



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



ANALÝZA NEJISTOT EMISNÍCH TESTŮ NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Jan Fliegel**
Vedoucí práce: doc. Ing. Lubomír Moc, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

ANALYSIS OF UNCERTAINTY OF EMISSION MEASUREMENTS ON A CHASSIS DYNAMOMETER

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machine and Equipment Design
Author: **Bc. Jan Fliegel**
Supervisor: doc. Ing. Lubomír Moc, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Bc. Jan F L I E G E L
studijní program	N2301 Strojní inženýrství
obor	2302T010 Konstrukce strojů a zařízení
zaměření	Pístové spalovací motory

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

ANALÝZA NEJISTOT EMISNÍCH TESTŮ NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

- 1) V rešeršní části práce popište emisní testy osobních automobilů a porovnejte jednotlivé testy z hlediska měřicího zařízení a metodiky testu.
- 2) Analyzujte faktory, které ovlivňují nejistotu emisního testu na vozidlovém dynamometru, navrhňte postupy k určení jednotlivých faktorů a uveďte postup výpočtu celkové nejistoty pro emisní test.
- 3) Navržený postup výpočtu nejistot ověřte na souboru výsledků z dostupných emisních testů ze zkušebních laboratoří.
- 4) Při řešení diplomové práce spolupracujte se zkušební laboratoří Škoda Auto.



Forma zpracování diplomové práce:

Průvodní zpráva: cca 50 stran textu a příloh, návrh programu výpočtů nejistot pro vybrané faktory, zpracování a analýza souboru emisních testů.

Průvodní zpráva a přílohy budou odevzdány na CD nosiči.

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- 1) Takáts, M: Měření emisí spalovacích motorů. Skripta ČVUT, Praha, 1997
- 2) Výsledky emisních testů zkušebních laboratoří.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Lubomír Moc, CSc. - TU v Liberci, KVM

Konzultant diplomové práce:

Ing. František Plát, Ph.D. – Škoda Auto a. s.

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

vedoucí katedry



doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.

děkan

V Liberci dne 21. 1. 2014

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování:

Děkuji Doc. Ing. Lubomíru Mocovi, CSc. a Ing. Františku Plátovi, Ph.D. za jejich podnětné a cenné rady, které mi pomohly při řešení mé diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval pracovníkům laboratoře měření emisí za poskytnutí informací o řešení dané problematiky a poskytnutí podkladů z databáze výsledků emisních testů a všech potřebných technických podkladů.

ANALÝZA NEJISTOT EMISNÍCH TESTŮ NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU

Vypracoval: Jan Fliegel

Vedoucí DP: Doc. Ing. Moc Lubomír, CSc.

Konzultant: Ing. Plát František, Ph.D

Rok: 2014

ANALÝZA NEJISTOT EMISNÍCH TESTŮ NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU

RESUMÉ

Tato diplomová práce se věnuje problematice legislativou předepsaných emisních testů osobních automobilů. Emisní test představuje řetězec několika dílčích procesů, které jsou ovlivněny řadou vnějších faktorů. Předpis vymezuje intervaly přípustných hodnot většiny veličin či faktorů ovlivňujících výsledky emisních testů (teplota, vlhkost, kalibrace dynamometru, CVS, analyzátorů, tolerance odchylek od jízdní křivky etc.). Díky moderní technice je ale dnes možné podstatně snížit variabilitu ovlivňujících veličin, a tím snížit celkovou nejistotu měření emisí. Cílem této diplomové práce je provést kvantitativní zhodnocení vlivu jednotlivých faktorů na výsledky emisních testů, stanovit celkovou nejistotu měření emisí a identifikovat dominantní vlivy podílející se na výsledné nejistotě.

ANALYSIS OF UNCERTAINTY OF EMISSION MEASUREMENTS ON A CHASSIS DYNAMOMETER

SUMMARY

This master thesis deals with legislatively required emission tests of passenger cars. An emission test is consisted of several processes that are influenced by lots of factors. The legislation limits values for most of quantities and factors that influence the emission tests results (temperature, humidity, calibration of dynamometer, CVS, analysers, tolerated deviations from driving curve etc). Currently, it is possible to fulfil stricter requirements for influence quantities variability resulting to lower total uncertainty of emission measurements. The aim of this thesis is to evaluate the influence of individual factors to emission tests, to calculate total uncertainty of emission measurement and to identify main effects contributing to the uncertainty.

1.	ÚVOD	5
2.	EMISE SPALOVACÍCH MOTORŮ.....	6
2.1	SLOŽKY EMISÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ	6
3.	PŘEHLED EMISNÍCH TESTŮ	8
3.1	EVROPSKÝ SYSTÉM EMISNÍ LEGISLATIVY	9
3.1.1	<i>Evropské emisní normy</i>	<i>9</i>
3.1.2	<i>Evropský jízdní cyklus</i>	<i>11</i>
3.2	AMERICKÝ SYSTÉM EMISNÍ LEGISLATIVY	12
3.2.1	<i>Americký jízdní cyklus</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Americké emisní normy</i>	<i>13</i>
3.3	JAPONSKÝ SYSTÉM EMISNÍ LEGISLATIVY	16
4.	MĚŘENÍ EMISÍ.....	18
4.1	SILNIČNÍ MODEL	19
4.2	OHŘEV VOZU A KALIBRACE DYNAMOMETRU	19
4.3	PRE-TEST	20
4.4	EMISNÍ TEST	21
4.4.1	<i>Výpočet hmotnosti složky výfukového plynu.....</i>	<i>22</i>
4.4.2	<i>Korekce koncentrace znečišťující látky</i>	<i>22</i>
4.4.3	<i>Výpočet faktoru ředění</i>	<i>22</i>
4.5	VERIFIKACE SILNIČNÍHO MODELU (DOBĚHY)	23
5.	NEJISTOTA MĚŘENÍ	25
5.1	ZDROJE NEJISTOT MĚŘENÍ.....	25
5.2	PŘÍMÉ A NEPŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ.....	26
5.3	METODY VYHODNOCOVÁNÍ NEJISTOT	26
5.3.1	<i>Standardní nejistoty stanovené metodou typu A.....</i>	<i>26</i>
5.3.2	<i>Standardní nejistoty stanovené metodou typu B.....</i>	<i>29</i>
5.3.3	<i>Kombinovaná standardní nejistota.....</i>	<i>30</i>
5.3.4	<i>Rozšířená standardní nejistota U</i>	<i>31</i>
6.	NEJISTOTA MĚŘENÍ CO₂.....	33
6.1	VÝPOČET A STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ CO ₂ METODOU TYPU A	33

6.2	VÝPOČET A STANOVENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ CO ₂ METODOU TYPU B.....	33
6.2.1	<i>Nejistota měření emisí způsobená laboratorním zařízením.....</i>	34
6.2.2	<i>Vliv přípravy měření.....</i>	37
6.2.3	<i>Celková nejistota získaná metodou typu B</i>	51
6.3	KOMBINOVANÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ EMISÍ	53
6.4	ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ EMISÍ	53
6.5	OVĚŘENÍ VÝSLEDKU NA SOUBORU EMISNÍCH TESTŮ.....	53
6.6	RELATIVNÍ POROVNÁNÍ ZDROJŮ NEJISTOT	56
7.	ZÁVĚR	60
8.	CITOVANÁ LITERATURA	61
9.	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	63
10.	SEZNAM PŘÍLOH	67

1. Úvod

V současné době je kladen stále větší důraz na snížení množství všech škodlivých látek produkovaných lidskou činností. Rostoucí potřeba mobility způsobuje růst zátěže životního prostředí. Automobilová doprava přispívá významným podílem k celkovému množství škodlivin produkovaných dopravou. Tato skutečnost se odráží i v legislativě většiny států, a dochází tak k postupnému zpřísnování emisních limitů. Konstrukteři jsou nuceni ke zlepšování konstrukce pístových spalovacích motorů, případně k aplikaci technologií, které snižují množství škodlivých látek ve výfukových plynech automobilů. Stejně tak se legislativně zpřísnují nároky na kvalitu složení paliv, což také přispívá ke snížení produkce škodlivých emisí. Stále nižší obsah škodlivých složek ve výfukových plynech dále vede k nutnosti použití přesnějších způsobů měření a striktnějšímu definování podmínek emisních testů osobních i nákladních automobilů.

Každé měření s sebou nese větší či menší nepřesnosti způsobené různými vlivy. Cílem každého měřicího technika by mělo být tyto vlivy eliminovat na co možná nejmenší možnou míru. Je bohužel realitou, že není možné se chybám vzniklým v průběhu měření plně vyhnout. Podmínkou každého správně provedeného měření je tedy zmapovat a popsat jeho nejistotu. Tuto hodnotu je pak nutné řádně uvádět k výsledku pro jeho jednoznačnou definici.

Cílem této diplomové práce je analýza faktorů, které ovlivňují nejistoty měření emisí, návrh postupů k určení nejistot jednotlivých vybraných faktorů a postup pro výpočet celkové nejistoty. Dále pak relativní porovnání jednotlivých zdrojů nejistot z hlediska jejich významnosti a případné návrhy, jak eliminovat či omezit určité zdroje nejistot.

V teoretické části této diplomové práce budou popsány hlavní škodlivé látky produkované spalovacími motory, dále pak legislativní rámec zabývající se emisní problematikou v různých regionech světa. Detailněji pak bude popsána metodika emisních testů definovaná Evropskou komisí. Dále je důležité uvedení teorie výpočtu a určování nejistot měření dle doporučení skupiny mezinárodních organizací působících v oblastech metrologie, normalizace a užití chemie, medicíny či fyziky.

V praktické části bude podrobně diskutován celý řetězec dílčích dějů, z nichž se skládá emisní test (dle metodiky EU), z hlediska nejistoty, kterou jednotlivé děje ovlivňují celkový výsledek měření emisí. Na základě databáze výsledků emisních testů, technické dokumentace používaných přístrojů, cíleně provedených experimentů a zkušeností pracovníků Emisní laboratoře budou vyhodnoceny či odhadnuty nejistoty jednotlivých faktorů ovlivňujících výsledek emisního testu. Z těchto dílčích nejistot je možné vypočítat celkovou nejistotu měřicího procesu.

2. Emise spalovacích motorů

V této kapitole se budu zjednodušeně zabývat popisem základních škodlivin obsažených ve výfukových plynech a jejich vlivem na lidské zdraví a životní prostředí. Představím také rozdíl mezi složkami zážehového a vznětového motoru.

2.1 Složky emisí spalovacích motorů

Oxid uhelnatý CO

Tento pro organismus jedovatý plyn vzniká při nedokonalém spalování. S krevním barvivem vytváří oxid uhelnatý velmi pevný karboxyhemoglobin, který omezuje přenos kyslíku z plic do krevního oběhu. Tím jsou jednotlivé orgány poškozovány nedostatkem kyslíku, i když by tento byl obsažen ve vdechovaném vzduchu v dostatečném množství. Oxid uhelnatý se dále podílí na vzniku fotochemického (letního) smogu [1].

Oxid uhličitý CO₂

Společně s vodou (H₂O) se jedná o produkt dokonalé oxidace. Je to bezbarvý plyn, bez zápachu, velmi stabilní a málo reaktivní. Škodlivě působí na lidský organismus, až když jeho koncentrace ve vdechovaném vzduchu začne vytěšňovat kyslík. Oxid uhličitý patří mezi tzv. skleníkové plyny, které způsobují vznik radiační clony, omezující sdílení tepla země s okolím [2].

Oxidy dusíku NO_x

Oxidy dusíku vznikají ve spalovacím prostoru při vysokých teplotách a tlacích oxidací atmosférického dusíku. Dusík (N₂) je obsažen ve výfukových plynech ve vysoké koncentraci, neboť je přítomen v nasávaném vzduchu, jedná se ale o inertní plyn bez škodlivých účinků. Označením NO_x se obvykle rozumí oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂). Přímá škodlivost NO na živý organismus je vcelku nízká. Při delší době působení v atmosféře dochází k jeho oxidaci na oxid dusičitý, jehož škodlivost je klasifikována jako závažnější. Při vdechování se na stěnách sliznice tvoří kyselina dusičná (HNO₃). Dýchací soustava reaguje na vdechování HNO₃ jako na začínající hoření a automaticky přivírá přístup vzduchu do plic. Důsledkem toho je pocit dušení a nucení ke kašli. Tento nežádoucí jev nastává již při velmi nízkých koncentracích, resp. při krátkých expozičních dobách. Oxidy dusíku se významně podílejí na tvorbě letního smogu. Spolupodílejí se též na tvorbě kyselých dešťů [1].

Nespálené uhlovodíky HC

Při velmi nepříznivých podmínkách pro oxidaci paliva obsahuje výfukový plyn nespálené uhlovodíky (obvykle souhrnně označovány jako THC – total hydrocarbons), mezi které patří:

PARAFINY - látky prakticky bez zápachu, ale s narkotickým působením a slabě dráždivé pokožku,

OLEFINY, ACETYLENY - látky s nevýrazně nasládlou vůní, které slabě dráždí pokožku. Značně se podílejí na tvorbě smogu,

AROMATICKÉ UHLOVODÍKY - (např. benzyren 3,4) látky s charakteristickým zápachem a narkotickým působením, známé jako nervové jedy s rakovinotvorným působením,

ČÁSTEČNĚ SPÁLENÉ UHLOVODÍKY, jako aldehydy (např. formaldehyd C_nH_mCOH), ketony apod. – látky, které i v malé koncentraci dráždí oči, nos a poznají se podle zápachu [1].

Pevné částice PM

Pevné částice najdeme ve větší míře u vznětových motorů. Obsahují z velké části (až 75 %) primární uhlík. Zbytek pak tvoří sulfáty, dusík, voda a neidentifikovatelné složky. Konkrétní složení a množství jednotlivých částí značně závisí na typu motoru a samozřejmě na jeho technickém stavu a stáří. Jádrem těchto částic tvoří uhlík a popel. Zbylé částice se na jádro „nabalí“ během cesty z válce přes výfuk do ovzduší. Problém nastává především při dlouhodobějším pobytu v prostředí s vysokým obsahem PM. Krátká expozice vyvolá podráždění očí, jícnu a průdušek, dýchací potíže nebo nutnost ke zvracení. Dlouhodobá expozice může mít rakovinotvorný efekt [2].

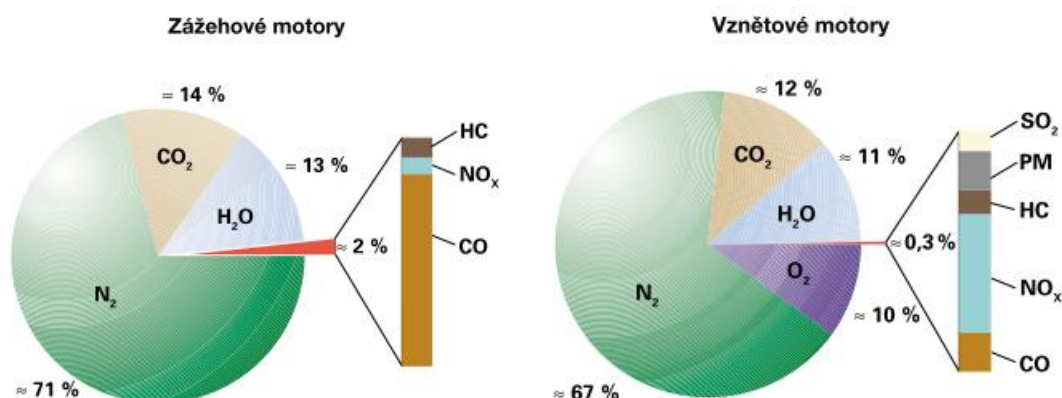
Oxidy síry SO_x

SO_2 (oxid siřičitý) je štiplavě páchnoucí, bezbarvý, nehořlavý plyn, který napadá sliznici a plíce. Podporuje vznik onemocnění dýchacích cest. SO_3 (oxid sírový) je látka, která má dráždivé účinky na dýchací orgány. Oxidy síry jsou produkovány především vznětovými motory. Podíl emisí SO_x ze spalovacích motorů je na celkové produkci zanedbatelný, protože obsah síry v motorové naftě neustále klesá [1].

Kyslík O_2

Nejedná se sice o nebezpečnou složku výfukových plynů, ale je zajímavé se o ni zmínit. Kyslík se ve výfukových plynech zážehového motoru objevuje jen tehdy, byl-li v čerstvé směsi v přebytku anebo se nevyužil z jiných důvodů. U vznětových motorů se objevuje vždy, protože vznětový motor pracuje s přebytkem vzduchu. Kyslík významně ovlivňuje reakce probíhající v katalytických konvertorech [2].

Přibližné procentuální složení surových výfukových plynů zážehového a vznětového motoru jsou zobrazeny na obr. 1.



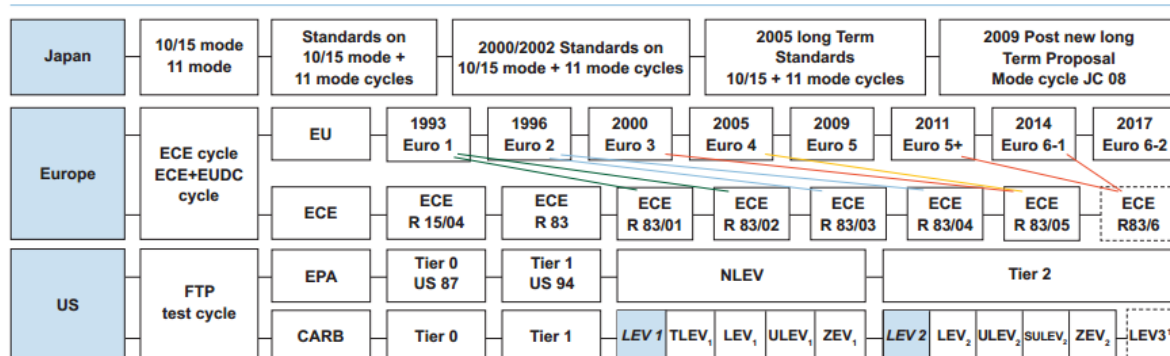
obr. 1: Procentuální složení výfukových plynů spalovacích motorů [3]

3. Přehled emisních testů

V této kapitole popíšu tři základní emisní normy, neboť patří mezi nejčastěji zastoupené a vykazují největší rozdílnosti. Hlavním sledovaným kritériem jsou limity jednotlivých složek výfukových plynů a průběh jízdního cyklu. Právě v tomto cyklu se tyto tři normy nejvíce odlišují. Zajímavým ukazatelem je také vývoj zpřísňování jednotlivých limitů.

Světovou emisní legislativu lze rozdělit na tři hlavní systémy: Evropský, Americký (USA) a Japonský. Postupné přijímání jednotlivých norem pro tyto hlavní legislativní systémy je patrné z obr. 3. Ostatní země světa většinou využívají metodiky a limity jednoho z těchto tří systémů, popřípadě je lehce modifikují či kombinují. Na obrázku 3 je uveden přehled platnosti emisních norem.

WORLDWIDE TESTING PROCEDURES AND STANDARDS

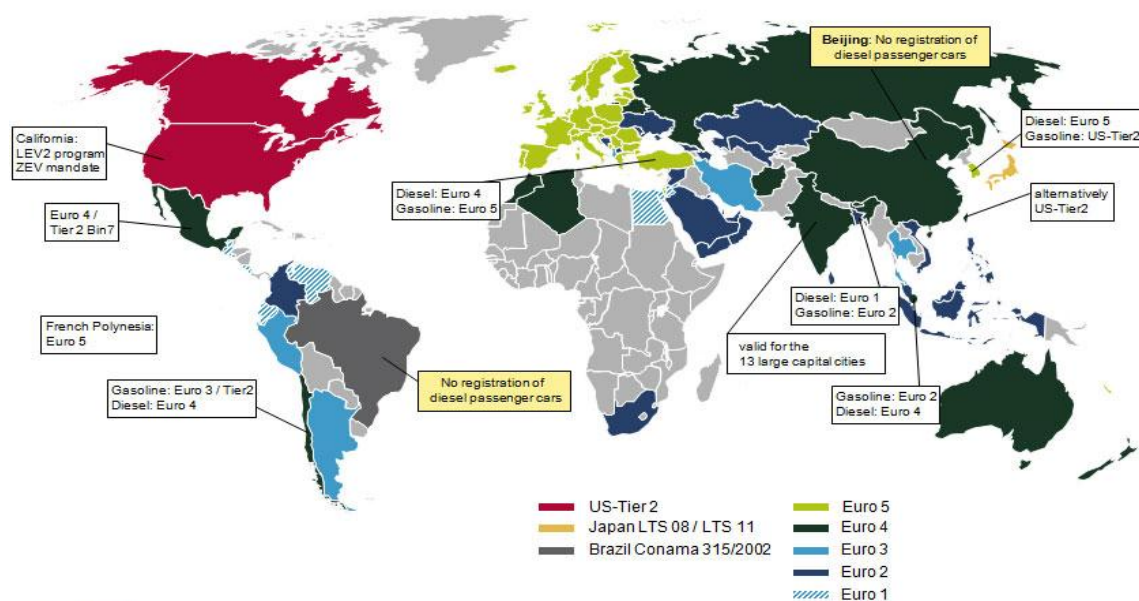


European Union countries: Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, the Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, United Kingdom.

Candidate Members: Croatia, Former Yugoslav Republic of Macedonia, Iceland, Turkey

¹⁾ proposed

obr. 2: Přehled emisních předpisů[4]



Status: January 2012

obr. 3: přehled emisních norem[4]

3.1 Evropský systém emisní legislativy

Postupně se zpřísnující evropské emisní normy jsou známy pod označením Euro1 až Euro 6. Aktuálně platná je norma Euro 5, norma Euro 6 by měla vstoupit v platnost v září 2014. Samotné předpisy, které specifikují limitované komponenty a jejich povolené množství lze nalézt pod označením EU 630/2012 (715/2007). Metodika měření včetně požadavků na měřicí techniku je pak definována legislativními předpisy EU 566/2011 (EU 692/2008) a EHK 83.07.

Zavedení nového emisního stupně Euro není jednorázová akce. Prvním krokem je nejprve zavedení nového emisního stupně pro nově registrované vozy na evropském trhu. Například pro Euro 5 byl stanoven termín 1. 9. 2009. Vozy, které jsou homologované do tohoto data, se mohou nadále vyrábět a prodávat přesto, že stupeň Euro 5 neplní. V druhém pozdějším kroku se pak nový předpis začne týkat i všech nově vyrobených vozů. Pro stupeň Euro 5 to bylo datum 1. 1. 2011. Od té doby již není možné nabízet vozy, které neplní tento emisní stupeň.

3.1.1 Evropské emisní normy

V první části této kapitoly uvádím hodnoty limitů, které jsou stanoveny pro jednotlivé emisní stupně označované souhrnně EURO. V současné době platná norma Euro 5 omezuje množství oxidu uhelnatého (CO), uhlovodíků (HC), oxidů dusíku (NO_x) a pro vznětové motory také množství pevných částic (PM). Hodnoty se uvádějí v gramech na ujetý kilometr.

