

# Měření výkonu spalovacích motorů

**Bakalářská práce**

Vedoucí bakalářské práce:  
doc. Ing. Jiří Čupera, Ph.D.

Vypracoval:  
Patrik Tvrdý

Brno 2017

Na této stránce bude vložen originální formulář Zadání bakalářské práce.  
Vystavený, podepsaný a orazítovaný formulář Vám připraví vedoucí bakalářské  
práce před jejím svázáním.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Měření výkonu spalovacích motorů** vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmetná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne \_\_\_\_\_

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Čuperovi, Ph.D. za ochotu, důležité rady a pomoc při tvorbě této práce.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením výkonu spalovacích motorů. V teoretické části práce jsou popsány druhy výkonu a charakteristiky motorů. Dále práce popisuje princip a metody měření, typy zkušebních zařízení a jejich konstrukci. Praktická část práce se zabývá měřením výkonu na vozidlové zkušebně. K měření bylo použito vozidlo Škoda Superb 2.0 TDi.

## **Klíčová slova**

Výkon spalovacího motoru, točivý moment, válcový dynamometr, motorový dynamometr.

## **Abstract**

This thesis deals with measuring the performance of internal combustion engines. In theoretical section describes the types and performance characteristics of the engine. It also describes the principles and methods of measurement, types of test facilities and their construction. The practical part deals with the measurement of performance on the chassis dynamometer. For measurements was used vehicle Skoda Superb 2.0 TDi.

## **Keywords**

Engine power, torque, test bench, engine dynamometer.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Cíle bakalářské práce</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Termomechanika spalovacích motorů</b>	<b>10</b>
3.1	Porovnávací cykly spalovacích motorů .....	10
3.1.1	Cyklus zážehových motorů – Ottův .....	11
3.1.2	Smíšený cyklus – Sabbatův .....	12
<b>4</b>	<b>Výkon spalovacích motorů</b>	<b>14</b>
4.1	Točivý moment .....	14
4.2	Druhy výkonu .....	16
4.2.1	Indikovaný výkon .....	16
4.2.2	Efektivní výkon .....	17
4.2.3	Ztrátový výkon .....	18
4.2.4	Jmenovitý výkon .....	19
4.2.5	Maximální výkon .....	20
4.2.6	Redukovaný výkon .....	20
<b>5</b>	<b>Charakteristiky spalovacích motorů</b>	<b>21</b>
5.1	Otáčková charakteristika .....	21
5.1.1	Vnější otáčková charakteristika .....	21
5.1.2	Částečná otáčková charakteristika .....	22
5.2	Zatěžovací charakteristika .....	23
5.3	Regulační charakteristika .....	23
5.4	Úplná charakteristika .....	24
<b>6</b>	<b>Normativní požadavky na měření výkonu</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Dynamometry</b>	<b>27</b>

---

7.1	Pasivní dynamometry.....	28
7.1.1	Hydraulické dynamometry.....	28
7.1.2	Elektromagnetické vířivé dynamometry .....	29
7.2	Aktivní dynamometry.....	30
7.2.1	Elektrické dynamometry.....	30
<b>8</b>	<b>Válcové zkušebny</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>Motorové zkušebny</b>	<b>34</b>
<b>10</b>	<b>Metodika měření a zpracování výsledků</b>	<b>36</b>
10.1	Specifikace a technické parametry vozidla .....	36
10.2	Technické parametry vozidlové zkušebny.....	38
10.3	Dynamická zkouška.....	41
10.3.1	Data získaná měřením.....	42
10.3.2	Podmínky měření a korekce dat.....	42
10.3.3	Výsledky průměrných hodnot a otáčková charakteristika .....	44
<b>11</b>	<b>Závěr</b>	<b>45</b>
<b>12</b>	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>46</b>
12.1	Knižní publikace .....	46
12.2	Elektronické zdroje .....	46
<b>13</b>	<b>Seznam obrázků</b>	<b>47</b>
<b>14</b>	<b>Seznam tabulek</b>	<b>48</b>

# 1 Úvod

V mé bakalářské práci se zabývám problematikou měření výkonu spalovacích motorů. Vlivem neustálého vývoje a zvyšujících se nároků na spalovací motory, zejména na jejich výkon a spotřebu, se z měření výkonu stal právoplatný technicko-vědní obor sloužící k porovnávání rozličných parametrů různých spalovacích motorů. Měření výkonu se uplatňuje zejména ve výzkumu a vývoji a v automobilové diagnostice.

V úvodu práce jsou popsány termodynamické děje tepelných oběhů motorů jakožto tepelných strojů. Teoretická část práce definuje výkon motoru a jednotky nezbytné k jeho výpočtu. Dále práce popisuje principy měření a různé typy testovacích zařízení pro měření výkonu spalovacího motoru nebo hnacího výkonu na kolech motorového vozidla. V praktické části práce je uvedena metodika měření výkonu na válcovém dynamometru. Měření proběhlo na válcové zkušebně Mendelu v Brně. Pro měření bylo použito vozidlo Škoda Superb 2.0 TDI.



## **2 Cíle bakalářské práce**

Cílem této práce je představení problematiky související s měřením výkonu a popis základních principů měření výkonu motoru. Definování veličiny výkonu a veličin potřebných k jeho výpočtu. Nastínění normativních požadavků na měření.

Cílem praktické části je popsat metodiku měření výkonu motoru přenášeného na kola vozidla a provést praktické měření na válcovém dynamometru.

## 3 Termomechanika spalovacích motorů

Spalovací motory považujeme za tepelné stroje, u kterých k přívodu tepla do oběhu dochází přímo hořením směsi paliva ve spalovacím prostoru. Kvůli odlišnosti oběhů zážehových a vznětových motorů je nutné rozlišovat cykly těchto spalovacích motorů. U zážehových motorů je do spalovacího prostoru nasávána směs vzduchu a paliva ve formě aerosolu. Tato směs je zažehnuta elektrickou jiskrou na konci komprese, kde teplota směsi nesmí být vyšší než její zápalná teplota. Hoření směsi má explozivní charakter a proto se považuje za hoření při stálém objemu. Tento Ottův výbušný cyklus je proto také označován jako cyklus isochorický. Vznětové motory komprimují čistý vzduch. Palivo (motorová nafta) je vstřikováno do vzduchu na konci komprese a je zapáleno kompresním teplem. Proto teplota na konci komprese musí být vyšší než zápalná teplota paliva. V důsledku toho vznětové motory dosahují vyššího kompresního poměru a tím i vyšší tepelné účinnosti než zážehové. Hoření směsi teoreticky probíhá za konstantního tlaku. Tento rovnotlaký cyklus je čistě teoretický a uvažuje se u vznětových volnoběžných motorů. Kombinací zážehového a rovnotlakého cyklu vzniká Smíšený cyklus, se kterým pracují moderní vznětové motory (Groda,2008).

### 3.1 Porovnávací cykly spalovacích motorů

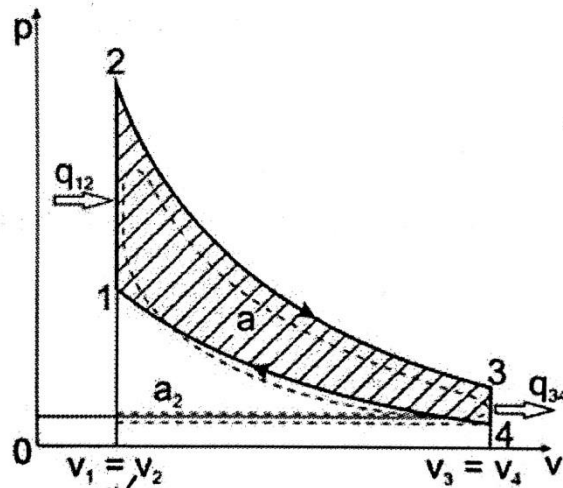
Porovnávací cykly spalovacích motorů jsou idealizované pracovní cykly, které sestávají ze základních změn stavu. Tyto cykly jsou tedy teoretické a při jejich výpočtu se vychází z následujících podmínek:

- stroj pracuje bez tření a tepelných ztrát
- pracovní látkou je ideální plyn
- cyklus pracuje se stejnou látkou (uzavřený cyklus)

Pro teoretické cykly se stanovuje termická účinnost, která vyjadřuje možnosti dosažení nejvyšší účinnosti tepelných strojů. S idealizovanými cykly se porovnávají skutečné cykly tepelných strojů. Tyto skutečné cykly se získávají z indikátorových diagramů. Termická účinnost cyklů skutečných strojů je vždy nižší než účinnost daného idealizovaného cyklu vlivem tepelných ztrát a mechanického tření (Groda, 2008).

### 3.1.1 Cyklus zážehových motorů – Ottův

Pro čtyřdobý zážehový motor se jako porovnávací cyklus volí oběh s přívodem tepla za stálého objemu. Tento cyklus je tvořen dvěma izochorickými a dvěma adiabatickými změnami.



Obr. 1 Zážehový cyklus v p-V diagramu (Groda, 2008)

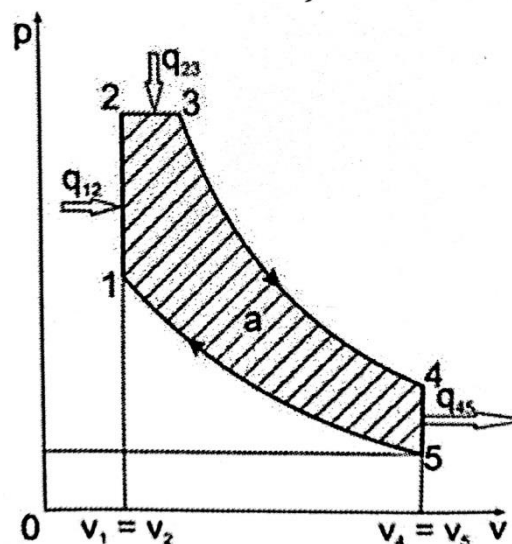
- 4-1: adiabatická komprese
- 1-2: izochorický přívod tepla ( $q_{12}$ )
- 2-3: adiabatická expanze
- 3-4: izochorický odvod tepla ( $q_{34}$ )
- a – užitečná práce
- $a_2$  – práce potřebná pro nasání směsi a vytlačení spalin

V prvním zdvihu dochází k nasátí směsi vzduchu a paliva do válce a to při tlaku o málo nižším než je tlak atmosferický. Poté se uzavře sací ventil a dochází ke druhému zdvihu a ke kompresi směsi (4-1). Konečná teplota na konci komprese musí být nižší než zápalná teplota směsi. Směs je zažehnuta těsně před koncem komprese, tak aby došlo k izochorickému spalování (1-2) a tímto je do cyklu přivedeno teplo ( $q_{12}$ ). K expanzi dochází ve třetím zdvihu (2-3), kdy se před ukončením třetího zdvihu otvírá výfukový ventil a spaliny opouští válec za stálého objemu (3-4). Tímto je cyklus uzavřen. U skutečného cyklu musí docházet ještě ke čtvrtému zdvihu, ve kterém jsou z válce vytlačeny zbytky spalin, až potom je možné cyklus opa-

kovat nasátím nové směsi. Skutečný cyklus je v p-v diagramu zaznačen čárkovaně. Práce tohoto skutečného cyklu je oproti ideálnímu menší o práci  $a_2$  potřebnou ke čtvrtému zdvihu a nasátí nové směsi (Groda, 2008).

