

**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

**METODYKA MĚŘENÍ VÝKONU A ZTRÁT NA  
VÁLCOVÉM DYNAMOMETRU**

**Jan Žák**

Bakalářská práce

**2014**

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Žák**  
Osobní číslo: **D10380**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Název tématu: **Metodika měření výkonu a ztrát na válcovém dynamometru**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Analýza aktuálních podmínek měření výkonu v laboratoři KEEZ.
- 2) Rozbor problému měření ztrát a výkonu akcelerační metodou.
- 3) Návrh metody měření.
- 4) Experimentální měření.
- 5) Vyhodnocení navržené metody.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:  
**Doporučená literatura zadaná vedoucím práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Pokorný, Ph.D.**  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. února 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2013**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.  
děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vykonal samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona Č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 27. 5. 2014

Jan Žák

Poděkování:

Děkuji Ing. Zdeňku Maškovi, Ph.D., za konzultace, trpělivost a předání mnoha cenných vědomostí při realizaci experimentálních měření a zpracovávání dat. Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Pokornému, Ph.D., za vedení mé práce, podporu a užitečné informace. Děkuju společnosti Jawa Moto spol. s r.o., za půjčení motoru 125 CPI pro účel namodelování rotačních součástí. Děkuji všem, kteří mi pomohli zkonstruovat rám pro motorové měření výkonu. Nakonec chci poděkovat své rodině a svým přátelům, kteří mě velice podporovali.

## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zabývá měřením výkonu a ztrát akcelerační metodou na válcovém dynamometru. Na začátku práce je uveden popis měření výkonu, rozbor akcelerační metody a seznámení se s aktuálními podmínkami pro měření v laboratoři KEEZ. Hlavní část práce se zabývá navržením metod měření, které jsou založeny na určení momentů setrvačnosti rotujících hmot měřeného vozidla. Metody jsou experimentálně ověřeny a vyhodnoceny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

měření výkonu, válcový dynamometr, momenty setrvačnosti

## **TITLE**

Methodology for measuring performance and losses on a roller dynamometer

## **ANNOTATION**

The bachelor's thesis is concerned with measurements of performance and losses by the acceleration method on the roller dynamometer. The description of measurements of performance, analysis of acceleration method and explanation of present measurement conditions at the KEEZ laboratory are stated at the beginning of the thesis. The main part of the thesis is concerned with suggesting of methods of measurements for determination of moments of inertia of rotating masses of the measured vehicle. The methods are experimentally verified and evaluated.

## **KEY WORDS**

power measurement, roller dynamometer, moments of inertia

## Obsah

|   |    |
|---|----|
| SEZNAM SYMBOLŮ.....   | 9  |
| SEZNAM ILUSTRACÍ.....   | 11 |
| SEZNAM TABULEK.....   | 12 |
| SEZNAM GRAFŮ.....   | 13 |
| SEZNAM ZKRATEK.....   | 14 |
| Úvod.....   | 15 |
| 1 Rozbor problému měření výkonu a ztrát akcelerační metodou .....                   | 16 |
| 1.1 Měření výkonu spalovacích motorů silničních vozidel .....                       | 16 |
| 1.1.1 Přehled způsobů měření vozidlového motoru výkonovou brzdou.....               | 16 |
| 1.1.2 Přehled výkonových brzd.....  | 19 |
| 1.2 Rozbor dynamické akcelerační zkoušky.....                                       | 20 |
| 1.2.1 Výpočet ztrát z doběhové zkoušky.....   | 23 |
| 1.2.2 Momenty setrvačnosti .....  | 24 |
| 2 Aktuální podmínky pro měření výkonu motoru v laboratoři KEEZ .....                | 26 |
| 2.1 Popis stanoviště válcového dynamometru .....                                    | 26 |
| 2.2 Hlavní jednotky zkušebního stavu .....  | 27 |
| 2.2.1 Vířivá brzda.....   | 28 |
| 2.2.2 Řídící terminál a programové vybavení .....                                   | 31 |
| 2.3 Momenty setrvačnosti zkušebního stavu .....                                     | 32 |
| 3 Návrh metod měření .....  | 34 |
| 3.1 Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí proudového zatížení brzdou          | 35 |
| 3.1.1 Postup metody .....   | 35 |
| 3.2 Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí změny setrvačnosti brzdy .....      | 37 |
| 3.2.1 Postup metody .....   | 37 |
| 3.3 Metoda zjištění momentu setrvačnosti měřením na rozdílné převodové stupně ..... | 38 |
| 3.3.1 Postup metody .....   | 38 |
| 3.4 Namodelování a odkývání rotujících částí.....                                   | 39 |
| 3.4.1 Postup metody .....   | 39 |
| 3.5 Porovnání válcové a motorové zkoušky, určení odporu kola .....                  | 40 |
| 3.6 Metoda měření výkonu s empirickými hodnotami .....                              | 41 |
| 4 Experimentální měření.....  | 42 |
| 4.1 Příprava pro měření motorovou zkouškou.....                                     | 42 |
| 4.2 Realizace experimentálního měření .....   | 44 |
| 4.2.1 Motorová zkouška .....  | 44 |
| 4.2.2 Válcová zkouška.....  | 45 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3   | Zpracování navržených metod měření .....  | 45 |
| 4.3.1 | Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí proudového zatížení brzdou .....    | 46 |
| 4.3.2 | Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí změny setrvačnosti brzdy .....      | 49 |
| 4.3.3 | Metoda zjištění momentu setrvačnosti měřením na rozdílné převodové stupně ..... | 50 |
| 4.3.4 | Namodelování a odkývání rotujících částí .....                                  | 50 |
| 4.3.5 | Porovnání válcové a motorové zkoušky, určení odporu kola .....                  | 52 |
| 5     | Vyhodnocení navržených metod a diskuze .....                                    | 54 |
| 5.1   | Výsledné výkonové a momentové charakteristiky motoru .....                      | 56 |
| 5.1.1 | Válcová zkouška .....   | 56 |
| 5.1.2 | Motorová zkouška .....  | 58 |
| 6     | Závěr .....   | 60 |
| 7     | Použité zdroje .....  | 62 |



## SEZNAM SYMBOLŮ

|                        |                      |   |
|------------------------|----------------------|---|
| $P$                    | [W]                  | výkon   |
| $P_V$                  | [W]                  | výkon vozidla   |
| $P_{VB}$               | [W]                  | výkon vozidla na ose brzdy  |
| $M$                    | [Nm]                 | moment  |
| $M_M$                  | [Nm]                 | moment motoru na klikovém hřídeli   |
| $M_{VB}$               | [Nm]                 | moment vozidla na ose brzdy   |
| $M_S$                  | [Nm]                 | moment z tenzometrického snímače vyvozený brzdou,   |
| $M_{BACC}$             | [Nm]                 | moment vyvozený brzdou z tenzometrického snímače při akceleraci                                     |
| $M_{BD}$               | [Nm]                 | moment vyvozený brzdou z tenzometrického snímače při doběhu   |
| $M_{ZO}$               | [Nm]                 | člen zahrnující ztráty třením v ložiscích a odporem vzduchu rotujících dílů celého zkušebního stavu |
| $M_{ZACC}$             | [Nm]                 | ztrátový moment při akceleraci redukován na válec   |
| $M_{ZD}$               | [Nm]                 | ztrátový moment z doběhu redukován na válec   |
| $M_{ZV}$               | [Nm]                 | ztrátový moment z válcové zkoušky redukován na válec  |
| $M_{ZM}$               | [Nm]                 | ztrátový moment z motorové zkoušky redukován na válec   |
| $M_{ZK}$               | [Nm]                 | ztrátový moment zadního kola redukován na válec   |
| $F$                    | [N]                  | síla  |
| $F_V$                  | [N]                  | hnací síla vozidla  |
| $m$                    | [kg]                 | hmotnost  |
| $m_{VOZ}$              | [kg]                 | hmotnost vozidla  |
| $m_{ROT}$              | [kg]                 | ekvivalentní hmotnost rotujících částí vozidla  |
| $l$                    | [m]                  | délka   |
| $v$                    | [m·s <sup>-1</sup> ] | rychlost vozidla  |
| $\frac{dv}{dt}$        | [m·s <sup>-2</sup> ] | zrychlení vozidla   |
| $\omega$               | [s <sup>-1</sup> ]   | úhlová rychlost   |
| $\omega_B$             | [s <sup>-1</sup> ]   | úhlová rychlost válce   |
| $\frac{d\omega}{dt}$   | [s <sup>-2</sup> ]   | úhlové zrychlení  |
| $\frac{d\omega_B}{dt}$ | [s <sup>-2</sup> ]   | úhlové zrychlení brzdy  |
| $\epsilon_{ACC}$       | [s <sup>-2</sup> ]   | úhlové zrychlení brzdy při akceleraci   |

|              |                    |   |
|--------------|--------------------|---|
| $\epsilon_D$ | $[s^{-2}]$         | zrychlení brzdy při doběhu  |
| $J$          | $[kg \cdot m^2]$   | moment setrvačnosti   |
| $J_C$        | $[kg \cdot m^2]$   | moment setrvačnosti celkový motocyklu a brzdy redukovány na osu brzdy |
| $J_M$        | $[kg \cdot m^2]$   | moment setrvačnosti motoru  |
| $J_K$        | $[kg \cdot m^2]$   | moment setrvačnosti kola  |
| $J_B$        | $[kg \cdot m^2]$   | moment setrvačnosti brzdy s válcem                                    |
| $i_C$        |                    | celkový převod motor - válec  |
| $i_{MK}$     |                    | převodový poměr motor - kolo  |
| $i_{KV}$     |                    | převodový poměr kolo - válec  |
| $i_{MV}$     |                    | převodové poměry mezi klikovou hřídelí motoru a osou válce            |
| $\eta_{MK}$  |                    | mechanická účinnost převodového ústrojí mezi klikovou hřídelí a kolem |
| $\eta_{KV}$  |                    | mechanická účinnost převodového ústrojí mezi kolem a válcem           |
| $r$          | $[m]$              | poloměr   |
| $r_V$        | $[m]$              | poloměr válce   |
| $r_K$        | $[kg \cdot m^2]$   | poloměr kola  |
| $T$          | $[s^{-1}]$         | perioda   |
| $g$          | $[m \cdot s^{-1}]$ | gravitační konstanta  |
| $e$          | $[m]$              | vzdálenost středu kyvu od osy těžiště kola                            |

## SEZNAM ILUSTRACÍ

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1: Přehled základních výkonových zkoušek .....      | 17 |
| Obrázek 2: Schéma zkušebního stavu [1].....                 | 22 |
| Obrázek 3: Schéma stanoviště dynamometru .....              | 26 |
| Obrázek 4: Schéma dynamometru s válcem.....                 | 27 |
| Obrázek 5: Schéma otočného uložení brzdy [3].....           | 28 |
| Obrázek 6: Schéma vířivé brzdy [3].....                     | 29 |
| Obrázek 7: Charakteristika vířivé brzdy [6] .....           | 30 |
| Obrázek 8: Schéma odkývání kola .....                       | 40 |
| Obrázek 9: Rám pro odstrojený motocykl.....                 | 42 |
| Obrázek 10: Motocykl připraven k měření.....                | 43 |
| Obrázek 11: Odkývání zadního kola na trnu .....             | 51 |
| Obrázek 12: Modely rotačních částí motoru a převodovky..... | 52 |

## **SEZNAM TABULEK**

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1: Typy výkonových brzd .....  | 19 |
| Tabulka 2: Parametry vířivé brzdy laboratoře KEEZ.....                                 | 30 |
| Tabulka 3: Momenty setrvačnosti zkušebního stavu.....                                  | 32 |
| Tabulka 4: Momenty setrvačnosti motocyklu .....  | 33 |
| Tabulka 5: Navržené metody měření.....   | 34 |
| Tabulka 6: Navržené metody měření.....   | 44 |
| Tabulka 7: Přehled válcových měření .....  | 45 |
| Tabulka 8: Výsledky navržených metod .....   | 54 |
| Tabulka 9: Vliv špatně zadané hodnoty momentu setrvačnosti při válcovém měření .....   | 57 |
| Tabulka 10: Vliv špatně zadané hodnoty momentu setrvačnosti při motorovém měření ..... | 59 |

## SEZNAM GRAFŮ

|  |    |
|--|----|
| Graf 1: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, bez modifikace – proud 300mA .....      | 46 |
| Graf 2: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, bez modifikace – proud 400mA .....      | 47 |
| Graf 3: Moment setrvačnosti kola z válcové zkoušky, bez modifikace – 200mA .....                 | 48 |
| Graf 4: Moment setrvačnosti motoru z válcové zkoušky, bez modifikace – 200mA.....                | 48 |
| Graf 5: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, s proudem 300mA – bez válce 300mA ..... | 49 |
| Graf 6: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, s proudem 400mA – bez válce 400mA ..... | 50 |
| Graf 7: Ztráty při válcovém měření .....   | 52 |
| Graf 8: Ztráty při motorovém měření .....  | 53 |
| Graf 9: Ztráty z přenosu kola na válec.....  | 53 |
| Graf 10: Souhrn momentů setrvačnosti .....   | 55 |
| Graf 11: Charakteristiky válcové zkoušky s různě zadanými momenty setrvačnosti .....             | 56 |
| Graf 12: Charakteristiky z motorové zkoušky s různě zadanými momenty setrvačnosti.....           | 58 |

## **SEZNAM ZKRATEK**

|      |  |
|------|--|
| KEEZ | <i>Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě</i> |
| OSVD | <i>Ovládací Software Válcového Dynamometru</i>                                 |
| DP-E | <i>Dopravní prostředky – elektrotechnika</i>                                   |

## Úvod

Úkolem této bakalářské práce je nalézt vhodnou metodiku měření výkonu motocyklu a jeho ztrát akcelerační metodou. Pro přesné měření je nutné u této metody zvládnout problematiku momentů setrvačnosti. Měření je realizováno na vířivém válcovém dynamometru v laboratoři DFJP se školním motocyklem Jawa 125 Dandy.

Válcový dynamometr ve školní laboratoři má sloužit k výuce vlastností motorových vozidel a k realizaci experimentálních měření jejich výkonu, momentu a ztrát. K těmto účelům je mimo jiné vhodná akcelerační zkouška, jelikož má velmi dobrou opakovatelnost měření. Aby bylo možné dosáhnout příznivých výsledků při měření, je potřeba se s problematikou měření výkonu akcelerační metodou blíže seznámit. Velkou část této problematiky zahrnují pasivní odpory a momenty setrvačnosti rotujících částí měřeného vozidla a měřicího zařízení. Zde nastává problém, který může měření nepříznivě ovlivnit. Nepřesná hodnota momentů setrvačnosti vozidla změni výslednou naměřenou velikost momentu motoru a výkonu v celém rozsahu měřených otáček. Pasivní odpory se dají jednoduše zjistit pomocí tzv. doběhové zkoušky, ale zde je také nutné znát momenty setrvačnosti vozidla. Momenty setrvačnosti měřeného vozidla ve většině případů nejsou známy. Z tohoto důvodu se pro měření výkonu zadávají empirické hodnoty těchto momentů setrvačnosti, které ale nezaručí přesné měření. Jádrem problému této bakalářské práce tedy spočívá ve vhodném zjišťování momentů setrvačnosti za účelem přesného měření výkonu akcelerační metodou.

V bakalářské práci je rozbor problematiky měření výkonu akcelerační metodou, popsán válcový dynamometr v laboratoři DFJP, návrh metod pro výpočet momentů setrvačnosti u použitého motocyklu, provedení motorové akcelerační zkoušky, provedení válcové akcelerační zkoušky, výpočet dat a vyhodnocení z realizovaných měření.

# 1 Rozbor problému měření výkonu a ztrát akcelerační metodou

Akcelerační metoda je jednou z několika možností, jak lze měřit výkon silničních vozidel, resp. jejich motoru. Jelikož má své výhody i nevýhody. Je nutné znát obecně problematiku měření výkonu motoru.

## 1.1 Měření výkonu spalovacích motorů silničních vozidel

Výkon je jeden ze základních parametrů hnací jednotky motorového silničního vozidla. Jako fyzikální jednotka je výkon definován prací vykonanou za určitý čas. U spalovacích motorů se zpravidla rozděluje výkon na indikovaný, efektivní a ztrátový. Pro pohon vozidla je rozhodující efektivní výkon ekvivalentně nazýván výkonem užitečným. Hodnota efektivního výkonu je změřena na výstupním konci klikového hřídele motoru. U motorových vozidel se tedy zjišťuje výkon především při rotačním pohybu otáčejících se součástí hnacího ústrojí za využití obecného vztahu pro výpočet výkonu (1).

$$P = M \cdot \omega \quad (1)$$

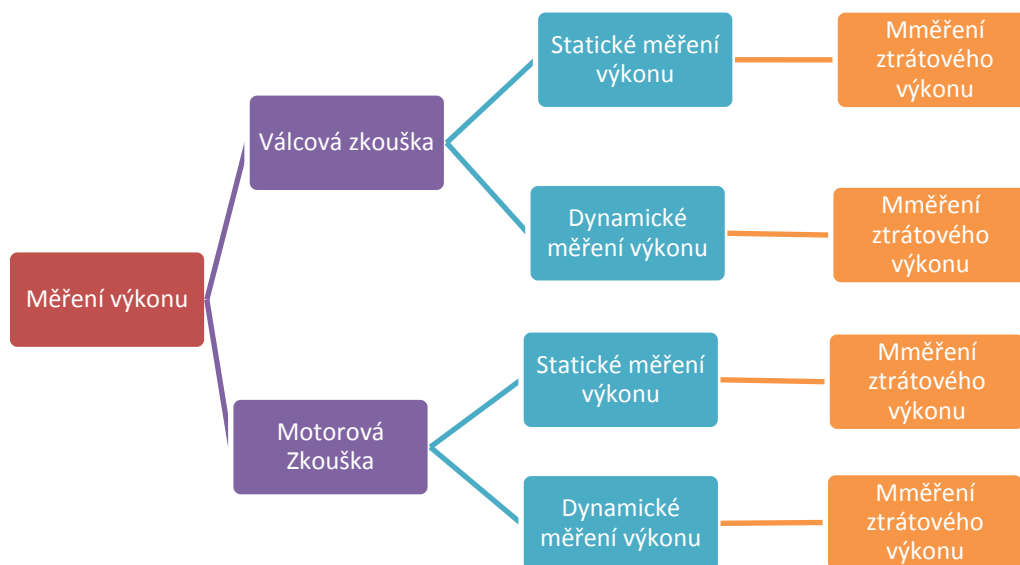
|          |                    |                 |
|----------|--------------------|-----------------|
| $P$      | [W]                | výkon           |
| $M$      | [N·m]              | moment          |
| $\omega$ | [s <sup>-1</sup> ] | úhlová rychlost |

Z toho vyplývá, že efektivní výkon motoru lze zjistit, když se změří točivý moment motoru a otáčky. Tento způsob umožňují tzv. výkonové brzdy. Základní princip měření výkonových brzd je tedy ten, že vozidlo, resp. motor, je vystavováno určitému zatížení o známém či nepřímo změřitelném točivém momentu a zároveň jsou měřeny jeho otáčky. [3][5]

### 1.1.1 Přehled způsobů měření vozidlového motoru výkonovou brzdou

Pro měření výkonu motoru silničního vozidla na výkonové brzdě existují dvě základní metody, které se dají v rámci možností zkušebního stavu kombinovat. Jedná se o statické měření výkonu a akcelerační dynamické měření výkonu. U těchto dvou základních metod je ještě vhodné rozlišovat, zda je přenos motoru na výkonovou brzdu uskutečněn přes kola vozidla tzv. válcovou zkouškou, nebo bez kol tzv. motorovou zkouškou. Tato měření v sobě začleňují také měření ztrátového výkonu, do kterého se zahrnují pasivní odpory zkušebního stavu. Na Obrázku 1 je znázorněno schéma rozdělení základních výkonových zkoušek.





