



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## NÁVRH DYNAMOMETRU PRO ZÁVODNÍ PNEUMOBIL

PNEUMOBILE DYNAMOMETER DESIGN

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matyáš Fritscher

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Filip Jeniš

BRNO 2021



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Matyáš Fritscher</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Filip Jeniš</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh dynamometru pro závodní pneumobil

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na ÚK již několik let funguje Pneumobil Racing Team Brno – studentský tým stavící závodní monoposty poháněné stlačeným vzduchem. Vozidla je během vývoje třeba testovat – buď v ostrém provozu na závodním okruhu, nebo v laboratorních podmínkách na dynamometru. Druhá možnost má výhodu testování za každého počasí a stále stejných okolních podmínek. Na základě zkoušek je potom možné optimalizovat převodové poměry apod.

Typ práce: vývojová – konstrukční

**Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je konstrukční návrh dynamometru a volba testovacích módů pro měření výkonu a spotřeby závodního pneumobilu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- návrh testovacích režimů,
- konstrukční návrh dynamometru,
- výběr brzdy a jejího ovládání,
- návrh měřicího řetězce.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. Elektrické pohony a jejich řízení. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.

ATKINS, Richard D. An introduction to engine testing and development. Warrendale, Pa.: SAE International, 2009. ISBN 0768020999.

VLK, František. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. Brno: Vlk, 2001. ISBN 80-238-6573-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem měřicí stanice s dynamometrem pro závodní pneumobil vyvíjený studentským týmem. Zařízení má za cíl usnadnit a zpřesnit ladění vozidla pro různé disciplíny. V úvodní části práce je provedena rešerše stávajících řešení komerčních dynamometrů. Dále je v rámci výběru vhodné brzdy posouzena možnost úpravy brzdy, která byla univerzitou nabídnuta k opětovnému využití pro tento projekt. Po ověření, že splňuje nutné požadavky, následuje představení několika koncepčních návrhů. Pro vybranou vlastní koncepci se specifickým řešením pro toto vozidlo je pak provedeno konstrukční řešení včetně ověření bezpečnosti vybraných konstrukčních uzlů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

dynamometr, pneumobil, řemenový pohon, hřídel, náboj

## ABSTRACT

This bachelor thesis concerns design of measuring station with a dynamometer for a racing pneumobile developed by a student team. The aim of this device is to simplify the process of tuning of the vehicle and to make it more precise. At the beginning of the work, there is a research of current commercial solutions of dynamometer stations. Then, while choosing a suitable brake, there is an evaluation of the possibility of repurposing an old brake, given by the university for this project. After verifying that it meets the necessary requirements, there are several concept solutions presented. For the selected concept, with a specific design for this vehicle, there is a complete design solution including safety analysis of selected nodes.

## KEYWORDS

dynamometer, pneumobile, belt drive, shaft, hub



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FRITSCHER, Matyáš. *Návrh dynamometru pro závodní pneumobil*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Filip Jeniš.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Filipu Jenišovi za jeho čas, ochotu, odborné vedení a cenné rady.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Filipa Jeníše. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Válcové zkušebny	15
2.2	Motorové zkušebny	17
2.3	Typy brzd	20
2.4	Popis fungování školní stanice	22
2.5	Popis fungování pneumobilu	24
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>25</b>
3.1	Zkušební módy	25
3.2	Brzdy	26
3.3	Koncepce zkušebny	26
3.4	Specifikace cíle	27
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>28</b>
4.1	Srovnání parametrů školní zkušebny a pneumobilu	28
4.2	Koncepty	29
4.2.1	Varianta 1 - Válcová zkušebna jednoduchá	29
4.2.2	Varianta 2 - Válcová zkušebna s elektromotorem	30
4.2.3	Varianta 3 - Zkušebna s částečnou demontáží	31
4.2.4	Varianta 4 - Motorová zkušebna	32
4.3	Zhodnocení variant	32
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>34</b>
5.1	Řemenový převod	35
5.2	Náboj s řetězovými koly	36
5.3	Hlavní hřídel a její uložení	37
5.3.1	Kontrola hřídele	38
5.4	Napínák řemene	41
5.5	Rám stanice	43
5.5.1	Řešení napínání řetězu	43
5.6	Měřicí řetězec	44

5.7	Postup přípravy stanice	46
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>51</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>53</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>54</b>

# 1 ÚVOD

Závodní vozidla jsou navrhována zpravidla jako průběžně se vyvíjející prototyp, jehož vývoj reflektuje zkušenosti z testování a závodů. Tento fakt je ještě zdůrazněn komplikovaností až nemožností zahrnout do teoretických výpočtů všechny provozní podmínky vozidla. Proto je zejména pro toto odvětví klíčové podrobné a neustálé testování, napodobující reálný provoz.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem měřicí stanice pro účely Pneumobil Racing Team Brno. Pneumobily jsou vozidla poháněná stlačeným vzduchem, která se účastní každoroční soutěže. V současné době je využívána dvoustupňová převodovka namísto původní čtyřstupňové, a to z důvodu spolehlivosti a váhy. Proto je ještě více než dříve potřeba naladit převodové poměry tak, aby vyhovovaly jak ve sprintu, tak ve vytrvalostním závodě.

Ty však nelze příliš dobře navrhnout bez znalosti průběhu výkonu a točivého momentu v závislosti na otáčkách a postupně klesajícím plnicím tlaku. Zkušební jízdy, potřebné pro sběr dat, však nelze vždy podstoupit, ať už z povětrnostních důvodů, nedostupnosti vhodného prostoru nebo neúplnosti vozidla z důvodu probíhajících prací.

Proto vznikla potřeba navrhnout měřicí stanici vybavenou dynamometrem. Dalším důvodem, proč je pro závodní tým měření výkonu a točivého momentu v různých režimech velmi důležité, je snadné posouzení vlivu provedených úprav na pohonu vozidla.

Z ekonomických důvodů se jeví výhodně možnost rekonstrukce nevyužívané školní motorové zkušebny pro tyto účely.

V rámci této práce bude proveden návrh testovacích módů a ovládání a posouzena proveditelnost rekonstrukce s ohledem na rozdílnost parametrů závodního vozidla a původního školního zkušebního motoru, v případě nemožnosti rekonstrukce i výběr jiné vyhovující brzdy. Dalším krokem pak bude konstrukční návrh rámu pro uchycení vozidla a součástí pro převod kroutícího momentu na hřídel zvoleného dynamometru.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Dynamometr určuje výkon pomocí měření síly (točivého momentu) potřebného k udržení konkrétní rychlosti (otáček za minutu). Software poté vypočte výkon podle níže uvedených vztahů, s případnou korekcí dalšími proměnnými.

$$P = M * \omega \quad (2.1)$$

Kde:

P výkon,

M točivý moment v daných otáčkách

$\omega$  úhlová rychlost

Hodnotu točivého momentu získáme následovně:

$$M = F * x \quad (2.2)$$

Kde:

x rameno k tenzometrickému členu

F síla na něm změřená

Úhlová rychlost je vypočtena pomocí snímače počtu otáček za minutu:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.3)$$

Kde:

n otáčky za minutu

Z hlediska zatížení lze metody měření výkonových parametrů motoru na zkušebnách rozdělit:

- **Statická zkouška**

Motor je zatížen retardérem (dynamometrem), který regulací udržuje konstantní otáčky. Pomocí snímače jsou měřeny otáčky a na známém rameni je z tenzometrického členu určena síla. Výpočtem je pak určen točivý moment a výkon. Výhodou je nezávislost na momentech setrvačnosti jednotlivých dílů, které nejsou vždy přesně zjistitelné. Nevýhodou je, že výstupem není spojitý graf, ale body, a také dlouhý časový průběh zkoušky.

- **Dynamická zkouška**

Motor je během akcelerace zpravidla zatížen pouze setrvačností rotujících dílů (válce, ale také setrvačnick, převodovka, kola) a průběžně je měřeno úhlové zrychlení. Výsledný kroutící moment se pak určí pomocí vztahu:

$$M_k = \alpha * I \quad (2.4)$$

Kde:

I celkový moment setrvačnosti

$\alpha$  úhlové zrychlení

Je však nutné znát momenty setrvačnosti všech rotačních částí v řetězci s dostatečnou přesností. Pokud nejsou tyto údaje k dispozici, má dynamicky zjišťovaný výkon motoru pouze informativní charakter. [1]

Někteří výrobci (např. MotoComTest) používají korekci ztrát přenosu měřením ztrát při vymáčknuté spojce během zpomalování kola (tzv. doběhová zkouška). Měření ztrát lze urychlit díky schopnosti softwaru dopočítat kompletní křivku ztrát z určitých úseků. [2]

Dynamickou zkoušku lze také realizovat na stanici s vířivou brzdou nebo stejnosměrným strojem, kde lze elektricky simulovat setrvačné účinky vozidla namísto použití přídavných rotujících dílů. Okamžitý brzdňý moment je vypočítáván v závislosti na dodaném výkonu od motoru, setrvačných účincích vozidla a teoretickém proměnném odporu vzduchu a vozovky. [3]

Vstupními parametry pro software je hmotnost vozidla, přetížení od zpomalování s vyřazeným rychlostním stupněm v běžné rychlosti (DYNO-MAX používá 55mph), které je experimentálně zjištěno přesným akcelerometrem na rovné trati na skutečném vozidle. Lze zadat i průběžně proměnné klesání/stoupání pro simulování profilu konkrétní trati. Častou aplikací je orientační zjištění maximální dosažitelné rychlosti pro daný převodový stupeň. Pokud má regulátor a brzda dostatečně rychlou odezvu, chová se motor při manuálním ovládnání plynového pedálu zkušebním jezdce pocitově stejně, jako na silnici. [4]

## 2.1 Válcové zkušebny

Válcová brzda (zkušebna) měří výkon přímo na vozidle bez nutnosti demontáže motoru. Vozidlo je uchyceno na zkušebně zpravidla pomocí popruhů, přičemž poháněná kola jsou umístěna na jednom nebo více válcích, brzděných pomocí retardéru, na kterém se měří otáčky a zátěž. Kotvící popruhy nebo pásy se často používají i u běžných vozů, nutné jsou pak u výkonných vozidel pro zlepšení přitlaku a tím trakce.

Umožňuje rychlé a velmi přesné změření výkonu při konstantní rychlosti, otáčkách nebo tažné síle u osobních a lehčích užitkových automobilů.

Nevýhodou tohoto způsobu jsou výrazné a nestálé ztráty. Naměřený výkon je ovlivňován odporem převodovky, rotační hmotou kol, jejich nahuštěním, silou přitažení popruhů i např. odporem alternátoru a dalších přídavných zařízení motoru a také samotným měřícím zařízením.

Hodnota takto vzniklého ztrátového výkonu vychází z technických parametrů konkrétní zkušebny a vozidla. Ta proto musí být velmi přesně kalibrována, a tyto hodnoty musí být pravidelně ověřovány a korigovány. Například změna kol, pneumatik nebo i pouze tlaku v pneumatikách již způsobí určitou změnu měřeného výkonu, a tedy nelze absolutně porovnat měření z jiných dnů. Pokud není zkušebna kalibrována, lze ji stále využít pro měření výkonu před úpravou a po ní. [1]

Superflow AutoDyn™ 849 je příkladem válcové zkušebny s vířivou brzdou vhodnou pro motory do 1193 kW s pokročilým softwarem umožňujícím simulaci vozovky (RST), zatěžující motor podle změřené vlastní setrvačnosti vozidla, aerodynamických a valivých ztrát.



obr. 2-1 Superflow AutoDyn™ 849 [5]

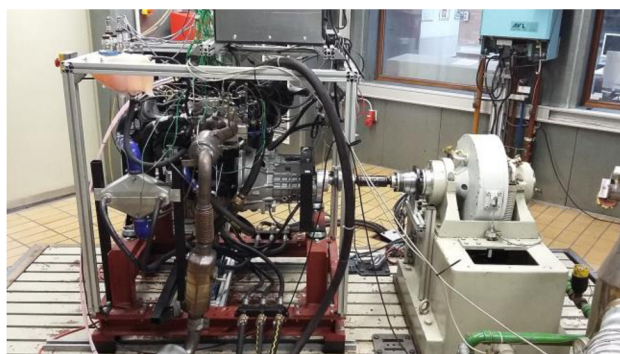




obr. 2-2 Nissan GTR na válcové zkušebně [6]

## 2.2 Motorové zkušebny

Měření probíhá na samotném motoru, který je demontován z vozidla. Výstupní hřídel motoru je připojena na dynamometr, který na ni působí zvolenou zátěží. Zjevná nevýhoda plynoucí z konstrukce je nutnost demontáže motoru z vozidla, a s tím spojené časové náklady na testování, případně i opotřebení dílů vozidla vlivem demontáže a opětovné montáže.



obr. 2-3 Motor Ford EcoBoost na motorové zkušebně [7]

