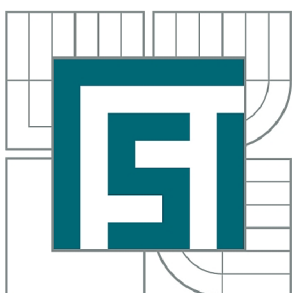




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## KONCEPCE ULOŽENÍ MOTORU FORMULE STUDENT NA DYNAMOMETR

CONCEPTION OF MOUNTING FORMULA STUDENT ENGINE TO DYNAMOMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MILAN ŠPIČÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL JANOUŠEK

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Milan Špičák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

### **Koncepce uložení motoru Formule Student na dynamometr**

v anglickém jazyce:

### **Conception of mounting Formula Student engine to dynamometer**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte koncepční řešení uložení motoru formule student na dynamometr Superflow.

Cíle bakalářské práce:

Úvod do problematiky

Popis měřicího stanoviště

Přehled používaných řešení uložení motoru

Návrh koncepce uložení pro motor formule student

Závěr

Seznam odborné literatury:

[1] VLK,F. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. ISBN 80-234-6573-0, Nakladatelství VLK, Brno 2000.

[2] SVOBODA,P.-BRANDEJS,J.-DVOŘÁČEK,J.-PROKEŠ,F.:Základy konstruování. Brno.CERM,s.r.o.2009.ISBN 978-80-7204-633-1

[3] SUPERFLOW DYNAMOMETERS & FLOWBENCHES. SuperFlow SF-902 Engine Dynamometer [online]. 2012 [cit. 2012-10-19]. Dostupné z: <http://www.superflow.com/Dynamometers/Engine/sf902.php>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Janoušek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 9.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty



## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá uložením jednoválcového motocyklového motoru na dynamometr. V první části je osvětlena problematika soutěže Formula Student. Dále práce obsahuje rozbor používaných motorových zkušeben včetně měřicí techniky. V poslední části je samotný návrh uložení motoru Husaberg FE 570 na dynamometr Superflow SF-902, pro ilustraci doplněný o virtuální model.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Motorová zkušebna, měřicí technika, Husaberg FE 570, dynamometr, SF-902, Formula Student, TU Brno Racing

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis describes the mounting of single cylinder motorcycle engine on a dynamometer. The first part is about Formula Student competition. It also contains an overview of the motor testing cells, including measuring equipment. Finally describes the draft of mounting the engine Husaberg FE 570 on dynamometer Superflow SF-902 including virtual model for illustration.

## **KEYWORDS**

Engine testing cell, measuring equipment, Husaberg FE 570, dynamometer, SF-902, Formula Student, TU Brno Racing





## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠPIČÁK, M. *Koncepce uložení motoru Formule Student na dynamometr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 36 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Janoušek.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Janouška a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2013

.....

Milan Špičák



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce za jeho cenné připomínky a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu.



## OBSAH

Úvod .....	9
1 Formula Student .....	10
1.1 Tým TU Brno Racing .....	10
1.2 Pravidla soutěže týkající se spalovacích motorů .....	12
2 Měřicí stanoviště pro motorové zkoušky .....	13
2.1 Popis měřicího stanoviště .....	13
2.1.1 Technika pro udržení optimálních podmínek .....	13
2.1.2 Řídící technika zkušebny .....	14
2.1.3 Měřicí technika .....	14
2.2 Přehled typů dynamometrů .....	20
2.2.1 Elektrický vířivý dynamometr .....	20
2.2.2 Práškový elektrický vířivý dynamometr .....	21
2.2.3 Hydrodynamický dynamometr .....	21
2.2.4 Elektrický dynamometr .....	22
2.2.5 Tandemové dynamometry .....	23
2.3 Dynamometr Superflow SF-902 .....	23
2.3.1 Specifikace .....	23
2.3.2 Vybavení .....	24
3 Uložení motoru Husaberg FE 570 na dynamometr .....	25
3.1 Předchozí řešení .....	25
3.1.1 Z převodovky na elektrický vířivý dynamometr V250 .....	25
3.1.2 Z převodovky na hydrodynamický dynamometr Superflow SF-902 .....	26
3.2 Nová koncepce uložení motoru Husaberg FE 570 .....	27
3.2.1 Virtuální model motoru Husaberg FE 570 .....	27
3.2.2 Umístění motoru na základě virtuálního modelu .....	30
3.2.3 Přenos točivého momentu .....	30
Závěr .....	34
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	36



## ÚVOD

Před téměř třemi lety vznikl na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně tým, účastníci se soutěže Formula Student. Jak napovídá samotný název TU Brno Racing, TU z anglického „Technical University“, jedná se o celosvětový podnik. Hlavním úkolem je konstrukce formulového vozu pro účast v sérii závodů. Soutěží se ve dvou kategoriích Formula Student Electric a Formula Student Combustion, lišících se pohonnou jednotkou vozu. V kategorii Electric můžeme vidět elektrické motory, oproti tomu v Combustion se využívá klasických spalovacích.

Konstrukce takového vozu vyžaduje komplexní řešení od samotné koncepce přes konstrukční návrh, výrobu, až po samotné testování. Tato práce se zaměří na poslední zmíněné, čímž je testování a optimalizace pohonné jednotky.

Brněnské formule používají jednoválcové spalovací motory od rakouské firmy Husaberg, které je možné vidět v jejich motocyklech FE 570. Takto specifické uplatnění motocyklového motoru si žádá jistých úprav, zejména v řízení motoru.

Nejpoužívanější metodou pro vhodné nastavení parametrů potřebných pro správnou funkci motoru, je jejich testování na motorové zkušebně. Motorová zkušebna umožňuje simulovat různé zátěžné stavy motoru a nastavit v nich důležité veličiny jako je předstih zážehu a dávka paliva.

Tato práce se zabývá koncepčním návrhem zástavby motoru na zkušební stav, neboť používané řešení se v praktickém provozu neosvědčilo. První část obsahuje krátké seznámení se soutěží Formula Student a týmem TU Brno Racing působícím v ní. Druhá část se zabývá technikou používanou pro měření parametrů motoru a zajištění stálých podmínek, v průběhu testu. V závěru je podrobný rozbor dynamometru Superflow SF-902, který bude použit pro testování motoru Husaberg FE 570 a návrh koncepčního řešení zástavby.



