TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Měření koncentrací emisí výfukových plynů v reálném čase

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce: **Bc. Petr Cejpa**
Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Páv, Ph.D.

Liberec 2018

Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: **2017/2018**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Petr Cejpa**
Osobní číslo:	**S17000265**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu:	**Měření koncentrací emisí výfukových plynů v reálném čase**
Zadávající katedra:	**Katedra vozidel a motorů**

Zásady pro vypracování:

1. Popište obecnou problematiku při měření koncentrací emisí výfukových plynů na válcové zkušebně.
2. Na válcové zkušebně celého vozu se odebírá vzorek výfukových plynů pro jeho analýzu z výfukového potrubí o určité délce, samotné vedení vzorku plynu má také určitou délku, takže se vzorek k vlastnímu detektoru dostává se zpožděním závislým na průtoku výfukových plynů i samotného vzorku. Navrhněte výpočtovou korekci změřených dat tak, aby se synchronizovala data měřená analyzátorem výfukových plynů s ostatními veličinami měřenými v reálném čase.
3. Navržený korekční výpočet implementujte do tabulkového procesoru Excel.
4. Proveďte experimentální ověření navržené korekce při vhodně zvolených transientních stavech motoru.
5. Během řešení diplomové práce spolupracujte se společností Škoda Auto a.s..

Rozsah grafických prací: **podle pokynů konzultanta**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran. + CD**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] HEYWOOD, J.B.: Internal Combustion Engines Fundamentals, McGraw-Hill 1988.
[2] BEROUN, S., PÁV, K.: Vybrané statě z vozidlových spalovacích motorů, TU Liberec 2013.
[3] Norma EHK 83.
[4] Zprávy z měření, Škoda Auto, a.s..
[5] Dokumentace k měřícím přístrojům.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Karel Páv, Ph.D.**
ŠKODA-AUTO a.s.

Datum zadání diplomové práce: **20. listopadu 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. února 2019**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 20. listopadu 2017

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum: 15.5.2018

Podpis:

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou měření koncentrací emisí výfukových plynů a vyhodnocováním dat z těchto měření. V průběhu emisních testů dochází ke změnám režimů provozu pohonné jednotky a společně s touto změnou se mění i doba, za kterou jsou hodnoty emisí zaznamenány emisními analyzátory. Díky změně této prodlevy je obtížné identifikovat provozní režimy odpovídající naměřeným emisím. Řešením zmíněného problému se zabývá tato diplomová práce.

Klíčová slova: výfukové emise, výfukové plyny, analýza naměřených emisí, zpoždění, analyzátory emisí, emisní legislativa.

Abstract

The aim of this thesis is an exhaust emission measurement and analysis of measured data. During the emission tests, the modes of engine operation are changed. Due to this change are also changed times, which are necessary for record of emission values. Therefore the right correlation between data measured from engine and gas analyzers is a challenging task. The solution of a mentioned problem is the main target of this thesis.

Keywords: exhaust emissions, exhaust gases, analysis of measured emissions, time lag, emission analyzers, emission legislation.

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi při vypracovávání této diplomové práce poskytovali nezbytnou podporu. Především bych rád poděkoval mým rodičům, kteří mě podporovali během celého studia. Dále také mé přítelkyni, za její trpělivost a toleranci.

Můj dík také patří docentu Pávovi za poskytnutí možnosti spolupráce se společností Škoda Auto a.s. a jeho odborné vedení, sdílení znalostí a velkou ochotu. V neposlední řadě také děkuji inženýru Michalu Lendělovi, se kterým bylo možné provést všechna praktická měření.

Obsah

Úvod 9

1. Škodlivé složky výfukových plynů 10

1.1. Hlavní složky nežádoucích výfukových plynů 11

Oxid uhelnatý (CO) 11

Nespálené uhlovodíky (HC) 11

Oxidy dusíku (NO_x) 11

Pevné částice (PM) 12

Oxidy síry 12

2. Spalovací motory a spektrum emisí 13

2.1. Zážehové motory 14

2.2. Vznětové motory 14

3. Emisní standardy 15

3.1. Evropská emisní legislativa 16

3.1.1. Emisní testy v reálném provozu (RDE) 17

3.1.2. Emisní testy v laboratorních podmínkách (NEDC, WLTP) 26

3.1.3. Průběh WLTC a NEDC testu 30

4. Analyzátory emisí 32

Infračervený analyzátor CO (NDIR) 32

Plamenoionizační analyzátor THC (FID) 33

Chemiluminiscenční analyzátor NO a NO_X (CLA) 34

Paramagnetický analyzátor O_2 (PMA) 35

Počítač pevných částic PM 36

5. Řešení časového posunu mezi signály 37

5.1. Rozdělení zpoždění signálů 38

5.2. Analytické stanovení funkce t_A 39

5.3. Tvorba realizovatelného řešení funkce Δt 42

5.3.1. Vytvoření emisního impulzu 43
5.3.2. Vytvoření emisního impulzu změnou λ 45
5.3.3. Automatizovaná detekce impulzů v záznamu CO 50
5.3.4. Program pro určení funkce zpoždění tA 51
5.4. Použití funkce zpoždění t_A 57
5.5. Hodnota zpoždění t_B 59
5.6. Experimentální určení hodnot zpoždění t_B 60
5.6.1. Hodnoty zpoždění t_B na válcové zkušebně 62
Hodnota t_B pro CO_2 63
Hodnota t_B pro HC 64
Hodnota t_B pro NO_x 65
Hodnota t_B pro CH_4 66
6. Aplikace metody korekce časového zpoždění 67
6.1. Korekce záznamu emisí CO na motorové brzdě 68
6.2. Korekce záznamu emisí na válcové zkušebně 76
6.2.1. Aproximace hmotnostního průtoku palivové směsi 79
6.2.2. Korekce záznamu pro vůz Škoda Oktavia III 1.6 MPI 80
6.2.3. Příklad aplikace korekce záznamu zkoušky WLTP 84
7. Závěr 86
8. Seznam symbolů zkratek 87
9. Použité zdroje 94
10. Seznam použitého software 96
11. Seznam příloh 97
Příloha A: 99
Příloha B: 100
Příloha C: 104

Úvod

Osobní automobily se spalovacími motory se za posledních sto let staly neodmyslitelnou součástí lidské společnosti a v mnoha ohledech přesahují rozměr dopravních prostředků. Staly se symbolem sociálního postavení, vymezily celé sportovní odvětví a pronikly do světa kultury a zábavy. Není jiného masově vyráběného produktu, který by ovlivnil lidskou společnost v tolika směrech najednou.

S globálně rostoucí životní úrovní stoupá i počet automobilů. S ohledem na množství neobnovitelných zdrojů, které jsou spotřebovávány na výrobu vozů, není tento trend dlouhodobě udržitelný. Navíc vozidlo samotné je spotřebičem převážně neobnovitelných druhů energie. I přes všechny ekologické dopady je však nepopiratelně nezbytným nástrojem pro fungování lidské civilizace. Zdánlivé řešení v podobě elektromobilů a jejich veřejná obliba je spíše důsledkem módních trendů a propagace. Při zohlednění všech okolností spojených s výrobou, provozem a životností jsou elektromobily zatím zajímavým technickým řešením, ale nikoliv rovnocennou a zdůvodnitelnou alternativou.

Všechny nežádoucí dopady na životní prostředí způsobené automobily jsou ovšem v první řadě následkem jejich neefektivního využívání a s tím souvisejícím počtem vozidel, nikoliv nedostatečnými provozními vlastnostmi. Díky enormnímu množství zdrojů a úsilí byl během posledních čtyřiceti let obsah škodlivin ve výfukových plynech redukován na procenta původních hodnot, ovšem efektivita využívání osobních dopravních prostředků je několikanásobně horší.

Pro snižování množství emitovaných škodlivin do okolního prostředí automobily byla zavedena řada mezinárodních právních předpisů. Díky těmto impulzům pro zlepšení konstrukce a řízení pohonných jednotek, kontinuálně rostou nároky na snižování obsahu škodlivin ve výfukových plynech a tím i nároky na měření a vyhodnocování složení těchto plynů.

1. **Škodlivé složky výfukových plynů**

Se zvyšujícím se počtem automobilů roste i potřeba redukovat množství nežádoucích složek výfukových plynů. Tyto emise produkované spalováním fosilních paliv jsou zdroji jedovatých sloučenin a ekologickou zátěží. V rozvinutých zemích a zejména ve městech, tvoří automobilové emise podstatnou část vyprodukovaných škodlivin člověkem.

V současné době je naprostá většina automobilů vybavena pohonnými jednotkami s vnitřním spalováním, které můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin: zážehové (Motory Ottova typu) a vznětové (Motory Dieselova typu). Oba typy motorů spalují směs uhlovodíků. Ideální spalování paliva může být zjednodušeně popsáno následující rovnicí 1. [14]

$$HC\ (palivo) + \ O_2\ (vzduch) \rightarrow \ CO_2 + \ H_2O + práce + teplo \qquad (1)$$

Hlavními produkty této reakce jsou voda ve formě páry a oxid uhličitý, který je skleníkovým plynem. Jelikož je oxid uhličitý hlavním produktem této reakce, je snížení emise tohoto plynu možné pouze společně se snížením spotřeby paliva. Ovšem, v reálných podmínkách, uvnitř spalovacího prostoru vzniká mnoho vedlejších produktů spalování. Velká část z nich je škodlivá, a proto je jejich maximální množství regulováno legislativou.

1.1. Hlavní složky nežádoucích výfukových plynů

Oxid uhelnatý (CO)

CO je bezbarvou látkou bez chuti a zápachu, která je lehčí než vzduch. Ve větších dávkách je pro lidi i zvířata jedovatý. Jeho jedovatost je dána větší afinitou vůči krevnímu hemoglobinu, než jakou má kyslík. Díky tomu se naváže na hemoglobin místo kyslíku, který je nezbytný pro fungování organismu. Symptomy otravy oxidem uhelnatým variují v rozmezí nevolností a bolestí hlavy až kómatem a smrtí. Oxid uhelnatý je vytvářen při nedostatečné oxidací uhlovodíkových složek. Tento děj nastává při nedostatku oxidantů se současně nízkými teplotami spalování. Zvýšené množství CO vzniká zejména při spalování bohatých směsí paliva a vzduchu.

Nespálené uhlovodíky (HC)

Ve výfukových plynech je mezi ostatními složkami také zastoupeno nespálené palivo a mazací olej, který pronikl do spalovacího prostoru. Plynná fáze nespálených uhlovodíků je komplexní směsí, která je určena podmínkami ve spalovacím prostoru. Některé z těchto plynů mají nepříjemný zápach a mnoho z nich je jedovatých. Velká část těchto plynů také zvyšuje riziko vzniku rakoviny. Zvýšené množství HC vzniká zejména při spalování bohatých palivových směsí v místech, kde se nešíří plamen a předčasně končí oxidační reakce.

Oxidy dusíku (NO_x)

Hlavními složkami jsou NO, NO_2. Příznaky otravy člověka způsobené NO jsou pálení očí, podráždění sliznic a mohou vést až ke ztrátě vědomí. NO ve vzduchu spontánně oxiduje na NO_2, což je červenohnědý jedovatý plyn s nepříjemným zápachem. Hlavními symptomy otravy NO_2 jsou dýchací obtíže a podráždění sliznic. NO_2 také přispívá k výskytu kyselých dešťů a znehodnocování půdy. Zvýšená produkce NO_x je spojena s vysokými teplotami ve spalovacím prostoru. U zážehových motorů tvoří většinu složek NO_x sloučenina NO. U vznětových se běžně vyskytují složky NO i NO_2.

Pevné částice (PM)

Za pevné částice jsou považovány pevné struktury uhlíku, oxidů síry, sírany kovů, zbytky paliva, oleje, které jsou nositely dalších nežádoucích produktů spalování. Reagování těchto částic s lidským tělem je ovlivněno zejména jejich velikostí. Pevné částice větší než 10 μm ulpívají z velké části pouze v nose a krku, na rozdíl od částic menších než 2,5 μm. Tyto částice se dostávají až do plicních sklípků, kde jsou vstřebávány do organismu.

K vyšší produkci pevných částic přispívají nižší teploty spalování a větší obsah těžkých uhlovodíků v palivu. PM vznikají zejména v lokálních oblastech, kde složení palivové směsi je $\lambda < 0,6$. Z těchto důvodů je produkce pevných částic obecně větší ve vznětových motorech a u zážehových motorů s přímým vstřikováním. Obecně lze produkci PM snížit lepší atomizací paliva. Při seřizování vznětových motorů se vždy hledá kompromis mezi produkcí NO_x a PM, protože tyto produkty vznikají při přesně opačných nastaveních.

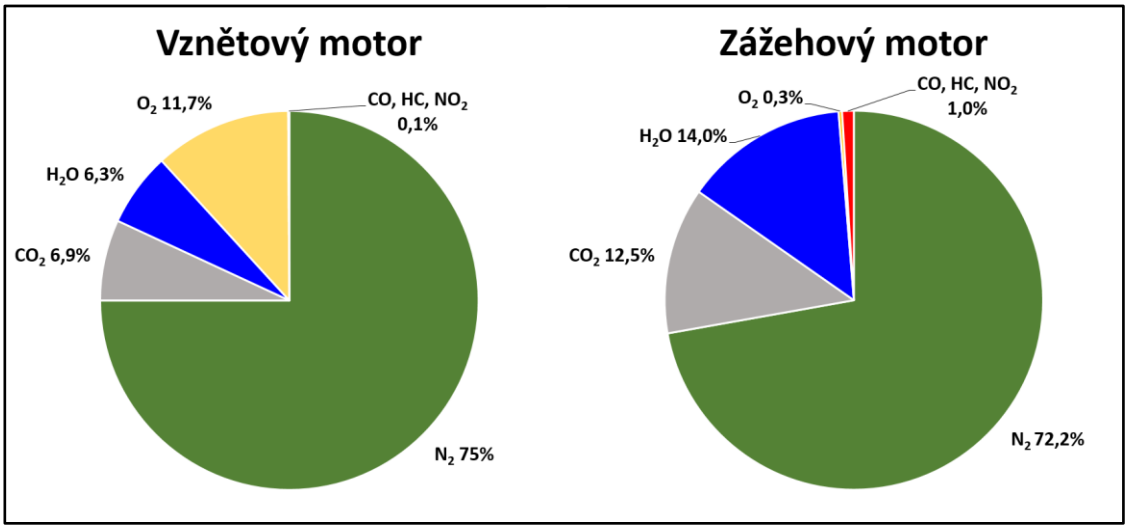
Oxidy síry

Tyto sloučeniny jsou produkovány ze sirných složek paliva a maziva. Hlavním zástupcem této skupiny sloučenin je SO_2, což je jedna z plynných fází dráždící sliznice. Tento plyn přispívá k tvorbě kyselých dešťů a negativně ovlivňuje katalytické reakce ve výfukovém potrubí, čímž přispívá k emisi dalších škodlivin. Proto je obsah síry v motorových palivech regulován legislativou na hodnotu 10 mg/kg.

2. Spalovací motory a spektrum emisí

Množství a složení výfukových plynů vyprodukovaných motory s vnitřním spalováním je ovlivněno zejména typem motoru – vznětový / zážehový. To je způsobeno rozdílnými podmínkami při spalování a rozdílnými typy použitých paliv (nafta obsahuje těžší uhlovodíky, než benzín). Na složení a množství emisí má samozřejmě také vliv mnoho dalších aspektů, například: zdvihový objem motoru, nastavení řídící jednotky, přeplňování, recirkulace výfukových plynů, hmotnost vozu, aerodynamický odpor vozu, pneumatiky atd.

Poměrné složení surových emisí výfukových plynů z motorů s vnitřním spalováním je zobrazeno na následujícím obrázku, obrázek 1.



Obrázek 1: Typické složení surových emisí spalovacích motorů. (objemové zastoupení) [17]

2.1. Zážehové motory

Klasické zážehové motory jsou ve většině režimů provozovány při stechiometrickém poměru vzduchu a paliva 14,65 (vzduch kg / palivo kg), tato směs je zapalována pomocí elektrického výboje na zapalovací svíčce. Složení palivové směsi je kontrolováno pomocí jednoho, nebo více λ senzorů, které měří parciální tlak O_2 ve výfukových plynech. Tento druh spalování vede při porovnání se vznětovým motorem k vyšší spotřebě paliva a vyšším surovým emisím CO, HC, NO_x (surové emise jsou výfukové plyny před katalytickými procesy ve výfukovém potrubí) a vysokým teplotám ve spalovacím prostoru, oproti vznětovým motorům. Ovšem díky vysokým teplotám ve spalovacím prostoru v zážehových motorech dochází ke značně nižším emisím pevných částic a stechiometrická palivová směs usnadňuje následné katalytické procesy v trojcestném katalyzátoru. Zážehové motory dosahují účinnosti okolo 35 %, z pohledu využití chemické energie uložené v palivu pro pohyb vozidla.

2.2. Vznětové motory

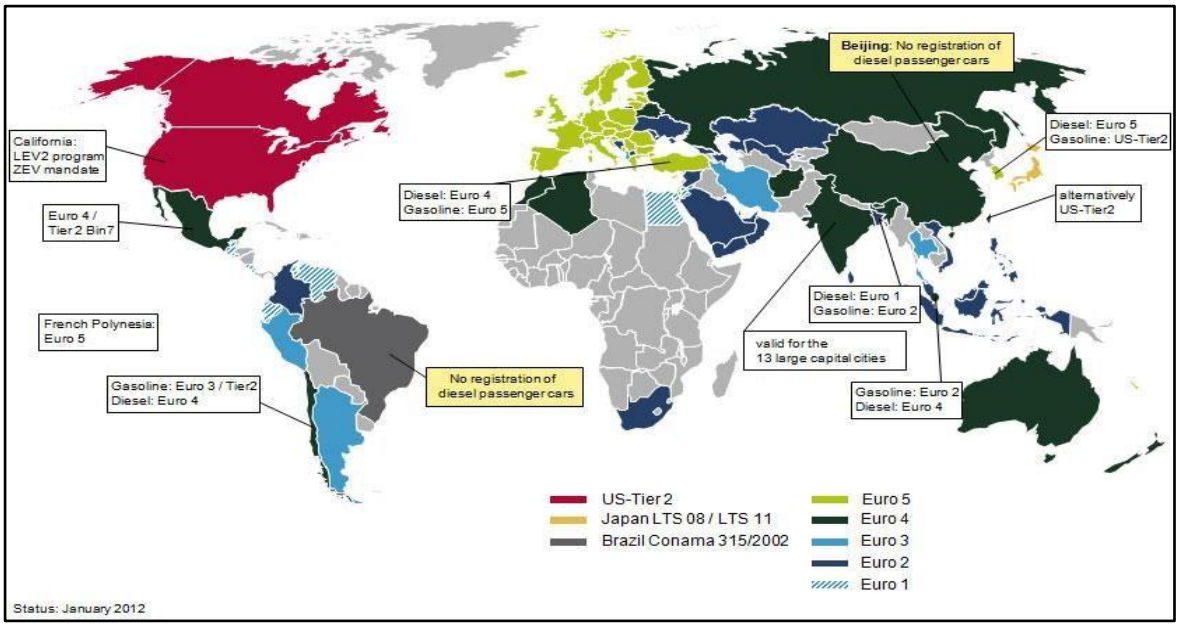
Vznětové motory nabyly velké popularity v osobních automobilech díky nižší spotřebě paliva vůči motorům zážehovým. Tato výhoda je dána provozem při chudých palivových směsích a vyšších kompresních poměrech. Spalování chudých směsí vede také k nižším provozním teplotám a většímu toku výfukových plynů než u motorů zážehových. Přebytek vzduchu (tím i kyslíku) v palivové směsi zapříčiňuje značně nižší emise CO a HC. Díky spalování nafty difúzním plamenem a tím nižším teplotám ve spalovacím prostoru je také snížena produkce NO_x. Ovšem toto snížení teploty vede na druhé straně také ke zvýšené produkci pevných částic. Přebytek vzduchu v palivové směsi také brání přímé redukci NO_x, což vede ke složitějším katalytickým systémům. [11]

Dodatečné snížení produkce NO_x je možné aplikací recirkulace výfukových plynů (EGR). Tato technologie je založena na přivádění části výfukových plynů zpět do spalovacího prostoru a tím snižování koncentrace O_2 v palivové směsi. Tento kyslík se jinak podílí na oxidaci N_2 za vzniku NO a NO_2.

3. **Emisní standardy**

Snaha o ochranu životního prostředí vedla k zformování emisních norem ve všech rozvinutých zemích. Průkopníky v této oblasti byly Spojené státy americké, konkrétně stát Kalifornie.

Všechny emisní zkoušky jsou postaveny na kontrole množství vyprodukovaných spalin při stanovených podmínkách provozu vozidla. Ovšem způsoby a návyky používání vozů se liší dle konkrétních podmínek pro danou lokalitu. Proto vzniklo několik emisních standardů v závislosti na geopolitickém umístění dané oblasti, i když současnou vizí je postupné sjednocování těchto předpisů. Hlavními emisními standardy jsou: Evropský (EURO), severoamerický (TIER) a Japonský. Místa platnosti zmíněných norem jsou na následujícím obrázku, obrázek 2.



Obrázek 2: Oblasti platností emisních norem v roce 2012 [4]

3.1. Evropská emisní legislativa

Evropské emisní limity jsou známé pod označením Euro 1, až Euro 6, které jsou aktuálně v platnosti. Tyto normy a nařízení omezují množství jednotlivých složek spalin, které jsou vyprodukovány během předepsaného testu, vztažené na kilometr ujeté vzdálenosti, tabulka 1. Uvedené limity v tabulce 1 platí pro osobní automobily do 3,5 tuny s maximálně devíti místy na sezení (včetně řidiče), tedy kategorie M1. [8]

Tabulka 1: Emisní limity dle normy Euro 6, pro kategorii M1.

Typ motoru	CO [mg/km]	THC [mg/km]	NMHC [mg/km]	NO_X [mg/km]	HC +NO_X [mg/km]	PM [mg/km]	PN [1/km]
Zážehový	1000	100	68	60	-	5	$6 \cdot 10^{11}$
Vznětový	500	-	-	80	170	5	$6 \cdot 10^{11}$

Tabulka 2: Popis emisních zkratek.

CO [mg/km]	Hmotnost oxidu uhelnatého na kilometr	**HC +NO_X [mg/km]**	Hmotnost uhlovodíků a oxidů dusíku na kilometr
THC [mg/km]	Hmotnost všech uhlovodíků na kilometr	**PM [mg/km]**	Hmotnost pevných částic na kilometr
NMHC [mg/km]	Hmotnost uhlovodíků bez metanu na kilometr	**PN [1/km]**	Počet pevných částic na kilometr
NO_X [mg/km]	Hmotnost oxidů dusíku na kilometr		

Následující informace tvoří jen základní přehled a nepostihují celý více než šestisetstránkový dokument *Nařízení komise (EU) 2017/1151 ze dne 1. června 2017*, který emisní zkoušky detailně specifikuje.

3.1.1. Emisní testy v reálném provozu (RDE)

Real driving emissions je nová emisní zkouška a společně s WLTC je nezbytnou homologační podmínkou. Pro validitu emisní zkoušky je nutné dodržet *Nařízení komise (EU) 2017/1151 ze dne 1. června 2017*, které zkoušku detailně specifikuje a doplňuje *Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007*.

Tato zkouška je prováděna na veřejných komunikacích v reálném provozu. Prováděný test musí obsahovat jízdu při třech rozdílných podmínkách: městská zástavba, venkov, dálnice. Zároveň je určená trasa jízdy navržena schvalovacím orgánem na základě topografické mapy a musí splňovat následující podmínky, tabulka 3. [18].

Tabulka 3: Mezní podmínky okolního prostředí.

Podmínky okolí	Mírné	Rozšířené
Emisní korekční součinitel	1	1/1,6
Okolní teplota	0≤T≤30 [°C]	-7 ≤T≤ 0 [°C]; 30 ≤T≤ 35 [°C]
Nadmořská výška	≤ 700 [m]	700 ≤ n.v. ≤ 1300 [m]

Pokud jedna z měřených hodnot, která určuje podmínky testu, odpovídá rozšířeným okolním podmínkám, lze pro vyhodnocení použít rozšířený emisní korekční součinitel. Ten změní limitní hodnoty naměřených emisí ve prospěch testovaného vozidla. Konkrétně je možné výslednou hodnotu hmotnosti emisí na kilometr (hmotnost NO_x a PM) vydělit konstantou 1,6. Tento postup ovšem neplatí pro hmotnost CO_2, dle *Nařízení komise (EU) 2017/1151- příloha IIIA / strana L175/118 bod 9.5*, jehož limitní hodnota se vydělit nesmí. Samotný test musí splňovat následující podmínky.

Studený start

Testovaný vůz musí být před zkouškou provozován po dobu alespoň 30 minut a poté kondiciován při okolních podmínkách 6 až 56 hodin. Poté následuje takzvaný studený start, který je definován jako prvních 5 minut po nastartování, nebo doba po nastartování, při které je teplota chladící kapaliny nižší než 70 °C. Během této doby nesmí rychlost vozu překročit limit 60 km/h a vůz nesmí stát v součtu déle jak 90 s. Ihned po nastartování vozidlo také nesmí zůstat zastaveno déle jak 15 s.

Jízdní dynamika

Celkový nadbytek nebo nedostatek jízdní dynamiky při jízdě se ověří pomocí následujících kritérií, tabulka 4, dle *Nařízení komise (EU) 2017/1151 – dodatek 7a / strana L175/177*. Další nutné podmínky pro splnění testu jsou v tabulce 5.

Tabulka 4: Požadavky na dynamiku jízdy během RDE testu.
(a = kladné zrychlení [m/s^{-2}], v = rychlost [m/s^{-1}]) [8]

	↓ V ≤ 74.6 [km/h]	**↓ V > 74.6 [km/h]**
95% v·a během měření nesmí překročit průběh funkce	v·a = 0,136·v + 14,44	v·a = 0,0742·v + 18,966
	↓ V ≤ 94.5 [km/h]	**↓ V > 94.05 [km/h]**
Minimální velikost kladného zrychlení a nesmí klesnout pod průběh	a = -0,0016·v + 0,1755	a = 0,025

Tabulka 5: Jízdní požadavky RDE testu. [8]

Rozsah jízdy	**Městská**	**Mimoměstská**	**Dálniční**
	rychlost ≤ 60 [km/h]	60 < rychlost ≤ 90 [km/h]	90 [km/h] < rychlost
Minimální vzdálenost	16 [km]	16 [km]	16 [km]
Podíl vzdálenosti	29 – 44 [%]	23 – 43 [%]	23 – 43 [%]
Celková doba trvání	90 -120 [minut]		
Průměrná rychlost zahrnující stání	15 < průměrná rychlost < 40 [km/h]	-	-
Celkový čas stání (v < 1 [km/h])	6 – 30 [%] Z městského času	-	-
Jednotlivý čas stání	< 300 [s]	-	-
v > 100 [km/h]	-	-	≥ 5 [min]
v > 145 [km/h]	-	-	< 3% dálničního času
Kumulativní nadmořská výška	< 1200 m/100 [km]		
Rozdíl mezi počáteční a koncovou namořskou výškou	≤ 100 [m]		

Vyhodnocování

Emise produkované během RDE testu jsou vyhodnocovány pomocí dvou metod nazývaných *Moving Averaging Windows* a *Power Binning*. Celkové hodnoty naměřené během celého RDE cyklu a městská část samostatně nesmí překročit hodnoty, které jsou odvozeny z normy EURO 6. Tyto limity jsou vypočteny podle následujícího vzorce, rovnice 2.

$$NTE_{pollutant} = CF_{pollutant} \cdot TF \cdot EURO6 \quad (2)$$

Hodnota součinitele TF je prozatím stanovena na hodnotu 1 a hodnoty odpovídající koeficientu $CF_{pollutant}$ jsou uvedeny v tabulce 6. Za proměnnou $EURO6$ jsou dosazovány hodnoty odpovídající dané emisní složce pro vybraný typ motoru z tabulky 1.

Tabulka 6: Korekční součinitel „$CF_{pollutant}$“ pro výpočet emisních limitů dle normy Euro 6 pro RDE. [18]

Fáze	NO_x [g/km]	PN [1/km]	CO [g/km]
Dočasná	2,1	1,5	zatím není stanoven
Konečná	1,5	1,5	zatím není stanoven

Vyhodnocování RDE metodou *Moving Averaging Windows (MAW)*

Metoda klouzavých průměrovacích oken poskytuje přehled o emisích v reálném provozu, které vznikají během zkoušky. Data z měření jsou rozdělena na dílčí úseky („okna“) a následně statisticky zpracována.

Stanovení j-tého průměrovacího okna

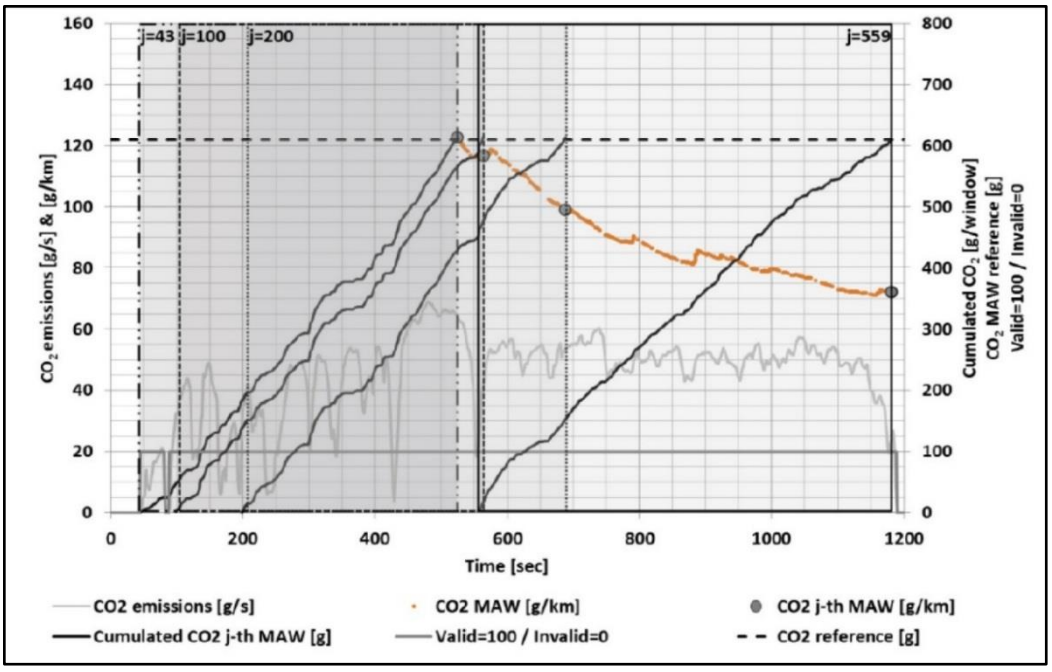
Doba trvání j-tého časového okna je proměnná a je stanovena následujícím vztahem, rovnice 3. Kde $t_{1,j}$ je první sekunda j-tého okna a $t_{2,j}$ je poslední sekunda j-tého okna.

$$t_j = t_{2,j} - t_{1,j} \tag{3}$$

Hodnota $t_{2,j}$ je dána podmínkou, rovnice 4. Kde M_{CO_2} jsou hmotnosti CO_2 získané

$$M_{CO_2}(t_{2,j}) - M_{CO_2}(t_{1,j}) = M_{CO_2,ref} \tag{4}$$

integrací průběhu CO_2 do času $t_{2,j}$ od času $t_{1,j}$. $M_{CO_2,ref}$ musí být určena jako polovina hmotnosti CO_2 vyprodukovaného během WLTC cyklu (WLTC je popsán v kapitole 3.1.2). V rámci každého okna je vypočítána hmotnost CO_2 na kilometr, a hmotnost PM na kilometr a průměrná rychlost v daném okně. Každá z těchto hodnot je poté zanesena jako bod do CO_2, popřípadě PM křivky vozidla, obrázek 3. [8]



Obrázek 3: Diagram průběhů zpracovaných dat z části zkoušky RDE. (CO_2 v závislosti na čase, klouzavý průměr CO_2 v okně, výsledný klouzavý průměr daného okna, množství vyprodukovaného CO_2 během okna, validita měření, referenční hodnota CO_2). [8]

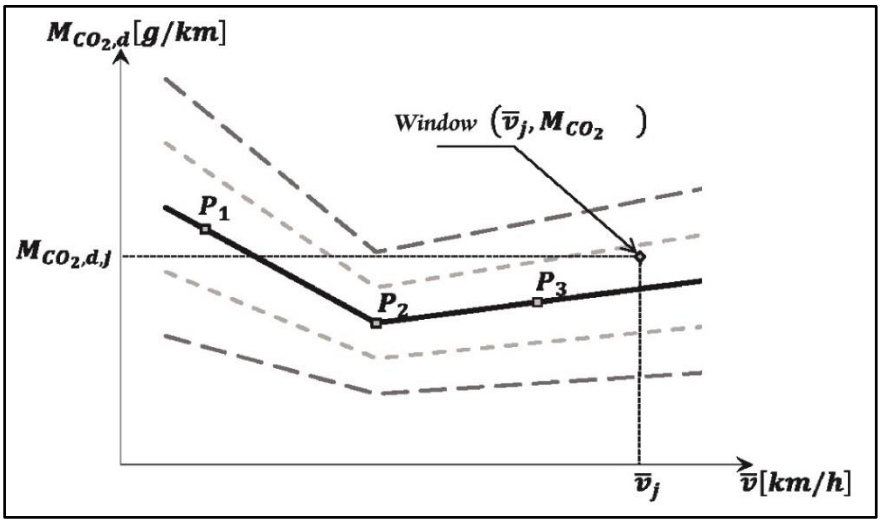
Vyhodnocení oken RDE cyklu

Po statistickém zpracování jednotlivých oken je nutné zjistit, zda počet naměřených dat během zkoušky vyhovuje následujícím požadavkům, tabulka 7, kde koeficienty w_i, w_j, w_k jsou určeny vzdáleností bodu pro dané okno od referenční křivky CO_2. Výpočet hodnot w_i, w_j, w_k pro všechny možné případy polohy bodu

Tabulka 7: Jízdní požadavky RDE testu. [8]

	Městská	**Mimoměstská**	**Dálniční**
Rychlostní práh okna [km/h]	rychlost < 45	45 ≤ rychlost < 80	80 ≤ rychlost < 145
Validita testu			
Počet oken [%]	≥ 15	≥ 15	≥ 15
Procentuální zastoupení oken s výsledkem +- 25% křivky CO_2 [%]	≥ 50	≥ 50	≥ 50
Výpočet kontrolních hodnot emisí			
Emise pro danou fázi (CO_2 , nebo PM) [mg/km]	$M_{měs.} = \frac{\sum m_{emise} \cdot w_i}{\sum w_i}$	$M_{mim.} = \frac{\sum m_{emise} \cdot w_j}{\sum w_j}$	$M_{dál.} = \frac{\sum m_{emise} \cdot w_k}{\sum w_k}$
Celkové RDE emise [mg/km]	$M = 0{,}33 \cdot M_{městská} + 0{,}33 \cdot M_{mimoměstská+} 0{,}33 \cdot M_{dálniční}$		

okna vůči referenční křivce je popsán v nařízení *2017/1151*. Referenční křivka CO_2 je definována pomocí tří bodů (P_1, P_2, P_3), daných souřadnicemi x = rychlost vozu km/h, y = množství CO_2 mg/km, obrázek 4.



Obrázek 4: Referenční křivka CO_2. [8]

Bod P_1 je definován průměrnou rychlostí v části WLTC cyklu s nízkou rychlostí, v_{p1}=19 km/h a množstvím emisí $CO_{2,p1}$ v městské fázi WLTP cyklu vynásobeným konstantou, $CO_{2,p1}$ = $M_{CO_2,p1}$·1,2 g/km. Bod P_2 je definován obdobně, pouze pro fázi cyklu s vysokou rychlostí (mimo město) v_{p2}=56,6 km/h a $CO_{2,p2}$=$M_{CO_2,p2}$·1,1 g/km. Bod P_3 (dálnice) v_{p3}=92,3 km/h a $CO_{2,p3}$ = $M_{CO_2,p3}$·1,05 g/km.

Vyhodnocování RDE metodou *Power Binning*

Základním vstupem pro metodu *Power Binning* jsou klouzavé průměry z třísekundových oken z RDE testu se záznamy hodnot hmotností sledovaných výfukových plynů $m_{gas,s}$ g/s, výkonu P_s kW, rychlosti v_s km/h, které nezahrnují studený start (Délka oken je definována pouze časem 3s.). Průběh výkonu je možné určit pomocí výpočtu na základě okamžitých emisí CO_2 nebo pomocí měření točivého momentu během jízdy na nábojích kol (tak je uvedeno v nařízení EU). Klouzavé průměry se počítají při vzorkovací frekvenci 1 Hz, výsledné rovnice pro klouzavé průměry oken mají tedy tvar, rovnice 5, 6, 7.

$$m_{gas,s} = \frac{\sum_{i=k}^{i=k+3} m_{CO_2,i}}{3} \tag{5}$$

$$P_s = \frac{\sum_{i=k}^{i=k+3} P_i}{3} \tag{6}$$

$$v_s = \frac{\sum_{i=k}^{i=k+3} v_i}{3} \tag{7}$$

Dále se každá trojice klouzavých průměrů přiřadí do následující skupiny, podle rychlosti v_s, tabulka 8.