**Obrázek 1: Přehled základních výkonových zkoušek**

Měření výkonu silničního vozidla na výkonové brzdě lze tedy rozdělit na měření motorové a měření válcové. Válcová zkouška se provádí bez demontáže vozidla a přenos výkonu je na měřicí zařízení převeden stykem vozidlového kola a válce zkušebního stavu. Při této zkoušce výrazně působí na měření vliv valivého odporu kola. Další výrazný fakt je, že mezi kolem a válcem neustále dochází ke skluzu a převodový poměr se mění podle zatížení. U motorové zkoušky je motor napojen na výkonovou brzdu přímo z hnacího hřídele, nebo pomocí převodu s malými mechanickými ztrátami. Je tedy odstraněn přenos hnací síly na výkonovou brzdu přes pneumatiku, což je největší zdroj ztrátového výkonu. Motorová zkouška je ale technicky náročnější na provedení, jelikož je potřeba rozebrat vozidlo a vhodně zajistit přenos výkonu na výkonovou brzdu. Z tohoto důvodu se pro běžnou diagnostiku motorová zkouška nepoužívá. [3]

Statické měření výkonu probíhá tak, že se motor zatěžuje, dokud se otáčky neustálí při určité hodnotě. Jakmile se otáčky motoru ustálí, tak se odečte hodnota točivého momentu snímačem síly na rameni výkyvného statoru brzdy. Výkon se poté vypočte dle vztahu (1). Pro změření průběhu výkonu, resp. točivého momentu, v určitém rozsahu otáček motoru se musí provést ve vhodných intervalech větší počet měření. Ve výsledném grafu výkonu a točivého momentu v závislosti na otáčkách se tak získají body, pro které lze odhadnout funkci. Výsledná momentová křivka se poté převede na výkon. Pomocí této zkoušky se získá tzv. stacionární výkon, jelikož během zkoušky dojde ke stabilizaci vnitřních teplot motoru. Výhodou této zkoušky je, že na výsledné hodnoty mají momenty setrvačnosti rotujících částí

vozidla nepatrný vliv. Ovšem tato zkouška má i nevýhody. Ty plynou především z časové náročnosti zkoušky, přičemž pohonné ústrojí vozidla je vystaveno velké zátěži a je nutné zabezpečit dostatečně intenzivní chlazení.

Při akceleračním měření výkonu je brzdící účinek brzdy vyvoláván setrvačnými účinky rotujících hmot. Vozidlo provede akceleraci v předem definovaném rozsahu otáček, při které roztáčí setrvačník se známým momentem setrvačnosti. Během akcelerace jsou snímány otáčky setrvačnickového stavu, ze kterých se diferencí úhlové rychlosti podle času vypočte úhlové zrychlení. Vynásobením úhlového zrychlení a momentu setrvačnosti se získá točivý moment, jehož výpočet obecně znázorňuje rovnice (2). Poté se tento moment přepočítá na výkon dle rovnice (1).

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

|                      |                      |                     |
|----------------------|----------------------|---------------------|
| $M$                  | [N·m]                | moment              |
| $J$                  | [kg·m <sup>2</sup> ] | moment setrvačnosti |
| $\frac{d\omega}{dt}$ | [s <sup>-2</sup> ]   | úhlové zrychlení    |

Touto metodou se získá tzv. dynamický výkon, při němž nedochází ke stabilizaci vnitřních teplot motor. To způsobuje oproti statickému výkonu mírnou deformaci výkonové křivky, se kterou se však musí počítat. Akcelerační zkouška je provedena během relativně krátkého času a je vhodnější například pro orientační měření výkonu, nebo u porovnávání tvaru výkonové křivky při optimalizaci parametrů motoru. Nároky na chlazení motoru nejsou u této metody vysoké. Značná nevýhoda akcelerační zkoušky je, že je třeba znát přesně momenty setrvačnosti rotujících hmot měřeného vozidla. Pokud tyto hodnoty nejsou známy, tak se nedá výkonové měření akcelerační metodou použít jinak než jako orientační. Podrobnější rozbor akcelerační metody, kterou se zabývá tato bakalářská práce, je popsán v kapitole 1.2.

Při měření výkonu na výkonové brzdě se stanoví ze snímačů otáček a točivého momentu výkon celého zkušebního stavu. Cílem je ale zjistit výkon pouze na výstupu klikového hřídele motoru. Z tohoto důvodu je třeba stanovit tzv. ztrátový výkon. Ztrátový výkon v sobě zahrnuje odpory, které na zkušební stav působí na cestě od klikového hřídele po výkonovou brzdu. Jsou v něm zahrnuty odpory v převodech a ložiscích, valivý odpor pneumatiky na válci a odpor vzduchu rotujících součástí. Ztrátový výkon se určuje doběhovou zkouškou. Doběhová zkouška se provádí tak, že se při dosažení maximálních otáček měření rozpojí spojka testovacího vozidla a rotující stav se nechá samovolně

doběhnout do minimálních otáček měření. Při tomto doběhu se snímá rychlost otáček motoru, které se přepočtou na zrychlení. Je nutné znát moment setrvačnosti rotujících hmot celého zkušebního stavu. Vynásobením momentu setrvačnosti zkušebního stavu s negativním zrychlením vyjde ztrátový moment, který lze jednoduše přepočítat na výkon. Zjištění ztrátového výkonu vzhledem k potřebě zjištění momentu setrvačnosti rotujících hmot vozidla souvisí s akcelerační zkouškou a je o něm také dále pojednáváno v kapitole 1.2.

### 1.1.2 Přehled výkonových brzd

Výkonové brzdy lze rozdělit dle Tabulky 1. Dělí se na dva základní typy, a to na setrvačnickové zkušebny a dynamometry. Pojmem dynamometr se obecně nazývají zařízení, kterými lze regulovat brzdňý moment vyvíjený na vozidla a odečítat ho pomocí deformačního snímače. Dynamometry se dělí podle principu zatěžování a to na tekutinové, elektromagnetické vířivé, stejnosměrné a asynchronní střídavé.

**Tabulka 1: Typy výkonových brzd**

| Typy výkonových brzd           |
|--------------------------------|
| <i>Setrvačnickové zkušebny</i> |
| <i>Dynamometry</i>             |
| - Tekutinové                   |
| - Elektromagnetické vířivé     |
| - Stejnosměrné                 |
| - Asynchronní                  |

Setrvačnicková zkušebna je nejjednodušším typem výkonových brzd a brzdí vozidlo pouze setrvačnými účinky hmot, tedy pouze při zrychlení. Vozidlo, resp. motor vozidla, roztáčí setrvačníky v zásadě několikanásobně většími setrvačnými účinky, než má samotné vozidlo. Z principu plyne, že setrvačnickové zkušebny lze použít pouze u dynamické zkoušky.

Tekutinové brzdy existují buď hydraulické, nebo vzduchové. Brzdící moment je vyvolán aerodynamickým odporem turbíny uvnitř brzy. Rotor přenáší moment pomocí kapaliny resp. plynu na výkyvně uložený stator, který se přes rameno opírá o tenzometrické zařízení měřící sílu. Velikost brzdícího momentu roste se druhou mocninou otáček rotoru.

Momentové zatížení motoru je nejčastěji regulované množstvím vody v brzdě. Výhodou tohoto typu dynamometru je nižší cena pořízení. Nevýhodou je špatná regulovatelnost momentu.

Elektromagnetický vířivý dynamometr vyvíjí brzdící moment elektromagnetickým polem pomocí tzv. vířivých proudů. Momentové zatížení motoru je regulované přivedeným stejnosměrným proudem do dynamometru. Přivedený proud se reguluje softwarem v ovládacím zařízení brzdy. Výhodami elektromagnetické vířivé brzdy jsou, že mají oproti tekutinové brzdě dobrou regulovatelnost a vysoký rozsah otáček rotoru. Vířivý dynamometr ale slouží pouze jako brzda. Nelze ho využít například jako motor. Elektromagnetická vířivá brzda se používá k měření výkonu v laboratoři KEEZ, proto její princip a použití je dále popisován v kapitole 2.

Stejnoseměrné dynamometry mají velkou výhodu. Pracují jako elektrický pohon, tudíž mohou nejen brzdit, ale i pohánět výkonovou soustavu. To může přinést nespornou výhodu při měření ztrátového výkonu vozidla. Další výhodou je otáčková charakteristika stejnosměrného dynamometru a regulovatelnost, díky které lze oproti vířivému dynamometru na výkonovou soustavu vyvíjet požadovaný brzdňý moment s rychlejší a přesnější odezvou. Nevýhody jsou vyšší nároky na údržbu a velký moment setrvačnosti. [3]

Asynchronní dynamometry mohou podobně jako stejnosměrné dynamometry fungovat aktivně jako elektromotor, nebo pasivně jako brzda a přitom díky rekuperaci vracet elektrickou energii zpět do sítě. Mají velký otáčkový rozsah měření a ze všech zmiňovaných výkonových brzd nejlepší regulovatelnost točivého momentu, díky které mohou velice reálně simulovat jízdu v běžném provozu. Jsou méně náročné na údržbu než stejnosměrné brzdy. Asynchronní dynamometry jsou z uvedených dynamometrů pro měření výkonu motorových vozidel nejlepší, avšak drahé. [7]

## **1.2 Rozbor dynamické akcelerační zkoušky**

Rozbor akcelerační zkoušky bude dále přizpůsoben pro měření motocyklu na vířivé brzdě dle aktuálních podmínek pro měření v laboratoři KEEZ popsanych v kapitole 2. V kapitole 1.1.1 již bylo zmíněno, že princip akcelerační zkoušky spočívá v zatížení vozidlového pohonu rotujícími hmotami při akceleraci. Tento princip vychází z Newtonova druhého pohybového zákona, ekvivalentní akceleraci vozidla při jízdě na silnici, kterou popisuje následující rovnice:

$$P_V = F_V \cdot v_V = (m_{VOZ} + m_{ROT}) \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v_V \quad (3)$$

|                 |                      |   |
|-----------------|----------------------|---|
| $P_V$           | [W]                  | výkon vozidla,                                  |
| $F_V$           | [N]                  | hnací síla vozidla,                             |
| $m_{VOZ}$       | [kg]                 | hmotnost vozidla,                               |
| $m_{ROT}$       | [kg]                 | ekvivalentní hmotnost rotujících částí vozidla, |
| $v_V$           | [m·s <sup>-1</sup> ] | rychlost vozidla,                               |
| $\frac{dv}{dt}$ | [m·s <sup>-2</sup> ] | zrychlení vozidla.                              |

Mírnou úpravou rovnice (2) a vynásobením úhlovou rychlostí válce se získá ekvivalentní rovnice (4) vztahu (3). Rovnice (4) dává vztah pro výpočet výkonu vozidla redukováný na ose výkonové brzdy:

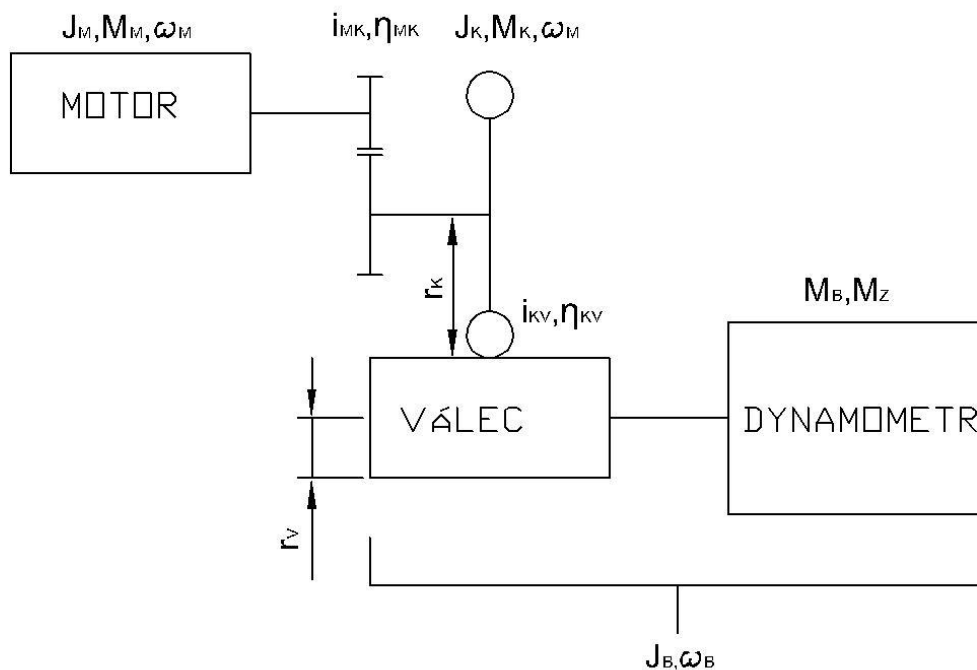
$$P_{VB} = J_C \cdot \frac{d\omega_B}{dt} \cdot \omega_B \quad (4)$$

Z čehož moment redukováný na osu brzdy vyjadřuje vztah (5):

$$M_{VB} = J_C \cdot \frac{d\omega_B}{dt} \quad (5)$$

|                        |                      |   |
|------------------------|----------------------|---|
| $P_{VB}$               | [W]                  | výkon vozidla na ose brzdy,   |
| $M_{VB}$               | [N·m]                | moment vozidla na ose brzdy,  |
| $J_C$                  | [kg·m <sup>2</sup> ] | moment setrvačnosti celého zkušebnímu stavu včetně brzdy redukováný na osu brzdy, |
| $\frac{d\omega_B}{dt}$ | [s <sup>-2</sup> ]   | úhlové zrychlení brzdy,   |
| $\omega_B$             | [s <sup>-1</sup> ]   | úhlová rychlost válce.  |

Veličiny  $P_{VB}$  a  $M_{VB}$  vyjadřují výchozí hodnoty celého zkušebnímu stavu na ose výkonové brzdy, tudíž nezahrnují ztráty. Do vztahu pro výpočet momentu motoru je proto potřeba započítat všechny veličiny, které se vyskytují při převodu z osy výkonové brzdy na osu klikového hřídele. Schéma zobrazující výkonovou soustavu s veličinami, které se v ní vyskytují, zobrazuje Obrázek číslo 2 vycházející z práce. [1]



Obrázek 2: Schéma zkušebního stavu [1]

Sestavení rovnice pro výpočet momentu motoru dynamickou zkouškou pak vypadá následovně:

$$M_M = \frac{M_S + M_{Z0} + [J_B + (J_M \cdot i_{MK}^2 \cdot \eta_{MK} + J_K) \cdot i_{KV}^2 \cdot \eta_{MK}]}{i_{MV} \cdot \eta_{MK} \cdot \eta_{KV}} \cdot \frac{d\omega_B}{dt} \quad (6)$$

|          |                      |  |
|----------|----------------------|--|
| $M_M$    | [N·m]                | moment motoru,   |
| $M_S$    | [N·m]                | moment z tenzometrického snímače vyvozený brzdou,  |
| $M_{Z0}$ | [N·m]                | člen zahrnující ztráty třením v ložiscích a odporem vzduchu rotujících dílů celého zkušebního stavu,   |
| $J_B$    | [kg·m <sup>2</sup> ] | moment setrvačnosti výkonové brzdy s válcem a všemi ostatními členy v ose brzdy s ní napevno spojené hřídeli,                                  |
| $J_M$    | [kg·m <sup>2</sup> ] | moment setrvačnosti motoru,  |
| $J_K$    | [kg·m <sup>2</sup> ] | moment setrvačnosti kola,  |
| $i_{MK}$ |                      | převodový poměr mezi klikovou hřídelí a osou zadního kola skládající se ze součinu primárního, sekundárního a zařazeného převodu v převodovce, |
| $i_{KV}$ |                      | převodový poměr mezi osou kola vozidla a osou válce brzdy<br>dán podílem poloměru válce s poloměrem kola: $i_{KV} = \frac{r_V}{r_K}$ (7)       |

|             |     |   |
|-------------|-----|---|
| $r_V$       | [m] | poloměr válce,  |
| $r_K$       | [m] | poloměr kola,   |
| $i_{MV}$    |     | převodový poměry mezi klikovou hřídelí motoru a osou brzdy<br>dán vztahem: $i_{MV} = i_{MK} \cdot i_{KV}$ , |
| $\eta_{MK}$ |     | mechanická účinnost převodového ústrojí mezi klikovou hřídelí<br>a kolem,                                   |
| $\eta_{KV}$ |     | mechanická účinnost převodového ústrojí mezi kolem a válcem.<br>[1]   |

Členy mechanické účinnosti převodů  $\eta_{MK}$  a  $\eta_{KV}$  obsahují pasivní odpory, které nelze určit. Například převod mezi válcem a kolem obsahuje valivé odpory, které závisí na konkrétním typu pneumatiky, její nahuštění a zatížení vozidla. Proto je vhodné tyto odpory změřit při výkonové zkoušce. To lze dobřehovou zkouškou vozidla. Výsledné ztráty budou změřeny zároveň s pasivními ztrátovými momenty  $M_{Z0}$ . Zjištění ztrát dobřehovou zkouškou jde i za pomoci přidavného elektromotoru s deformačním snímačem síly. Motor roztočí celou výkonovou soustavu s vozidlem, které má rozepnutou spojku. Pomocí deformačního snímače se potom odečte ztrátový moment. Elektromotor na měření ztrát zatím není v laboratoři KEEZ k dispozici. Pro dobřehovou zkoušku je vhodné mechanické účinnosti převodů  $\eta_{MK}$  a  $\eta_{KV}$  zahrnout do členu momentových ztrát zkušebního stavu při akceleraci  $M_{ZACC}$ . Tím se rovnice (6) mírně zjednoduší:

$$M_M = \frac{M_S + M_{ZACC} + [J_B + (J_M \cdot i_{MK}^2 + J_K) \cdot i_{KV}^2] \cdot \frac{d\omega_B}{dt}}{i_{MV}} \quad (9)$$

Pro motorovou zkoušku bez zadního kola vypadá vztah pro výpočet momentu motoru následovně:

$$M_M = \frac{M_S + M_Z + [J_B + J_M \cdot i_{MK}^2] \cdot \frac{d\omega_B}{dt}}{i_{MK}} \quad (10)$$

### 1.2.1 Výpočet ztrát z dobřehové zkoušky

Dobřehová zkouška se při akcelerační metodě provede ihned po akceleraci. Začátek dobřehu je zahájen otáčkami, které převyšují maximální měřené otáčky. V těchto otáčkách se

zmáčkne spojka a drží se, dokud otáčky brzdy nespádnou pod limitní otáčky spodní hranice měřené oblasti. Tím se získají v měřeném rozsahu otáček hodnoty negativního zrychlení válce, které jsou zapříčiněny ztrátovým momentem celého zkušebního stavu  $M_{ZD}$  za působení momentů setrvačnosti:

$$M_{ZD} = (J_B + J_K \cdot i_{KV}^2) \cdot \frac{d\omega_B}{dt} - M_B \quad (11)$$

$M_{ZD}$  – ztrátový moment při doběhu redukován na válec.