# 1 FORMULA STUDENT

Formula Student je soutěž, které se účastní zejména studenti technických vysokých škol z celého světa. Zadáním je vytvoření fiktivní společnosti, která se bude zabývat vývojem a sériovou produkcí vozů formulového typu pro amatérské víkendové jezdce. Hodnotí se celkový prodejní plán, cena v porovnání s poptávkou, konstrukční řešení a samotný prototyp potom předvádí celkový jízdní potenciál.

Historie Formule Student se začala psát v osmdesátých letech na území Spojených států amerických, kde je známá pod názvem Formula SAE®. Na konci let devadesátých se v britském Silverstone konal první evropský podnik známý pod názvem Formula Student. V současné době jsou závody formule student, rozšířeny na všechny kontinenty vyjma Antarktidy. Každý účastník musí být registrován u místních organizací technických inženýrů, jako je americká SAE, nebo britská IMechE. Proto můžeme říct, že s celkovým počtem přes 500 registrovaných týmů, se jedná o nejrozšířenější mezinárodní soutěž technických vysokých škol na světě. [7]

## 1.1 TÝM TU BRNO RACING

Tým formule student v Brně vzniknul v roce 2010 na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně. Hlavní impulz pocházel od skupinky studentů, která měla zkušenost s tímto projektem z pobytu na zahraniční univerzitě v dánském Odense.

V prvním roce existence tohoto týmu se podařilo postavit první generaci s typovým označením Dragon 1. Mezi největší úspěchy tohoto ročníku lze považovat účast na soutěži v britském Silverstone 2011. Na domácím poli členové týmu obdrželi cenu rektora VUT.



*Obr. 1 Snímek vozu Dragon 1*



Ve druhé sezóně byl zkonstruován vůz Dragon 2, se kterým se tým zúčastnil třech zahraničních podniků v britském Silverstone, maďarském Gyoru a italském Varanu. Kromě účasti na závodech došlo i k širšímu rozšíření povědomí o tomto projektu v rámci celé fakulty a zviditelnění projektu i mimo akademickou obec.



*Obr. 2 Snímek vozu Dragon II*

Současná generace vozu Dragon 3, je právě dokončována, jako hlavní cíl si dává bodovat alespoň v jednom ze tří plánovaných podniků na stupních vítězů. Zásadní zlom v tomto ročníku nastal z hlediska spolupráce s ostatními fakultami VUT, propagaci týmu a celého projektu v široké veřejnosti, na což ukazuje i velký nárůst spolupráce s průmyslem.



*Obr. 3 Render vozu Dragon III*



## 1.2 PRAVIDLA SOUTĚŽE TÝKAJÍCÍ SE SPALOVACÍCH MOTORŮ

Soutěžící ve formuli student se řídí pravidly vytvořenými americkou SAE International, která si jednotliví pořadatelé doplní o svá konkrétní vydání. Celý dokument je rozdělen do jednotlivých podsekcí, pro účely této práce bude rozebrána část zabývající se spalovacím motorem.

Základním omezením je nutnost použití čtyřdobých, pístových spalovacích motorů, kdy maximální zdvihový objem všech použitých motorů nesmí překročit hranici  $610 \text{ cm}^3$ .

Vzduch potřebný pro vytvoření palivové směsi musí projít přes jediný restriktor, což je část sacího potrubí, která je umístěna mezi škrticí klapkou a motorem. Musí mít kruhový průřez a podle použitého paliva je dán i jeho průměr. Pro motory spalující benzín je předepsaná hodnota 20 mm a pro E85 19 mm. Přepínat motor je možné pouze uspořádáním sacího traktu v pořadí škrticí klapka, restriktor, kompresor, motor, kdy chladit stlačený vzduch může pouze chladič typu vzduch-vzduch, nebo voda-vzduch.

Směšování paliva je dovoleno jak v karburátoru, tak systémem elektronického vstřikování.

Výfukové potrubí je omezeno z hlediska hluku, kdy maximální hluk při střední pístové rychlosti 914,4 m/min nesmí přesáhnout hodnotu 110dB.

Motor lze uvést do chodu pouze startérem, který se musí ovládat z pozice řidiče.[7]



Obr. 4 Řez motorem Husaberg FE 570[11]





## 2 MĚŘICÍ STANOVIŠTĚ PRO MOTOROVÉ ZKOUŠKY

Pod pojmem měřicí stanoviště pro motorové zkoušky rozumíme zařízení, které umožňuje provoz spalovacího motoru v různých jízdních režimech, kterým podléhá při běžném provozu ve vozidle a měření veškerých jeho parametrů. V dnešní době dokáže moderní stanoviště simulovat jízdní podmínky nejen z hlediska zátěže motoru, ale díky komplexnímu procesnímu řízení i z hlediska klimatického.

Motorová zkouška se nemusí provádět jen na samotném motoru, ale existují stanoviště, která umožňují provoz celého hnacího ústrojí tj. motor, převodová skříň, diferenciál, nebo celého vozidla v tzv. válcových vozidlových zkušebnách, jejich největší výhodou oproti předchozím je nejméně náročná příprava zkoušky.

Pro účely této práce se omezíme pouze na stanoviště zkoušející samotný motor.[13]

### 2.1 POPIS MĚŘICÍHO STANOVIŠTĚ

Motorová zkušebna se skládá zpravidla ze dvou vzájemně oddělených místností, jejichž vybavení lze rozdělit do následujících kategorií:

#### 2.1.1 TECHNIKA PRO UDRŽENÍ OPTIMÁLNÍCH PODMÍNEK

Důležitým aspektem při testování motorů je hluk, proto je zkušebna od ostatních částí oddělena protihlukovou izolací. Výfukové plyny zpracovává speciální odsávací systém, včetně filtrů.

Pro navození požadované klimatické kondice je nutná výkonná vzduchotechnika. Chladicí okruh motoru je napojen na speciální zařízení pro jímání tepla, které drží teplotu chladicího média v požadovaném rozmezí, přičemž obdobným způsobem lze připravit i teplotu paliva.