Tabulka 8: Jízdní požadavky RDE testu. [8]

	Městská	**Mimoměstská**	**Dálniční**
V_s [km/h]	v ≤ 60	60 < v ≤ 90	90 < v

V dalším kroku se vypočítají hodnoty tříd výkonu $P_{c,j}$, dle výkonových frekvencí (Tato pojmenování jsou uvedena v oficiálním překladu nařízení EU 2017/1151) $P_{c,j\ norm}$ a výkonu P_{drive} kW, rovnice 8.

$$P_{c,j} = P_{c,j\ norm} \cdot P_{drive} \tag{8}$$

Normované výkonové frekvence jsou stanoveny tabulkou 9.

Tabulka 9: Výkonové frekvence [8]

Výkonová třída	**$P_{c,j\ norm}$ [-]**		**Ve městě**	**Celá jízda**
	Od>	Do ≤	Časový podíl $t_{c,j}$ [%]	
1		-0,1	21,9700	18,5611
2	-0,1	0,1	28,7900	21,8580
3	0,1	1	44,0000	43,4582
4	1	1,9	4,7400	13,2690
5	1,9	2,8	0,4500	2,3767
6	2,8	3,7	0,0450	0,4232
7	3,7	4,6	0,0040	0,0511
8	4,6	5,5	0,0004	0,0024
9	5,5		0,0003	0,0003

Výkon P_{drive} je dán rovnicí 9,

$$P_{drive} = \frac{v_{ref}}{3{,}6} \cdot \left(f_0 + f_1 \cdot v_{ref} + f_2 \cdot v_{ref}^2 + TM_{NEDC} \cdot a_{ref}\right) \cdot 0{,}001 \tag{9}$$

při referenční rychlosti v_{ref} 19,44 m/s a zrychlení a_{ref} 0,45 m/s^{-2}. Hodnota TM_{NEDC} kg v rovnici 9 je ekvivalentní setrvačná hmotnost vozidla. Koeficienty f_0, f_1, f_2 jsou koeficienty regresní funkce pro sílu pasivních odporů, která je stanovena rovnicí 10,

$$\frac{P_{korigovaný}}{v} = f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2, \tag{10}$$

ta vychází z jízdního modelu vozu pro zkoušku NEDC, WLTC. $P_{korigovaný}$ je stanoven z výkonu $P_{měřený}$, měřeného na zkušební dráze (dráha pro stanovení jízdního modelu, popsáno v kapitole 3.1.2). $P_{měřený}$ je určen pomocí rovnice 11.

$$P_{korigovaný} = P_{měřený} \cdot \left(\frac{R_R}{R_R + R_{AERO}} \cdot [1 + K_R(t_m - t_0)] + \frac{R_{AERO}}{R_R + R_{AERO}} \cdot \frac{(\rho_0)}{\rho} \right) \quad (11)$$

R_R N/(km·h^{-1}) je valivý odpor kol při rychlosti v, R_{AERO} N/(km·h^{-1}) je aerodynamický odpor při rychlosti v, K_R 8,64·10^{-3} 1/°C je teplotní korekční faktor valivého odporu, t_m °C je teplota okolí při zkoušce, t_0 je referenční teplota rovná 20 °C, ρ kg/m^3 je hustota vzduchu při zkušebních podmínkách, ρ_0 kg/m^3 je hustota vzduchu při referenčních podmínkách 20°C, 100kPa.

Po získání hodnot z předchozích rovnic lze již určit $P_{c,j}$, který je dán rovnicí 8. Na základě hodnoty P_{drive} a tabulky 9 jemožné připravit rozložení výkonových frekvencí, které může vypadat následujícím způsobem, tabulka 10.

Tabulka 10: Výkonové frekvence pro vozidlo s hodnotami: f_0=79,19 [N], f_1=0,73 [N/(km·h^{-1})], f_2=0,73 [N/(km·h^{-2})], TM_{NEDC}=1,470 [kg], P_{rated} (uvedený výrobcem) = 75 [kW]. [8]

Výkonová třída	**$P_{c,j}$ [kW]**		**Ve městě**	**Celá jízda**
	Od >	Do ≤	Časový podíl $t_{C,j}$ [%]	
1	> -1,825	-1,825	21,9700	18,5611
2	-1,825	1,825	28,7900	21,8580
3	1,825	18,25	44,0000	43,4582
4	18,25	34,675	4,7400	13,2690
5	34,675	51,1	0,4500	2,3767
6 (1)	51,1	Všechny > 51,1	0,0450	0,4232
7	67,525	83,95	-	-
8	83,95	100,375	-	-
9	100,375		-	-

Tato tabulka může končit třídou nižší, než je třída číslo 9, pokud $P_{rated} \cdot 0{,}9$ je menší, než hodnota výkonu v nejvyšší třídě. V uvedeném příkladu hodnot pro tabulku 10 je tato proměnná rovna 75 · 0,9 = 67,5 kW. Díky této skutečnosti je tabulka rozdělena silnou čarou, která odděluje nepovinné řádky.

Na základě získaných výkonových frekvencí jsou vypočítané klouzavé průměry emisních veličin (podle rovnic 5, 6, 7) roztříděny podle výkonu do výkonových tříd pro městskou část a celý test. Proto, aby byla zkouška platná, musí být počet klouzavých průměrů pro každou výkonovou třídu v následujících mezích, tabulka 11.

Tabulka 11: Výkonové frekvence pro posouzení platnosti testu. [8]

Výkonová třída	**$P_{c,norm,j}$ [-]**		**Ve městě**	**Celá jízda**
	Od >	Do ≤	Procentuální zastoupení	
1 + 2		0,1	15 % až 60 %	5 % až 60 %
3	0,1	1	35 % až 50 %	28 % až 50 %
4	1	1,9	7 % až 25 %	0,7 % až 25 %
5	1,9	2,8	1 % až 10 %	5 výsledků až 5 %
6	2,8	3,7	5 výsledků až 2,5 %	0 % až 2 %
7	3,7	4,6	0 % až 1 %	0 % až 1 %
8	4,6	5,5	0 % až 0,5 %	0 % až 0,5 %
9	5,5		0 % až0,25 %	0 % až 0,25 %

Pokud zastoupení klouzavých průměrů v jednotlivých třídách odpovídá předepsanému rozložení v tabulce 11, hodnoty v každé výkonové třídě se zprůměrují (Průměrná rychlost a hmotnost emisí na kilometr v dané třídě.). Tato hodnota se poté vynásobí časovým podílem z tabulky 9, zvlášť pro městskou část a pro celkovou. Následně se provede suma hodnot pro městskou část a pro celkovou. Výsledné vážené průměry lze zapsat pomocí následujících rovnic, rovnice 12, 13.

$$\overline{m_{gas}} = \sum_{j=1}^{9} m_{gas,j} \cdot t_j \qquad [g/s] \tag{12}$$

$$\bar{v} = \sum_{j=1}^{9} v \cdot t_j \qquad [km/h] \tag{13}$$

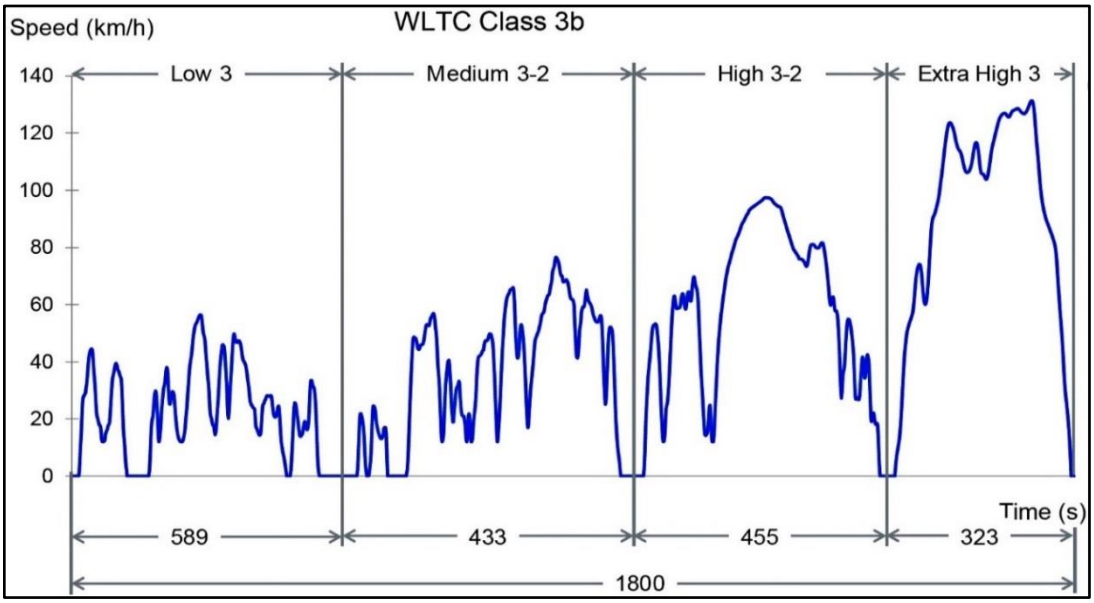
Tyto vztahy jsou použity pro městskou část a celkovou část odděleně. Hodnoty z rovnice 12 jsou poté přepočítány na ujetou vzdálenost pomocí následujícího vztahu, rovnice 14.

$$M_{gas} = \frac{\overline{m_{gas}} \cdot 3600}{\bar{v}} \qquad [g/km] \tag{14}$$

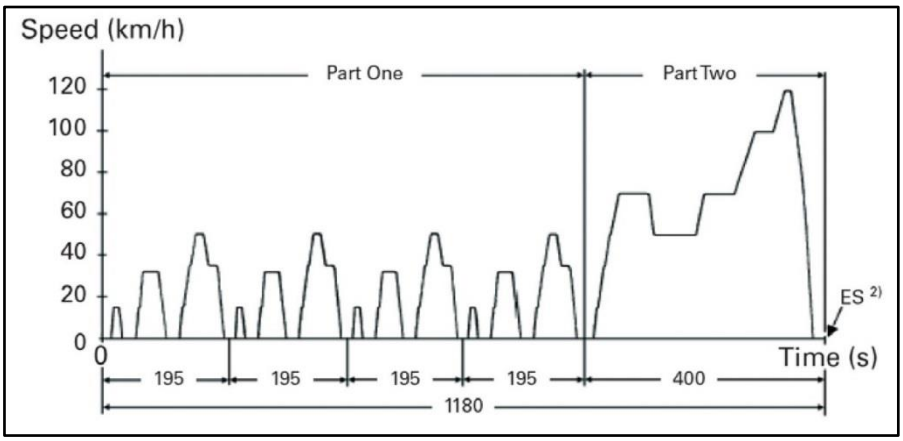
3.1.2. **Emisní testy v laboratorních podmínkách (NEDC, WLTP)**

Jízdní cyklus WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) byl vyvinut Evropskou hospodářskou komisí OSN (EHK OSN) a byl přijat Světovým fórem pro harmonizaci předpisů pro motorová vozidla (WP. 29), jako celosvětový technický předpis č. 15 v březnu 2014. Kromě reálnějších informací o spotřebě paliva a emisích CO_2 pro spotřebitele, vytváří WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure) také celosvětový rámec pro zkoušení vozidel. [9]

Při stanovení limitů pro hmotnosti vyprodukovaných emisních produktů je nutné také definovat provozní režimy, při kterých jsou tyto limity ověřovány. Provozní režim je určen funkcí popisující průběh rychlosti vozu v závislosti na čase zkoušky. Zmíněný průběh nese označení WLTC a je nástupcem jízdního cyklu NEDC (New European Driving Cycle), který byl výrazněji aktualizován naposledy v roce 1997 a přestával zohledňovat parametry současných vozů. Závislost rychlosti vozu na čase zkoušky pro cyklus WLTC je zobrazena na obrázku 5, dřívější NEDC je na obrázku 6.



Obrázek 5: Průběh rychlosti vozu během WLTC cyklu, rozdělení na čtyři fáze. [6]



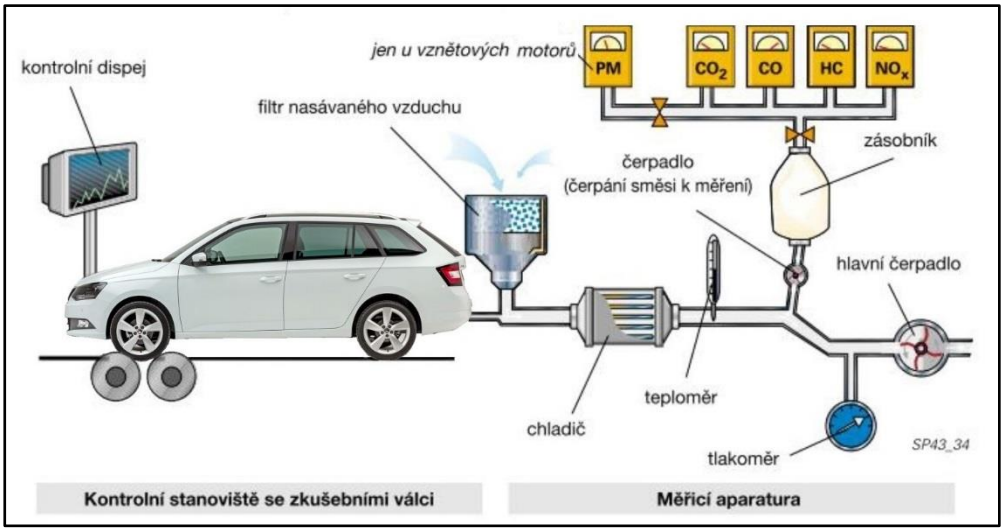
Obrázek 6: Průběh rychlosti vozu během NEDC cyklu. [16]

Průběhy rychlostních křivek WLTC cyklu jsou dále specifikovány podle kategorií, do které vůz patří. Tyto kategorie jsou definovány hodnotou poměru PMR (výkon/hmotnost) W/kg a maximální rychlostí vozu deklarovanou výrobcem, bez bezpečnostních omezení. Tyto kategorie jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 12: Kategorie vozidel dle hodnoty PMR. [6]

Kategorie	PMR [W/kg]	V_{max} [km/h]	Posloupnost rychlostních úseků
Třída 3b	PMR>34	$V_{max} \geq 120$	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3
Třída 3a		$V_{max} < 120$	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3
Třída 2	34 ≥ PMR > 22	-	Low 2 + Medium 2 + High 2 + Extra High 2
Třída 1	PMR ≤ 22	-	Low 1 + Medium 1 + Low 1

Zkouška NEDC nebo WLTC probíhá v laboratorních podmínkách na zkušebních válcích, které simulují jízdní pasivní odpory a odpory proti zrychlování vozu, obrázek 7.



Obrázek 7: Schéma stanoviště pro laboratorní měření emisí. [4]

Výsledná síla působící proti pohybu vozu je tedy dána jako součet síly pasivních odporů F_{pas} a síly odporu proti zrychlování F_{dyn}, rovnice 15.

$$F_{válců} = F_{pas} + F_{dyn} \tag{15}$$

Kde průběh F_{dyn} je dán, rovnice 16.

$$F_{dyn} = a \cdot m_{red} \tag{16}$$

Redukovanou hmotnost m_{red} je možné dle přepisu *(EU) 2017/1151* odhadnout, rovnice 17.

$$m_{red} = m_{vozu} + (m_{vozu} + 25kg) \cdot 0{,}03 \tag{17}$$

(Nebo ji je možné stanovit výpočtem, pomocí zákona o zachování kinetické energie.) Konstanta 25 kg je dána zmíněným předpisem na straně L175/437 bod 2.5.1. Průběh síly F_{pas} se stanovuje experimentálně. Tento experiment je založen na druhém Newtonově zákoně, rovnice 18.

$$F_{pas} = \frac{dp}{dt} \tag{18}$$

Kde hybnost p je dána, rovnice 19.

$$p = m_{red} \cdot v \tag{19}$$

Na základě předchozích rovnic je připraven následující experiment. Vůz je uveden do předepsané rychlosti na venkovní testovací dráze (rychlost je dána jako maximum WLTP cyklu + 10 km/h, dle *(EU 2017/1151))* a poté je při vyřazeném rychlostním stupni nechán zpomalovat pouze prostřednictvím pasivních odporů (valivý odpor kol, odpor vzduchu, atd.). Během zpomalování je zaznamenávána rychlost vozu, ze které je odvozena hybnost vozidla. Derivací hybnosti vozidla podle času získáme kýženou odporovou sílu, jako funkci rychlosti vozu. Výsledná odporová síla je pak dána funkcí, rovnice 20.

$$F_{válců} = f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2 \tag{20}$$

Tvar této rovnice je předepsán *(EU 2017/1151)* a je využíván při nastavování testovacího cyklu na válcové zkušebně. Tato rovnice tvoří hlavní část takzvaného jízdního modelu vozu.

Jelikož jsou tyto testy WLTP a NEDC prováděny v laboratorních podmínkách, poskytují možnost opakovatelnosti a z technického hlediska jsou přínosným zdrojem informací. Ovšem společně se zkouškou WLTC existuje i zkouška RDE (kapitola 3.1.1), zkouška v reálném provozu. Již podle názvu je zřejmé, že tato zkouška probíhá mimo laboratoř na pozemních komunikacích během

provozu a proto je její přesná opakovatelnost velice složitá. Vzhledem k této skutečnosti mají data z RDE mnohem nižší vypovídající hodnotu, než u testů WLTC.

Je nutné dodat, že zmíněné zkoušky se zabývají pouze celkovým množstvím emisí, které jsou přepočítávány na kilometr jízdy. Ovšem pro vývojové účely je nutné analyzovat časový záznam emisí v závislosti na parametrech nastavených a naměřených na motoru. Jen tak je možné odhalit kritické provozní režimy pohonné jednotky z pohledu emisí.

3.1.3. Průběh WLTC a NEDC testu

Proces měření emisí v laboratorních podmínkách je dán nařízením Evropské komise č. 692/2008. To uvádí požadavky na měřící techniku a specifikuje celý postup měření. Samotný test probíhá podle následujícího schématu (výčet činností uvádí hlavní principy zkoušky, ne celý postup). [4]

a) Určení silničního modelu vozu
b) Ohřev vozu
c) Kalibrace válcového dynamometru
d) Pretest
e) Kondiciování vozu
f) Emisní test vozu
g) Verifikace kalibrace dynamometru

a) Určení silničního modelu

Určení silničního modelu je proces určování průběhu výsledné odporové síly působící na vozidlo během jízdy v závislosti na jeho aktuální rychlosti. Tato síla je poté simulována odpory válců na válcovém stanovišti. Princip určení průběhu této funkce spočívá v derivaci funkce hybnosti vozidla podle času a byl popsán v kapitole 3.1.2.

b) Ohřev vozu

Vozidlo na válcové zkušebně je zahřáto na provozní teplotu jízdou při konstantní rychlosti, nebo zajetím emisního cyklu. Díky ohřevu vozu dojde ke stabilizaci odporových sil ve vozidle.

c) Kalibrace válců

Při vyřazeném rychlostním stupni dynamometr roztočí válce na rychlost odpovídající rychlosti vozu 140 km/h a nechá ho samovolně zpomalovat v závislosti na přednastavené odporové síle. V závislosti na odchylkách časů zpomalování od silničního modelu je upraveno zatížení dynamometrem. Tato kalibrace je opakována, dokud není odchylka mezi časy menší než ±5 %. Kalibrace je nutná při každém měření, i v případě měření stejných modelů vozů.

d) Pre-test

Po zkalibrování válců se provádí pre-test. Tato procedura znamená zajetí testovacího jízdního cyklu bez odběru vzorků výfukových plynů. Smyslem této části testu je stanovení definovaného a opakovatelného stavu vozidla před vlastním testem.

e) Kondiciování

Následující operací po pre-testu je kondiciování, kdy je vozidlo minimálně 12 – 36 hodin temperováno v rozsahu teplot 20 – 30 °C. [9]

f) Emisní test vozu

Po části kondiciování se provádí vlastní emisní test na testovacích válcích, dle průběhu WLTC nebo NEDC. Během testu jsou výfukové plyny nasávány společně s přefiltrovaným vzduchem tak, že je zajištěn stálý hmotnostní tok této směsi nezávisle na množství vyprodukovaných výfukových plynů. Tento efekt je docílen vynuceným podtlakem ve vedení výfukových plynů v místě opatřeným vzduchovým filtrem. Při větší zátěži, kdy pohonná jednotka produkuje více výfukových plynů, se zmenší podtlak v místě vzduchového filtru a je přisáváno méně vzduchu. Naopak v režimech, kdy je produkováno výfukových plynů méně, je podtlak v místě filtru větší a tím pádem je přisáváno vzduchu víc. Výsledkem je stálý hmotností tok směsi výfukových plynů a přisávaného vzduchu za filtrem. Po ustálení a homogenizaci je směs výfukových plynů a vzduchu odčerpána do vaků na vzorky plynu. Zvláštní vak je také určen pro vzduch, kterým jsou výfukové plyny ředěny. Hodnoty emisních veličin jsou tedy vypočítány z koncentrací v naředěných výfukových plynech s ohledem na koncentrace emisních plynů v přisávaném vzduchu.

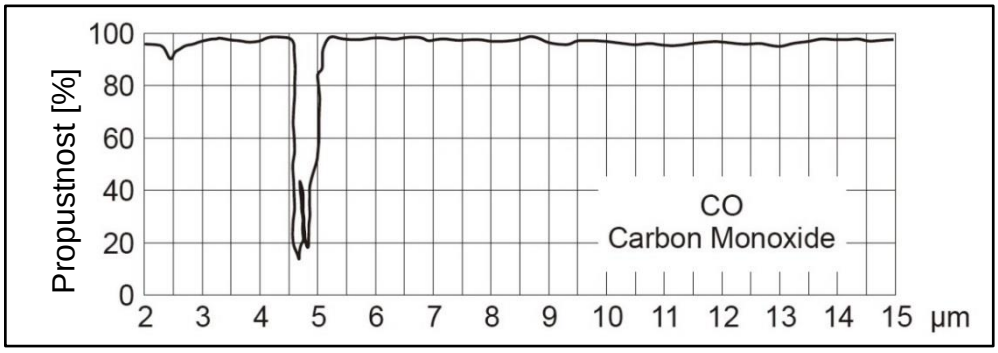
Jak je patrné z obrázku 7, výfukové plyny urazí dlouhou vzdálenost od motoru k analyzátorům. Tato vzdálenost představuje problém při analýze výsledků měření, jelikož do měření vnáší časovou prodlevu mezi změnou režimu na pohonné jednotce a zaznamenáním této změny v analyzátorech. Kompenzací tohoto časového rozdílu se zabývá předložená diplomová práce.

4. **Analyzátory emisí**

Analyzátory výfukových emisí jsou technologicky velice náročná zařízení, která zpravidla přímo neměří sledovanou veličinu, ale veličinu s ní svázanou, ze které je objemový podíl složky sledovaného plynu odvozen. Díky nutnosti časté kalibrace pomocí kalibračních plynů jsou tato zařízení nákladná jak na pořízení, tak na provoz. Základní principy jednotlivých analyzátorů jsou uvedeny v následujících kapitolách.

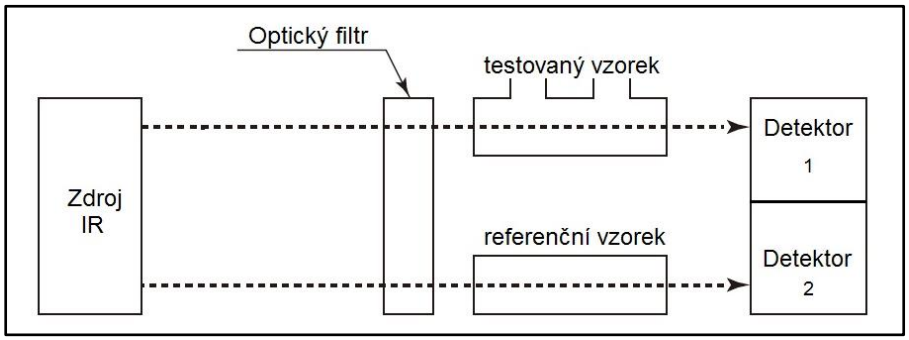
Infračervený analyzátor CO (NDIR)

Infračervený analyzátor CO ve výfukových plynech je založen na principu vyhodnocení množství energie pohlcené plynem CO z infračerveného světla o dané vlnové délce, kterým je plyn prozařován. Plyn CO nejvíce pohlcuje elektromagnetické záření o vlnové délce blízké 4,7 μm a tím dochází k jeho ohřevu, viz obrázek 8. Díky této vlastnosti je možné sestrojit následující zařízení, obrázek 9.



Obrázek 8: Propustnost elektromagnetického záření v prostředí CO v závislosti na vlnové délce. [3]

Infračervené světlo ze zdroje IR prochází optickým filtrem, který odstíní nežádoucí vlnové délky, které by mohly zahřívat i jiné plyny ve zkušebním vzorku než je CO. Dále toto světlo prochází dvěma skleněnými komorami. V jedné je testovaný vzorek a ve druhé referenční vzorek (plyn s nulovým obsahem CO). Světlo, které projde

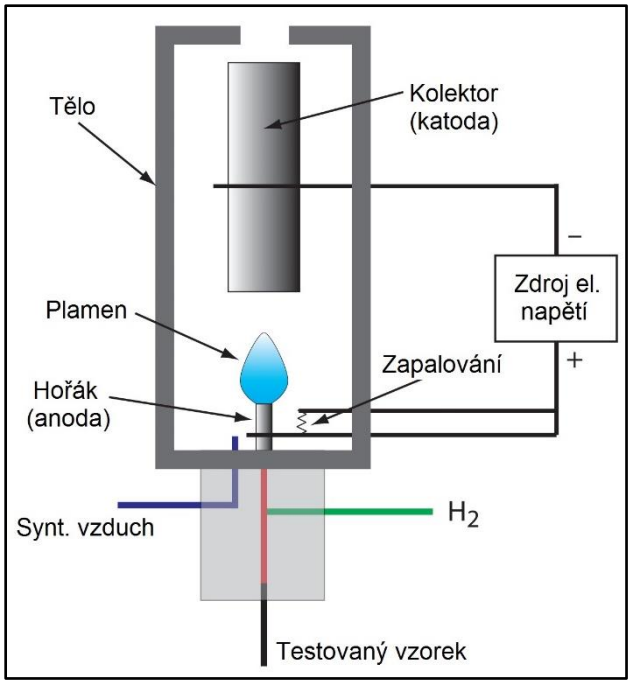


Obrázek 9: Schéma detektoru CO. [3]

komorami, dále dopadá na detektory. Vyhodnocení obsahu CO v testovaném vzorku může být určeno několika způsoby. Jedním z nich je měření rozdílu tlaku mezi komorami detektoru 1 a 2, způsobeným rozdílnou teplotou plynů v detektorech. Ta je závislá na množství záření, které projde komorami. Čím větší je podíl CO v testovaném vzorku, tím menší bude tlak plynu v detektoru 1. Další možností je měření proudění plynu mezi komorami detektorů, které je způsobené tlakovým rozdílem mezi komorami. Nejpřímější cestou měření prošlého záření komorami je pomocí detektoru, který elektromagnetické záření převádí přímo na elektrický signál. Zařízení může fungovat také jako jednokomorové, bez referenčního vzorku. Ovšem v tomto případě je obtížnější udržet nastavenou nulovou hodnotu CO.

Plamenoionizační analyzátor THC (FID)

Princip plamenoionizačního analyzátoru je založen na detekci iontů vytvořených během spalování organických sloučenin ve vodíkovém plameni. Produkce těchto iontů je proporcionálně úměrná koncentraci organických sloučenin v analyzovaném plynu. V případě výfukových plynů je tento princip využíván pro detekci součtu všech nespálených uhlovodíků ve výfukových plynech, označovaných jako THC (total hydrocarbon content). Na obrázku 10 je zobrazeno schéma zařízení.



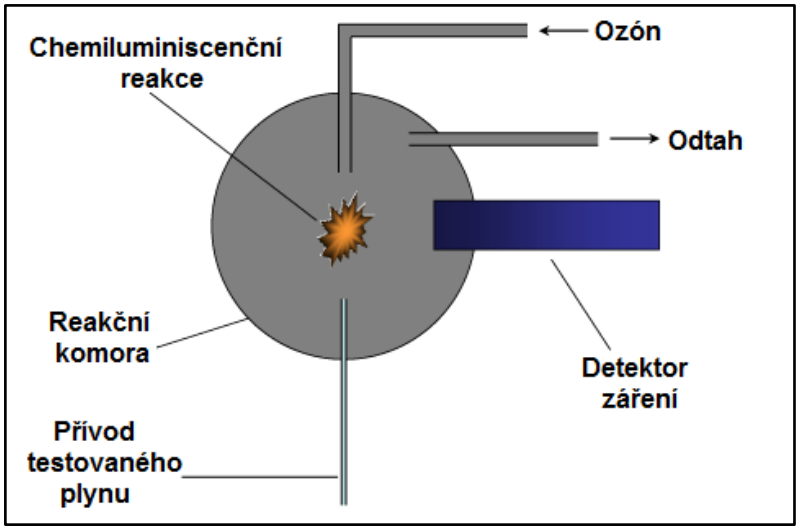
Obrázek 10: Schéma plamenoionizačního analyzátoru THC. [1] [5]

Chemiluminiscenční analyzátor NO a NO_X (CLA)

Detekce NO je založena na chemiluminiscenční reakci, rovnice 21.

$$NO + O_3 = NO_2 + O_2 + světelné\ záření \quad (21)$$

Jak je z této rovnice patrné, vzorek testovaného plynu je dopravován do komory, do které je přiváděn ozón. V této reakční komoře probíhá chemická reakce, jejíž produkty jsou nové molekuly a také světelné záření. Toto záření je přímo úměrné počtu molekul NO vstupujících do reakce. Měřením intenzity světelného záření je možné odvodit množství NO v testovaném vzorku. Pro měření koncentrací součtu všech molekul NO_X jsou tyto molekuly s větším počtem atomů kyslíku redukovány na NO ve vyhřívaném katalyzátoru. Schéma zařízení je na následujícím obrázku.



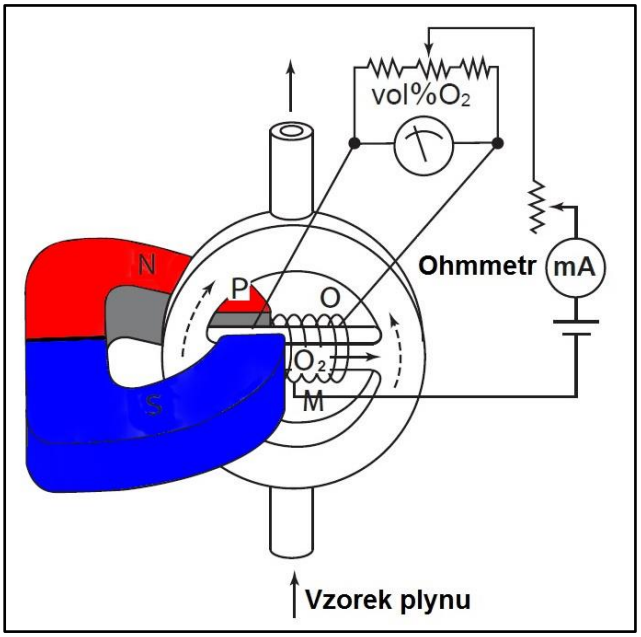
Obrázek 11: Schéma chemiluminiscenční analyzátoru CO. [1]

Paramagnetický analyzátor O_2 (PMA)

Paramagnetický analyzátor O_2 využívá paramagnetických vlastností kyslíku. Relativní citlivost vybraných plynů na magnetické pole vztažená k vlastnostem kyslíku je na následujícím obrázku. Z grafu je patrné, že společně

Obrázek 12: Relativní paramagnetismus vybraných plynů vzhledem k O_2. [10]

s kyslíkem má výrazné paramagnetické vlastnosti také molekula NO, obrázek 12. Ovšem obsah NO v surových výfukových plynech je vzhledem ke kyslíku výrazně menší a tak lze využít následujícího principu. Vzorek výfukových plynů protéká okolo měřící komory, obrázek 13. V měřící komoře je vyhřívaný odporový drát

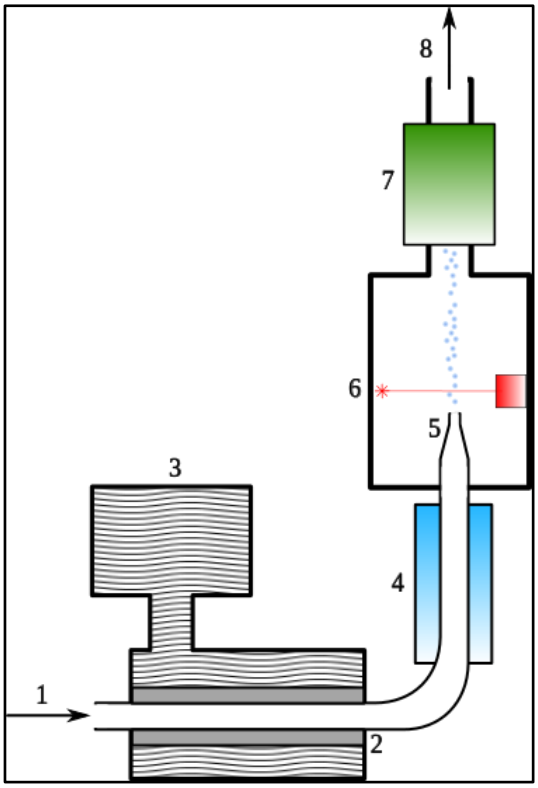


Obrázek 13: Schéma paramagnetického analyzátoru O_2. [10]

v magnetickém poli. Díky magnetickému poli je do prostoru drátu přitahován kyslík z výfukových plynů, v levé části. Tomuto plynu předává drát teplo, a s rostoucí teplotou plynu klesá jeho paramagnetičnost. Díky tomu není vázán magnetickým polem v prostoru drátu a je vytlačován studenějším kyslíkem směrem doprava. Důsledkem tohoto procesu je takzvaný magnetický vítr, který ochlazuje vyhřívaný drát a tím mění jeho elektrický odpor. Ze změny elektrického odporu vyhřívaného drátu lze odvodit obsah kyslíku ve výfukových plynech.

Počítač pevných částic PM

Nejčastějším zařízením pro vyhodnocení pevných částic vyprodukovaných během laboratorních zkoušek spalovacích motorů jsou kondenzační počítače pevných částic. Ty pracují na následujícím principu. Zkoumaný vzorek je přiváděn v místě 1 do vyhřívané komory. V tomto místě (2) je vzorek nasycen výpary pracovního média, nejčastěji butanolem ze zásobníku (3). Dále vzorek pokračuje do kondenzační trubice (4), kde butanolové přesycené páry začínají kondenzovat. Pevné částice ve zkoumaném vzorku se stávají kondenzačními zárodky butanolu, který na nich ulpívá a zvětšuje je na velikost zhruba 10μm. Díky této velikosti částice vytvoří po průchodu usměrňovací tryskou (5) dostatečně velký stín v laserovém paprsku, který je rozpoznatelný optickým detektorem (6). Dále je plyn odváděn vzduchovou pumpou (7) do výfuku (8).



Obrázek 14: Schéma počítače pevných částic: 1) přívod vzorku 2) vyhřívaná porézní vložka 3) pracovní tekutina 4) kondenzátor 5) usměrňovací tryska 6) laserový čítač 7) vzduchová pumpa 8) odtah. [15]

Díky tomuto principu je možné detekovat pevné částice v aerosolu již od velikosti 2nm, v závislosti na nastaveném stupni sycení vzorku pracovní kapalinou. Na druhé straně je toto zařízení velice citlivé na změnu teplot, protože se změnou teploty se mění i poloha rosného bodu nasyceného plynu a není možné efektivně řídit kondenzaci pracovního média na pevných částicích. Stejně tak je tento přístroj citlivý na otřesy a vibrace, proto jsou pro provoz nutné laboratorní podmínky.

5. Řešení časového posunu mezi signály

Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách, během emisních testů v laboratorních podmínkách je zaznamenáván časový průběh hodnot hmotnostních průtoků emisí, taktéž nazývaný jako online záznam. Legislativa tento postup nevyžaduje, ovšem pro vývojové účely agregátu jsou tato data nezbytná (vyžadována je pouze celková hmotnost emisních plynů za daný testovací cyklus). Díky těmto záznamům je možné identifikovat kritické provozní režimy motoru vzhledem k produkovaným emisím. Z těchto poznatků pak lze navrhnout budoucí optimalizace v konstrukci a nastavení motoru.

