



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Měření výfukových emisí motocyklů za  
reálného provozu

On-road measurement of exhaust emissions  
from motorcycles

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
2019

Bc. Vojtěch Císař

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301T047 Dopravní letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Císař** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **437270**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Měření výfukových emisí motocyklů za reálného provozu**

Název diplomové práce anglicky:

**On-road measurement of exhaust emissions from motorcycles**

Pokyny pro vypracování:

Práce se zabývá výfukovými emisemi motocyklů za běžného provozu, které jsou dosud málo zmapované, leč mohou být vzhledem k automobilům a těžkým vozidlům podstatné. Cílem práce je experimentální výzkum reálných emisí vybraného motocyklu. Na vhodně vybraných trasách budou zaznamenány průběhy provozních podmínek, které budou porovnány s klasickými jízdními cykly. Tyto průběhy budou replikovány na vozidlové zkušebně. Bude vyhodnocena úspěšnost replikace zejména vysoce dynamických změn, a rozdíly mezi emisemi a spotřebou paliva vzhledem k homologačním cyklům. Dle možností budou na vybraných trasách provedena měření emisí pomocí přenosné aparatury a/nebo bude měření rozšířeno o pokročilá měření částic a neregulovaných plynných látek. Práce by měla splňovat náležitosti odborné publikace včetně souhrnu stavu poznání, popisu experimentů a výsledků včetně zohlednění nejistoty měření a statistické významnosti zjištěných rozdílů, diskuze, a závěrů.

Seznam doporučené literatury:

Vojtisek-Lom, M., Zardini, A. A., Pechout, M., Dittrich, L., Forni, F., Montigny, F., Carriero, M., Giechaskiel, B., and Martini, G.: A miniature Portable Emissions Measurement System (PEMS) for real-driving monitoring of motorcycles, Atmos. Meas. Tech. Discuss., <https://doi.org/10.5194/amt-2019-387>, in review, 2020. + zde obsažené reference dle potřeby

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Michal Vojtíšek, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
doc. Michal Vojtíšek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací:  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

19.6.20

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Anotační záznam

Jméno autora:	Bc. Vojtěch Císař
Název práce:	Měření výfukových emisí motocyklů za reálného provozu
Anglický název:	On-road measurement of exhaust emissions from motorcycles
Rozsah práce:	96 stran 72 obrázků 19 tabulek
Akademický rok:	2019/2020
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	Strojní inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Michal Vojtíšek, M.S., Ph.D.
Klíčová slova:	Emise, Výfukové plyny, Motocykl, Měření emisí, Měření emisí v reálném provozu, Trojcestný katalyzátor, Emisní analyzátory, Válcová zkušebna, Homologace, Dojezdová zkouška
Key words:	Emissions, Exhaust gases, Motorcycle, Emission measurement, Real Driving emissions, Three-way catalyst, Emission analyzers, Chassis dyno, Homologation, Coast down test

## Abstrakt

Tato práce se zabývá emisemi, výhradně výfukovými plyny, které vypouští vozidla kategorie L (motocykly a jiná lehká vozidla) poháněná spalovacími motory. V textu je pojednáváno zejména o měření jednotlivých složek výfukových plynů jak standartními laboratorními metodami, tak i rozšířenými metodami, jako je například měření v reálném provozu. Jsou zde zhodnoceny stávající metody homologačního měření spalin a jejich budoucí vývoj dle legislativy. Následně byl navržen vhodný experiment, který poukazuje na základní rozdíly v emisním chování vybraného vzorku motocyklu mezi laboratoří a reálným provozem.

## Abstract

This thesis examines exhaust gas emissions of L-category vehicles (motorcycles and other light vehicles) powered by internal combustion engines. Methods used for measurement of individual components of exhaust gases used in laboratory are described, whilst presenting advanced approaches, such as real driving emissions measurement. Also, methods currently used in type approval measurement of exhaust gases are evaluated, with regards to the future development of legislation. Subsequently, a suitable experiment was designed in order to point out the main differences of emissions behaviour between laboratory and real driving testing for a representative motorcycle.

## Poděkování

Zde bych rád poděkoval všem, kteří mě podporovali a poskytli mi podklady a materiály pro vypracování mé diplomové práce. Obzvláště potom děkuji svému vedoucímu panu prof. Michalu Vojtíškovi, M.S., Ph.D. za odborné vedení, ochotnou pomoc a konzultace. Dále bych rád vyjádřil své díky firmě JAWA Moto spol. za poskytnutí měřicího vzorku motocyklu a firmě TÜV SÜD Czech za poskytnuté zázemí pro měření a ochotnou asistenci všech zaměstnanců VTP Rostoky při realizaci experimentu, zejména panu Ing. Pavlu Štěrbovi, Ph.D. V neposlední řadě bych rád poděkoval panu Ing. Vojtěchu Klírovi, Ph.D. za laskavou pomoc a poskytnutí cenných rad pro měření experimentu. Velké díky patří i projektu H2020 – 815002 UCARE „U can also reduce emissions“, který financuje provoz experimentálního analyzátoru MiniPEMS, použitého pro měření v této práci. Děkuji také své rodině, přátelům a partnerce za podporu během studií.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě strojní.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis

# Obsah

Anotační záznam .....	6
Seznam zkratk.....	9
1 Úvod .....	10
2 Emise .....	11
2.1 Plynné a pevné látky výfukových plynů.....	11
2.1.1 Složky výfukových plynů.....	11
2.2 Omezování škodlivin.....	13
2.3 Úprava spalin.....	14
2.3.1 Trojcestný katalyzátor – TWC (Three – way catalyst) .....	15
3 Emisní zkoušky.....	19
3.1 Měření emisí výfukových plynů.....	19
3.1.1 Metoda přímého vzorkování .....	19
3.1.2 Metoda vzorkování ředěných plynů.....	20
3.1.3 Metoda odběru vzorků v reálném provozu.....	22
3.1.4 Měření průtoku výfukových plynů .....	22
3.2 Analyzátory jednotlivých složek .....	24
3.2.1 Princip absorpce infračerveného záření.....	24
3.2.2 Princip absorpce ultrafialového záření.....	25
3.2.3 Princip využití chemické luminiscence .....	26
3.2.4 Princip změny vodivosti elektřiny – plamenoionizační detektor .....	27
3.2.5 Princip měření magnetických vlastností.....	27
3.2.6 Kalibrace analyzátorů .....	27
3.3 Zatěžování vozidla při měření .....	28
3.3.1 Válcový dynamometr .....	28
3.3.2 Jízdní cykly pro měření emisí.....	29
3.4 Měření emisí v reálném provozu.....	33
3.4.1 Vyhodnocení zkoušky .....	35
3.4.2 Dynamika jízdy při měření RDE .....	35
3.5 PEMS.....	37
4 Měření emisí motocyklů.....	40
4.1 Zkouška typu I.....	40
4.1.1 Průběh zkoušky.....	40
4.1.2 Analýza výsledků .....	42
4.2 Jízdní odpory.....	44
4.2.1 Výpočet sil jízdních odporů .....	45
4.2.2 Podmínky zkoušky .....	45

4.3	Měření RDE na motocyklu.....	46
4.3.1	Prozatímní experimenty .....	46
5	Experimentální část .....	50
5.1	Metodika vlastního experimentu .....	50
5.2	Zkoušené vozidlo .....	50
5.3	Záznam dat v reálném provozu .....	51
5.4	Jízdní odpory.....	56
5.5	Měření emisí na válcové zkušebně.....	63
5.5.1	Zkouška EURO 3.....	64
5.5.2	Zkouška EURO 4 (WMTC) .....	66
5.5.3	Zkouška RDE 1 .....	70
5.5.4	Zkouška RDE 2 .....	72
5.5.5	Zkouška RDE 3 .....	76
5.5.6	Pulzace ve výfukovém traktu.....	77
5.6	Měření emisí online v reálném provozu.....	79
5.7	Použité měřicí zařízení.....	83
5.8	Vyhodnocení.....	83
5.9	Souhrn experimentální části a diskuze výsledků.....	85
6	Závěr .....	88
7	Přílohy.....	89
7.1	Seznam příložených souborů s výsledky .....	89
7.2	Schéma kompletní elektroinstalace motocyklu JAWA 350 OHC.....	90
7.3	Seznam obrázků .....	91
7.4	Seznam tabulek .....	93
7.5	Použitá literatura .....	94



# Seznam zkratek

ABS	protiblokovací systém	Pt	platina
BMEP	střední efektivní tlak brzd	RDE	měření emisí v reálném provozu
BMW	výrobce silničních vozidel	Rh	rhodium
BSFC	měrná spotřeba paliva	RPM	počet otáček za minutu
ccm	centimetr krychlový	s	sekunda
cm	centimetr	SCS	systém kondice vzorku
CO	oxid uhelnatý	SOHC	typ ventilového rozvodu pístového motoru s jednou vačkou
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	TSI	obchodní označení zážehových přeplňovaných motorů
CVS	vzorkování s konstantním objemem průtoku	TWC	trojcestný katalyzátor
EFM	průtokoměr	Wh	watthodina
EURO	emisní norma pro homologované vozy	WLTC	normovaný jízdní cyklus
FVT	výzkumná společnost pro spalovací motory a termodynamiku	WMTC	normovaný jízdní cyklus
g	gram	°C	stupeň Celsia
GPS	globální polohový systém	λ	lambda, součinitel přebytku vzduchu
GT POWER	simulační program	μm	nanometr
h	Planckova konstanta		
H <sub>2</sub>	vodík		
HC	uhlovodík		
K	kelvin		
kg	kilogram		
km	kilometr		
km/h	kilometr za hodinu		
kPa	kilopascal		
kW	kilowat		
LabVIEW	programovací prostředí		
m	metr		
m.n.m.	metr nad mořem		
m/s	metr za sekundu		
N	newton		
N <sub>2</sub>	dusík		
NDIR	nedisperzní infračervený analyzátor		
NDUV	nedisperzní ultrafialový analyzátor		
NEDC	normovaný jízdní cyklus		
NO	oxid dusnatý		
NO <sub>2</sub>	oxid dusičitý		
NO <sub>x</sub>	oxid dusíku		
O <sub>2</sub>	kyslík		
Pd	paladium		
PEMS	přenosný systém pro měření emisí		
ppm	jedna miliontina		

# 1 Úvod

Emise spalovacích motorů jsou v současné době jedním z nejvíce diskutovaných problémů pozemní dopravy. Značný podíl dopravy na znečištění ovzduší a tvorbě smogu je bezesporný. Tyto problémy mají za následek globální zhoršování zdraví obyvatel této planety a do určité míry také zapříčiňují změny klimatických podmínek. Díky moderním technologiím se tyto problémy daří v poslední době velice efektivně řešit, zejména pomocí stále účinnějších a rozšířenějších zařízení pro úpravu výfukových plynů. Tomu ovšem předchází stále se zpřísnující emisní limity, které je neustále složitější splňovat, zejména bez drahých technologických řešení.

Emise jednostopých vozidel nejsou v současné době stále tak přísně limitované, jako ty automobilové, ačkoliv se v poslední době stávají stále podstatnějšími. V roce 2019 bylo v České republice 1,169 milionu registrovaných vozidel kategorie L (motocykly, tříkolky, čtyřkolky), což je ve vztahu k automobilům (4,86 milionu), které jsou diskutovány po stránce emisí mnohem více, nemalé číslo. Současně vyráběné či prodávané motocykly v Evropě podléhají emisním limitům EURO 4, které nejsou oproti dnešním technologickým možnostem nikterak přísné. Oproti tomu za nedlouho příchozí norma EURO 5 tyto limity výrazně snižuje, navíc byla Evropskou komisí vypracována studie na vliv emisí motocyklů v reálném provozu, která zahrnovala předběžné posouzení RDE měření vozidel kategorie L. Tato informace dává jasný signál k tomu, že se měření emisí v reálném provozu stává velice aktuálním tématem, a proto je nezbytné se touto problematikou začít zabývat. [1] [24] [25] [26]

Cílem této práce je analyzovat současné podmínky měření výfukových emisí motocyklů a měření emisí v reálném provozu. V návaznosti bude navržen vhodný experiment, jak simulovat nebo provést měření emisí v reálném provozu na vybraném motocyklu. Tento experiment bude proveden, zhodnotí se jeho metodika a výsledky. Součástí hodnocení je také porovnání s homologačním měřením a nalezení příslušných rozdílů.

Práce je koncipována do několika částí. Začátek obecně pojednává o plynných a pevných složkách výfukových plynů, jejich úpravě a analýze. Dále je probírána problematika RDE (měření emisí v reálném provozu) a současný postup při schvalování vozidel kategorie L do provozu. Na tuto nezbytnou teoretickou část navazuje část experimentální, jejíž hlavním tématem je zaznamenávání parametrů jízdy v reálném provozu a následně její reprodukce na válcové zkušebně s měřením výfukových plynů. Poslední částí je měření emisí online v provozu pomocí nekonvenčního analyzátoru. Součástí praktické části je i popis technického postupu při přípravách a získávání dat potřebných pro měření.

## 2 Emise

Pro řešení problematiky emisí motocyklů je nejprve nutné si definovat, co to emise jsou a jaké konkrétní škodlivé látky vznikají při procesu spalování u pohonné jednotky – spalovacího motoru. Tento pojem pochází z latinského jazyka (e-mitto) a má více významů. Znamená vypouštět, vydávat nebo také vysílat a má význam v mnoha oborech. Tato práce se zabývá výhradně plynnými znečišťujícími látkami, které vypouští spalovací motory motocyklů, jako nežádoucí produkt dopravy. Ty ovlivňují klimatické podmínky a tím mají vliv na životní prostředí, zdraví lidí i zvířat. Z důvodů, které se týkají příčin spojených se znečištěním ovzduší exhaláty a částicemi, zemře na celém světě přibližně 18 000 lidí denně. Proto tyto emise představují čtvrtý nejrizikovější faktor působící na zdraví populace, zejména v zalidněných oblastech, např. městech. [4] [5]

Množství a intenzitu exhalátů a částic lze zjistit pomocí zkoušek a testů, které se provádějí v různých fázích životnosti výrobku a mají dle toho různý význam. Zkoušky mají analytický charakter a mají za cíl najít a odstranit jejich zdroj. Během vývoje se schvalují do provozu, během výroby a provozu se potom provádí ověřovací zkoušky dle závazné legislativy. [5]

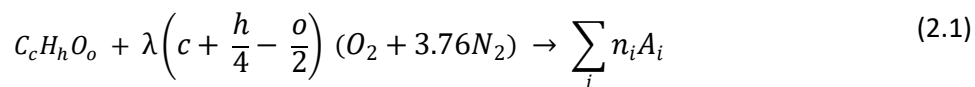
### 2.1 Plynné a pevné látky výfukových plynů

Z důvodu nedokonalého spalování uhlovodíkových paliv vznikají výfukové plyny, které obsahují exhalace a pevné částice. Složení látek v nich se liší v závislosti na tom, jakého je spalovací motor typu a v jakém je stavu. Dále je také závislé na spáleném palivu a jestli bylo použito nějakého zařízení pro redukci škodlivin ve výfukových plynech (katalyzátor, vstřikování močoviny, filtr pevných částic). [5]

#### 2.1.1 Složky výfukových plynů

Ze spalovacího motoru vychází více než 1000 určitých složek jednotlivých škodlivých látek. Legislativa je však omezena pouze na určité plynné nebo aerosolové emise. Dokonalou oxidací uhlíku a vodíku, které palivo obsahuje, vzniká během spalování uhlovodíkového paliva se vzduchem oxid uhličitý  $\text{CO}_2$  a voda  $\text{H}_2\text{O}$ . V případě nedokonalé oxidace jde potom o oxid uhelnatý  $\text{CO}$ , vodík  $\text{H}_2$ , uhlovodík  $\text{HC}$  a pevné částice. Pokud je jako okysličovadlo použit vzduch, má největší podíl v obsahu spalin dusík  $\text{N}_2$ . Dále zde díky vysokým teplotám vznikají oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  díky oxidaci vzdušného dusíku. Ty se nadále dělí na oxid dusnatý  $\text{NO}$  ve větší míře a v menším množství oxid dusičitý  $\text{NO}_2$ . Za nepříznivých podmínek pro oxidaci paliva jsou ve výfukových plynech obsaženy také nespálené uhlovodíky  $\text{HC}$ . Pokud není přítomen vůbec žádný vzduch uvnitř kapky kapalného paliva, dojde za vysoké teploty k pyrolýze molekul uhlovodíků. Důsledkem toho se poté ve výfukových plynech nachází pevné částice uhlíku (tzv. saze), které jsou součástí spalin. [2] [5]

Množství emisí jednotlivých limitovaných složek se vyjádří koncentrací složky pomocí stechiometrického zápisu spalovací reakce při spalování uhlovodíkových paliv. [2]



c, h, o – konstituční koeficienty uhlíku, vodíku a kyslíku v palivu

$\lambda$  – součinitel přebytku vzduchu ( $\lambda=1$  – 1 kg paliva, 14,8 kg vzduchu)

$A_i$  – chemický vzorec i-té složky

$n_i$  – počet molů i-té složky vzniklých spálením jednoho molu paliva

#### 2.1.1.1 Oxidy uhlíku ( $CO_x$ )

Oxid uhelnatý CO se velmi intenzivně (intenzivněji než kyslík) váže na krevní barvivo za vzniku karboxylhemoglobinu. To blokuje distribuci kyslíku k jednotlivým orgánům a ty jsou tím pádem poškozovány. Může tedy působit zdravotní problémy lidem trpícím kardiovaskulárními chorobami a při vysokých koncentracích může být i jedovatý. Zvyšuje také koncentrace přízemního ozonu a v důsledku přeměny na oxid uhličitý je taktéž považován za skleníkový plyn.

Oxid uhličitý  $CO_2$  není tak významně škodlivý lidskému zdraví. Jeho toxicita není nijak zásadně významná, pokud však jeho koncentrace nedosáhne úrovně, která by ovlivnila vytěšňování množství kyslíku v dýchacím ústrojí. Zásadnější negativní vliv má na životní prostředí tím, že vytváří radiační clonu, zabraňuje sdílení tepla sáláním z povrchu Země a to má za následek zvyšování teploty – skleníkový efekt. Množství oxidu uhličitého je přímo úměrné spotřebě paliva. Jeho množství může být ovlivněno pouze řízením směsi, nikoli však úpravou spalin. Až 95 % oxidů uhlíku ve vysoce obydlených oblastech (městech) pochází ze spalovacích motorů. [2] [7] [8] [9]

#### 2.1.1.2 Oxidy dusíku ( $NO_x$ )

Tato kategorie zahrnuje širokou škálu oxidů dusíku. Nejzásadnější jsou oxid dusnatý NO a oxid dusičitý  $NO_2$ , ale jedná se i o méně časté, jako je třeba oxid dusitý  $N_2O_3$ , oxid dusičitý  $N_2O_5$  nebo tetraoxid dusíku  $N_2O_4$ . Koncentrace oxidů dusíku roste a největším ohniskem jejich vzniku jsou obecně právě spalovací motory, kterým je připisován 55% podíl na celkových antropogenních emisích  $NO_x$ . Paliva se spalují při vysokých teplotách, čímž dochází k oxidaci vzdušného dusíku  $N_2$  na vysokoteplotní NO a to je důvod jejich vzniku. Zmíněné látky mají velice negativní dopady jak na globální ekosystém, tak na zdraví. Oxidy síry a oxid dusičitý mají navíc vliv na tvorbu kyselých dešťů, což velmi negativně ovlivňuje stavební konstrukce i vegetaci, čímž vznikají kyselé vodní plochy a toky. Nadále nesmíme zapomenout na tvorbu fotochemického smogu a vznik přízemního ozonu. Oxid dusnatý se navíc považuje za skleníkový plyn.

Škodlivost oxidu dusičitého na lidský organismus je klasifikována jako závažnější, než oxidu uhelnatého. Na organismus působí tzv. dezinformací regulační soustavy. Ta na přítomnost  $NO_2$  reaguje tak, jako by

začínalo hořet a znemožňuje přívod vzduchu do plic, což má za následek pocit dušení a kašel. To nastává i při nižších koncentracích. [2] [6]

#### 2.1.1.3 Uhlovodíky (HC)

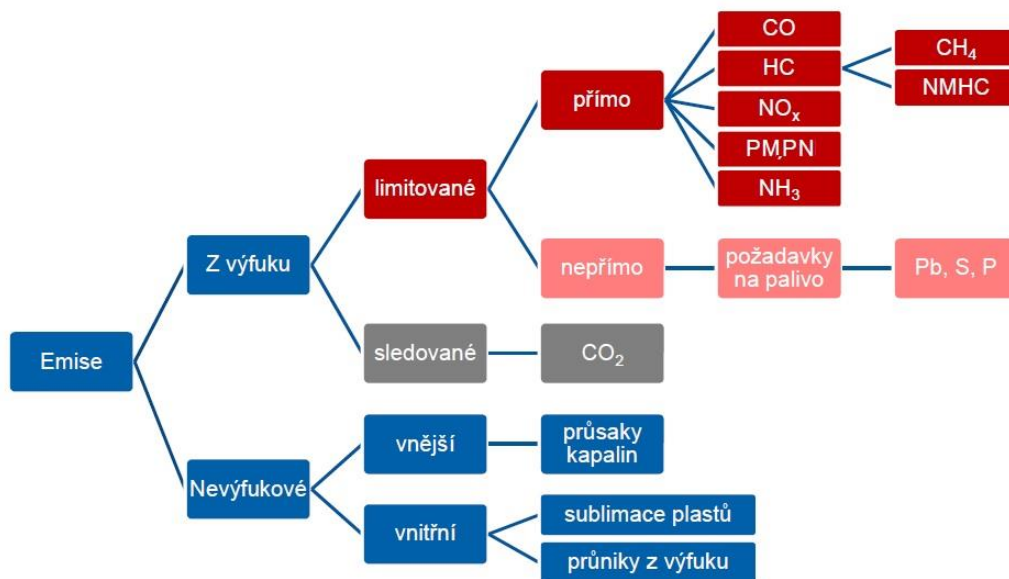
Jedná se o souhrnné označení pro sumu organických plynných látek obsahujících uhlík, vodík a případně další prvky. Vznikají při hoření materiálů, které obsahují uhlík, konkrétně uhlíkatých paliv. Dokáží se přemisťovat v atmosféře na velké vzdálenosti a jsou schopny dobře odolávat přirozenému rozkládání. Jejich celková směs je velmi nebezpečná pro lidské zdraví kvůli vysoké karcinogenitě a ohrožuje zdravý vývoj živočišného plodu. [30]

#### 2.1.1.4 Pevné částice

Pevné částice se také tvoří během spalovacího procesu a obsahují kromě semivolatilních organických sloučenin, kovů, anorganických pevných látek atd., zejména pevný uhlík ve formě sazí. Podle velikosti, od několika nanometrů až po mikrometry, mají různou dobu udržitelnosti v atmosféře. Například 10 $\mu$ m velká částice se udrží ve vzduchu několik hodin, zatímco částice o velikosti 1 $\mu$ m se může držet i v řádu několika týdnů. Díky tomu je jimi ovlivněna energetická bilance Země. Mohou závažně poškozovat kardiovaskulární a plicní systém díky obsahu karcinogenních sloučenin a usazují se také v dýchacích cestách. Pevné částice jsou také příčinou tzv. smogu a tím snižují viditelnost v oblastech s hustou dopravní infrastrukturou. [2] [31]

## 2.2 Omezování škodlivin

Kvůli závadnosti výše uvedených plynných a pevných látek, vycházejících ze spalovacích motorů jako produkty nedokonalého spalování, se tyto látky legislativně omezují. Na následujícím obrázku č. 1 lze vidět, jak konkrétně emise rozdělujeme. Těmi škodlivými je nezbytné se zabývat, a proto jsou legislativně omezeny. U každého nového vozidla je tedy nezbytné před zahájením výroby ověřit, zda splňuje legislativou stanovené emisní limity.



Obrázek 1: Rozdělení emisí [autor]

CO – oxid uhelnatý

CO<sub>2</sub> – oxid uhličitý

HC – uhlovodíky

NO<sub>x</sub> – oxidy dusíku

PM, PN – pevné částice

NH<sub>3</sub> – amoniak

CH<sub>3</sub> – methyl

NMHC – nemetanové uhlovodíky

Pb – olovo

S – síra

P – fosfor

Legislativně limitované složky výfukových je proto třeba redukovat, aby byly omezeny jejich nežádoucí dopady na klima, životní prostředí a lidské zdraví. Z toho důvodu se neustále vyvíjí nové redukční systémy, které jsou montovány do vozidel.

## 2.3 Úprava spalin

U moderních vozidel se spalovacími motory se výfukové plyny kvůli redukcí škodlivin a tím i negativním dopadům na životní prostředí dodatečně upravují. Dodatečná úprava v katalytickém reaktoru je z hlediska výsledných emisních parametrů naprosto zásadní. Konstrukce katalyzátoru je tvořena plechovým nebo keramickým nosičem, na kterém jsou ve vrstvách naneseny krystalky aktivních kovů. Monolit je chráněn a zaizolován v plechovém obalu. Průřez kanálků v monolitu se pohybuje

okolo 1 mm. Nosiče z kovu mají tenčí stěny než ty keramické, disponují ovšem větší teplotní roztažností a můžou začít korodovat. Aktivními látkami jsou v nich platina, rhodium, paladium nebo i další drahé kovy. Nezanedbatelným parametrem je u katalyzátorů také tzv. prostorová rychlost, která určuje dobu, po kterou se výfukový plyn zdrží v reaktoru. Definovat ji můžeme rovnicí:

$$SV = \frac{\dot{V}}{V} = \frac{\text{průtok plynu [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{]}}{\text{objem monolitu [m}^3\text{]}} \quad (2.2)$$

Pro produkci motorových vozidel je používáno několik druhů katalytických konvertorů a kvůli stále přísnějším emisním limitům se setkáváme i s kombinacemi více druhů katalyzátorů za sebou na jednom výfukovém potrubí, či více systémů v těle jednoho katalyzátoru. [3] [32] [33]

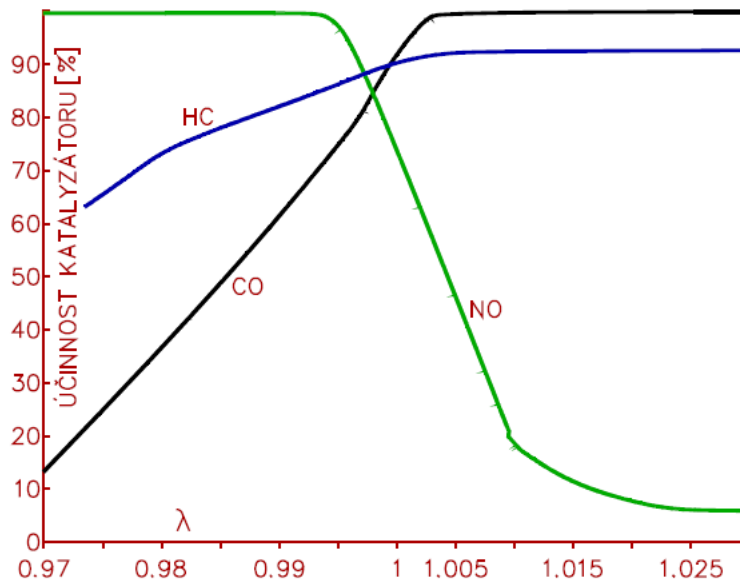
Katalyzátory používané pro redukci spalin spalovacích motorů dělíme na tyto nejnámější druhy [3]:

- Trojcestný katalyzátor-TWC (Three-way catalyst)
- Dvojecestný katalyzátor-DOC (Diesel oxidation catalyst)
- Částicový filtr DPF (Diesel particulate filter)
- Katalyzátor pro selektivní redukci NO<sub>x</sub> – SCR (selective catalytic reduction catalyst)
- Katalyzátor s ukládáním a redukcí NO<sub>x</sub> – NSRC (NO<sub>x</sub> storage and reduction catalyst)

### 2.3.1 Trojcestný katalyzátor – TWC (Three – way catalyst)

Z důvodu konkrétního zaměření této práce na motocykly zde bude podrobněji rozebrán pouze třícestný katalyzátor, protože ostatní druhy se pro tuto kategorii vozidel používají jen velmi málo (oxidační katalyzátor se sekundárním výfukem vzduchu).

Tento druh katalyzátoru je určen výhradně pro zážehové motory, které spalují stechiometrickou směs. To znamená, že vzduch a palivo jsou v ideálním poměru ( $\lambda \approx 1$ ). Po zahřátí na provozní teplotu dosahuje tento katalyzátor účinnosti více než 95 %, pokud je ovšem správně dimenzován. Téměř úplně eliminuje 3 hlavní škodliviny, které se nachází ve výfukových plynech, konkrétně oxidy dusíku, oxid uhelnatý a nespálené uhlovodíky. Aktivní vrstva obsahuje řadu aktivních kovů (Pt, Rh, Pd) a také oxid ceričitý CeO<sub>2</sub>. Oxid ceričitý vyrovnává fluktuace ve vstupní směsi díky tomu, že je schopný uvolňovat a ukládat kyslík. Účinnost je striktně závislá na poměru směsi. Pro dodatečnou oxidaci totiž není ve spalinách z hoření bohaté směsi přítomen kyslík. Naopak dodatečná redukce NO je prováděna pomocí reakce s produkty nedokonalé oxidace (CO, H<sub>2</sub>). Zde je nežádoucí velké množství kyslíku. [2] [10]



Obrázek 2: Technická účinnost trojcestného katalyzátoru [2]

Z tohoto důvodu je třeba, aby byl takový systém řízený. K tomu se používá tzv. λ-sonda, která je umístěna ve výfukovém systému před a za katalyzátorem. Řecké písmeno λ značí stechiometrický poměr benzínu a vzduchu při spalování v motoru. Pokud platí λ=1, ke spálení jednoho kilogramu benzínu je za potřebí 14,8 kg vzduchu. λ<1 značí bohatou směs (poměr vzduchu je menší), λ>1 naopak chudou směs (poměr vzduchu je větší). Redukce relevantních složek v závislosti na λ je vyobrazena na obrázku č. 2. Účelem λ-sondy je určovat průběžně okamžitou koncentraci kyslíku ve spalinách. Řídící jednotka poté vyhodnocuje naměřené hodnoty a podle nich dávkuje palivo a vzduch. Pokud by λ-sonda nebyla funkční, znamenalo by to pokles účinnosti katalytické reakce a také se mohou poškozovat reakční látky na monolitu. Hodnotu λ lze spočítat podle Brettschneiderova vzorce [11]. Jednotlivé koncentrace složek se zde vyjádří v % a ppm. [2] [3] [11] [10] [27]

$$\lambda = \frac{c_{CO_2} + c_{O_2} + \frac{1}{2}(c_{CO} + c_{NO})}{\left(1 + \frac{h}{4} - \frac{o}{2}\right)(c_{CO} + c_{CO_2} + c_{HC})} + \frac{\frac{h}{4} \frac{K}{K + \frac{c_{CO}}{c_{CO_2}}} - \frac{o}{2}}{1 + \frac{h}{4} - \frac{o}{2}} \quad (2.3)$$

h – průměrný počet atomů vodíku na jeden atom uhlíku

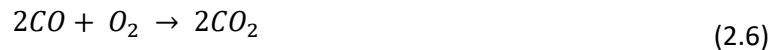
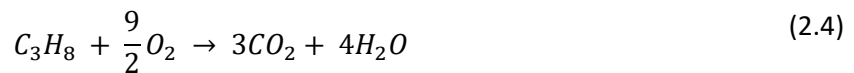
o – poměr atomových čísel, kyslík ku uhlíku

K – rovnovážná konstanta reakce (K = 3,5) - reakce popsaná níže, rovnice (2.10)

Veličiny –  $c_{CO}$  [%],  $c_{CO_2}$  [%],  $c_{NO}$  [%],  $c_{HC}$  [ppm]



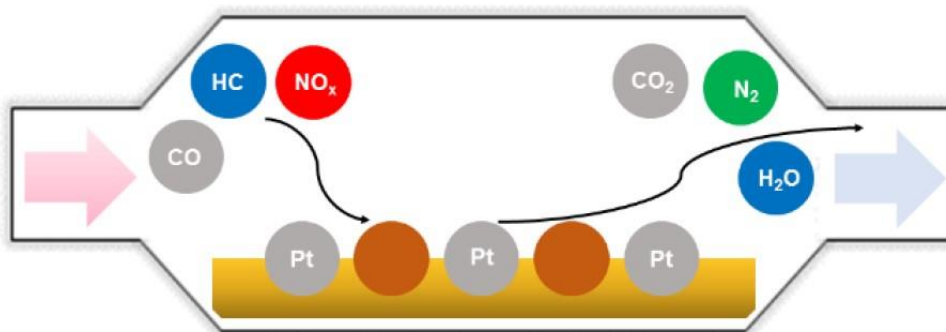
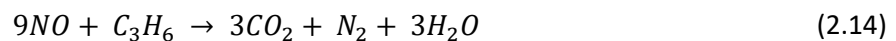
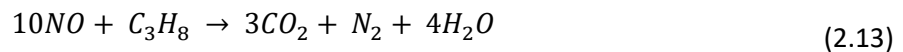
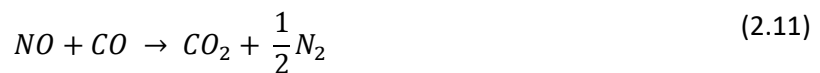
Na monolitu uvnitř trojcestného katalyzátoru probíhá řada reakcí, souhrnně vyjádřených [3]:



Pokud není přítomen dostatek kyslíku, převáží reakce CO a uhlovodíků s vodní párou [3]:



Redukce NO<sub>x</sub> probíhá také až v případě, že dojde ke spotřebování kyslíku [3]:



Obrázek 3: Eliminace složek škodlivin ve výfukových plynech na monolitu TWC [3]

Účinnost katalyzátoru je rovněž závislá na jeho teplotě. Studený katalyzátor nezvládá efektivně oxidovat nebo redukovat relevantní složky ve výfukových plynech a z toho důvodu je účinnost katalyzátoru závislá na jeho teplotě. Většina škodlivin při emisním testu (až 80 %) je vypuštěna právě v době, než se katalyzátor ohřeje na správnou teplotu. Z toho důvodu je nutné tuto skutečnost řešit,

aby tato doba byla co nejkratší. Existuje více technologických řešení, které tento problém alespoň částečně eliminují, jako například přidání druhého menšího katalyzátoru blíže k motoru. Ten sice není tak účinný, ovšem zahřívá se rychleji. [3] [10]

## 3 Emisní zkoušky

Existují tři základní druhy legislativně povinných emisních zkoušek, které se provádí v různém období života výrobku:

- Zkoušky homologační při schvalování typu (před zahájením výroby daného modelu)
- Zkoušky při kontrole shody výroby a udržení jakosti (nové kusy během produkce i z provozu)
- Zkoušky vozidel v provozu (zkoušky v průběhu provozování výrobku)

Zkoušky se provádějí v akreditované zkušebně dle závazné legislativy a podléhají předpisům EHK, směrnicím EHS a dalším předpisům v závislosti na konkrétní zemi, ve které je výrobek schvalován do provozu. První dvě z výše zmíněných zkoušek se provádějí na válcové zkušebně, kde je vozidlo zatěžováno příslušným jízdním cyklem, při němž se měří koncentrace látek ve výfukových plynech velice přesnými analyzátory. [5]

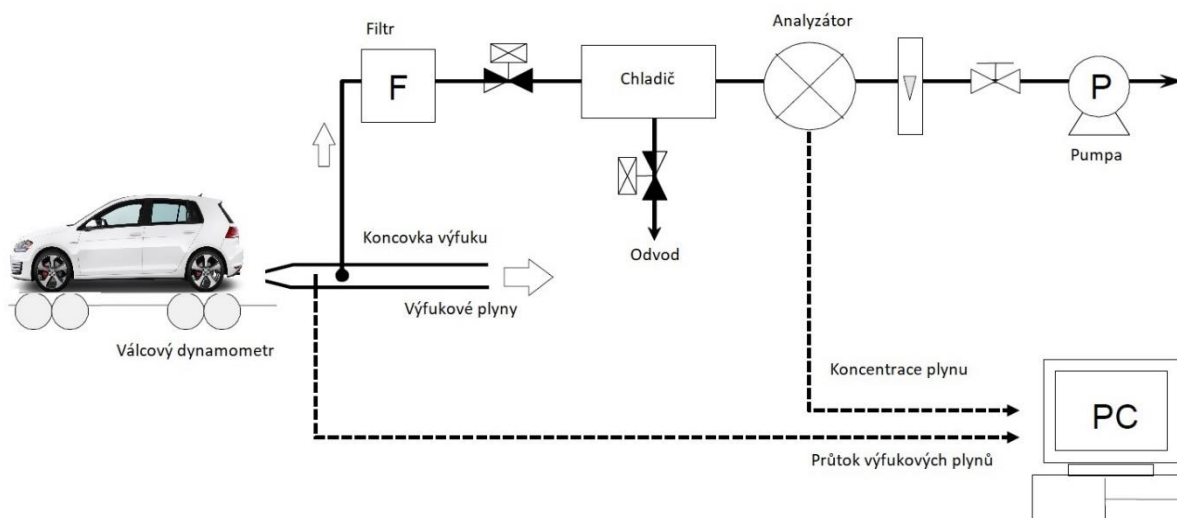
### 3.1 Měření emisí výfukových plynů

Obecně můžeme rozdělit laboratorní měření emisí výfukových plynů na 3 základní metody. První metoda spočívá v umístění detektoru přímo uvnitř výfukového potrubí. Ve druhém případě je odebírán nezředěných plynů a po jeho předúpravě se zavede do analyzátoru. Průtok výfukových plynů nebo jejich objem je v prvních dvou případech změřen a koncentrace určená příslušným analyzátorem se převádí na hmotnosti daných látek. Třetí je tzv. extrakční metoda odběru vzorků (lze nazvat také jako „odběr ředěného vzorku“), kde je vzorek zředěn okolním vzduchem nebo syntetickým vzduchem a poté je veden do analyzátoru nebo odběrného vaku. Určení metody měření závisí na konkrétních požadavcích na získaná data nebo na charakteru výfukového plynu. [2] [12]

#### 3.1.1 Metoda přímého vzorkování

Při metodě přímého vzorkování se vzorek neředí vzduchem. Abychom mohli touto metodou určit celkovou hmotnost měřených emisí, je nezbytné měřit současně i celkový průtok výfukových plynů. Provozní podmínky motoru jsou různé dle zatížení a dalších faktorů, a proto musí měřicí přístroj počítat s různým časovým zpožděním, ve kterém se dostane vzorek k jednotlivým analyzátorům. Při kalibraci si tak přístroj spočítá jednotlivá zpoždění mezi analyzátory (tzv. time alignment).

Na obrázku č. 4 lze vidět schéma vzorkování výfukových plynů přímou metodou. Část výfukových plynů je odebrána a filtrována. Vzorkovaný plyn je často ještě před vstupem do analyzátorů kondicionován odvlhčovačem (chladičem) a pokračuje nadále jako suchý vzorek, čím se sníží objem, a naopak zvýší koncentrace jednotlivých složek. Ve zvláštních případech se vzorek neodvlhčuje, naopak se udržuje vlhký. [12]



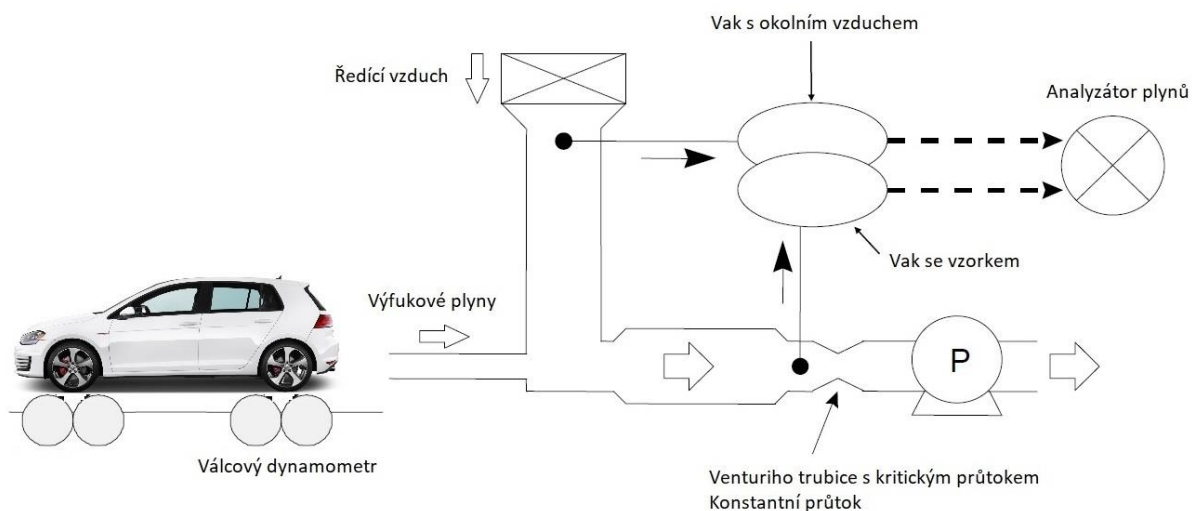
Obrázek 4: Schéma sestavy komponentů metody přímého vzorkování [12]

### 3.1.2 Metoda vzorkování ředěných plynů

Tato metoda je založena na ředění vzorku vzduchem. Koncentrace plynů se měří po zředění okolním vzduchem za podmínek, aby byla teplota rosného bodu vzorku níže než teplota okolního vzduchu. Koncentrace vodní páry vzorku výfukového plynu se redukuje, aby bylo zabráněno kondenzaci vody v potrubí, kterým je vzorek veden.

Nejběžnější používanou metodou ředění je metoda CVS („Constant Volume Sampler“ – „vzorkovač s konstantním objemem“). CVS je tzv. systém ředění celkového toku, kdy se kompletní výfukový tok mísí s okolním vzduchem při zachování konstantního průtoku zředěného plynu. Tato metoda se používá v případě, měříme-li celkové hmotnostní emise. Vhodnější pro analýzu, než metoda přímého vzorkování je tehdy, pokud má vzorek vysokou koncentraci anebo je příliš malý průtok výfukových plynů.

Na obrázku č. 5 je vidět základní schéma metody CVS. Vzorek je zředěn s přívodem okolního vzduchu a poté se udržuje konstantní objemový průtok. Aby byl průtok konstantní, ředí se výfukové plyny různým množstvím vzduchu dle aktuálního průtoku výfukových plynů objemovým dávkovacím čerpadlem. Toto množství je po celou dobu zaznamenáváno, aby při výsledném výpočtu bylo známo, jak velkým množstvím byl vzorek zředěn. V místě konstantního objemového průtoku se odebírá malý vzorek do vzorkovacího vaku. Po dokončení testu se analyzují jednotlivé složky ve vzorkovacím vaku a jsou dopočteny hmotnosti měřených plynů z jejich koncentrací, hustoty a celkového průtoku v CVS. Z důvodu možného výskytu měřených složek i v okolním vzduchu, kterým jsou plyny ředěny se tento vzduch vzorkuje do odděleného vaku. Po dokončení testu se analyzuje koncentrace jednotlivých složek okolního vzduchu a výsledky se použijí pro korekci výpočtu koncentrace ve vzorkovacím vaku. [2] [12]



Obrázek 5: Schéma sestavy komponentů metody odběru vzorků [12]

Při měření uhlovodíků HC se používá metoda nepřetržitého sčítání, vyjádřena jako numerický integrál naměřených koncentrací násobený průtokem. Koncentrace ve vzorkovacím vaku může být totiž nepřesná z důvodu možné adsorpce uhlovodíků na stěnách, čímž může být koncentrace v různých místech vaku odlišná. Tato metoda je vyžadována a nejčastěji používána pro homologační měření emisí nových motorových vozidel. [12] [18]

### 3.1.2.1 Výpočet hmotnosti emisí

Obsah vzorkovacího vaku se skládá ze složek výfukových plynů a ředícího vzduchu v poměru  $(c_{ex} \times V_{ex}) : (c_{amb} \times V_{amb})$ . Abychom mohli získat celkové hmotnostní emise měřeného vzorku, je nezbytné odečíst změřené koncentrace složek okolního vzduchu. Tento výpočet je obecně vyjádřen v rovnici (3.1) [12]. „DF<sub>vol</sub>“ je tzv. faktor ředění, vyjadřující objemový poměr zředěných výfukových plynů k surovému objemu samotných výfukových plynů. [12]

$$\begin{aligned}
 c_{ex} \times V_{ex} &= c_{sam} \times V_{mix} - c_{amb} \times V_{amb} \\
 &= c_{sam} \times V_{mix} - c_{amb} \times (V_{mix} - V_{ex}) \\
 &= c_{sam} - c_{amb} \times 1 - \frac{V_{ex}}{V_{mix}} \times V_{mix} \\
 &= c_{sam} - c_{amb} \times 1 - \frac{1}{DF_{vol}} \times V_{mix}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$c_{ex}$  – Průměrná koncentrace měření složek výfukových plynů

$c_{sam}$  – Koncentrace složek měření ve vzorkovacím vaku (již zředěno vzduchem)

$c_{amb}$  – Koncentrace měřených složek ve vaku s okolním vzduchem

$V_{ex}$  – Objem výfukových plynů (integrovaná hodnota průtoku)

$V_{amb}$  – Objem ředícího vzduchu (integrovaná hodnota průtoku)

$V_{mix}$  – Objem již zředěného vzduchu (integrovaná hodnota průtoku)

$DF_{vol}$  – Faktor ředění ( $V_{mix}/V_{ex}$ )

### 3.1.3 Metoda odběru vzorků v reálném provozu

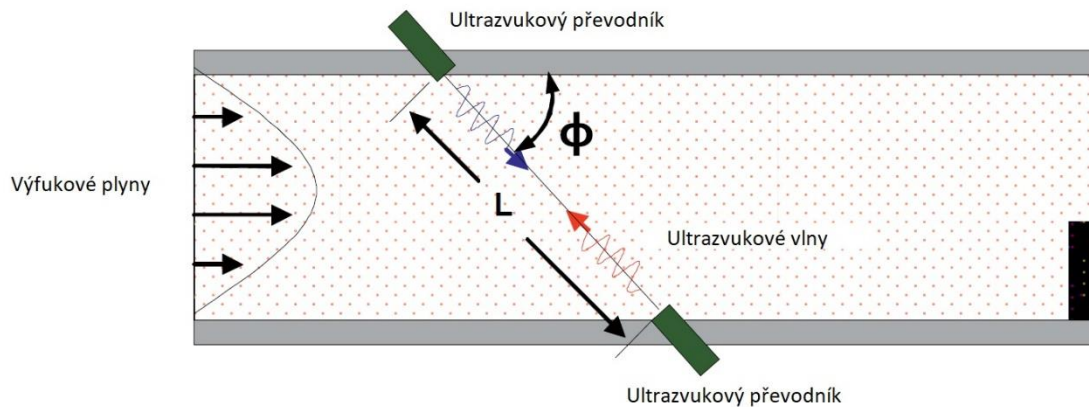
Existuje metoda analýzy výfukových plynů, která pracuje na principu odběru vzorku výfukových plynů do odběrných vaků, ovšem bez přítomnosti analyzátorů. Vzorek se odebírá během jízdy v reálném provozu do vaku, který si vozidlo veze s sebou. Vak je po skončení emisního testu přemístěn do laboratoře, kde se provede následná analýza odebraných vzorků. Tato metoda je používána například pro měření emisí autobusů pro veřejnou dopravu v USA. U menších vozidel je zatím mnoho dalších problémů, které se musí vyřešit, jako například kondiční prostor pro vak nebo metoda odběru vzorku spalin.

### 3.1.4 Měření průtoku výfukových plynů

U metody přímého vzorkování je nutné znát průtok výfukových plynů proto, abychom mohli vypočítat hmotnost emisí. Existuje několik metod, které se běžně používají pro měření průtoku plynů. Podmínky toku výfukových plynů, jako jsou např. teplota, tlak, složení nebo rychlost průtoku se neustále mění, navíc obsahují velké množství vody a částic. U malých benzinových motorů navíc hrozí pulzace toku při volnoběhu, s čímž souvisí i občasný zpětný směr toku. Konstrukce průtokoměru musí být taková, aby tyto podmínky neovlivňovaly měřenou hodnotu. Je taky nezbytné ohlídat, aby připojené měřicí zařízení nemělo díky poklesu tlaku ve výfukovém potrubí vliv na chování motoru a emisní systém vozidla. Všechny metody měření průtoku mají své výhody i nevýhody. Proto je nutné vždy zvolit správnou metodu měření průtoku dle výše popsaných podmínek. [12] [13]

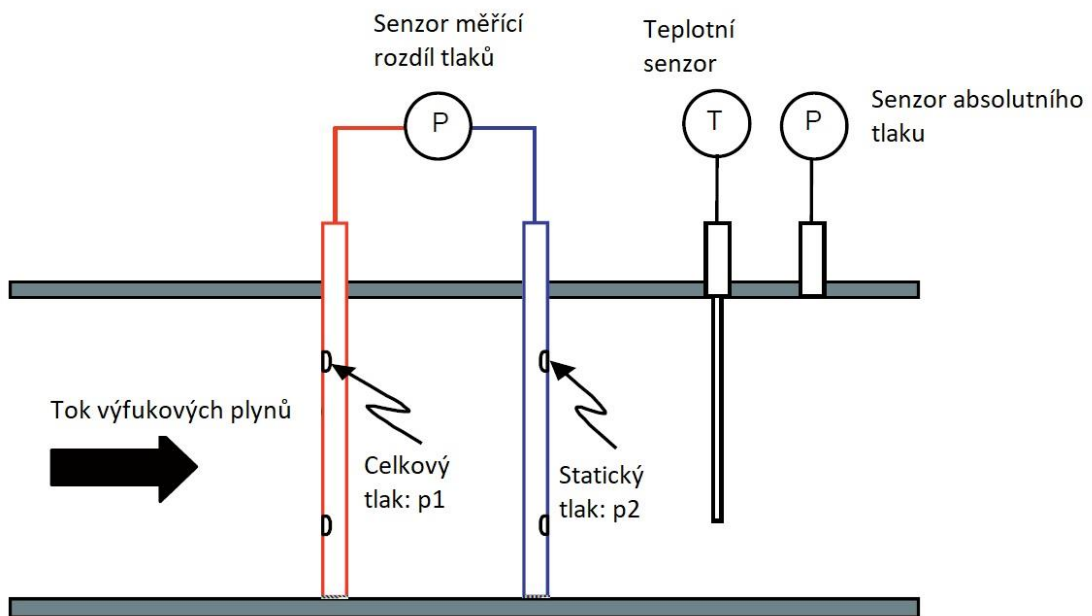
#### 3.1.4.1 Metoda přímého měření průtoku

Měří se pomocí ultrazvukových a Pitotových trubicových průtokoměrů, které měří přímý průtok plynů. Ultrazvukový průtokoměr (obrázek č. 6) má na vnitřní straně trubice diagonálně proti sobě umístěny dva ultrazvukové snímače. Jeden vždy funguje jako vysílač ultrazvukových vln a ten druhý jako přijímač. Své funkce si navzájem mění. Měří se čas šíření zvuku mezi snímači, který je ovlivněn právě proudícími výfukovými plyny a následně je dopočítána rychlost průtoku. [12]



Obrázek 6: Ultrazvukový průtokoměr [12]

Pitotova trubice na obrázku č. 7 měří rozdíl tlaku mezi celkovým tlakem ve směru průtoku plynů a statickým tlakem, který je kolmý na směr průtoku. Tento diferenční tlak je potom také roven druhé mocnině hodnoty rychlosti plynu. Je možné změřit i záporný diferenční tlak, který je potom stejně úměrný zpětnému toku plynů v trubici. [12]



Obrázek 7: Pitotova trubice [12]

### 3.1.4.2 Metoda nepřímého měření průtoku

Existuje několik metod nepřímého měření průtoku výfukových plynů. Metoda průtoku nasávaného vzduchu a průtoku paliva vypočítává průtok výfukových plynů na základě výpočtů z hmotnostního průtoku těchto dvou známých veličin za předpokladu, že se všechno palivo a vzduch v motoru spálí. Další metoda je téměř stejná s tím rozdílem, že se průtok paliva odhaduje ze známého poměru vzduch/palivo a průtoku vzduchu. Poslední důležitá je stopovací metoda. Princip je takový, že se zavede

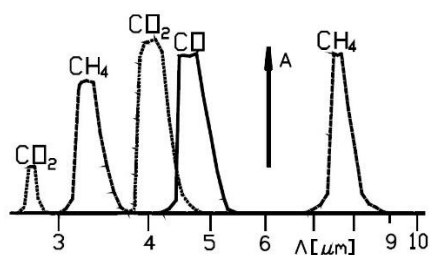
přesně odměřené množství inertního plynu (např. hélium) do toku výfukových plynů při dané rychlosti průtoku a průtok výfukových plynů se poté spočítá z výsledné koncentrace stopovací látky (pro určení koncentrace hélia je nezbytný hmotnostní spektrometr). [1] [12] [28]

## 3.2 Analyzátoři jednotlivých složek

Měření jednotlivých složek spalin probíhá na různých principech. Každý analyzátor je schopen měřit jiné složky a funguje na jiném principu. V následujících částech kapitoly jsou rozebrány jednotlivé principy analýzy jednotlivých látek ve spalinách.

### 3.2.1 Princip absorpce infračerveného záření

Princip je založen na prosvícení měřeného plynu světelným svazkem, při němž je část energie tohoto záření pohlcena. Každý plyn je schopen absorbovat elektromagnetické záření o jiné délce vlny  $\lambda$ . Závislost tzv. absorpčního koeficientu na délce vlny je tak individuální vlastnost každé alespoň dvouatomové molekuly plynu. [2]



Obrázek 8: Absorpční spektra [2]

Míra absorpce je tedy definována plochou A pod křivkou označenou příslušnou látkou na grafu na obrázku č. 8. Absorpci lze tedy spočítat s využitím  $\lambda$  Lambertova-Beerova absorpčního zákona následujícím výpočtem:

$$A_{CELKOVÁ} = \int \frac{I_{0,\lambda} - I_{1,\lambda}}{I_{0,\lambda}} d\lambda = \int (1 - e^{-\epsilon\rho L}) d\lambda \quad (3.2)$$

$$I_{1,\lambda} = I_{0,\lambda} e^{-\epsilon\rho L}$$

$\rho$  – hustota plynu

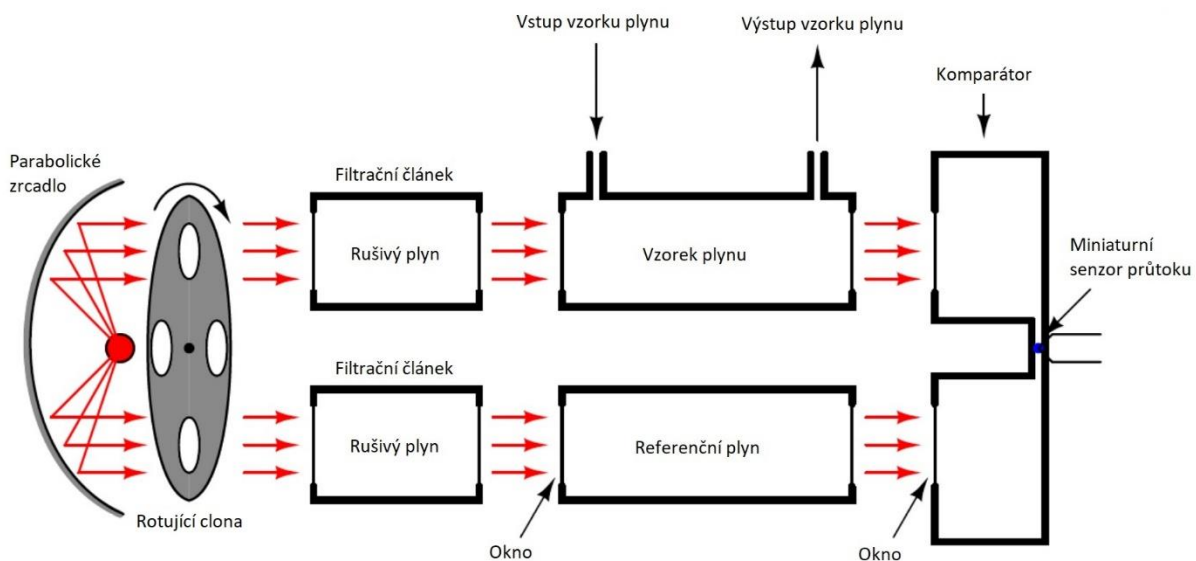
L – délka absorpční dráhy (tloušťka vrstvy plynu)

$\epsilon$  – absorpční koeficient

Infračervený zdroj vysílá záření, které prochází skrze kyvety. Okna kyvet jsou z takového materiálu, aby byly pro vlnové délky použité pro měření zcela propustné. Ve srovnávací kyvetě se nachází plyn nepohlcující infračervené záření, v měřicí kyvetě prochází měřený vzorek výfukových plynů. Tím je část záření v měřicí kyvetě pohlcena, zatímco ve srovnávací ne. Podle rozdílu intenzity infračerveného



záření lze určit koncentraci složek, které se ve vzorku nachází. Intenzita záření je detekována pomocí komparátoru. V jeho komorách se nachází plyn, jehož koncentrace je měřena ve směsi spalin. Tento plyn poté absorbuje jen v oblasti individuálního spektra absorpce, díky čemuž se náplně obou komor ohřívají rozdílně v závislosti na tom, jaká je koncentrace měřené složky. U novějších přístrojů je intenzita detekována například fotodiodou nebo fototranzistorem. Tento přístroj, jehož konstrukce je názorně vyobrazena na obrázku č. 9, se nazývá „bezdisperzní infračervený analyzátor“ (NDIRA – Non Dispersive Infrared Analyser). [2] [14] [23]



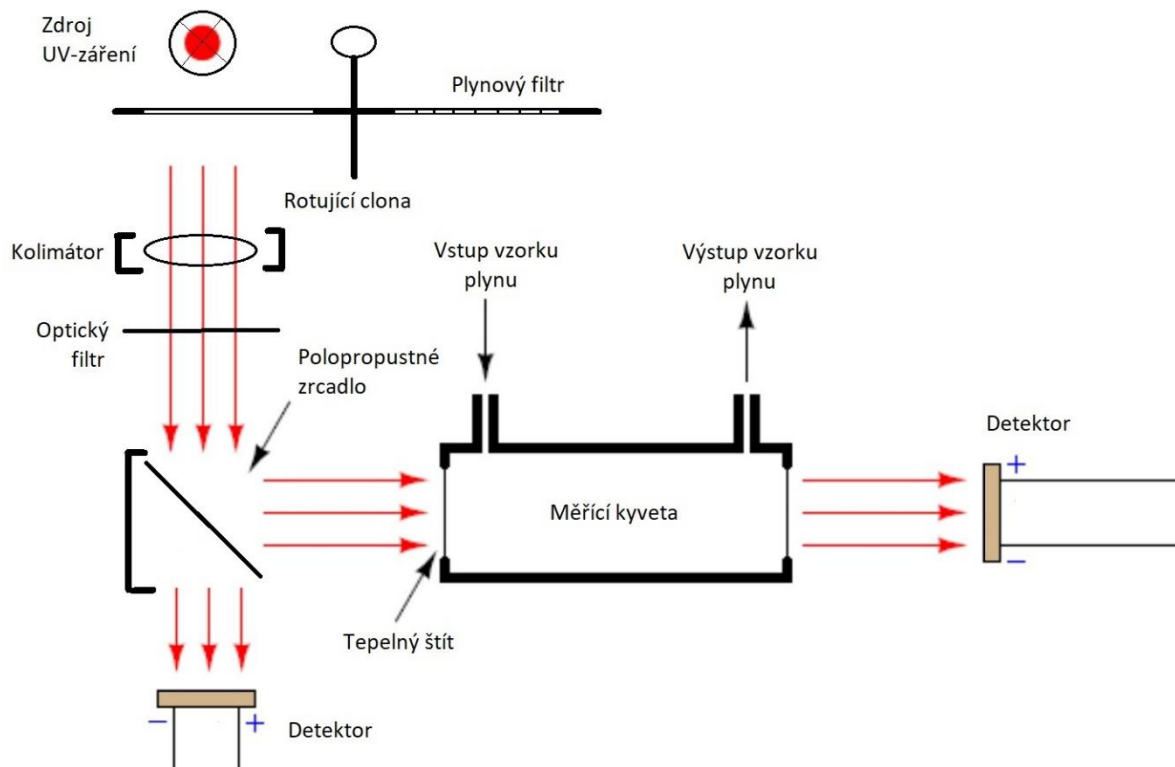
Obrázek 9: NDIR – Bezdisperzní infračervený analyzátor [14]

Tato metoda se používá standardně pro měření koncentrací oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého ve směsi výfukových plynů. Je možné touto metodou analyzovat i další látky, avšak vždy je to provázeno určitými komplikacemi nebo je vyžadováno specifické konstrukční řešení. Citlivost těchto přístrojů se liší a je závislá zejména na délce kyvety. Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější řešení použitelné při vývoji a výzkumu. [2]

### 3.2.2 Princip absorpce ultrafialového záření

Jedná se také o tzv. optický analyzátor. Záření je po vypuštění ze zdroje modifikováno a poté rozděleno polopropustným zrcadlem. Část záření je pohlcena složkami, které se nachází ve vzorku směsi výfukových plynů v kyvetě. Druhá část záření jde přímo do tzv. korekčního detektoru. Citlivost přístroje se zajišťuje náplní plynové výbojky ve zdroji a náplní plynového filtru v rotující cloně. Na druhé straně clony je otvor. Díky tomu mohou detektory zpracovat 3 druhy signálu dle okamžité polohy clony. Vzniká tak lineární nárůst napětí, které lze exponenciálně přepočítat na koncentraci detekované složky ve vzorku. Při analyzování složek ve výfukových plynech se přístroje na principu absorpce ultrafialového záření (NDUVA – Non Dispersive Ultraviolet Analyser) používají výhradně ke zjištění

koncentrace oxidů dusíku (NO, NO<sub>2</sub>). Nevýhodou je nízká životnost výbojky. Na obrázku č. 10 je vyobrazeno schéma tohoto analyzátoru. [2]



Obrázek 10: NDUV – Bezdisperzní ultrafialový analyzátor [autor]

### 3.2.3 Princip využití chemické luminiscence

Některé chemické reakce vytváří emise, které provázejí specifická energetická kvanta (fotony). Metoda je využívána pro zjištění koncentrace oxidů dusíku a předmětnou reakci [2] lze zapsat jako:



$h$  – PLANCKova konstanta (energetické kvantum)

$\nu$  – frekvence

Zjednodušeně popsáno, v přístroji vzniká ozon tím, že na molekuly kyslíku působí elektrostatické pole, které má vysoké napětí. Tento ozon vstupuje do reaktoru s fotonásobičem, kde se smíchá se spalinami. Z fotonásobiče poté vychází signál, který je úměrou množství dopadajících energetických kvant. Výstupní signál je nadále vyhodnocován v elektronické části měřícího přístroje. Při provozu je důležité zajistit neustálý přísun kyslíku, který je dodáván z tlakové lahve. [2]

### 3.2.4 Princip změny vodivosti elektřiny – plamenoionizační detektor

Připojíme-li na plamen vznikající z vodíku a vzduchu elektrický proud, tvoří se malý proud iontů. Tento proud roste úměrně množství uhlovodíků, které jsou přítomny po přivedení organicky vázaného uhlíku do plamene. Analyzátor pracující na této metodě se nazývá plamenoionizační detektor (FID – Flame Ionization Detector). Aby se zajistilo přesné dávkování látek a dodržely se přesné průtokové a tlakové podmínky, je přístroj vybaven soustavou regulátorů a kapilár. Vzorek se temperuje na vysoké teploty, až 200°C. Proud iontů je snímán pomocí dvou elektrod. Pokud není ve sloučeninách obsažen kyslík, hodnota proudu procházejícího plamenem je úměrná počtu uhlíkových atomů, které jsou vázány v organických sloučeninách ve vzorku. Pro co největší eliminaci chyby měření je důležité dbát na správný poměr mezi vodíkem a vzduchem. Vodík je nutno neustále dodávat z tlakové lahve. Výsledky mohou být odlišné od analýzy přístrojem NDIRA, který disponuje komparátorem s uhlovodíkovou náplní, a proto je důležité vždy u výsledku uvádět měřící metodu. [2] [29]

### 3.2.5 Princip měření magnetických vlastností

Tato metoda se používá pro zjištění koncentrace kyslíku, který má vysokou permeabilitu a je dobře vtahován do magnetického pole. V analyzátoru se nachází permanentní magnet nebo elektromagnet, který přitahuje kyslík. Molekuly kyslíku jsou přitaženy do magnetického pole, kde za zvýšení teploty ztratí magnetizmus (Curieův zákon). Poté jsou vytlačeny přísunem studených molekul, čímž vzniká stabilní magnetický průtok. Část odporového vinutí na vstupu molekul je chlazena studeným proudem vzorku, výstupní část ohřátým proudem vzorku. Teploty na obou částech vinutí jsou tudíž rozdílné. Tento rozdíl je poté úměrný koncentraci kyslíku v analyzovaném vzorku. [2]

### 3.2.6 Kalibrace analyzátorů

Pro relevantní výsledky měření výše zmíněnými analyzátorů je důležité určit analyzátor s vhodným rozsahem dle charakteru měřeného objektu a zajistit jejich dostatečnou citlivost kalibrací. Aby byla citlivost analýzy látek ověřena, provádí se tzv. kalibrace měřících přístrojů, čemuž lze rozumět, jako určení závislosti mezi koncentrací jednotlivé látky a hodnoty elektrické veličiny, kterou přístroj vykazuje na ukazateli.

Pro správnou kalibraci přístrojů je třeba použití tzv. kalibračních plynů. Nulová hodnota výchylky přístroje se obvykle nastaví plynem, ve kterém není přítomna ani jedna z analyzovaných látek (dusík, syntetický vzduch). Plyn je vpuštěn do analyzátoru a ten si uloží tuto hodnotu jako nulovou pro dané látky. Naopak pro ověření určité hodnoty přítomné látky je do analyzátoru vpuštěn plyn s přesně danou koncentrací látky. Analyzátor si poté srovná elektrickou hodnotu tak aby odpovídala dané koncentraci látky. Kalibrační plyny se dodávají v tlakových lahvích specializovanými výrobci a je třeba, aby jejich složení bylo ve vhodné kombinaci a koncentrace látek v měřícím rozsahu analyzátorů. Je také nutné,

aby byly zajištěny vždy stejné stavové podmínky kalibračního plynu (tlak a průtok, regulované ventilem na výstupu z tlakové lahve). [2] [16] [18]

### 3.3 Zatěžování vozidla při měření

Abychom byli schopni zjistit dostatečné emisní chování jednotlivých měřených vozidel, je třeba simulovat jízdní odpory související s podélnou dynamikou pro namáhání pohonného ústrojí vozidla. V praxi to znamená, že je vozidlo ukotveno na válcovém dynamometru (ten má dle skutečných jízdních odporů daného vozidla nastavenou určitou míru brždění) a v závislosti rychlosti na čase zrychluje a zpomaluje podle předem stanoveného jízdního cyklu.