- SF-POWERMARK

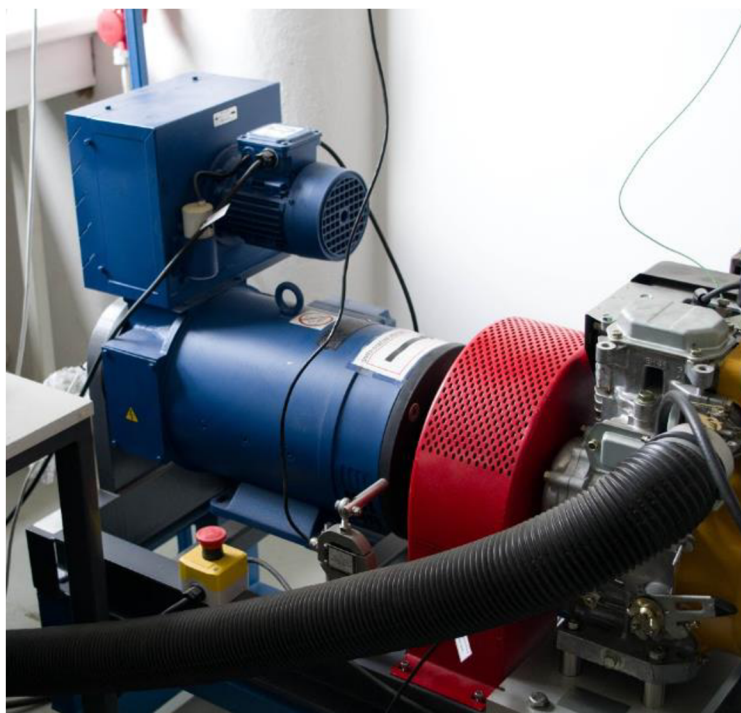
Tato motorová zkušebna výrobce Superflow s vodní brzdou je vybavená elektrickým startérem a softwarem umožňujícím jednoduché provedení běžných testů. Je vhodná pro měření do 15000 min<sup>-1</sup> , 1864 kW a 2373 Nm.



obr. 2-4 Zkušebna SF-POWERMARK [8]

- TecQuipment TD301

Na Ústavu konstruování je k dispozici experimentální stanice TecQuipment TD301 vybavena dynamometrem, jejíž součástí je spalovací zkušební motor Subaru Robin EH34 o výkonu přibližně 8 kW a točivém momentu 24 Nm. Stanice je v současné podobě tvořena zkoumaným motorem a dynamometrem na společném rámu, soustavou modulů, které zobrazují měřené veličiny a ovládají elektromotor, a příslušenstvím potřebným k chodu stanice (elektrická rozvodná skříň a vybavení pro provoz spalovacího motoru, např. odvod spalin). Motor je připojen k stejnosměrnému elektromotoru, který jej zatěžuje. Dynamometr je osazen měřícím zařízením značky TecQuipment. Data ze senzorů sbírá a zobrazuje soustava modulů.



obr. 2-5 Školní experimentální stanice TecQuipment TD301

První a pro tuto práci nejdůležitější je **zobrazovací modul pro otáčky a krouticí moment (DTS3)**. Sleduje otáčky na dynamometru a sílu na tenzometru pro určení krouticího momentu. Jeho prostřednictvím je také ovládán samotný chod dynamometru (start, stop a regulace otáček).

Druhý a třetí modul slouží k podrobnějšímu měření spalovacích motorů. Jsou to zobrazovací modul pro tlak a teplotu (DPT1) a zobrazovací modul spotřeby paliva.

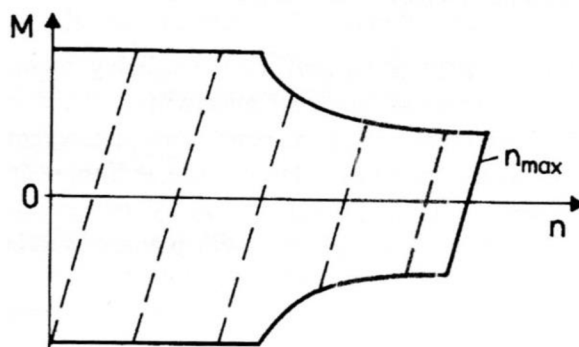
Zobrazovací moduly mají digitální výstupy, které jsou připojeny k **modulu VDAS – Versatile Data Acquisition System**. Tento je vybaven USB konektorem, přes který lze připojit stanici k počítači a pomocí dodaného softwaru VDAS zobrazit, zaznamenat a vyhodnotit měřené veličiny. [9].

Dle specifikace výrobce [10] je maximální měřený výkon pro tuto stanici 10 kW, přičemž maximální moment neuvádí. Je však pravděpodobné, že omezujícím členem zde bude stejnosměrný elektromotor. Jeho udávaný výkon na štítku je 6,7 kW při otáčkách  $1800 \text{ min}^{-1}$ . Ze vztahů 2.1 a 2.3 vyjádříme maximální krouticí moment, který je elektromotor schopen vyvinout

$$M_{kmax} = \frac{60P}{2\pi n} = 35,5 \text{ Nm} \quad (2.5)$$

Maximální dovolené otáčky  $n_{max}$  dle specifikace výrobce jsou  $3600 \text{ min}^{-1}$ .

Rozdíl otáček na štítku a ve specifikaci plyne z principu fungování stejnosměrného motoru. Do  $1800 \text{ min}^{-1}$  dává maximální točivý moment, tedy lineárně roste výkon s otáčkami zvyšováním napětí na kotvě. Za  $1800 \text{ min}^{-1}$  je již dosaženo maximálního napětí a tedy i výkonu – další zvýšení otáček je podmíněno snížením točivého momentu pomocí odbuzování za konstantního výkonu, viz vztah 2.1. Maximální dovolené otáčky jsou poté dány konstrukcí. [11]



obr. 2-6 Momentová charakteristika stejnosměrného stroje [3]

## 2.3 Typy brzd

Při zkoušce je potřeba pro udržení konstantních otáček či simulaci jízdních odporů působit momentem proti točivému momentu, který na hřídel dodává zkoušený motor. Nejběžnější typy dynamometrů jsou:

- Třecí

Tato konstrukčně nejjednodušší podoba brzdí pomocí třecí brzdy, dnes se však téměř nepoužívá pro její nepřesnost. Ta je dána zejména závislostí koeficientu tření na teplotě, která se v průběhu měření mění.

- Tekutinové

K brždění je využíván aerodynamický (vzduchové) nebo hydrodynamický (hydraulické) odpor vzniklý prouděním tekutiny mezi státorem a rotorem. Brzdný moment je přibližně úměrný čtverci otáček. Doplněním o servoventil, umožňující změnu plnění vířivých komor, lze brzdný moment regulovat pro zkoušku za konstantních otáček. Výhodou je nízká cena vzhledem k absorbovanému výkonu. Příkladem je brzda, která je součástí motorové zkušebny SF-Powermark zmíněné v kapitole 2.2.

- Elektrické
  - Stejnoseměrný dynamometr

Jedná se o stejnosměrný stroj, který lze jednoduše regulovat změnou buzení a odběru energie. Nevýhodou však jsou nízké dosažitelné otáčky, poměrně nízký maximální výkon vzhledem k ceně a velký moment setrvačnosti. Výhodou je možnost operace ve všech 4 kvadrantech. Tohoto typu je i zmíněná školní experimentální stanice TecQuipment TD301 (10kW, 3600 min<sup>-1</sup>).

- Střídavý proud

Podobné stejnosměrným, i tyto brzdy mají zpravidla nižší maximální výkon, ale specifická odvětví si je cení pro jejich operaci ve všech 4 kvadrantech. Příkladem je zakázkový Mustang Dynamometer určený pro přesné měření závodních NASCAR motorů (670 kW, 12 000 min<sup>-1</sup>). [12] Dalším zástupcem je zkušebna Sakor AccuDyne, používaná například pro vývoj a měření startérů hybridních vozidel (42 kW, 18 000 min<sup>-1</sup>) [13]



obr. 2-7 Motorová zkušebna Sakor AccuDyne [13]

### Vířivý proud

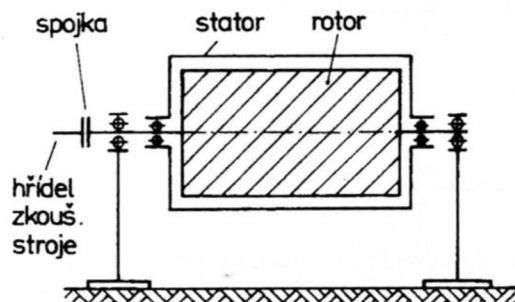
Výkyvně uložené těleso obsahuje ozubený pólový kotouč, budicí cívku a chladicí komory (je zpravidla použito vodní chlazení). Cívkou protéká stejnosměrný proud, čímž vzniká magnetické pole. V zubech kotouče je statické, ve stěnách přivrácených ke kotouči však pulzuje s frekvencí stejnou, jako se otáčejí zuby. Tím vznikají ve stěnách komor vířivé proudy, jejichž působením vzniká brzdňý moment. Ten lze jednoduše regulovat změnou proudu v budicí cívce. Jsou často používány pro zkoušení vozidel na válcových i motorových zkušebnách, jelikož díky úzkému a poměrně lehkému kotouči mají malý moment setrvačnosti, dále jsou schopny dosahovat vysokých otáček a brzdňých výkonů. Nejsou však schopny, na rozdíl od elektrických strojů, práce ve všech 4 kvadrantech. [14] Příkladem je vířivá brzda DE400 výrobce Taylor Dynamometer (400 kW, 8000 min<sup>-1</sup>) [15], nebo vířivá brzda na zkušebně Superflow AutoDyn™ 849 z kapitoly 2.1.



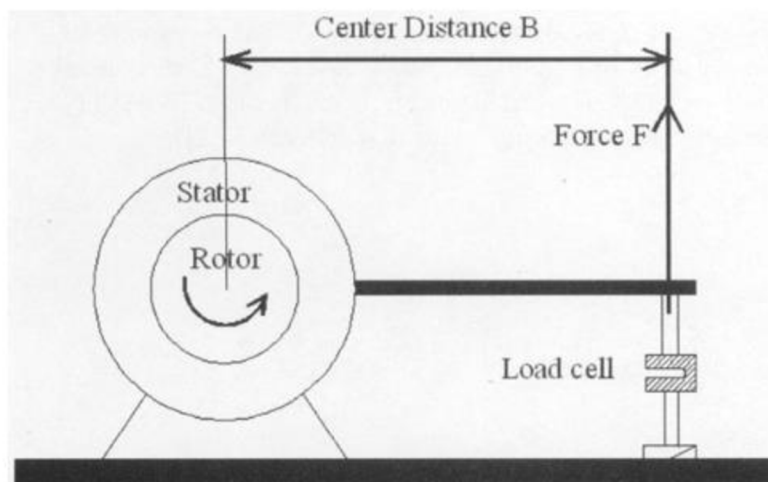
obr. 2-8 Vířivá brzda Taylor Dynamometer DE400 [15]

## 2.4 Popis fungování školní stanice

Jedná se o stejnosměrný elektrický dynamometr, tedy stroj schopný pracovat jak v režimu elektrického generátoru (brzdit motor), tak v režimu elektromotoru (roztáčet motor). Brzdící zařízení (elektromotor) je na výkyvném rámu a na rameni se měří reakce vzniklá jeho natočením pomocí tenzometrického členu (load cell). Na něm zjistíme sílu (výstupem je napětí, je třeba kalibrovat) a při známé délce ramene určíme moment. Pomocí optického enkodéru lze také měřit otáčky. Z těchto dvou údajů je vypočten výkon v daných otáčkách pomocí vztahu 2.1.



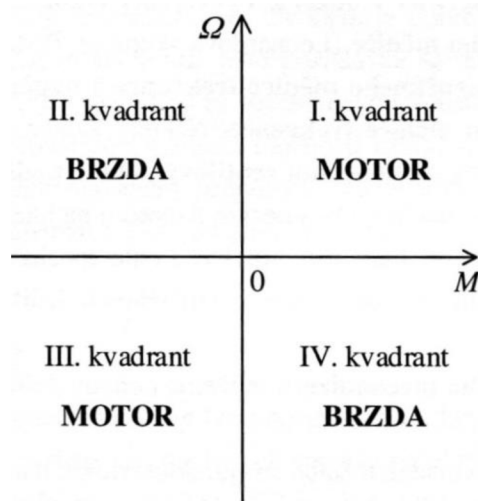
obr. 2-9 Uložení dynamometru [1]



obr. 2-10 Princip měření točivého momentu [16]

Specifikace výrobce udává „regenerative drive“, tedy regenerativní pohon, což znamená schopnost měnit mechanickou energii motoru na elektrickou, pokud se elektromotor nachází v režimu brždění (tedy generátoru) a tuto vracet do elektrické sítě.