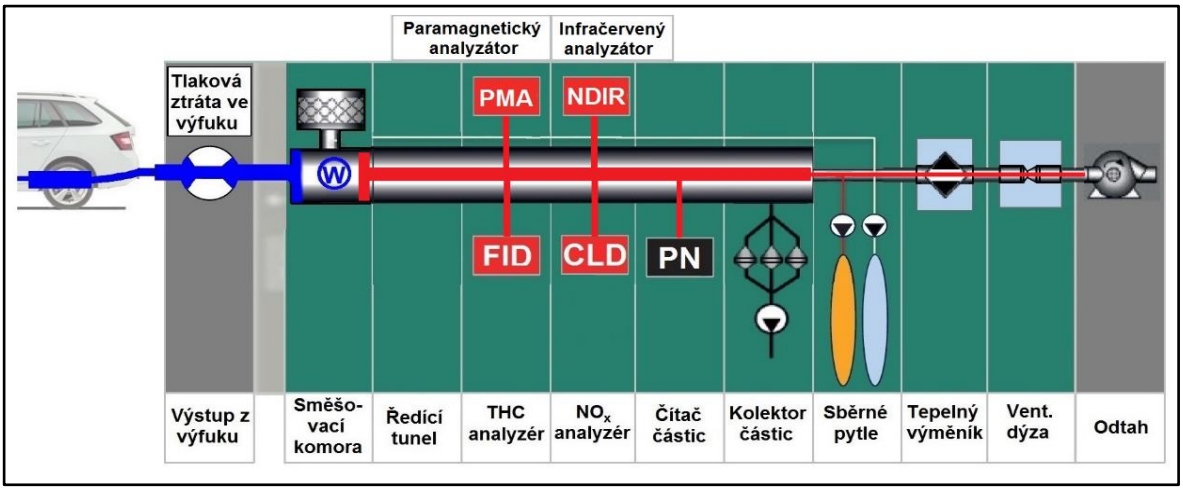
Pro přesné určení kritických režimů motoru z hlediska emisí je nutné přiřadit hodnoty emisních veličin v jednotlivých okamžicích testu k hodnotám stanovujícím provozní stav motoru. Zde ovšem nastává komplikace. Mezi změnou režimu na motoru a zaznamenáním této změny na analyzátorech výfukových plynů je časová prodleva a tato prodleva se během testu mění. Způsob kompenzace této časové prodlevy je vysvětlen na následujících stránkách.

5.1. Rozdělení zpoždění signálů

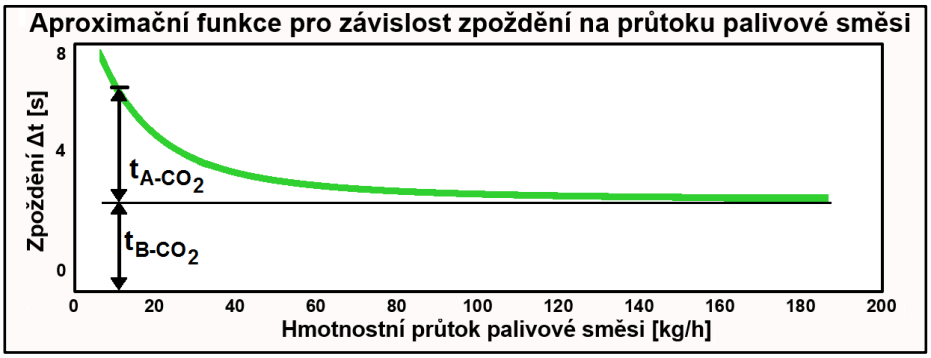
Mezi změnou provozního režimu motoru a jejím zaznamenáním na analyzátorech výfukových plynů je časové zpoždění, které se v průběhu testování mění. Tuto časovou prodlevu Δt lze rozložit na dvě části v závislosti na jejím průběhu, rovnice 22. Grafické vyjádření t_A a t_B je pak na obrázku 16.

$$\Delta t = t_A + t_B \tag{22}$$

Veličina t_A je doba, za kterou projde myšlená částice výfukových plynů výfukovým systémem vozidla a vedením před místo s konstantním hmotnostním průtokem, označené jako W (modrá trasa). Čas t_B je doba za kterou částice urazí vzdálenost mezi místem W a příslušným analyzátorem plus čas potřebný na vyhodnocení elektronickou částí zařízení, červená trasa. V tomto červeném úseku je hmotnostní tok naředěných výfukových plynů konstantní (Díky aplikaci Venturiho dýzy ve vyhodnocovacím zařízení). Cesta myšlené částice měřícím řetězcem je znázorněna na následujícím schématu, obrázek 15.



Obrázek 15: Schéma systému firmy AVL pro laboratorní měření emisí. [2]

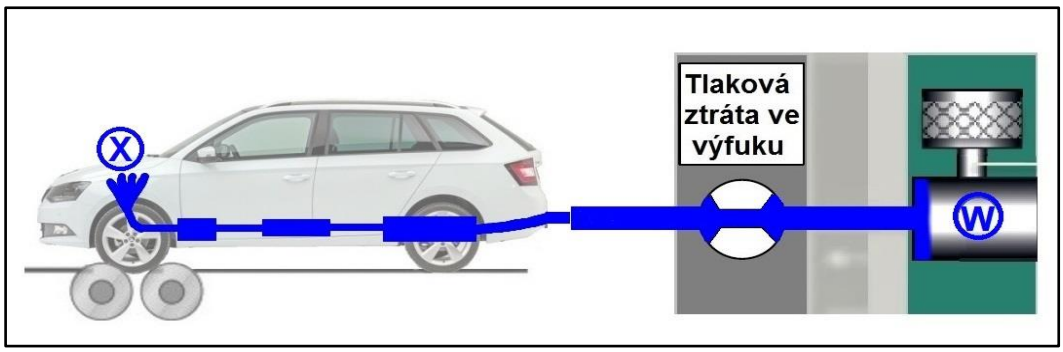


Obrázek 16: Rozdělení časového zpoždění záznamu CO_2 na konstantní a proměnnou část.

Důležitým závěrem tohoto rozboru je informace, že zpoždění t_B se během zkoušky nemění a lze s ní pracovat jako s konstantou. Naopak hodnota t_A se s časem mění a závisí na mnoha parametrech.

5.2. Analytické stanovení funkce t_A

Základní podmínkou pro řešení zpoždění t_A je stanovení charakteristické rychlosti jako funkce měřitelné veličiny na trase výfukových plynů mezi motorem X a místem W (modře), obrázek 17. Tu by bylo možné určit pomocí změření rychlosti



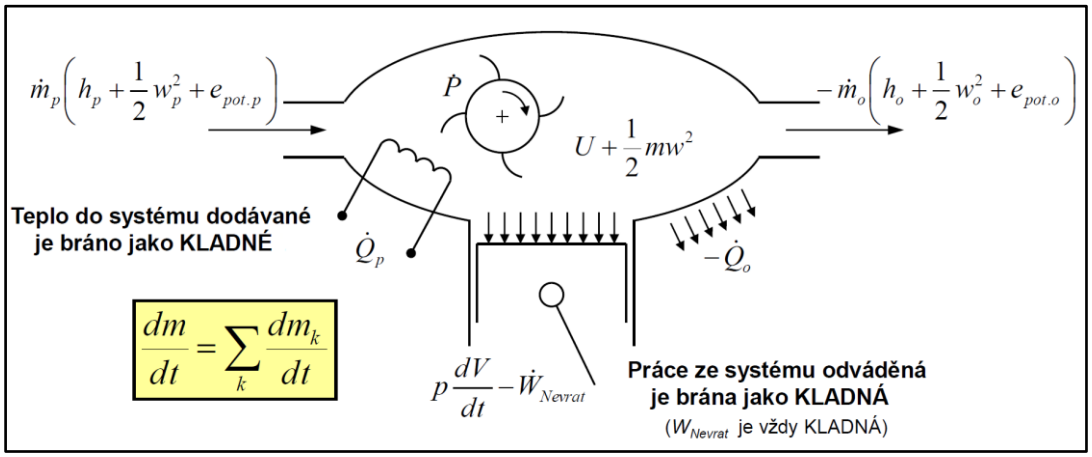
Obrázek 17: Schéma trasy výfukových plynů s proměnným opožděním. [2]

výfukových plynů na několika místech výfukového potrubí a pomocí těchto dat vytvořit zjednodušený rychlostní profil podél délky potrubí v závislosti na provozním režimu motoru. Ovšem vzhledem k nutnosti vrtání (zničení) každého výfuku pro danou konfiguraci vozidla se nejedná o přijatelné řešení.

Charakteristická rychlost ve vedení na obrázku 17 je závislá na mnoha parametrech a tak se při exaktním pohledu na zkoumaný úsek nabízí rovnice energetické bilance pro otevřený systém, vztah 23.

$$\frac{d\left(U+\frac{1}{2}mw^2+me_{pot}\right)}{dt}=\dot{Q}-\dot{W}+\sum_K \dot{m}_K\left(h_m+\frac{1}{2}w^2+e_{pot}\right) \tag{23}$$

Popis proměnných použitých v rovnici 22 je v tabulce 13, schéma pro odvození rovnice je na obrázku 18.



Obrázek 18: Ilustrační schéma pro rovnici 21. [13]

Tabulka 13: Popis proměnných v rovnici 23.

U	Vnitřní energie [J]	t	Čas [s]
m	Hmotnost [kg]	$\dot{Q}$	Výsledná tepelná výměna s okolím [J/s]
w	Rychlost média [m/s]	$\dot{W}$	Celkový odváděný výkon [J/s]
e_{pot}	Měrná potenciální energie [J/kg]	h_m	Měrná entalpie [J/kg]

Takto postavená rovnice poskytuje přesnou představu o energetické bilanci ve zkoumaném systému a tím pádem teoreticky i možnost vyjádřit rychlost v jednom z úseků vzhledem k energetickým změnám uvnitř otevřeného systému. Jako přijatelné zjednodušení se jeví tvar rovnice 24.

$$\frac{d\left(U+\frac{1}{2}mw^2\right)}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_K \dot{m}_K \left(h+\frac{1}{2}w^2\right) \tag{24}$$

V tomto tvaru je zanedbán výraz popisující potenciální energii plynu, rovnice 25.

$$e_{pot} = g \cdot h_v \qquad [m \cdot s^{-2}] \cdot [m] \tag{25}$$

Ta je vzhledem k nízké hustotě zkoumaného plynu a relativně malým výškovým rozdílům o několik řádů nižší, než energie ostatní, proto ji zle zanedbat. Stejně tak lze vynechat práci vykonanou výfukovými plyny ve výfuku (pro motor bez turbodmychadla), rovnice 26.

$$\frac{d\left(U+\frac{1}{2}mw^2\right)}{dt} = \dot{Q} + \sum_K \dot{m}_K \left(h+\frac{1}{2}w^2\right) \tag{26}$$

Tento tvar je posledním stupněm přijatelného zjednodušování pro vyšetřování rychlosti média. Veličiny této rovnice lze déle rozepsat do následujících vztahů 27, 28, 29. Popis proměnných v rovnicích je uveden v tabulce 14.

$$U = \overline{c_V}^T_{T_{ref}}\left(T - T_{ref}\right) \cdot m \tag{27}$$

$$\dot{Q} = \left(T - T_{ref}\right) \cdot k \cdot S \tag{28}$$

$$h = \overline{c_p}^T_{T_{ref}}\left(T - T_{ref}\right) \tag{29}$$

Tabulka 14: Popis proměnných v rovnicích 27, 28, 29.

$\overline{c_V}^T_{T_{ref}}$	Střední hodnota izochorické tepelné kapacity mezi T_{ref} a T [J·kg^{-1}· K^{-1}]
$\overline{c_p}^T_{T_{ref}}$	Střední hodnota izobarické tepelné kapacity mezi T_{ref} a T [J·kg^{-1}· K^{-1}]
T	Teplota výfukových plynů ve sledovaném místě [K]
T_{ref}	Teplota okolního vzduchu [K]
k	Součinitel prostupu tepla ve sledovaném místě [W· K^{-1}· m^{-2}]
S	Plocha výfuku ve sledovaném místě tepelné výměny [m^{-2}]

Největší neznámou v rovnici 26 je součinitel prostupu tepla k, který je potřebný pro výpočet tepelné výměny mezi výfukem a okolím s pomocí rovnice 28. Tento součinitel je definován vztahem 30.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \tag{30}$$

Tabulka 15: Popis proměnných v rovnici 30.

α_1	Součinitel přestupu tepla, výfukové plyny – stěna výfuku [W· K^{-1}· m^{-2}]
δ	Tloušťka stěny výfuku [m]
λ	Součinitel tepelné vodivosti materiálu výfuku [W· K^{-1}· m^{-1}]
α_2	Součinitel přestupu tepla, stěna výfuku – okolní vzduch [W· K^{-1}· m^{-2}]

Součinitelé přestupu tepla jsou hlavním problémem řešení celé rovnice, jelikož závisí prakticky na všem, co se na tomto ději podílí (rozměr a tvar výfuku, rychlost proudění plynu kolem výfuku, hustota plynu, měrná tepelná kapacita plynu, viskozita plynu, tepelná vodivost plynu). Všechny tyto veličiny se mění nejenom s časem zkoušky, ale také podél celého vedení. Proto je exaktní metoda řešení prakticky nemožná. Vzhledem k rozměrům a složitosti oblasti, kterou by bylo nutné simulovat, je i řešení pomocí simulačního softwaru nevhodnou alternativou.

5.3. Tvorba realizovatelného řešení funkce Δt

Předchozí vztahy byly rigorózním postupem jak problematiku otevřeného systému řešit, ale vedly k laboratorně neproveditelným postupům. Pro prakticky řešitelné stanovení zpoždění v první části výfukového potrubí (mezi místem X a W) byl navržen následující postup.

Pro vůz s danou konfigurací (kombinace motoru, výfuku atd.) se sestaví funkce zpoždění Δt, která bude závislá na parametrech, které lze přímo měřit na motoru během emisních testů. Tato funkce bude určena aproximací hodnot naměřených v ustálených stavech motoru tak, aby postihla všechny provozní režimy motoru. Délka zpoždění Δt_j v daném režimu se určí jako čas mezi začátkem impulzu na veličině vstupující do motoru a zaznamenáním tohoto impulzu na emisních analyzátorech.

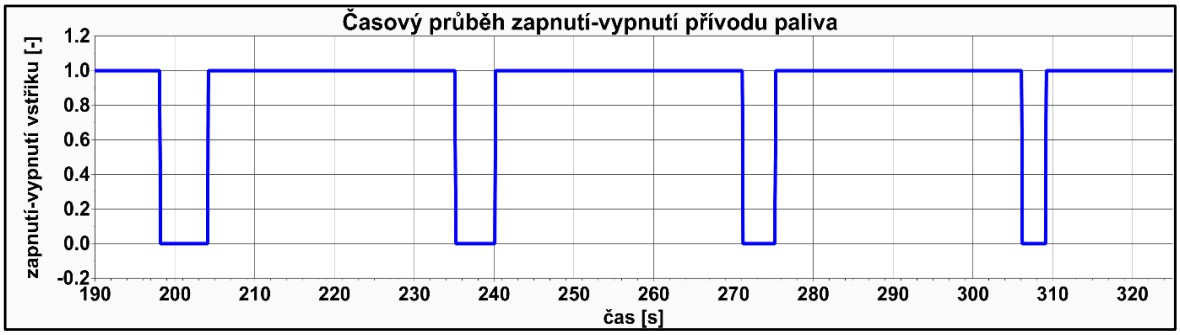
Konkrétně bude funkce Δt závislá na hmotnostním průtoku palivové směsi. U této vstupní veličiny lze s určitostí předpokládat, že má přímý vliv na rychlost výfukových plynů ve vedení. Zároveň tuto veličinu zle nepřímo zaznamenávat v průběhu testu, bez zásahů do zkoušeného vozu.

Na druhou stranu je nutné očekávat, že v době po studeném startu motoru bude metoda pracovat s nejmenší přesností, protože teplota výfukových plynů podél vedení výfuku bude spojena s množstvím spálené palivové směsi podle jiné závislosti, než v době, kdy bude výfukový trakt zahřátý na provozní teplotu. Tento stav je následkem akumulace tepla ve výfukovém vedení, která probíhá v největší míře právě po studeném startu.

V následujících kapitolách jsou uvedeny záznamy z provedených experimentů. Podrobné informace o okolních podmínkách během testů (teplota, tlak, vlhkost a další) nejsou uváděny, protože je zde silný předpoklad, že nemají žádný vliv na požadované výsledky.

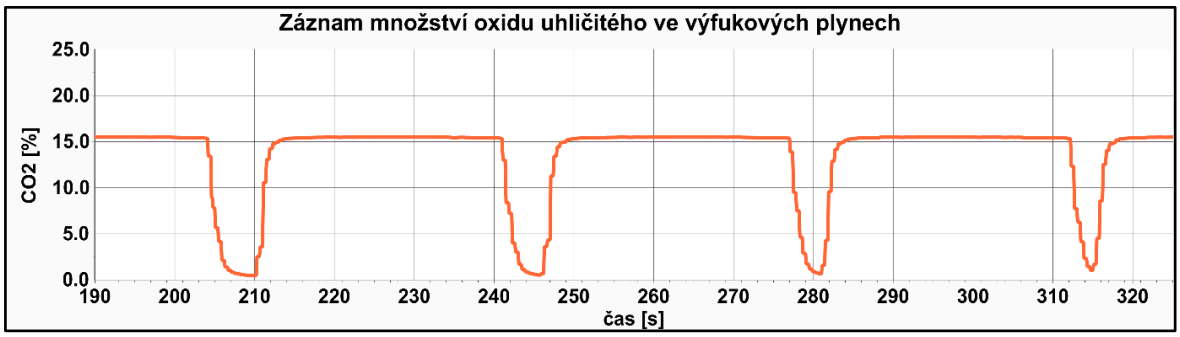
5.3.1. Vytvoření emisního impulzu

Postup určení zpoždění v ustáleném provozním režimu vyžaduje vytvoření emisního impulzu. Tento impulz musí být vytvořen změnou jedné z řídících veličin vstupujících do motoru a zároveň musí být jasně detekovatelný na emisních analyzátorech. Prvním způsobem vytváření emisních impulzů bylo přerušování přívodu paliva. To pochopitelně vyvolá nejzřetelnější změnu ve složení emisí, kterou je možné zároveň řídit. Tento test měl ověřit, nebo vyvrátit hypotézu o detekovatelnosti impulzů. Neboli ověřit zda dojde ve výfukovém systému k takovému promísení výfukových plynů, že je nemožné zachytit impulz trvací jen několik sekund. Zkouška byla provedena na čtyřválcovém zážehovém motoru o zdvihovém objemu 1,6 litru MPI 59kW. Motor byl v provozním režimu 2000 1/min a 35 N/m se sériovým výfukovým vedením na motorovém zkušebním stavu. Záznamy ze sledovaných měřících kanálů jsou na následujících obrázcích.



Obrázek 19: Časový záznam signálu pro řízení přívodu paliva. Přerušení vstřikování paliva na 5s, 4s, 3s, 2s.

Obrázek 20: Časový záznam objemového podílu kyslíku ve vysušených výfukových plynech na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)



Obrázek 21: Časový záznam objemového podílu CO_2 ve vysušených výfukových plynech na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)

Z výsledků na obrázcích 19, 20, 21 je patrné, že myšlenka detekovatelných impulzů je realizovatelná. Ovšem úplné omezení přívodu paliva je možné jen na brzdovém zkušebním stanovišti, tedy v případě, kdy je motor i s výfukem mimo vozidlo. Proto bylo nutné nalézt jinou řídící veličinu, která by vyprodukovala jasně identifikovatelné impulzy na emisních analyzátorech a zároveň ji bylo možné měnit i na válcové zkušebně. Tomuto požadavku odpovídá změna hodnoty součinitele přebytku vzduchu λ.

5.3.2. **Vytvoření emisního impulzu změnou λ**

Další veličinou, pomocí které by se mohl vytvořit zřetelný impulz emisí je hodnota součinitele přebytku vzduchu lambda. Ten bylo možné měnit prostřednictvím aplikační řídící jednotky (Řídící jednotka vozidla s možností online záznamu všech snímaných veličin z defaultních i přidaných snímačů ve vozidle a možností změny nastavení řídících parametrů za chodu motoru). Součinitel přebytku vzduchu lambda je definovaná vztahem 31.

$$\lambda = \frac{m_{vzduchu}}{m_{paliva} \cdot L_{vvt}} \tag{31}$$

Konstanta L_{vvt} je určena rovnicí 32,

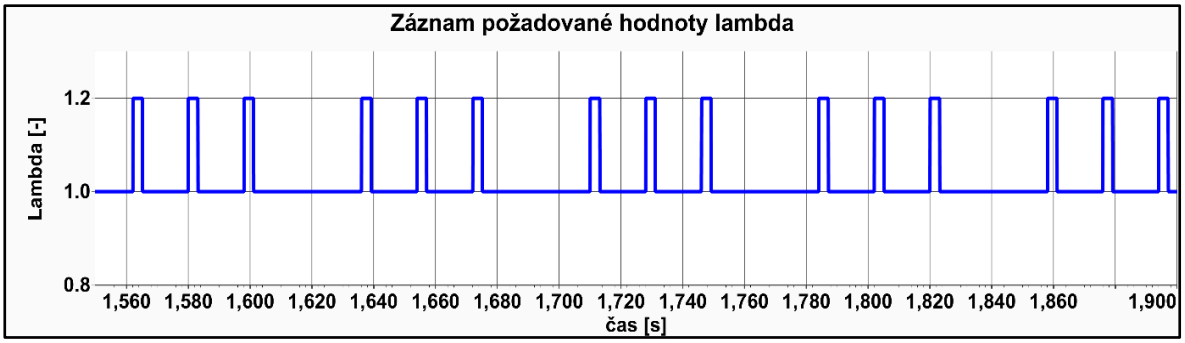
$$L_{vvt} = L_{vt} \cdot \left(1 + \frac{\frac{p_{H_2O}}{p_{atm.}}}{1 - \frac{p_{H_2O}}{p_{atm.}}} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{svz}} \right), \tag{32}$$

kde proměnná p_{H_2O} je tlak vodních par ve vzduchu a p_{atm} je atmosférický tlak vzduchu, M_{H_2O} je molární hmotností vody a M_{svz} je molární hmotností suchého vzduchu. L_{vt} je určen v závislosti na složení paliva, rovnice 33.

$$L_{vt} = \frac{1}{0{,}232} \left(\frac{8}{3} \sigma_c + 8\sigma_{H_2} + \sigma_S - \sigma_{O_2} \right) \tag{33}$$

Hodnoty koeficientů σ jsou určeny hmotnostními podíly uhlíku, vodíku, síry a kyslíku v palivu. Zároveň je hodnota lambdy vhodnou veličinou, protože její požadovanou hodnotu lze vyčíst z diagnostického rozhraní OBD II (On-board diagnostics II), které je přítomné téměř v každém voze a lze jej využít bez jakýchkoliv zásahů do konstrukce automobilu. Tou největší výhodou však je, že signál z OBD II zle nastavit jako další snímaný kanál v záznamu emisních analyzátorů. To znamená možnost provést synchronizované měření dat z analyzátorů s daty s impulzním signálem vstupujícím do motoru (hodnota požadované lambdy). Dle standardizovaného rozhraní OBD II, je hodnota požadované lambdy na kanálu PID (Parameter IDs) číslo 68 (zapsáno decimálně).

Návrh na vytvoření emisních impulzů pomocí změny požadované hodnoty lambda bylo nutné ověřit a tak byl proveden následující experiment. Při tomto testu byla skokově měněna velikost požadované hodnoty lambda směrem k chudým směsím na hodnotu 1,2, obrázek 22. Zkouška byla provedena na čtyřválcovém



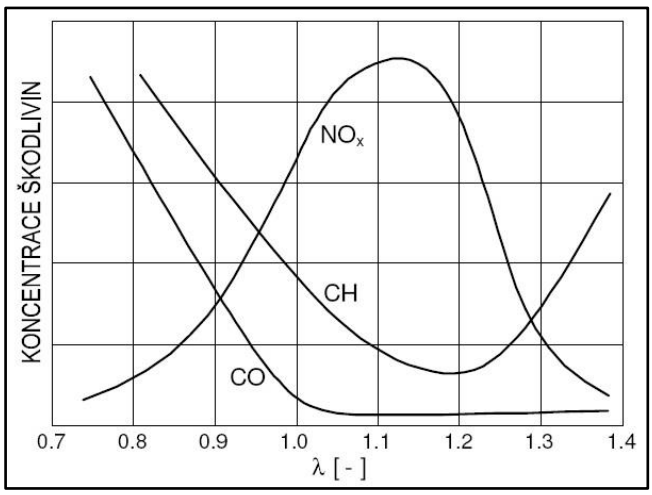
Obrázek 22: Časový záznam signálu požadované hodnoty lambda.

zážehovém motoru o zdvihovém objemu 1,6 litru MPI 59kW. Motor byl v několika provozních režimech při 5000 1/min se sériovým výfukovým vedením na brzdové zkušebním stavu, obrázek 23. Při zkoušce bylo použito palivo BA 95.

Obrázek 23: Časový záznam efektivního točivého momentu v průběhu měření.

Vzorky emisí byly odebírány na konci výfukového vedení, za tlumičem hluku. Řádově nejpatrnější změny v koncentracích nastávaly u množství oxidu dusíku, obrázek 24. Vzhledem k tomu, že měření emisí probíhalo až na konci výfukového vedení, je změna množství NOx výsledkem chemických reakcí v katalytických reaktorech, které zásadně ovlivňují délku a amplitudu emisních impulzů NOx.

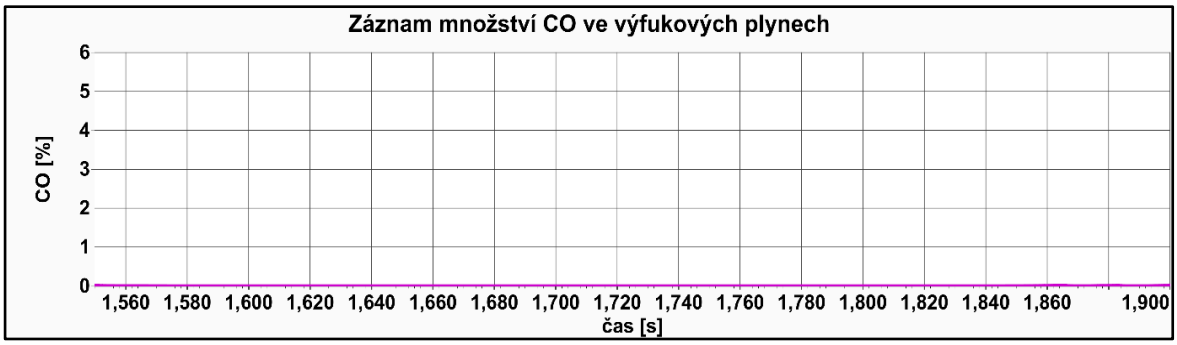
Obrázek 24: Časový záznam množství NO_x na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)



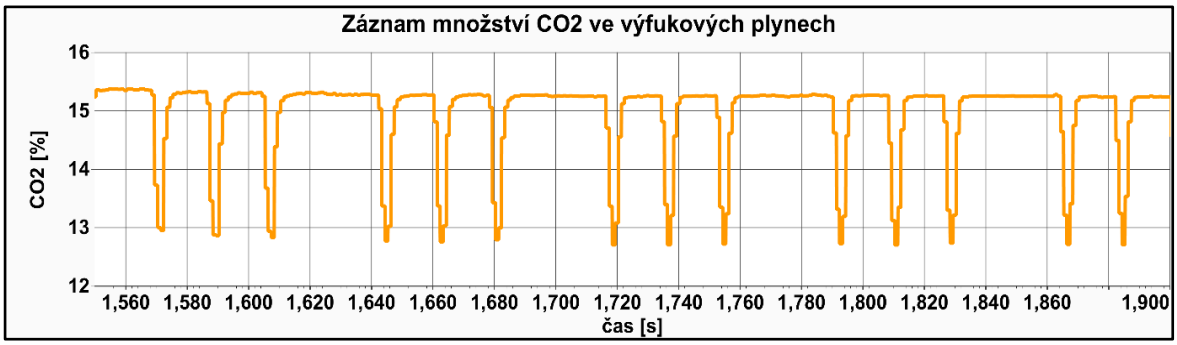
Obrázek 25: Typické koncentrace surových emisí zážehového motoru. [14]

Při zvýšení hodnoty lambda nad hodnotu 1 je v palivové směsi přebytek vzduchu a tím i přebytek kyslíku. Tento přebytek umožňuje úplnou oxidaci uhlíku na CO_2, což vede ke snížení koncentrací surových emisí CO, dle závislosti na obrázku 25. Přebytek kyslíku také umožňuje tvorbu molekul oxidů dusíku, která se projeví jeho zvýšenými objemovými koncentracemi, obrázek 24.

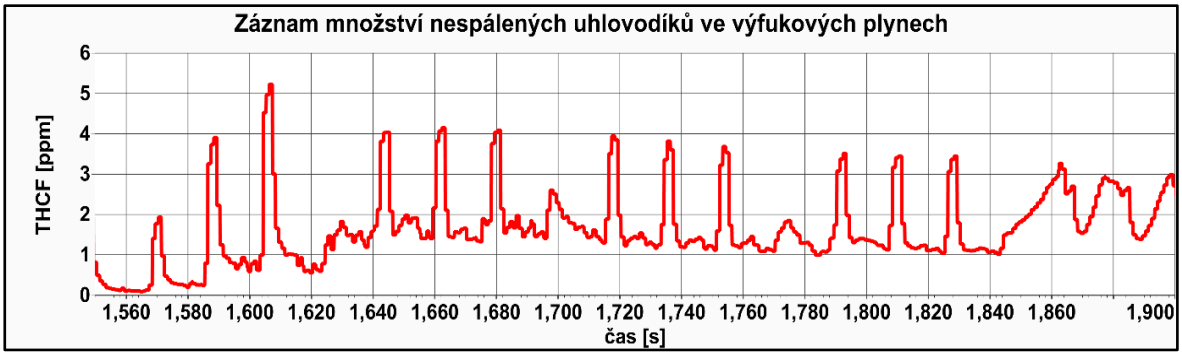
V souladu s tímto principem je obsah CO na konci výfuku po celou dobu zkoušky téměř roven nule, obrázek 26. Změny v záznamech dalších sledovaných emisních složek jsou na obrázcích 27 a 28.



Obrázek 26: Časový záznam objemového podílu CO ve vysušených výfukových plynech na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)

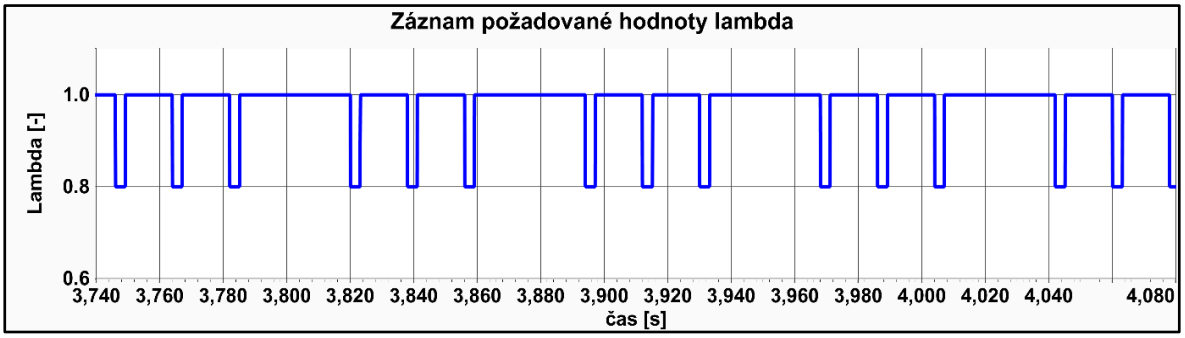


Obrázek 27: Časový záznam objemového podílu CO_2 ve vysušených výfukových plynech na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)



Obrázek 28: Časový záznam množství THCF na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)

Dalším krokem v experimentu bylo vytvoření emisního impulzu změnou hodnoty lambda směrem k bohatým směsím, skokově na hodnotu 0,8, obrázek 29.



Obrázek 29: Časový záznam signálu požadované hodnoty lambda.

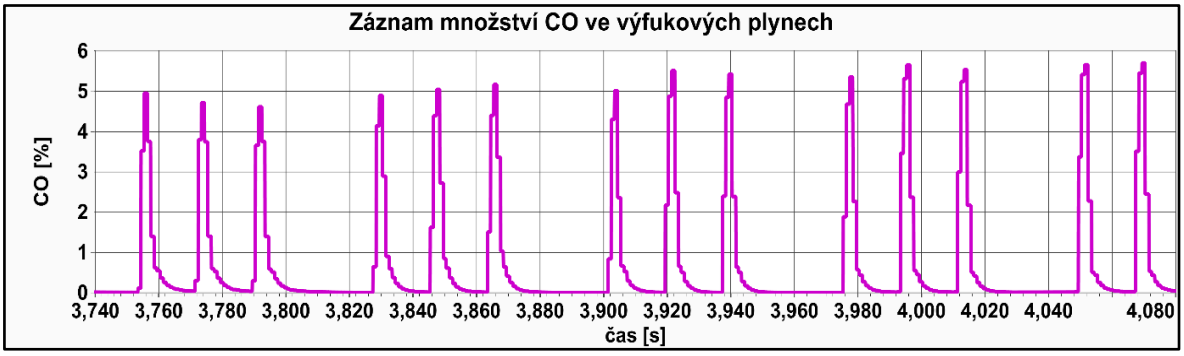
Měření bylo provedeno při stejné konfiguraci a provozních režimech, jako v předchozím případě (motor 1,6 litru MPI 59kW, 5000 1/min), obrázek 30.

Obrázek 30: Časový záznam efektivního točivého momentu v průběhu měření.

Díky nedostatku kyslíku v palivové směsi nastala v záznamu oxidů dusíku opačná situace, tedy nedetekovatelné změny (obrázek 31). Naopak jako nejlépe

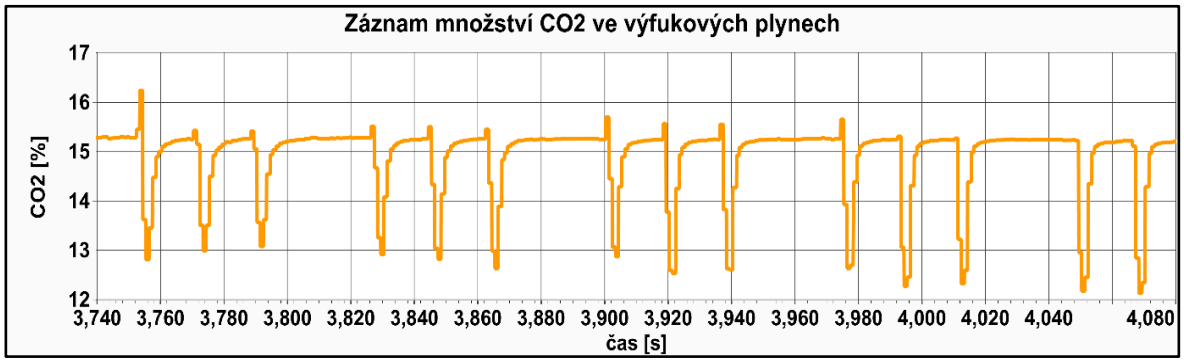
Obrázek 31: Časový záznam množství NO_x na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)

detekovatelná variace v záznamu se projevila hodnota poměrného množství oxidu uhelnatého, obrázek 32. Z hlediska automatizované detekce impulzů je ideální, když

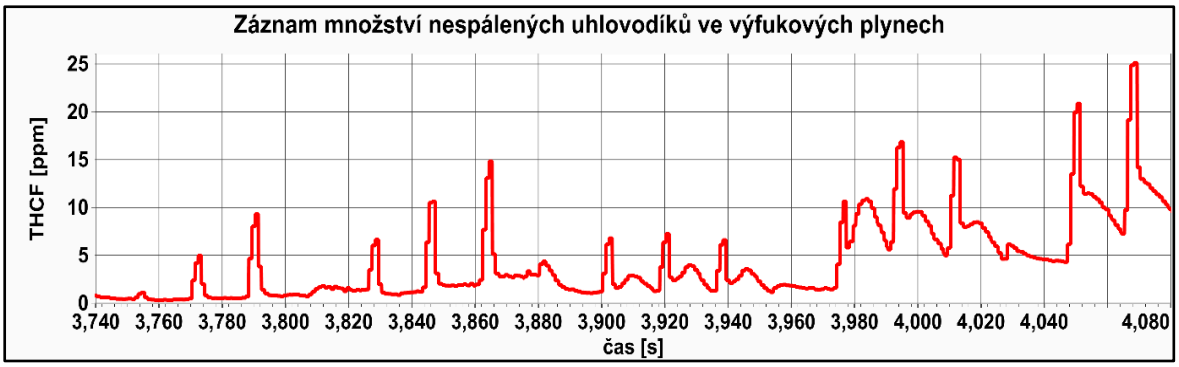


Obrázek 32: Časový záznam objemového podílu CO ve vysušených výfukových plynech na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)

se klidová hodnota blíží nule ve všech provozních režimech motoru. Velice příznivou vlastností je také téměř skoková změna signálu z klidové hodnoty a návrat na počáteční úroveň bez překmitu. Díky těmto vlastnostem byl ze všech analyzovaných signálů, pro zaznamenání emisního impulzu, vybrán právě záznam CO. Hodnoty pro ostatní emisní složky jsou na obrázcích 33 a 34.



Obrázek 33: Časový záznam objemového podílu CO_2 ve vysušených výfukových plynech na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)



Obrázek 34: Časový záznam množství THCF na konci výfukového vedení. (za tlumičem hluku)

5.3.3. **Automatizovaná detekce impulzů v záznamu CO**

Úplnou mapu zpoždění je možné vytvořit jen za pomocí měření zpoždění v rozsahu celé charakteristiky motoru. S tímto záměrem byla navržena následující síť (tabulka 16). V této tabulce jsou uvedeny určující provozní režimy motoru pro plánovaný test.

Tabulka 16: Provozní režimy motoru pro určení mapy zpoždění.