Z tohoto vztahu vychází vztah pro doběh motorové zkoušky. Ten ovšem neobsahuje moment setrvačnosti kola:

$$M_{ZD} = J_B \cdot \frac{d\omega_B}{dt} - M_B \quad (12)$$

Celý průběh ztrátového momentu změřený doběhovou zkouškou  $M_{ZD}$  se pro započtení do vztahu pro výpočet momentu motoru musí převést na ztrátový moment při akceleraci  $M_{ZACC}$ . To se provede změnou smyslu znaménka jednotlivých dat a následnou interpolací celého měřeného průběhu dat na otáčky při akceleraci.

### 1.2.2 Momenty setrvačnosti

Z definice akcelerační dynamické zkoušky vyplývá, že momenty setrvačnosti rotujících hmot jsou důležitou veličinou, které jsou z principu nezbytné pro výpočet momentu motoru. Moment setrvačnosti je definován takto:

$$J = \int_m r^2 dm \quad (13)$$

$dm$  hmotnostní element,

$r$  [m] poloměr (hmotnostního elementu od osy rotace).

Obecně tedy velikost momentu setrvačnosti závisí na druhé mocnině vzdálenosti hmotnostních elementů od osy rotace.

V celé výkonové soustavě s vozidlem se vyskytují momenty setrvačnosti výkonové brzdy s válcem a moment setrvačnosti vozidla. Moment setrvačnosti vozidla se dělí na moment setrvačnosti kola a moment setrvačnosti motoru. Momenty setrvačnosti převodového ústrojí po spojku jsou velice malé a dají se zanedbat. Pokud se zanedbají,



redukují se na osu zadního kola, resp. k ose brzdy. Pro celkový moment setrvačnosti celé výkonové soustavy platí následující vztah:

$$J_C = (J_M \cdot i_{MK}^2 + J_K) \cdot i_{KV}^2 + J_B \quad (14)$$

Moment setrvačnosti výkonové brzdy s válcem je znám. Moment setrvačnosti motoru a kola většinou znám není. Ty se zjistí buď od výrobce vozidla, nebo se musí zjistit vhodnou metodou. Tyto metody většinou nejsou příliš jednoduché, nebo obsahují určité nepřesnosti.

Zanedbání momentů setrvačnosti motocyklu při měření akcelerační zkouškou, nebo zadání její špatné hodnoty, vnáší do měření systematickou chybu. Tato chyba změní velikost naměřeného momentu motoru při akceleraci. Velikost systematické chyby měření momentu motoru závisí na poměru skutečných momentů setrvačnosti motocyklu redukováných na osu brzdy a momentu setrvačnosti brzdy s válcem. Čím větší bude mít brzda s válcem moment setrvačnosti oproti motocyklu, tím menší chyba při měření se špatně zadanými momenty setrvačností motocyklu vzniká. Z rovnice (13) také vyplývá, že redukce momentů setrvačnosti motocyklu na osu brzdy s válcem závisí na druhé mocnině převodových stupňů. Tím při jejich zanedbání bude velikost chyby záviset také na zvoleném převodovém stupni při měření. Čím menší převodový poměr, resp. vyšší převodový stupeň, bude zařazen při výkonovém měření, tím menší bude chyba.

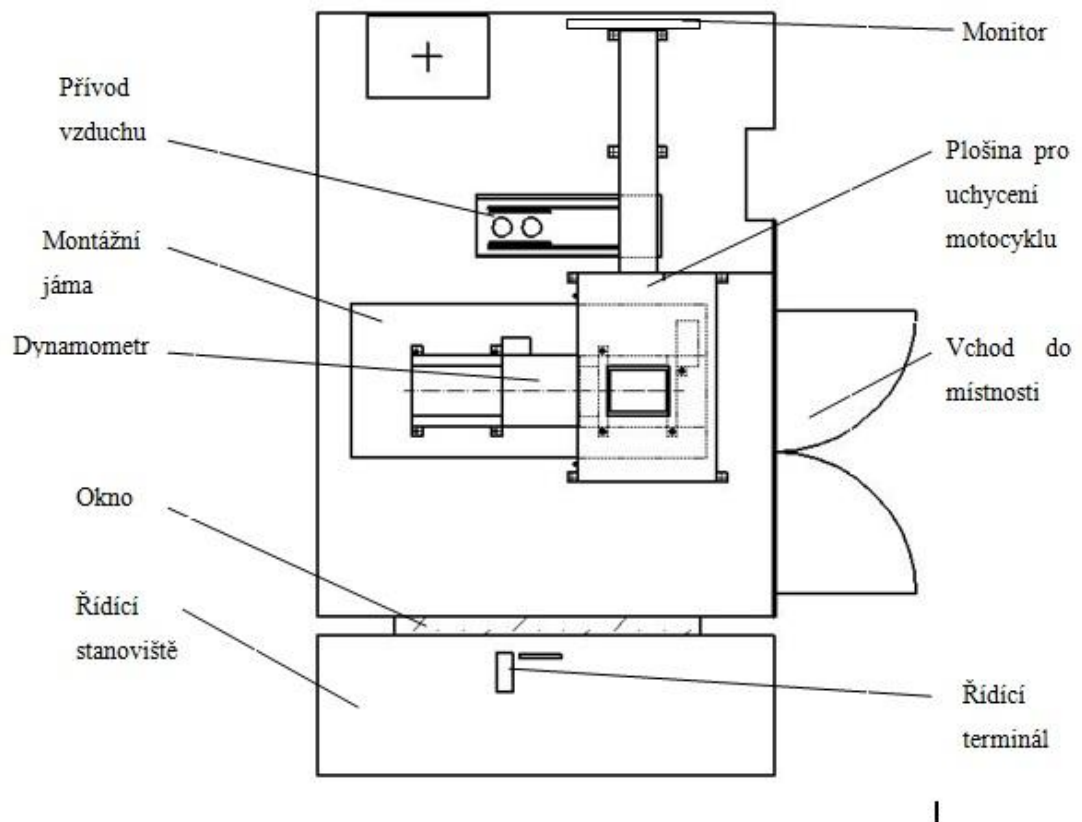
Pro dobřehovou zkoušku platí podobné zákonitosti jako při akceleraci. Opět je pro přesné zjištění momentových ztrát  $M_{ZD}$  potřeba znát momenty setrvačnosti rotujících dílu vozidla při doběhu. Při jejich špatném nastává menší chyba než při akceleraci, jelikož při doběhu se po rozpojení spojky započítává do měření pouze moment setrvačnosti zadního kola. Převodový poměr mezi zadním kolem a válcem je navíc většinou menší než 1, čímž je vliv momentu setrvačnosti zadního kola snížen. [1][6]

## 2 Aktuální podmínky pro měření výkonu motoru v laboratoři KEEZ

V laboratoři DFJP Univerzity Pardubice, nacházející se ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě v Doubravicích, je válcový dynamometr určený pro měření výkonu jednostopých motorových vozidel. Výrobcem a dodavatelem dynamometru je firma VUES Brno a.s. Dynamometr se stal tématem několika diplomových prací a ročníkových projektů, jejichž cílem bylo jeho zprovoznění a vytvoření softwarového vybavení.

### 2.1 Popis stanoviště válcového dynamometru

Válcový dynamometr se nachází v samostatné místnosti laboratoře sekce DP-E (dopravní prostředky – elektrotechnika). Tato místnost je zvukově izolovaná. Uvnitř laboratoře se nachází podúrovňová montážní jáma, ve které je na rámu přimontován dynamometr s válcem. Rám s dynamometrem a válcem je přichycen šrouby do betonu. Nad válcem je ocelový rám s plošinou a svěrným uchycením. Rám s plošinou a svěrným uchycením slouží k fixaci motocyklu za přední kolo, na kterém se má vykonávat měření na válci. V podlaze vedle montážní jámy s dynamometrem se nachází výstup šachty sloužící pro přívod vzduchu. Na Obrázku 3 je schéma stanoviště dynamometru.

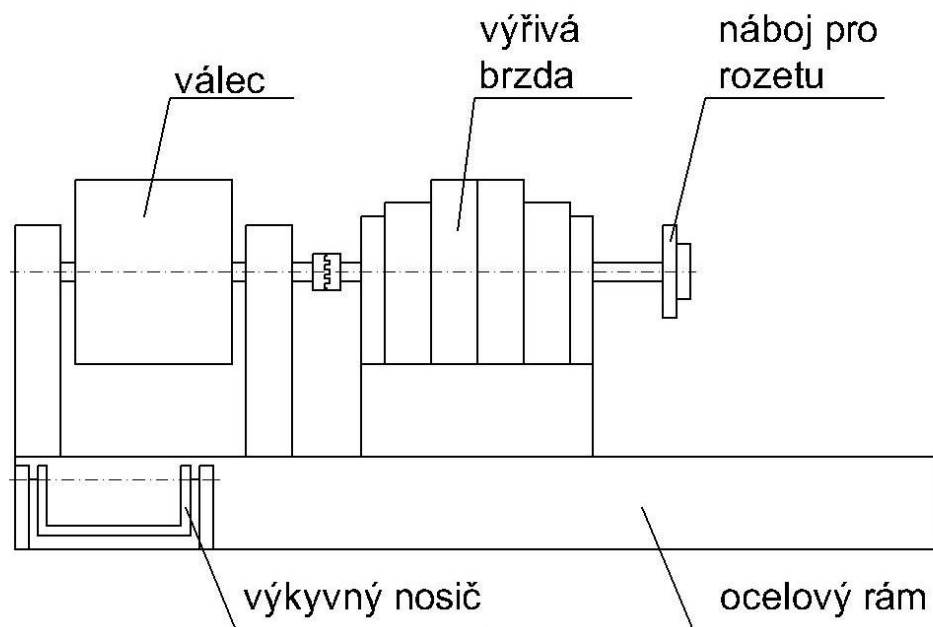


Obrázek 3: Schéma stanoviště dynamometru

Pro ovládání a okamžité sledování výsledků z měření slouží v místnosti zkušebního stavu monitor zavěšený nad zkušebním stavem. Řídicí stanoviště se nachází ve vedlejší místnosti odděleno oknem s protihlukovým sklem. V řídicím stanovišti se nachází řídicí terminál dynamometru a osobní počítač pro obsluhu dynamometru. Na stanovišti válcového dynamometru se dále vyskytuje odvětrávací systém výfukových plynů a pružný rozvod přiváděného vzduchu z šachty přívodu vzduchu.

## 2.2 Hlavní jednotky zkušebního stavu

Hlavní jednotky zkušebního stavu jsou vířivá brzda, válec zajišťující přenos trakční síly z měřeného vozidla a řídicí terminál. Programové vybavení zajišťuje osobní počítač napojený na řídicí terminál.



**Obrázek 4: Schéma dynamometru s válcem**

Vířivá brzda s válcem je připevněna na ocelovém rámu, který je uložen v šachtě pod úrovní podlahy. Z jedné strany je na brzdu pomocí hřídelové spojky napojen válec a z druhé strany brzdě je výstup hřídele s prostorem pro měření samotných spalovacích motorů motorovou zkouškou. Konec hřídele určený pro motorová měření je aktuálně osazen nábojem sloužícím k připevnění rozety řetězového převodu. K rámu je ještě navíc připevněn nosič, který má výkyvné uložení. Tento nosič má v budoucnu sloužit pro elektromotor, pomocí kterého se mají měřit pasivní odpory zkoušeného motocyklu či motoru. Schéma kompletu

dynamometru s válcem je na Obrázku 4. Řídící terminál s osobním počítačem se nachází, jak už bylo zmíněno, ve vedlejší místnosti.

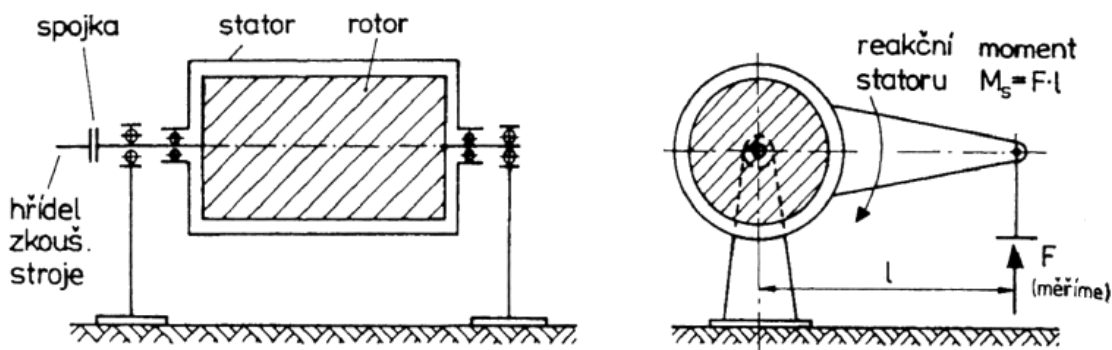
Pro korekci momentu a výkonu měřeného motoru na standardní atmosférické podmínky slouží atmosférická sonda. Používaná sonda je od firmy Omega Engineering, Inc. Pro výpočet korekce momentu a výkonu jsou ze sondy podstatné hodnoty o relativní vlhkosti vzduchu, teplotě a barometrickém tlaku.

### 2.2.1 Vířivá brzda

Při popisu vířivé brzdy se vychází z prací [1] a [2]. Vířivá brzda má dvě hlavní části a to rotor a stator. Rotor je roztáčen přes hřídel měřeným motorovým vozidlem, nebo samostatným spalovacím motorem. Stator je výkyvně uchycen v ose rotace rotoru na ložiscích. Mezi rotorem a státorem působí na stator brzdné síly vyvinuté vířivými proudy. Na tyto brzdné síly působí reakce pevné vazby mezi otočným státorem a pevným rámem. Pevná vazba je tvořena deformačním členem s tenzometrickým snímačem, pomocí kterého se měří moment  $M_S$  vyvozený brzdou, který popisuje rovnice (15). Schéma výkyvného uložení brzdy je na Obrázku 5.

$$M_S = F \cdot l \quad (15)$$

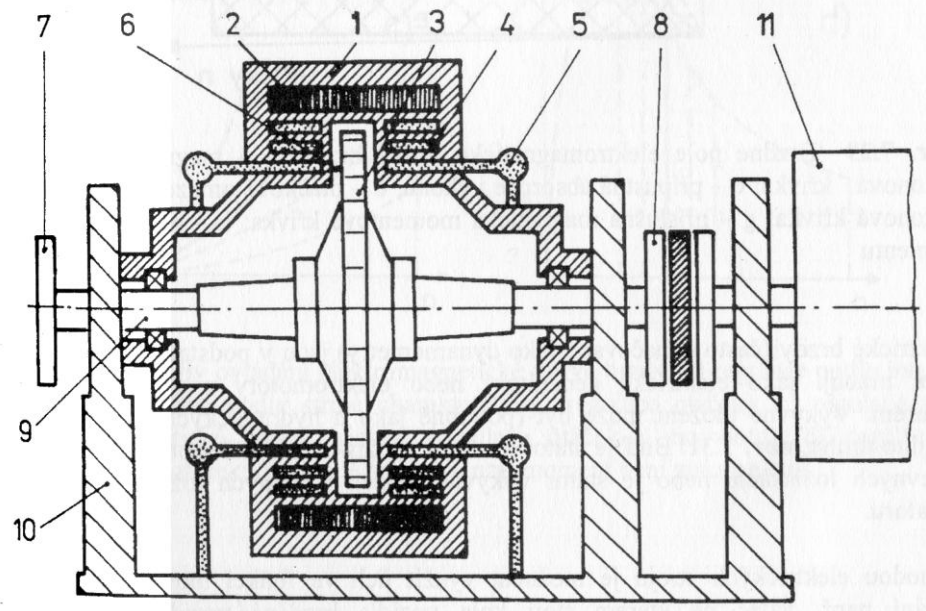
$M_S$  [N·m] Moment z tenzometrického snímače vyvozený brzdou,  
 $F$  [N] síla,  
 $l$  [m] délka (ramene).