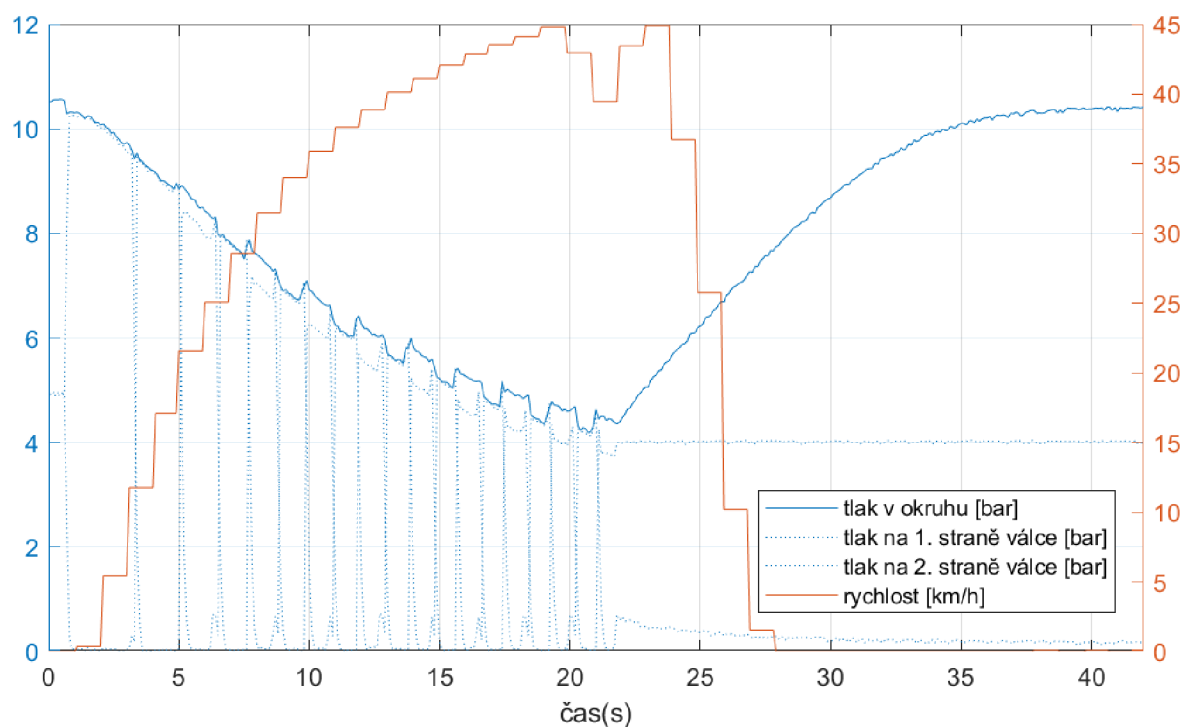
Označení „four-quadrant“ ve specifikaci znamená schopnost pracovat ve všech 4 kvadrantech  $\Omega$ -M diagramu, kde  $\Omega$  jsou otáčky a M moment aplikovaný zkušební stanicí. Tedy roztáčet/urychlovat motor vpřed, brzdit motor točící se vpřed, roztáčet/urychlovat motor vzad, a brzdit motor točící se vzad. Prakticky toto umožňuje například startování spalovacích motorů, zápornou korekci setrvačných účinků, zkoušky brzd, nebo různé testovací režimy simulující jízdu i z kopce. Tímto se liší například od běžně používaných vířivých brzd, které umí pracovat pouze v II. a IV. kvadrantu. [11]



obr. 2-11 Kvadranty  $\Omega$ -M diagramu [11]

## 2.5 Popis fungování pneumobilu

Pneumobil Falcon je závodní monopost, který je poháněn stlačeným vzduchem z tlakové lahve. Využívá pneumatické prvky k vytvoření síly na válci a systém pohonu, který převádí lineární pohyb na točivý moment. Z tlakové lahve je vzduch přepouštěn do vzdušníku, který umožňuje vyšší výstupní tlak. Stlačený vzduch je přiváděn střídavě na jednu a druhou stranu válce, a tak je pohybováno pístem tam a zpět. Ozubený hřeben spojený s pístem je osazen dvěma volnoběžkami tak, aby vždy jedna byla v záběru a druhá se protáčela. Dále je pomocí dvoustupňové převodovky určen převodový poměr a točivý moment je převeden na jediné zadní kolo (jedná se o tříkolové vozidlo). U připravovaného čtyřkolového vozidla Typhoon bude na zadní nápravě navíc umístěn diferenciál. Vše je řízeno elektronicky pomocí počítače Arduino Uno a vozidlo je vybaveno displejem, na kterém lze i za provozu ladit nastavení vozidla, číst data ze senzorů a zaznamenávat je na paměťovou kartu. Zásadním rozdílem pohonu pneumobilu oproti spalovacímu motoru je, že pracuje v poměrně nízkých otáčkách (do  $600 \text{ min}^{-1}$ ), zato však s vysokým momentem (až  $223 \text{ Nm}$ ) Maximální výkon je odhadován na  $7,5 \text{ kW}$ . Zároveň je nutno dodat, že vzdušník se při plné zátěži nestíhá doplňovat. Jak je vidět na grafu, zejména při plném výkonu je již během několika cyklů tlak výrazně snížen (z původních  $10 \text{ bar}$  na  $5 \text{ bar}$ , po  $16$  cyklech pístu, kdy bylo dosaženo maximální rychlosti  $45 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , v čase  $20 \text{ s}$ ) a s ním i kroučící moment, který je tlaku přímo úměrný. Po uvolnění akceleračního je pak tlak opět doplněn za zhruba  $14$  sekund.



obr. 2-12 Průběh tlaku a rychlosti během rychlostní zkoušky pneumobilu



## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Závodní vozidlo je na soutěži hodnoceno v různých disciplínách a jeho odladění pro maximální výkon ve sprintu i maximální dojezd ve vytrvalostním závodě není jednoduchým cílem bez přímého měření výkonu. Výkon vozidla pak bývá měřen buďto zkouškou statickou, nebo dynamickou. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, měřicí stanice se dají rozdělit do dvou koncepcí – válcové a motorové zkušebny. Každé z těchto provedení pak může být brzděno různými typy brzd. V této části práce budou zhodnoceny zkušební módy, brzdy a koncepce ve srovnání s požadavky zadání.

### 3.1 Zkušební módy

#### **Statická zkouška**

Její výhodou je jednoduchost ovládání v případě využití stejnosměrné brzdy, stačí pouze nastavit otáčky, které má držet regulátor, a odečíst aktuální výkon. U pneumatického pohonu se vzdušником však takto nelze určit křivku průběhu výkonu v otáčkách jako u spalovacího či elektrického motoru, jelikož je zkouška časově náročná a tlak spolu s výkonem během ní zásadně poklesne.

Pro tento závodní tým je využitelná například na ladění spotřeby vzduchu za konstantní rychlosti, a to pro různá nastavení řídicí jednotky, různé převodové poměry, či jiné konstrukční úpravy. Je tedy vhodná zejména na ladění vozidla pro vytrvalostní závod.

#### **Dynamická zkouška**

Výhodou je možnost sestavit křivku průběhu výkonu v otáčkách díky poměrně krátké době trvání, a to i s vědomím klesajícího plnicího tlaku a tedy momentu. Dalším kladem je, že svého principu nevyžaduje vůbec brzdu, jelikož lze provést pouze změřením úhlového zrychlení za známých setrvačných účinků, které jsou dané mechanicky. Dobu trvání zkoušky, tedy čas potřebný pro dosažení maximálních otáček, lze regulovat přidáním setrvačníku o daném momentu setrvačnosti.

V případě využití stávající stejnosměrné brzdy je nutná úprava řízení zkušebny. Jednou z možností je vyřadit elektromotor a změřit a spočítat setrvačné účinky soustavy, a tu případně doplnit o vhodný setrvačník. Lepší, avšak o poznání náročnější variantou, je simulovat pomocí přibrzdění elektromotorem skutečné setrvačné účinky na silnici po vzoru dnešních moderních zkušeben, jak je popsáno v úvodu kapitoly 2.

Tato zkouška je pro tým vhodná k měření akcelerace, buď přibližně pro porovnání vlivu úprav, nebo přesněji napodobením setrvačnosti reálného stroje na silnici. Je tedy vhodná zejména pro ladění na závod ve sprintu.

## 3.2 Brzdy

### **Stejnoseměrná**

Omezené maximální otáčky zde nevedí, jelikož pneumobil nebude pracovat ve vysokých otáčkách (viz kapitola 2.4). Naopak značnou výhodou je plný brzdny moment již od nulových otáček a snadná regulace.

### **Střídavá**

Výhodou je snadná regulace podobně jako stejnosměrné, nevýhodou je již vysoká cena, navíc není příliš vhodná pro takto nízké otáčky.

### **Vířivá**

Rozdílem oproti předešlým dvěma typům je nemožnost práce ve 4 kvadrantech, která však pro tuto aplikaci není klíčová, výhodou je vysoký brzdny výkon, poměrně malé rozměry a malý moment setrvačnosti.

### **Hydraulická**

Je nejlevnější vzhledem k výkonu, nedokáže však dobře reagovat v malých otáčkách, také nepracuje ve všech 4 kvadrantech, problémem při jejím umístění je také nutnost zajištění přívodu a odtoku média.

## 3.3 Koncepce zkušebny

### **Válcová zkušebna**

Válcové zkušebny jsou nejběžnějším typem zejména pro jednoduchost a rychlost testování. Lze provádět měření na kompletním vozidle bez nutnosti demontáže pohonu.

Nevýhodou je riziko prokluzu. Píst pohánějící toto vozidlo dodává výkon v rázech. S vozidlem nastaveným pro sprint, tedy při maximálním plnění, je první pohyb pístu velice prudký. Vzhledem k nízké váze vozidla zde hrozí proklouznutí kola na válcích a zkreslení měřených dat.

### **Motorová zkušebna**

Toto provedení by umožnilo přesné a opakovatelné měření výkonových charakteristik bez ztrát způsobených prokluzem či dalšími faktory, jako například nahuštěním pneumatik. Z konstrukčního hlediska je také toto provedení mnohem jednodušší, jelikož je zapotřebí pouze připojit výstupní hřídel pohonu na dynamometr a navrhnout vhodný rám.

Nevýhodou je pak nutnost demontáže pro účely testování.

## 3.4 Specifikace cíle

Cílem bakalářské práce je navrhnout dynamometr pro závodní pneumobil Falcon. Dílčí cíle jsou:

- zhodnocení možnosti využití, případně úpravy stávajícího dynamometru
- výběr provedení měřicí stanice, případně i typu brzdy, pokud by stávající nevyhověla
- návrh testovacích režimů a ovládání elektromotoru
- konstrukce rámu pro uchycení vozidla
- návrh součástí pro převod kroutícího momentu na hřídel zvoleného dynamometru

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Školní měřicí stanice TecEquipment TD301 je ve stávající podobě motorová zkušebna brzděná stejnosměrným motorem, softwarově umožňující pouze statickou zkoušku. Pro tuto práci byla dána zcela k dispozici, a to včetně možnosti úprav. Její využití se jeví z ekonomického hlediska velmi výhodně. Je však potřeba zjistit, zda je k měření pneumatického pohonu vhodná, jelikož na toto použití nebyla dimenzována. Toto vyhodnocení bude probíhat pomocí řešerše mezních parametrů z dokumentů výrobce, štítku na elektromotoru i konzultací.

Pokud výpočty potvrdí, že dynamometr zvládne brzdit odhadované zatížení od tohoto vozidla s dostatečnou bezpečností, lze využít stanici s vlastním rámem pro vozidlo a případně upraveným řídicím hardwarem i softwarem.

U elektromotoru jsou omezujícím parametrem nejvyšší přípustné otáčky. Také je potřeba brát ohled na jeho točivý moment, aby byl schopen dostatečně brzdit v případě zájmu o využití režimu zkoušky za konstantních otáček.

Problém příliš vysokého momentu lze řešit převodem do rychla, což sníží moment a zvýší otáčky, a následnou softwarovou korekcí. Ty však nesmí přesáhnout dovolenou hodnotu.

V případě nemožnosti dodržení všech požadovaných parametrů pomocí převodu by bylo nutno zvážit zakoupení jiné brzdy, dimenzované na takovýto pohon, případně konstrukce zkušebny využívající pouze setrvačné hmoty a umožňující pouze dynamickou zkoušku.

### 4.1 Srovnání parametrů školní zkušebny a pneumobilu

Jelikož pro vozidlo nejsou k dispozici přesná data, pracuje se zde s konzervativními odhady na základě návrhových výpočtů dodaných týmem Pneumobil Racing.

Během dynamické zkoušky se bude vozidlo testovat pro sprint, bude tedy použit plný tlak, ale elektromotor bude pouze přibrzďovat pro simulaci účinků setrvačných hmot, odporu vzduchu a valivého odporu.

Při statické zkoušce se bude vozidlo ladit na vytrvalostní režim, typicky okolo 50 % výkonu, nebývá zde dlouho zařazený první rychlostní stupeň, pro elektromotor je tedy nutno dlouhodobě udržet nanejvýš poloviční točivý moment.

I v případě, že by měl být v rámci statické zkoušky měřen maximální točivý moment, lze počítat se značnou opakovatelnou krátkodobou přetížitelností stejnosměrného stroje, která dle dostupné literatury činí 50 % až 200 % po dobu 15-20 sekund, v závislosti na dovoleném oteplení. [17]

Za účelem srovnání parametrů v následující tabulce je proto použita konzervativní hodnota 50 %. V případě pohonu pneumobilu je pokles točivého momentu v čase poměrně rychlý. Jak dokládá graf v kapitole 2.4, po dovolených 20 sekundách již točivý moment pohonu dosahuje pouze poloviční hodnoty. S ohledem na výše zmíněné skutečnosti stanice vyhovuje požadavkům s voleným převodovým poměrem 4,8:1.