### 3.1.2 Smíšený cyklus – Sabbatův

U vznětových motorů je palivo do spalovacího prostoru vstřikováno pod vysokým tlakem. Tohoto způsobu poprvé využil Diessel. Ten ke vstřikování paliva využil stlačeného vzduchu. Později se k rozprášení paliva začala používat vysokotlaká pístová čerpadla. Palivo je vlivem vysokého tlaku rozprášeno a v důsledku toho se zvyšuje rychlost hoření. Spalování z části probíhá za konstantního tlaku (2-3).



Obr. 2 Smíšený cyklus v p-V diagramu (Groda, 2008)

- 1-2: isochorická změna (přívod tepla)
- 2-3: isobarická změna (přívod tepla)
- 3-4: adiabatická změna
- 4-5: isochorická změna
- 5-1: adiabatická změna

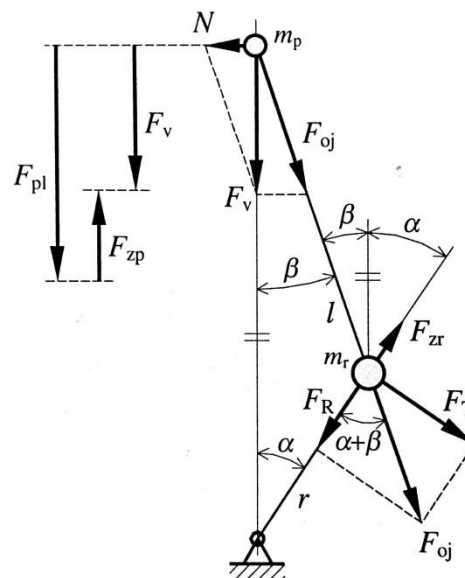
V části (5-1) dochází ke stlačování čistého vzduchu. Teplota vzduchu na konci komprese musí být větší než zápalná teplota nafty. V bodě 2 dochází ke vstříku paliva pod vysokým tlakem a jeho jemnému rozprášení. Část paliva hoří za stálého objemu (1-2) a teplo vniklé spalováním je využito na zvýšení tlaku. Zbytek paliva hoří za stálého tlaku (2-3). Z p-v diagramu vyplývá, že k expanzi dochází v částech (2-3) a (3-4). Před koncem expanze se otevírá výfukový ventil a spaliny jsou odváděny za stálého tlaku (4-5), (Groda, 2008).

## 4 Výkon spalovacích motorů

Výkon spalovacího motoru je jednou z nejdůležitějších veličin sloužících ke komplexnímu posouzení práce, kvalitativní úrovně motoru a jeho využití. U spalovacích motorů je výkon definován jako mechanická práce za jednotku času. Protože výkon motoru není možné určit přímým měřením, určujeme jeho výkon z točivého momentu vyvozeného motorem na klikovém hřídeli (popř. na kolech vozidla) a úhlové rychlosti otáčení klikové hřídele (popř. kol vozidla) nebo pomocí středního tlaku ve válci. Na velikost výkonu motoru má vliv celá řada faktorů. Mezi hlavní faktory můžeme zařadit druh spalovaného paliva, konstrukci motoru a také aktuální vlastnosti vzduchu (jeho teplota, tlak a relativní vlhkost). Vzhledem k široké škále parametrů motorů uvažujeme několik druhů výkonu (Hlavňa, 2000).

### 4.1 Točivý moment

Točivý moment je definován jako moment vyvozený motorem na klikovém hřídeli. Je to jedna z hlavních veličin charakterizující spalovací motor. Točivý (krouťící) moment ( $M_t$ ) vyplývá ze silového působení v klikovém mechanismu.



Obr. 3 Silové působení v klikovém ústrojí (Hlavňa, 2000)

Ve směru osy válce působí výsledná síla  $F_v$ . Tato síla je dána vektorovým součtem síly od tlaku plynů  $F_{pl}$  a setrvačné síly posuvných hmot  $F_{zp}$ .

$$\bar{F}_v = \bar{F}_{pl} + \bar{F}_{zp} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

Síla od tlaku plynů je dána vztahem:

$$\bar{F}_{pl} = S \cdot p_{(\alpha)} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

- $S$  – průmět osy pístu do plochy kolmé na osu pístu [ $\text{m}^2$ ]
- $p_{(\alpha)}$  – tlak ve válci (tlak se mění v závislosti na úhlu natočení kliky ( $\alpha$ )). [ $\text{Pa}$ ]

Síla setrvačných sil je dána vztahem:

$$\bar{F}_{zp} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (\cos \alpha + \cos 2\alpha) \quad [\text{N}] \quad (3)$$

- $m_p$  – hmotnost posuvných částí ( $m_{\text{ojnice}} + m_{\text{pístu}} + m_{\text{čepu}} + m_{\text{pístních kroužků}}$ ) [ $\text{Kg}$ ]
- $r$  – délka ramene kliky [ $\text{m}$ ]
- $\omega$  – úhlová rychlost [ $\text{s}^{-1}$ ]

Vztah pro výpočet klikového poměru:

$$\lambda = \frac{r}{l} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

kde  $l$  [ $\text{m}$ ] je délka kliky,  $r$  [ $\text{m}$ ] je délka ramene

Síla  $F_{oj}$  působící v ose ojnice je dána vztahem:

$$F_{oj} = \frac{F_v}{\cos \beta} \quad [\text{N}] \quad (5)$$

Tato síla se na klice rozloží na složky radiální  $F_R$  a tangenciální  $F_T$  síly:

$$F_R = F_{oj} \cdot (\cos \alpha + \beta) \quad [\text{N}] \quad (6)$$

$$F_T = F_{oj} \cdot (\sin \alpha + \beta) \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Tangenciální složka  $F_T$  [N] na rameni kliky  $r$  [m] vytváří točivý moment:

$$M_T = F_T \cdot r \quad [\text{Nm}] \quad (8)$$

(Hlavňa, 2000)

## 4.2 Druhy výkonu

### 4.2.1 Indikovaný výkon

Indikovaný výkon získáme provedením jednoho pracovního oběhu uvnitř válce motoru bez uvažování ztrát. Výkon určujeme z indikátorového diagramu resp. z plochy určující práci motoru v tomto diagramu. Indikovanou práci za jeden oběh ( $W_i$ ) dělíme dobou trvání tohoto oběhu ( $\tau$ ).

Indikovaný výkon je tedy dán vztahem:

$$P_i = \frac{W_i}{\tau} \quad [\text{W}] \quad (9)$$

Dobu trvání jednoho oběhu můžeme určit jako:

$$\tau = \frac{1}{2n} \cdot z \quad [\text{s}] \quad (10)$$

- $n$  – otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ],
- $z$  – počet zdvihů za jeden pracovní oběh.



Pokud z indikátorového diagramu určíme střední indikovaný tlak ( $p_{is}$ ), vykonanou práci můžeme vyjádřit jako:

$$W_i = p_{is} \cdot V_z \quad [J] \quad (11)$$

- $V_z$  – zdvihový objem válce [ $\text{dm}^3$ ]
- $p_{is}$  – střední indikovaný tlak. [MPa]

Středním indikovaným tlakem se rozumí poměr indikované práce vykonané pracovním oběhem a zdvihového objemu válce. Pro indikovaný výkon jednoválcového motoru platí vztah:

$$P_i = \frac{p_{is} \cdot V_z \cdot 2n}{z} \quad [\text{Pa}] \quad (12)$$

- $p_{is}$  - střední indikovaný tlak [Mpa]
- $V_z$  - zdvihový objem válce [ $\text{cm}^3$ ]
- $n$  – otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]
- $z$  – počet zdvihů za jeden pracovní oběh [-]

(Hlavňa, 2000)

#### 4.2.2 Efektivní výkon

Efektivní (užitečný) výkon motoru je výkon zjištěný na klikovém hřídeli popř. na spojkové přírubě a to ve chvíli, kdy jsou k motoru připojena všechna zařízení bezvýhradně potřebná k jeho správnému, plynulému a trvalému chodu. Jinak řečeno, efektivní výkon představuje velikost výkonu motoru využitelného pro pohon spotřebičů. Oproti indikovanému výkonu je velikost efektivního výkonu menší o ztráty způsobené třením pohybujících se součástí motoru, o ztráty spojené s výfukem a nasátím nové pracovní náplně a o ztráty způsobené pohonem pomocných

zařízení. Pokud celkový ztrátový výkon označíme ( $P_s$ ), efektivní výkon na klikovém hřídeli je roven indikovanému výkonu ( $P_i$ ) zmenšenému o ztrátový výkon (Hlavňa, 2000).

$$P_e = P_i - P_s, P_e = P_i \cdot \left( \frac{P_i - P_s}{P_i} \right) \quad [\text{W}] \quad (13)$$

Člen v závorce nazýváme jako mechanickou účinnost motoru ( $\eta_m$ ). Z účinnosti motoru dále můžeme vyjádřit střední efektivní tlak ( $p_e$ ).

$$p_e = p_{is} \cdot \eta_m \quad [\text{Pa}] \quad (14)$$

- $p_{is}$  – střední indikovaný tlak [MPa]
- $\eta_m$  – mechanická účinnost [-]

### 4.2.3 Ztrátový výkon

Ztrátový výkon je rozdílem mezi indikovaným a efektivním výkonem motoru. Tento výkon v sobě zahrnuje odpory při pohybu součástí motoru a příkony pomocných zařízení motoru potřebných pro jeho činnost, například:

- palivová soustava
- mazací soustava
- rozvodový mechanismus
- chladicí soustava
- přeplňování motoru

Tyto ztráty lze vyjádřit mechanickou účinností ( $\eta_m$ ). Ztrátový výkon je závislý na mnoha faktorech, jako jsou mechanický a tepelný stav motoru, teplota a druh oleje, otáčky motoru atd. V důsledku toho je výpočet ztrátového výkonu složitý. Pro zjednodušení výpočtu je definován střední ztrátový tlak ( $p_{ss}$ ), který představuje střední hodnotu tlaku působící na píst proti jeho pohybu. Při tomto pohybu by se za jeden zdvih spotřebovala práce stejné velikosti, jako je ztrátová práce jednoho oběhu (Hlavňa, 2000)

Vzorec pro výpočet středního ztrátového tlaku:

$$p_{ss} = \frac{W_s}{V_z} \quad [\text{MPa}] \quad (15)$$

- $W_s$  – ztrátová práce vykonaná za jeden oběh [J]
- $V_z$  – zdvihový objem [ $\text{cm}^3$ ]

Pro ztrátový výkon můžeme analogicky použít vzorec (12) s dosazením středního ztrátového tlaku.

$$P_s = \frac{p_{ss} \cdot V_z \cdot 2n}{z} \quad [\text{W}] \quad (16)$$

- $p_{ss}$  – střední ztrátový tlak [MPa]
- $V_z$  – zdvihový objem motoru [ $\text{cm}^3$ ]
- $n$  – otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]
- $z$  – počet zdvihů za jeden pracovní oběh [-]

#### 4.2.4 Jmenovitý výkon

Jmenovitý výkon je největší užitečný výkon, který může spalovací motor produkovat. Hodnotu jmenovitého výkonu zaručuje výrobce a najdeme ji na štítku motoru. Motor je schopen tento výkon produkovat trvale, nebo přerušovaně a to podle jeho účelu použití a způsobu zátěže, tak jak stanoví výrobce a to v následujících podmínkách:

- při jmenovitých otáčkách motoru
- při jmenovitém stavu vzduchu při podtlaku v sání nepřekračujícím mezní hodnotu
- při přetlaku ve výfuku za výfukovými svody nebo u motorů přeplňovaných turbodmychadlem za turbínou nepřekračujícím udanou mezní hodnotu

Podíl jmenovitého výkonu a zdvihového objemu motoru označujeme jako objemový (litrový) výkon, který udává výkon motoru na jeden litr zdvihového objemu (Hlavňa, 2000).

#### 4.2.5 Maximální výkon

Maximální výkon je největší užitečný výkon jaký je motor schopný produkovat bez tepelného a mechanického namáhání a to po dobu nejméně 15 minut. Podmínkou je, aby byl motor zatížen v režimu jmenovitého výkonu před i po dosažení maximálního výkonu (Hlavňa, 2000).

#### 4.2.6 Redukovaný výkon

Redukovaný výkon je výkon naměřený při daných podmínkách a poté upravený přepočtem na jmenovité podmínky, které jsou stanoveny normou. Norma stanovuje následující referenční hodnoty:

Tab. 1 Referenční hodnoty

Barometrický tlak [kPa]	$p_r$	100
Teplota vzduchu [K]	$T_r$	298
Relativní vlhkost vzduchu [%]	$u_r$	60
Teplota chladicí kapaliny na vstupu do mezichladiče [K]	$T_{vr}$	298

Zdroj: Dopravný prostředek – jeho motor (Hlavňa, 2000)

Při měření výkonu za atmosférických podmínek, které jsou dané tlakem ( $p_{atm}$ ) a teplotou ( $T_{atm}$ ) bude redukovaný výkon:

$$P_{er} = P_e \cdot \alpha, \quad [W] \quad (17)$$

kde  $\alpha$  je tzv. korekční koeficient. Hodnotu tohoto koeficientu je možné stanovit jako:

$$\alpha = \frac{100}{p_{atm}} \cdot \sqrt{\frac{T_{atm}}{298}} \quad [-] \quad (18)$$

(Hlavňa, 2000)

## 5 Charakteristiky spalovacích motorů

Charakteristiky spalovacích motorů slouží k porovnávání vybraných parametrů různých motorů. V těchto charakteristikách jsou ve formě grafických závislostí znázorněny základní veličiny jako výkon ( $P_e$ ), točivý moment ( $M_t$ ), otáčky ( $n$ ), střední efektivní tlak ( $p_e$ ), měrná spotřeba paliva ( $m_{pe}$ ), dále potom účinnosti, vybrané teploty a tlaky atd. Charakteristiky nejčastěji rozdělujeme podle zvolené nezávisle proměnné veličiny (Hlavňa, 2005).

### 5.1 Otáčková charakteristika

Otáčková charakteristika znázorňuje závislost výkonu a točivého momentu motoru na jeho otáčkách a to při stálém nastavení ovládacího zařízení (při stálé poloze pedálu akcelérátoru), které reguluje výkon motoru. Jedná se o nejpoužívanější charakteristiku vyskytující se v protokolech z měření, jako součást technické dokumentace vozidel a pracovních strojů, v prospektových materiálech výrobců atd. (Hlavňa, 2005).

#### 5.1.1 Vnější otáčková charakteristika

Tato charakteristika je typická tím, že pedál akcelérátoru, který reguluje výkon motoru je nastaven na maximální možnou hodnotu a to v celém spektru otáček. Dále se tato charakteristika dělí podle množství a způsobu řízení dodávky paliva:

##### ***Absolutní***

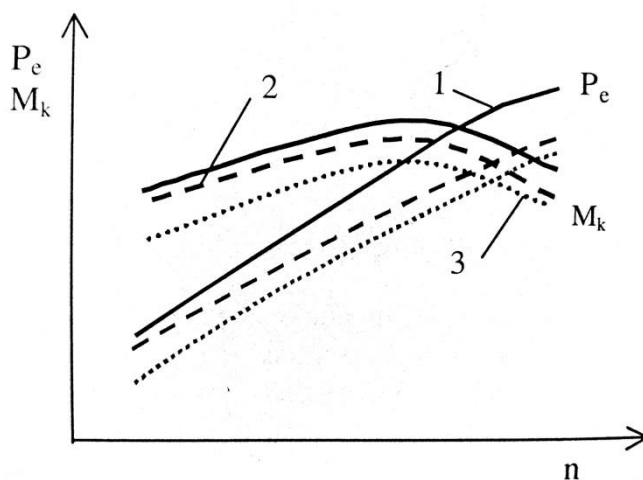
Absolutní charakteristika se získává při nastavení motoru na hranici dosažitelného výkonu bez jakéhokoliv omezení. Tvorba této charakteristiky je náročná, protože každý její bod se získává při rozdílném nastavení motoru.

##### ***Na hranici kouřivosti***

Tato charakteristika se používá při navrhování vstřikovacích systémů. V každém měřeném bodě charakteristiky je nastavená limitní dávka paliva, která je na hranici povolené kouřivosti.

### Provozní

Při sestavování provozní charakteristiky je motor nastaven na konkrétní provozní podmínky jako například spotřeba, životnost, emisní hodnoty apod. Zařízení regulace výkonu motoru je nastaveno na konstantní hodnotu. Průběh provozní charakteristiky je ve srovnání s absolutní charakteristikou posunut k nižším hodnotám a to výrazně pro vznětové motory, méně pro motory zážehové. (Hlavňa, 2005)



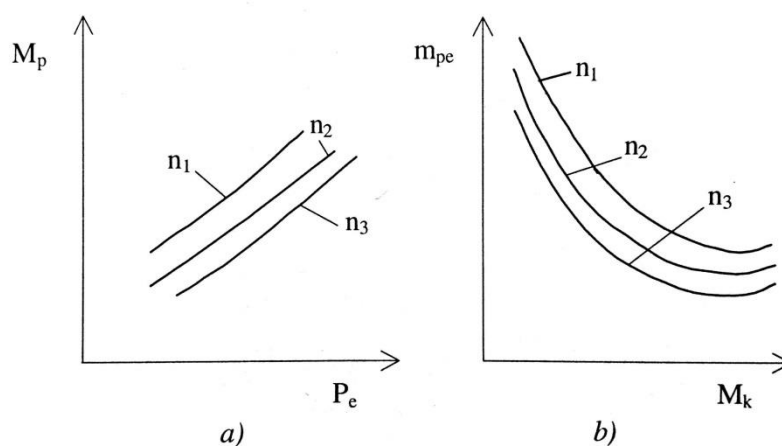
Obr. 4 Otáčkové charakteristiky spalovacího motoru (Hlavňa, 2005)  
(1- absolutní, 2- na hranici kouřivosti, 3- provozní)

#### 5.1.2 Částečná otáčková charakteristika

Částečné charakteristiky se průběhem podobají charakteristikám provozním, avšak odlišují se svou velikostí a to podle nastavení polohy akceleračního výkonu. Částečná charakteristika tedy platí i pro konstantní nastavení polohy akceleračního výkonu v celém spektru otáček motoru, avšak toto nastavení je menší než maximální hodnota (Hlavňa, 2000).

## 5.2 Zatěžovací charakteristika

U zatěžovacích charakteristik jsou jako konstantní parametr zvoleny otáčky motoru. Přitom se změnou polohy pedálu akcelérátoru regulujícího výkon motoru mění zátěžový moment z minimální na maximální hodnotu. Tyto charakteristiky se užívají pro zaznamenávání a vyhodnocení spotřeby, a nebo jako podklad pro konstrukci charakteristik úplných a to při vyhodnocování ztrátového momentu nebo chodu naprázdno. Zvláště výhodné jsou pro posuzování stacionárních motorů. Na obr. 5 jsou znázorněny závislosti hodinové spotřeby na výkonu (a), závislost měrné spotřeby paliva na točivém momentu (b), (Hlavňa, 2000).