Zřídka je možné se setkat se zařízeními, která upravují plnicí vzduch, jako jeho teplotu a tlak. Nachází uplatnění ve specializovaných zkušebnách pro přepřehované motory.[2][13]



Obr. 5 Odsávací vstup zkušebny Superflow SF-902



### 2.1.2 ŘÍDICÍ TECHNIKA ZKUŠEBNY

Veškeré probíhající procesy na zkušebně se řídí a zaznamenávají pomocí automatizovaných systémů umístěných v tzv. velíně. Ten je rozdělen na několik pracovišť, kde se v určité části ovládá klimatizační technika, další řídí a zaznamenává měřené údaje dynamometru a poslední slouží pro řízení motoru.



Obr. 6 Pohled z velína zkušebny Superflow SF-902

### 2.1.3 MĚŘICÍ TECHNIKA

Smyslem celého testu je vyčíslit měřené parametry motoru a stanovit vzájemné závislosti těchto parametrů. Výčet nejčastěji sledovaných veličin je možné vidět v Tab. 1.

Podmínky měření, měřené veličiny a korekce na standartní podmínky jsou specifikovány v následujících normách.[4][13]

- ISO 1585:1992 „Silniční vozidla. Zkoušky motoru. Výkon netto.“
- ČSN 30 2008 „Motory automobilové. Zkoušky na brzdovém stanovišti.“

Tab. 1 Nejčastěji sledované veličiny na zkušebnách spalovacích motorů

Teploty	Tlaky	Průtoky	Poloha	Ostatní
Chladicí médium	Plnicí vzduch	Chladicí médium	Škrticí klapky	Složení výfukových plynů
Výfukové plyny	Palivo	Palivo	Klikový hřídel	Točivý moment
Palivo	Mazivo	Mazivo	Vačkové hřídele	
Plnicí vzduch	Spalovací tlaky	Plnicí vzduch		
Mazivo				



## TEPLOTY

K měření teploty se nejčastěji používají **termočlánky**, pracující na principu termoelektrického jevu. Využívá se rozdílného elektrického potenciálu dvou kovů v závislosti na teplotě. Podle použitých materiálů je možné zvolit správný rozsah termočlánku.[5]



*Obr. 7 Snímač teploty*

## TLAKY

Pro nižší pracovní tlaky, jako jsou tlak oleje nebo tlak paliva, se používají tzv. **tenzometrické snímače**. Měřený tlak působí uvnitř snímače na membránu z vhodně zvoleného materiálu dle měřicího rozsahu zařízení. Pomocí tenzometru, součásti, která v závislosti na svém tvaru mění svou vlastní elektrickou vodivost, se změří deformace této membrány a následně vypočítá požadovaný tlak.

Tlaky působící například uvnitř spalovacího prostoru se měří zařízením pracujícím na principu tzv. **piezoelektrického jevu**. To znamená, že uvnitř snímače je umístěn krystal, který je schopen v závislosti na své deformaci generovat elektrické napětí.[5]



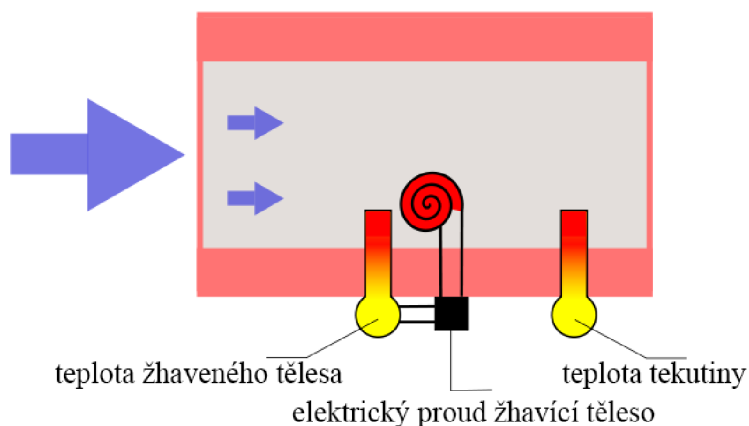
*Obr. 8 Snímače tlaku*



## PRŮTOKY

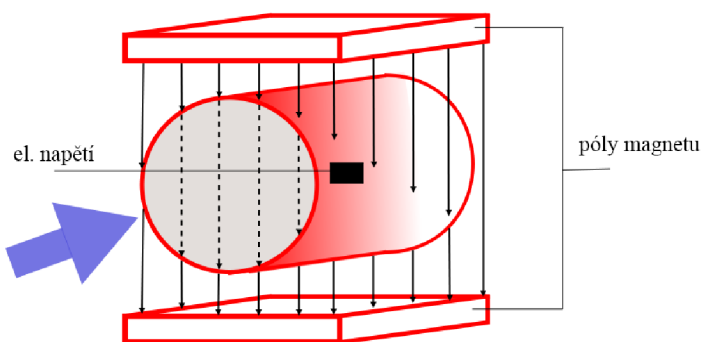
Výčet používaných metod v této oblasti je velmi rozsáhlý. Závisí zejména na charakteru měřeného média, předpokládaném rozsahu a stupni požadované přesnosti.

Mezi hlavní zástupce patří **termoelektrické průtokoměry**. V proudu tekutiny je umístěno vyhřívané tělísko, které je ochlazováno obtékající tekutinou. Změnou proudu procházejícího tělískem, je udržován konstantní rozdíl teploty tělíska a kapaliny, množství protékající kapaliny určíme z velikosti proudu potřebného pro ohřívání tělíska. Takto pracují hlavně hmotností průtokoměry nasávaného vzduchu.[5]



Obr. 9 Princip termoelektrického průtokoměru[5]