Otáčky [1/min] Moment [% maxima]	**1000**	**2000**	**3000**	**4000**	**5000**
20	t_{A1}	t_{A2}	t_{A3}	t_{A4}	t_{A5}
40	t_{A6}	t_{A7}	t_{A8}	t_{A9}	t_{A10}
60	t_{A11}	t_{A12}	t_{A13}	t_{A14}	t_{A15}
80	t_{A16}	t_{A17}	t_{A18}	t_{A19}	t_{A20}
100	t_{A21}	t_{A22}	t_{A23}	t_{A24}	t_{A25}

V každém z těchto provozních režimů je vytvořeno několik emisních impulzů, ze kterých je následně určena hodnota zpoždění pro daný hmotnostní tok palivové směsi. Takto naměřené hodnoty jsou poté proloženy aproximační funkcí, tak aby vznikla úplná funkce zpoždění. Pro praktické využití této metody je nutné celý postup zautomatizovat. Z těchto důvodů byl vytvořen následující program.

5.3.4. Program pro určení funkce zpoždění t_A

Pro vytvoření funkce zpoždění v závislosti na hmotnostním průtoku palivové směsi je nutné naměřit zpoždění v desítkách provozních režimů. Aby bylo možné tato měření efektivně vyhodnocovat, byl vytvořen specializovaný program. Ten zpracuje naměřené signály z emisních analyzátorů a vytvoří funkci zpoždění.

Vzhledem k dostupnosti programu na všech počítačích se standartním softwarovým vybavením (balíček Microsoft Office), bylo pro realizaci algoritmu zvoleno vývojové prostředí *Visual Basic for Applications* v programu *Microsoft Excel 2013.* To umožňuje vytvořit program pro zpracování dat a implementovat jej jako součást tabulkového procesoru *Microsoft Excel.* Software pracuje podle následujícího algoritmu v několika krocích.

Krok 1.

Po otevření programu pro korekci časových posunů v rozhraní Excel, v pracovním sešitě s názvem „Data_emisnich_impulzu“ se zobrazí sloupce pro vstupní data, obrázek 35. Po spuštění vyhodnocovacího algoritmu pomocí tlačítka na pracovní

CO	Otáčky motoru	Lambda	Okamžitá rychlost vozidla	Síla na válcích
[ppm]	[rpm]	[-]	[km/h]	[N]
-0,3007	0,0000	2,0000	0,00	-6,20
-0,3110	0,0000	2,0000	0,00	-6,20
-0,3174	0,0000	2,0000	0,00	-6,20
-0,3228	0,0000	2,0000	0,00	-6,20
-0,3290	0,0000	2,0000	0,00	-6,20
-0,3320	0,0000	2,0000	0,00	-6,20

Obrázek 35: Část protokolu z emisního testu na válcové zkušebně.

ploše, program nalezne potřebné sloupce dle jejich názvu. Dále program vyzve uživatele k zadání vzorkovací frekvence f_z, se kterou byly hodnoty emisí zaznamenány.

Krok 2.

Algoritmus nalezne nejkratší záznam mezi zmiňovanými signály, protože počet nasnímaných hodnot se pro jednotlivé signály může lišit.

Krok 3.

Program načte hodnoty signálů do proměnných typu pole. Délka těchto polí je dána délkou nejkratšího signálu. Používané záznamy veličin jsou v následující tabulce.

Tabulka 17: Popis používaných proměnných typu pole.

$Lambda_i$	Okamžitá hodnota nastavené řídící konstanty lambda [-]
CO_i	Okamžitá hodnota koncentrace CO [%]
$Otáčky_i$	Okamžitá hodnota otáček motoru [1/min]
$Rychlost_i$	Okamžitá rychlost vozidla [km/h]
$Síla_i$	Okamžitá síla na válcích [N]

Krok 4.

Pokud jsou v záznamech chybové hodnoty #N/A jsou nahrazeny nulou.

Krok 5.

Aplikace určí začátek a konec impulzů ve sloupci lambda ($zLambda(k)$ je začátek, $kLambda(k)$ je konec). Pořadí impulzu v záznamu je určeno proměnnou k. Impulz je pak detekován podle následujícího klíče, vztah 34, 35.

$$Když\ (\ Lambda_i > 0{,}9\ \Lambda\ Lambda_{i+1} < 0{,}85)\ pak\ (zLambda(k) = i) \tag{34}$$

$$Když\ (\ Lambda_i < 0{,}85\ \ \Lambda\ \ Lambda_{i+1} > 0{,}9)\ pak\ (kLambda(k) = i) \tag{35}$$

Na základě měření bylo zjištěno, že v záznamu hodnoty λ se mohou vyskytovat krátké úseky, které by mohly být nesprávně zaznamenány jako vytvořené impulzy. Ovšem tyto úseky jsou kratší než jedna sekunda a tak mohou být snadno vynechány následující podmínkou, vztah 36.

$$Když\ \left((kLambda(k) - zLambda(k)) < f_z\right)\ pak\ vynechat \tag{36}$$

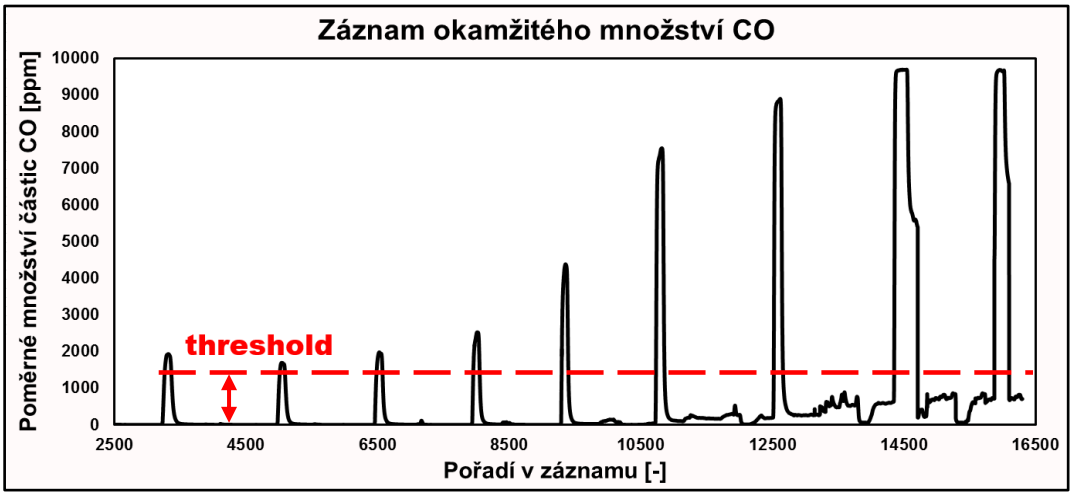
Další možností, díky které může dojít ke změně hodnoty lambda na velikost menší než 1, je obohacování směsi při vysokých zatíženích. Ovšem v těchto režimech lambda není menší než 0,95.

Krok 6.

Algoritmus připraví délku vyhodnocovacího okna (pojmenované $vOkno$), která je rovna čtyřem sekundám neboli čtyřnásobku vzorkovací frekvence.

Krok 7.

Aplikace vyzve k zadání hranice detekovatelnosti $threshold$ ppm. Té musí být přiřazena taková velikost, aby počet průsečíků přímky rovnoběžné s osou x ve vzdálenosti $threshold$ od osy x odpovídal dvojnásobku počtu emisních impulzů, obrázek 36. Zároveň musí vzniklé průsečíky náležet náběžným a úběžným hranám hledaných emisních impulzů.



Obrázek 36: Ukázka polohy hodnoty threshold. Průsečíky přímky threshold se signálem CO odpovídají náběžným a úběžným hranám vytvořených impulzů.

Krok 8.

Program uloží souřadnice x bodů průsečíků přímky $threshold$ se signálem CO. Pozice průsečíků je uložena do proměnné typu pole o dvou rozměrech. V této proměnné je uložena pozice bodu na ose x, číslo pořadí impulzu, poloha na vzestupné, nebo sestupné straně impulzu. Pozice průsečíku v záznamu je tedy uložena v následujícím tvaru, rovnice 37.

$$souřadnice\ Xp\ (pořadí\ impulzu\ k; vzestupná\ hrana = 1, sestupná = 2) \qquad (37)$$

Rovnice 38 ukazuje příklad záznamu souřadnice x=9121 průsečíku v pátém impulzu na náběžné hraně pulzu.

$$Xp(5;1) = 9121 \qquad (38)$$

Krok 9.

Software nalezne lokální maxima signálu CO. Intervaly hledání lokálních maxim jsou určeny pozicemi průsečíku z kroku 8. Například interval pro hledání maxima v impulzu číslo 5 je určen, rovnice 39.

$$\langle Xp(5;1);\ Xp(5;2)\rangle \qquad (39)$$

Krok 10.

Program nalezne a uloží souřadnici x bodů, kde hodnota signálu CO dosáhne desetiny lokálního maxima směrem doleva od lokálních maxim do proměnné $\mathrm{X}_{desetina}(\mathrm{k})$.

Krok 11.

Algoritmus určí souřadnici x referenčního bodu pro daný impulz v signálu CO. Souřadnice $\mathrm{X}_{ref}(\mathrm{k})$ je definována následujícím vztahem, rovnice 40.

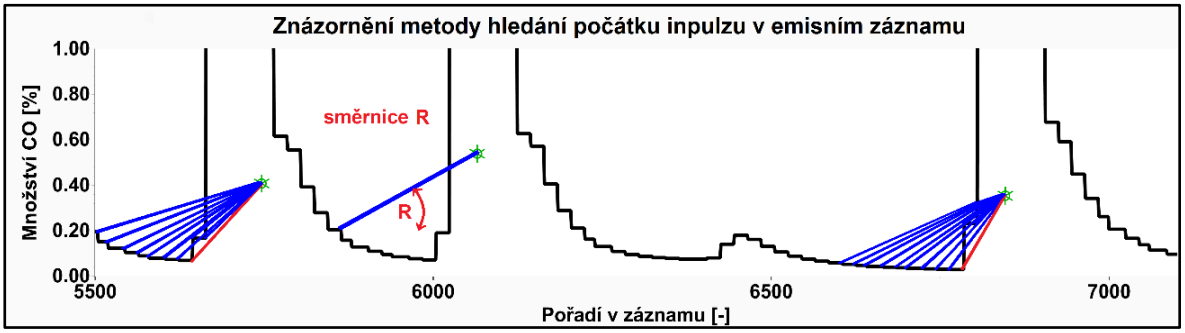
$$\mathrm{X}_{ref}(\mathrm{k}) = \mathrm{X}_{desetina}(\mathrm{k}) + 2 \cdot f_z \tag{40}$$

Krok 12.

Určí souřadnici y referenčního bodu pro daný impulz CO. Souřadnice $\mathrm{Y}_{ref}(\mathrm{k})$ je dána hodnotou 0,1 lokálního maxima.

Krok 13.

Algoritmus nalezne souřadnice začátků zaznamenaných impulzů v signálu CO podle následujícího postupu, ten byl inspirován článkem [12]. Mezi referenčním bodem a zkoumanými body signálu CO na intervalu $\langle X_{ref}(k) - vOkno; X_{ref}(k) - 1\rangle$ vytváří parametrické rovnice přímek. Program nalezne přímku s největší směrnicí, protože ta je dána referenčním bodem a bodem začátku impulzu CO. Poté uloží souřadnici x začátku daného impulzu do proměnné $XzCO(k)$. Grafická interpretace této operace je na obrázku 37.



Obrázek 37: Ukázka polohy referenčních bodů (zeleně) společně s vyznačenou porovnávací směrnicí R. Počátek impulzu náleží přímce s největší směrnicí (červeně).

Krok 14.

Program určí zpoždění pro daný impulz podle následujícího vztahu, rovnice 41.

$$Zpoždění(k) = \frac{(XzCO(k) - zLambda(k))}{f_z} \tag{41}$$

Krok 15.

Program spočítá průměrný hmotnostní průtok palivové směsi v intervalu mezi vytvořením a zachycením emisního impulzu, rovnice 42. Výpočet hmotnostního

$$\emptyset \dot{M} směsi(k) = \frac{\sum_{i=zLambda(k)}^{i=XzCO(k)} \dot{m}_i}{[XzCO(k) - zLambda(k)]} \tag{42}$$

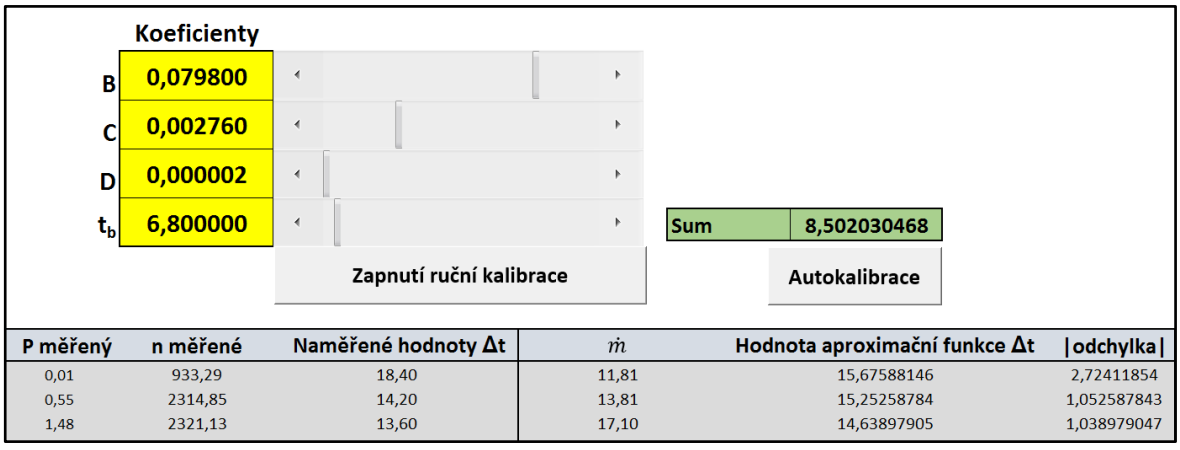
průtoku palivové směsi je popsán v kapitole 6.2.1. V této fázi jsou uloženy hodnoty zpoždění mezi impulzy v signálech lambda a CO společně s hodnotami průměrných průtoků na příslušných intervalech.

Krok 16

Body funkce zpoždění v závislosti na průtoku palivové směsi jsou aproximovány funkcí v rovnici 43.

$$\Delta t = \boldsymbol{t_B} + \frac{1}{\boldsymbol{B} + \boldsymbol{C} \cdot \dot{m} + \boldsymbol{D} \cdot \dot{m}^2} \tag{43}$$

Proměnná $\dot{m}$ je hmotnostním průtokem palivové směsi. Hodnota t_B je dána konstantním zpožděním analyzátoru a je pro každou emisní složku jiná. Způsob jejího určení je popsán v kapitole 5.5. Koeficienty B, C, D jsou nalezeny podle následujícího postupu.



P měřený	n měřené	Naměřené hodnoty Δt	$\dot{m}$	Hodnota aproximační funkce Δt	|odchylka|
0,01	933,29	18,40	11,81	15,67588146	2,72411854
0,55	2314,85	14,20	13,81	15,25258784	1,052587843
1,48	2321,13	13,60	17,10	14,63897905	1,038979047

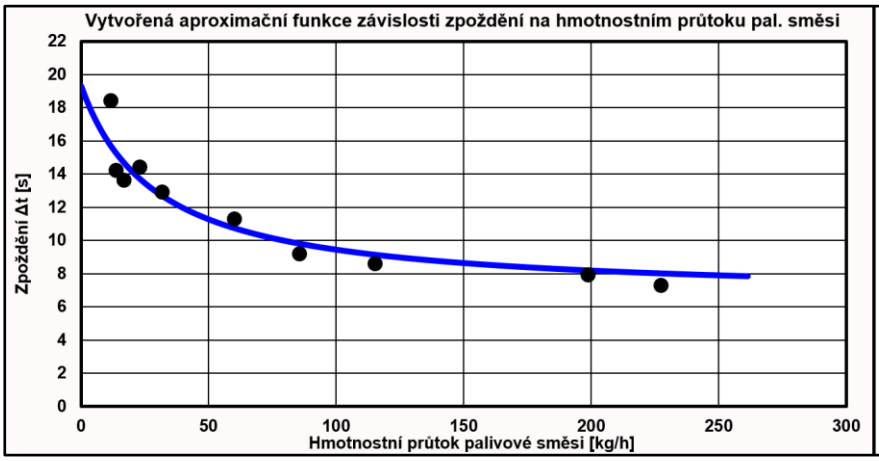
Obrázek 38: Obrázek pro popis určení funkce zpoždění. (Sloupce dat nejsou zobrazeny celé)

Na obrázku 38 jsou zobrazeny hodnoty, se kterými program pracuje. Je zde sloupec hmotnostního průtoku palivové směsi $\dot{m}$, jehož hodnoty byly určeny v kroku 15. Stanovení $\dot{m}$ na základě otáček a výkonu přenášeného na válce je popsáno v kapitole 6.2.1. Ve sloupci $Naměřené\ hodnoty\ \Delta t$ jsou změřené hodnoty zpoždění mezi impulzy (krok 14). Sloupec s názvem $Hodnota\ aproximační\ funkce\ \Delta t$

zobrazuje hodnoty získané dosazením proměnné $\dot{m}$ do rovnice 43, odchylky jsou vypočítány dle vztahu 44.

$$Odchylka = \sqrt{(\Delta t\ Měřené - \ \Delta t\ Vypočítané)^2} \tag{44}$$

Druhá část téhož okna v programu Excel je na obrázku 39. Hodnoty



X Vykreslovací	Y Vykreslovací
0,1	19,28813315
2	18,51948247
4	17,80448983
5,933333333	17,18999804
7,883333333	16,6345539
9,833333333	16,1341582
11,78333333	15,68101882
13,73333333	15,26874799
15,68333333	14,89205955
17,63333333	14,54654129
19,58333333	14,22848152
21,53333333	13,93473532
23,48333333	13,66262038
25,43333333	13,40983491
27,38333333	13,17439253
29,33333333	12,95456997
31,28333333	12,74886496
33,23333333	12,55596188

Obrázek 39: Obrázek pro popis určení funkce zpoždění. (Sloupce dat nejsou zobrazeny celé)

$X\ Vykreslovací$ jsou zvolené body na ose x, pro vykreslení a porovnání průběhu aproximační funkce s naměřenými hodnotami. Data $Y\ Vykreslovací$ jsou funkčními hodnotami aproximační funkce v bodech $X\ Vykreslovací$.

V buňce označené jako Sum (obrázek 38) je zapsána suma odchylek. Hledané koeficienty ze vztahu 43 jsou označeny žlutou barvou. Pro nalezení koeficientů B, C, D je využita funkce $Solver$, která je implementována do programu Microsoft *Excel.* V této funkci byl nastaven řešič $GDR\ Nonlinear$. Ten je založen na algoritmu, který byl popsán Leon S. Lasdonem [7]. Program variuje koeficienty B, C, D v rozmezí nastavených intervalů tak, aby suma kvadrátů odchylek byla co nejmenší. Algoritmus začíná výpočet od zadaných počátečních hodnot, ty je možné měnit posuvníky. Zvolené intervaly koeficientů jsou v následující tabulce 18.

Tabulka 18: Intervaly ve kterých řešič hledá nejvhodnější hodnoty koeficientů.

t_B	Známý z kapitoly 5.2	C	$\langle 0; 0{,}1 \rangle$
B	$\langle 0; 2 \rangle$	D	$\langle 0; 0{,}01 \rangle$

Krok 17

Hodnoty koeficientů pro aproximační funkci (rovnice 43) jsou uloženy a dále využívány při stanovování časového posunu pro každý bod záznamu emisí (kapitola 5.4).

5.4. Použití funkce zpoždění t_A

Myšlenka vytvoření funkce zpoždění na základě emisních impulzů vznikla z potřeby eliminovat analyticky těžce postihnutelné veličiny (změna průřezu a členitosti výfukového potrubí, změna teploty výfukových plynů a další…). Aplikace této funkce vychází z následujících vztahů.

První rovnicí je obecný vztah pro výpočet dráhy na základě rychlosti, tedy rovnice 45.

$$L = \int_0^{t_A} v_e \cdot dt \tag{45}$$

Proměnná L_e náleží ekvivalentní délce výfukového vedení do místa ředění [m], t_A času proměnného zpoždění [s], v_e ekvivalentní rychlosti výfukových plynů [m/s]. Z tohoto vztahu lze přejít na rovnici 46,

$$L = \int_0^{t_A} k_e \cdot \dot{m} \cdot dt \tag{46}$$

kde je rychlost nahrazena hmotnostním průtokem výfukových plynů $\dot{m}$ [kg/s] a proměnnou k [m/kg]. Ta zastupuje ekvivalentní průřez a hustotu, rovnice 47.

$$k_e = \frac{1}{S_e \cdot \rho_e} \tag{47}$$

Dalším nezbytným krokem je tedy stanovení funkce k. Pro nalezení řešení je možné využít případ z měření emisních impulzů, tedy s konstantním hmotnostním tokem $\dot{M}$ [kg/s], známým zpožděním pro tento průtok $\Delta\tau$ [s], konstantní hodnotou funkce $k_e = K$ [m/kg] a délkou výfukového vedení k místu ředění L [m], rovnice 48.

$$L = K_e \cdot \dot{M} \cdot t_A \tag{48}$$

Kde t_A je proměnná část zpoždění a lze ji vyjádřit v rovnici 49.

$$t_A = \Delta\tau - t_B \tag{49}$$

Je zřejmé, že ze vztahu 48 lze snadno vyjádřit hledanou neznámou K, rovnice 50.

$$K_e = \frac{L}{\dot{M} \cdot t_A} \tag{50}$$

Konstanta K je tedy závislá na hmotnostním průtoku palivové směsi, a při uvažování neustáleného provozního stavu motoru se stává funkcí, rovnice 51.

$$k_e = \frac{L}{\dot{m} \cdot \left(\frac{1}{B + C \cdot \dot{m} + D \cdot \dot{m}^2}\right)} \tag{51}$$

S takto připravenou závislostí je možné začít řešit samotné posouvání průběhů zaznamenaných emisí v závislosti na hmotnostním průtoku palivové směsi během měření. Doba, za kterou daný objem výfukového plynu dorazí do místa ředění je odvozena ze vztahu 46. Ten při dosazení za k_e nabývá tvaru, rovnice 52.

$$1 = \int_0^{t_A} (B + C \cdot \dot{m} + D \cdot \dot{m}^2) dt \tag{52}$$

Získaný vztah je poté zdiskretizován, pro použití na nasnímaném záznamu do tvaru rovnice 53.

$$1 = \sum_{i=g}^{i=g+h} (B + C \cdot \dot{m} + D \cdot \dot{m}^2) \cdot \frac{1}{f_z} \tag{53}$$

Proměnné g, $g + h$ jsou polohy na ose x v záznamu CO. Z tohoto vztahu lze dále odvodit algoritmus, pomocí něhož se určí časové zpoždění pro danou hodnotu v záznamu emisí, rovnice 54. Tento popis vyjadřuje sčítání součinu veličin z rovnice

$$Suma = Suma + \left((B + C \cdot \dot{m} + D \cdot \dot{m}^2) \cdot \frac{1}{f_z}\right) dokud\ (Suma \leq 1\ ) \tag{54}$$

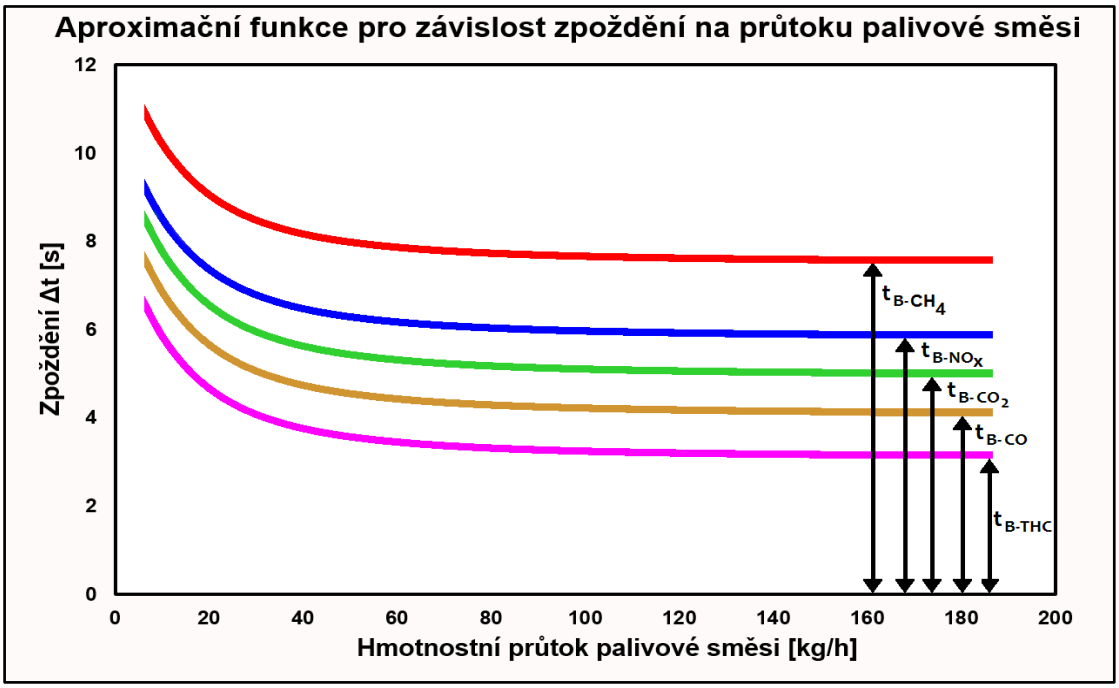
53, dokud není tento součin roven 1. Počet opakování kroků v rovnici 54 je roven právě číslu h. Proměnné časové zpoždění zaznamenané emisní veličiny je pak rovno vztahu 55.

$$t_A = \frac{h}{f_z}\ [s] \tag{55}$$

5.5. Hodnota zpoždění t_B

Konstantní část časového posunu mezi změnou provozního režimu motoru a jejím zaznamenáním na emisních analyzátorech je nezávislá na provozních podmínkách a parametrech motoru. Toto zpoždění je spojené s technologií, kterou daný analyzátor využívá. Principy vyhodnocovacích zařízení byly popsány v kapitole 4 a také bylo ukázáno, že pro každou sledovanou emisní veličinu je využito jiného postupu. To vede k rozdílným zpožděním pro každou zaznamenávanou složku emisí.

Celkové zpoždění libovolné emisní veličiny je závislé na hmotnostním průtoku palivové směsi. Hodnota tohoto zpoždění bude s rostoucím průtokem palivové směsi klesat, až k hodnotě konstantního zpoždění t_B, která je na hmotnostním průtoku palivové směsi motorem nezávislá, na rozdíl od času t_A (obrázek 16). Předpokládaný průběh zpoždění emisních analyzátorů v závislosti na hmotnostním průtoku palivové směsi je vykreslen na obrázku 40.



Obrázek 40: Předpokládané průběhy zpoždění emisních analyzátorů v závislosti na hmotnostním průtoku palivové směsi společně s vyznačenými hodnotami konstantních zpoždění analyzátorů.

Hodnoty těchto zpoždění jsou vlastnostmi analyzátorů, proto je lze použít pro všechna následující měření nezávisle na typu motoru a konfiguraci výfuku.

5.6. Experimentální určení hodnot zpoždění t_B

Hodnota konstantního zpoždění t_B je dána konfigurací vyhodnocovacího systému emisí za místem ředění. Tato konfigurace se při emisních zkouškách nemění, proto stačí hodnoty t_B určit pouze jednou a je možné je používat pro libovolná měření na dané válcové zkušebně. Změna zpoždění t_B během měření může nastat pouze v případě, že dojde ke změně ředícího faktoru. Ředící faktor je vstupní hodnota v nastavení emisního testu. Tento faktor přísluší Venturiho dýze o určitém průměru a během testu je možné mezi jednotlivými dýzami přepínat, při změnách fáze testu, právě na základě ředícího faktoru. Tím se mění kritický průřez dýzy a spolu s ním i hodnota množství přisávaného vzduchu do ředícího tunelu emisního vyhodnocovacího zařízení. Hodnota ředícího faktoru se dle aktuálního nastavení mění při přechodu mezi rychlostními úseky během emisního testu (rychlostní úseky emisního testu, obrázek 5), tak aby koncentrace emisních plynů nepřekročily v naředěném objemu výrobcem doporučovanou mez. Ovšem tato změna výrazně komplikuje analýzu emisních záznamů, neboť se skokově mění i zpoždění těchto signálů. Proto stojí za uvážení možnost nastavení konstantního ředícího faktoru pro celý test, i za cenu mírného odchýlení od doporučovaného postupu. Tuto možnost nastavení zřejmě využívají jiná válcová stanoviště v rámci koncernu WV, konkrétně hodnotu ředícího faktoru 5 pro celý test.

Pro určování hodnot konstantních zpoždění jednotlivých analyzátorů bylo navrženo několik postupů. Počáteční návrhy byly založeny na vytvoření skokové změny ve složení emisí v místě ředění (místo W na obrázku 15) a následnou identifikací této změny v záznamu emisí, společně s nalezením času vytvoření této změny v signálu s okamžitou odezvou. Při vytváření funkce zpoždění t_A je signálem s okamžitou odezvou záznam hodnoty lambda. Ten je ovšem vztažen k počátku výfukového vedení (motoru). Při hledání hodnoty zpoždění t_B bylo nutné mít takový signál z místa ředění W. To ovšem znamenalo technický problém, protože jedinými přidanými kanály v záznamech emisí mohla být data z rozhraní OBD II. Tyto podmínky vedly ke specifickým návrhům řešení dané situace.

První variantou řešení byl záznam tlaku výfukových plynů ve vedení těsně před místem W prostřednictvím tlakového čidla připojeného do řídící jednotky vozidla a následný přenos signálu do záznamu emisních analyzátorů prostřednictvím OBD II. Při odpojení zdroje emisí mělo dojít k poklesu tlaku v místě W a následnému snížení koncentrací emisí v záznamu. Tento způsob určování hodnoty t_B se ovšem ukázal jako nespolehlivý, vzhledem k těžce rozpoznatelným tlakovým rozdílům před místem W.

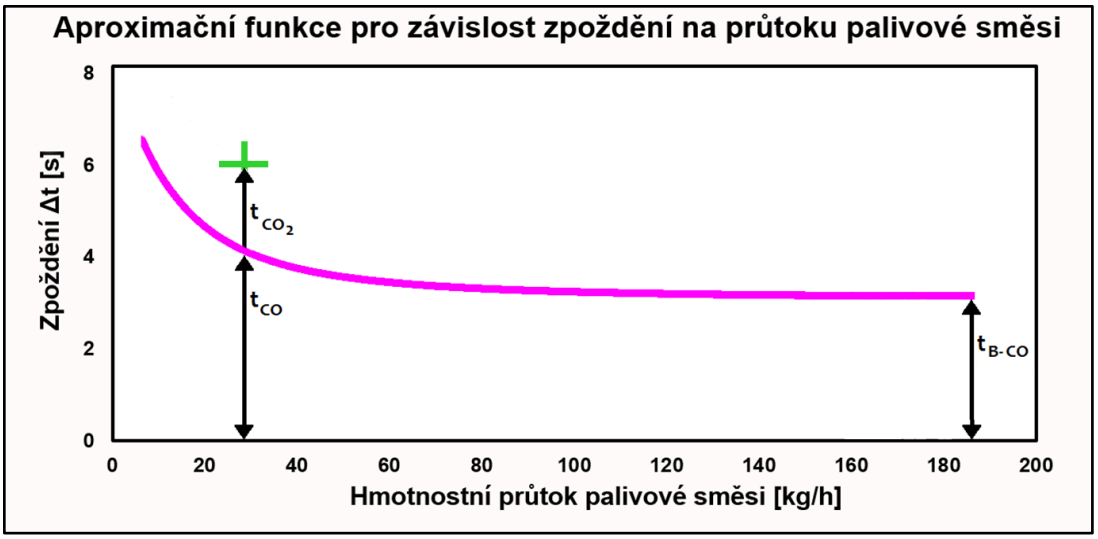
Druhou ideou bylo přivedení emisního plynu do místa ředění W ze zdroje ovládaného řídícím signálem z vozidla. Tento signál měl ovládat ventil na zdroji emisního plynu a zároveň být závislý na provozním stavu světlometů vozidla. Při rozsvícení světlometů mělo dojít k otevření ventilu a zároveň měla být tato změna zaznamenána jako pokles napětí v palubní síti vozidla. Tento pokles by byl rozpoznatelný v záznamu napětí v palubní síti ukládaného prostřednictvím OBD II. Zmínění způsob řešení nebyl vzhledem k omezenému časovému fondu zkušebny realizován.

Pro určení konstantních hodnot zpoždění t_B bylo nakonec využito výsledků z určování funkce zpoždění t_A, s využitím postupu v následující kapitole. Tento postup mohl být navržen až v závislosti na výsledcích z měření, která stanovovala funkci t_A. Tyto výsledky ještě nebyly v době předchozích dvou návrhů známé.

5.6.1. Hodnoty zpoždění t_B na válcové zkušebně

Navržený postup určování hodnot t_B pro jednotlivé emisní složky vychází z předpokladu, že tvar funkce zpoždění Δt je pro zkoumané plyny stejný, pouze posunutý o konstantní hodnotu t_B ve směru osy y. Tento předpoklad je založen na úvaze o pohybu výfukových plynů ve výfukovém potrubí, ve kterém všechny složky emisních plynů postupují stejnou rychlostí a dokonale promísené. Proto by měla mít funkce proměnného zpoždění t_A stejný tvar pro všechny emisní složky (obrázek 39).

Při tomto předpokladu stačí určit křivku zpoždění Δt pro snadno detekovatelný CO, pomocí emisních impulzů, jako v případě sestavování funkce t_A. Poté určit jediný bod na křivce zpoždění pro požadovanou emisní složku výfukových plynů (obrázek 41). Tento bod je určený časovým zpožděním jednoho impulzu a



Obrázek 41: Ilustrativní obrázek pro metodu určování konstantního zpoždění pro další emisní složky.

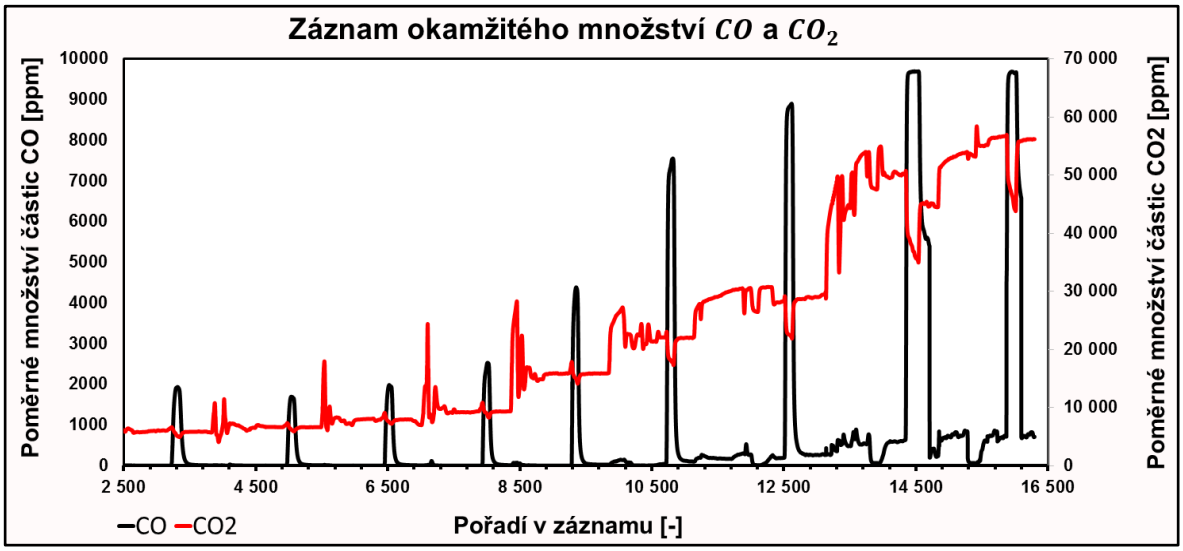
příslušným hmotnostním průtokem palivové směsi pro daný impulz. Konstantní zpoždění t_B pro další emisní plyny je pak dáno vztahem 56 (Ukázka pro konkrétní případ t_{B-CO_2}).

$$t_{B-CO_2} = t_{B-CO} + (t_{CO_2} - t_{CO}) \tag{56}$$

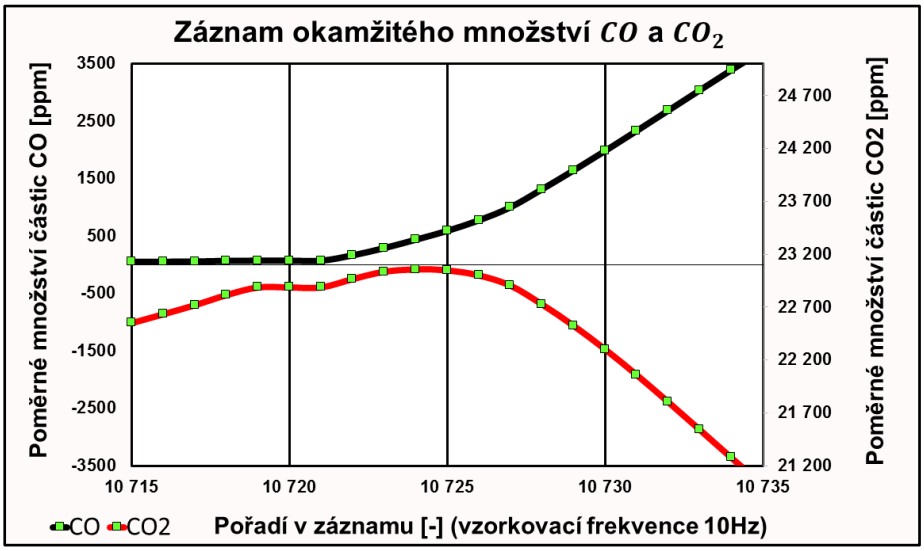
Čas konstantního zpoždění t_{B-CO} pro válcovou zkušebnu byl určen metodou emisních impulzů, jeho hodnota je 6,8 s. Vzhledem k této hodnotě jsou na následujících stránkách vztaženy časy t_B pro ostatní emisní složky výfukových plynů.