Obrázek 5: Schéma otočného uložení brzdy [3]

Rotorem brzdy je ocelové ozubené kolo a ve statoru je uloženo budící vinutí. Přivedením stejnosměrného proudu do budícího vinutí se v brzdě vytvoří magnetický tok. Roztočený rotor poté vytváří magnetický odpor a na budícím vinutí vznikají vířivé proudy. Čím vyšší frekvence otáčení bude na rotoru, tím bude vyšší frekvence střídání vířivých

proudů. Brzdný účinek tedy závisí na velikosti budícího proudu a úhlové rychlosti rotoru. Lze ho snadno a plynule regulovat přivedeným proudem. Jelikož nelze u vířivé brzdy provádět rekuperaci energie, tak se vlivem vířivých proudů dynamometr nadměrně zahřívá. Tepelnou energii je proto nutné odvádět chladicími kanálky vodního chlazení do chladícího okruhu. Na Obrázku 6 je schéma vířivé brzdy.



**Obrázek 6: Schéma vířivé brzdy [3]**

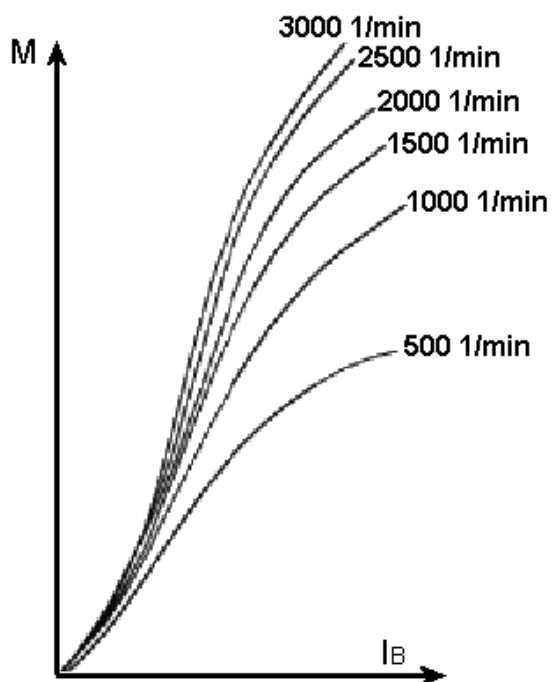
Popis vířivé brzdy: 1 - výkyvné těleso statoru brzdy, 2 – budící vnutí, 3 – ozubený kotouč, 4 – chladicí kanálky, 5 – odvod vody do chladícího okruhu, 6 – mezera mezi rotorem a statorem, 7 – náboj pro rozetu, 8 hřídelová spojka, 9 – hřídel, 10 – uchycení brzdy, 11 – válec.

Měření na vířivé brzdě je omezeno jejími vlastnostmi. Zejména je omezováno maximálním výkonem a maximálními otáčkami dynamometru, proto je nutné zvolit vhodný rozsah otáček při měření vhodným převodovým poměrem podle charakteristiky měřeného vozidla. V Tabulce 2 jsou popsány parametry vířivé brzdy laboratoře DP-E.

Tabulka 2: Parametry vířivé brzdy laboratoře KEEZ [1]

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Typ</b>                       | VUES VD125  |
| <b>Výkon</b>                     | 125 kW  |
| <b>Otáčky jmenovité</b>          | 2 000 min <sup>-1</sup>                             |
| <b>Otáčky maximální</b>          | 3 600 min <sup>-1</sup>                             |
| <b>Moment</b>                    | 597 Nm  |
| <b>Provedení</b>                 | IP23 dle ČSN EN 60034-5                             |
| <b>Tvar</b>                      | IM B3 dle ČSN 60034-7                               |
| <b>Chlazení</b>                  | vodní IC3W7 dle ČSN EN 60034-6                      |
| <b>Směr otáčení</b>              | oba směry   |
| <b>Zatížení</b>                  | trvalé  |
| <b>Napětí budící cívky</b>       | 91 V  |
| <b>Proud budící cívky</b>        | 1,7 A   |
| <b>Hmotnost</b>                  | 380 kg  |
| <b>Tenzometrický snímač síly</b> | SSM-AJ-2000, 2 kN                                   |
| <b>Snímač otáčení</b>            | pulsní induktivní LUN1326.02-8<br>(60 pulsů/otáčku) |

Obrázek 7 znázorňuje, jak závisí moment brzdy vyvozený přivedeným budícím proudem při různých otáčkách. Z tohoto obrázku je také patrné, že charakteristika vířivé brzdy není lineární. [6]



Obrázek 7: Charakteristika vířivé brzdy [6]

Výstupní veličiny z vířivé brzdy jsou indukční proud změřený snímačem proudu, otáčky a brzdný moment. Snímač proudu funguje na Hallově principu a jeho filtrovaný a zesílený analogový signál se přivádí do řídicího terminálu. Snímač otáček je induktivní a otáčky snímá z ozubeného kola se šedesáti výstupky. Obvod pro zpracování signálu ze snímače otáček je schopen zpracovávat otáčky od hodnoty 0,5 ot/s. Snímač momentu je tvořen tenzometrickým můstkem s lineární závislostí výstupního signálu na síle. Jeho citlivost je podle výrobce 3 mV/V, což je pro řídicí terminál nerozlišitelný signál. Signál je proto zesilován až stonásobně.

### **2.2.2 Řídicí terminál a programové vybavení**

Řídicí terminál je důležitá součást pro funkci válcového dynamometru. Terminál je 16-bit, je vybaven jednoduchým LCD displejem a osmi-tlačítkovou klávesnicí a je uložen spolu se všemi jeho obvody v počítačové skříni. Jeho úloha spočívá v tom, že zajišťuje veškeré funkce a ovládání vířivé brzdy. Terminál zpracovává signály ze vstupních snímačů. Zajištění komunikace se softwarem osobního počítače zajišťuje řídicí terminál pomocí sériového portu. [2]

Software řídicího terminálu hlavně splňuje požadavky týkající se regulace brzdy. Proudem pro budící vinutí se reguluje brzdý moment a otáčky. Vstupní požadavky pro nastavení regulace se do terminálu zadávají pomocí klávesnice na terminálu a nejdůležitější údaje se zobrazují na zobrazovacím displeji. Velice důležitá je také schopnost komunikace s osobním počítačem, jelikož je u daných zkoušek potřeba zadávat terminálu velké množství vstupních údajů a při měření je nasbíráno velké množství dat. Tohle množství dat navíc nejde zobrazovat na samotném řídicím terminálu a nelze je dále zpracovávat. Bez ovládacího softwaru lze provádět pouze statickou zkoušku a to s určitým omezením.

Při provedení dynamické zkoušky je třeba ovládat vířivou brzdou softwarem v osobním počítači napojeným na řídicí terminál. V laboratoři DP-E jsou k tomuto účelu dva grafické programy, a to Brzda Dyn a OSVD. Brzda Dyn je software vytvořený pro účely dynamického měření. Dovede vykreslit momentovou a výkonovou charakteristiku, včetně pasivních odporů z dobové zkoušky, z průměru tří měření. Zprůměrovaná měření dovede mezi sebou také porovnávat. Program OSVD vznikl jako bakalářská práce [2], za účelem řízení válcového dynamometru. Program umožňuje libovolnou volbu režimu řízení vířivého dynamometru. Má široké možnosti nastavení vstupních parametrů a zpracování dat. V programu je velice dobře zpracovaná statická výkonová zkouška. Lze zde také zpracovávat hodnoty naměřené

atmosférickou sondou. Pro dynamickou zkoušku program zatím neumí zpracovávat data. Lze ale libovolně regulovaná data získaná z řídicího terminálu vzorkovat do textových souborů. Získané vzorky poté lze zpracovávat v jiném programu vhodném pro zpracování dat.

### 2.3 Momenty setrvačnosti zkušebního stavu

Momenty setrvačnosti zkušebního stavu je nutné přesně znát pro provedení dynamické zkoušky. Výpočtem měřicího kompletu vířivé brzdy s válcem včetně hřídelí, hřídelové spojky a přírub se zabývala práce [8] a následně po úpravách válce práce [1]. Ve výpočtu momentu setrvačnosti z těchto prací nebyl započten univerzální náboj z duralu sloužící k přišroubování rozety. Proto bylo nutné ho vypočítat. Výpočet byl proveden přes příslušný 3D CAD program, ve kterém byl náboj namodelován a po dosazení hustoty materiálu náboje vypočten. Momenty setrvačnosti kompletu brzdy s válcem a jejich součet jsou v následující Tabulce 3.

**Tabulka 3: Momenty setrvačnosti zkušebního stavu [1]**

| <b>Momenty setrvačnosti zkušebního stavu</b> |                                 |
|--|---------------------------------|
| Moment setrvačnosti válce s hřídelem         | 2,28905 kg·m <sup>2</sup>       |
| Moment setrvačnosti brzdy s hřídelem         | 0,41072 kg·m <sup>2</sup>       |
| Moment setrvačnosti hřídelové spojky         | 0,00349 kg·m <sup>2</sup>       |
| Moment setrvačnosti náboje pro rozetu        | 0,00645 kg·m <sup>2</sup>       |
| <b>Celkový součet momentů setrvačnosti</b>   | <b>2,70971 kg·m<sup>2</sup></b> |

Momenty setrvačnosti jednostopých vozidel se v současnosti určují pomocí empirických hodnot, rozdělených na moment setrvačnosti motoru  $J_M$  a kola  $J_K$ , viz [8]. Tyto hodnoty uvedené v Tabulce 4 ovšem nejsou zcela přesné a jsou příčinou systematické chyby, u které neznáme její velikost. Při měření dynamickou zkouškou je tedy třeba na tyto nepřesnosti brát ohled.



**Tabulka 4: Momenty setrvačnosti motocyklu [8]**

| <i>Typ motocyklu</i> | $J_K$ [kg·m <sup>2</sup> ] |
|----------------------|----------------------------|
| Moped                | 0,05 – 0,08                |
| Motocykl do 125 ccm  | 0,08 – 0,10                |
| Motocykl do 250 ccm  | 0,10 – 0,13                |
| Motocykl do 500 ccm  | 0,13 – 0,15                |
| Motocykl nad 500 ccm | 0,15 – 0,20                |
| <i>Typ motoru</i>    | $J_M$ [kg·m <sup>2</sup> ] |
| 1 válec do 125ccm    | 0,004 – 0,006              |
| 1 válec do 500ccm    | 0,009 – 0,012              |
| 2 válec do 250ccm    | 0,008 – 0,012              |
| 2 válec do 1 000ccm  | 0,040 – 0,060              |
| 4 válec do 500ccm    | 0,020 – 0,040              |
| 4 válec do 1 000ccm  | 0,030 – 0,055              |
| 4 válec nad 1 000ccm | 0,035 – 0,065              |

### 3 Návrh metod měření

Pro správné měření výkonu a ztrát motocyklu akcelerační zkouškou se musí určit vhodná metoda. V této kapitole je popsáno několik metod měření výkonu založených na zjištění momentů setrvačnosti motocyklu, které jsou proveditelné v laboratoři DP-E. Metody se liší hlavně náročností na provedení a přesností výsledků. Následující Tabulka 5 zobrazuje souhrn navržených metod měření proveditelných ve školní laboratoři DP-E.

Tabulka 5: Navržené metody měření

| METODA MĚŘENÍ  | POZNÁMKA   |
|--|--|
| Zjištění momentu setrvačnosti pomocí změny proudového zatížení brzdy.              | Proveditelná válcová i motorová zkouška.                         |
| Zjištění momentu setrvačnosti pomocí změny setrvačnosti brzdy.                     | Proveditelná pouze motorová zkouška.                             |
| Zjištění momentu setrvačnosti motoru pomocí změny převodového stupně.              | Potřeba znát moment setrvačnosti zadního kola u válcové zkoušky. |
| Zjištění momentu setrvačnosti odkýváním a namodelováním rotujících částí motocyklu | Je třeba rozebrat motocykl.                                      |
| Porovnání válcové a motorové zkoušky   | Nutné provést válcovou i motorovou zkoušku                       |
| Měření výkonu s empirickými hodnotami  | Dosavadní způsob měření.   |

První tři navržené metody uvedené v tabulce fungují na principu změny zrychlení u dvou různých měření vyvolané známou změnou jiného vstupního parametru. Zbylé tři metody jsou navrženy pro porovnání metod a rozšíření poznatků v této problematice.

Je potřeba měřit výkon motocyklu ve vhodném rozsahu otáček. Jawa 125 Dandy je vhodné měřit v rozsahu od pěti do deseti tisíc otáček za minutu. Všechny metody se provedou tak, že se nejprve naměří vhodný počet měření. Pro účely této bakalářské práce je vhodné provést 10 měření pro každou metodu. Poté se jednotlivá měření zpracují. Zpracovaná měření se zprůměrují, vykreslují do grafů a dále zpracovávají. Každá následující metoda se provede jak válcově, tak motorově. Jen pro metodu 3.2 se změnou setrvačnosti brzdy se provede pouze motorová zkouška, jelikož je nutné u této metody odpojit válec.

Před zahájením měření je také nutné provést přípravy:

- motocykl se upevní do stojanu či rámu,

- provede se kontrola a konečné nastavení motocyklu (tlak vzduchu v hnací pneumatice se nahušťuje na 3 bary),
- nachystá se odvod výfukových plynů a přívod vzduchu chlazení,
- zapne se řídicí terminál s počítačem a provede se kontrola zařízení,
- motocykl se zahřeje na provozní teplotu,
- zadají se vstupní údaje do ovládacího softwaru dynamometru.

### **3.1 Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí proudového zatížení brzdou**

Při této metodě se využívá toho, že lze vířivou brzdou libovolně vyvíjet brzdny moment budícím proudem. Hodnotu zatěžovacího momentu, kterým vířivá brzda zatěžuje motocykl, lze potom přesně změřit. Provedou se dvě měření. Jedno měření proběhne bez zátěže a druhé se zátěží. Rozdíl zatěžovacích momentů s rozdílem zrychlení poté umožní spočítat moment setrvačnosti vyjádřením ze vztahu pro výpočet momentu motoru, resp. pro výpočet pasivních odporů. Při této metodě se předpokládá, že výkon motoru a pasivní odpory jsou při každém měření stejné. [9]

#### **3.1.1 Postup metody**

Provede se příprava k měření motocyklu. Zvolí se vhodný převodový stupeň. Jawu 125 dandy bude nevýhodnější měřit na pátý převodový stupeň. Poté se provede deset měření bez zátěže. Uskuteční se orientační měření se zátěží pro určení zatěžovacího proudu. Zatížení nesmí být příliš velké kvůli změně dynamických dějů v motoru, kdy se mění jeho vnější charakteristika motoru a měří. Navíc motocykl nemusí být schopen dosáhnout horní hranice měřených otáček. Zároveň nesmí být příliš malé, aby se změna zatížení dostatečně projevila. Zaleží na typu motocyklu a také na jaký převodový stupeň se měření provádí. Určení zatěžovacího proudu se pro Jawu 125 Dandy odzkouší tak, že se odhadem nastaví zatěžovací proud (například 250 mA) a provede se měření motocyklu. Zatížená akcelerace by měla trvat v měřeném intervalu (5000 až 10000 otáček za minutu) zhruba dvojnásobek času nezatíženého měření. Je vhodné porovnat charakteristiky zatíženého a nezatíženého měření (stačí bez odečtených ztrát), zdali na výsledném grafu není očividná změna průběhu momentu a výkonu motoru. Při těchto porovnáních není důležité znát velikost momentu motoru a výkon, důležité je pouze porovnat, jestli se tvar křivky někde výrazně nerozchází.

Provede se deset měření se zátěží. Ze zatíženého a nezatíženého měření se použijí hodnoty momentů odečtené tenzometrickým snímačem na brzdě a hodnoty zrychlení. Pomocí

těchto dvou měření se z akcelerační části zkoušky vypočte moment setrvačnosti celého motocyklu. Vychází se z porovnání vztahů pro výpočet momentu motoru (16).

$$M_M = \frac{M_{BACC1} + M_{ZACC} + J_C \cdot \epsilon_{ACC1}}{i_C} = \frac{M_{BACC2} + M_{ZACC} + J_C \cdot \epsilon_{ACC2}}{i_C} \quad (16)$$

Kde moment vyvinutý brzdou při akceleraci a zrychlení při akceleraci s dolním indexem 1 znamená, že data pochází z prvního (nezatíženého) měření. Dolní index 2 značí druhé (zatížené) měření. Úpravou vzorců momentu motoru z obou měření a vyjádřením celkového momentu setrvačnosti vyjde:

$$J_C = \frac{M_{BACC1} - M_{BACC2}}{\epsilon_{ACC2} - \epsilon_{ACC1}} \quad (17)$$

Ze vztahu (17) plyne, že první měření nemusí být nezatížené. Jednotlivá měření však musí být zatížena různě.

Dále se vypočte moment setrvačnosti zadního kola s hnacím ústrojím po spojku z dobehových zkoušek. Stejně jako při akceleraci se moment setrvačnosti kola vypočte z nezatíženého a zatíženého měření rovnicí (19). Vychází se ze vztahu pro výpočet ztrátového momentu motocyklu:

$$M_{ZD} = (J_B + J_K \cdot i_{KV}^2) \cdot \epsilon_{D1} - M_{BD1} = (J_B + J_K \cdot i_{KV}^2) \cdot \epsilon_{D2} - M_{BD2} \quad (18)$$

$$J_K = \frac{M_{BD2} - M_{BD1}}{(\epsilon_{D1} - \epsilon_{D2}) \cdot i_{KV}^2} - \frac{J_B}{i_{KV}^2} \quad (19)$$

Vypočte se moment setrvačnosti motoru (21) vyjádřením ze vztahu pro výpočet celkového momentu setrvačnosti:

$$J_C = (J_M \cdot i_{MK}^2 + J_K) \cdot i_{KV}^2 + J_B \quad (14)$$

$$J_M = \frac{(J_C - J_B)}{i_C^2} - \frac{J_K}{i_{MK}^2} \quad (20)$$

Při motorové akcelerační zkoušce nebereme v úvahu moment setrvačnosti zadního kola a moment setrvačnosti motoru vypočteme z následujícího vztahu:

$$J_M = \frac{(J_C - J_B)}{i_{MK}^2} \quad (21)$$

Hodnoty momentů setrvačnosti se nevypočítají jako jedna konkrétní hodnota, ale jako průběh v závislosti na čase resp. na otáčkách. Z této závislosti vyplyne konkrétní hodnota momentu setrvačnosti. Nakonec se vypočtou pasivní odpory a výsledný moment motoru včetně výkonu.