Tab. 4-1 Srovnání parametrů školní zkušebny a pneumobilu

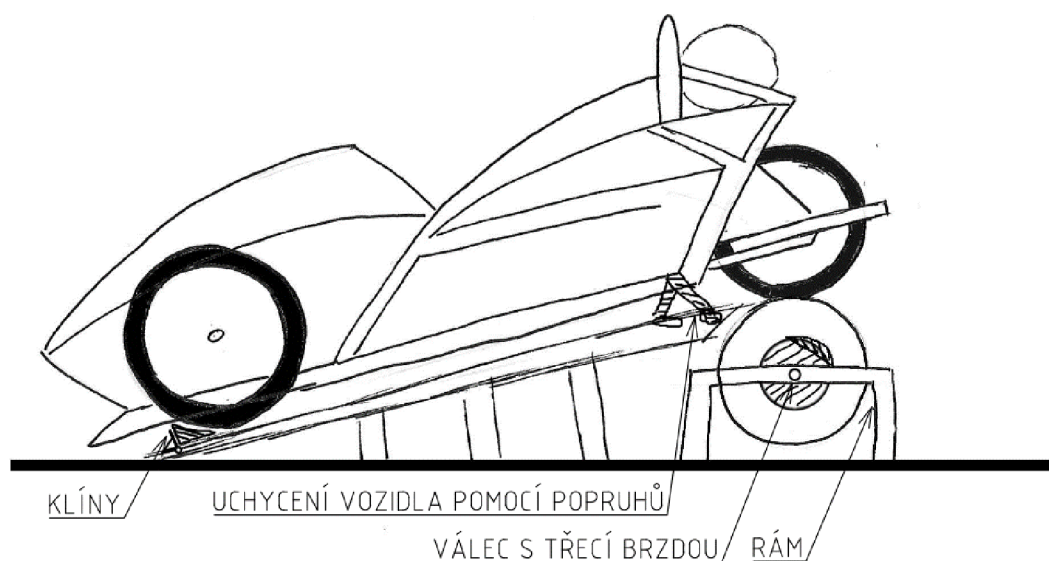
	Zkušebna	Pneumobil	Pneumobil 4,8:1
Otáčky (min <sup>-1</sup> )	3600	600	2880
Výkon (kW)	10	7,5	7,5
Točivý moment (N.m)	35,5 trvalý 53,5 přetížení 50 %	223	46,5

## 4.2 Koncepty

Prvotní fází návrhu byla úvaha nad provedením uložení vozidla/pohonné jednotky, způsobem změny převodového poměru a možnými zkouškami.

### 4.2.1 Varianta 1 - Válcová zkušebna jednoduchá

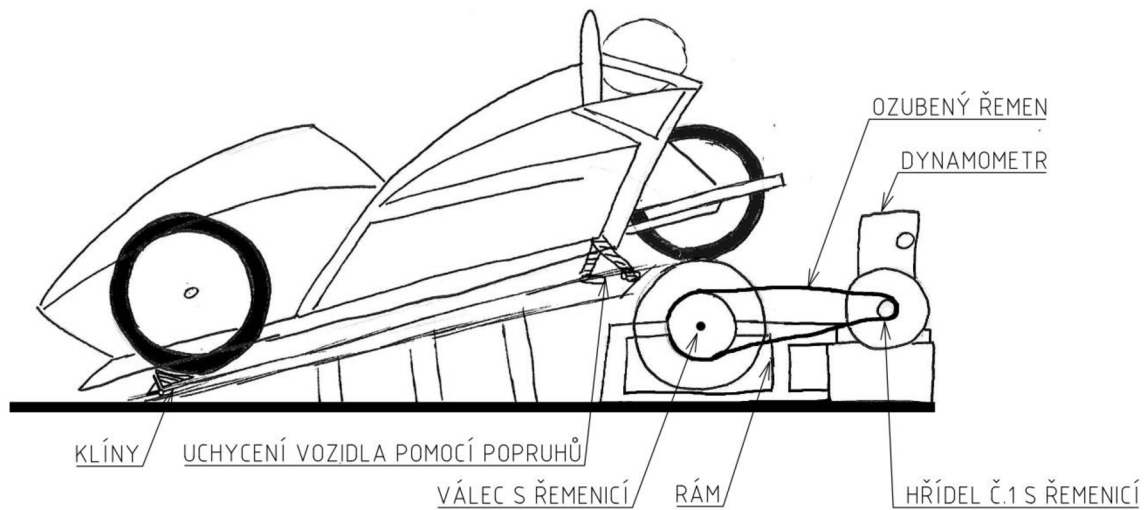
Toto nejjednodušší provedení vychází z běžně používaného konceptu, kde je k měření výkonu užito pouze setrvačnosti válců. Vozidlo v původním stavu je připevněno k rámu a přitaženo popruhy, jeho zadní pneumatika je na válci, na němž je snímač otáček. Elektromotor nebude využit, k válci se umístí jednoduchá třecí brzda pro zastavení. Využije se pouze snímač otáček a ovládací panel bude sloužit pro přenos otáček z něj do PC, případně se místo něj využije například Arduino. Toto provedení umožní jen dynamickou zkoušku měřením úhlového zrychlení válce o známém momentu setrvačnosti.



obr. 4-1 Nákres varianty 1 - Válcová zkušebna jednoduchá

#### 4.2.2 Varianta 2 - Válcová zkušebna s elektromotorem

Vozidlo v původním stavu je připevněno k rámu a přitaženo popruhy, jeho zadní pneumatiky, případně pneumatika, jsou na válci. Na rozdíl od předešlé varianty bude dynamometr zachován. Potřebný převodový poměr a přenos momentu z osy válce na hřídel dynamometru bude zajištěn pomocí ozubeného řemene. Bude možno využít původní ovládací panel dynamometru pro provedení statické zkoušky. V případě zájmu o zkoušku dynamickou bude nutno vyvinout ovládací software a vyměnit panel za nový, například s řízením přes Arduino, jelikož stávající provedení s regulátorem otáček a potenciometrem, kterým jsou voleny, tuto neumožňuje.

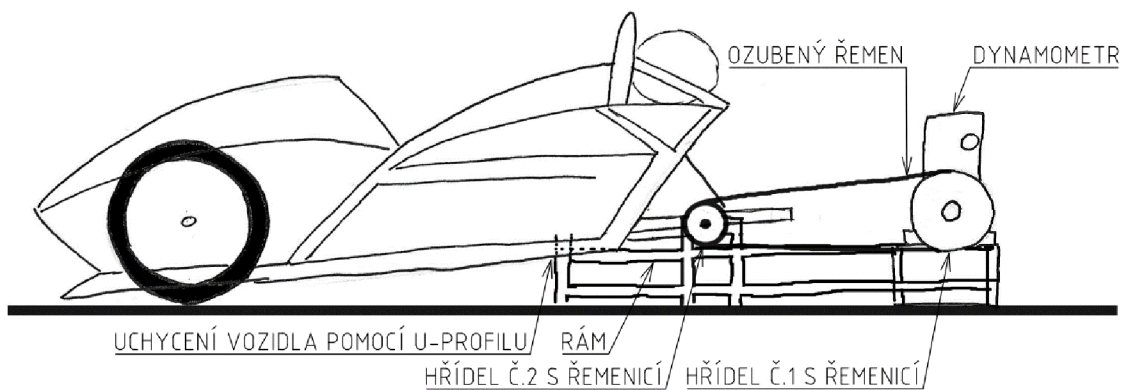


obr. 4-2 Nákres varianty 2 - Válcová zkušebna s elektromotorem

#### 4.2.3 Varianta 3 - Zkušebna s částečnou demontáží

Vozidlo zůstane zachováno téměř úplně, dojde pouze k demontáži zadního kola a jeho nahrazení hřídelí, na které bude možno snadno vyměňovat převodová kola. Hřídel bude stejně jako u varianty 2 spojena se stávající hřídelí dynamometru řemenovým převodem, který zajistí přenos točivého momentu i potřebné zpřevodování. Toto vše bude uloženo v jednoduchém svařovaném rámu. Robustní svařovaný rám bude navržen pro snadné a dostatečně tuhé zajištění vozidla, a to tvarově i pomocí popruhů.

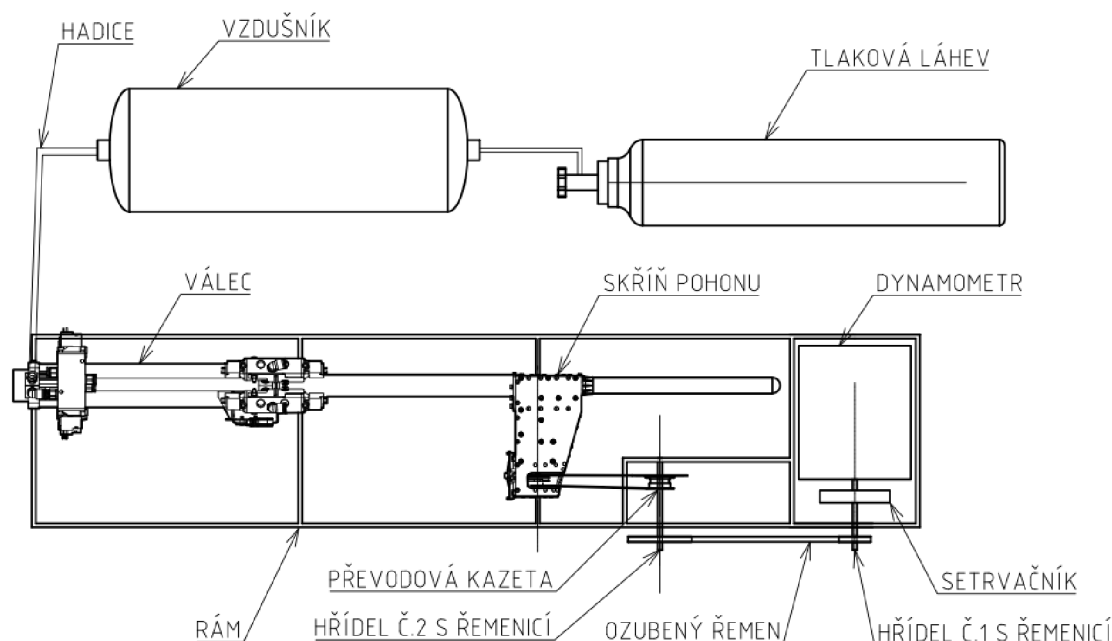
Byla zvažována i modifikace této varianty s přímým ozubením, vyžadovala by však vyšší přesnost a tuhost rámu kvůli správné funkci ozubení, vykazovala vysokou hlučnost a nebyla příliš vhodná pro pohon s vysokými rázy.



obr. 4-3 Nákres varianty 3 - Zkušebna s částečnou demontáží

#### 4.2.4 Varianta 4 - Motorová zkušebna

Pohonná jednotka (válec, volnoběžky, převodovka, i zadní náboj s konečnými převody) bude pro účely zkoušky demontována a usazena do rámu. Mimo to se podobá variantě 3, ale rám bude konstrukčně jednodušší a menší. Je však nutno vyřešit umístění tlakové lahve a vzdušníku, který bude také nutno z vozidla demontovat, případně přistavit vozidlo poblíž stanice a připojit vzdušník delšími hadicemi.



obr. 4-4 Nákres varianty 4 – Motorová zkušebna

### 4.3 Zhodnocení variant

Válcová zkušebna, kterou zastupuje varianta 1 a 2, je konstrukčně složitější a nákladnější, navíc riziko prokluzu a zkreslení měření je zde značné.

Motorová zkušebna, kterou je varianta 4, má nevýhodu v podobě nutné demontáže kompletní pohonné jednotky. Zejména proto, že se jedná o studentský projekt, je časová náročnost zkoušky velmi důležitým faktorem.

Po konzultaci požadavků týmu a zvážení těchto konvenčních provedení válcové zkušebny byla zvolena varianta 3, která je v mnoha ohledech kompromisem mezi těmito návrhy. Narozdíl od tradiční motorové zkušebny bude zachováno během měření kompletní vozidlo vyjma zadního kola.

Přehledné porovnání variant je v tabulce níže.



