

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra vozidel a pozemní dopravy**



Diplomová práce

**Vliv přeplňování na provozní parametry vznětového  
spalovacího motoru**

Vedoucí práce: **Ing. Martin Kotek, Ph.D.**

Autor práce: **Bc. Jiří Rejthárek**

© 2018 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jiří Rejthárek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Vliv přeplňování na provozní parametry vznětového spalovacího motoru**

Název anglicky

**Effect of supercharging on the operating parameters of the compression ignition engine**

---

### Cíle práce

Cílem práce bude analyzovat a experimentálně ověřit vliv přeplňování na provozní parametry vznětového spalovacího motoru. V rámci experimentů budou provedeny konstrukční úpravy přeplňování (změna plnicího tlaku, použití mezichladiče a další) a bude zkoumán vliv na výkon a produkci emisí.

### Metodika

- prostudovat základní literaturu, normy, internetové odkazy a další dostupné prameny z celého světa a provést literární rešerši v oblasti přeplňování spalovacích motorů
- v rámci experimentů ověřit vliv přeplňování na provozní parametry vznětového spalovacího motoru

**Doporučený rozsah práce**

40-50 stran textu včetně tabulek a obrázků

**Klíčová slova**

turbo, diesel, spotřeba, kouřivost

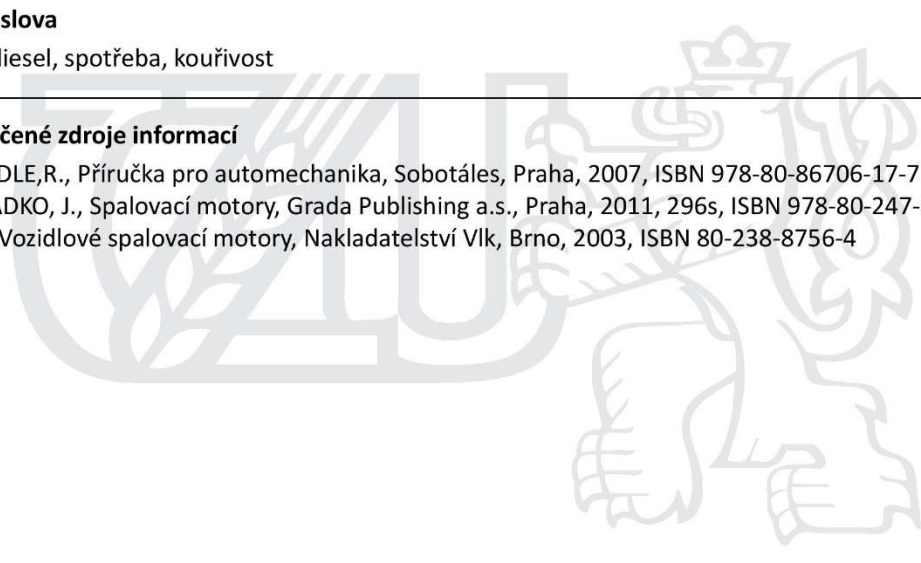
---

**Doporučené zdroje informací**

GSCHIEDLE, R., Příručka pro automechaniku, Sobotáles, Praha, 2007, ISBN 978-80-86706-17-7

HROMÁDKO, J., Spalovací motory, Grada Publishing a.s., Praha, 2011, 296s, ISBN 978-80-247-3475-0

VLK, F., Vozidlové spalovací motory, Nakladatelství Vlk, Brno, 2003, ISBN 80-238-8756-4



---

**Předběžný termín obhajoby**

2017/18 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vozidel a pozemní dopravy

---

Elektronicky schváleno dne 16. 1. 2017

**doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv přeplňování na provozní parametry vznětového spalovacího motoru vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 30.3.2018

\_\_\_\_\_

**Abstrakt:** Cílem této diplomové práce je experimentálně ověřit vliv přeplňování na provozní parametry vznětového spalovacího motoru. V rámci experimentu byly prováděny změny parametrů přeplňování, jako je změna plnicího tlaku turbodmychadla a změny v účinnosti chlazení stlačeného vzduchu v sání. Byla sesbírána data o výkonu motoru, emisích pevných částic a data z řídicí jednotky motoru. Na základě těchto dat je v této práci vyhodnocen vliv jednotlivých změn na zmíněné parametry. Samotnému experimentu předchází stručná rešerše, která k němu poskytuje teoretický základ. Je zde popsána základní funkce a historický vývoj vznětového spalovacího motoru, teorie přeplňování pomocí turbodmychadla, teorie chlazení stlačeného vzduchu pomocí mezichladiče, problematika emisí vznětového motoru a způsoby měření výkonu automobilového motoru.

**Klíčová slova:** Turbodmychadlo, vznětový motor, emise, výkon

## **Effect of supercharging on the operating parameters of the compression ignition engine**

**Abstract:** The aim of this diploma thesis is to experimentally verify the influence of supercharging on the operating parameters of the diesel combustion engine. Within the experiment, changes in charging parameters such as turbocharger intake pressure changes and changes in intercooler performance were done. There were collected data as engine power, diesel particulate emissions and data from the engine control unit. Based on these data, the impact of individual changes on these parameters is evaluated in this work. The experiment itself is preceded by a brief research that provides a theoretical basis for it. It describes the basic functions and historical development of the diesel combustion engine, turbocharging theory, theory of compressed air cooling by an intercooler, the issue of diesel engine emissions and how to measure the power of a car engine.

**Key words:** Turbocharger, diesel engine, emissions, power

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Kotkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a trpělivost při zpracování této práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Metodika práce .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Vznětové spalovací motory .....</b>	<b>4</b>
4.1	Základní princip fungování vznětového spalovacího motoru.....	4
4.2	Historie vznětového motoru.....	6
4.3	p-V diagram vznětového motoru .....	7
<b>5</b>	<b>Přepřívání vznětových motorů.....</b>	<b>9</b>
5.1	Princip přepřívání.....	9
5.2	Turbodmychadlo .....	10
5.2.1	Druhy regulace .....	11
5.3	Chlazení stlačeného vzduchu.....	14
5.3.1	Princip chlazení stlačeného vzduchu .....	14
5.3.2	Druhy chlazení .....	15
<b>6</b>	<b>Emise vznětového motoru .....</b>	<b>19</b>
6.1	Složení výfukových plynů vznětových motorů .....	19
6.2	Snižování emisí vznětového motoru.....	21
6.2.1	Opatření u motoru .....	21
6.2.2	Opatření za motorem.....	22
6.3	Homologační měření emisí a spotřeby paliva.....	23
6.3.1	NEDC.....	23
6.3.2	WLTP .....	24
<b>7</b>	<b>Měření výkonových parametrů .....</b>	<b>26</b>
7.1	Dynamická metoda .....	26
7.2	Statická metoda.....	27
7.2.1	Měření na motorové zkušebně .....	27
7.2.2	Měření na válcové zkušebně .....	28
<b>8</b>	<b>Měření.....</b>	<b>29</b>
8.1	Měření jízdních cyklů NEDC a WLTC .....	32
8.2	Měření výkonu.....	38

<b>9</b>	<b>Výsledky, zhodnocení .....</b>	<b>43</b>
9.1	Měření jízdních cyklů .....	43
9.2	Měření výkonu .....	44
<b>10</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>48</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam tabulek a grafů .....</b>	<b>56</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>57</b>



# 1 Úvod

Tato diplomová práce navazuje na předchozí bakalářskou práci na téma přeplňování motorů s vnitřním spalováním, která obsahovala základní průřez danou problematikou. Rozsah této práce se tentokrát omezuje na přeplňování vznětových spalovacích motorů pomocí turbodmychadla. Věnována bude především automobilovým motorům, neboť oborem mého studia je „silniční a městská automobilová doprava“.

Vznětový motor v osobních automobilech je v současnosti velmi diskutované téma. Nejčastěji se hovoří o jeho emisích a s tím související možné zákazy vjezdu do center evropských měst, především v Německu. Širokou diskuzi i mezi laickou veřejností nastartovala kauza „dieselgate“ v USA v roce 2015, kdy bylo zveřejněno vyšetřování automobilky Volkswagen na základě studie organizace CARB. Studenti tehdy zjistili, že vozy oné automobilky se vznětovým motorem 2.0 TDI vypouští v reálném provozu několikanásobně více oxidů dusíku, než dovolují přísné limity při homologačních testech v laboratoři.

V České republice se problematika vznětových motorů a jejich emisí řeší především v souvislosti se zpřísněním pravidelných emisních kontrol na stanicích technické kontroly, kdy se u modernějších vozů podporujících protokol EOBD kontroluje funkce emisních systémů ve voze. Problémem byly především vznětové motory originálně vybavené filtrem pevných částic, u kterých byl filtr vyřazen (často spolu s oxidačním katalyzátorem), vozidlo dál nelegálně jezdilo po pozemních komunikacích a vypouštělo zdraví škodlivé látky, avšak do roku 2016 měření emisí paradoxně procházelo. Tomu by nová metodika měla zabránit. Dalším diskutovaným tématem je tzv. chiptuning, neboli softwarová úprava řídicí jednotky, která může mít vliv na kouřivost vznětového motoru.

V této práci bude měřen vůz Volkswagen Golf s přeplňovaným vznětovým motorem. Cílem měření bude zjistit vliv změn, jako je právě chiptuning, nebo úprava chlazení, na výkon motoru. Také budou měřeny emise pevných částic v jízdnicích cyklech NEDC a WLTC.

## 2 Cíl práce

Cílem práce bude analyzovat a experimentálně ověřit vliv přeplňování na provozní parametry vznětového spalovacího motoru. V rámci experimentů budou provedeny konstrukční úpravy přeplňování (změna plnicího tlaku, použití mezichladiče a další) a bude zkoumán vliv na výkon a produkci emisí.

### 3 Metodika práce

V první řadě bude prostudována základní literatura, internetové zdroje a další dostupné prameny z celého světa. Na základě materiálů bude provedena literární rešerše. Hlavní témata rešerše budou vznětový motor, přeplňování, emise a měření výkonu.

V druhé části práce bude připraven a proveden experiment, ověřující vliv přeplňování na provozní parametry vznětového spalovacího motoru, především na výkon a emise. Experiment se bude dělit na dvě části.

V první části měření bude cílem změřit emise pevných částic v homologačních jízdách NEDC a WLTC. Každý cyklus bude měřen dvakrát. Jednou se sériovou řídicí jednotkou, kterou byl vůz vybaven z výroby. Podruhé s upravenou jednotkou (tzv. chiptuning), kde je zvýšený plnicí tlak přeplňování a dávka paliva o cca 30 %. Cílem bude porovnat výsledky z jízdách cyklů NEDC a WLTC mezi sebou, to znamená jaký vliv má softwarová úprava řídicí jednotky na emise a jaký je rozdíl v provozních veličinách.

Druhá část měření se bude věnovat měření výkonových parametrů na válcové zkušebně. Bude zde opět porovnávána sériová řídicí jednotka s upravenou. Navíc zde bude každé měření opakováno dvakrát, podruhé bude mezichladič stlačeného vzduchu ostřikován vodou, což zlepšuje účinnost chlazení. Cílem bude zjistit, jaký vliv má ostřikování mezichladiče vodou jednak na výkon, ale také na provozní parametry, jako je teplota stlačeného vzduchu za mezichladičem.

V závěru práce budou zhodnoceny výsledky experimentu.

## 4 Vznětové spalovací motory

Vznětový motor je tepelný stroj, který přeměňuje energii uloženou v palivu na mechanickou práci a na teplo. Jedná se o pístový motor s vnitřním spalováním a výměnou obsahu válce. Vznětový motor do válce nasává čistý vzduch, palivo je vstřikováno většinou přímo do válce, případně do předkomůrky. Ke vznícení paliva dochází pouze vlivem tlaku a teploty ve válci, není zde žádná zapalovací jiskra, jako u zážehových motorů. [1]

### 4.1 Základní princip fungování vznětového spalovacího motoru

Vznětový motor může být jak dvoudobý, tak čtyřdobý. Dále se budeme zabývat výhradně čtyřdobým vznětovým motorem, neboť jiný se v automobilové dopravě nepoužívá. Dvoudobé vznětové motory se dnes používají už pouze v lodní dopravě, v minulosti sloužily také na pohon lokomotiv na železnici. [2]

Čtyřdobý motor má tyto fáze: sání, komprese, expanze, výfuk. Expanzi předchází vstřík paliva do stlačeného vzduchu těsně před horní úvratí pístu, kde se palivo vznítí pomocí vysoké teploty a tlaku. Vlivem vzníceného paliva, se plyny ve válci rychle roztahují a tím uvádí píst do chodu. Tímto procesem se převádí chemická energie z paliva do mechanické energie. Oproti zážehovému motoru, kde je k zapálení směsi potřeba jiskry, pracuje vznětový motor s vyššími tlaky, aby ke vznětu paliva mohlo dojít. To je dosažené vyšším kompresním poměrem, v rozsahu zhruba 1:14 – 1:14 (zážehový maximálně do 14:1, obvykle však kolem 10:1 u současných motorů). Díky vyšším tlakům dosahuje vznětový motor větší účinnosti dle Carnotova cyklu. Celková účinnost pak je kolem 30-45 % (zážehový cca o 10 % méně). [1] [2]

Jako palivo se používá nejvíce motorová nafta, která má navíc vyšší výhřevnost oproti benzínu, obvyklému jako palivo u zážehových motorů. Provoz vznětových motorů je proto z ekonomického hlediska výhodný. Z tohoto důvodu se často používá v nákladní dopravě, na pohon lodí, vlaků a nákladních automobilů. Tato práce bude dále omezena na použití převážně v osobních automobilech. [1]

**Cyklus čtyřdobého vznětového motoru:**

**1. Sání** – přes otevřený sací ventil je do válce nasáván čistý vzduch ze sání. Výfukový ventil je uzavřen. Píst se pohybuje z horní úvratě do dolní.

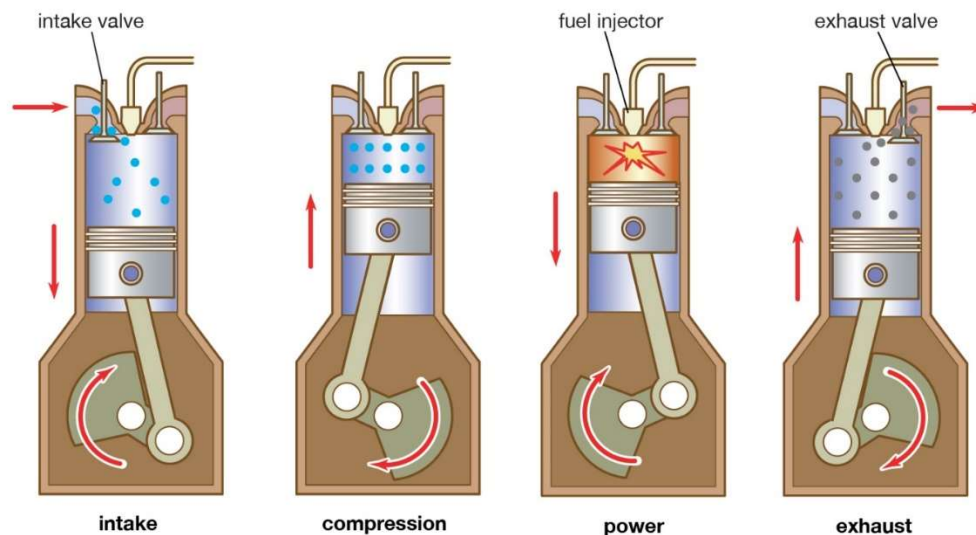
**2. Komprese** – Píst se pohybuje z dolní úvratě do horní, sací i výfukový ventil je zavřený. Tím se zmenšuje objem vzduchu ve válci a dochází k nárůstu tlaku i teploty. Palivo je vstříkováno tryskou přímo do válce či do předkomůrky pod vysokým tlakem před horní úvratí, vlivem vysoké teploty 700 – 900 °C se odpaří a vznítí. Na konci komprese je tlak ve válci 3,0 až 5,5 MPa, díky vysokému kompresnímu poměru, u vznětového motoru v rozmezí 1:14 až 1:23.

**3. Expanze** – vznícené palivo hoří a expanduje, tím tlačí na dno pístu. Sací i výfukový ventil je stále zavřený. Píst se pohybuje z horní úvratě do dolní. Při expanzi motor koná práci.

**4. Výfuk** – otevře se výfukový ventil a spaliny jsou vytlačeny pístem z válce do výfuku. Píst jde z dolní úvratě do horní. Čtyřdobý cyklus je tímto zdvihem ukončen a znovu se opakuje. Celý cyklus proběhl během dvou otáček klikového hřídele.

Celý cyklus je znázorněn na obrázku 4-1.[1][2]

**Obrázek 4-1** Cyklus čtyřdobého vznětového motoru



© Encyclopædia Britannica, Inc.