Obr. 5 Zatěžovací charakteristiky spalovacího motoru (Hlavňa, 2005)

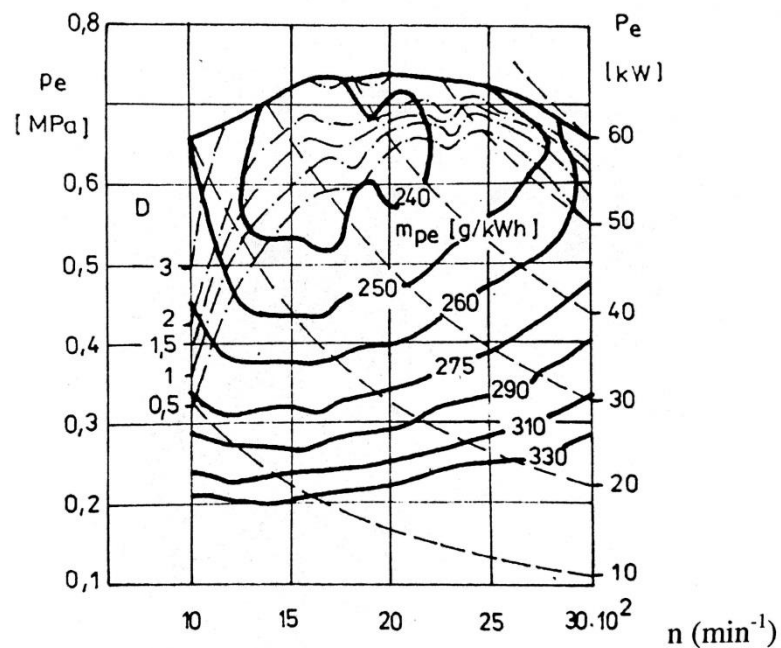
## 5.3 Regulační charakteristika

Regulační charakteristiky se nejčastěji využívají v oblastech výzkumu a vývoje, při navrhování řídicích systémů nebo seřizování konstrukčních prvků, které mají vliv na výstupní hodnoty spalovacího motoru. Znázorňují závislost provozních veličin na veličinách, které charakterizují seřízení motoru jako například složení směsi, součinitel přebytku vzduchu, časování rozvodu apod. Při měření se mění sledovaná veličina, ostatní vstupní parametry jako například otáčky, poloha pedálu akcelometru, teploty atd. se udržují konstantní (Hlavňa, 2000).

## 5.4 Úplná charakteristika

Úplná charakteristika spalovacího motoru se nedá získat přímo měřením nebo výpočtem. Vzniká přenosem bodů vybrané veličiny z otáčkové nebo zatěžovací charakteristiky do souřadnicového systému  $M_t - n$ . Tato charakteristika slouží ke komplexnímu posuzování motoru z hlediska výkonu, točivého momentu, středního efektivního tlaku, spotřeby a dalších vedlejších veličin. Sledované veličiny jsou v charakteristice zobrazeny současně pomocí průsečnickových diagramů.

(Hlavňa, 2000)



Obr. 6 Úplná charakteristika spalovacího motoru (Hlavňa, 2005)



## 6 Normativní požadavky na měření výkonu

Měření výkonu spalovacích motorů musí podléhat určitým standardům, které jsou dány příslušnými normami. Existuje mnoho národních i mezinárodních norem popisujících metodiku měření výkonu. V ČR jsou nejužívanějšími: ISO DIN 1585, ČSN 30 2008 a EHK R85. V této kapitole budou popsány technické požadavky vycházející z nejčastěji používané mezinárodní normy ISO DIN 1585. Tato norma se týká motorů s vnitřním spalováním, které jsou užívány v osobních automobilech a jiných motorových prostředcích, ne však v motocyklech, mopedech, zemědělských strojích a traktorech.

Z normy plynou požadavky na přesnost měřících zařízení, která zahrnují tyto veličiny:

- **Točivý moment** – systém měření točivého momentu dynamometru musí mít v potřebném rozsahu přesnost  $\pm 1\%$ .
- **Otáčky motoru** – systém měření otáček motoru musí mít přesnost  $\pm 0,5\%$ .
- **Průtok paliva** – měřící systém pro průtok paliva musí mít přesnost  $\pm 1\%$ .
- **Teplota paliva a vzduchu** – systém měření teploty paliva a nasávaného vzduchu musí mít přesnost  $\pm 2\text{ K}$ .
- **Tlak okolního prostředí** – systém měření tlaku okolního prostředí musí mít přesnost  $\pm 100\text{ Pa}$ .
- **Tlak výfukových plynů** – systém měření tlaku výfukových plynů musí mít přesnost  $\pm 200\text{ Pa}$ .
- **Snížení tlaku v sacím potrubí** – systém pro měření snížení tlaku v sacím potrubí musí mít přesnost  $\pm 50\text{ Pa}$ .
- **Absolutní tlak v sacím potrubí** – systém pro měření absolutního tlaku v sacím potrubí musí pracovat s přesností  $\pm 2\%$ .

Zkouška čistého výkonu musí podle ISO 1585 sestávat u zážehových motorů ze zkušebního chodu při plném plynu a u motorů vznětových ze zkušebního chodu při maximálním zatížení vstřikovacího čerpadla.

Motory musí být před zkouškou zaběhnuty a zahřáty v souladu s doporučením výrobního podniku. Zkoušky musí být prováděny s olejem a palivem předepsaným výrobcem.

Výkon musí být měřen při stabilních provozních podmínkách se změřeným přívodem čerstvého vzduchu k motoru. Teplota přiváděného vzduchu stejně tak jako všechny zkušební podmínky by se měla pohybovat v co nejmenším rozsahu vzhledem k referenčním podmínkám, aby se korekční faktor udržel co nejbližší standartním podmínkám. Překračuje-li korekční faktor limit (pro vznětové motory 0,9 – 1,1 a pro zážehové motory 0,93 – 1,07) musí být údaje o okolních podmínkách uvedeny v protokolu z měření.

Pokles tlaku v sání musí být měřen po proudu sacího vedení popř. vzduchové mřížky, tlumiče hluku sání nebo podobných stejně hodnotných zařízení. Absolutní přetlak na vstupu do motoru je měřen ve sběrné trubce sání po proudu od kompresoru nebo mezichladiče stlačeného vzduchu (pokud je jimi motor vybaven) v místech, kde měření tlaku mělo za následek úpravu korekčního faktoru. Protitlak ve výfukovém systému musí být měřen ve vzdálenosti nejméně trojnásobku průměru trubky od příruby výfuku po proudu od turbokompresoru. Měřená data se smí snímat teprve tehdy, když jsou hodnoty otáček motoru, točivého momentu a teplot konstantní nejméně po dobu 60 sekund.

Teplota chladící kapaliny na výstupu z motoru se musí pohybovat v rozmezí  $\pm 5$  K od teploty udávané výrobcem. Pokud tuto hodnotu výrobce neudává musí být teplota chladící kapaliny  $363 \pm 5$  K. Teplota paliva u zážehových motorů musí být měřena co nejbližší ke vstupu ventilu vstřikování a musí se pohybovat v rozmezí  $\pm 5$  K od teploty udávané výrobcem. Pokud výrobce tuto hodnotu neudává, musí být teplota paliva  $298 \pm 5$  K.

Teplota paliva u vznětových motorů musí být měřena u vstupu vstřikovacího čerpadla a musí se pohybovat v rozmezí  $\pm 3$  K od hodnoty udávané výrobcem. V případě, že výrobce tuto hodnotu neudává musí být teplota paliva  $313 \pm 3$  K. Minimální přípustná teplota paliva na vstupu do palivového čerpadla je 303 K.

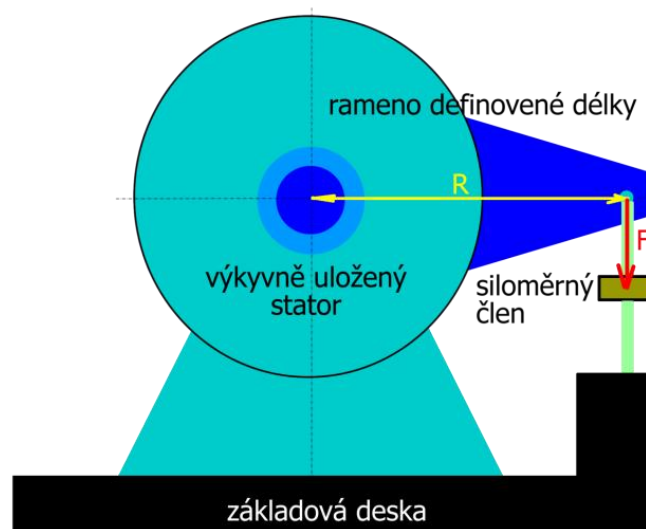
Teplota mazacího oleje musí být měřena na vstupu do hlavního olejového kanálu. Teplota se musí pohybovat v rozmezí udávaném výrobcem. Pokud je to nutné, je možné pro udržení teploty oleje v rozmezí využít přídatné regulační zařízení.

Pomocná zařízení motoru potřebná pro provoz v plánovaném použití musí být nainstalována v co možné stejné poloze jako při plánovaném užití. Pro zkoušku je třeba odstranit určené příslušenství potřebné pouze pro provoz vozidla, které může být na motoru nainstalováno. Mezi takové příslušenství patří např. klimatizační zařízení, kompresor pro brzdy, čerpadlo pro posilovač řízení apod.

Pokud je takové příslušenství neodstranitelné, může být výkon odebíraný tímto nezatíženým příslušenstvím přičten k výkonu motoru (ISO 1585, 2006).

## 7 Dynamometry

Dynamometry jsou zařízení určená k měření točivého momentu popř. výkonu spalovacího motoru. V praxi se pro tyto stroje používá termín brzda. Tato motorová brzda funguje tak, že vytváří točivý moment o stejné síle, jakou generuje zkoušený motor, moment má pouze opačný smysl. Pro měření točivého momentu se u dynamometrů používá deformační člen (tenzometr). Moment síly působí na tenzometr, který je umístěný na rameni výkyvného statoru dynamometru a měří tuto sílu (viz. obr. 7). Protože rameno statoru má definovanou délku a známe sílu, kterou rameno působí na tenzometr. Jsme schopni spočítat točivý moment, který dynamometr vytváří při brždění motoru (Vlk, 2005).