**Tab. 4-2** Zhodnocení variant

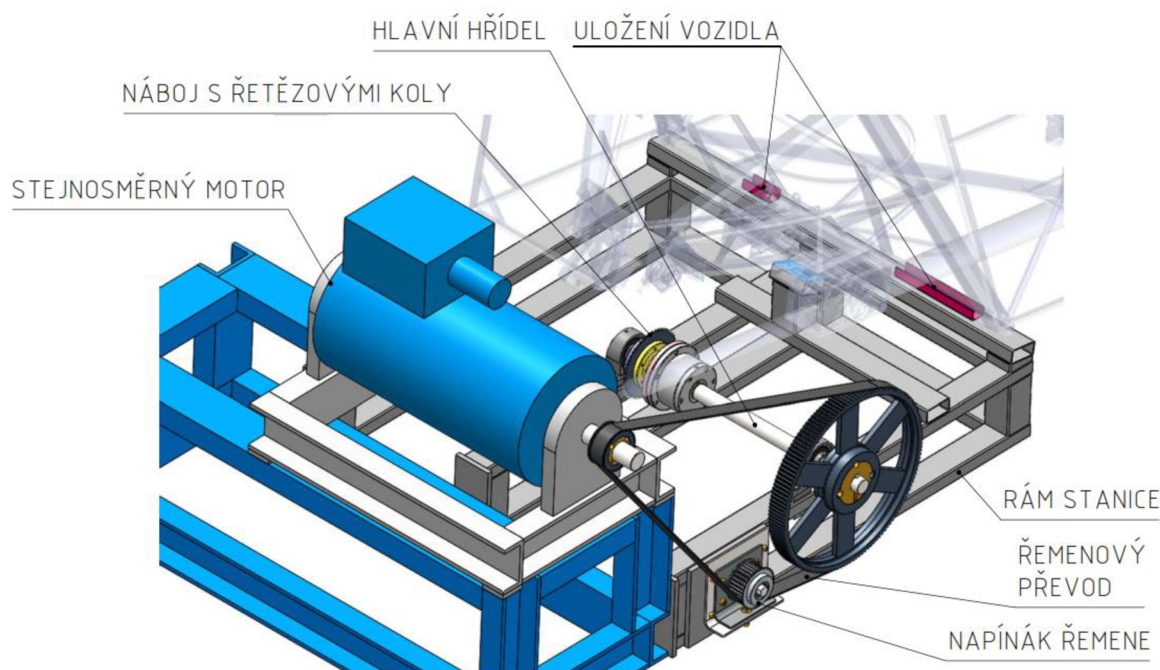
	<b>Uložení</b>	<b>Převod</b>	<b>Zkoušky</b>	<b>Užitná hodnota</b>	<b>Jednoduchost a cena</b>	<b>Body celkem</b>
<b>1</b>	Válce	-	Jen dynamická	1	2	3
<b>2</b>	Válce	Řemen	Statická (dynamická po úpravě)	5	1	6
<b>3</b>	Tvarové	Řemen	Statická (dynamická po úpravě)	4	4	8
<b>4</b>	Demontáž	Řemen	Statická (dynamická po úpravě)	2	5	7

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Z předběžných výpočtů vyplynulo, že využití stávající stanice je možné, což umožní využít k ovládní dynamometru její panel a software pro statickou zkoušku. Rozšíření o dynamickou zkoušku by vyžadovalo návrh nového ovládacího software i hardwarové úpravy, jelikož současný panel využívá k nastavení požadovaných otáček pro regulátor pouze potenciometr. K simulaci setrvačných účinků reálného vozidla pro dynamickou zkoušku by bylo nutné řídit regulaci brzdného momentu externě a navrhnout poté způsob zpracování naměřených dat ze senzorů otáček a tenzometru. Řešení těchto možných úprav však nebude předmětem této práce.

V následující části práce tak budou zpracovány úpravy mechanické. Podle dat dodaných týmem Pneumobil Racing uvažujeme nejvyšší točivý moment pohonu při sprintu na plný výkon se zařazeným prvním rychlostním stupněm, toto však platí pouze pro první záběr pístu, poté dochází k rychlému poklesu tlaku, kterému je moment přímo úměrný.

Svařovaný rám stanice slouží k tvarovému uchycení vozidla a navazuje na původní rám dynamometru. Jsou na něj připevněny ložiskové domky nesoucí hřídel. Ta slouží k přenosu výkonu z náboje na velkou řemenici. Z té je pak řemenem přenášen na hřídel dynamometru, tímto převodem zároveň dochází k potřebné změně otáček a točivého momentu, která byla popsána v kapitole 4.1. Na rámu je také umístěn napínák řemene, který zároveň plní funkci vodící kladky.



obr. 5-1 Celkový pohled na stanici

## 5.1 Řemenový převod

Přenos výkonu z hřídele s nábojem na hřídel dynamometru je zajištěn ozubeným řemenem. Pro jeho správnou funkci je potřeba zajistit jeho dostatečné předpětí a boční vedení. Řemenice se vyrábí i v provedení s vodícími bočnicemi, od 80 zubů výše se však s bočnicemi nedodávají. Podle katalogu výrobce SIT SpA [18] je pak přípustná osová vzdálenost konfigurace s jednou bočnicí rovna osminásobku průměru malé řemenice. Pro delší vzdálenosti je pak potřebná vodící kladka. Vzhledem k prostorovému uspořádání stanice bylo nutné tuto vzdálenost překročit a vodící kladku použít, tato zde zároveň zastává funkci napínací kladky.

Z důvodu přenosu poměrně vysokého točivého momentu byl zvolen profil zubů HTD – High Torque Drive. Tento se vyrábí v roztečích 3M až 20M a různých šířkách. Z předběžných výpočtů síly na řemen s uvažováním značných rázů vycházel řemen o rozteči 8M a šířce 30 nebo 50 mm.

Z hlediska ceny, praktičnosti i nežádoucího vlivu setrvačných hmot na měření bylo snahou využít co nejmenší řemenice. Průměr hřídele dynamometru 38 mm umožňuje použití malé řemenice od 30 zubů výše.

Porovnáním parametrů dynamometru a pohonu vozidla byla z dostupných kombinací řemenic zvolena varianta 144 a 30 zubů, která dává převodový poměr 4,8 zvolený v kapitole 4.1.

Podle doporučení výrobců Continental i Gates bylo k výběru vhodných řemenů využito jejich zdarma dostupného výpočtového softwaru a následně zvolena nejekonomičtější varianta. Výsledkem výpočtového softwaru DF-Pro společnosti Gates pro zvolenou konfiguraci byl řemen 2272-8M-50 Gates Powergrip HTD, u softwaru CONTI ® Professional společnosti Continental řemen HTD 8M-2248-30 CXP CONTI SYNCHROFORCE. Zvolen byl řemen Continental, který byl sice mírně dražší, ale v celkovém pohledu výhodnější. Jelikož má šířku jen 30 mm oproti konkurenčnímu 50 mm, užší řemenice poskytují značnou cenovou i hmotnostní úsporu.

Pro uchycení řemenic na hřídeli s nábojem i na hřídeli dynamometru slouží upínací pouzdra Taper Lock. Díky jejich kuželovitému tvaru jsou schopny přenášet určitý točivý moment svěrným způsobem. Na hřídeli s nábojem by pouzdro přeneslo dle údajů výrobce [19] moment 282 Nm. Svěrné spojení by tedy mohlo k přenosu zadaného momentu 223 Nm samo o sobě postačit, z důvodu malé rezervy rázového charakteru zatížení však bylo využito spojení perem k vyloučení prokluzu řemenice. Pouzdro použité na hřídeli dynamometru pak dokáže svěrně přenést moment 240 Nm, který několikanásobně převyšuje nejvyšší kroutící moment dynamometru 54 Nm, pojištění perem tak není nutné.

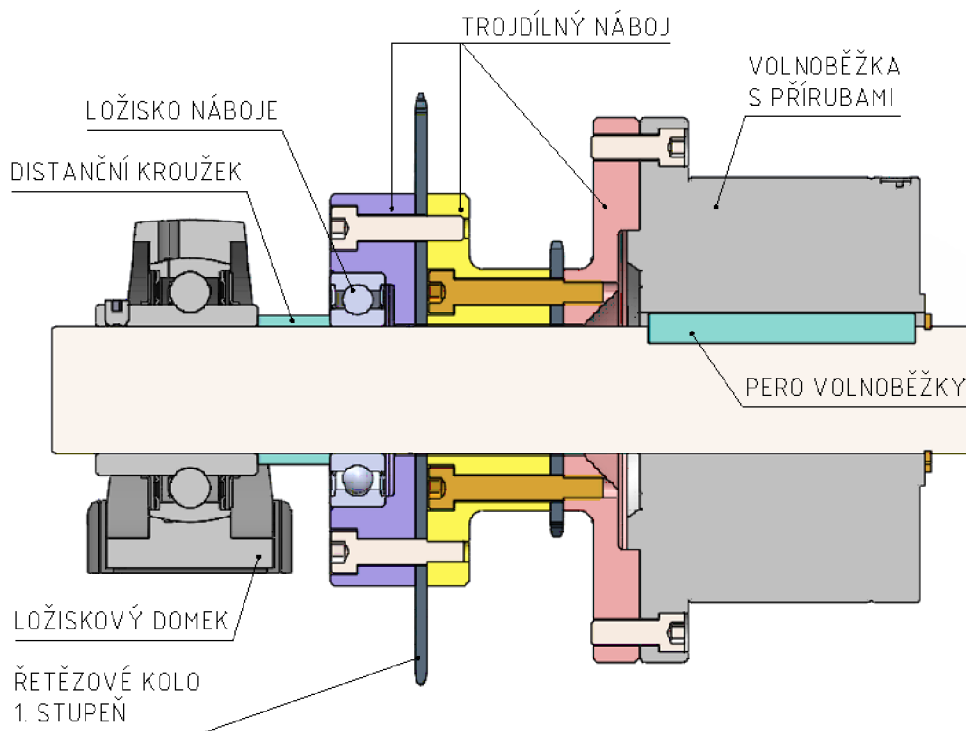
Jako vstupní parametry pro výpočet CONTI ® Professional byl použit točivý moment 223 Nm na hnací hřídeli, řemenice HTD 8M se 144 a 30 zuby a napínací kladka se 30 zuby, jejíž optimální pozici určí v rámci zadaného svislého intervalu souřadnic software automaticky. Vodorovná pozice kladky byla zvolena tak, aby byla kladka co nejbližší hnací řemenici na odlehčené větvi řemene. Pro výpočet provozního součinitele bezpečnosti byl zvolen proměnný způsob zatěžování a krátkodobý pohon se středními až vysokými rázy. Tyto údaje určily požadovaný součinitel 2,0. Navržený pohon se součinitelem 2,39 splňuje tedy požadavky s dostatečnou bezpečností. Výstupem tohoto softwaru byly také údaje o silách v řemenicích ve statickém i dynamickém stavu a doporučená napínací síla, které pak byly využity při návrhu napínáku. Výstupní protokol je přílohou této práce.

## 5.2 Náboj s řetězovými koly

Na hřídel je potřeba upevnit řetězová kola, která na ni přenáší výkon přes volnoběžku. Ta je zapotřebí pro správnou funkci pohonu, jelikož volnoběžka je součástí i původního náboje v kole vozidla. Slouží k zajištění toho, že vždy bude pohon vozidla otáčet brzdou, nikdy ne naopak. Přenos točivého momentu opačným směrem v situaci, když by motor dynamometru ve snaze udržet nastavené otáčky pro statickou zkoušku otáčel pohonem, by totiž mohl způsobit zaseknutí a poškození pohonu vozidla. Dalšími požadavky pro návrh náboje byly snadná rozebíratelnost, nutná pro testování různých převodových poměrů, a dodržení vzájemné vzdálenosti řetězových kol tak, aby nedocházelo ke křížení řetězu.

Pro hřídel o průměru 30 mm byla zvolena samostředící volnoběžka GL30 s dodávanou montážní přírubou F4 a krycí přírubou D2. Příruby slouží k utěsnění maziva, krycí příruba má v sobě otvory pro jeho doplnění. Montážní příruba je opatřena otvory pro šrouby, kterými je připevněna k náboji.

Náboj je dělený na tři části. V levé je uloženo ložisko SKF 6006-2RS, prostřední zajišťuje vzdálenost řetězových kol a pravá slouží k připojení k přírubě volnoběžky. Pro jeho spojení byly zvažovány lícované šrouby z důvodu namáhání kolmo na osu šroubu. S ohledem na náročnost zhotovení přesných otvorů v mnoha součástech zároveň bylo ale rozhodnuto použít předepnutý třecí šroubový spoj. V příložené výpočtové zprávě vytvořené v softwaru MathCAD je proto provedena jeho kontrola, které vyhověl. Životnost ložiska byla určena kalkulátorem výrobce na 2050 hodin.



obr. 5-2 Řez nábojem s řetězovými koly

### 5.3 Hlavní hřídel a její uložení

Jedním z hlavních požadavků na tuto stanici je její snadná rozebíratelnost, protože při testování budou často volena různá ozubená kola. Hřídel s nábojem je proto uložena v ložiskových domcích typu UCP2, které umožňují axiální zajištění stavěcím šroubem. Jelikož hřídel žádné axiální zatížení nepřenáší, je toto zcela postačující řešení, které umožňuje snadnou demontáž. Tyto domky se vyrábí jako komplety s ložisky o vnitřních průměrech odstupňovaných po 5 mm. Největší průměr hřídele je pak omezen rozměry vnitřního otvoru menšího řetězového kola, byl tedy zvolen 30 mm, a odpovídající domky UCP 206.