Zdroj: <https://www.britannica.com/media/full/162716/19423>

## 4.2 Historie vznětového motoru

Příběh vznětového motoru s vnitřním spalováním začíná v Německu roku 1892 u Rudolfa Diesela a jeho prvního patentu. Ten se už delší dobu před tím zabýval myšlenkou hospodárnějšího pohonu, než je parní stroj. Nakonec skončil u zdokonalení Ottova motoru, kde nepoužil elektrickou jiskru k zažehnutí směsi, ale namísto toho ke vznícení došlo vstříknutím paliva přímo do stlačeného vzduchu ve válci. Prvním výrobcem tohoto Dieselova motoru byl německý výrobce kanónů Krupp, pro kterého 25. dubna 1897 Diesel sestavil funkční motor na petrolej. Následovaly další úpravy a vychytání počátečních problémů, až nakonec v roce 1900 na světové výstavě v Paříži byl tento motor vyznamenán udělením Velké ceny. Následně v roce 1911 byla spuštěna první loď se vznětovým čtyřdobým motorem Selandia, která sloužila až do roku 1942. První sériově vyráběný nákladní automobil s Dieselovým motorem byl vyroben v roce 1924 německou továrnou MAN. [3]

V roce 1936 pak bylo představeno první sériově vyráběné osobní auto se vznětovým motorem. Byl jím Mercedes-Benz W138 260D. Poháněl ho řadový vznětový čtyřválec o zdvihovém objemu 2,6 l s atmosférickým plněním, vstříkovacím čerpadlem Bosch, kompresním poměrem 20,5:1 a výkonem 33 kW při 3200 ot/min. [4]

První osobní automobil s přeplňovaným vznětovým motorem byl opět Mercedes-Benz, konkrétně vrcholový model W116 300SD z roku 1978. Byl vybaven řadovým pětiválcem 3,0l přeplňovaný turbodmychadlem a výkonem 85 kW. Nabízen byl pouze ve Spojených státech amerických. [4]

V Evropě byl prvním přeplňovaným turbo-dieselem Peugeot 604. V roce 1986 byl Fiat Croma prvním osobním autem vybaveným přímým vstříkovaním. Ve stejném roce BMW představilo první vznětový motor s elektronicky řízeným vstříkovacím čerpadlem Bosch. V roce 1989 pak představilo Audi první vznětový motor s přímým vstříkovaním a elektronicky řízeným čerpadlem. Následně v roce 1991 představil Fiat přeplňování pomocí turbodmychadla s proměnlivou geometrií turbíny. [5]

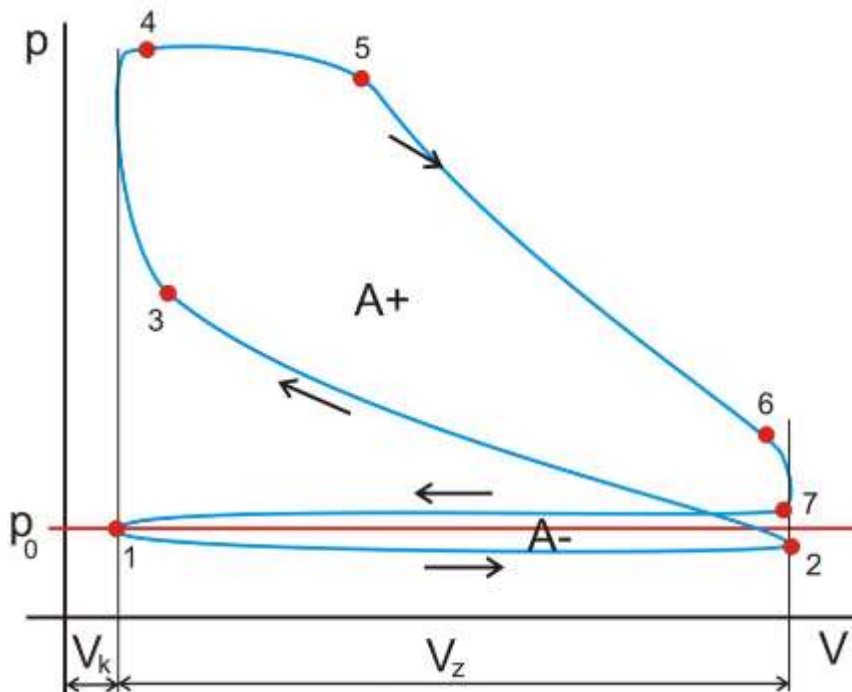
Nakonec v roce 1995 byl představen VW Golf se vznětovým čtyřválcem 1,9 l, přímým vstříkovaním, elektronicky řízeným čerpadlem Bosch, turbodmychadlem s variabilní geometrií Garrett, o výkonu 81 kW, kterého se bude týkat druhá část této práce. [5]

### 4.3 p-V diagram vznětového motoru

Diagram p-V je pracovní oběh, který představuje průběh pracovního procesu v motoru. Rozbor oběhu je základním podkladem pro posouzení pracovních charakteristik motoru, jako je např. využití tepla nebo střední tlak na píst. Matematicky vyjádřitelný oběh se neobejde bez určitého zjednodušení, proto rozeznáváme oběhy ideální a teoretické, rozlišují se dle stupně zjednodušení. [1]

Teoretický diagram vznětového motoru je zobrazen na obrázku 4-2 a popsán níže:

**Obrázek 4-2 Teoretický p-V diagram pístového čtyřdobého vznětového motoru**



Zdroj: <http://docplayer.cz/8663967-19-a-20-pistove-spalovaci-motory-zazehove-a-vznetove-19-and-20-petrol-and-diesel-pistone-combustion-engines.html>

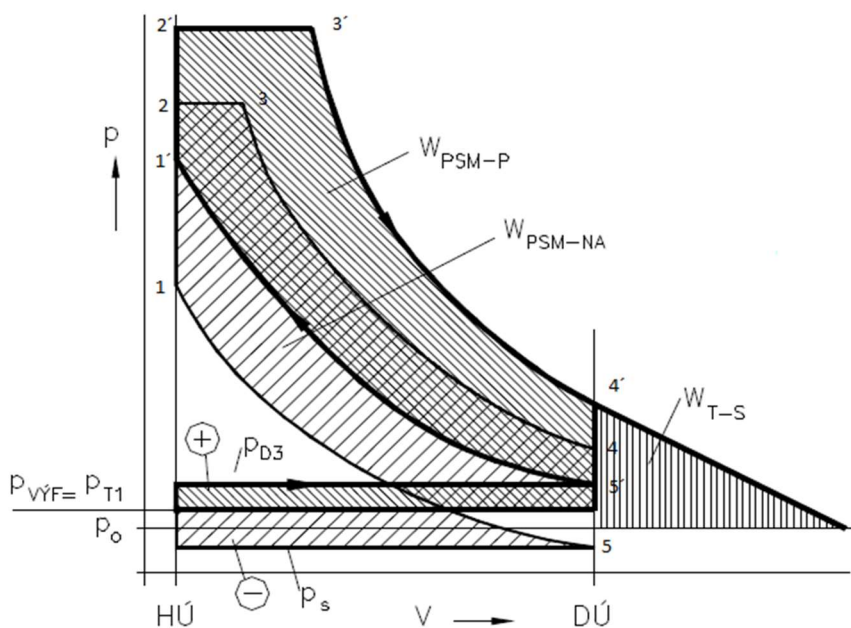
- 1-2 izobarické sání – nasávání vzduchu
- 2-3 adiabatická komprese
- 3 předvstřík pro vznícení směsi
- 3-4 pilotní vstřík – izochorické hoření směsi
- 4-5 dostřík – izobarické hoření směsi
- 5-6 adiabatická expanze
- 6 – otevření výfukového ventilu
- 6-7 izochorický výfuk
- 6-1 izobarický výfuk – vytlačení spalin [6]

Vznětový čtyřdobý pístový motor je charakteristický tzv. Sabatovým cyklem. Tento motor je charakteristický tím, že nasává čistý vzduch, palivo je vstřikováno buď přímo do válce, nebo do předkomůrky a tato směs se vznítí samotným nárůstem teploty a tlaku při kompresním zdvihu bez pomoci dalšího zařízení, jako je třeba zapalovací systém u zážehových motorů. [1]

Sabatův cyklus se skládá z těchto fází (viz obrázek 4-3):

- 5 – 1 (5'-1') adiabatická komprese nasáté směsi
- 1 – 2 (1'-2') izochorický přívod tepla (hoření směsi)
- 2 – 3 (2'-3') izobarický přívod tepla (hoření směsi)
- 3 – 4 (3'-4') adiabatická expanze plynů od spálené směsi
- 4 – 5 (4'-5') izochorický odvod tepla (výfuk)

**Obrázek 4-3 p-V diagram přeplňovaného vs. atmosférického vznětového motoru**



Zdroj: Beroun, 2013

$W_{PSM-P}$  – práce vykonaná motorem s přeplňováním

$W_{PSM-NA}$  – práce vykonaná atmosféricky plněným motorem

HÚ – horní úvrať pístu

DÚ – dolní úvrať pístu

Z diagramu na obrázku 4-3 je jasně vidět, že přeplňování má vliv na průběh tlaku ve válci a vykonaná práce je větší než bez přeplňování. [8]



## 5 Přeplňování vznětových motorů

Přeplňování je neefektivnějším způsobem zvyšování výkonu vznětového spalovacího motoru. Přeplňování znamená způsob plnění válců vzduchem pod větším tlakem, než je tlak atmosférický. [1]

### 5.1 Princip přeplňování

Proces hoření je oxidační reakce. Kyslík je tedy nezbytný k hoření paliva ve spalovacím motoru. Čím více kyslíku ve válci je, tím je možné spálit více paliva. U atmosféricky plněných motorů se do válce dostane jen tolik kyslíku, kolik si ho ze vzduchu motor dokáže dostat vlastním sacím účinkem pístu přes otevřený sací ventil. Pokud se na motor namontuje zařízení, které dokáže do motoru dostat více vzduchu pod tlakem vyšším než atmosférickým, jedná se o přeplňování. Tímto způsobem je možné zvýšit objemový a měrný výkon motoru i jeho účinnost. [8]

Nevýhodou atmosféricky plněného motoru je, že nemá 100% plnicí účinnost. To znamená, že do válce nasaje menší objem vzduchu, než je samotný objem válce. Plnicí účinnost navíc klesá s rostoucími otáčkami. Tato nevýhoda se o to více projeví při použití ve vyšších nadmořských výškách, kde je řidší vzduch s menším obsahem kyslíku. Zvláště u leteckých motorů, motoru tak výrazně klesá výkon s rostoucí nadmořskou výškou. [1]

Letectví a následně i závodní silniční vozy byly tak prvním odvětvím, kde se začalo používat přeplňování u pístového spalovacího motoru. Původně k plnění těchto motorů sloužily mechanické kompresory, radiální nebo Rootsovy, poháněné energií od klikového hřídele. Nevýhodou je příkon kompresoru, který ubírá část výkonu motoru. Největší rozmach přeplňování formou mechanických kompresorů nastal především v průběhu I. a II. světové války u bojových letadel. [9]

Později se začala k přeplňování používat také turbodmyhadla. Výhodou turbodmyhadla oproti mechanickému kompresoru je, že využívá odpadní energie výfukových plynů. Z počátku však turbodmyhadla trpěla velmi dlouhou prodlevou. Nejdříve se používala hlavně k přeplňování velkých vznětových motorů v nákladní dopravě. Postupně se turbodmyhadla rozšířila i do osobních automobilů. Velký boom nastal v 80. letech minulého století, kdy se turbodmyhadlo dostalo i do nejvyšších pater automobilových soutěží, jako je Formule 1 a světový šampionát v rallye. Tento trend následovaly i civilní vozy, především výkonné sportovní vozy se zážehovými motory, ale také se turbodmyhadlo se také stalo běžnou součástí vznětových motorů i u běžných

cestovních vozů. Dnes se turbodmychadla používají u velké části zážehových a u všech vznětových motorů. Hlavním cílem už není maximální výkon, jako tomu bylo v 80. letech, ale spotřeba paliva a emise. [8] [9]

Norma ČSN 09 0022 rozeznává tři základní skupiny/stupně přeplňování:

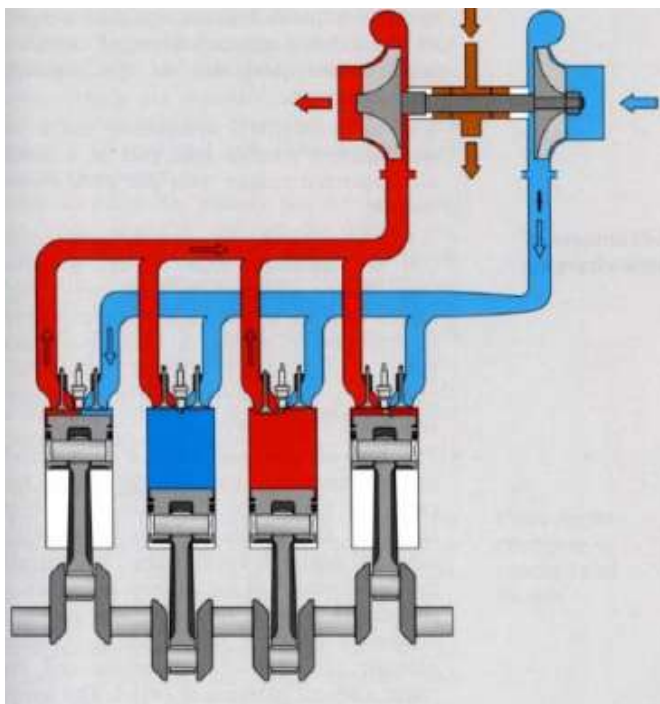
1. Nízkotlaké přeplňování – zvýšení výkonu až o 50 %, plnicí tlak do 0,5 bar přetlaku
2. Středotlaké přeplňování – zvýšení o 50 – 75 %, plnicí tlak 0,5-0,8 bar přetlaku
3. Vysokotlaké přeplňování – zvýšení výkonu o více než 75%, plnicí tlak vyšší než 0,8 bar přetlaku [8]

## 5.2 Turbodmychadlo

Přeplňování pomocí turbodmychadla spočívá ve využití energie výfukových plynů. Ty pohánějí dostředivou turbínu, která je na společné hřídeli s odstředivým kompresorem, dodávajícím stlačený vzduch do motoru viz obrázek 5-1. Využívá se tak odpadní energie výfukových plynů, díky tomu dochází ke zlepšení tepelné účinnosti motoru a snížení měrné spotřeby paliva. Tento způsob přeplňování je proto efektivnější než mechanickým kompresorem. Má ale i své nevýhody. Potíže mohou nastat při

náhlém požadavku na plný výkon. Při sešlápnutí plynového pedálu se zvýší dávka paliva, ale požadovaného plnicího tlaku v sacím potrubí je dosaženo se zpožděním. To je způsobeno prodlevou, než dosáhne turbodmychadlo určitých otáček. Tato prodleva, tzv. „turbo-lag“, se dá minimalizovat snížením momentu setrvačnosti rotoru. Buď zmenšením průměru kompresoru a turbíny a místo toho zvýšit otáčky, které mohou být přes 280.000ot/min, nebo použitím lehčích materiálů. [1] [8]

**Obrázek 5-1 Schéma přeplňování turbodmychadlem**



*Zdroj: Beroun, 2013*

Vynález turbodmychadla pochází od švýcarského konstruktéra Alfreda Büchi. Jeho patent pochází z roku 1905. Tato technologie však zpočátku zůstala nevyužita, zřejmě kvůli nemožnosti vyrobit kola kompresoru a turbíny s dostatečnou přesností za přijatelnou cenu. Až krátce před II. světovou válkou se začalo objevovat v lodních a leteckých motorech, později u diesellových motorů nákladních automobilů. U osobních automobilů se začalo používat až v 70. letech 20. století. Dnes je tímto druhem přeplňování vybavena téměř většina dnešních evropských automobilů. [1] [8]

### 5.2.1 Druhy regulace

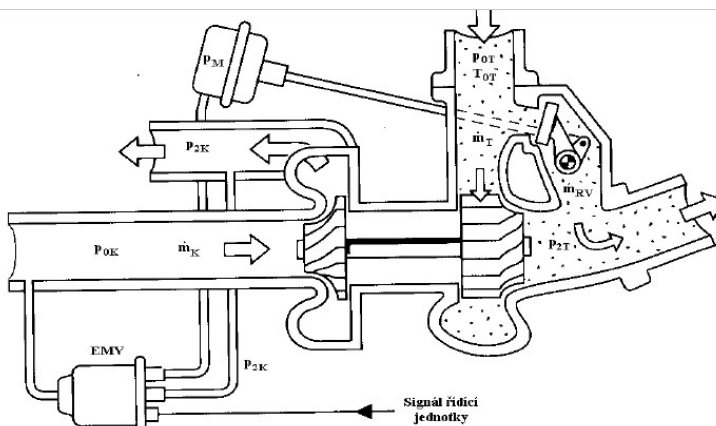
Parametry turbodmychadla pro moderní motor se zpravidla navrhnou tak, aby náběh plicního tlaku přeplňování byl už při nízkých otáčkách motoru a plného tlaku bylo dosaženo ve středních otáčkách, což jsou zpravidla nejpoužívanější provozní otáčky motoru. Aby takové turbodmychadlo nepřekročilo své konstrukční maximální otáčky, nebo maximální přípustný tlak v sání, během požadavku na plný výkon při jmenovitých (maximálních) otáčkách motoru a zároveň nedocházelo ke škrcení průtoku výfukových plynů v průtočných průřezech turbíny, je třeba nějakým způsobem regulovat množství plynů pohánějících turbínu. [1][10]

#### 5.2.1.1 Regulace pomocí obtokové klapky

Nejjednodušší forma regulace turbodmychadla. Turbodmychadlo je vybaveno jednoduchou klapkou/ventilem, která umožní přemostit turbínu a část plynů tudy obtékat. Klapka může být zabudována přímo v turbínové části turbodmychadla, nebo na kolektoru výfukových plynů před turbodmychadlem. Schéma regulace a její funkce je zřejmá z obrázku 5-2. [1] [10]

**Obrázek 5-2 Schéma regulace pomocí obtokové klapky**

Přednostmi jsou jednoduchost, spolehlivost, cena a odolnost vůči vysokým teplotám. Nevýhoda je, že při přemostění turbíny zůstane část výfukových plynů nevyužita, což snižuje účinnost. Tento způsob regulace turbíny dnes v osobních automobilech



Zdroj: <http://www.autoznalosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html>

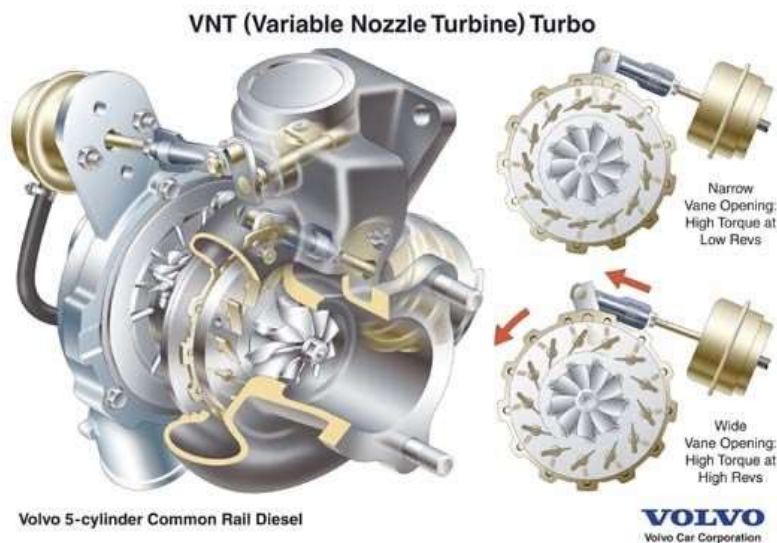
využívá u drtivé většiny přepřívovaných zážehových motorů, u vznětových už jen výjimečně. [8][10]

### 5.2.1.2 Regulace změnou geometrie lopatek statoru

V současnosti nejčastější druh regulace u vznětových motorů. Bývá označován zkratkou VNT (variable nozzle turbo). Tento systém má dvě hlavní výhody. První, že turbínou protéká veškerý objem spalin, je tedy efektivnější. Druhou výhodou je, že je plnicí tlak přesněji regulován v celém rozsahu otáček motoru i v závislosti na zatížení. [8]

Kolem turbíny je na statoru dokola umístěno několik regulačních lopatek, viz obrázek 5-3. které regulují tok spalin působících na turbínu, jejich pohyb je vzájemně synchronizovaný. Lopatky jsou natáčeny pomocí táhla, na jeho konci je membrána v uzavřené baňce. Pomocí podtlaku, působícího na membránu, je regulován pohyb táhla,

**Obrázek 5-3 VNT regulace turbodmyhadla**



Zdroj: <http://www.fastmotoring.com/wp-content/uploads/2010/10/VNT-Turbo.jpg>

V nízkých otáčkách motoru jsou lopatky přivřené, toto škrcení dodá spalinám větší rychlost na roztočení turbíny, s rostoucími otáčkami a plnicím tlakem se regulační lopatky postupně rozevírají, rychlost protékajících spalin se tím sníží, tím se omezuje plnicí tlak. Výhodou je rychlejší náběh už od nízkých otáček a regulovatelnost v jakémkoliv provozním režimu. Turbína se navrhuje pro maximální hmotnostní průtok, optimální geometrie rozváděcích lopatek pak zhruba na střed regulované oblasti. [8]

který naklápí lopatky.