#### 3.3.1 Válcový dynamometr

Jedná se o zařízení, které simuluje jízdu vozidla po silnici v kontrolovaném prostředí. Povrch silnice je simulován otáčejícími se válci, které jsou spojeny s řízeným dynamometrem, jehož odpor je řízen dle všech jízdních odporů daného vozidla. Zkoušený exemplář je pevně uchycen zádržným systémem k pevným bodům, aby nedošlo ke sklouznutí z válců. Před vozidlem je umístěn výkonný ventilátor, který zajišťuje proudění vzduchu na předek vozidla. Rychlost vzduchu je shodná s rychlostí válců. K výfuku vozidla je většinou připojen odběr výfukových plynů, který tyto plyny odvádí pryč z budovy anebo ještě předtím skrze měřicí zařízení. Tento způsob testování se většinou používá kvůli velkým rozměrům měřicího zařízení nebo nemožnosti uskutečnit takovéto měření venku. Obvyklé případy použití válcové zkušebny:

- Měření emisí
- Měření hluku (válcová zkušebna v bezdozvukové komoře)
- Elektromagnetické zkoušky
- Měření výkonu

Konstrukční řešení válců může být odlišné, avšak moderní zkušebny jsou provedením se dvěma dvojicemi válců, pro každé kolo na osobním automobilu jeden.

3 základní módy měření jsou:

- Udržování konstantní rychlosti – dynamometr se snaží kompenzovat sílu vyvíjenou zkoušeným vzorkem a tím udržet stále stejnou rychlost
- Udržování konstantní síly – dynamometr vyvíjí stále stejný odpor neohledně na rychlost otáčení
- Simulace jízdních odporů – odpor se dynamicky mění s rychlostí dle zadaných silničních koeficientů ( $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ), které jsou rozdílné pro každé vozidlo – řízení podle polynomu 2. řádu

[5]

### 3.3.2 Jízdní cykly pro měření emisí

Pro měření emisí jsou kvůli srovnání v rámci různých legislativ určeny dané jízdní cykly, podle kterých pohonné ústrojí vozidla na válcové zkušební dynamicky zatěžováno. V praxi měření probíhá tak, že se na displeji před vozidlem zobrazuje křivka plynoucí v čase, které se řidič snaží držet. Na ose „y“ ubíhá čas ve vteřinách, na ose „x“ je poté vynesena rychlost vozidla. Na obrázku č. 11 je vyobrazen displej s ubíhající křivkou testovacího cyklu, který je umístěn před vozidlem.



Obrázek 11: Vyobrazení křivky cyklu během testování před vozidlem [autor]

Je zde také jasně stanoveno, jak moc se může aktuální rychlost vozidla vychýlit od té předem stanovené. Pokud je vozidlo vybaveno manuální převodovkou, jsou navíc jasně definovány řadicí body.

#### 3.3.2.1 Jednotlivé jízdní cykly

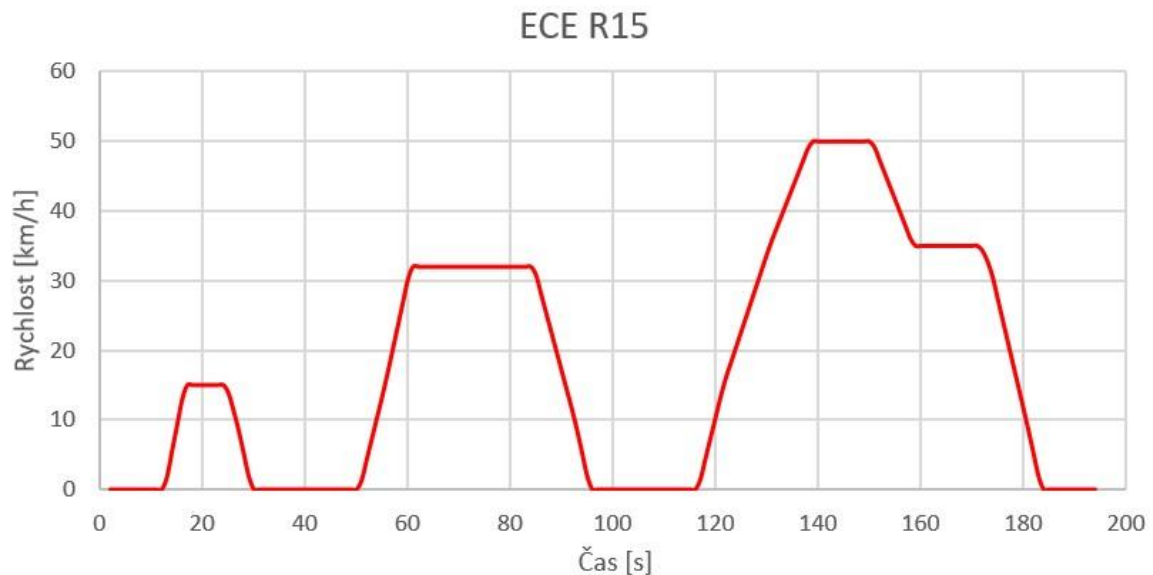
Jednotlivé jízdní cykly mají odlišné parametry. Použití příslušného cyklu závisí na těchto faktorech:

- Období, ve kterém byl výrobek homologován
- Druh vozidla
- Velikostní třída vozidla
- Oblast, pro kterou byla provedena homologace

Příklady homologačních cyklů:

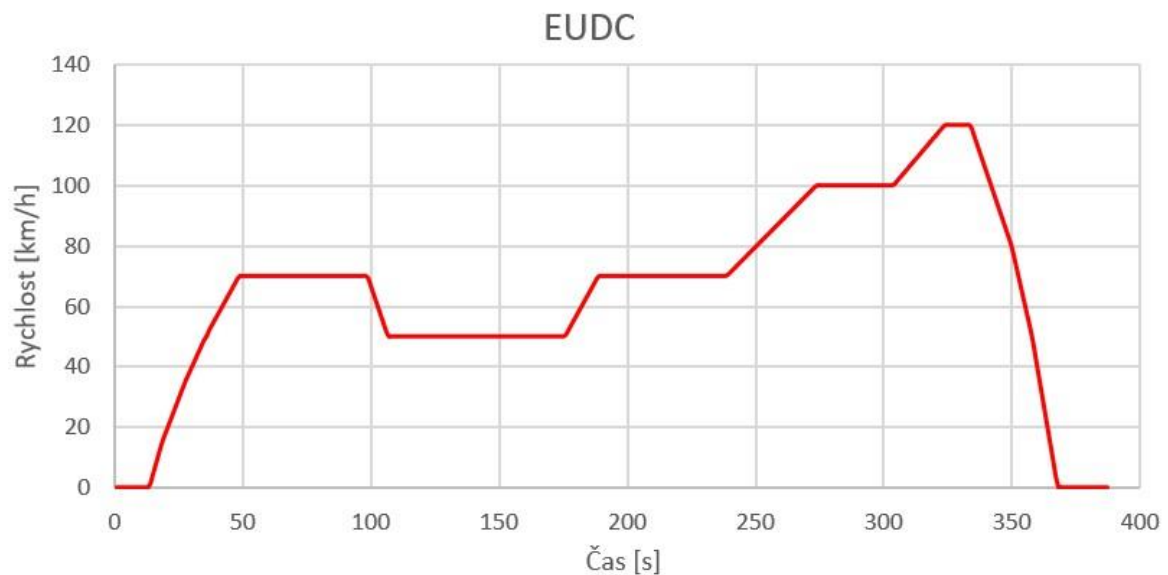
NEDC – New European Driving Cycle

Jedná se o hlavní homologační cyklus používaný až do nedávna (obměna během normy EURO 6) v Evropě. Je rozdělen na několik částí, jejichž konfigurace závisí na třídě testovaného vzorku. První část ECE (obrázek č. 12) simuluje jízdu po městě a je tak složena z rychlostí do 50 km/h. [18]



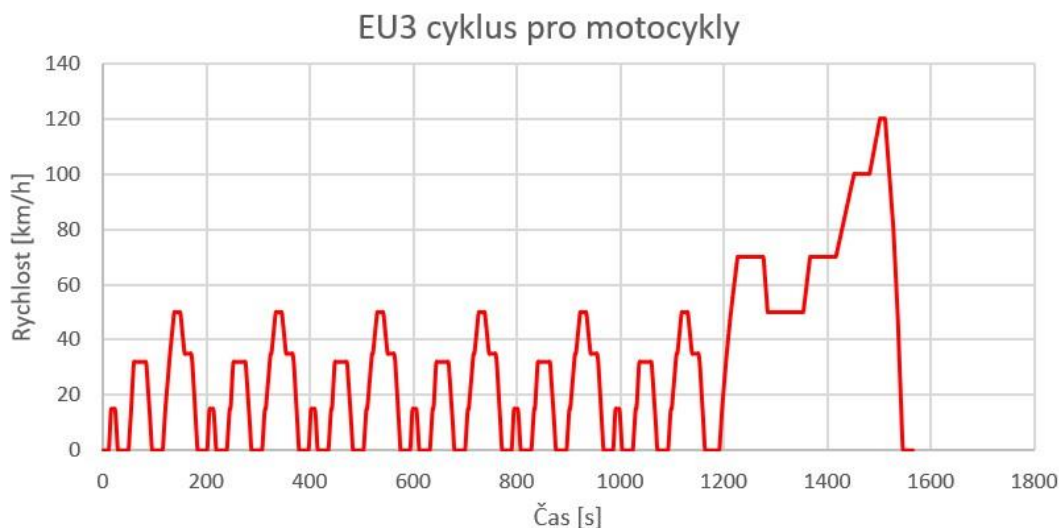
Obrázek 12: Část testovacího cyklu ECE R15 [autor]

Druhá část EUDC (obrázek č. 13) simuluje mimoměstskou část. Je složena zejména z rychlostí, které vozidlo dosahuje mimo město (okresní silnice, dálnice) až do 120 km/h.



Obrázek 13: Část testovacího cyklu EUDC [autor]

Pokud tyto části spojíme v různých kombinacích, vznikají dané homologační cykly pro různé druhy vozidel. Pro osobní automobily se používala 4x městská část ECE R15 + 1x mimoměstská EUDC. Pro motocykly 6x ECE R40 + 1x EUDC. Celkový homologační cyklus motocyklů (s maximální rychlostí minimálně 130 km/h) pro normu EURO 3 je potom vyobrazen na obrázku č. 14. [18]

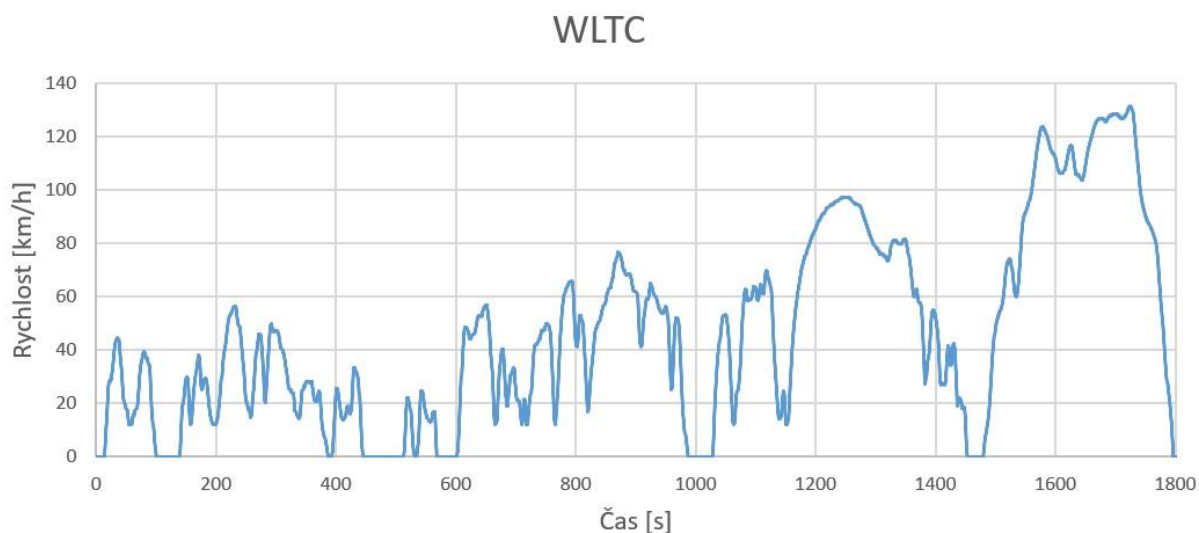


Obrázek 14: Homologační cyklus pro motocykly při schvalování normy EURO 3 [autor]

Řadící body v těchto cyklech jsou přesně definovány a jsou stejné pro všechna vozidla.

WLTC – Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle

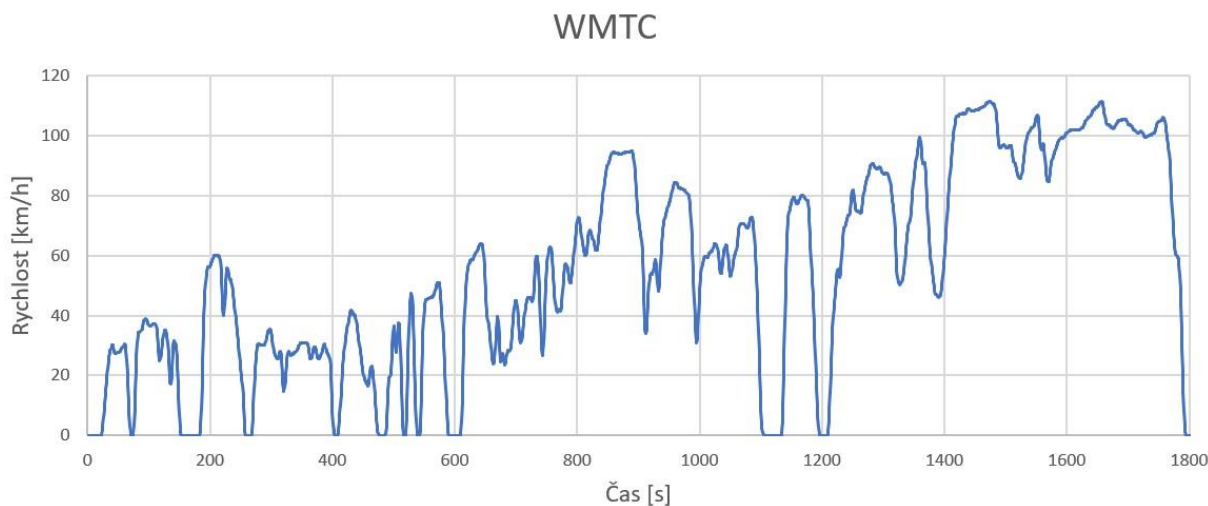
Tento evropský automobilový homologační cyklus se používá od roku 2015 (obrázek č. 15). Je rozdělen na 4 fáze – „low“, „medium“, „high“ a „extra high“. První fáze simuluje výhradně městský provoz (0 – 60 km/h), druhá k městskému provozu přidává i mimoměstské rychlosti (60 – 90 km/h), třetí zahrnuje zejména mimoměstské rychlosti a v poslední fázi se jedná o dálniční jízdu (90 km/h a více). Tento cyklus má více modifikací, které závisí na třídě homologovaného vozidla. Vyznačuje se daleko vyšší dynamikou jízdy než starší homologační cykly, které jsou uvedeny výše. Z toho důvodu je nutné, aby byly řadící body u vozidel s manuální převodovkou definovány vždy pro každé vozidlo zvlášť. [16]



Obrázek 15: Homologační cyklus WLTC pro automobily při schvalování EURO 6 [autor]

#### WMTC – World Motorcycle Test Cycle

WMTC je obdoba cyklu WLTC, která je ovšem upravena dle požadavků na běžné jízdní režimy motocyklů. Na obrázku č. 16 je znázorněn graf cyklu WMTC class 3A, který je určen pro motocykly s maximální rychlostí v rozmezí 130 -140 km/h. Stejně jako cyklus WLTC je rozdělen na fáze, v tomto případě ovšem jen na 3 („low“, „medium“ a „high“). [18]



Obrázek 16: Homologační cyklus WMTC pro motocykly při schvalování normy EURO 4 [autor]

Stejně jako u automobilového homologačního cyklu WLTC je nezbytné pro každý stroj zvlášť spočítat řadící body. Legislativa přesně definuje, jak tyto řadící body spočítat. Nabízí však také k dispozici odkaz na stažení programu v MS EXCEL, který tyto body spočítá automaticky po dosazení základních vstupních parametrů, které jsou následující:

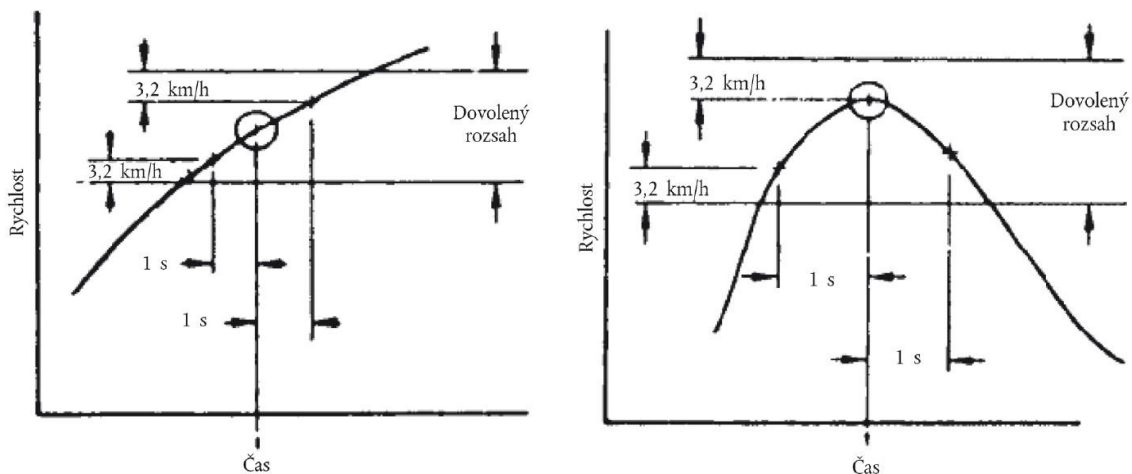


- třída WMTC, která se určí dle maximální rychlosti vozidla (třída 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2)
- maximální výkon
- hmotnost
- maximální otáčky motoru
- otáčky motoru na volnoběh
- podíl otáček a rychlosti  $n/v$  na jednotlivé převodové stupně

Zmíněný program je volně dostupný ke stažení na v následujícím odkaze [19]:

<http://live.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grpe/wmtc.html>

Při měření musí být průběh rychlostí v čase v tolerančním pásmu. Maximální možná odchylka rychlosti v každém okamžiku je přesně dána legislativou. Horní mez je určena hodnotou přesně o 3,2 km/h vyšší než nejvyšší bod na křivce v časovém rozptylu jedné sekundy od daného okamžiku (obrázek č. 17). To samé platí i pro dolní mez, která je o 3,2 km/h nižší než nejnižší bod na křivce vzdálený do jedné sekundy (obrázek č.18). [18]



Obrázek 17 a Obrázek 18: Definice maximální a minimální možné odchylky od křivky během testu [18]

### 3.4 Měření emisí v reálném provozu

Aby bylo prokazatelné, že vozidla (prozatím pouze osobní automobily) splňují emisní limity nejen na válcové zkušebně, ale i v jakýchkoli jiných jízdních podmínkách, zavedly se dle legislativy tzv. RDE testy (Real Driving Emissions – měření emisí v reálném provozu). Hlavní rozdíl je v opakovatelnosti testů. Zatímco na válcové zkušebně zajíždí vozidla stejné testy, v reálném provozu tuto podmínku nelze splnit. Z toho důvodu je za potřebí, aby tyto testy bylo možné vyhodnocovat statistickými metodami a tím pádem zajistit podmínky, které je potřeba během každého testu nezbytně dodržet, aby byl validní. Podmínky pro testy jsou následující [16] [17] [20]:

- Dobrý technický stav vozidla, které má již najeto alespoň 3000 km.
- Zatížení vozidla včetně posádky a měřícího zařízení nesmí přesáhnout 90% maximálního možného zatížení
- Nadmořská výška musí být menší nebo rovna 700 m.n.m., ve výjimečných případech až do 1300 m.n.m.
- Během celé jízdy nesmí být poměrný kumulativní nárůst nadmořské výšky menší než 1200 m za 100 km
- Venkovní teplota se musí pohybovat v rozmezí 0 – 30 °C, ve výjimečných případech až -7 – 35 °C
- Pro homologační měření je vždy za potřebí dvou validních jízd (start se studeným a s ohřátým motorem).
- Před studeným startem je nezbytné provést minimálně 30-ti minutovou jízdu a poté vozidlo nechat 6-56 hodin chladnout (soaking)
- Homologační zkouška musí být provedena v pracovní den.
- Všechny spotřebiče ve vozidle jsou běžně používány

#### Parametry jízdy:

Celková doba testu musí být v rozmezí 90 – 120 minut a v každé části je nezbytné ujet minimálně 16 km. [16] [17]

#### Městská část:

- zahrnuje rychlosti do 60 km/h
- průměrná rychlost musí být v rozmezí 15 – 40 km/h
- podíl městské části v celkové jízdě musí činit 29 – 44 %
- vozidlo musí 6 – 30 % doby jízdy ve městě stát

#### Mimoměstská část:

- zahrnuje rychlosti 60 – 90 km/h
- podíl mimoměstské části v celkové jízdě musí činit 33 % ± 10 %

#### Dálniční část:

- zahrnuje rychlosti 90 – 145 km/h, ve výjimečných případech až 160 km/h (nesmí překročit 3% celkové vzdálenosti ujeté při testu)
- podíl dálniční části v celkové jízdě musí činit 33 % ± 10 %

### 3.4.1 Vyhodnocení zkoušky

Se zkoušeným vzorkem je nezbytné zajet během RDE testů také cyklus WLTC na válcové zkušební a určit tzv. hodnoty CO<sub>2</sub> referenční. Poté se výsledné hodnoty porovnají. Hodnoty naměřené z provozu nebývají tak příznivé, aby splňovaly normu EURO 6. Proto se podle legislativy vypočítají hodnoty, které se nesmí překročit [16] [17]:

$$NTE_{pollutant} = CF_{pollutant} * EURO 6 \quad (3.4)$$

NTE<sub>pollutant</sub> – nepřekročitelné hodnoty

CF<sub>pollutant</sub> – conformity factor – faktor shodnosti (NO<sub>x</sub> – 1.43, PN – 1.5, CO – bez limitu)

EURO 6 – mezní hodnota emisí sledované veličiny dle normy EURO 6

### 3.4.2 Dynamika jízdy při měření RDE

Pro relevantní výsledky z jízdy jsou definovány dynamické parametry. Hodnotí se parametry zrychlení, VA<sub>positive</sub> (součin rychlosti a zrychlení vozidla) nebo RPA (relativní pozitivní akcelerace). PEMSem jsou zaznamenány parametry týkající se zrychlení a následně jsou dle legislativy použity pro výpočet:

$$d_i = \frac{v_i}{3,6} \quad (3.5)$$

$$a_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2 * 3,6} \quad (3.6)$$

$$(v * a)_i = v_i * a_i / 3,6 \quad (3.7)$$

i = od 1 do N<sub>t</sub>

d<sub>i</sub> – vzdálenost ujetá za časový krok i [m]

v<sub>i</sub> – aktuální rychlost vozidla během časového kroku i [km/h]

N<sub>t</sub> – celkový počet vzorků

a<sub>i</sub> – zrychlení během časového kroku i [m/s<sup>2</sup>], i = 1: v<sub>i-1</sub> = 0, i = N: v<sub>i+1</sub> = 0

(v \* a)<sub>i</sub> – součin aktuální rychlosti vozidla a zrychlení během časového kroku i [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> nebo W/kg]

Po vypočtení parametrů výše následuje tzv. diskretizace. Výsledky se seřadí vzestupně podle rychlosti do separátních „košů“ (město, mimoměsto a dálnice) a vyhodnotí se průměrná rychlost každého rychlostního „koše“:

$$\overline{v}_k = \frac{\sum_i v_{i,k}}{N_k} \quad (3.8)$$

i = od 1 do N<sub>k</sub>     k = u, r, m

N<sub>k</sub> – počet vzorků v jednom rychlostním „koši“

Pod hodnoty  $(a * v)_{i,k}$  spadají zrychlení, která jsou větší nebo rovno  $0,1 \text{ m/s}^2$ . Ty se seřadí vzestupně a určí se jejich celkový počet v každém „koši“  $M_k$ . Hodnotám se postupně přiřazují:

$1/M_k, 2/M_k, \dots, M_k/M_k = 100 \%$ .  $(v * a_{pos})_k$  je hodnota  $(v * a_{pos})_{i,k}$  s  $j/M_k = 95\%$ .

Následuje výpočet  $RPA_k$  – relativní pozitivní akcelerace pro jednotlivé úseky [ $\text{m/s}^2$  nebo  $\text{kWs}/(\text{kg} * \text{km})$ ]

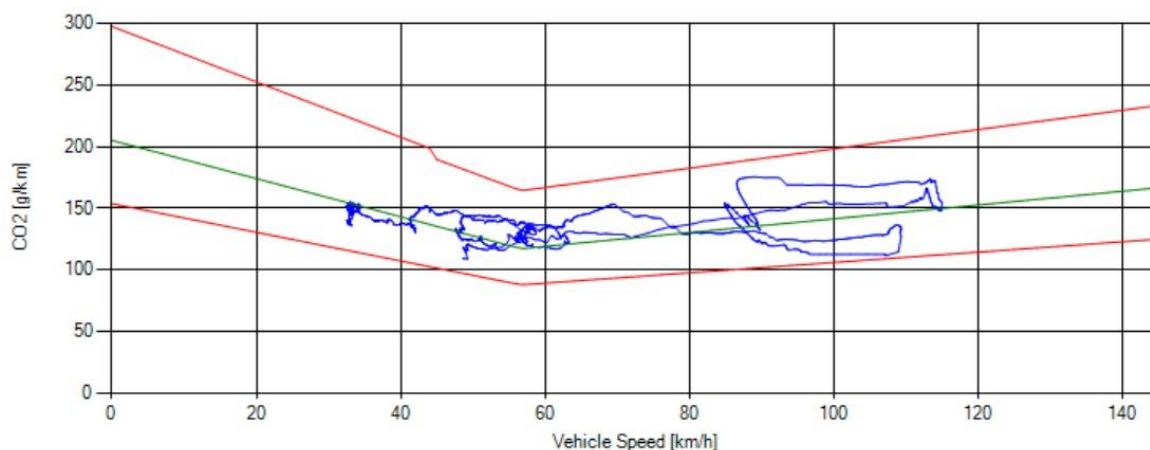
$$RPA_k = \sum_j (\Delta t * (v * a_{pos})_{j,k}) / \sum_i d_{i,k} \quad (3.9)$$

$j = \text{od } 1 \text{ do } M_k, i = \text{od } 1 \text{ do } N_k$

$\Delta t$  – rozdíl v čase, který se rovná 1 s

Dále je nezbytné ověřit, zda je jízda dle těchto dvou parametrů platná. V případě  $(v * a_{pos})_k$  je jízda neplatná, pokud je  $\bar{v}_k \leq 74,6 \text{ km/h}$  a  $(v * a_{pos})_k > (0,136 * \bar{v}_k + 14,44)$  nebo pokud je  $\bar{v}_k > 74,6 \text{ km/h}$  a  $(v * a_{pos})_k > (0,0742 * \bar{v}_k + 18,966)$ . V případě  $RPA_k$  je neplatná, pokud je  $\bar{v}_k \leq 94,05 \text{ km/h}$  a  $RPA_k < (-0,0016 * \bar{v}_k + 0,1755)$  nebo pokud je  $\bar{v}_k > 94,05 \text{ km/h}$  a  $RPA_k < 0,025$ . [16] [17]

K vyhodnocení dynamiky se používá metoda akceleračních oken. Jízda se rozdělí na jednotlivá akcelerační okna, jejichž analýza určuje platnost jízdy měření emisí v reálném provozu. Normalita akceleračních oken se určí porovnáním změřených emisí  $\text{CO}_2$  za danou vzdálenost s křivkou emisí  $\text{CO}_2$ , která byla získána při měření homologačního jízdního cyklu  $\text{CO}_2$  referenční na válcovém dynamometru. Pokud zkouška splní všechny výše uvedené parametry, je možné ji prohlásit za platnou. Na obrázku č. 19 lze vidět tzv. MAW (Moving Average Windows) graf, který znázorňuje validitu akceleračních oken. Každé akcelerační okno je zde znázorněno jako jeden bod, jejichž souhrn tvoří modrou křivku. Zelená tzv. V-line křivka je tvořena hodnotami naměřenými při měření  $\text{CO}_2$  referenční na válcové zkušebně. Červené křivky vyobrazují legislativně určené limity odchylky od zelené V-line křivky. Standardně je nutné, aby mezi křivkami bylo nejméně 50 % akceleračních oken v každé části. Zde je to 100 %. Tento konkrétní graf vyobrazuje validní test, který byl měřen současně se záznamovou jízdou v experimentální části RDE 2 na automobilu (Škoda Fabia 1.2 TSI). [16] [17]



Obrázek 19: Graf MAW – souhrn akceleračních oken (Škoda Fabia 1.2 TSI) na trase RDE 2 [autor]

### 3.5 PEMS

PEMS je zkratka – Portable Emissions Measurement System. Jedná se o přenosné zařízení, které se namontuje na zkoušený vzorek (zpravidla osobní automobil) a zaznamenává výfukové emise během jízdy v reálném provozu. Přístroj tohoto typu je sériově vyráběn čtyřmi hlavními značkami (SEMTECH, AVL, MAHA a HORIBA), jejichž konstrukční řešení je rozdílné, avšak princip funkce je podobný. Metoda měření koncentrací složek ve výfukových plynech PEMSem se lehce liší od metody měření CVS, nicméně analyzátory jednotlivých složek pracují na stejném principu. Na obrázku č. 20 lze vidět PEMS užívaný pro homologační měření.



Obrázek 20: PEMS pro automobily SEMTECH SENSORS [autor]

Zařízení se nainstaluje na tažné zařízení automobilu (nejlepší řešení, avšak je možné řešit i jiným způsobem). Na konec výfukového systému je těsně upevněna žáruvzdorná hadice, která přivádí výfukové plyny do průtokoměru (obrázek č. 21). Funkcí průtokoměru je měřit aktuální průtok, z čehož

jsou později počítány výsledné hmotnosti jednotlivých složek. Princip průtokoměru je řešen Pitotovou trubicí, která porovnává tlaky ve dvou osách (popsáno v předchozí kapitole 3.1.4.1.). Zařízení, ve kterém se nachází průtokoměr, má navíc funkci odběru vzorku a jeho zavedení dále do zařízení.



