

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Diplomová práce

Analýza produkce pevných částic spalovacích motorů

Bc. Marcel Svět

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Marcel Svět

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Analýza produkce pevných částic spalovacími motory

Název anglicky

Analysis of particulate matter production of internal combustion engines

Cíl práce

Cílem práce je literární rešerše v oblasti produkce pevných částic spalovacími motory (rozbor částic, přístroje, metody) a následně porovnávací měření vybraných přístrojů pro měření pevných částic produkovaných motorem osobního automobilu.

Metodika

Rešeršní část práce bude založena na studiu a analýze odborných zdrojů informací. Praktická část se bude věnovat měření produkce pevných částic vznětového motoru osobního automobilu bez filtru pevných částic, které bude prováděno různými přístroji. Měření bude probíhat v laboratorních podmínkách na věcné zkušební.

Práce bude zpracována dle osnovy:

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Přehled řešené problematiky
5. Praktická část práce
6. Výsledky a diskuse
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů
9. Přílohy

Doporučený rozsah práce
40-60 stran

Clíčová slova
analýza, spalovací motor, emise, pevné částice

Doporučené zdroje informací

EASTWOOD, Peter. Particulate Emissions from Vehicles. Chichester: Antony Rowe, 2008. ISBN 978-0-470-72455-2

HROMÁDKO, Jan. Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-2473-475-0

MOHANKUMAR, S. ■ P. SENTHILKUMAR. Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2017, 80, 1227-1238 [cit. 2022-11-23]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.05.193

PETROVIC, Velimir, Slobodan JANKOVIC, Mirosljub TOMIC, Zoran JOVANOVIC ■ Dragan KNEZEVIC. The possibilities for measurement and characterization of diesel engine fine particles: A review. Thermal Science [online]. 2011, 15(4), 915-938 [cit. 2022-11-23]. ISSN 0354-9836. Dostupné z: doi:10.2298/TSC110509192P

Předložení termín obhajoby
2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce
doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Garantující pracoviště
Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 16. 1. 2023

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Miroslav Mašek, Ph.D.
Děkan

V Praze dne 22. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Analýza produkce pevných částic spalovacích motorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31. 3. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Martinu Kotkovi, Ph.D. za trpělivost, cenné rady a připomínky při psaní práce a také svým rodičům za podporu po celou dobu studia.

Analýza produkce pevných částic spalovacími motory

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na produkci pevných částic spalovacími motory osobních automobilů.

Rešeršní část práce obsahuje analýzu vzniku pevných částic a jejich charakteristických vlastností, jako jsou složení, tvar, velikost a skupenství. Věnována je také rizikům, které pevné částice představují pro lidské zdraví. Dále jsou v této části popsány měřicí přístroje pro analýzu pevných částic rozdělené do skupin podle principu měření, metody pro snižování emisí pevných částic a typy měření pevných částic podle legislativních předpisů.

Praktická část popisuje provedené experimentální měření emisí pevných částic produkovaných běžným osobním automobilem se vznětovým motorem bez filtru pevných částic v laboratorních podmínkách na válcové zkušebně. Naměřená a analyzovaná data z různých přístrojů jsou v následující části porovnána a vyhodnocena.

Klíčová slova: analýza; spalovací motor; emise; pevné částice

Analysis of particle matter production of internal combustion engines

Abstract

This thesis focuses on the production of particulate matter by passenger car internal combustion engines.

The research part of the thesis includes an analysis of the formation of particulate matter and its characteristic properties such as composition, shape, size and state. It also addresses the risks that particulate matter poses to human health. In addition, this section describes the measuring instruments for particulate matter analysis grouped according to the principle of measurement, methods for reducing particulate matter emissions and types of particulate matter measurement according to legislative regulations.

The practical part describes experimental measurements of particulate matter emissions produced by a conventional diesel passenger car without a diesel particulate filter under laboratory conditions on a chassis dynamometer. The measured and analysed data from different instruments are compared and evaluated in the following section.

Keywords: analysis; internal combustion engine; emissions; particle matter

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce.....	2
3 Metodika práce.....	3
4 Přehled řešené problematiky	4
4.1 Rozbor částic	6
4.1.1 Složení pevných částic	7
4.1.2 Tvar pevných částic	8
4.1.3 Velikost pevných částic	10
4.1.4 Skupenství pevných částic	11
4.1.5 Zdravotní rizika spojená s pevnými částicemi.....	11
4.2 Přístroje	12
4.2.1 Gravimetrická metoda.....	14
4.2.2 Analýza chemických skupin	14
4.2.3 Hmotnostní spektrometrie.....	16
4.2.4 Optická metoda – rozptyl světla	17
4.2.5 Optická metoda – absorpce světla	18
4.2.6 Extinkce světla.....	22
4.2.7 Metody mikrobalance	24
4.2.8 Měření velikosti částic	24
4.2.9 Požadavky na přístroje používané na SME	28
4.3 Metody	31
4.3.1 Metody snižování emisí pevných částic	31
4.3.2 Legislativní rozdělení měření emisí pevných částic	34
5 Praktická část práce.....	41
5.1 Průběh měření	41
5.2 Testované vozidlo	41
5.3 Přístrojové vybavení.....	42
5.3.1 Testo NanoMet3	42
5.3.2 Palas UF-CPC 200	44
5.3.3 TSI EEPS 3090	45
5.3.4 Dekati ePNC	46
5.3.5 Přístroje pro měření plynných emisí	47
5.3.6 Válcová zkušebna Schenck 3604/GS56	47
5.3.7 OBD diagnostika.....	47

5.4	Uspořádání měřicího pracoviště	48
5.5	Zpracování naměřených dat	48
6	Výsledky a diskuse	50
6.1	Koncentrace částic v ustálených stavech.....	50
6.1.1	Ustálený stav 1	50
6.1.2	Ustálený stav 2	51
6.1.3	Ustálený stav 3	53
6.1.4	Vyhodnocení výsledků v ustálených stavech.....	54
6.2	Koncentrace částic při přechodových stavech.....	55
6.2.1	Akcelerace 1.....	55
6.2.2	Akcelerace 2.....	56
6.2.3	Akcelerace 3.....	57
6.2.4	Vyhodnocení výsledků v přechodových stavech	58
6.3	Koncentrace částic při celém testovacím cyklu	60
7	Závěr.....	62
8	Seznam použitých zdrojů.....	64

1 Úvod

V moderním světě jsou k pohonu silničních vozidel z valné většiny využívány spalovací motory s vnitřním spalováním, které historicky nahradily starší typy motorů založené na principu parního stroje díky svému mnohem příznivějšímu poměru hmotnosti a výkonu. Jako první se začaly v 60. letech 19. století vyrábět zážehové motory, kde sloužil jako palivo plyn, ale za základ spalovacích motorů dnešní doby je považován čtyřtákní motor Nicolause Augusta Otta patentovaný v roce 1877 označovaný jako „Ottův motor“. Vznětové motory vznikly později vynálezem konstruktéra Rudolfa Diesela roku 1897, ale byly kvůli svým velkým rozměrům a složitému vysokotlakému kompresoru zatím vhodné jen stacionární či lodní motory. Většího rozmachu se vznětové motory dočkaly po vynalezení hydraulického vstřikovacího čerpadla v meziválečném období. Tehdy se ovšem motory nevyvíjely s důrazem na jejich dopady na životní prostředí – byly poměrně hlučné a produkovaly velké množství emisí, které případně jen mírně upravovaly místní předpisy. Rozhodující byly výkon a hospodárnost motorů s vnitřním spalováním. Vozidla poháněná spalovacími motory se postupně masově rozšířila (v roce 2023 je na světě provozováno přibližně 1,2 miliardy takových vozidel, z toho zhruba 900 milionů osobních automobilů), mnohá jezdí ve velkoměstech a městských aglomeracích, kde produkují emise plynné i pevných částic přímo do ovzduší [1], [2].

Pevné částice produkované spalovacími motory jsou poměrně často diskutovaným tématem, protože mohou být významným nebezpečím pro lidské zdraví i životní prostředí. Kromě emisí z výfuků jsou ovšem všechna silniční vozidla producenty také dalších pevných částic vznikajících například otěrem pneumatik, vozovky, spojkového a brzdového obložení apod. Plynnými emisemi ze spalovacích motorů se začaly zabývat různé emisní normy již v 60. letech 20. století v USA, pevnými částicemi poté jako první na světě evropská norma Euro 1 v roce 2001, nicméně na ostatní pevné částice, které nevychází z výfuků vozidel, začala klást důraz až nejnovější emisní norma Euro 7. Prvotní návrh tohoto standardu byl velice přísný a označovaný automobilkami téměř jako nesplnitelný z důvodu velice krátké doby mezi schválením a uvedením v platnost a také podmínek měření pevných částic z brzd a pneumatik, takže byl během roku 2023 po dlouhých jednáních upraven a zmírněn [3], [4], [5].

2 Cíl práce

Cílem práce je literární rešerše v oblasti produkce pevných částic spalovacích motorů (rozbor částic, přístroje, metody) a následné porovnávací měření různých přístrojů pro měření pevných částic produkovaných vznětovým motorem osobního automobilu.

3 Metodika práce

Metodika řešení práce se zakládá na studiu a analýze odborných zdrojů a oficiálních směrnic, jejich studiu a vytvoření rešerše.

Praktická část se bude věnovat měření produkce pevných částic u osobního automobilu se vznětovým motorem, který z výroby není vybaven filtrem pevných částic. Měření se bude provádět na válcové zkušebně v laboratořích Technické fakulty, pro křížovou kontrolu a vzájemné porovnání bude použito několik přístrojů pro měření emisí plyných i pevných částic ve výfukových plynech. Měřit se bude podle standardizovaného homologačního cyklu WLTC, který je podrobněji popsán v dalších kapitolách.

Závěr práce obsahuje shrnutí teoretických poznatků a jejich porovnání s praktickou částí práce.

4 Přehled řešené problematiky

V odborných zdrojích je spalovací motor definován následovně: „Spalovací motor je tepelný stroj, který spalováním paliva získává tepelnou energii a využitím vhodného plynného média ji převádí na mechanickou práci. Energie plynného média je využívána buď jako energie potenciální (tlak spalin) u pístových motorů, nebo energie kinetická (rychlost proudu spalin) u spalovacích turbín.“ [1].

Ve vozidlech jsou nejrozšířenější pístové spalovací motory s vnitřním spalováním, kde je energie přenášena na píst klikového mechanismu. Používaná paliva mají většinou kapalné skupenství (benzín, nafta, methanol, ethanol, E85) nebo plynné skupenství (LPG – zkapalněný propan-butan, CNG/LNG – stlačený/zkapalněný zemní plyn), podle toho se tyto motory nazývají plynové. Motory se podle způsobu dopravy náplně do válce dělí na motory s přirozeným sáním, s vyplachováním a přeplňované motory, kde je tlak dopravované směsi zvýšen dmychadlem (turbodmychadlem, kompresorem). Počet dob pracovního cyklu motory dělí na dvoudobé a čtyřdobé. A dále se motory rozdělují na zážehové a vznětové, když je jako ukazatel využit způsob zapálení směsi paliva se vzduchem. U zážehových motorů je pro zažehnutí paliva nutná zapalovací svíčka, která elektrickým výbojem zapaluje směs ve válci, vznětové motory spoléhají na vznícení směsi paliva vstříknutého do válce za vysoké teploty a tlaku.

Palivo pro spalovací motory se zjednodušeně skládá z uhlíku, vodíku, síry a kyslíku. Spalování paliva ve spalovacích motorech tedy teoreticky probíhá podle těchto základních stechiometrických rovnic.

$$c + h + s + o = 1 \cdot kg \quad (1)$$

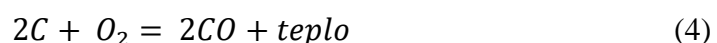
Písmena c, h, s, o znamenají hmotnost uhlíku (C), vodíku (H₂), síry (S) a kyslíku (O₂) v 1 kg paliva s rozměrem kg·kg⁻¹ paliva.

Při hoření paliva spalitelné prvky shoří – váží se s kyslíkem podle těchto spalovacích rovnic:

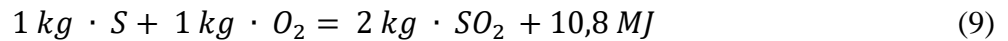
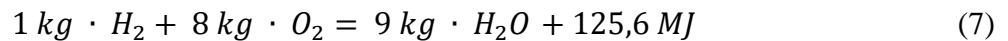


$$1 \text{ kg} \cdot C + \frac{8}{3} \text{ kg} \cdot O_2 = \frac{11}{3} \text{ kg} \cdot CO_2 + 33,9 \text{ MJ} \quad (3)$$

resp.



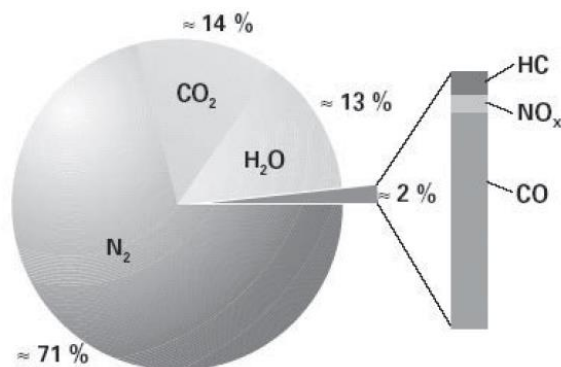
$$1 \text{ kg} \cdot C + \frac{4}{3} \text{ kg} \cdot O_2 = \frac{7}{3} \text{ kg} \cdot CO + 10,2 \text{ MJ} \quad (5)$$



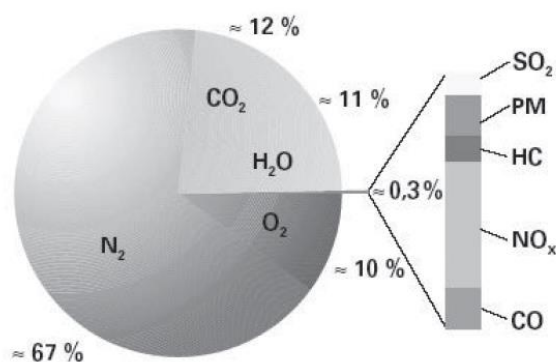
Z toho vyplývá, že spálením jednoho kilogramu uhlíku vzniká 3,67 kg oxidu uhličitého a také 2,33 kg oxidu uhelnatého. Při spálení jednoho kilogramu vodíku se vytvoří 9 kg vody a při shoření stejného množství síry jsou výsledkem reakce dva kilogramy oxidu siřičitého.

Protože však děje ve spalovacím motoru neprobíhá pouze podle těchto ideálních rovnic, a protože je spalován vzduch a nikoli jen čistý kyslík, jsou ve výfukových plynech obsaženy mnohé další sloučeniny. Nedokonalou oxidací vzniká vodík. Při přebytku kyslíku nebo jiném důvodu nevyužití kyslíku ve směsi s palivem je ve výfukových plynech ze zážehového motoru přítomen kyslík, který je u vznětových motorů vždy z důvodu spalování chudé směsi. Jelikož atmosférický vzduch tvoří ze 75,5 hmotnostních procent dusík, je také tento prvek tou nejvýznamnější složkou výfukových plynů. Při vysokých teplotách ve spalovacím prostoru vznikají oxidací dusíku ze vzduchu oxidy dusíku NO_x : zejména oxid dusnatý (NO), méně potom oxid dusičitý (NO_2) a oxid dusný (N_2O). Nespálené uhlovodíky (HC) vznikají, pokud jsou velice nepříznivé podmínky pro oxidaci paliva a za neúplného přístupu vzduchu nastává v kapce nespáleného paliva za vysoké teploty dekompozice molekul uhlíku, což má za následek vznik sazí (pevného uhlíku) ve spalinách. K tomuto jevu dochází zejména u vznětových motorů. Paliva obsahují také síru, která během spalování oxiduje na oxidy síry, jež se objevují ve spalinách. S výfukovými plyny dále z motoru vychází také malé množství dalších druhů pevných částic, které budou podrobněji charakterizovány v následujících kapitolách [1], [6].

Obrázek 1: Složení výfukových plynů zážehového motoru [1]



Obrázek 2: Složení výfukových plynů vznětového motoru [1]



Na obrázcích 1 a 2 je uvedeno přibližné procentuální složení výfukových plynů zážehových a vznětových motorů. Rozdíly ve složení výfukových plynů jsou kromě odlišného paliva (benzín vs. motorová nafta) dané také rozdílným fungováním zážehového motoru, který pracuje častěji se stechiometrickou směsí a vznětového motoru spalujícího chudou směs s přebytkem vzduchu. Voda se ve výfukových plynech vyskytuje jako vodní pára.

4.1 Rozbor částic

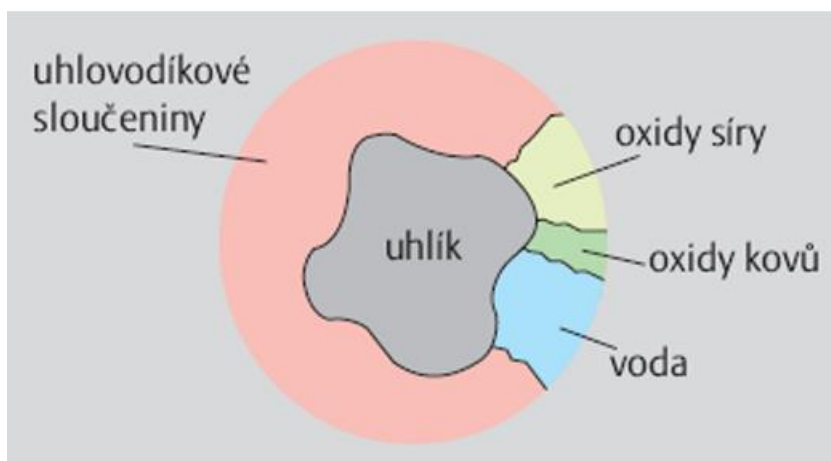
Tato kapitola se věnuje rozboru pevných částic, někdy též označovaných jako polétavý prach, prachové částice nebo PM (z anglického Particulate Matter). Výskyt pevných částic v ovzduší je zcela přirozeným jevem. Při erupcích sopek, lesních požárech, krystalizaci soli ze slané mořské vody nebo erozi hornin dochází k produkci pevných částic, které se rozptýlí ve vzduchu a tvoří tak aerosol, což je směs kapalných či pevných částic rozptýlených v plynu. I tyto přírodní částice mohou být pro člověka škodlivé, nicméně se na světě většinou nevyskytují v příliš vysokých podílech. Vyšší koncentrace pevných částic

jsou zejména ve městech a průmyslových oblastech, kde převažuje tzv. antropogenní vliv – tedy vliv člověka, jehož činností vznikají pevné částice. Mezi tyto aktivity se řadí průmyslová činnost, spalování odpadu, doprava, výroba elektřiny a také vytápění domácností, ke kterému jsou i v dnešní době zejména na venkově využívány kotle a kamna na tuhá paliva. Následující podkapitoly se zaměří na podrobný rozbor pevných částic, které jsou produkovány dopravou, resp. spalovacími motory.

4.1.1 Složení pevných částic

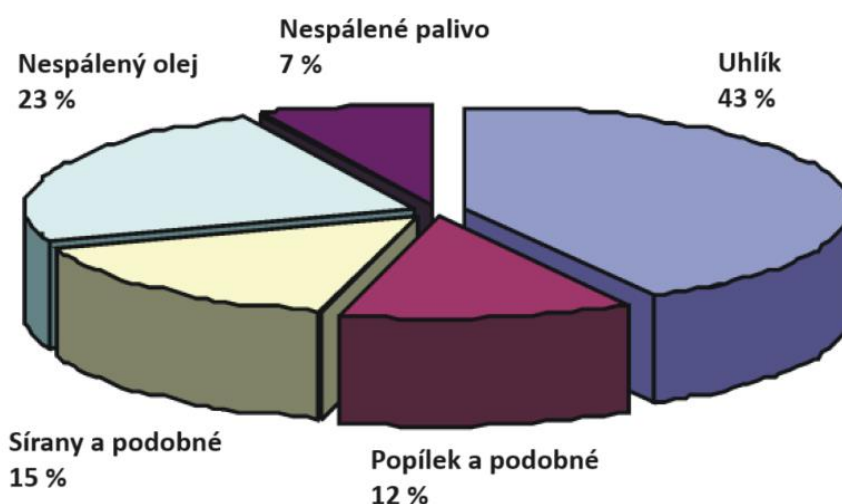
Existuje několik mechanismů vzniku pevných částic postupně od úplného začátku spalování ve spalovacím prostoru až po chvíli, kdy výfukové plyny opouští výfukové potrubí vozidla. Pevné částice vznikající pyrolytickým spalováním molekul paliva ve vznětovém spalovacím motoru jsou tvořeny z největší části saze – primárním uhlíkem. Tvorba sazí souvisí zejména s kvalitou vstřiku paliva do válce a saze vznikají v místech spalovacího prostoru, kde nedochází k dokonalému difúznímu spalování paliva vlivem neodpaření kapek paliva a extrémně nízkého místního přebytku vzduchu nebo kvůli spalování motorového oleje vniklého netěsnostmi do spalovacího prostoru. Na čistý primární uhlík ve formě sazí se váží další látky vzniklé při spalování a kondenzací či adsorpcí tvoří velké množství sloučenin. Pevné částice se proto dále skládají z těžkých uhlovodíků, kde je z hlediska zdraví člověka obzvlášť nebezpečná skupina polycyklických aromatických uhlovodíků – tj. uhlovodíků vázaných do struktury spojených benzenových jader. Nejnebezpečnější je karcinogenní benzo(a)pyren, dále se na pevné částice váže také fluoren, antracen, tetracen, fluoranten, fenalen, chryzén, trifenylen, fenanthren či pyren. Na povrchu pevných částic se dále usazuje tzv. sulfátová frakce obsahující oxidy síry. Převážná většina oxidů síry je emitována jako oxid siřičitý (SO_2) a jen 2–3 % jako oxid sírový (SO_3). Nicméně při použití oxidačního katalyzátoru ve výfukovém potrubí vozidla se oxid siřičitý oxiduje na oxid sírový a poměr se obrací až na 70 % SO_3 . Další složkou pevných částic je popílek tvořený z různých oxidů, hydroxidů a síranů pocházejících z nespalitelných zbytků paliva a motorového oleje. V pevných částicích se vyskytují také kovy jako nikl, olovo, zinek, chrom, kadmium, kobalt, arsen, měď a jejich oxidy, které jsou produktem opotřebení válce, pístu nebo pístních kroužků motoru. Poslední významnou složkou pevných částic je vázaná voda, která může být přítomna jako kapka vody s navázanými cizími sloučeninami, které molekulu vody obalují, případně může být navázána na povrchu uhlíku tvořícího pevné částice. Na obrázku níže je schématické znázornění pevné částice [1], [5].