## 3.2 Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí změny setrvačnosti brzdy

Tato metoda funguje na podobném principu, jako metoda zatěžování proudem. Stejně jako v předchozím případě se provedou dvě měření s různým zatížením motocyklu. Rozdíl je však ve způsobu zatěžování. Při této metodě se využívá změny momentu setrvačnosti brzdy. Lze toho dosáhnout například zkonstruováním přídatného setrvačnicku na osu brzdy. Jelikož je výroba přídatného setrvačnicku velmi časově a rozpočtově náročná, rozhodl jsem se u této metody provést pouze motorovou zkoušku a tím získat pouze moment setrvačnosti motoru. Změna setrvačnicku pak byla realizována odpojením válce (setrvačnicku) určeného pro měření výkonu na zadním kole motocyklu. Hodnota momentu setrvačnosti válce je výrazně vyšší oproti hodnotě momentu setrvačnosti samotné brzdy, proto lze očekávat, že hodnoty měření budou zkresleny vlivem změny dynamických dějů v motoru.

### 3.2.1 Postup metody

Provede se příprava k měření motocyklu. Válec brzdy zůstane nejdříve připojený. Zvolí se vhodný převodový stupeň. Protože má samotný dynamometr poměrně malý moment setrvačnosti, zvolí se pro Jawu 125 Dandy pátý převodový stupeň. Akcelerace bude trvat déle a lépe vystihne jízdní režim motocyklu.

Provede se deset měření, které se zprůměrují do jednoho. Poté se odpojí válec od brzdy a provede se znovu deset měření, které se zprůměrují. Pomocí těchto dvou měření se z akcelerační části zkoušky vypočte moment setrvačnosti motoru  $J_M$ . Jako v předchozí metodě vyjdeme ze vztahu pro výpočet momentu motoru. Musíme ale zohlednit měření motorovou zkouškou bez zadního kola:

$$M_M = \frac{M_{BACC1} + M_{ZACC} + (J_M \cdot i_{MK}^2 + J_{B1}) \cdot \epsilon_{ACC1}}{i_{MK}} = \frac{M_{BACC2} + M_{ZACC} + (J_M \cdot i_{MK}^2 + J_{B2}) \cdot \epsilon_{ACC2}}{i_{MK}} \quad (22)$$

Koncové číslo dolního indexu 1 označuje veličiny naměřené z prvního měření a dolní index 2 označuje veličiny naměřené při druhém měření (bez válce). Po úpravě rovnice (22) a vyjádření momentu setrvačnosti motoru vznikne následující vztah:

$$J_M = \frac{M_{BACC2} - M_{BACC1} + J_{B2} \cdot \epsilon_{ACC2} - J_{B1} \cdot \epsilon_{ACC1}}{i_{MK}^2 (\epsilon_{ACC1} - \epsilon_{ACC2})} \quad (23)$$

Moment setrvačnosti motoru se vypočítá jako průběh v závislosti na čase, resp. na otáčkách, ze kterého vyplyne konkrétní hodnota momentu setrvačnosti.

### 3.3 Metoda zjištění momentu setrvačnosti měřením na rozdílné převodové stupně

Pomocí této metody se dá zjistit pouze moment setrvačnosti motoru. Při válcovém měření je nutné znát moment setrvačnosti zadního kola (zjištěný například odkýváním uvedeném v kapitole 3.4) a převodového ústrojí po hnanou část spojky (možno zanedbat). Provedou se dvě měření, z nichž první měření probíhá na jiný převodový stupeň jako měření druhé. Tím se mění zatížení motoru a na dynamometru se naměří rozdílné zrychlení. Při předpokladu, že při obou měření bude motor vykonávat stejný průběh výkonu, lze porovnáním výsledků z obou měření zjistit moment setrvačnosti motoru.

#### 3.3.1 Postup metody

Provede se příprava k měření motocyklu. Zvolí se převodové stupně, na které se bude měření provádět. Pro Jawu 125 Dandy se bude měřit na pátý a čtvrtý převodový stupeň. Dále bude popisována pouze varianta na pátý a čtvrtý převodový stupeň. Dále se provede deset měření včetně doběhové zkoušky na pátý převodový stupeň. Poté se provede deset měření včetně doběhové zkoušky na čtvrtý převodový stupeň.

Z provedených měření se získají potřebné hodnoty zrychlení válce, hodnoty z tenzometrického snímače brzdy a hodnoty ztrát z doběhové zkoušky (výhoda pro motorovou zkoušku, pro válcovou zkoušku musíme znát moment setrvačnosti zadního kola). Pro výpočet momentu setrvačnosti motoru se bude vycházet z rovnic pro výpočet točivého momentu motoru:

$$M_M = \frac{M_{BACC5} + M_{ZACC} + J_C \cdot \epsilon_{ACC5}}{i_{C5}} = \frac{M_{BACC4} + M_{ZACC} + J_C \cdot \epsilon_{ACC4}}{i_{C4}} \quad (24)$$

Koncové číslo dolního indexu 5 označuje veličiny měřené na pátý převodový stupeň a dolní index 4 označuje veličiny měřené na čtvrtý převodový stupeň. Rovnici rozepíšeme na následující tvar:

$$\begin{aligned} M_M &= \frac{M_{BACC5} + M_{ZACC5} + (J_M \cdot i_{MK5}^2 + J_K) \cdot i_{KV}^2 + J_B \cdot \epsilon_{ACC5}}{i_{MK5} \cdot i_{KV}} \\ &= \frac{M_{BACC4} + M_{ZACC4} + (J_M \cdot i_{MK4}^2 + J_K) \cdot i_{KV}^2 + J_B \cdot \epsilon_{ACC4}}{i_{MK4} \cdot i_{KV}} \end{aligned} \quad (25)$$

Z tohoto tvaru už lze vyjádřit moment setrvačnosti motoru  $J_M$ .

$$J_M = \frac{i_{MK5}(M_{BACC4} + M_{ZACC4} + J_K \cdot i_{KV}^2 \cdot \epsilon_{ACC4} + J_B \cdot \epsilon_{ACC4}) - i_{MK4}(M_{BACC5} + M_{ZACC5} + J_K \cdot i_{KV}^2 \cdot \epsilon_{ACC5} + J_B \cdot \epsilon_{ACC5})}{i_{KV}^2 \cdot i_{MK4} \cdot i_{MK5} \cdot (\epsilon_{ACC5} - \epsilon_{ACC4})} \quad (26)$$

Jelikož se u této metody počítá, že je znám moment setrvačnosti zadního kola, tak lze vypočítat člen zahrnující ztráty z dobehové zkoušky pro čtvrtý a pátý převodový stupeň  $M_{ZACC4}$  a  $M_{ZACC5}$  vycházející z rovnice (11).

U motorové zkoušky se pro výpočet momentu setrvačnosti motoru vychází z předešlého vztahu, není v něm ovšem zahrnut moment setrvačnosti kola a převodový poměr kolo-válec.

$$J_M = \frac{i_{MK5}(M_{BACC4} + M_{ZACC4} + J_B \cdot \epsilon_{ACC4}) - i_{MK4}(M_{BACC5} + M_{ZACC5} + J_B \cdot \epsilon_{ACC5})}{i_{MK4} \cdot i_{MK5} \cdot (i_{MK5} \cdot \epsilon_{ACC5} - i_{MK4} \cdot \epsilon_{ACC4})} \quad (27)$$

Hodnoty momentů setrvačnosti se vypočítají jako jeden průběh v závislosti na čase resp. na otáčkách. Z této závislosti se statisticky určí hodnota momentu setrvačnosti. Nakonec se vypočtou pasivní ztráty, výsledný moment a výkon motoru.

### 3.4 Namodelování a odkývání rotujících částí

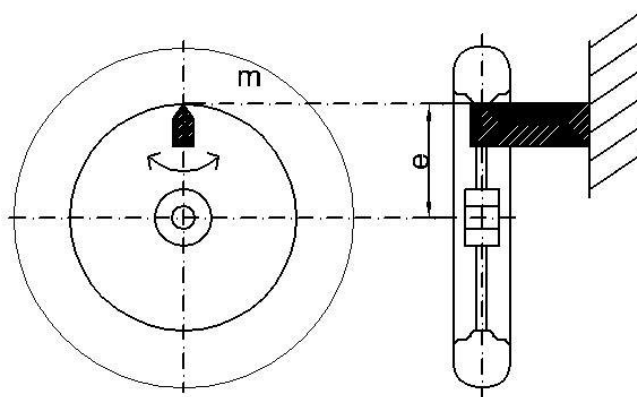
Zjištění momentu setrvačnosti motocyklu nutné pro přesné změření výkonu a ztrát akcelerační zkouškou na válcovém dynamometru se dá také provést pomocí metody, při které je nutné rozebrat motocykl. Rotující díly motocyklu lze namodelovat ve vhodném programu, který spočítá jejich momenty setrvačnosti. Další možnost je zjistit momenty setrvačnosti pomocí fyzikálního kyvadla. Vhodná je kombinace těchto dvou metod, kde se namodeluje pohonné ústrojí motocyklu kromě zadního kola a zadní kolo se odkývá.

#### 3.4.1 Postup metody

Pokud není k dispozici technická dokumentace pohonného ústrojí motocyklu, tak je pro namodelování rotujících dílů motoru a převodovky zapotřebí kompletně demontovat motor motocyklu. Po demontáži se jednotlivé díly motocyklu postupně změří a namodelují ve vhodném 3D CAD programu, v mém případě školní verze Creo Pro Engineer. Největší část momentu setrvačnosti motoru tvoří klikový hřídel a vše, co je s klikovým hřídelem pevně spojeno. Pro přesné změření ztrát je vhodné moment setrvačnosti hnací části spojky redukovat na osu klikového hřídele. Moment setrvačnosti hnané části spojky, převodové ústrojí převodovky a sekundární převod je vhodné redukovat na osu zadního kola vzhledem k principu dobehové zkoušky.

Moment setrvačnosti zadního kola se určí odkýváním. Nejdříve se zadní kolo demontuje z motocyklu. Připraví se pevně uchycený trn, na který se kolo pověsí za ráfek. Je potřeba ještě nejdřív změřit vzdálenost uložení kola na trnu od těžiště kola a kolo zvážit. Kolo

se na trnu rozkývá do malých kmitů. Kolo se nesmí vychýlit od svislé osy o víc než 6°. Pomocí stopek se poté stopuje doba periody kmitu. Schéma odkývání kola je na Obrázku 8.



**Obrázek 8: Schéma odkývání kola**

Výsledné hodnoty se poté dosadí do vztahu (28) pro výpočet momentu setrvačnosti odvozeného z fyzikálního kyvadla.

$$J_K = m \cdot g \cdot e \cdot \left( \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} - \frac{e}{g} \right) \quad (28)$$

|       |                      |  |
|-------|----------------------|--|
| $J_K$ | [kg·m <sup>2</sup> ] | moment setrvačnosti kola                       |
| $m$   | [kg]                 | hmotnost                                       |
| $T$   | [s <sup>-1</sup> ]   | perioda  |
| $e$   | [m]                  | vzdálenost středu kyvu od osy těžiště kola     |
| $g$   | [m·s <sup>-1</sup> ] | gravitační konstanta (9,81 m·s <sup>-1</sup> ) |

Poté se k momentu setrvačnosti zadního kola přičte moment setrvačnosti hnané části spojky, převodové ústrojí a sekundární převod redukováný na osu zadního kola.

Při akcelerační zkoušce se do vstupních parametrů zadají vypočtené momenty setrvačnosti. Provedou se tři měření, které se zprůměrují do jednoho a určí se ztráty, točivý moment a výkon motoru.

### 3.5 Porovnání válcové a motorové zkoušky, určení odporu kola

Při provedení motorové akcelerační zkoušky se eliminuje vliv valivého odporu mezi pneumatikou a válcem, odpor vzduchu rotujícího zadního kola a také se eliminuje vliv skluzu pneumatiky na měření. To umožňuje provést přesnější měření. Porovnáním válcové a motorové zkoušky lze zjistit součet hodnot odporu valení a odporu vzduchu rotujícího kola.



Hodnota odporu valení se zjistí tak, že se u všech uvedených metod měření provede rozdíl ztrát z válcové zkoušky a zkoušky motorové.

$$M_{ZK} = M_{ZV} - M_{ZM} \quad (29)$$

$M_{ZV}$  – Ztrátový moment z válcové zkoušky redukován na válec,

$M_{ZM}$  – ztrátový moment z motorové zkoušky redukován na válec,

$M_{ZK}$  – ztrátový moment zadního kola redukován na válec.

### 3.6 Metoda měření výkonu s empirickými hodnotami

Tato metoda je velice jednoduchá. Do vstupních parametrů akcelerační zkoušky se zadají tabulkové momenty setrvačnosti podle konstrukčního provedení daného typu motocyklu. Poté se provedou tři měření, které se zprůměrují do jednoho a určí se pasivních ztráty, moment a výkon motoru. Při tomhle měření dochází k vědomému vzniku systematické chyby. Pokud tyto hodnoty pochází z neznámého zdroje a nejsou z vlastních zkušeností ověřeny, není možné určit, jak velká chyba vzniká a zda je tato chyba zanedbatelná či ne. Empirické momenty setrvačnosti jsou použity z tabulky 4. Pro Jawu 125 Dandy jsem vybral moment setrvačnosti kola  $J_K$  o hodnotě  $0,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a moment setrvačnosti motoru  $J_M$  o velikosti  $0,005 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .

## 4 Experimentální měření

Experimentální měření se školním motocyklem Jawa 125 Dandy se provádělo jako válcová tak motorovou zkouškou. K provedení motorové zkoušky bylo třeba vhodně zajistit uchycení motoru a převod motoru na osu hřídele dynamometru. K měření byl použit software OSVD, který umožňuje široké nastavení ovládní brzdy. Výstupní data tento software umožňuje logovat do textových souborů, ze kterých se dále zpracovávaly. Pro zpracování dat do jednotlivých navržených metod bylo využito programového prostředí Matlab.

### 4.1 Příprava pro měření motorovou zkouškou

Pro uskutečnění motorové zkoušky bylo třeba zajistit co nejjednodušší a praktické řešení. Jelikož kliková skříň motoru Jawy 125 Dandy je součástí i její převodovky, tak nebylo možné dynamometr napojit přímo na klikový hřídel. Bylo tedy nutné zachovat primární převodový poměr a převod převodovky. Pro co nejjednodušší spojení motoru s osou válce bylo zachováno i sekundárního řetězového převodu. Tím sice odpadla mechanická účinnost převodového ústrojí mezi kolem a válcem  $\eta_{KV}$  s odporem vzduchu rotujícího kola, ale mechanická účinnost  $\eta_{MK}$  převodového ústrojí mezi klikovou hřídelí a kolem, resp. brzdou, byla zachována.



Obrázek 9: Rám pro odstrojený motocykl

Na Obrázku 9 je rám, který byl zkonstruován, aby uchytil odstrojený motocykl. Tím se zredukovala pracnost na provedení motorové zkoušky na minimum, jelikož nebylo třeba motocykl celý rozebrat. Všechny komponenty nutné pro běh motoru zůstaly upevněny v rámu motocyklu na svém místě.



**Obrázek 10: Motocykl připraven k měření**

Rám byl zkonstruován tak, že motocykl je v něm výkyvně připevněn šroubovými spoji vedle montážní jámy brzdy, jak zobrazuje Obrázek 10. K náboji na výstupním konci dynamometru byla připravena redukce na rozetou zadního kola Jawy 125 dandy. Tím zůstal zachován stejný převodový poměr sekundárního převodu. Pro spojení pastorku na výstupním konci převodovky s rozetou přišroubovanou k náboji brzdy bylo potřeba použít prodloužený řetěz. Výkyvné uložení motocyklu k rámu umožňuje napínání řetězu šroubováním matic na závitové tyči.

## 4.2 Realizace experimentálního měření

### 4.2.1 Motorová zkouška

Měření byla provedena v několika sériích, z nichž každá série měření měla určitou modifikaci. Jednotlivé série se při zpracování dat kombinovaly podle zvolené metody zjištění momentu setrvačnosti navržené v předchozí kapitole. Přehled měření s různými modifikacemi, které byly použity v jednotlivých navržených metodách, znázorňuje Tabulka 6.

Tabulka 6: Navržené metody měření

| Metoda                   | Použité modifikace měření | Zatěžovací proud [mA] | Převodový stupeň | Připojení válce |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Zatížení brzdy proudem   | bez modifikace            | 0                     | 5                | ano             |
|                          | s proudem                 | 300                   | 5                | ano             |
|                          | s proudem                 | 400                   | 5                | ano             |
| Změna převodového stupně | bez modifikace            | 0                     | 5                | ano             |
|                          | jiný převod               | 0                     | 4                | ano             |
| Změna setrvačnosti brzdy | s proudem                 | 300                   | 5                | ano             |
|                          | s proudem                 | 400                   | 5                | ano             |
|                          | změna setrvačnosti        | 300                   | 5                | ne              |
|                          | změna setrvačnosti        | 400                   | 5                | ne              |

První série měření proběhla bez modifikací, tzn. na pátý převodový stupeň, zatěžovací proud byl nastaven na nulovou hodnotu a válec byl připojen. Každá zkouška obsahovala akceleraci a následný doběh. Doba akcelerace trvala poměrně krátkou dobu a to přibližně 2 až 2,5 sekund. Může za to nízký moment setrvačnosti brzdy s válcem a vyšší převodový poměr než při válcovém měření.

Další dvě série měření proběhly při zátěži proudem. První série s proudem 300mA a druhá s proudem 400mA. Zrychlení při akceleraci se značně snížilo. Zejména ve vysokých otáčkách s proudem 400mA bylo zrychlení velice malé. Je to dáno charakteristikou vířivé brzdy. U doběhu bylo naopak záporné zrychlení velké.

Při měření na čtvrtý převodový stupeň se měřilo bez zatížení proudem. Tato měření se porovnávala pouze s měřeními bez modifikací.

Měření se změnou setrvačnosti brzdy proběhlo s odpojeným válcem. Vzhledem k velice velkému poměru momentu setrvačnosti válce vůči momentu setrvačnosti rotoru brzdy, který je vyšší než 5:1, bylo naměřené zrychlení při měření bez proudu tak rychlé, že by

bylo nepoužitelné. Zkouška bez válce byla měřena jen s proudem 300mA a 400mA. Hodnoty proudů jsou stejné jako při zkoušce s válcem pro možnost porovnání.