Obrázek 21: Připojení výfuku k průtokoměru PEMSu [autor]

Nadále je vzorek veden do tzv. SCS (Sample Conditioning System – systém kondice vzorku), který jej upravuje tak, aby byl co nejlépe analyzovatelný. Poté probíhá samotné měření složek analyzátory (CO a CO<sub>2</sub> – NDIR, NO a NO<sub>2</sub> – NDUV). Toto je základní jednoduchá verze, kterou však lze doplnit o další příslušenství:

- čítač částic – měří počet pevných částic
- horký FID – měří koncentrace nespálených uhlovodíků
- GPS – měří rychlost, polohu a nadmořskou výšku vozidla během testu
- „weather“ sonda – snímá okolní klimatické podmínky
- OBD – spojuje PEMS s elektronickým systémem vozidla, je schopen vyčítat důležité informace, jako je rychlost vozidla nebo otáčky motoru
- baterie – zajišťuje napájení měřících zařízení, aby výfukové emise nebyly ovlivněny nadměrným odběrem elektrického proudu z vozidla

Před a po každém testu je nezbytné, aby byla provedena tzv. kalibrace (pre-test a post-test), princip je popsán výše. Předpis přesně definuje maximální možnou odchylku (DRIFT), o kolik se může analyzátor během měření odchýlit od původně stanovených hodnot. Zmíněné hraniční toleranční hodnoty jsou:

	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	NO <sub>x</sub> [ppm]	HC [ppm]
Zero (nula)	0,0075	0,2	5,0	10,0
Span (vrchní hranice)	0,0075	0,2	5,0	10,0

Tabulka 1: Maximální možné odchylky analyzátoru od původních hodnot během testu [17]

Zero Drift				
	CO <sub>2</sub> %	CO %	NO <sub>x</sub> ppm	THC ppmC
Pre-test zero Result	0.00	-0.0015	0.0	
Post-test pre-zero Result	0.00	-0.0022	1.4	
Drift (abs)	0.00	-0.0007	1.4	
Tolerance (abs)	0.2	0.0075	5.0	10.0
Validity	Valid	Valid	Valid	
Span Drift				
	CO <sub>2</sub> %	CO %	NO <sub>x</sub> ppm	THC ppmC
Pre-test span Result	14.98	0.9892	1728.1	
Post-test pre-span Result	14.91	0.9912	1728.0	
Bottle Value	15.00	0.9900	1728.0	
Drift (abs)	0.07	0.0020	0.1	
Tolerance	0.2	0.0075	5.0	10.0
Drift (%)	0.47	0.20	0.01	
Tolerance (%)	2.0	2.0	2.0	2.0
Validity	Valid	Valid	Valid	
Action Times				
	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	THC
Pre-test zero time	13:49:31	13:49:31	13:49:35	
Pre-test span time	13:52:14	13:52:14	13:52:14	
Post-test zero time	16:04:18	16:04:18	16:04:21	
Post-test span time	16:06:32	16:06:32	16:06:32	

Obrázek 22: Vyhodnocení odchylek analyzátorů během testu – PEMS SEMTECH SENSORS [autor]

## 4 Měření emisí motocyklů

V současné době nově homologovaná vozidla kategorie L (lehká vozidla – motocykly, tříkolky, čtyřkolky) podléhají emisní normě EURO 4. V této kapitole bude popsána zejména zkouška typu I – výfukové emise po studeném startu. Zkouška probíhá na válcovém dynamometru, kde se projede zkušební cyklus WMTC, při čemž jsou změřeny emise výfukových plynů. Vozidla se dělí do tříd, zejména podle jejich objemu motoru a maximální možné dosažitelné rychlosti (třída 1, 2-1, 2-2, 3-1 a 3-2). [18]

### 4.1 Zkouška typu I.

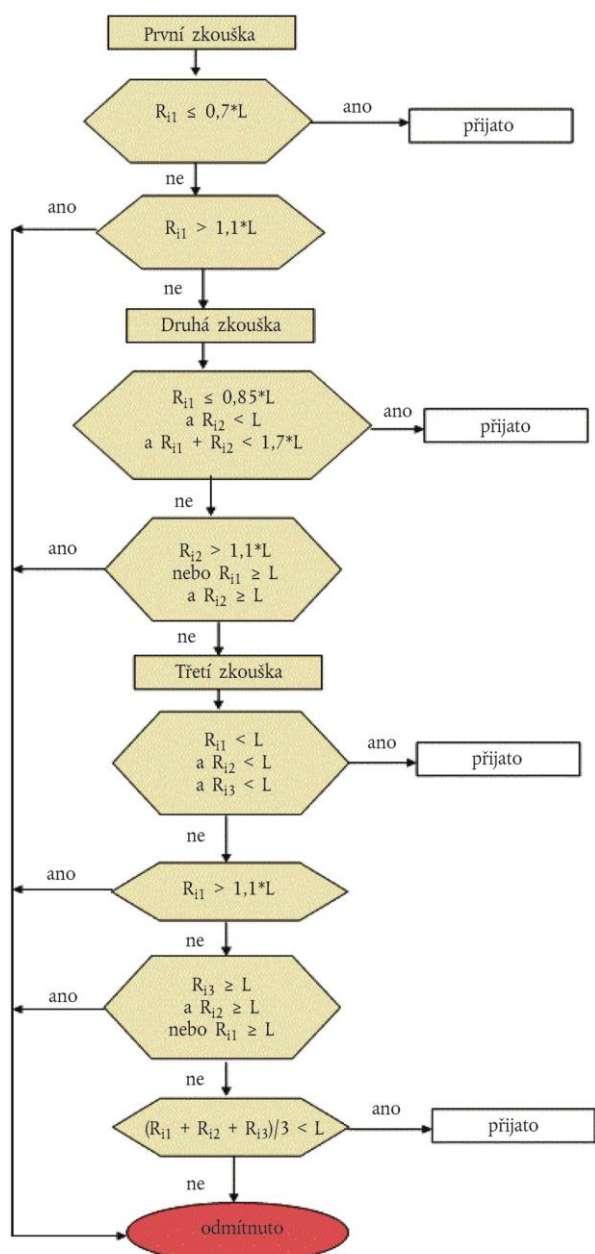
Hlavní podmínky zkoušky typu I [15] [18]:

- teplota vzduchu okolí při zkoušce  $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
- teplota vzduchu okolí při temperování vozidle před zkouškou  $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
- vozidlo má najeto alespoň 1000 km a je řádně zaběhnuto
- použije se referenční palivo s udávanou hustotou při  $15 \text{ }^\circ\text{C}$
- hmotnost zkušebního řidiče  $75 \pm 5 \text{ kg}$
- tlak v pneumatikách musí odpovídat specifikacím výrobce

#### 4.1.1 Průběh zkoušky

Zkouška se skládá z předepsaného sledu operací, k nimž patří: nastavení dynamometru, tankování referenčního paliva, odstavení a běh motoru. Účelem je zjistit hmotnost emisí uhlovodíků, oxidu uhelnatého, oxidů dusíku, oxidu uhličitého a spotřeby paliva/energie. Počet zkoušek je určen dle diagramu na obrázku č. 23. [18]





Obrázek 23: Diagram postupu vyhodnocování při zkoušce typu I. [18]

$R_i$  – představují konečné výsledky měření (číslo značí, o kolikátou zkoušku v pořadí se jedná)

$L$  – představuje limitní hodnoty

Před „ostrým testem“ proběhne tzv. stabilizace – nastavení válcového dynamometru. Poté se vozidlo ostaví do prostoru, kde temperuje pod dobu 6-36 hodin. Před měřením se vozidlo pevně uchyťí hnacím kolem na válcový dynamometr bez nastartování motoru a na výfukový systém se těsně napojí potrubí odběru vzorků (utěsnění až bezprostředně před zahájením testu). Ventilátor chlazení vozidla a odběrné ventily se uvedou do pohotovostního režimu, vyprázdňené vaky jsou připojeny k systémům odběru vzorků. Systém CVS se uvede do činnosti, nastaví se průtoky vzorků (požadovaná hodnota) a průtokoměry plynu (nula). Poté se manuálně zahájí test a současně se nastartuje motor.

Do 15 vteřin od nastartování se zařadí rychlostní stupeň a vozidlo začne zrychlovat (jede po křivce zkušebního cyklu). Na konci každé fáze cyklu proběhne výměna vzorkovacích vaků. Po zkoušce se do 2 vteřin od ukončení testu zastaví motor vozidla a poté se vypne ventilátor a zařízení pro odběr vzorků (CVS). [18]

#### 4.1.2 Analýza výsledků

Analýza musí být provedena co nejdříve po dokončení testu (odběru vzorků), nejpozději do 20 minut. Určují se koncentrace složek ve vaku A – výfukové plyny + okolní vzduch i ve vaku B – pouze okolní vzduch. Před i po analýze se provede kalibrace jednotlivých analyzátorů. Odchylka od referenčních hodnot nesmí být větší, než 2 %. Výsledky se počítají zvlášť pro každou část testu podle následujících vzorců [18]:

- Normalizovaný objem zředěných plynů [m<sup>3</sup>] (273,2 K a 101,3 kPa) [18]

$$V = V_0 \frac{N \cdot (P_a - P_i) \cdot 273,2}{101,3 \cdot (T_p + 273,2)} \quad (4.1)$$

$V_0$  – objem plynů, které přečerpá objemové dávkovací čerpadlo P za jednu otáčku [m<sup>3</sup>]

$N$  – počet otáček objemového dávkovacího čerpadla za část zkoušky

$P_a$  – tlak v okolí [kPa]

$P_i$  – průměrný podtlak během jedné části zkoušky na vstupu do čerpadla P [kPa]

$T_p$  – teplota zředěných plynů na vstupu do čerpadla [K]

- hmotnost a koncentrace nespálených uhlovodíků HC [18]

$$HC_m = \frac{1}{S} \cdot V \cdot d_{HC} \cdot \frac{HC}{10^3} \quad (4.2)$$

$$HC_c = HC_e - HC_d \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (4.3)$$

$HC_m$  – hmotnost nespálených uhlovodíků, vyprodukovaných motorem za část zkoušky [mg/km]

$S$  – ujetá vzdálenost [km]

$V$  – celkový objem zředěných plynů [m<sup>3</sup>]

$d_{HC}$  – hustota uhlovodíků (0 °C, 101,3 kPa), pro benzin =  $631 \cdot 10^3$  [mg/m<sup>3</sup>]

$HC_c$  – koncentrace zředěných plynů, vyjádřená v částech na milion [ppm] ekvivalentu uhlíku (např. koncentrace v propanu násobená třemi), přepočtená s ohledem na ředicí vzduch

$HC_e$  – koncentrace uhlovodíků ve vzorku zředěných plynů nashromážděných ve vaku (vacích) A, vyjádřená v částech na milion [ppm] ekvivalentu uhlíku

$HC_d$  – koncentrace uhlovodíků ve vzorku ředicího vzduchu nashromážděného ve vaku (vacích) B, vyjádřená v částech na milion [ppm] ekvivalentu uhlíku

$DF$  – faktor ředění

- hmotnost a koncentrace oxidu uhelnatého CO [18]

$$CO_m = \frac{1}{S} \cdot V \cdot d_{CO} \cdot \frac{CO}{10^3} \quad (4.4)$$

$$CO_c = CO_e - CO_d \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (4.5)$$

$CO_m$  – hmotnost oxidu uhelnatého, vyprodukovaného motorem za část zkoušky [mg/km]

$S$  – ujetá vzdálenost [km]

$V$  – celkový objem zředěných plynů [ $m^3$ ]

$d_{CO}$  – hustota oxidu uhelnatého =  $1,25 \cdot 10^3$  (0 °C, 101,3 kPa) [ $mg/m^3$ ]

$CO_c$  – koncentrace zředěných plynů, přepočtená s ohledem na ředící vzduch [ppm]

$CO_e$  – koncentrace oxidu uhelnatého ve vaku A [ppm]

$CO_d$  – koncentrace oxidu uhelnatého ve vaku B [ppm]

$DF$  – faktor ředění

- hmotnost a koncentrace oxidů dusíku  $NO_x$  [18]

$$NO_{xm} = \frac{1}{S} \cdot V \cdot d_{NO_2} \cdot \frac{NO_{xc} \cdot K_h}{10^3} \quad (4.6)$$

$$NO_{xc} = NO_{xe} - NO_{xd} \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (4.7)$$

$NO_{xm}$  – hmotnost oxidů dusíku, vyprodukovaných motorem za část zkoušky [mg/km]

$S$  – ujetá vzdálenost [km]

$V$  – celkový objem zředěných plynů [ $m^3$ ]

$d_{NO_2}$  – hustota oxidů dusíku ve formě oxidu dusičného =  $2,05 \cdot 10^3$  (0 °C, 101,3 kPa) [ $mg/m^3$ ]

$NO_c$  – koncentrace zředěných plynů, přepočtená s ohledem na ředící vzduch [ppm]

$NO_e$  – koncentrace oxidů dusíku ve vaku A [ppm]

$NO_d$  – koncentrace oxidů dusíku ve vaku B [ppm]

$K_h$  – korekční faktor vlhkosti [18]

$$K_h = \frac{1}{1 - 0,0329 \cdot (H - 10,7)} \quad (4.8)$$

$$H = \frac{6,2111 \cdot U \cdot P_d}{P_a - P_d \cdot \frac{U}{100}} \quad (4.9)$$

$H$  – absolutní vlhkost vyjádřena v g vody na kg suchého vzduchu

$U$  – vlhkost [%]

$P_d$  – tlak nasycené vodní páry [kPa]

$P_a$  – atmosférický tlak [kPa]

$DF$  – faktor ředění

- hmotnost a koncentrace oxidu uhličitého CO<sub>2</sub> [18]

$$CO_{2m} = \frac{1}{S} \cdot V \cdot d_{CO_2} \cdot \frac{CO_{2c}}{10^2} \quad (4.10)$$

$$CO_{2c} = CO_{2e} - CO_{2d} \cdot \left( \frac{1}{DF} \right) \quad (4.11)$$

CO<sub>2m</sub> – hmotnost oxidu uhličitého, vyprodukovaného motorem za část zkoušky [mg/km]

S – ujetá vzdálenost [km]

V – celkový objem zředěných plynů [m<sup>3</sup>]

d<sub>CO<sub>2</sub></sub> – hustota oxidu uhelnatého = 1,964 · 10<sup>3</sup> (0 °C, 101,3 kPa) [g/m<sup>3</sup>]

CO<sub>2c</sub> – koncentrace zředěných plynů, přepočtená s ohledem na ředící vzduch [%]

CO<sub>e</sub> – koncentrace oxidu uhličitého ve vaku A [%]

CO<sub>d</sub> – koncentrace oxidu uhličitého ve vaku B [%]

DF – faktor ředění

Faktor ředění vypočítáme následujícím způsobem (pro běžná referenční paliva):

$$DF = \frac{X}{C_{CO_2} + (C_{HC} + C_{CO}) \cdot 10^{-4}} \quad (4.12)$$

C<sub>CO<sub>2</sub></sub> [%], C<sub>HC</sub> [ppm], C<sub>CO</sub> [ppm] – koncentrace příslušných složek ve zředěném výfukovém plynu ve vaku

X pro benzin = 13,4 [18]

## 4.2 Jízdní odpory

Pro určení jízdních odporů a následně jejich nastavení na válcovém dynamometru je nutné provést tzv. dojezdovou zkoušku. Jedná se o silniční zkoušku, při které se zjistí závislosti jízdních odporů na rychlosti jízdy. Výsledek nazýváme dojezdovou charakteristikou. V praxi probíhá tak, že se zkoušené vozidlo rozjede po vodorovné zkušební trati za bezvětří na předem určenou rychlost, nejlépe na maximální, pokud to podmínky dovolují. Poté dojde k přerušení pohonu (vyřazení rychlosti). Vozidlo se však vlivem setrvačnosti pohybuje dále a vlivem vzdušného, valivého a třecího odporu volně deceleruje až do úplného zastavení. Samotné měření často probíhá pouze v určitém úseku, například 120 → 20 km/h. S řízením vozidla je nutno manipulovat co nejméně, aby vozidlo jelo po dráze co nejpříměji a brzdy nesmí být použity během průběhu měření. [15] [18]

Doba dojezdu Δt, která odpovídá specifikované rychlosti v se měří jako uplynulý čas při zpomalení vozidla z rychlosti v + Δv na rychlost v – Δv. Měření se ihned opakuje na stejném úseku v opačném směru, kde se změří druhá doba dojezdu Δt. Průměrná hodnota se následně vypočítá:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_a + \Delta t_b}{2} \quad (4.13)$$

Tyto zkoušky se provedou nejméně 4, z nichž je poté spočítána průměrná hodnota:

$$\Delta t = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (4.14)$$

Velmi důležité je také určit statistickou přesnost. Legislativa vyžaduje přesnost maximálně 3 %. Pokud tato přesnost není dosažena, je nezbytné měření opakovat do té doby, než bude tato podmínka splněna. Při opakování je nezbytné, aby byly dodrženy stejné podmínky (zahřívání a počáteční rychlost). [18]

#### 4.2.1 Výpočet sil jízdních odporů

Síla jízdního odporu  $F$  [N] při určité rychlosti  $v$  se vypočítá následujícím způsobem [18]:

$$F = \frac{1}{3,6} \cdot m_{ref} \cdot \frac{2 \cdot \Delta v}{\Delta t} \quad (4.15)$$

$m_{ref}$  – referenční hmotnost vozidla [kg]

$\Delta v$  – odchylka rychlosti vozidla [km/h]

$\Delta t$  – vypočtený rozdíl času dojezdu [s]

$$F = f_0 + f_2 \times v^2 \quad (4.16)$$

Abychom získali koeficienty  $f_0$  a  $f_2$ , přizpůsobíme tuto rovnici pomocí lineární regrese souboru získaných hodnot  $F$  a  $v$ . Koeficienty se nadále korigují na normální podmínky okolí pomocí rovnic [18]:

$$f_0^* = f_0 = [1 + K_0(T_T - T_0)] \quad (4.17)$$

$$f_2^* = f_2 \times \frac{T_T}{T_0} \times \frac{p_0}{p_T} \quad (4.18)$$

$K_0$  – stanoví se dle empirických údajů pro dané vozidlo (předpoklad  $-6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

Konečná síla jízdního odporu při referenční rychlosti  $v_0$  [18]:

$$F(v_0) = f_0^* + f_2^* \times v_0^2 \quad (4.19)$$

#### 4.2.2 Podmínky zkoušky

Je nezbytné také dodržet jasně definované podmínky, ať už z důvodu bezpečnosti, tak relevantnosti měření. Podmínky jsou následující [18]:

- jezdec sedí na vozidle ve standardní jízdní pozici, je oblečen do těsně přiléhajícího oděvu a je vybaven ochrannými prvky, jako je přilba, rukavice, vhodná obuv nebo ochrana očí
- jezdec musí vážit  $75 \pm 5$  kg a měřit  $175 \pm 5$  cm

- zkušební dráha musí být rovná, plochá, hladká, čistá, suchá a její sklon nesmí překročit 0,5 % v rozmezí každých 2 m na celé trati
- vítr musí být ustálený a nesmí překročit průměrnou rychlost 3 m/s ve směru jízdy (5 m/s při porывu) a 2 m/s kolmo na směr jízdy
- teplota vzduchu musí být v rozmezí 5 – 35 °C a relativní vlhkost maximálně 95 %
- měřící zařízení musí být na vozidlo instalováno takovým způsobem, aby nenarušilo rozložení váhy, ani aerodynamiku vozidla

### 4.3 Měření RDE na motocyklu

Emise výfukových plynů jsou v současné době od roku 2016 omezeny normou EURO 4, které podléhají limitům uvedeným v tabulce č. 2 (spalovací benzinové motory). Ta vyžaduje ve spojení s výfukovými plyny pouze 2 homologační zkoušky: zkoušku typu I popsanou výše a zkoušku typu II, která se zabývá zvýšenými volnoběžnými otáčkami při volné akceleraci. S příchodem normy EURO 5 lze tedy očekávat nejen zpřísnění limitů, ale i rozšíření měření a testování za účelem schválit výrobek do provozu.

	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	HC (g/km)
EURO 4 (2016)	1,14	0,09	0,17
EURO 5 (2020)	1,0	0,06	0,1

Tabulka 2: Emisní limity dle norem EURO 4 a EURO 5 [15]

Pro rozšíření měření emisí se přímo nabízí příchod RDE, stejně jako tomu bylo u osobních automobilů. Existuje však spousta problémů, které jsou s tímto měřením spojené. Největší problém je velikost, váha a nekompaktnost měřícího zařízení, které není tak jednoduché na motocykly (obzvláště nižších hmotnostních kategorií) nainstalovat. I kdyby se současně dostupným měřícím zařízením povedlo tyto vozidla vybavit, razantní změna hmotnosti a aerodynamických vlastností by mohla výrazně ovlivnit měřené hodnoty a takové testování by nebylo relevantní. Nicméně příchod měření RDE na motocyklech v budoucnu je zřejmý, a proto již existují první studie, které se věnují této problematice. Experimentální část této práce se zabývá zmapováním situace ohledně měření RDE na motocyklech a analýzou emisního chování motocyklů při jiných jízdních režimech, než jsou homologační cykly. [1] [18]

#### 4.3.1 Prozatímní experimenty

Experimentálním měřením v reálném provozu se již zabývá mnoha institucí. Tyto výzkumy se dělí na 2 části dle toho, jaké zařízení bylo pro měření použito.

- měření pomocí automobilového PEMSu
- měření pomocí experimentálních analyzátorů

Jako příklad měření pomocí automobilového PEMS na motocyklu lze uvést výzkum německého institutu FVT, který provedl měření emisí výfukových plynů na motocyklu značky BMW. Měření proběhlo pomocí zařízení PEMS AVL M.O.V.E., které se používá výhradně pro homologační jízdy RDE u osobních automobilů. Na motocykl typu BMW F 800 GT byl tento PEMS nainstalován s kompletním příslušenstvím a napájením (obrázek č. 24). Chyběl pouze čítač pevných částic, který v tomto případě není potřeba, protože legislativa motocyklů pevné částice nelimituje.

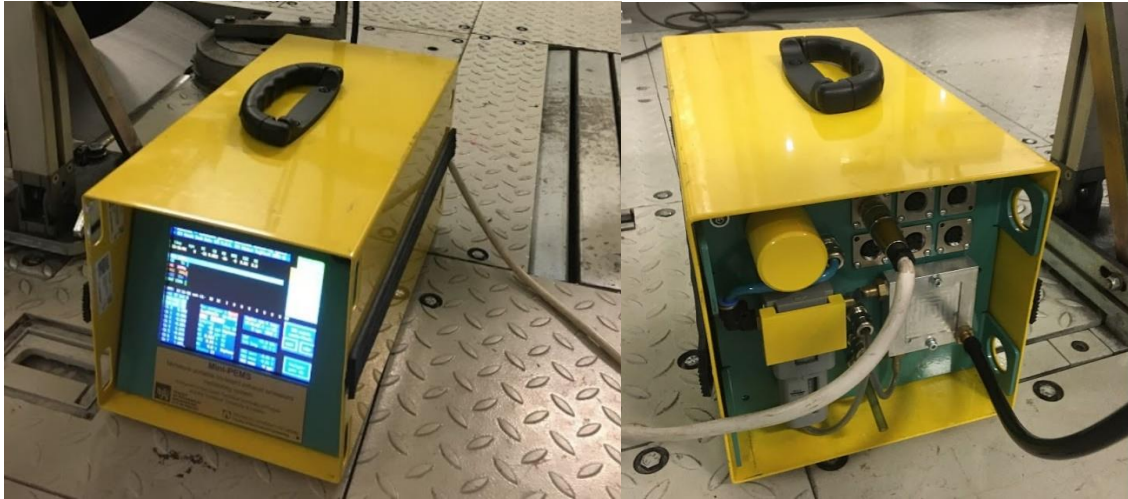


*Obrázek 24: Motocykl BMW F 800 GT s PEMSem pro automobily AVL M.O.V.E. [13]*

Vozidlo bylo testováno v mnoha jízdních režimech. Kromě testů v reálném provozu, které podléhaly automobilové legislativě RDE, byly provedeny další experimentální měření na silnici a na válcové zkušebně. V laboratoři byly reprodukovány testy naměřené v provozu na dalších 4 motocyklech a byly provedeny i standardní testovací cykly. Cílem výzkumu bylo navrhnout testovací jízdní cykly pro různé kategorie emisí pro budoucí příchod RDE na motocyklech.

Výsledkem testování je zjištění markantních rozdílů mezi jednotlivými kategoriemi motocyklů, díky čemuž nelze navrhnout jednotné nebo alespoň rozumně sjednocené parametry měření tak, aby byly testovací procedury zvládnutelné. Navíc je zde zmíněn i problém s nosností malých motocyklů a mopedů a měření průtoku u malých motorů. [13]

Pro příklad měření RDE pomocí experimentálních analyzátorů je vybrán experimentální Mini-PEMS (obrázek č. 25 a 26) vytvořený pro měření emisí výfukových motocyklů, který byl následně i využit pro vlastní měření. Tento PEMS byl vytvořen v rámci spolupráce technické univerzity v Liberci a pražského ČVUT pod vedením prof. Michala Vojtíška M.S., Ph.D. Hlavní výhodou tohoto zařízení je nesporně v jeho kompaktních rozměrech a váze, což dává prostor možnostem měřit emise výfukových plynů online v reálném provozu.



Obrázek 25 a Obrázek 26: Mini-PEMS pro motocykly [autor]

Tento PEMS je vybaven standardními analyzátoři pro měření kyslíku, oxidů uhlíku a dusíku (NDIR, elektrochemický článek). Dále je schopen snímat i uhlovodíky, avšak pro přesnější hodnoty by bylo zapotřebí analyzátoru založeném na principu změny vodivosti elektřiny vodíkového plamene (FID). Hodnota koncentrací HC však není legislativně vyžadována ani při měření RDE na automobilech. Dále zde chybí čítač pevných částic, toho ovšem také není za potřebí z důvodu zatím nezavedeného limitu. Pro kontrolu aktuálních hodnot během měření a základní ovládání je zde dotykový displej. Oproti automobilovému PEMSu je zde však problém absence průtokoměru výfukových plynů, který je nezbytný pro dopočet výsledných hmotnostních poměrů analyzovaných složek ve výfukových plynech. Ten lze spočítat za předpokladu znalosti dalších veličin, který je přístroj schopen zaznamenávat pomocí vlastního příslušenství, jako je například absolutní tlak v sacím potrubí, otáčky motoru a teploty jak před vstupem do motoru, tak ve výfukovém traktu. Kromě toho lze přístroj dovybavit vlastním GPS modulem pro záznam rychlosti, vzdálenosti, pozice nebo nadmořské výšky. Hmotnostní průtok vzduchu lze dopočítat z následující rovnice:

$$m_{air} = 0,0289 * \eta_{vol} * V_d * RPM * MAP * \frac{1}{120 * 8,314 * T_{int}} \quad (4.20)$$

$m_{air}$  – hmotnostní průtok nasávaného vzduchu [g/s]

0,0289 – molární hmotnost okolního vzduchu ve standardní atmosféře [kg/mol]

$\eta_{vol}$  – objemová účinnost motoru

$V_d$  – zdvihový objem motoru [dm<sup>3</sup>]

RPM – počet otáček motoru za jednu minutu

MAP – absolutní tlak v sacím potrubí [kPa]

$T_{int}$  – teplota nasávaného vzduchu [K]

8,314 – univerzální plynová konstanta

120 – konstanta pro 4 – době motory



Tento mini-PEMS je nesporně příkladem toho, jak by v budoucnu mohlo být řešené zařízení pro měření RDE na motocyklech. Při testování a validaci tohoto přístroje byla u výše zmíněných složek naměřena odchylka v koncentracích i hmotnostních emisí okolo 8 % (CO dokonce pouze 2 %) oproti výsledkům oproti laboratornímu vybavení. Přitom včetně baterie, která s jistotou zajistí napájení po dobu minimálně 2 hodin, váží pouhých 9 kg. [1]

## 5 Experimentální část

### 5.1 Metodika vlastního experimentu

Pro zmapování emisního chování motocyklu mimo homologační cyklus, bylo nezbytné navrhnout vlastní metodiku měření. Protože zkoušené vozidlo neumožňovalo instalaci rozměrnějšího zařízení pro záznam výfukových emisí, bylo nutné nalézt jiné řešení. Nejprve se tedy zaznamenala data v reálném provozu a poté se co nejpřesnějším způsobem reprodukovala na válcové zkušebně, kde již probíhala samotná analýza složek ve výfukových plynech, aniž by byl zkoušený motocykl jakkoliv ovlivněn zátěží měřícího zařízení.

### 5.2 Zkoušené vozidlo

Pro měření byl zapůjčen vzorek vozidla z firmy JAWA Moto Spol. s.r.o. Jedná se o standardní motocykl střední třídy s jednoduchým pohonným ústrojím, určený výhradně pro rekreační jízdu, s označením JAWA 350 OHC SPECIAL, který lze vidět na obrázku č. 27. Zkoušený vzorek byl již řádně zajetý, konkrétně měl najeto 6500 km. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce č. 3.



Obrázek 27: JAWA 350 OHC SPECIAL [34]

JAWA 350 OHC SPECIAL – Technické parametry	
Pohonná jednotka	Spalovací čtyřdobý motor SOHC
Počet válců	1
Vstřikování	Elektronické, nepřímé
Objem	397,2 ccm
Výkon	20,4 kW / 6500 rpm
Kompresní poměr	8,8:1
Chlazení	Vzduchem - přímé
Převodovka	5 - rychlostní
Převodové poměry	I – 2,615 II – 1,789 III – 1,350 IV – 1,120 V – 0,892 Stálý převod – 2,533
Pohon	Řetěz
Hmotnost bez náplní	156 kg
Maximální rychlost	130 km/h
Katalyzátory	4xTWC (2 malé + 2 větší)
Brzdy	Kotoučové
Pneumatiky	KENDA přední – 130/80 R18 (225 kPa) zadní – 3,25 R18 (225 kPa)
Nádrž	16L
Homologace dle normy	e8*168/2013*00002*

Tabulka 3: Technické parametry motocyklu JAWA 350 OHC SPECIAL [21] [34]

### 5.3 Záznam dat v reálném provozu

Pro zaznamenání klíčových parametrů jízdy bylo na motocykl nainstalováno logovací zařízení. Parametry jízdy byly zaznamenány na dvou záznamových přístrojích. Prvním byl datalogger s GPS modulem, který během jízdy zaznamenával následující parametry:

- rychlostní profil (aktuální rychlost vozidla v km/h)
- aktuální poloha, souřadnice
- výškový profil (aktuální nadmořská výška v m.n.m.)

Data byla zaznamenána s frekvencí 1 Hz a poté přepočítána a upravena pro další zpracování. Napájení probíhalo přímo z akumulátoru vozidla.

V druhém případě se jednalo o ústřednu, do které byly zavedeny elektrické signály z elektroinstalace vozidla (schéma v příloze) pro zaznamenání následujících parametrů:

- rychlostní profil (aktuální rychlost vozidla v km/h)
- otáčky motoru (RPM)
- poloha škrtkové klapky (% otevření)



*Obrázek 28 a Obrázek 29: Instalace záznamového zařízení na zkoušený motocykl [autor]*

Záznam otáček motoru lze získat více různými způsoby. Jako nejjednodušší řešení se nakonec ukázalo zaznamenávat analogový vstupní signál z elektrického vedení mezi řídicí jednotkou a otáčkoměrem. Jeho elektrická hodnota byla následně přepočtena na otáčky motoru za minutu. Záznam rychlosti vozidla vyžadoval složitější řešení, jelikož se nepodařilo nalézt vhodný signál vstupující do rychloměru, který by ukazoval použitelné hodnoty. Proto byl využit signál ze snímače ABS na zadním kole, který počítá frekvenci otáček, z čehož byla následně dopočtena rychlost vozidla. Poloha škrtkové klapky byla zaznamenána z konektoru přímo na klapce, kde byl snímán opět signál z kabelu přivedeného z řídicí jednotky. Ústředna byla, stejně jako datalogger, napájena přímo z akumulátoru vozidla.

Pro co nejpřesnější reprodukci na válcové zkušebně bylo potřeba znát zejména aktuální rychlost a aktuální zařazený rychlostní stupeň v závislosti na čase během testu. Informaci o aktuálně zařazeném rychlostním stupni se zaznamenat nepodařilo, nicméně tato informace se jednoduše dopočítala ze znalosti jednotlivých převodových poměrů, aktuální rychlosti a otáček motoru.

Po nainstalování a ověření funkčnosti záznamového zařízení bylo třeba naplánovat trasy měření. Vzhledem k neznalosti, jaké parametry bude mít v budoucnu trasa pro měření RDE motocyklů, bylo rozhodnuto, že se použijí stejné parametry a omezení, jaké platí při měření RDE na automobilech (popsáno v kapitole 4.4). Proto byly naplánovány a odměřeny 2 různé trasy, které podléhaly těmto parametrům. Jedna reprezentovala studený a druhá teplý start, stejně jako je to u homologačního měření automobilů v reálném provozu. Navíc byla vybrána ještě jedna trasa, která naopak těmto parametrům nepodléhala. Ta má simulovat případnou kratší (1h) ranní cestu do práce a zahrnovat všechna 3 jízdní prostředí (město, mimoměsto a dálnice), ovšem v jiném pořadí. Pro záznam dat v reálném provozu bylo využito dvou jezdců. Parametry jízdy a podmínek jsou zaznamenány v tabulce č. 4.

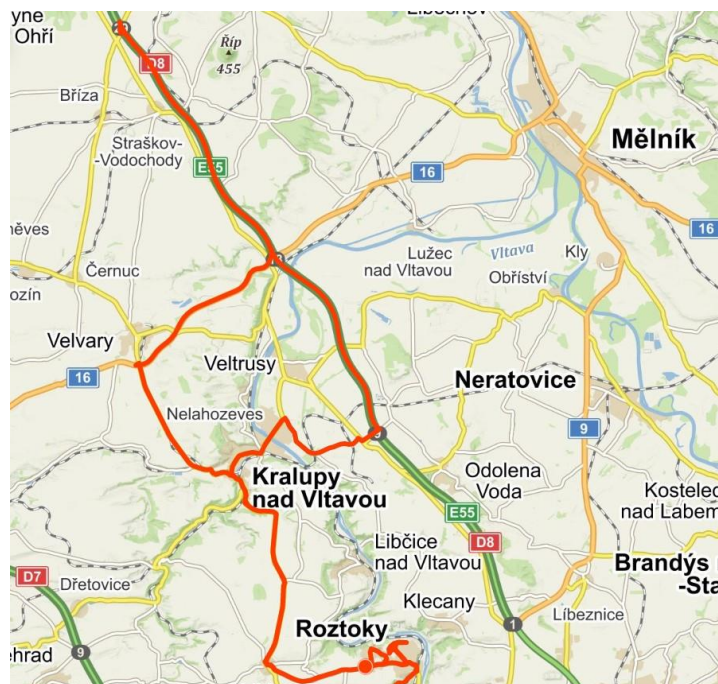
Parametry Jízdy			
Trasa	RDE 1	RDE 2	RDE 3
Délka trasy (km)	97,5	94,8	70,5
Doba jízdy (min)	111,5	115,8	75,2
Jezdec	1	2	2
Hmotnost jezdce (kg)	92	93	93
Hmotnost motorky (kg)	172,5	172,5	171,5
Start	studený	teplý	studený*
Styl jízdy	mírná dynamika	vyšší dynamika	běžný

\* motor nebyl zcela vychladlý (6 - 56 hodin chladnutí), ale zároveň již neměl provozní teplotu

Tabulka 4: Parametry jízdy RDE [autor]

#### Trasa RDE 1

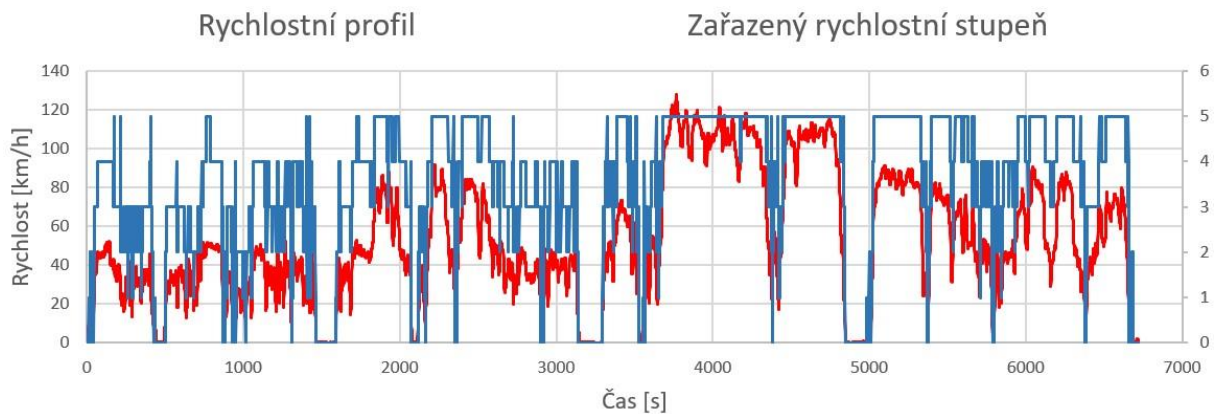
Tato trasa reprezentuje jízdu RDE podléhající parametrům jízdy pro automobily se studeným startem. Start i cíl jízdy byl v jednom a tom samém místě – VTP Roztoky u Prahy. Trasa zahrnuje všechny jízdní režimy a splňuje předem určené poměry. Dynamika byla při této jízdě nižší.