Obrázek 3: Schématické znázornění pevné částice [7]



Procentuální podíly druhů pevných částic ve výfukových plynech vznětových motorů se vyvíjely s časem a metodami omezování emisí. Na obrázku je uveden příklad složení emitovaných pevných částic vznětového motoru těžkého nákladního vozidla splňujícího emisní normu Euro IV, ze kterého je patrné, že téměř polovinu tvoří pevný uhlík, asi 30 % jsou těkavé organické sloučeniny z nespáleného paliva a oleje a přibližně 15 % anorganické sloučeniny na bázi síry a dusíku [8].

Obrázek 4: Procentuální složení pevných částic motoru Euro IV [8]

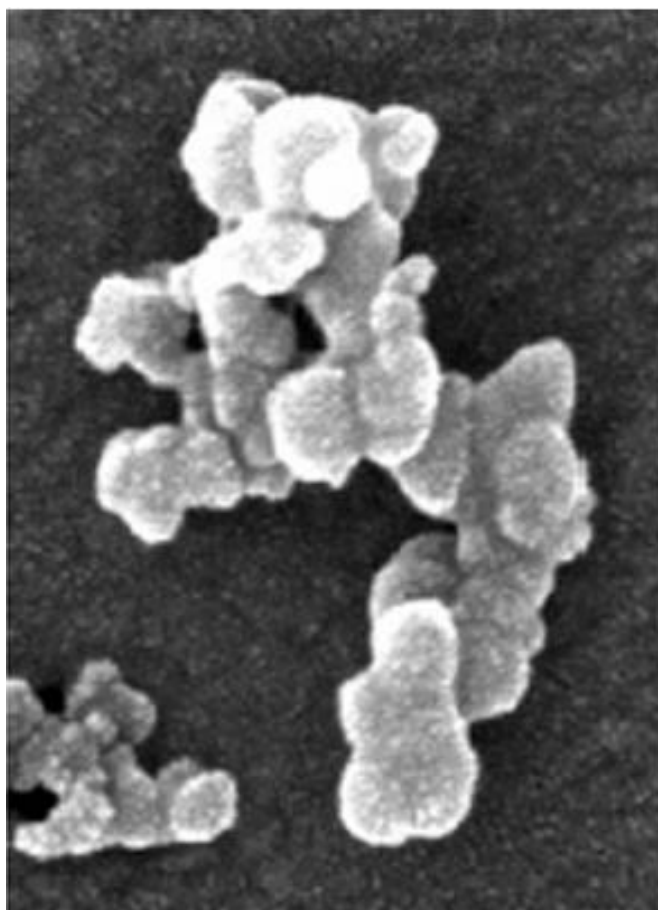


4.1.2 Tvar pevných částic

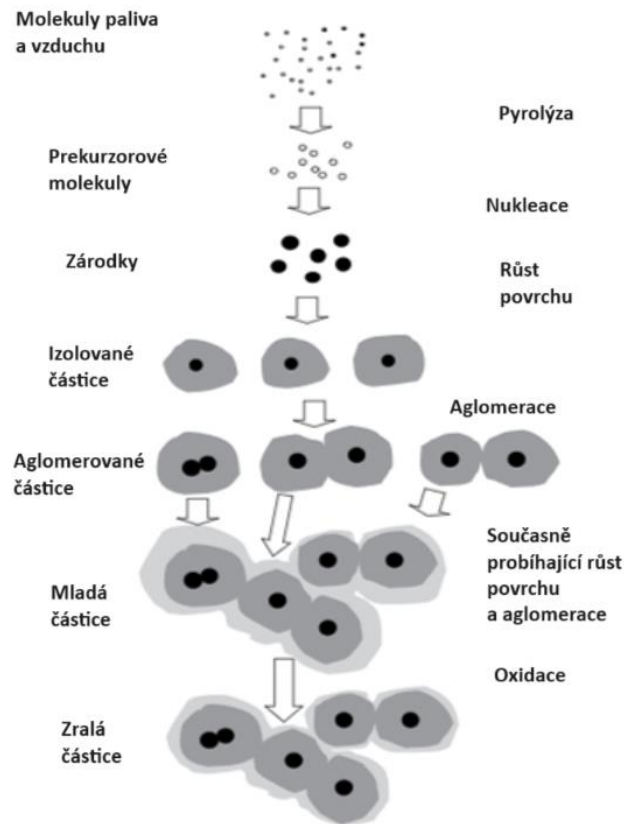
Představa, že mají pevné částice kulovitý tvar jako na jejich schématickém zobrazení výše, by nebyla zcela správná. Tvorba a následný růst pevných částic probíhá v několika krocích, počínaje pyrolýzou (tepelně-chemickým rozkladem), po které následují nukleace

(vznik zárodečných míst nové fáze), koalescence (splývání disperzních částic ve větší celky a zánik aerosolu), růst povrchu, a nakonec je proces zakončen aglomerací (spojováním částic do větších celků) a oxidací. Z tohoto důvodu mají pevné částice rozličné a složité tvary, které jsou viditelné z obrázků níže, kde je nejprve uveden snímek typické pevné částice ze vznětového motoru a následně proces růstu částice s jednotlivými fázemi. Zárodek, resp. jádro částice je tvořeno většinou pevným uhlíkem, někdy kapkou vody, na jejichž povrchu se zachycují další organické i anorganické sloučeniny nacházející se v těkavém stavu. Kapky vody jsou také jedinou výjimkou, kdy mají pevné částice relativně pravidelný kulovitý tvar [5].

Obrázek 5: Snímek pevné částice ze vznětového motoru z elektronového mikroskopu [7]



Obrázek 6: Tvorba a růst pevných částic [5]



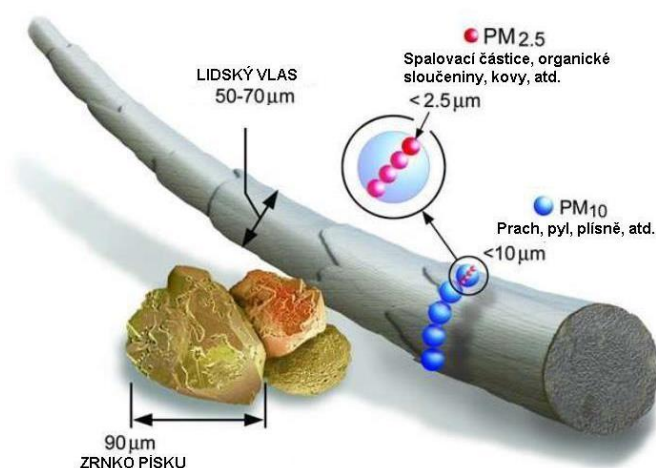
4.1.3 Velikost pevných částic

Jak bylo zmíněno výše, mají pevné částice velice nepravidelný, často vláknitý tvar, který komplikuje stanovení jejich velikosti. Pro charakteristiku velikosti pevných částic proto existují různé způsoby, jako jsou: průměr částici nepravidelného tvaru proložené koule ekvivalentní objemu; průměr koule Stokesova ekvivalentu; průměr aerodynamicky ekvivalentní koule. Další možností, jak posuzovat velikost částic je velikost jejího povrchu, která se u běžné pevné částice produkované vznětovým motorem obvykle pohybuje v rozmezí 100–150 m²/g. Rozložení velikosti je u pevných částic logaritmicke-normální. Pokud se využije metoda proložené koule ekvivalentního objemu, většina částic podle hmotnosti se nachází v režimu akumulace (velikost 100–900 nm) a většina částic podle počtu se nachází v režimu nukleace (< 100 nm).

Pokud se použije klasifikace pevných částic podle velikosti (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁), spadají pevné částice produkované spalovacími motory do kategorií PM_{2,5} a PM₁, tedy mezi částice, jejichž aerodynamický průměr (výše také jako průměr aerodynamicky ekvivalentní

koule) je menší než 2,5 μm resp. 1 μm . Samotná jednotlivá částice pevného primárního uhlíku neboli saze, má aerodynamický průměr zhruba 0,05 μm , ale jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, vzniklé pevné částice mají rozměry větší kvůli spojování částic aglomerací. Pro zajímavost otěrové částice z pneumatik, spojkového a brzdového obložení spadají z velké části do velikosti PM_{2,5}. Níže je pro představu obrázek, na kterém je pro srovnání velikost lidského vlasu, zrnka jemného písku a částic PM₁₀ a PM_{2,5} [5], [9].

Obrázek 7: Názorná představa velikosti pevných částic [9]



4.1.4 Skupenství pevných částic

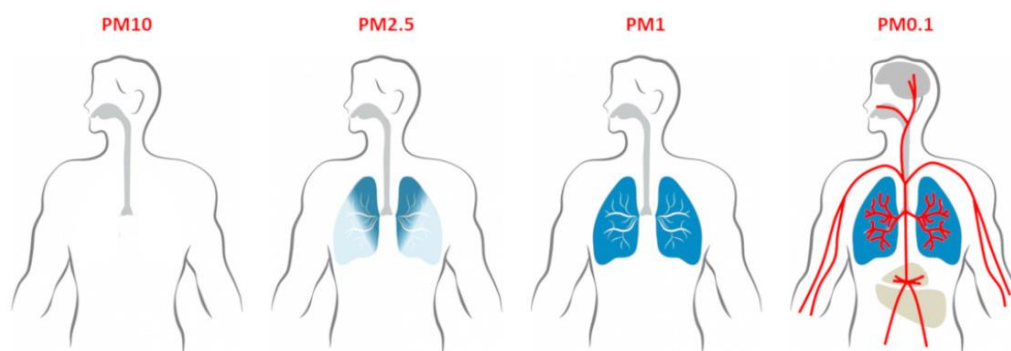
Pojem „pevná částice“ může být částečně matoucí, protože vede k myšlence, že taková částice se vyskytuje pouze v pevném skupenství. V aerosolu výfukových plynů spalovacích motorů se však tzv. pevné částice vyskytují v kapalném i pevném stavu. Kapalně skupenství se v tomto případě týká částic tvořených vodou, pevné potom uhlíkatými a popelovými frakcemi [5].

4.1.5 Zdravotní rizika spojená s pevnými částicemi

Částice velikosti do 10 μm jsou zachyceny na sliznicích horních cest dýchacích, ty menší pronikají i do dolních dýchacích cest. Částice PM₁₀ jsou proto méně škodlivé než částice PM_{2,5}, kterým lidské dýchací ústrojí nestaví do cesty žádné zábrany. Nejnebezpečnější jsou pak částice PM₁, tedy menší než 1 μm , protože se mohou snadno dostávat až do plicních sklípků. V případě nanočástic (menší než 0,5 μm = PM_{0,5}) pak již můžeme hovořit o pronikání až do krevního řečiště a nanočástice tak ovlivňují přímo jednotlivé orgány včetně mozku. V případě částic PM₁₀ při krátkodobé expozici dochází

k podráždění dýchacích cest a častějším infekcím, při dlouhodobé pak k rozvoji vážných onemocnění dýchacích cest. Samotné zárodky pevných částic nejsou pro lidské zdraví nebezpečné, riziko ovšem představují těkavé organické látky a další sloučeniny, které se na ně váží. Jedná se hlavně o polycyklické aromatické uhlovodíky a těžké kovy, které v organismu působí toxicky. Pevné částice nepůsobí jen na plíce, ale mohou zprostředkovaně pomocí přenášených těkavých organických látek působit i na jiné orgány. Primárně mohou způsobovat/zhoršovat kardiovaskulární onemocnění a choroby dýchacích cest (astma, chronickou obstrukční plicní nemoc), způsobují podráždění očí, nicméně navázané těkavé karcinogenní látky mohou mít za následek vznik rakoviny plic a dalších orgánů. Na obrázku níže je uvedeno, kam v lidském organismu pronikají pevné částice od velikosti PM_{10} (tzv. „hrubé“ částice) až po velikost nanočástic $PM_{0,1}$ [5], [9], [10].

Obrázek 8: Pronikání částic různých velikostí do lidského organismu [10]



4.2 Přístroje

Změny v měření emisí pevných částic, které proběhly v posledních 20 letech, a snížené emise pevných částic až do úrovně velikosti chyby měření dříve užívaných přístrojů, vyvolaly poptávku po nových přístrojích, které jsou schopny měřit v reálném čase, mají zvýšenou citlivost a umožňují provoz na palubě vozidla během jeho provozu. V reakci na tento vývoj vznikla řada nových a vylepšených přístrojů a metod měření založených například na gravimetrickém měření, chemické analýze filtrů, optických metodách či na elektrickém náboji pevných částic. Následující podkapitoly se blíže věnují jednotlivým metodám zkoumání množství pevných částic ve výfukových plynech shrnutých v tabulce [5], [8].

Tabulka 1: Shrnutí základních metod zkoumání pevných částic [11]

Princip		Měřená vlastnost	Informace v reálném čase	Informace o velikosti částic
Gravimetrická metoda	Vážení filtru	Hmotnost	Ne	Ne
Analýza chemických skupin	Rozpouštění	PM = SOL + SOF + SUL	Ne	Ne
	Tepelné odpařování	PM = EC + OC	Ne	Ne
	Hmotnostní spektrometrie	Hmotnost	Ano	Ano
Optické metody	Rozptyl světla	Hmotnost (kouře), resp. počet	Ano	Ne
	Absorpce světla	Hmotnost	Ano	Ne
	Extinkce světla	Opacita (kouřivost)	Ano	Ne
Mikrobalanční metody	Mikrobalance	Hmotnost	Ano	Ne
Měření velikosti částic	Mikroskopie	Počet, plocha	Ne	Ano
	Impaktor	Hmotnost	Ne	Ano
	Spektrometr diferenciální pohyblivosti	Počet	Ano	Ano
	Diferenciální analyzátor pohyblivosti	Počet	Ne	Ano
Metody využívající elektrický náboj		Aktivní plocha	Ano	Ne

4.2.1 Gravimetrická metoda

Při gravimetrické metodě se zjišťuje hmotnost pevných částic nashromážděných ve filtru po zředění v CVV tunelu nebo ředidlem s částečným průtokem. Hmotnost částic se vypočítá jednoduše odečtením hmotností filtru po testu a před testem. Filtr shromažďuje všechny velikosti částic. Konvenční filtry jsou vyrobeny ze skleněných vláken a mezivrstvy (např. polytetrafluorethylen – PTFE) chránící povrch před chemickými reakcemi. Měření filtrů jsou ovlivněna adsorpcí výparů na substrátech, ztrátami odpařováním během nebo po odběru vzorků a reakcemi mezi shromážděnými (amonnými) částicemi a substráty. Manipulace s filtry a ztráty materiálu z povrchu filtru mohou také hrát důležitou roli, zejména u filtrů z křemenných vláken. Tyto ztráty mohou řádově činit až 20 µg a mohou záviset na množství částic na filtru. Aby se zabránilo elektrostatickým účinkům nabitých částic a elektrostatickým účinkům při manipulaci s filtry, jsou filtry neutralizovány bezprostředně před umístěním na misku váhy. U vozidel s moderními technologiemi zpracování výfukových plynů naráží gravimetrická metoda na své detekční limity, protože samotný filtr má hmotnost kolem 150 mg, zatímco pevné částice zachycené filtrem u vozidel vybavených DPF mohou vážit až 10 µg, což tvoří jen necelých 0,1 % hmotnosti filtru. Nedostatečná citlivost gravimetrické metody je hlavním důvodem pro hledání alternativních detekčních technik [8].

4.2.2 Analýza chemických skupin

Předpisy o emisích pevných částic nestanovují žádná měření na základě chemického složení. Ta se provádějí pouze pro výzkumné účely a k poskytnutí informací pro následné studie. Chemická analýza se provádí na vzorcích odebraných pomocí filtrů.

4.2.2.1 Analýza chemických skupin rozpouštěním

Při analýze chemických skupin rozpouštěním (extrakcí rozpouštědly) se usazené částice extrahují organickým rozpouštědlem a vodou, čímž se odstraní organické a anorganické frakce. Jako organické rozpouštědlo slouží např. dichlormethan a extrakcí plynovou chromatografií/masovou spektrometrií (GC/MS). Takto se charakterizuje tzv. rozpustná organická frakce (SOF). Po odpaření rozpouštědla lze stanovit hmotnost SOF

vážením zbytku. Obvykle se rozpouštědlo částečně odpaří, aby se SOF zkoncentroval pro GC/MS analýzu pro analýzu SOF polycyklických aromatických uhlovodíků (PAH), dusíkatých polycyklických aromatických uhlovodíků, hopanů, steranů a dalších sloučenin. Extrakce ethanolem nebo isopropanolem ve směsi s vodou lze stanovit obsah síranů (SUL). Alternativně jej lze stanovit pomocí iontové chromatografie. Filtr lze znovu zvážit a rozdíl oproti původnímu plnému filtru udává hmotnost pevných částic (SOL). Nakonec lze zbytkovou pevnou látku analyzovat metodami, jako je energetická disperzní rentgenová fluorescence a indukční fluorescence, hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem pro stanovení prvkového složení. Tyto komplexní analýzy jsou časově náročné a nákladné, a proto se používají především pro výzkumné programy [8].

4.2.2.2 Analýza chemických skupin tepelným odpařováním

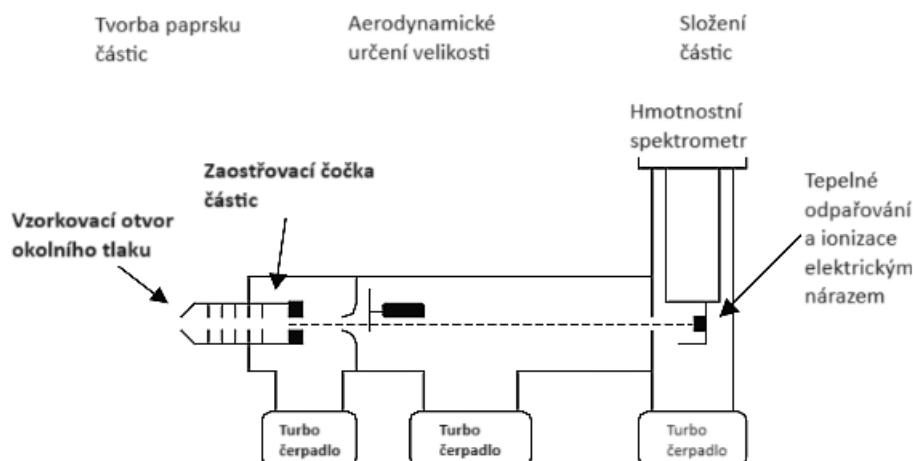
Analýza tepelným odpařováním je v podstatě termická/optická analýza, která probíhá ve dvou krocích: nejprve se vzorek zahřeje v inertní atmosféře, obvykle postupně na teplotu 600 °C, aby se odpařil organický materiál, který se následně oxiduje a detekuje jako CO₂ nebo se konvertuje na metan (CH₄) pro plamenovou ionizační detekci. Uhlík naměřený v tomto kroku se označuje jako organický uhlík. Poté se v dalším kroku ke zbývajícimu vzorku přivede kyslík a zahřeje se na ještě vyšší teplotu (až 900 °C). Uhlík analyzovaný v tomto kroku se označuje jako elementární uhlík. Při tomto postupu může organický uhlík v bezkyslíkaté atmosféře zuhelnatět a být chybně detekován jako elementární uhlík. Některé podíly žáruvzdorného organického uhlíku mohou být rovněž počítány jako elementární uhlík. A naopak některé složky elementárního uhlíku mohou být započítány jako organický uhlík v důsledku aktivity katalytických nebo oxidačních druhů adsorbovaných v pevných částicích. Proto rozdělení na elementární a organický uhlík touto metodou není přesné. Mezilaboratorními srovnávacími studii je dokázáno, že různé termické metody se shodují v rozmezí 5–15 % v parametru koncentrace celkového uhlíku (suma elementárního a organického uhlíku), ale jednotlivé koncentrace elementárního a organického uhlíku se mohou lišit více než dvojnásobně. Organický uhlík stanovený touto metodou je pouze částí celkové organické hmoty, která obsahuje další prvky, jako je vodík, kyslík, dusík a síra. Čerstvé výfukové plyny z vozidel se spalovacími motory obsahují především bezkyslíkaté uhlovodíky, takže hmotnost organické hmoty je přibližně 1,15krát vyšší než hmotnost organického uhlíku za předpokladu průměrného poměru H/C 1,85.

Důležitou výhodou použití termicko-optické analýzy uhlíku je dostupnost široce uznávaných a hojně používaných kalibračních metod. Používají se čtyři kalibrační standardy: hydrogenftalát draselný, sacharóza, CO₂ a metan (CH₄). Metan se používá jako standard pro kalibraci odezvy plamenové ionizační detekce a CO₂ se používá k ověření účinnosti přeměny CO₂ na CH₄. Hydrogenftalát draselný a sacharóza slouží při kalibraci jako náhražky organického uhlíku. Komerční přístroje používané k analýze chemických skupin tepelným odpařováním u vzorků pevných částic z vozidel rozšiřují měření organického elementárního uhlíku také o detekci síranů. Toho se dosahuje redukcí síranů na SO₂, který je poté detekován nedisperzním infračerveným detektorem [8].