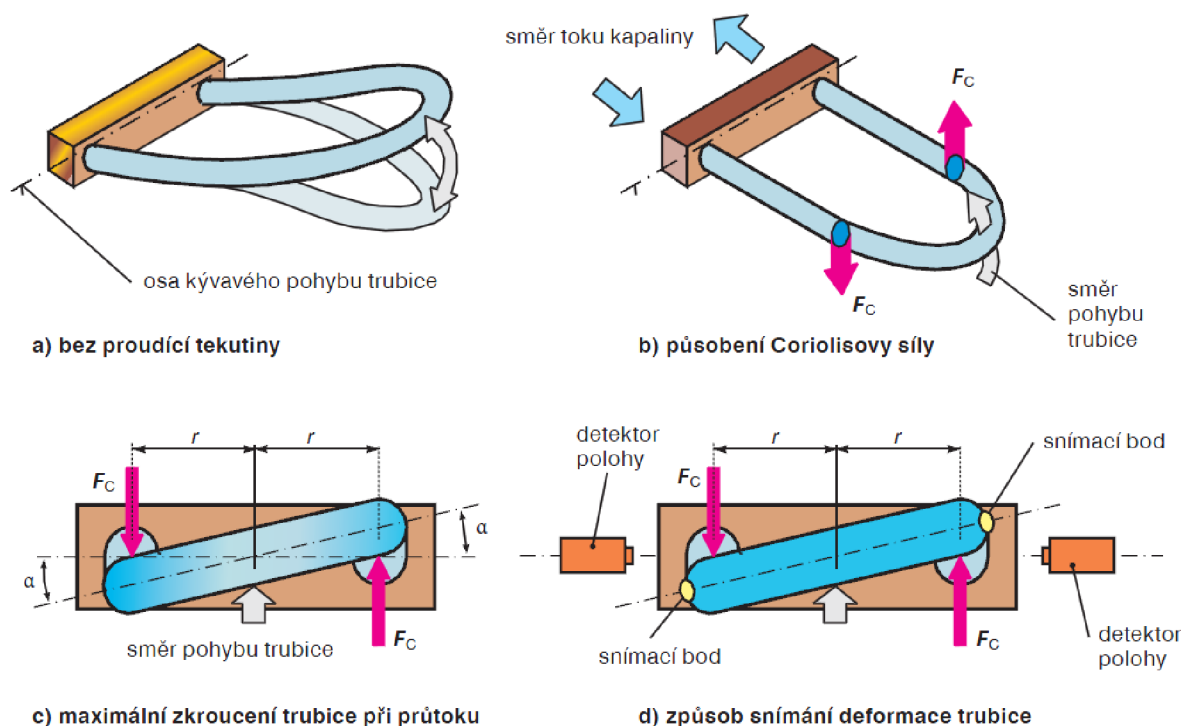
Pro měření například chladicích médií se používají **indukční průtokoměry**, které pro svou práci potřebují vodivé médium. Pokud se v magnetickém poli pohybuje vodivé těleso, indukuje v sobě elektrické napětí. Existuje lineární závislost mezi střední rychlostí proudu kapaliny a indukovaným napětím.[5]



Obr. 10 Princip indukčního průtokoměru[5]



V případě nevodivého paliva je možné uplatnit průtokoměry založené na principu **Coriolisova efektu**. Jedná se o nejpřesnější metodu určování hmotnostního průtoku tekutiny, která nezávisí na měřeném médiu. Jak je vidět na Obr. 11 průtok tekutiny kmitající U-trubicí ovlivňuje velikost Coriolisovy síly působící na tuto trubici, tudíž z této závislosti lze určit rychlost průtoku tekutiny a dále vypočítat její průtok.[8]



Obr. 11 Princip Coriolisova průtokoměru [8]

### POLOHA, RYCHLOST A ZRYCHLENÍ

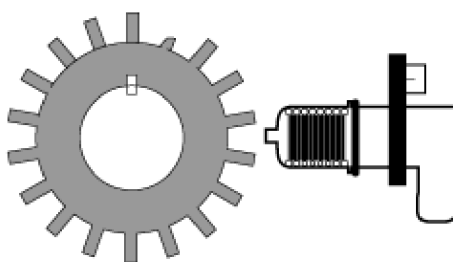
Snímání polohy, respektive rychlosti a zrychlení závisí zejména na tom, jaký pohyb sledovaná součást koná a v případě otáčejících se částí, zda se jedná o pohyb kontinuální.

Translační pohyb konečné délky, lze změřit tzv. lineárním potenciometrem, který mění svůj elektrický odpor v závislosti na posuvu jádra uvnitř obalu. Podobný princip se používá i u součástí konajících rotační pohyb konečného natočení, který se změří rotačním potenciometrem.



*Obr. 12 Snímače polohy, rychlosti, zrychlení*

Polohu, rychlost a zrychlení rotujících mechanismů měří například bezkontaktní snímače pracující na principu elektromagnetické indukce, respektive Hallova jevu. Senzor snímá otáčející se kolo s profilovaným povrchem, většinou ve tvaru zubů, tím ovlivňuje magnetické pole v okolí snímače. Na základě takto získaného signálu je řídicí systém schopen vyhodnotit časovou závislost výskytu zubů, tudíž i rychlost a zrychlení snímaného kola. Pokud je profilovaný povrch vyroben, tak že obsahuje jeden, nebo více odlišných zubů je možné vyhodnocovat i polohu, ve které se daný mechanismus nachází.



*Obr. 13 Snímání polohy[5]*

#### VÝKON A TOČIVÝ MOMENT

Měřitkem porovnání motorů a cílem optimalizace je závislost točivého momentu, respektive výkonu na otáčkách motoru. Tuto závislost je možné získat dynamickým, či statickým měřením.





## Dynamické měření

Jedná se levnější, ovšem v čistě motorových zkušebnách méně používaný způsob. Zkoušený motor roztáčí těleso o známém momentu setrvačnosti ze základních otáček do maximálních možných, při plně otevřené škrtkové klapce.

Okamžitý točivý moment se potom vypočítá jako součin okamžitého úhlového zrychlení a momentu setrvačnosti:

$$M_o = I \cdot \alpha_o \text{ [Nm]} \quad (1)$$

Okamžitý výkon jako součin okamžité úhlové rychlosti a okamžitého točivého momentu:

$$P_o = M_o \cdot \omega_o \text{ [W]} \quad (2)$$

Pro zpřesnění se výpočet ještě doplňuje o koeficienty zohledňující tření, setrvačné hmoty samotného motoru apod.

Tato metoda neumožňuje aktivní zásah do řízení motoru během testu ani simulaci jízdních režimů. [2][13]



Obr. 14 Ukázka objemu setrvačných hmot při dynamickém měření [9]

## Statické měření

Označované jako motorová brzda s retardérem, případně univerzální brzda. Síla motoru, respektive její moment se měří zařízením zvaným dynamometr, který se skládá ze dvou hlavních částí. Stator, ten je uložen v nosné konstrukci tak, aby bylo možné v této vazbě měřit velikost reakčního silového momentu a uvnitř se otáčející rotor poháněný zkoušeným agregátem. Podle použité technologie se řídí přenos síly z rotoru na stator a tím se vyvíjí zátěž pro motor.