Obrázek 30: Trasa RDE 1 [22]

Po jízdě byla zpracována data. Signál byl přepočten na skutečné hodnoty a byl proveden výpočet řadících bodů. Na grafu na obrázku č. 31 lze pozorovat průběh rychlosti a zařazených rychlostních stupňů během jízdy. Je zde vidět, že záznam proběhl korektně, jelikož rychlostní stupně odpovídají

příslušným rychlostem. Záznam rychlosti je téměř shodný v případě informace z motocyklu, GPS dataloggeru i GPS záznamu z telefonu.



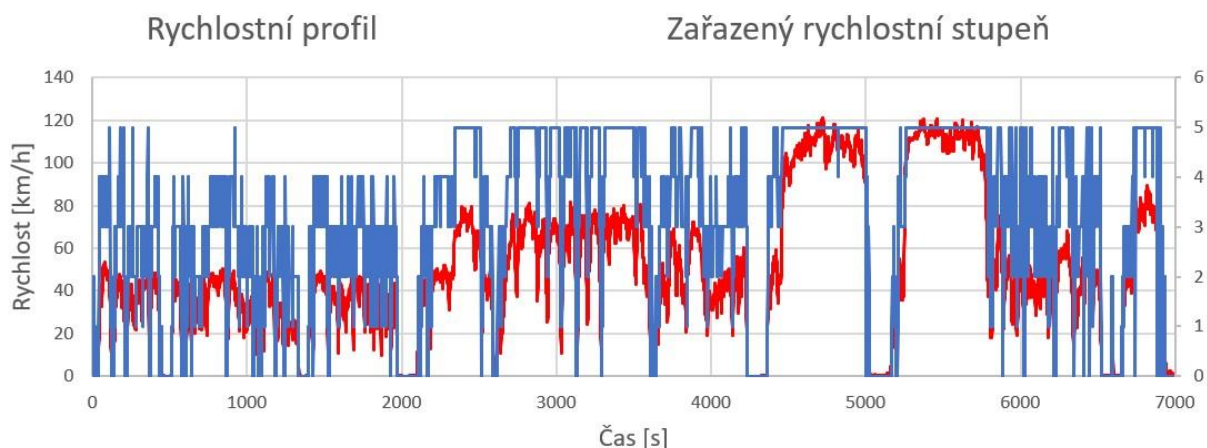
Obrázek 31: Graf – průběh rychlosti a zařazeného rychlostního stupně na trase RDE 1 [autor]

#### Trasa RDE 2

Trasa č. 2 je odlišná, ale také odpovídá podmínkám pro homologační jízdu RDE automobilů. Motor vozidla byl před zahájením jízdy zahřátý. Začátek a konec byl opět v areálu VTP Roztoky u Prahy a začátek trasy byl také velmi podobný. Po vyjetí z Roztok se však trať ubírala jiným směrem. Motocykl tentokrát řídil zkušební jezdec č. 2, který s motorkou jel více dynamicky, nicméně stále tak, aby dynamické parametry nepřekročily limitní hodnoty pro RDE automobilů. Mapa trasy je vyobrazena na obrázku č. 32 a záznam rychlostního profilu a zařazených rychlostních stupňů na grafu na obrázku č. 33.



Obrázek 32: Trasa RDE 2 [22]

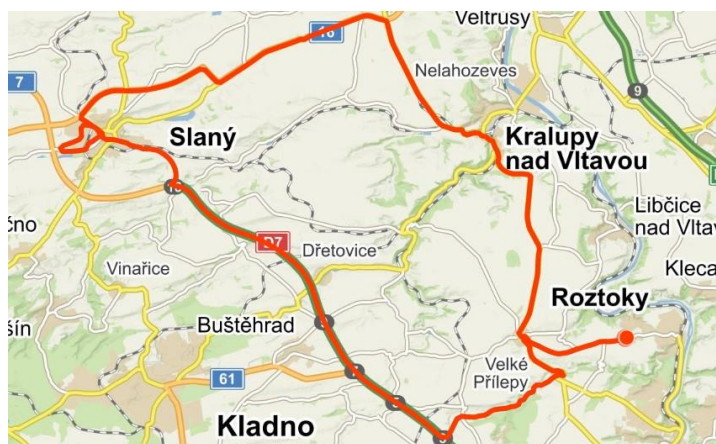


Obrázek 33: Graf – průběh rychlosti a zařazeného rychlostního stupně na trase RDE 2 [autor]

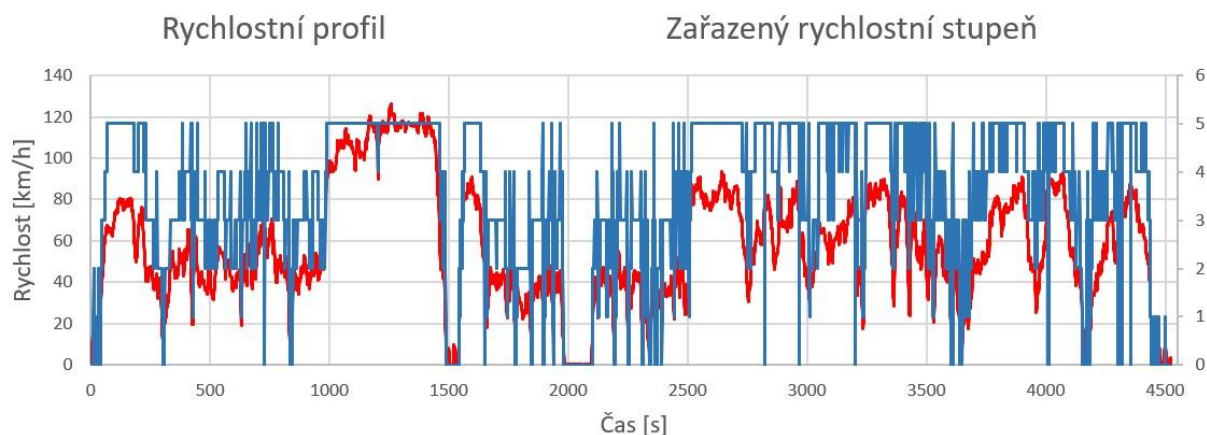
Během zaznamenávání této trasy navíc jelo v těsném závěsu za motocyklem vozidlo se zařízením PEMS, které měřilo emise v reálném provozu. Parametry (dynamické, poměrové, vzdálenostní atd.) emisního testu z vozidla podléhají všem legislativním parametrům a z toho důvodu lze předpokládat, že jízda motocyklu též podléhá parametrům automobilového RDE dle normy 2018/1832. Validita testu vozidla Škoda Fabia 1.2 TSI je vyobrazena v grafu na obrázku č. 19 MAW výše v kapitole 3.4.2. Dynamika jízdy při měření RDE.

### Trasa RDE 3

Poslední trasa v reálném provozu již neodpovídá parametrům RDE pro automobily. Je vymyšlena náhodně, ale zahrnuje také všechny jízdní režimy (město, mimoměsto a dálnice). Jsou ovšem v jiném pořadí a také nebyl striktně kontrolován jejich poměr. Záznam opět započal a skončil v areálu VTP Roztoky u Prahy a motocykl řídil opět jezdec č. 2, při čemž se snažil o standardní jízdu, jakoby se snažil normálním způsobem dopravit z bodu A do bodu B. Trasa RDE 3 je vyobrazena na obrázku č. 34 a graf průběhu rychlosti a zařazených převodových stupňů na obrázku č. 35.



Obrázek 34: Trasa RDE 3 [22]



Obrázek 35: Graf – průběh rychlosti a zařazeného rychlostního stupně na trase RDE 3 [autor]

Výpočet řadících bodů byl proveden následujícím způsobem. Otáčky zaznamenané během každé vteřiny testu byly děleny aktuální rychlostí a tím byly získány nové hodnoty. Následně byla navržena funkce v programu MS EXCEL, která rozhodla o aktuálním zařazeném stupni v každou vteřinu.

$$N_{\text{gear}} = \text{KDYŽ}(A(X > 120, X < 180), 1, 0) + \text{KDYŽ}(A(X > 84, X < 120), 2, 0) + \text{KDYŽ}(A(X > 66, X < 84), 3, 0) + \text{KDYŽ}(A(X > 54, X < 66), 4, 0) + \text{KDYŽ}(A(X > 40, X < 54), 5, 0) \quad (5.1)$$

Pokud je X definováno, jako aktuální podíl otáček a rychlosti  $X = n/v$ , potom  $N_{\text{gear}}$  je aktuální zařazený rychlostní stupeň. Pokud hodnota neodpovídá ani jedné možnosti, je výsledek vyhodnocen jako volnoběh neboli rozpojená spojka či zařazený neutrální.

## 5.4 Jízdní odpory

Než se přistoupí k samotnému reprodukování zaznamenaných testů a dalším měření na válcové zkušebně, je za potřebí nastavit dynamometr tak, aby zatěžoval pohonné ústrojí vozidla obdobným způsobem, jako kdyby bylo vozidlo zatěžováno skutečnými jízdními odpory přímo na silnici. Ty se v tomto případě dělí na silniční odpory a odpor ze stoupání. K silničním odporům patří zejména odpor valení, vzduchu a tření. Tyto odpory lze zjistit tzv. dojezdovou zkouškou, jejíž obecný princip je popsán výše. Aby bylo měření prokazatelné, je důležité tuto zkoušku provést.

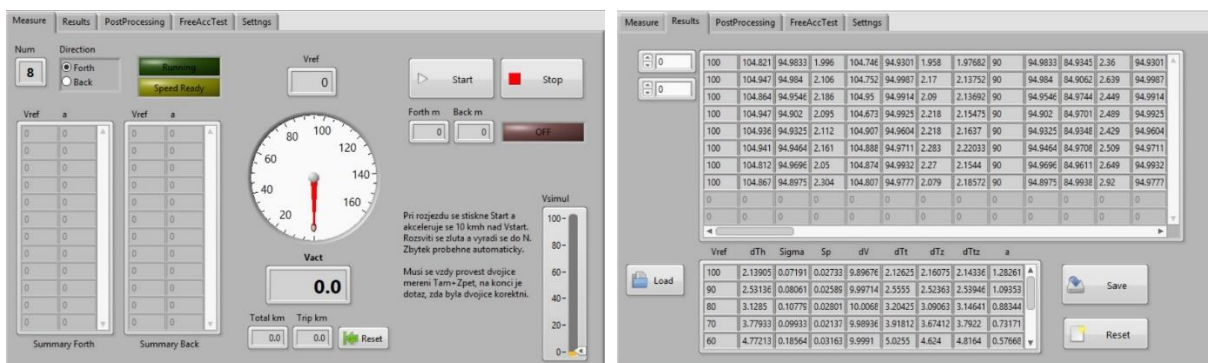
Měření bylo provedeno na asfaltové přistávací dráze na letišti v Panenském Týnci (obrázek č. 41). Zkouška má přísné podmínky, které je třeba dodržet a je náročná na přípravu měřícího zařízení. Aby při této zkoušce byla získána relevantní data, bylo zapotřebí vybavit motocykl dalším měřícím zařízením (obrázek č. 36 a 37). Byl doplněn přesnější a citlivější GPS modul s vyšší frekvencí snímání. Dále byla přidána dotyková obrazovka s programem určeným přímo pro měření dojezdové zkoušky. K té se GPS modul připojil nepřímo přes původní ústřednu použitou pro logování signálů z elektroinstalace motoru. Bylo také nutné doplnit baterie, které toto zařízení napájely.



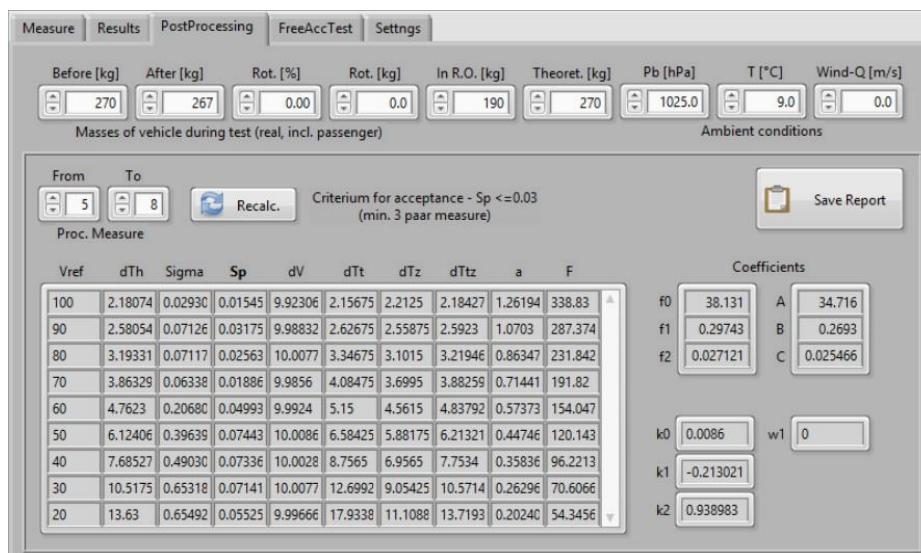


Obrázek 36 a Obrázek 37: Motocykl JAWA se záznamovým zařízením pro dojezdovou zkoušku [autor]

Pro záznam zkoušky byl využit program vytvořený v prostředí LabVIEW, navržený panem Ing. Pavlem Štěrbou Ph.D., který kontroluje průběh celého měření a po zadání určitých parametrů v nastavení je schopen celou zkoušku i kompletně vyhodnotit. Nejdříve se v programu nastaví rozmezí rychlostí, mezi kterými bude měření probíhat. Poté řidič zahájí zkoušku tlačítkem „Start“ a rozjede se nad rychlost, která byla v nastavení určena jako počáteční. Měření započne 5 km/h nad touto rychlostí. V tu chvíli se na displeji rozsvítí zelená kontrolka a řidič zmáčkne spojku (drží ji nebo zařadí neutrál, pokud je to možné). Vozidlo se nechá volně decelerovat až na rychlost o 5 km/h nižší, než je rychlost určená pro konec měření. Poté se opět rozsvítí zelená kontrolka a řidič může dobrzdit. Následuje otočení vozidla a proběhne měření stejným způsobem v opačném směru. Tím je hotovo jedno měření. Celá zkouška se opakuje do té doby, než se dosáhne požadované statistické přesnosti. Ovládání programu během zkoušky je vyobrazeno na obrázku č. 38. Nastavení jednotlivých parametrů zkoušky a vyobrazení výsledných dat potom na obrázku č. 39 a 40.



Obrázek 38 a Obrázek 39: Záznamový program pro dojezdovou zkoušku v prostředí LabVIEW [autor]



Obrázek 40: Vyhodnocení dojezdové zkoušky v programu [autor]

Parametry dobehové zkoušky:

- Rozpětí měřících rychlostí: 100 -> 20 km/h
- Hmotnost motocyklu včetně jezdce a měřícího zařízení před zkouškou: 269 kg
- Hmotnost motocyklu včetně jezdce a měřícího zařízení po zkoušce: 268 kg
- Teplota vzduchu: 9 °C
- Tlak: 102,9 kPa
- Rychlost větru: 0 m/s



Obrázek 41: Měření dojezdové zkoušky [autor]

Bylo provedeno a zaznamenáno 9 měřených jízd. Nejlepší statistická přesnost byla při použití 4 jízd, konkrétně 5-8 jízda z celkových 9. Data z průměru těchto 4 jízd jsou uvedeny v tabulce č. 5.

$V_{ref}$	$\Delta T_h$	Sigma	$S_p$	$\Delta V$	$\Delta T_{forth}$	$\Delta T_{back}$	$\Delta T_{avg}$	a	F
100	2.181	0.029	0.015	9.92	2.157	2.212	2.184	1.262	338.8
90	2.581	0.071	0.032	9.99	2.627	2.559	2.592	1.07	287.4
80	3.193	0.071	0.026	10.01	3.347	3.102	3.219	0.863	231.8
70	3.863	0.063	0.019	9.99	4.085	3.7	3.883	0.714	191.8
60	4.762	0.207	0.05	9.99	5.15	4.562	4.838	0.574	154
50	6.124	0.396	0.074	10.01	6.584	5.882	6.213	0.447	120.1
40	7.685	0.49	0.073	10	8.757	6.957	7.753	0.358	96.2
30	10.518	0.653	0.071	10.01	12.699	9.054	10.571	0.263	70.6
20	13.63	0.655	0.055	10	17.934	11.109	13.719	0.202	54.3

Tabulka 5: Data 4 použitých dojezdových tetů [autor]

$V_{ref}$  – referenční rychlost jízdy, měření probíhá mezi  $V_{ref} + 5$  km/h až  $V_{ref} - 5$  km/h ( $V_{ref} = 100$ , měření 105 – 95 km/h)

$\Delta T_h$  – harmonický průměr časů dojezdu z počtu měření  $n$ , definováno jako  $[N / \text{suma } (2 / (\Delta T_{tam} + \Delta T_{zpet}))]$ . Jedná se o parametr, který je použit pro výpočet přesnosti.

Sigma – standardní odchylka časů dojezdu

$S_p$  – statistická přesnost zahrnující počet dvojic měření, aritmetický průměr doby dojezdu při rychlosti  $V_{ref}$  a výslednou odchylku v čase  $\Delta T_h$  [16]

$\Delta V$  – průměr rychlostní difference při měření pro danou  $V_{ref}$

$\Delta T_{forth}$  – průměr dojezdových časů ve směru tam pro danou  $V_{ref}$

$\Delta T_{back}$  – průměr dojezdových časů ve směru zpět pro danou  $V_{ref}$

$\Delta T_{avg}$  – průměr z  $\Delta T_{forth}$  a  $\Delta T_{back}$

a – zpomalení ( $\Delta V / \Delta T_{avg}$ )

F – síla jízdního odporu  $[(m + m_r) * a]$

Výsledná křivka na grafu na obrázku č. 42 závislosti silničního zatížení a rychlosti vozidla z průměru 4 vybraných jízd vypadá následovně:



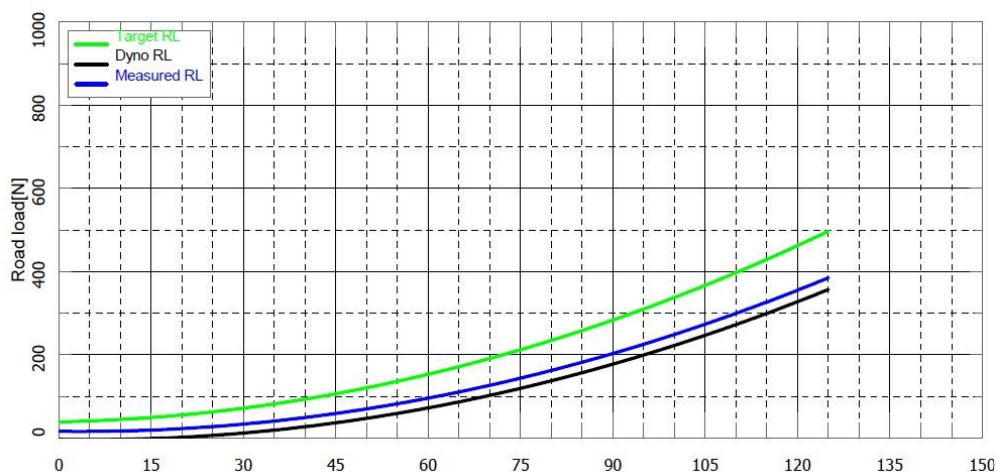
Obrázek 42: Graf – výsledná křivka dojezdové zkoušky [autor]

Průběh křivky není čistě parabolický, což je způsobeno drobnými odchylkami v jednotlivých měřeních a také podmínkami při zkoušce, které je velmi složité opakovat vždy naprosto přesně. Svojí roli v tom také hraje drobné zakřivení dráhy, či náhle poryvy větru. Výsledky (tabulka č. 6) jsou ovšem relevantní pro to, abychom mohli na válcovém dynamometru simulovat reálné odpory.

F0	<b>38.1</b>	N
F1	<b>0.2974</b>	N/(km/h)
F2	<b>0.0271</b>	N/(km/h) <sup>2</sup>

Tabulka 6: Silniční koeficienty z dojezdové zkoušky [autor]

Pro ověření správnosti měření dojezdové zkoušky a nastavení válců je za potřebí zopakovat měření dojezdů na válcové zkušební. Musí se nastavit simulace jízdních odporů na dynamometru a definovat si, jaké odpory dynamometru odpovídají těm skutečným, které byly změřeny na silnici. Je za potřebí provést minimálně 2 měření. Při prvním si válce nastaví zadané odpory z reálné zkoušky. Poté je provedeno první dojezdové měření, jehož hodnoty se srovnají s těmi nastavenými. Na grafu na obrázku č. 43 je vidět rozdíl mezi jednotlivými křivkami, které by se měly překrývat.



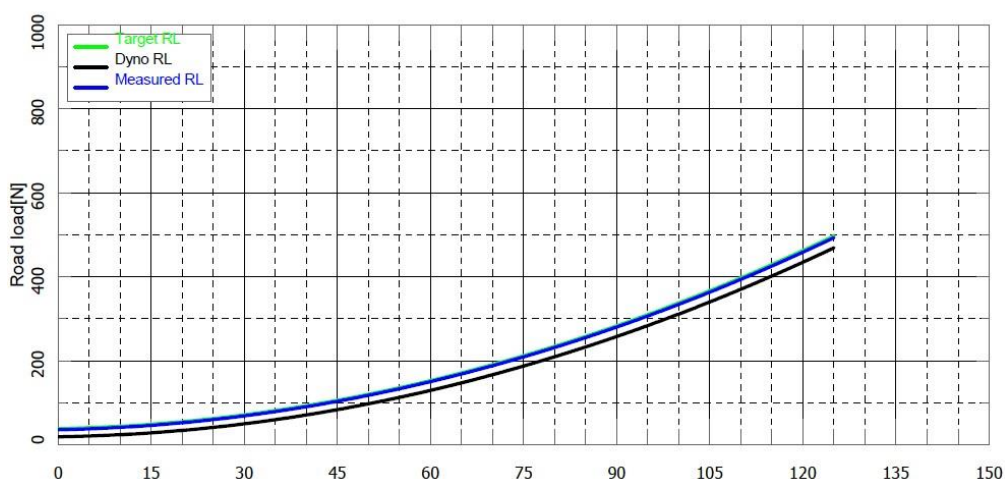
Obrázek 43: Graf – křivka dojezdové zkoušky č. 1 z dynamometru [autor]

Rozdíl mezi cílovou (zelená křivka) a naměřenou (modrá křivka) hodnotou se využije k určení jízdních odporů pro válcovou zkušebnu tak, aby odpovídaly těm reálným. Následuje druhé měření, které ověří správnost vypočtených koeficientů (tabulka č. 7) pro odpory na válcích.

F0	<b>18.62</b>	N
F1	<b>0.2147</b>	N/(km/h)
F2	<b>0.02706</b>	N/(km/h) <sup>2</sup>

Tabulka 7: Silniční koeficienty z dojezdové zkoušky válcového dynamometru [autor]

Následující graf na obrázku č. 44 vyobrazuje ověření těchto koeficientů druhou doběhovou zkouškou. Zelená křivka (cíl měření) se v celé délce kryje s modrou (naměřené hodnoty).

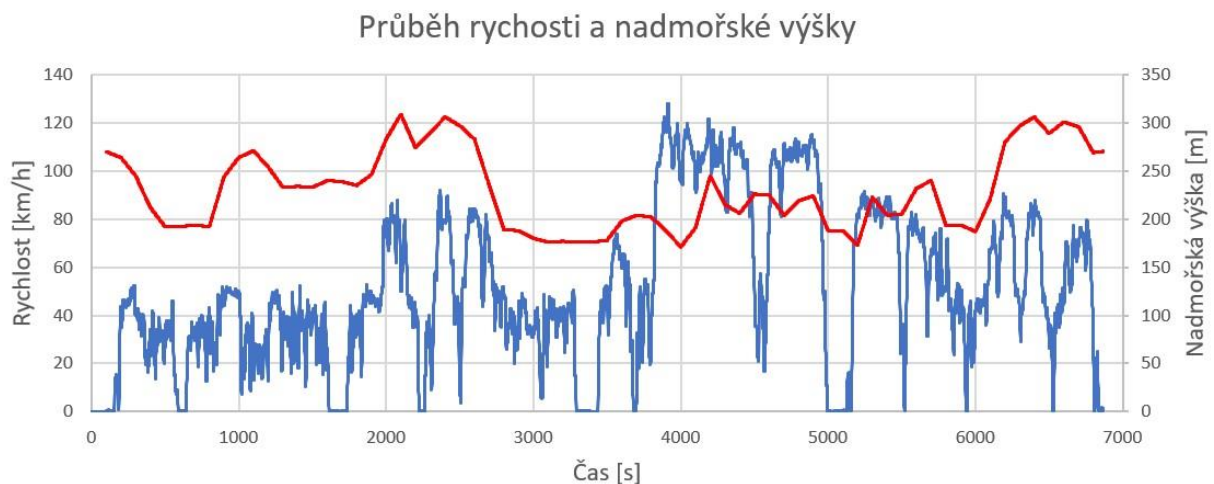


Obrázek 44: Graf – křivka dojezdové zkoušky č. 2 z dynamometru [autor]

Pokud se zaměříme na odpor ze stoupání, je důležité nejdříve říci, že simulování odporu ze stoupání na využití válcové zkušebny je velmi komplikovaný problém. Software, který řídí válcovou zkušebnu není totiž na tuto možnost připraven. Dokáže simulovat pouze kompletní souhrn jízdních odporů (viz. výše), které však nelze měnit dynamicky během jednoho testu. Z tohoto důvodu se nejdříve

zjistilo, jak velký vliv má zahrnutí odporu ze stoupání na celkovou energii, spotřebovanou během testu. Dle předpokladu rozdíl totiž neměl být velký, jelikož počátek a konec trasy byl v jednom a tom samém místě. Jednoduše tedy řečeno, energie vynaložená navíc při stoupání se opět odečte při klesání. Byl vypracován kinematický simulační model v prostředí GT POWER, který u jedné naměřené jízdy z reálného provozu (RDE 1) porovnal celkovou spotřebu paliva za předpokladu, že odpor ze stoupání zahrneme a zanedbáme. Jako vstupní veličiny do výpočetního modelu byly vybrány následující parametry:

- Naměřený rychlostní profil vozidla během jízdy (obrázek č. 45)
- Naměřený výškový profil vozidla během jízdy, z něhož se určilo stoupání (obrázek č. 45)
- Hmotnost vozidla
- Silniční koeficienty jízdních odporů z dojezdové zkoušky
- BMEP a BSFC mapy motoru



*Obrázek 45: Graf – průběh rychlosti a nadmořské výšky trasy RDE 1 [autor]*

Výsledkem jsou průběhy aktuálních spotřeb paliva. Po jejich sečtení dostáváme rozdíl celkových spotřeb s odporem ze stoupání a bez něj. Výsledky jsou následující:

- Celková spotřeba paliva se zanedbáním stoupání: 3451,1 g
- Celková spotřeba paliva se zahrnutím stoupání: 3455,7 g

Po odečtení a převedení rozdílu na procenta vychází rozdíl v celkově spotřebovaném palivu 0,13 %. Tento rozdíl byl shledán jako nepodstatný s ohledem na komplikovanost řešení problému, kterým by bylo nastavit válcovou zkušebnu tak, aby byla schopna simulovat odpor ze stoupání. Z toho důvodu jsem se rozhodl odpor ze stoupání zanedbat.

## 5.5 Měření emisí na válcové zkušebně

Samotné měření bylo hned z počátku provázeno problémy. Z výsledků po úvodním testu bylo zřejmé, že katalytický systém, který se nacházel na vozidle je buď nefunkční anebo je jeho funkčnost velmi omezena. Proto bylo za potřebí sehnat náhradní výfukové potrubí se správně pracujícími katalyzátory. Naštěstí, po oslovení firmy JAWA, byl dodán jiný výfukový systém, ten byl ovšem z jiného modelu. Jednalo se o výfuky z modelu JAWA 350 OHC, který je technicky totožný, jako měřený vzorek JAWA 350 OHC SPECIAL, s rozdíly pouze v designu. Jak lze vidět na obrázku č. 46, výfukové trubice měly tedy lehce jiný tvar, nicméně stejné funkční parametry. Tato skutečnost měření pravděpodobně nijak neovlivňuje, ale je nutno podotknout, že byl měřený vzorek vozidla v „nesériovém“ provedení.



Obrázek 46: Graf – motocykl JAWA během testu na válcové zkušebně [autor]

Poté, co byly odstraněny a vyřešeny všechny konstrukční problémy, mohlo se přistoupit přímo k měření. V plánu bylo reprodukovat jízdní cykly nalogované v reálném provozu, ale i provést měření homologačních cyklů EURO 3 a EURO 4. Výfukové plyny byly analyzovány ve všech případech metodou CVS pomocí analyzátorů na válcové zkušebně. Dva testy byly současně měřeny i automobilovým PEMSem SEMTECH SENSORS a výzkumným mini-PEMsem pro motocykly. Zároveň tedy proběhla i validace (srovnání analýzy stejného vzorku více zařízeními) všech třech měřících aparatur. V následující tabulce č. 8 je uveden seznam testů, které byly odměřeny na válcích.

Vstupní data pro jízdu	Jízda	Délka trasy	Stav motoru při startu	měřicí zařízení
EU3	EU3	13 km	studený	CVS
WMTC	WMTC 1	28 km	studený	CVS
	WMTC 2	28 km	studený	CVS
	WMTC 3	28 km	studený	CVS+PEMS+miniPEMS
Trasa 1	RDE 1.1	97 km	studený	CVS
	RDE 1.2	97 km	studený	CVS
Trasa 2	RDE 2.1	95 km	teplý	CVS
	RDE 2.2	95 km	teplý	CVS
	RDE 2.3	95 km	teplý	CVS+PEMS+miniPEMS
Trasa 3	RDE 3.1	70 km	teplý	CVS
	RDE 3.2	70 km	teplý	CVS

Tabulka 8: Tabulka testů měřených na válcové zkušební [autor]

V prvním sloupci je uveden druh zkoušky (vstupní data pro zkoušku), který byl nastaven na válcové zkušební pro odjetí testu. V první řadě šlo o dva homologační cykly různých euro norem. Pro normu EURO 3 se jednalo o jízdní cyklus dle 2002/51/ES, stupeň "B" pro velké motocykly s pevně danými řadícími body. Normu EURO 4 reprezentoval cyklus WMTC Class 3-1 (pro motocykly vyrobené po roce 2017, s maximální rychlostí  $130 \leq v_{\max} < 140$  km/h), ke kterému bylo třeba dopočítat řadící body dle parametrů měřeného vozidla. Dále byly reprodukovány trasy pomocí dat naměřených z reálného provozu. [18]

Aby mohly být testy relevantně vyhodnoceny, u všech druhů zkoušek se provedly minimálně 2 testy. Výjimkou byl pouze homologační cyklus EURO 3, který byl změřen pouze jednou pro zjištění referenčních hodnot, nikoliv z důvodu hlubšího zkoumání výsledků. V druhém sloupci lze vidět konkrétní označení testů, provedených na válcové zkušební. V dalších sloupcích jsou uvedeny parametry testů a jaké měřicí zařízení bylo použito.

