standard Cycles. 12th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop. San Diego, CA, April 15-17, 2002.
21. Dearth, M.A., et al.: SemtechD: The Chassis Roll Evaluation of a Commercial Portable Emission Measurement System (PEMS). SAE Technical Paper 2005-01-0673, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 2005.
22. Breton, Leo: Real-time on-road vehicle exhaust gas modular flowmeter and emissions reporting system. United States patent no. 6148656, 2000.
23. Vojtíšek M., Fenkl M., Dufek M.: Effect of high-speed, performance driving on exhaust emissions of modern light-duty vehicles. In: Advances in Automotive Engineering, Brno 2008, ISBN 978-80-7399-496-9.
24. Vojtíšek, M.: Výfukové emise z moderních pístových spalovacích motorů během reálného provozu: trendy, faktory ovlivňující rozložení emisí a anomálie, měřicí metody. Sborník konference Ovzduší 2009, Brno, 26.-29.4.2009, ISBN 978-80-210-4829-4, str. 84-88.