Rok/norma		CO (g/km)		NO _x (g/km)		HC + NO _x (g/km)		HC (g/km)	PČ (g/km)
1992	I	3,16	3,16	-	-	1,13	1,13	-	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	0,50	0,70*	-	0,08**
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	-	0,56	0,20	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	-	0,30	0,10	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	-	0,23	0,10	0,005
2014	VI	1,00	0,50	0,06	0,08	-	0,17	0,10	0,005

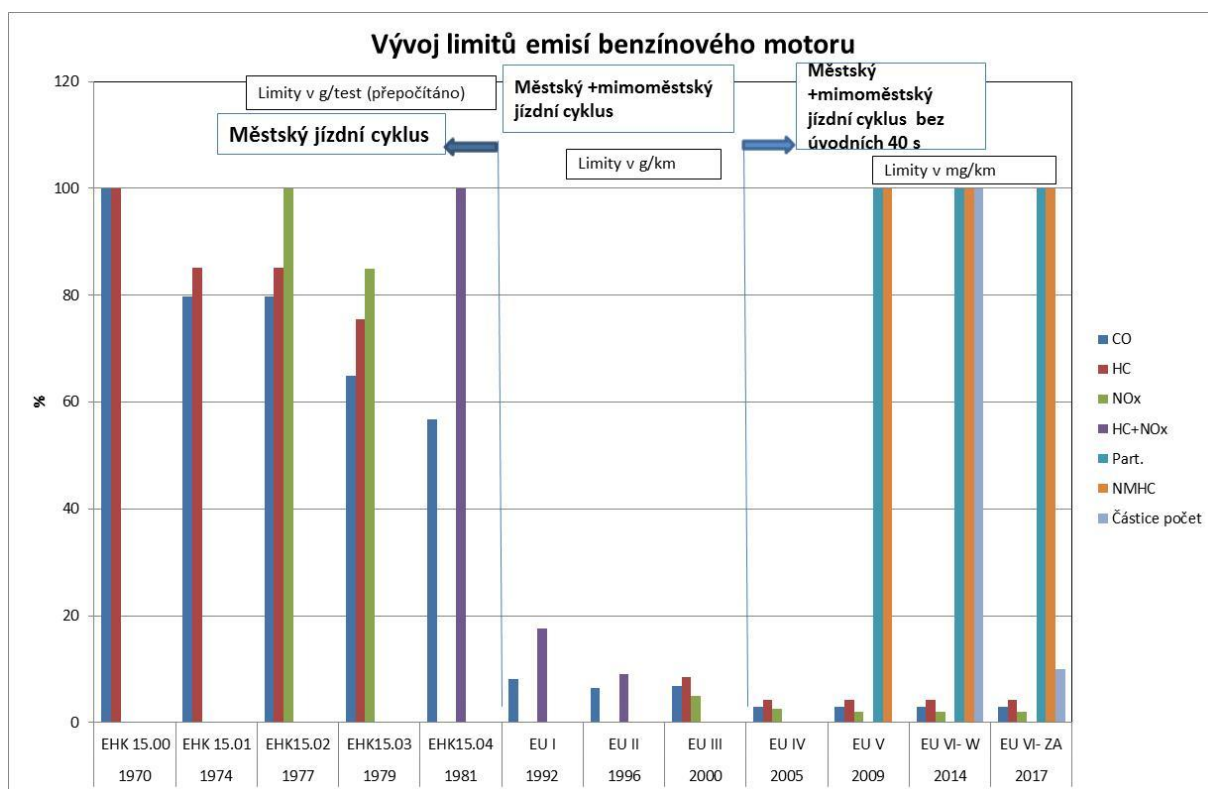
BENZÍNOVÉ MOTORY, NAFTOVÉ MOTORY

* 0,90 pro motory s přímým vstřikováním paliva

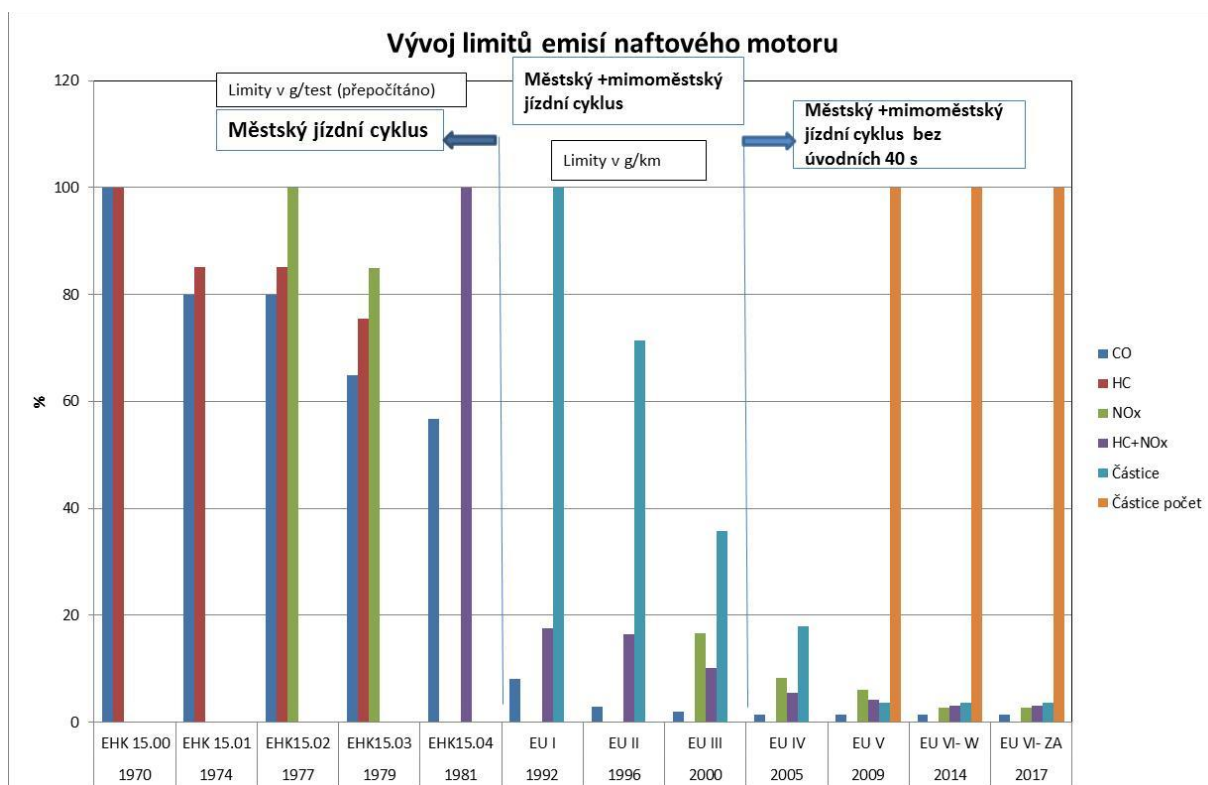
** 0,10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

Tabulka 1: Přehled emisních limitů dle norem EURO [5]

V tabulce 1 je přehledně uveden ucelený přehled limitů jednotlivých sledovaných složek. Na grafech 1 a 2 je grafické porovnání vývoje těchto limitů v čase.



graf 1: Vývoj emisí benzínového motoru [6]



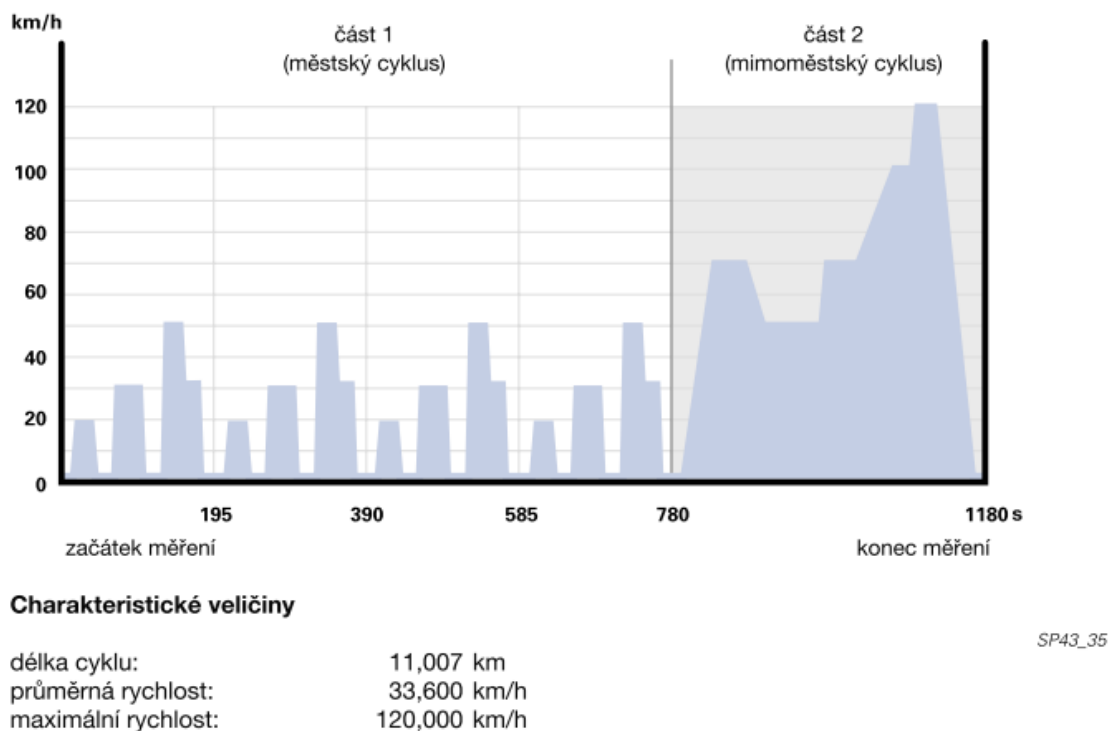
graf 2: Vývoj emisí naftového motoru [6]

Oxid uhličitý vznikající při každém spalování uhlikatých paliv nepředstavuje jedovatou látku, nicméně je znám jako jeden z tzv. skleníkových plynů, které mají významný podíl na globálním oteplování. Vzhledem k tomu, že jeho množství produkované

automobilem se spalovacím motorem je přímo úměrné spotřebě paliva, nelze ho limitovat shodným způsobem jako výše popsané škodlivé látky. Automobily s motory s vyšším obsahem by totiž nebyly schopny plnit jednotný limit CO₂. Omezení množství CO₂ vypouštěného do atmosféry osobními automobily je v Evropské unii upraveno předpisem EU 101. Limity jsou stanoveny jako flotilové, vztahují se totiž na celou produkci jednotlivého výrobce. V případě, že průměrné CO₂ flotily vozů daného výrobce překročí stanovenou mezní hodnotu, je proti tomuto výrobcí uplatňován systém pokut. Limity stanovuje ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) a v současnosti je závazná hodnota 130 g/km.

3.1.2 Evropský jízdní cyklus

Každý legislativní emisní systém musí kromě stanovení limitních hodnot pro škodlivé látky také definovat podmínky, za jakých jsou prováděna kontrolní měření emisí, neboť celá testovací metodika zásadním způsobem ovlivňuje dosažené výsledky. Jednu za základních specifikací pro emisní testy představuje tzv. jízdní cyklus, který definuje závislost rychlosti automobilu na čase. Od roku 1992, kdy vešla v platnost norma Euro 1, je v Evropské unii využíván tzv. NEDC (New European Driving Cycle, někdy též označován jako NEFZ – Neuer Europäischer Fahrzyklus či MVEG – Motor Vehicle Emission Group), který zahrnuje fázi simulující městský provoz a fázi simulující mimoměstský provoz (viz graf 3). Do roku 2005 (začátek platnosti normy Euro 4) předcházela vlastní jízdě 40s perioda ohřevu motoru bez odběru vzorku emisí. V současnosti probíhá měření včetně studeného startu – automobil se rozjede ihned po nastartování. Tato úprava metodiky měření představuje určité zpřísnění nároků, protože jsou do výsledku měření zahrnuty i výfukové plyny, které vznikají ve fázi ohřevu katalyzátoru, tedy ve fázi jeho nízké účinnosti.[3]



graf 3: Evropský jízdní cyklus [3]

3.2 Americký systém emisní legislativy

USA jsou průkopníkem v tvorbě legislativy napomáhající ke snižování škodlivin ve výfukových plynech automobilů. USA byly také první zemí, kde se v automobilech začaly aplikovat katalytické konvertory (konkrétně v Kalifornii). Přestože se často srovnávají evropské emisní limity s emisními limity používanými v USA, není jejich přímé porovnání možné. Kromě rozdílných jednotek, které by bylo možné přepočítat, se v USA provádějí emisní testy na odlišném jízdním cyklu.

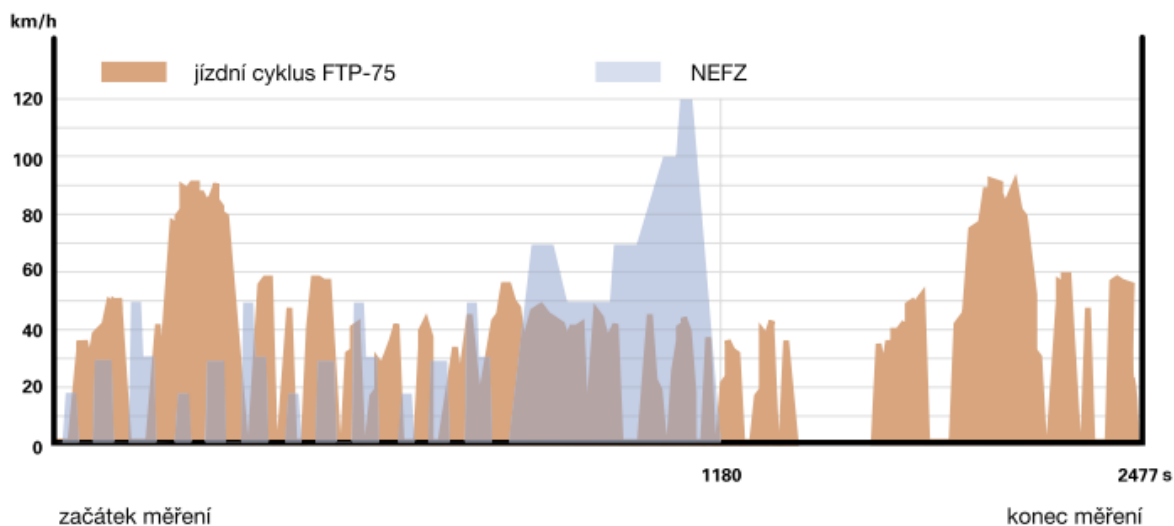
3.2.1 Americký jízdní cyklus

Americká emisní norma je další velmi důležitou normou, o které se v krátkosti zmíním. USA jako první zavedly normy pro výfukové plyny a staly se tak průkopníky v tvorbě emisních předpisů.

Americký emisní cyklus je zobrazen grafem 4. Aby byly rozdíly mezi evropským NEFZ a cyklem platným v USA FTP-75 (Federal Test Procedur) více patrné, jsou oba diagramy „položeny“ přes sebe.

Odlišnosti v těchto jízdních cyklech spočívají v:

- trvání cyklu;
- průměrné rychlosti;
- maximální rychlosti;
- rychlostních intervalech;
- rozjezdové fázi.



graf 4: Porovnání evropského a amerického jízdního cyklu [3]

3.2.2 Americké emisní normy

Spojené státy americké mají své vlastní normy. Tyto normy se dělí na normy státní a kalifornské.

3.2.2.1 Státní normy

Emisní standardy pro motory a vozidla, včetně emisních norem pro emise skleníkových plynů (GHC) jsou stanoveny v US Environmental Protection Agency (EPA). Emise reguluje úřad EPA, kvalita ovzduší je založena na *Clear Air Act*, naposledy pozměněné v roce 1990. Osobní automobily a lehká nákladní vozidla podléhají emisním normám Tier1, Tier2.[1]

Tier 1

Normy byly zveřejněny v konečné právní formě v roce 1991 a postupně zaváděny v letech 1994 a 1997. V tabulce č. 2 a v tabulce č. 3 jsem uvedl základní emisní limity pro uvedené kategorie. Jsou zde zaznamenány pouze hodnoty pro osobní automobily o hmotnosti do 8 500 lb a dané hodnoty jsou v g/mi.[1]

Kategorie	50 000 mil/5 let					
	HC	NMHC	CO	NO _i Diesel	NO _i Benzín	PM*
Osobní Automobily	0,41	0,25	3,4	1,0	0,4	0,08

Tabulka 2: Emisní limity Tier 1 [1]

Kategorie	100 000mil/10 let					
	HC	NMHC	CO	NO _i Diesel	NO _i Benzín	PM*
Osobní Automobily	-	0,31	4,2	1,25	0,6	0,10

Tabulka 3: Emisní limity Tier 1 [1]

Tier 2

Normy Tier 2 byly přijaty v roce 1999 a postupně zaváděny od roku 2004 do roku 2009. Mají přísnější hodnoty než předchozí Tier 1 a doplňují kategorii vozidel (medium-duty passenger vehicles – MDPV), která zahrnuje těžší SUV automobily a osobní dodávky o celkové hmotnosti 8 500 – 10 000 lb.[1]

Emisní normy jsou strukturovány do osmi stálých a tří dočasných úrovní různé přísnosti tzv. certifikačního koše (Certification bins). Podle Tier 2 žebříčku 1-11; je 1 nejčistší (Zero emission vehicle) a 11 nejšpinavější. Výrobci vozidel si mohou vybrat pro certifikaci vozidel z různých košů. Emise NO_x vozového parku musí splňovat průměrné hodnoty NO_x 0,07g/mi. Dočasné certifikační koše (9, 10, a 11) s mírnějšími hodnotami skončily modelovým rokem 2008. Emisní standardy pro všechny znečišťující látky (certifikační koše) jsou uvedeny v tabulce 4 a v tabulce 5. Pokud jsou použity střední doby životnosti výfukových emisí, jsou tyto normy použitelné po dobu 5 let nebo 50 000 mil podle toho, co nastane dříve. Celková životnost se liší podle druhu vozidla, na osobní vozidla „celkové životnosti“ byla doba rozšířena na 11 let nebo 120 000 mil podle toho co nastane dříve. [7]

Emisní normy Tier 2 pro osobní automobily (50 000 mil/5 let)					
Koř	Střední životnost (50 000 mil/5 let)				
	HCHO	NMHC	CO	NO _x	PM
Dočasné koře					
11b					
10a	0,015	0,125	3,4	0,4	-
9a	0,015	0,075	3,4	0,2	-
Permanentní koře					
8	0,015	0,100	3,4	0,14	-
7	0,015	0,075	3,4	0,11	-
6	0,015	0,075	3,4	0,08	-
5	0,015	0,075	3,4	0,05	-
4	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-

Tabulka 4: Emisní limity Tier 2 [7]

Emisní normy Tier 2 pro osobní automobily (120 000 mil/11 let)					
Koř	Celková životnost (120 000 mil/ 11 let)				
	HCHO	NMHC	CO	NO _x	PM
Dočasné koře					
11b	0,032	0,280	7,3	0,9	0,12
10a	0,018	0,156	4,2	0,6	0,08
9a	0,018	0,090	4,2	0,3	0,06
Permanentní koře					
8	0,018	0,125	4,2	0,20	0,02
7	0,018	0,090	4,2	0,15	0,02
6	0,018	0,090	4,2	0,10	0,01
5	0,018	0,090	4,2	0,07	0,01
4	0,011	0,070	2,1	0,04	0,01
3	0,011	0,055	2,1	0,03	0,01
2	0,004	0,010	2,1	0,02	0,01
1	0,000	0,000	0,0	0,00	0,00

Tabulka 5: Emisní limity Tier 2 [7]

3.2.2.2 Kalifornské normy

Kalifornie má jako jediný stát v USA právo mít vlastní emisní předpisy, které může i rozvíjet. Tyto předpisy jsou často přísnější než vládní standardy. Ostatní státy si mohou zvolit, zda převezmou kalifornské, nebo státní normy. Emisní předpisy motorů a vozidel jsou schvalovány úřadem California Air Resources Board (ARB), regulačním orgánem v rámci EPA. [1]

Tier 1/LEV (Low emission vehicles)

Jedná se o kalifornské emisní předpisy platné do roku 2003, jež byly rokem 2004 nahrazeny předpisy LEV II.

LEV II

Kalifornské emisní předpisy LEV II přijaté v roce 1998 přišly v platnosti pro modelový rok vozidel 2004.

LEV III

Kalifornské emisní předpisy LEV III byly přijaty v lednu 2012. Výrobci mohou certifikovat vozidla před modelovým rokem 2015. Začátkem roku 2020 musí být všechna vozidla certifikována pro LEV III. Následující Tabulka č. 6 zobrazuje emisní hodnoty pro osobní automobily LEV III, kde hodnoty jsou v g/mi. [8]

Emisní normy LEV III pro osobní automobily					
Typ vozidla	Emisní kategorie	NMOG + NO _x	CO	HCHO	PM
PC	LEV 160	0,160	4,2	0,004	0,01
LDT	ULEV 125	0,125	2,1	0,004	0,01
MDPV	ULEV 70	0,070	1,7	0,004	0,01
	ULEV 50	0,050	1,7	0,004	0,01
	SULEV 30	0,30	1,0	0,004	0,01
	SULEV 20	0,20	1,0	0,004	0,01

Tabulka 6: Emisní normy LEV III pro osobní automobily [8]

Kalifornie dále převzala předpisy od ARB zahrnující kontrolu emisí skleníkových plynů, které vešly v platnosti v roce 2006. V následující tabulce č. 7 jsou zobrazeny normy skleníkových plynů pro osobní automobily od roku 2011 do roku 2016.[9]

Emisní normy LEV III pro osobní automobily		
Rok	CO ₂ (g/mi)	Spotřeba (mpg)
2011	267	33,3
2012	233	38,2
2013	227	39,2
2014	222	40,1
2015	213	41,8
2016	205	43,4

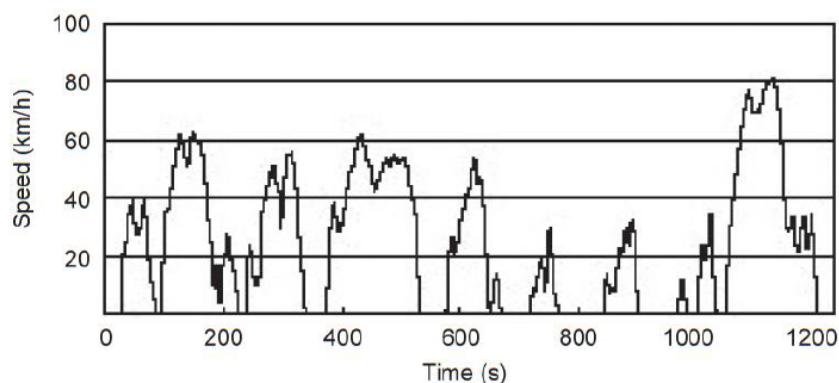
Tabulka 7: Emisní normy LEV III pro osobní automobily [9]

3.3 Japonský systém emisní legislativy

Japonsko využívá svůj vlastní systém emisní legislativy, který se odlišuje od evropského i amerického, a to jak v hodnotách limitů pro škodlivé látky, tak i v průběhu jízdního cyklu – viz graf 5 a tabulky 8 a 9.