Hodnota t_B pro CO_2

Při zkoumání časového posunu pro emisní složku CO_2 se ukázalo, že časové zpoždění jejího záznamu je téměř totožné ze signálem CO. Při obohacení palivové směsi dochází na obou signálech ke skokovému promítnutí nové rovnováhy poměru CO a CO_2, proto nebyl postup popsaný v kapitole 5.6.1 použit. Tento poznatek je ilustrován na obrázcích 42, 43. Na obrázku 43 je vidět opoždění



Obrázek 42: Záznam okamžitého množství CO a CO_2 ve vysušeném vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.



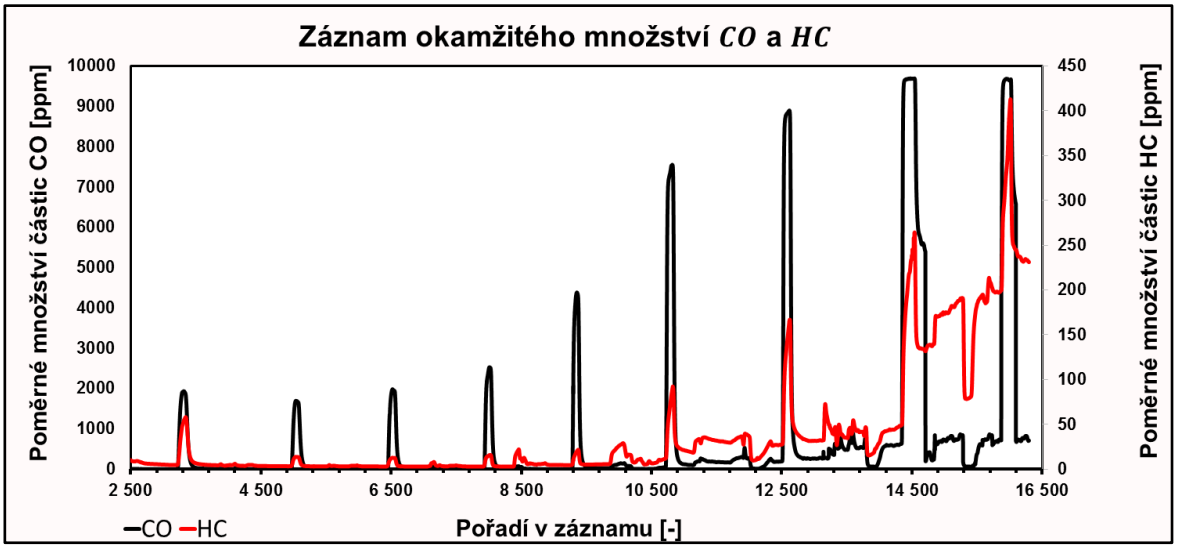
Obrázek 43: Graf s naměřenými body na záznamech CO a CO_2 ve vysušeném vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.

reakce analyzátoru CO_2 oproti CO, které je 0,3 s. Z naměřených dat tedy vychází, že konstantní části zpoždění analyzátorů CO a CO_2 jsou téměř totožné, vztah 57.

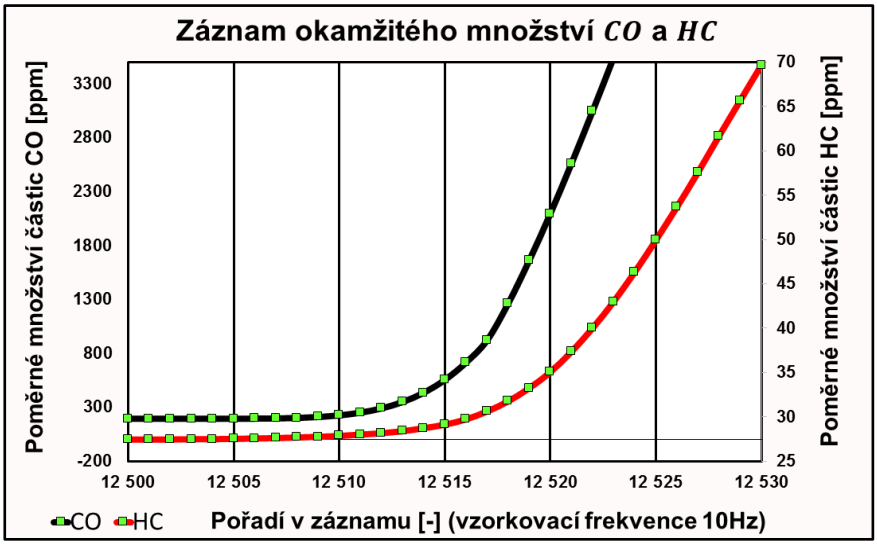
$$t_{B-CO_2} = t_{B-CO} \tag{57}$$

Hodnota t_B pro HC

Zpoždění analyzátoru uhlovodíků ve výfukových plynech se ukázalo jako rovné zpoždění analyzátoru CO. Tento výsledek je zřejmý z obrázku 44 a v detailnějším pohledu na obrázku 45. Jak bylo popsáno v kapitole 4, analyzátor



Obrázek 44: Záznam okamžitého množství CO a HC ve vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.



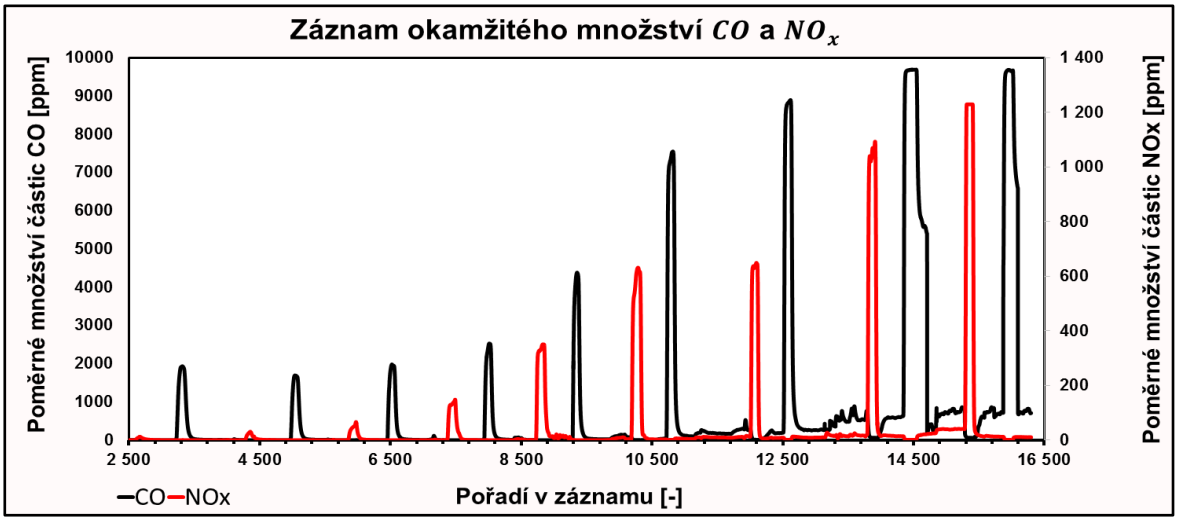
Obrázek 45: Graf s naměřenými body v záznamech CO a HC ve vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.

uhlovodíků využívá jiného principu fungování než analyzátor CO, proto je zmíněný výsledek neočekávaným faktem. Toto nepředpokládané zjištění je zřejmě zapříčiněno korekcí signálů již v rámci analyzátoru. Závěrem toho měření je rovnice 58.

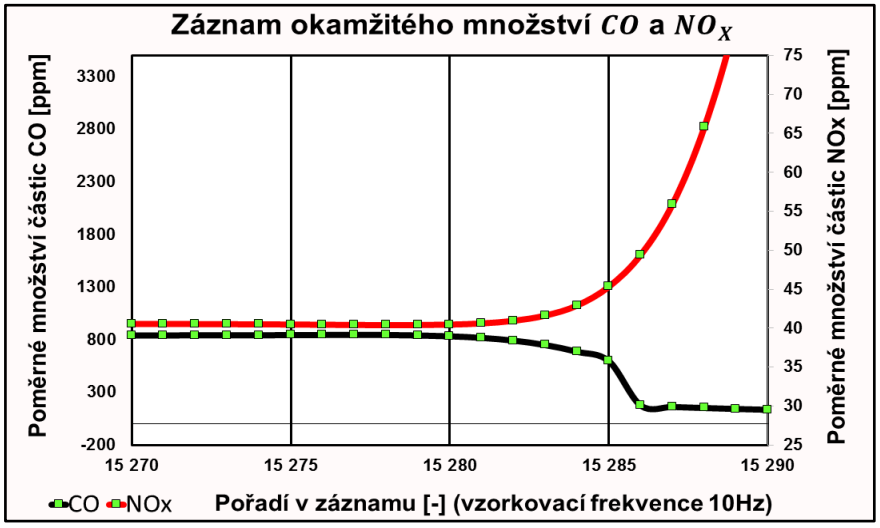
$$t_{B-HC} = t_{B-CO} \tag{58}$$

Hodnota t_B pro NO_x

Zpoždění analyzátoru oxidů dusíku ve výfukových plynech bylo naměřeno jako rovné zpoždění analyzátoru CO. Tento výsledek je ukázán na obrázku 46 a v detailnějším pohledu na obrázku 47.



Obrázek 46: Záznam okamžitého množství CO a NO_X ve vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.



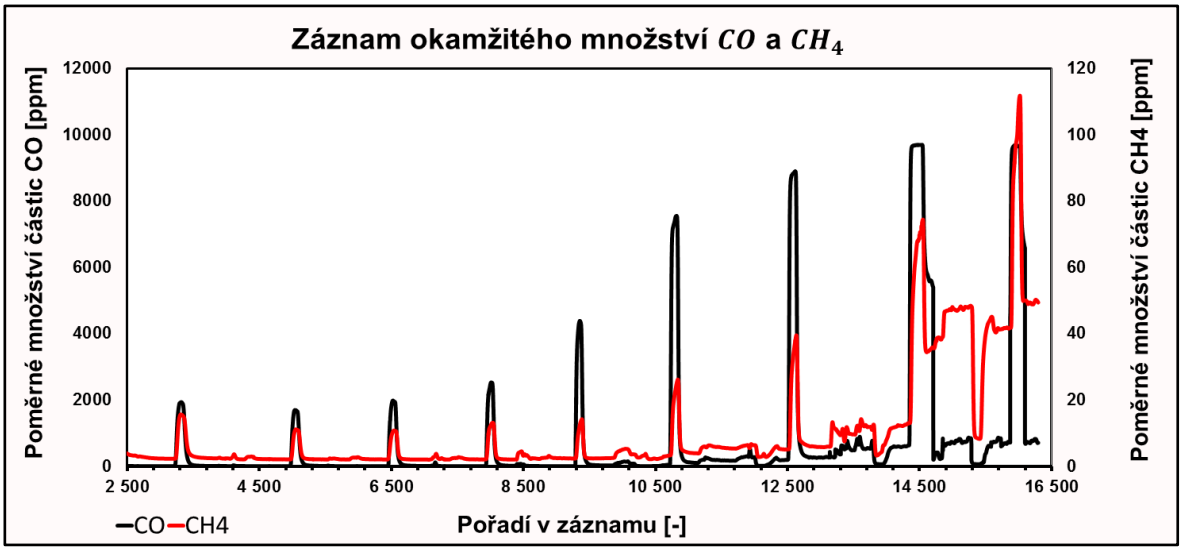
Obrázek 47: Graf s naměřenými body v záznamech CO a NO_X ve vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.

Tento fakt má zřejmě stejnou příčinu jako v případě analyzátoru HC, tedy korekci odezvy analyzátoru již v rámci vyhodnocovacího zařízení. Závěr je taktéž shodný, rovnice 59.

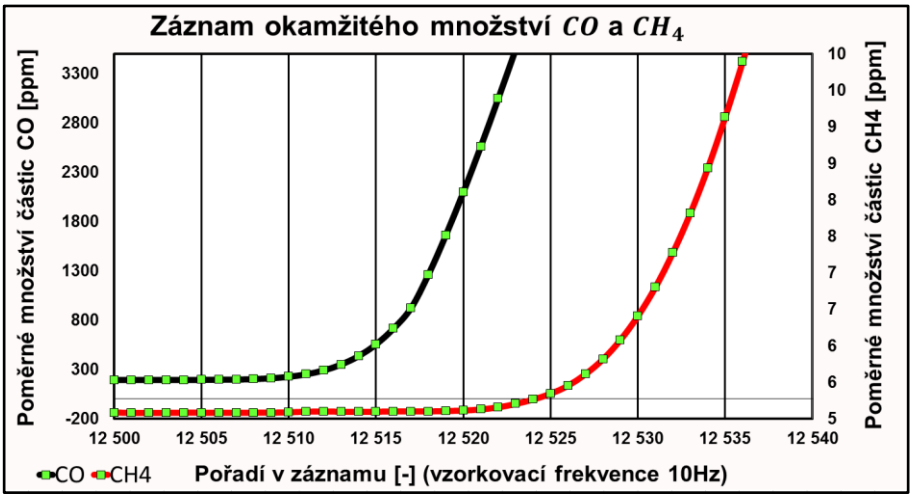
$$t_{B-NOx} = t_{B-CO} \tag{59}$$

Hodnota t_B pro CH_4

Zpoždění analyzátoru metanu ve výfukových plynech bylo naměřeno jako rozdílné, oproti zpoždění analyzátoru CO. Tento výsledek je ukázán na obrázku 48 a v detailnějším pohledu na obrázku 49. Nabité zjištění je vzhledem k předešlým



Obrázek 48: Záznam okamžitého množství CO a HC ve vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.



Obrázek 49: Graf s naměřenými body v záznamech CO a HC ve vzorku emisních plynů na válcové zkušebně.

záznamům, ve kterých se hodnoty zpoždění jednotlivých složek emisních plynů rovnají, překvapivým zjištěním. Závěrem pro zpoždění metanu je tedy rovnice 60.

$$t_{B-CH_4} = t_{B-CO} + 1 \tag{60}$$

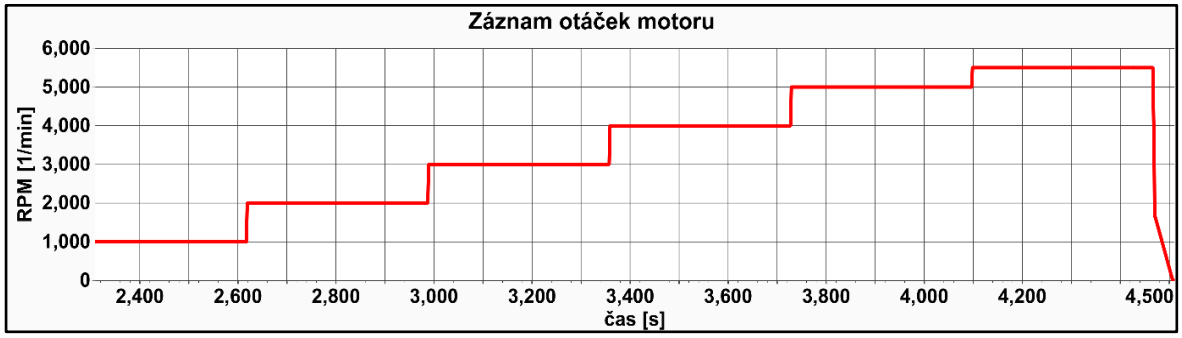
6. Aplikace metody korekce časového zpoždění

Navržený postup korekce proměnného časového zpoždění záznamů z emisních analyzátorů byl vyvíjen a zlepšován v závislosti na poznatcích z měření, které poskytovalo okamžitou zpětnou vazbu o správnosti. Zejména programová část vyžadovala opakované testování, tak aby byl program použitelný i bez hlubší znalosti jeho fungování. Velká snaha byla také vynaložena na to, aby měl výsledný kód programu srozumitelnou formu a byl snadno modifikovatelný dalšími uživateli.

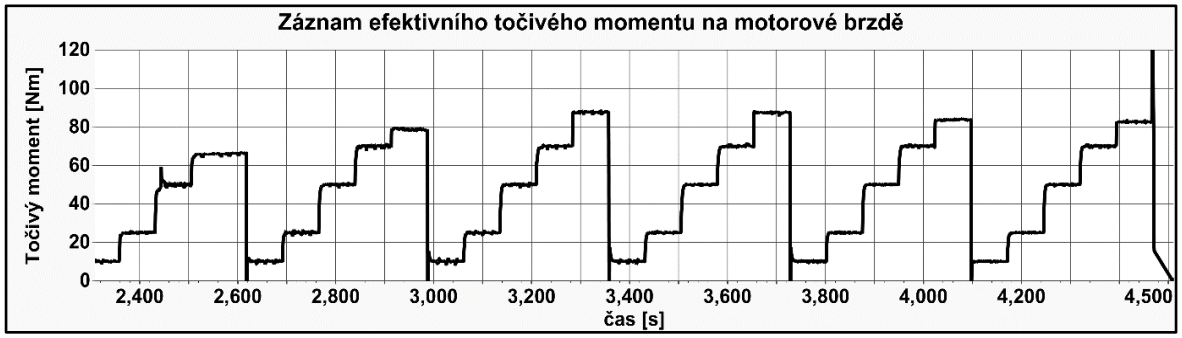
6.1. Korekce záznamu emisí CO na motorové brzdě

Během tvorby programu bylo nezbytné navržené postupy ověřovat. Díky časové dostupnosti a široké škále měřených veličin bylo provedeno několik dílčích měření na motorové zkušebně. Hlavním experimentem na tomto stanovišti bylo stanovení časové korekce zpoždění na základě emisních impulzů vytvořených pro úplnou charakteristiku motoru. Tento pokus byl proveden na zážehovém motoru o zdvihovém objemu 1,0L MPI. Na následujících obrázcích je ukázán záznam základních veličin v průběhu testu.

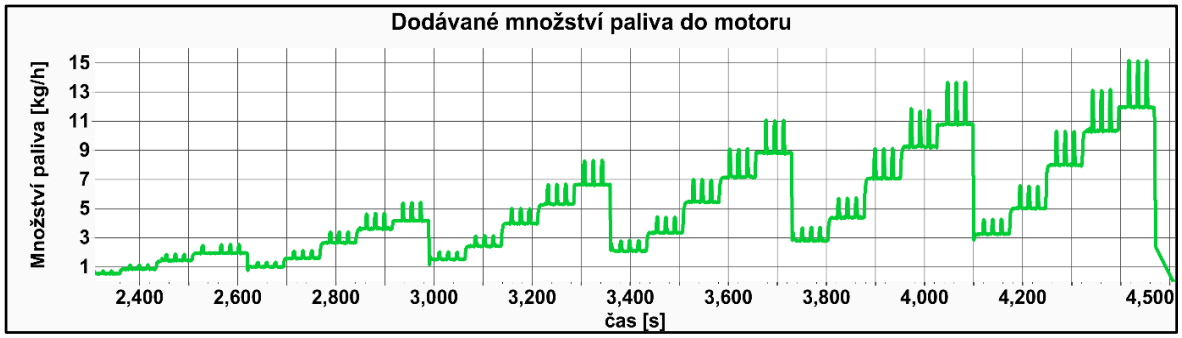
Jak je patrné z grafů, měření probíhalo v 30 provozních režimech. Ovšem v prvním úseku záznamu točivého momentu (obrázek 51) jsou zdánlivě jen čtyři



Obrázek 50: Časový záznam otáček motoru během tvorby funkce zpoždění.



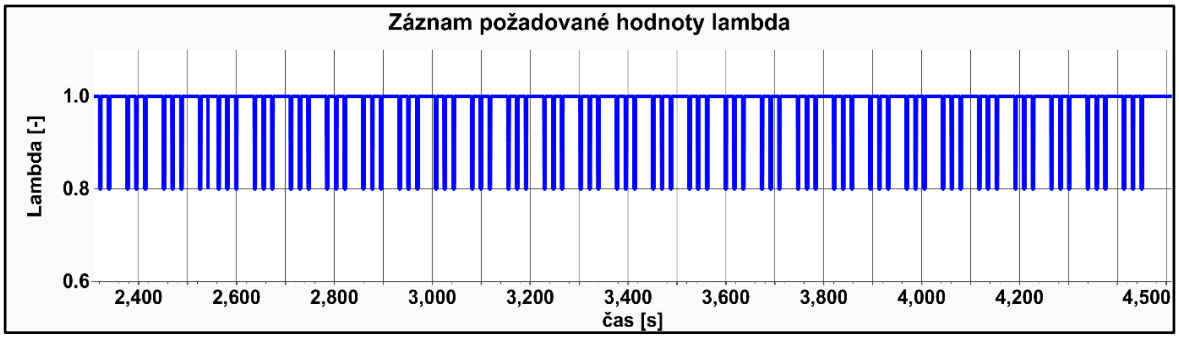
Obrázek 51: Časový záznam točivého momentu motoru během tvorby funkce zpoždění.



Obrázek 52: Časový záznam dodávaného množství paliva během tvorby funkce zpoždění.

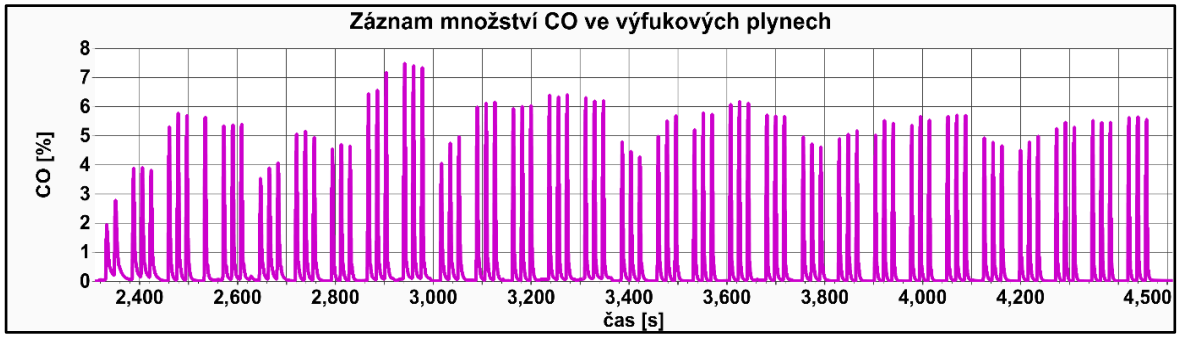
nastavení. To je dáno tím, že maximální točivý moment při tisíci otáčkách za minutu je omezen hodnotou 68 Nm, která je jeho konstrukčním maximem. V těchto

nastaveních byly vytvářeny emisní impulzy pomocí změny regulační konstanty lambda. Každá změna (impulz) trvala tři sekundy a byla prováděna směrem do oblasti bohatých směsí. Požadované hodnoty lambda jsou zaznamenány na obrázku 53. Skokové změny této konstanty jsou zřejmé i na průběhu funkce dodávaného množství paliva, obrázek 52.



Obrázek 53: Časový záznam signálu požadované hodnoty lambda.

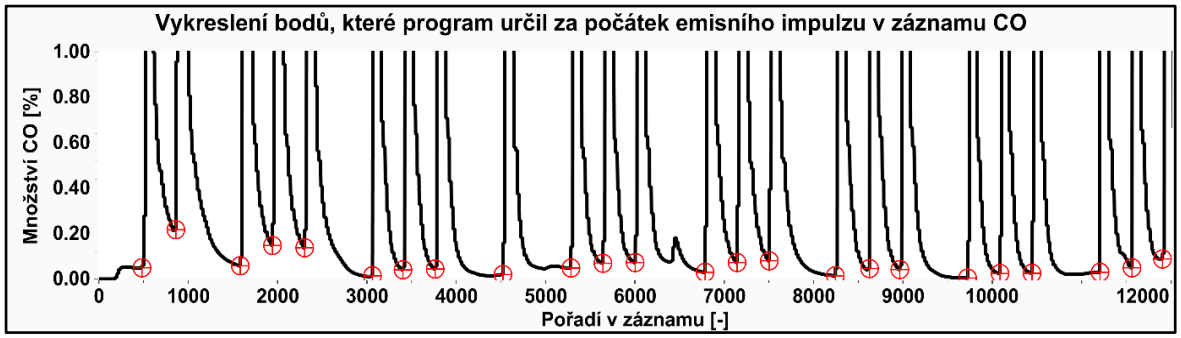
Díky vhodně zvolenému způsobu vyvolání emisního impulzu (změna λ na 0,8) a současně výběru CO jako detekčního plynu byly všechny skokové změny v bohatosti palivové směsi zřetelně zaznamenány, obrázek 54.



Obrázek 54: Časový záznam poměrného množství CO ve vysušených výfukových plynech, měřeno na konci sériového výfukového vedení (za tlumičem hluku).

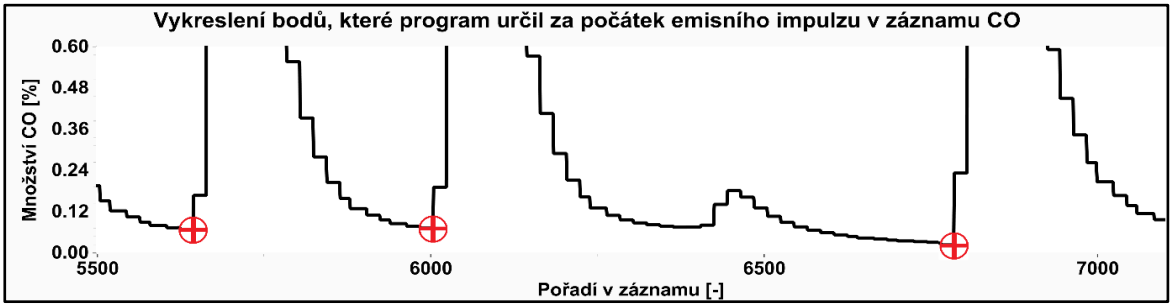
Celkem bylo vytvořeno 87 skokových změn hodnoty lambda, z nichž byly všechny zaznamenány vytvořeným programem.

Úspěšné stanovení počtu impulzů je jen dílčím úkolem celého programu. Ovšem stěžejní částí je detekce počátků emisních impulzů. V případě záznamu požadované hodnoty lambda (obrázek 53) je automatická detekce impulzů triviální záležitostí. Na druhé straně analýza v záznamu CO je výrazně složitější a vyžaduje aplikaci metody největší směrnice popsané v kapitole 5.3.4. Pomocí tohoto postupu je dosaženo vynikající přesnosti. Body odpovídající souřadnicím x, které byly určeny za počátky impulzů, jsou na následujících grafech.

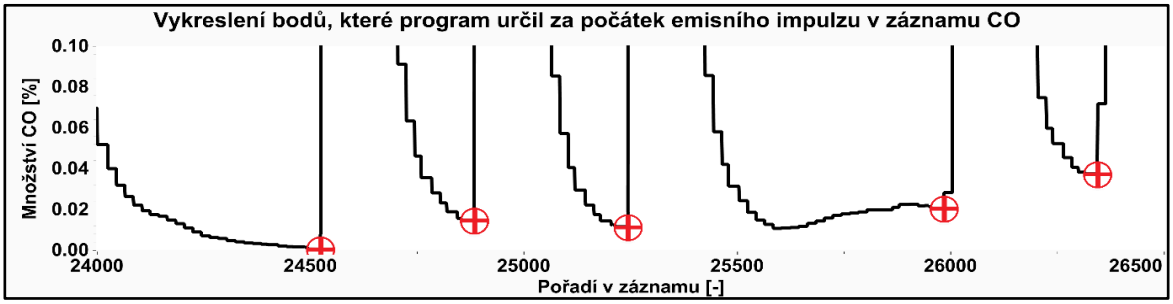


Obrázek 55: Výřez ze záznamu poměrného množství CO ve vysušených výfukových plynech, měřeno na konci sériového výfukového vedení (za tlumičem hluku), a automaticky určených počátků emisních impulzů.

Jak je vidět na obrázku 55, program úspěšně vynechal špičku v oblasti okolo vzorku číslo 6500. Dále také správně určil počátky impulzů v místech, kde signál nezačíná z nulové hodnoty a to zejména v oblasti kroku 0 až 3000. Při detailnější kontrole správnosti určení počátků emisních impulzů bylo vytvořeno několik zvětšených pohledů, mezi nimi byly grafy 56 a 57.



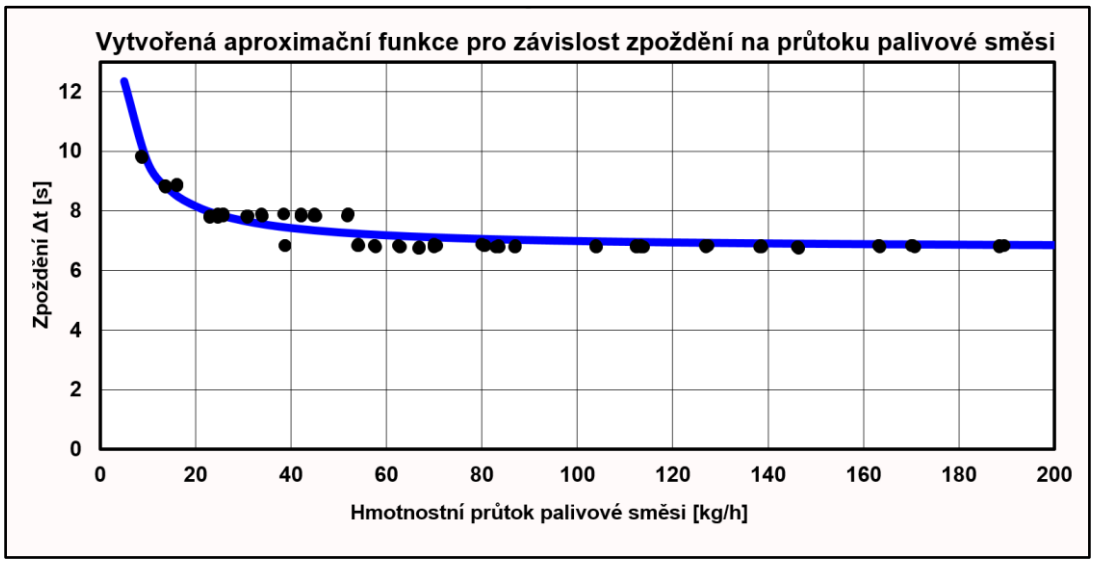
Obrázek 56: Výřez ze záznamu poměrného množství CO ve vysušených výfukových plynech, společně s určenými počátky. Měřeno na konci sériového výfukového vedení (za tlumičem hluku).



Obrázek 57: Výřez ze záznamu poměrného množství CO ve vysušených výfukových plynech, společně s určenými počátky. Měřeno na konci sériového výfukového vedení (za tlumičem hluku).

Z těchto grafů je patrné, že metoda určování počátků emisních impulzů (kapitola 5.3.4) pracuje s přesností, která je omezena vzorkovací frekvencí signálu. Algoritmus tedy pracuje správně a metoda je efektivní.

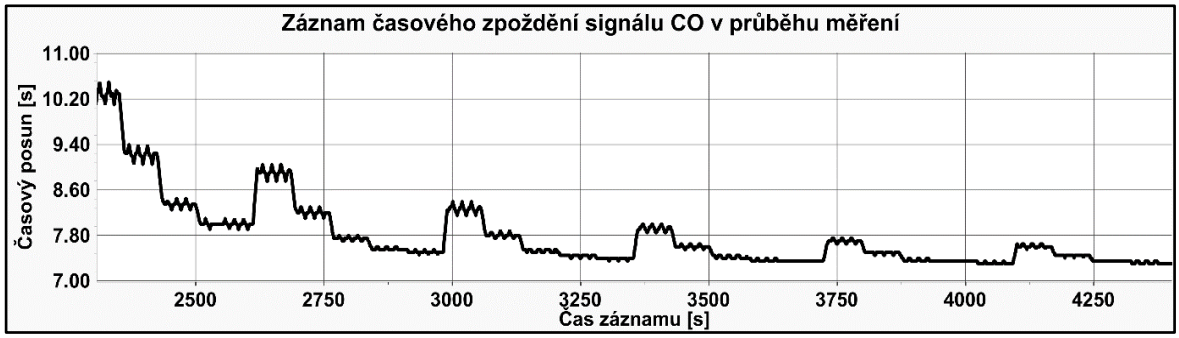
Po úspěšné identifikaci emisních impulzů v záznamech hodnot λ a CO byly vypočítány časy zpoždění mezi těmito impulzy. Poté byl k těmto časům přiřazen průměrný hmotnostní průtok palivové směsi v příslušných intervalech (krok 15 v kapitole 5.3.4). Hodnoty zpoždění pro konkrétní hmotnostní průtok jsou na obrázku 58 vyznačené jako černé body. Vzorkovací frekvence naměřených signálů



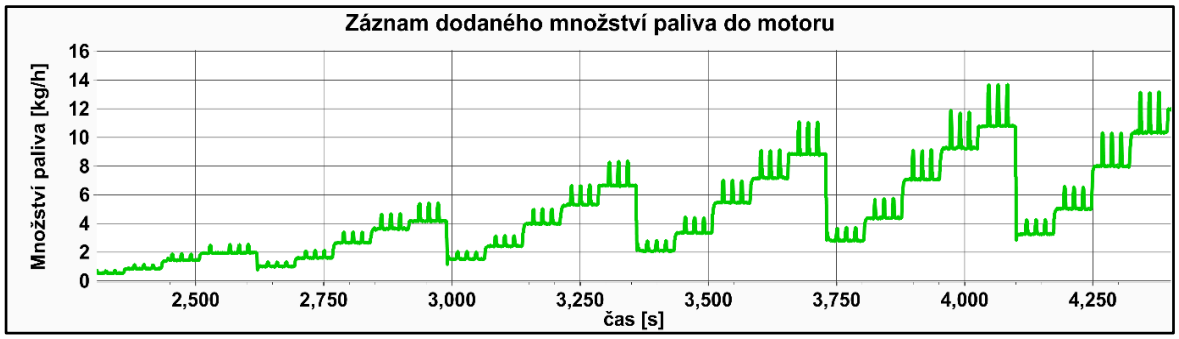
Obrázek 58: Průběh aproximační funkce zpoždění v programu Microsoft Excel. Černé body jsou naměřené hodnoty zpoždění, modře je znázorněna aproximační funkce.

byla omezena možnostmi testovacího stanoviště na 1Hz. I přes tuto komplikaci je závislost zpoždění na hmotnostním průtoku zřejmá a odpovídá tvaru navržené funkce, která je zapsána rovnicí 43. Po určení koeficientů této funkce pomocí postupu v kroku 16 v kapitole 5.3.4 byla odvozená závislost vykreslena (modře) společně s naměřenými hodnotami (černě).

Výsledný průběh časového zpoždění, získaného aplikací metody korekce časového posunu, v závislosti na čase zkoušky je na následujícím obrázku, obr. 59. Společně s grafem zpoždění je vykreslen i záznam množství dodaného paliva do



Obrázek 59: Záznam určeného časového zpoždění v závislosti na průběhu zkoušky.



Obrázek 60: Časový záznam dodávaného množství paliva během tvorby funkce zpoždění.

motoru (obr. 60). Výsledek odpovídá předpokladu snižování doby zpoždění se zvyšujícím se množstvím spálené palivové směsi. Na obrázku číslo 59 je patrný asymptotický průběh funkce zpoždění, jejíž funkční hodnota se přibližuje k sedmi sekundám, které jsou hodnotou konstantního zpoždění.

Pro ověření správnosti výsledku na úrovni řádů mohou posloužit následující rovnice. Význam proměnných je vysvětlen v tabulce 19. Schéma výfu-

$$\Delta t = \frac{L}{v_e} \tag{61}$$

$$v_e = \frac{\dot{V}}{S} \tag{62}$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m} \cdot r \cdot T_e}{p_e} \qquad S_e = \frac{\pi \cdot {D_e}^2}{4} \tag{63, 64}$$

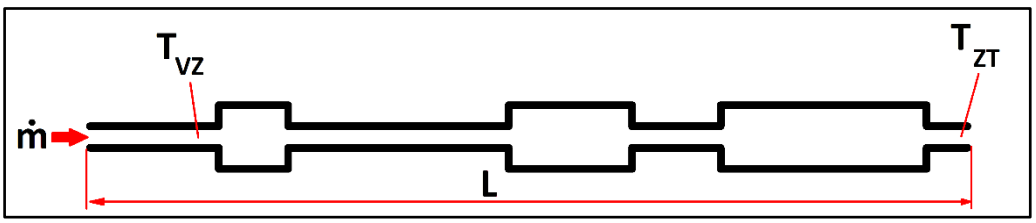
$$\dot{m} = \dot{m}_{pal} + \dot{m}_{pal} \cdot 14{,}65 \cdot \lambda \qquad T_e = \left(\frac{t_{VK} + t_{ZT}}{2}\right) + 273 \tag{65, 66}$$

$$r = 290 \quad p_e = 101000 \quad D_e = 0{,}06 \quad t_{ZT} = 120 \quad \lambda = 1\ [-]$$

Tabulka 19: Význam koeficientů pro rovnice 61, 62, 63, 64, 65, 66.