4.2.3 Hmotnostní spektrometrie

Analýza částic pomocí hmotnostní spektrometrie aerosolů je obor, který v posledních letech zaznamenal velký rozvoj. Při této analýze se buď detekují jednotlivé částice, určí se jejich velikost, odpaří se a ionizují a vzniklé ionty se hmotnostně analyzují, nebo se částice shromáždí na podložku ve vakuu, zahřejí se, aby se desorbovaly polotěkavé látky, a ionizují se nárazem elektronů. Přístup založený na analýze jednotlivých částic má tu výhodu, že může v zásadě poskytnout úplné chemické složení pro každou jednotlivou částici. To umožňuje rozlišit vnitřně a vně smíšené aerosoly. Jeho nevýhodou je obtížná kvantifikace složení, protože účinnost ionizace závisí na velikosti a složení. Výhodou druhého přístupu je, že ionizace nárazem elektronů umožňuje použít standardní databáze hmotnostních spekter k identifikaci a kvantifikaci chemických prvků. Nevýhodou je, že detekuje pouze polotěkavé látky a v nich frakční složky. Nedávné zavedení schématu založeného na laseru je slibné pro odpařování i nežáruvzdorných složek. Tyto přístroje detekují s dobrou účinností částice větší než 100–200 nm. Nejmenší detekční velikost komerčních přístrojů je aerodynamický průměr přibližně 30 nm. Princip měřicího přístroje pro analýzu aerosolů metodou hmotnostní spektrometrie je uveden na obrázku níže. V současné době je nejnáročnější částí analýzy ultra jemných částic stanovení organických sloučenin. Nadměrná fragmentace tvrdou ionizací způsobuje ztráty původní molekulární informace, zatímco měkká ionizace je citlivá pouze na omezené chemické skupiny. Přítomnost mnoha podobných a reaktivních organických sloučenin v částicích rovněž komplikuje interpretaci dat [8], [12].

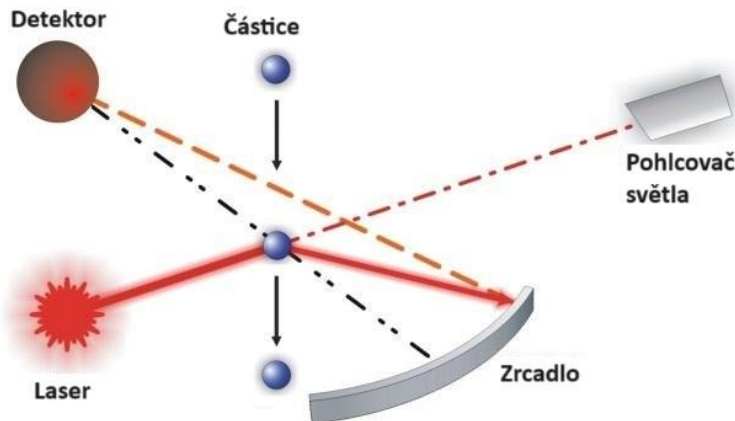
Obrázek 9: Schéma přístroje pro hmotnostní spektrometrii aerosolů [13]



4.2.4 Optická metoda – rozptyl světla

Interakce mezi částicemi a světlem včetně rozptylu světla jsou dobře prozkoumané oblasti. Rozptyl světla našel také značné uplatnění při měření velikosti a koncentrace částic. Spolu s transmisí elektronovou mikroskopií se rozptyl světla pevnými částicemi stal klíčovým nástrojem pro studium morfologie sazí. Vzor a intenzita rozptylu světla jsou silně závislé na poměru velikosti částic a vlnové délky dopadajícího světla. Rozptyl světla u různých reálných pevných částic, které nemají přesně určený jednotný tvar, ale jsou tvarově velice složité a rozdílné se může podstatně lišit. Proto se pro částice sazí fraktálního tvaru používají odvozené zjednodušené modely. Komerční přístroje založené na rozptylu světla se poprvé objevily v polovině 20. století. Pro praktické aplikace existují dva druhy přístrojů: přístroje měřící rozptyl světla jednotlivými částicemi a přístroje pro analýzu rozptylu světla souborem částic. Nejběžnějším přístrojem první kategorie je optický čítač částic, jehož princip je zachycen na obrázku níže. Zvláštní kategorií je kondenzační čítač částic, kde se částice kondenzací rozrůstají na opticky detekovatelné částice větší velikosti. Do druhé kategorie patří rozptylové fotometry, které měří intenzitu rozptýleného světla na jednom nebo více místech [8].

Obrázek 10: Princip optického čítače částic [14]



4.2.5 Optická metoda – absorpce světla

Černý uhlík silně pohlcuje světlo, a proto je pozitivním činitelem ovlivňujícím záření a přispívajícím ke změně klimatu.

Nejběžnější metody analyzování aerosolů jsou:

- diferenční metoda, při níž se absorpce odvozuje z rozdílu mezi extinkcí a rozptylem
- metody založené na filtru, které měří útlum světla pevnými částicemi zachycenými na filtru
- foto-akustická spektroskopie a laserem indukovaná inkandescence, které měří černý uhlík prostřednictvím tepla, které částice získávají při absorpci světla

Mezi přístroje zaměřené na detekci pevných částic principem absorpce světla patří spotmetry, aethalometry, foto-akustické senzory sazí a přístroje využívající metodu laserem indukované inkandescence. Podrobněji se jim věnují následující podkapitoly.

4.2.5.1 Spotmetr

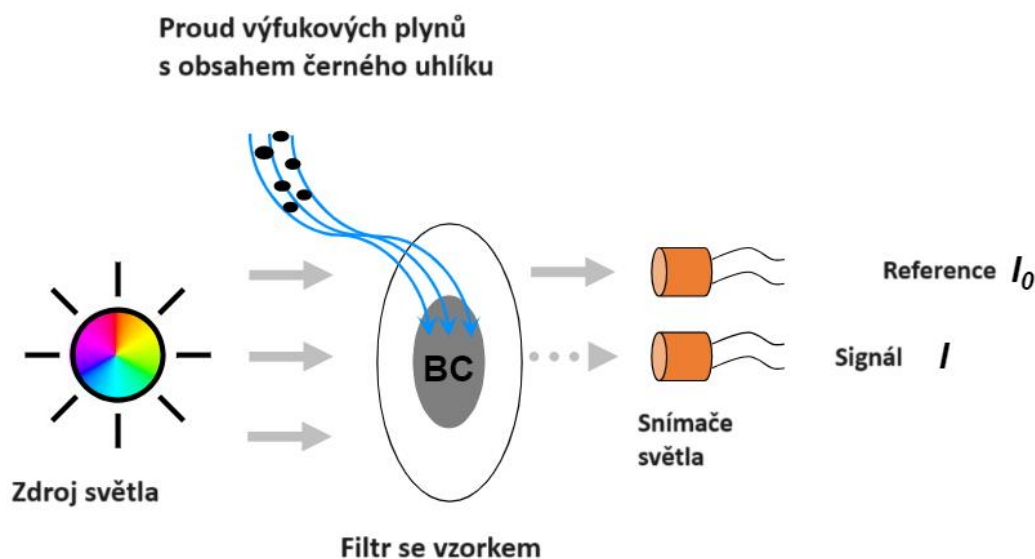
Ve spotmetru se relativní koncentrace sazí zjišťuje filtrováním výfukových plynů přes papírový filtr a zaznamenáváním poměru mezi světlem odraženým tímto exponovaným místem a neexponovaným místem. Tím je definováno filtrační číslo kouřivosti. Protože se tato metoda provádí na částicích zachycených na filtru, mohou se naměřené vlastnosti lišit od skutečných vlastností částic ve vzduchu. Je prokázáno, že filtrační číslo kouřivosti úzce souvisí s emisemi černého uhlíku, pokud analyzované částice obsahují více než 15 % černého uhlíku. Spotmetry byly díky své robustnosti v minulosti oblíbenými přístroji ve zkušebnách motorů. Mez detekce spotmetrů je přibližně 0,002 filtračního čísla kouřivosti,

což odpovídá koncentraci černého uhlíku $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pro velmi nízké úrovně emisí pevných částic za filtry pevných částic může být k dosažení přiměřené přesnosti zapotřebí doba odběru vzorků až 10 minut [8], [13].

4.2.5.2 Aethalometr

Aethalometr je přístroj pro měření koncentrací černého uhlíku v aerosolech v reálném čase. Funguje na principu sběru pevných částic na filtr vyrobený z křemenných vláken a měření změny propustnosti (absorpce) světla v závislosti na čase. Měření probíhá na několika vlnových délkách (zpravidla od 370 nm do 950 nm), čímž se získávají detailnější informace o druhu a vlastnostech černého uhlíku. Tento princip funkce aethalometru je také na obrázku níže. Aethalometry se běžně používají pro monitorování okolního prostředí s časovým rozlišením v řádu minut. V posledních letech se však objevují i moderní verze s časovým rozlišením 1–10 s. Aethalometry se srovnávají s tzv. tepelnými metodami, které měří elementární uhlík. Mnoho studií prokázalo silnou korelaci mezi těmito dvěma metodami. Absorpce světla na filtru je ovlivněna strukturou filtračních vláken. Může docházet k vícenásobnému rozptylu světla a artefaktům způsobeným zanesením filtru. Zdokonalenou verzí aethalometru je víceúhlový absorpční fotometr, který koriguje tyto artefakty měřením rozptylu světla pod několika úhly. Pro výpočet koncentrace černého uhlíku jsou klíčové dva parametry: útlum paprsku světla procházejícího filtrem naměřený aethalometrem a průtok vzorku, který je sledován hmotnostním průtokoměrem. Z těchto dat se poté vypočítává koncentrace černého uhlíku. Stejně jako ostatní metody založené na filtru trpí i analýza pomocí aethalometru na systematické chyby. Tyto chyby je pro získání přesných výsledků nutné korigovat. Jedná se o korekci vícenásobného rozptylu a korekci útlumu v závislosti na zanesení filtru [8], [11], [15].

Obrázek 11: Princip funkce aethalometru [16]

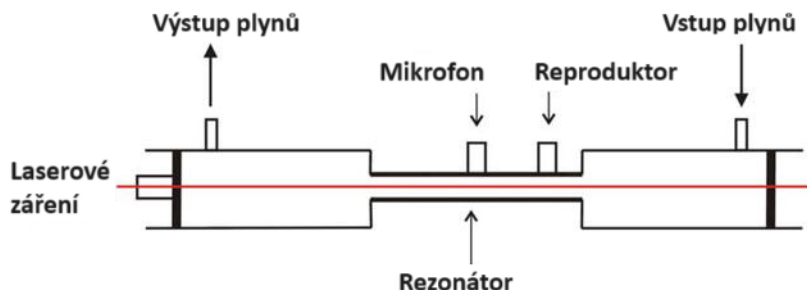


4.2.5.3 Foto-akustický snímač sazí

Foto-akustická spektroskopie je optická metoda pro měření emisí černého uhlíku v reálném čase. Funguje na principu absorpce modulovaného laserového záření pevnými částicemi a měření akustické odezvy. Laserové záření je absorbováno pevnými částicemi a vede k ohřevu a následné tepelné expanzi částic, která generuje akustické vlny v okolním plynu. Tyto vlny jsou zesíleny akustickým rezonátorem a detekovány mikrofonem. Intenzita zvukových vln je úměrná absorbované energii laseru a koncentraci černého uhlíku. Metoda foto-akustické spektroskopie je nezávislá na velikosti částic, protože účinnost absorpce světla nezávisí na velikosti částic pro velikosti částic menší než vlnová délka použitého záření. Pro přepočítání objemové koncentrace na hmotnostní je nutné použít kalibrační faktory, které se liší v závislosti na typu sazí. Tloušťka kondenzovaného materiálu na částicích černého uhlíku může ovlivnit foto-akustickou odezvu a vliv na signál mohou mít také plynné látky v aerosolu výfukových plynů, jako je např. vodní pára nebo oxid dusičitý, které mohou absorbovat světlo a ovlivňovat tak signál. Tento negativní vliv na přesnost měření lze minimalizovat vhodnou volbou vlnové délky. Přístroje na principu foto-akustického snímače sazí mají rychlou odezvu s mezí detekce černého uhlíku až $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Foto-akustický snímač sazí se používá pro měření emisí černého uhlíku z výfukových plynů vznětových motorů již od 80. let 20. století. Jedná se o užitečný nástroj pro základní výzkum emisí a pro

monitorování emisí v reálném čase. Na obrázku je uveden princip foto-akustického snímače sazí [8], [12].

Obrázek 12: Princip funkce foto-akustického snímače sazí [12]



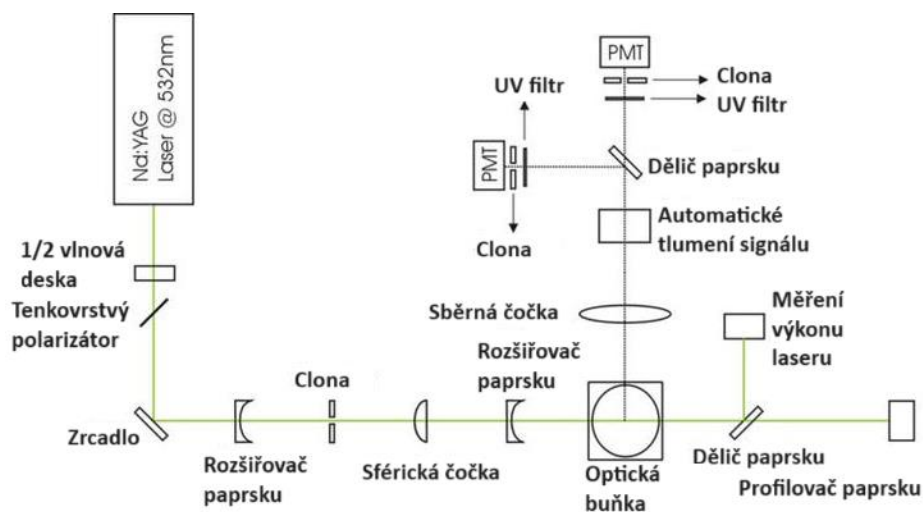
4.2.5.4 Laserem indukovaná inkandescence

Laserem indukovaná inkandescence je optická metoda používaná pro měření emisí pevných částic ve výfukových plynech. Princip metody spočívá v zahřátí částic krátkým laserovým impulzem (trvání několik nanosekund) na teplotu těsně pod teplotou sublimace uhlíku. Následný rozpad a žhavení se měří pomocí fotonásobiče. Rozlišují se dva typy laserem indukované inkandescence:

- Jednobarevná laserem indukovaná inkandescence, která měří signál žhavení na jedné vlnové délce. Intenzita žhavení a rychlost rozpadu se analyzují, aby se odvodil počet a průměrná velikost primárních částic, a tím i objem sazí. Kondenzované materiály se nezjišťují, protože se během zahřívání brzy vypaří a nepřispívají k inkandescenci.
- Dvoubarevná laserem indukovaná inkandescence, kdy se měří signál žhavení na dvou vlnových délkách, takže lze pomocí modelu odvodit teplotu sazí.

Laserem indukovaná inkandescence má oproti jiným metodám měření emisí pevných částic několik užitečných vlastností spočívajících v rychlosti měření, které je možné provádět v reálném čase s frekvencí 10–30 Hz; v citlivosti, protože je možné detekovat i nízké koncentrace pevných částic (od $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a lze při této metodě použít přímo nezpracované výfukové plyny bez nutnosti ředění. Naopak mezi nevýhody se řadí závislost na optických vlastnostech sazí, protože řádné vyhodnocení dat vyžaduje znalost indexu lomu sazí; neznámý vliv popela na měření a morfologické změny částic, jelikož zahřívání laserem může způsobit změny tvaru částic, které ovlivňují výsledek měření [8].

Obrázek 13: Schéma laserem indukované inkandescence [12]

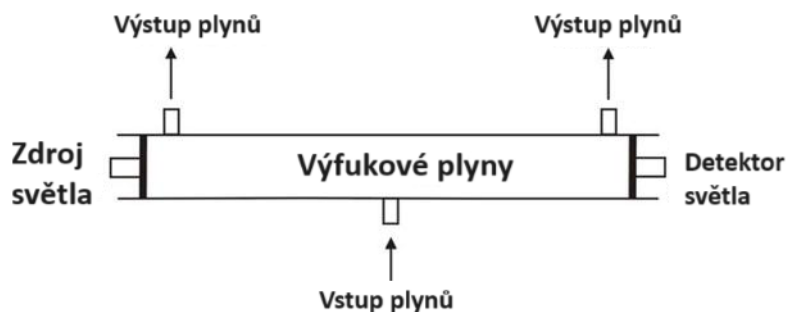


4.2.6 Extinkce světla

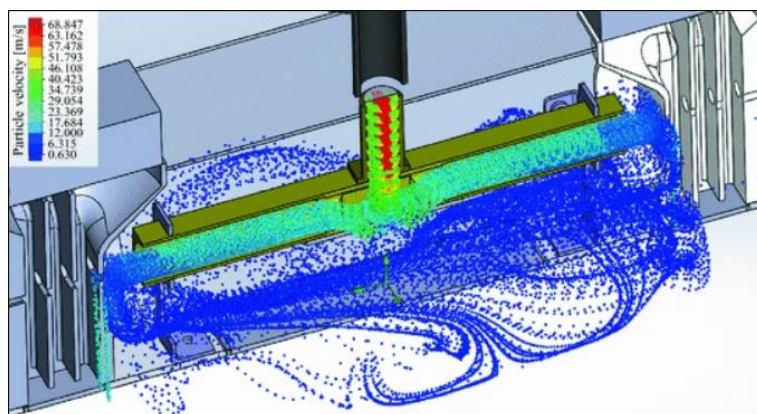
Měření extinkce neboli zeslabení záření při jeho pohlcení absorpcí je možné provádět pomocí opacimetrů a přístrojů s dutinovým prstencem, avšak pouze opacimetry se používají při studiu výfukových aerosolů. Opacimetr je přístroj, který měří míru zeslabení světla procházejícího vzorkem plynu – v tomto případě výfukovými plyny. Toto zeslabení je způsobeno absorpcí a rozptylem světla na částicích obsažených v plynu. Opacimetry se běžně používají ke kvantifikaci emisí pevných částic, a to především sazí, ze spalovacích motorů. Princip fungování opacimetru je založen na porovnání intenzity světla dopadajícího na vzorek výfukových plynů s intenzitou světla procházejícího tímto vzorkem. Opacita, definovaná jako poměr těchto dvou intenzit, je mírou extinkce světla a závisí na vlnové délce světla, velikosti a tvaru částic, jejich složení a koncentraci. Měření založená na extinkci kvantifikují koncentrace částic pomocí Beer–Lambert–Bouguerova zákona, kde poměr intenzity procházejícího a dopadajícího světla je exponenciální funkcí délky dráhy a koeficientu extinkce. V praxi se používají dva typy opacimetrů: vzorkovací a řadové. Vzorkovací opacimetry odebírají část výfukových plynů a měří jejich extinkci v měřicí komoře. Řadové opacimetry naproti tomu měří extinkci světla procházejícího přímo výfukovým potrubím. Opacimetry mají oproti jiným metodám měření emisí několik výhod. Jsou rychlé a poskytují výsledky v reálném čase, s rozlišením 0,1 s. Jsou také relativně levné a snadno se používají. Navíc zvládají měřit extinkci v nezpracovaných výfukových plynech, bez nutnosti jejich ředění nebo úpravy. Hlavní nevýhodou opacimetrů je nejednoznačnost

měřené veličiny. Opacita neposkytuje přímou informaci o hmotnostní koncentraci pevných částic. Vztah mezi opacitou a hmotnostní koncentrací se navíc mění v závislosti na složení a morfologii částic. V důsledku toho se opacimetry používají spíše k relativnímu porovnání emisí než k absolutní kvantifikaci hmotnostní koncentrace pevných částic. Užitečnost opacimetrů v automobilovém průmyslu se v posledních letech snižuje, přestože patří k nejstarším přístrojům pro měření emisí spalovacích motorů. Důvodem je klesající produkce emisí pevných částic z moderních motorů vybavených filtry pevných částic. Opacimetry jsou u takových vozidel méně citlivé a jejich detekční limit je poměrně vysoký. I přes uvedené nevýhody jsou opacimetry stále užitečným nástrojem pro základní měření emisí pevných částic z výfukových plynů. Jsou vhodné pro rychlé a relativní porovnání emisí z různých zdrojů a pro sledování vývoje emisí v čase. Na obrázcích níže je uvedeno schématické znázornění opacimetru s jeho základními součástmi a dále také velice důležitý správný návrh měřicí buňky opacimetru, u které je klíčové homogenní rozložení rychlosti částic v měřicí trubici [8], [17].

Obrázek 14: Schéma opacimetru [12]



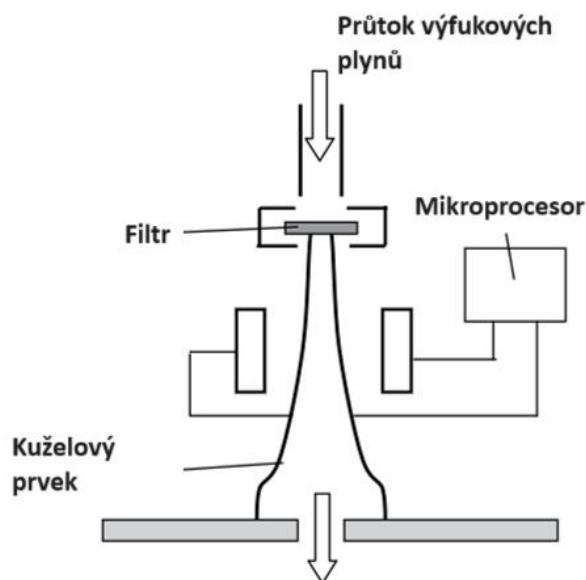
Obrázek 15: Barevná simulace správné rychlosti částic v měřicí trubici opacimetru [17]



4.2.7 Metody mikrobalance

Jednou z metod mikrobalance, která se využívá pro analýzu výfukových plynů je oscilační mikrobalance s kuželovým prvkem. Měří hmotnost pevných částic nepřímým způsobem na základě změny rezonanční frekvence vibračního systému. Tato frekvence se mění v závislosti na hmotnosti částic usazených na filtru umístěném na konci kuželového prvku. Uspořádání měřicího zařízení je zřejmé z obrázku. Měření je nezávislé na morfologii částic a umožňuje rychlou odezvu se sekundovou indikací hmotnosti. Metoda je ovšem citlivá na mechanické a tepelné vlivy z okolí a nedokonalé rozlišení mezi částicovou a plynnou fází, což může vést k nepřesnostem v měření. Změny provozního bodu motoru a s tím související kolísání průtoku a tlaku mohou způsobovat přechodné nasávání a uvolňování těkavých látek z filtru, což může vést k záporným hodnotám hmotnosti. Pro korekci těchto nepřesností se proto vyvíjejí integrační metody, které berou v úvahu provozní podmínky a vlastnosti filtru [5].