JAPAN

NEW DRIVING CYCLE JC 08



Distance: 8.2 km Max. Speed: 80 km/h
Duration: 1205 s Average speed: 24.4 km/h

graf 5: Japonský jízdní cyklus [4]

EXHAUST EMISSION LIMIT – GASOLINE AND LPG FUELLED VEHICLES

	Test Mode ¹⁾	Unit	CO	HC	NOx	PM ²⁾	New Model	All prod. / Imported veh
New Short Term (Mean/Max)								
PC	10-15 Mode	g/km	0.67/1.27	0.08/0.17	0.08/0.17	-	Oct 2000	Sep 2002
	11 Mode	g/test	19.0/31.1	2.20/4.42	1.40/2.50	-		
Mini Com Veh	10-15 Mode	g/km	3.30/5.11	0.13/0.25	0.13/0.25	-	Oct 2002	Sep 2003
	11 Mode	g/test	38.0/58.9	3.50/6.40	2.20/3.63	-		
Light CV	10-15 Mode	g/km	0.67/1.27	0.08/0.17	0.08/0.17	-	Oct 2000	Sep 2002
	11 Mode	g/test	19.0/31.1	2.20/4.42	1.40/2.50	-		
Medium CV	10-15 Mode	g/km	2.10/3.36	0.08/0.17	0.13/0.25	-	Oct 2001	Sep 2003
	11 Mode	g/test	24.0/38.5	2.20/4.42	1.60/2.78	-		
New Long Term (Mean/Max)				NMHC				
PC	Combined Mode ⁴⁾	g/km	1.15/1.92	0.05/0.08	0.05/0.08	-	Oct 2005	Sep 2007
Mini Com Veh			4.02/6.67	0.05/0.08	0.05/0.08	-	Oct 2007	Sep 2008 / Sep 2007
LCV			1.15/1.92	0.05/0.08	0.05/0.08	-	Oct 2005	Sep 2007
Medium LCV			2.55/4.08	0.05/0.08	0.07/0.10	-	Oct 2005	Sep 2007
Post New Long Term ³⁾ (Mean/Max) 8th Recommendation from the Central Environmental Council – Amended in Nov07 (Mean/Max)								
PC	Combined Mode ⁴⁾	g/km	1.15/1.92	0.05/0.08	0.05/0.08	0.005/0.007	Oct 2009	Oct 2009 / Sep 2010
Mini Com Veh			4.02/6.67	0.05/0.08	0.05/0.08	0.005/0.007	Oct 2009	Sep 2010
Light LCV			1.15/1.92	0.05/0.08	0.05/0.08	0.005/0.007	Oct 2009	Oct 2009 / Sep 2010
Medium LCV			2.55/4.08	0.05/0.08	0.07/0.10	0.007/0.009	Oct 2009	Oct 2009 / Sep 2010

¹⁾ Test mode: see page 47-48 ²⁾ PM limit applied only to direct injection gasoline engines equipped with NOx adsorber
³⁾ New PM measurement method; technically modified methods for CO and other gases ⁴⁾ Combined Mode: see page 45

Tabulka 8: Japonské emisní limity pro benzinové a plynové motory [4]

JAPAN

EXHAUST EMISSION LIMIT – DIESEL VEHICLES

EXHAUST EMISSION LIMIT – DIESEL VEHICLES								
	Test Mode ¹⁾	Unit	CO	HC	NOx	PM	New Model	All prod. / Imported veh.
New Short Term (Mean / Max)								
PC ≤ 1265 kg	10-15 Mode	g/km	0.63/0.98	0.12/0.24	0.28/0.43	0.052/0.11	Oct 2002	Sep 2004
PC > 1265 kg			0.63/0.98	0.12/0.24	0.30/0.45	0.056/0.11	Oct 2002	Sep 2004
Light Com Veh			0.63/0.98	0.12/0.24	0.28/0.43	0.052/0.11	Oct 2002	Sep 2004
Med. Com Veh			0.63/0.98	0.12/0.24	0.49/0.68	0.06/0.12	Oct 2003	Sep 2004
New Long Term (Mean / Max)								
NMHC								
PC ≤ 1265 kg	Combined Mode ⁵⁾	g/km	0.63/0.84	0.024/0.032	0.14/0.19	0.013/0.017	Oct 2005	Sep 2007
PC > 1265 kg			0.63/0.84	0.024/0.032	0.15/0.20	0.014/0.019	Oct 2005	Sep 2007
Light Com Veh			0.63/0.84	0.024/0.032	0.14/0.19	0.013/0.017	Oct 2005	Sep 2007
Med. Com Veh			0.63/0.84	0.024/0.032	0.25/0.33	0.015/0.020	Oct 2005	Sep 2007
Post New Long Term ⁴⁾ - 8th Recommendation from the Central Environmental Counsel - Amended in November 2007 (Mean/Max)								
PC	Combined Mode ⁵⁾	g/km	0.63/0.84	0.024/0.032	0.08/0.11 ³⁾	0.005/0.007	Oct 2009	Oct 2009 / Sep 2010
Light LCV			0.63/0.84	0.024/0.032	0.08/0.11	0.005/0.007	Oct 2009	Oct 2009 / Sep 2010
Medium LCV			0.63/0.84	0.024/0.032	0.15/0.20	0.007/0.009	Oct 2009 Oct 2010 ²⁾	Sep 2010 / Sep 2011 ²⁾

¹⁾ Test mode: see pages 47-48

²⁾ Oct 2009 for Medium Commercial Vehicle w/ 1.7 t < GVW ≤ 2.5 t or Oct 2010 for Medium Commercial Vehicle w/ 2.5 t < GVW ≤ 3.5 t

³⁾ For vehicles not exceeding 1.265 kg. For vehicles > 1.265 kg: 0.15/0.20

⁴⁾ New PM measurement method; technically modified methods for CO and other gases

⁵⁾ Combined Mode: see page 45

Tabulka 9: Japonské emisní limity pro naftové motory [4]

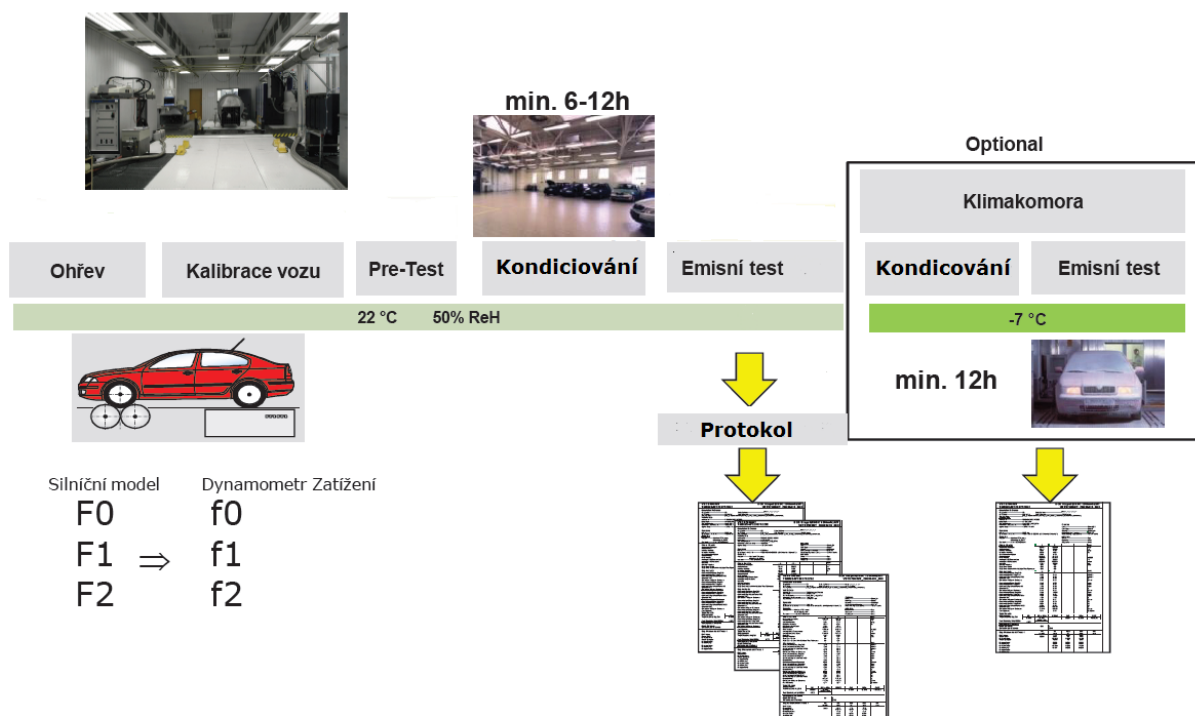
4. Měření emisí

V rámci stanovení jakékoliv nejistoty měření je nejprve důležité pochopit přípravu, proces a vyhodnocení samotného měření. Z tohoto důvodu považuji za nutné podrobně popsat průběh emisního testu spalovacího motoru, jenž je definován normou Evropské komise č. 692/08 (European commission regulation No. 692/08). V této normě jsou specifikovány požadavky na přesnost přístrojového vybavení, které je nutné pro testy využívat, dále pak je popsána příprava vozu před testem a přesně stanovený postup samotného emisního testu.

Celý proces měření emisí lze rozčlenit do několika fází, které detailněji popíši v následujících podkapitolách. Schematicky jsou tyto fáze znázorněny na obr. 4.

- 1) Stanovení silničního modelu
- 2) Ohřev
- 3) Kalibrace
- 4) Pretest
- 5) Kondicionování
- 6) Vlastní emisní test
- 7) Verifikace kalibrace dynamometru (tzv. doběhy)

Emisní proces dle EHK83, 692/2008 EU



obr. 4: schéma přípravy a průběhu emisního testu

4.1 Silniční model

Silniční model je matematický prostředek, kterým se za pomoci kvadratické funkce simuluje celková odporová síla působící proti pohybu vozidla v závislosti na aktuální rychlosti v běžných podmínkách. Obsahuje část, která představuje valivé odpory pneumatik a ložisek podvozku a část aerodynamickou, závislou na aerodynamickém odporu vozu C_x a jeho čelní ploše.

Přesný postup stanovení této funkce je součástí předpisu EHK 83. V jednoduchosti lze proces získání silničního modelu popsat následovně. Vůz se rozjede v reálných podmínkách na ustálenou rychlost 150 km/h a nechá se samovolně, pouze za pomoci pasivních odporů, zpomalovat. Během zpomalování je zaznamenávána aktuální rychlost v závislosti na čase uplynulém od začátku zpomalování. Z této závislosti se poté vypočte výsledná odporová síla, kterou musí vůz překonávat při jízdě (modrá křivka na grafu 6). Silniční model je pro každý typ automobilu získán v průběhu homologačního procesu a lze jej vyhledat v interní databázi daného výrobce automobilů.

Výsledná síla je pak vyjádřena vzorcem

$$F^S = F0^S + F1^S \cdot v^2 \quad (1) [10]$$

F^S [N] – celková výsledná odporová síla vozidla

$F0^S$ [N] - hodnota odpovídající valivému odporu

$F1^S$ [N/(km/h)²] – hodnota odpovídající odporu vzduchu

v [km/h] – rychlost vozidla

4.2 Ohřev vozu a kalibrace dynamometru

Proces kalibrace dynamometru představuje proces převedení silničního modelu na podmínky laboratoře. Cílem je dosáhnout pomocí dynamometru (elektrický brzdový motor) simulaci zatížení stejných podmínek jako na silnici. Dochází k simulaci reálných odporových sil automobilu. Zároveň se takto eliminují rozdíly v odporech podvozků i dvou typově stejných vozů (se stejným silničním modelem), neboť dynamometr dorovná rozdíly mezi odpory podvozku daného vozidla a silničním modelem. Proces kalibrace probíhá zhruba takto. Vůz provozem na dynamometru ohřejeme na provozní teplotu, čímž dojde ke stabilizaci odporových sil podvozku, především pneumatik. Toto ohřátí se provádí zaještěním běžného emisního cyklu nebo ustálenou rychlostí. Poté dynamometr (automobil má zařazený neutrální) vůz rozjede na rychlost cca 150 km/h a nechá ho samovolně za pomoci přednastavené síly zpomalovat. Počítač vyhodnotí odchylky dosažených časů zpomalování vzhledem k silničnímu modelu a koriguje zatížení dynamometru. Celý proces se opakuje, až jsou hodnoty odchylek nižší než požadovaný limit předepsaný normou EHK ($\pm 5\%$). Vzhledem k tomu, že každý podvozek i stejného typu vozu se liší, nutno doplňující zatížení dynamometru přizpůsobit u každého měřeného vozu před zkouškou. Porovnání silničního modelu a odporové síly dynamometru je znázorněné grafem 6.

Za pomoci tohoto procesu dojde ke stanovení kvadratické rovnice pro nastavení celkové odporové síly dynamometru F^D (rovnice 2).

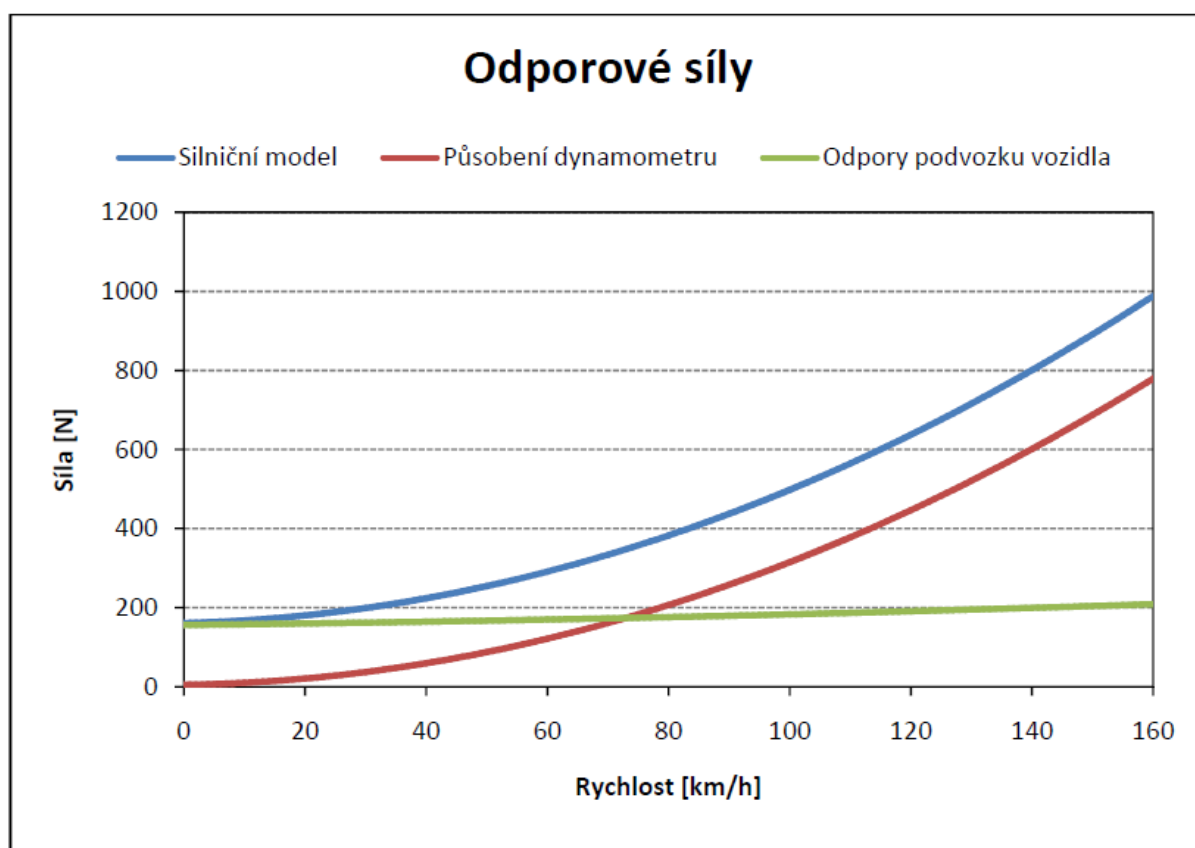
$$F^D = F0^D + F1^D \cdot v^2 \quad (2)$$

F^D = celková síla dynamometru [N]

$F0^D$ = složka valivého odporu [N]

$F1^D$ = hodnota odpovídající součiniteli odporu vzduchu [$\text{N}/(\text{km/h})^2$]

v = rychlost vozidla [km/h]



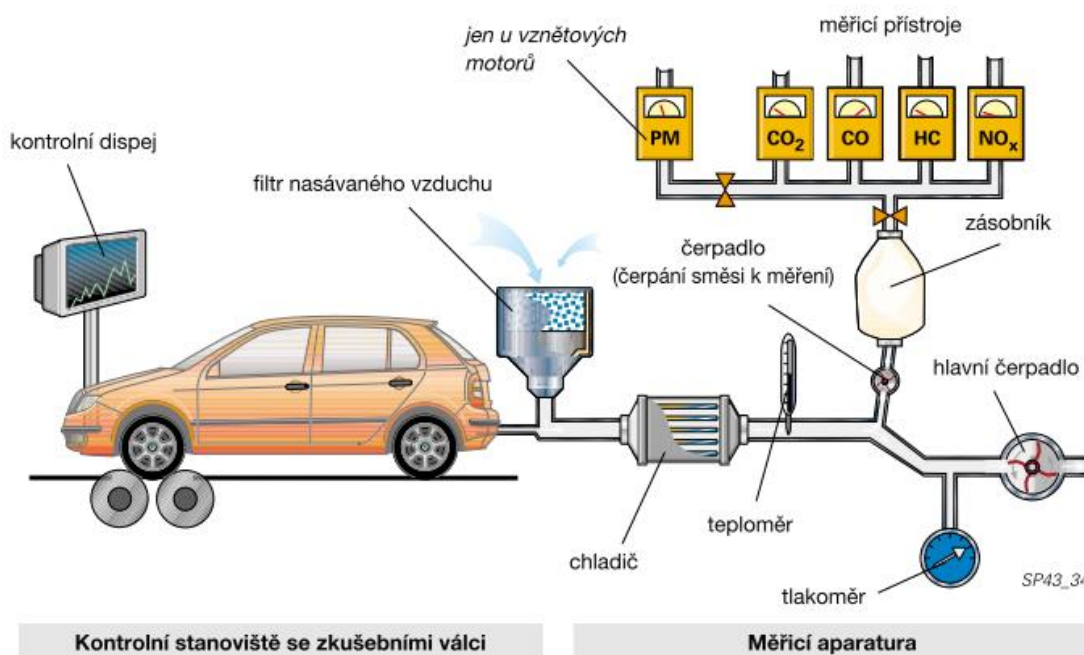
graf 6: zobrazení odporových sil v závislosti na rychlosti vozidla [11]

4.3 Pre-test

Po kalibraci následuje tzv. pre-test, jenž zajišťuje definovaný a opakovatelný stav vozidla před vlastním testem. Využívá se stejné jízdní křivky jako při testu, nejsou ale odebrány vzorky výfukového plynu pro analýzu. Během pre-testu je dynamometr nastaven na hodnoty odporových sil získaných při kalibraci. Po pre-testu musí být vozidlo minimálně 6 h temperováno na teplotu v rozmezí 20 – 30°C, než je možné provést měření emisí.

4.4 Emisní test

Při samotné zkoušce jede vozidlo v předepsaném cyklu, který je uveden v kapitole 3 a odpovídá obvyklému provozu vozidla. Vozidlo je zatěžováno dynamometrem, který simuluje reálné podmínky provozu vozidla. V průběhu emisního testu jsou výfukové plyny nasávány spolu s filtrovaným vzduchem tak, aby proud směsi výfukových plynů a vzduchu byl stále stejný, rovnoměrný a odpovídal předem definovanému množství. Toto proudění je zajištěno za pomoci systému pro ředění výfukových plynů. Tím je zabráněno nežádoucí kondenzaci vodní páry či dalších látek. V okamžiku, kdy vozidlo produkuje více výfukových plynů (např. při akceleraci), je přisáváno méně vzduchu a ve chvílích, kdy je výfukových plynů méně, přisává se vzduchu více. Na konci tunelu po ustálení a homogenizaci je část takto vznikající směsi odčerpávána do vaků. Do vaků je také odebírána vzorek ředícího vzduchu. Koncentrace emisních látek je pak dána výpočtem z koncentrací ve vzorku a v ředícím vzduchu. Celý přesný výpočet je popsán dále v této kapitole. Měření se provádí po celou dobu testu, ale výsledky se uvádějí v gramech na kilometr [g/km]. [3] Schematicky je tento proces znázorněn na obr. 5.



obr. 5: schéma systému měření emisí [3]

4.4.1 Výpočet hmotnosti složky výfukového plynu

Výsledná hodnota vyprodukovaných emisí uvedená v g/km či mg/km není přímo měřená veličina, nýbrž se jedná o veličinu vypočtenou dle rovnice 3.

$$M_i \left[\frac{g}{km} \right] = \frac{V^{CVS} \cdot \rho_i \cdot c_i \cdot 10^{-6}}{d} \quad (3) [10]$$

- M_i hmotnost emisí znečišťující látky i v g/km
 V^{CVS} objem zředěných výfukových plynů vyjádřený v litrech a korigovaný na normální podmínky (273,2 K a 101,33kPa)
 ρ_i hustota znečišťující látky i v g/l za normální teploty a tlaku (273,2 K a 101,33kPa)
 c_i koncentrace znečišťující látky i ve zředěném výfukovém plynu vyjádřená v ppm a korigovaná množstvím znečišťující látky i obsažené v ředícím vzduchu.
 d ujetá vzdálenost vozu v km

[10]

4.4.2 Korekce koncentrace znečišťující látky

$$c_i = c_e - c_d \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \quad (4) [10]$$

- c_e naměřená koncentrace znečišťující látky i ve zředěném výfukovém plynu, vyjádřená v ppm
 c_d koncentrace znečišťující látky i ve vzduchu používaném k ředění, vyjádřená v ppm
 DF faktor ředění

[10]

4.4.3 Výpočet faktoru ředění

Pro benzín

$$DF = \frac{13,4}{c_{CO_2} + (c_{HC} + c_{CO})10^{-4}} \quad (5) [10]$$

Pro naftu

$$DF = \frac{13,5}{c_{CO_2} + (c_{HC} + c_{CO})10^{-4}} \quad (6) [10]$$

Pro LPG

$$DF = \frac{11,9}{c_{CO_2} + (c_{HC} + c_{CO})10^{-4}} \quad (7) [10]$$

Pro NG

$$DF = \frac{9,5}{c_{CO_2} + (c_{HC} + c_{CO})10^{-4}} \quad (8) [10]$$

Pro etanol

$$DF = \frac{12,5}{c_{CO_2} + (c_{HC} + c_{CO})10^{-4}} \quad (9) [10]$$

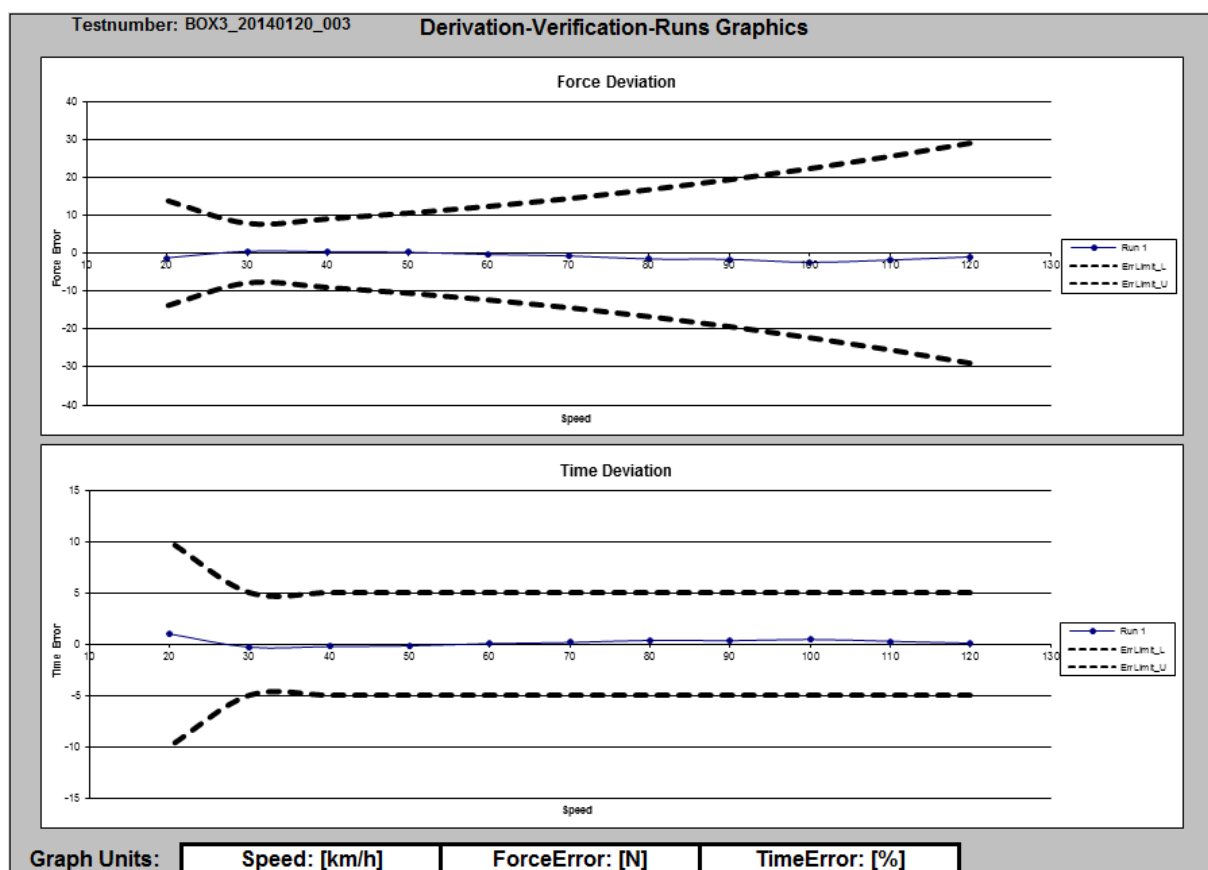
c_{CO_2} koncentrace CO₂ ve zředěných výfukových plynech ve vaku pro jímání vzorků vyjádřená v % objemu,

c_{HC} koncentrace HC ve zředěných výfukových plynech ve vaku pro jímání vzorků vyjádřená v ppm ekvivalentu uhlíku,

c_{CO} koncentrace CO ve zředěných výfukových plynech ve vaku pro jímání vzorků vyjádřená v ppm.

4.5 Verifikace silničního modelu (Doběhy)

Po ukončení zkoušky je nutné provést verifikaci nastavení válců tzv. doběhy. Vůz se dynamometrem opět rozjede na ustálenou rychlost 150 km/h a nechá se zpomalovat. Dynamometr měří čas nutný na toto zpomalení. Výsledné časy se musí shodovat v 5% toleranci se silničním modelem. Ne vždy je tento verifikační doběh úspěšný a test se v takovém případě považuje za neplatný. Na obr. 6 je uveden příklad záznamu a vyhodnocení verifikace silničního modelu.



obr. 6: příklad vyhodnocení verifikace silničního modelu [6]

5. Nejistota měření

Teorie měření i všeobecné poznání nám říká, že není v našich silách dosáhnout správného a v případě opakovaného měření i stejného výsledku. Každé měření je zatíženo určitým rozptylem. I v případě velmi dobré a kvalitní přípravy v laboratorních podmínkách a za použití kvalitních měřidel se nevyhneme působení určitých faktorů, které ovlivní výsledek. Je proto nutné určitým způsobem kvantifikovat variabilitu výsledků měření (určit tzv. nejistotu) a tímto údajem pak doplnit výsledek měření.