Dynamometr umožňuje měřit průběh točivého momentu, respektive výkonu v závislosti na otáčkách. Setrvat na dílčích hodnotách otáček tzv. Měření na konstantní rychlost, nebo setrvat na určité hodnotě zatížení tzv. Měření na konstantní sílu a zasahovat přitom do řízení motoru. Díky tomu je možné simulovat různá zatížení při provozu vozidla již na motorové zkušebně.[2]

## 2.2 PŘEHLED TYPŮ DYNAMOMETRŮ

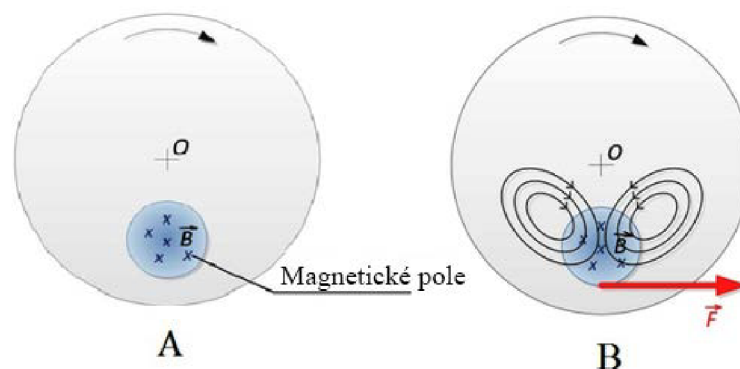
Rozlišujeme dva základní typy dynamometrů:

**Pasivní dynamometry** jsou schopny pouze absorbovat (brzdit) energii motoru.

**Aktivní dynamometry** jsou schopny jak absorbovat, tak samy produkovat kinetickou energii a naopak tak motor roztáčet. Tím se například dají určit pasivní odpory, případně simulovat režim brzdění motorem.

### 2.2.1 ELEKTRICKÝ VÍŘIVÝ DYNAMOMETR

Elektrické vířivé dynamometry jsou v současné době nejrozšířenějším typem pasivních dynamometrů. Základem je vodivý rotující kotouč umístěný v magnetickém poli statoru, které vytváří elektromagnety. Díky rotaci dochází k časové změně magnetického pole vůči kotouči a tím k indukci elektrického proudu. Ten, ale zpětně vytváří okolo kotouče magnetické pole, které má opačný směr než pole původní, tím vzniká brzdící síla, respektive moment síly v uložení statoru. Při tomto jevu dochází ke vzniku tzv. Joulova tepla, které je nutné odvádět. Velikost brzdící síly je závislá na budícím proudu elektromagnetů.[4]



Obr. 15 Ukázka vířivých proudů v rotujícím disku [10]

Jeho největší výhodou, jako u většiny dynamometrů na bázi elektromagnetismu, je rychlá reakce na požadovanou změnu zátěže. Mezi hlavní nevýhody patří velký objem setrvačných hmot v porovnání s jinými dynamometry a s tím související velikost celého zařízení a vyšší pořizovací cena.





### 2.2.2 PRÁŠKOVÝ ELEKTRICKÝ VÍŘIVÝ DYNAMOMETR

Práškové elektrické vířivé dynamometry jsou speciálním provedením elektrického vířivého dynamometru, kdy je do vzduchové mezery mezi statorem a rotujícím diskem aplikován prášek vodivého materiálu, který zvýší koncentraci vířivých proudů, a tím i účinnost celého dynamometru. Problém nastává při chlazení tohoto dynamometru, proto nachází uplatnění pouze při nižších otáčkách.[4][13]



*Obr. 16 Vířivý dynamometr AVL DP 500*

### 2.2.3 HYDRODYNAMICKÝ DYNAMOMETR

Hydrodynamické dynamometry patří do kategorie pasivních. Pracují na principu hydraulického čerpadla, kde regulací průtoku kapaliny měníme sílu, kterou působí rotor na vnitřek statoru. Z hlediska hydromechaniky dochází, vlivem nuceného snížení průtoku, k přeměně kinetické energie na tlakovou a tepelnou, ta je s proudem kapaliny odnášena do vyrovnávacího zásobníku, kde se maří do okolí.

Výhodou je nízká pořizovací cena, malá velikost, nízká hmotnost a možnost absorbovat velké množství energie. V porovnání s elektrickými dynamometry nedokáží hydrodynamické tak rychle zareagovat na požadovanou změnu brzděného momentu, což je do jisté míry kompenzováno menším objemem setrvačných hmot.[4]



*Obr. 17 Hydrodynamický dynamometr Superflow SF-902*

#### **2.2.4 ELEKTRICKÝ DYNAMOMETR**

Elektrické dynamometry jsou zástupci kategorie aktivních. Jako absorbér energie se používá stejnosměrný elektromotor, který je možné provozovat buď aktivně, jako motor a sledovat například třecí ztráty, nebo klasicky jako generátor a v závislosti na budícím proudu rotoru řídit zátěž zkoušenému agregátu.[4]



*Obr. 18 Aktivní elektrický dynamometr DS 736-4V*



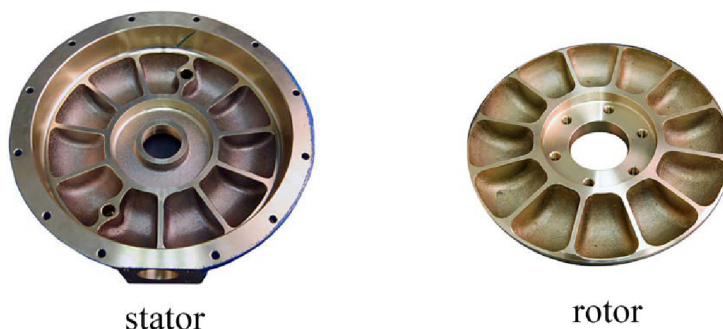
### 2.2.5 TANDEMOVÉ DYNAMOMETRY

Tandemové dynamometry nachází uplatnění při zkouškách vysoko-výkonových, nebo velkoobjemových motorů, kde se musí absorbovat velké množství energie. Proto se používá sériového spojení dvou a více konvenčních dynamometrů.[4]

## 2.3 DYNAMOMETR SUPERFLOW SF-902

SF-902 je hydrodynamický dynamometr americké společnosti Superflow specifický svou variabilitou a širokým měřicím rozsahem.