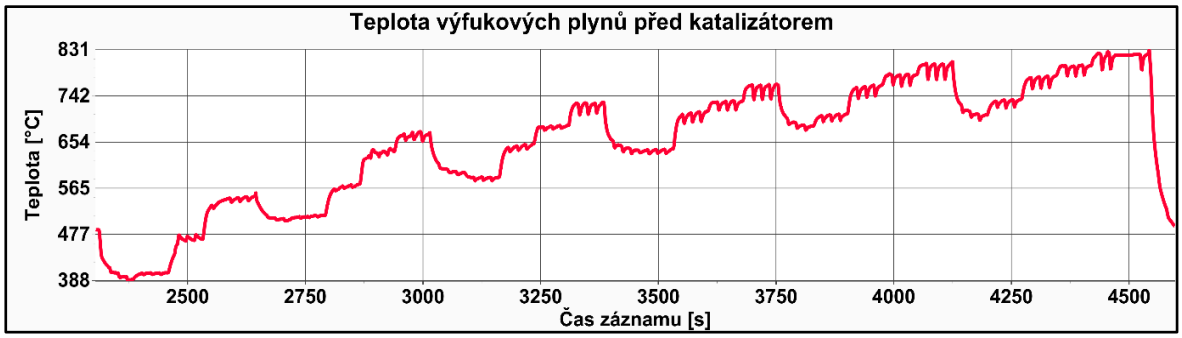
Δt	Doba proměnného zpoždění $[s]$	S_e	Ekvivalentní průřez výfuku $[m^2]$
L	Délka výfuku $[m]$	$\dot{m}$	Hmotnostní tok palivové směsi $[kg/s]$
v_e	Ekvivalentní rychlost výfukových plynů $[m/s]$	$\dot{m}_{pal}$	Hmotnostní tok paliva $[kg/s]$
$\dot{V}$	Objemový tok výfukových plynů $[m^3/s]$	λ	Součinitel přebytku vzduchu $[-]$
r	Charakteristická plynová konstanta $[J/(kgK)]$	T_e	Ekvivalentní teplota ve výfukovém potrubí $[°C]$
t_{VK}	Teplota výfukových plynů před katalyzátorem $[°C]$	p_e	Ekvivalentní tlak ve výfukovém potrubí $[Pa]$
D_e	Ekvivalentní průměr výfuku $[m]$	t_{ZT}	Teplota výfukových plynů na konci výfuku $[°C]$

kového vedení je na obrázku 61. Použité vztahy mají pouze vytvořit představu o velikostech časových zpoždění výfukových plynů, nikoliv utvořit použitelný matematický model. Největší nepřesnost ve výpočtu je způsobena zavedením ekvivalentních hodnot, které je nemožné experimentálně určit. Ovšem některé ze



Obrázek 61: Schéma výfukového vedení pro motor použitý během experimentu.

vstupních parametrů bylo možné měřit. Jedním z nich je teplota výfukových plynů před katalyzátorem, ta byla pro výpočet kontinuálně zaznamenávána (obrázek 62).



Obrázek 62: Časový záznam teploty výfukových plynů před katalyzátorem.

Rovněž i hodnota množství dodávaného paliva (obrázek 60). Ekvivalentní průměr výfuku byl odhadnut na základě nejmenšího a největšího průměru ve vedení. Odhadem byla určena i hodnota ekvivalentního tlaku a teplota t_{ZT}. Výsledný výraz pro výpočet času zpoždění má tvar rovnice 67.

$$\Delta t = \frac{L \cdot \pi \cdot {D_e}^2 \cdot p_e}{62 \cdot \dot{m}_{pal} \cdot \lambda \cdot r \cdot \left[\left(\frac{t_{VK} + t_{ZT}}{2}\right) + 273\right]} \tag{67}$$

Při dosazení teploty před katalyzátorem 401 °C a k této teplotě odpovídající množství paliva 0,57 kg/h (pro výpočet převedeno na kg/s), vyjde čas zpoždění 2,34 s. Tento výsledek je překvapivě blízký hodnotě časového zpoždění t_A, stanovené pomocí emisních impulzů (obrázek 59, rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou časového posunu). Porovnání časů zpoždění z obou metod je v tabulce 20.

Tabulka 20: Porovnání hodnot zpoždění určených metodou detekce impulzů a rovnice 67.

Čas zkoušky $[s]$	**Množství dodávaného paliva** $[kg/h]$	**Teplota** t_{VK} $[°C]$	**Teplota** t_{ZT} $[°C]$	**Zpoždění** t_A **určené metodou impulzů** $[s]$	**Zpoždění** t_A **určené rovnicí 57** $[s]$
2350	0,57	401	80	2,95	2,34
2650	1,02	534	95	1,61	1,15
3000	1,54	660	100	1,00	0,70
3400	2,34	656	120	0,60	0,44
4000	9,20	771	220	0,05	0,10

Jako kontrola správnosti výsledků metody emisních impulzů na úrovni řádů rovnice 67 zcela dostačuje. Ovšem pro využívání, nebo dokonce zpřesňování tohoto postupu je nutné zaznamenávat použité vstupní veličiny současně se záznamy z emisních analyzátorů. To bohužel není na válcové zkušebně technicky možné,

protože řídicí systém emisních analyzátorů je uzavřeným prostředím, které umožňuje zaznamenávat další data pouze prostřednictvím OBD II. Navíc, v případě emisního měření na válcové zkušebně, je část vedení s proměnným zpožděním rozšířena o vyhřívanou hadici spojující systém emisních analyzátorů a výfuk vozidla, což přináší komplikaci schématu 61.

6.2. Korekce záznamu emisí na válcové zkušebně

Po navržení principu řešení časového zpoždění, určení hodnot konstantního zpoždění a vytvoření programu pro aplikaci těchto poznatků bylo dalším krokem testování na emisní válcové zkušebně, obrázek 63. Toto pracoviště je úzce

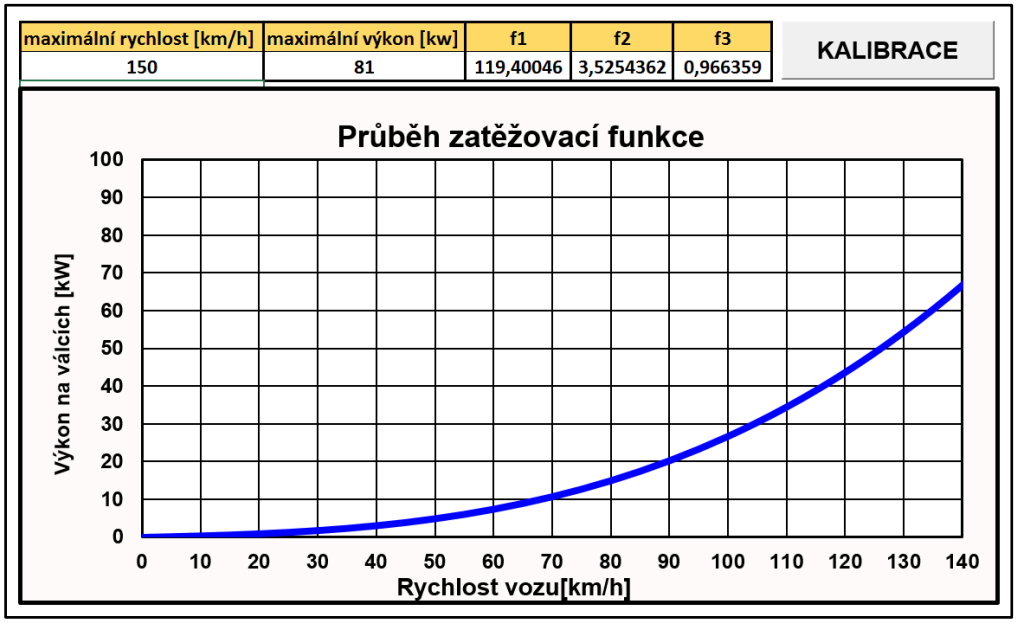
Obrázek 63: Fotografie testovacího prostoru emisní válcové zkušebny.

specializovanou zkušebnou na měření emisí dle standardů WLTP. To na jedné straně vede k vysoké efektivitě provádění těchto testů, ale na straně druhé k naprosto minimálním možnostem zásahu do měřících zařízení.

Jedním z těchto omezení je nemožnost vytvoření testu dle vlastního nastavení. Veškerá měření jsou tedy časově omezena na délku normou stanovených jízdních cyklů. Dalším technickým omezením je nemožnost ovládání brzdného momentu na válcích během probíhající zkoušky. Jediným proveditelným způsobem, jak nastavovat odpory válců proti pohonu kol vozidla, jsou odporové koeficienty v jízdním modelu vozu. Význam jízdního modelu vozu je popsán v kapitole 3.1.2 v rovnici 20. Ovšem všechny tři koeficienty v této rovnici musí nabývat hodnot, které jsou pro řídící software válců přípustné. Žádný z nich nesmí být nulový a všechny mohou nabývat hodnot v omezeném intervalu.

Pro vytvoření emisních impulzů v celém spektru zatížení pro daný motor bylo nutné nalézt takové koeficienty jízdního modelu, které by zajistily maximální zatížení motoru při přípustné rychlosti válců. Tato rychlost byla stanovena obsluhou na 135 km/h. Pro nalezení těchto koeficientů byl vytvořen pomocný soubor v programu Excel. Ten umožňuje nalezení koeficientů ve funkci jízdního modelu na základě zadaného výkonu a požadované rychlosti pro jeho dosažení.

Program variuje koeficienty v intervalech okolo již zadaných hodnot. Snímek z tohoto programu je na obrázku 64.



Obrázek 64: Snímek z programu Excel, výpočet zatěžovacích koeficientů na válcové zkušebně.

Na základě zkušeností z několika měření byl také vytvořen jízdní plán finální zkoušky, který podrobně stanovuje časy mezi jednotlivými impulzy a časy pro změny provozních režimů. Dostatečně dlouhé intervaly pro ustálení emisních signálů, při změně režimů a pro oddělení jednotlivých impulzů, se ukázaly jako nezbytná podmínka pro následnou detekci impulzů. Část časového rozvrhu zkoušky je v tabulce 21, celý plán zkoušky je pak v příloze A.

Tabulka 21: Část časového rozvrhu pro vytváření emisních impulzů na válcové zkušebně, pro jeden stupeň zatížení motoru.

	[s]	celkový čas [s]	rychlost [km/h]	lambda
čas na změnu rychlosti	10	570	60	1
čas ustálení před	10	580	60	1
čas pulzu 1,15	10	590	60	1,15
čas ustálení po	50	640	60	1
čas pulzu 0,7	10	650	60	0,7
čas ustálení po	50	700	60	1

Další neočekávaná komplikace se vyskytla při zajišťování komunikace vyhodnocovacího zařízení emisí s řídící jednotkou vozidla prostřednictvím OBD II. V původním návrhu na měření hmotnostního průtoku palivové směsi bylo předpokládáno, že bude možné zaznamenávat množství spotřebovaného vzduchu motorem právě prostřednictvím OBD II a z tohoto záznamu a dalších dostupných hodnot bude vypočítán hmotnostní průtok palivové směsi. V průběhu zkoušek se však ukázalo, že tato komunikace fungovala pouze u prvního testovaného vozu.

Tímto vozem byla Škoda Kodiaq 2,0 TSI, se zákaznickou řídící jednotkou a hotovým řídícím softwarem. Druhým testovaným vozem byl Seat Ibiza 2017 s prototypovým motorem a aplikační řídící jednotkou. Software v řídící jednotce vozidla byl ve stádiu vývoje a některé komunikační kanály v OBD II nebyly funkční. Tato skutečnost byla určena za důvod nefunkčnosti ukládání dat z ECU (Elektronická řídící jednotka vozu) systémem analyzátorů a tak byla použita další konfigurace vozu. Tou byl Seat Ibiza 2017 s prototypovým motorem a aplikační řídící jednotkou s již dokončeným řídícím softwarem. Ale ani v tomto případě nebyl v záznamech analyzátorů přítomný signál o množství spotřebovaného vzduchu, ovšem signál o otáčkách motoru a požadované hodnotě součinitele přebytku vzduchu lambda byl k dispozici.

S tímto zjištěním byl vybrán další vůz, který měl sériový motor, dokončený řídící software a aplikační řídící jednotku. Podle zmíněných podmínek byla k dispozici Škoda Octavia III s motorem 1,6L MPI. I s touto konfigurací se následně ukázalo, že není možné zaznamenávat množství spotřebovaného vzduchu. Ovšem otáčky motoru a požadovaná hodnota součinitele přebytku vzduchu λ byly v záznamech z emisních analyzátorů. Společně s těmito signály i aktuální rychlost vozidla a brzdná síla na válcích. Na základě těchto hodnot bylo navrženo alternativní řešení pro určení hmotnostního průtoku palivové směsi během emisních zkoušek.

6.2.1. Aproximace hmotnostního průtoku palivové směsi

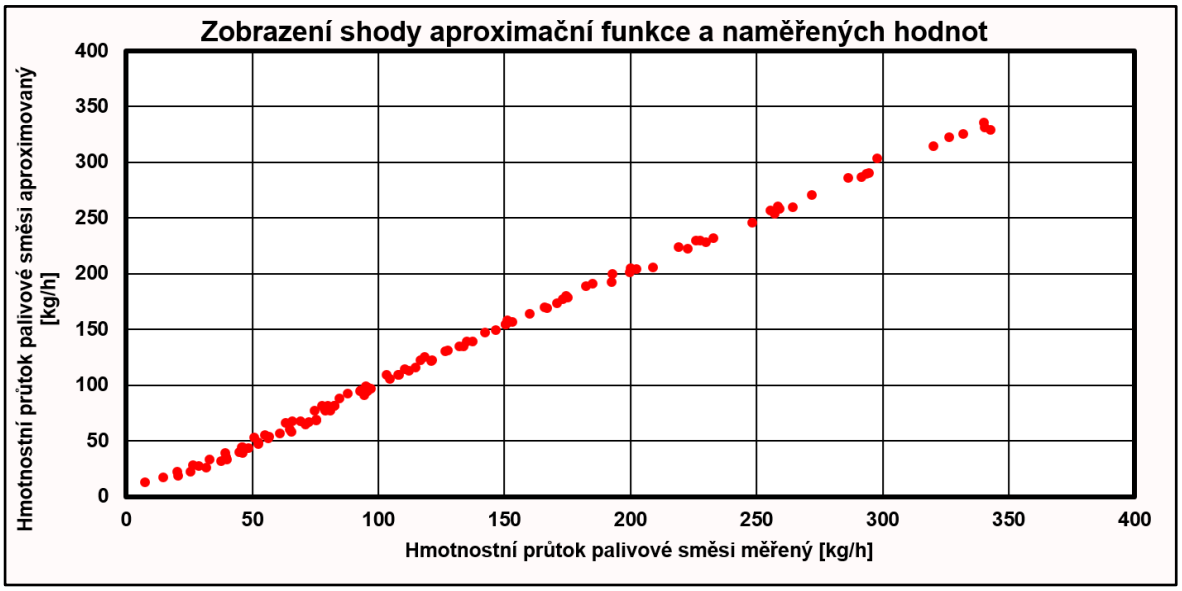
V předcházející kapitole byly popsány technické problémy, které se vyskytly při aplikaci postupů pro korekci časového zpoždění emisních analyzátorů na válcové zkušebně. Jednou z těchto komplikací byla i nemožnost zaznamenávání spotřebovávaného množství vzduchu motorem prostřednictvím OBD II. Tato zásadní komplikace vedla k nutnosti odvozování spotřebovaného množství palivové směsi z vhodných údajů, které jsou v záznamech z analyzátorů k dispozici. Těmito údaji jsou: aktuální síla na válcích F_a N, aktuální rychlost vozidla v_a km/h, aktuální otáčky motoru n_a 1/min. Z aktuální rychlosti vozidla a zaznamenávané síly je určen aktuální výkon přenášený na válce, vztah 68.

$$P_a = F_a \cdot \frac{v_a}{3{,}6} \tag{68}$$

Na minulé stránce byl vysvětlen důvod pro aproximaci hmotnostního průtoku palivové směsi funkcí, jejíž hodnota je určena parametry P_a a n_a. Vyjádření této funkce bylo zformováno do tvaru rovnice 69.

$$\dot{m} = \boldsymbol{E} + \boldsymbol{F} \cdot P_a + \boldsymbol{G} \cdot n_a + \boldsymbol{H} \cdot {n_a}^2 \tag{69}$$

Koeficienty E, F, G, H v této funkci byly určeny na základě dat z úplné charakteristiky motoru. K určení koeficientů byla využita metoda nejmenších čtverců, kterou nepřímo nabízí program Excel. Dostačující shodu této aproximace ilustruje obrázek 65. Konkrétní hodnoty uvedených koeficientů jsou v tabulce 22.



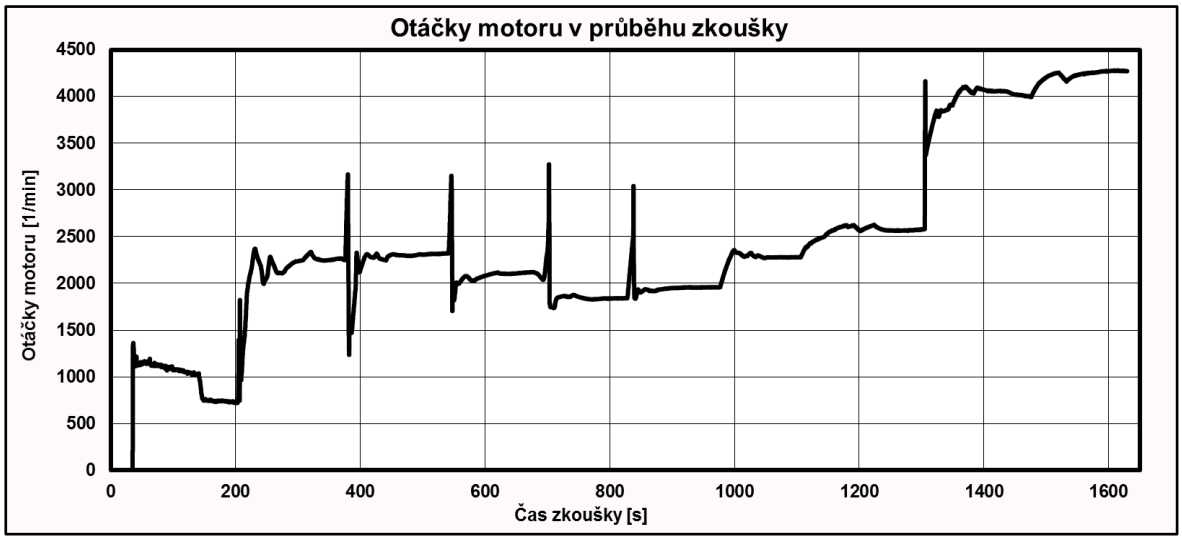
Obrázek 65: Porovnání shody aproximační funkce a naměřených hodnot. Při dokonalé shodě mají body ležet v jedné přímce, která svírá úhel 45° s osou x.

Tabulka 22: Hodnoty koeficientů E, F, G, H z rovnice 69.

E	F	G	H
17,08972	3,50043	-0,00803	2,49809E-06

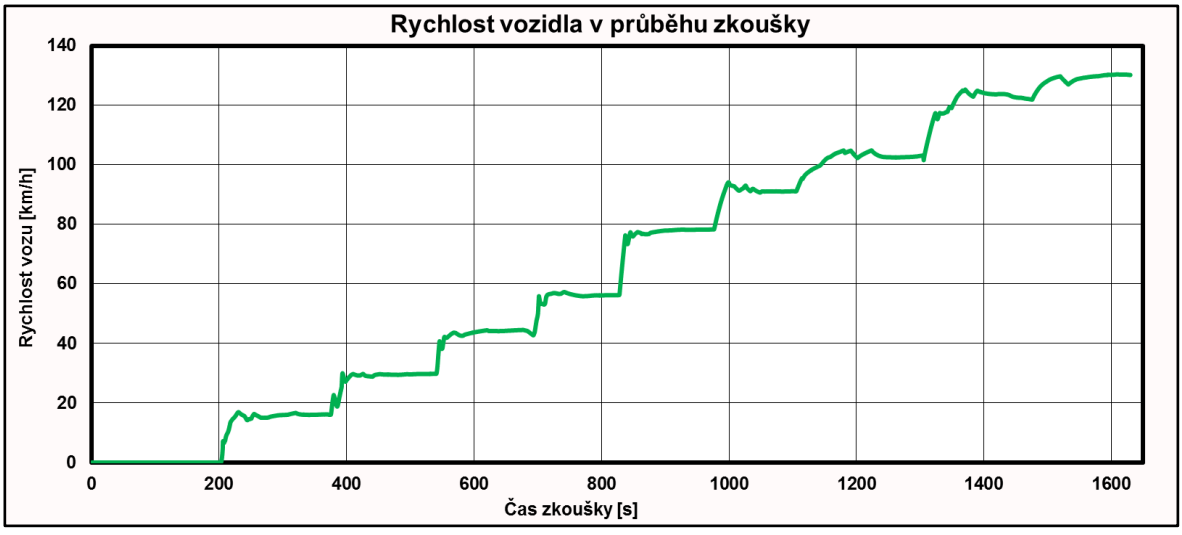
6.2.2. **Korekce záznamu pro vůz Škoda Oktavia III 1.6 MPI**

Po nezbytných úpravách metodiky pro provádění a vyhodnocování zkoušek emisních impulzů na válcové zkušebně byl uskutečněn ověřovací test (Přesný časový plán této zkoušky je v příloze A). Naplánovaný rozvrh začínal studeným startem motoru po 35 sekundách od začátku zkoušky. Vozidlo bylo před testem více jak 24 hodin v uzavřeném prostoru při pokojové teplotě. Start motoru na začátku zkoušky je zřetelný na obrázku 66. Poté byl motor ponechán při



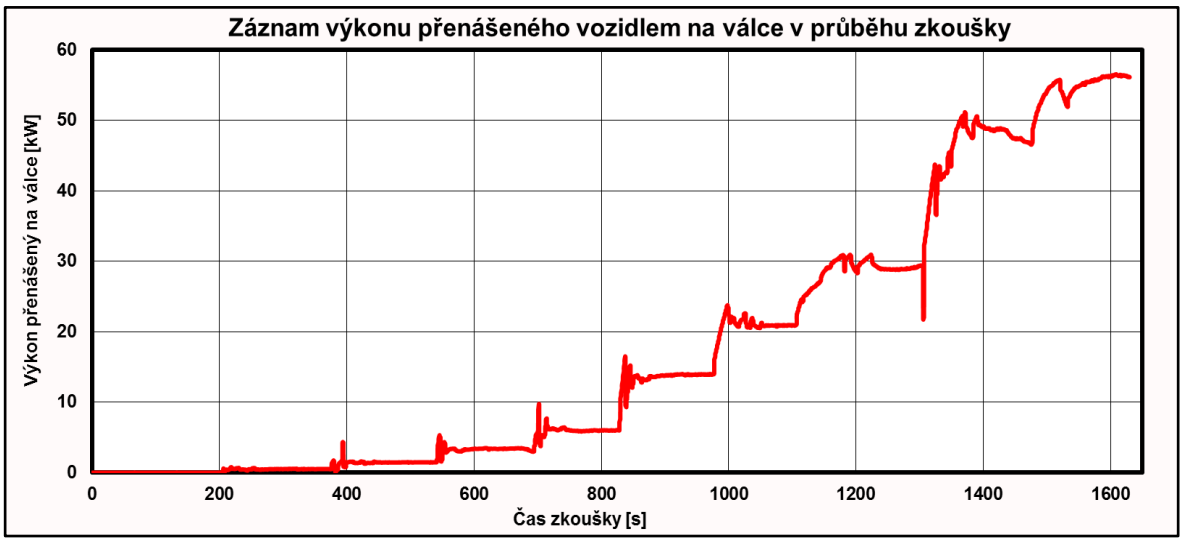
Obrázek 66: Záznam otáček motoru během testu na válcové zkušebně.

volnoběžných otáčkách s vyřazeným rychlostním stupněm po dobu 165 sekund. Během této doby byl vytvořen emisní impulz pomocí změny součinitele přebytku vzduchu lambda a tím dočasného vytvoření chudé a poté bohaté směsi. Po dostatečně dlouhé době pro ustálení emisního signálu po vytvořeném impulzu bylo vozidlo ustalováno na následujících rychlostech, obrázek 67.



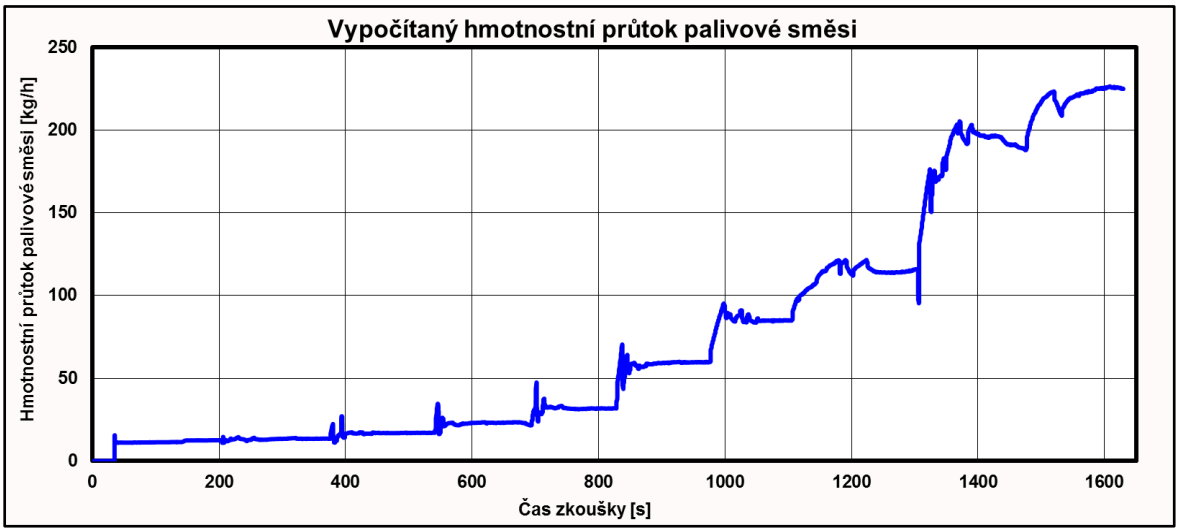
Obrázek 67: Záznam relativní rychlosti vozidla vůči povrchu válců na válcové zkušebně.

Odpor proti rotaci kol vozidla vytvářený válci byl nastaven několikrát větší, než jaký by byl použit během emisních testů WLTP. Postup zjišťování vhodného nastavení odporových koeficientů byl popsán v kapitole 6.2. Díky tomuto nastavení bylo dosaženo relativně velkého přenosu výkonu na válce již při přijatelných rychlostech. Záznam výkonu během zkoušky je na obrázku 68. V závislosti na



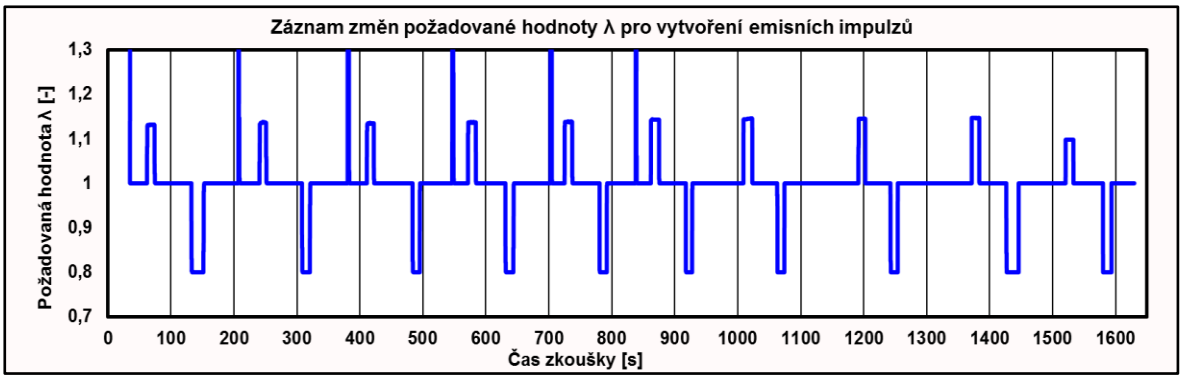
Obrázek 68: Záznam výkonu přenášeného vozidlem na válce.

výkonu na válcích a otáčkách motoru byl vypočítán hmotnostní průtok palivové směsi, dle vztahu 69. Díky této skutečnosti tvar křivky průběhu hmotnostního průtoku palivové směsi kopíruje tvar křivky výkonu, obr. 69.



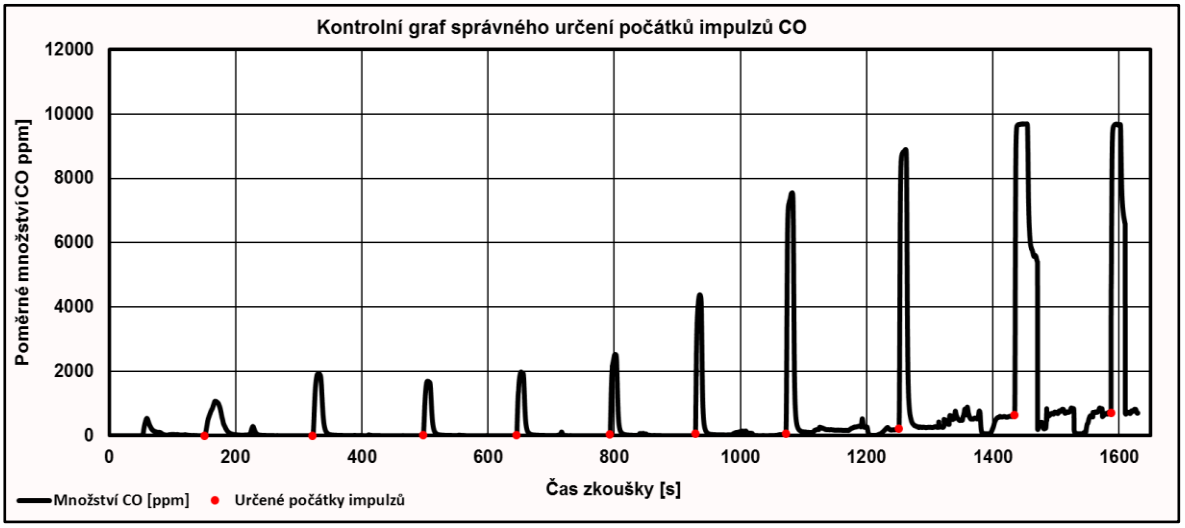
Obrázek 69: Záznam vypočítaného hmotnostního průtoku palivové směsi, test na válcové zkušebně.

V průběhu těchto provozních režimů bylo vytvořeno několik emisních impulzů pomocí změny součinitele přebytku vzduchu lambda, obrázek 70. Hodnoty lambda,



Obrázek 70: Záznam požadované hodnoty λ v průběhu testu na válcové zkušebně.

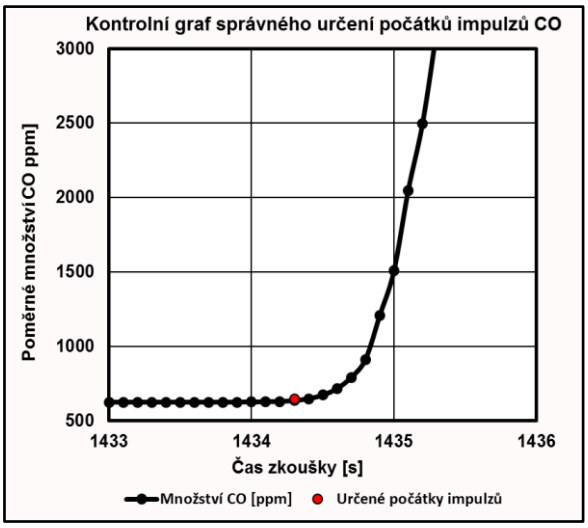
které v obrázku 61 překračují hranici 1,3, nejsou vytvořeny záměrně, ale jsou místy, kde docházelo k brzdění motorem. Mezi úmyslně vytvořenými impulzy byl vždy ponechán dostatečný časový odstup pro ustálení rychlosti vozu a zřetelného oddělení emisních impulzů. Díky této metodice byl vytvořen vhodný záznam emisí CO, který umožňoval vytvořit funkci zpoždění v závislosti na hmotnostním průtoku palivové směsi. Záznam emisí CO a programem určené počátky emisních impulzů jsou na obrázku 71. Jak je ze záznamu patrné, poměrné množství CO je ideálním



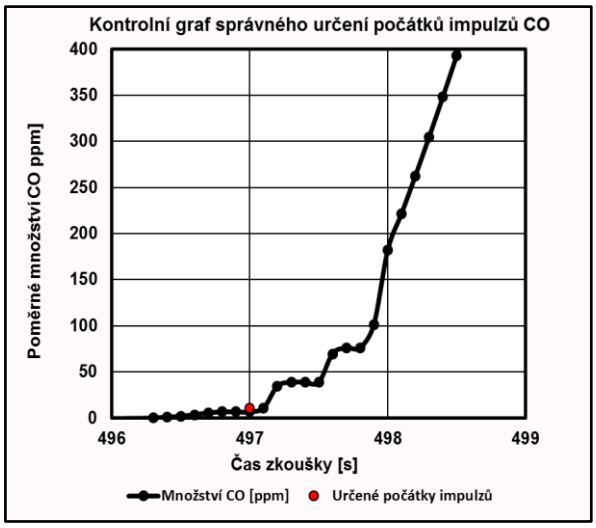
Obrázek 71: Záznam emisí CO v průběhu testu na válcové zkušebně s programem určenými počátky.

výfukovým plynem pro detekci emisních impulzů. I v případě dlouhého vedení, které dopravuje výfukové plyny do analyzátorů, nedochází k tak velkému promísení, které by nedovolovalo identifikovat počátky impulzů.

Po bližším pohledu na výsledky hledání počátků emisních impulzů v záznamu CO bylo ověřeno, že použitá metoda funguje s vynikající přesností. Tato přesnost je omezena pouze vzorkovací frekvencí signálu. Efektivita metody největší směrnice je ilustrována na obrázcích 72 a 73. Na základě těchto dat mohla být

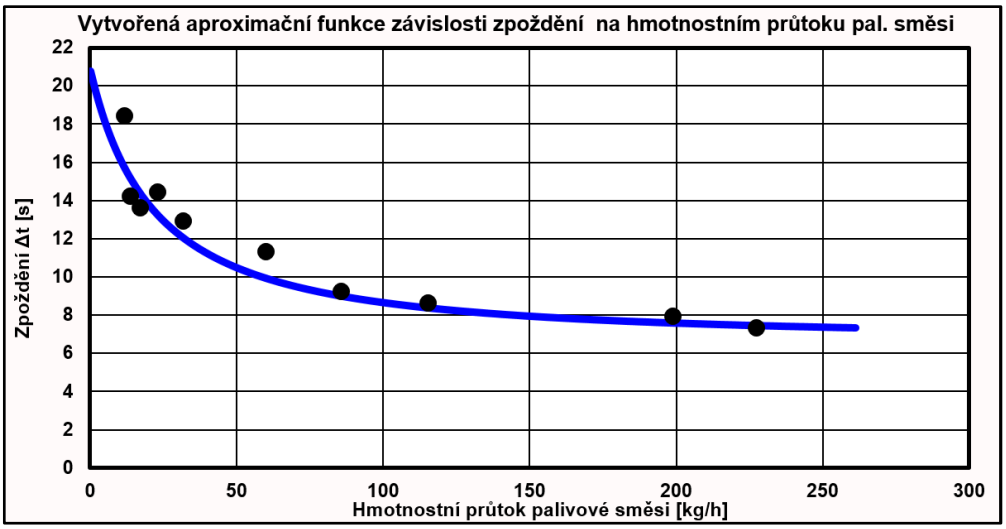


Obrázek 72: Detailní pohled na algoritmem určený počátek emisního impulzu.



Obrázek 73: Detailní pohled na algoritmem určený počátek emisního impulzu.