### 5.5.1 Zkouška EURO 3

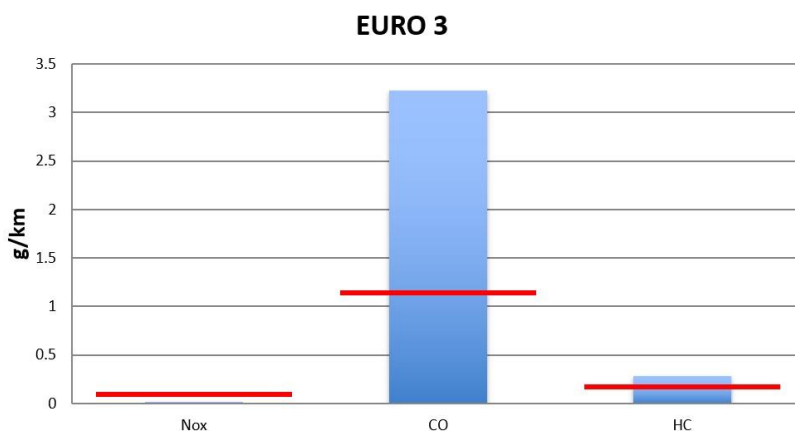
Po analýze jednotlivých složek homologační zkoušky EURO 3 byly zjištěny následující výsledky, které jsou vidět v tabulce č. 9. Hodnoty byly naměřeny metodou CVS (s využitím odběrných vaků pro jednotlivé fáze jízdního cyklu). Výsledky (tabulka č. 9) jsou porovnávány s limitními hodnotami EURO 4 i přesto, že se jednalo o homologační cyklus EURO 3 s ohledem na to, podle kterých limitů byl měřený stroj homologován – EURO 4.

Analyzovaná složka	Naměřené hodnoty	Limit EU 4	Jednotky
NO <sub>x</sub>	0.01973	0.09	g/km
CO	3.22888	1.14	g/km
CO <sub>2</sub>	80.87	X	g/km
HC	0.2792	0.17	g/km

Tabulka 9: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky EURO 3 [autor]

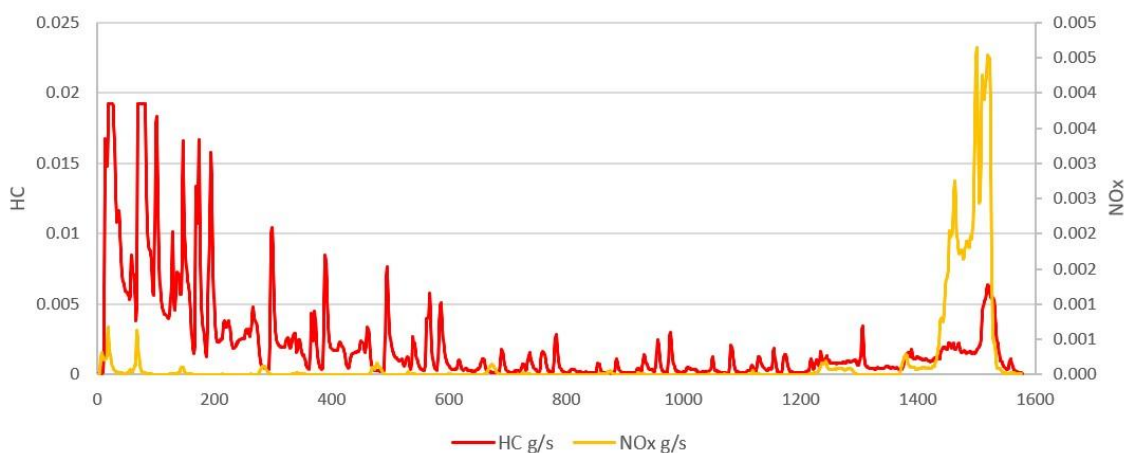


Z naměřených hodnot je zřetelné že hodnoty CO a HC neodpovídají limitům EURO 4. Naopak hodnota NO<sub>x</sub> je ztelně pod limitem. Pro lepší představu jsou celkové hmotnostní emise a jejich limity vyjádřeny v následujícím grafu na obrázku č. 47.



Obrázek 47: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů EU3 [autor]

Hlavním důvodem tohoto faktu jsou pravděpodobně teploty výfukových plynů. Při nezahřátém motoru jsou vždy hodnoty NO<sub>x</sub> nízké. Naopak hodnoty CO a HC jsou u studeného motoru vysoké a po zahřátí se snižují. Dynamika tohoto cyklu je ovšem tak nízká, že nedojde k dostatečnému prohřátí a katalyzátory tak nepracují správně. Při pohledu na modální data (metoda přímého vzorkování) na obrázku č. 48 lze pozorovat, že hodnoty NO<sub>x</sub> jsou ve většině testu extrémně nízké a zvýší se až v poslední fázi, kdy motocykl setrvává ve vyšších rychlostech. Naopak hodnoty HC jsou vysoké na začátku a postupně se během testu snižují podle toho, jak se motocykl zahřívá. Záznam hodnot CO bohužel není relevantní z důvodu nízkého rozsahu analyzátoru a z toho důvodu by srovnání modálních dat nebylo průkazné.



Obrázek 48: Graf – průběh hmotnostních složek HC a NO<sub>x</sub> během testu EU3 [autor]

Jako základní analýza dynamiky jízdy během testu byl spočítán absorbovaný výkon. Ze záznamu válcové brzdy lze získat informaci o tom, kolik výkonu bylo během testu každou vteřinou pohlceno.

Tato hodnota byla přepočítána, aby se dala porovnat mezi jednotlivými testy. U zkoušky EURO 3 bylo absorbováno průměrně 44 Wh/km. Definovat kompletně dynamiku jízdy by bylo daleko složitější nicméně toto číslo alespoň prokáže rozdíl mezi jednotlivými cykly.

Kompletní průběhy všech složek jsou uvedeny v příloze EURO3.xlsx.

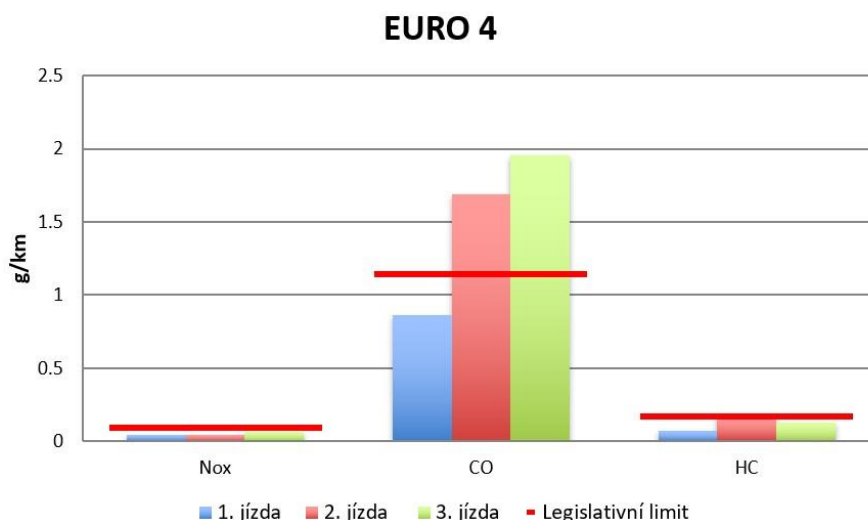
### 5.5.2 Zkouška EURO 4 (WMTC)

Pro ověření homologační zkoušky EURO 4, podle které je toto vozidlo homologováno, byl použit měřicí cyklus WMTC Class 3-1. Výsledné hodnoty složek analyzovaných metodou CVS (s využitím odběrných vaků pro jednotlivé fáze jízdního cyklu) v tabulce č. 10 jsou v tomto případě značně odlišné.

Analyzovaná složka	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Limit EU 4	Jednotky
NO <sub>x</sub>	0.04294	0.04505	0.06351	0.09	g/km
CO	0.86057	1.68928	1.95812	1.14	g/km
CO <sub>2</sub>	68.63	74.12	73.52	X	g/km
HC	0.0756	0.17677	0.12731	0.17	g/km

Tabulka 10: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky EURO 4 [autor]

Měření cyklu WMTC na první pohled vykazují vyrovnanější hodnoty. Zkouška č. 1 dokonce splňuje limity EURO 4. Při tomto měření byl však zaznamenán drobný únik výfukových plynů v místě netěsného spoje výfukového potrubí, což může být příčinou nižších koncentrací a hmotnosti emisí. To lze potvrdit i při pohledu na nižší hodnotu CO<sub>2</sub>, což značí nižší spotřebu paliva, která by ovšem během stejného testu měla být podobná. Nicméně i tak je evidentní, že je konstrukční řešení laděno spíše na cyklus s vyšší dynamikou jízdy. Pro lepší přehled jsou výsledky opět vyobrazeny na sloupcovém grafu na obrázku č. 49.



Obrázek 49: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů EU4 [autor]

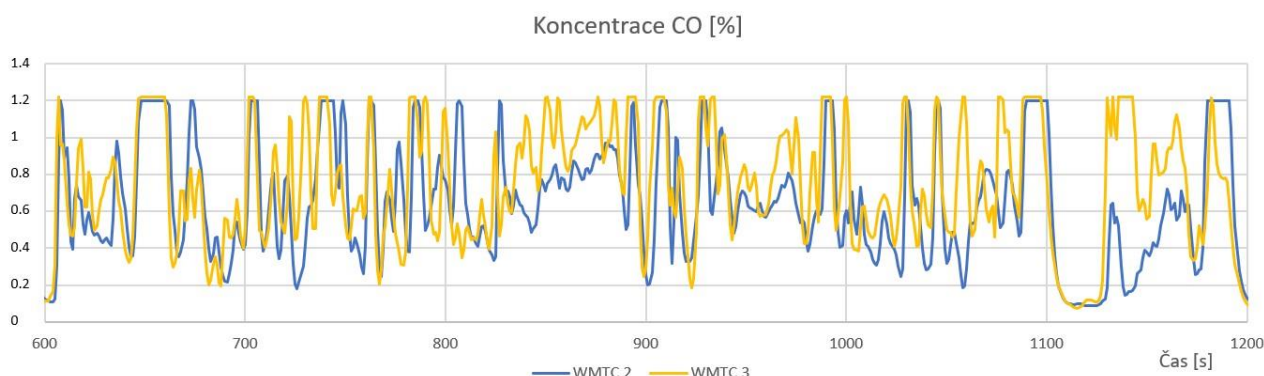
Cyklus WMTC disponuje nadstandardně vysokou dynamikou jízdy oproti staršímu homologačnímu cyklu, což znamená vyšší teploty ve výfukovém traktu. Hodnoty HC a NO<sub>x</sub> jsou v přijatelných mezích.

Hodnota CO je sice nad limitem, nicméně není tak alarmující, jako hodnota naměřená během cyklu měření zkoušky EURO 3. Při srovnání hodnot CO v jednotlivých fázích je zřejmé, že vysoké hodnoty CO pocházejí zejména z první fáze, kde je motor ještě studený a dynamika jízdy není na tolik vysoká, aby se katalyzátor dostatečně ohřál. V druhé a třetí fázi již hodnota CO rapidně klesá. Výsledky jednotlivých fází pytlkové analýzy jsou znázorněny v následující tabulce č. 11.

test	fáze 1	fáze 2	fáze 3	jednotky
WMTC 2	5.03157	1.2756	0.99912	g/km
WMTC 3	5.00964	1.46704	1.40713	g/km

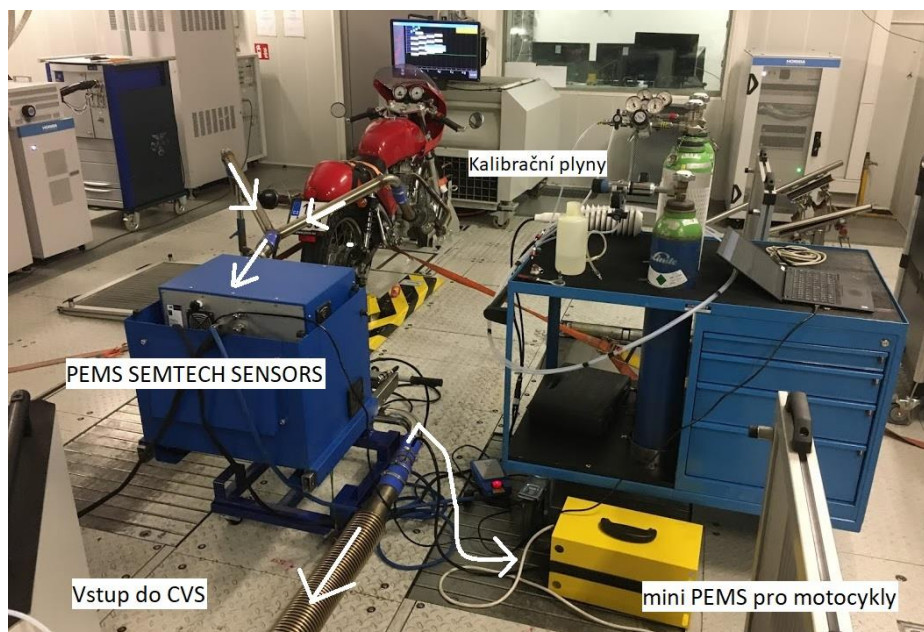
Tabulka 11: Výsledky hmotnostních emisí CO během jednotlivých fází zkoušky EURO 4 [autor]

Pokud se ponoříme hlouběji do analýzy modálních výsledků a porovnáme je s pytlovou analýzou, zjistíme, že i když hodnota CO opět při přímém odběru přesahovala v určitých místech rozsah analyzátoru, fáze 2 byla u testu 2 a 3 téměř validní (s testem 1 nelze porovnávat z důvodu úniku výfukových plynů). Na grafu na obrázku č. 50 lze pozorovat průběh koncentrace oxidu uhelnatého ve výfukových plynech během fáze 2. Ač jsou průběhy podobné, v mnohých místech se liší, často se chovají až opačně. Důvodem je s největší pravděpodobností rozdíl v momentálním jízdním režimu. Při různých testech se jezdec nemusel vždy držet křivky stejným způsobem, čímž vznikají odlišnosti v koncentracích.



Obrázek 50: Graf – průběh koncentrací CO ve fázi 2 během testů WMTC 2 a WMTC 3 [autor]

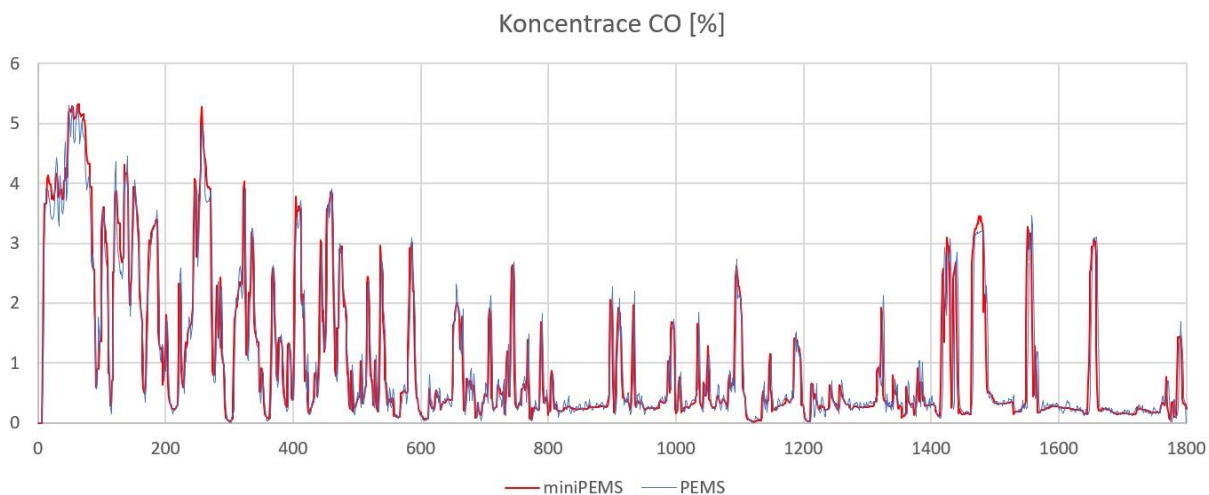
Test č. 3 byl kromě využití metody CVS také analyzován pomocí zařízení PEMS, které je určeno pro měření v reálném provozu. Zapojení je zřejmé z obrázku č. 51. Na výfuk byl napojen automobilový PEMS SEMTECH SENSORS a poté i výzkumný žlutý PEMS pro motocykly. Následně výfukové plyny pokračovaly do CVS. Tím lze považovat měření za korelační a porovnat tak analýzy PEMS přístrojů. Na obrázku je znázorněno zapojení výše zmíněných přístrojů během testu. Směr šipek naznačuje směr toku výfukových plynů.



Obrázek 51: Korelační měření na válcové zkušebně [autor]

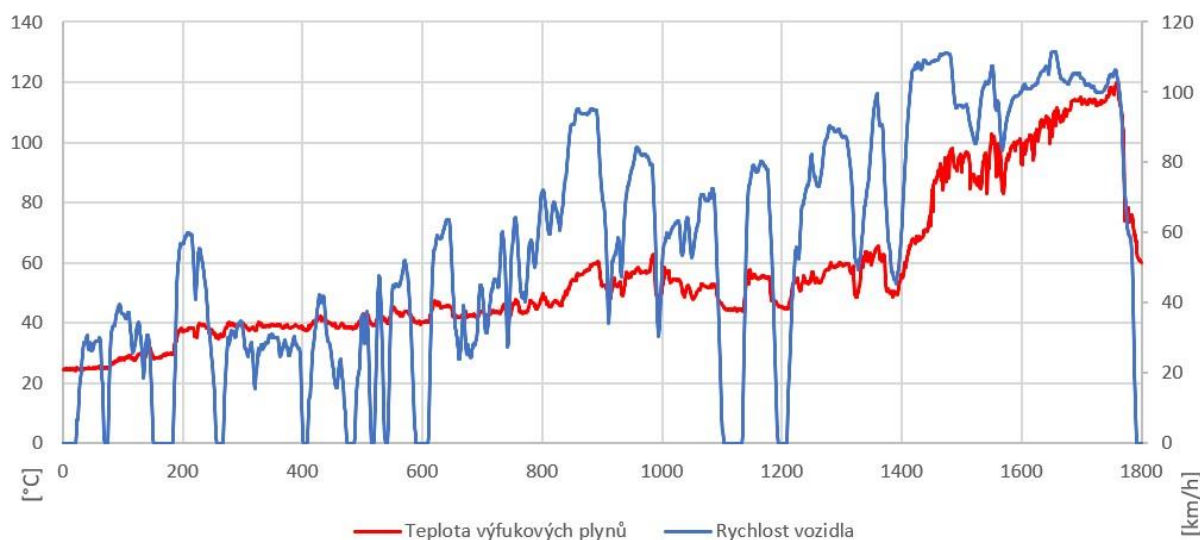
Měření pomocí zařízení PEMS se potýkalo s jedním velkým problémem. Jak je již výše popsáno, hmotnost konečných složek je dopočítána z jejich koncentrace a výsledného průtoku. Průtok byl v tomto případě ovšem měřen nekorektně, a proto lze posoudit pouze průběh koncentrací. Příčin nekorektního průtoku může být více. Prvním problémem je pravděpodobně příliš velký průměr trubice průtokoměru. Objem motoru je velmi malý (pouze 397,2 ccm) oproti automobilům, na které je tento průtokoměr dimenzován, a i když motor standardně pracuje ve vyšších otáčkách, není protékající objem plynu dostatečně velký na to, aby nevznikala chyba v průtoku. Byl použit 2-palcový průtokoměr, který je standardně určen pro vozidla s objemem motoru zhruba 1000-2000 ccm a je kalibrován pro průtok 15.8 – 535 kg/h. Průtokoměr s menším průměrem však nebyl k dispozici, a proto tento problém bohužel neměl jiné řešení. Druhým, mnohem závažnějším problémem byla velká přítomnost pulzací ve výfuku, což bývá potíží u malých jednoválcových atmosférických motorů. Více je popsáno v kapitole níže, pulzace ve výfukovém traktu.

Na následujícím grafu na obrázku č. 52 lze vidět průběh koncentrací CO z obou zařízení PEMS.



Obrázek 52: Graf – průběh koncentrací CO obou zařízení PEMS během korelačního měření [autor]

Pokud porovnáme jednotlivé průběhy koncentrací z obou zařízení, lze vidět že koncentrace jsou téměř totožné. Experimentální analyzátor pro motocykly má dle chování křivky horší citlivost na prudké změny, nicméně i tak jsou jeho výsledky naprosto relevantní. Z grafu je na první pohled zřetelné, o jak vysoké hodnoty výsledky rozsah analyzátorů u CVS, kde byl rozsah analyzátoru zhruba na hodnotě 1.2 %, v rámci složky CO ochudil. Je zřejmé, že vysoké koncentrace převládají v první a ve třetí fázi. Pokud se podíváme na průběh teplot výfukových plynů měřených pomocí zařízení PEMS SEMTECH SENSORS (obrázek č. 53), je zřejmé, že v první fázi zřejmě nebyla teplota katalyzátoru vysoká na tolik, aby pracoval správně. K vyšším teplotám dochází až ve druhé fázi, kde se koncentrace složek CO značně snižuje. K rapidnímu zvýšení teplot dochází ve fázi třetí. Tam je již katalyzátor také zahřátý, ovšem kvůli vysokým rychlostem, dynamickému zrychlování a příliš vysokým teplotám pravděpodobně nestíhá z důvodu nižší účinnosti. Hodnoty teplot nelze považovat za relevantní, jelikož se jedná o teplotu vzorku, který značně vychladne během cesty poměrně dlouhým výfukovým potrubím až do PEMSu. Proto je třeba tento průběh teplot brát pouze jako informativní o tom, jak se teplota zvyšovala či snižovala.



Obrázek 53: Graf – průběh rychlosti a teploty výfukových plynů během testu WMTC 3 [autor]

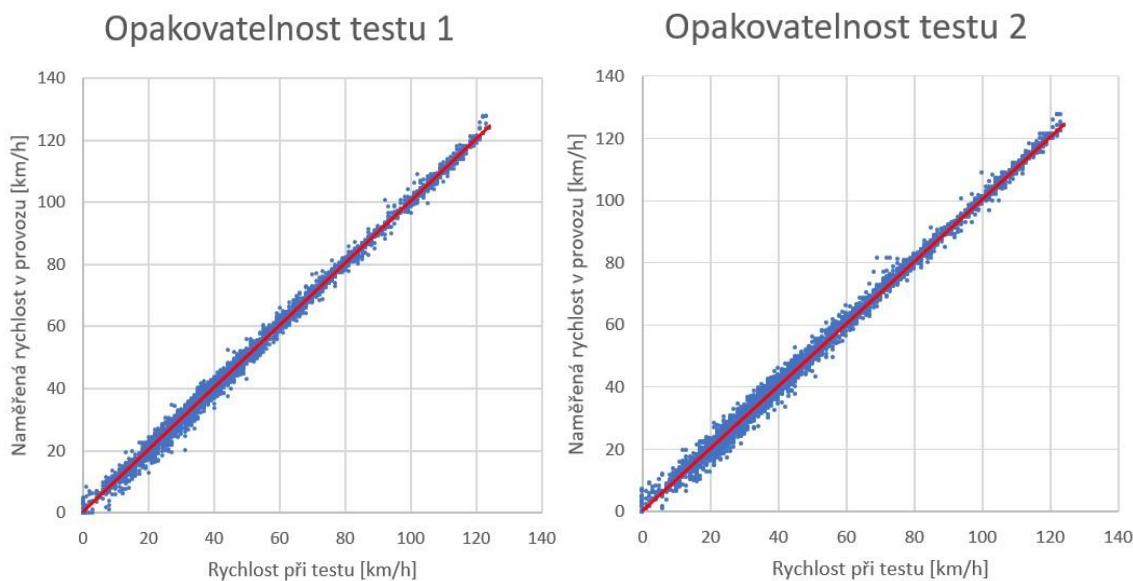
Průběhy složky  $\text{NO}_x$  jsou uvedeny v příloze. Jejich průběh byl u všech zařízení velmi podobný. Složka HC nebyla měřena zařízením PEMS SEMTECH SENSORS z důvodu absence analyzátoru na principu změny vodivosti elektřiny vodíkového plamene.

Vysoká dynamika jízdy oproti staršímu homologačnímu cyklu je u cyklu WMTC patrná již na první pohled. Výsledkem je průměrně spotřebovaných 62 Wh/km, což je o 41 % více, než u měření EURO 3.

Kompletní průběhy všech složek jsou uvedeny v příloze WMTC.xlsx.

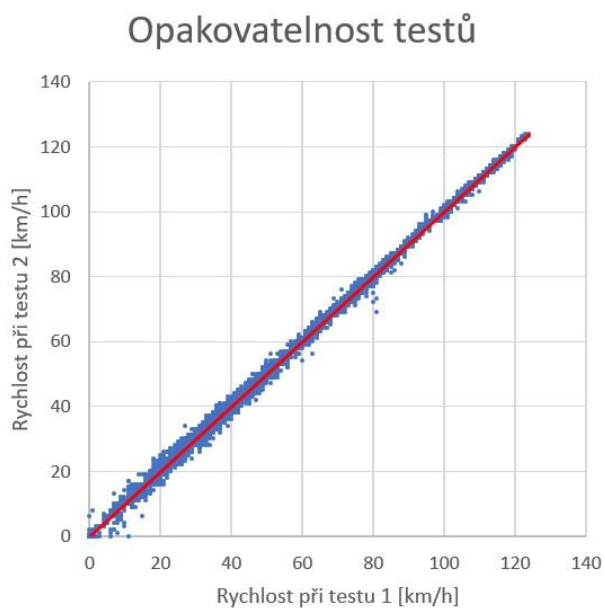
### 5.5.3 Zkouška RDE 1

U měření tras zaznamenaných v reálném provozu bylo nejprve porovnáno, jak dobře se podařilo měření zreprodukovat. V následujících bodových grafech na obrázku č. 54 a 55 je vidět, jak velká odchylka byla mezi hodnotou při záznamu dat v reálném provozu a při samotném měření. Každý samostatný bod reprezentuje jednu vteřinu během testu, při čemž na ose Y je rychlost, která v ten čas byla zaznamenána v provozu a na ose X naopak rychlost, kterou jelo v tu dobu na válci. Dokonalá reprodukce trasy by znamenala, že tyto body budou tvořit přímku pod úhlem  $45^\circ$ . Nicméně ani v tomto případě nejsou odchylky tak časté a zásadní. Byla vynesena lineární regrese (červená přímka), aby bylo zřejmé, že většina rychlostí je zopakována správně a celková odchylka není velká.



Obrázek 54 a Obrázek 55: Grafy – opakovatelnost testů trasy RDE 1 [autor]

Na grafu na obrázku č. 56 lze vidět opakovatelnost mezi jednotlivými měřeními. Zde lze pozorovat výraznější rozdíly pouze zřídka.



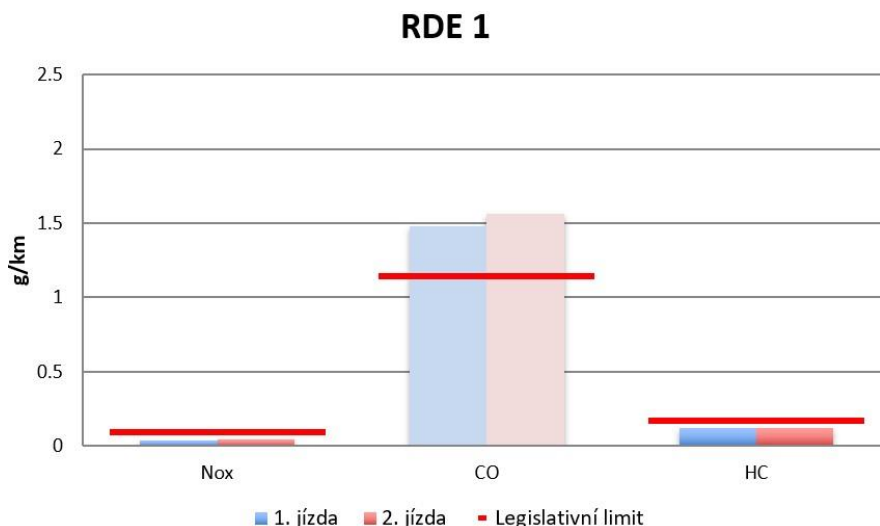
Obrázek 56: Graf – opakovatelnost jednotlivých měření trasy RDE 1 [autor]

Při analýze složek výfukových emisí nebyla tentokrát použita metoda odběru vzorků (s využitím odběrných vaků pro jednotlivé fáze jízdního cyklu), ale jen metoda přímého vzorkování. Důvodem je, že testy byly abnormálně dlouhé a jízdní cykly by se musely rozdělit na mnoho fází. Celkové hmotnostní emise proto musely být vypočítány z modálních výsledků (tabulka č. 12). Hodnotu CO nemůžeme považovat za prokazatelnou z toho důvodu, že koncentrace této složky v některých částech testu opět překročila rozsah analyzátoru a tím naměřená hodnota není hodnota skutečných emisí.

Analyzovaná složka	Měření 1	Měření 2	Limit EU 4	Jednotky
NO <sub>x</sub>	0.040391	0.043152	0.09	g/km
CO	(1.475758)	(1.562651)	1.14	g/km
CO <sub>2</sub>	73.95	75.09	X	g/km
HC	0.121536	0.122452	0,17	g/km

Tabulka 12: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky RDE 1 [autor]

Jak je vidět, měření trasy RDE (reálný provoz) přináší opět rozdílné výsledky. Hodnota CO je opět výrazně nad limitem. I když toto číslo není relevantní, reálné hodnoty nemohou být nižší a ani tato hodnota není v limitu EURO 4. Ostatní složky limit splňují, například NO<sub>x</sub> jsou opět velmi nízké. Jejich hodnota nedosahuje ani polovinu limitní hodnoty a jsou zároveň výrazně nižší než u WMTC. Naopak oproti cyklu EURO 3 jsou výrazně vyšší. Jejich hodnota je přesně v půlce mezi výše zmíněnými cykly, čemuž odpovídá i absorbovaný výkon, který byl v tomto cyklu naměřen 51 Wh/km. To opět souvisí a dynamikou jízdy, která podle těchto informací zdaleka nedosahuje dynamiky při testu EURO 4 v cyklu WMTC.



Obrázek 57: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů RDE 1 [autor]

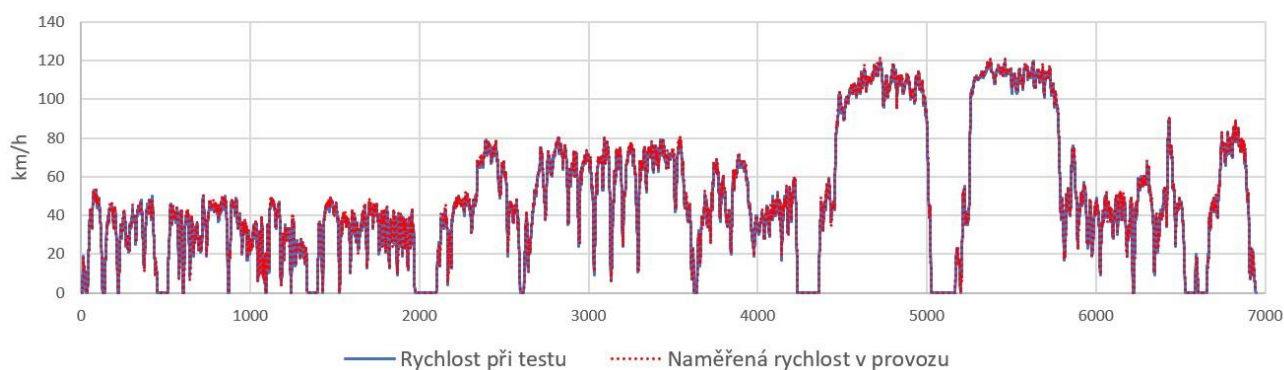
Kompletní průběhy všech složek jsou uvedeny v příloze RDE1.xlsx.

#### 5.5.4 Zkouška RDE 2

U zkoušky RDE 2 byla vyhodnocena reprodukovatelnost testů také jako relevantní. Kritéria pro opakovatelnost byla stejná, jako u testu WMTC. Tentokrát je vyobrazena jako graf rychlosti v závislosti na čase. Jednotlivé křivky se navzájem téměř po celé délce překrývají. Na grafu na obrázku č. 58 lze vidět pouze test č.1, nicméně ostatní zkoušky mají stejně validní opakovatelnost. Vyhodnocení opakovatelnosti je popsáno níže v kapitole 5.8 Vyhodnocení.



## Opakovatelnost testu 1



Obrázek 58: Graf – opakovatelnost testu 1 trasy RDE 2 [autor]

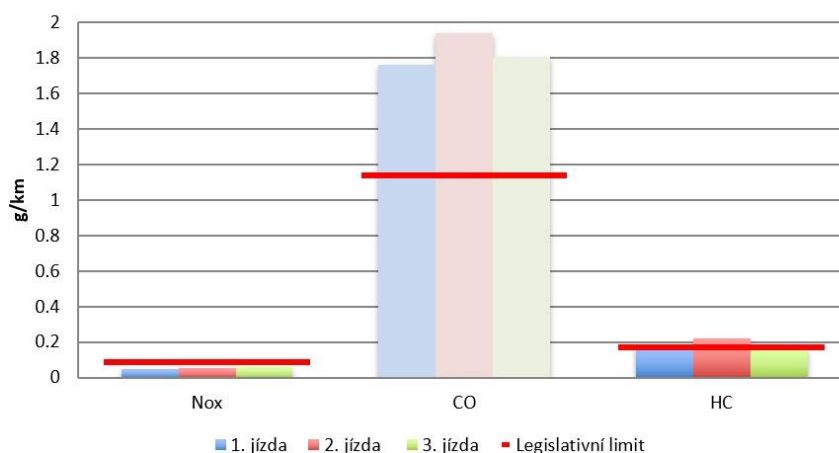
Výsledky testu 2 (tabulka č. 13) jsou celkově vyšší než u testu RDE 1, celkově ale potvrzují stejné chování. Výsledné složky byly také analyzovány pouze metodou přímého odběru vzorku, s čímž opět souvisí omezení hodnoty CO rozsahem analyzátoru. I tak je ovšem vidět že celková hmotnost CO je o něco vyšší.