#### 4.2.2 Válcová zkouška

Válcová měření byla provedena rovněž několika sériemi s různými modifikacemi jako zkouška motorová. Odpadla zde metoda se změnou setrvačnosti brzdy, kdy tato změna byla u motorové zkoušky provedena odpojením válce, který je nutný pro uskutečnění zkoušky válcové. Před samotným zahájením válcové zkoušky bylo nutné nejdříve změřit dynamický poloměr kola. To bylo provedeno tak, že se porovnávaly otáčky motoru, změřené multiskopem PMS 100 na sekundárním zapalování, a otáčky motoru změřené na válci. Měření proběhlo při zatížení a ustálených otáčkách na  $7000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Dynamický poloměr kola je 289 mm. Následující Tabulka 7 zobrazuje přehled provedených měření pro válcovou zkoušku.

Tabulka 7: Přehled válcových měření

| Metoda                   | Použité modifikace měření | Zatěžovací proud [mA] | Převodový stupeň |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|
| Zatížení brzdy proudem   | bez modifikace            | 0                     | 5                |
|                          | s proudem                 | 200                   | 5                |
| Změna převodového stupně | bez modifikace            | 0                     | 5                |
|                          | jiný převod               | 0                     | 4                |

Po sérii měření bez modifikací, které proběhly bez problémů, bylo uskutečněno měření se zátěží proudem. Proudové zatížení bylo nastaveno na 200 mA. Touto hodnotou se zrychlení při zkoušce dostatečně změnilo a motocykl neměl problém dosáhnout maxima měřených otáček. Měření na čtvrtý převodový stupeň, probíhající při nulovém zatížení proudem, proběhlo opět standardně.

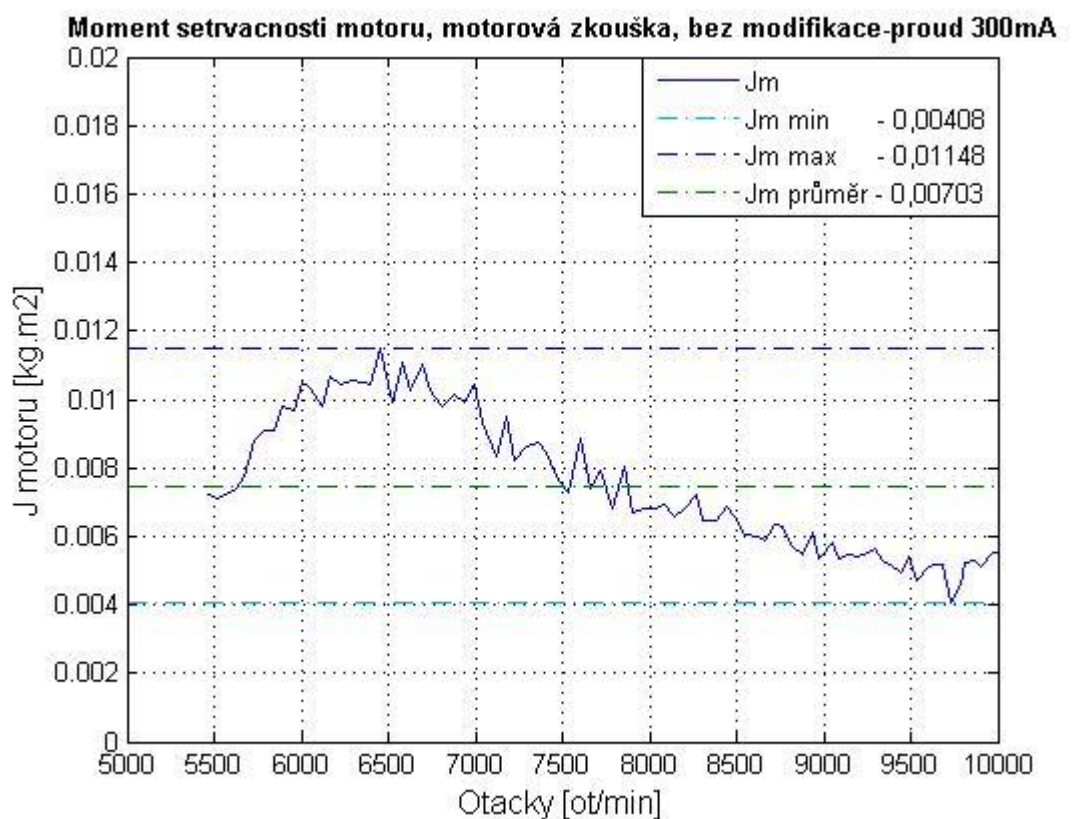
### 4.3 Zpracování navržených metod měření

Data z měření obsahovala vzorky času, budícího proudu, momentu z tenzometrického snímače a otáčky válce a motoru. Data bylo nejprve nutné rozdělit na akceleraci a doběh. Poté byl proveden výpočet zrychlení motoru a následovalo filtrování dat klouzavým průměrem s exponenciálním zapomínáním. Všechna potřebná data bylo poté třeba interpolovat na jediný vektor otáček. Pro jednotlivé metody byl vypočten moment setrvačnosti podle vztahů uvedených v kapitole 3. Výsledné momenty nevycházely jako konstanta, ale jako průběh

v závislosti na otáčkách. Jako výchozí hodnota momentu setrvačnosti byl zvolen průměr z tohoto průběhu.

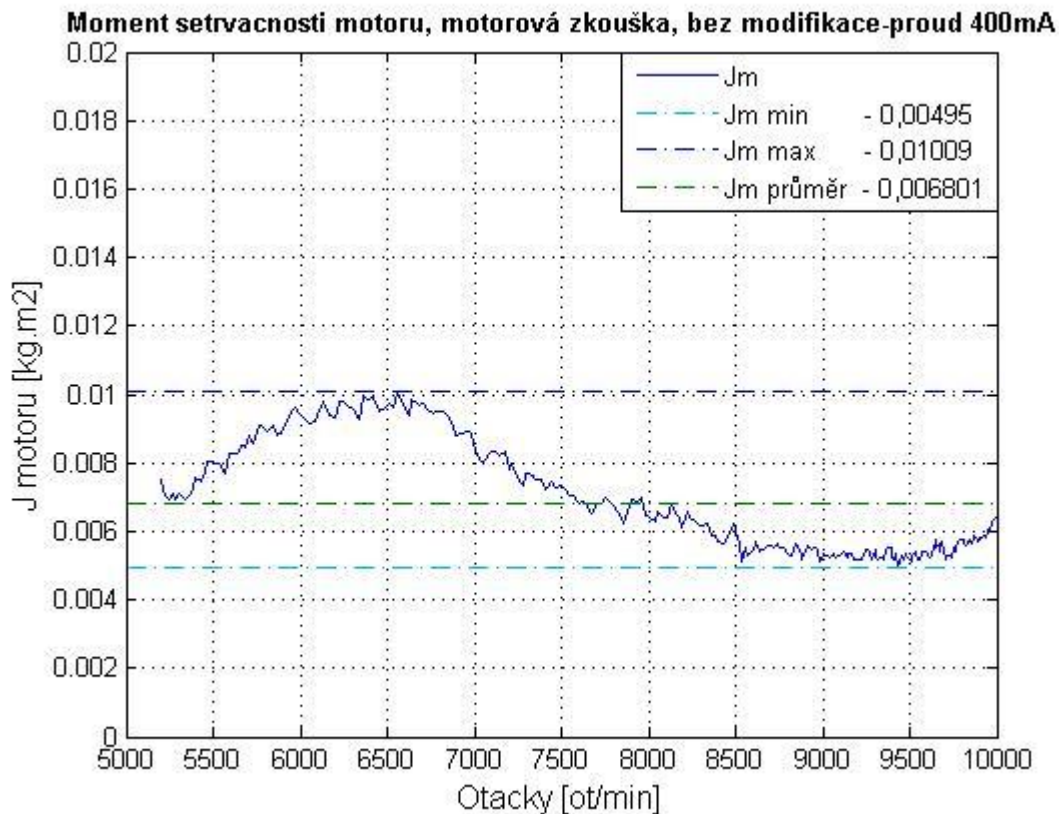
#### 4.3.1 Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí proudového zatížení brzdou

Průběh momentu setrvačnosti motoru pro tuto metodu je vypočten dle rovnice (17) a následně (21). Pro jeho výpočet bylo nejdříve použito dat bez modifikací a dat se zátěží proudem 300 mA. Výsledný průběh z těchto měření je vyobrazen na Grafu 1. Maximální hodnota je  $0,01148 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a minimální  $0,004082 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Průměrná hodnota je  $0,007482 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .



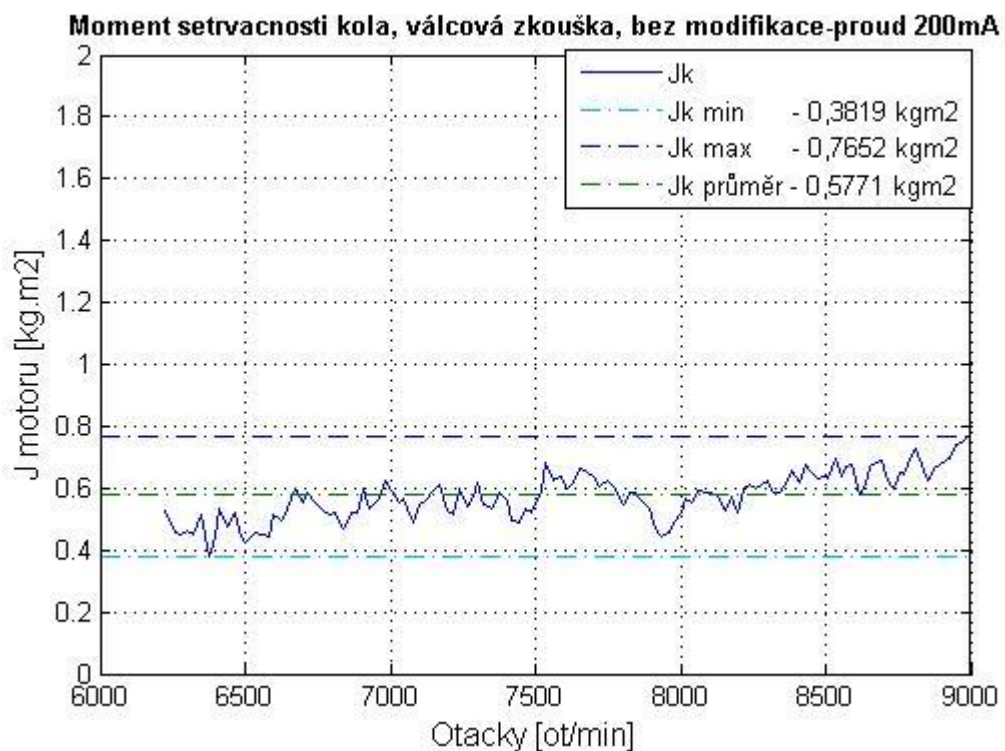
**Graf 1: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, bez modifikace – proud 300mA**

Graf 2 zobrazuje moment setrvačnosti motoru při použití dat bez modifikace a zatížení proudem 400 mA. Z tohoto grafu lze vyčíst, že průměrná hodnota nepatrně klesla a to na hodnotu  $0,0068 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Minimální hodnota potom je  $0,00495 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a maximální hodnota je  $0,01009 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .

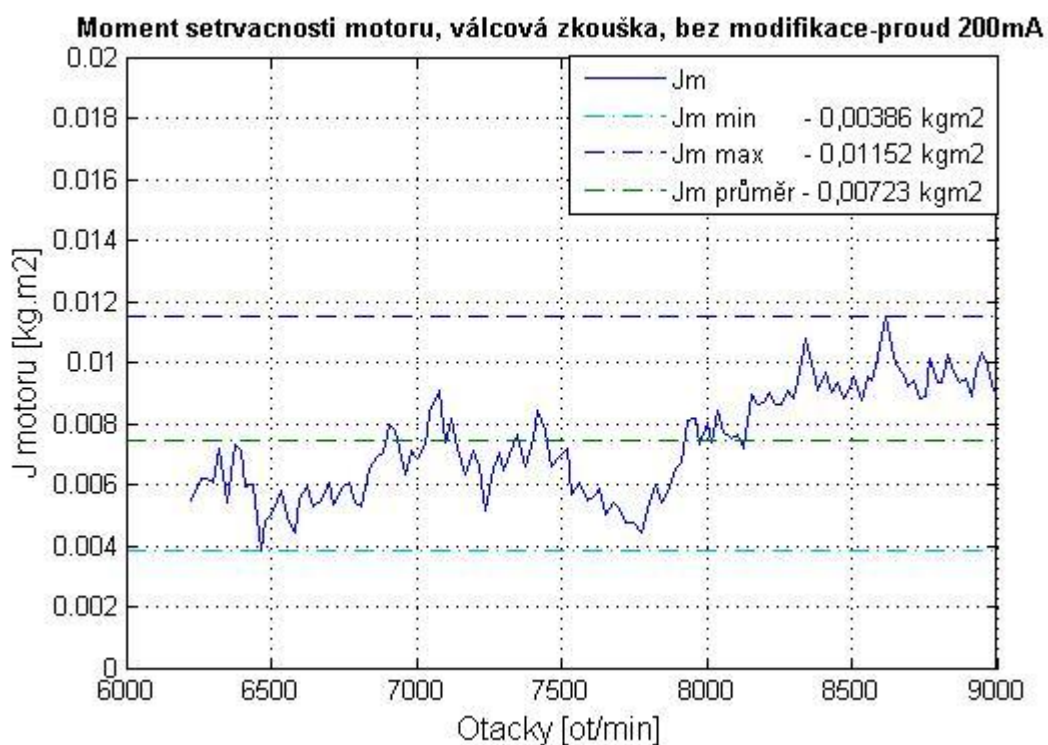


**Graf 2: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, bez modifikace – proud 400mA**

Válcové měření momentu setrvačnosti motoru a kola bylo zpracováno v rozsahu od 6000 do 9000 otáček za minutu. Důvod tohoto snížení otáčkového rozsahu je ten, že při počátku akcelerace a počátku doběhu nedocházelo k ustálenému zrychlení motoru. Tím pádem nebylo možné mezi sebou porovnávat hodnoty zrychlení z různých měření. Vypočtené hodnoty momentů setrvačnosti byly v blízkosti pěti a deseti tisíci otáčkách za minutu značně deformované a vychylovaly se do nesmyslných absolutních hodnot. Hodnota zatěžovacího proudu u zatíženého měření byla 200 mA. Na Grafu 3 je průběh momentu setrvačnosti kola vypočtený z doběhových zkoušek podle rovnice (19). Jeho průměrná hodnota je  $0,577 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Graf 4 zobrazuje průběh momentu setrvačnosti motoru. Zde průměrná hodnota dosahuje hodnoty  $0,0073 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .



**Graf 3: Moment setrvačnosti kola z válcové zkoušky, bez modifikace – 200mA**

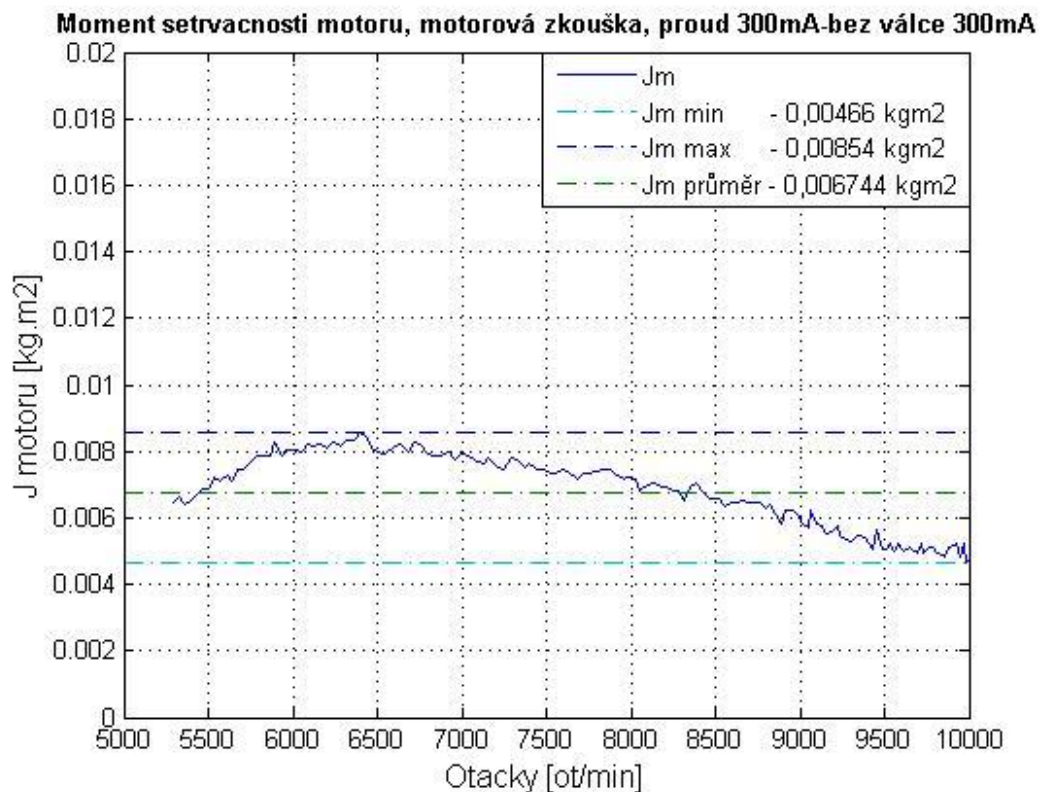


**Graf 4: Moment setrvačnosti motoru z válcové zkoušky, bez modifikace – 200mA**

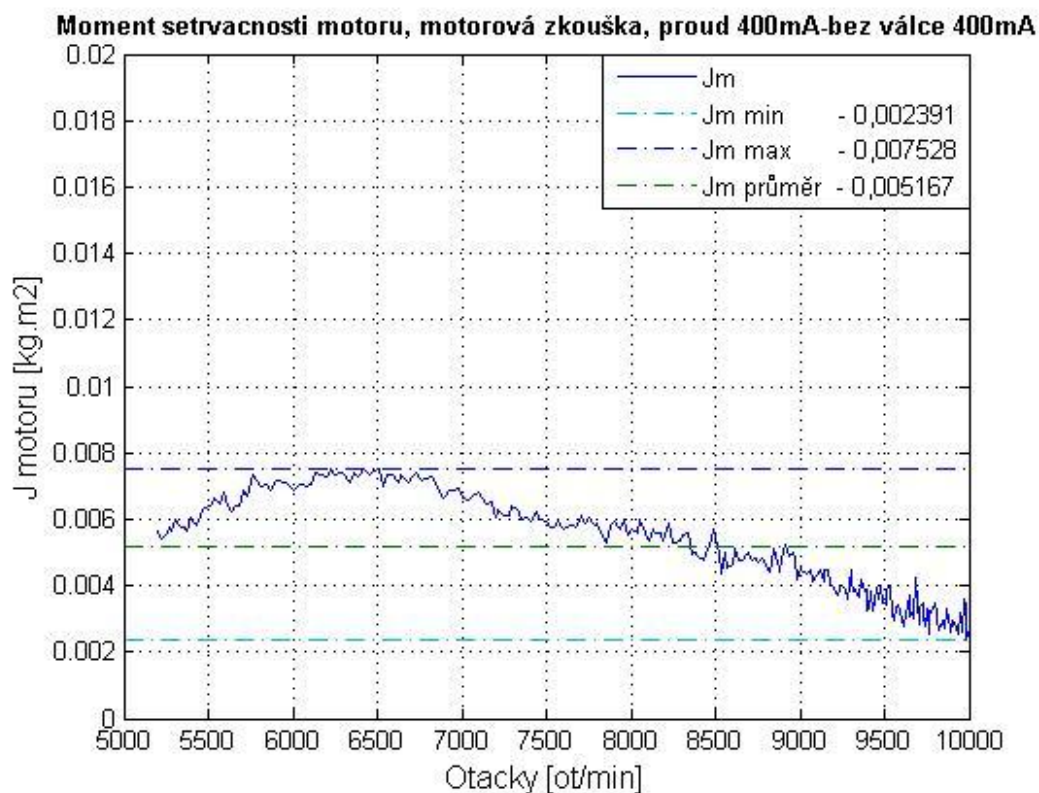


### 4.3.2 Metoda zjištění momentu setrvačnosti pomocí změny setrvačnosti brzdy

U této metody bylo nutné přitížit jednotlivé zkoušky s válcem i bez válce proudem o stejné hodnotě. To u obou porovnávaných měření vyvolalo přibližně stejnou hodnotu zatěžovacího momentu v závislosti na otáčkách. Graf 5 zobrazuje graf s vypočteným průběhem momentu setrvačnosti motoru. Měření v tomto případě byla přitížena zatěžovacím proudem 300 mA. Průměrná hodnota je  $0,006744 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , minimální  $0,00495 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a maximální  $0,01009 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Na Grafu 6 je graf z měření momentu setrvačnosti, které bylo přitíženo proudem 400 mA. Průměrná hodnota zde vyšla  $0,005167 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , minimální hodnota  $0,002391 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a maximální  $0,007582 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Oproti měření se zátěží 300 mA zde došlo k výraznějšímu posunu hodnot.



Graf 5: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, s proudem 300mA – bez válce 300mA



**Graf 6: Moment setrvačnosti motoru při motorové zkoušce, s proudem 400mA – bez válce 400mA**

### 4.3.3 Metoda zjištění momentu setrvačnosti měřením na rozdílné převodové stupně

Moment setrvačnosti motoru vypočten jako průběh v závislosti na otáčkách motoru byl nepoužitelný. Je proto vypočten numericky a to postupným vyčíslením výsledného momentu motoru na čtvrtý a pátý převodový stupeň. Při každém vyčíslení se krokově zvyšoval moment setrvačnosti motoru, dokud se hodnoty momentu motoru z obou měření nevyrovnaly. Poté byl moment setrvačnosti odečten a jeho výsledná hodnota pro motorovou zkoušku je  $0,0062 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . U válcového měření bylo znovu použito numerické metody výpočtu momentu setrvačnosti motoru. Hodnota tentokrát vyšla  $0,0101 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ .

### 4.3.4 Namodelování a odkývání rotujících částí

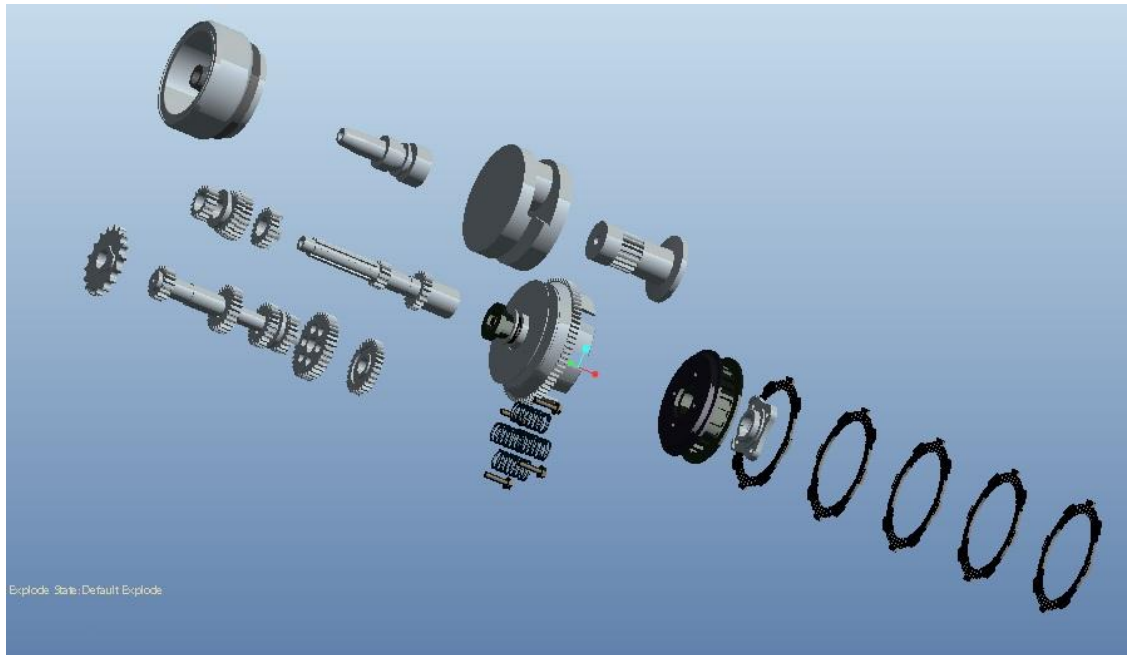
Odkývání zadního kola proběhlo tak, že se kolo na trnu vychýlilo přibližně o  $6^\circ$  a stopoval se čas dvaceti kyvů. Tento čas se poté vydělil dvaceti a vyšla perioda  $T$  jednoho kyvu. Tento proces byl opakován pětkrát. Poté byly výsledné periody kyvu kola zprůměrovány. Doba periody kyvu zadního kola činí 1,31 s. Po zvážení hmotnost kola činila 9,06 kg a vzdálenost středu kyvu od těžiště byla změřena na 203,5 mm. Výsledný

moment setrvačnosti vypočtený dle vztahu (28) vyšel  $0,41 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Na Obrázku 11 je fotka kývajícího se kola.



**Obrázek 11: Odkývání zadního kola na trnu**

Moment setrvačnosti motoru byl vypočten pomocí školní verze 3D CAD systému Creo Pro Engineer. Pro tento účel bylo nutné rozebrat celý motor Jawy 125 Dandy. Všechny rotující díly motoru i převodovky byly změřeny a namodelovány. Hnačí část spojky byla redukována na osu klikového hřídele. Ostatní hmotové momenty setrvačnosti převodovky byly redukovány na osu rotace zadního kola. Obrázek 12 zobrazuje sestavu namodelovaných částí motocyklu v rozložené formě.

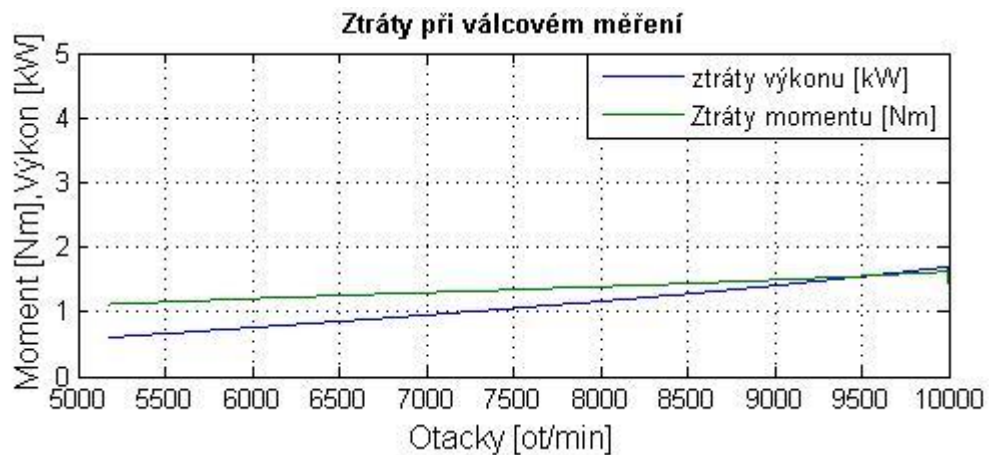


**Obrázek 12: Modely rotačních částí motoru a převodovky**

Konečná hodnota momentu setrvačnosti na klikovém hřídeli vyšla  $0,0084 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Konečná hodnota momentu setrvačnosti zadního kola s redukovánými momenty setrvačnosti převodovky vyšla  $0,43 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Momenty setrvačnosti motoru a kola vypočtené touthle metodou budou dále sloužit jako referenční hodnoty momentů setrvačnosti.

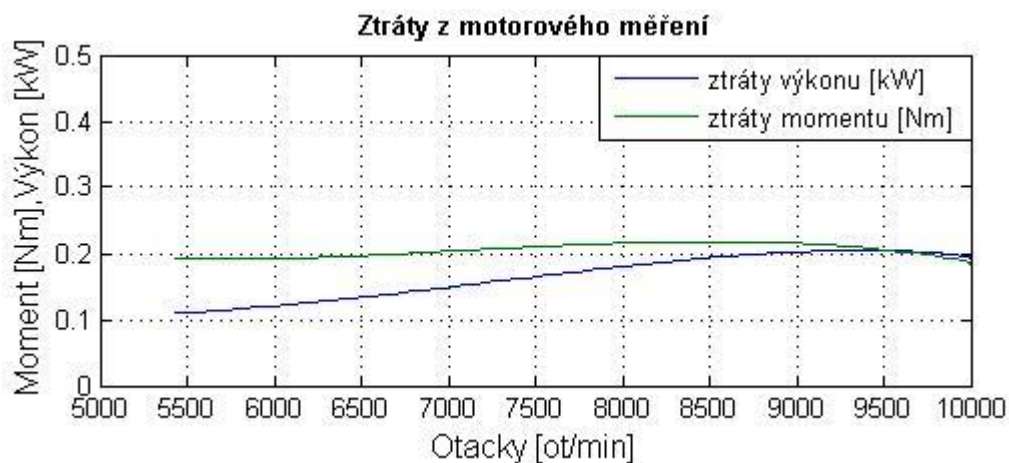
#### 4.3.5 Porovnání válcové a motorové zkoušky, určení odporu kola

Výpočet ztrát motocyklu doběhovou zkouškou byl proveden při válcovém a motorovém měření. Při válcovém měření byl získán ztrátový moment a výkon celého motocyklu včetně ložiskového odporu a odporu vzduchu brzdy s válcem. Odpory brzdy s válcem nejsou známy, ale předpokládá se, že jejich hodnota je velmi malá. Ztráty z válcového měření jsou zobrazeny na Grafu 7.



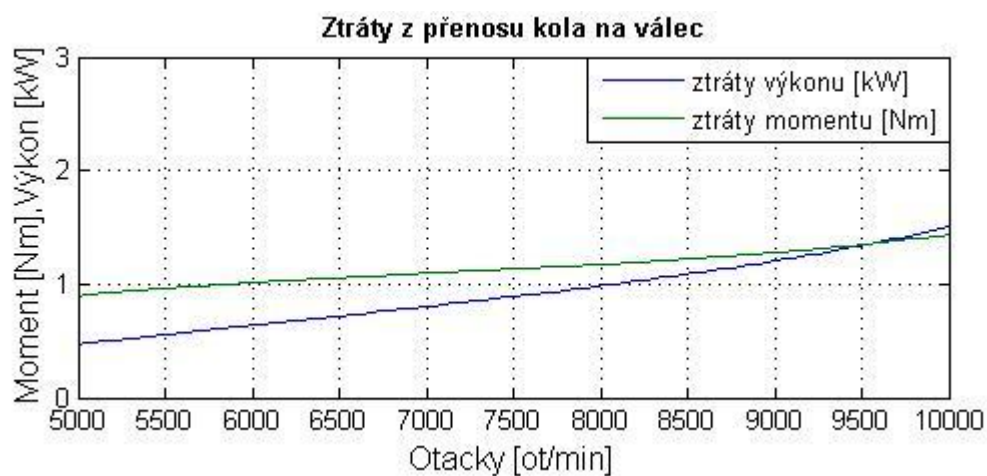
**Graf 7: Ztráty při válcovém měření**

U motorového měření byly naměřeny ztráty převodového ústrojí a ztráty dynamometru s brzdou. Ztráty z motorového měření zobrazuje Graf 8.



**Graf 8: Ztráty při motorovém měření**

Odečtením ztrát z motorového měření od ztrát z válcového měření dle rovnice (29) získáme ztráty vzniklé při přenosu zadního kola na válec, ztráty odporu vzduchu a ložiskového odporu zadního kola zobrazené následujícím Grafu 9.



**Graf 9: Ztráty z přenosu kola na válec**

Z Grafu 9 je patrné, že zadní kolo způsobuje výkonové ztráty motocyklu redukované na osu klikového hřídele až 1,5 kW.

## 5 Vyhodnocení navržených metod a diskuze

Výsledky navržených metod zobrazuje Tabulka 8. Moment setrvačnosti vypočten z modelu a odkýváním zadního kola je referenční hodnota.

Tabulka 8: Výsledky navržených metod

| METODA                       | MODIFIKACE METODY                               | $J_M$ [kg·m <sup>2</sup> ] | $J_K$ [kg·m <sup>2</sup> ] |
|------------------------------|---|----------------------------|----------------------------|
| Výpočet z modelu a odkýváním |   | 0.0084                     | 0.43                       |
| Zatížení proudem             | motorové měření, bez modifikace-zatížení 300mA  | 0.0070                     |                            |
|                              | motorové měření, bez modifikace-zatížení 400mA  | 0.0064                     |                            |
|                              | válcové měření, bez modifikace-zatížení 200mA   | 0.0073                     | 0.58                       |
| Změna setrvačnosti brzdy     | motorové měření, zatížení 300mA-bez válce 300mA | 0.00674                    |                            |
|                              | motorové měření, zatížení 400mA-bez válce 400mA | 0.00517                    |                            |
| Změna převodového stupně     | motorové měření                                 | 0.0062                     |                            |
|                              | válcové měření                                  | 0.0101                     |                            |
| Empirické hodnoty            |   | 0.005                      | 0.09                       |

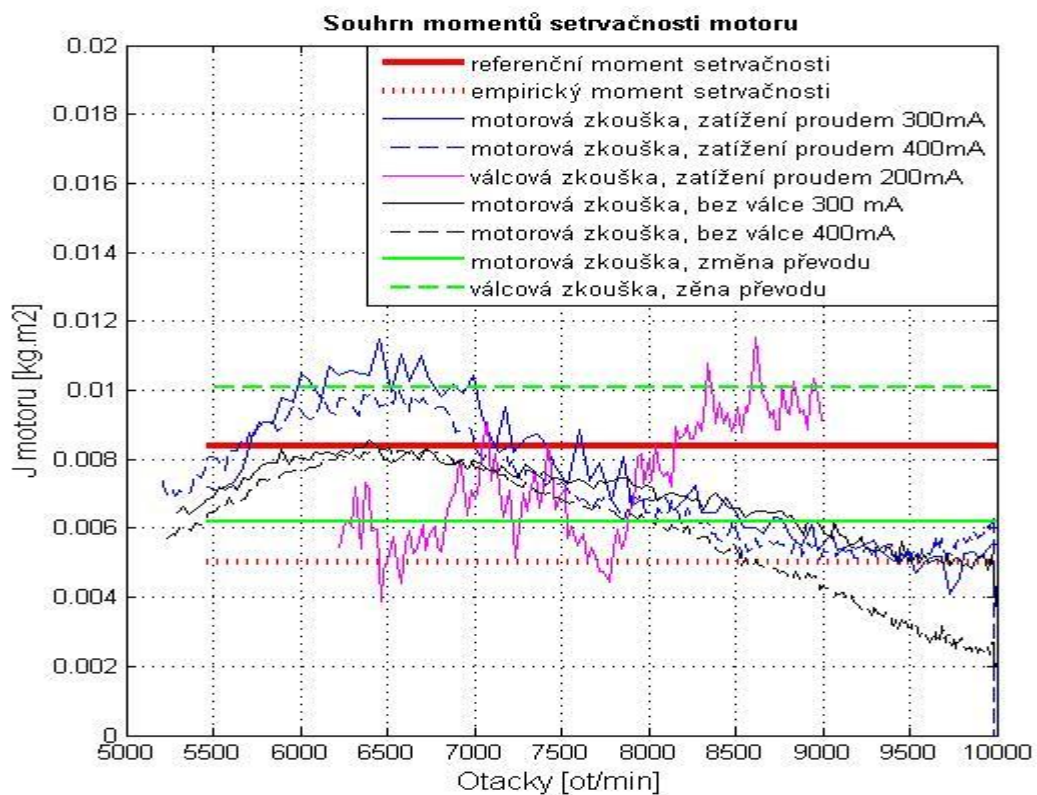
U měření provedených motorovou zkouškou se referenční hodnotě nejvíce přibližuje metoda se změnou zatížení brzdy proudem o hodnotě 300 mA. Hodnota této metody dosahuje 0,0070 kg·m<sup>2</sup>. Při té samé metodě, ale se změnou zatížení proudem 400 mA hodnota momentu setrvačnosti vychází 0,0064 kg·m<sup>2</sup>. Následující metodou je zjištění momentu setrvačnosti vyvolané změnou setrvačnosti brzdy. U této metody, při které byly obě porovnávaná měření zatíženy proudem 300 mA, vyšel moment setrvačnosti 0,00674 kg·m<sup>2</sup>. Při měření provedených se zátěží 400 mA bylo dosaženo hodnoty 0,00517 kg·m<sup>2</sup>. Moment setrvačnosti vypočtený porovnáním měření na rozdílné rychlostní stupně bylo dosaženo hodnoty 0,0062 kg·m<sup>2</sup>. Empirický moment setrvačnosti motoru je 0,005 kg·m<sup>2</sup>. Tato hodnota

je nejvíce vzdálená vypočtené referenční hodnotě momentu setrvačnosti a ukazuje se být nejhorší z porovnávaných metod.