Obrázek 16: Princip oscilační mikrobalance s kuželovým prvkem [5]



4.2.8 Měření velikosti částic

V dnešní době jsou k dispozici také přístroje určující velikost pevných částic. Vzhledem k velkému rozsahu velikostí částic však nelze využívat stejné provozní principy pro všechny částice. Přepočítání získaného signálu na velikost částic je velmi problematická

oblast, kterou snadno ovlivňují další aspekty, jako je morfologie a složení částic. Běžným předpokladem tvaru částic je jejich sféricita, ale tato vlastnost neplatí pro aglomeráty, kde je nutné použít přepočítání na ekvivalentní průměr. Navíc se přístroje kalibrují pomocí zkušebních aerosolů, které se mohou chovat jinak než skutečné částice vypouštěné motorovými vozidly [5], [8].

4.2.8.1 Mikroskopie

Z důvodu velmi malých rozměrů pevných částic je velice důležitou technikou pro analýzu emisí pevných částic z motorových vozidel elektronová mikroskopie umožňující detailní studium velikosti a morfologie částic včetně jejich agregátů. Ke studiu pevných částic se využívají dva typy elektronových mikroskopů:

- Rastrovací elektronový mikroskop vytvářející obraz na principu odražených elektronů a poskytující 3D obraz povrchu a morfologie částic.
- Transmisní elektronový mikroskop, který vytváří obraz na základě průchodu elektronů vzorkem pevných částic a dává 2D obraz s vysokým rozlišením vnitřního složení částic.

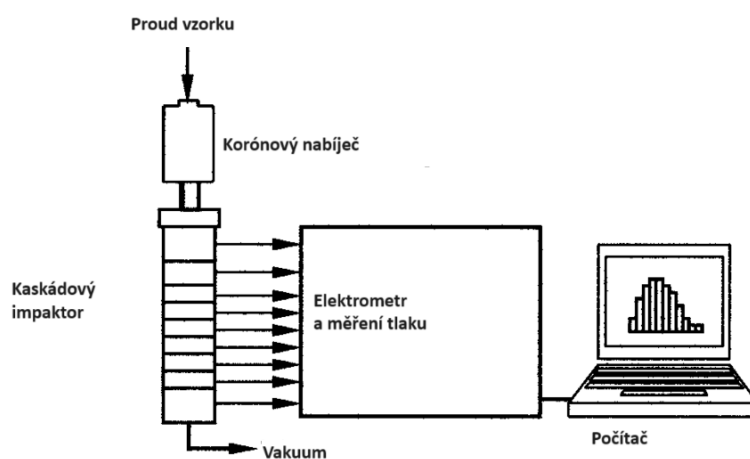
Díky elektronové mikroskopii lze dostat podrobné informace o agregátech pevných částic, jako jsou gyrační poloměr (tj. parametr charakterizující velikost částice libovolného tvaru jako vzdálenost od osy rotace, v níž by musela být soustředěna veškerá hmotnost částice, aby měla stejný moment setrvačnosti jako skutečná částice), rozdělení velikosti agregátů, fraktální dimenzi, počet primárních částic v agregátu a rozdělení velikosti primárních částic. Dále je také možné mikroskopii zkoumat vliv složení paliva a chodu motoru na tvar emitovaných pevných částic [11].

4.2.8.2 Impaktor

Jedním z používaných druhů impaktorů je elektrický nízkotlaký impaktor, který třídí částice podle jejich aerodynamického průměru – pomocí setrvačných sil. Proudnice se v impaktoru rychle stáčí do pravého úhlu, přičemž malé i velké částice si díky setrvačným silám zachovávají své původní vektory rychlosti, a proto dopadají na povrch, kde jsou zachyceny. Menší částice jsou zachycovány na každém dalším stupni impaktoru, protože se

rychlost zvyšuje. Mezní charakteristika pro každý stupeň musí být strmá, jinak by docházelo k nesprávnému třídění. U impaktoru byla dolní mez velikosti zachycených částic běžně okolo 400 nm, ale použitím nižších provozních tlaků se tuto mez podařilo snížit cca na 30 nm. Bohužel i to je stále příliš velké číslo na to, aby bylo možné plně měřit nukleační režim, a kromě toho takový provoz může způsobit odpaření a ztrátu některých těkavých látek. Dvěma důležitými výhodami impaktoru jsou možnost vážit jeho různé stupně, čímž se získá přímé měření rozložení hmotnosti a také možnost měřit velikost částic v reálném čase [8], [11], [12].

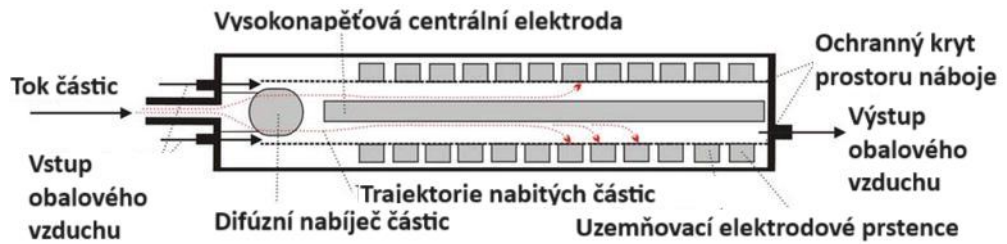
Obrázek 17: Schéma elektrického nízkotlakého impaktoru [18]



4.2.8.3 Spektrometr diferenciální pohyblivosti

Základní princip spektrometru diferenciální pohyblivosti spočívá v nabíjení pevných částic vznikajících při spalování a jejich klasifikaci na základě pohyblivosti. Pevné částice, které vstupují do spektrometru diferenciální pohyblivosti, jsou elektricky nabíjeny pomocí korónového výboje. Každá částice se nabíjí úměrně svému povrchu. Nabité částice jsou poté zavedeny do silného radiálního elektrického pole uvnitř třídící kolony. Kladně nabitě částice jsou dále unášeny obalovým vzduchem ve směru čtených segmentovaných sběrných elektrod. Částice jsou poté podle poměru vlečného náboje připojeny k různě vzdáleným segmentovaným elektrodovým prstencům směrem dolů po třídící koloně. Proud produkovaný částicemi na každém citlivém elektrometru se používá k určení velikosti částic a koncentrace. Základní schéma spektrometru diferenciální pohyblivosti je znázorněno na obrázku [12].

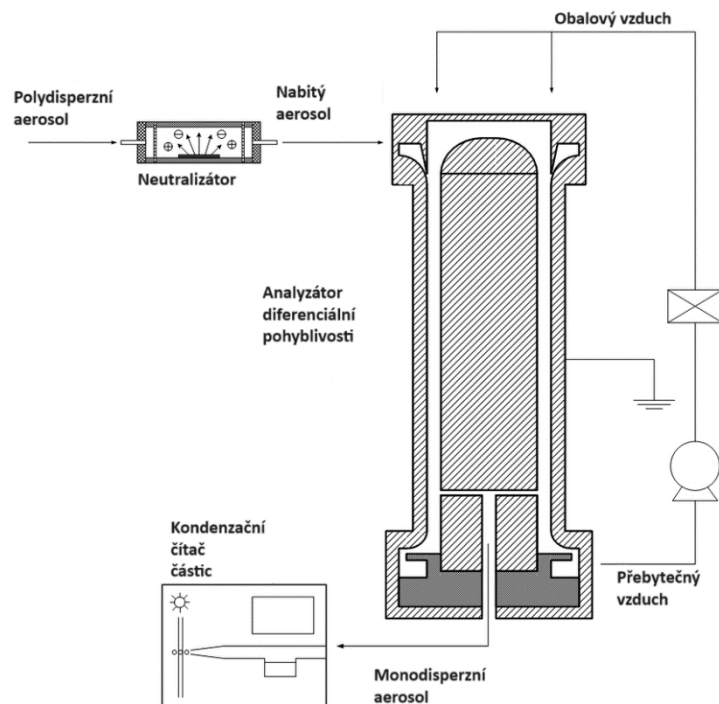
Obrázek 18: Schéma spektrometru diferenciální pohyblivosti [12]



4.2.8.4 Skenovací mobilní třídič částic

Skenovací mobilní třídič částic třídí částice podle jejich elektrické pohyblivosti. Provádí to postupným zvyšováním nebo skenováním síly elektrostatického pole. Nejmenší měřitelná velikost je přibližně 7 nm, ale není možné při jediném skenování pokrýt celý rozsah velikostí až do několika mikrometrů jednou měřicí jednotkou. Největší nevýhodou je však doba trvání celého skenování, která činí dvě až tři minuty, takže v případě přechodných emisí nelze sledovat všechny velikosti současně. Charakteristiky aerosolu navíc musí zůstat v tomto časovém rámci stabilní. Aby se tyto problémy obešly, používá se paralelně několik jednotek, přičemž každá pracuje v jiné klasifikaci velikostí. Navíc je u skenovacího mobilního třídiče částic nutné rozsáhlé ředění. Struktura skenovacího mobilního třídiče částic je na obrázku níže.

Obrázek 19: Schéma skenovacího mobilního třídiče částic [19]



4.2.9 Požadavky na přístroje používané na SME

Pro kontrolní měření kouřivosti vznětových spalovacích motorů vozidel při pravidelných prohlídkách na Stanicích Měření Emisí se používají opacimetry (kouřoměry), které mají přesně definované vlastnosti, jež musí splňovat. Tyto požadavky jsou definovány ve Vyhlášce o technických prohlídkách vozidel č. 211/2018 Sb. a v této kapitole budou ty nejdůležitější z nich specifikovány.

Přístrojem pro měření kouřivosti vozidel se vznětovými motory se měří světelná absorpce výfukových plynů (N), doba akcelerace motoru (t_A), otáčky a teplota motoru a současně umožňuje vypočítávat korigovaný součinitel absorpce (K) pomocí referenčních vzorců.

Přístroj sestává nejméně z těchto podsestav:

- podsestavy komory kouřoměru měřící světelnou absorpci výfukových plynů a umožňující výpočet korigovaného součinitele absorpce
- podsestavy měření teploty motoru,
- podsestavy měření otáček motoru,
- podsestavy komunikace s palubními sběrnicemi vozidla a OBD,
- podsestavy tisku on-line protokolu,
- podsestavy komunikace po síti TCP/IP.

Technické požadavky na kouřoměr je možno převzít z normy ISO 11614 „Požadavky na přístroje pro měření emisí výfukových plynů vozidel se zážehovými motory i vznětovými motory ve stanicích měření emisí (SME), ve stanicích technických kontrol (STK) a při technických silničních kontrolách (TSK)“, pokud výrobce přístroje respektoval její požadavky a může tuto skutečnost doložit.

Z podsestavy kouřoměru se pro účely emisního testu povinně zpracovávají následující veličiny:

- K (kouřivost) [m^{-1}],
- t_B (doba akcelerace motoru z volnoběžných na maximální otáčky) [s],
- teplota výfukového plynu na vstupu do kouřoměru nebo tlak výfukového plynu na vstupu do kouřoměru nebo složení výfukového plynu (CO [%], HC [ppm], CO₂ [%]).

Z podsestavy kouřoměru mohou být dostupné následující veličiny, pro účely statistického zpracování:

- NO [ppm],
- NO₂ [ppm],
- NO_x [ppm],
- CO [%],
- HC [ppm],
- CO₂ [%].

Podsestava kouřoměru musí splňovat požadavky na přesnost měření a rozlišitelnost výstupních hodnot, které obsahuje následující tabulka [20], [21], [22], [23].

Tabulka 2: Požadavky na přesnost měření a rozlišitelnost výstupních hodnot kouřoměru [23]

Veličina	Přesnost údaje	Rozlišitelnost
K (0,25- 1,8) m ⁻¹	0,1 m ⁻¹	0,01 m ⁻¹
t _B	0,1 s	0,1 s
Teplota výfuk. plynu	Dostatečné k detekci přítomnosti plynu	
Tlak výfuk. plynu	Dostatečné k detekci přítomnosti plynu	
CO, HC, CO ₂	Dle požadavků na analyzátory	

Na obrázcích níže je příklad přístroje „Stanice ACTIGAS 605“ schváleného pro měření emisí vozidel vybavených vznětovými motory na SME v České republice. Sestava obsahuje mobilní stojan vybavený ACTIBOX PC, modul kouřoměru AT605ANG, odběrovou sondu 10 mm, RT modul 3 BlueNet (pro měření otáček ze zvlnění alternátoru a teploty, snímač teploty oleje G 0,8 m, dálkové ovládání, snímač teploty oleje G 0,8 m a záložní zdroj UPS 12 V pro bezpečné vypnutí PC [24].

Obrázek 20: Mobilní stojan vybavený ACTIBOX PC stanice ACTIGAS 605 [25]



Obrázek 21: Modul kouřoměru AT605ANG stanice ACTIGAS 605 [26]



4.3 Metody

V této kapitole budou charakterizovány metody snižování emisí pevných částic u spalovacích motorů a dále popsány metody měření emisí pevných částic se zaměřením na homologační a kontrolní způsoby měření.

4.3.1 Metody snižování emisí pevných částic

Ke snižování emisí pevných částic slouží u moderních spalovacích motorů konstrukční řešení, která je možné rozdělit podle jejich umístění ve vozidle na tři hlavní skupiny:

- opatření před motorem
- opatření u motoru
- opatření za motorem

Opatření před motorem mají za úkol zajistit co nejkratší dobu promísení směsi paliva se vzduchem a zajistit optimální průběh spalování. Toho je docilováno řízeným pohybem náplně ve válci ve tvaru tečné rotace, stupněm přeplnění a mezichlazením stlačeného vzduchu. Tečná rotace ve spalovacím prostoru, které je docíleno například pomocí tzv. vířivých klapek umístěných v sání motoru, je na obrázku níže.

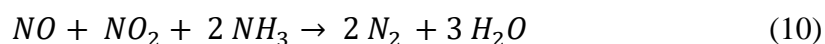
Obrázek 22: Schéma tečné rotace ve spalovacím prostoru [27]



Mezi opatření u motoru se řadí zvyšování vstřikovacího tlaku paliva až na 250 MPa, který zajišťuje spolu s jemnějšími otvory (průměr až 0,009 mm) vstřikovacích trysek menší kapky paliva, které se ve spalovacím prostoru lépe odpařují. Dále do těchto opatření spadají rozdělení dávky vstřikovaného paliva na více menších dávek při úhlovém odstupu otočení

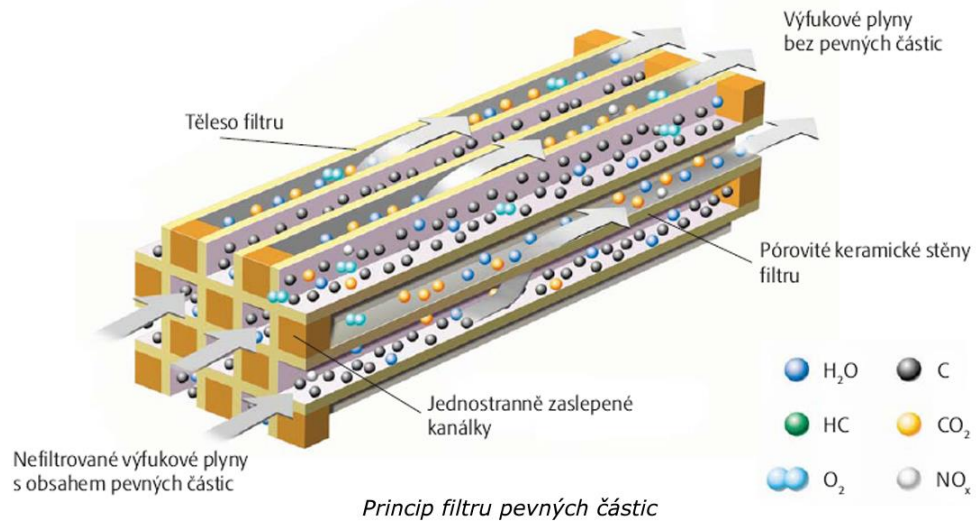
klikové hřídele a značný vliv na emise PM má také složení používaného paliva. Například obsah síry v palivu je legislativně regulován a díky tomu se také snižuje obsah sulfátové frakce v pevných částicích. Emise oxidů dusíku (NO_x) jsou redukovány systémem recirkulace výfukových plynů (EGR). Mezi recirkulací výfukových plynů a kouřivostí motoru, a tím pádem tvorbou pevných částic, je však nutné vytvořit kompromis, protože se stoupajícím množstvím výfukových plynů vrácených do sání motoru roste jeho kouřivost.

Za motorem mohou být u vznětových spalovacích motorů umístěny k omezení emisí pevných částic nebo snížení jejich škodlivosti následující komponenty: oxidační katalyzátor, filtr pevných částic a případně katalyzátor pro selektivní katalytickou redukcí. Vznětové motory mohou být vybaveny výhradně oxidačním katalyzátorem s vrstvou platiny a palladia na keramickém či kovovém nosiči, jelikož pracují s přebytkem kyslíku. V oxidačním katalyzátoru dochází k oxidaci uhlovodíků (HC) na vodní páru (H_2O) a oxidu uhelnatého (CO) na oxid uhličitý (CO_2). Úkolem katalyzátoru pro selektivní katalytickou redukcí (SCR katalyzátor) je omezení emisí oxidů dusíku (NO_x) pomocí vstřikování redukčního činidla do výfukových plynů před SCR katalyzátorem. Jako redukční činidlo se využívá přípravek AdBlue, což je vodný roztok močoviny o koncentraci 32,5 % a jeho spotřeba se pohybuje zhruba v poměru 1:20 k množství spotřebovaného paliva. Z močoviny se ve výfukovém potrubí hydrolyzou tvoří amoniak a oxidy dusíku se poté redukuje na dusík podle rovnice:



Nejzásadnějším prvkem snižování emisí pevných částic jsou filtry pevných částic – DPF filtry. Tyto filtry jsou umístěny ve výfukovém potrubí za oxidačním katalyzátorem a jsou schopné snížit emise PM až o 98 %. Do osobních automobilů se vznětovými motory se začaly umisťovat se zavedením emisní normy Euro 4. Skládají se nejčastěji z keramického tělesa uspořádaného do plástvovité nebo vláknité struktury, kterou prochází výfukové plyny. V porézní struktuře filtru se mechanicky zachycují pevné částice, které jsou spáleny při regeneraci filtru pevných částic. Filtr pevných částic s procházejícími výfukovými plyny, ze kterých jsou filtrovány pevné částice, je schematicky vyobrazen na obrázku níže [1], [7], [28].

Obrázek 23: Princip funkce filtru pevných částic [7]



Pro regeneraci filtru pevných částic je nutné dosáhnout ve filtru teploty, kdy se nashromážděné pevné částice vznítí. Teplota vzplanutí PM, která se pohybuje okolo 550 °C, však není ve filtru dosažena při běžném provozu vozidla a dosahuje se jí buď dodatečným vstříkem paliva po základním vstříku, nebo umístěním speciálního vstřikovače paliva přímo do výfukového potrubí. Za zvýšením teploty v DPF na potřebnou úroveň stojí také hoření nespálených uhlovodíků v oxidačním katalyzátoru. Někteří výrobci automobilů (Citroen, Peugeot) používali speciální aditivum Eolys, kterým se za pomoci katalýzy paliva pomocí ceru snižovala teplota potřebná k regeneraci na cca 450 °C a regenerace díky tomu trvala kratší dobu a nebyla časově náročná jako u konvenčních systémů. Vhodný okamžik pro spuštění regenerace DPF vyhodnocuje řídicí jednotka motoru na základě mnoha parametrů. Mezi nejdůležitější patří:

- rozdílový tlak před a za filtrem pevných částic, resp. rozdíl tlaku před DPF a atmosférickým tlakem
- vypočtená hmotnost sazí v DPF
- teplota chladicí kapaliny motoru
- teplota v DPF
- rychlost vozidla

Interval mezi regeneracemi filtru pevných částic je závislý na jízdním stylu a využívání vozidla, dále na stavu komponent motoru, vstřikovací soustavy a samotného filtru pevných částic a může se z těchto důvodů pohybovat od nízkých stovek kilometrů až po více než tisíc najetých kilometrů mezi regeneracemi [1], [29].

Na obrázku níže je reálná fotografie filtru pevných částic kombinovaného v jednom obalu s oxidačním katalyzátorem nacházejícím se ve výfukovém potrubí těsně před keramickým tělesem DPF. Na fotografii jsou viditelné dva vývody pro snímač rozdílového tlaku a závitový otvor pro zašroubování snímače teploty před filtrem pevných částic, resp. před oxidačním katalyzátorem.

Obrázek 24: Filtr pevných částic [30]



4.3.2 Legislativní rozdělení měření emisí pevných částic

Měření emisí je možné podle účelu rozdělit v zásadě na dva základní způsoby – homologační měření a kontrolní měření. Měření homologační se provádí při typovém schvalování nových vozidel, resp. vozidel, která jsou poprvé uváděna do provozu. Naproti tomu kontrolní měření jsou vykonávána na Stanicích Měření Emisí (SME) jako pravidelná kontrola emisí vozidel, která jsou v provozu. Obě měření s důrazem na legislativu platnou na území České republiky jsou podrobněji charakterizována v následujících podkapitolách.