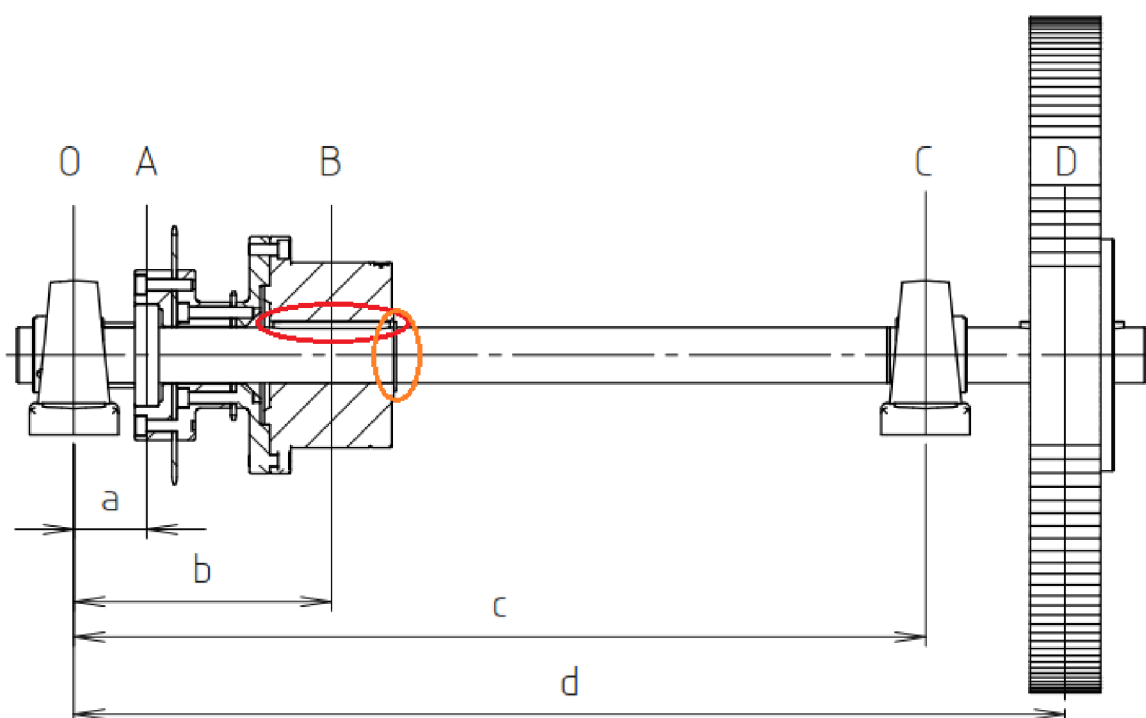
Pro výměnu řetězových kol je nutné hřídel axiálně posunout v ložiscích, je tedy žádoucí, aby měla v celé délce stejný průměr. S ohledem na snížení ceny však není nutno dodržet toleranci rozměrů a drsnosti v celé její délce, pouze na plochách, které přichází do styku s ložisky a volnoběžkou. Ty jsou odděleny na jedné straně zápichem, na druhé drážkou pro pojistný kroužek.

Následující výpočty jsou popsány v příložené výpočtové zprávě.

### 5.3.1 Kontrola hřídele

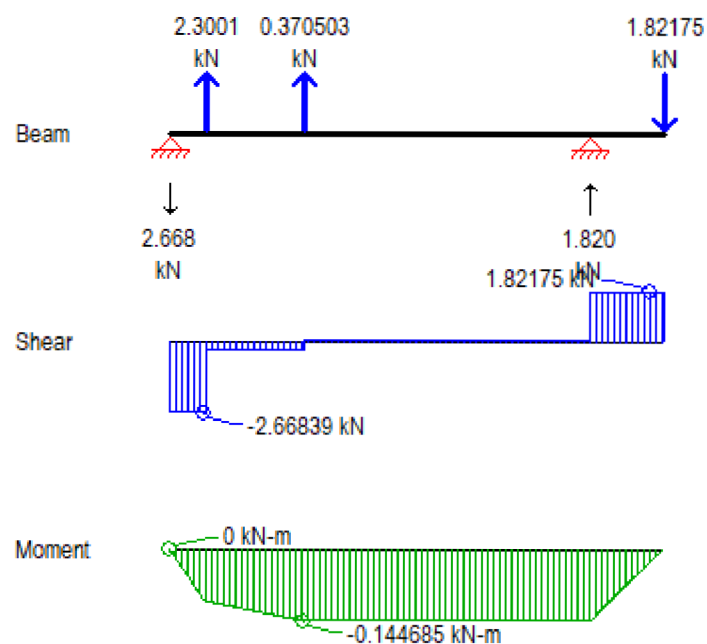
Pro kontrolu hřídele vůči meznímu stavu pružnosti je nejdříve potřeba určit působící síly a momenty. Zatížení silou od hnacího řetězu se pomocí statické rovnováhy rozloží mezi ložisko náboje, značené na následujícím schématu písmenem A, a volnoběžku označenou jako B. Situaci uvažujeme pro zařazený první rychlostní stupeň, jelikož zde působí plný točivý moment a hřídel je tak výrazně namáhána krutem.

Další silové zatížení pak působí od řemenice v bodě D. Hřídel je také namáhána krutem mezi body B a D. Je uložena v ložiskových domcích, značených O a C. Na hřídeli se vyskytují dvě nebezpečná místa, která vyžadují kontrolu a jsou vyznačena barevně. Jedná se o drážku pro pero volnoběžky a drážku pro pojistný kroužek, jelikož v těchto místech dochází ke koncentraci napětí.

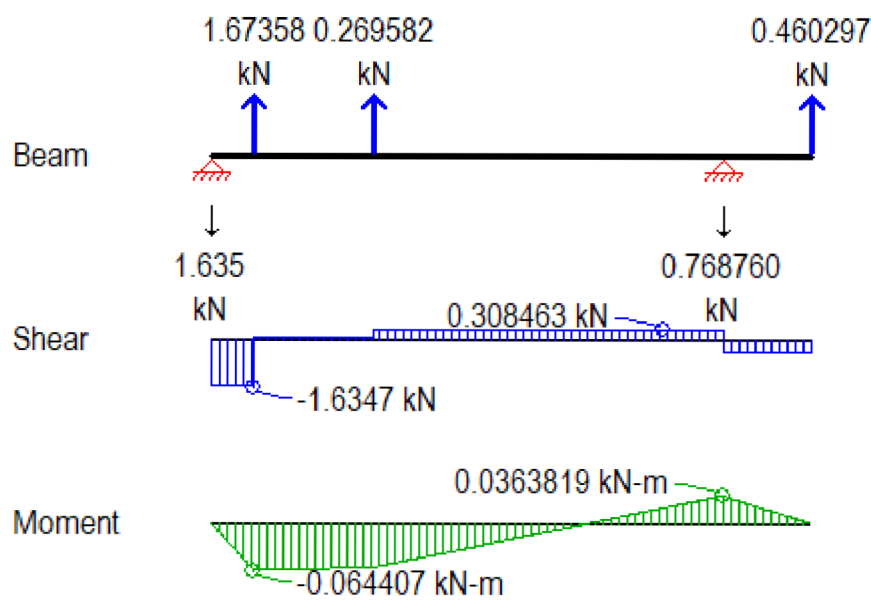


obr. 5-3 Hřídel s vyznačenými kritickými místy

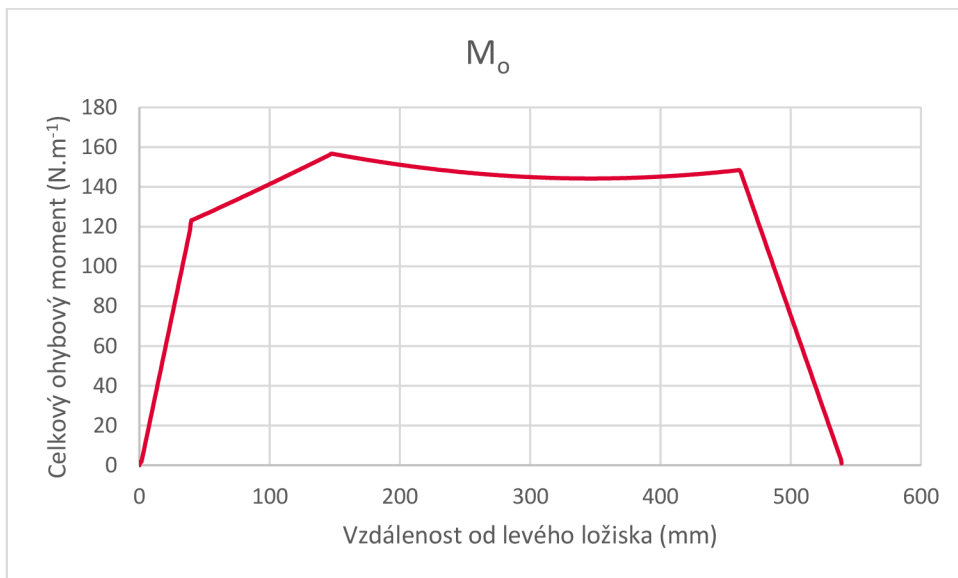
Silové zatížení nepůsobí v navzájem kolmých rovinách. Výpočet ohybového momentu tak byl proveden zvlášť v rovině XY a XZ. K výpočtu a vykreslení průběhů v jednotlivých rovinách byl užit výpočtový software DSNWinbeam. Tento umožňuje export dat ve formátu CSV, pro vykreslení průběhu celkového ohybového momentu a určení jeho hodnoty v kritických místech pak bylo užito programu Microsoft Excel, do kterého byla tato data načtena.



obr. 5-4 Průběh ohybového momentu v rovině XZ v DSNWinbeam



obr. 5-5 Průběh ohybového momentu v rovině XY v DSNWinbeam



obr. 5-6 Průběh celkového ohybového momentu na hřídeli

Maximum ohybového momentu se nachází ve vzdálenosti 147,33 mm, tedy v místě drážky pro pero, a má hodnotu 156,72 N.m. V místě drážky pro pojistný kroužek je hodnota ohybového momentu jen mírně nižší, a to 153,94 N.m.

Drážky pro pero i pojistný kroužek jsou považovány za koncentrátory napětí, je proto potřeba do výpočtu napětí zahrnout i tvarový součinitel. Tyto součinitele jsou zpracovány do nomogramů dostupných v literatuře, například v knize Peterson's Stress Concentration Factors [20]. Právě z nomogramů této knihy vychází i použitý kalkulátor eFatigue, jehož výhodou je automatické přesné odečtení hodnot. Pro oba koncentrátory napětí byly určeny součinitele tvaru pro krut i ohyb.

### Round Shaft with Semi-Circular Keyway

Bending | Torsion

**Variables**

Gross Section Stress

D 30 mm

r 0.4 mm

where  
 $0.005 < r/D < 0.04$  in bending  
 $0.005 < r/D < 0.07$  in torsion

Calculate Kt | Select Different Geometry

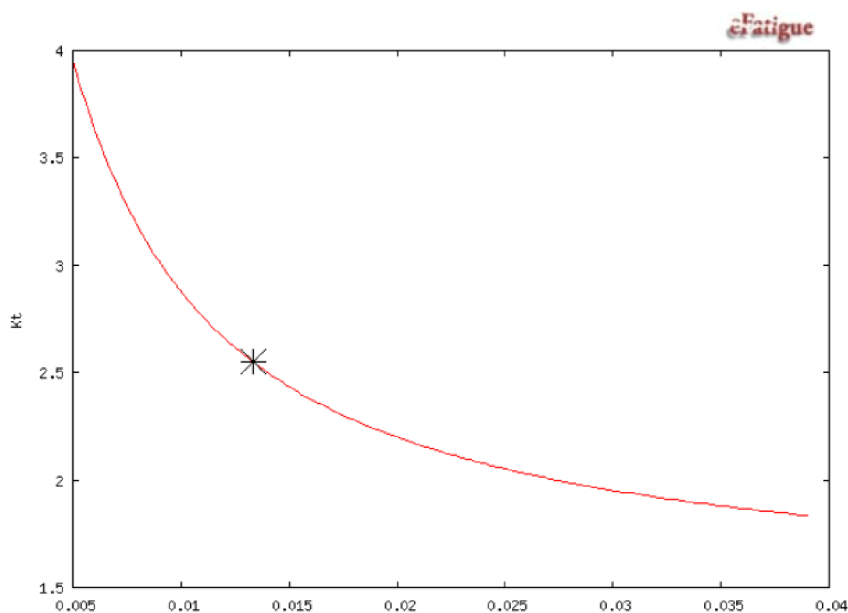
### Results

$K_t = 2.55$

obr. 5-7 Ukázka zadání výpočtu na webu eFatigue



Peterson Plot



obr. 5-8 Ukázka odečtení z Petersonova nomogramu na webu eFatigue

Pro hřídel byla zvolena běžně dostupná konstrukční ocel 11 523.0 s mezí kluzu 430 MPa pro kruhovou ocel taženou za studena dle ČSN 41 1523. Nejnižší hodnota bezpečnosti 1,48 vůči meznímu stavu pružnosti byla určena v místě drážky pro pero, navržená hřídel tedy vyhovuje. Únavový výpočet nebyl proveden, jelikož se u tohoto zařízení nepředpokládá dlouhodobý provoz. Životnost ložisek SKF UC 206 v domcích je podle kalkulátoru výrobce 8270 hodin pro více namáhané ložisko.