Základním dokumentem zabývajícím se problematikou určování nejistot měření je Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [12], který byl vydán těmito mezinárodními organizacemi: BIPM (Bureau International des Poids et Metres – Mezinárodní úřad pro váhy a míry), IEC (International Electrotechnical Committee – Mezinárodní elektrotechnická komise), IFCC (International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine – Mezinárodní federace pro klinickou chemii a laboratorní medicínu), ISO (International Standardisation Organisation – Mezinárodní organizace pro normalizaci), IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry – Mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii), IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics – Mezinárodní unie pro čistou a užitou fyziku) a OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale – Mezinárodní organizace pro legální metrologii).

Dle [12] je nejistota měření definována takto: parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině.

5.1 Zdroje nejistot měření

Nejistota výsledku měření odráží omezenou možnost znalosti hodnoty měřené veličiny. Úplné poznání by vyžadovalo nekonečné množství informací. Jevy přispívající k nejistotě a způsobující, že výsledek měření nemůže být charakterizován pouze jedinou hodnotou, se nazývají zdroje nejistot.

V praxi existuje mnoho možných zdrojů nejistot měření; patří mezi ně např.:

- a) neúplná definice měřené veličiny
- b) nedokonalá realizace definice měřené veličiny
- c) nereprezentativní výběr vzorků (měřený vzorek nemusí reprezentovat definovanou měřenou veličinu)
- d) nedostatečná znalost vlivů okolního prostředí nebo jejich nedokonalé měření
- e) vliv lidského faktoru při odečítání analogových měřidel
- f) omezená rozlišovací schopnost měřicího přístroje nebo práh rozlišení
- g) nepřesnost měřicích etalonů a referenčních materiálů

h) nepřesné hodnoty konstant a dalších parametrů získaných z externích zdrojů a použitých v algoritmu při výpočtu

i) aproximace a zjednodušení obsažené v měřicí metodě a postupu

j) změny v opakovaných pozorováních měřené veličiny, která jsou prováděna za zjevně shodných podmínek.

Zdroje nejistot nemusí být nutně nezávislé. Některé ze zdrojů nejistot uvedené pod body a) až i) mohou přispívat ke zdroji nejistot uvedenému pod bodem j). Při určování nejistot vycházíme z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky. Předpokládáme přitom, že měřené hodnoty a chyby mají určité rozdělení pravděpodobnosti. Potom i výsledek měření má určité rozdělení pravděpodobnosti. [13]

5.2 Přímé a nepřímé metody měření

Způsoby získání určité fyzikální veličiny jsou různé. Ve všech případech je však nutné ke zjištění veličiny použít určité měřicí přístroje. Pokud jsme schopni hodnotu požadované veličiny odečíst přímo ze stupnice přístroje, tak se jedná o tzv. přímo měřenou veličinu. Pokud však potřebujeme k určení hodnoty zjišťované veličiny výpočet podle dané závislosti měřené veličiny na veličinách jiného druhu, tak se jedná o tzv. nepřímé metody měření. Ve druhém případě se výpočet nejistoty částečně komplikuje, neboť je nutné si uvědomit a zahrnout do výpočtu také závislosti a vztahy mezi jednotlivými přímo měřenými veličinami.

5.3 Metody vyhodnocování nejistot

Při určování nejistot měření se rozlišují dvě základní metody: metoda označovaná jako typ A je založena na využití statistické analýzy souboru dat; metoda typu B pak využívá postupy jiné, než statistické. Bohužel v řadě publikací dochází k určitému zjednodušení, kdy jsou nejistoty určené metodou A označovány jako náhodné chyby a nejistoty určené metodou B jako systematické chyby, případně jsou nejistoty přímo označovány jako typu A či B, ačkoli takto rozlišovat lze pouze metody, které vedly k určení těchto nejistot. Na tuto skutečnost je upozorňováno i v dokumentu [12]. Ve složitějších měřicích řetězcích může totiž náhodná chyba jedné veličiny působit jako systematická chyba jiné veličiny, která ji využívá jako vstupní parametr.

Vhodnost aplikace metody A, resp. metody B pro stanovení dílčí nejistoty způsobené určitým faktorem závisí na konkrétním případě v závislosti na dostupných informacích o konkrétním měřicím procesu. Obvykle lze nejistotu většiny faktorů stanovit oběma způsoby, což přináší určitou kontrolu dosažených výsledků. Metoda B je pak vhodná, pokud není dostupný dostatečně rozsáhlý vzorek experimentálních dat, případně pro analýzu struktury celkové nejistoty.

5.3.1 Standardní nejistoty stanovené metodou typu A

Standardní nejistota typu A - u_A se získává statisticky z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny. Přitom se předpokládá, že se během tohoto opakovaného měření nemění ani tato měřená veličina a ani ovlivňující podmínky. Jde v podstatě o vyhodnocení nejistoty pro dané určité opakované měření. Nejedná se o vyhodnocení obecného procesu měření požadované veličiny. Se stoupajícím počtem opakovaných měření dochází ke

zmenšování této nejistoty. Při statickém vyhodnocování se předpokládá normální rozdělení chyb měření.

Při stanovování standardní nejistoty při přímém měření jedné veličiny je nutné nejprve stanovit odhad této veličiny označované například Y . Vzhledem k předpokládanému normálnímu rozdělení je tento odhad nejlépe charakterizován výběrovým průměrem $\bar{x}$ z naměřených hodnot x_i . A to následujícím vztahem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10) [14]$$

Rozptyl naměřených hodnot označovaný jako výběrový rozptyl se vypočítá dle vztahu

$$S_x^2 = \frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (11) [12]$$

Výběrová směrodatná odchylka pak charakterizuje rozptýlení naměřených hodnot kolem výběrového průměru $\bar{x}$. A získá se odmocněním rozptylu určeného vztahem (11).

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12) [12]$$

Výběrový průměr udává odhad hodnoty měřené veličiny a poněvadž se určuje z náhodného výběru, má náhodný charakter. Teoreticky bychom mohli získat nekonečný soubor výběrových průměrů, Rozptyl výběrových průměrů je pak n krát menší než rozptyl výběrového průměru jednoho souboru měření a stanoví se ze vztahu (13) či po úpravě vztahu (14).

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n} \cdot S_x^2 \quad (13) [12]$$

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (14) [12]$$

Standardní nejistota typu A je pak rovna směrodatné odchylce výběrových průměrů, Která vznikne opět odmocněním rozptylu výběrových průměrů.

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (15) [12]$$

Složitější případ pak nastává při určování nejistot nepřímo měřené veličiny, kterou je nutné získat z určitého vztahu. Nejprve je nutné stanovit vztah pro hodnotu veličiny Y v závislosti na několika přímo měřených veličinách X_j a konstant V_h .

$$Y = f(X_1, \dots, X_j, \dots, X_m, V_h) = f(X, V) \quad (16) [14]$$

Měření se opakuje n -krát a pro každé i -té měření dostaneme hodnoty přímo měřených veličin, kde $i=(1, 2, \dots, n)$.

$$x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{mi} \quad (17) [14]$$

Odhad hodnoty veličiny Y se stanoví výběrovým průměrem $\bar{y}$. Ten získáme tak, že nejprve určíme výběrové průměry $\bar{x}_j$ jednotlivých přímo měřených veličin x_j z jednotlivých naměřených hodnot x_{ji} :

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad (18) [14]$$

A tyto výběrové průměry dosadíme do vztahu (16).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(\bar{x}_{1i}, \dots, \bar{x}_{ji}, \dots, \bar{x}_{mi}, v_1, \dots, v_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(\bar{x}_j, v) \quad (19) [14]$$

Standardní nejistota typu A u_{Ay} se pak určí dle vztahu

$$u_{Ay}^2 = S_{\bar{y}}^2 = \sum_{j=l}^m A_{xj}^2 \cdot S_{\bar{x}_j}^2 + 2 \cdot \sum_{j=l; k < j}^m A_{xj} \cdot A_{xk} \cdot s_{xj,k} \quad (20) [14]$$

Kde

$$A_{xj} = \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_j}, A_{xk} = \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_k} \quad (21) [14]$$

Jsou převodní charakteristiky stanovené dosazením vypočítaných hodnot $\bar{x}$ a hodnot v do parciálních derivací předchozí rovnice (16) za předpokladu zanedbání členů vyšších řádů Taylorovy řady.

$$S_{\bar{x}j}^2 = \frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2 \quad (22) [12]$$

Je výběrový rozptyl výběrového průměru $\bar{x}_j$

$$S_{\bar{x}j} = \frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j) \cdot (x_{ki} - \bar{x}_k) \quad (23) [14]$$

Je výběrová kovariance výběrových průměrů $\bar{x}_j$ a $\bar{x}_k$.

Druhý člen ve vztahu (21) určuje vztah mezi měřenými veličinami. Pokud je tato korelace nulová nebo blíží se nule, je možné vztah zjednodušit zanedbáním tohoto členu.

5.3.2 Standardní nejistoty stanovené metodou typu B

Standardní nejistoty typu B - u_B jsou způsobovány známými a odhadnutelnými příčinami vzniku. Jejich identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor. Jejich určování nebývá vždy jednoduché. U složitých měřicích zařízení a při zvýšeném požadavku na přesnost, se musí provést podrobný rozbor chyb, což vyžaduje značné zkušenosti. Tyto nejistoty vycházejí z různých zdrojů a výsledná nejistota je dána jejich sumací. Určování nejistoty metodou typu B není závislé na počtu opakovaných měření. Tento způsob je vhodný především v případě, když není možné provést dostatečné množství měření za dodržení podmínky opakovatelnosti pro stanovení nejistoty metodou A. Mezi nejobvyklejší zdroje nejistot určené metodou typu B patří [15]:

1. Měřidla a etalony kalibrované v jiných laboratořích.
2. Fyzikální konstanty používané při výpočtu výsledné uváděné hodnoty.
3. Vlivy prostředí, které nemohou být statisticky vyšetřeny.
4. Možné odlišnosti v uspořádání měřidel a realizaci měřicího procesu.
5. Nedostatek rozlišovací schopnosti měřidla.

Postup při výpočtu nejistoty měření typem B je následující:

- 1) Je nutné dle zkušeností určit možné zdroje nejistot.
- 2) Vypočteme maximální možný rozsah změn $\pm \Delta Z_{\max}$.
- 3) Rozhodneme, které rozdělení pravděpodobnosti vystihuje uvedený interval.
Z uvedené tabulky rozdělení pravděpodobností určíme konstantu označovanou χ .

Rozdělení	χ
Normální (Gaussovo) rozdělení	3
Trojúhelníkové rozdělení	$\sqrt{6} \sim 2,45$
Bimodální – trojúhelníkové rozdělení	$\sqrt{2} \sim 1,41$
Bimodální – Diracovo rozdělení	1
Rovnoměrné rozdělení	$\sqrt{3} \sim 1,73$
Lichoběžníkové rozdělení	2,19

Tabulka 10: přehled koeficientů rozdělení pravděpodobnosti [14]

Grafický přehled rozdělení pravděpodobností je uveden v příloze 1.

- 4) Z vytypovaných zdrojů určíme nejistoty dle vztahu.

$$u_{bi} = \frac{Z_{\max}}{\chi} \quad (24) [14]$$

- 5) Celková nejistota je pak dána geometrickým součtem všech nejistot.

$$u_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{bi}^2} \quad (25) [14]$$

5.3.3 Kombinovaná standardní nejistota

Teoreticky by pro dané měření nejistota získaná metodou typu A měla být rovna nejistotě získané metodou typu B. Ve většině případů, však sice při opakovaných měřeních dostaneme výsledek metodou typu A, avšak ten může být zkreslený a od skutečné hodnoty odchýlený o systematickou chybu. V těchto vyhodnoceních metoda typu B doplňuje metodu typu A a využívá se tzv. kombinované nejistoty.

Kombinovaná standardní nejistota - u_C je sumací nejistot vyhodnocených metodou typu A a B. Kombinovaná standardní nejistota udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny.[14]

Za známých standardních nejistot typu A a B se stanoví kombinovaná nejistota u dle následujícího vztahu:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (26) [14]$$

Zde je nutné poznamenat, že však ne vždy je pouhá sumace nejistot správná. Jak je uvedeno v [12], je potřeba se vyhnout tzv. dvojímu započtení určité dílčí nejistoty. Při výpočtu nejistoty měřicího procesu metodou A je třeba současně analyzovat data, ze kterých je vypočítána, s ohledem na podmínky, za jakých byla tato data naměřena. Tak lze určit, které z jednotlivých dílčích nejistot již byly započítány a které nebyly metodou A postiženy a je nutné je určit metodou B.

V některých složitějších měřeních (jakým je například emisní test) není naopak možné použít metodu typu A. Tato situace může nastat, pokud není možné uskutečnit dostatečné množství měření při dodržení podmínek opakovatelnosti. V tomto případě je nutné použít pro vyhodnocení pouze metodu typu B a nevyužívá se nejistota kombinovaná.

Základní definice opakovatelnosti podle ISO 5725-1986 je dána těmito prvky:

opakovatelnost - úzkým souhlasem mezi vzájemně nezávislými výsledky, získanými v podmínkách opakovatelnosti,

podmínky opakovatelnosti - podmínky, kdy vzájemně nezávislé výsledky testů jsou získány stejnou metodou na identickém zkušebním materiálu v té samé laboratoři stejným operátorem, užívajícím stejné zařízení v krátkém časovém intervalu,

hodnota opakovatelnosti r : hodnota, která jako absolutní rozdíl mezi dvěma jednotlivými testy za splnění podmínek opakovatelnosti je očekávána s pravděpodobností 95%,

kritický rozdíl opakovatelnosti: absolutní rozdíl mezi dvěma jednotlivými výsledky testu za splnění podmínek opakovatelnosti může být očekávána s danou pravděpodobností.

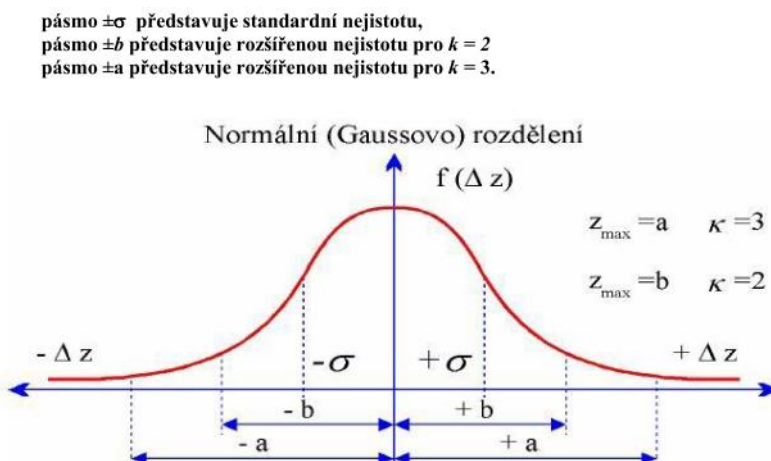
Je třeba dodat, že hodnota r je teoretická, není známa a jsou určovány pouze její odhady. [16]

5.3.4 Rozšířená standardní nejistota U

Jak již bylo v textu uvedeno, výše popsaným postupem se získá standardní kombinovaná nejistota nebo v individuálních případech pouze nejistota určité skupiny. Standardní nejistota znamená, že při skládání byly použity hodnoty směrodatných odchylek. Při splnění jistých předpokladů je možné považovat rozdělení takto určené nejistoty za přibližné normální (Gaussovo), které je znázorněno na 7. Z toho pak vyplývá, že takto vypočtená nejistota pokrývá asi 67 % možných výsledků, jinak řečeno, že asi 1/3 výsledků

muže padnout mimo takto stanovené pole nejistot. Jelikož z metrologického hlediska je takováto situace dosti těžko přijatelná, přistupuje se k vynásobení standardní nejistoty rozšiřujícím koeficientem, který umožní získat pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. K rozšiřování nejistoty lze přistupovat několika způsoby.

V běžné praxi se obvykle hodnota rozšiřujícího koeficientu určí dohodou pro určitou hrubě odhadovanou pravděpodobnost pokrytí výsledku. S předpokladem normálního rozdělení jsou pak vžité dvě základní hodnoty koeficientu rozšíření 2 a 3 pro pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, resp 99,7 %. Průběh normálního rozdělení se zobrazením pravděpodobnosti pokrytí je na obr. 7. [13]



obr. 7: zobrazení průběhu normálního rozdělení [16]

Rozšířená standardní nejistota se pak vypočítá jako součin standardní nejistoty a koeficientu rozšíření k .

$$U = k \cdot u \quad (27) [16]$$

6. Nejistota měření CO₂

V posledních letech je kladen stále větší důraz na emise CO₂. Tato hodnota je pod velkým dohledem všech výrobců automobilů a důraz na její snižování se zvětšuje úměrně s rostoucím požadavkem EU. Jsou tedy vyvíjena různá technická opatření, která by měla vést ke snížení emisí CO₂. Prokázat účinnost takového dílčího opatření může být obtížné, pokud není známo, s jakou nejistotou lze hodnotu CO₂ na daném analytickém zařízení měřit. Rozdíl v hodnotách CO₂ v g/km lze považovat za statisticky významný, pouze pokud je větší než nejistota měřicího procesu.

Vzhledem k povaze měření a vyhodnocení všech složek výfukových plynů, tak jak je popsáno v kapitole 4, je postup výpočtu nejistoty pro všechny složky identický. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl věnovat podrobněji pouze složce CO₂.

6.1 Výpočet a stanovení nejistoty měření CO₂ metodou typu A

Jak jsem již uváděl v kapitole o nejistotách měření, je jednou z metod získání nejistoty metoda typu A. Touto metodou je stanovena nejistota výpočtem z opakovaně provedených měření dané veličiny, u kterých se předpokládá dodržení pravidel opakovatelnosti. Čím větší je počet měření, tím dochází ke zpřesňování nejistoty.

V kapitole 4 je popsán proces měření emisí. Každý emisní test vyžaduje několik po sobě jdoucích operací. Mezi tyto operace patří kalibrace dynamometru, pretest a následné kondicionování vozu po dobu min 6 hodin. Teprve po té je možné emisní test zopakovat. Z tohoto důvodu je nemožné zachovat uvedené podmínky opakovatelnosti. Není technicky možné měření zopakovat pro účely vyhodnocení nejistoty metodou typu A. Není možné metodu typu A pro výpočet nejistoty měření emisí použít a je nutné se zaměřit na nejistotu typu B.

6.2 Výpočet a stanovení nejistoty měření CO₂ metodou typu B

Druhou odlišnou metodou pro stanovení nejistoty měření je metoda typu B. Při výpočtu touto metodou jsem postupoval dle teorie uvedené v kapitole 5.3.2.

V první řadě jsem stanovil všechny důležité zdroje nejistot, které mohou v celém řetězci ovlivnit výsledek. Při důkladné analýze procesu měření uvedeného v kapitole 4, jsem dospěl k závěru, že celý proces měření se skládá ze tří dílčích celků.

- 1) Nejistota měření způsobená laboratorním zařízením
- 2) Nejistota měření způsobená přípravou vozu
- 3) Nejistota měření způsobená vlivem operátora

Pro každý s faktorů obsažený v těchto celcích bylo nutné stanovit maximální rozsah změn. Při mém bližším zkoumání tohoto rozsahu pro jednotlivé vlivy, jsem zjistil, že se jedná o dva druhy možných rozsahů, které se v některých případech liší. Jeden rozsah je umožněný předpisem EHK a druhý rozsah, přesnější, je rozsah, kterého dosahuje moderní laboratoř. Vzhledem k opakovatelnosti je zajímavá hodnota, které dosahuje daná laboratoř, jež je přesnější. Avšak z hlediska reprodukovatelnosti je zajímavý rozsah změn v případě dodržení

předpisu EHK. Celosvětově rozmístěné laboratoře mohou používat rozdílné okrajové podmínky v rámci předpisu. Rozhodl jsem se proto vyhodnotit a porovnat oba výsledky.

Pro další výpočet je nutné pro každý faktor určit rozdělení pravděpodobnosti a k němu použít správný koeficient kapa. Grafický přehled rozdělení pravděpodobnosti je uveden v příloze 1.

6.2.1 Nejistota měření emisí způsobená laboratorním zařízením

Jednou ze tří uvedených dílčích celků je nejistota měření způsobená laboratorním zařízením. Jedná se o nejistotu, jež je způsobena nepřesností samotného měřicího zařízení. Popis a funkci tohoto zařízení, průběh měření a stanovení výsledné koncentrace jednotlivých složek výfukových plynů jsem uvedl v kapitole 4. Z uvedené rovnice (3) pro výpočet hmotnosti výfukových plynů je patrné, že výsledná hodnota množství vyprodukovaného CO₂ veličinou získanou z několika dílčích měřených veličin a konstant. V uvedeném vzorci jsou tři následující veličiny:

- V^{CVS} objem zředěných výfukových plynů vyjádřený v litrech a korigovaný na normální podmínky (273,2 K a 101,33kPa)
- c_i koncentrace znečišťující látky i ve zředěném výfukovém plynu vyjádřená v ppm a korigovaná množstvím znečišťující látky i obsaženém v ředícím vzduchu
- d ujetá vzdálenost vozu v km

V následujících kapitolách se budu věnovat rozboru nejistot měření těchto tří hodnot s tím, že hodnota koncentrace je navíc ještě ovlivněna rozsahem kalibračního plynu, který se používá pro kalibraci analyzátorů.

6.2.1.1 Vliv systému ředění výfukových plynů a měření objemu v primárním ředícím systému

První měřenou veličinou je objem ředěných výfukových plynů. Pro výpočet bylo nutné stanovit krajní meze pro danou veličinu. K tomuto určení mně posloužila norma EHK 83 a certifikát výrobce zařízení používaného v emisní laboratoři.

Metoda měření celkového objemu zředěného výfukového plynu, která je včleněna do systému odběru vzorku plynů s konstantním objemem, musí být taková, aby měření bylo přesné na ± 2 % za všech provozních podmínek. Jestliže zařízení nemůže v měřicím bodu vyrovnávat kolísání teploty směsi výfukových plynů a ředícího vzduchu, musí se použít výměník tepla k udržení teploty na hodnotě specifikované provozní teploty ± 6 K. V případě potřeby lze k ochraně zařízení pro měření objemu použít určitou formu ochrany, např. cyklonový odlučovač, filtr celého proudu, atd. Snímač teploty se montuje bezprostředně před zařízením k měření objemu. Tento snímač teploty musí mít přesnost ± 1 K a časovou odezvu 0,1 s při 62 % změny dané teploty (hodnota měřená v silikonovém oleji). Rozdíl tlaku od tlaku atmosférického se měří před zařízením pro měření objemu, a je-li třeba, i za ním. Tlak se během zkoušky měří s přesností $\pm 0,4$ kPa.[3]

Výrobce zařízení CVS používaného v moderní laboratoři udává nejistotu $\pm 0,85\%$ s tím, že zahrnuje nejistotu kalibrační metody a kalibrovaného zařízení a nezahrnuje nejistotu

dlouhodobé stability. Vzhledem k tomu, že se zařízení pravidelně kalibruje, je tedy možné vliv tzv. driftu opomenout.

V dalším kroku jsem určil, vzhledem k povaze veličiny, normální rozdělení, pro které se používá koeficient χ rovno 3.

Pro výpočet nejistoty způsobené vlivem systému ředění výfukových plynů jsem pro oba uvedené rozsahy použil rovnici (24). Výpočet pro rozsah daný normou EHK je uveden rovnicí (28) a pro rozsah běžný v moderní emisní laboratoři je uveden rovnicí (29).

Výsledky jsem pro přehlednost uvedl do tabulky 11.

Nejistota způsobená vlivem měření objemu vzduchu				
	$\pm \Delta Z_{\max} [\%]$	χ	ub1 [g/km]	ub1 [%]
EHK	2	3	---	0,6667
LAB	0,85	3	---	0,2833

Tabulka 11: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem měření objemu vzduchu

Výpočet pro stanovení nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem systému ředění výfukových plynů pro rozsah dle normy EHK

$$u_{b1}^{EHK} = \frac{2}{3} = 0,6667 [\%] \quad (28)$$

Výpočet pro stanovení nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem systému ředění výfukových plynů dle rozsahu laboratoře

$$u_{b1}^{LAB} = \frac{0,85}{3} = 0,2833 [\%] \quad (29)$$

6.2.1.2 Vliv odběru a analýzy vzorků

Další měřenou veličinou je koncentrace získaných vzorků. Krajní hodnoty jsem opět získal z normy EHK 83 a z certifikátu používaného analyzátoru.