Regulace je tedy ovládána buď

pneumaticky, častěji

pneumaticko-  
elektricky, kdy

množství podtlaku  
ovládá

elektromagnetický  
ventil. V dnešní době

se stále častěji objevuje  
plně elektronická

regulace, tzv. REA  
(rotary electronic  
acutation). [11]

### 5.2.1.3 Další druhy regulace

**Regulace pomocí směrové klapky** - Speciální verze regulace změnou geometrie statoru turbíny. Turbodmychadlo má v turbínovém obalu pouze jednu natáčecí klapku na vstupu do turbíny, která upravuje vír přiváděných spalín a určuje jejich rychlost. V nízkých otáčkách je snaha o maximální škrcení, aby spaliny měly co nejvyšší rychlost na roztočení turbíny. Ve vysokých otáčkách je klapka naplno otevřena a ke škrcení nedochází, protože turbínou protéká dostatečné množství spalín. [7]

Tento zvláštní druh regulace se příliš nerozšířil do praxe. Byl užit v roce 1991 u vozu Peugeot 405 T16, ve kterém bylo namontováno turbodmychadlo značky Garrett s označením T25-VAT. [7]

**Změna šířky rozváděcího kola turbíny** - S dalším zajímavým, ale ne příliš rozšířeným, systémem regulace turbíny přišla firma Iveco ve spolupráci s výrobcem turbodmychadel Holset. Princip spočívá opět ve škrcení výfukových plynů, tentokrát ale pomocí axiálně posuvné válcové clony, která provádí změnu šířky rozváděcího kola statoru turbíny. Posuv clony je ovládán pomocí úhlové dvouramenné páky, na kterou působí obvyklá regulační „baňka“ s membránou, do které je přiváděn podtlakový signál pomocí elektromagnetického akčního členu řízeného elektronikou motoru. [8]

Při nízkých otáčkách motoru je produkováno malé množství spalín, které mají malou kinetickou energii, proto je clona naplno zavřená, je dosaženo dostatečného škrcení ke zrychlení výfukových plynů a roztočení turbíny. Po dosažení požadovaného plnicího tlaku se začne clona postupně odsouvat a ve vysokých otáčkách je pak naplno otevřená. Výhodou této metody je jednoduchost, rychlost reakce, maximální využití kinetické energie výfukových plynů a tedy velká účinnost turbodmychadla. [1]

Nevýhodou této regulace je problém axiálního posuvu clony při měnících se teplotách okolo turbíny, kdy rozdíl teploty na studeném motoru krátce po startu a zahřátém motoru pracujícím na plný výkon může být až okolo 800°C. Navíc u vznětových motorů může docházet k zanášení sazemi, které mohou omezit posuv clony. [1] [8]

## 5.3 Chlazení stlačeného vzduchu

Chlazením horkého stlačeného vzduchu z turbodmyhadla nebo kompresoru je možné relativně snadno zlepšit účinnost přeplňování. Základním smyslem přeplňování je dostat do válce co nejvíce molekul kyslíku, nezbytnému k hoření. Ochlazením roste hustota vzduchu, což znamená, že se do prostoru válce dostane více kyslíku. [1]

### 5.3.1 Princip chlazení stlačeného vzduchu

Při stlačování vzduchu obecně dochází k jeho ohřátí. Čím vyšší stupeň stlačení, tím dochází k většímu ohřátí. U přeplňování spalovacího motoru je tento jev negativní z několika důvodů. Prvním důvodem je, že stlačený vzduch o vysoké teplotě má nižší hustotu než vzduch studený. Pokud by se stlačený vzduch podařilo ochladit před vstupem do válce, zvýšila by se tím plnicí účinnost, neboť by ve válci bylo více molekul kyslíku. [1]

Dalším důvodem je, že teplý nasávaný vzduch klade vyšší nároky na chlazení motoru samotného. Teplota nasávaného vzduchu přímo ovlivňuje teplotu hoření ve válci, stejně tak teplotu výfukových plynů. Vyšší teplota nasávaného vzduchu tedy ve výsledku způsobuje vyšší tepelné namáhání motoru i turbodmyhadla. [1]

Proto je vhodné na potrubí, které vede vzduch z dmyhadla do motoru, umístit mezichladič stlačeného vzduchu, anglicky nazývaný intercooler. V mezichladiči dochází k ochlazení stlačeného vzduchu řádově o několik desítek stupňů Celsia, dle konstrukce chlazení a stupně přeplňování. [1] [13]

Negativem pak mohou být tlakové ztráty v potrubí, ztráty v samotném chladiči a také pokles tlaku po ochlazení, neboť ochlazením se zvýší hustota vzduchu a úměrně tomu poklesne i tlak. Tato negativa ale nemají takový vliv a výrazně je převyšuje právě pozitivní účinek chlazení. [1] [13]

### 5.3.2 Druhy chlazení

Druh použitého chladicího média především závisí na konkrétní aplikaci daného spalovacího motoru. Nejčastěji se u osobních a nákladních automobilů používá chlazení pomocí okolního vzduchu, případně pomocí vody. [1]

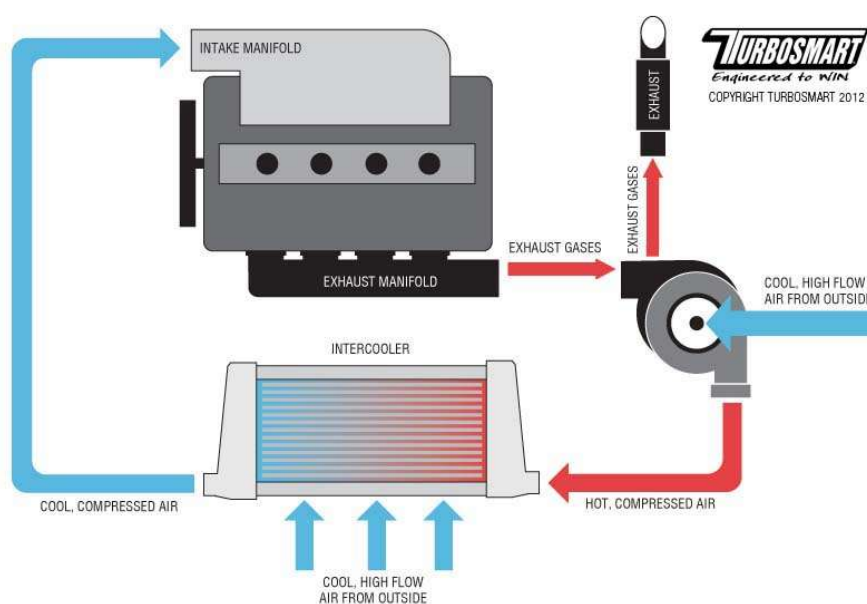
#### 5.3.2.1 Výměník vzduch-vzduch

Jak naznačuje název, tento výměník využívá jako chladicí médium okolní vzduch, je proto vhodný pro motory, které jsou umístěny v pohybujiícím se stroji (automobily, letadla). [13]

Kvůli dobré tepelné vodivosti a nízké hmotnosti se vyrábí obvykle z hliníkových slitin. Skládá se z tenkých trubiček, kterými proudí stlačený vzduch, mezi nimi je hustá mřížka, přes kterou je teplo odváděno do okolí. Schéma umístění ve vozidle viz obrázek 5-4. [13]

Díky své nízké ceně, jednoduchosti a nízké hmotnosti se jedná o nejčastěji používaný druh chlazení. Výhodou také je, že není potřeba na chlazení vynaložit žádnou energii navíc. Nevýhodou je nízká účinnost při nízkých rychlostech prodění, když se vozidlo pohybuje pomalu. Dále značná závislost účinnosti na okolní teplotě. Nevýhodou může být náročnost zástavby, neboť je třeba, aby na mezichladič proudil vzduch, ideální umístění je tedy na čelní ploše ve směru jízdy. Dlouhé vedení k mezichladiči, z mezichladiče do motoru a velký počet ohybů může způsobovat ztráty a zvětšovat prodlevu náběhu plnicího tlaku. [1] [13]

**Obrázek 5-4 Schéma mezichladiče vzduch-vzduch:**



Zdroj: <http://www.turbosmart.com.au/technical-articles/how-an-intercooler-works/>

Můžeme rozeznávat tři typy montáže mezichladiče na vozidle:

**FMIC** – *front mounted intercooler* – mezichladič umístěný v přídi před ostatními chladiči. Velmi výhodné umístění z hlediska chlazení, z toho důvodu je také nejčastěji používané. Nevýhodou může být riziko poškození, neboť je mezichladič umístěn hned za nárazníkem, dále může snižovat účinnost chladičů umístěných za ním.

**SMIC** – *side mounted intercooler* – mezichladič umístěný ve předu na straně auta, nejčastěji před podběhem předního kola. Mezichladič nebrání přístupu vzduchu k ostatním chladičům, nevýhodou je malý zástavbový prostor limitující velikost chladiče.

**TMIC** – *top mounted intercooler* – mezichladič umístěný nad motorem. Výhodou je krátké vedení potrubí z turbodmychadla do sání, navíc je chladič chráněn před poškozením. Nevýhodou je menší účinnost, dochází k ohřevu od motoru a je nutné přidat lapač vzduchu na kapotu vozidla k usměrnění proudu vzduchu na chladič, což má negativní vliv na aerodynamiku. Typickým představitelem tohoto řešení jsou vozy značky Subaru. [12] [13]

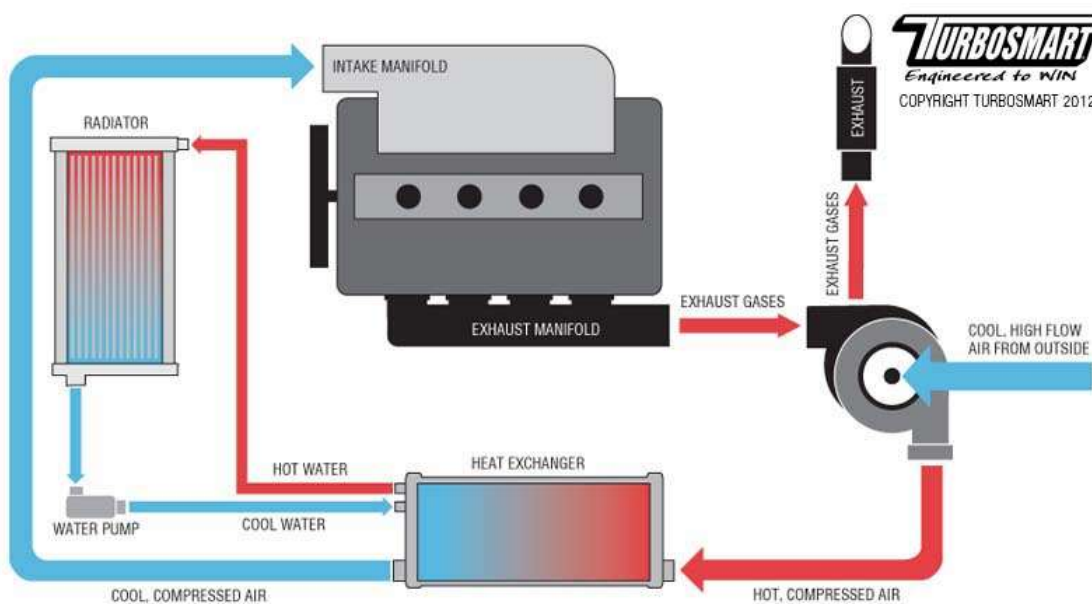
### 5.3.2.2 Výměník voda-vzduch

Chladicím médiem je voda či jiná chladicí kapalina. Vodní chlazení má větší účinnost, mezichladič může mít díky tomu menší rozměry. Chladič může být kdekoliv, proto se umísťuje co nejbližší motoru. Díky tomu může být krátké sací potrubí s nízkými ztrátami. [13]

Chlazení funguje pomocí proudění studené vody skrz mezichladič, je tedy potřeba čerpadlo (nejčastěji elektrické), které vodu dopravuje a další chladič, kde se voda opět ochladí. Nevýhodou je tedy vyšší hmotnost a složitost systému, tedy i jeho cena. Také je potřeba dodávat energii na pohon čerpadla. Výhodou ovšem je malý vliv účinnosti chlazení na teplotu chlazení. Navíc tento druh chlazení lze použít i u stacionárních nebo lodních motorů. Schéma chlazení viz obrázek 5-5. [12][13]

V historii automobilů měl vodou chlazený mezichladič například Peugeot 405 T16, ze současných vozů například u koncernu VW zážehové přeplňované motory 1.0 a 1.5 TSI, nebo vznětové 2.0 TDI. Dalším příkladem je u BMW motor V8 4,4 l se dvěma turbodmychadly a dvěma mezichladiči voda-vzduch. [14]



**Obrázek 5-5 Schéma chlazení stlačeného vzduchu mezichladičem voda-vzduch**

Zdroj: <http://www.turbosmart.com.au/technical-articles/how-an-intercooler-works/>

### 5.3.2.3 Speciální druhy chlazení

Existují i další způsoby, jak stlačený vzduch v sacím potrubí ochladit. Jedním z nich je Millerův způsob chlazení. Zakládá se na principu, že se sací ventil uzavře ještě před momentem, než se píst dostane do dolní úvratě. Vzduch ve válci expanduje a snižuje se jeho teplota. Výhodou toho principu je nižší namáhání motoru a nižší spotřeba, nevýhodou je potom snížený výkon, který se může nahradit vyšším stupněm plnění dmychadla, nebo vyšším kompresním poměrem. V tomto režimu pracuje při částečném zatížení motoru koncernu VW 1.5 TSI o výkonu 96kw, používaný i ve vozech Škoda. [14][15]

Další způsob je vstřikování vody (případně směsi vody s etanolem) do sání. Výparné teplo, potřebné k odpaření kapaliny, je odebráno horkému stlačenému vzduchu a tím se jeho teplota sníží. Nevýhodou je nutnost přídavného zařízení, které vodu do sání vstřikuje. Dále je nutné mít zásobník na vstřikovanou vodu a ten doplňovat. Doba použití je závislá na velikosti zásobníku. V praxi se používá jen u specifických aplikací, například u dragsterů v závodech na 400 m. [16]

Za možnost, jak snížit teplotu vzduchu nasávaného do motoru, je možné dále považovat použití expanzní turbíny. Zde se využívá další turbodmychadlo. Klasické výfukové turbodmychadlo stlačí vzduch, který jde přes mezichladič do kompresoru, který je poháněn expanzní turbínou, dále jde přes další mezichladič do expanzní turbíny a až poté do motoru. Tímto způsobem lze sice dosáhnout velmi nízkých teplot, ale nevýhodou je vysoká cena, složitost a prostorová náročnost na zástavbu. [15]

Dále je možné doplnit běžných mezichladič typu vzduch-vzduch zařízením, které krátkodobě zlepšuje jeho chlazení. Jedná se o systém, který ostříkuje mezichladič médiem, které jej na povrchu ochlazuje (např. oxid uhličitý nebo oxid dusný), nebo zlepšuje jeho tepelnou výměnu s okolním vzduchem (voda). Nevýhody jsou podobné jako u vstřikování vody do sání, výhodou je nízká cena. Používá se zpravidla také u speciálů na závodech na 400 m. Výjimkou je Subaru Impreza STI, které má ostříkování mezichladiče vodou již z výroby. [17]

Tyto speciální druhy chlazení mají svá specifika, díky kterým je jejich využití v praxi velmi omezené. Nejčastěji se proto setkáme s klasickými výměníky typu vzduch-vzduch, případně voda-vzduch.