4.3.2.1 Homologační měření emisí

Homologační měření emisí se od roku 2017 provádí podle nového postupu WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure), který platí v celé EU, ale i v Číně,

Japonsku, Indii, Koreji a dalších zemích, a nahradil zastaralý postup NEDC (New European Driving Cycle). Dříve využívaný cyklus NEDC byl navržen v 80. letech 20. století, využíval se od roku 1992 a již nevyhovoval moderním požadavkům. Součástí postupu WLTP je cyklus WLTC (Worldwide harmonised Light-duty vehicle Test Cycle), který měří spotřebu paliva, emise CO₂ a další znečišťující látky u osobních a lehkých užitkových vozidel. Porovnání podmínek měření cyklů WLTC a NEDC obsahuje tabulka níže. Obecně platí, že nový postup WLTP má za cíl poskytnout mnohem realističtější údaje o emisích a spotřebě paliva, které lépe odrážejí používání vozidla v každodenním provozu [31], [32], [33], [34], [35].

Tabulka 3: Porovnání homologačních cyklů NEDC a WLTP [31]

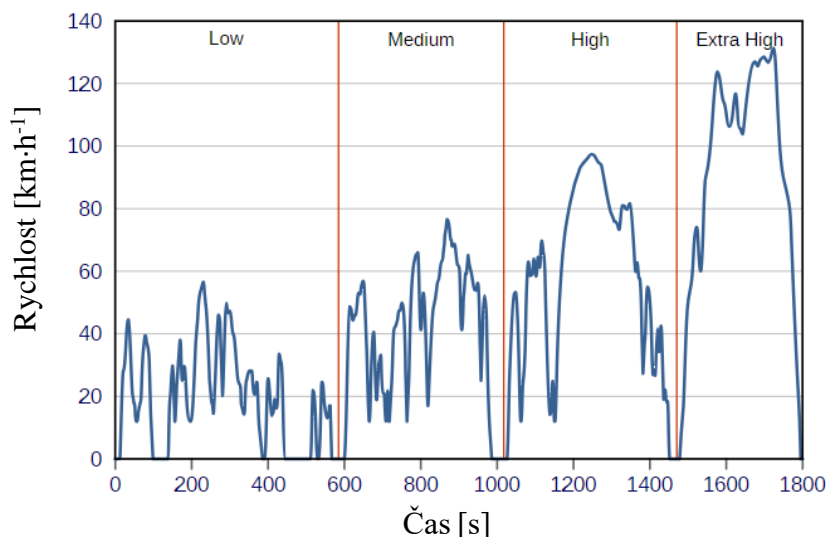
Název cyklu	NEDC	WLTP
Testovací cyklus	Jeden testovací cyklus	Dynamický cyklus bližší reálnému provozu
Doba trvání cyklu [min]	20	30
Vzdálenost cyklu [km]	11	23,25
Fáze jízdy	Dvě fáze, 66 % městský a 34 % mimoměstský provoz	Čtyři fáze, 52 % městský a 48 % mimoměstský provoz
Průměrná rychlost [km·h ⁻¹]	34	46,5
Maximální rychlost [km·h ⁻¹]	120	131,3
Řazení rychlostních stupňů	Pevné okamžiky přeřazení	Řazení přizpůsobené různým vozidlům

Cyklus WLTC se pro vozidla dělí podle jejich poměru pohotovostní hmotnosti v kg a výkonu motoru v kW (Power to Mass Ration, PMR) na čtyři třídy (Class 1, 2, 3a, 3b). Pro běžná osobní vozidla (PMR větší než 34) využívaná třída 3b se skládá ze čtyř fází podle nejvyšší rychlosti simulujících městskou a příměstskou jízdu a jízdu na rychlostních silnicích a dálnicích:

- Low – nízká – až 56,5 km·h⁻¹
- Medium – střední – až 76,6 km·h⁻¹
- High – vysoká – až 97,4 km·h⁻¹
- Extra High – extra vysoká – až 131,3 km·h⁻¹

Procedura rovněž počítá s volitelnou výbavou vozidla, která ovlivňuje aerodynamiku, valivý odpor a hmotnost vozidla. Výsledkem je hodnota CO₂, která odráží vlastnosti a charakteristiky konkrétního vozidla [32], [34], [35].

Obrázek 25: Cyklus WLTC pro třídu 3b [36]



Na obrázku výše je graf časového průběhu rychlosti při všech čtyřech fázích cyklu WLTC pro třídu 3b.

Kromě nového zkušební cyklu WLTC je součástí postupu homologace nových vozidel od roku 2017 měření emisí v běžném provozu (Real Driving Emissions, RDE). Při měření emisí znečišťujících látek ve skutečném provozu je použito přenosné zařízení pro měření emisí (Portable Emissions Measurement System, PEMS) připojené k vozidlu. Modul PEMS, jehož obvyklá montáž na tažné zařízení testovaného vozidla je zřejmá z obrázku níže, obsahuje GPS modul, senzor pro měření atmosférických podmínek (teplota okolí, atmosférický tlak a relativní vlhkost) a analyzátor výfukových plynů, který je schopen s pomocí průtokoměru výfukových plynů spočítat hmotnost plynných emisí (CO₂, CO, uhlovodíky, NO_x) a počet pevných částic. Aby nebylo měření ovlivněno elektrickým příkonem zařízení PEMS, musí být zařízení elektricky zcela soběstačné a napájené samostatným Li-ion akumulátorem. Také měření emisí v běžném provozu má určené fáze, které musí vozidlo absolvovat, a dané podmínky, při kterých se měření probíhá. První část zkoušky probíhá v městském provozu (definován rychlostí vozidla nižší než 60 km·h⁻¹), která musí být dlouhá nejméně 16 km a tvořit 29–44 % z celkově ujeté trasy. Následuje úsek

mimo město (definován rychlostním intervalem 60–90 km·h⁻¹); tato část, opět s minimální délkou 16 km, musí tvořit 23–43 % z celkové ujeté vzdálenosti. Třetí částí je jízda po dálnici (rychlost vozidla vyšší než 90 km·h⁻¹). Délka této trasy musí činit nejméně 16 km a tvořit 23–43 % z celkové vzdálenosti. Po dobu nejméně pěti minut se vozidlo musí pohybovat rychlostí vyšší než 100 km·h⁻¹. Rychlost vozidla se řídí místními rychlostními omezeními, resp. podmínkami okolního provozu, měření je zakázáno provádět v noci a řidič je povinen dodržovat pravidla silničního provozu. Naměřené výsledky zkoušek RDE jsou korelovány s výsledky získanými ve zkušební laboratoři při měření na válcové zkušebně [32], [34], [37].

Obrázek 26: Vozidlo při zkoušce RDE s namontovaným měřicím modulem PEMS [37]



4.3.2.2 Kontrolní měření emisí

Kontrolní měření emisí je v České republice upraveno Metodickým postupem měření emisí vozidel ve stanicích měření emisí (SME), ve stanicích technických kontrol (STK) a při provádění technických silničních kontrol (TSK). Kontrola vozidel se vznětovým motorem s řízenými systémy s OBD má celkem pět kroků:

1. identifikace vozidla
2. vizuální kontrola
3. diagnostika systému řízení motoru
4. v závislosti na výsledku bodu 3 úprava měřicího postupu
5. měření kouřivosti

V prvním kroku se provádí kontrola identifikačních údajů vozidla, kdy se kontroluje shoda skutečného provedení a identifikačních údajů (zejména VIN) vozidla s údaji uvedenými

v technickém průkazu a v osvědčení o registraci vozidla. Poté následuje vizuální kontrola skupin a dílů ovlivňujících tvorbu emisí škodlivin. Posuzuje se úplnost a těsnost příslušných soustav, těsnost motoru, nepřipustné modifikace a nepřiměřené opravy. Z důvodu bezpečnosti a ochrany zdraví pracovníků STK a SME se před zahájením měření kontroluje také motor vozidla a jeho příslušenství z hlediska jeho technického stavu, úplnosti, úniků provozních médií, stavu rotujících součástí, řemenic, řemenů, ventilátorů a dalších pomocných pohonů. Provádí se rovněž vizuální kontrola výfukového systému se zaměřením na těsnost, úplnost (zjevně chybějící katalyzátory, DPF, EGR a další komponenty a systémy pro snižování emisí škodlivin), viditelná poškození, upevnění lambda sond a těsnění přírub a spojů. Osobní automobily se vznětovými motory schválené v úrovni „Euro 2“ a novější musí být vybaveny katalyzátory a osobní automobily schválené v úrovni „Euro 5“ a novější musí být vybaveny DPF filtry. Zjevná nepřítomnost či poškození katalyzátoru, resp. DPF je hodnocena jako vážná závada typu B. Jako třetí v pořadí se vyhodnocuje diagnostika systému řízení motoru, tzn. kontrola paměti závad řídicího systému hnacího agregátu. Nejprve se provede identifikace softwarové verze řídicí jednotky motoru načtením identifikačních řetězců softwaru (CALID) a kontrolních součtů (CVN) prostřednictvím diagnostického rozhraní. Informativně se také vyčítá VIN vozidla, pokud je uložený v palubní síti. Vizuálně se kontroluje funkčnost MIL (kontrolky chybné funkce motorů vybavených OBD). U „malých vozidel“ v úrovni Euro 3 a novější se musí MIL rozsvítit po zapnutí zapalování a nejpozději po nastartování motoru musí zhasnout, pokud není indikována závada. Standardizovaná podoba MIL je uvedena na obrázku níže. Následně se online přenosem kontrolují Readiness kódy (stavové kódy, přiřazené v rámci OBD určitým komponentám nebo subsystémům vozidla, udávající, zda byla příslušná komponenta nebo subsystém interně otestována z hlediska správné funkce). Na stavu Readiness kódů závisí průběh některých dalších měření. V případě, že Readiness indikují neproběhlé testy nebo nejsou v diagnostickém protokolu obsaženy vůbec, provedou se doplňková měření. Po Readiness kódech se opět pomocí online přenosu kontroluje paměť závad. Vyhodnocují se pouze emisně relevantní potvrzené závady a stav MIL [38].

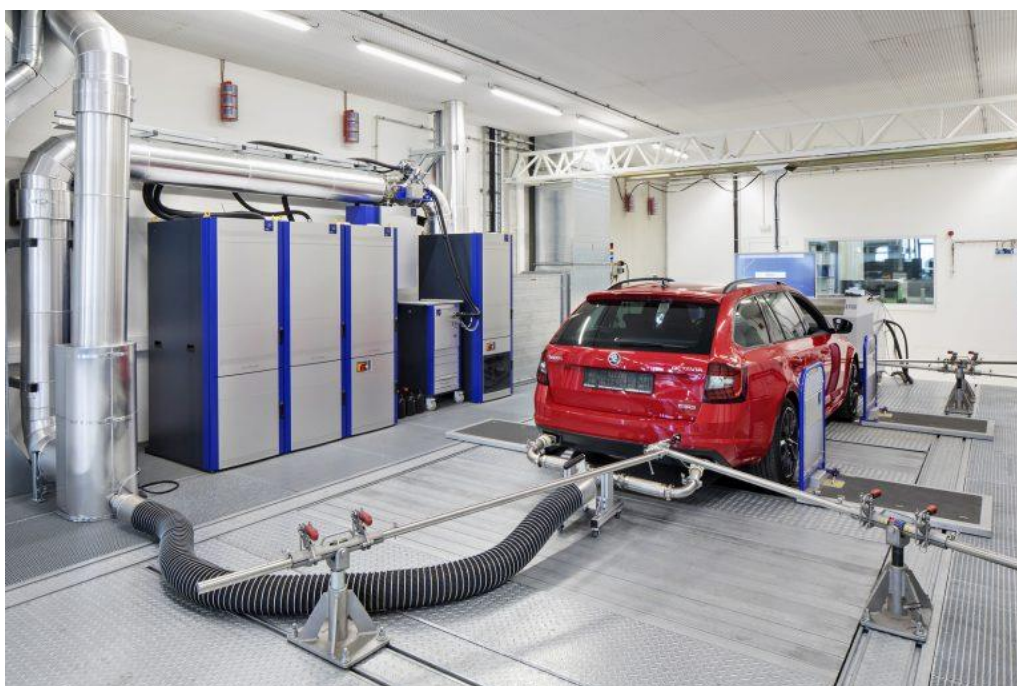
Obrázek 27: Standardizovaná podoba MIL [39]



Až na závěr probíhá měření kouřivosti následujícím způsobem. Při měření na SME je povinné používat schválený měřicí program určený pro úřední měření a je nepřipustné využívat měřících programů pro diagnostická měření. Volič převodových stupňů musí být v poloze „N“ (neutrál) nebo „P“ (parking), spojka u mechanických převodovek musí být sepnutá. Motor musí být nastartovaný po dobu nejméně 1 minuty a zahřátý na provozní teplotu. Nestanoví-li výrobce jinak, rozumí se provozní teplotou teplota nejméně 60 °C, bez ohledu na to, z jakého zdroje byla získána. Snímání otáček motoru se pro vozidla s OBD rozhraním provádí přednostně prostřednictvím tohoto rozhraní. Kontrola regulace volnoběhu se provádí u všech vozidel. Po 10 sekundách stabilizace volnoběhu se zapnou všechny významné elektrické spotřebiče (osvětlení vozidla, vyhřívání skel, klimatizace), u vozidel se servořízením se otáčí volantem – nesmí dojít k trvalému poklesu volnoběžným otáček pod spodní hranici otáčkového pásma na dobu delší než 3 sekundy. Po vypnutí všech spotřebičů musí otáčky motoru zůstat ve stanoveném otáčkovém pásmu. Před samotným měřením kouřivosti motoru probíhá kontrola omezovače (referenčních otáček). Postupně se sešlápne pedál akcelerace, až se otáčky motoru přestanou zvyšovat, a přitom se kontroluje, zda se referenční otáčky pohybují ve stanoveném pásmu. Jestliže dochází k překročení maximálních přípustných otáček motoru, kontrola se ukončí a zapíše se závada. U vozidel uvedených do provozu nejpozději do 31. 12. 2011 je doporučeno před měřením emisí provést propláchnutí výfukového systému pomocí tří akcelerací motoru ze základního volnoběhu při plném sešlápnutí pedálu akcelerace. Doporučuje se dosáhnout alespoň 2/3 otáček maximálního výkonu motoru nebo otáček OEM omezovače, pokud je nastaven na nižší hodnotu. Tím je vozidlo připraveno k měření kouřivosti opacimetrem umístěným

do koncovky výfuku. Měření kouřivosti se uskutečňuje metodou volné akcelerace. Akcelerační pedál se rychle sešlápne do maximální polohy (avšak bez kick-downu) a drží v této poloze, dokud není dosaženo tolerančního pásma referenčních otáček (omezovače). Jakmile je dosaženo tolerančního pásma referenčních otáček, je možné akcelerační pedál okamžitě uvolnit. Výsledná hodnota kouřivosti je nejvyšší zaznamenaná hodnota kouřivosti během akcelerace. Po poklesu otáček do pásma základního volnoběhu následuje pauza v délce nejméně 15 sekund. U vozidel homologovaných s filtrem pevných částic je přípustné provést pouze jedno platné opakování za předpokladu, že všechny readiness kódy jsou nastaveny a naměřená hodnota kouřivosti nepřesahuje limit. U vozidel homologovaných podle 98/69/ES resp. 2005/55/ES a novějších předpisů vybavených OBD, je přípustné provést pouze 2 platná opakování za předpokladu, že všechny readiness kódy jsou nastaveny, naměřená hodnota kouřivosti nepřesahuje limit a vzájemný rozdíl naměřených hodnot kouřivosti není větší než $0,25 \text{ m}^{-1}$. Výsledná hodnota kouřivosti se stanoví jako aritmetický průměr z obou opakování. Pro ostatní vozidla se postup měření opakuje nejméně 4x a výsledná hodnota kouřivosti se stanoví jako aritmetický průměr ze 4 posledních platných opakování. Limitní hodnoty kouřivosti jsou stanoveny výrobcem vozidla. Pokud je nestanovil nebo pokud se jedná o vozidla s DPF, použijí se limitní hodnoty dle Přílohy č. 1 vyhlášky č. 211/2018 Sb. Na obrázku níže je možné vidět automobil při kontrolním měření emisí na moderně vybavené Stanici Měření Emisí [38].

Obrázek 28: Fotografie stanice měření emisí [40]



5 Praktická část práce

Tato kapitola se věnuje praktickému měření produkce pevných částic vznětového spalovacího motoru automobilu Škoda Octavia na válcové zkušebně v laboratořích Technické fakulty ČZU v režimu standardizovaného homologačního cyklu WLTC třídy 3b.

5.1 Průběh měření

Testovaný automobil byl před měřením na válcové zkušebně zahřátý na provozní teplotu krátkou jízdou v běžném provozu. Poté se vozidlo zajistilo proti pohybu na válcích zkušebny upínacími popruhy, do výfuku se nainstalovaly měřicí sondy, které bylo z důvodu tvarování koncovky výfuku nutné zajistit drátem. Měřicí sondy byly napojeny na celou měřicí aparaturu, která byla kvůli křížové kontrole mezi přístroji složena celkem ze šesti přístrojů pro analýzu emisí spalovacích motorů. Před vozidlo byl z důvodu zajištění chlazení motoru umístěn ventilátor. K vozidlu se pomocí diagnostického kabelu připojil notebook s diagnostickým nástrojem pro vozidla koncernu Volkswagen Group. Poté bylo možné přistoupit k samotnému měření, které probíhalo podle celého cyklu WLTC třídy 3b obsahujícího čtyři fáze simulující městskou a příměstskou jízdu i jízdu na rychlostních silnicích a dálnicích. V první fázi s názvem „Low“ se rychlost vozidla pohybuje maximálně do $56,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, ve fázi „Medium“ dosahuje rychlost až $76,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, následuje třetí fáze nazvaná „High“ s nejvyšší rychlostí $97,4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a cyklus je zakončen poslední fází „Extra High“, kde se z důvodu simulace jízdy po dálnici rychlost pohybuje do hodnoty $131,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Průběh rychlostí, které bylo během měřicího cyklu potřeba dosáhnout, byl promítán na obrazovce umístěné před čelním sklem vozidla přímo ve výhledu řidiče. Řazení rychlostních stupňů během měření bylo zjednodušeno díky vybavení testovaného vozidla automatickou převodovkou.

5.2 Testované vozidlo

K testování bylo použito vozidlo Škoda Octavia druhé generace s motorem 1,9 TDI a automatickou šestistupňovou převodovkou DSG. Přesné parametry vozidla obsahuje tabulka níže.

Tabulka 4: Parametry testovaného vozidla Škoda Octavia II

Značka	Škoda
Model	Octavia II
Karoserie	Hatchback
Rok výroby	2006
Stav odometru [km]	245 000
Emisní standard	Euro 4
Spotřeba paliva město / mimo město / komb. [l / 100 km]	7,7 / 5 / 5,9
Zrychlení 0–100 km·h ⁻¹ [s]	12,2
Maximální rychlost [km·h ⁻¹]	189
Nejvyšší výkon [kW]	77 při 4000 ot·min ⁻¹
Nejvyšší točivý moment [Nm]	250 při 1900 ot·min ⁻¹
Kód motoru	EA188
Zdvihový objem [cm ³]	1896
Zdvih [mm]	95,5
Vrtání [mm]	79,5
Přepřňování	Turbodmychadlo Garrett 751851
Ventilový rozvod	SOHC
Typ vstřikování	PD

5.3 Přístrojové vybavení

Přístrojové vybavení pro experiment měření množství pevných částic, které vyprodukuje vozidlo se vznětovým motorem bez filtru pevných částic, se skládá z měřicích přístrojů, samotné válcové zkušebny a diagnostiky pro sledování a logování (záznam) dat z řídicí jednotky vozidla.

5.3.1 Testo NanoMet3

Testo NanoMet3 je přenosný měřicí systém emisí (PEMS) pro měření koncentrace počtu a středního průměru pevných nanočástic o velikostech 10 až 700 nm za reálného provozu. Jedná se kompaktní, snadno přenositelný a robustní přístroj poskytující přímou

odezvu v širokém rozsahu koncentrací. Kromě napájení standardním střídavým napětím 100 až 240 V může být přístroj provozován i z akumulátorů s napětím 12 až 24 V pro palubní měření nebo pro měření v terénu. Doba odezvy je dostatečně krátká na měření krátkodobého chodu motoru, poskytující kompletní datový řetězec s koncentrací počtu částic, průměrnou velikostí, celkovým povrchem částic usazených v plicních sklípcích (Lung-Deposited Surface Area, LDSA) a vypočteným množstvím částic s rozlišením 1 Hz. Široký měřicí rozsah (ředěný $10^4 \div 10^8$ částic/cm³) pokrývá prakticky všechny emisní normy týkající se počtu částic včetně nejnovějších požadavků Euro 6. Při odběru vzorků mohou na okraji výfuku kondenzovat těkavé látky do nanokapiček, které pak mohou být detekovány jako částice dohromady s netěkavými pevnými částicemi, a tím ovlivnit výsledky měření. Aby byly měřeny pouze pevné částice, je Testo NanoMet3 vybaven úpravou výfukové sondy podle patentovaného principu tepelného ředění, který je plně v souladu s Programem pro měření částic EU (Particle Measurement Programme, PMP). Systém je vybaven klasifikátorem difuzních rozměrů od firmy Testo, senzorem pro měření koncentrace počtu částic a středního průměru částic v řádech nanometrů. Měřicí princip využívá k počítání částic elektrické nabíjení. Přesné parametry tohoto přístroje obsahuje následující tabulka a jeho podobu je možné vidět na obrázku níže [41].

Tabulka 5: Parametry přístroje Testo NanoMet3 [41]

Aerosol	Primárně ředěné výfukové plyny nebo vzduch obsahující nanočástice
Rozsah kontaminace [částic/cm ³]	Senzor: $10^3 \div 10^6$ Ředěný: $10^4 \div 3 \cdot 10^8$
Velikost částic [nm]	10 ÷ 700
Rozsah průměrné velikosti částic [nm]	10 ÷ 300
Ředicí faktor	Standardně 10; 100; 300
Hmotnost [kg]	18

Obrázek 29: Přístroj pro čítání a klasifikaci částic Testo NanoMet3 [42]



5.3.2 Palas UF-CPC 200

Palas UF-CPC 200 je kondenzační čítač nanočástic na bázi butanolu s vysokou účinností. Měří početní koncentrace ultra jemných částic (UFP) v aerosolech a konkrétně tento model je určen pro koncentrace až do $2 \cdot 10^6$ částic/cm³. Díky tomu je vhodný pro měření vysokých koncentrací u aerosolů s nízkým ředěním, jako jsou výfukové plyny. Aerosol je přiváděn přímo do odpařovací jednotky pomocí interně nastavitelného a řízeného membránového čerpadla, nasyceného pracovní kapalinou – n-butanolem. Butanol proudí ve spirále uvnitř válce do základny odpařovací jednotky. Neodpařený zbytek je druhým čerpadlem čerpán zpět do zásobníku. Tímto způsobem se aktivně zajišťuje trvalé nasycení odpařovací jednotky a zároveň se zabraňuje tvorbě usazenin na vnitřních stěnách. Kondenzované částice jsou detekovány optickým senzorem, který určuje koncentraci a distribuci velikosti kondenzovaných částic. Odpařovací a kondenzační modul je bezúdržbový a umožňuje nepřetržitý provoz až po dobu jednoho roku. Technické údaje přístroje jsou shrnuty v tabulce a na obrázku je také samotný čítač Palas UF-CPC 200 [43].