Chyba měření nesmí přesáhnout $\pm 2 \%$ (vnitřní chyba analyzátoru), bez ohledu na skutečnou hodnotu pro kalibrační plyny. U koncentrací menších než 100 ppm nesmí chyba měření přesáhnout ± 2 ppm.[10]

Výrobce analyzátoru používaného v Emisní laboratoři udává vnitřní nejistotu analyzátoru 0,3%. Drift analyzátoru je eliminován kalibrací před každým měřením.

Vzhledem k povaze veličiny jsem se opět rozhodl použít normální rozdělení.

Postup výpočtu byl totožný s postupem uvedeným v kapitole 6.2.1.1. Výpočet pro nejistotu dle rozsahu normy EHK je rovnice (30) a dle rozsahu laboratoře rovnice (31). Výsledky jsou uvedeny v tabulce (12).

Nejistota způsobená vlivem odběru a analýzy vzorků				
	$\pm \Delta Z_{\max} [\%]$	χ	Ub2 [g/km]	Ub2 [%]
EHK	2	3	---	0,6667
LAB	0,3	3	---	0,1000

Tabulka 12: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem odběru a analýzou vzorků

Při výpočtu korigované koncentrace CO₂ jsou použity i koncentrace HC a CO. Tyto koncentrace ale dosahují až o několik řádů nižších hodnot než koncentrace CO₂, a tak nejistota spojená s jejich měření je z hlediska koncentrace CO₂ zanedbatelná.

Výpočet pro stanovení nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem odběru a analýzy vzorků dle normy EHK

$$u_{b2}^{EHK} = \frac{2}{3} = 0,6667 [\%] \quad (30)$$

Výpočet pro stanovení nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem odběru a analýzy vzorků dle rozsahu laboratoře

$$u_{b2}^{LAB} = \frac{0,3}{3} = 0,1 [\%] \quad (31)$$

6.2.1.3 Vliv nejistoty kalibračních plynů

V pravidelných intervalech dochází v laboratořích ke kalibraci měřícího analyzátoru kalibračním plynem, čímž je eliminován vliv časového driftu analyzátoru. Vzhledem k tomu, že jedna homogenní láhev kalibračního plynu vydrží cca 6 měsíců, by např. nejistota získaná metodou typu A z malého počtu měření tento vliv v sobě zahrnutý mýt nemohla. Proto je nutné tento vliv do výpočtu zahrnout.

Skutečná koncentrace kalibračního plynu se smí lišit od jmenovité hodnoty v rozmezí $\pm 2\%$. [10]

Rozsah koncentrace kalibračního plynu CO₂ udávaná dodavatelem kalibračního plynu je 0,5 %.

Pro tento typ vlivu jsem opět použil normální rozdělení. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 13.

Nejistota způsobená vlivem rozsahu koncentrace kalibračního plynu				
	$\pm \Delta Z_{\max} [\%]$	χ	Ub3 [g/km]	Ub3 [%]
EHK	2	3	---	0,6667
LAB	0,5	3	---	0,2980

Tabulka 13: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem rozsahu koncentrace kalibračního plynu

Výpočet pro stanovení nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem kalibračního plynu dle normy EHK.

$$u_{b3}^{EHK} = \frac{2}{3} = 0,6667 \text{ [%]} \quad (32)$$

Výpočet pro stanovení nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem kalibračního plynu používaného v laboratoře

$$u_{b3}^{LAB} = \frac{0,5}{3} = 0,1667 \text{ [%]} \quad (33)$$

6.2.1.4 Vliv měření ujeté vzdálenosti

Ujetá vzdálenost je měřená přesným otáčením dynamometru, u něhož je znám průměr válce. Měření této veličiny je řádově přesnější než měření zbývajících dvou hodnot a proto jsem ve výpočtu nejistoty tuto hodnotu zanedbal.

6.2.2 Vliv přípravy měření

Příprava měření a příprava měřicího vzorku umožňuje implementaci poměrně znatelného množství nejistot. V této kapitole představím postupně jednotlivé kroky přípravy měření v emisní laboratoři a vypočtu jejich vliv do celkové nejistoty.

6.2.2.1 Nejistota způsobená kalibrací dynamometru

Nastavení a kalibrace dynamometru je popsána v kapitole 4.2. Po kalibraci získáme kvadratickou rovnici, jež je uvedena v této kapitole jako rovnice 2. Tato kvadratická rovnice definuje celkovou sílu, kterou působí dynamometr. Normou je uvedeno, že výsledný průběh odporu dynamometru musí ležet v $\pm 5 \text{ %}$ intervalu odchylovající se od silničního modelu získaného při homologaci. V průběhu kalibrace může tedy dojít k nastavení odlišné síly simulující jízdní odpory. Tato diference jistě způsobí rozdíl ve výsledné naměřené hodnotě. Jedná se tedy o další faktor vnášející chybu do výsledku měření.

Předpis EHK umožňuje rozsah nastavení odporové síly dynamometru v rozmezí $\pm 5 \text{ %}$. Při analýze velkého množství emisních protokolů jsem vyhodnotil, že v moderní emisní laboratoři je běžný rozsah $\pm 2,5 \text{ %}$.

Při kalibraci válců se řídicí jednotka dynamometru pokouší s největší pravděpodobností nastavit optimální nulový rozsah. Za tohoto předpokladu jsem pro tento vliv nejistoty vybral normální (Gaussovo) rozdělení.

U zkušebního vozu jsem najel standardní odporovou křivku dynamometru. Za pomoci SW Excel jsem přepočtl posun odporových sil v hodnotách o -20 % , -10 % , 0 , $+10 \text{ %}$ a $+20 \text{ %}$. Výsledné grafy odporových sil pro jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v grafu 7. Při těchto nastaveních odporové křivky jsem provedl čtyři postupná měření stejného vozu. Výsledky jsem uvedl do tabulky 15 a grafu 8. Za pomoci regresní analýzy jsem odvodil rovnici závislosti CO₂ na nastavení dynamometru (rovnice 34) a určil krajní rozsahy hodnoty CO₂. Pro rozsah umožnění předpisem EHK je výpočet uvedený rovnicí (35, 36 a 37). Pro rozsah

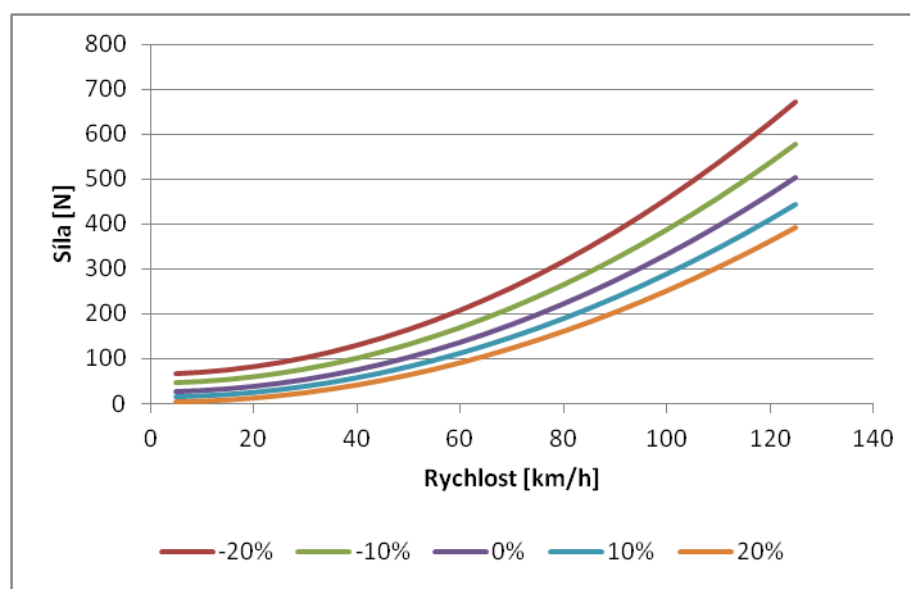
laboratoře pak rovnicí (40, 41 a 42). Výslednou nejistotu jsem vypočetl dosazením hodnoty $\chi=3$ pro Gaussovo rozdělení a hodnot rozsahů změn z rovnic (37), potažmo (42), do rovnice pro výpočet nejistoty typu B (24). Postup je uveden rovnicí (38 a 39) pro rozsah dle EHK a (43 a 44) pro rozsah laboratoře.

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 14.

Nejistota způsobená nastavením dynamometru				
	$\pm \Delta Z_{\max}$	χ	ub4 [g/km]	ub4 [%]
EHK	1,9275	3	0,6425	0,2695
LAB	0,9638	3	0,3213	0,1348

Tabulka 14: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem cyhby nastavení dynamometru

Grafy odporových sil



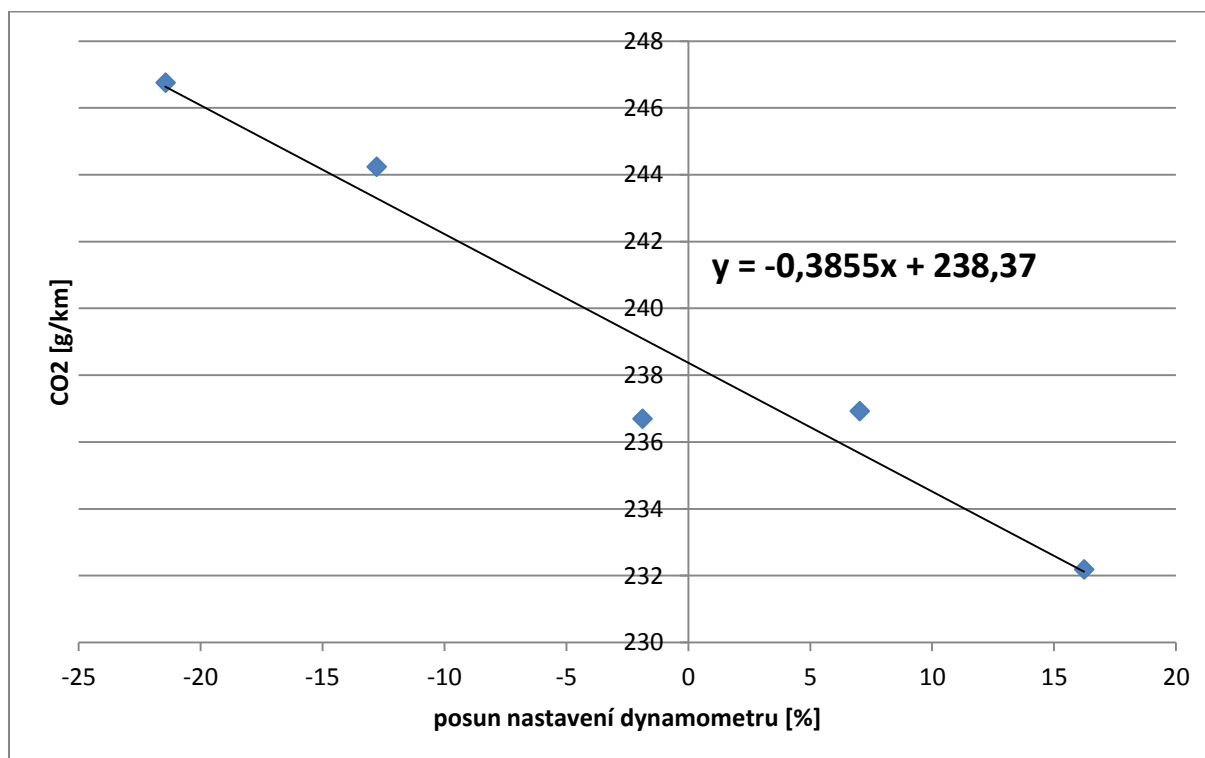
graf 7: Graf zobrazující odporové síly dynamometru pro jednotlivé nastavení válců

Výsledky emisních testů.

Výsledky emisních testů pro jednotlivá nastavení válců					
	-20 %	-10 %	0	10 %	20 %
125-115	-20,99	-11,81	-1,29	7,89	17,29
115-105	-21,14	-12,04	-1,21	7,93	17,22
105-95	-21,22	-12,02	-1,15	7,67	16,94
95-85	-21,34	-12,29	-1,41	7,66	16,55
85-75	-21,34	-12,79	-1,6	7,33	16,35
75-65	-21,5	-13,13	-1,93	6,85	16,06
65-55	-21,73	-13,52	-2,22	6,33	15,32
55-45	-22,09	-13,93	-2,7	5,89	15,59
45-35	-22,28	-13,77	-3,15	6,09	15,15
35-25	-21,77	-13,47	-2,5	6,15	15,21
25-15	-20,47	-11,88	-1,55	7,49	16,86
průměr	-21,4427	-12,7864	-1,88273	7,025455	16,23091
CO2	246,7576	244,2401	236,6978	236,9263	232,1888

Tabulka 15: Výsledky emisních testů pro jednotlivá nastavení válců

Výsledky emisních testů zanesených do grafu



Graf 8: závislost hmotnosti CO₂ na nastavení dynamometru

Výsledná rovnice regrese

$$y^{DYN} = 0,3855x + 238,37 \quad (34)$$

Výpočet nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem kalibrace dynamometru dle rozsahu daného předpisem EHK

$$M_{CO_2_{max}}^{EHK} \left[\frac{g}{km} \right] = -0,3855 \cdot (-5) + 238,37 = 240,2975 \quad (35)$$

$$M_{CO_2_{min}}^{EHK} \left[\frac{g}{km} \right] = -0,3855 \cdot (5) + 238,37 = 236,4425 \quad (36)$$

$$\Delta Z_{max_4}^{EHK} = \frac{240,2975 - 236,4425}{2} = \frac{3,855}{2} = 1,9275 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (37)$$

$$u_{b4}^{EHK} = \frac{1,9275}{3} = 0,6425 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (38)$$

$$u_{b4}^{EHK} = \frac{0,6425}{238,37} \cdot 100 = 0,2695 [\%] \quad (39)$$

Výpočet nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem kalibrace dynamometru dle rozsahu laboratoře

$$M_{CO_2_{max}}^{LAB} = -0,3855 \cdot (-2,5) + 238,37 = 239,3338 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (40)$$

$$M_{CO_2_{min}}^{LAB} = -0,3855 \cdot (2,5) + 238,37 = 237,4063 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (41)$$

$$\Delta Z_{max_4}^{LAB} = \frac{239,3338 - 237,4063}{2} = \frac{1,9275}{2} = 0,9638 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (42)$$

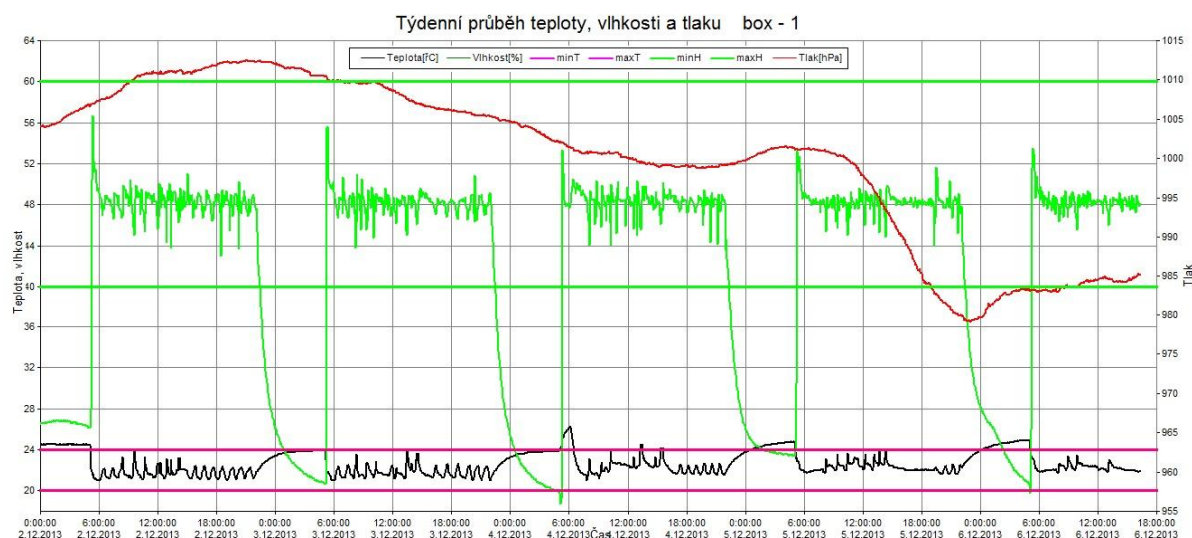
$$u_{b4}^{LAB} = \frac{0,9638}{3} = 0,3213 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (43)$$

$$u_{b4}^{LAB} = \frac{0,3213}{238,37} \cdot 100 = 0,1348 [\%] \quad (44)$$

6.2.2.2 Vliv teploty v laboratoři

Měření emisí se provádí ve speciální místnosti označované jako měřicí box. Tento měřicí box je vždy řádně odvětráván za pomoci klimatizační jednotky. Ta udržuje s určitou přesností nastavenou teplotu v průběhu celého měření. Jistou zvláštností jsou speciální klimatizační boxy, umožňující nastavení plusových i minusových teplot, pro měření v extrémních podmínkách. V průběhu testu bez zvláštního požadavku na teplotu je však nastavována běžná teplota. Bylo nutné si položit otázku, jestli změna teploty může vnést měřitelnou chybu do výsledku. Stanovil jsem tedy možné okrajové podmínky pro nastavení teploty, provedl porovnávací emisní testy a vypočetl nejistotu.

V průběhu zkoušky musí být dle předpisu EHK83 teplota zkušebny v rozsahu od 293 K do 303 K (20 °C až 30 °C).[10] Pokud není požadováno speciální měření v klimakomoře, je v měřicích boxech v průběhu testu zadávána běžná teplota. Průběh teploty během jednoho týdne znázorňuje graf (9) černou čarou. Hodnoty teplot oscilují od 20,5 do 23,5°C. Tyto hodnoty jsem tedy použil jako krajní hodnoty pro tento faktor.



Graf 9: průběh teploty v měřicím boxu v čase

Běžná klimatizační jednotka udržuje nastavenou teplotu v určitém rozmezí okolo teploty požadované se stejnou pravděpodobností. Důvodem je, že přesnější udržení požadované teploty vyžaduje větší energetickou náročnost. Pro tento typ pravděpodobnosti je nutné použít tzv. lichoběžníkové provedení. χ tím pádem nabývá hodnoty 2,19.

Při nastavení okrajových teplotních rozsahů jsem provedl dvě měření na jednom voze. Pro tato měření byla využita klimakomora s možností přesného nastavení teploty. Průběh této teploty během zmíněných testů znázorňuje graf 11.

Výsledky emisních testů jsem uvedl do tabulky (17) a grafu (10). Za pomoci regresní analýzy jsem odvodil rovnici závislosti CO_2 na teplotě (viz rovnice 45). Dosazením krajních hodnot teplot dle normy EHK do rovnice 45 jsem vypočetl krajní hodnoty veličiny CO_2 (viz rovnice 46 a 47). Dosazením získaného rozsahu a koeficientu χ do rovnice (24) jsem vypočetl nejistotu pro tento faktor. Rovnice (48 až 50) znázorňuje výpočet pro rozsah dle normy EHK. Rovnice (51 až 55) pak pro rozsah v běžné laboratoři.

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 16.

Nejistota způsobená vlivem teploty				
	$\pm \Delta Z_{\max}$	χ	ub5 [g/km]	ub5 [%]
EHK	4,1930	2,19	1,9146	0,8001
LAB	1,2579	2,19	0,5744	0,2375

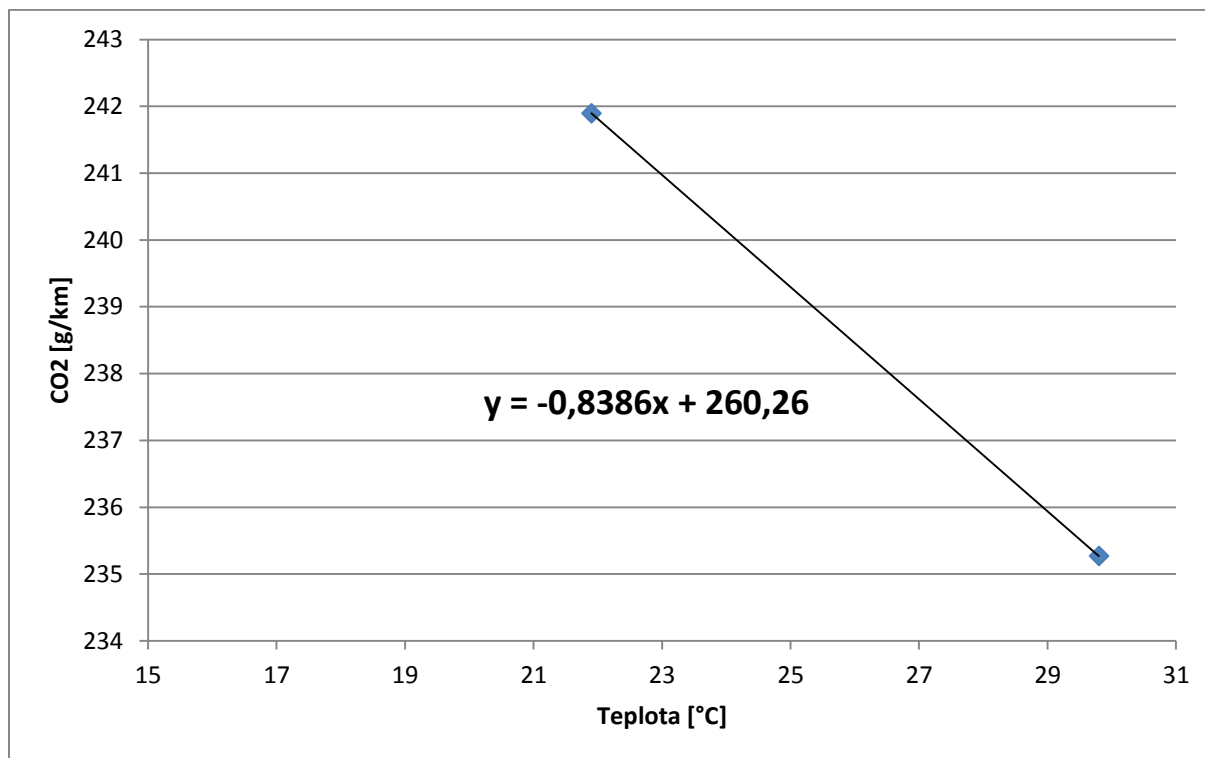
Tabulka 16: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem nastavení teploty

Výsledky emisních testů

Výsledky emisí CO ₂ ovlivněné teplotou laboratoře		
	Teplota [°C]	CO ₂ [g/km]
Měření č. 1	21,9°C	241,8951
Měření č. 2	29,8°C	235,2705

Tabulka 17: výsledky emisních testů pro různé nastavení teploty v boxu

Výsledky emisních testů zanesených do grafu



graf 10: závislost hmotnosti CO₂ na teplotě v boxu

Výsledná rovnice regrese

$$y^{TEP} = -0,8383x + 260,26 \quad (45)$$

Výpočet nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem teploty dle rozsahu daného předpisem EHK

$$M_{CO_2_{5min}}^{EHK} = -0,8383 \cdot (30,0) + 260,26 = 235,1020 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (46)$$

$$M_{CO_2_{5max}}^{EHK} = -0,8383 \cdot (20,0) + 260,26 = 243,4880 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (47)$$

$$\Delta Z_{max_5}^{EHK} = \frac{243,4880 - 235,1020}{2} = \frac{8,386}{2} = 4,1930 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (48)$$

$$u_{b5}^{EHK} = \frac{4,1930}{2,19} = 1,9146 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (49)$$

$$u_{b5}^{EHK} = \frac{1,9146}{239,295} \cdot 100 = 0,8001 [\%] \quad (50)$$

Výpočet nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem teploty dle běžného maximálního rozsahu laboratoře

$$M_{CO_2_{5max}}^{LAB} \left[\frac{g}{km} \right] = 0,8383 \cdot (20,5) + 260,26 = 243,0687 \quad (51)$$