## 6 Emise vznětového motoru

Při spalování uhlovodíkových paliv vzniká při dokonalém hoření oxid uhličitý  $\text{CO}_2$  a vodní pára  $\text{H}_2\text{O}$ . Reálné hoření ve válci ale dokonalé není, při nedokonalé oxidaci vzniká ještě oxid uhelnatý  $\text{CO}$  a vodík  $\text{H}_2$ . [1]

Vznětový motor na rozdíl od zážehového pracuje s přebytkem kyslíku, proto se objevuje i ve výfukových plynech. [1]

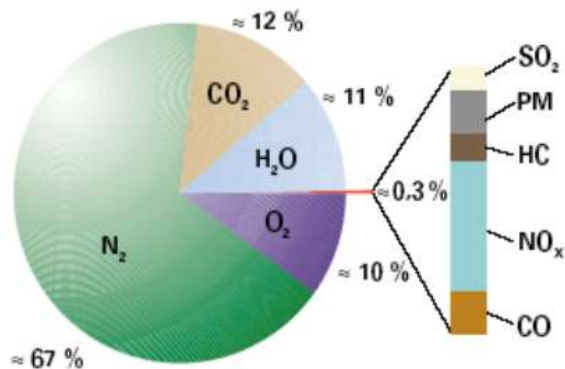
Největší složkou vzduchu je dusík  $\text{N}_2$ , proto je také nejvýznamnější složkou výfukových plynů. Je to bezbarvý nejdovatý plyn. Za vysokých teplot ve válci reaguje s kyslíkem a vznikají tzv.  $\text{NO}_x$ , což jsou oxidy dusíku: oxid dusný  $\text{N}_2\text{O}$ , oxid dusičitý  $\text{NO}_2$  a zejména oxid dusnatý  $\text{NO}$ . [1]

V neposlední řadě vznětový motor produkuje pevné částice (PM). Dále také ve výfukových plynech mohou být zbytky nespálených uhlovodíků HC, oxidy síry a další látky. [1]

### 6.1 Složení výfukových plynů vznětových motorů

Poměr jednotlivých složek ve výfukových plynech vznětového motoru viz obrázek 6-1:

**Obrázek 6-1 Složení výfukových plynů vznětového motoru**



Zdroj: Hromádko et. al., 2011

**Oxid uhličitý** – je produktem dokonalé oxidace, jeho přítomnost ve výfukových plynech značí kvalitně spálené palivo. Jedná se o bezbarvý plyn, bez zápachu, je stabilní a málo reaktivní. Nemá negativní vliv na organismus do chvíle, kdy jeho koncentrace ve vdechovaném vzduchu nevytláčuje kyslík. Jde o jeden ze skleníkových plynů. Jeho množství ve výfukových plynech je úměrné spotřebovanému palivu. Jedná se v současnosti o velmi sledovanou složku výfukových plynů. [1]

**Oxid uhelnatý** - Oxid uhelnatý je jedovatý plyn pro lidský organismus, neboť se váže na hemoglobin a omezuje příjem kyslíku do krevního oběhu v plicích. Také se podílí na vzniku fotochemického smogu. Je produktem nedokonalé oxidace. [1]

**Oxidy dusíku** – jedná se o nejsledovanější složku výfukových plynů u vznětového motoru, především po kauze „dieselgate“. Oxidy dusíku se podílejí na tvorbě smogu a vzniku kyselých dešťů. Pro lidský organismus je nebezpečný hlavně oxid dusičitý, ze kterého se na stěnách sliznice tvoří kyselina dusičitá, důsledkem je pocit dušení a nucení ke kašli. [1]

**Nespálené uhlovodíky** – ve výfukových plynech mohou zůstat zbytky nespáleného paliva, nebo uhlovodíky, které vznikly během procesu hoření. Nejvíce nebezpečné jsou polycyklické aromatické uhlovodíky PAH, které se vážou na pevné částice a jsou karcinogenní. [1]

**Pevné částice** – pevné částice obsahují především primární uhlík. Vznikají při spálení neodpařených kapek paliva. Dále mohou obsahovat organický uhlík a malé množství sulfátu, dusíku, vody a dalších složek. Jádro částic se skládá z pevného uhlíku a popele, organické, sulfátové a další směsi ulpívají na povrchu. Na člověka může krátkodobé vystavení částicím způsobit podráždění oka, jícnu a průdušek. Můžou vyvolat až pocit ke zvracení a dýchací potíže. Dlouhodobá expozice může způsobit zánět a histopatologické změny v plicích. Nejnebezpečnější mohou být karcinogenní PAH navázané na pevné částice. Větší částice jsou nejméně nebezpečné, neboť se zachytí v dýchacích cestách, částice pod 1 $\mu$ m proniknou až do plic a částice pod 0,1 $\mu$ m se mohou dostat do krevního řečiště. [1]

**Oxidy síry** - vznikající na základě obsahu síry v motorové naftě. V současné EU se však prodává nafta s nízkým obsahem síry, neboť oxidy síry poškozují filtry pevných částic, kterými jsou vybaveny moderní vznětové motory. Oxid siřičitý také způsobuje kyselé deště. V současné době se prodává nafta s obsahem síry max. 0,01 %, emise oxidů síry ze vznětových motorů jsou tak téměř zanedbatelné. [1]

## 6.2 Snižování emisí vznětového motoru

Emise vznětového motoru lze snížit přímo u motoru ovlivněním spalovacího procesu, nebo opatřením za motorem, které mají za úkol úpravu výfukových plynů.

### 6.2.1 Opatření u motoru

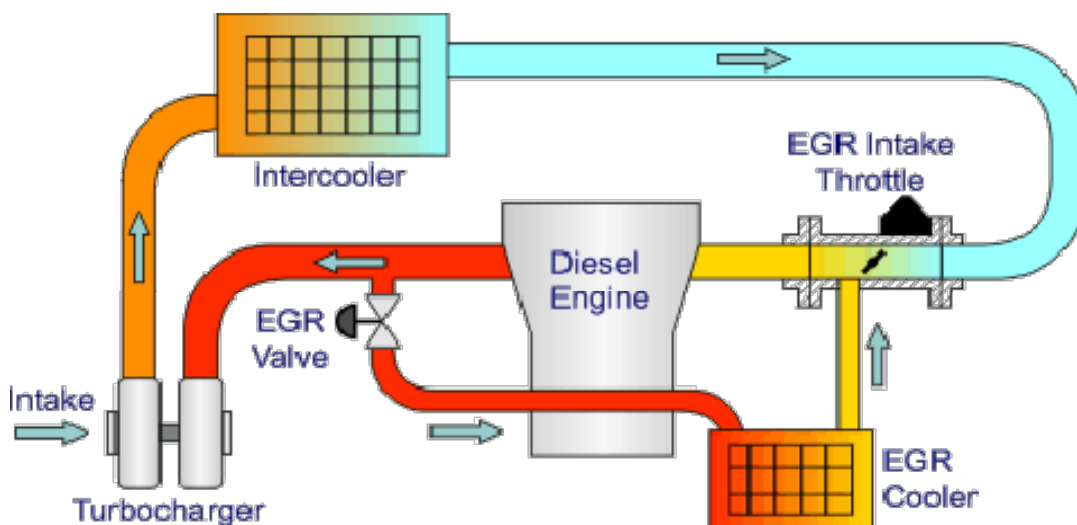
Důležitý je optimálně navržená plnicí soustava umožňující vytvoření víru k dobrému promísení paliva se vzduchem po vstřiku, těsně před vznícením. Dále také stupeň přeplňování a mezichlazení stlačeného vzduchu. [1]

Na kouřivost, tedy produkci pevných částic má především vliv rozprášení paliva a přebytek vzduchu. Zvýšením plnicího tlaku, což zajistí vyšší přebytek vzduchu, i vstřikovacího tlaku, tedy jemnějším rozprášením paliva, tak lze kouřivost snížit. [1]

Tvorbu oxidů dusíku ovlivňuje teplota hoření ve válci. Tu lze ovlivnit už volbou kompresního poměru, kdy s klesajícím kompresním poměrem klesá produkce NO<sub>x</sub>, negativum je ale nižší celková účinnost motoru. Dále lze tvorbu NO<sub>x</sub> omezit pozdějším dostřikem paliva, to ale zvyšuje produkci CO, nebo rozdělením vstřikovacích dávek, což snižuje také produkci nespálených uhlovodíků. Emise NO<sub>x</sub> lze také snížit lepším ochlazením stlačeného vzduchu v mezichladiči, protože tím klesne i teplota hoření. [1]

Ke snižování emisí oxidu dusíku se dále používá systém recirkulace spalin. K tomu se používá ventil známý pod zkratkou EGR (z anglického exhaust gas recirculation). Ten dnes bývá často doplněn i chladičem spalin. EGR ventil funguje v režimech částečného zatížení, přepouští výfukové plyny z kolektoru před turbodmychadlem zpět do sání, viz obrázek 6-2. [1]

**Obrázek 6-2 Schéma EGR ventilu s chladičem spalin:**



Zdroj: [https://www.dieselnets.com/tech/engine\\_egr\\_sys.php](https://www.dieselnets.com/tech/engine_egr_sys.php)

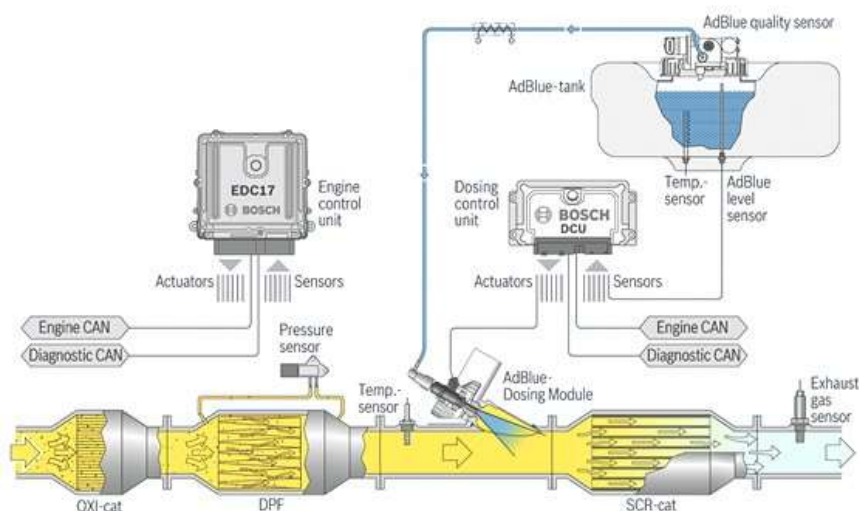
## 6.2.2 Opatření za motorem

Vznětový motor pracuje s přebytkem vzduchu, proto může být vybaven pouze oxidačním katalyzátorem (na rozdíl od zážehového, který může mít oxidačně-redukční katalyzátor). Oxidační katalyzátor snižuje množství CO ve výfukových plynech, které přeměňuje na CO<sub>2</sub> a také nespálených uhlovodíků, které přeměňuje na vodu. Katalyzátorem této oxidační reakce jsou drahé kovy, jako platina nebo paladium, na keramickém nosiči. [1]

Dalším zařízením je filtr pevných částic. Ten může být umístěn za oxidačním katalyzátorem a je schopný pochyťat většinu emisí pevných částic. Filtr je tvořen oxidem křemičitým a má porézní strukturu. Pro zachování dlouhodobé schopnosti zachytávat pevné částice je nutné zachycené částice pravidelně vypalovat. K tomu dochází při tzv. regeneraci filtru, která probíhá za zvýšené teploty výfukových plynů na cca 550 °C. Takové teploty není za běžného provozu dosaženo, proto je pro vyvolání regenerace nutný dodatečný vstřík paliva, které pak dohořívá v oxidačním katalyzátoru a vypaluje filtr. [1]

Opatřením pro redukci NO<sub>x</sub> ve výfukových plynech je selektivní katalytická redukce – SCR. Jako redukční činidlo slouží sloučenina amoniaku – močovina ve vodě. To je vstříkováno a rozprašováno tryskou přímo do výfuku, kde oxidy dusíku reagují s amoniakem a v SCR katalyzátoru se redukují na dusík a vodu. [1]

**Obrázek 6-3 Schéma emisních opatření za motorem:**



Zdroj: Hromádka et. al., 2011

OXI-cat – oxidační katalyzátor

DPF – diesel particulate filter – filtr pevných částic

SCR-cat – katalyzátor na selektivní katalytickou redukci

## 6.3 Homologační měření emisí a spotřeby paliva

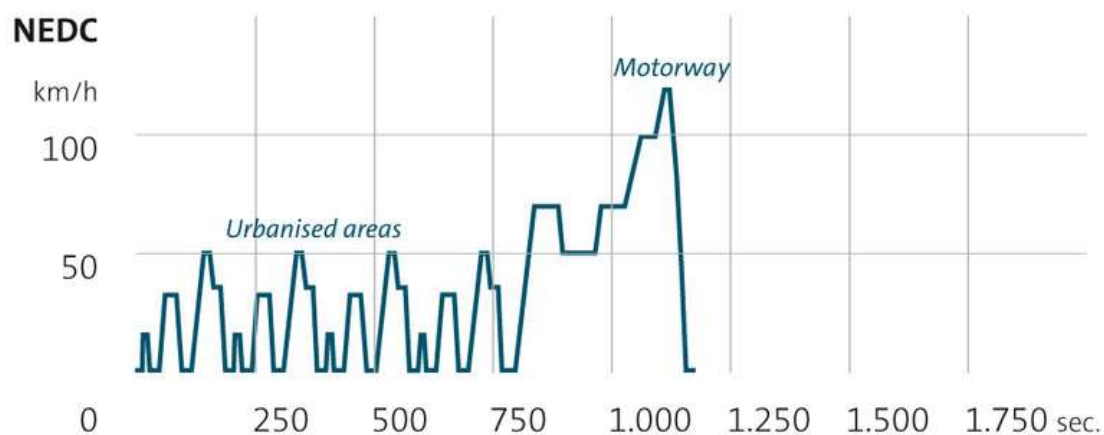
Pro homologaci vozidel do 3,5 t v EU se využívá simulace jízdního cyklu na řízeném válcovém dynamometru. Při této zkoušce jsou zachytávány a analyzovány výfukové plyny. Metoda pro stanovení hodnot emisí se nazývá CVS (constant volume sampling). Emise jsou z výfuku odsávány a ředěny pomocí výkonného ventilátoru. Vzorky naředěných emisí jsou sesbírány do speciálních vaků, kde se pak stanovuje koncentrace jednotlivých látek v takto naředěných výfukových plynech. Následně se dle koncentrace CO<sub>2</sub> dopočítá průměrná spotřeba paliva [1]

### 6.3.1 NEDC

Prvním jednotným jízdním cyklem pro sledování emisí nových vozidel platným v Evropě byla směrnice EHK 15 z roku 1971. Původním cílem bylo sledovat emise oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků, později i oxidů dusíku. Jízdní cyklus v počátku obsahoval 4 městské cykly. Test se v průběhu doplňoval a měnil. Nakonec koncem osmdesátých let byla EHK 15 nahrazena vyhláškou EHK 83, která položila základ pro emisní předpisy známé pod názvem EURO plus číslo revize. Tato vyhláška vstoupila v platnost v roce 1989 a v roce 1992 byly stanoveny limity dle EURO 1. [1]

Dle vyhlášky EHK 83 byl také definovaný jízdní cyklus pro měření emisí souhrnně nazývaný NEDC – New European Driving Cycle. Ten se skládá z městského cyklu UDC, který je složen ze čtyř základních městských cyklů ECE 15, a mimoměstského cyklu EUDC. Celé měření se provádí kontinuálně a trvá 20 minut. Schéma celého cyklu je vidět na obrázku 6-4. Vozidlo musí být před testem minimálně 6 hodin temperováno při teplotě ve zkušebně v rozmezí 20-30 °C. [1]

**Obrázek 6-4** *New european driving cycle*



Zdroj: <https://www.volkswagen.cz/technologie/wltp/prehled-jizdniho-cyklu-nefz>

Tento cyklus se od 70. let zásadně nezměnil, na dnešní dobu se v něm jezdí až příliš pomalu a akceleruje velmi zvolna. Výsledkem tak jsou nerealistické výsledky emisí a spotřeby. Proto se touto metodou homologovalo pouze do září roku 2017, kdy nastoupil přísnější cyklus nazvaný WLTP. Cyklus NEDC se používá dál, ale měří se podle něj jen emise CO<sub>2</sub>, dle kterých pak EU uděluje pokuty za každý gram nad 130g/km v roce 2018. Od roku 2020 pak nad 95g/km. Počítá se flotilový průměr, což znamená průměrné emise oxidu uhličitého všech prodaných vozů dané značky v EU dle jízdního cyklu NEDC. [1] [14]

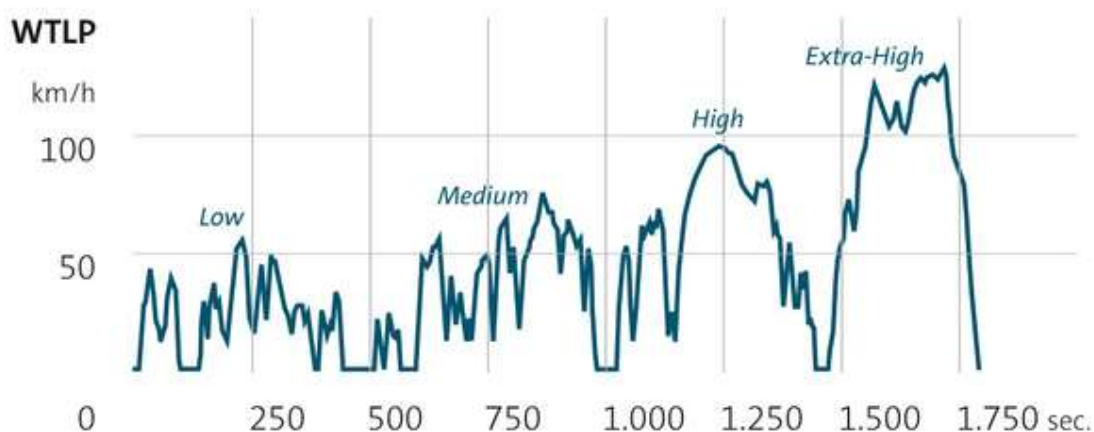
### 6.3.2 WLTP

WLTP je zkratka anglického Worldwide-harmonized Light-duty vehicles Test Procedure. Jak název naznačuje, jedná se o celosvětový standard pro určení emisí a spotřeby paliva. Tato metodika se používá k homologaci nových vozidel v EU od 1.9.2017. [18]

Samotný jízdní cyklus se pak nazývá WLTC (Worldwide-harmonized Light-duty-vehicle Test Cycle). Rozlišují se tři třídy WLTC, podle poměru výkon/váha vozidla. První třída je do 22 kW/t, druhá je do 34 kW/t a třetí nad 34 kW/t. Většina dnešních osobních automobilů spadá právě do třetí kategorie, která nás bude dále zajímat. [14]

Maximální dosažená rychlost v testu je ve srovnání s cyklem NEDC o 10 km/h vyšší. Průměrná rychlost dosahuje hodnoty 47 km/h, u NEDC to bylo pouze 33km/h. V testovací místnosti je stanovena teplota na 23 °C. Prodloužila se také ujetá vzdálenost na 23 km, což je více než dvojnásobek oproti původním 11 kilometrům. Pro ilustraci je celé schéma jízdního cyklu zobrazeno na obrázku 6-5. Jednotlivé odlišnosti oproti NEDC jsou přehledně znázorněné na obrázku 6-6. [18]

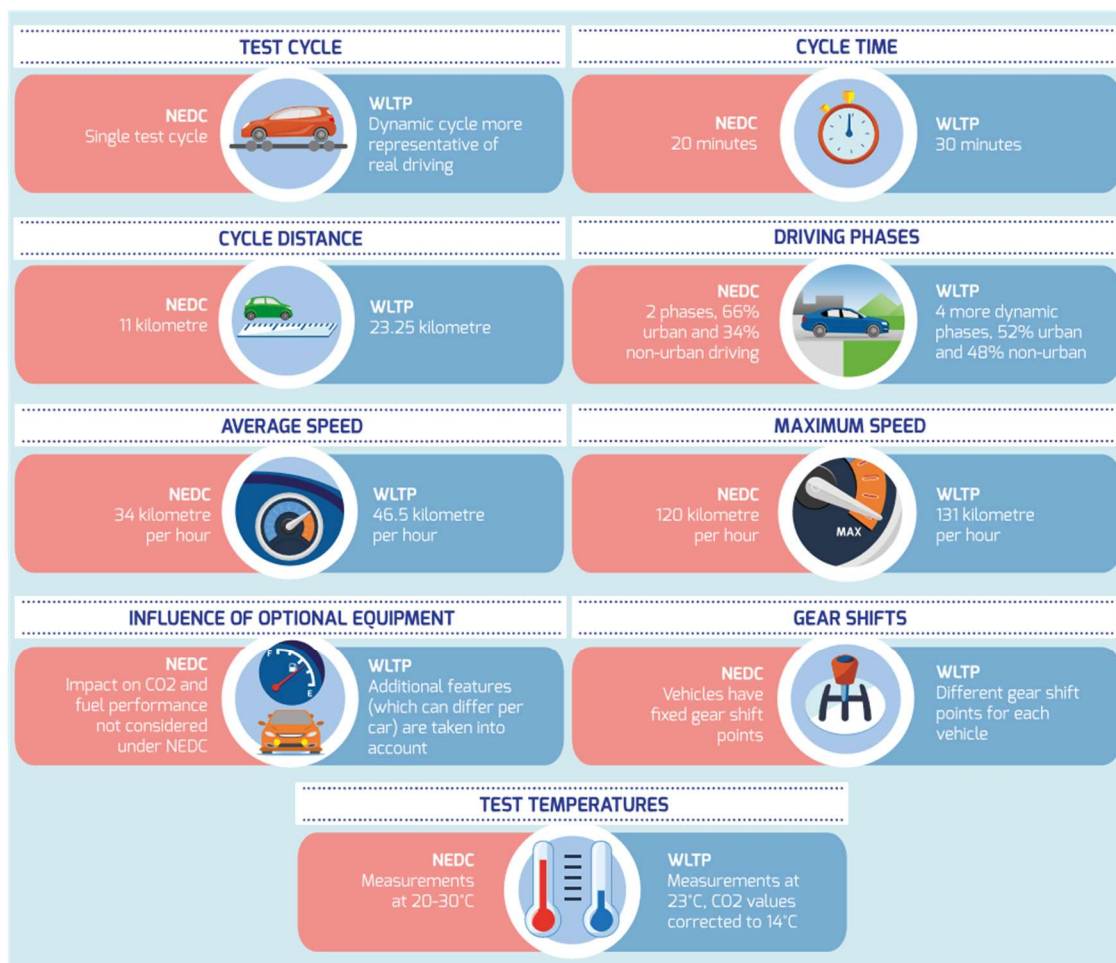
**Obrázek 6-5 jízdní cyklus WLTC 3. třídy**



Zdroj: <https://www.volkswagen.cz/technologie/wltp>



**Obrázek 6-6 rozdíly NEDC vs. WLTP**



Zdroj: <http://wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>

## 7 Měření výkonových parametrů

Výkon a točivý moment patří mezi základní parametry spalovacího motoru, především maximální hodnoty těchto veličin, ale také jejich průběh v závislosti na otáčkách, nazývaný otáčková charakteristika. Byly proto vyvinuty různé metody, jak tuto charakteristiku zjistit. Tyto metody umožňují měřit hodnoty jak motoru samotného, tak motoru bez demontáže z automobilu. Výkonové parametry se měří při maximálním zatížení – plném plynu, zjišťují se tak maximální možnosti, které je motor schopen dodat.