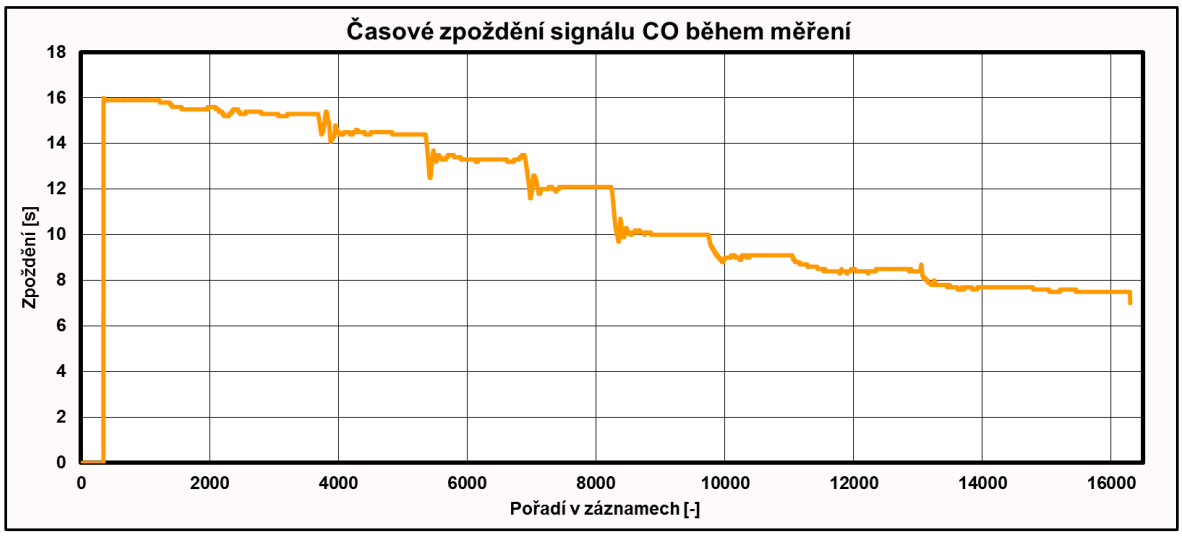
vytvořena funkce zpoždění v závislosti na hmotnostním průtoku palivové směsi motorem. Průběh této funkce je na obrázku 74. Umístění naměřených bodů této funkce odpovídá předpokládanému tvaru funkce zpoždění. Na základě této funkce



Obrázek 74: Průběh vytvořené funkce zpoždění v závislosti na hmotnostním průtoku palivové směsi, pro válcovou zkušebnu.

lze konstatovat, že celkové zpoždění pro záznam CO, CO_2, NO_x, THC variuje v rozmezí 7 až 21 sekund. Emisní složka CH_4 pak v rozmezí 8 až 22 sekund.

Při zpětné aplikaci korekční funkce na záznam zkoušky, prostřednictvím vztahů 53, 54, vyjde následující průběh zpoždění, obrázek 75. Tento záznam je



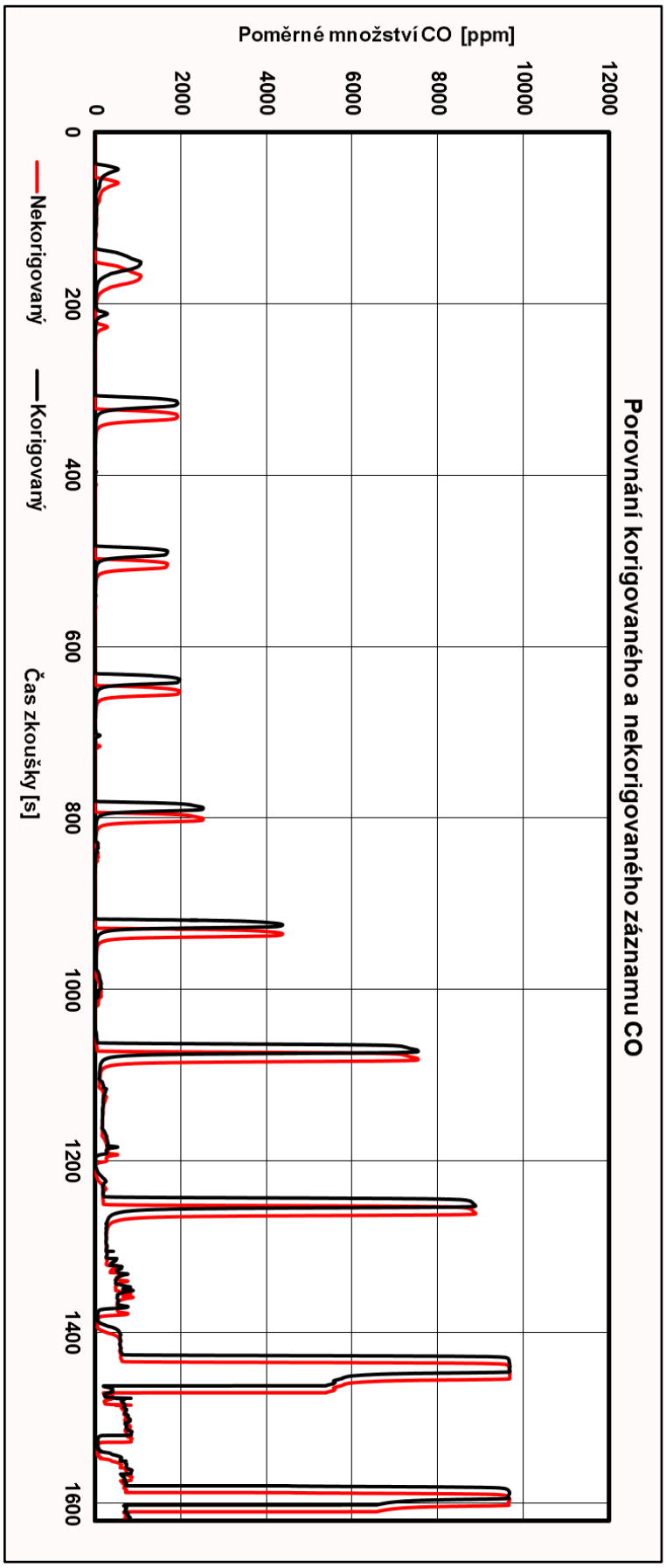
Obrázek 75: Průběh zpoždění emisní složky CO během testovacího měření.

záměrně, pro lepší uchopitelnost významu zpoždění, vykreslen v závislosti na pořadí bodů v záznamu, nikoliv na čase zkoušky. Například naměřená hodnota CO s pořadovým číslem 8000 byla zpožděna oproti záznamu otáček motoru, síle na válcích a rychlosti vozidla o 12 sekund.

Posunutím každého bodu v záznamu emisí o příslušnou hodnotu zpoždění z obrázku 75 byly získány následující korigované záznamy, obrázek 76 a déle přílohy B1 až B4. Korekce zpoždění z obrázku 75 byla použita na všechny emisní signály, s výjimkou záznamu CH_4 pro který byla určena jiná hodnota t_B.

6.2.3. **Příklad aplikace korekce záznamu zkoušky WLTP**

Pro ukázku použití metody korekce časového posunu byl zpracován emisní signál naměřený během emisního testu WLTP. Tato zkouška byla uskutečněna na zážehovém motoru (podrobné informace o motoru podléhají utajení). Výsledky jsou v přílohách C1 až C8.



Obrázek 76: Průběh emisí CO před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky popsané v kapitole 6.2.3.

7. Závěr

V první části této diplomové práce byla popsána složitá problematika měření a vyhodnocování emisních zkoušek. Tento obor je komplexní disciplínou, která nabízí prostor pro inovace a zlepšení. Jedno z těchto zdokonalení bylo navrženo a otestováno v rámci této diplomové práce.

Díky vytvořené korekční metodě časových posunů a její následné aplikaci je možné takřka eliminovat časové zpoždění v emisních online záznamech, které vzniká během testů na válcové zkušebně. Toto zpoždění mezi záznamy emisních analyzátorů a záznamy veličin, které popisují provozní stav vozidla, je téměř odstraněno pomocí výpočtové korekce. Uvedená korekce využívá dat z metody emisních impulzů.

Pro snadnou aplikaci zmíněné korekční metody byl vytvořen program v rámci tabulkového procesoru Microsoft Excel. Kvůli specifickým nárokům na zpracování dat, byl tento program nejprve zrealizován v jazyce Visual Basic a následně implementován do rozhraní programu Excel.

Vytvořené postupy byly pravidelně ověřovány laboratorním měřením, které ale přinášelo neočekávané technické komplikace. Pro překonání těchto problémů byla korekční metoda časového posunu několikrát upravena, tak aby byla prakticky použitelným nástrojem.

Řešení diplomové práce probíhalo v rámci úzké spolupráce se společností Škoda Auto a.s.

8. Seznam symbolů zkratek

Symbol	Popis	Jednotka
a	Zrychlení vozidla	[m/s^2]
a_{ref}	Referenční zrychlení pro P_{drive}	[0,45 m/s^2]
$BA\ 95$	Motorový benzín s oktanovým číslem 95	
B, C, D	Koeficienty funkce zpoždění	[-]
$CF_{pollutant}$	Faktor shodnosti	[-]
CLA	Chemiluminiscenční analyzátor	
CO	Oxid uhelnatý	
CO_2	Oxid uhličitý	
CO_i	Okamžitá hodnota koncentrace CO v i-tém bodě záznamu	[%]
$CO_{2,p1}$	Hmotnost CO_2 v městské části WLTC	[g/km]
$CO_{2,p2}$	Hmotnost CO_2 v mimoměstské části WLTC	[g/km]
$CO_{2,p3}$	Hmotnost CO_2 v dálniční části WLTC	[g/km]
$\overline{c_p}^T_{T_{ref}}$	Střední hodnota izobarické tepelné kapacity mezi T_{ref} a T	[J·kg^{-1}· K^{-1}]
$\mathrm{CustomerNN0}$	Externí kanál číslo 0 v záznamu emisních analyzátorů	
$\mathrm{CustomerNN1}$	Externí kanál číslo 1 v záznamu emisních analyzátorů	
$\mathrm{CustomerNN2}$	Externí kanál číslo 2 v záznamu emisních analyzátorů	
$\overline{c_V}^T_{T_{ref}}$	Střední hodnota izochorické tepelné kapacity mezi T_{ref} a T	[J·kg^{-1}· K^{-1}]
D_e	Ekvivalentní průměr výfuku	[m]
E, F, G, H	Koeficienty aproximační funkce hmotnostního průtoku palivové směsi motorem	[-]
EGR	Recirkulace spalin (Exhaust Gas Recirculation)	
EU	Evropská unie	
$EURO$	Evropská emisní legislativa	
e_{pot}	Měrná potenciální energie plynu	[J/kg]
F_a	Aktuální síla na válcích, která působí proti rotaci kol poháněné nápravy	[N]
F_{dyn}	Dynamická síla působící proti zrychlení vozidla	[N]

F_{pas}	Výsledná síla pasivních odporů působících proti pohybu vozidla	[N]
$F_{válců}$	Síla působící proti rotaci poháněných kol vozidla na obvodu válců na válcové zkušebně	[N]
f_0, f_1, f_2	Koeficienty regresní funkce jízdního odporu	[N], [N/(km/h)], [N/(km/h) ^{2}]
f_z	Vzorkovací frekvence záznamu	[Hz]
FID	Plamenoionizační analyzátor (Flame Ionization Detector)	
g	Celočíselná proměnná	[-]
$GDR\ Nonlin.$	Výpočetní metoda funkce $Solver$	
h_m	Měrná entalpie	[J/kg]
H_2O	Voda	
H_u	Dolní výhřevností paliva	[MJ/kg]
HC	Uhlovodíky (hydrocarbons)	
h	Celočíselná proměnná	[-]
IR	Infračervené záření (Infra-red radiation)	
k	Součinitel prostupu tepla ve sledovaném místě	[W· K^{-1}· m^{-2}]
$kLambda(k)$	Hrubě určený konec impulzu k v záznamu CO	[-]
k_e	Proměnná zastupující ekvivalentní průřez a ekvivalentní hustotu výfukových plynů	[m/kg]
$Lambda_i$	Okamžitá hodnota požadovaného součinitele přebytku vzduchu lambda v i-tém bodě záznamu	[-]
L_e	Ekvivalentní délka výfukového vedení do místa ředění	[m]
L_{vt}	Stechiometrické množství suchého vzduchu	[-]
L_{vvt}	Stechiometrické množství vlhkého vzduchu	[-]
m	Hmotnost plynu	[kg]
MAW	Vyhodnocovací metoda pro zkoušku RDE (Moving Averaging Windows)	
$M1$	Kategorie osobních automobilů do 3,5t a maximálně s 9 místy k sezení, včetně řidiče	
MPI	Vícebodové vstřikování (Multipoint fuel injection)	
$m_{vzduchu}$	Hmotnost vzduchu spotřebovávaná motorem	[kg/h]
m_{vozu}	Hmotnost vozidla	[kg]
m_{red}	Redukovaná hmotnost vozidla při vyřazeném rychlostním stupni	[kg]

m_{paliva}	Hmotnost paliva spotřebovávaná motorem	[kg/h]
$m_{gas,s}$	Klouzavý průměr hmotnostního průtoku sledované emisní složky při testu RDE v okně s	[g/s]
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok palivové směsi	[kg/h]
$m_{CO_2,i}$	Hmotnostní průtok sledované emisní složky při testu RDE v naměřené hodnotě číslo i	[g/s]
M_{svz}	Molární hmotnost suchého vzduchu	[g/mol]
$M_{mim.}$	Hmotnost emisí pro mimoměstskou fázi testu	[mg/km]
$M_{měs.}$	Hmotnost emisí pro městskou fázi testu	[mg/km]
$M_{dál.}$	Hmotnost emisí pro dálniční fázi testu	[mg/km]
MAF_i	Okamžitá hodnota spotřebovávaného množství vzduchu motorem v i-tém bodě záznamu	[kg/h]
$\dot{M}$	Konstantní hmotnostní tok výfukových plynů	[kg/s]
M_{H_2O}	Molární hmotnost molekuly vody	[g/mol]
M_{CO_2}	Hmotnost CO_2	[g]
$M_{CO_2,ref}$	Referenční Hmotnost CO_2	[g]
$M_{CO_2,p3}$	Souřadnice Y definičního bodu referenční křivky P_3	[g/km]
$M_{CO_2,p2}$	Souřadnice Y definičního bodu referenční křivky P_2	[g/km]
$M_{CO_2,p1}$	Souřadnice Y definičního bodu referenční křivky P_1	[g/km]
$\dot{m}_{pal}$	Hmotnostní tok paliva	[kg/s]
$\emptyset \dot{M} směsi(k)$	Průměrný hmotnostní průtok palivové směsi pro impulz k	[kg/h]
N_2	Molekulární dusík	
NO_2	Oxid dusičitý	
NO_X	Oxidy dusíku	
$NTE_{pollutant}$	Limitní hodnota emisí	[g/km] nebo [1/km]
n_a	Aktuální otáčky motoru	[1/min]
$NEDC$	New European Driving Cycle	
$NMHC$	Hmotnost uhlovodíků bez metanu v dané látce (Non-methane hydrocarbons)	
NO	Oxid dusnatý	
O_2	Molekulární kyslík	
O_3	Ozón	
$OBD\ II$	Palubní diagnostika vozidla (On-board diagnostics II)	

$Otáčky_i$	Název proměnné, ve které jsou načtené hodnoty otáček	
P_1, P_2, P_3	Definiční body referenční křivky	
P_a	Aktuální výkon přenášený vozidlem na válce	[W]
$P_{c,j,norm}$	Meze třídy výkonu na kolech pro třídu j ve smyslu normalizované hodnoty výkonu. (Podrobněji v EU 2017/1151 strana L175/164)	[-]
$P_{c,j}$	Meze třídy výkonu na kolech pro třídu j (Podrobněji v EU 2017/1151 strana L175/164)	[kW]
P_{drive}	Požadovaný výkon na náboji kola u vozidla při referenční rychlosti a zrychlení. (Podrobněji v EU 2017/1151 strana L175/164)	[kW]
P_i	Výkon při testu RDE v naměřené hodnotě číslo i	[kW]
$P_{korigovaný}$	Korigovaný výkon, vychází z $P_{měřený}$	[kW]
$P_{měřený}$	Výkon určený na zkušební dráze (Dráha pro stanovení jízdního modelu)	[kW]
P_{rated}	Maximální jmenovitý výkon motoru uvedený výrobcem	[kW]
P_s	Klouzavý průměr výkonu ve vyhodnocovacím okně pro test RDE s	[kW]
p_{H_2O}	Tlak sytých par v nasávaném vzduchu motorem	[mbar]
$p_{atm.}$	Atmosférický tlak vzduchu	[mbar]
p_e	Ekvivalentní tlak ve výfukovém potrubí	[Pa]
PID	Identifikační číslo kanálu (Parameter IDs)	
PM	Pevné částice (Particulate Matter)	
PMA	Paramagnetický analyzátor	
PMR	Poměr výkonu k hmotnosti vozu (Power mass ratio)	[kW/kg]
p	Hybnost vozidla	[kg(m/s)]
$\dot{Q}$	Výsledná tepelná výměna s okolím	[J/s]
R_{AERO}	Aerodynamický odpor působící proti pohybu vozidla, při dané rychlosti vozidla	[N/(km·h^{-1})]
R_R	Valivý odpor kol při dané rychlosti vozidla	[N/(km·h^{-1})]
R_R	Teplotní korekční faktor valivého odporu	[8,64·10^{-3}/°C]
RDE	Emisní testy v reálném provozu (Real driving emissions)	
r	Charakteristická plynová konstanta	[J/(kg·K)]

$Rychlost_i$	Název proměnné, ve které jsou načtené hodnoty okamžité rychlosti vozidla	
S	Plocha výfuku ve sledovaném místě tepelné výměny	[m^{-2}]
S_e	Ekvivalentní průřez výfuku	[m^2]
$Solver$	Numerický řešič v programu Excel	
SO_2	Oxid siřičitý	
$Síla_i$	Název proměnné, ve které jsou okamžité hodnoty síly na válcích	
t	Čas	[s]
$TIER$	Severoamerická emisní legislativa	
THC	Hmotnost všech uhlovodíků v dané látce (total hydrocarbons)	
TF	Součinitel pro výpočet limitní hodnoty emisí	[-]
$Threshold$	Hranice detekovatelnosti impulzu	[ppm]
T	Teplota výfukových plynů ve sledovaném místě	[K]
t_m	Teplota okolí při stanovování jízdního modelu	[°C]
t_j	Doba trvání j-tého časového okna v metodě MAW	[s]
$t_{c.j}$	Časový podíl třídy j výkonu na kolech	[%]
t_{ZT}	Teplota výfukových plynů na konci výfuku	[°C]
t_{VK}	Teplota výfukových plynů před katalyzátorem	[°C]
t_{B-NOx}	Konstantní část časového zpoždění emisní složky NOx	[s]
t_{B-HC}	Konstantní část časového zpoždění emisní složky HC	[s]
t_{B-CO}	Konstantní část časového zpoždění emisní složky CO	[s]
t_B	Konstantní část časového zpoždění záznamu emisí.	[s]
t_{B-CO_2}	Konstantní část časového zpoždění emisní složky CO_2	[s]
t_{B-CH_4}	Konstantní část časového zpoždění emisní složky CH_4	[s]
t_{Aj}	Proměnná část časového zpoždění záznamu emisí v provozním režimu vozidla j	[s]
t_A	Proměnná část časového zpoždění záznamu emisí.	[s]

$t_{2,j}$	Poslední sekunda j-tého okna v metodě MAW	[s]
$t_{1,j}$	První sekunda j-tého okna v metodě MAW	[s]
t_0	Referenční teplota	20 [°C]
T_{ref}	Teplota okolního vzduchu	[K]
T_e	Ekvivalentní teplota ve výfukovém potrubí	[°C]
TM_{NEDC}	Ekvivalentní setrvačná hmotnost vozidla při NEDC	[kg]
U	Vnitřní energie plynu	[J]
$\dot{V}$	Objemový tok výfukových plynů	[m^3/s]
v_a	Aktuální relativní rychlost vozidla vůči povrchu válců	[km/h]
v_e	Ekvivalentní rychlost výfukových plynů	[m/s]
v_i	Rychlost při testu RDE v naměřené hodnotě číslo i	[km/h]
v_{p1}	Průměrná rychlost v městské části WLTC	[km/h]
v_{p2}	Průměrná rychlost v mimoměstské části WLTC	[km/h]
v_{p3}	Průměrná rychlost v dálniční části WLTC	[km/h]
v_{ref}	Referenční rychlost pro P_{drive}	[70 km/h]
v_s	Klouzavý průměr rychlosti ve vyhodnocovacím okně pro test RDE s	[km/h]
v	Rychlost vozidla	[km/h]
$vOkno$	Délka vyhodnocovacího okna	[-]
$\dot{W}$	Celkový odváděný výkon	[J/s]
W_j, W_i, W_k	Vzdáleností bodu pro dané okno od referenční křivky v metodě MAW	[g/km]
$WLTC$	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure	
$WLTP$	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure	
WV	Volkswagen	
w	Rychlost plynu	[m/s]
$X_{desetina}(k)$	Souřadnice desetiny lokálního maxima impulzu číslo k, směrem do leva od lokálního maxima	[-]
$X_{ref}(k)$	Souřadnice X referenčního bodu pro impulz k	[-]
Xp	Souřadnice průsečíku signálu CO a přímky hodnoty $Threshold$	[-]
$XzCO(k)$	Souřadnice X počátku impulzu CO číslo k	[-]
$Y_{ref}(k)$	Souřadnice Y referenčního bodu pro impulz k	[-]

$Zpoždění(k)$	Zpoždění signálu na impulzu číslo k	[-]
$zLambda(k)$	Hrubě určený počátek impulzu k v záznamu CO	[-]
α_1	Součinitel přestupu tepla, výfukové plyny – stěna výfuku	[W· K^{-1}· m^{-2}]
α_2	Součinitel přestupu tepla, stěna výfuku – okolní vzduch	[W· K^{-1}· m^{-2}]
η_c	Celková účinností vozidla, považovaného za pohonu válců	[-]
η_{mot}	Celková účinnost motoru	[-]
η_p	Účinnost přenosu výkonu od motoru na válce	[-]
ρ_0	Hustota vzduchu při referenčních podmínkách (20°C, 100kPa)	[kg/m^3]
ρ_e	Ekvivalentní hustota výfukových plynů	[kg/m^3]
σ_{H_2}	Hmotnostní podíl vodíku v palivu	[-]
σ_{O_2}	Hmotnostní podíl kyslíku palivu	[-]
σ_S	Hmotnostní podíl síry v palivu	[-]
σ_c	Hmotnostní podíl uhlíku v palivu	[-]
$\Delta\tau$	Časové zpoždění pro konstantní hmotnostní tok výfukových plynů $\dot{M}$	[s]
Δt	Celkové časové zpoždění záznamu emisí	[s]
$\Delta t\ Měřené$	Naměřené časové zpoždění	[s]
$\Delta t\ Vypočítané$	Vypočítané časové zpoždění	[s]
δ	Tloušťka stěny výfuku	[m]
λ	Součinitel tepelné vodivosti materiálu výfuku	[W· K^{-1}· m^{-1}]
λ	Součinitel přebytku vzduchu	[-]
ρ	Hustota vzduchu při stanovování jízdního modelu	[kg/m^3]

9. Použité zdroje

[1] CLD Principles. *Cambustion.com* [online]. Cambridge, CB1 8DH, United Kingdom: Cambustion, 2017 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: https://www.cambustion.com/products/cld500/cld-principles

[2] ENGELJEHRINGER, Kurt. *AVL EMISSION TESTING HANDBOOK* [online]. Hanz-List Platz 1, 8020 Graz, Austria, 2016, 2016(1.1), 80 [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: https://www.avl.com/documents/10138/2703362/AVL+Handbook+2016.pdf

[3] EXA IR Infrared Gas Analyzers. Yokogawa.com [online]. 2-9-32 Nakacho, Musashino-shi, Tokyo 180-8750, JAPAN: Yokogawa Electric Corporation, 2008 [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: https://web-material3.yokogawa.com/TI11G00A01-01E_010.pdf

[4] FLIEGEL, Jan. *ANALÝZA NEJISTOT EMISNÍCH TESTŮ NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/19733/browse?type=title

[5] Gas Chromatography. *LibreTexts* [online]. DePauw University: LibreTexts, 2017 [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Analytical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Analytical_Chemistry_2.0_(Harvey)/12_Chromatographic_and_Electrophoretic_Methods/12.4%3A_Gas_Chromatography

[6] HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, c1988. ISBN isbn0-07-028637-x.

[7] LASDON, Leon. *NONLINEAR OPTIMIZATION USING THE GENERALIZED REDUCED GRADIENT METHOD*. Case Western Reserve University, 1973. Case Western Reserve University.

[8] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1151*. In: Brusel, Belgie: EVROPSKÁ KOMISE, 2017, ročník 2017, II.

[9] *Official Journal of the European Union: Commision regulation (EU) 2017/1221* [online]. 2017, 2017(692/2008) [cit. 2017-11-30].

[10] Paramagnetic Oxygen Analyzers. *Yokogawa.com* [online]. Nakacho, Musashino-shi, Tokyo 180-8750, JAPAN: Yokogawa Electric Corporation, 2012 [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: https://web-material3.yokogawa.com/TI11P03A05-01E_020.pdf

[11] PÁV, Karel. Emise ve výfukových plynech PSM. In: *KVM TUL* [online]. Liberec: TUL, 2013 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/studenti/skripta-a-texty-on-line/pohonne-jednotky-I

[12] PÁV, Karel. *MECCA: Measurement of ignition delay*. České vysoké učení technické v Praze MECCA, Technická 4, 16607, Praha 6, Czech Republic: Print Matula, 2010, 2010(01). ISSN 1214-0821.

[13] PÁV, Karel. Modelování oběhu PSM. In: *KVM TUL* [online]. Liberec: TUL, 2013 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/studenti/skripta-a-texty-on-line/pohonne-jednotky-I

[14] PLÁT, František. *DYNAMIC BEHAVIOUR OF NO_X STORAGE CATALYSTS AND COMBINED EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS*. Praha: Department of Chemical Engineering, 2011.

[15] SKOOG, Douglas A., F. James. HOLLER a Stanley R. CROUCH. *Principles of instrumental analysis*. 6th ed. /. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole, c2007. ISBN 978-0495012016.

[16] ŠKODA AUTO. *EMISE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ MOTOROVÝCH VOZIDEL*. Mladá Boleslav: Škoda Auto a.s., 2005.

[17] ŠTĚPÁNEK, Jan. *SIMULATION OF AUTOMOTIVE CATALYSTS AND COMBINED EXHAUST GAS AFTERTHREATMENT SYSTEMS*. Praha: Department of Chemical Engineering, 2013.

[18] Worldwide Emissions Standards 2017/2018. *Www.delphi.com* [online]. Avenue de Luxembourg, L-4940 Bascharage, G.D. of Luxembourg: Delphi Automotive, 2017 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: https://www.delphi.com/emissions-standards-2017-2018

10. Seznam použitého software

[1] Microsoft Corporation: Microsoft Office Word 2013
[2] Jbeam 7.1.6.28
[3] Zoner Photo Studio 18
[4] Microsoft Corporation: Microsoft Office Excel 2013

11. Seznam příloh

Příloha A:

- Obr. A.1 – Harmonogram emisních impulzů pro test na válcové zkušebně.

Příloha B:

- Obr. B.1 – Porovnání upraveného a neupraveného záznamu HC.
- Obr. B.2 – Porovnání upraveného a neupraveného záznamu CH_4.
- Obr. B.3 – Porovnání upraveného a neupraveného záznamu CO_2.
- Obr. B.4 – Porovnání upraveného a neupraveného záznamu NO_X.

Příloha C:

- Obr. C.1 – Záznam otáček motoru a hmotnostního průtoku palivové směsi ze zkoušky WLTP.
- Obr. C.2 – Záznam okamžité rychlosti vozidla a hmotnostního průtoku palivové směsi ze zkoušky WLTP.
- Obr. C.3 – Záznam časového zpoždění analyzátorů a hmotnostního průtoku palivové směsi ze zkoušky WLTP.
- Obr. C.4 – Porovnání korigovaného a nekorigovaného záznamu NO_X ze zkoušky WLTP.
- Obr. C.5 – Porovnání korigovaného a nekorigovaného záznamu CO ze zkoušky WLTP.
- Obr. C.6 – Porovnání korigovaného a nekorigovaného záznamu CO_2 ze zkoušky WLTP.
- Obr. C.7 – Porovnání korigovaného a nekorigovaného záznamu HC ze zkoušky WLTP.
- Obr. C.8 – Porovnání korigovaného a nekorigovaného záznamu CH_4 ze zkoušky WLTP.

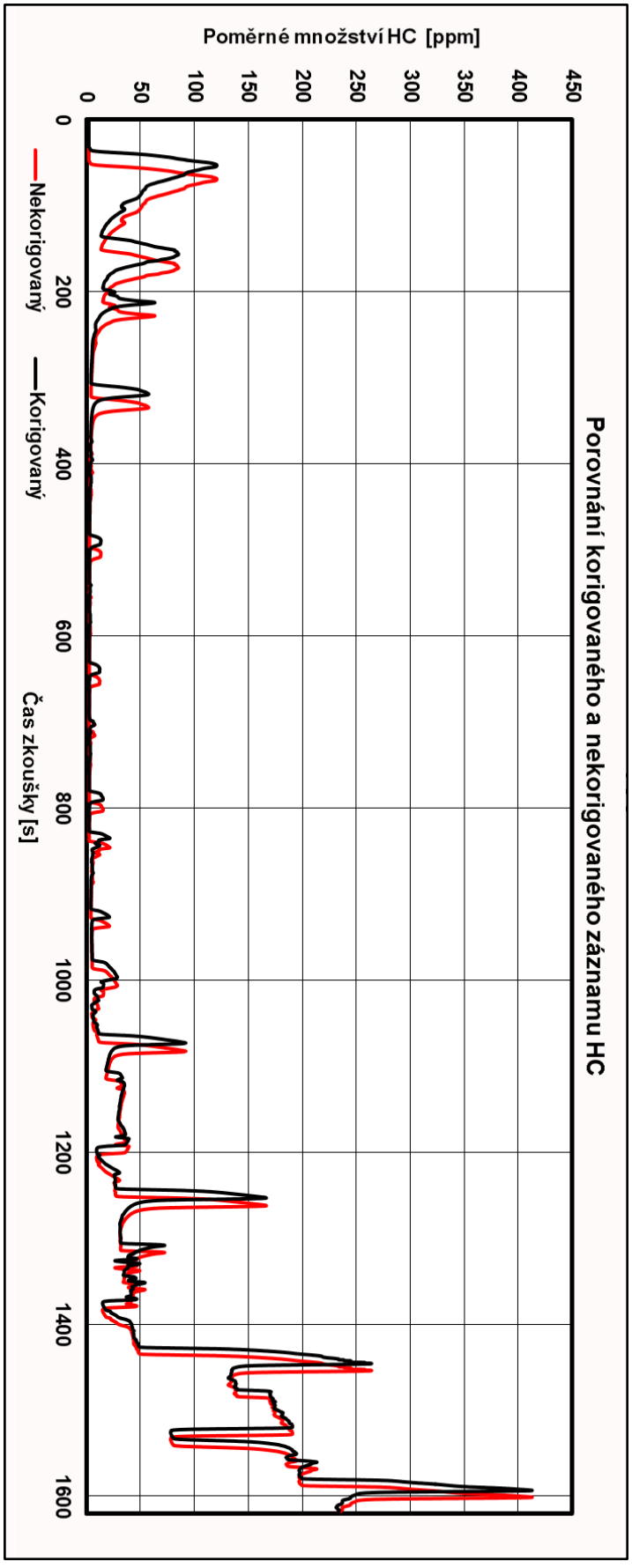
Datové CD obsahující:

- Text práce ve formátu PDF a soubor v programu Microsoft Office Excel 2013 s algoritmy pro automatizovanou korekci časového posunu v online záznamu emisí. Heslo pro úpravu souboru Excel bylo nastaveno do tvaru: “Korekce“.

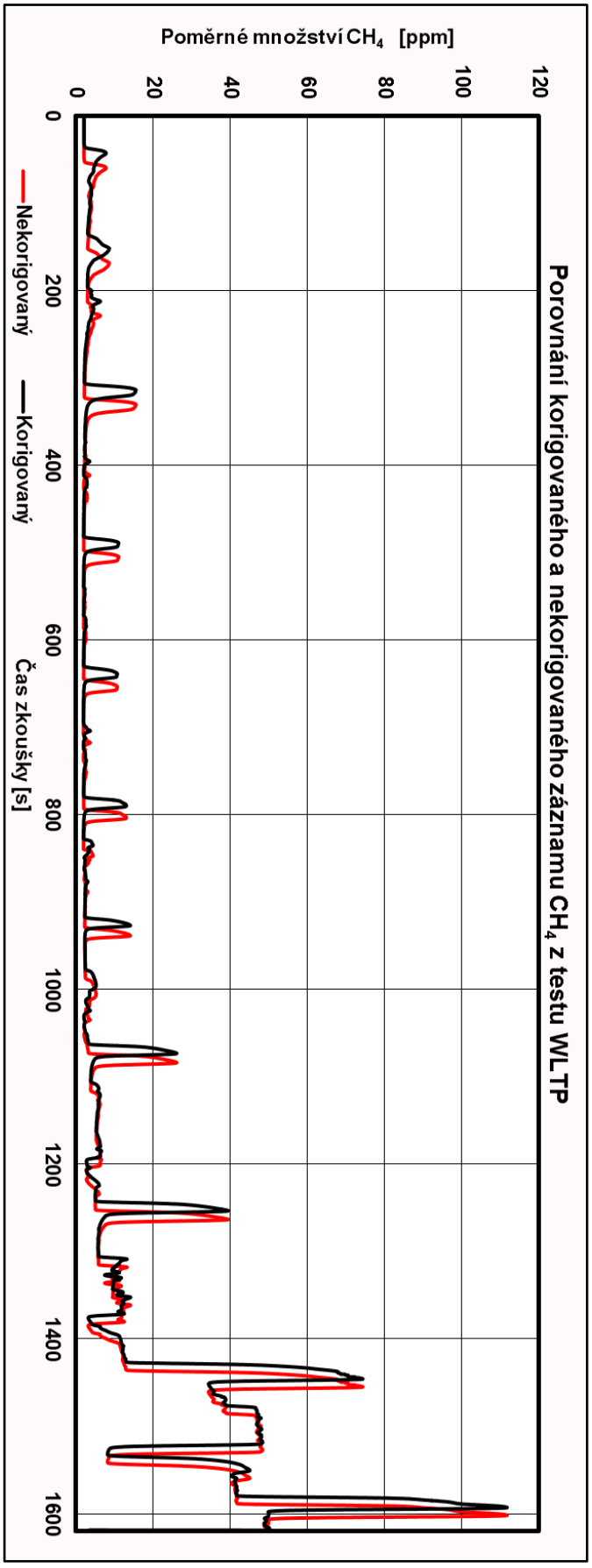
Příloha A:

	[s]	celkový čas [s]	rychlost [km/h]	lambda
čas na změnu rychlosti	10	10	0	1
čas ustálení před	10	20	0	1
čas pulzu 1,15	10	30	0	1,15
čas ustálení po	50	80	0	1
čas pulzu 0,7	10	90	0	0,7
čas ustálení po	50	140	0	1
čas na změnu rychlosti	10	150	15	1
čas ustálení před	10	160	15	1
čas pulzu 1,15	10	170	15	1,15
čas ustálení po	50	220	15	1
čas pulzu 0,7	10	230	15	0,7
čas ustálení po	50	280	15	1
čas na změnu rychlosti	10	290	30	1
čas ustálení před	10	300	30	1
čas pulzu 1,15	10	310	30	1,15
čas ustálení po	50	360	30	1
čas pulzu 0,7	10	370	30	0,7
čas ustálení po	50	420	30	1
čas na změnu rychlosti	10	430	45	1
čas ustálení před	10	440	45	1
čas pulzu 1,15	10	450	45	1,15
čas ustálení po	50	500	45	1
čas pulzu 0,7	10	510	45	0,7
čas ustálení po	50	560	45	1
čas na změnu rychlosti	10	570	60	1
čas ustálení před	10	580	60	1
čas pulzu 1,15	10	590	60	1,15
čas ustálení po	50	640	60	1
čas pulzu 0,7	10	650	60	0,7
čas ustálení po	50	700	60	1
čas na změnu rychlosti	10	710	75	1
čas ustálení před	10	720	75	1
čas pulzu 1,15	10	730	75	1,15
čas ustálení po	50	780	75	1
čas pulzu 0,7	10	790	75	0,7
čas ustálení po	50	840	75	1
čas na změnu rychlosti	10	850	90	1
čas ustálení před	10	860	90	1
čas pulzu 1,15	10	870	90	1,15
čas ustálení po	50	920	90	1
čas pulzu 0,7	10	930	90	0,7
čas ustálení po	50	980	90	1
čas na změnu rychlosti	10	990	105	1
čas ustálení před	10	1000	105	1
čas pulzu 1,15	10	1010	105	1,15
čas ustálení po	50	1060	105	1
čas pulzu 0,7	10	1070	105	0,7
čas ustálení po	50	1120	105	1
čas na změnu rychlosti	10	1130	120	1
čas ustálení před	10	1140	120	1
čas pulzu 1,15	10	1150	120	1,15
čas ustálení po	50	1200	120	1
čas pulzu 0,7	10	1210	120	0,7
čas ustálení po	50	1260	120	1
čas na změnu rychlosti	10	1270	135	1
čas ustálení před	10	1280	135	1
čas pulzu 1,15	10	1290	135	1,15
čas ustálení po	50	1340	135	1
čas pulzu 0,7	10	1350	135	0,7
čas ustálení po	50	1400	135	1