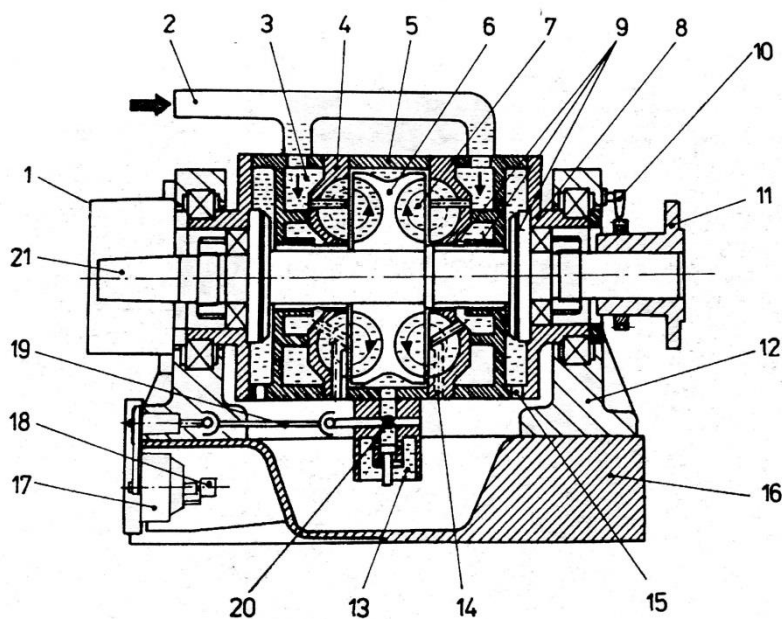
Obr. 7 Princip měření točivého momentu (Čupera, ©2016)

Smysl silového působení momentu dělí dynamometry na dva základní typy. Pasivní dynamometry, které jsou schopny motor jen brzdít a aktivní dynamometry, které je možno využít ve funkci motorů a pomocí nich roztáčet válec na kterém stojí kola vozidla (Čupera ©2016).

## 7.1 Pasivní dynamometry

### 7.1.1 Hydraulické dynamometry

V hydraulických dynamometrech se pohybová energie dodávaná spalovacím motorem mění v teplo vnitřním třením částic kapaliny. Kapalina zde funguje jako pracovní médium a zároveň jako chladící prostředek. Voda přiváděná do dynamometru (2) se rovnoměrně rozděluje do kruhových komor (3), odkud dále protéká přes statorové lopatky do vířivých komor (7). Otáčející se rotor (6) víří vodu v komorách a tím přeměňuje výkon zkoušeného motoru v tepelnou energii. Ohřátá voda vytéká přes kruhové mezery mezi stator (4) a dvojitým rotorem (7). Voda zároveň přenáší moment z dvojitého rotoru na stator, které jsou pevně umístěny ve výkyvném tělese brzdy. Těleso brzdy se ramenem opírá o siloměrné zařízení např. tenzometr, mechanické váhy, pneumatický siloměr (Vlk, 2005).



Obr. 8 Schéma hydraulické brzdy s el. ovládním (Vlk, 2005)

#### ***Hydraulické dynamometry s konstantním plněním***

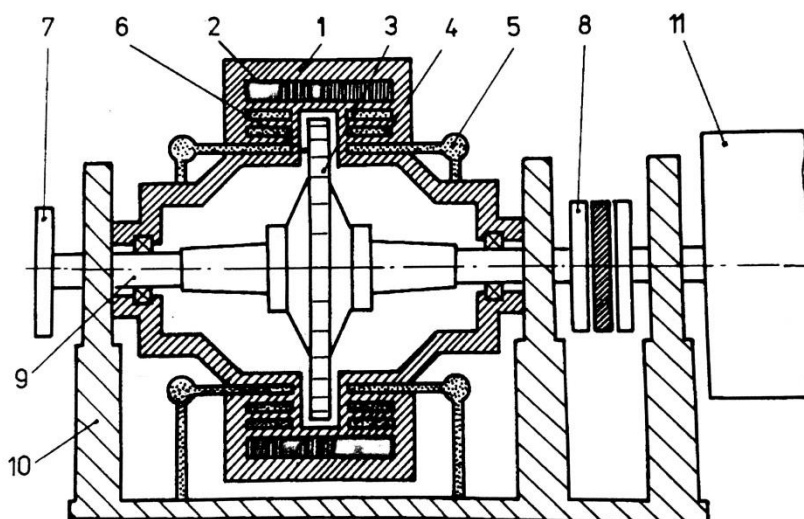
U dynamometrů s konstantním plněním je při konstantních otáčkách obsah kapaliny pro různé momenty stejný. Točivý moment, který brzda odebírá je závislý na zasouvání tenkých plátu do komory statoru. Tím se zvyšuje odpor proudění kapaliny a snižuje rychlost proudění, která se čtvercem rychlostí mění hydraulický odpor.

### **Hydraulické dynamometry s variabilním plněním**

U dynamometrů s variabilním plněním je změna odporu závislá na přiváděném množství kapaliny do vířivých komor. Množství vody vtékající do komor je závislé na poloze servoventilu (13) umístěného na tělese brzdy. Servoventil je ovládán pomocí motorku. Rychlost změny odporu a tedy i momentu je vyšší než u dynamometrů s konstantním plněním, protože změnu množství kapaliny je možné uskutečnit rychleji než zasouvání lopatek statoru.

#### **7.1.2 Elektromagnetické vířivé dynamometry**

Elektromagnetické vířivé dynamometry jsou nejrozšířenějším typem brzd. Tyto brzdy jsou založeny na působení vířivých proudů. Velikost brzdného účinku se reguluje velikostí budícího proudu přiváděného do budícího vinutí. Těleso brzdy (1) je výkyvně uložené a obsahuje ozubený pólkový kotouč (3). Dále se v tělese nachází budící vinutí (2) a chladicí komory (4). Budícím vinutím protéká stejnosměrný proud a tím vzniká magnetické pole. Toto pole pulsuje s frekvencí otáčejících se zubů pólového kotouče a tím vznikají ve stěnách chladicích komor vířivé proudy, které brzdí ozubený kotouč (rotor). Vzniklá energie se odvádí ve formě tepla do chladicích komor. Konstrukce brzdy je symetrická, může se tedy otáčet oběma směry ale naproti elektrickým stejnosměrným a asynchronním dynamometrům nemůže zkoušený motor pohánět (Vlk, 2005).



Obr. 9 Elektromagnetická vířivá brzda (Vlk, 2005)

## **7.2 Aktivní dynamometry**

### **7.2.1 Elektrické dynamometry**

Elektrické brzdy v podstatě pracují jako elektromotory nebo elektrické generátory s výkyvně uloženým státorem. Hlavní výhodou elektrických dynamometrů je možnost nejen brzdít ale i pohánět zkoušený stroj. Z tohoto důvodu jsou vhodné pro válcové zkušebny např. k brzdovým zkouškám nebo ke stanovení pasivních ztrát (Vlk, 2005).

#### ***Stejnoseměrné dynamometry***

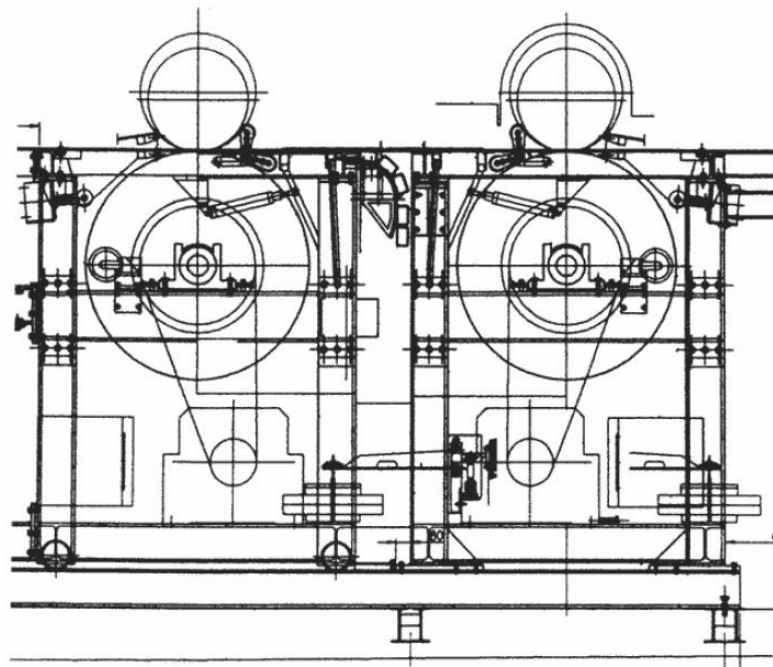
Tyto dynamometry sil lze představit jako elektrické generátory. Velikost brzděného momentu se reguluje za pomoci změny napětí kotvy nebo změnou budicího proudu a to podle toho v jakém úseku otáčkového rozsahu dynamometr pracuje. Z klidového stavu až do poloviny jmenovitých otáček se brzděný moment řídí změnou napětí kotvy. Brzda odevzdává jmenovitý moment, výkon roste úměrně s otáčkami. V oblasti od poloviny jmenovitých otáček výše je počet otáček řízen změnou budicího proudu, při zmenšení intenzity proudu rostou otáčky. Stejnoseměrné dynamometry mohou tedy pracovat v obou regulacích (při konstantních otáčkách i při konstantním točivém momentu). Mezi další výhody patří možnost rekuperace energie zpět do sítě (Vlk, 2005), (Čupera©2016).

#### ***Střídavé dynamometry***

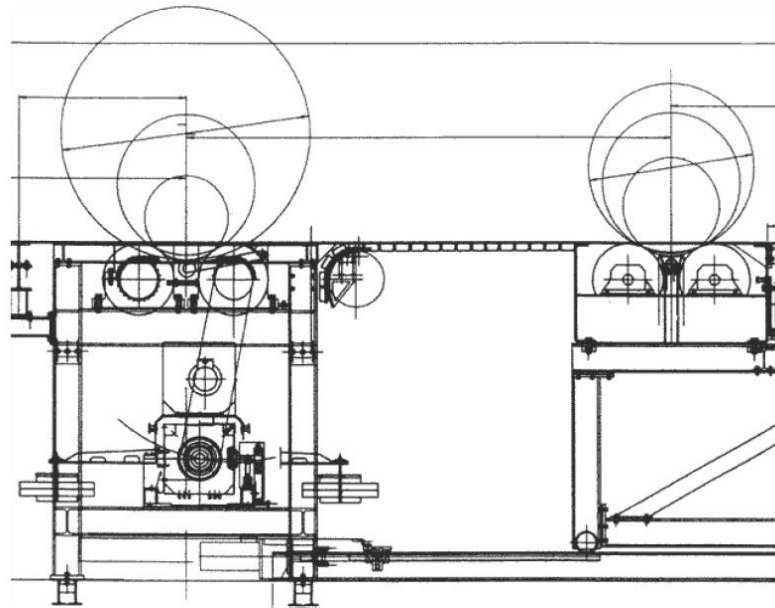
Střídavé dynamometry jsou v podstatě třífázové střídavé asynchronní motory. Střídavý proud prochází vinutím statoru a tím vytváří magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje napětí v rotoru a vzniklý proud vyvolává magnetický tok, který vyvolává silové působení na rotor a tím jeho otáčení. U asynchronních dynamometrů se regulace otáček provádí změnou frekvence proudu a regulace točivého momentu je řízena změnou napětí (Wikipedia,©2016).