### 7.1 Dynamická metoda

Tato metoda je relativně snadným a rychlým způsobem, jak zjistit otáčkovou charakteristiku motoru, tedy křivku výkonu a točivého momentu v závislosti na otáčkách, bez jeho demontáže z vozu. Vozidlo najede na válce o známém momentu setrvačnosti a na vyšší převodový stupeň akceleruje z volnoběhu až do maximálních otáček. Při měření se měří úhlové zrychlení válce a otáčky motoru. Následně se z toho dopočítá točivý moment motoru a z toho v závislosti na otáčkách výkon. Na výslednou hodnotu výkonu má ovšem vliv i moment setrvačnosti motoru i všech roztáčených součástí na vozidle (kola, převody), který je potřeba zjistit doběhovou zkouškou. [1]

Dynamická metoda měření může být ještě jednodušší. Například měření zrychlení klikového hřídele při volné akceleraci, případně s přidavnými setrvačnými hmotami při jízdě na určitý převodový stupeň. Do dynamické metody se také řadí měření přímočarého zrychlení celého vozidla za jízdy. Tyto metody nejsou příliš přesné, ale mohou sloužit k diagnostickým potřebám, nebo pro porovnávání před a po opravě/úpravě motoru. Metoda volné akcelerace není vhodná pro turbodmychadlem přeplňované motory, neboť turbodmychadlo nestačí dosáhnout plného tlaku. [1]

## 7.2 Statická metoda

Další používané měření výkonu je pomocí statické metody. Metoda je založena na měření síly působící na určitém rameni při brzdění válce. Brzdný moment je vytvářen nejčastěji elektromotorem brzdy, který udržuje měřený motor v konstantních otáčkách. Zatěžovacím momentem brzdy se udržují předvolené otáčky motoru a měří se síla při těchto otáčkách. [1]

Tato metoda je oproti dynamické přesnější, není závislá na momentu setrvačnosti. Dynamickou metodou však není získáván spojitý průběh točivého momentu, ale nominální hodnoty v jednotlivých bodech otáčkového spektra. Celý průběh pak lze dostat pomocí spojnic, mezi těmito body. [1]

Měření je možné provádět jak se samotným motorem na zkušebním stanovišti, tak s motorem ve vozidle na válcové zátěžové brzdě. [1]

### 7.2.1 Měření na motorové zkušebně

Základní způsob, jak změřit výkonové parametry přímo na klikovém hřídeli. Samotný motor je při tomto měření upnut na měřicí stoličce a připojen k motorové brzdě. Nazývá se brzdou, protože proti zjišťovanému točivému momentu motoru působí brzdný moment o velikosti, kterou buď známe, nebo jí můžeme měřit. Nejčastěji se používají elektromagnetické vířivé brzdy, nebo elektrodynamické brzdy. Brzdý moment se měří nejčastěji pomocí tenzometrických snímačů, měřících sílu, které tento moment namáhá, na známém rameni. Moment je tedy vypočten vztahem 7-1:

$$M = F \cdot r \text{ [Nm]} \quad (7-1)$$

Kde  $F$  [N] je síla namáhající tenzometr a  $r$  [m] rameno, přes které síla působí.

Výkon se poté přečte dle vztahu 7-2:

$$P = M \cdot \omega \text{ [kW]} \quad (7-2)$$

Kde  $\omega$  [rad/s] je úhlová rychlost motoru.

**Elektromagnetická vířivá brzda** – skládá se z ozubeného pólového kotouče a budícího vinutí. Při průtoku stejnosměrného proudu vinutím vzniká magnetické pole. Toto pole je statické vzhledem k rotujícímu kotouči, tedy se otáčí spolu s ním. Ve stěnách chladících komor přivrácených k ozubenému kotouči pak toto magnetické pole pulzuje s frekvencí, rovné frekvenci otáčení kotouče. Tím vznikají ve stěnách vířivé proudy, které brzdí motor. [1]

**Elektrodynamická brzda** – elektrodynamické brzdy jsou někdy označovány také jako univerzální brzdy, nebo dynamometry. Jedná se nejčastěji o asynchronní stroje, pracující jako elektromotory, nebo generátory, s výkyvně uloženým statorem. Výhodou je možnost rychlé změny zatížení, proto se používají k měření homologačních cyklů. [1]

### 7.2.2 Měření na válcové zkušebně

Válcová zkušebna umožňuje měřit výkon motoru bez demontáže z automobilu. Výkon se měří na obvodu hnacích kol, které jsou v kontaktu s brzděným válcem. Změřený výkon je nižší, než užitečný výkon na klikovém hřídeli, což je dáno ztrátami v převodovce, rozvodovce, hnacích hřídelích a valivým odporem pneumatik.

Tyto válcové zkušebny jsou zpravidla vybaveny řízeným dynamometrem. Vozidlo je ukotveno na měřicím stanovišti, kde jsou buď jen hnaná, nebo všechna kola umístěna na válcích. Válce, na kterých jsou kola hnané nápravy, jsou brzděny pomocí brzdy s regulovatelným brzdícím účinkem. Brzda může být vířivá, hydraulická, nebo elektrická. Rotor brzdy je spojen s měřicím válcem, stator brzdy je uložen výkyvně. Při přenosu točivého momentu automobilu  $M_k$  pomocí kol se třením zkušební válec roztáčí. Jakmile se uvede do chodu brzda, vznikne brzdící moment  $M_v$ , mající opačný smysl. Reakční moment se pak přenáší na výkyvně uložený stator, kde je pomocí tenzometru měřena síla vyvolaná tímto momentem. Reakční moment se rovná brzdícímu momentu, z čeho lze určit i hnací sílu na obvodě hnacích kol. [1]

## 8 Měření

Pro potřeby měření posloužil vůz VW Golf třetí generace se vznětovým motorem o objemu 1,9 l, vybavený přímým vstřikem s elektronicky řízeným rotačním čerpadlem. Tento motor je standardně vybavený turbodmychadlem s regulací turbíny pomocí proměnlivé geometrie rozváděcích lopatek statoru.

**Tabulka 1 Technické údaje měřeného vozidla**

Značka	Volkswagen
Typ	Golf 3
Rok výroby	1996
Motorizace	1.9 TDI
Kódové označení motoru	AFN
Emisní norma	Euro 2
Maximální výkon motoru	81 kW/4150 ot/min
Maximální točivý moment	235 Nm/1900 ot/min
Systém vstřikování paliva	Přímé, rotační čerpadlo Bosch
Přeplňování	VNT turbodmychadlo, mezichladič

Zkoušený vůz měl navíc místo originálního turbodmychadla Garrett VNT15, modernější turbodmychadlo Garrett GT1749VA. Toto turbodmychadlo má přesnější regulaci díky většímu počtu rozváděcích lopatek (VNT15 jich má 9, GT17 má 11) a také lepší geometrii lopatek kompresoru. Dále byl motor oproti sériovému vybaven tryskami s o 10 % větším průtokem.

Všechna měření byla provedena dvakrát. Jednou s řídicí jednotkou motoru se sériovým továrním softwarem a podruhé s upravenou jednotku s tzv. „chiptuningem“, která je naladěna na míru použitým vstřikovacím tryskám a turbodmychadlu.

Sériová jednotka pracuje s plnicím tlakem 1,0 bar, zatímco upravená reguluje plnicí tlak na 1,35 bar.

Vůz je vybaven sériovým mezichladičem stlačeného vzduchu, umístěným před podběhem levého kola. Protože při delší zátěži s upravenou jednotkou takto řešené chlazení přestává stačit, byl sériový mezichladič navíc doplněn ostřikovací tryskou, ovládanou z pozice řidiče, která ostřikuje mezichladič vodou. Toto řešení funguje a je ověřené i na sériovém vozidle Subaru Impreza v nejvýkonnější verzi STI. Ostřík vody na povrch chladiče zlepšuje tepelnou výměnu a zvyšuje tím účinnost chlazení.

Měření probíhalo na válcové zkušebně v dílnách Technické fakulty ČZU. První částí měření byly homologační emisní cykly NEDC a WLTC. Oba emisní cykly byly změřeny jak na sériové řídicí jednotce, tak na upravené. Cílem je porovnat jaký vliv má úprava v jednotce na emise pevných částic v obou jízdách cyklech.

Druhá část měření je věnovaná měření výkonu. Zde je kromě rozdílu výkonu sledována účinnost chlazení sériového mezichladiče stlačeného vzduchu, a zda má na chlazení pozitivní vliv ostříkávání mezichladiče vodou.

Během celého měření je vůz napojen přes OBD na diagnostiku, kde je sledován především plnicí tlak turbodmyhadla, teplota nasávaného vzduchu za mezichladičem, poloha plynového pedálu a další provozní veličiny.

### **Použité měřicí přístroje:**

**a) Válcová zkušebna:** modernizovaná zkušebna Schenck 3604/GS56 z roku 1983 určená pro homologaci vozidel do 3,5 t.

Zkušebna se skládá ze dvou válců propojených řetězem. K válcům je připojena sada připojitelných setrvačnicků, které mají za úkol simulovat setrvačnou hmotnost vozidla. Z druhé strany jsou k válcům připojeny brzdové systémy. Na hlavní hřídel je připojen stejnosměrný elektrický motor o výkonu 56 kW, který vytváří simulaci odporu vzduchu. K druhému válci byla dodatečně připojena vířivá brzda o výkonu 125 kW, jež slouží pro účely statického měření výkonu.

Válcová zkušebna je ovládána pomocí elektronického systému Datalab od firmy Moravské přístroje a.s., vlastní ovládací program byl vytvořen v programovém prostředí ControlWeb, pomocí kterého je celé pracoviště ovládáno a který zároveň automaticky sbírá data.

**b) Notebook s diagnostikou** - VAG-COM a OBD kabelem. Naměřené hodnoty byly následně vyhodnoceny programem Dieselpower log view.

**c) Spektrometrový analyzátor pevných částic** – TSI Model 3090 EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer) - Analyzátor měří koncentraci částic každou desetinu sekundy. Snímá částice o velikosti 5.6 až 560 nanometrů.

### **Příprava před měřením:**

Nezbytné bylo, aby byl měřený vůz v perfektním technickém stavu, především před náročným měřením výkonu statickou metodou.

Při prvním najetí na měřicí stanoviště válcové zkušebny se ukázalo, že je olejová vana motoru téměř v kontaktu s měřicími válci. Kontakt válce s olejovou vanou byl silně nežádoucí, neboť by, kromě negativně ovlivněných výsledků vlivem tření, mohlo dojít k poškození motoru vozu, případně kontaminaci hardwaru brzdy motorovým olejem, kdyby došlo k jejímu prodření.

Nejsnadnějším řešením bylo zvýšit tlak v pneumatikách, ale přesto byla vana stále nízko. Jelikož vozidlo bylo vybaveno výškově stavitelnými tlumiči, tak bylo jednoduché zvýšit světlou výšku přímo na tlumiči, jen bylo potřeba auto zvednout na zvedáku a demontovat kola.

Po vyřešení prvního problému už bylo možné vozidlo umístit na měřicí stanoviště. Předními koly se najede mezi měřicí válce, následně se válce protočí, aby se auto srovnalo. Poté je potřeba vůz bezpečně ukotvit. To bylo zabezpečeno pomocí dvou popruhů upevněných do ok v podlaze a k vozu za tažné oko. Zadní kola se zajistí zatažením ruční brzdy. Ukotvené vozidlo na měřicím stanovišti je vidět na obrázku 8-1.

***Obrázek 8-1 Vůz na měřicím stanovišti***



## 8.1 Měření jízdních cyklů NEDC a WLTC

Pro měření emisních homologačních testů bylo potřeba nastavit jízdní odpory na válcích, aby co nejvíce odpovídaly reálnému provozu. Dále bylo nezbytné přistavit před vůz ventilátor, který zajistí chlazení během pokusu. Před výfuk byla umístěna hadice na odvod výfukových plynů (viz obrázek 8-2). Do výfuku byla vsazena sonda kouřového analyzátoru (detail na obrázku 8-3), neboť z emisí budeme sledovat pouze pevné částice vyprodukované během jednotlivých cyklů (na obrázku 8-4 program EEPS analyzátoru). Přes OBD zásuvku je zapojen notebook s diagnostikou VAG-COM (viz obrázek 8.5) pro sledování provozních parametrů motoru, především teploty a tlaku v sacím potrubí, dle kterých je možné určit zatížení motoru během jednotlivých cyklů a vzájemně výsledky z těchto cyklů mezi sebou porovnat.

*Obrázek 8-2 Umístění odsávání a analyzátoru*

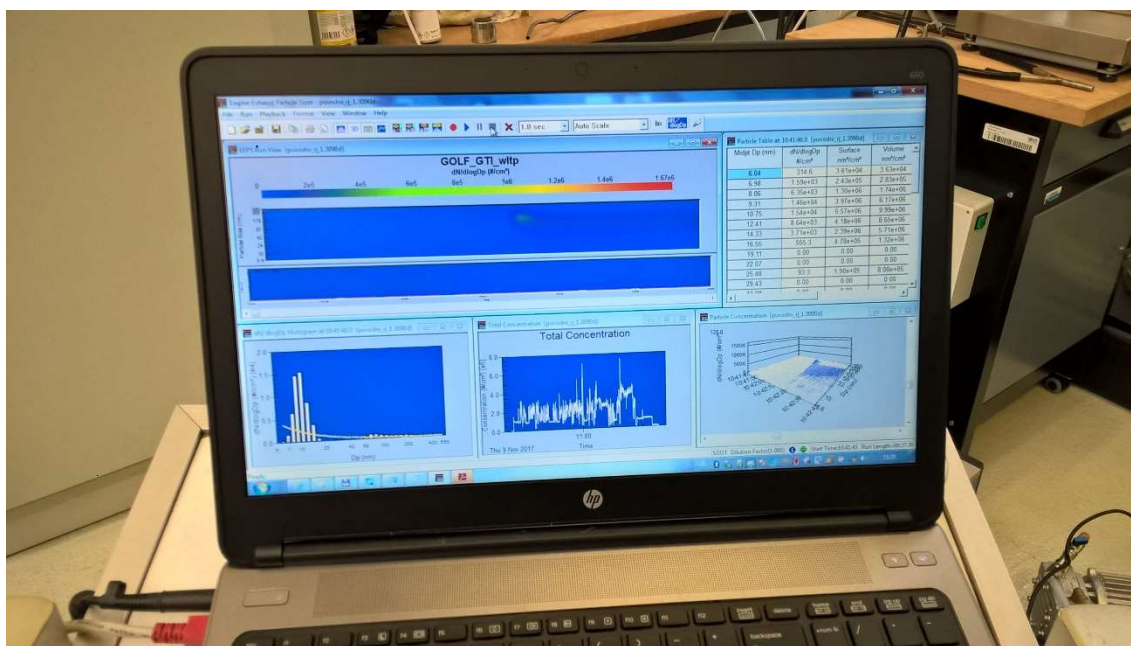


*Obrázek 8-3 Spektrometrový analyzátor pevných částic*





**Obrázek 8-4 Program EEPS analyzátoru**



**Obrázek 8-5 Notebook s diagnostikou napojený na OBD zásuvku**



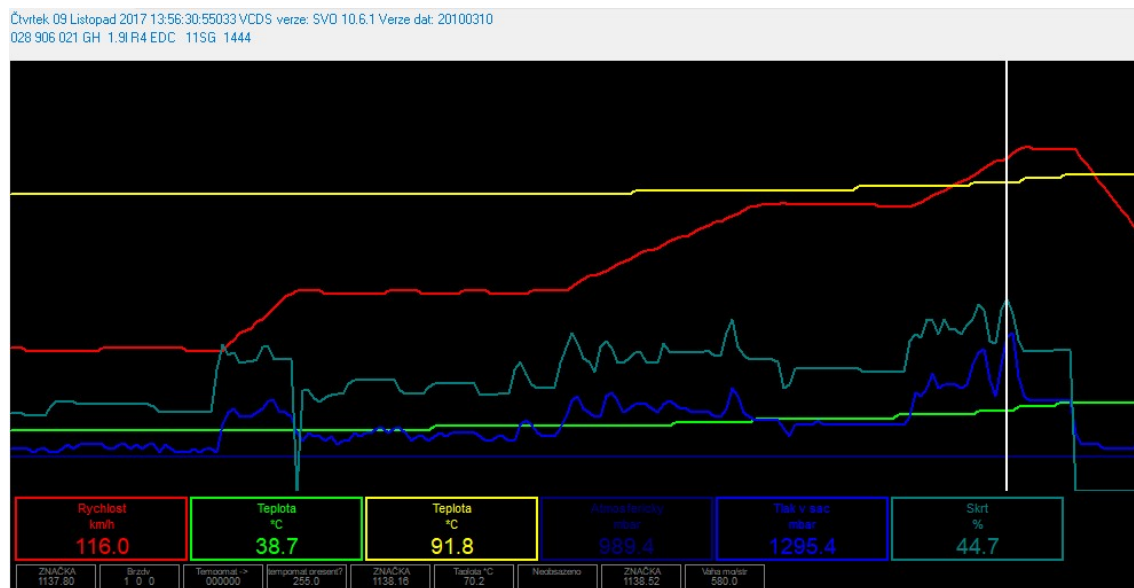
### 1. Měření: Sériová řídicí jednotka

NEDC – v cyklu NEDC s originální řídicí jednotkou byly naměřeny hodnoty zapsané v tabulce 2. Na obrázku 8-6 je zobrazen výřez grafu z diagnostiky. Je zde zachycen moment největší zátěže motoru, který nastal u závěrečné fáze cyklu, těsně před dosažením maximální rychlosti cyklu, což je 120 km/h. Celková naměřená koncentrace částic činila  $1,72 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Celý graf z měření emisí pevných částic je uveden v příloze.