Oproti konkurenčním výrobcům hydrodynamických dynamometrů používá firma Superflow patentované řešení nerezového statoru, čímž dosahují o 75% vyšší odolnosti vůči kavitačnímu poškození, v porovnání s bronzovými, nebo hliníkovými. **Kavitace** je jev, ke kterému dochází u hydraulických strojů a způsobuje poškozování lopatek. Při vysokých rychlostech oběžného kola dochází v určitých oblastech k významnému snížení tlaku až pod hodnotu nasycených par, které má za následek přechod kapaliny ze skupenství kapalného do plynného a vzniku malých nestabilních bublinek, které se následně hroubí a způsobují tlakový ráz uvnitř stroje. Proto, že k tomuto jevu dochází opakovaně, projevuje se únavovým poškozením jednotlivých součástí.[6][8]



*Obr. 19 Ukázka rotoru a statoru dynamometru SF-902[6]*

### 2.3.1 SPECIFIKACE

Pracovním médiem je voda, která se pomocným čerpadlem distribuuje z vyrovnávacího zásobníku, tak je celý systém provozován v uzavřeném okruhu. Na rozdíl od otevřených systémů nedochází ke kontaminaci okolního prostředí.

Maximální rychlost otáčení dynamometru je 15 000 ot/min, maximální brzdový výkon 1119 kW a maximální točivý moment 1627 Nm, čímž umožňuje měření většiny běžných agregátů.[6]



### 2.3.2 VYBAVENÍ

Běžně dodávané příslušenství od společnosti Superflow je:

- chladicí věž
- vozík pro transport motoru na Obr. 20
- servo-pohon pro ovládání škrticí klapky
- 16-ti kanálový panel pro připojení senzorů teploty
- 10-ti kanálový panel pro senzory tlaku
- dva kanály pro měření tlaku plnicího vzduchu a paliva
- dva průtokoměry paliva
- váha vzduchu



*Obr. 20 Vozík Superflow pro transport motoru[6]*

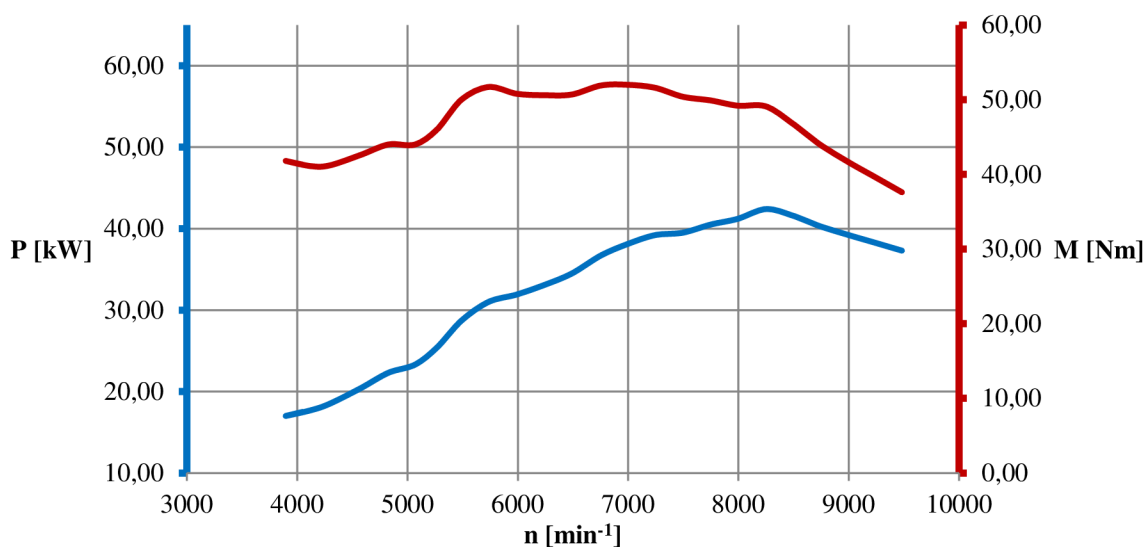


### 3 ULOŽENÍ MOTORU HUSABERG FE 570 NA DYNAMOMETR

Kvůli pravidly předepsanému restriktoru nebylo možné použít sériové řízení motoru, proto se tým rozhodl použít plně programovatelnou jednotku od britské společnosti DTA Fast.

K dosažení co nejvyššího výkonu a plochého průběhu točivého momentu bylo nutné tyto parametry seřadit na měřicím stanovišti. Vzhledem k možnostem týmu a svým vlastnostem byl k tomuto účelu v roce 2013 zvolen dynamometr Superflow SF-902.

Pro bezpečný a přesný průběh takového měření bylo důležité navrhnout pevné uchycení motoru v motorové zkušebně a zvolit místo pro přenos krouticího momentu z motoru na hřídel dynamometru.



Obr. 21 Výkonové parametry motoru Husaberg FE 570 v roce 2012

#### 3.1 PŘEDCHOZÍ ŘEŠENÍ

Doposud existovala dvě řešení uchycení motoru Husaberg FE 570 na dynamometr v rámci Ústavu automobilního a dopravního inženýrství FSI VUT v Brně, ale ukázala se jako nevyhovující, proto bylo nutné na základě nabytých zkušeností navrhnout řešení nové.