## 5.4 Napínák řemene

Pro správnou funkci řemenového převodu je nutné jeho dostatečné napnutí. Ideální umístění napínací kladky bylo určeno výpočtovým programem CONTI Professional, napínák však umožňuje svislou změnu této polohy pro vyrovnání nepřesností. Zároveň i zadaná poloha hnací řemenice se může změnit, jelikož její osa se může posouvat za účelem napnutí řetězu.

Z důvodu požadavku na vodící kladku byla pro napínání použita řemenice s bočnicemi, která tak plní zároveň obě funkce. Kvůli umístění na vnitřní, tedy ozubené straně řemene je volena ozubená řemenice. Tato je zakoupena jako plná, a jsou v ní následně zhotoveny otvory pro nalisování ložisek a vložení distančního kroužku.

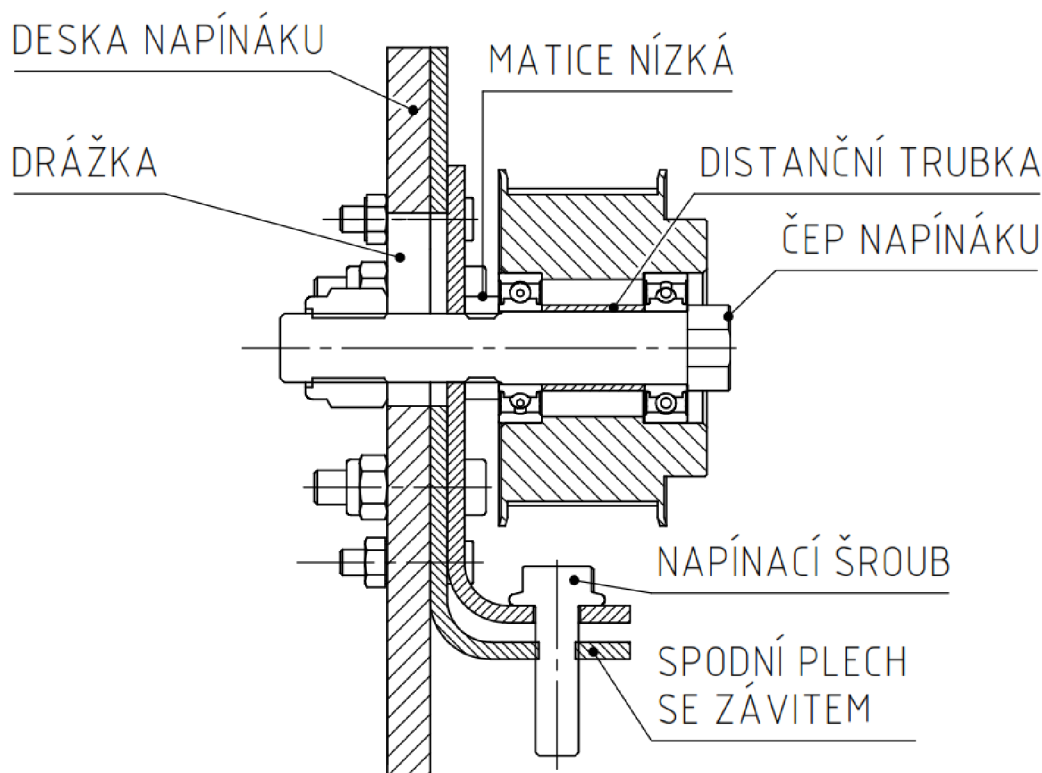
Čep má na svém konci za ložisky závit, na kterém jsou dvě matice. Nízká matice slouží zároveň jako distanční člen, určující vzdálenost kladky od napínáku. Ze zadní strany desky napínáku je pak umístěna samojistná matice, která dotažením proti nízké matici umožní zajistit kolmost čepu. Toto řešení je voleno oproti navařenému čepu z důvodu lepšího zajištění kolmosti v běžných dílenských výrobních podmínkách.

Tělo napínáku se skládá z ploché desky, ke které je přišroubován spodní ohnutý plech. Oba tyto díly jsou opatřeny shodnými svislými drážkami, kterými prochází čep a šrouby připevňující horní plech a které umožňují svislý pohyb kladky. Tyto šrouby i čep jsou na druhé straně opatřeny samojistnými maticemi. Pro účely seřízení napínáku je tak možno matice mírně povolít tak, aby vznikla vůle umožňující posun, ale díky samojistící funkci nedojde k jejich úplnému povolení.

Napínání je řešeno otáčením šroubu, který prochází otvorem v horním plechu a je přitahován k závitům v plechu spodním. Stanovená statická napínací síla z CONTI Professional je 833 N. Závit byl proto v příložené výpočtové zprávě ověřen na otláčení a toto namáhání splňuje s bezpečností 3,4.

Čep byl ve výpočtové zprávě ověřen vůči meznímu stavu pružnosti z důvodu namáhání ohybem, jeho bezpečnost je 2,2.

Průměru osy čepu odpovídá pár ložisek SKF 6003-2RSH, dle kalkulátoru na stránkách výrobce pro radiální sílu odpovídající napínací síle a otáčky  $3000 \text{ min}^{-1}$  vychází životnost více namáhaného ložiska 14800 hodin, což je více než dostačující hodnota.

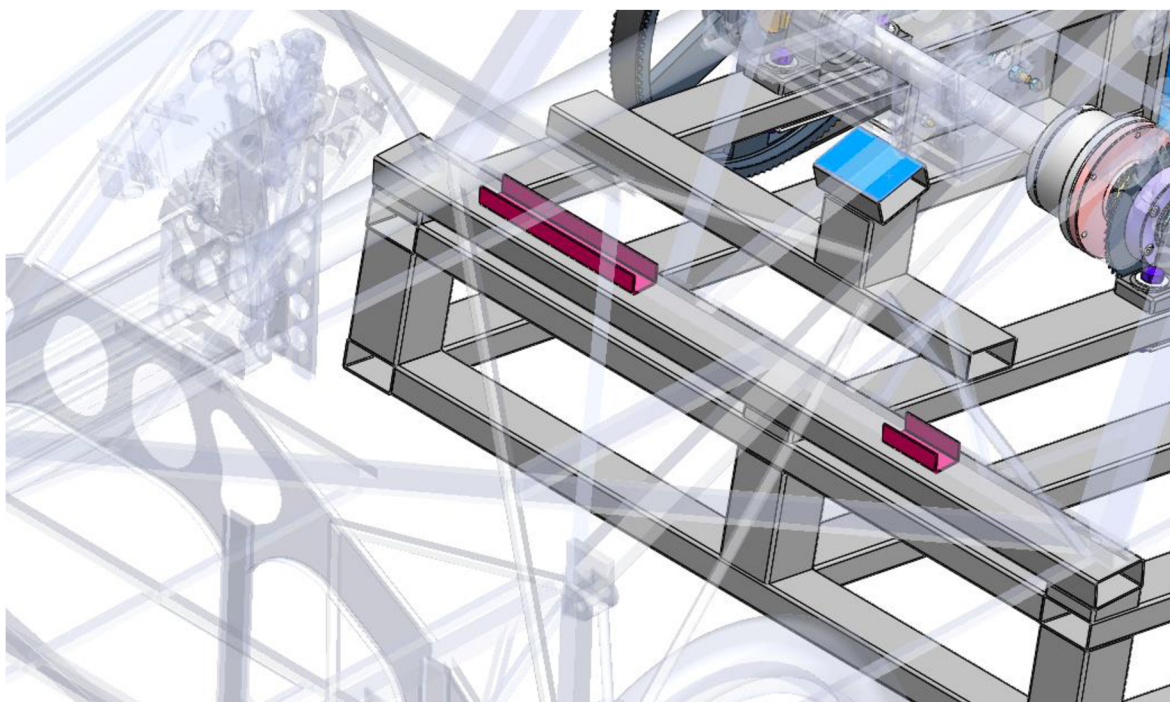


obr. 5-9 Řez napínákem řemene

## 5.5 Rám stanice

Nový rám stanice navazuje na původní rám dynamometru, který bude pro aktuální potřeby mírně upraven tak, aby došlo k posunutí dynamometru doprava. Je navržen jako svařovaná konstrukce z obdélníkových profilů 60x30x2 mm, pro svislé sloupky byly použity čtvercové profily 60x60x2 mm, pro připojení k původnímu rámu pak plochá ocel tloušťky 10 mm.

Vozidlo je tvarově uchyceno ve dvou U-profilech, do kterých zapadne rám vozidla. Dále je zadní část rámu vozidla opřena o sloupek, který zabraňuje pohybu vozidla vlivem záběru řetězu. Tyto kontaktní body jsou navrženy s vůlí a mohou být tak vyloženy měkkým tlumícím materiálem, pro snížení přenosu vibrací a kompenzaci případné nepřesnosti uložení.

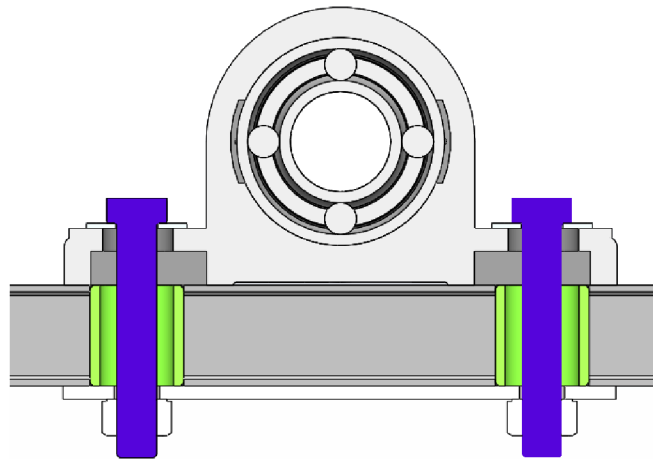


obr. 5-10 Detail uložení vozidla s vyznačenými kontaktními plochami rámu

### 5.5.1 Řešení napínání řetězu

Po usazení vozidla bude nutno zajistit dostatečné napnutí jeho řetězů. Nejprve byla zvažována varianta využití napínáku shodného se současně používaným u vozidla, nicméně dle týmu docházelo u vozidla v minulosti jak s tímto, tak různými jinými řetězovými napínáky k problémům. Bylo proto rozhodnuto o napínání řetězu změnou osové vzdálenosti, jelikož se jedná o levné, jednoduché a robustní řešení.

Řetězy budou vyrobeny na míru tak, aby již nebylo potřeba příliš velké napínání na stanici. Ložiskové domky mají oválné díry pro šrouby, které umožňují posuv a tím změnu osové vzdálenosti. S použitými šrouby M12 je tento rozsah 10 mm. Ten by ještě nemusel být dostatečný, proto jsou navíc do profilu rámu zavařeny trubky o vnitřním průměru 22 mm, což dále zvýší rozsah pohybu na celkových 25 mm. Tento by již měl být dostatečný pro napnutí řetězu.



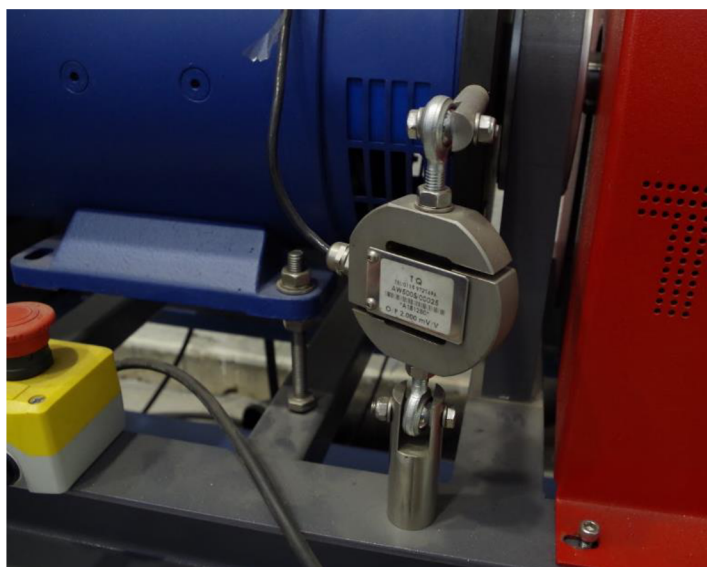
obr. 5-11 Řez ložiskovým domkem

## 5.6 Měřicí řetězec

Stejnoseměrný elektromotor stanice TecQuipment TD301 je osazen rotačním enkodérem Hengstler 0-527-091 snímajícím otáčky a tenzometrickým členem TQ AW500S na rámu. Data z těchto dvou senzorů sbírá panel, který je vybaven USB výstupem. Přes něj jsou data odesílána do počítače, kde je lze zpracovat přiloženým softwarem VDAS. Z otáček a síly na tenzometru lze určit točivý moment a výkon postupem popsáním v kapitole 2.4.



obr. 5-12 Enkodér na hřídeli elektromotoru



obr. 5-13 Tenzometrický člen měřicí stanice

## 5.7 Postup přípravy stanice

Z vozidla je demontováno zadní kolo a z jeho náboje se sundají stávající řetězy. Rám pneumobilu se usadí do profilů na rámu zkušebny a opře o podpěrný sloupek. K zamezení pohybu se dodatečně stáhne popruhy na těchto kontaktních bodech. Na řetězová kola náboje stanice se nasadí řetězy určené pro stanici. Posunutím ložiskových domků směrem k dynamometru se napne dostatečně řetěz a poté jsou dotaženy šroubové spoje domků, přičemž je nutno dbát na stejnou vzdálenost na obou stranách. Nakonec je pomocí napínáku napnut i řemen a stanice je připravena k provozu.