**Tabulka 2 NEDC sériová jednotka**

průměrná teplota v sání	32,3	°C
maximální teplota v sání	40,5	°C
průměrný tlak v sání	0,04	bar
maximální tlak v sání	0,30	bar
průměrná zátěž	13,5	%
maximální zátěž	44,7	%
maximální koncentrace částic	$3,89 \cdot 10^5$	$\text{cm}^{-3}$
celková koncentrace částic	$1,72 \cdot 10^8$	$\text{cm}^{-3}$

**Obrázek 8-6 NEDC log výřez, sériová jednotka**

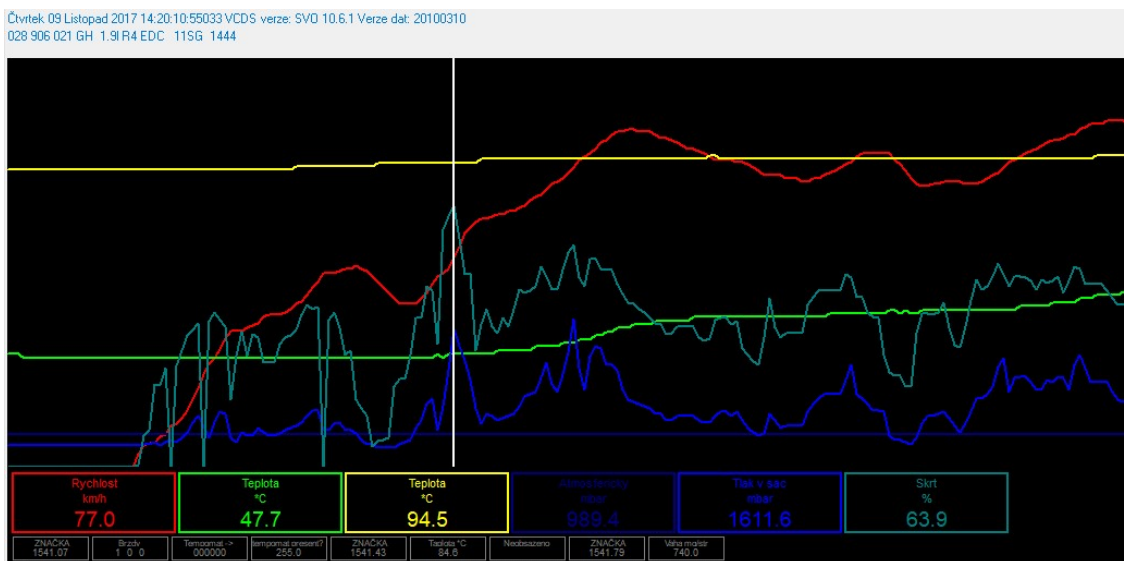


WLTC – v cyklu WLTC s originální řídicí jednotkou byly naměřeny hodnoty zapsané v tabulce 3. Na obrázku 8-7 je zobrazen výřez grafu z diagnostiky. Je zde zachycen moment největší zátěže motoru – 63,9 %. Celková naměřená koncentrace částic činila  $3,15 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Celý graf z měření emisí pevných částic je uveden v příloze.

**Tabulka 3 WLTC sériová jednotka**

průměrná teplota v sání	44,0	°C
maximální teplota v sání	68,9	°C
průměrný tlak v sání	0,08	bar
maximální tlak v sání	0,75	bar
průměrná zátěž	17,8	%
maximální zátěž	63,9	%
maximální koncentrace částic	$5,69 \cdot 10^5$	$\text{cm}^{-3}$
celková koncentrace částic	$3,15 \cdot 10^8$	$\text{cm}^{-3}$

**Obrázek 8-7 WLTC log výřez, sériová jednotka**



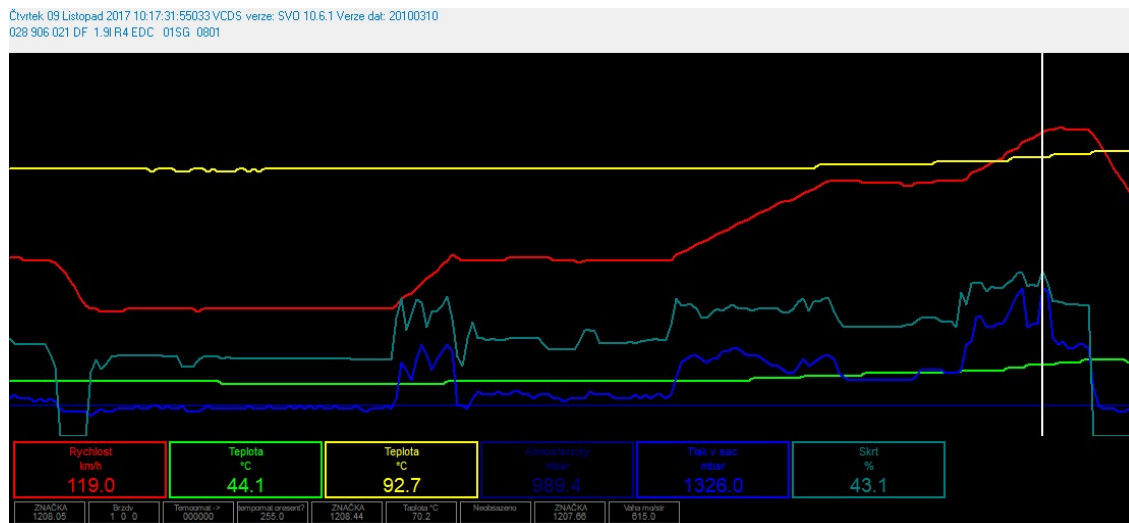
## 2. Měření: Upravená řídicí jednotka

NEDC – v cyklu NEDC s upravenou řídicí jednotkou byly naměřeny hodnoty zapsané v tabulce 4. Na obrázku 8-8 je zobrazen výřez grafu z diagnostiky. Je zde zachycen moment největší zátěže motoru, který nastal opět u závěrečné fáze cyklu. Celková naměřená koncentrace částic činila  $1,99 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Celý graf z měření emisí pevných částic je uveden v příloze.

**Tabulka 4 NEDC upravená jednotka**

průměrná teplota v sání	37,3	°C
maximální teplota v sání	45,6	°C
průměrný tlak v sání	0,06	bar
maximální tlak v sání	0,35	bar
průměrná zátěž	13,8	%
maximální zátěž	43,1	%
maximální koncentrace částic	$4,05 \cdot 10^5$	$\text{cm}^{-3}$
celková koncentrace částic	$1,99 \cdot 10^8$	$\text{cm}^{-3}$

**Obrázek 8-8 NEDC log výřez, upravená jednotka**



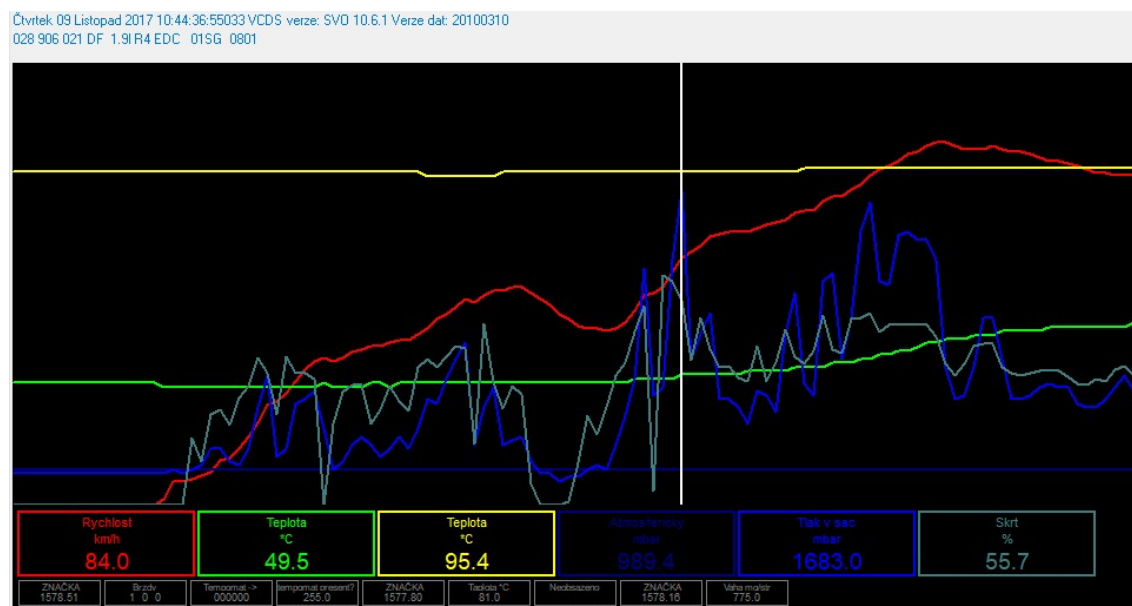
WLTC – v cyklu WLTC s upravenou řídicí jednotkou byly naměřeny hodnoty zapsané v tabulce 5. Na obrázku 8-9 je zobrazen výřez grafu z diagnostiky. Je zde zachycen stejný moment, kde se sériovou řídicí jednotkou byla největší zátěž motoru (63,9 %), zde je to však pouze 55,7 %, plnicí tlak turbodmychadla je však vyšší.

Celková naměřená koncentrace částic činila  $3,53 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Celý graf z měření emisí pevných částic je uveden v příloze.

**Tabulka 5 WLTP upravená jednotka**

průměrná teplota v sání	45,5	°C
maximální teplota v sání	75,6	°C
průměrný tlak v sání	0,1	bar
maximální tlak v sání	0,69	bar
průměrná zátěž	18,4	%
maximální zátěž	63,4	%
maximální koncentrace částic	$7,40 \cdot 10^5$	$\text{cm}^{-3}$
celková koncentrace částic	$3,53 \cdot 10^8$	$\text{cm}^{-3}$

**Obrázek 8-9 WLTC log výřez, upravená jednotka**



## 8.2 Měření výkonu

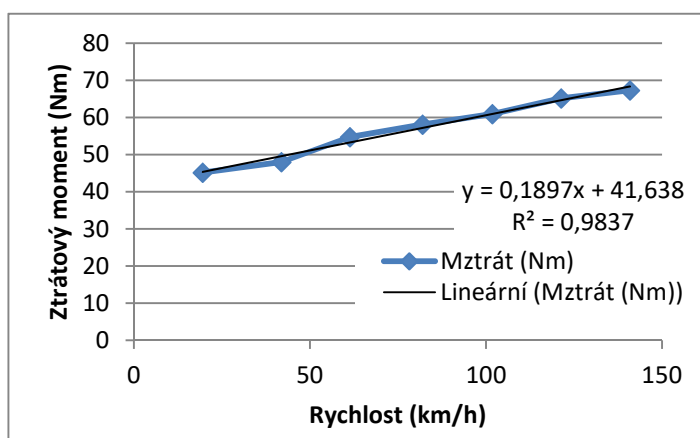
Výkon byl měřen statickou metodou na čtvrtý rychlostní stupeň. Postup měření byl následující. Rozjet vůz postupně do dosažení čtvrtého rychlostního stupně a vytočení do otáček maximálního výkonu. Poté bylo nutné nastavit zátěž brzdy, aby vyrovnala točivý moment na kolech při plném zatížení motoru. Dále byla postupně zvětšována zátěž brzdy, otáčky motoru tak se zvyšující se zátěží postupně klesaly. Tím byl změřen průběh točivého momentu v celém rozsahu provozních otáček.

Dále bylo třeba změřit celkový převodový poměr k dopočítání výsledných hodnot. Celkový poměr znamená poměr otáček měřicího válce a otáček motoru. Je tedy roven násobku převodového poměru rychlostního stupně, stálého převodového poměru v převodovce a poměru mezi kolem a měřicím válcem. Místo výpočtu, který by mohl být nepřesný, neboť nelze dostatečně přesně určit průměr kola kvůli deformaci pneumatiky, byl převodový poměr zjištěn experimentálně. Byly zjištěny otáčky motoru dle OBD diagnostiky a otáčky válce v několika bodech, viz tabulka 6, a z toho stanovený průměr byl brán jako celkový převodový poměr.

**Tabulka 6 Převodový poměr**

Celkový převodový poměr		
otáčky motoru	otáčky válců	převod
1491	777	1,9189
1995	1022	1,9521
2499	1280	1,9523
2950	1500	1,9667
průměr		<b>1,9475</b>

**Obrázek 8-10 Naměřený ztrátový moment**



Na závěr měření byly změřeny pasivní ztráty, tj. ztráty v převodech, hnacích hřídelích a valivý odpor pneumatik. To bylo provedeno opačným principem, jako měření výkonu. Válce byly roztočeny pomocí elektromotoru z brzdy, zároveň s válcem byly roztáčeny i kola měřeného vozidla. Ve vozidle byl zařazen „neutrál“. Spolu s koly byla tedy roztáčena hmota hnacího ústrojí. Toto měření bylo provedeno v několika bodech otáčkového spektra a proloženo křivkou. Točivý moment elektromotoru, nutný k roztočení těchto hmot, je roven ztrátám. Tím byl získán ztrátový moment v hnacím ústrojí, který je možné přičíst k momentu naměřenému na kolech, výsledkem je točivý moment motoru. Naměřený ztrátový moment je zobrazen v grafu 8-10.



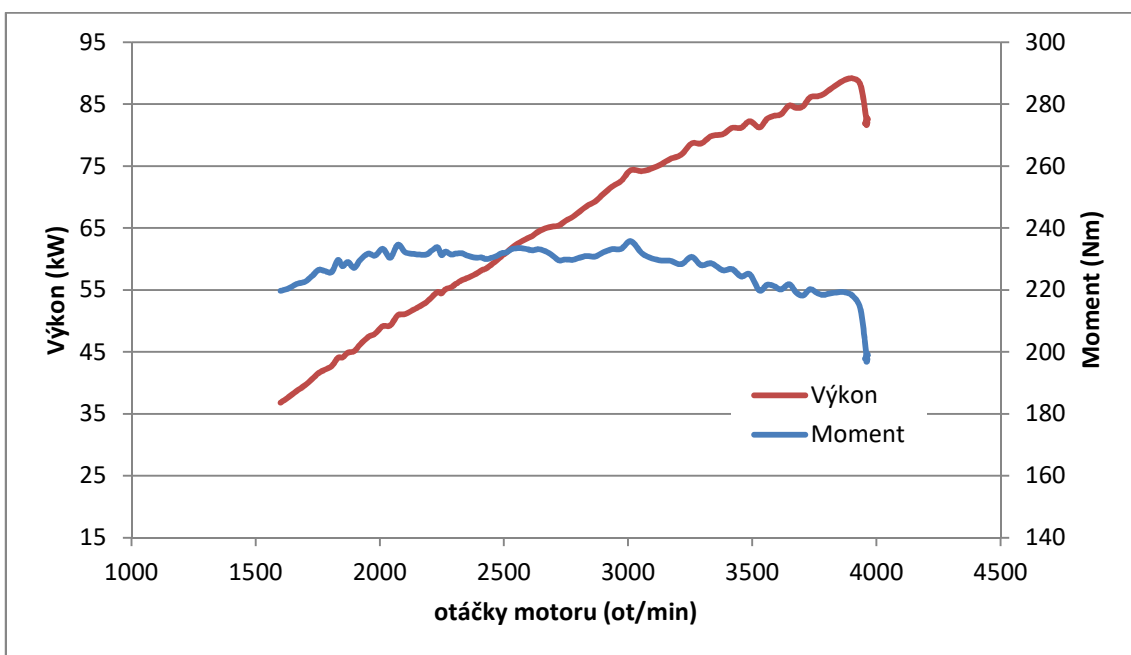
### 1. Měření: Sériová řídicí jednotka

Při prvním měření výkonu se sériovou jednotkou byly naměřeny maximální hodnoty viz tabulka 7. Průběh výkonu a točivého momentu je znázorněn na obrázku 8-11. Na obrázku 8-12 je pak znázorněn záznam z OBD diagnostiky a je zde zachycen moment nejvyšší teploty nasávaného vzduchu – 96,3 °C.