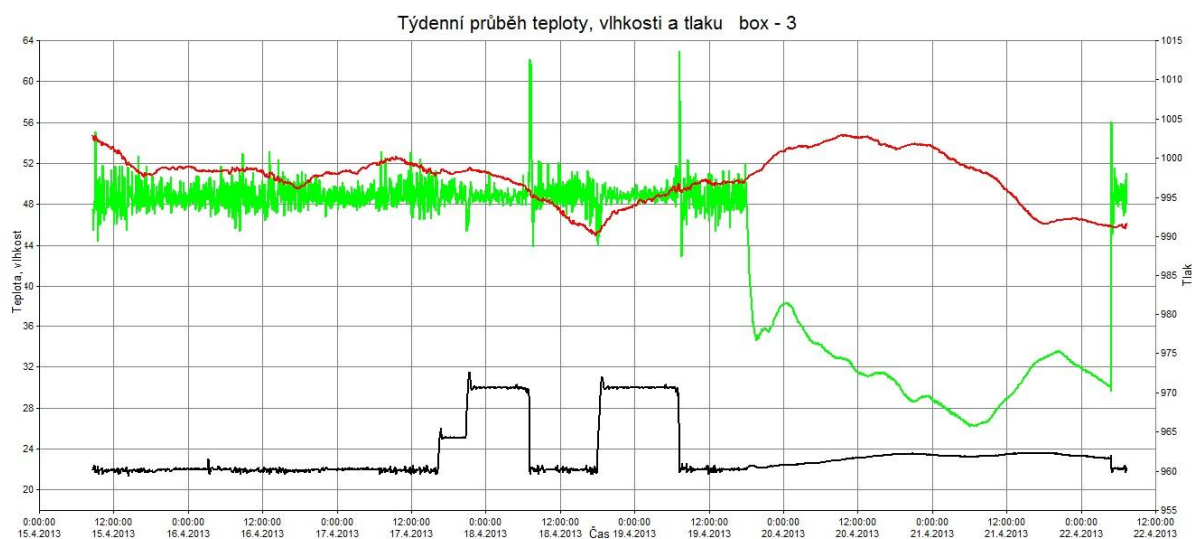
$$M_{CO_2_{5min}}^{LAB} \left[\frac{g}{km} \right] = 0,8383 \cdot (23,5) + 260,26 = 240,5529 \quad (52)$$

$$\Delta Z_{max_5}^{LAB} = \frac{243,0687 - 240,5529}{2} = \frac{2,5158}{2} = 1,2579 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (53)$$

$$u_{b5}^{LAB} = \frac{1,2579}{2,19} = 0,5744 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (54)$$

$$u_{b5}^{LAB} = \frac{0,5744}{241,8108} \cdot 100 = 0,2375 [\%] \quad (55)$$

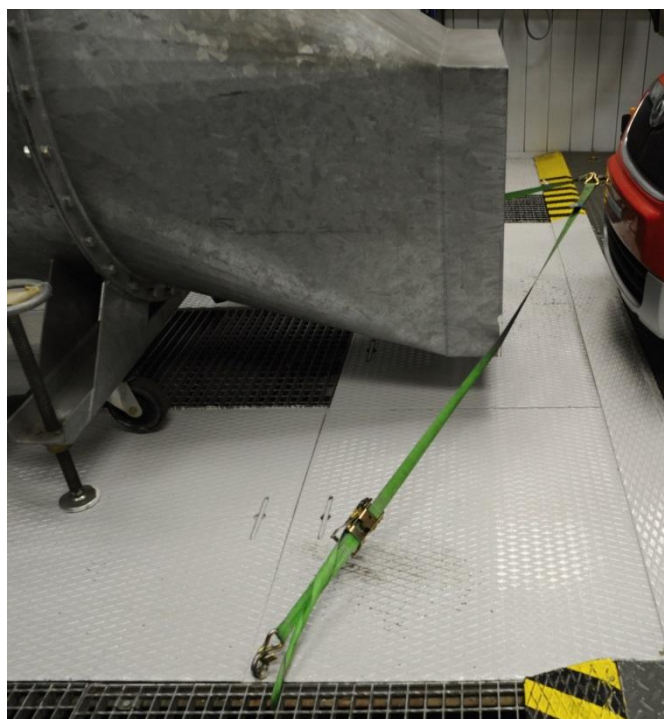
Graf průběhu teplot v době provedených měření



Graf 11: průběh teploty v boxu v době porovnávacího měření

6.2.2.3 Vliv kotvení vozu na nejistotu měření

Pro ustavení vozu na dynamometry je nutné vůz z hlediska bezpečnosti řádně upevnit. Dojde k zatažení ruční brzdy, upevnění zadních kol do úchytů a upevnění vozu za přední tažné oko v nárazníku, které zabraňuje bočnímu posunu vozu na dynamometru. V emisní laboratoři běžně provádějí toto upevnění pomocí stahovacího pásu, jak je vidět na obr. 8.



obr. 8: uchycení vozu při zkoušce

Toto upevnění se poprvé provede při kalibraci a nastavení dynamometru. Následně je vůz odpoután, odstaven do kondičního prostoru a po uplynutí doby stanovené normou je opět upevněn.

Při utahování upevňovacího pásu je vůz mírně přitahován ve svislém směru k ose válce dynamometru. Tím pádem je zřejmé, že přitažením pásu mohou vznikat nežádoucí pasivní odpory vozidla. Takto vzniklé pasivní odpory vnáší do měření chybu a to především pokud by nebylo utažení pásu stejné při nastavování odporové síly dynamometru a následně při samotném testu.

Uchycení vozu při emisním testu není předpisem řešeno, a proto není možné zcela jednoznačně určit přesnou hranici maximálních okrajových podmínek. Pro stanovení vlivu upoutání vozu na nejistotu výsledku jsem provedl různá měření na jednom voze při nastavení různých okrajových podmínek. Z výsledků jsem vyvodil, že největšího vlivu bylo dosaženo při následující kombinaci. V prvním testu došlo k utažení pásů jak při kalibraci, tak při samotném emisním testu. Při druhé zkoušce došlo ke stejnému utažení při kalibraci, avšak již k úplnému opomenutí dotažení při testu. Tyto výsledky jsem také použil pro výpočet nejistoty.

Další kombinací byl volný pás při kalibraci a dotažený při testu. Tento druh chyby však způsobil nesplnění závěrečného doběhu, a proto jsem jej již nevyhodnocoval. Další dvě možné zvolené kombinace byly volný pás jak při kalibraci, tak při testu a opačně, utažený pás při kalibraci i při testu. Vzhledem k možnosti dynamometru eliminovat pasivní odpory vozu, jsem předpokládal, že výsledek těchto dvou testů bude téměř totožný. Měření tuto premisu potvrdilo. Zajímavé však bylo zjištění, že v první fázi testu byla větší naměřená hodnota CO₂ v případě druhé varianty, avšak v druhé fázi testu v případě první varianty. Usuzuji, že vzniklé pasivní odpory ovlivňují pouze složku valivých odporů a tím pádem se nemění s rostoucí rychlostí.

Technik provádějící upevňování vozu se běžně snaží utáhnout pás vždy stejnou silou. Předpokládám, že běžná rozlišovací schopnost člověka při stanovení síly v průběhu utahování pásu není ideální a pohybuje se s určitou pravděpodobností v určitém rozsahu. Proto jsem pro tento vliv nejistoty vybral lichoběžníkové rozdělení.

Výsledky emisních testů jsem uvedl do tabulky (19). Ve stejné tabulce je také uvedena maximální výsledná odchylka doběhu, z níž je patrné, že test může být považován za platný, neboť byla splněna podmínka 5 %. V grafu (12) je uvedeno porovnání rozdílu doběhů při různé síle dotažení pásů v testu. Jedná se o závislost procentuální odchylky času od silničního modelu na zrychlení vozidla. Při větším dotažení pásů vzrostly odpory vozu a tím pádem došlo ke zkrácení doběhových časů. Z výsledků těchto dvou porovnávacích měření jsem vypočetl rozsah odchylek ΔZ_{max} a dělením této hodnoty koeficientem pro lichoběžníkové rozdělení 2,19, jsem vypočetl nejistotu měření způsobenou vlivem ukotvení vozu. (viz rovnice 56 až 60). Výsledky nejistot jsou uvedeny v tabulce 18. V tomto případě jsou shodné, neboť i okrajové podmínky jsou v tomto případě totožné.

Nejistota způsobená vlivem ukotvení vozu				
	$\pm \Delta Z_{max}$ [g/km]	χ	u_{b6} [g/km]	u_{b6} [%]
EHK	1,9461	2,19	0,8886	0,3745
LAB				

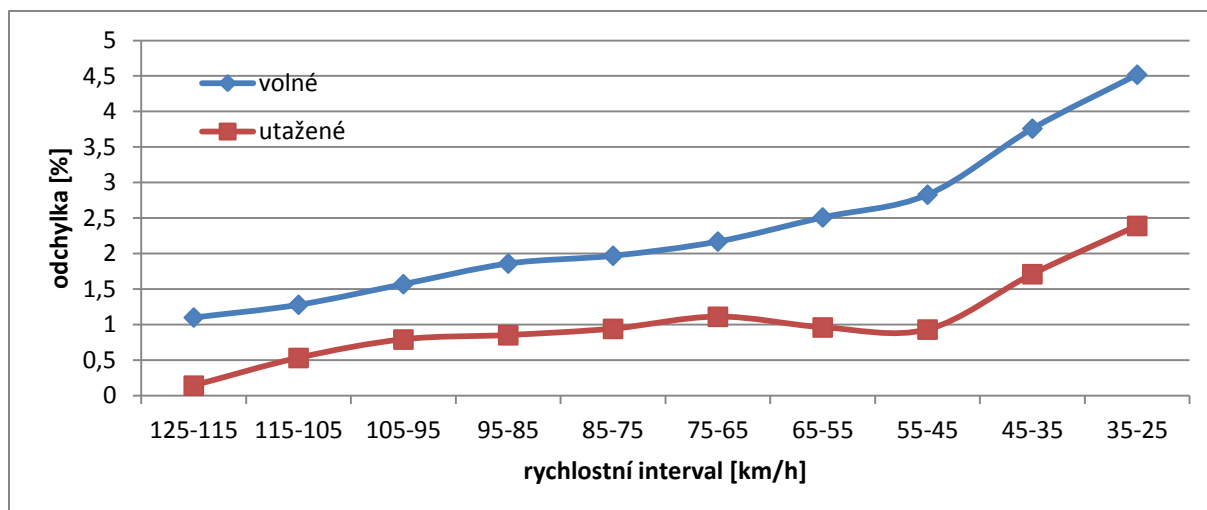
Tabulka 18: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem různého ukotvení vozu

Výsledky emisních testů

Výsledky emisí CO ₂ ovlivněné kotvením vozu				
	kalibrace	test	Doběhy [%]	CO ₂ [g/km]
Měření č. 3	utažené	utažené	2,39	239,2017
Měření č. 4	utažené	volné	4,52	235,3096

Tabulka 19: výsledky emisních testů pro různé způsoby uchycení vozu

Graf odchylky odporové síly dynamometru



graf 12: závislost odchylky verifikačního doběhu na zrychlování vozu

Výpočet nejistoty měření CO₂ způsobené vlivem kotvení vozu

$$M_{CO_2_{6max}} \left[\frac{g}{km} \right] = 239,2017 \quad (56)$$

$$M_{CO_2_{6min}} \left[\frac{g}{km} \right] = 235,3096 \quad (57)$$

$$\Delta Z_{max_6} = \frac{239,2017 - 235,3096}{2} = \frac{3,8921}{2} = 1,9460 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (58)$$

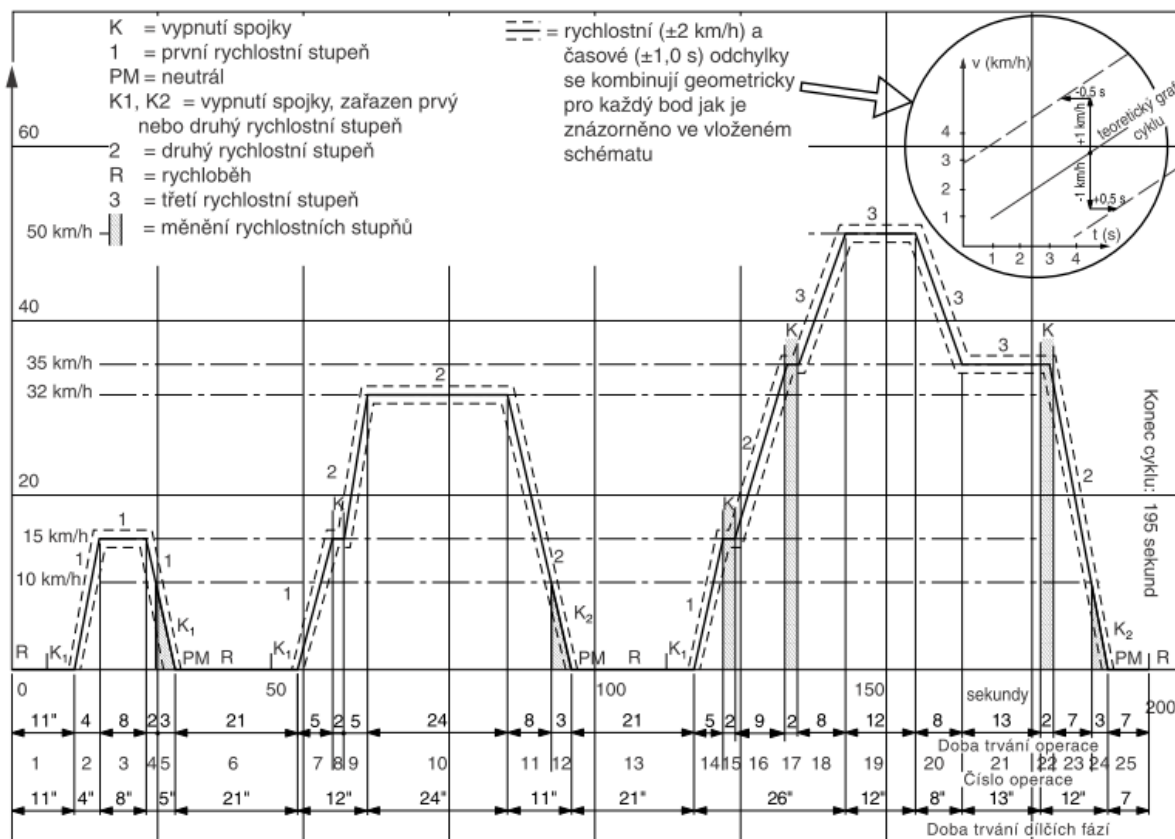
$$u_{b6} = \frac{1,9460}{2,19} = 0,8886 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (59)$$

$$u_{b6} = \frac{0,8886}{237,2557} \cdot 100 = 0,3745 [\%] \quad (60)$$

6.2.2.4 Vliv řidiče a způsob jízdy v emisním testu

V kapitole 3 jsem uvedl emisní jízdní cyklus platný pro evropské normy. Zkouška je rozdělena na dva dílčí cykly - městský cyklus a mimoměstský cyklus. Teoretická vzdálenost v městském cyklu je 4,052 km a v mimoměstském 6,955 km. Celkem pak 11,007.

Na obr. 9 je znázorněn průběh testu, tak jak je definován normou EHK



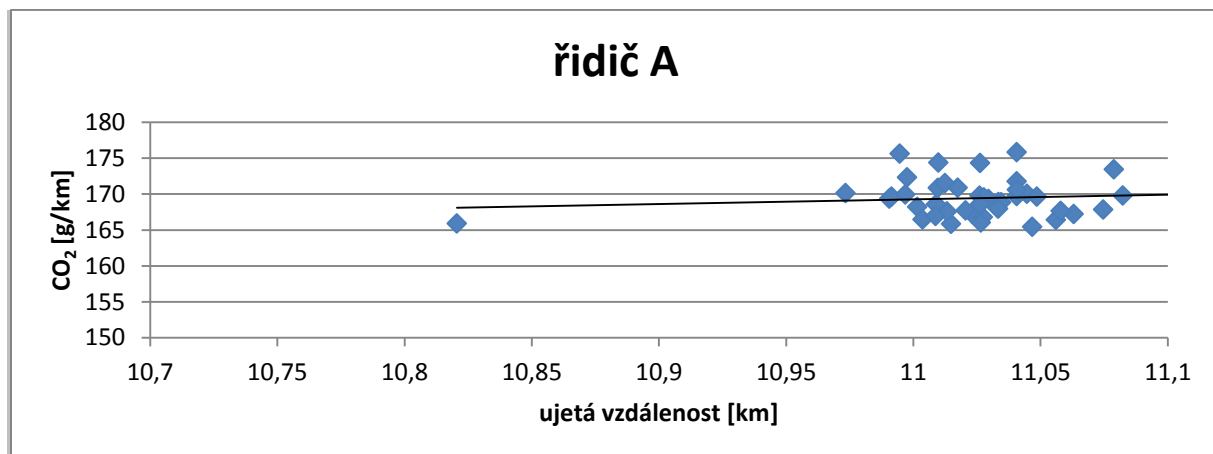
obr. 9: Evropský jízdní cyklus dle normy EHK 83

Je dovolena odchylka ± 2 km/h měřené rychlosti od teoretické rychlosti při zrychlování, při konstantní rychlosti a při zpomalování za použití brzd vozidla. [10]

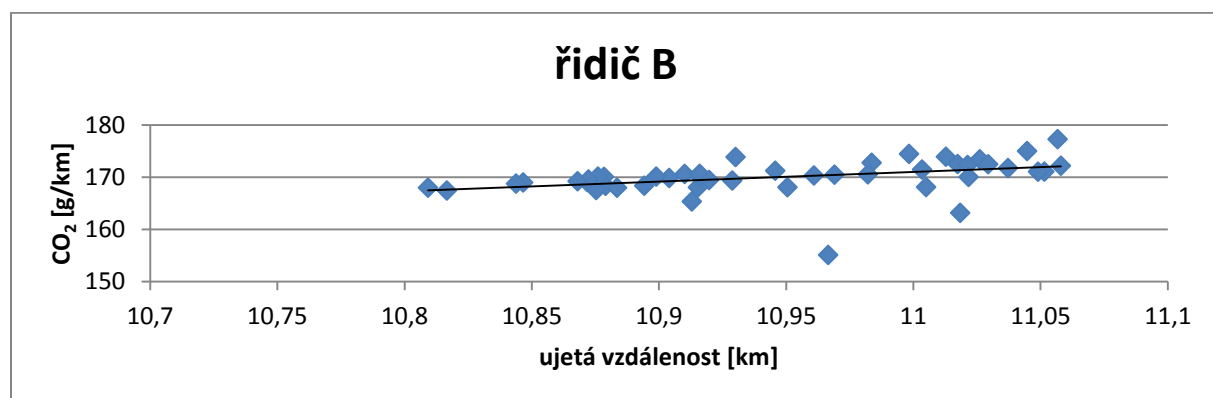
Dovolené odchylky času jsou $\pm 1,0$ s. Výše uvedené dovolené odchylky platí rovněž pro začátek a pro konec každé periody řazení rychlostních stupňů pro městský cyklus (část 1) a pro operace č. 3, 5, 7 mimoměstského cyklu (část 2). Je nutno poznamenat, že povolený čas dvou sekund zahrnuje dobu pro řazení rychlostního stupně, a jestliže je to potřebné, určitou časovou vůli pro napojení se na průběh cyklu.[10]

Tato povolená odchylka způsobí odchylku mezi teoretickou a skutečnou ujetou vzdáleností v testu. Toto můžeme také pozorovat v provedených měřeních. Ze všech 105 emisních testů poskytnutých emisní laboratoří vykazovalo nejmenší ujetou vzdálenost 10,9271 a největší 11,17119 což je rozdíl 442,09 m. Jelikož maximální a minimální hodnota není dostatečně vypovídající, neboť se může jednat o náhodu, bylo nutné hlouběji analyzovat trendy jednotlivých řidičů. Pro tuto analýzu jsem opět použil výsledky z korelačního vozu.

Testy jsem rozdělil na dvě skupiny podle řidičů. Tyto hodnoty jsem pak vložil do grafů 13 a 14.



graf 13: vyhodnocení ujeté vzdálenosti pro řidiče A



graf 14: vyhodnocení ujeté vzdálenosti pro řidiče B

Při vyhodnocování výsledků najetých km jednotlivých řidičů jsem vypořádal zřetelnou tendenci řidičů k určitému typickému stylu jízdy. Jeden z řidičů označený jako řidič A měl tendenci pohybovat se v jednom určitém poli km v testu, zatímco řidič B měl svoje pole rovnoměrněji rozloženo po v rámci předepsané hranice dle EHK. Měření skutečné vzdálenosti je sice měřeno s velkou přesností a jeho vlastní vliv v otázce nejistot zanedbávám, ale otázkou zůstává, jestli kratší vzdálenost ujetá v testu skutečně odpovídá také méně vyprodukovanému množství CO₂. Rozhodl jsem se proto určit vliv najetých km v testu na výslednou hodnotu CO₂.

Provedl jsem proto porovnání dvou měření. U jednoho měření došlo záměrně k najetí nízkého počtu km na dolní toleranci, v druhém testu naopak k záměrnému najetí počtu km na horní toleranci. V jednom testu došlo v první fázi k ujetí 3,90521 km a v druhém testu 4,13964 km. Rozdíl je 234 m. Výsledky těchto emisních testů jsem uvedl v tabulce 21. V uvedeném případě nerozlišuji předpis EHK a LAB neboť rozdíl v najetých km vypořádaný u 105 skutečných měření se v podstatě rovná možnému rozdílu, jenž umožňuje EHK. Předpokládám normální rozdělení. V tomto případě je důležité upozornit, že tento vliv může být vnesen do výsledné nejistoty v plné míře, pokud by docházelo k rotaci řidičů. V tom případě by bylo nutné použít tzv. binomické rozdělení. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 20.

Nejistota způsobená vlivem ujeté dráhy				
	$\pm \Delta Z_{max}$ [g/km]	χ	u_{b7} [g/km]	u_{b7} [%]
EHK	1,2438	3	0,4146	0,1765
LAB				

Tabulka 20: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem různé ujeté dráhy

Výsledky emisních testů

Výsledky emisí CO ₂ ovlivněné ujetou dráhou		
test	Dráha [km]	CO ₂ [g/km]
Měření č. 5	3,90521	236,1866
Měření č. 6	4,13964	233,6989

Tabulka 21: výsledky emisních testů pro okrajové podmínky ujeté dráhy

Výpočet nejistoty měření CO₂ způsobený vlivem ujeté dráhy

$$M_{CO_2_{max}} = 236,1866 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (61)$$

$$M_{CO_2_{min}} = 233,6989 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (62)$$

$$\Delta Z_{max_7} = \frac{236,1866 - 233,6989}{2} = \frac{2,4877}{2} = 1,2438 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (63)$$

$$u_{b7} = \frac{1,2438}{3} = 0,4146 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (64)$$

$$u_{b7} = \frac{0,4146}{234,9428} \cdot 100 = 0,1765 [\%] \quad (65)$$

6.2.2.5 Vliv stylu jízdy řidiče

Vliv najetých km v emisním testu na výslednou nejistotu měření, která je způsobeno řidičem, je popsán a vypočten v předešlé kapitole. Další chybou, která může být vnesena do výsledku, je vliv jízdního stylu daného řidiče. V případě nezkušeného řidiče může dojít k tomu, že jízda v emisním testu nebude plynulá. V tom případě by mohlo docházet ke zvýšené produkci výfukových plynů. Sice předpokládám, že u většiny důležitých emisních testů jsou využíváni pouze zaškolení řidiči s praxí, jejichž jízdní projev je vždy téměř shodný, ale přesto jsem se rozhodl této problematice věnovat a její vliv zanést do celkové nejistoty. Nechal jsem na jednom voze porovnat vliv jízdního stylu na výslednou hodnotu CO₂.

První emisní test zajel tzv. „zkušený řidič“, který má za sebou několikaletou praxi a jehož jízdní styl je ustálený. Druhý emisní test byl zajet v režimu „začátečníka“. Na obr. 10 je zobrazeno porovnání těchto dvou jízdních stylů. Šedivé pole značí předepsanou rychlost. Tmavě červená čára skutečnou rychlost „zkušeného“ řidiče a tmavě zelenou čarou pak skutečná rychlost řidiče „začátečníka“. Z jízdního projevu je vidět častá oscilace rychlosti nezkušeného řidiče v přechodových režimech. Výsledky emisních testů jsou uvedeny v tabulce (23). Tím jsem získal nutné krajní hodnoty.