Tabulka 6: Parametry čítače částic Palas UF-CPC 200 [43]

Rozsah měření [částic/cm ³]	$2 \cdot 10^6$
Velikost částic [nm]	4 ÷ 10000
Přesnost [%]	5
Zdroj světla	LED
Pracovní kapalina	1-butanol

Obrázek 30: Kondenzační čítač částic Palas UF-CPC 200 [44]



5.3.3 TSI EEPS 3090

Třídíč částic TSI EEPS 3090 měří částice o velikosti od 5,6 do 560 nm při frekvenci 10 Hz pro vizualizaci dynamického chování emitovaných částic. Přístroj pracuje na principu spektrometru a využívá soustavu citlivých elektrometrů v kombinaci se třemi maticemi pro inverzi dat, které poskytují údaje o velikosti částic v reálném čase ve 32 kanálech velikosti (16 kanálů na dekádu). EEPS neobsahuje vestavěné ředění vzorku, což poskytuje maximální flexibilitu a nezávislost na úpravě vzorku a pracuje při tlaku okolí, aby se zabránilo odpařování těkavých a polotěkavých částic, což poskytuje rozdělení podle velikosti a početní koncentrace (v rozmezí až 1000 částic/cm³). Detailnější parametry třídíče částic jsou v tabulce a pod tabulkou je poté fotografie přístroje TSI EEPS 3090 [45].

Tabulka 7: Parametry třídíče částic TSI EEPS 3090 [45]

Rozlišení velikosti částic [kanálů/dekáda]	16
Velikost částic [nm]	5,6 ÷ 560
Časové rozlišení [rozdělení podle velikosti / s]	10
Hmotnost [kg]	32

Obrázek 31: Třídič částic TSI EEPS 3090 [46]



5.3.4 Dekati ePNC

Dekati ePNC je čítač částic, který byl navržen speciálně pro snadnou integraci do zařízení pro periodické testování a kontrolu a splňuje metrologické požadavky nařízení EU o RDE. Konstrukce přístroje ePNC je velice kompaktní, jeho modulární struktura se skládá ze samostatné řídicí a metrologické jednotky. Řídicí jednotka se stará o řídicí systémy a datovou komunikaci, zatímco vyměnitelná metrologická jednotka obsahuje systém měření částic, což usnadňuje servis a údržbu a snižuje náklady. Technologie počítání částic je založena na difúzním nabíjení, difúzním sběru částic a elektrické detekci shromážděných částic. Parametry přístroje a fotografie Dekati ePNC jsou opět uvedeny níže [47].

Tabulka 8: Parametry čítače částic Dekati ePNC [47]

Citlivost [částic/cm ³]	1000
Max. koncentrace [částic/cm ³]	1,5·10 ⁷
Velikost částic [nm]	23 ÷ 200
Interval měření [s]	1
Hmotnost [kg]	2,15

Obrázek 32: Čítač částic Dekati ePNC [48]



5.3.5 Přístroje pro měření plynných emisí

Za účelem křížové kontroly mezi měřicími přístroji byly při měření využity také analyzátory, které měří plynné emise (HC, CO, CO₂, O₂, NO_x). Konkrétně ATAL Gas Analyzer AT 505 a Mini-PEMS gen. 2.

5.3.6 Válcová zkušebna Schenck 3604/GS56

Měření bylo realizováno na modernizované válcové zkušebně Schenck 3604/GS56 v laboratořích KVPD. Tato válcová zkušebna je určena pro homologaci vozidel s hmotností do 3,5 t a je tvořena dvěma válci propojenými řetězem. Jeden z válců je navíc vybavený protiskluzovým povrchem sloužícím k přenosu energie mezi koly vozidla a zkušebnou. Z jedné strany jsou k válcům připojeny setrvačníky simulující setrvačnou hmotnost vozidla, z druhé strany jsou připojeny brzdové systémy. Simulaci odporu vzduchu tvoří stejnosměrný elektrický motor o výkonu 56 kW a vířivá brzda o výkonu 125 kW slouží ke statickému měření výkonu. Válcová zkušebna je ovládána pomocí elektronického systému Datalab od firmy Moravské přístroje a.s., kde byl vytvořen v programovém prostředí ControlWeb vlastní ovládací program, pomocí kterého je celé pracoviště ovládáno a zároveň se systém také stará o automatický sběr dat [49].

5.3.7 OBD diagnostika

Při měření emisí pevných částic na válcové zkušebně bylo nutné odečítat a zaznamenávat data z řídicí jednotky motoru vozidla. Za tímto účelem byl k vozidlu pomocí

kabelu VAG-COM HEX-CAN připojen notebook se spuštěným diagnostickým programem VCDS od společnosti Ross-Tech. Pro analýzu produkce pevných částic byly důležité zejména údaje o sešlápnutí pedálu akcelerace, otáčkách vozidla a rychlosti pevných částic, nicméně zobrazována a ukládána byla také data o plicím tlaku a dalších veličinách.

5.4 Uspořádání měřicího pracoviště

Na fotografii níže je kompletní sestava použitých přístrojů pro analýzu plyných a pevných částic. Zleva nejprve přístroje pro měření plyných částic Mini-PEMS gen. 2 a vzadu stojící zelený ATAL Gas Analyzer AT 505, poté směrem doprava analyzátoři plyných částic: Testo NanoMet3 s monitorem, za ním Dekati ePNC a vpravo poté stojící Palas UF-CPC 200 a na něm položený TSI EEPS 3090.

Obrázek 33: Analyzátoři částic použité při měření [zdroj: vlastní]



5.5 Zpracování naměřených dat

Naměřená data ze všech přístrojů bylo nejprve potřeba časově synchronizovat, protože na přístrojích nebylo spuštěno měření v jednom přesném okamžiku. Poté bylo nutné experimentálně stanovit ředící poměry pro Dekati ePNC, Palas UF-CPC 200 a TSI EEPS 3090, které byly napojeny přes ředící odběrné zařízení výfukových plynů. Při určování

ředicích poměrů sloužil čtvrtý přístroj (Testo NanoMet3) jako etalon, protože si ředicí poměr nastavuje automaticky a nebyl napojen přes ředicí zařízení. Následně byly z naměřených hodnot vybrány vhodné okamžiky volnoběhu a akcelerace, na kterých bylo provedeno vyhodnocení rozdílů naměřených hodnot mezi různými použitými přístroji v rozdílných provozních režimech vozidla.

6 Výsledky a diskuse

Ředící poměry byly experimentálně stanoveny z vybraných okamžiků ustáleného stavu a jsou vypsány v tabulce.

Tabulka 9: Experimentálně zjištěné ředící poměry

Přístroj	Ředící poměr
Testo NanoMet3	1
Palas UF-CPC 200	1/208
TSI EEPS 3090	1/460
Dekati ePNC	1/430

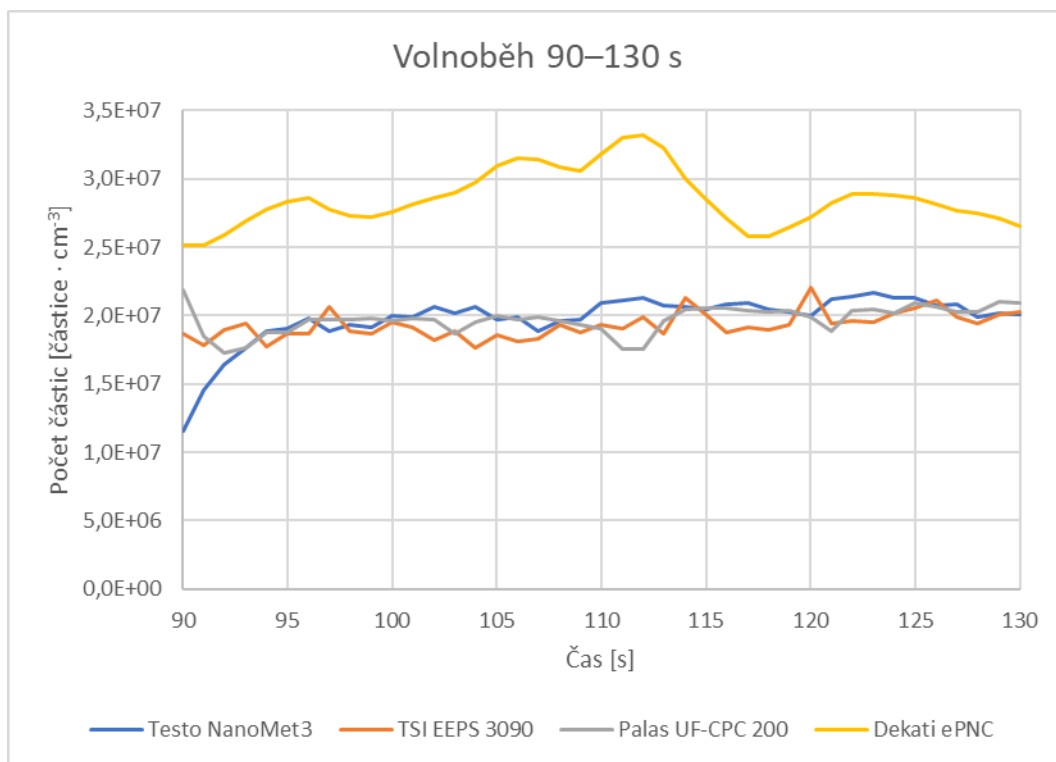
6.1 Koncentrace částic v ustálených stavech

V této části jsou popsány výsledky měření v ustálených stavech, tzn. při volnoběžných otáčkách motoru měřeného vozidla. V grafech je vždy zobrazen časový průběh naměřeného množství částic jednotlivými přístroji a v tabulkách jsou obsaženy průměrné, maximální a celkové počty částic v absolutních i relativních hodnotách. Relativní hodnoty v procentech jsou vždy vztaženy k přístroji Testo NanoMet3, který při vyhodnocování sloužil jako etalon.

6.1.1 Ustálený stav 1

První ustálený stav byl zvolen v čase měřicího cyklu od 90 do 130 sekund. Tento 40sekundový volnoběh vozidlo udržuje v části cyklu s nízkou rychlostí („Low“) po dvou krátkých akceleracích na rychlost okolo 40 km·h⁻¹. Výsledky z přístrojů Testo NanoMet3, TSI EEPS 3090 a Palas UF-CPC 200 si byly velice podobné. Dekati ePNC naměřil v tomto případě průměrné, maximální i celkové koncentrace zhruba o 40–50 % vyšší než zbývající analyzátory pevných částic.

Graf 1: Ustálený stav 1, volnoběh 90–130 s



Tabulka 10: Naměřený počet částic při ustáleném stavu 1

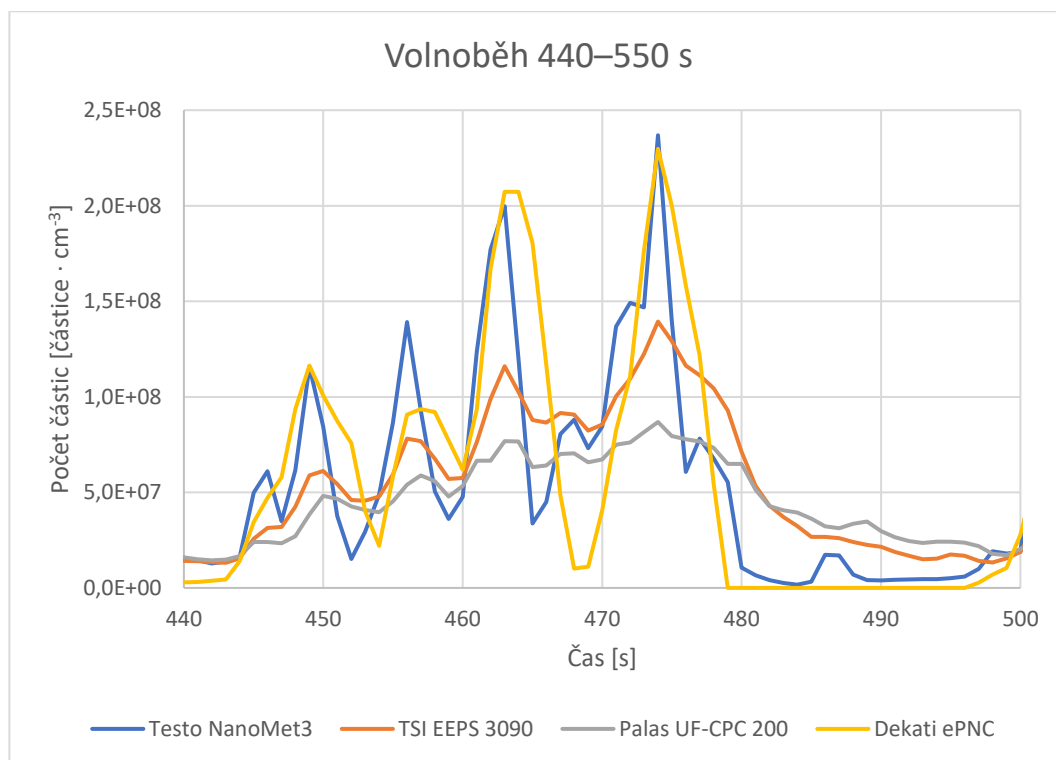
Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	1,98·10 ⁷	1,92·10 ⁷	1,97·10 ⁷	2,86·10 ⁷
	Maximum	2,17·10 ⁷	2,20·10 ⁷	2,19·10 ⁷	3,32·10 ⁷
	Suma	8,10·10 ⁸	7,91·10 ⁸	8,08·10 ⁸	11,69·10 ⁸
Relativně [%]	Průměr	100	97,2	99,6	144,5
	Maximum	100	101,6	100,8	153,2
	Suma	100	97,7	99,7	144,2

6.1.2 Ustálený stav 2

Pro druhý ustálený stav byl vybrán interval 440 až 500 sekund, který se stále ještě nachází v části „Low“ cyklu WLTC 3b. Při tomto 60 sekund trvajícím volnoběhu byly nejnižší průměrné, nejvyšší i celkové koncentrace naměřeny pomocí kondenzačního čítače

nanočástic Palas UF-CPC 200. Nejvyšší naměřená koncentrace tímto přístrojem dosahovala dokonce pouze 37 % koncentrace částic detekovaných etalonem. Také nejvyšší počet částic, který byl naměřen přístrojem TSI EEPS 3090, byl nižší než u Testo NanoMet3 – o 41 procent.

Graf 2: Ustálený stav 2, volnoběh 440–550 s



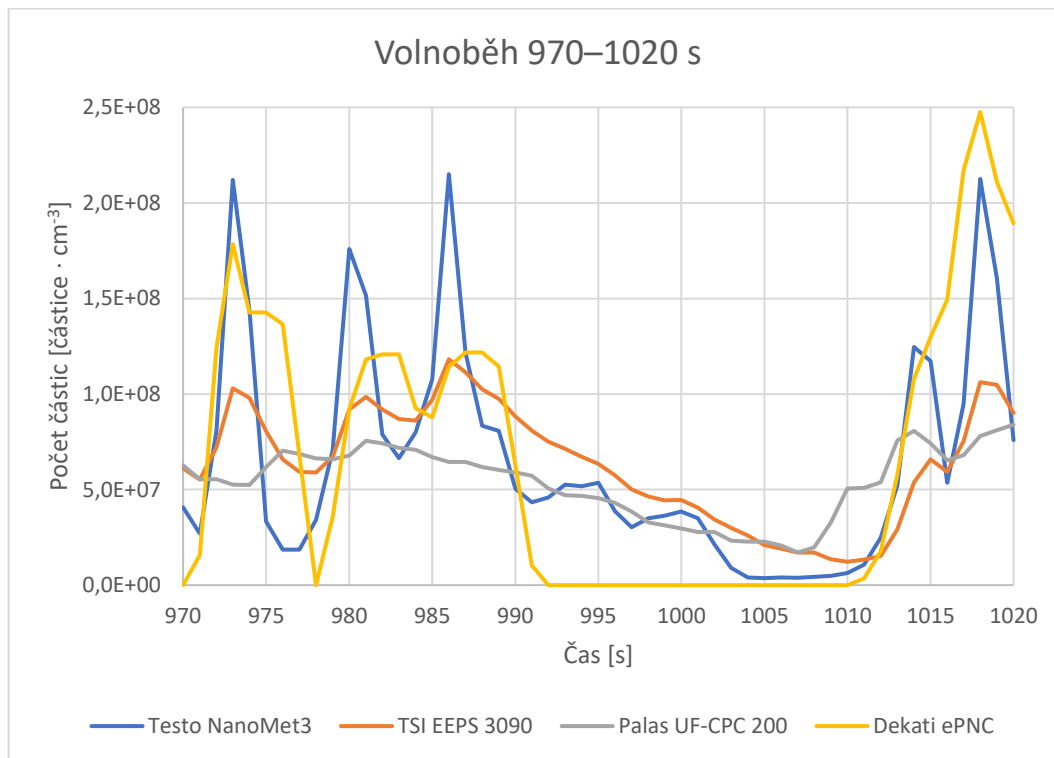
Tabulka 11: Naměřený počet částic při ustáleném stavu 2

Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	$5,19 \cdot 10^7$	$5,38 \cdot 10^7$	$4,42 \cdot 10^7$	$5,42 \cdot 10^7$
	Maximum	$2,37 \cdot 10^8$	$1,39 \cdot 10^8$	$0,87 \cdot 10^8$	$2,31 \cdot 10^8$
	Suma	$3,58 \cdot 10^9$	$3,61 \cdot 10^9$	$2,98 \cdot 10^9$	$3,72 \cdot 10^9$
Relativně [%]	Průměr	100	103,7	85,1	104,3
	Maximum	100	58,8	36,7	97,7
	Suma	100	100,8	83,3	103,9

6.1.3 Ustálený stav 3

Ve třetím ustáleném stavu, který je v testovacím cyklu na pomezí fázi „Medium“ a „High“, se opakovalo chování přístroje Palas UF-CPC 200, který opět detekoval nejnižší množství PM. O 45 % nižší max. hodnotu oproti etalonu vykázal třídič částic TSI EEPS 3090, naopak maximum naměřené třídičem částic Dekati ePNC bylo o 15 procent vyšší.

Graf 3: Ustálený stav 3, volnoběh 970–1020 s



Tabulka 12: Naměřený počet částic při ustáleném stavu 3

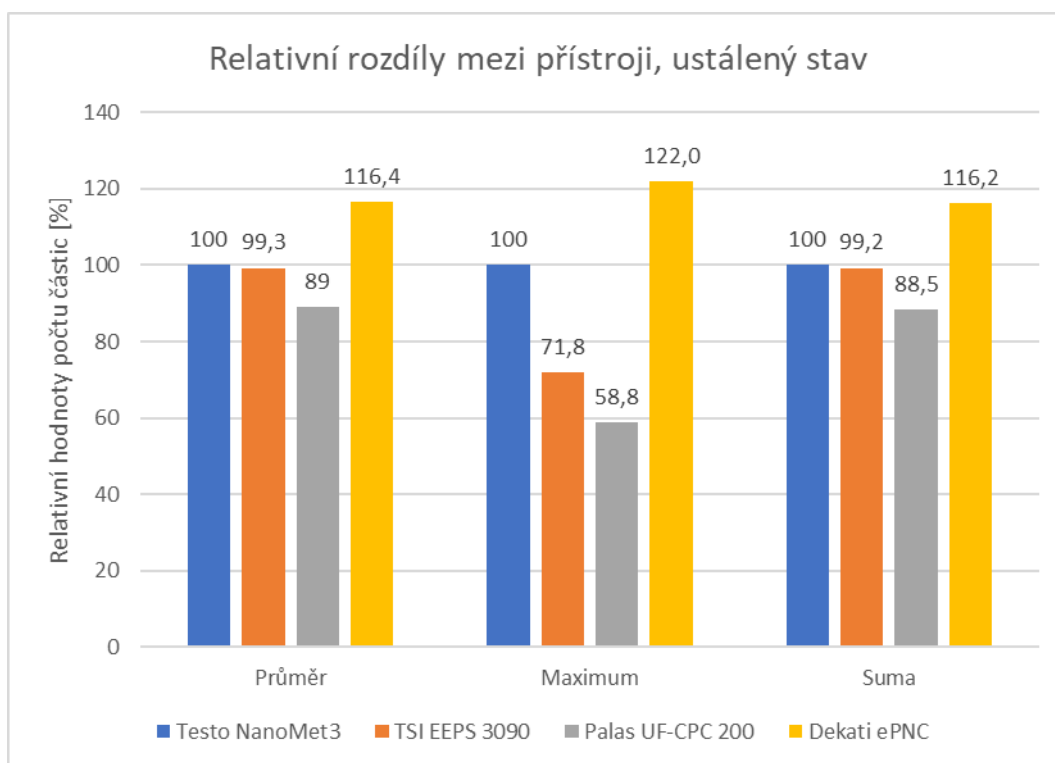
Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	$6,55 \cdot 10^7$	$6,35 \cdot 10^7$	$5,39 \cdot 10^7$	$6,57 \cdot 10^7$
	Maximum	$2,15 \cdot 10^8$	$1,18 \cdot 10^8$	$0,84 \cdot 10^8$	$2,48 \cdot 10^8$
	Suma	$3,34 \cdot 10^9$	$3,31 \cdot 10^9$	$2,75 \cdot 10^9$	$3,35 \cdot 10^9$
Relativně [%]	Průměr	100	96,9	82,3	100,4
	Maximum	100	55,0	39,0	115,1
	Suma	100	99,2	82,4	100,4

6.1.4 Vyhodnocení výsledků v ustálených stavech

Tabulka 13: Naměřené počty částic při třech analyzovaných volnoběžích

Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	4,57·10 ⁷	4,55·10 ⁷	3,93·10 ⁷	4,95·10 ⁷
	Maximum	2,23·10 ⁸	1,59·10 ⁸	1,30·10 ⁸	2,70·10 ⁸
	Suma	2,58·10 ⁹	2,57·10 ⁹	2,18·10 ⁹	2,75·10 ⁹
Relativně [%]	Průměr	100	99,3	89	116,4
	Maximum	100	71,8	58,8	122,0
	Suma	100	99,2	88,5	116,2

Graf 4: Relativní rozdíly mezi přístroji v ustálených stavech



Výsledky shrnující všechny zkoumané ustálené stavy potvrzují dílčí vyhodnocená data z jednotlivých volnoběhů. Nejnižší průměrnou, maximální i celkovou hodnotu počtu pevných částic ve výfukových plynech naměřil přístroj Palas UF-CPC 200. Průměrná

a celková hodnota se od etalonu odlišuje o 11 % a maximální o 41 %. Za tímto přístrojem následoval TSI EEPS 3090, který je průměrnou a celkovou hodnotou téměř na úrovni Testo NanoMet3, nicméně nejvyšší detekovaná hodnota v ustálených stavech je oproti němu o 28 procent nižší. Všechny koncentrace pevných částic naměřil vyšší než etalon analyzátor Dekati ePNC, a to v rozmezí 16–22 procent.