## 8 Válcové zkušebny

Válcové zkušebny slouží k rychlému měření hnacího výkonu vozidla a to bez potřeby demontovat motor z vozidla. Testované vozidlo je usazeno na zkušebních válcích a zajištěno proti pohybu pomocí popruhů nebo ocelových lan ukotvených k podlaze zkušebny. Podle druhu zkušebny spočívají na válcích buď to jen kola hnací nápravy, nebo všechna kola vozidla. Podle uspořádání válců se kolo otáčí na jednom válci (monoválcové uspořádání), nebo na dvou válcích (duoválcové uspořádání). Válce mají protismykovou úpravu povrchu a definovaný moment setrvačnosti. K válci je připojen dynamometr s regulovatelným brzdícím momentem. V případě duo válcového uspořádání jen k jednomu z válců. Rotor dynamometru je spojen s válcem a stator brzdy je uložen výkyvně. Na obvodě hnacích kol vozidla vzniká hnací síla, která se třením přenáší na válce a roztáčí je. Připojením brzdy vznikne brzdící moment, který současně vyvolá reakční moment stejné velikosti s opačným smyslem. Tento reakční moment působí na výkyvně uložený stator brzdy. Měřením tohoto reakčního momentu je možno změřit i hnací sílu na obvodu kol (Vlk, 2005).



Obr. 10 Monoválcové uspořádání (Čupera, ©2016)



Obr. 11 Duoválcové uspořádání (Čupera, ©2016)

U zkušeben, které slouží pro zkoušky akcelerace a pro měření výfukových plynů mohou být ke zkušebním válcům připojeny setrvačnický nahrazující setrvačné účinky vozidla. Proto je nutné rozlišovat válcový dynamometr a válcový setrvačnický stav, který slouží pouze k měření dynamického výkonu a není vybaven dynamometrem, který by mohl zatěžovat motor při konstantních rychlostech.

### ***Měření stacionárního výkonu***

Měření je prováděno při konstantních otáčkách motoru, který je zatížen brzdou. Výkon motoru se zjišťuje z otáček dynamometru a k nim odpovídající hodnotě točivého momentu.

### ***Měření dynamického výkonu***

Při měření dynamického výkonu hrají zásadní roli momenty setrvačnosti všech roztáčejících se částí. Motor je zatížen odporem setrvačnicků během jejich roztáčení. Výkon je vypočten z úhlové rychlosti a točivého momentu, který je v tomto případě vypočten z momentu setrvačnosti připojených setrvačnicků a jejich úhlového zrychlení.



***Měření ztrátového výkonu***

Protože při měření výkonu motoru jsou většinou snímány otáčky zkušebních válců, je výkon, který naměříme v podstatě výkonem zkušebního zařízení. Pro zjištění výkonu vozidla musíme určit ztrátový výkon. Ten závisí na vzdušném a valivém odporu. Ztrátový výkon se zjišťuje dojezdovou zkouškou.

Technická řešení válcových zkušeben jsou rozmanitá a závisí na konkrétním účelu zkušebny. Kromě měření výkonu lze válcové zkušebny použít také pro účely:

- simulace jízdy a vyhledávání závad na vozidle
- zjištění tažné síly
- zjištění akcelerace
- měření emisí
- měření spotřeby paliva
- zkoušky ve větrném tunelu.

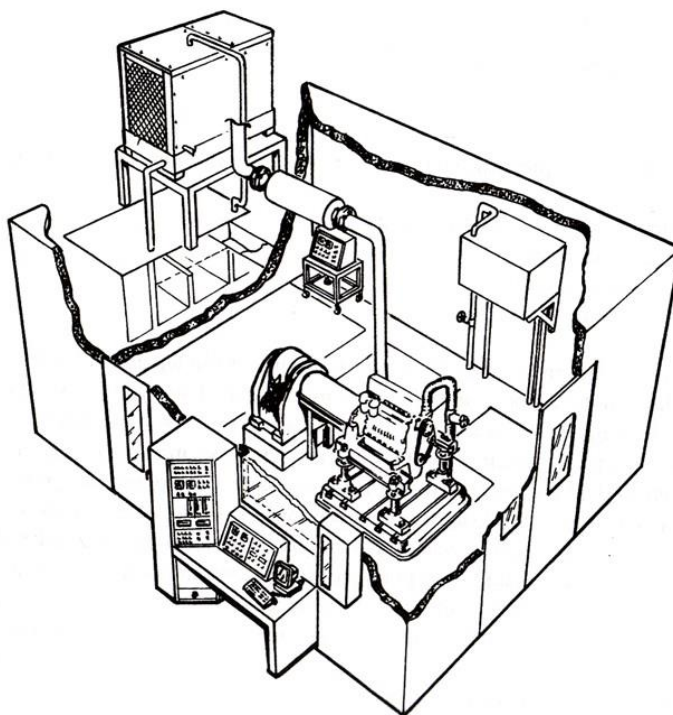
(Vlk, 2005)

## 9 Motorové zkušebny

Motorové zkušebny slouží k testování samotných spalovacích motorů. Toto zařízení je tedy ideální k testování spalovacích motorů ve vývojových laboratořích, k testování prototypů motorů apod. V případě testování motoru konkrétního automobilu je nutné motor z automobilu demontovat. Principem zkoušení výkonu je měření točivého momentu dynamometru, který má stejnou velikost jako točivý moment motoru ale obrácený smysl. Z velikosti točivého momentu a otáček motoru se vypočítá efektivní výkon motoru. Efektivní výkon se dále upravuje pomocí korekčního koeficientu (Vlk, 2005).

Prostor motorové zkušebny se skládá z několika prostorových celků:

- prostor zkoušení motorů (někdy označován také jako „kobka“)
- operátorská místnost
- prostory podpůrných systémů (ventilace, spalínové hospodářství)
- prostor sloužící k přípravě motorů před zkoušením
- prostor ke skladování paliv.



Obr. 12 Design zkušební místnosti (Martyr, 2007)

Prostory motorové zkušebny musí splňovat normativní požadavky v dané zemi, avšak některá řešení jsou shodná ve většině laboratoří. Motor musí být upevněn na testovací desce opatřené drážkami. Drážky jsou tu z důvodu změny polohy držáku nesoucích motor. Deska je pružně připevněna k seismickému bloku, který musí být schopen pohlcovat vibrace motoru. Ostatní části podlahy tvoří většinou kanály pro vedení kabelů a potrubí kromě přívodu paliva, které nesmí být vedeno pod podlahou. Kanály jsou překryty ocelovými pláty. Povrchová úprava podlahy a stěn musí mít chemickou odolnost vůči palivům a mazivům. Stěny a strop testovací místnosti musí odolat mechanickému poškození v případě destrukce části motoru. Stejně tak musí mít stěny, strop, dveře pro vstup a průhledy do testovací místnosti velkou míru zvukové neprostupnosti.

Protipožární opatření testovací místnosti se skládá ze dvou nezávislých systémů. Jedním ze systémů je zařízení detekce hořlavých a výbušných plynů v místnosti a úniku paliva. Dále je to samotný systém hašení požáru. Signalizace těchto systémů musí být nezávislá a energeticky zálohovaná. Tyto systémy neslouží pouze k signalizaci nebezpečí a samotnému hašení případného požáru ale mohou autonomně zasahovat do ventilace zkušebny, uzavírat přípustě paliv, ukončovat testování apod. Systém hašení podléhá národním schvalovacím procedurám. Dále musí motorová zkušebna jako zařízení pracující ve výbušném prostředí, splňovat normu 94/9/ES známou pod označením ATEX (Atmospheric explosion). V motorových zkušebnách je možné použít následující způsoby hašení:

- vodní mlha pod vysokým tlakem
- oxid uhličitý
- suchá prášková hasiva
- inertní plyny
- hasící pěny

Další důležitou součástí zkušebny je zařízení vzduchotechniky. Vzduchotechnika ve zkušebně má kromě výměny vzduchu v kobce a udržování tepelné bilance za úkol také přípravu vzduchu pro spalovací motor. Vzduchotechnika musí dopravovat požadované množství vzduchu o zaručených parametrech (tlak, teplota, vlhkost) do sání/plnění motoru (Martyr, 2007).

# 10 Metodika měření a zpracování výsledků

## 10.1 Specifikace a technické parametry vozidla

Pro měření výkonu na válcovém dynamometru bylo použito školní vozidlo Škoda Superb 2.0 TDI CR s pohonem na všechna kola ve variantě sedan/liftback. Pohonnou jednotkou automobilu je vpředu napříč uložený čtyřválcový vznětový motor se systémem přímého vysokotlakého vstřikování paliva Common-Rail. Systém pracuje se vstřikovacím tlakem až 180 MPa a trysky vstřikování jsou ovládané piezoventilem. Motor je přepínán turbodmychadlem s proměnou geometrií rozváděcích lopatek. Podle technické dokumentace agregát disponuje maximálním výkonem 125 kW při 4200 min<sup>-1</sup> a maximálním točivým momentem 350 Nm při 1750 – 2500 min<sup>-1</sup>. Výkon motoru přenáší šestistupňová manuální převodovka na obě nápravy automobilu.