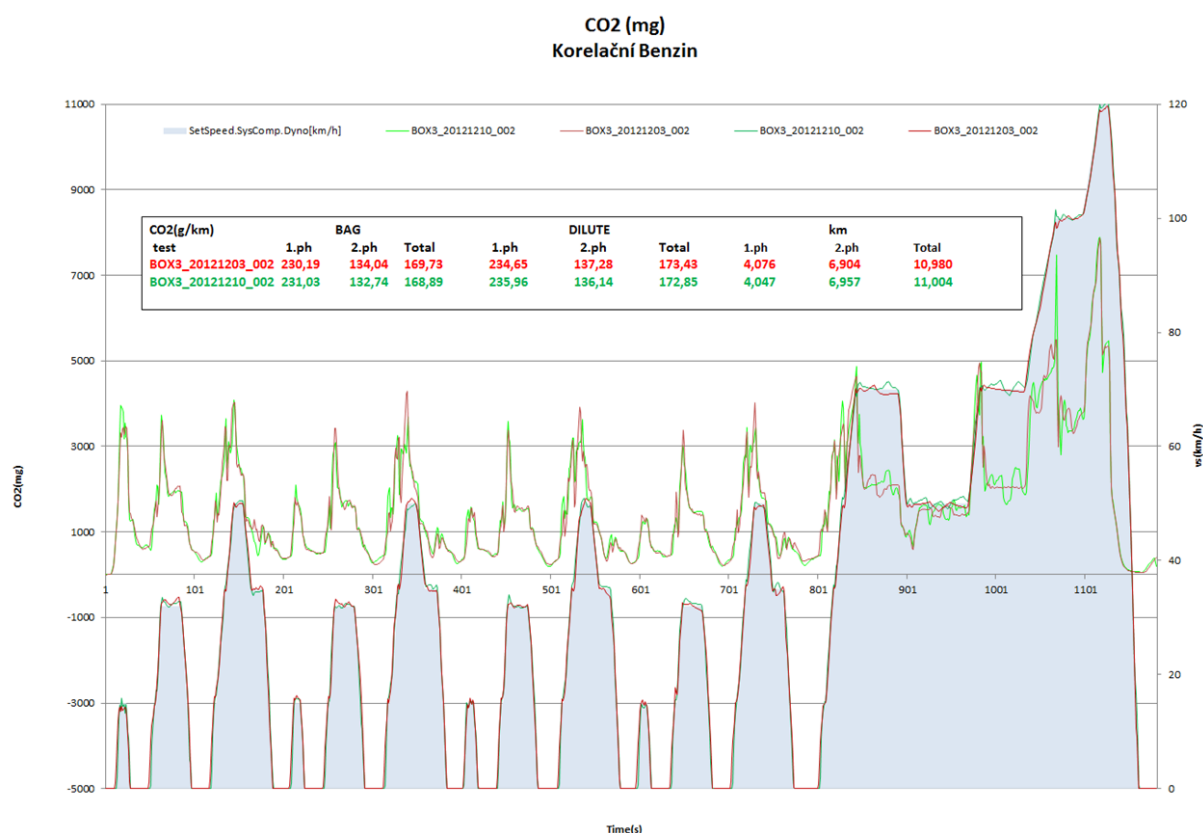
Nejsem schopen s určitostí stanovit, které rozdělení pravděpodobnosti je pro tento faktor nejvhodnější. Teorie nejistoty měření však říká, že v případě nejistoty je možné použít rovnoměrné rozdělení pro vyjádření pravděpodobnosti. Proto jsem v tomto případě použil uvedené rozdělení. Dosazením těchto hodnot do rovnice (24) jsem získal nejistotu pro zmíněný vliv (viz rovnice 69 a 70).

Výsledky jsou uvedeny v tabulce (22).

Nejistota způsobená vlivem jízdního stylu				
	$\pm \Delta Z_{\max}$ [g/km]	χ	u_{b8} [g/km]	u_{b8} [%]
EHK				
LAB	0,4201	$\sqrt{3}$	0,2424	0,0009

Tabulka 22: Výsledné hodnoty nejistoty způsobené vlivem různých jízdních stylů

Porovnání rychlosti jízdních stylů



obr. 10: porovnání rychlosti jízdních stylů

Výsledky emisních testů při porovnání stylu dvou řidičů

Výsledky emisí CO ₂ ovlivněné stylem jízdy		
test	řidič	CO ₂ [g/km]
Měření č. 8	zkušný	231,0301
Měření č. 9	nezkušný	230,1900

Tabulka 23: výsledky testů pro různé jízdní styly

Výpočet nejistoty měření CO₂ způsobený vlivem jízdního stylu řidičů

$$M_{CO_2_{8max}} = 231,0301 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (66)$$

$$M_{CO_2_{8min}} = 230,1900 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (67)$$

$$\Delta Z_{max_8} = \frac{231,0301 - 230,1900}{2} = \frac{0,8401}{2} = 0,4200 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (68)$$

$$u_{b8} = \frac{0,4200}{\sqrt{3}} = 0,2424 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (69)$$

$$u_{b8} = \frac{0,2424}{230,31} \cdot 100 = 0,0009 [\%] \quad (70)$$

6.2.2.6 Vliv pneumatik

Vzhledem k 100% kalibraci vozů na válcích lze eliminovat vlivy pneumatik (typ pneumatik, velikost, opotřebení atd.).

6.2.3 Celková nejistota získaná metodou typu B

Celkem jsem vyhodnotil osm faktorů ovlivňujících chybu výsledku. Výslednou nejistotu získanou metodou typu B jsem vypočetl dosazením všech osmi výsledků do rovnice (25).

$$\begin{aligned}
 u_b &= \sqrt{u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2 + u_{b5}^2 + u_{b6}^2 + u_{b7}^2 + u_{b8}^2} = \\
 &= \sqrt{0,2833^2 + 0,1^2 + 0,1667^2 + 0,1348^2 + 0,2375^2 + 0,3745^2 + 0,1765^2 + 0,0009^2} = \\
 &= 0,6521 \% \qquad (71)
 \end{aligned}$$

Uvedené výsledky jednotlivých nejistot včetně celkové nejistoty získané metodou typu B jsem vložil do tabulky (24). Z výsledků je patrné, že v moderní laboratoři je dosahováno přibližně poloviční nejistoty oproti výsledku, který by byl umožněn předpisem EHK 83. Pro další výpočty budu používat už jen nejistotu běžné laboratoře.

Celková nejistota získaná způsobem typu B				
			EHK %	LAB %
Laboratorní zařízení	ředění výfukových plynů	u_{b1}	0,6667	0,2833
	Přesnost analyzátor	u_{b2}	0,6667	0,1000
	Přesnost kalibračního plynu	u_{b3}	0,6667	0,1667
Vliv přípravy	Nastavení dynamometru	u_{b4}	0,2695	0,1348
	Teplota v boxu	u_{b5}	0,6253	0,2375
	kotvení vozu	u_{b6}	0,3745	0,3745
Vliv operátora	Vliv najetých km	u_{b7}	0,1765	0,1765
	vliv řidiče	u_{b8}	0,0009	0,0009
u_b [%]			1,4030	0,6521

Tabulka 24: souhrnná tabulka projednotlivé faktory nejistoty typu B

6.3 Kombinovaná nejistota měření emisí

Vzhledem k tomu, že pro nejistotu stanovenou metodou A není možné získat dostatečné množství měření při zachování podmínek opakovatelnost a že tento typ nejistoty se týká především samotného měření určitého vzorku, je pro celkové vyhodnocení použita metoda typu B.

$$u = u_b = 0,6521 [\%] \quad (72)$$

6.4 Rozšířená nejistota měření emisí

Rozšířenou nejistotu jsem získal dosazením do rovnice (27) při použití správného koeficientu k. V tabulce (25) jsou uvedeny dva výsledky. Jeden pro pravděpodobnost pokrytí 95 % a druhý pro 99,7 %.

Rozšířená nejistota měření emisí v moderní emisní laboratoři		
Pravděpodobnost pokrytí	koeficient	Výsledek [%]
95%	2	1,3042
99,7%	3	1,9563

Tabulka 25: výsledné hodnoty pro rozšířenou nejistotu měření

Tím jsem získal výslednou hodnotu pro rozšířenou nejistotu měření emisí na válcovém dynamometru v procentech.

$$U = 1,9563 \%$$

Pro reprezentativní hodnotu 100 g/km je výsledek s pravděpodobností pokrytí 99,7 %:

$$100,000 \pm 1,957 \text{ g/km}$$

6.5 Ověření výsledku na souboru emisních testů

V průběhu roku jsou v laboratoři měřeny tzv. korelační vozy, které neprocházejí normálním provozem a slouží pouze k provádění kontrolních emisních testů (1x týdně/ měřicí box). Porovnáním výsledků těchto testů se ověřuje stabilita celého měřicího systému v čase. Tyto vozy se rovněž využívají na porovnání s jinými zkušebnami. Z emisní laboratoře jsem získal celkem 105 testů provedených v letech 2012 a 2013. Tyto testy byly všechny provedeny na jednom voze se spalovacím zážehovým motorem. Variabilitou byly faktory měřicích boxů, řidičů, stavu km na voze a především čas. Těchto 105 testů jsem eliminoval pouze na jeden měřicí box a pouze na jednoho řidiče. Získal jsem tím celkem 37 testů. U

těchto 37 testů jsem vyhodnotil výběrový rozptyl S_y^2 a výběrovou směrodatnou odchylku S_y , která charakterizuje rozptýlení naměřených hodnot kolem výběrového průměru $\bar{x}$

Výběrový průměr jsem získal dosazením do rovnice (10).

$$\bar{x} = \frac{1}{37} \sum_{i=1}^n x_i = 228,8201 \frac{g}{km} \quad (73)$$

Výběrový rozptyl S_y^2 jsem vypočetl vztahem (11) a směrodatnou odchylku S_y vztahem (12). Kde x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty. Z důvodu velmi citlivých údajů není možné tyto výsledky v této práci uvádět.

$$S_y^2 = \frac{1}{(36)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - 228,8201)^2 \frac{g}{km} \quad (74)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{(36)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - 228,8201)^2 \frac{g}{km}} \quad (75)$$

$$S_y = 4,3831 \frac{g}{km} \quad (76)$$

Výsledek v g/km převedeme na %.

$$S_y = \frac{4,3831}{228,8201} \cdot 100 = 1,9155 \% \quad (77)$$

Vypočtená směrodatná odchylka naměřených hodnot v emisní laboratoři v letech 2012 a 2013 odpovídá vypočtené rozšířené nejistotě měření U. To znamená, že více než 68,2 % naměřených hodnot leží v intervalu nejistoty.

Pro vyhodnocení, zdali mezi získanými výsledky není výsledek zatížený hrubou chybou vymykající se určené nejistotě, použiji tzv. Grubbsův test.

Nejprve jsem stanovil nejmenší a největší hodnotu výsledku v souboru měření a aritmetický průměr.

$$CO_2^{Grubb\ min} = 221,6542 \frac{g}{km} \quad (78)$$

$$CO_2^{Grubb\ max} = 240,3047 \frac{g}{km} \quad (79)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{37} \sum_{i=1}^n x_i = 228,8201 \frac{g}{km} \quad (80)$$

Následně jsem vypočetl koeficienty odlehlých výsledků dle teorie Grubbsova testu.

$$T_1 = \frac{\bar{x} - x_{min}}{U} \quad (81)$$

$$T_n = \frac{\bar{x} - x_{max}}{U} \quad (82)$$

Kde x_{min} a x_{max} je minimální naměřená hodnota a U je výsledná nejistota přepočtená pro daný soubor výsledků.

$$T_1 = \frac{228,8201 - 221,6542}{4,4764} = 1,6008 \quad (83)$$

$$T_n = \frac{\overline{x_{max}} - x}{4,4764} = 2,5655 \quad (84)$$

Tyto hodnoty jsem porovnal s kritickou hodnotou $T_\alpha = 2,623$ pro zvolenou hladinu významnosti 0,5.

$$T_1 = 1,6008 < 2,5655 \quad (85)$$

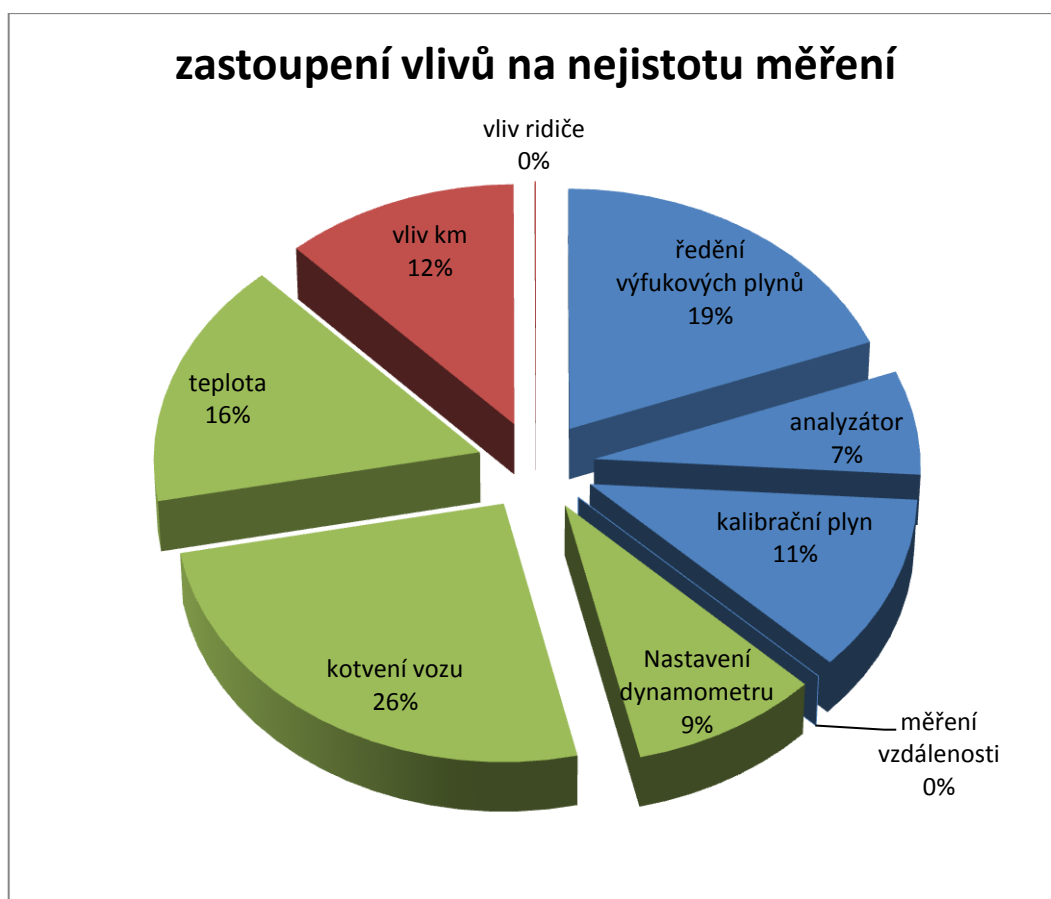
$$T_n = 2,5655 < 2,5655 \quad (86)$$

Z výsledků v rovnicích (85) a (86) jsem zjistil, že žádný výsledek z 37 získaných měření není považován za odlehlý vzhledem k získané nejistotě a zvolené hladině významnosti.

6.6 Relativní porovnání zdrojů nejistot

Pro názornost a celkovou představu jsem uvedl procentuální zastoupení jednotlivých vlivů na nejistotu měření stanovených v kapitole 6.2 v grafu 15.

Graf jsem barevně rozdělil dle logiky kapitoly 6.2. Zelená barva zobrazuje vliv přípravy měření. Modrá barva značí vliv měřicího zařízení a barvou červenou je zobrazen faktor operátora. Z grafu je patrné, že ze tří uvedených podskupin má nadpoloviční vliv příprava měření (51 %), dále pak měřicí zařízení z 37% a vliv operátora tvoří 12%. Největší vliv na vzniklou nejistotu měření má právě jeho příprava. Dle kapitoly 6.2.2. je za součást této přípravy považována kalibrace dynamometru, nastavení teploty v boxu a ukotvení vozu při zkoušce. Chybné upevnění vozu představuje celkově největší vliv na výsledek ze všech zjištěných faktorů a to okolo $\frac{1}{4}$. Eliminace tohoto faktoru by značně přispěla ke zpřesnění výsledku.



Graf 15: porovnání zastoupení jednotlivých faktorů ovlivňujících nejistotu měření

V kapitole 6.2.2.3. je popsán detailněji způsob kotvení vozu při zkoušce. Na obr. 8 je možné pozorovat, že pásy sloužící k uchycení vozu směřují v přímce, jež protíná spojnicí oka sloužícího k tažení vozu a podlahu laboratoře pod určitým úhlem. Tím pádem je vůz tlačěn určitou silou směrem dolů a je přitlačován na dynamometr. Toto je hlavní příčinou růstu odporových sil při jeho přílišném utahení. Pro snížení či případné úplné odstranění tohoto vlivu je vhodné uchycení vozu pomocí tyče s proměnnou délkou. Tato tyč je uchycena

vodorovně s podlahou a zajištěna na přesnou délku. Při jejím použití nevzniká svislá nežádoucí síla. Při použití tohoto způsobu uchycení by došlo k eliminaci uvedeného faktoru. Při vyloučení faktoru upevnění vozu z rovnice (71) by pak celková rozšířená nejistota byla 1,4192 % z původních 1,9563 %. Použití upevňovací tyče je uvedeno na obr. 11.



obr. 11: upevňovací tyč k uchycení vozu při zkoušce

Druhým největším vlivem způsobujícím výslednou chybu měření je teplota v laboratoři. Z grafu 9 je zjištěno, že teplota v normálním měřicím boxu osciluje v rozmezí $\pm 1,5$ °C. Výpočtem jsem zjistil, že vliv tohoto rozmezí způsobuje nejistotu 0,2375 % (viz kapitola 6.2.2.2. Pokud bychom snížili rozsah teploty na $\pm 0,5$ °C, snížila by se nejistota tohoto vlivu na 0,07917 %. Výpočet jsem provedl stejným způsobem jako v kapitole 6.2.2.2. Nejprve jsem do výsledné rovnice regrese (45) vložil krajní hodnoty teploty 21,5 °C a 22,5 °C. Tím jsem získal maximální a minimální vypočtenou hodnotu CO₂ pro tyto optimalizované krajní hodnoty. Výpočet je uveden rovnicí (87) a (88). Z těchto hodnot jsem rovnicí (89) získal rozsah. Dosazením výsledné hodnoty z rovnice (89) a koeficientu pro lichoběžníkové rozdělení do rovnice (24) jsem vypočetl nejistotu měření pro užší rozsah nastavené teploty v g/km, rovnicí (91) pak v %.

$$M_{CO_2_{5max}}^{opt} \left[\frac{g}{km} \right] = 0,8383 \cdot (21,5) + 260,26 = 242,2301 \quad (87)$$

$$M_{CO_2_{5min}}^{opt} \left[\frac{g}{km} \right] = 0,8383 \cdot (22,5) + 260,26 = 241,3915 \quad (88)$$

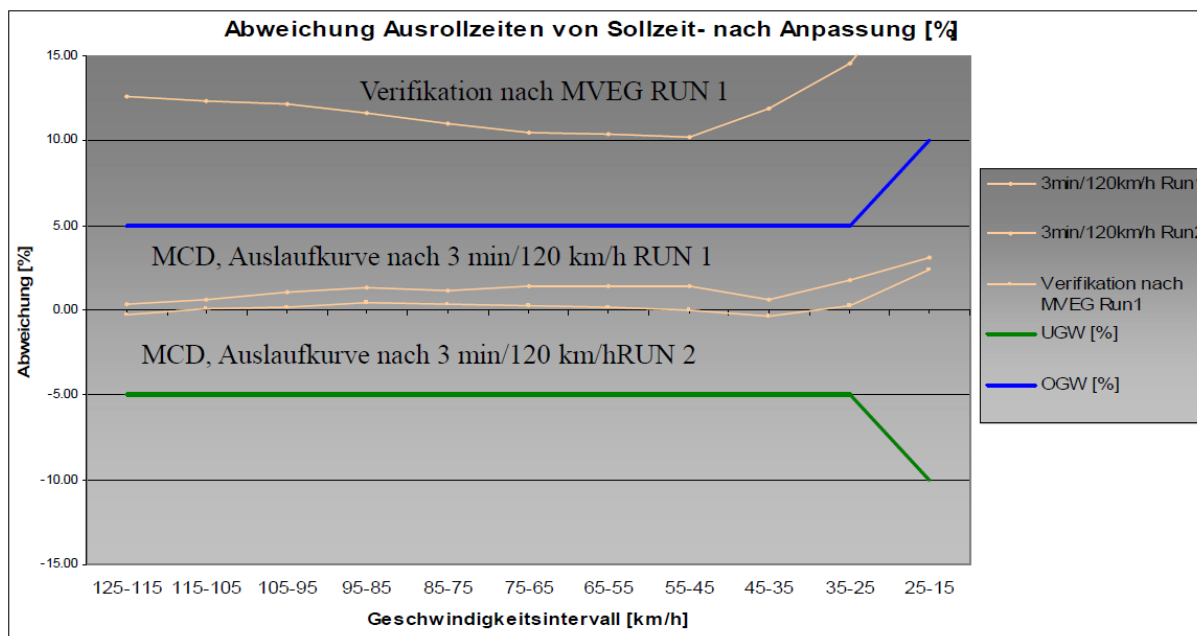
$$\Delta Zmax_5^{opt.} = \frac{242,2301 - 241,3915}{2} = \frac{0,8386}{2} = 0,4193 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (89)$$

$$u_{b5}^{opt} = \frac{0,4193}{2,19} = 0,1914 \left[\frac{g}{km} \right] \quad (90)$$

$$u_{b5}^{opt} = \frac{0,1914}{241,8108} \cdot 100 = 0,0791 [\%] \quad (91)$$

Tím je dokázáno, že zpřesnění o pouhý stupeň zlepší nejistotu tohoto faktoru o cca 70 %. Přesnější udržení teploty je technicky možné v klimakomoře. Důkazem je graf 11. Ovšem používání přesnější vzduchotechniky či klimatizace je velmi finančně náročné a tím pádem pro běžný emisní test nepoužívané.

Třetím faktorem z přípravy měření je nastavení dynamometru. Tato chyba tvoří z celkové nejistoty typu B 9 %. Přesnost kalibrace tedy nevnáší do měření dominantní chybu. Přesné nastavení odporu dynamometru se v průběhu mého měření ukázalo jako poměrně složitá kapitola, jež by vyžadovala hlubší samostatné zkoumání. Při pokusech o co možná největší zpřesnění v průběhu procesu kalibrace válců jsem narazil na několik zajímavých dílčích zjištění. Např. při příliš dlouhém ohřevu vozu před kalibrací, došlo sice k nastavení odporové křivky dynamometru, ale po finální verifikaci (doběhu) nebyla splněna podmínka hranice ± 5 %. Na obr. 12 je uveden příklad verifikační křivky, ležící již mimo uvedenou hranici. Test by byl neplatný. Tento faktor by vyžadoval mnohem větší počet měření, než bylo z časových důvodů umožněno vykonat.



obr. 12: Zobrazení verifikačního ověření kalibrace dynamometru

Nejistota způsobená měřicím zařízením je daná výrobcem a její zpřesnění by bylo možné pouze při použití přesnějšího zařízení.

Vliv řidiče se dá eliminovat především jeho zaškolením a zkušeností. Ve většině emisních laboratoří je zvykem, že jeden dynamometr je obsluhován jedním řidičem. Za tohoto předpokladu by byla tato chyba v rámci jednoho boxu eliminována.

Vliv měřicího zařízení či kalibračního plynu je otázkou zpřesnění nejistot používaného zařízení.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo kvantitativní zhodnocení vlivu jednotlivých faktorů na výsledky emisních testů, stanovení nejistoty celého měřicího řetězce a identifikování dominantních vlivů, jež se podílejí na výsledné nejistotě.

V teoretické části jsem provedl literární rešerši, která zahrnuje stručný úvod do problematiky škodlivých látek produkovaných spalovacími motory (Kapitoly 1 a 2) a legislativní rámec, jež se touto oblastí zabývá (Kapitola 3). Dále je zde podrobně popsána metodika emisních testů dle současných evropských standardů (Kapitola 4) a způsob stanovení nejistoty měření dle GUM [12] (Kapitola 5).

V praktické části diplomové práce (Kapitola 6) jsem pak aplikoval postupy a informace získané rešerší odborné literatury. Nejistota typu A je nejistotou, kterou v první řadě ovlivňuje měření samotné, s počtem měření klesá, a proto se týká konkrétního měření emisí. Vzhledem k povaze a složitosti emisního testu není možné provést dostatečné množství testů při dodržení podmínky opakovatelnosti. Z tohoto důvodu jsem vyhodnotil použití metody typu A jako nevhodné. Zaměřil jsem se na metodu typu B. Ke stanovení nejistoty metodou B, jsem provedl nejprve podrobný rozbor celého procesu měření CO₂ a vytipoval hlavní zdroje nejistot. Poté jsem navrhl a s pomocí personálu emisní laboratoře realizoval několik cílených experimentů, na jejichž základě jsem vypočetl jednotlivé dílčí nejistoty i celkovou nejistotu metodou B. Provedl jsem výpočet jednak při uvážení variability ovlivňujících faktorů v plné šíři umožněné předpisem EHK 83, jednak v (užším) rozmezí, jež je běžně dosahováno v moderně vybavené emisní laboratoři. V závěru jsem vypočetl rozšířenou standardní nejistotu, kterou považuji za celkovou nejistotu měření CO₂ v dané Emisní laboratoři.