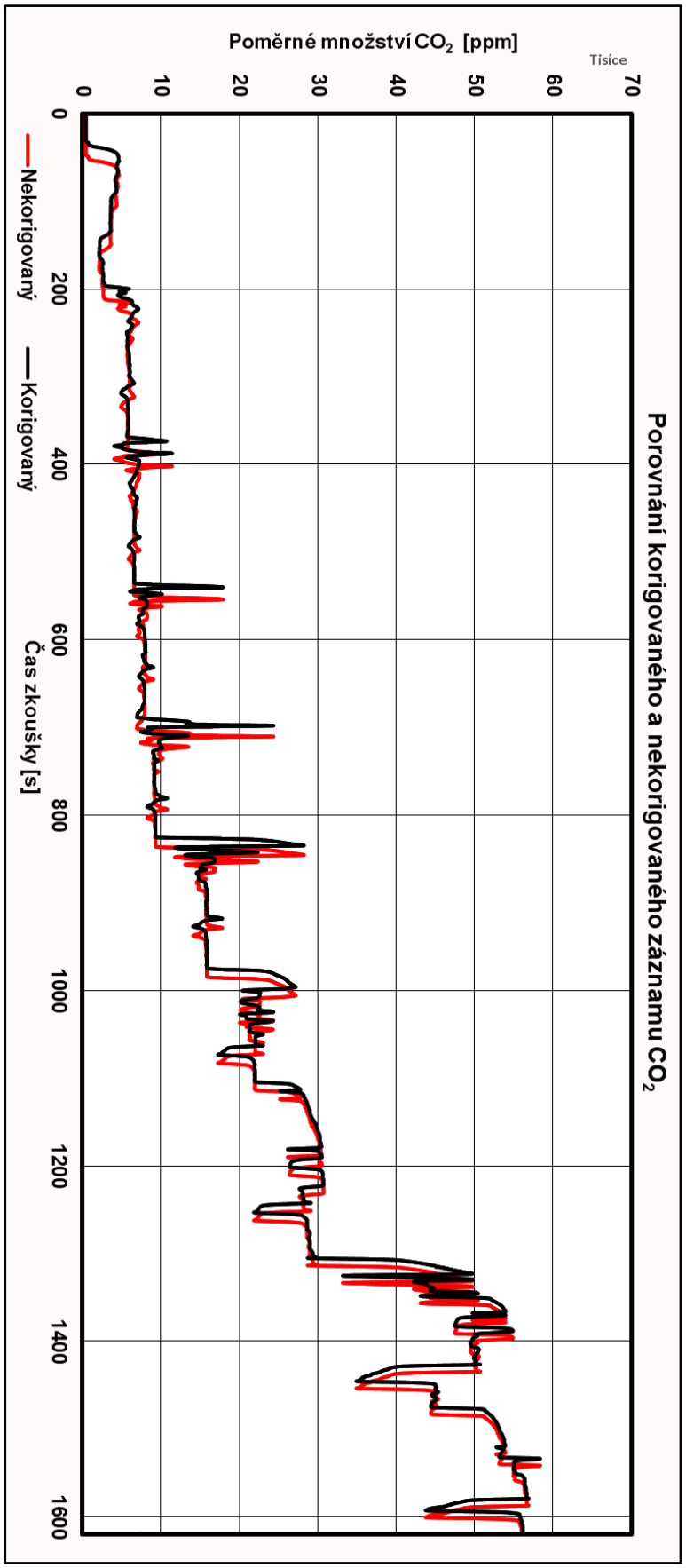
Příloha B:



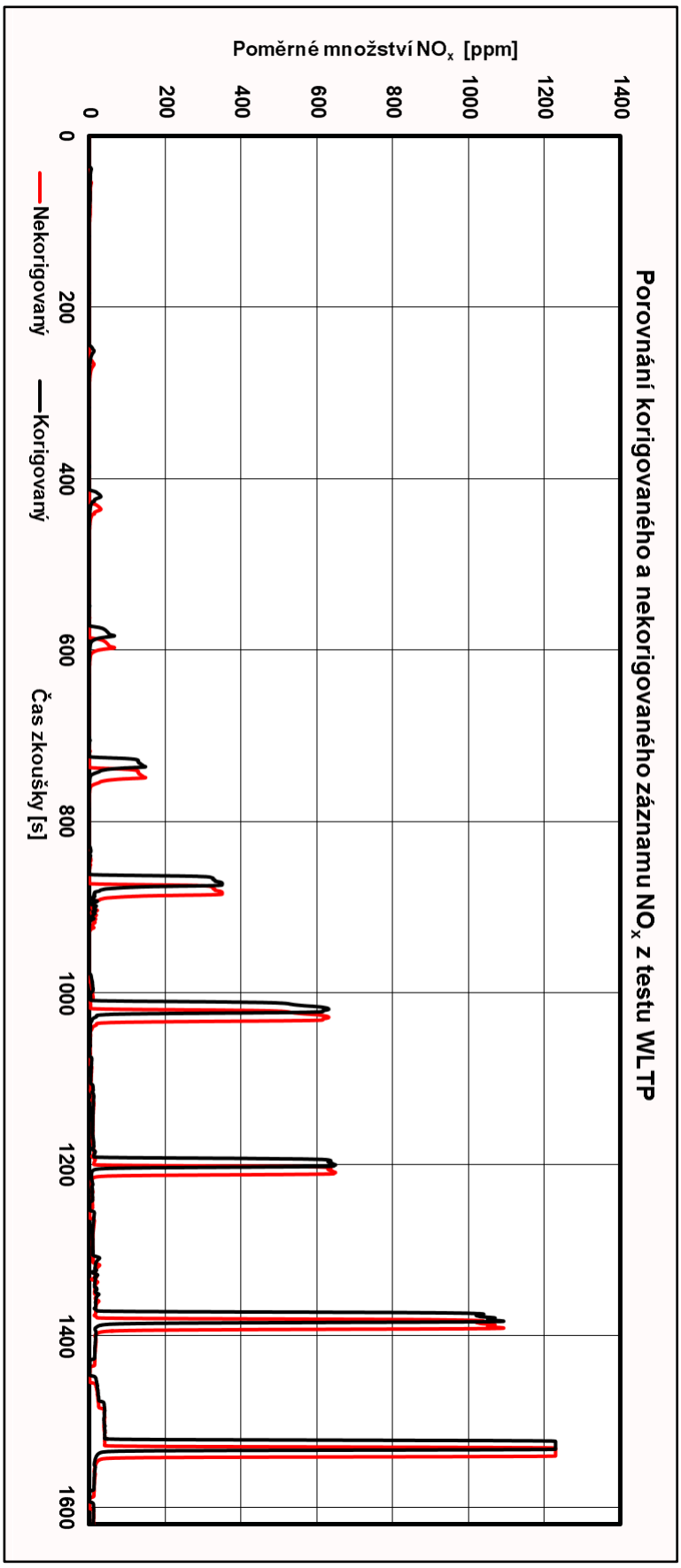
Obrázek B1: Průběh emisí HC před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky popsané v kapitole 6.2.3.



Obrázek B2: Průběh emisí CH_4 před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky popsané v kapitole 6.2.3.

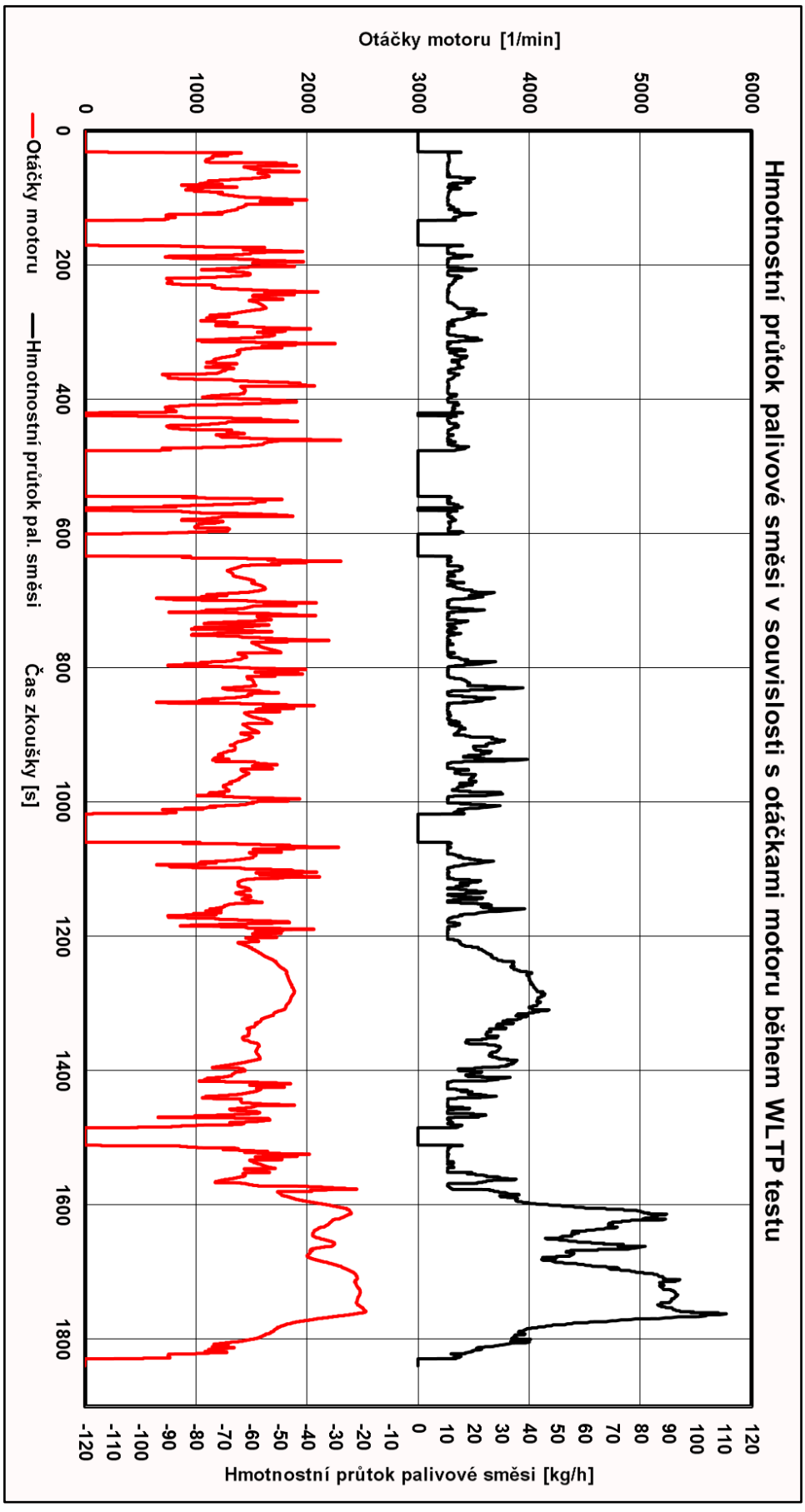


Obrázek B3: Průběh emisí CO_2 před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky popsané v kapitole 6.2.3.

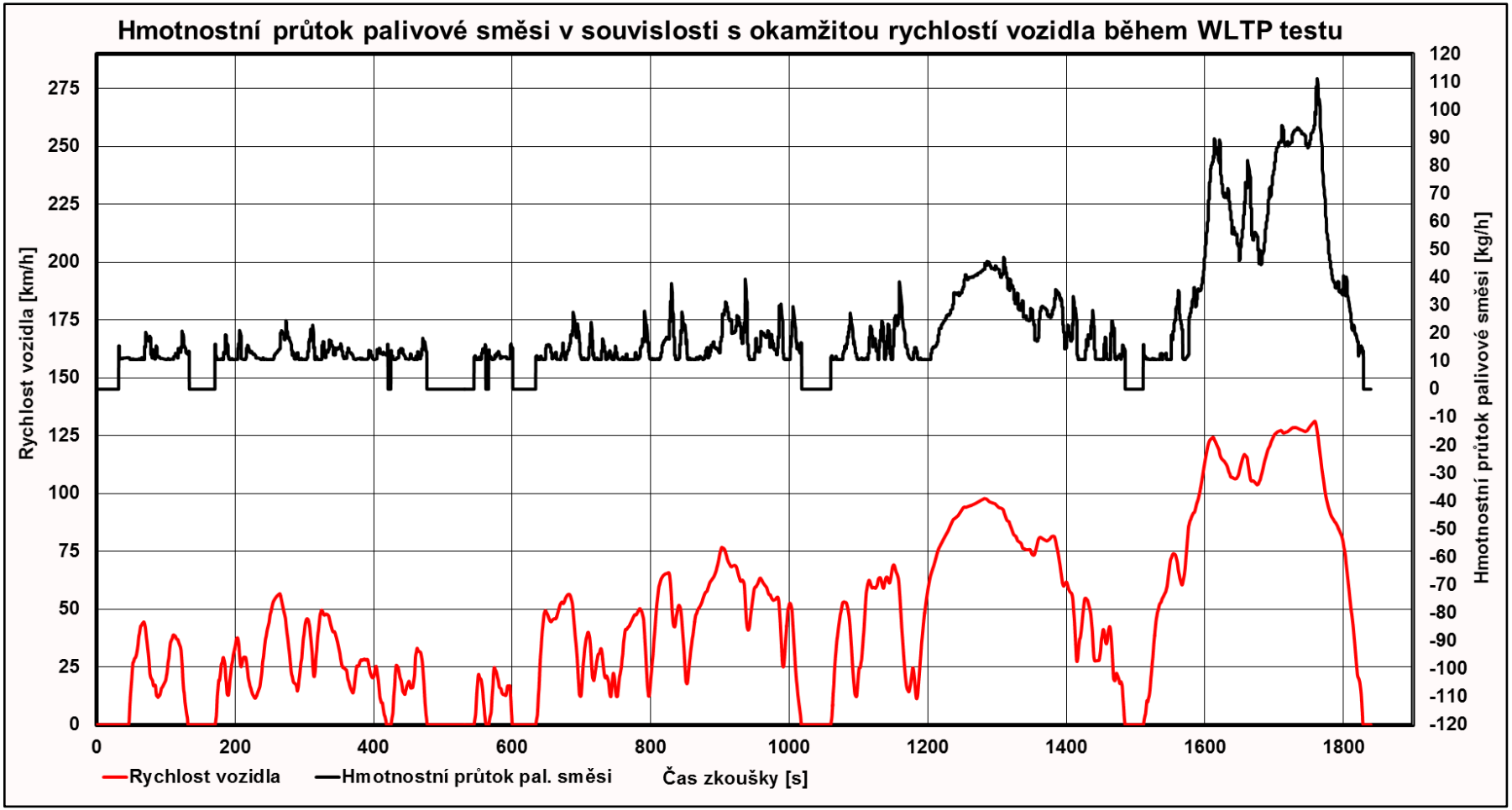


Obrázek B4: Průběh emisí NO_x před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky popsané v kapitole 6.2.3.

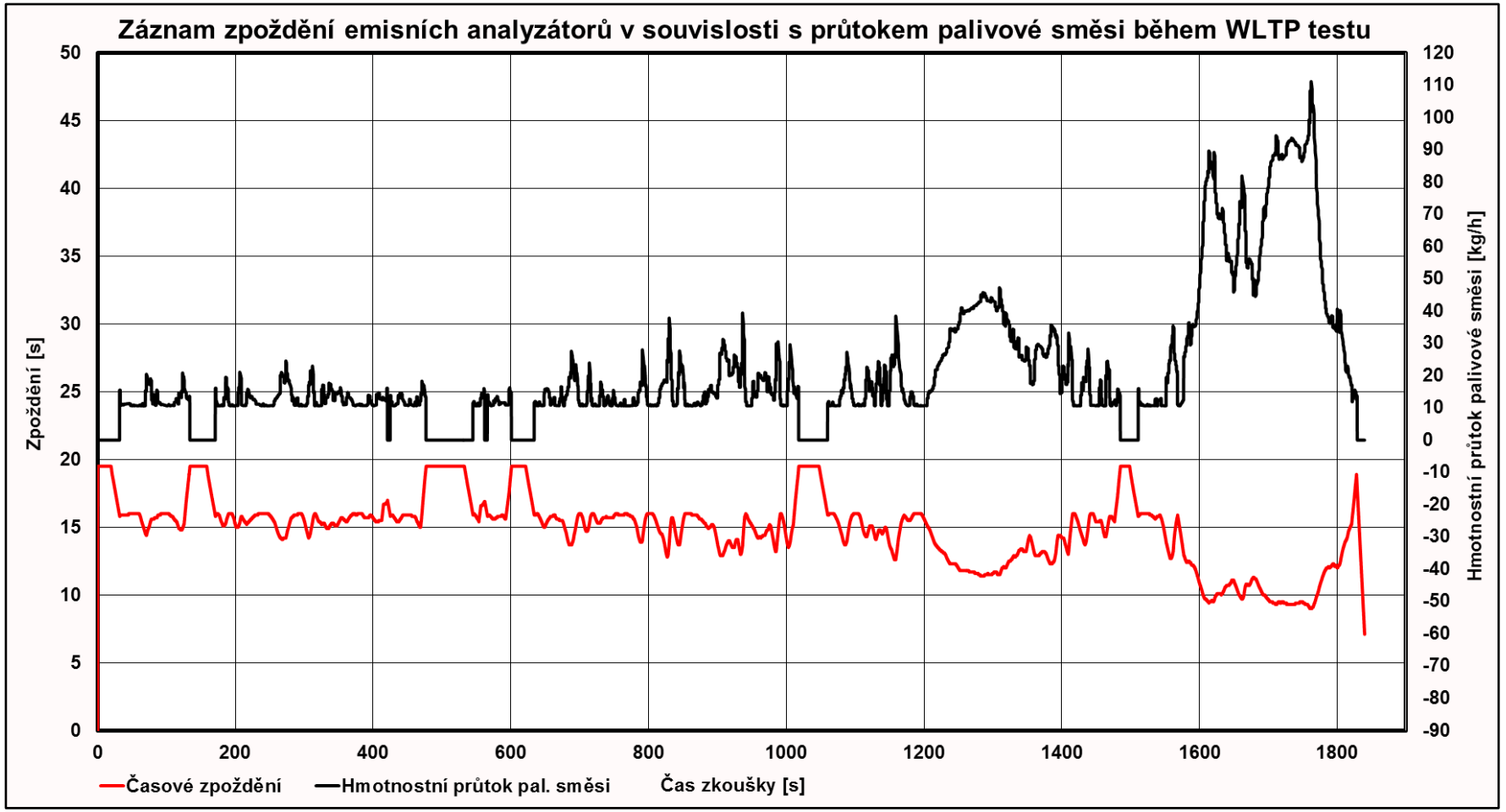
Příloha C:



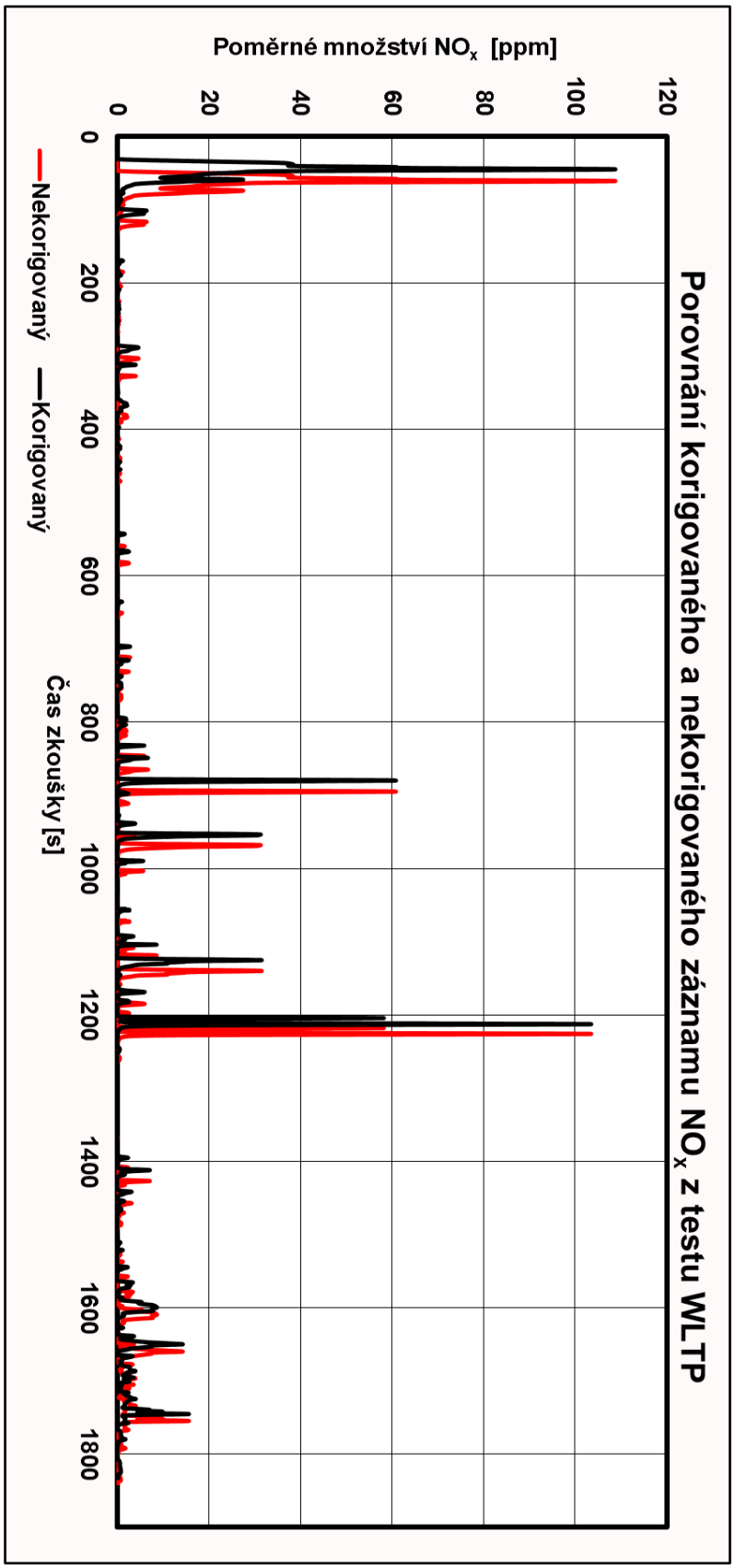
Obrázek C1: Vypočítané množství palivové směsi v závislosti na aktuálním výkonu na válcích a otáčkách motoru, společně s průběhem naměřených otáček při WLTP testu.



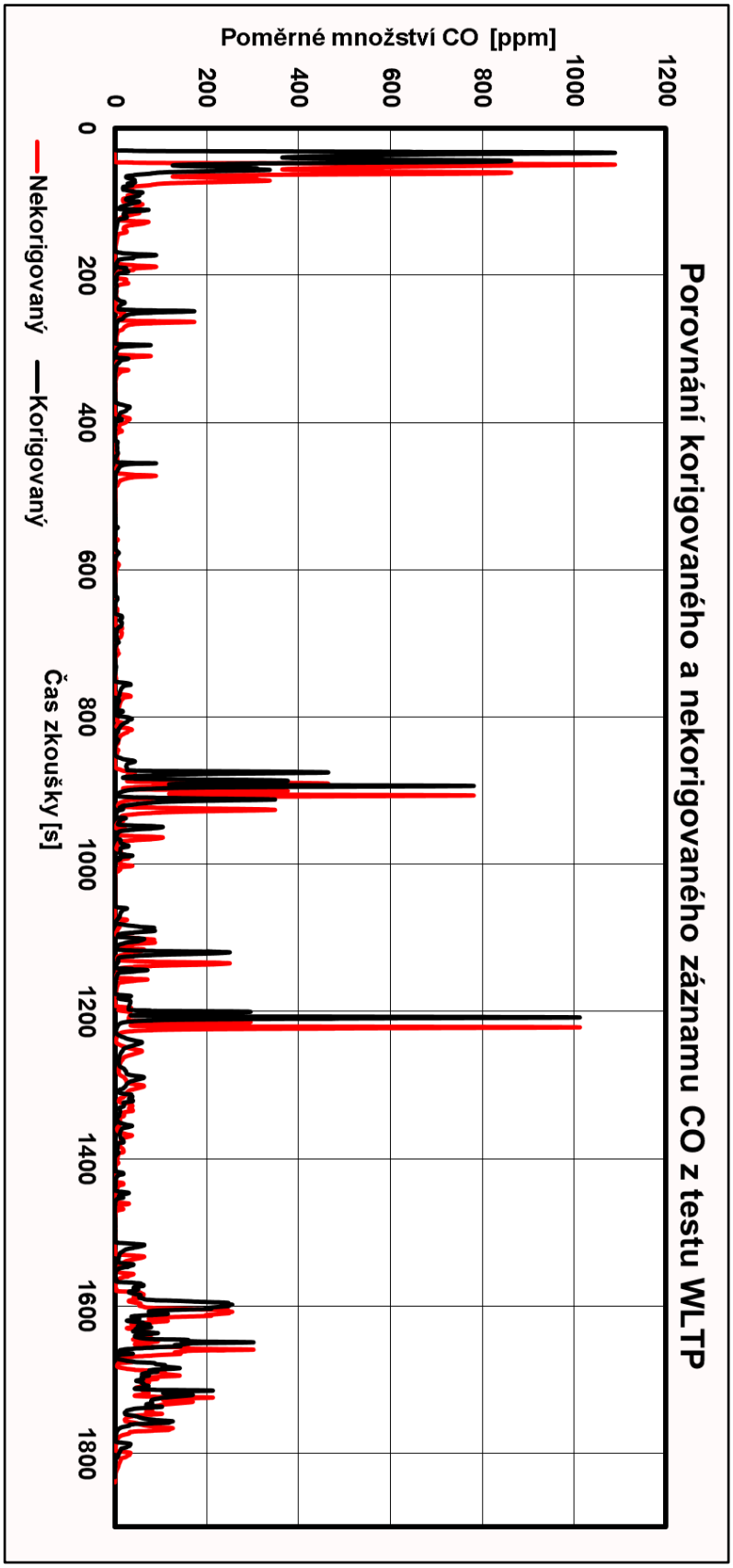
Obrázek C2: Vypočítané množství palivové směsi v závislosti na aktuálním výkonu na válcích a otáčkách motoru, společně s průběhem okamžité rychlosti vozidla při WLTP testu.



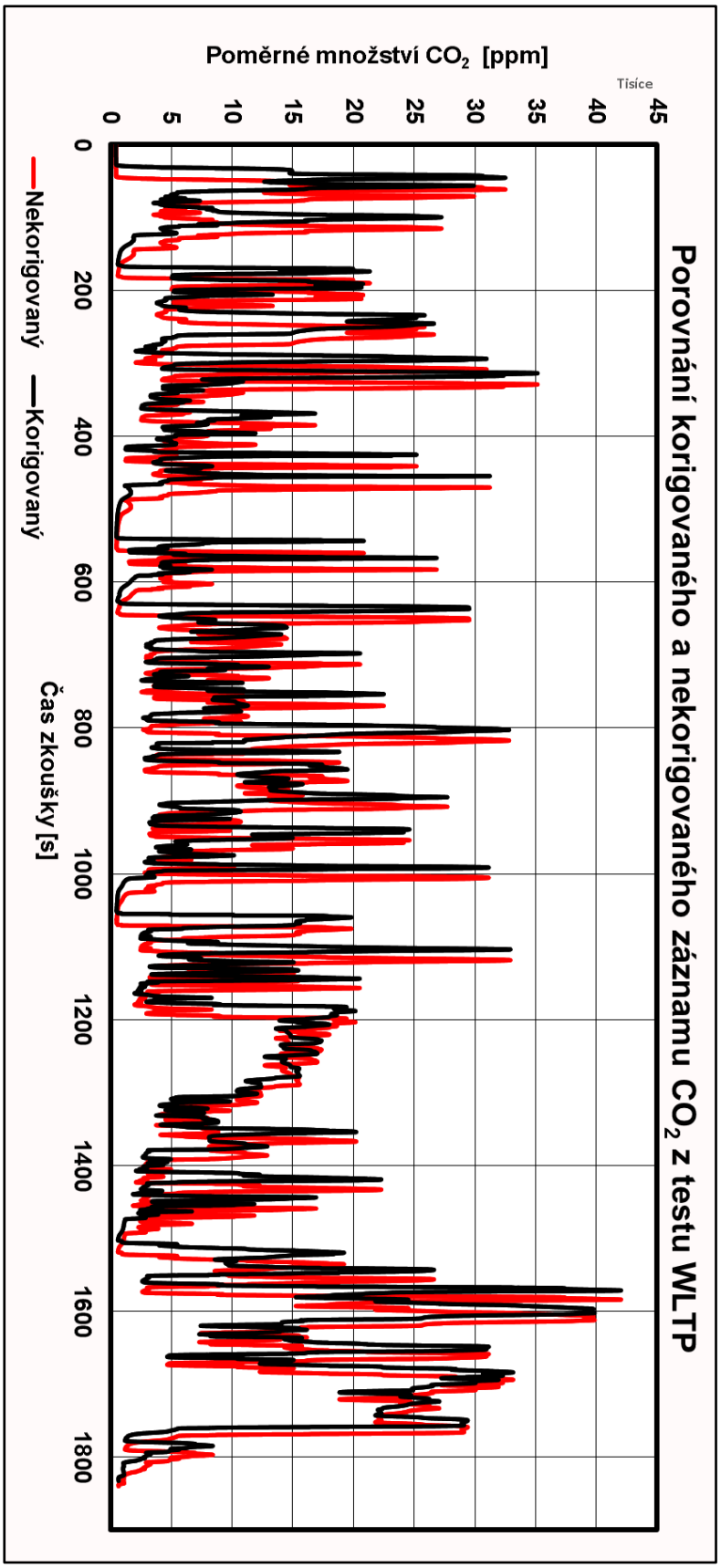
Obrázek C3: Průběh vypočítaného zpoždění emisních analyzátorů CO, HC, CO_2, NO_x. Zpoždění bylo určeno na základě okamžitého hmotnostního průtoku palivové směsi během WLTP testu.



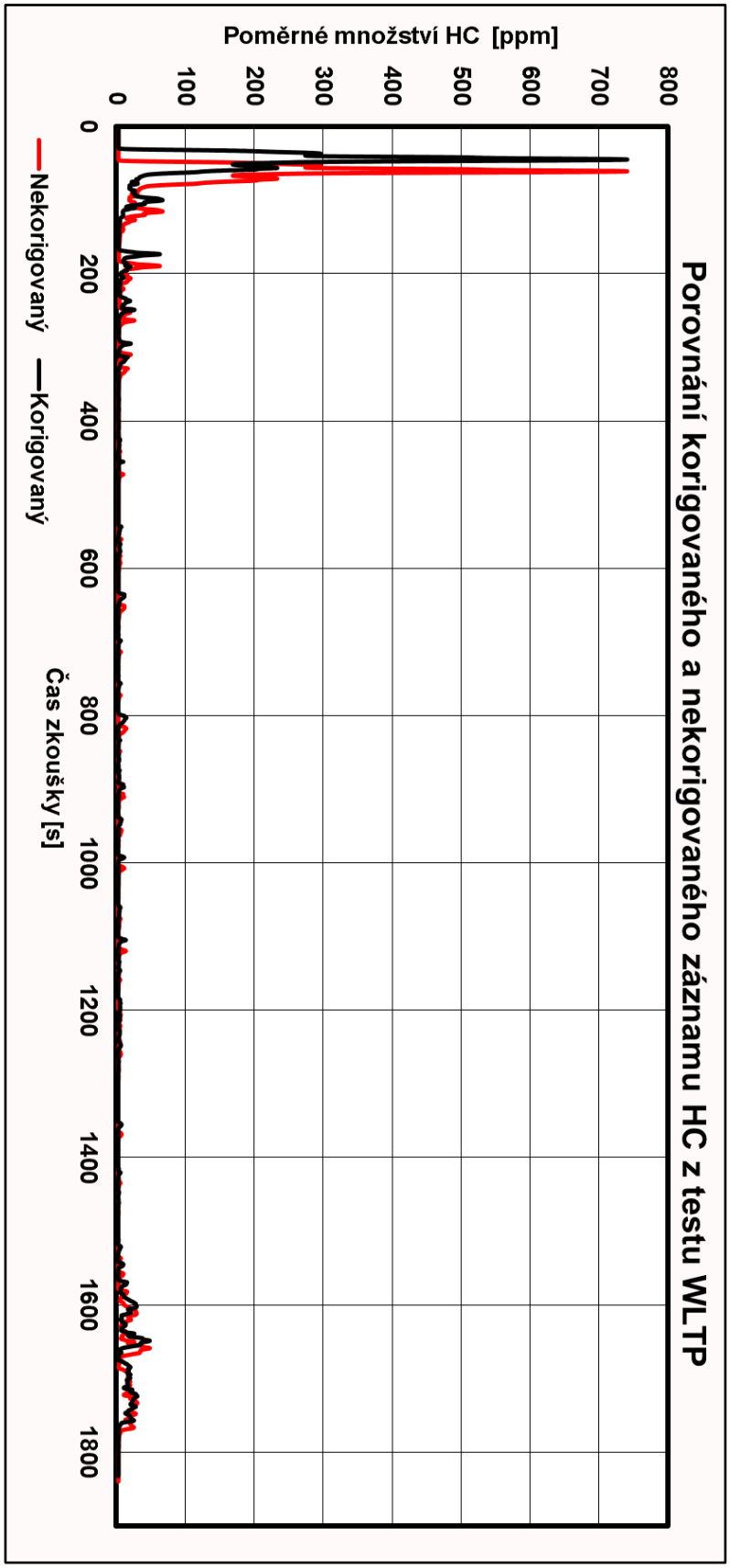
Obrázek C4: Průběh záznamu emisí NOx před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky WLTP.



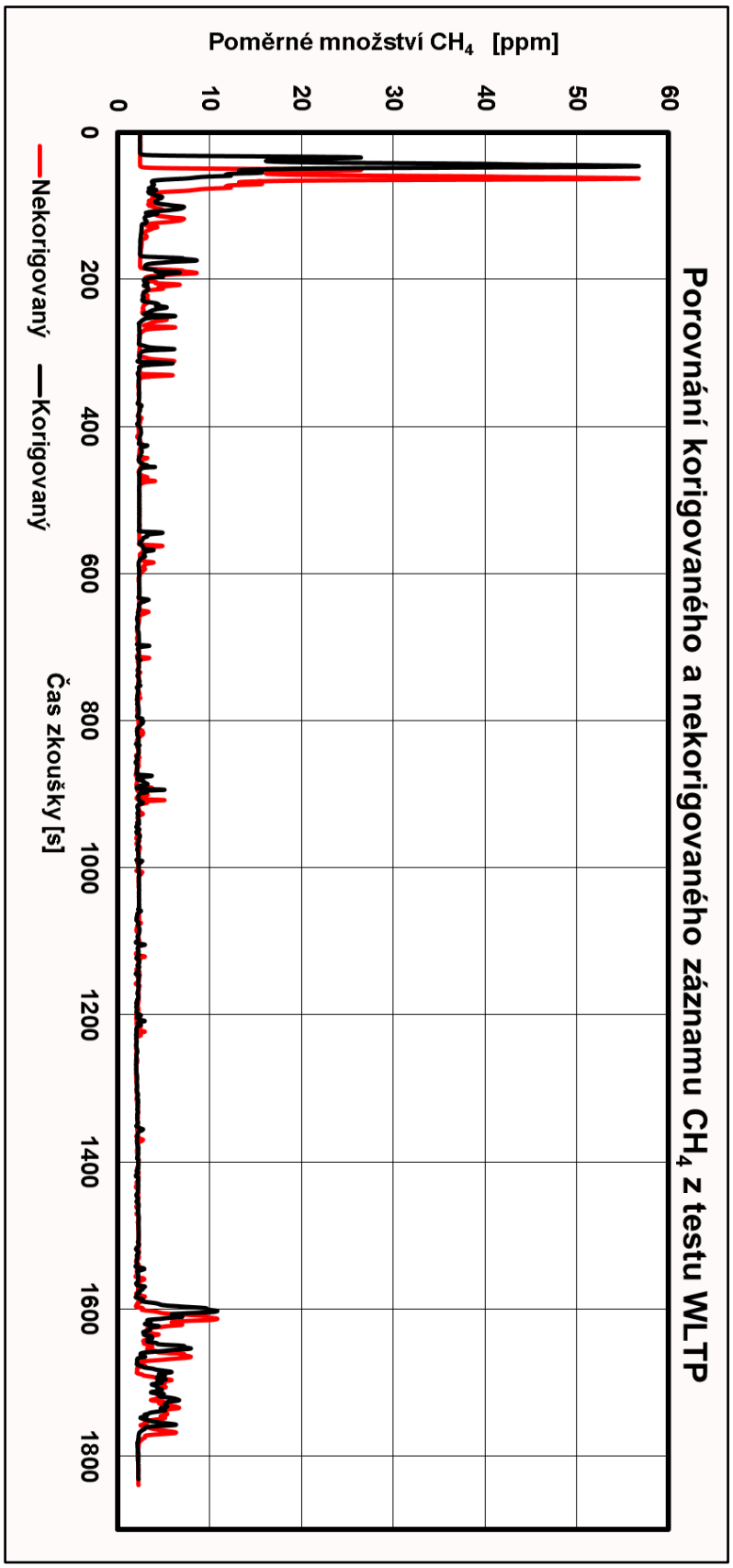
Obrázek C5: Průběh záznamu emisí CO před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky WLTP.



Obrázek C6: Průběh záznamu emisí CO_2 před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky WLTP.



Obrázek C7: Průběh záznamu emisí HC před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky WLTP.



Obrázek C8: Průběh záznamu emisí CH_4 před a po časové korekci. Záznam byl pořízen během zkoušky WLTP.