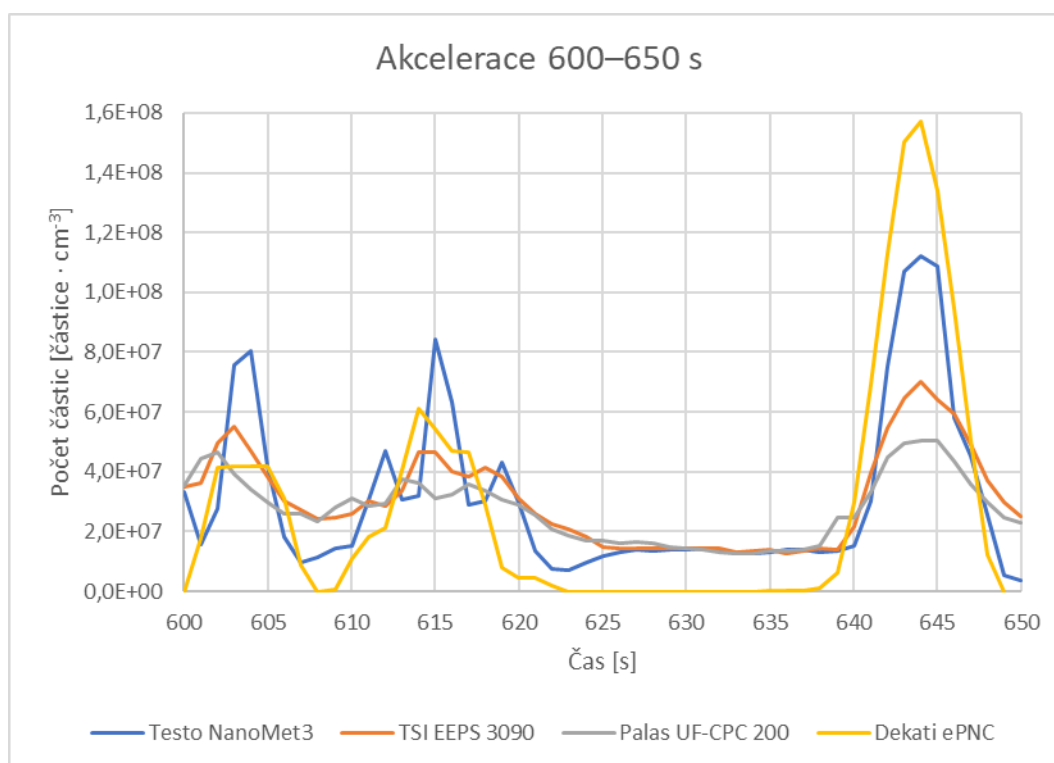
6.2 Koncentrace částic při přechodových stavech

Tato část shrnuje výsledky měření koncentrace pevných částic při akceleracích vozidla určených cyklem WLTC.

6.2.1 Akcelerace 1

První zkoumanou akcelerací začíná fáze „Medium“ homologačního cyklu a vozidlo při ní musí zrychlit z 0 na 58 km·h⁻¹. Nejvyšší průměrné a celkové počty částic byly naměřeny pomocí etalonu, nejvyšší maximální počet byl detekován ve špičce před koncem akcelerace čítačem částic Dekati ePNC a byl oproti hodnotě změřené Testo NanoMet3 vyšší o 40 procent. Nejnižší hodnoty byly výsledkem měření přístroje Palas UF-CPC 200.

Graf 5: Akcelerace 1, interval 600–650 s



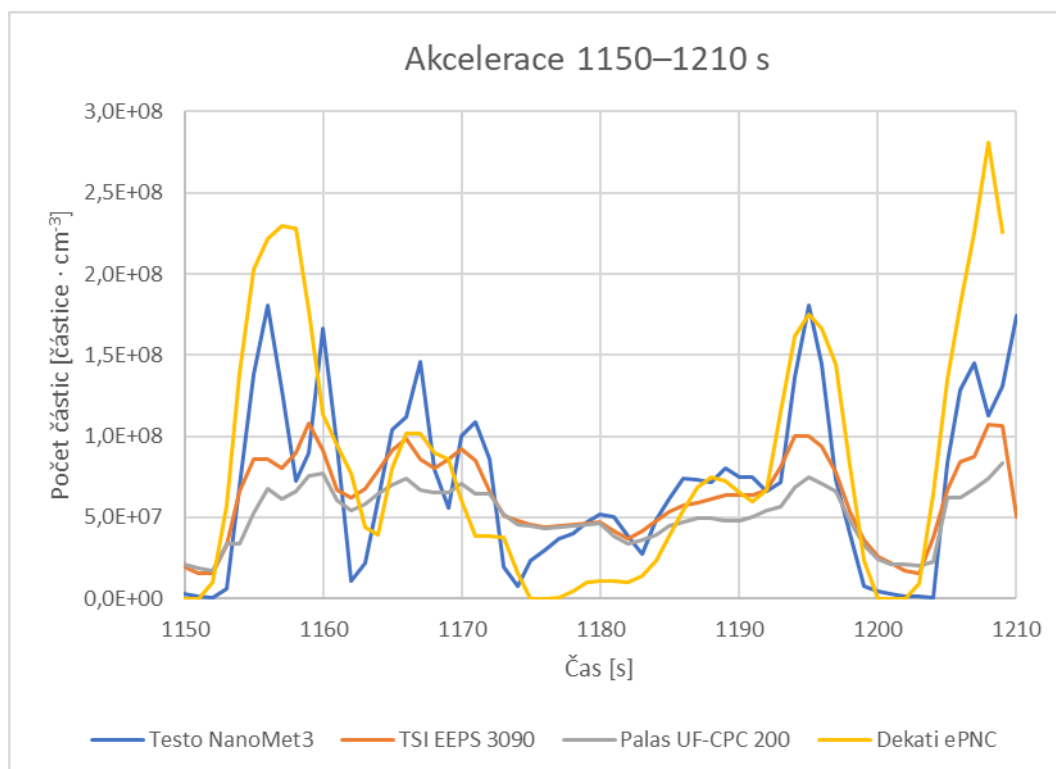
Tabulka 14: Naměřený počet částic při akceleraci 1

Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	3,11·10 ⁷	2,99·10 ⁷	2,80·10 ⁷	2,78·10 ⁷
	Maximum	1,12·10 ⁸	0,70·10 ⁸	0,50·10 ⁸	1,57·10 ⁸
	Suma	1,59·10 ⁹	1,60·10 ⁹	1,37·10 ⁹	1,39·10 ⁹
Relativně [%]	Průměr	100	96,1	88,6	89,4
	Maximum	100	62,3	44,9	140,3
	Suma	100	99,6	86,3	87,7

6.2.2 Akcelerace 2

Akcelerace č. 2 je z části „High“ a obsahuje zrychlení vozidla z 10 na 100 km·h⁻¹. Naměřené hodnoty a výsledky kopírují trend z předchozí akcelerace.

Graf 6: Akcelerace 2, interval 1150–1210 s



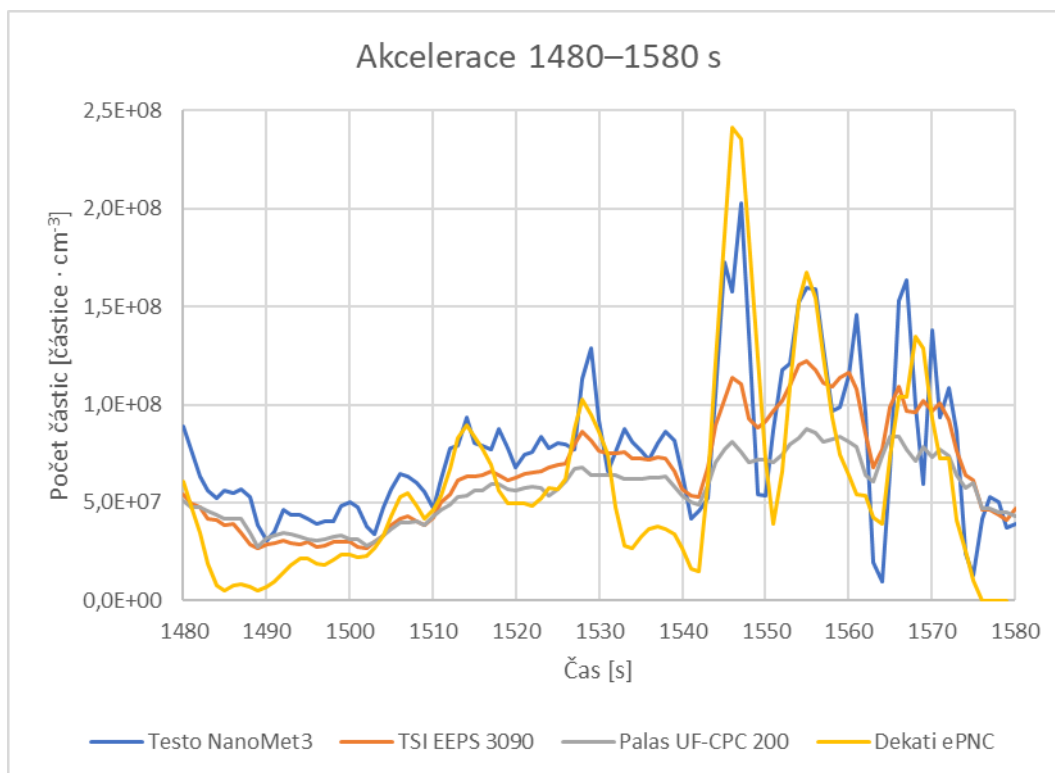
Tabulka 15: Naměřený počet částic při akceleraci 2

Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	7,00·10 ⁷	6,30·10 ⁷	5,15·10 ⁷	8,10·10 ⁷
	Maximum	1,81·10 ⁸	1,08·10 ⁸	0,84·10 ⁸	2,81·10 ⁸
	Suma	4,27·10 ⁹	3,99·10 ⁹	3,09·10 ⁹	4,86·10 ⁹
Relativně [%]	Průměr	100	90,0	73,5	115,6
	Maximum	100	59,6	46,4	155,7
	Suma	100	93,3	72,3	113,7

6.2.3 Akcelerace 3

Tato akcelerace ze sekce s extra vysokou rychlostí „Extra High“ simulující jízdu po dálnici začíná v 0 km·h⁻¹ a končí ve 125 km·h⁻¹, dochází při ní k nejsilnějšímu sešlápnutí plynového pedálu z celého měřicího cyklu (u testovaného vozidla až 70 procent), trvá dohromady zhruba 100 sekund a tomu také odpovídají naměřené absolutní sumární hodnoty počtu pevných částic, které jsou ze všech akcelerací nejvyšší. Relativní hodnoty naměřeného množství částic jsou odlišné od předcházejících přechodových stavů, protože u přístroje Dekati ePNC došlo poprvé k detekci menšího průměrného a celkového počtu pevných částic než u Testo NanoMet3. Maximální hodnotu však čítač pevných částic od výrobce Dekati naměřil o 19 procent vyšší než přístroj společnosti Testo. U zbylých dvou přístrojů byla opět naměřena maxima cca 40 % (Palas UF-CPC 200) a 60 % (TSI EEPS 3090), která odpovídají maximálním procentuálním hodnotám z první a druhé akcelerace.

Graf 7: Akcelerace 3, interval 1480–1580 s



Tabulka 16: Naměřený počet částic při akceleraci 3

Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	$7,68 \cdot 10^7$	$6,60 \cdot 10^7$	$5,66 \cdot 10^7$	$5,84 \cdot 10^7$
	Maximum	$2,03 \cdot 10^8$	$1,22 \cdot 10^8$	$0,87 \cdot 10^8$	$2,42 \cdot 10^8$
	Suma	$7,76 \cdot 10^9$	$6,69 \cdot 10^9$	$5,70 \cdot 10^9$	$5,90 \cdot 10^9$
Relativně [%]	Průměr	100	86,0	73,7	76,0
	Maximum	100	60,3	43,1	119,1
	Suma	100	86,2	73,4	76,0

6.2.4 Vyhodnocení výsledků v přechodových stavech

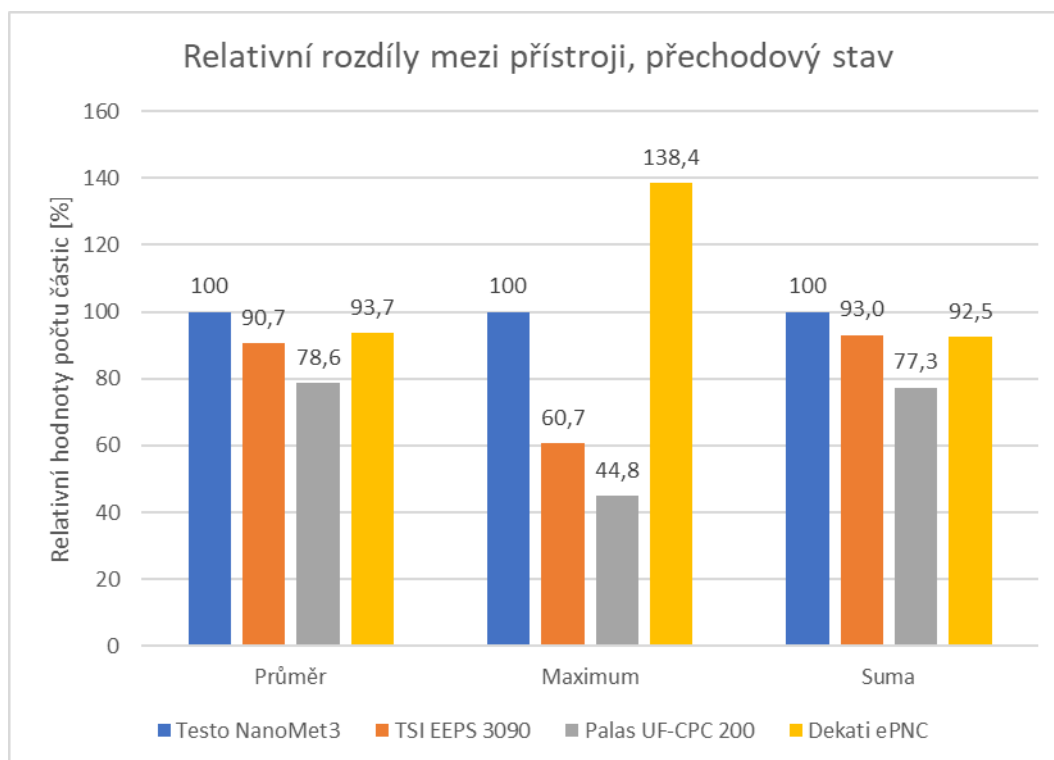
Výsledky shrnující všechny zkoumané přechodové stavy jsou v souladu s dílčími vyhodnocenými daty z jednotlivých akcelerací. Nejnižší průměrnou, maximální i celkovou hodnotu počtu pevných částic ve výfukových plynech naměřil přístroj Palas UF-CPC 200. Průměrná a celková hodnota se od etalonu odlišuje o 21, resp. 23 % a maximální dokonce

o 55 %. Za tímto přístrojem následoval TSI EEPS 3090, který je průměrnou a celkovou hodnotou přibližně na devíti desetinách hodnot Testo NanoMet3, ale nejvyšší detekovaná hodnota při akceleracích je oproti němu o 39 procent nižší. Maximální koncentraci pevných částic naměřil vyšší než etalon analyzátor Dekati ePNC, a to o 38 procent, průměrná a sumární hodnota však byly cca o 7 % nižší.

Tabulka 17: Naměřené počty částic při třech analyzovaných akceleracích

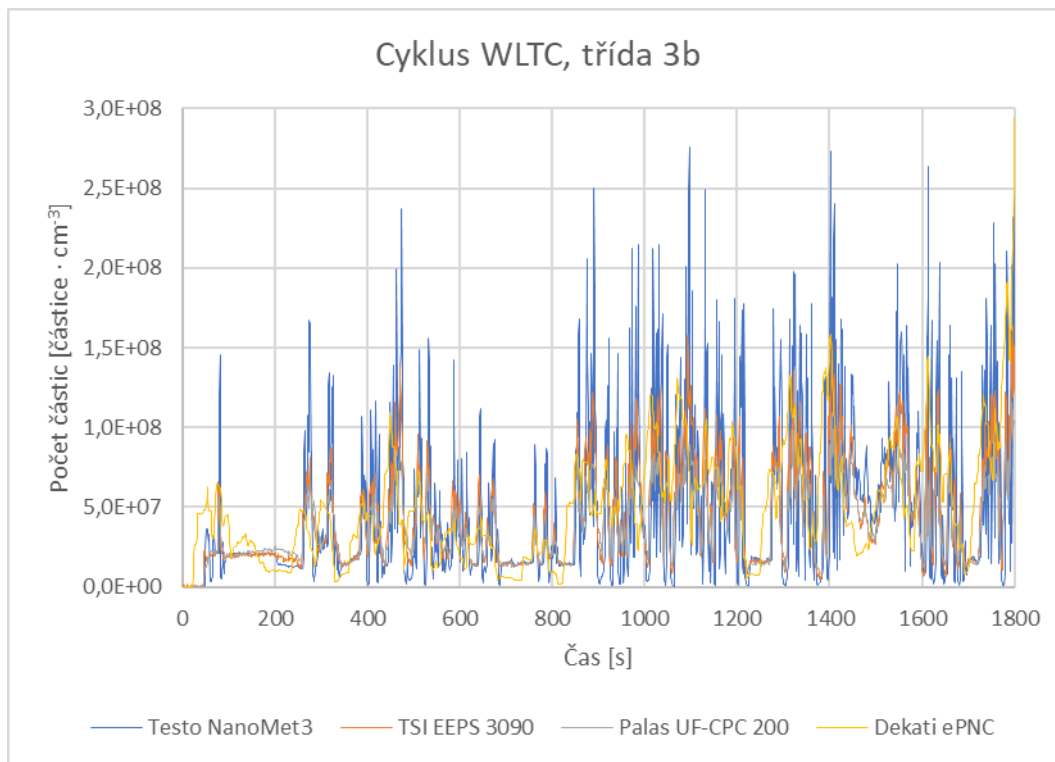
Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	5,93·10 ⁷	5,30·10 ⁷	4,54·10 ⁷	5,57·10 ⁷
	Maximum	1,65·10 ⁸	1,00·10 ⁸	0,74·10 ⁸	2,27·10 ⁸
	Suma	4,54·10 ⁹	4,09·10 ⁹	3,39·10 ⁹	4,05·10 ⁹
Relativně [%]	Průměr	100	90,7	78,6	93,7
	Maximum	100	60,7	44,8	138,4
	Suma	100	93,0	77,3	92,5

Graf 8: Relativní rozdíly mezi přístroji v přechodových stavech



6.3 Koncentrace částic při celém testovacím cyklu

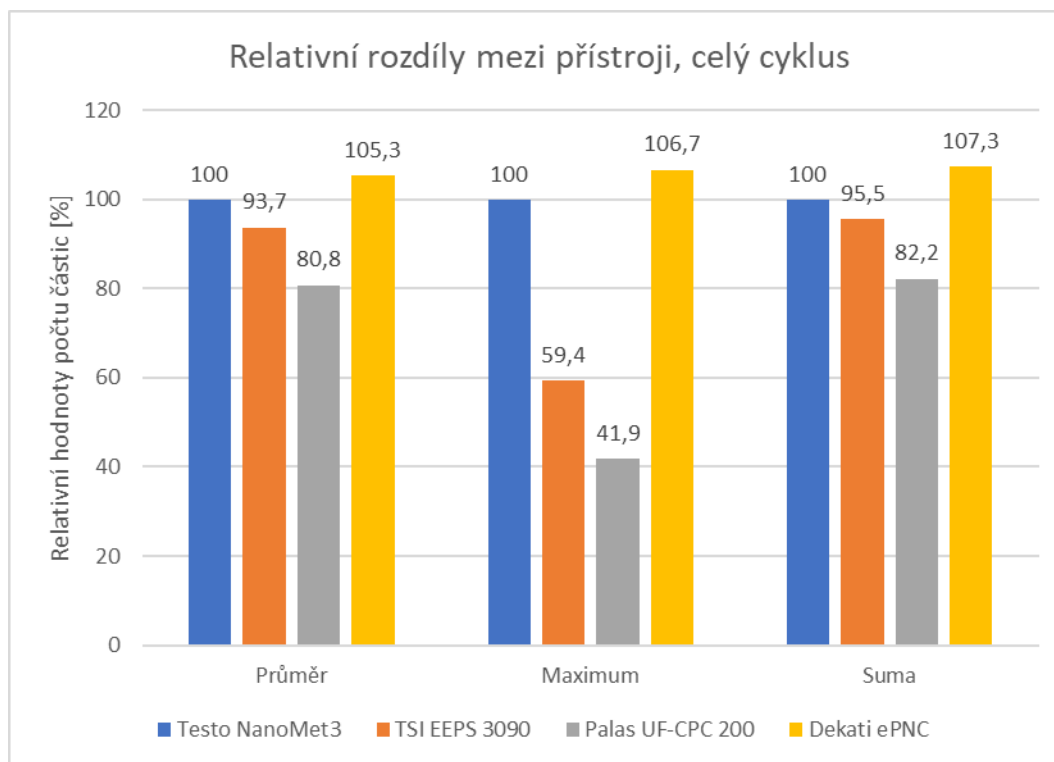
Graf 9: Časový průběh počtu částic během celého měřicího cyklu



Tabulka 18: Naměřený počet částic při celém měřicím cyklu

Počet částic		Přístroj			
		Testo NanoMet3	TSI EEPS 3090	Palas UF-CPC 200	Dekati ePNC
Absolutně [částice·cm ⁻³]	Průměr	4,81·10 ⁷	4,50·10 ⁷	3,88·10 ⁷	5,06·10 ⁷
	Maximum	2,76·10 ⁸	1,64·10 ⁸	1,16·10 ⁸	2,94·10 ⁸
	Suma	8,49·10 ¹⁰	8,11·10 ¹⁰	6,98·10 ¹⁰	9,12·10 ¹⁰
Relativně [%]	Průměr	100	93,7	80,8	105,3
	Maximum	100	59,4	41,9	106,7
	Suma	100	95,5	82,2	107,3

Graf 10: Relativní rozdíly mezi přístroji v celém měřicím cyklu



Je-li zkoumán celý měřicí cyklus, jsou relativní rozdíly mezi jednotlivými přístroji odpovídající trendům nastaveným výsledky z ustálených a přechodových stavů. Nejvyšší průměrné hodnoty byly naměřeny přístrojem Dekati ePNC, nejnižší poté Palas UF-CPC 200 s tím, že relativní rozdíl mezi těmito analyzátory činí 25 %. Situace se opakuje u maximálních detekovaných hodnot, kde je mezi čítačem částic Dekati a kondenzačním čítačem Palas difference dokonce 65 %, a rovněž v případě celkového počtu částic, kdy byl tento rozdíl jedna čtvrtina sumy částic detekované přístrojem Testo NanoMet3.