Celková rozšířená standardní nejistota stanovení CO₂ činila při pravděpodobnosti pokrytí 99,7% cca 2%. V případě variability ovlivňujících veličin v plném rozsahu umožněném předpisem by nejistota byla téměř dvojnásobná. Toto je nutné uvážit při porovnávání výsledků z různých laboratoří. Ověřením výsledné nejistoty na reprezentativním vzorku emisních testů jsem potvrdil správnost výpočtu.

Pomocí metody B jsem kromě celkové nejistoty získal i informaci o její struktuře. Z hodnot jednotlivých dílčích nejistot jsem mohl posoudit jejich relativní podíl na celkové nejistotě. Více než polovina výsledné nejistoty je způsobena přípravou vozu na měření a podmínkami v měřicím boxu (kotvení vozu, nastavení dynamometru, teplota). Dominantní zdroj nejistoty pak představuje proces uchycení vozu na dynamometru. Tento zdroj jsem doporučil eliminovat použitím kotvicí tyče, která je dnes již nabízena výrobcí vybavení pro emisní zkušebny. Stejně tak zpřísnění krajních limitů pro teplotu v měřicím boxu by zlepšila přesnost měření. Přínos tohoto opatření jsem posoudil v kapitole 6. V tomto případě by však finanční náročnost zřejmě nebyla úměrná získané přesnosti.

8.Citovaná literatura

1. **Půlpán, Michal.** Emisní hodnoty motorů. *Bakalářská práce*. Praha: CVUT, Fakulta dopravní, 2012.
2. **Hromádko, J., V. Honig a P. Miler.** *Spalovací motory: Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha : Grada Publishing, a.s., 2011. 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
3. **Škoda Auto.** Učební pomůcka. *Emise výfukových plynů motorových vozidel*. Mladá Boleslav : Škoda Auto a.s., 2005.
4. **Delphi.** Worldwide Emission Standards. *Passenger Cars and Light Duty Vehicles*. Michigan : Delphi, 2012.
5. **Sajdl, Jan.** Emisní norma EURO. *www.autolexicon.net*. [Online] <http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro/>.
6. **Kunert, Radek.** Interní materiály – ŠKODA AUTO, a.s., TPC/3 – Emisní laboratoř. Mladá Boleslav : Škoda auto, 2011.
7. **DieselNet.** Cars and Light-Duty Trucks-Tier 2. *DieselNet*. [Online] 1997-2012. http://www.dieselnets.com/standards/us/ld_t2.php.
8. **DieselNet..** Cars and Light-Duty Trucks-California. *DieselNet*. [Online] 1997-2012. http://www.dieselnets.com/standards/us/ld_ca.php.
9. **DieselNet..** California: Cars: Greenhouse Gas Emissions. *DieselNet*. [Online] 1997-2012. http://www.dieselnets.com/standards/us/ca_ghg.php.
10. **Česko.** Předpis č. EHK 83. 1995.
11. **Březina, Jan.** STANOVENÍ NO A NO₂ PŘI EMISNÍCH TESTECH. *Diplomová práce*. Praha: VŠCHT, Fakulta chemicko-inženýrská , 2013.
12. **Metrology, Joint Committee for Guides in.** JCGM 100:2008, Guide to the expression of uncertainty in measurement. 2008.
13. **Miloš Vlk,** EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKA. *Experimentální mechanika*. [Online] 2003. http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium/_opory/Experimentalni_mechanika.pdf
14. **CVUT.** Nejistoty měření. *www1.fs.cvut.cz*. [Online] <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>.
15. **Ludvík Vladimír.** *Sborníky technické harmonizace*. 2005.
16. **Vyjadřování nejistot měření při kalibracích.** *Palstat s.r.o.* [Online] 2012. www.palstat.cz/download/kalibrace.

17. **Kyjov, SOŠ.** Produkty spalování uhlovodíkových paliv spalovacích motorů. *sossoukyjov*. [Online] 2006. <http://www.sossoukyjov.cz/?akce=e-studovna>.

18. **Jiří Pernikář,** Hodnocení způsobilosti kontrolních prostředků. Brno, 2012

9. Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Popis	Jednotka
ACEA	European Automobile Manufacturer's Association Evropská asociace výrobců automobilů	
ARB	Air Resources Board	
C_x	Aerodynamický odpor vozidla	
C_i	Koncentrace znečišťující látky i ve zředěném výfukovém plynu a korigovaná množstvím znečišťující látky i obsaženém v ředícím vzduchu.	ppm
C_e	Koncentrace znečišťující látky i ve zředěném výfukovém plynu	ppm
C_d	Koncentrace znečišťující látky i ve vzduchu používaném k ředění	ppm
C_{CO_2}	Koncentrace CO_2 ve zředěném výfukovém plynu	ppm
$C_{CO_2}^{amb}$	koncentrace CO_2 ve vzduchu používaném k ředění	ppm
CO	Oxid Uhelnatý	
CO_2	Oxid Uhličitý	
CVS	Constant volume sampler zařízení pro odběr konstantního množství vzorků	
d	Ujetá vzdálenost	km
DF	Faktor ředění	
EHK	Evropská hospodářská komise	
EEC	European Economic Community Evropské hospodářské společenství	
ECE	Ekonomická komise pro Evropu	
EPA	Environmental Protection Agency Agentura ochrany životního prostředí	
F^S	celková výsledná odporová síla vozidla silničního modelu	N
F^D	Celková odporová síla dynamometru	N
F_0^S	Hodnota odpovídající valivému odporu silničního modelu	N/(km/h)
F_0^D	Hodnota odpovídající valivému odporu nastavení dynamometru	N/(km/h)
F_1^S	Hodnota odpovídající odporu vzduchu silničního modelu	N/(km/h) ²
F_1^D	Hodnota odpovídající odporu vzduchu nastavení dynamometru	N/(km/h) ²
FTP	Federal Test Procedur	
GHC	Green House Gas Skleníkový plyn	
H_2	Vodík	
H_2O	Voda	
HC	Uhlovodíky	
HNO_3	Kyselina dusičná	
ISO	International Organization for Standardization Mezinárodní organizace pro normalizaci	
k	Koeficient pro pravděpodobnosti pokrytí	
LDT	Light Duty Trucks Lehké užitkové nákladní automobily	

LEV	Low emission vehicles Nízkoemisní vozidla	
MDPV	Medium-duty passenger vehicles	
MVEG	Motor Vehicle Emission Group	
M_i	Hmotnost emisí znečišťující látky	g/km
M_{CO_2}	Hmotnost emisí znečišťující látky CO_2	g/km
$M_{CO_2\min}^{EHK}$	Minimální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při lehčím nastavení odporu dynamometru dle rozsahu povoleném normou EHK	g/km
$M_{CO_2\max}^{EHK}$	Maximální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při těžším nastavení odporu dynamometru dle rozsahu povoleném normou EHK	g/km
$M_{CO_2\min}^{LAB}$	Minimální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při lehčím nastavení odporu dynamometru dle rozsahu moderní laboratoře	g/km
$M_{CO_2\max}^{LAB}$	Maximální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při těžším nastavení odporu dynamometru dle rozsahu moderní laboratoře	g/km
$M_{CO_2\min}^{EHK}$	Minimální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při minimální teplotě měření dle rozsahu povoleném normou EHK	g/km
$M_{CO_2\max}^{EHK}$	Maximální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při maximální teplotě měření dle rozsahu povoleném normou EHK	g/km
$M_{CO_2\min}^{LAB}$	Minimální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při minimální teplotě měření dle rozsahu moderní laboratoře	g/km
$M_{CO_2\max}^{LAB}$	Maximální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při maximální teplotě měření dynamometru dle rozsahu moderní laboratoře	g/km
$M_{CO_2\min}$	Minimální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při volném kotevním pásu v testu	g/km
$M_{CO_2\max}$	Maximální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při utaženém kotevním pásu v testu	g/km
$M_{CO_2\min}$	Minimální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při ujetí delší dráhy v emisním testu	g/km
$M_{CO_2\max}$	Maximální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 změřená při ujetí kratší dráhy v emisním testu	g/km
$M_{CO_2\min}$	Minimální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 při simulaci nezkušeneho způsobu jízdy v emisním testu	g/km
$M_{CO_2\max}$	Maximální hmotnost emisí znečišťující látky CO_2 při simulaci zkušeneho způsobu jízdy v emisním testu	g/km
N_2	Dusík	
NO	Oxid dusnatý	
NO _x	Oxidy dusíku	
NO ₂	Oxid dusičitý	
N ₂ O	Oxid dusný	
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus nový evropský jízdní cyklus	
O ₂	Kyslík	
PC	Passenger Car	
PM	Pevné částice	
SO ₂	Oxid siřičitý	
SO ₃	Oxid sírový	
SUV	Sport Utility Vehicles Automobil pro volný čas	

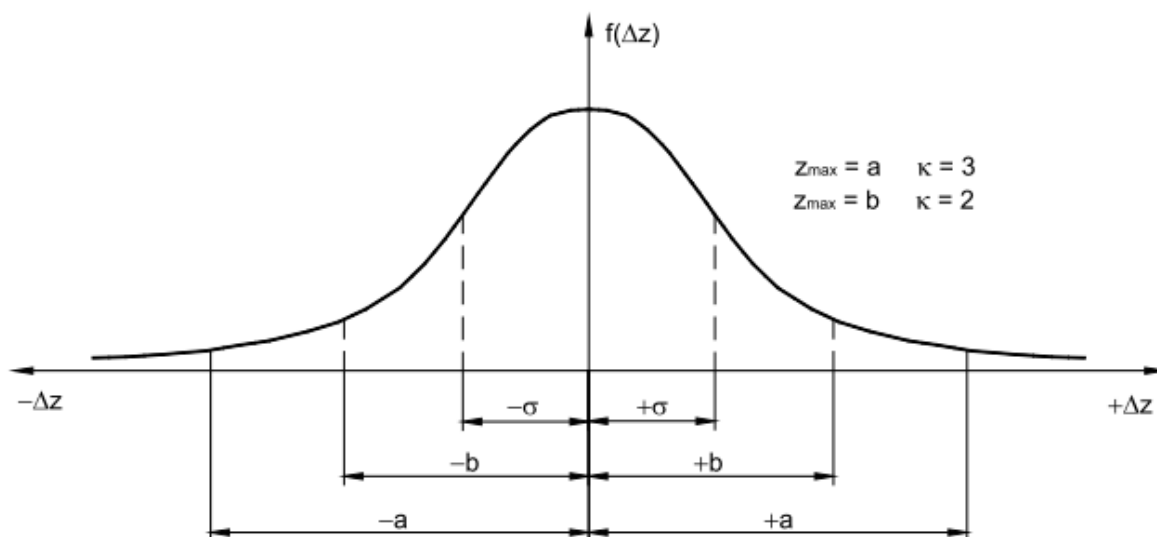
u	Kombinovaná nejistota	
U	Rozšířená nejistota	
u_A	Standardní nejistoty stanovené metodou typu A	
u_B	Standardní nejistoty stanovené metodou typu B	
u_{b1}^{EHK}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem systému ředění výfukových plynů dle rozsahu normy EHK	g/km , %
u_{b1}^{LAB}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem systému ředění výfukových plynů dle rozsahu laboratoře	g/km , %
u_{b2}^{EHK}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem povoleného rozsahu vnitřní chyby analyzátoru normou EHK	g/km , %
u_{b2}^{LAB}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem dle rozsahu vnitřní chyby analyzátoru moderní laboratoře	g/km , %
u_{b3}^{EHK}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem rozsahu koncentrace kalibračního plynu umožněného normou EHK 83.	
u_{b3}^{LAB}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem koncentrace kalibračního plynu dle rozsahu vzorku používaného v běžné moderní laboratoři	
u_{b4}^{EHK}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem kalibrace dynamometru dle rozsahu povoleného normou EHK	g/km , %
u_{b4}^{LAB}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem kalibrace dynamometru dle rozsahu běžně dosahovaného v laboratořích	g/km , %
u_{b5}^{EHK}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem teploty v laboratoři dle rozsahu povoleného normou EHK	g/km , %
u_{b5}^{LAB}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem teploty v laboratoři dle rozsahu běžně dosahovaného v laboratořích	g/km , %
u_{b6}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem kotvení vozu v testu	g/km , %
u_{b7}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem ujeté dráhy v testu	g/km , %
u_{b8}	Standardní nejistota stanovená metodou typu B pro měření CO ₂ způsobená vlivem zkušenosti řidiče	g/km, %
v	Rychlost vozidla	km/h
V^{CVS}	Objem zředěných výfukových plynů	l
V_{min}^{CVSEHK}	Minimální objem zředěných výfukových plynů dle povoleného rozsahu normy EHK	m ³
V_{max}^{CVSEHK}	Maximální objem zředěných výfukových plynů dle povoleného rozsahu normy EHK	m ³
V_{min}^{CVSLAB}	Minimální objem zředěných výfukových plynů dle rozsahu moderní laboratoře	m ³
V_{max}^{CVSLAB}	Maximální objem zředěných výfukových plynů dle rozsahu moderní laboratoře	m ³
V_h	Konstanty použité ve vztahu pro výpočet veličiny	
X_j	Přímo měřené veličiny	
Y	Vyjádření přímo měřené veličiny	
ΔZ_{max1}^{EHK}	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem systému ředění výfukových plynů dle rozsahu normy EHK	g/km

$\Delta Zmax_1^{LAB}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem systému ředění výfukových plynů dle rozsahu laboratoře	g/km
$\Delta Zmax_2^{EHK}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem povoleného rozsahu vnitřní chyby analyzátoru normou EHK	g/km
$\Delta Zmax_2^{LAB}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem dle rozsahu vnitřní chyby analyzátoru moderní laboratoře	g/km
$\Delta Zmax_3^{EHK}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem rozsahu koncentrace kalibračního plynu povoleného normou EHK	g/km
$\Delta Zmax_3^{LAB}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem rozsahu koncentrace kalibračního plynu běžně používaného v laboratořích	g/km
$\Delta Zmax_4^{EHK}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem kalibrace dynamometru dle rozsahu povoleného normou EHK	g/km
$\Delta Zmax_4^{LAB}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem kalibrace dynamometru dle rozsahu běžně dosahovaného v laboratořích	g/km
$\Delta Zmax_5^{EHK}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem teploty v laboratoři dle rozsahu povoleného normou EHK	g/km
$\Delta Zmax_5^{LAB}$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem teploty v laboratoři dle rozsahu běžně dosahovaného v laboratořích	g/km
$\Delta Zmax_6$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem kotvení vozu v testu	g/km
$\Delta Zmax_7$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem ujeté dráhy v testu	g/km
$\Delta Zmax_8$	Maximální možný rozsah změn hodnoty CO ₂ způsobený vlivem zkušenosti řidiče	g/km
ρ_i	Hustota znečišťující látky	g/l

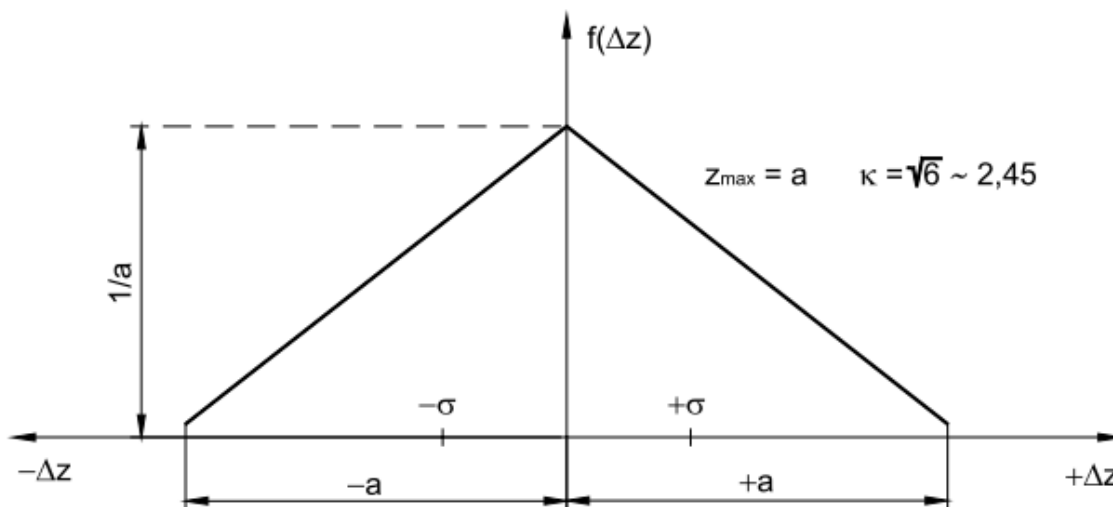
10. Seznam příloh

1. Grafická znázornění jednotlivých rozdělení dle TPM 0051-93

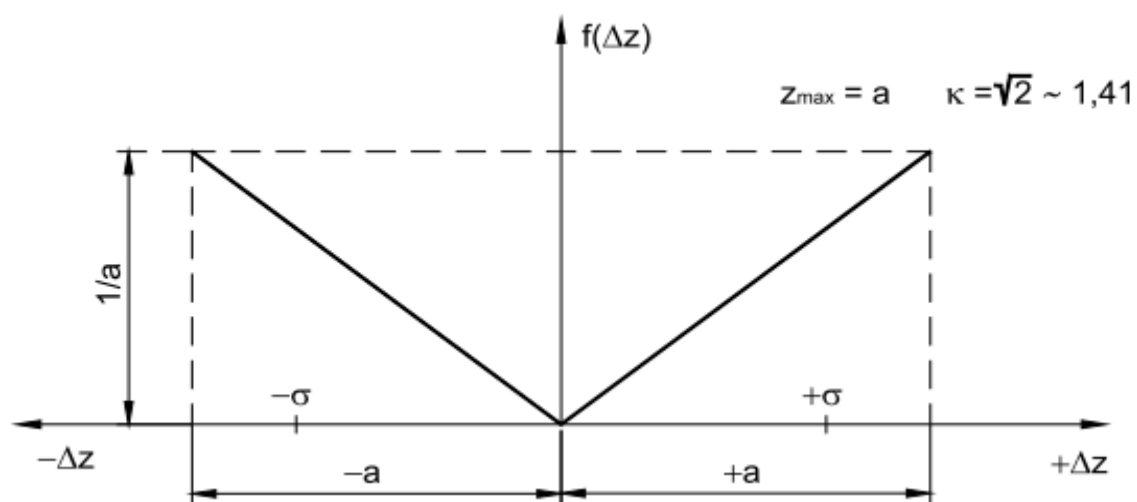
1. Příloha - Grafická znázornění jednotlivých rozdělení dle TPM 0051-93



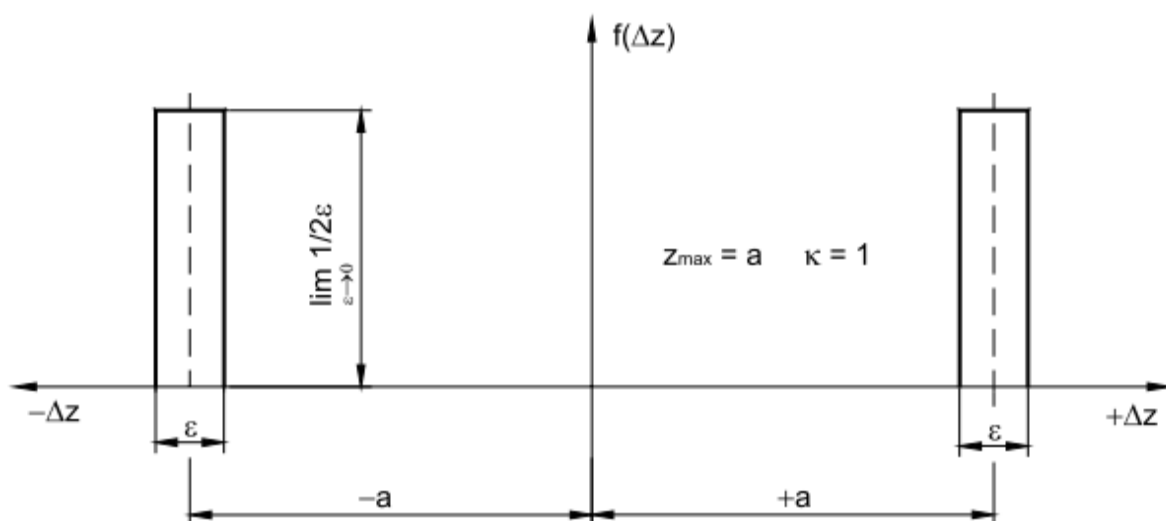
obr.1: Normální (Gaussovo) rozdělení



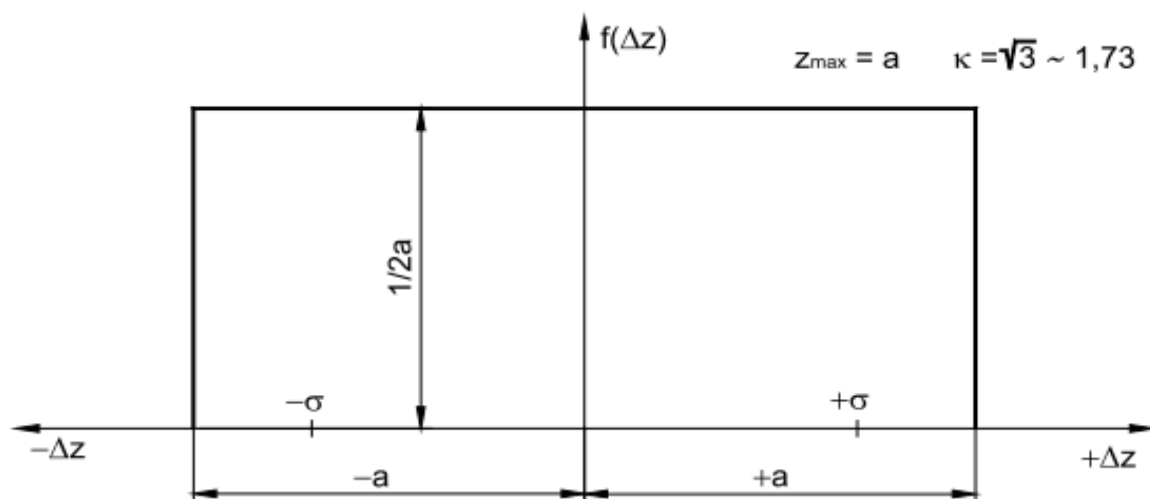
obr. 2: Trojúhelníkové rozdělení



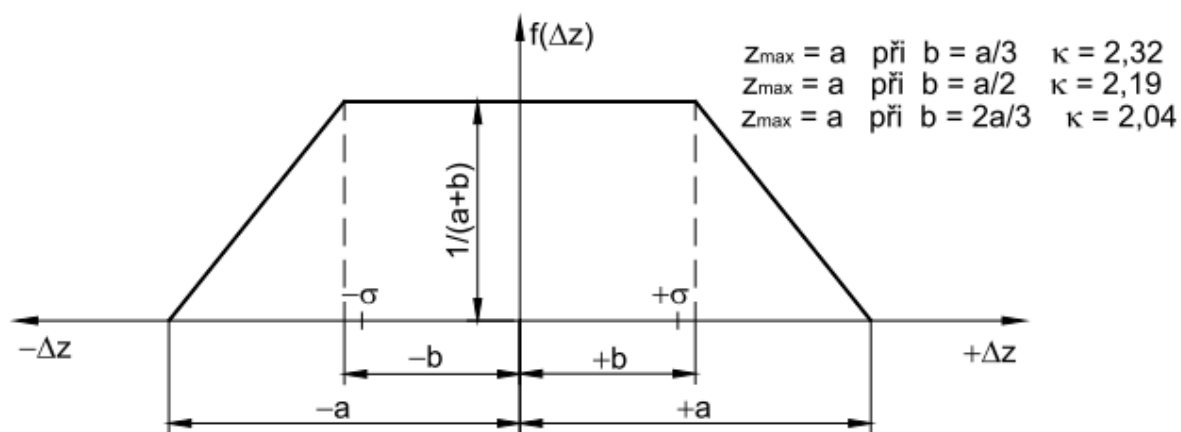
obr. 3: Bimodální - Trojúhelníkové rozdělení



obr. 4: Bimodální - Diracovo rozdělení



obr. 5: Rovnoměrné (pravoúhlé) rozdělení



obr. 6: Lichoběžníkové rozdělení