Obr. 13 Škoda Superb na válcovém dynamometru

Tab. 2 Technická data měřeného vozidla

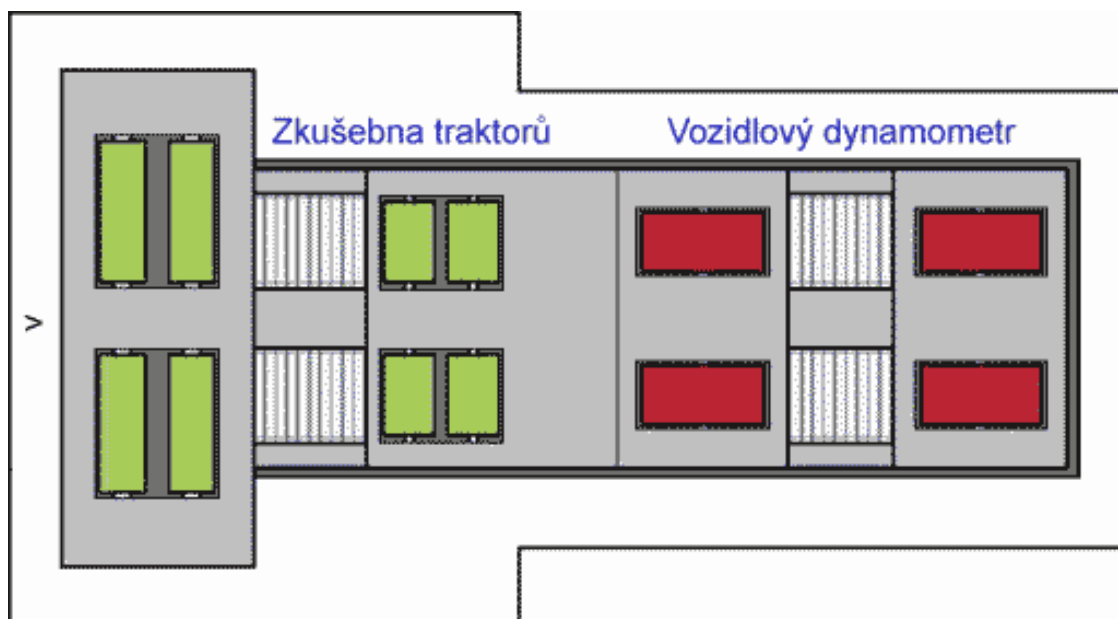
<b>Parametry</b>	<b>Hodnota</b>
Karoserie	sedan/liftback
Počet dveří	5
<b>Motor</b>	
Kód motoru	CBDB
Konstrukce	Řadový čtyřválec
Zdvihový objem	1968 cm <sup>3</sup>
Vrtání/zdvih	81 x 95,5 mm
Kompresní poměr	16,5:1
Max. výkon	125 kW při 4200 min <sup>-1</sup>
Max. točivý moment	350 Nm při 1750 - 2500
Rozvodové ústrojí	DOHC
Počet ventilů na válec	4
Palivo	Motorová nafta dle DIN EN590
<b>Provozní vlastnosti</b>	
Max. rychlost	219 km·h <sup>-1</sup>
Zrychlení 0 – 100 km·h <sup>-1</sup>	9,0 s
<b>Rozměry</b>	
Výška	1462 mm
Délka	4838 mm
Šířka	1817 mm
Rozvor	2761 mm
Rozchod vpředu	1545 mm
Rozchod vzadu	1518 mm
Rozměr pneumatik	205/55 R16

Zdroj: Technická dokumentace vozidla (2009)

## 10.2 Technické parametry vozidlové zkušebny

Měření výkonu proběhlo na vozidlové zkušebně Ústavu techniky a automobilové dopravy Mendelovy univerzity v Brně. Vozidlová zkušebna disponuje válcovým vozidlovým dynamometrem pro zkoušení osobních automobilů 4VDM-E120D, válcovým dynamometrem pro zkoušení traktorů VDU-E270T\_E150T, zařízením pro emisní analýzu včetně  $\text{NO}_x$ , zařízením pro měření spotřeby a osmi senzory tlaku a teploty.

Konstrukce válcového dynamometru vychází z tuhých základních rámců nesoucích ložiska zkušebních válců, rámců nesoucích elektrické stejnosměrné dynamometry a stojin. Blok přední osy vozidlového dynamometru spolu s blokem zadní osy traktorového dynamometru jsou umístěny pevně. Zadní monoválce vozidlového dynamometru a přední válce pro traktory jsou uloženy posuvně v rozmezí požadovaného rozvoru. Levé a pravé válce jsou spojeny pomocí elektricky ovládané frikční spojky, jejich rozpojení umožňuje měření brzdných sil z vysokých rychlostí.



Obr. 14 Schéma kompletní zkušebny (Čupera©2016)

Elektrické dynamometry jsou propojeny s válcovými jednotkami pomocí ozubených řemenů. Válce jsou vybaveny pneumaticky řízenými brzdami, které slouží k najetí vozidla a jako bezpečnostní brzda. Každá válcová jednotka je vybavena nájezdovým a středícím zařízením s pneumatickým ovládním a měřícími rolnami s odsouvatelným krytem. Nájezdová a středící zařízení jsou umístěna na ocelových profilech upevněných do základového rámu. Podpěry pevného a posuvného krytí jsou rovněž uchyceny na základním rámu na dně montážní jámy. Základní rám je zalit betonem.

Plocha okolo vozidlového dynamometru je překrytá ocelovými plechy. Do montážní jámy je zapuštěnými kanály přiváděn chladící vzduch. Jeho přívod je vyústěn pod jednotlivými osami. Před vozidlem je umístěn ventilátor náporového sání, který je možné ovládat klávesnicí z kabiny vozidla. Dalšími důležitými součástmi jsou vzduchotechnika a spalinové hospodářství. Vzduchotechnika je schopná vyměnit až 25 000 m<sup>3</sup>/h vzduchu a regulovat podtlak v místnosti v rozmezí 5 – 300 Pa. U Výfukových plynů je možné odsávané množství regulovat v závislosti na odebraném výkonu motoru popř. ručně a to až do 24 000 m<sup>3</sup>/h.



Obr. 15 Vozidlová zkušebna Mendelu (Čupera, ©2016)

Tab. 3 Základní technické parametry dynamometru 4VDM E120-D

Max. zkušební rychlost [km·h <sup>-1</sup> ]	200
Max výkon na nápravu [kW]	240
Max. hmotnost na nápravu [kg]	2000
Průměr válců [m]	1,2
Šířka válců [mm]	600
Mezera mezi válci [mm]	900
Povrch válců	Zdrsnění RAA 1,6
Setrvačná hmotnost válců (každá náprava) [kg]	1130
Min. rozvor [mm]	2000
Max. rozvor [mm]	3500
Zatížitelnost krytí	
v místě jízdy [kg]	2000
v místě chůze [kg]	500
Tlakový vzduch [bar]	min. 4
Rozsah měření rychlosti [km·h <sup>-1</sup> ]	0 – 200
Rozsah měření sil [kN]	4 x ± 5
Přesnost měření rychlosti [km·h <sup>-1</sup> ]	± 0,01
Přesnost měření sil [%]	± 0,25
Přesnost regulace síly [%]	± 0,1
Přesnost regulace rychlosti [%]	± 0,5

Zdroj: Ústav techniky a automobilové dopravy MZLU (2016)



### 10.3 Dynamická zkouška

Dynamická zkouška na válcovém dynamometru slouží k popsání závislosti výkonu a točivého moment spalovacího motoru v závislosti na jeho otáčkách. Výkon motoru se vypočítá z úhlové rychlosti a točivého momentu. Ten je v tomto případě vypočten z momentu setrvačnosti zkušebních válců (popř. připojených setrvačniců) a úhlového zrychlení válců, které je zaznamenáváno pomocí snímače polohy.

$$M = \omega \cdot I \quad [\text{Nm}] \quad (19)$$

- $I$  – moment setrvačnosti válce [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]
- $\omega$  – úhlové zrychlení [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

Před samotným měřením výkonu bylo nejdříve třeba určit ztrátový výkon a to buď výpočtem anebo měřením. Měření ztrátového výkonu se provádí tzv. dojezdovou zkouškou, kdy se po volném zrychlování vozidla do maximálních otáček ubere plyn a vozidlo se nechá s vyřazeným rychlostním stupněm a sešlápnutým spojkovým pedálem volně decelerovat, přičemž se zaznamenávají pasivní ztráty.

Doběhová zkouška i měření výkonu se provádí na jeden rychlostní stupeň, typicky na jeden ze dvou posledních. Důvodem je možnost prokluzu kol při nižší zařazené rychlosti vlivem přenosu velkého točivého momentu.

Měření dynamickou zkouškou bylo provedeno třikrát. Do protokolu se zaznamenával efektivní výkon ( $P_e$ ), točivý moment ( $M_t$ ), otáčky ( $n$ ), rychlost ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) a teplota vzduchu na vstupu do sání motoru ( $^{\circ}\text{C}$ ). Protože data v protokolu nejsou korigována na barometrické podmínky, použijeme korekční součinitel pro vznětové turbodmychadlem přeplňované motory podle normy ISO 1590.

$$k = \frac{99}{p_d} \cdot \left( \frac{T}{298} \right)^{0,7} \quad [-] \quad (20)$$

### 10.3.1 Data získaná měřením

Tab. 4 Data získaná ze zkušebních protokolů

Dynamická zkouška /1			Dynamická zkouška /2			Dynamická zkouška /3		
n	P	M <sub>t</sub>	n	kW	M <sub>t</sub>	n	kW	M <sub>t</sub>
min <sup>-1</sup>	kW	Nm	min <sup>-1</sup>	kW	Nm	min <sup>-1</sup>	kW	Nm
1681	44,5	253,1	1669	44,3	253,6	1698	45,5	256,1
1928	58,3	288,6	1893	56,1	283,1	1904	56,1	281,3
2148	67,2	298,8	2114	65,8	297,1	2135	66,8	298,6
2392	76	303,5	2351	74,8	303,9	2378	75,8	304,5
2622	84,2	306,8	2584	83,1	307	2597	83,6	307,3
2846	90,1	302,3	2830	89,3	304,2	2837	90,4	304,4
3081	97,7	302,8	3030	96,7	304,8	3049	97,4	305
3305	101,2	292,6	3271	101,6	296,6	3267	101,3	296,2
3505	105,6	287,8	3452	106,1	293,3	3485	106	290,5
3699	108,3	279,6	3655	109,4	285,9	3672	108,8	282,9
3929	109,2	265,4	3857	110,2	272,9	3865	109,3	270
4081	111,9	261,9	4023	112,8	267,8	4037	111,7	264,2
4243	114,2	257,1	4210	114,6	260	4219	114,2	258,6
4401	113,6	246,5	4372	115,2	251,6	4374	114,1	249,1
4549	112,7	236,6	4544	108,7	228,5	4524	112,1	236,6