Pro výměnu řetězových kol je nejprve doporučeno podložit hřídel uprostřed vhodným podpěrným sloupkem pro snadnější manipulaci a zamezení přílišné zátěže na pravé ložisko. Na stanici se povolí stavěcí šrouby na ložiskových domcích a hřídel se vysune doprava, čímž je umožněn přístup k náboji.

## 6 DISKUZE

Při návrhu byl kladen důraz na jednoduchost konstrukce a minimalizaci technicky náročných operací, aby bylo možno co nejvíce součástí vyrobit v běžném dílenském prostředí. Proto je například napínák navržen z ohýbaných plechů, využívá k nastavení běžný šroub a jeho čep je zajištěn maticemi, namísto přivaření, kde by bylo obtížné zaručit kolmost. Náboj ze stejných důvodů využívá třecí šroubový spoj namísto lícovaných šroubů, jelikož jejich použití by obnášelo vysoké nároky na přesnost výroby děr v děleném náboji a řetězových kolech. Jako materiál hřídele byla zvolena běžně dostupná konstrukční ocel. Při pevnostní kontrole tak dosahovala její bezpečnost v kritickém místě hodnoty 1,48, která se může jevit jako poměrně nízká. Jelikož zvětšení průměru hřídele brání rozměry menšího řetězového kola, při požadavku na vyšší bezpečnost, například i s ohledem na vyšší než návrhové zatížení v budoucnu, by bylo nutno použít materiálu s vyšší mezí kluzu, takové však již bývají určeny k dalšímu tepelnému zpracování, což zvyšuje nároky na výrobní prostředí i cenu.

Z důvodu požadavku na snadnou rozebíratelnost a co nejmenší časové nároky na provedení zkoušky byla zvolena koncepce, která nespadá ani pod tradiční válcové zkušebny, ani pod motorové. Vozidlo je sice nutno částečně rozebrat, nicméně oproti demontáži celé pohonné jednotky pro motorovou zkušebnu je stále doba přípravy přijatelná. Na rozdíl od dosavadních měření na trati lze také testovat vozidlo i v situaci, kdy je během sezóny kvůli probíhajícím úpravám například podvozku či brzd částečně rozebrané a nezpůsobilé k provozu, případně měření neumožňují aktuální povětrnostní podmínky či nedostupnost vhodného prostoru.

Na náboji jsou momentálně osazena řetězová kola s 53 a 26 zuby, do kterých jsou vyvrtány otvory dle výkresové dokumentace. Tato kola odpovídají aktuálně osazeným na vozidle. Po vzoru jejich výkresů je možno podle potřeb týmu nakoupit a upravit kola s různými počty zubů v intervalu mezi těmito počty. Omezením navrženého zařízení je, že při aktuálním průměru hřídele a vnějším průměru náboje již nelze zvolit kolo s výrazně menším počtem zubů, než právě 26. Výrazně vyšší počet zubů než 53 by mohl naopak způsobit příliš vysoký točivý moment – zde bude vždy nutno ověřit, zda nejsou překročeny konstrukční meze stanice.

Co se týče rámu, je velice pravděpodobně předdimenzovaný, s ohledem na kusovou výrobu, konstrukci z poměrně levných profilů a šířku ložiskových domků však nebylo jeho přesné dimenzování prioritou této práce.

Cílem této práce byl vývoj dynamometru pro vozidlo Falcon. Nově vyvíjený monopost Typhoon s modelem Falcon sdílí pohonnou jednotku, tudíž budou naměřené výsledky i pro toto vozidlo relevantní. Pro budoucí vozidla s jiným pohonem by pak musel být podpěrný sloupek a U-profil přemístěny či upraveny na míru danému vozidlu.

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce byl návrh dynamometru pro pneumobil Falcon závodního týmu působícího na VUT.

Na základě návrhových parametrů vozidla a experimentálních dat z jeho provozu bylo rozhodnuto o využití dynamometru ze školní stanice TecQuipment TD301, který splňoval po navrženém zpřevodování parametry nutné pro účely měření tohoto pneumatického pohonu.

Oproti na trhu běžně dostupným válcovým a motorovým zkušebnám je zde použita specifická koncepce měřicí stanice s částečnou demontáží vozidla. Výhodou takového provedení je eliminace náročné demontáže celé pohonné jednotky u zkušeben motorových, zároveň se stále jedná o levnější a snáze vyrobiteľnou variantu oproti zkušebně válcové, která by navíc u tohoto typu vozidla měla značné riziko ztrát prokluzem.

Požadavek na minimalizaci cenových nákladů bylo splněn především využitím stávajícího školního dynamometru a zajištěním vyrobiteľnosti většiny součástí ve školních podmínkách.

Zvolené provedení pak bylo rozpracováno v rámci konstrukčního návrhu v systému SolidWorks, v němž byly vymodelovány všechny konstrukční uzly (rám, hřídel, náboj a napínák řemene) a vytvořena výkresová dokumentace. Ke zvolení a výpočtu řemenového pohonu byl použit software výrobce řemene CONTI Professional. V softwaru MathCAD byla zpracována výpočtová zpráva. V ní jsou výpočtově ověřeny vybrané konstrukční uzly. Z důvodu výrazného namáhání byly ověřeny třecí šroubové spoje v náboji. Dále byla vypočtena bezpečnost hřídele vůči meznímu stavu pružnosti a zkontrolovány spoje pery na otláčení. U napínáku řemene pak byla provedena kontrola stavěcího závitu v plechu vůči otláčení a vypočtena bezpečnost čepu. Nakonec byla určena trvanlivost ložisek pomocí kalkulátoru na stránkách jejich výrobce SKF. Všechny navržené součásti kontrolám vyhověly.

Přínos práce spočívá zejména v navržení dostupné alternativy ke komerčním řešením na míru tomuto pohonu a poskytuje týmu přesnější data pro optimalizaci parametrů pohonu a rychlému, objektivnímu porovnání vlivu úprav vozidla ve srovnání s dosavadními metodami návrhových výpočtů a časově náročnými zkouškami na trati.

Byly navrženy dva testovací módy, statická a dynamická zkouška. Se stávajícím ovládacím panelem a softwarem stanice je možno provádět zkoušku statickou, na provedení zkoušky dynamické by bylo potřeba navrhnout ovládací panel a software nově. To by tak bylo možným pokračováním této práce.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VLK, František. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel : výkon vozidla, brzdné vlastnosti, převodová ústrojí, řízení, geometrie kol, tlumiče a pružiny, říditelnost a ovladatelnost, životnostní zkoušky, motor, zapalování, elektronické systémy*. 2. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2005. ISBN 80-239-3717-0.
- [2] *Motocomtest* [online]. [vid. 2019-11-05]. Dostupné z: <http://www.motocom.cz/mereni2.htm>
- [3] *DIESELPOWER race engineering - Válcová zkušebna (brzda)* [online]. [vid. 2019-11-04]. Dostupné z: <https://dieselpower.cz/raceold/Vyvoj-Servis-Centrum/valcova-zkusebna.php>
- [4] *DYNomite Dynamometer* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [https://www.dynomitedynamometer.com/dyno-tech-talk/simulate\\_road\\_loads.htm](https://www.dynomitedynamometer.com/dyno-tech-talk/simulate_road_loads.htm)
- [5] *SuperFlow Dynamometers & Flowbenches | Sussex, Wisconsin* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://superflow.com/product/sf-849-chassis-dyno/#overview>
- [6] *GTR on dyno | Sunny | Flickr* [online]. [vid. 2019-11-04]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/airboy123/8542044871>
- [7] *File:VCR-engine dyno testing P1505 Heilbronn University.jpg - Wikimedia Commons* [online]. [vid. 2019-11-05]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VCR-engine\\_dyno\\_testing\\_P1505\\_Heilbronn\\_University.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VCR-engine_dyno_testing_P1505_Heilbronn_University.jpg)
- [8] *SuperFlow Dynamometers & Flowbenches | Sussex, Wisconsin* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://superflow.com/product/sf-powermark-engine-dynamometer/>
- [9] NOVÁK, M. *Realizace edukačních úloh na experimentální stanici pro testování spalovacích motorů*. 2010. 83s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Martin Vrbka.
- [10] *Manuály ke stanici Regenerative Engine Test Set TD300*, TecEquipment Ltd, Bonsall Street, Long Eaton, Nottingham NG10 2AN, UK.
- [11] KOBRLE, Pavel. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [12] *MD-Performance-Catalog* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.mustangdyne.com/wp-content/uploads/2020/01/MD-Performance-Catalog.pdf>
- [13] *AC Dynamometers | Motoring Dynos | Sakor Technologies* [online]. [vid. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://www.sakor.com/Products/AccuDyne-AC-Dynamometers>
- [14] *Dynamometr na vířivé proudy a jeho regulace - Časopis Elektro - Odborné časopisy* [online]. [vid. 2019-12-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/dynamometr-na-virive-proudy-a-jeho-regulace--14869>
- [15] *DE400 Engine Dynamometer* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.taylordyno.com/wp-content/uploads/pdfs/SMS2031-DE400.pdf>

- [16] ATKINS, Richard D. *An introduction to engine testing and development*. Warrendale, Pa.: SAE International, c2009, xv, 289 p. ISBN 07-680-2099-9.
- [17] Stejnoseměrné stroje [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/stroje/skripta/ss\\_stroje.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/stroje/skripta/ss_stroje.pdf)
- [18] *SIT timing pulleys - TOP DRIVE HTD* [online]. SIT SpA [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [http://sit-shanghai.com/wp-content/uploads/\\_documents/en/HTD-Timing-pulleys.pdf](http://sit-shanghai.com/wp-content/uploads/_documents/en/HTD-Timing-pulleys.pdf)
- [19] *Taper bushing SER-SIT* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [http://sit-shanghai.com/wp-content/uploads/\\_documents/en/Taper-bushing-SER-SIT.pdf](http://sit-shanghai.com/wp-content/uploads/_documents/en/Taper-bushing-SER-SIT.pdf)
- [20] PILKEY, Walter D. *Peterson's Stress Concentration Factors*. 2. vyd. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN 9780471538493.

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Superflow AutoDyn™ 849 [5].....	16
Obr. 2-2	Nissan GTR na válcové zkušebně [6]. .....	17
Obr. 2-3	Motor Ford EcoBoost na motorové zkušebně [7]. .....	17
Obr. 2-4	Zkušebna SF-POWERMARK [8] .....	18
Obr. 2-5	Školní experimentální stanice TecQuipment TD301. ....	19
Obr. 2-6	Momentová charakteristika stejnosměrného stroje [3].....	20
Obr. 2-7	Motorová zkušebna Sakor AccuDyne [13]. .....	21
Obr. 2-8	Vířivá brzda Taylor Dynamometer DE400 [15].....	22
Obr. 2-9	Uložení dynamometru [1].....	22
Obr. 2-10	Princip měření točivého momentu [16].....	23
Obr. 2-11	Kvadranty $\Omega$ -M diagramu [11].....	23
Obr. 2-12	Průběh tlaku a rychlosti během rychlostní zkoušky pneumobilu .....	24
Obr. 4-1	Nákres varianty 1 - Válcová zkušebna jednoduchá.....	30
Obr. 4-2	Nákres varianty 2 - Válcová zkušebna s elektromotorem. ....	31
Obr. 4-3	Nákres varianty 3 - Zkušebna s částečnou demontáží.....	31
Obr. 4-4	Nákres varianty 4 - Motorová zkušebna .....	32
Obr. 5-1	Celkový pohled na stanici. ....	34
Obr. 5-2	Řez nábojem s řetězovými koly. ....	37
Obr. 5-3	Hřídel s vyznačenými kritickými místy. ....	38
Obr. 5-4	Průběh ohybového momentu v rovině XZ v DSNWinbeam.....	39
Obr. 5-5	Průběh ohybového momentu v rovině XY v DSNWinbeam. ....	39
Obr. 5-6	Průběh celkového ohybového momentu na hřídeli. ....	40
Obr. 5-7	Ukázka zadání výpočtu na webu eFatigue. ....	40
Obr. 5-8	Ukázka odečtení z Petersonova nomogramu na webu eFatigue.....	41
Obr. 5-9	Řez napínákem řemene .....	42
Obr. 5-10	Detail uložení vozidla s vyznačenými kontaktními plochami rámu.....	43
Obr. 5-11	Řez ložiskovým domkem. ....	44
Obr. 5-12	Enkodér na hřídeli elektromotoru.....	45

Obr. 5-13 Tenzometrický člen měřicí stanice..... 46

## 10 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Srovnání parametrů školní zkušebny a pneumobilu.....	29
Tab. 4-2	Zhodnocení variant.....	33

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

Výpočtová zpráva

Výstupní protokol řemene z programu CONTI Professional

Výkresová dokumentace