##### 3.1.1 Z PŘEVODOVKY NA ELEKTRICKÝ VÍŘIVÝ DYNAMOMETR V250

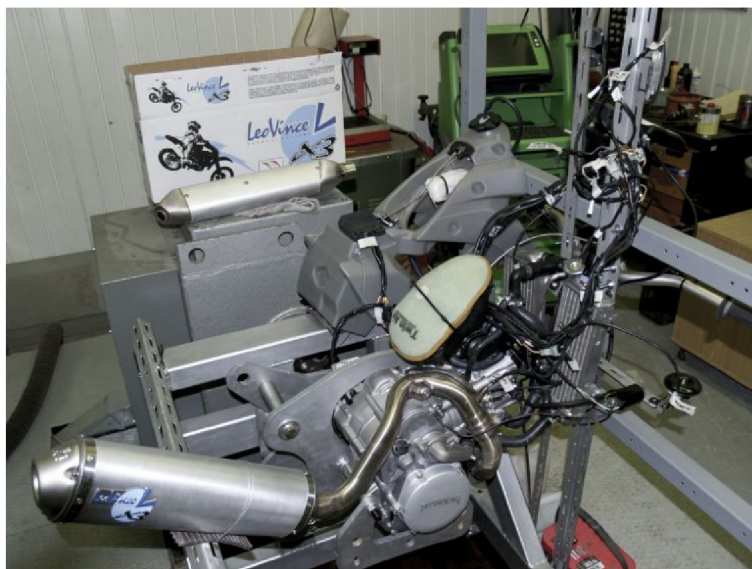
U tohoto řešení se vyskytly dva hlavní problémy. Prvním z nich bylo použití elektrického vířivého dynamometru do 250kW. To pro motor o předpokládaném výkonu okolo 45 kW představovalo velkou zátěž z hlediska setrvačných hmot, které z velké části ovlivňovaly celé měření.

Jako druhý nedostatek se ukázala myšlenka přenášet krouticí moment z výstupního hřídele převodovky, kdy celé měření probíhalo za účasti převodové skříně. Elektrické vířivé dynamometry se vyznačují velmi rychlou reakcí na změnu zátěže, jelikož se jedná o jednoválcový čtyřdobý motor, dochází v rámci jednoho pracovního cyklu k fluktuaci





v průběhu krouticího momentu. Při expanzi dojde až k několikanásobnému nárůstu točivého momentu oproti ostatním fázím cyklu. Rychlá reakce na změnu zátěže elektrických dynamometrů zapříčiňovala neadekvátní přetěžování jednotlivých částí agregátu, včetně převodovky. Byly určité snahy o eliminování vložením pružného členu mezi dynamometr a motor, u kterých vyšlo najevo, že pro dostatečné množství pohlcené energie je zapotřebí takový tlumič, který se projeví negativně jako velká zátěž vlivem setrvačných hmot. [4]

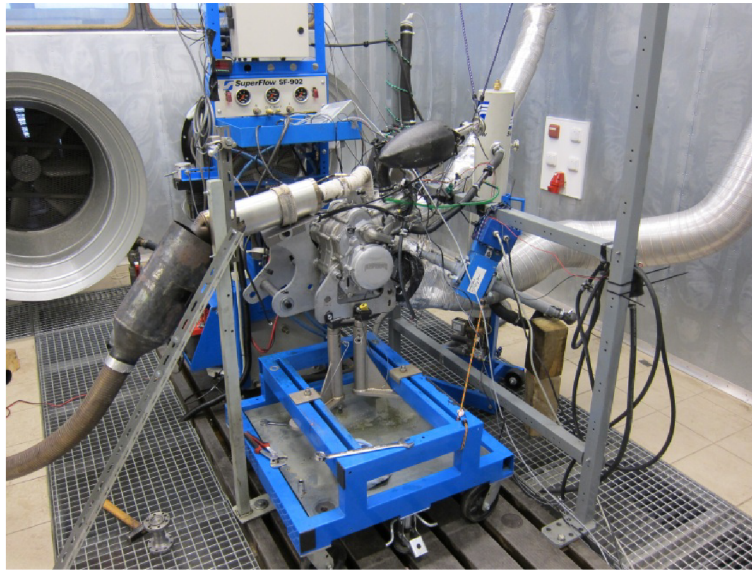


*Obr. 22 Varianta uložení na elektrický dynamometr[4]*

### **3.1.2 Z PŘEVODOVKY NA HYDRODYNAMICKÝ DYNAMOMETR SUPERFLOW SF-902**

Tento návrh vycházel, z pohledu použitých součástí, z předchozího, kdy byl opět pro přenos krouticího momentu využit výstup z převodové skříně motoru, ale nyní na hydrodynamický dynamometr Superflow SF-902, který disponuje nízkými setrvačnými hmotami a pomalejší reakcí na změnu zátěže, což je výhodou oproti elektrickému vířivému dynamometru V250.

Útlum zmiňovaných rázů točivého momentu umožňovali dvě skutečnosti. Jako pracovní médium tohoto dynamometru slouží voda, tedy reálná kapalina, která je do určité míry stlačitelná a speciálně navržený pružný člen na hřídeli spojující motor s dynamometrem. Toto uspořádání umožnilo změřit kompletní charakteristiku motoru, ale kvůli opotřebení převodovky při měření bylo učiněno rozhodnutí navrhnout takové řešení, aby mohla být z měření eliminována.



*Obr. 23 Varianta uložení na hydrodynamický dynamometr*

## 3.2 NOVÁ KONCEPCE ULOŽENÍ MOTORU HUSABERG FE 570

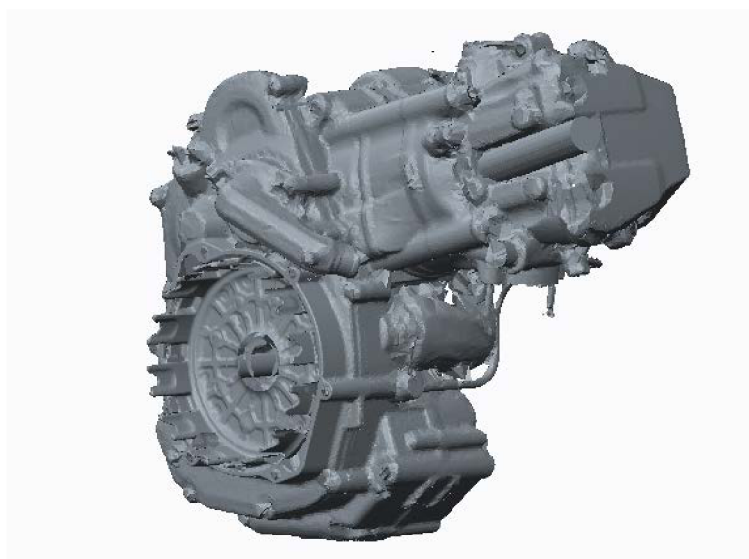
Před vytvořením nového konceptu uložení motoru na dynamometr bylo nutné zvážit veškeré skutečnosti ovlivňující měření.