Analyzovaná složka	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Limit EU 4	Jednotky
NO <sub>x</sub>	0.050007	0.053168	0.059588	0.09	g/km
CO	(1.762936)	(1.938)	(1.808874)	1.14	g/km
CO <sub>2</sub>	74.51	73.61	74.81	X	g/km
HC	0.184009	0.219409	0.167911	0,17	g/km

Tabulka 13: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky RDE 2 [autor]

Důvod vyšších výsledných hodnot je pravděpodobně dán tím, že se katalyzátor dostal jen zřídka do stavu, kdy by mohl pracovat optimálně. V městské části se vozidlo pohybovalo v nízkých rychlostech, čímž nedošlo k dostatečnému zahřátí. Naopak v mimoměstské části, díky vyšší dynamice a rychlostem, nestíhal katalyzátor s nízkou účinností redukovat škodliviny dostatečným způsobem.

## RDE 2



Obrázek 59: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů RDE 2 [autor]

Měření s označením RDE 2.3 bylo stejně jako u WMTC také analyzováno pomocí obou zařízení PEMS. Jak je již popsáno výše, z důvodu použití velkého průměru trubice průtokoměru a pulzacím ve výfuku, nebyl korektně změřen průtok výfukových plynů. Při měření trasy RDE byla ovšem po celou dobu zaznamenávána aktuální poloha škrtící klapky, což umožňuje vypočítat aktuální průtok v sání podle rovnice 5.1 uvedené výše a poskytuje tak relevantní odhad průtoku výfukových plynů motocyklu během testu. Rovnice výpočtu průtoku byla upravena následujícím způsobem a byl vypočítán průběh průtoku během testu v molech za sekundu. [1]

$$MAF \left[ \frac{mol}{s} \right] = MAP[kPa] * V_d[dm^3] * RPM / (120 * 8.314 [J * mol^{-1} * K^{-1}] * 300[K]) \quad (5.2)$$

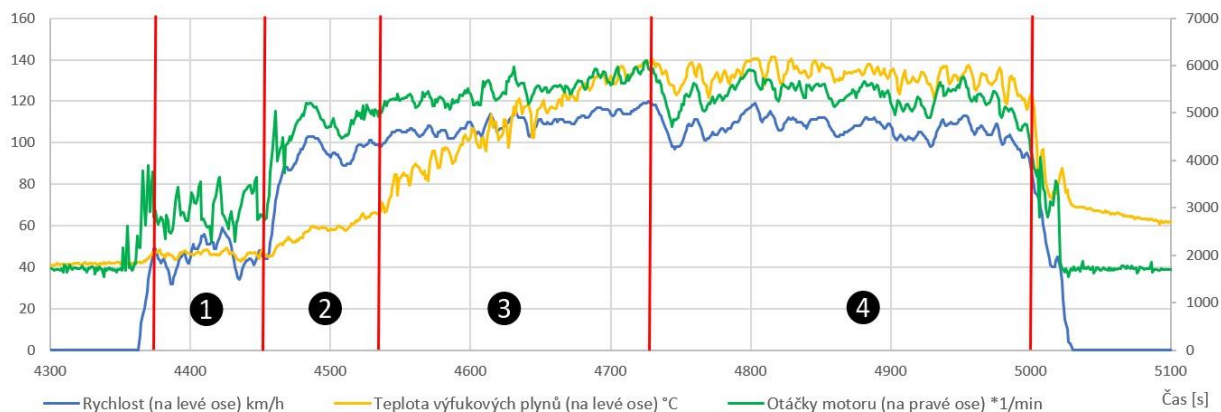
Průtok byl vynásoben molární hmotností a koncentrací dané látky a tím vyšly následující výsledky, které lze vidět v tabulce č. 14.

Analyzovaná složka	Měření 3 PEMS	Limit EU 4	Jednotky
NO <sub>x</sub>	0.0434	0.09	g/km
CO	6.4841	1.14	g/km
CO <sub>2</sub>	81.94	X	g/km

Tabulka 14: Výsledky hmotnostních emisí z koncentrací ze zařízení PEMS a výpočtem průtoku [autor]

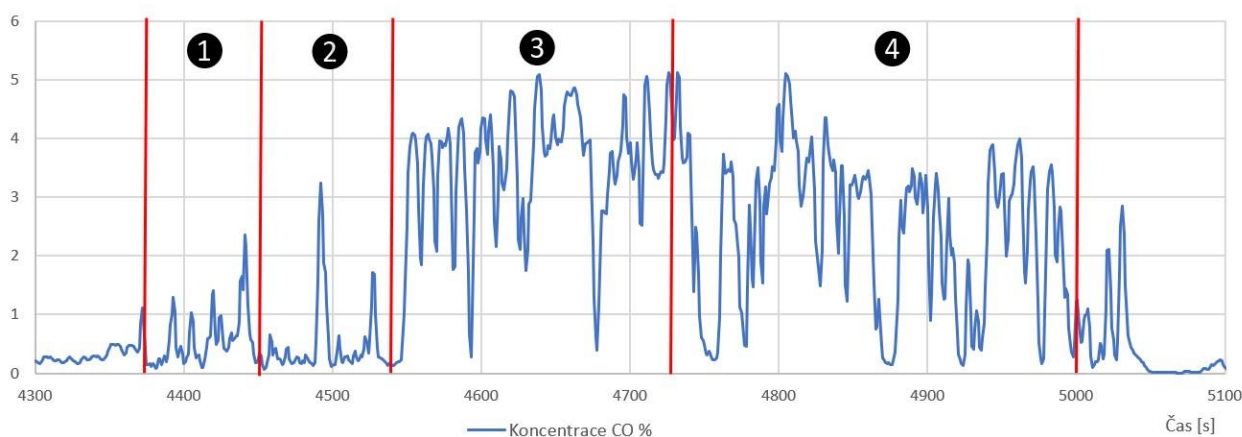
Je zřetelné, že CO<sub>2</sub> a tím pádem i spotřeba paliva je o něco vyšší, což znamená jistou chybu ve výpočtu. Rozdíl ovšem není tak markantní a je zde alespoň vidět, jak vysoko se hmotnosti složky CO ve výfukových spalinách dostávají. Na tyto hodnoty lze pohlížet pouze orientačně, z důvodu nepřesného výpočtu průtoku výfukových plynů.

I v tomto případě, měření všemi měřicími aparaturami, proběhla druhá validní korelace a byly získány další důležité hodnoty, díky kterým lze všechny výše uvedené informace ověřit. Pro ověření byl vybrán dálniční úsek, který reprezentuje průběh změn. Na následujícím grafu na obrázku č. 60 lze pozorovat průběh rychlosti, otáček a teploty výfukových plynů. Teplota výfukových plynů závisí na zatížení motoru. Zátěž roste s otáčkami motoru a rychlostí vozidla.



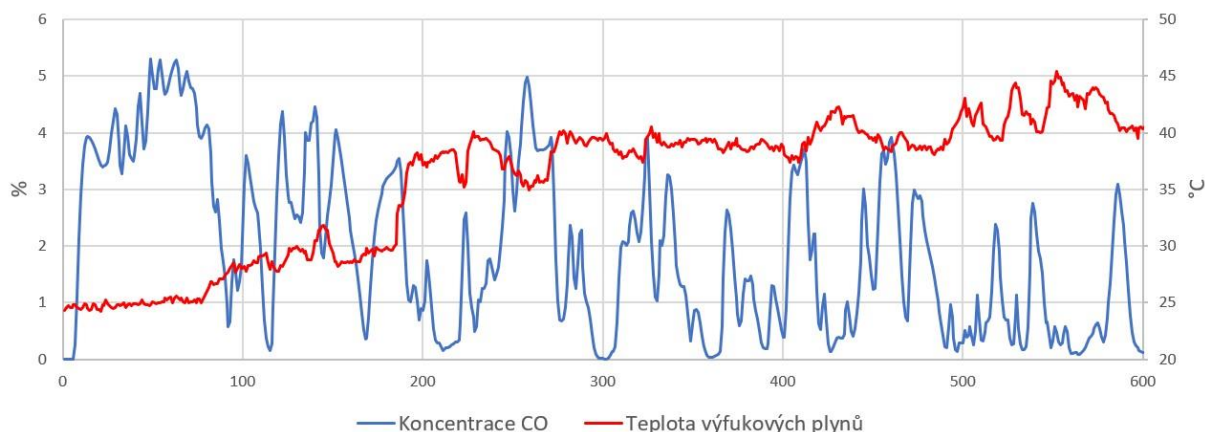
Obrázek 60: Graf – průběh rychlosti, otáček a teploty výfukových plynů v úseku testu RDE 2.3 [autor]

Úsek byl nadále rozdělen do 4 částí, ve kterých lze pozorovat jednotlivé změny. V první části se vozidlo pohybuje v relativně nízkých rychlostech a odpovídají tomu i nižší otáčky. Teplota výfukových plynů je v rozsahu správné funkce katalyzátoru. Ve druhé části vozidlo prudce zrychlí, čímž se zvýší i otáčky motoru. Teplota začne narůstat mírně. Ve třetí části pokračuje nárůst rychlosti a otáček, ovšem mírnějším způsobem. Naopak teplota narůstá stále razantně. V poslední části se všechny tři veličiny pohybují v relativně stálých hladinách. Na dalším grafu na obrázku č. 61 můžeme pozorovat průběh koncentrace složky CO ve stejných případech. V první části se jedná o nízké rychlosti a nízké hodnoty koncentrací výfukových plynů (CO), při kterých katalyzátor pracuje správně. I když dojde ve druhé části k prudkému zrychlení, teploty jsou stále dostatečně nízké a průtok není tak velký, aby zvládal katalyzátor dostatečně redukovat škodliviny. Třetí část je ve znamení vysokých koncentrací, což značí ztrátu účinnosti katalyzátorů z důvodu velkého průtoku výfukových plynů kvůli stále narůstající rychlosti. Dle teploty výfukových plynů je evidentní vyšší zatížení motoru. Průměrná hodnota CO v této části činí 3,3 %. Poslední část není tak dynamická, a proto se koncentrace o něco sníží, průměrně na 2,3 %, i když rychlosti zůstávají vysoké.



Obrázek 61: Graf – průběh koncentrace CO v úseku testu RDE 2.3 [autor]

Při uvažování příliš nízkých rychlostí a tím i teplot ve výfukových plynech, jsou koncentrace také velmi vysoké. Nicméně start zkoušky RDE 2.3 proběhl s motorem zahřátým na provozní teplotu, proto je zde tato skutečnost demonstrována na první fázi cyklu WMTC, který byl také změřen pomocí zařízení PEMS, ovšem se studeným startem. V následujícím grafu na obrázku č. 62 lze pozorovat, že úroveň koncentrací se snižuje s narůstající teplotou výfukových plynů.



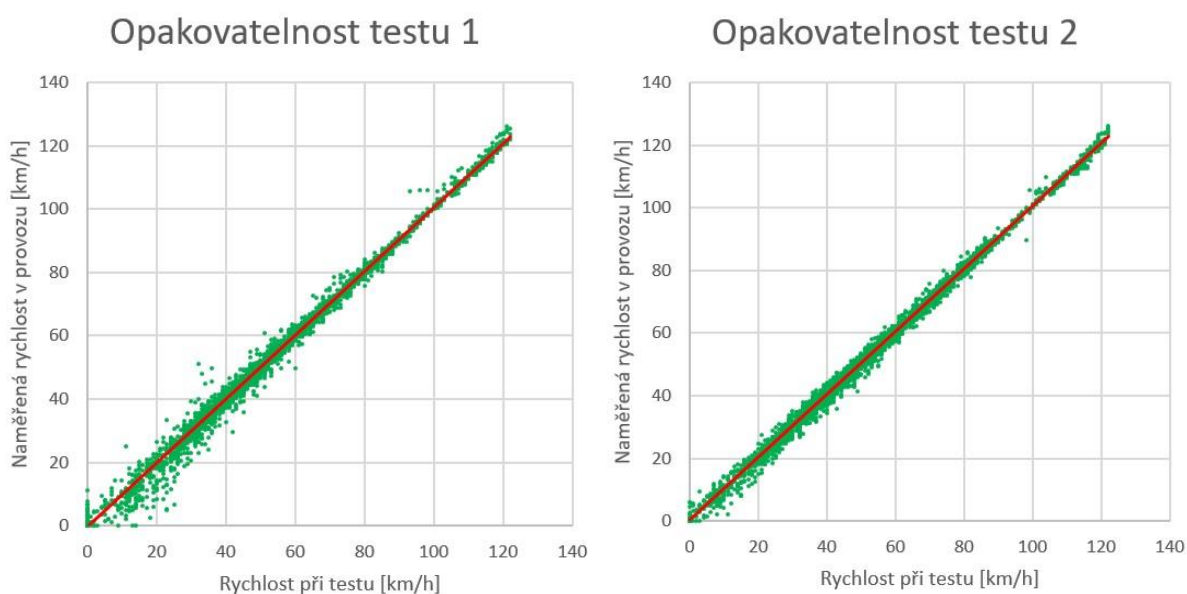
Obrázek 62: Graf – průběh rychlosti a teploty výfukových plynů během první fáze testu WMTC 3 [autor]

Dynamika cyklu RDE 2 byla vyšší než u cyklu RDE 1, čemuž odpovídá i absorbovaný výkon, který činil v tomto případě 53 Wh/km. Ve srovnání s cyklem WMTC je ovšem stále o dost nižší.

Kompletní průběhy všech složek jsou uvedeny v příloze RDE2.xlsx.

### 5.5.5 Zkouška RDE 3

Parametry měření trasy RDE 3 byly stejné jako trasy RDE 1, pouze motor nebyl zcela vychladlý, zároveň ovšem nebyl zahřátý na provozní teplotu, jako u testu RDE 2. Opakovatelnost je opět vyobrazena na bodových grafech na obrázku č. 63 a 64. Zde lze však pozorovat větší rozdíl mezi jednotlivými testy. U testu č. 1 je zřetelné, že se jezdci na válcové zkušební nedařilo držet křivku tak dobře, jako u testu č. 2, což dělá rozdíl i ve výsledných rozdílech v hmotnosti emisí.



Obrázek 63 a Obrázek 64: Grafy – opakovatelnost testů trasy RDE 3 [autor]

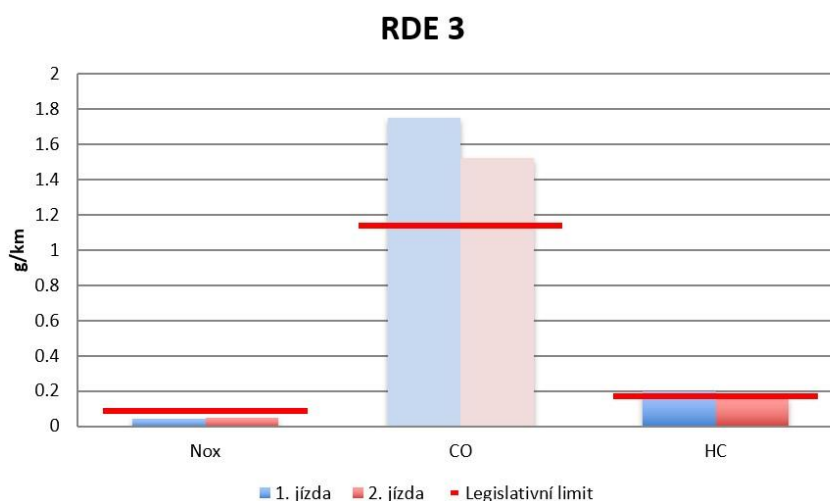
Hmotnostní výsledky emisí v tabulce č. 15 jsou podobné jako u trasy RDE 1. Validnější jsou spíše výsledky z měření č.2. vzhledem k faktu že se řidič vozidla snažil jet co nejvíce „běžnou jízdou“, je

evidentní, že „běžný“ styl jízdy odpovídá spíše jízdě s nižší dynamikou. Tomu odpovídá i nižší výsledný absorbovaný výkon 50 Wh/km.

Analyzovaná složka	Měření 1	Měření 2	Limit EU 4	Jednotky
NO <sub>x</sub>	0.044891	0.046974	0.09	g/km
CO	(1.748121)	(1.524232)	1.14	g/km
CO <sub>2</sub>	74.85	73.98	X	g/km
HC	0.19835	0.159742	0,17	g/km

Tabulka 15: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky RDE 3 [autor]

Hmotnostní výsledky CO opět nejsou relevantní z důvodu nízkého rozsahu analyzátoru, nicméně i tak se dá znovu s jistotou říci, že překračují limitní hodnoty. Hodnoty NO<sub>x</sub> jsou opět velmi nízké. Uhlovodíky v měření č. 1 také splňují limit, u měření dva jsou vyšší. To je ovšem zapříčiněno nevyrovnaným stylem jízdy během testu, jak je zřejmé z grafu opakovatelnosti.

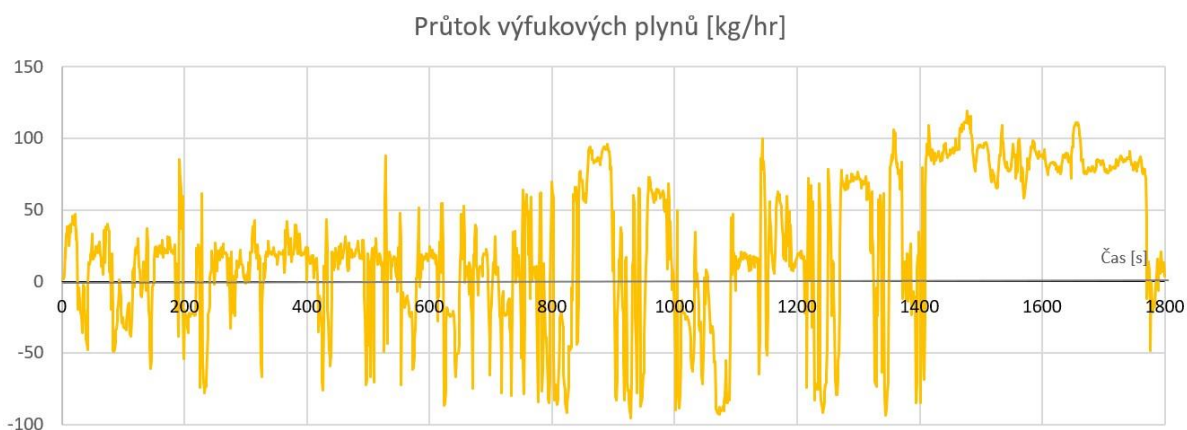


Obrázek 65: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů RDE 3 [autor]

Kompletní průběhy všech složek jsou uvedeny v příloze RDE3.xlsx.

### 5.5.6 Pulzace ve výfukovém traktu

Hlavním důvodem, proč hmotnostní výsledky naměřené zařízením PEMS nejsou relevantní, jsou pravděpodobně pulzace ve výfukovém potrubí. Výpočet hmotnosti emisí u této analýzy probíhá tak, že je naměřená koncentrace násobena průtokem. Analyzátor si odebírá pouze malý vzorek z celkového objemu výfukových plynů, a proto je nezbytné touto metodou celkové hmotnosti složek dopočítat. Z grafu na obrázku č. 66 průběhu průtoku během měření cyklu WMTC je ovšem zřetelné, že jdou hodnoty z velké části do záporu. Po přepočtu koncentrace na hmotnostní emise tak potom vychází velmi malé číslo, které není korektní.



Obrázek 66: Graf – průtok výfukových plynů v testu WMTC 3 [autor]

V určitých fázích testu však průtok vypadá korektně. Jedná se zejména o místa, kde vozidlo dosahuje vysokých rychlostí. Nicméně to se nedá říct s jistotou, z důvodu neznalosti přesného průtoku, který by v potrubí měl být. Ten lze však odhadnout dle výpočtu výše. Z průběhu průtoku, který byl naměřen během testu RDE 3.3 lze ovšem definovat základní chování pulzací. Na následujícím grafu na obrázku č. 67 lze vidět, že průtok je konstantní v případě, pokud vozidlo stojí na místě a motor běží na volnoběh. Ve chvíli, kdy se ovšem rozjede (5170 s), je průtok nestabilní. Průtok se opět ustálí ve chvíli, kdy dosáhne určité rychlosti (otáček). Na grafu lze vidět (5260 s) v tomto případě relativní ustálení průtoku výfukových plynů.



Obrázek 67: Graf – průtok výfukových plynů v úseku testu RDE 2.3 [autor]

Potencionálním řešením tohoto problému by bylo prodloužení výfukového potrubí před odběrem vzorku, v kterém by se pulzace ustálily, to ovšem neřeší problém měření v reálném provozu, kde bude zapotřebí mít měřící zařízení přímo na motocyklu. To by ale znamenalo větší chybu měření a také větší zpoždění v čase, za který se dostane vzorek od určitého zaznamenávaného momentu k analyzátoru.

Jiným případným řešením by bylo nainstalovat na výfukové potrubí mezi výfuk vozidla a měřicí přístroje tzv. přechodovou komoru, ve které se průtok stabilizuje a odstraní se většina pulzací. To ovšem vyžaduje značně složitější řešení konstrukce napojení výfukového traktu na měřicí přístroje. V obou případech to bude ovšem velmi složité vyřešit na motocyklu, který bude měřen za reálného provozu.

## 5.6 Měření emisí online v reálném provozu

Pro ověření výsledků simulace RDE byl proveden experiment měření emisí přímo v provozu s experimentálním analyzátozem. Mini-PEMS byl nainstalován přímo na motocykl (obrázek č. 68).



Obrázek 68: MiniPEMS na motocyklu [autor]

Odběr vzorku byl nejdříve zaveden na konec výstupu z výfukového traktu. I když však byla odběrná trubice zavedena do tlumiče hluku co nejdále to šlo, odběr vzorku nebyl korektní. Opět se zde projeví pulzace ve výfukovém potrubí, které zapříčinily zpětný tok vzduchu, a to mělo za následek ředění vzorku výfukových plynů okolním vzduchem. Výsledné koncentrace složek tak byly velice nízké a neodpovídaly dříve naměřeným hodnotám. Z toho důvodu bylo nezbytné nalézt jiné řešení, a sice odběr vzorku spalin blíže k motoru – mezi katalyzátory a tlumičem hluku. V tomto místě byl již odběr korektní. K PEMSu byly zároveň připojeny i další snímače:

- snímač otáček motoru
- snímač tlaku v sání
- GPS modul
- senzor teploty výfukových plynů

K měření byla vybrána trasa RDE 2 z toho důvodu, že byla příslušným zařízením (MiniPEMS) měřena i na válcové zkušebně. Při měření v provozu nebyl zaznamenán průtok výfukových plynů, jelikož MiniPEMS nedisponuje průtokoměrem. Aby bylo možné určit hmotnostní složky, bylo potřeba průtok vypočítat. V tomto případě se však jedná o hrubý odhad, z důvodu špatného záznamu tlaku v sacím potrubí. Zaznamenaná hodnota je konstantní, což značí nekorektnost. Bohužel zde nebyla zaznamenána ani poloha škrtící klapky, a tak byla použita odhadnutá průměrná hodnota 60 kPa. Výpočet vypadal následujícím způsobem [1]:

$$MAF \left[ \frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] = 60 [\text{kPa}] * V_d [\text{dm}^3] * RPM / (120 * 8.314 [\text{J} * \text{mol}^{-1} * \text{K}^{-1}] * 300 [\text{K}]) \quad (5.3)$$

Po vynásobení průtoku koncentracemi a molárními hmotnostmi příslušných složek vycházejí následující výsledky, uvedené v tabulce č. 16.

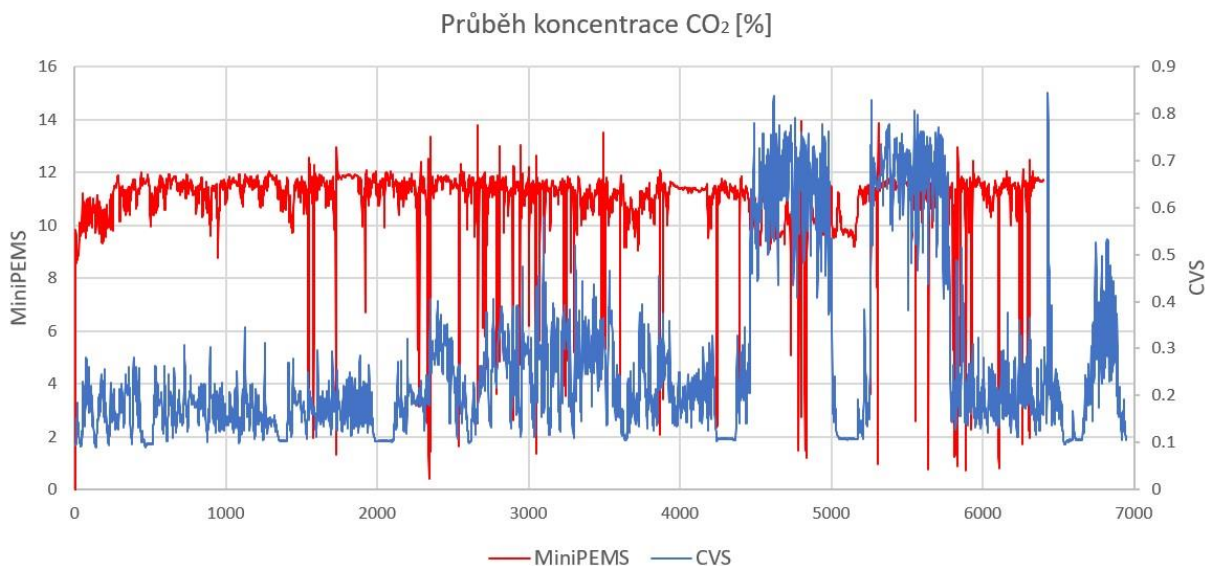
Analyzovaná složka	Měření 3 PEMS	Limit EU 4	Jednotky
NO <sub>x</sub>	0.0342	0.09	g/km
CO	4.2535	1.14	g/km
CO <sub>2</sub>	91.27	X	g/km
HC	0.1607	0.17	g/km

Tabulka 16: Výsledky hmotnostních emisí jízdy v reálném provozu s odhadem průtoku výfukových plynů [autor]

Z hmotnosti složky CO<sub>2</sub> je zřejmé, že výpočet nebyl zcela přesný. Hodnota je zhruba o 15 g/km výše, než byla v ostatních testech. Jízda však byla velmi dynamická a na dálnici bylo dosahováno vyšších rychlostí, tudíž tyto hodnoty lze orientačně brát v úvahu. Hodnota CO je opět velmi vysoká, je ovšem nižší, než ve stejném testu na válcovém dynamometru. Oxidy dusíku v tomto případě s rezervou splňují limit. Uhlovodíky (analyzované metodou NDIR) jsou také v limitu, ovšem jen těsně.

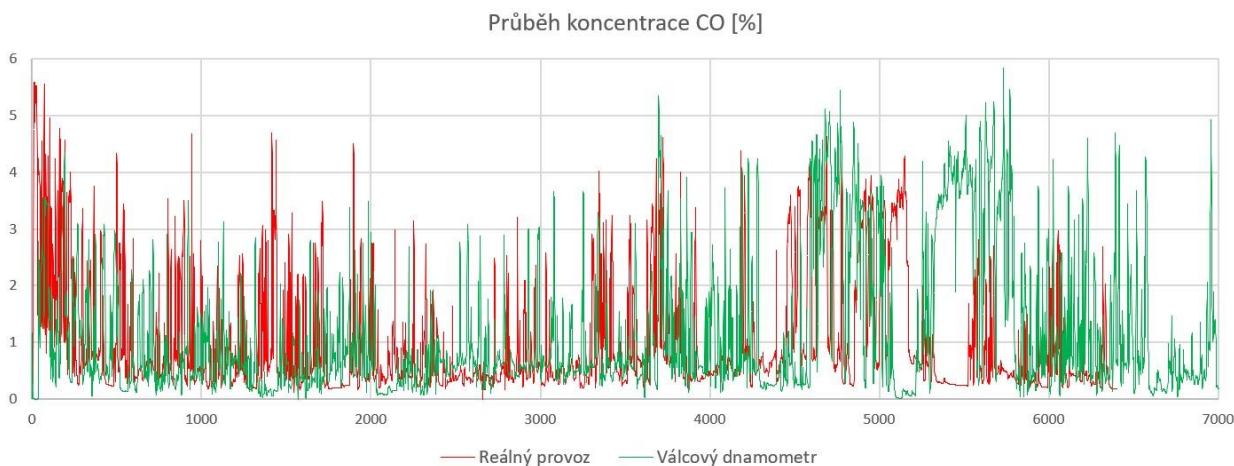
Pokud porovnáme průběh koncentrací CO<sub>2</sub> mezi jízdou v reálném provozu se zařízením MiniPEMS a jízdou na válcovém dynamometru měřenou pomocí CVS na grafu na obrázku č. 69, je zde vidět rozdíl v průbězích. Délky testu jsou v čase rozdílné, což je zapříčiněno rozdílnými délkami zastávek a rozdílem v průbězích rychlosti. Tato skutečnost názorně dokazuje, že podobná opakovatelnost testů v reálném provozu je téměř nemožná. Zatímco u PEMSu je hodnota v konstantních mezích, u CVS lze pozorovat větší rozdíly. To je zapříčiněno ředícím vzduchem, který je proměnný v závislosti na průtoku výfukových plynů. Z toho důvodu je koncentrace u CVS proměnná na rozdíl od PEMSu, kde se neustále odebírá neředěný vzorek. Průběh koncentrací ze zařízení MiniPEMS zde vychází ze surových dat. Pro striktně přesné hodnoty by bylo zapotřebí provést korekci dat na odchylku z kalibrace analyzátorů.





Obrázek 69: Graf – průběh koncentrací CO<sub>2</sub>, MiniPEMS vs. CVS [autor]

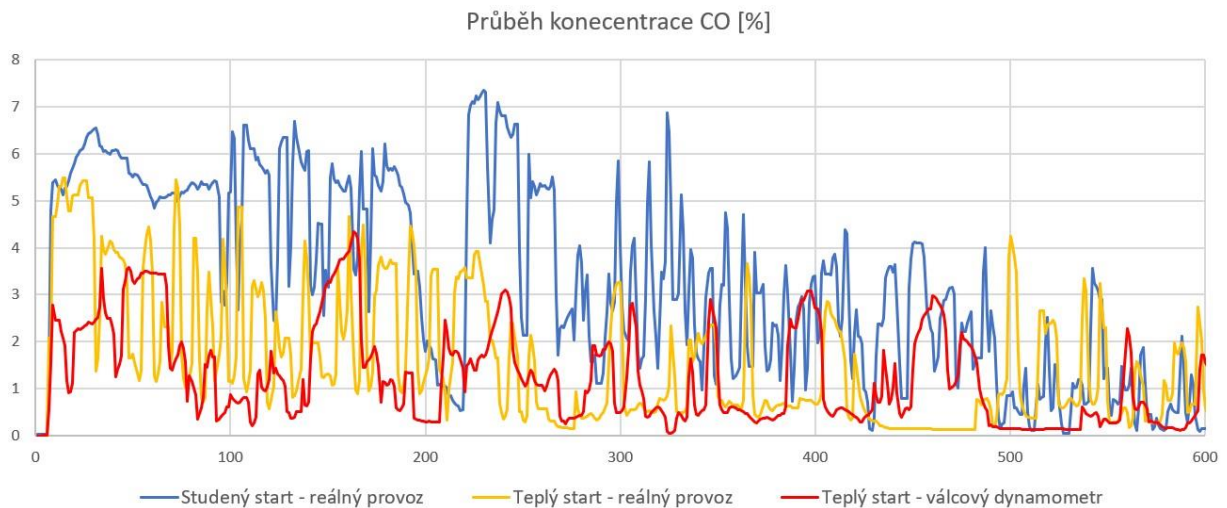
Z průběhu koncentrací CO<sub>2</sub> ze zařízení MiniPEMS je zřejmé, že jsou v obvyklých mezích, což vypovídá o korektnosti měření uhlíkatých sloučenin. Na průběžích složky CO si tak lze ukázat porovnání mezi měřeními na válcovém dynamometru a v reálném provozu stejným analyzátozem. Na grafu na obrázku č. 70 jsou vyobrazeny průběhy koncentrací CO mezi testem RDE 2 a měřeními online v reálném provozu na stejné trase, v obou případech měřeno pomocí zařízení MiniPEMS.



Obrázek 70: Graf – průběh koncentrací CO, RDE online vs. emisní laboratoř [autor]

Zde je patrné, že koncentrace jsou v podobných mezích, což ověřuje validitu simulace reálného provozu na válcovém dynamometru. Průměrná hodnota koncentrace CO v reálném provozu byla 1.146 %, na válcovém dynamometru 0.991 %. Tyto hodnoty nám dávají alespoň hrubý náhled na podobnost testu, nelze je ovšem srovnávat přímo. Rozdíl v koncentracích může být zapříčiněn rozdílným průběhem testu. Z toho důvodu by bylo možné je srovnat přímo pouze za podmínek, kdyby při záznamu dat pro test na válcovém dynamometru byly přímo i měřeny složky výfukových plynů.

Začátek zkoušky v reálném provozu byl proveden se zahřátým motorem na provozní teplotu stejně, jako tomu bylo při testu RDE na válcovém dynamometru. Ještě před tímto měřením byla však projeta městská část této trasy se studeným startem. Díky tomu lze srovnat průběhy koncentrací mezi studeným startem, teplým startem a teplým startem na válcovém dynamometru. Tyto průběhy jsou vyobrazeny na grafu na obrázku č. 71.