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou produkce pevných částic spalovacími motory.

Rešeršní část byla zaměřena na rozbor pevných částic, kde byly pevné částice charakterizovány z hlediska mechanismu jejich vzniku, z pohledu složení, velikosti, tvaru, skupenství a vlivů na lidské zdraví. Dále byla tato část práce věnována měřicím přístrojům pro analýzu pevných částic ze spalovacích motorů, metodám omezování emisí pevných částic a metodám měření emisí pevných částic při homologačních i kontrolních měřeních.

Praktická část práce byla věnována porovnávacímu měření čtyř přístrojů (Testo NanoMet3, TSI EEPS 3090, Palas UF-CPC 200, Dekati ePNC) pro analýzu pevných částic emitovaných spalovacími motory. Experiment byl prováděn v laboratorních podmínkách na válcové zkušebně Technické fakulty, na vozidle Škoda Octavia druhé generace s motorizací 1.9 TDI, které bylo vyrobeno bez vybavení filtrem pevných částic. Měření probíhalo při standardizovaném homologačním cyklu WLTC třídy 3b, který zahrnuje potřebné ustálené i přechodové stavy pro porovnání měřicích přístrojů. Naměřená data ze všech čtyř přístrojů byla časově synchronizována, byly experimentálně stanoveny ředící poměry pro přístroje napojené přes ředící odběrné zařízení výfukových plynů a z měřicího cyklu byly zvoleny vhodné stavy volnoběhu a akcelerace, při kterých byly přístroje vzájemně porovnány.

Přenosný měřicí systém emisí (PEMS) Testo NanoMet3, který si automaticky nastavuje ředící poměr, a který jako jediný nebyl připojený přes ředící zařízení, byl při vyhodnocení brán jako etalon, ke kterému byla vztažena množství částic naměřená ostatními třemi přístroji.

V ustálených stavech byly průměrné i celkové hodnoty naměřené pomocí TSI EEPS 3090 na úrovni etalonu, maximální hodnota činila 72 %. U kondenzačního čítače částic Palas UF-CPC 200 byly průměrné a celkové hodnoty o 11 % nižší než počty částic detekované etalonem a maximum činilo 59 procent. Přístroj Dekati ePNC detekoval v případech, kdy bylo vozidlo provozováno při volnoběžných otáčkách, průměrně i celkově o 16 % více částic než Testo NanoMet3 a v největší špičce dokonce zaznamenal maximum vyšší o 22 procent.

Při vyhodnocování dat z akcelerací bylo zjištěno, že nejnižší průměrnou, maximální i celkovou hodnotu počtu pevných částic ve výfukových plynech naměřil přístroj Palas UF-CPC 200. Průměrná a celková hodnota se od etalonu odlišuje o 21, resp. 23 % a maximální

dokonce o 55 %. Za tímto přístrojem následoval TSI EEPS 3090, který je průměrnou a celkovou hodnotou přibližně na 90 procentech hodnot Testo NanoMet3, ale nejvyšší detekovaná hodnota při akceleracích je oproti němu o 39 % nižší. Maximální koncentraci pevných částic naměřil vyšší než etalon analyzátor Dekati ePNC, a to o 38 procent, průměrná a sumární hodnota však byly cca o 7 % nižší.

Relativní rozdíly mezi přístroji při vyhodnocení celého měřicího cyklu kopírovaly trend nastavený údaji z ustálených a přechodových stavů. Jako nejcitlivější se opět projevil čítač částic Dekati ePNC, který vykazoval velkou citlivost navzdory připojení přes ředicí odběrné zařízení. Oba zbývající analyzátory, které byly rovněž napojeny na ředicí zařízení, nedokázaly detekovat tak velké množství částic a zejména jejich maxima byla velice vzdálena od maximálních hodnot naměřených přístrojem Testo NanoMet3. U TSI EEPS 3090 činila nejvyšší detekovaná hodnota $1,64 \cdot 10^8$ částic v 1 cm^3 výfukových plynů a u kondenzačního čítače částic Palas UF-CPC 200 $1,16 \cdot 10^8$ částic $\cdot\text{cm}^3$, což je oproti etalonu relativní rozdíl 40, resp. 58 % a ve srovnání s čítačem částic Dekati ePNC ještě o 6 procent více.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] HROMÁDKO, Jan; HÖNIG, Vladimír a MILER, Petr. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [2] *Electric Vehicle Outlook 2023*. Online. In: . Dostupné z: https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/2431510_BNEFElectricVehicleOutlook2023_ExecSummary.pdf. [cit. 2023-10-15].
- [3] *Co vlastně stanovuje nová emisní norma Euro 7? Tady je to nejdůležitější*. Online. Dostupné z: <https://www.auto.cz/co-vlastne-stanovuje-nova-emisni-norma-euro-7-tady-je-to-nejdulezitejsi-150120>. [cit. 2023-10-15].
- [4] *Emisní norma EURO 7 bude výrazně přijatelnější, než navrhovala Evropská komise*. Online. MDČR. Dostupné z: <https://mdcr.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Uspech-ceskeho-vyjednavani-Emisni-norma-EURO-7-bu>. [cit. 2023-10-14].
- [5] EASTWOOD, Peter. *Particulate emissions from vehicles*. Wiley-professional engineering publishing series. Chichester: Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-72455-2.
- [6] *Složení atmosférického vzduchu*. Online. TZBinfo.cz. Dostupné z: <https://www.tzbinfo.cz/tabulky-a-vypocty/74-slozeni-atmosferickeho-vzduchu>. [cit. 2023-10-20].
- [7] *Škoda Auto Zpráva o trvale udržitelném rozvoji 2005/2006*. Online. In: Škoda Auto. 2006. Dostupné z: http://www.mta4cars.cz/stahuj/filter_dpf_cze.pdf. [cit. 2023-11-18].
- [8] PETROVIČ, Velimir; JANKOVIČ, Slobodan; TOMIČ, Miroslav; JOVANOVIČ, Zoran a KNEŽEVIČ, Dragan. THE POSSIBILITIES FOR MEASUREMENT AND CHARACTERIZATION OF DIESEL ENGINE FINE PARTICLES – A REVIEW. Online. *Thermal Science*. 2015, roč. 4, č. 15. Dostupné z: <https://doi.org/10.2298/TSCI110509092P>. [cit. 2024-01-17].
- [9] *Kvalita vzduchu v uzavřených místnostech - 5. Co jsou PM částice?* Online. VOJÁČEK, Antonín. *Automatizace.hw.cz*. 2019. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/kvalita-vzduchu-v-uzavrenych-mistnostech-5-co-jsou-pm-castice.html>. [cit. 2023-11-18].
- [10] DANIEL, Vincent. Airborne particulate matter and their health effects. Online. *Encyclopedia of the Environment*. 2019. [cit. 2023-11-19].

- [11] GIECHASKIEL, Barouch; MARICQ, Matti; NTZIACHRISTOS, Leonidas; DARDIOTIS, Christos; WANG, Xiaoliang et al. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. Online. *Journal of Aerosol Science*. 2014, č. 67. [cit. 2024-01-17].
- [12] VISKUP, Richard. Comparison of Different Techniques for Measurement of Soot and Particulate Matter Emissions from Diesel Engine. Online. 2020. ISSN edsair. [cit. 2024-02-27].
- [13] COE, Hugh; BOWER, Keith a ALLAN, James. Quantitative sampling using an Aerodyne aerosol mass spectrometer 1. Techniques of data interpretation and error analysis. Online. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003, roč. 108. ISSN 01480227. [cit. 2024-03-01].
- [14] WEBER, Konradin; SINGH, Upendra N.; PAPPALARDO, Gelsomina; VOGEL, Andreas; FISCHER, Christian et al. Airborne measurements of the Eyjafjallajökull volcanic ash plume over northwestern Germany with a light aircraft and an optical particle counter: first results. Online. S. 78320P-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.869629>. [cit. 2024-03-01].
- [15] *Paul Scherrer Institute – Aethalometer*. Online. Paul Scherrer Institute. Dostupné z: <https://www.psi.ch/en/lac/aethalometer>. [cit. 2024-03-01].
- [16] *Princip funkce aethalometru*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.aerosolmageesci.com/products/aethalometer-ae36/>. [cit. 2024-03-01].
- [17] AXMANN, H.; EICHBERGER, B. a BERGMANN, Alexander. Determination of NOX and Soot Concentrations Using a Multi-wavelength Opacimeter. Online. 2016. ISBN 9783319473215. ISSN edsair. [cit. 2024-03-02].
- [18] TELKO, M. J. a HICKEY, A. J. Dry powder inhaler formulation. Online. *Respiratory care*. 2005, roč. 50, č. 9, s. 1209-27. ISSN 00201324. [cit. 2024-03-02].
- [19] KIM, Taesung; DOO, Seok-gwang; PARK, Jin-hwan; WOO, Daekwang a KIM, Kwangsu. Formation of Silicon Nanoparticles Using SiH₄ Pyrolysis at Atmospheric and Low-Pressure. Online. *Journal of the Korean Physical Society*. 2009, roč. 54, s. 1021-1026. ISSN 03744884. [cit. 2024-03-02].
- [20] *Zákon č. 432/2022 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 56/2001 Sb., o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích a o změně zákona č. 168/1999 Sb., o*

pojištění odpovědnosti za škodu způsobenou provozem vozidla a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o pojištění odpovědnosti z provozu vozidla), ve znění zákona č. 307/1999 Sb., ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. Online. In: *Zákony pro lidi.* 2022. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/print/cs/2022-432/zneni-20240101.htm?sil=1>. [cit. 2024-03-04].

[21] *Zákon č. 56/2001 Sb. Zákon o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích.* Online. In: *Zákony pro lidi.* 2001. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/print/cs/2001-56/zneni-20240101.htm?sil=1>. [cit. 2024-03-04].

[22] *Vyhláška č. 211/2018 Sb. Vyhláška o technických prohlídkách vozidel.* Online. In: *Zákony pro lidi.* 2018. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/print/cs/2018-211/zneni-20240101.htm?sil=1>. [cit. 2024-03-04].

[23] *Požadavky na přístroje pro měření emisí výfukových plynů vozidel se zážehovými motory i vznětovými motory ve stanicích měření emisí (SME), ve stanicích technických kontrol (STK) a při technických silničních kontrolách (TSK).* Online. In: Ministerstvo dopravy ČR. 2020. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Ministerstvo/Vestniky-dopravy/Vestniky-dopravy-2020/Vestnik-dopravy-1-2020/Pozadavky-na-pristroje-2020.pdf>. [cit. 2024-03-04].

[24] *Přístroj pro měření emisí ACTIGAS 605 (CZ).* Online. Univer.cz. Dostupné z: <https://www.univer.cz/pristroj-pro-mereni-emisi-actigas-605-cz-id6321>. [cit. 2024-03-04].

[25] *Mobilní stojan vybavený ACTIBOX PC.* Online. In: . Dostupné z: https://www.univer.cz/obrazek.php?image=actia_actigas605.jpg. [cit. 2024-03-04].

[26] *Modul kouřoměru AT605ANG.* Online. In: . Dostupné z: https://www.univer.cz/obrazek.php?image=actia_at605.jpg. [cit. 2024-03-04].

[27] THOMPSON, David S.; LARAMEE, Robert S.; JANKUN-KELLY, Monika; CHEN, Guoning a ZHANG, Eugene. Bringing Topology-Based Flow Visualization to the Application Domain. Online. *Topology-Based Methods in Visualization II.* 2009. [cit. 2023-11-21].

- [28] MOHANKUMAR, S. a SENTHILKUMAR, P. Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, č. 80, s. 1227–1238. [cit. 2023-11-19].
- [29] PAJDOWSKI, P. a PUCHAŁKA, B. The Process of Diesel Particulate Filter Regeneration under Real Driving Conditions. Online. *Earth and Environmental Science*. 2019, č. 214. [cit. 2023-11-21].
- [30] *DPF filtr*. Online. In: Autodily-pro.cz. Dostupné z: <https://www.autodilypro.cz/files/blog/DPF-filter.png>. [cit. 2023-12-18].
- [31] *FROM NEDC TO WLTP: WHAT WILL CHANGE?* Online. WLTP facts. Dostupné z: <https://www.wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>. [cit. 2024-03-06].
- [32] *WLTP a RDE*. Online. Fiat Professional. Dostupné z: <https://www.fiatprofessional.com/cz/WLTP>. [cit. 2024-03-06].
- [33] *WLTP Facts.eu*. Online. Dostupné z: <https://www.wltpfacts.eu/>. [cit. 2024-03-06].
- [34] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2023/443. In: . 2023.
- [35] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1151. In: . 2017.
- [36] *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)*. Online. Diesel Net. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>. [cit. 2024-03-06].
- [37] *Měření emisí osobních vozidel v reálném provozu*. Online. In: TÜV SÜD. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/-/media/regions/cz/pdf-files/publikace/produktove-listy/as/tuvsud-fotostory-mereni-emise-rde-a3.pdf>. [cit. 2024-03-07].
- [38] Metodický postup měření emisí vozidel ve stanicích měření emisí (SME), ve stanicích technických kontrol (STK) a při provádění technických silničních kontrol (TSK). In: . 2019.
- [39] *Kontrolka MIL*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.autojournal.cz/wp-content/uploads/2017/09/Katalyz%C3%A1tor.jpg>. [cit. 2024-01-20].
- [40] *Fotografie stanice měření emisí*. Online. In: . Dostupné z: https://auto-dubina.cz/wp-content/uploads/2020/10/Mereni-Emisi_Auto_Dubina.jpg. [cit. 2024-03-01].
- [41] *Přenosný měřicí systém emisí (PEMS) pro čítání a klasifikaci nanočástic Testo NanoMet3*. Online. In: Testo.cz. Dostupné z: <https://castice.testo.cz/Technicka-data/Prospekt-nanomet3.pdf>. [cit. 2024-03-20].

- [42] *Testo NanoMet3*. Online. In: . Dostupné z: https://cleanaireurope.com/wp-content/uploads/2020/05/testo-NanoMet3-front-open_master-1-1024x682.jpg. [cit. 2024-03-20].
- [43] *UF-CPC 200*. Online. Palas. Dostupné z: <https://www.palas.de/en/product/ufcpc200?save=accept>. [cit. 2024-03-20].
- [44] *Palas UF-CPC 200*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.palas.de/file/cE7490/image/png/UF-CPC+System.png>. [cit. 2024-03-20].
- [45] *Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer Model 3090*. Online. In: TSI. Dostupné z: https://tsi.com/getmedia/a01ec52e-f39f-4312-8f9a-fded71631a69/3090_Engine_Exhaust_Particle_Sizer_A4_2980351_WEB?ext=.pdf. [cit. 2024-03-20].
- [46] *TSI EEPS 3090*. Online. In: . Dostupné z: https://tsi.com/getmetafile/e550817b-bf58-4cad-9565-98d6efa1bbec/3090_01. [cit. 2024-03-20].
- [47] *Dekati ePNC*. Online. In: Dekati. Dostupné z: https://dekatitechnologies.com/wp-content/uploads/dekati_technologies_epnc_eng_brochure.pdf. [cit. 2024-03-20].
- [48] *Dekati ePNC*. Online. In: Dekati. Dostupné z: https://dekatitechnologies.com/wp-content/uploads/dekati_epnc_2023_web.jpg. [cit. 2024-03-20].
- [49] *Válcová zkusebna*. Online. TF ČZU. Dostupné z: <https://katedry.czu.cz/kvvpd/uvod/laboratore-katedry/vyukova-hala-m10-iv/valcova-zkusebna>. [cit. 2024-03-21].

Seznam obrázků

Obrázek 1: Složení výfukových plynů zážehového motoru [1]	6
Obrázek 2: Složení výfukových plynů vznětového motoru [1]	6
Obrázek 3: Schématické znázornění pevné částice [7].....	8
Obrázek 4: Procentuální složení pevných částic motoru Euro IV [8]	8
Obrázek 5: Snímek pevné částice ze vznětového motoru z elektronového mikroskopu [7] .	9
Obrázek 6: Tvorba a růst pevných částic [5]	10
Obrázek 7: Názorná představa velikosti pevných částic [9].....	11
Obrázek 8: Pronikání částic různých velikostí do lidského organismu [10]	12
Obrázek 9: Schéma přístroje pro hmotnostní spektrometrii aerosolů [13].....	17
Obrázek 10: Princip optického čítače částic [14]	18
Obrázek 11: Princip funkce aethalometru [16].....	20
Obrázek 12: Princip funkce foto-akustického snímače sazí [12]	21
Obrázek 13: Schéma laserem indukované inkandescence [12].....	22
Obrázek 14: Schéma opacimetru [12]	23
Obrázek 15: Barevná simulace správné rychlosti částic v měřicí trubici opacimetru [17] .	23
Obrázek 16: Princip oscilační mikrobalance s kuželovým prvkem [5]	24
Obrázek 17: Schéma elektrického nízkotlakého impaktoru [18].....	26
Obrázek 18: Schéma spektrometru diferenciální pohyblivosti [12]	27
Obrázek 19: Schéma skenovacího mobilního třídiče částic [19].....	27
Obrázek 20: Mobilní stojan vybavený ACTIBOX PC stanice ACTIGAS 605 [25].....	30
Obrázek 21: Modul kouřoměru AT605ANG stanice ACTIGAS 605 [26]	30
Obrázek 22: Schéma tečné rotace ve spalovacím prostoru [27].....	31
Obrázek 23: Princip funkce filtru pevných částic [7]	33
Obrázek 24: Filtr pevných částic [30].....	34
Obrázek 25: Cyklus WLTC pro třídu 3b [36].....	36
Obrázek 26: Vozidlo při zkoušce RDE s namontovaným měřicím modulem PEMS [37]..	37
Obrázek 27: Standardizovaná podoba MIL [39]	39
Obrázek 28: Fotografie stanice měření emisí [40].....	40
Obrázek 29: Přístroj pro čítání a klasifikaci částic Testo NanoMet3 [42].....	44
Obrázek 30: Kondenzační čítač částic Palas UF-CPC 200 [44].....	45
Obrázek 31: Třídič částic TSI EEPS 3090 [46].....	46

Obrázek 32: Čítač částic Dekati ePNC [48].....	47
Obrázek 33: Analyzátory částic použité při měření [zdroj: vlastní]	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnutí základních metod zkoumání pevných částic [11]	13
Tabulka 2: Požadavky na přesnost měření a rozlišitelnost výstupních hodnot kouřoměru [23]	29
Tabulka 3: Porovnání homologačních cyklů NEDC a WLTP [31]	35
Tabulka 4: Parametry testovaného vozidla Škoda Octavia II.....	42
Tabulka 5: Parametry přístroje Testo NanoMet3 [41].....	43
Tabulka 6: Parametry čítače částic Palas UF-CPC 200 [43]	44
Tabulka 7: Parametry třídiče částic TSI EEPS 3090 [45]	45
Tabulka 8: Parametry čítače částic Dekati ePNC [47]	46
Tabulka 9: Experimentálně zjištěné ředící poměry	50
Tabulka 10: Naměřený počet částic při ustáleném stavu 1	51
Tabulka 11: Naměřený počet částic při ustáleném stavu 2.....	52
Tabulka 12: Naměřený počet částic při ustáleném stavu 3.....	53
Tabulka 13: Naměřené počty částic při třech analyzovaných volnoběžích.....	54
Tabulka 14: Naměřený počet částic při akceleraci 1	56
Tabulka 15: Naměřený počet částic při akceleraci 2	57
Tabulka 16: Naměřený počet částic při akceleraci 3	58
Tabulka 17: Naměřené počty částic při třech analyzovaných akceleracích	59
Tabulka 18: Naměřený počet částic při celém měřicím cyklu.....	60