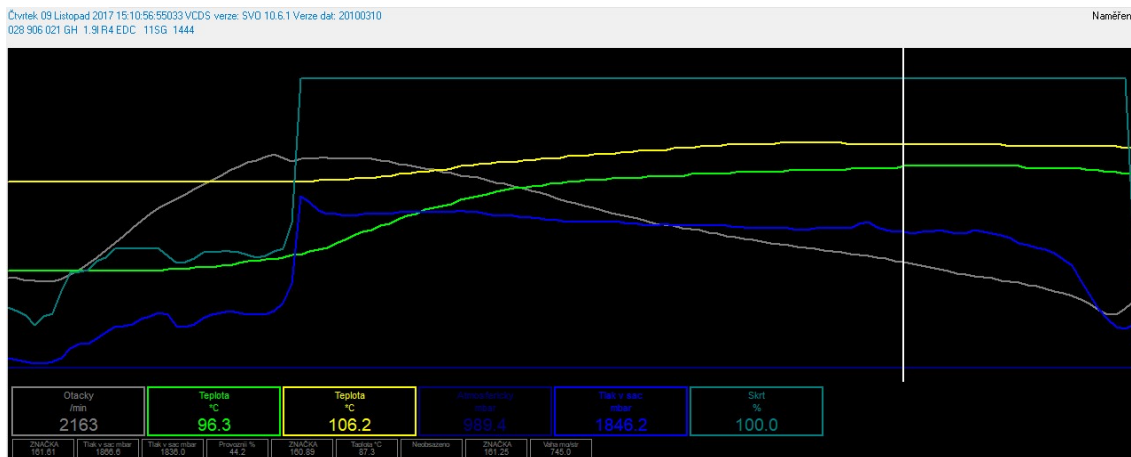
**Tabulka 7 Maximální naměřené hodnoty, sériová jednotka**

Výkon	<b>89</b>	kW	při	<b>3900</b>	ot/min
Moment	<b>236</b>	Nm	při	<b>3000</b>	ot/min

**Obrázek 8-11 Graf z měření výkonu – sériová jednotka**



**Obrázek 8-12 měření výkonu log výřez, sériová jednotka**



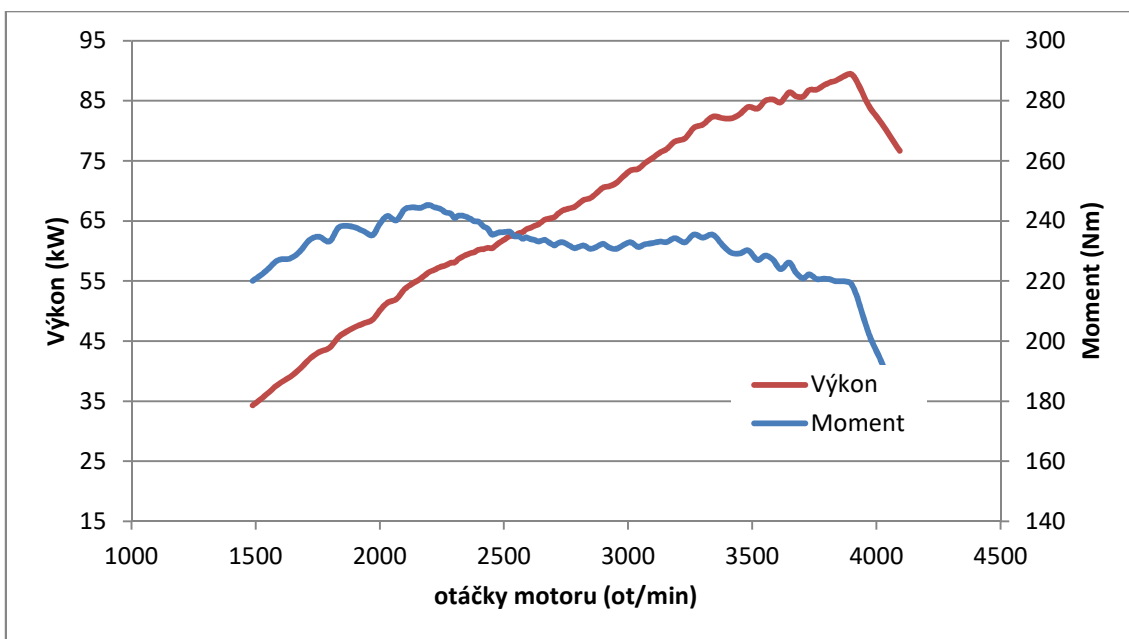
## 2. Měření: Sériová řídicí jednotka + ostřík mezichladiče vodou

U dalšího měření bylo zapojeno ostříkávání mezichladiče vodou. Byly naměřeny maximální hodnoty viz tabulka 8. Průběh výkonu a točivého momentu je znázorněn na obrázku 8-13. Na obrázku 8-14 je pak znázorněn záznam z OBD diagnostiky, kde je zachycen moment nejvyšší teploty nasávaného vzduchu – 88,2 °C.

**Tabulka 8 Maximální naměřené hodnoty, sériová jednotka + ostřík**

Výkon	<b>89</b>	kW	při	<b>3900</b>	ot/min
Moment	<b>245</b>	Nm	při	<b>2200</b>	ot/min

**Obrázek 8-13 Graf z měření výkonu – sériová jednotka + ostřík**



**Obrázek 8-14 měření výkonu log výřez, sériová jednotka + ostřík**





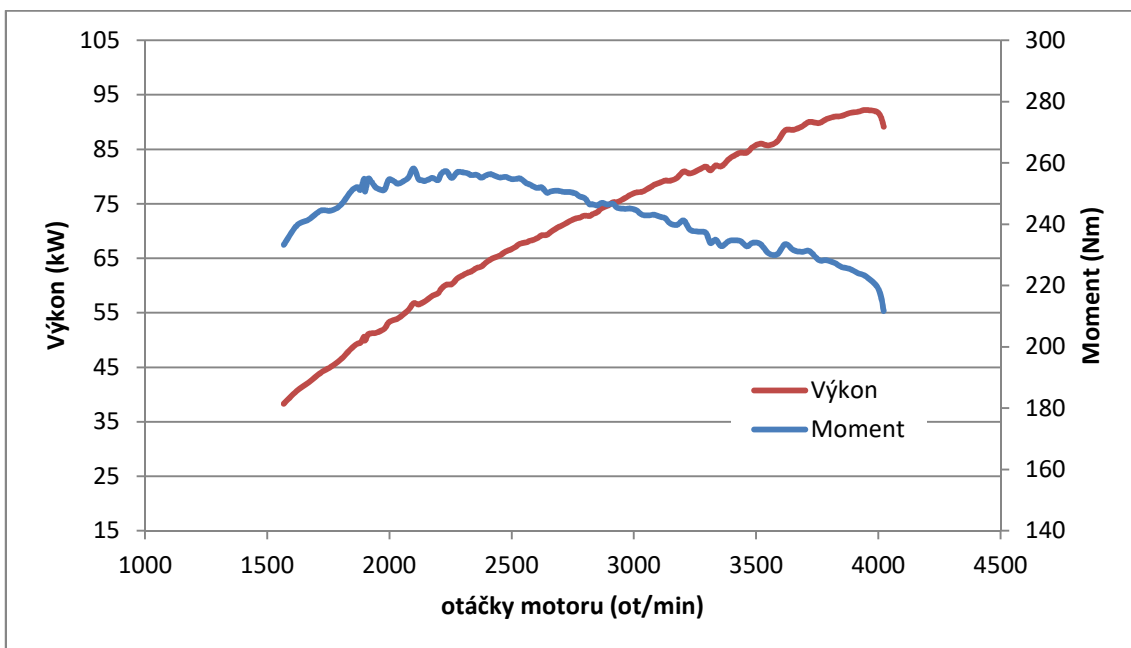
### 3. Měření: Upravená řídicí jednotka

Při prvním měření výkonu s upravenou jednotkou byly naměřeny maximální hodnoty viz tabulka 9. Průběh výkonu a točivého momentu je znázorněn na obrázku 8-15. Na obrázku 8-16 je pak znázorněn záznam z OBD diagnostiky a je zde zachycen moment nejvyšší teploty nasávaného vzduchu – 123,3 °C.

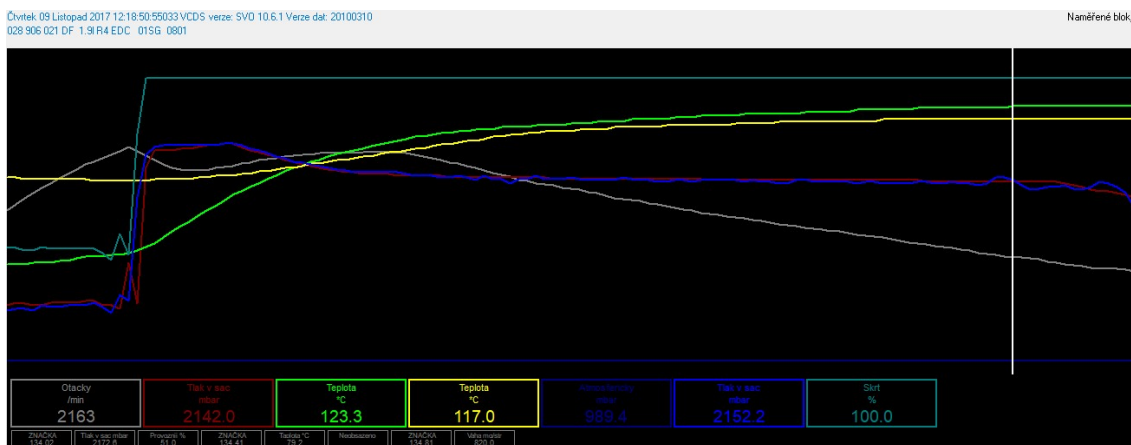
**Tabulka 9 Graf z měření výkonu – upravená jednotka**

Výkon	92	kW	při	4000	ot/min
Moment	258	Nm	při	2100	ot/min

**Obrázek 8-15 Graf z měření výkonu – upravená jednotka**



**Obrázek 8-16 měření výkonu log výřez, upravená jednotka**



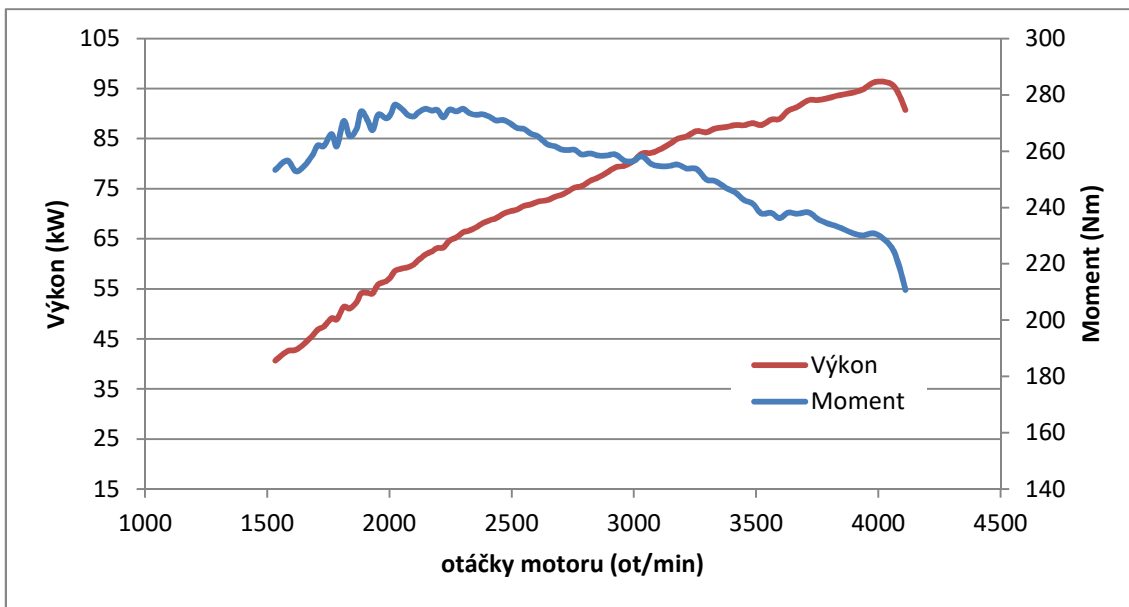
#### 4. Měření: Upravená řídicí jednotka + ostřík mezichladiče vodou

U dalšího měření s upravenou jednotkou bylo opět zapojeno ostříkávání mezichladiče vodou. Byly naměřeny maximální hodnoty viz tabulka 10. Průběh výkonu a točivého momentu je znázorněn na obrázku 8-17. Na obrázku 8-18 je pak znázorněn záznam z OBD diagnostiky, kde je zachycen stejný moment jako u měření bez ostříku a je zde teplota nasávaného vzduchu 106,2 °C.

**Tabulka 10 Graf z měření výkonu – upravená jednotka + ostřík**

Výkon	96	kW	při	4050	ot/min
Moment	277	Nm	při	2000	ot/min

**Obrázek 8-17 Graf z měření výkonu – upravená jednotka + ostřík**



**Obrázek 8-18 měření výkonu log výřez, upravená jednotka + ostřík**



## 9 Výsledky, zhodnocení

Podářilo se naměřit odpovídající hodnoty jak při měření jízdních cyklů, tak při měření výkonu. Rozdíly v hodnotách při jednotlivých změnách jsou rozlišitelné, lze tak na jejich základech vyvodit závěr.

Největším úskalím, především při měření výkonu, se ukázal být nedostatečný ventilátor chlazení, kterým je dílna Technické fakulty ČZU vybavena. Teploty provozních náplní v motoru i teplota nasávaného vzduchu za mezichladičem byly chvílemi během měření výkonu s upravenou jednotkou velmi vysoko (viz teplota chladicí kapaliny na obrázku 8-16: 117 °C).

### 9.1 Měření jízdních cyklů

Pokud porovnáme mezi sebou výsledky z jízdních cyklů NEDC a WLTC, je znát, že cyklus WLTC pracuje s výrazně větším zatížením motoru viz tabulka 11.

**Tabulka 11 Porovnání hodnot z měření cyklů NEDC a WLTC**

	NEDC		WLTC		
	Sériová ŘJ	Upravená ŘJ	Sériová ŘJ	Upravená ŘJ	
průměrná teplota v sání	32,3	37,3	44	45,5	°C
maximální teplota v sání	40,5	45,6	68,9	75,6	°C
průměrný tlak v sání	0,04	0,06	0,08	0,1	bar
maximální tlak v sání	0,3	0,35	0,75	0,69	bar
průměrná zátěž motoru	13,5	13,8	17,8	18,4	%
maximální zátěž motoru	44,7	43,1	63,9	63,4	%

Při měření s upravenou jednotkou byla teplota v sání vždy vyšší, než při měření se sériovou jednotkou a to jak průměrné, tak maximální hodnoty.

Co se týče plnicího tlaku, tak v NEDC cyklu byly jak průměrné, tak maximální hodnoty vyšší u upravené jednotky. U WLTC byl sice průměrný plnicí tlak vyšší u upravené, avšak maximální dosažený byl vyšší při měření se sériovou jednotkou.

Další zajímavostí bylo, že zatímco maximální zátěž motoru (poloha plynového pedálu) byla vždy vyšší se sériovou jednotkou, v průměru však byla zátěž motoru větší s upravenou jednotkou.

Primárním cílem měření jízdních cyklů však bylo měření emisí pevných částic z výfuku. V tabulce 12 je uvedený celkový počet částic naměřený spektrometrem během celého jízdního cyklu.

**Tabulka 12 Naměřené koncentrace pevných částic**

Počet částic celkem		
Jízdní cyklus	Sériová ŘJ	Upravená ŘJ
NEDC	<b>1,72 x 10<sup>8</sup> cm<sup>-3</sup></b>	<b>1,99 x 10<sup>8</sup> cm<sup>-3</sup></b>
WLTC	<b>3,15 x 10<sup>8</sup> cm<sup>-3</sup></b>	<b>3,53 x 10<sup>8</sup> cm<sup>-3</sup></b>

Z výsledných hodnot jasně vyplývá, že vůz s upraveným softwarem řídící jednotky produkuje více pevných částic. A to jak v jízdním cyklu NEDC, tak WLTC. V případě cyklu NEDC je to o necelých 11 % více, ve WLTC o necelých 14 %. Je pravděpodobné, že v reálném provozu budou emise pevných částic vyšší ještě o něco více, než 14 %. Tento závěr potvrdil počáteční očekávání.

## 9.2 Měření výkonu

Během čtyř měření výkonu byly naměřeny maximální hodnoty výkonu a točivého momentu viz tabulka 13.

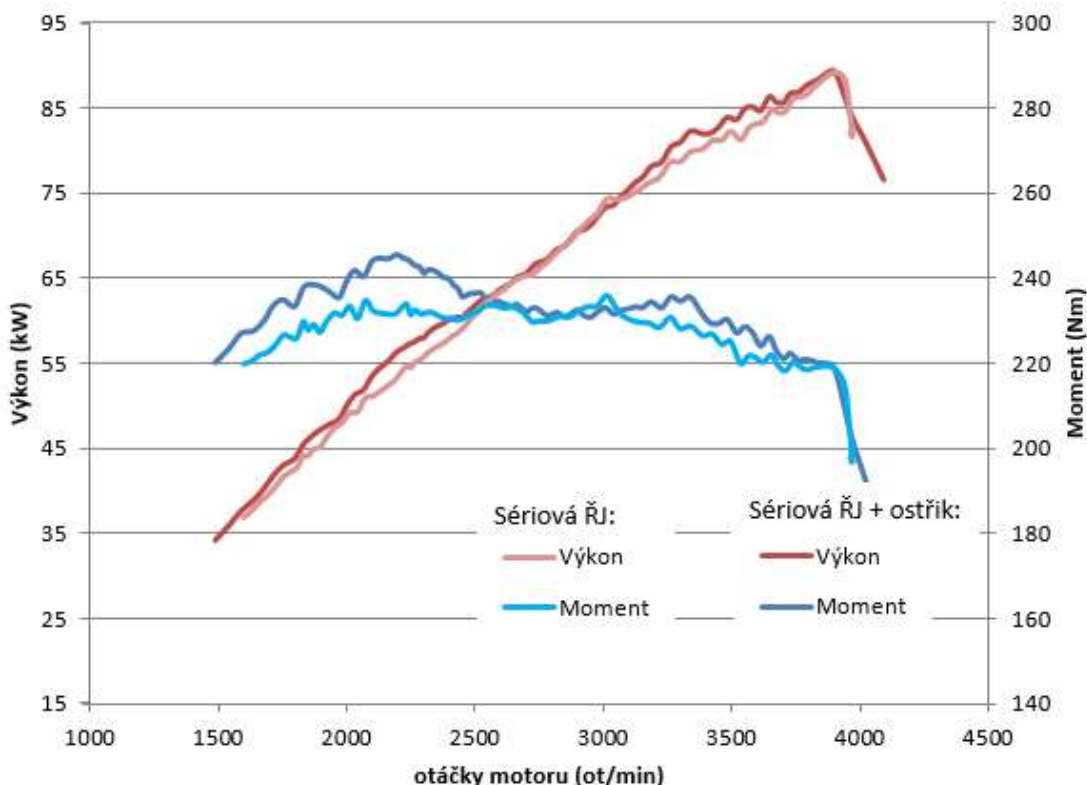
**Tabulka 13 Maximální naměřené hodnoty výkonu a točivého momentu**

<i>1. Měření: Sériová jednotka</i>					
Výkon	<b>89</b>	kW	při	<b>3900</b>	ot/min
Moment	<b>236</b>	Nm	při	<b>3000</b>	ot/min
<i>2. Měření: Sériová jednotka + ostřík mezichladiče</i>					
Výkon	<b>89</b>	kW	při	<b>3900</b>	ot/min
Moment	<b>245</b>	Nm	při	<b>2200</b>	ot/min
<i>3. Měření: Upravená jednotka</i>					
Výkon	<b>92</b>	kW	při	<b>4000</b>	ot/min
Moment	<b>258</b>	Nm	při	<b>2100</b>	ot/min
<i>4. Měření: Upravená jednotka + ostřík mezichladiče</i>					
Výkon	<b>96</b>	kW	při	<b>4050</b>	ot/min
Moment	<b>277</b>	Nm	při	<b>2000</b>	ot/min

Během prvního měření byl změřen výkon se sériovou řídící jednotkou a sériovým mezichladičem stlačeného vzduchu. Bylo dosaženo vyššího výkonu i točivého momentu, než udává výrobce (81 kW a 235 Nm), to je zřejmě dáno použitím vstřikovacích trysek o vyšším průtoku.