### 10.3.2 Podmínky měření a korekce dat

#### Měření č. 1

Tab. 5 Podmínky při měření č.1

Parametr	Hodnota
Teplota paliva	23 °C
Teplota nasávaného vzduchu	26 °C
Barometrický tlak	98,40 kPa
Relativní vlhkost	75 %

Pomocí korekčního koeficientu přepočítáme nekorigovaná data na barometrické podmínky:

$$k = \frac{99}{98,4} \cdot \left( \frac{299,15}{298} \right)^{0,7} = 1,0088$$

**Měření č. 2**

Tab. 6 Podmínky při měření č. 2

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Teplota paliva	23 °C
Teplota nasávaného vzduchu	26 °C
Barometrický tlak	98,40
Relativní vlhkost	75 %

Barometrické podmínky jsou stejné jako u první zkoušky. Hodnota korekčního koeficientu je tedy stejná:

$$k = 1,0088$$

**Měření č. 3**

Tab. 7 Podmínky při měření č. 3

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Teplota paliva	23 °C
Teplota nasávaného vzduchu	26 °C
Barometrický tlak	98,40
Relativní vlhkost	75 %

Opět určíme korekční koeficient:

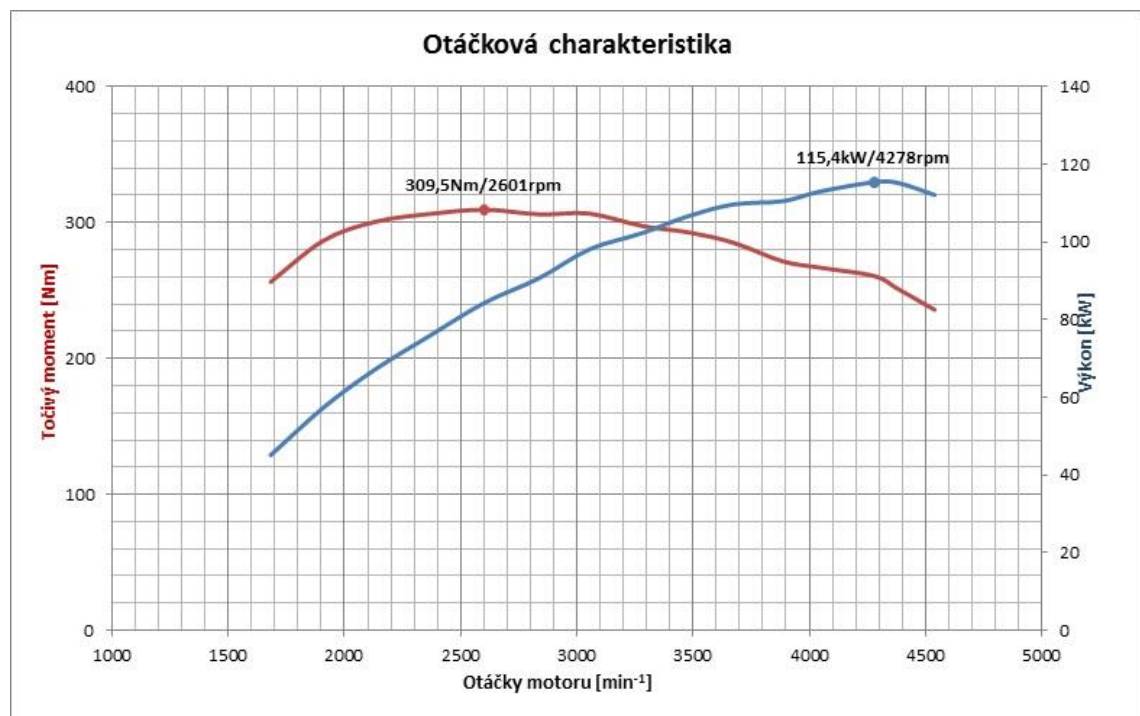
$$k = \frac{99}{98,4} \cdot \left( \frac{298,15}{298} \right)^{0,7} = 1,0064$$

### 10.3.3 Výsledky průměrných hodnot a otáčková charakteristika

Zkorigované hodnoty maximálního výkonu a maximálního točivého momentu ze tří měření zprůměrujeme. Pro posouzení rozptýlenosti naměřených dat od jejich střední hodnoty určíme směrodatnou odchylku ( $S_x$ ) a variační koeficient ( $v_x$ ).

Tab. 8 Průměrné hodnoty maximálního výkonu a maximálního točivého momentu

	<b>P</b>	<b>M<sub>t</sub></b>
$\bar{x}$	115,4 kW	309,47 Nm
$s_x$	0,55 kW	0,21 Nm
$v_x$	0,48 %	0,07 %



Obr. 16 Otáčková charakteristika Škoda Superb 2.0 TDI CR

## 11 Závěr

V dnešní době existuje mnoho metod měření výkonu spalovacích motorů. Z těchto metod je nejčastěji používána metoda měření výkonu na válcovém dynamometru a měření výkonu na motorových dynamometrech ve zkušebních celách. Velkou výhodou válcových dynamometrů je to, že motor nemusí být z vozidla demontován. Dále pak válcové dynamometry mohou sloužit nejen k měření výkonu motoru ale například i k autodiagnostice nebo analýze jízdních vlastností vozidla. Nevýhodou je nutnost určení ztrátového výkonu a nižší přesnost měření než poskytují motorové dynamometry.

Pro měření výkonu na motorových dynamometrech je nutné zkoušený motor nejprve demontovat z vozidla, proto je tato metoda vhodnější spíše k testování motorů ve výrobních závodech nebo vývojových centrech, k testování prototypů motorů apod. Výhodou motorového dynamometru je větší přesnost měření.

Cílem praktické části práce bylo měření výkonu na válcovém dynamometru. Zkoušené vozidlo Škoda Superb bylo testováno na vozidlové zkušebně Ústavu techniky a automobilové dopravy Mendelu v Brně. Vozidlo absolvovalo tři měření výkonu a to dynamickou metodou. Naměřená data byla nejprve korigována na barometrické podmínky, poté byly určeny střední hodnoty maximálního výkonu a maximálního točivého momentu. Automobil dosahuje maximálního výkonu 115,4 kW při 4278 min<sup>-1</sup> a maximálního točivého momentu 309,5 N·m při 2601 min<sup>-1</sup>. Statistickou průkaznost výsledků jak výkonu, tak točivého momentu potvrzuje nízký variační koeficient. Rozdíl mezi maximální hodnotou výkonu udávanou výrobcem a naměřenými hodnotami poukazuje na značný stupeň opotřebení motoru.

## 12 Seznam použité literatury

### 12.1 Knižní publikace

GRODA, Bořivoj a Tomáš VÍTĚZ. Termomechanika I. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2008. ISBN 978-80-7375-160-9.

HLAVŇA V., KUKUČA P., ISTENÍK R., LABUDA R., LIŠČÁK Š., Dopravný prostředek - jeho motor. Žilina: Žilinská univerzita, 2000. ISBN 80-7100-665-3.

ISO/DIS 1585. Road vehicles — Engine test code — Net power. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

MARTYR, A. J. a M.A. PLINT. Engine testing theory and practice. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 9780750684392.

VLK, František. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel: výkon vozidla, brzdné vlastnosti, převodová ústrojí, řízení, geometrie kol, tlumiče a pružiny, říditelnost a ovladatelnost, životní zkoušky, motor, zapalování, elektronické systémy. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2005. ISBN 80-239-3717-0.

### 12.2 Elektronické zdroje

ČUPERA J., Měření výkonu motoru [online]. 2016 [cit 2016-11-22]. Dostupné z: <<http://web2.mendelu.cz/autozkusebna/html/prostud.htm>>

ČUPERA J., Výkon motoru [online]. 2016 [cit 2016-11-22]. Dostupné z: <<http://web2.mendelu.cz/autozkusebna/html/prostud.htm>>

WIKIPEDIE, Asynchronní motor [online]. 2016 [cit. 2016-11-23]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní\\_motor.htm](http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní_motor.htm)>

## 13 Seznam obrázků

Obr. 1	Zážehový cyklus v p-V diagramu (Groda, 2008)	11
Obr. 2	Smíšený cyklus v p-V diagramu (Groda, 2008)	12
Obr. 3	Silové působení v klikovém ústrojí (Hlavňa, 2000)	14
Obr. 4	Otáčkové charakteristiky spalovacího motoru (Hlavňa, 2005) (1- absolutní, 2- na hranici kouřivosti, 3- provozní)	22
Obr. 5	Zatěžovací charakteristiky spalovacího motoru (Hlavňa, 2005)	23
Obr. 6	Úplná charakteristika spalovacího motoru (Hlavňa, 2005)	24
Obr. 7	Princip měření točivého momentu (Čupera, ©2016)	27
Obr. 8	Schéma hydraulické brzdy s el. ovládním (Vlk, 2005)	28
Obr. 9	Elektromagnetická vířivá brzda (Vlk, 2005)	29
Obr. 10	Monoválcové uspořádání (Čupera, ©2016)	31
Obr. 11	Duoválcové uspořádání (Čupera, ©2016)	32
Obr. 12	Design zkušební místnosti (Martyr, 2007)	34
Obr. 13	Škoda Superb na válcovém dynamometru	36
Obr. 14	Schéma kompletní zkušebny (Čupera ©2016)	38
Obr. 15	Vozidlová zkušebna Mendelu (Čupera, ©2016)	39
Obr. 16	Otáčková charakteristika Škoda Superb 2.0 TDI CR	44

## **14 Seznam tabulek**

<b>Tab. 1</b>	<b>Referenční hodnoty</b>	<b>20</b>
<b>Tab. 2</b>	<b>Technická data měřeného vozidla</b>	<b>37</b>
<b>Tab. 3</b>	<b>Základní technické parametry dynamometru 4VDM E120-D</b>	<b>40</b>
<b>Tab. 4</b>	<b>Data získaná ze zkušebních protokolů</b>	<b>42</b>
<b>Tab. 5</b>	<b>Podmínky při měření č.1</b>	<b>42</b>
<b>Tab. 6</b>	<b>Podmínky při měření č. 2</b>	<b>43</b>
<b>Tab. 7</b>	<b>Podmínky při měření č. 3</b>	<b>43</b>
<b>Tab. 8</b>	<b>Průměrné hodnoty maximálního výkonu a maximálního točivého momentu</b>	<b>44</b>