Obrázek 71: Graf – průběh koncentrací CO, studený a teplý start [autor]

Z grafu je zřetelné, že teplota motoru má na emisní chování markantní vliv. Zde je ovšem vidět i rozdíl mezi reálným provozem a válcovým dynamometrem za předpokladu startu s ohřátým motorem. Z toho lze usuzovat, že okolní podmínky testu mohou mít též zásadní vliv na výsledné koncentrace emisí mezi měřením v reálném provozu a na válcové zkušebně.

## 5.7 Použité měřicí zařízení

Seznam použitého měřicího zařízení během experimentální části:

- GPS datalogger CAN2MMC
- Ústředna National Instruments cRIO-9063
- GPS
  - GPS jednotka DEWE-VGPS-HSC
  - GPS modul GARMIN GPS 18x PC
- Dotykový displej s OS Windows a programem pro dojezdovou zkoušku
- 2x akumulátor 6V
- Válcová zkušebna MAHA 4x4 AIP-ECDM 48L-4mot
- Systém analýzy výfukových spalin HORIBA CVS-ONE-MV-HE, HORIBA MEXA-ONE-C2-OV
- PEMS SEMTECH SENSORS LDV
  - EFM průtokoměr 2-palcový
- Mini-PEMS, experimentální analyzátor pro měření výfukových emisí v provozu

## 5.8 Vyhodnocení

V tabulce č. 17 jsou uvedeny kompletní výsledky průměrných hmotnostních emisí a výsledky zatěžování všech validních realizovaných testů. Ve všech případech jsou výsledné hodnoty analyzovány metodou CVS, kromě testu RDE ONLINE, kde jsou výsledky vypočteny z koncentrací analyzovaných MiniPEMSem a odhadnutého průtoku výfukových plynů. Hodnoty označené červeně nejsou validní z důvodu omezeného rozsahu analyzátoru nebo úniku výfukových plynů, jak je popsáno výše. Žluté hodnoty jsou určeny skrze dopočet průtoku výfukových plynů s odhadem parametrů.

Data pro test	Test	Absorbovaný výkon [Wh/km]	Složky výfukových emisí			
			CO [g/km]	CO <sub>2</sub> [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	HC [g/km]
EURO 3	EU3	44	3.2289	80.87	0.0197	0.2792
EURO 4	WMTC 1	62	0.8606	68.63	0.0429	0.0756
	WMTC 2		1.6893	74.12	0.0451	0.1768
	WMTC 3		1.9581	73.52	0.0635	0.1273
Trasa 1	RDE 1.1	51	1.4758	73.94	0.0404	0.1215
	RDE 1.2		1.5627	75.09	0.0432	0.1225
Trasa 2	RDE 2.1	53	1.7629	74.50	0.0500	0.1840
	RDE 2.2		1.9380	73.60	0.0532	0.2194
	RDE 2.3		1.8089	74.81	0.0596	0.1679
Trasa 3	RDE 3.1	50	1.7481	74.84	0.0449	0.1983
	RDE 3.2		1.5242	73.97	0.0470	0.1597
-	RDE ONLINE	-	4.2535	91.26	0.0342	0.1607

Tabulka 17: Kompletní výsledky hmotnostních emisí [autor]

Při pohledu na absorbovaný výkon je zřetelné, že jsou zde vidět patřičné rozdíly v zatížení. Jak je již popsáno výše, ani jeden z homologačních cyklů neodpovídá dynamickým parametrům, jakých motorka dosahuje v reálném provozu. Ve starém homologačním cyklu pro normu EURO 3 je zatěžování velmi malé, naopak v současném WMTC je zatěžování mnohem vyšší, což vykazuje o dynamičtější jízdě. S tím nadále souvisí i výsledné výfukové emise. Při rozdílných režimech jízdy je motor rozdílně zatěžován, což se promítá na množství výfukových plynů, které z motoru vystupují a na tom, jakým způsobem jsou následně redukovány v katalytickém systému. Nedostatečná dynamika znamená nedostatečné teploty výfukových plynů pro správnou funkci katalyzátorů, vysoké rychlosti naopak příliš velký průtok škodlivých látek, které nestíhají být redukovány. Hmotnostní složky jsou ve většině případů nad limitem, nicméně lze v nich pozorovat jistou nevyváženost. Jednotlivé komentáře zazněly již výše, ovšem je evidentní, že nejvyváženější výsledky vykazují testy WMTC, což značí dostatečnou dynamiku a zároveň více jízdnicích režimů, při kterých je účinnost katalyzátorů dostatečná. Je tedy zřejmé, že měření v reálném provozu přináší nové hodnoty. Při srovnání jednotlivých cyklů zaznamenaných v reálném provozu je zřetelné, že jsou si výsledky velmi podobné. U výsledků RDE 2 jsou sice hmotnostní emise celkově vyšší, ale to je důsledek většího zatěžování motoru při jízdě ve vyšších rychlostech. Měření RDE online v reálném provozu ověřuje, že se výsledky z reprodukování RDE tras na válcové zkušebně dají považovat za průkazné a srovnatelné s případnými hodnotami naměřenými přímo v reálném provozu.

Pokud se zaměříme na opakovatelnost testů, je zřejmé, že nebyly a ani nemohly být reprodukovány naprosto přesným způsobem. Relevantnost jejich opakovatelnosti je popsána výše a na základě legislativních kritérií (připouští se časová tolerance plus minus 1 s a rychlostní tolerance plus minus 3.2 km/h) bylo vyhodnoceno, jak dobře byly testy opakovány. V následující tabulce č. 17 je v procentech vyjádřen čas, který odpovídal těmto kritériím, z celkové doby testu.

Test	Korektní opakovatelnost [%]
EU 3	98.5
WMTC 1	93.9
WMTC 2	97.9
WMTC 3	98.2
RDE 1.1	95.4
RDE 1.2	93.8
RDE 2.1	95.3
RDE 2.2	90.5
RDE 2.3	93.6
RDE 3.1	92.3
RDE 3.2	95.1

Tabulka 18: Procento korektně zopakovaných oken během testu [autor]

Z tabulky č. 18 je zřejmé, že ve všech případech dosahovala opakovatelnost více než 90 %. Nejlepší byla v testu EU 3, WMTC 2 a 3. Tyto testy jsou oproti testům RDE velmi krátké, což může být také příčinou – udržování koncentrace jezdce při jízdě.

Za předpokladu, že podmínky testů na válcovém dynamometru byly vždy stejné, dělá rozdílnost ve výsledcích právě opakovatelnost a nejistota, která je ztížena systematickou chybou (např. nepřesnost měřicího zařízení). Proto je za potřebí určit z výsledných hodnot nejistotu, která vypovídá o významnosti rozdílů během měření. Pokud vezmeme v úvahu, že bylo stejné měření opakováno, dá se nejistota určit ze statistické analýzy měření. Nejdříve se spočítá aritmetický průměr z hodnot získaných při měření:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.4)$$

Po vypočítání aritmetického průměru se určí směrodatná odchylka naměřených hodnot od získané hodnoty a vyjádří se v procentech. Tím je získán komplexní přehled o statistické přesnosti. Jednotlivé hodnoty lze vidět v tabulce č. 19.

Rozdíly v opakovatelnosti měření [%]				
	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HC
WMTC 2	7.4	0.4	17.0	16.3
WMTC 3	7.4	0.4	17.0	16.3
RDE 1.1	2.9	0.8	3.3	0.4
RDE 1.2	2.9	0.8	3.3	0.4
RDE 2.1	4.0	0.3	7.8	3.4
RDE 2.2	5.5	0.9	2.0	15.2
RDE 2.3	1.5	0.7	9.8	11.8
RDE 3.1	6.8	0.6	2.3	10.8
RDE 3.2	6.8	0.6	2.3	10.8

Tabulka 19: Opakovatelnost měření [autor]

Homologační test EURO 3 zde zmíněn není z toho důvodu, že byl měřen pouze jednou. Dále chybí test WMTC 1, který do statistiky nelze zahrnout z důvodu netěsnosti ve spoji výfukového traktu během testu. Z tabulky č. 19 je zřetelné, že rozdíly nejsou nijak obzvláště velké. Největší rozdíl v hodnotách NO<sub>x</sub> a HC v homologačních testech EURO 4, WMTC cyklech. Naopak nejlepší opakovatelnost je jednoznačně v testech RDE 1, kde jsou malé odchylky ve všech 4 složkách.

## 5.9 Souhrn experimentální části a diskuze výsledků

V druhé části práce byl uskutečněn experiment, který měl za cíl definovat emisní chování vybraného vzorku motocyklu v reálném provozu, srovnat jej s homologačními zkouškami a nalézt případné rozdíly. Z důvodu velkých rozměrů a hmotnosti měřicího zařízení byl experiment naplánován tak, aby se tato

fakta dala zjistit v emisní laboratoři. Bylo provedeno rozsáhlé měření, které zahrnovalo 3 trasy zaznamenané v reálném provozu, dojezdovou zkoušku pro získání silničních odporů vozidla, výpočet vlivu odporu ze stoupání, 11 emisních zkoušek na válcové zkušební a v neposlední řadě i samotné přímé měření v reálném provozu pomocí experimentálního analyzátoru. Nesporná výhoda v simulaci reálného provozu v emisní laboratoři je možnost opakovatelnosti a ověření výsledků z měření, což v reálném provozu není možné. Navíc přímé měření emisí v reálném provozu ověřuje, že replikace testů z reálného provozu v emisní laboratoři vykazuje prokazatelné výsledky. Nejvyrovnanější výsledky vykazoval cyklus WMTC, dle kterého byl motocykl homologován. Jízda v reálném provozu byla dynamicky odlišná a vykazovala opakovatelně rozdílné výsledky. Z toho důvodu se dá očekávat, že zavedení měření v reálném provozu pro motocykly přinese nové poznatky globálně.

Byly také objeveny značné pulzace ve výfukovém traktu, což zabraňuje korektnímu dopočtu hmotnostních emisí při použití současně dostupných přenosných průtokoměrů pro automobily. Tento problém se týká zejména motocyklů s nízkoobjemovými spalovacími motory s malým počtem válců. Pro korektní měření se správným dopočtem hmotnostních emisí bude nezbytné nalézt vhodné technologické řešení, které tento problém eliminuje, jako je například přechodová komora nebo prodloužení vedení výfukových plynů k průtokoměru, které ustálí tok výfukových plynů a pulzace. To ovšem nebude jednoduché konstrukčně vyřešit tak, aby bylo možné takové řešení aplikovat v reálném provozu.

Měřicí zařízení bude nezbytné redukovat na takové rozměry a hmotnosti, aby bylo možné ho použít na všech nebo alespoň většině kategorií motocyklů a nebyly tím ovlivněny samotné emisní výsledky. Bude také zapotřebí zařízení konstrukčně dimenzovat tak, aby se dalo unifikovaně instalovat na všechny druhy motocyklů, jako u automobilů (instalace na tažné zařízení). Na obrázku č. 72 je vyobrazený návrh případného řešení.



Obrázek 72: Ukázka možného řešení JAWA + PEMS [autor]

Lze uvažovat i o dalších metodách měření, jako je například odběr vzorků výfukových plynů do vaků v reálném provozu (popsáno v kapitole 3.1.3.). Řešením by mohlo být také omezení legislativy na měření pouze některých parametrů v reálném provozu (například koncentrace), podle kterých by se výsledky korelovaly pomocí parametrů známých z laboratoře. Skvělým příkladem měřícího zařízení, které by pro výše popsané účely mohlo v budoucnu sloužit, je experimentální MiniPEMS, použitý v této práci pro měření koncentrací vybraných složek spalin v reálném provozu.

Z výše popsaných důvodů je nezbytné myslet i na vhodnou úpravu parametrů jízdy RDE v legislativě pro kategorii L. Tyto parametry bude také nutné rozdělit a definovat zvlášť pro každou třídu motocyklů, a to nejen z důvodu větších konstrukčních rozdílů, než je tomu u automobilů. Je zde mnoho otázek a problémů, se kterými se budou muset výrobci vozidel, měřícího zařízení i homologační orgány zabývat.

## 6 Závěr

V první části této práce byla provedena rešerše na téma emise výfukových plynů obecně, jejich měření na motocyklech, na válcové zkušebně a také v reálném provozu. Nejprve byly rozebírány hlavní složky výfukových plynů a jejich úprava v katalytickém konvertoru. Dále byly popsány jednotlivé metody měření, včetně způsobu analýzy jednotlivých složek výfukových plynů. Závěrem byly vyčteny současné požadavky legislativy na emisní měření motocyklů a automobilů v reálném provozu.

Druhá část práce se zabývá praktickým experimentem, ve kterém je simulováno měření emisí v reálném provozu na vybraném typu motocyklu. Výsledkem byly shledány značné rozdíly v zatěžování vozidla mezi homologačními cykly a reálným provozem. Na absorbovaném výkonu byla základním způsobem definována dynamika jednotlivých cyklů a porovnána mezi sebou, což svým způsobem vysvětluje rozdílnost emisního chování zkoušeného vzorku. Během měření byly pozorovány vysoké pulzace ve výfukovém traktu, které se běžně objevují u nízko-objemových spalovacích motorů s malým počtem válců.

Na základě všech poznatků z měření a výsledků bylo poukázáno na následující problémy. Dynamika cyklu WMTC je příliš vysoká na to, aby odpovídala reálnému provozu. Z toho důvodu mohou mít některá vozidla v budoucnu problém s tímto druhem měření, jako například vzorek zkoušený v této práci, jehož úprava spalin je na dynamickou jízdu úzce vázána. Z druhého pohledu je ovšem zřejmé, že u většiny motocyklů se s dynamickým stylem jízdy počítá, obzvláště více než u automobilů. Dalším problémem jsou rozměry a hmotnost současně dostupných analyzátorů pro měření v reálném provozu, které jsou pro tuto kategorii nevyhovující z důvodu malé hmotnosti zkoušených vozidel. Měřené hodnoty by tak mohly být značně ovlivněny. Nesmí se ovšem opomenout problém s měřením průtoku výfukových plynů, který vytváří pulzace ve výfukovém traktu. Je nezbytné nalézt obecně vhodné řešení tohoto problému, protože hodnota průtoku je klíčová pro výpočet hmotnostních emisí.

Závěrem je nutno podotknout, že měření v reálném provozu přináší odlišné výsledky a má smysl. U motocyklů lze shledat mnohem větší rozdíly v konstrukci jednotlivých tříd vozidel a motorů, než u automobilů a zároveň jsou zde markantnější rozdíly v jízdách stylech jezdců. Z toho důvodu lze předpokládat i rozdílnější výsledky měření emisí v reálném provozu na motocyklech než u automobilů a je nezbytné, aby tato fakta byla brána v úvahu při tvorbě budoucí legislativy měření emisí v reálném provozu, vztahující se na vozidla kategorie L.



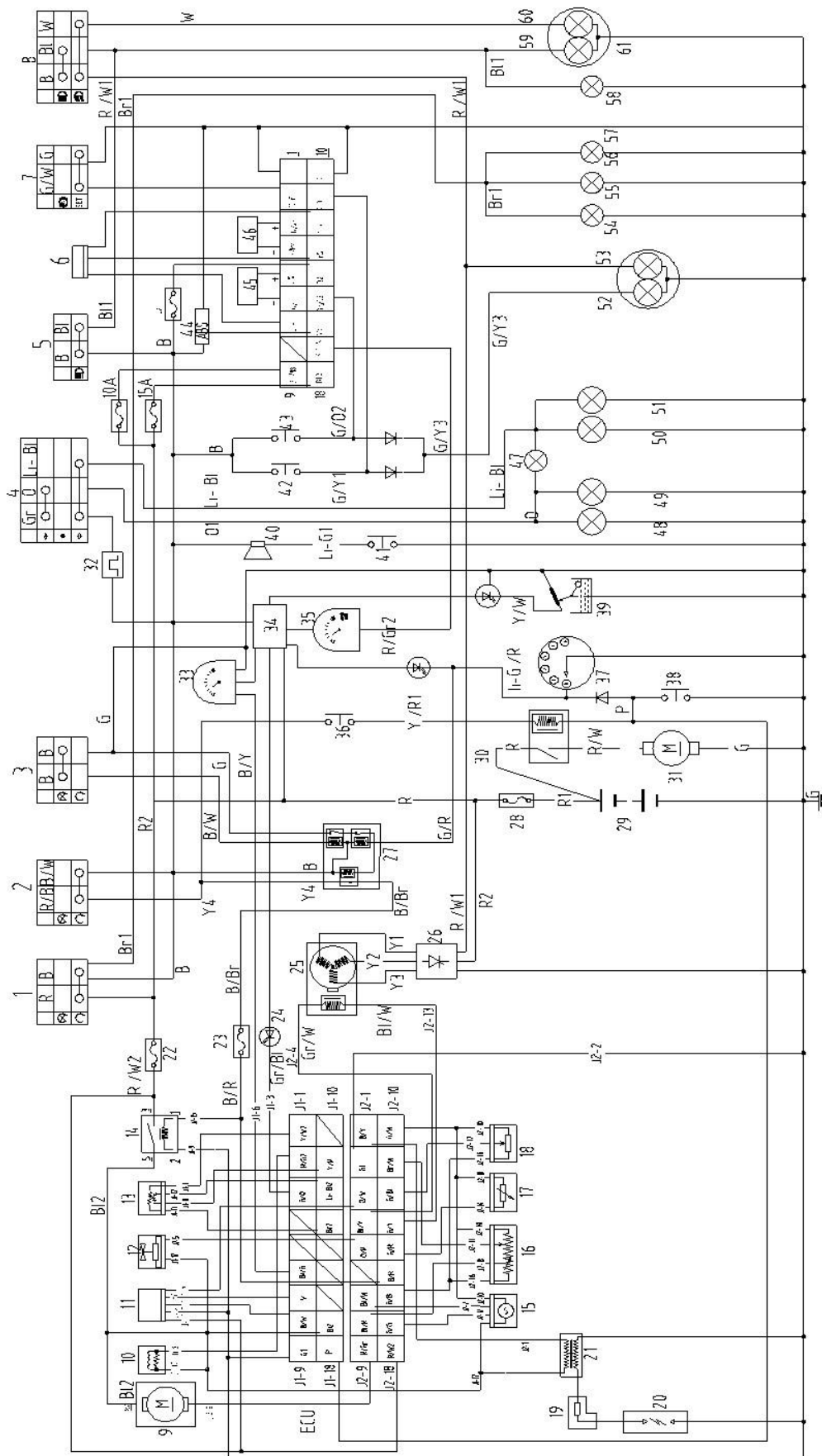
# 7 Přílohy

## 7.1 Seznam přiložených souborů s výsledky

- EURO3.xlsx
- EURO4.xlsx
- RDE1.xlsx
- RDE2.xlsx
- RDE3.xlsx

Všechny soubory jsou přiloženy pouze v elektronické podobě.

## 7.2 Schéma kompletní elektroinstalace motocyklu JAWA 350 OHC



## 7.3 Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení emisí [autor] .....	14
Obrázek 2: Technická účinnost trojcestného katalyzátoru [2] .....	16
Obrázek 3: Eliminace složek škodlivin ve výfukových plynech na monolitu TWC [3] .....	17
Obrázek 4: Schéma sestavy komponentů metody přímého vzorkování [12] .....	20
Obrázek 5: Schéma sestavy komponentů metody odběru vzorků [12] .....	21
Obrázek 6: Ultrazvukový průtokoměr [12] .....	23
Obrázek 7: Pitotova trubice [12] .....	23
Obrázek 8: Absorpční spektra [2] .....	24
Obrázek 9: NDIR – Bezdisperzní infračervený analyzátor [14] .....	25
Obrázek 10: NDUV – Bezdisperzní ultrafialový analyzátor [autor] .....	26
Obrázek 11: Vyobrazení křivky cyklu během testování před vozidlem [autor] .....	29
Obrázek 12: Část testovacího cyklu ECE R15 [autor] .....	30
Obrázek 13: Část testovacího cyklu EUDC [autor] .....	30
Obrázek 14: Homologační cyklus pro motocykly při schvalování normy EURO 3 [autor] .....	31
Obrázek 15: Homologační cyklus WLTC pro automobily při schvalování EURO 6 [autor] .....	32
Obrázek 16: Homologační cyklus WMTC pro motocykly při schvalování normy EURO 4 [autor] .....	32
Obrázek 17 a Obrázek 18: Definice maximální a minimální možné odchylky od křivky během testu [18] .....	33
Obrázek 19: Graf MAW – souhrn akceleračních oken (Škoda Fabia 1.2 TSI) na trase RDE 2 [autor] .....	37
Obrázek 20: PEMS pro automobily SEMTECH SENSORS [autor] .....	37
Obrázek 21: Připojení výfuku k průtokoměru PEMSu [autor] .....	38
Obrázek 22: Vyhodnocení odchylek analyzátorů během testu – PEMS SEMTECH SENSORS [autor] .....	39
Obrázek 23: Diagram postupu vyhodnocování při zkoušce typu I. [18] .....	41
Obrázek 24: Motocykl BMW F 800 GT s PEMSem pro automobily AVL M.O.V.E. [13] .....	47
Obrázek 25 a Obrázek 26: Mini-PEMS pro motocykly [autor] .....	48
Obrázek 27: JAWA 350 OHC SPECIAL [34] .....	50
Obrázek 28 a Obrázek 29: Instalace záznamového zařízení na zkoušený motocykl [autor] .....	52
Obrázek 30: Trasa RDE 1 [22] .....	53
Obrázek 31: Graf – průběh rychlosti a zařazeného rychlostního stupně na trase RDE 1 [autor] .....	54
Obrázek 32: Trasa RDE 2 [22] .....	54
Obrázek 33: Graf – průběh rychlosti a zařazeného rychlostního stupně na trase RDE 2 [autor] .....	55
Obrázek 34: Trasa RDE 3 [22] .....	55
Obrázek 35: Graf – průběh rychlosti a zařazeného rychlostního stupně na trase RDE 3 [autor] .....	56
Obrázek 36 a Obrázek 37: Motocykl JAWA se záznamovým zařízením pro dojezdovou zkoušku [autor] .....	57
Obrázek 38 a Obrázek 39: Záznamový program pro dojezdovou zkoušku v prostředí LabVIEW [autor] .....	57
Obrázek 40: Vyhodnocení dojezdové zkoušky v programu [autor] .....	58
Obrázek 41: Měření dojezdové zkoušky [autor] .....	58

Obrázek 42: Graf – výsledná křivka dojezdové zkoušky [autor].....	60
Obrázek 43: Graf – křivka dojezdové zkoušky č. 1 z dynamometru [autor].....	61
Obrázek 44: Graf – křivka dojezdové zkoušky č. 2 z dynamometru [autor].....	61
Obrázek 45: Graf – průběh rychlosti a nadmořské výšky trasy RDE 1 [autor] .....	62
Obrázek 46: Graf – motocykl JAWA během testu na válcové zkušební [autor] .....	63
Obrázek 47: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů EU3 [autor].....	65
Obrázek 48: Graf – průběh hmotnostních složek HC a NO <sub>x</sub> během testu EU3 [autor].....	65
Obrázek 49: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů EU4 [autor].....	66
Obrázek 50: Graf – průběh koncentrací CO ve fázi 2 během testů WMTC 2 a WMTC 3 [autor] .....	67
Obrázek 51: Korelační měření na válcové zkušební [autor].....	68
Obrázek 52: Graf – průběh koncentrací CO obou zařízení PEMS během korelačního měření [autor] .....	69
Obrázek 53: Graf – průběh rychlosti a teploty výfukových plynů během testu WMTC 3 [autor] .....	70
Obrázek 54 a Obrázek 55: Grafy – opakovatelnost testů trasy RDE 1 [autor] .....	71
Obrázek 56: Graf – opakovatelnost jednotlivých měření trasy RDE 1 [autor] .....	71
Obrázek 57: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů RDE 1 [autor].....	72
Obrázek 58: Graf – opakovatelnost testu 1 trasy RDE 2 [autor] .....	73
Obrázek 59: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů RDE 2 [autor].....	73
Obrázek 60: Graf – průběh rychlosti, otáček a teploty výfukových plynů v úseku testu RDE 2.3 [autor].....	74
Obrázek 61: Graf – průběh koncentrace CO v úseku testu RDE 2.3 [autor] .....	75
Obrázek 62: Graf – průběh rychlosti a teploty výfukových plynů během první fáze testu WMTC 3 [autor] .....	76
Obrázek 63 a Obrázek 64: Grafy – opakovatelnost testů trasy RDE 3 [autor] .....	76
Obrázek 65: Graf – hmotnostní emise výfukových plynů testů RDE 3 [autor].....	77
Obrázek 66: Graf – průtok výfukových plynů v testu WMTC 3 [autor] .....	78
Obrázek 67: Graf – průtok výfukových plynů v úseku testu RDE 2.3 [autor] .....	78
Obrázek 68: MiniPEMS na motocyklu [autor].....	79
Obrázek 69: Graf – průběh koncentrací CO <sub>2</sub> , MiniPEMS vs. CVS [autor] .....	81
Obrázek 70: Graf – průběh koncentrací CO, RDE online vs. emisní laboratoř [autor] .....	81
Obrázek 71: Graf – průběh koncentrací CO, studený a teplý start [autor] .....	82
Obrázek 72: Ukázka možného řešení JAWA + PEMS [autor].....	86

## 7.4 Seznam tabulek

Tabulka 1: Maximální možné odchylky analyzátoru od původních hodnot během testu [17] .....	39
Tabulka 2: Emisní limity dle norem EURO 4 a EURO 5 [15] .....	46
Tabulka 3: Technické parametry motocyklu JAWA 350 OHC SPECIAL [21] [34] .....	51
Tabulka 4: Parametry jízd RDE [autor] .....	53
Tabulka 5: Data 4 použitých dojezdových tetů [autor] .....	59
Tabulka 6: Silniční koeficienty z dojezdové zkoušky [autor] .....	60
Tabulka 7: Silniční koeficienty z dojezdové zkoušky válcového dynamometru [autor] .....	61
Tabulka 8: Tabulka testů měřených na válcové zkušebně [autor] .....	64
Tabulka 9: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky EURO 3 [autor] .....	64
Tabulka 10: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky EURO 4 [autor] .....	66
Tabulka 11: Výsledky hmotnostních emisí CO během jednotlivých fází zkoušky EURO 4 [autor] .....	67
Tabulka 12: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky RDE 1 [autor] .....	72
Tabulka 13: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky RDE 2 [autor] .....	73
Tabulka 14: Výsledky hmotnostních emisí z koncentrací ze zařízení PEMS a výpočtem průtoku [autor] .....	74
Tabulka 15: Výsledky hmotnostních emisí zkoušky RDE 3 [autor] .....	77
Tabulka 16: Výsledky hmotnostních emisí jízdy v reálném provozu s odhadem průtoku výfukových plynů [autor] .....	80
Tabulka 17: Kompletní výsledky hmotnostních emisí [autor] .....	83
Tabulka 18: Procento korektně zopakovaných oken během testu [autor] .....	84
Tabulka 19: Opakovatelnost měření [autor] .....	85

## 7.5 Použitá literatura

- [1] VOJTISEK-Lom, M., Zardini, A. A., Pechout, M., Dittrich, L., Forni, F., Montigny, F., Carriero, M., Giechaskiel, B., and Martini, G.: A miniature Portable Emissions Measurement System (PEMS) for real-driving monitoring of motorcycles, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, [cit. 2020-06-09] <https://doi.org/10.5194/amt-2019-387>, in review, 2020.
- [2] TAKÁTS, M. *Měření emisí spalovacích motorů*. Praha: ČVUT, 1997. [cit. 2020-05-12]
- [3] BŘEZINA, Jan. Aktivita trojcestného katalyzátoru v ustáleném stavu a při oscilacích ve složení vstupního plynu. Praha, 2015. [cit. 2020-06-19] Diplomová práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Kočí, Ph.D.
- [4] Energy and air pollution: spotřeba energie a znečištění ovzduší [online]. 2016, 266 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>
- [5] FIRST, Jiří. Zkoušení automobilů a motocyklů: Příručka pro konstruktéry. Praha: S&T CZ, 2008. ISBN 978-80-254-1805-5. [cit. 2020-05-12]
- [6] Oxidy dusíku [online], 5 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy\\_dusiku.pdf](https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf)
- [7] Oxid uhličitý [online], 5 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/repository/latky/oxid\\_uhlicity.pdf](https://www.irz.cz/repository/latky/oxid_uhlicity.pdf)
- [8] Oxid uhelnatý [online], 4 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/repository/latky/oxid\\_uhelnaty.pdf](https://www.irz.cz/repository/latky/oxid_uhelnaty.pdf)
- [9] FIRST, Jiří. Energetická analýza pozemní dopravy: Systémy přeměny energií. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05664-6. [cit. 2020-06-27]
- [10] Plát, F. Dynamic behavior of NOx storage catalysts and combined exhaust gas after treatment systems. [cit. 2020-06-09] PhD Thesis, VŠCHT Praha, 2011.
- [11] ATAL. Návod na obsluhu analyzátoru AT 505. 30. listopadu 2009. [cit. 2020-06-09]
- [12] ADACHI, Masayuki a Hiroshi NAKAMURA. *Engine Emissions Measurement Handbook: HORIBA Automotive Test Systems*. [cit. 2020-05-12] Warrendale, Pennsylvania, USA, 2014.

- [13] HIESMAYR, Johannes, Martin DIPPOLD, Werner STADLHOFER, Christian ZINNER a Stefan HAUSBERGER. *Modellentwicklung zur Generierung von Emissionsfaktoren für motorisierte Zweiräder* [online]. Bergisch Gladbach, Rakousko, 2015 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: [https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1892/file/Emissionsfaktoren\\_fAr\\_motorisierte\\_ZweirAder\\_FE\\_84.05212015.pdf](https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1892/file/Emissionsfaktoren_fAr_motorisierte_ZweirAder_FE_84.05212015.pdf)
- [14] *Inst tools: NDIR Analyzer Filter Cells* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: NDIR Analyzer Filter Cells
- [15] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EU. In: *168/2013 EU* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1595719575508&uri=CELEX:32013R0168>
- [16] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EU. In: *1151/2017 EU* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1595719736562&uri=CELEX:32017R1151>
- [17] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EU. In: *1832/2018 EU* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1595719797012&uri=CELEX:32018R1832>
- [18] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EU. In: *134/2014 EU* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1595719575508&uri=CELEX:32014R0134>
- [19] *Worldwide harmonized Motorcycle emissions Certification/Test procedure (WMTC) informal group: Informal group on the development of a Worldwide Harmonized Motorcycle Emissions Certification/Test Procedure (WMTC)* [online]. 2011 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grpe/wmtc.html>
- [20] Real Driving Emissions (RDE). [www.avl.com](http://www.avl.com) [online]. b.r. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.avl.com/real-driving-emissions-rde>
- [21] *SHINERAY XY400–A Maintenance Manual* [online]. [cit. 2020-04-28]. DOI: Shineray Co., Ltd. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/brand/shineray/>
- [22] *MAPY CZ: Mapy Česká republika* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.5148000&y=50.0766000&z=11>
- [23] *Gas analyzer spectroscopy - Working Principle and Types* [online]. 2017 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://automationforum.in/t/gas-analyzer-spectroscopy-working-principle-and-types/2900>

- [24] *Strašák jménem Euro 5* [online]. 11.9.2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/moto-novinky/strasak-jmenem-euro-5-42346.html>
- [25] *Aktuálně.cz: Po Česku jezdí přes milion motocyklů, aut už je 4,86 milionu* [online]. Česká republika, 2019 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/po-cesku-jezdi-pres-milion-motocyklu-aut-je-4-86-milionu/r~0b569216277a11e4b8560025900fea04/>
- [26] *ČTK České noviny: Počet motorek v Česku v pololetí stoupl na 1,169 milionu* [online]. Česká republika, 2019 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/pocet-motorek-v-cesku-v-pololetí-stoupl-na-1-169-milionu/1797854>
- [27] *Lambda sonda* [online]. In: . 3.6.2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lambda\\_sonda](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lambda_sonda)
- [28] ADACHI, M., T. HIRANO, K. ISHIDA a C. CEPEDA. *Measurement of Exhaust Flow Rate: Helium Trace Method with a Mass Spectrometer* [online]. 24.2.1997 [cit. 2020-05-03]. DOI: <https://doi.org/10.4271/971020>. Dostupné z: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/971020/>
- [29] *Plamenoionizační detektor - Flame ionization detector*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: [https://cs.qwe.wiki/wiki/Flame\\_ionization\\_detector](https://cs.qwe.wiki/wiki/Flame_ionization_detector)
- [30] *Aromatické uhlovodíky* [online], 4 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/repository/latky/polycyklicke\\_aromaticke\\_uhlovodiky.pdf](https://www.irz.cz/repository/latky/polycyklicke_aromaticke_uhlovodiky.pdf)
- [31] *Polétavý prach* [online], 3 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/repository/latky/poletavy\\_prach.pdf](https://www.irz.cz/repository/latky/poletavy_prach.pdf)
- [32] BÁRTOVÁ, Š. *Selectivity of NOx Reduction In Diesel Exhaust Gas Catalysts Based on Platinum Group Metals.*, PhD. Thesis, Institute of Chemical Technology, Prague (2014). [cit. 2020-06-19]
- [33] LIU, Y., Zheng, Y., Harold, M. P. *Lean NOx reduction on LNT-SCR dual-layer catalysts by H2 and CO.* [cit. 2020-06-19] *Applied Catalysis B: Environmental* 2013, 132-133, 293–303
- [34] *JAWA: JAWA 350 OHC SPECIAL* [online]. [cit. 2020-07-11]. Dostupné z: <https://www.jawa.eu/jawa-350-ohc>