Zajímavá je změna během druhého měření, kdy byl sériový mezichladič stlačeného vzduchu ostříkovan vodou, a tím se zlepšila účinnost chlazení. Výkon zůstal stejných 89 kW při 3900 ot/min, ale točivý moment ve spodním pásmu otáček citelně narostl na 245 Nm, vrchol točivého momentu je o 800 ot/min níže. Změna je dobře patrná z obrázku 9-1, kde jsou grafy z obou měření přes sebe překryté. Teplota nasávaného vzduchu klesla až o 8,1 °C.

**Obrázek 9-1 Porovnání měření se sériovou jednotkou**



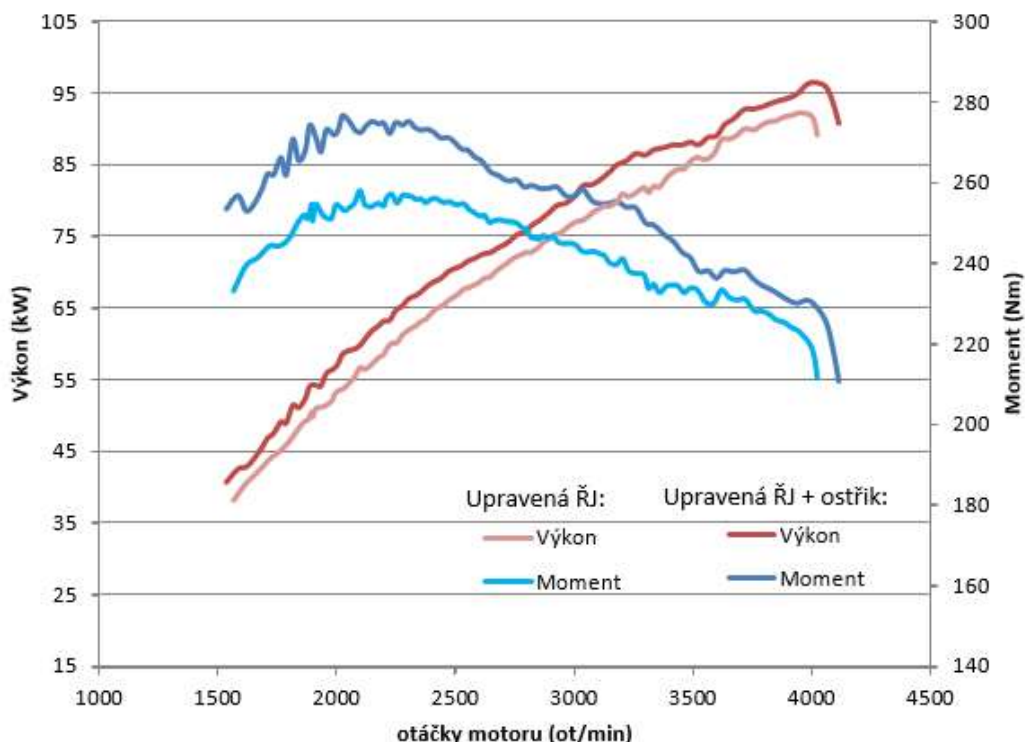
Poté následovala výměna řídicí jednotky za upravenou. Měřil se opět výkon se sériovým mezichladičem. Zde se objevil problém. Tím byl pokles plnicího tlaku turbodmychadla na 1,2 bar, přitom jednotka za normálních podmínek reguluje tlak na 1,35 bar. To bylo zřejmě způsobeno vysokou teplotou nasávaného vzduchu. Na obrázku 9-2 je zobrazen moment, kdy teplota nasávaného vzduchu překročila 80 °C (zeleně) a zároveň plnicí tlak začal klesat (modře). Jednotka je zřejmě vybavena limiterem, který při vysoké teplotě nasávaného vzduchu omezí plnicí tlak, aby ochránil motor i turbodmychadlo. Proto výkon narostl jen mírně na 92 kW a točivý moment na 277 Nm. Zde bylo jasné, že sériový mezichladič stlačeného vzduchu již nestačí.

**Obrázek 9-2 údaje z OBD při měření výkonu s upravenou jednotkou**



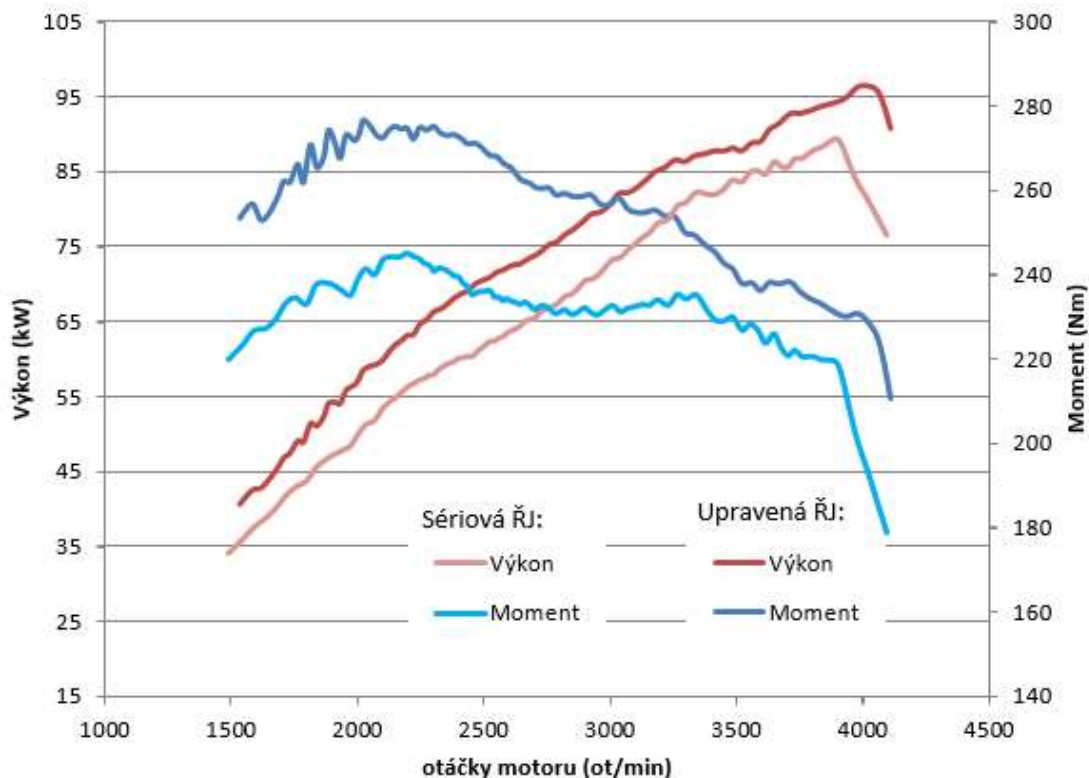
Při dalším měření byl mezichladič podpořen opět ostřikováním vodou. I tak to nestačilo a nebylo dosaženo plného plicního tlaku kvůli zásahům jednotky. Přesto byl naměřen znatelný nárůst 4 kW a 19 Nm jen pomocí ostřikování mezichladiče vodou. Rozdíl je patrný z obrázku 9-3. Pokles teploty nasávaného vzduchu byl až o 17,1 °C.

**Obrázek 9-3 Porovnání měření s upravenou jednotkou**



Na závěr ještě porovnání zvýšení výkonu a točivého momentu mezi sériovou a upravenou jednotkou viz obrázek 9-4. Tyto hodnoty jsou v obou případech měření, při kterých byl mezichladič ostříkovan vodou. Nárůst je 7 kW a 32 Nm.

**Obrázek 9-4 Porovnání měření sérová vs. upravená jednotka**



Slabinou toho měření byl slabý ventilátor před vozidlem, který měl dodávat proud vzduchu na chladiče. Proto se motor při měření s upravenou řídicí jednotkou přehříval a nejvíce znát to bylo na teplotě nasávaného vzduchu. Kvůli zásahům jednotky vlivem vysokých teplot nebyl naměřen potenciálně maximální výkon a točivý moment motoru.

Tento experiment však prokazatelně potvrdil kladný vliv jednoduchého zařízení, kterým byl ostříkovan mezichladič vodou. Jak v případě upravené, tak i sériové jednotky pomohl motoru při déle trvající zátěži a promítlo se to kladně především na křivce točivého momentu ve spodním spektru otáček motoru.

## 10 Závěr

V této diplomové práci byl měřen automobil Volkswagen Golf s přeplňovaným vznětovým spalovacím motorem. V rámci experimentu byly prováděny změny parametrů přeplňování, jako je změna plnicího tlaku turbodmyhadla a změny v účinnosti chlazení stlačeného vzduchu v sání. Byla sesbírána data o výkonu motoru, emisích pevných částic a data z řídicí jednotky motoru.

Cílem práce bylo ověřit, jak se přeplňovaný vznětový motor chová při změně vstupních parametrů. Na základě naměřených dat z experimentu byl v této práci vyhodnocen vliv jednotlivých změn na zmíněné parametry.

Experimentu předcházela teoretická úvod, který měl za úkol zasvěcení do dané problematiky. Byl v něm uveden princip a funkce vznětového pístového spalovací motoru a principy jeho přeplňování. Dále to byla problematika emisí vznětového motoru v osobních automobilech a současné způsoby homologačních měření emisí v zemích EU. Poslední část rešerše byla věnována měření výkonových parametrů vozidlových motorů.

Samotný experiment byl proveden v prostorách dílen Technické fakulty ČZU.

Byly změřeny emise pevných částic v jízdních cyklech NEDC a WLTC, nejprve s řídicí jednotkou, kterou byl vůz sériově vybaven a podruhé s jednotkou s upraveným softwarem pro vyšší výkon. Potvrdilo se, že vůz s upravenou řídicí jednotkou produkuje více pevných částic v obou jízdních cyklech.

V druhé části měření byl zjišťován výkon a točivý moment na válcové brzdě při statické metodě měření. Byla provedena 4 měření, se sériovou a s upravenou jednotkou po dvou měření. Při druhém měření byl mezichladič stlačeného vzduchu ostříkovan vodou. V této části bylo zjištěno, že ostříkování mezichladiče prokazatelně zlepšuje chlazení a snižuje teplotu nasávaného vzduchu. Díky tomu byl při ostříkování mezichladiče naměřen vyšší točivý moment. To bylo dáno především tím, že při delším zatížení řídicí jednotka kvůli vysoké teplotě v sání omezovala plnicí tlak, aby ochránila motor a turbodmyhadlo. Ostříkování mezichladiče tomu však dokázalo zčásti zamezit.

Závěrem je vhodné říci, že při úpravě řídicí jednotky vznětového přeplňovaného motoru za účelem zvýšení výkonu rostou také emise pevných částic vypouštěné do ovzduší. Pokud je takto upravené vozidlo v dlouhodobé zátěži, sériové chlazení stlačeného vzduchu nemusí stačit. Vhodným doplňkem při zvyšování výkonu je tedy i úprava mezichladiče. Buď pomocí ostříkování vody ke krátkodobému zlepšení chlazení, nebo lépe výměnou za jiný s větší účinnou plochou.



## Použitá literatura

1. **HROMÁDKO**, Jan et. al. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
2. **ARMSTRONG**, Lloyd Van Horn a Charles Lafayette **PROCTOR**. *Diesel engine* [online]. Vystaveno 18.9.2017. [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>
3. **KRÁLOVÁ**, Magda. Rudolf Diesel [Online] Vystaveno 2016. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/vedec/1118/diesel>
4. **DAIMLER**. Diesel engines in Mercedes-Benz passenger cars [Online] Vystaveno 2016. [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Diesel-engines-in-Mercedes-Benz-passenger-cars.xhtml?oid=9361301>
5. **DRAGOUN**, Aleš. Historie TDI, jak všechno začalo? [Online] Vystaveno 28.9.2015. [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/historie-tdi-jak-vsechno-zacalo-89321?cely-clanek>
6. **BENEŠ**, Ladislav. *Pístové spalovací motory zážehové a vznětové*. [Online] Vystaveno 2016. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/8663967-19-a-20-pistove-spalovaci-motory-zazehove-a-vznetove-19-and-20-petrol-and-diesel-pistone-combustion-engines.html>
7. **BEROUN**, Stanislav. *Vozidlové motory*, Skriptum TU v Liberci, 2013.
8. **KAMEŠ**, Josef. *Spalovací motorová vozidla: část: Spalovací motory*. Vyd. 2. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2010. ISBN 80-213-0895-8. 192 s.
9. **PAUER**, Václav. *Vývoj konstrukce závodních vozů: vše podstatné z historie techniky formulových vozů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. 355 s. ISBN 978-80-247-3015-8.

10. **MACKERLE**, Julius. *Automobil s lepší účinností*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1985. 248 s.

11. **HONEYWELL**. *VNT™ Turbochargers*. [Online] Vystaveno 2018. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <https://turbo.honeywell.com/our-technologies/vnt-turbochargers/>

12. **TURBOSMART**. *How an Intercooler works*. [Online] Vystaveno 2016. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.turbosmart.com.au/technical-articles/how-an-intercooler-works/>

13. **AET TURBOS**. *What is an intercooler and how does it work?* [Online] Vystaveno 22.10.2014. [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://www.aet-turbos.co.uk/blog/story/turbo-tech-101-what-is-an-intercooler-and-how-does-it-work>

14. **FREI**, Martin. *Emise osobních vozů do roku 2030*, Svět motorů. Speciál technika. Praha: Czech News Center a.s., 2018, 1, 8-10, ISSN 0039-7016

15. **HOFMANN**, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory*. 2. vyd. Brno: SNTL, 1985. 134 s.

16. **ŠRÁMEK**, Adam. *Zvýšení výkonu motoru vstřikováním vody: staré, účinné, přesto nerozšířené* [online] Vystaveno 15.02.2013. [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/zvyseni-vykonu-motoru-vstrikovanim-vody-stare-ucinne-presto-nerozsirene/>

17. **EDGAR**, Julian. *Intelligent intercooler water spray*. [Online] Vystaveno 2018. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.autospeed.com/cms/article.html?&title=Intelligent-Intercooler-Water-Spray-Part-1&A=0527>

18. **VOLKSWAGEN**. *Nové standarty pro spotřeby paliva*. [Online] Vystaveno 2018. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://www.volkswagen.cz/technologie/wltp>

19. **ACEA**. *FROM NEDC TO WLTP: WHAT WILL CHANGE?* [Online] Vystaveno 2018.

[cit. 2018-03-25]. Dostupné z:

<http://wltfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>

## Seznam obrázků

Obrázek 4-1 Cyklus čtyřdobého vznětového motoru .....	5
Obrázek 4-2 Teoretický p-V diagram pístového čtyřdobého vznětového motoru .....	7
Obrázek 4-3 p-V diagram přeplňovaného vs. atmosférického vznětového motoru .....	8
Obrázek 5-1 Schéma přeplňování turbodmychadlem.....	10
Obrázek 5-2 Schéma regulace pomocí obtokové klapky.....	11
Obrázek 5-3 VNT regulace turbodmychadla.....	12
Obrázek 5-4 Schéma mezichladiče vzduch-vzduch: .....	15
Obrázek 5-5 Schéma chlazení stlačeného vzduchu mezichladičem voda-vzduch .....	17
Obrázek 6-1 Složení výfukových plynů vznětového motoru .....	19
Obrázek 6-2 Schéma EGR ventilu s chladičem spalin: .....	21
Obrázek 6-3 Schéma emisních opatření za motorem: .....	22
Obrázek 6-4 New european driving cycle .....	23
Obrázek 6-5 jízdní cyklus WLTC 3. třídy .....	24
Obrázek 6-6 rozdíly NEDC vs. WLTP .....	25
Obrázek 8-1 Vůz na měřicím stanovišti .....	31
Obrázek 8-2 Umístění odsávání a analyzátoru .....	32
Obrázek 8-3 Spektrometrový analyzátor pevných částic .....	32
Obrázek 8-4 Program EEPS analyzátoru.....	33
Obrázek 8-5 Notebook s diagnostikou napojený na OBD zásuvku.....	33
Obrázek 8-6 NEDC log výřez, sériová jednotka .....	34
Obrázek 8-7 WLTC log výřez, sériová jednotka .....	35
Obrázek 8-8 NEDC log výřez, upravená jednotka .....	36
Obrázek 8-9 WLTC log výřez, upravená jednotka.....	37
Obrázek 8-10 Naměřený ztrátový moment.....	38
Obrázek 8-11 Graf z měření výkonu – sériová jednotka .....	39

---

Obrázek 8-12 měření výkonu log výřez, sériová jednotka .....	39
Obrázek 8-13 Graf z měření výkonu – sériová jednotka + ostřík.....	40
Obrázek 8-14 měření výkonu log výřez, sériová jednotka + ostřík.....	40
Obrázek 8-15 Graf z měření výkonu – upravená jednotka.....	41
Obrázek 8-16 měření výkonu log výřez, upravená jednotka.....	41
Obrázek 8-17 Graf z měření výkonu – upravená jednotka + ostřík.....	42
Obrázek 8-18 měření výkonu log výřez, upravená jednotka + ostřík.....	42
Obrázek 9-1 Porovnání měření se sériovou jednotkou.....	45
Obrázek 9-2 údaje z OBD při měření výkonu s upravenou jednotkou.....	46
Obrázek 9-3 Porovnání měření s upravenou jednotkou.....	46
Obrázek 9-4 Porovnání měření sérová vs. upravená jednotka.....	47

## Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1 Technické údaje měřeného vozidla .....	29
Tabulka 2 NEDC sériová jednotka .....	34
Tabulka 3 WLTP sériová jednotka .....	35
Tabulka 4 NEDC upravená jednotka .....	36
Tabulka 5 WLTP upravená jednotka .....	37
Tabulka 6 Převodový poměr .....	38
Tabulka 7 Maximální naměřené hodnoty, sériová jednotka.....	39
Tabulka 8 Maximální naměřené hodnoty, sériová jednotka + ostřík .....	40
Tabulka 9 Graf z měření výkonu – upravená jednotka.....	41
Tabulka 10 Graf z měření výkonu – upravená jednotka + ostřík .....	42
Tabulka 11 Porovnání hodnot z měření cyklů NEDC a WLTC .....	43
Tabulka 12 Naměřené koncentrace pevných částic .....	44
Tabulka 13 Maximální naměřené hodnoty výkonu a točivého momentu .....	44

# Přílohy