Metodou změny momentového zatížení brzdy proudem a změnou zatížení odpojením válce, kdy byly provedeny motorová měření s dvěma modifikacemi při různých zatěžovacích proudech 300 mA a 400 mA, jde vidět určitý pokles hodnot momentů setrvačnosti motoru. Vypočtený moment setrvačnosti je tedy závislý na velikosti momentového zatížení proudem.

U válcového měření nejlépe dopadla metoda se změnou momentového zatížení brzdy proudem. Byla dosažena hodnota  $0.0073 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Moment setrvačnosti zjištěn porovnáním měření na rozdílné rychlostní stupně se také příliš nevzdaluje od referenční hodnoty a vyšel  $0.0101 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Nejhuře, stejně jako u motorové zkoušky, dopadla empirická hodnota  $0,005 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Moment setrvačnosti kola vypočtený z porovnání momentem nezatížené a zatížené dobové zkoušky vyšel  $0,58 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Empirický moment setrvačnosti kola o velikosti  $0,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  je vzdálený referenční hodnotě o více než čtyřnásobek své hodnoty.

Graf 10 pro názornost zobrazuje průběhy všech vypočtených momentů setrvačnosti motoru na jednom grafu.



Graf 10: Souhrn momentů setrvačnosti

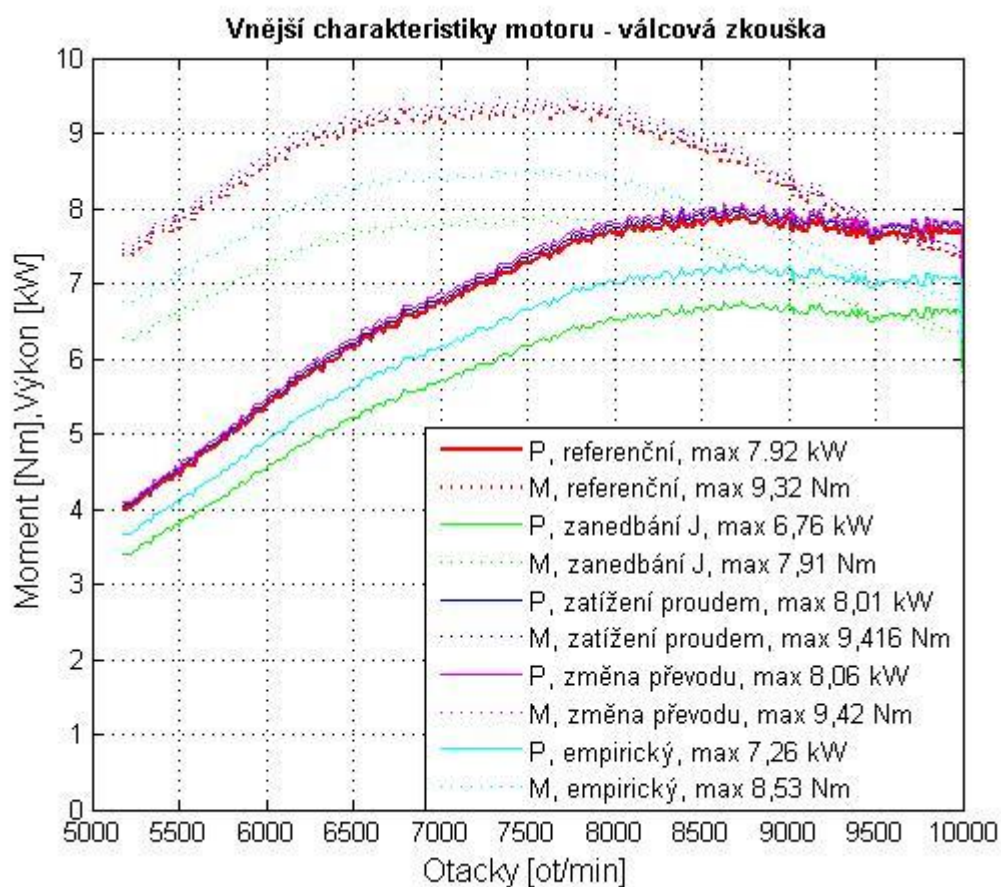
Výsledné tvary průběhů momentů setrvačnosti se příliš nepřibližují konstantám. To může být dané tím, že při dvou porovnávaných měření není skutečný průběh momentu motoru stejný a je posunutý vlivem rozdílného zrychlení.

## 5.1 Výsledné výkonové a momentové charakteristiky motoru

Výpočet výkonu a momentu motoru byl zpracován u válcové i motorové zkoušky z dat bez modifikací, tedy na pátý převodový stupeň bez zatěžovacího proudu. Výsledné průběhy jsou vždy průměrem z deseti měření.

### 5.1.1 Válcová zkouška

Na Grafu 11 jsou zobrazeny vnější výkonové a momentové charakteristiky motoru u válcové zkoušky. Jednotlivé charakteristiky se liší zadanou hodnotou momentu setrvačnosti motoru a kola z provedených metod pro válcovou zkoušku uvedených v tabulce 8. Vnější charakteristiky daného momentu setrvačnosti mají přiřazenou jednotnou barvu. Výkonové charakteristiky jsou zobrazovány souvislou čarou. Momentové jsou naznačeny tečkovanou z důvodu velkého počtu čar v grafu a tím pádem lepší přehlednosti.



**Graf 11: Charakteristiky válcové zkoušky s různě zadanými momenty setrvačnosti**



Červenou barvou jsou zobrazeny charakteristiky se zadanou referenční hodnotou  $J_M = 0,0084 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a  $J_K = 0,43 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Maximální výkon motoru vychází 7,92 kW. Zelená barva je přiřazena hodnotám se zanedbáním momentů setrvačnosti, takže  $J_M = 0 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a  $J_K = 0 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Rozdíl naměřeného maxima výkonu motoru je 1,16 kW. Modrá barva zobrazuje výsledek se zadanými hodnotami  $J_M = 0,0073 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a  $J_K = 0,58 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , které patří k metodě se změnou momentového zatížení proudem. Výsledná maximální hodnota výkonu je 8,01 kW. Tato metoda se velice přibližuje referenční hodnotě s rozdílem 0,09 kW díky tomu, že nižší moment setrvačnosti motoru je kompenzován vyšším naměřeným momentem setrvačnosti kola. Fialovou barvou jsou zobrazeny charakteristiky s momentem setrvačnosti motoru, který je zjištěn porovnáním měření na rozdílné převodové stupně. Hodnoty jsou tedy  $J_M = 0,0101 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a  $J_K = 0,43 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Pro moment setrvačnosti kola byla zadána referenční hodnota, jelikož takhle metoda neumožňuje vypočítat moment setrvačnosti kola. Rozdíl maxima výkonu 0,14 kW, což není příliš vychylující se hodnota. Poslední zelenomodrá charakteristika je vypočtena se zadanými empirickými hodnotami, tedy  $J_M = 0,005 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  a  $J_K = 0,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Zde je vidět, jak jsou tyhle empirické hodnoty nepřesné. Rozdíl mezi referenční a empirickou hodnotou maxima výkonu je 0,66 kW.

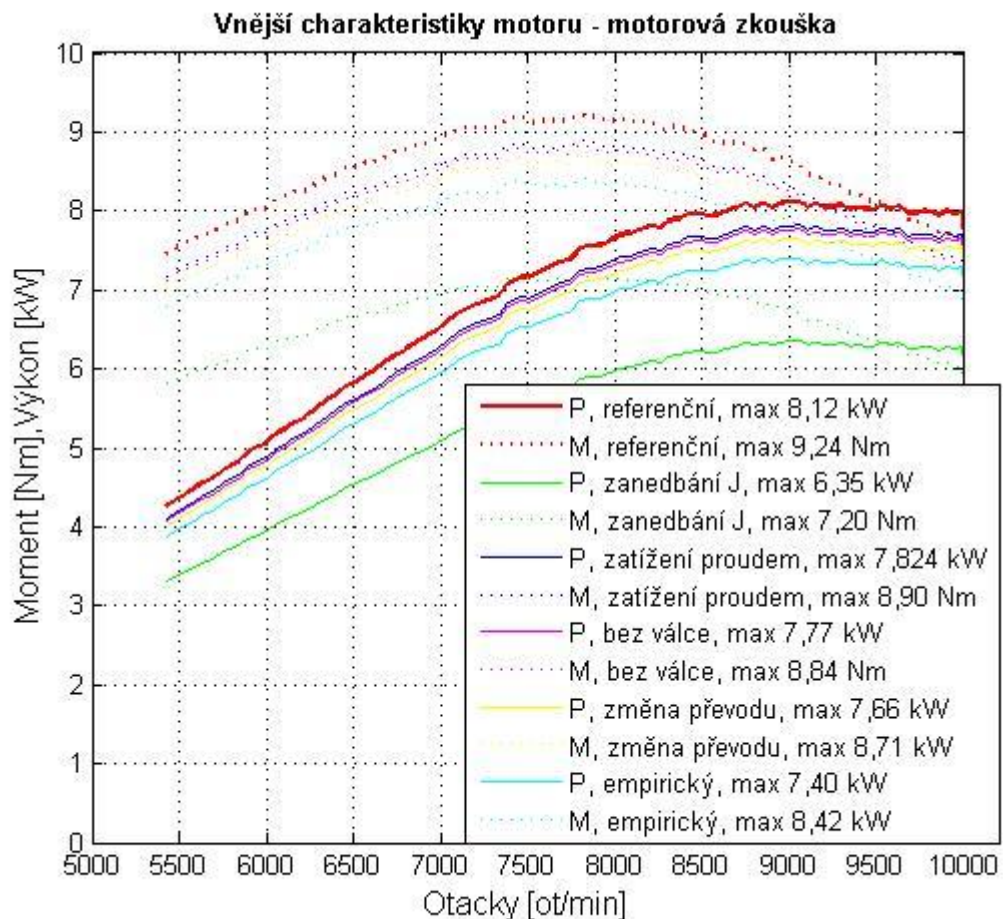
Tabulka 9 zobrazuje pro názornost srovnání špatně zadaných hodnot momentů setrvačnosti motoru a kola motocyklu. Projevy jsou zobrazeny jako odchylka v procentech výsledného výkonu. Srovnávají se chyby při úplném zanedbání momentu setrvačnosti a u změny zadání o malý krok.

**Tabulka 9: Vliv špatně zadané hodnoty momentu setrvačnosti při válcovém měření**

| Zadaná hodnota J                                  | maximální hodnota výkonu | procentuální odchylka výkonu |
|---|--------------------------|------------------------------|
| skutečný výkon                                    | 7,92 kW                  |                              |
| zanedbání $J_m$                                   | 7,25 kW                  | 8,5%                         |
| snížení $J_m$ o $0,001 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ | 7,84 kW                  | 1%                           |
| zanedbání $J_k$                                   | 7,43 kW                  | 6,2%                         |
| snížení $J_k$ o $0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$   | 7,81 kW                  | 1,4%                         |
| zanedbání $J_m$ i $J_k$                           | 6,76 kW                  | 14,6%                        |

### 5.1.2 Motorová zkouška

Charakteristiky motoru z motorové zkoušky zobrazuje Graf 12. Jednotlivé průběhy výkonu a momentu jsou zde zobrazovány a popisovány stejným systémem jako u zkoušky válcové. U průběhů odpovídajícím metodám změny momentového zatížení proudem a odpojení válce jsou zobrazeny pouze modifikace s proudovým zatížením 300 mA z důvodu přehlednosti grafu. Použité hodnoty momentů setrvačnosti z jednotlivých metod souhlasí s tabulkou 8. Rozdíl referenční hodnoty a hodnoty se zanedbáním momentu setrvačnosti činí 1,77 kW. Rozdíl referenční hodnoty s nejvíce se blížící metodou se zatížením proudem činní 0,296 kW. U metody s odpojením válce je rozdíl 0,35 kW, se změnou převodu 0,66kW a s empirickými hodnotami 0,72 kW.



Graf 12: Charakteristiky z motorové zkoušky s různě zadanými momenty setrvačnosti

Tabulka 10 zobrazuje srovnání špatně zadaných hodnot momentů setrvačnosti motoru a vliv na výslednou odchylku od skutečného výkonu u motorové zkoušky.

**Tabulka 10: Vliv špatně zadané hodnoty momentu setrvačnosti při motorovém měření**

| Zadaná hodnota J                                    | maximální hodnota výkonu | procentuální odchylka výkonu |
|---|--------------------------|------------------------------|
| skutečný výkon                                      | 8,12 kW                  |                              |
| zanedbání $J_m$                                     | 6,35 kW                  | 21,8%                        |
| snížení $J_m$ o $0,001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ | 7,90 kW                  | 2,6%                         |

Srovnáním odchylek zjištěných chyb z válcové a motorové zkoušky je zřetelné, že motorová zkouška je citlivější na špatně zadanou hodnotu momentu setrvačnosti motoru než zkouška válcová. Tyto chyby jsou silně závislé na tom, jaký je skutečný poměr setrvačných hmot testovaného vozidla a válcového dynamometru. Tím pádem také záleží na velikosti převodového poměru mezi testovaným vozidlem a válcovým dynamometrem. Obecně platí, že čím je poměr momentu setrvačnosti válcového dynamometru větší oproti momentům setrvačnosti měřeného vozidla redukováných na osu válce, tím je hodnota momentu setrvačnosti přesnější.

## 6 Závěr

V této bakalářské práci zabývající se měřením výkonu akcelerační metodou byla rozepsána obecně problematika měření výkonu. Dále byl rozepsán rozbor akcelerační metody a popsán problém související s momenty setrvačnosti. Provedla se analýza aktuálních podmínek pro měření výkonu v laboratoři DP-E, ve které se uskutečnilo experimentální měření. Laboratoř je v nově vybudovaném výukovém a výzkumném centru, kde byla v provozu prvním rokem. Byly navrženy metody pro výpočet momentu setrvačnosti motoru a kola měřeného motocyklu. Tyto metody jsou převážně založeny na principu porovnání dvou měření se známým rozdílným zatížením motocyklu. To umožňuje, za předpokladu stejně velkého skutečného výkonu a skutečných ztrát motocyklu, vypočítat potřebný moment setrvačnosti. Pro srovnání byla zjištěna hodnota momentu setrvačnosti motoru výpočtem z namodelovaných rotujících částí motocyklu pomocí 3D CAD programu. Tyto hodnoty jsou dále brány jako hodnoty skutečné. Hodnota momentu setrvačnosti kola byla zjištěna odkýváním a odvozením ze vztahu fyzikálního kyvadla. Experimentální měření bylo provedeno motorovou a válcovou zkouškou. U motorové zkoušky bylo potřeba zkonstruovat rám pro uchycení motocyklu. Uskutečnila se měření s modifikacemi, které byly potřeba pro navržené metody. Výsledkem z každé metody byla průměrná hodnota z deseti měření. Metody byly následně vyhodnoceny.

Nejvíce se skutečné hodnotě přibližuje metoda s momentovým zatěžováním dynamometru proudem. Metoda umožňuje poměrně široké možnosti zatěžování a dobrou opakovatelnost měření. Navíc jako jediná z metod umožňuje výpočet momentu setrvačnosti kola při válcové zkoušce. Při této metodě však musí přesně fungovat tenzometrický snímač síly na brzdě a je zde velká možnost udělat chybu měření. Méně přesná metoda je s měřením na rozdílné převodové stupně. Tato metoda má velice dobrou opakovatelnost měření, ale umožňuje změřit pouze moment setrvačnosti motoru a závisí na přesném určení ztrátového momentu a výkonu. Metoda, kde se zatížení motoru provedlo známou změnou momentu setrvačnosti brzdy tím, že se odpojil válec, je poměrně málo přesná. Tato nepřesnost je způsobena hlavně díky velkému poměru momentu setrvačnosti válce vůči momentu setrvačnosti rotoru brzdy, který je vyšší než 5:1. Opakovatelnost tohoto měření je nepatrně nižší než u předešlých metod, jelikož je třeba mechanicky odpojit válec. Pomocí všech uvedených metod však bylo dosaženo znatelně přesnějších výsledků, než pokud se měří výkon motoru se zadanými empirickými hodnotami.

Akcelerační metoda je i v běžné praxi brána spíše jako orientační. Pro přesné zjištění výkonových parametrů by bylo třeba udělat těchto zkoušek větší množství. Navržené metody pro výpočet momentů setrvačnosti motocyklu sice zpřesňují výsledné hodnoty, avšak stále jsou zde různé nejistoty, které nejsou známy.

## 7 Použité zdroje

- [1] MAŠEK, Zdeněk. *Programové řízení dynamometru pro zkoušení pohonu vozidel*, Pardubice 2005. Diplomová práce, UPCE
- [2] HONS, Lukáš. *Ovládací software pro stanoviště válcového dynamometru*. Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [3] VLK, František. *Diagnostika motorových vozidel*. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 444 s. ISBN 80-239-7064-X.
- [4] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel /.* vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [5] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4.
- [6] *Měření výkonu spalovacího motoru*. [počítačový soubor]. Dopravní fakulta Jana Pernera, University Pardubice.
- [7] *Pohony pro zatěžování a měření na zkušebnách a v laboratořích*. Www.propohony.cz [online]. 9.3.2011 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.propohony.cz/technologicka-reseni/141-pohony-pro-zatezovani-a-mereni-na-zkusebnach-a-v-laboratorich>
- [8] HACKENBERGER, M. *Návrh vybavení odborné laboratoře měření výkonu a autodiagnostiky*, Pardubice, 2004. Diplomová práce na UPCE DFJP KDP.
- [9] *Method for determining engine moment of inertia* [patent]. United States Patent, 4,036,049. Uděleno 19.7.1977.