Je důležité mít na vědomí chování jednoválcových motorů a celé uložení koncipovat ne na zatížení od maximálního nominálního krouticího momentu, ale na zatížení od špičky spalovacího tlaku v závislosti na poloze klikového hřídele, které tvoří několikanásobně vyšší zatížení. Dále je nutné s ohledem na velikost motoru, uvažovat velikost setrvačných hmot ovlivňujících dynamiku měření.

Proto byly navrženy následující uspořádání a komponenty. Jako nejvhodnější dostupný dynamometr byl vybrán hydrodynamický od firmy Superflow SF-902. Pro eliminování nadměrného namáhání převodovky se moment z motoru bude přenášet přímo z hnaného kola primárního převodu, které je v tomto případě součástí spojkového koše. [1][11]

### 3.2.1 VIRTUÁLNÍ MODEL MOTORU HUSABERG FE 570

Pro přesné zmapování tvaru motoru a polohy jednotlivých součástí je nejvhodnější použít metodu virtuálního modelu, který lze vytvořit pomocí 3D skenovacího zařízení. Vhodný model motoru pomocí 3D skeneru již byl vytvořen v předchozích letech, ale vzhledem k volbě místa pro přenos krouticího momentu bylo zapotřebí tento model upravit.



*Obr. 24 Upravený virtuální model motoru Husaberg FE 570*

## **ZAŘÍZENÍ ATOS**

ATOS je mobilní optický 3D skener značky GOM. Podobná zařízení nachází uplatnění v široké oblasti inženýrské činnosti jako je CAD, CAM a FEM. Umožňují prostorové snímání reálných objektů, což slouží zejména k porovnání návrhů se skutečností, případně přenesení reálného objektu do virtuálního prostředí. V dnešní době jsou hojně používané například i v odděleních kontroly kvality.

Měření využívá principu triangulace, fotogrammetrie a fringe-projection. Člověk vnímá svět kolem sebe jako 3D prostor díky svým dvěma očím, 3D scanner využívá dvou vzájemně od sebe vzdálených kamer pro digitalizaci objektu.

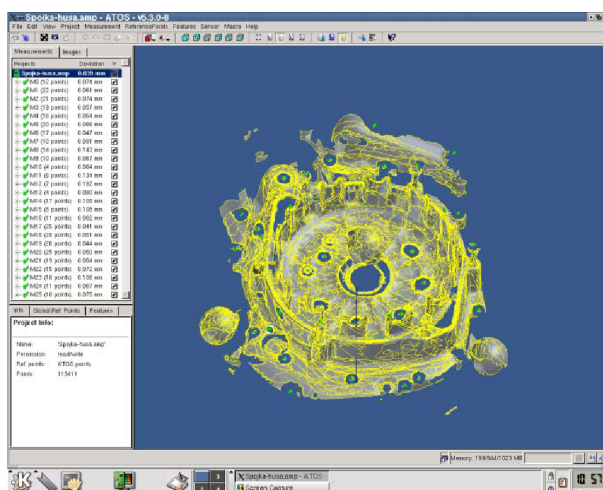
Snímaný objekt musí být předem připraven nanesením plavené křidy, která zajistí jednobarevný matný povrch. Pomocí projektoru se na snímaný objekt promítne série světelných pruhů nejdříve vertikálně orientovaných, poté horizontálně. Dvě kamery, každá z jiného pohledu, snímají nasvětlený povrch a pomocí softwaru vypočítají souřadnice jednotlivých bodů v prostoru.

Pro získání kompletního virtuálního modelu je nutné tento cyklus několikrát opakovat z různých úhlů. Správnou orientaci a složení jednotlivých pohledů v jeden virtuální model zajistí série referenčních bodů, které jsou pro ATOS známé a skenovaná součást se jimi polepí tak, že v každém snímaném pohledu musí být rozeznány alespoň 3 známé body.

Pro přesné určení polohy děr, zejména jejich středu se využívá pomocných válcových předmětů, případně koulí, jejichž povrch lze pomocí post-procesingu proložit tzv. primitivem stejného geometrického tvaru a tím získat přesnou polohu středu tohoto objektu.

Výsledný model lze exportovat v univerzálním formátu STL, který je možné použít v kterémkoliv CAD software.[3]



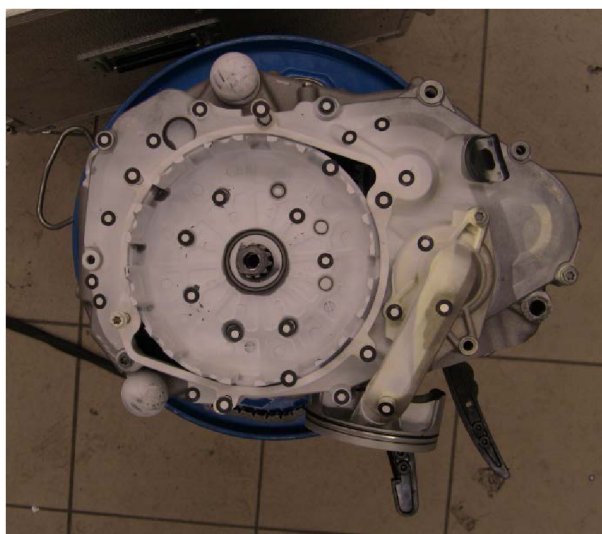


Obr. 25 Printscreen ze zařízení ATOS

### SKENOVÁNÍ SPOJKOVÉHO PROSTORU

Výstup z motoru bude realizován přes spojkový koš, který je klikovým hřídelem poháněn přes primární převod. Pro sousose připevnění motoru k rámu dynamometru je tedy nezbytné znát přesnou polohu spojkového koše vůči kotevním bodům motoru. Po otevření víka spojky, odmontování spojkových lamel a vnitřního koše nic nebrání vytvoření virtuálního modelu spojkového prostoru.

Díky blízké poloze dvou kotevních bodů motoru, lze tyto body určit jako referenční a ve výsledném zpracování spojit tento model s předchozím celého motoru za vzniku kompletního modelu motoru s odkrytým spojkovým prostorem.



Obr. 26 Motor Husaberg FE 570 s odkrytou spojkou



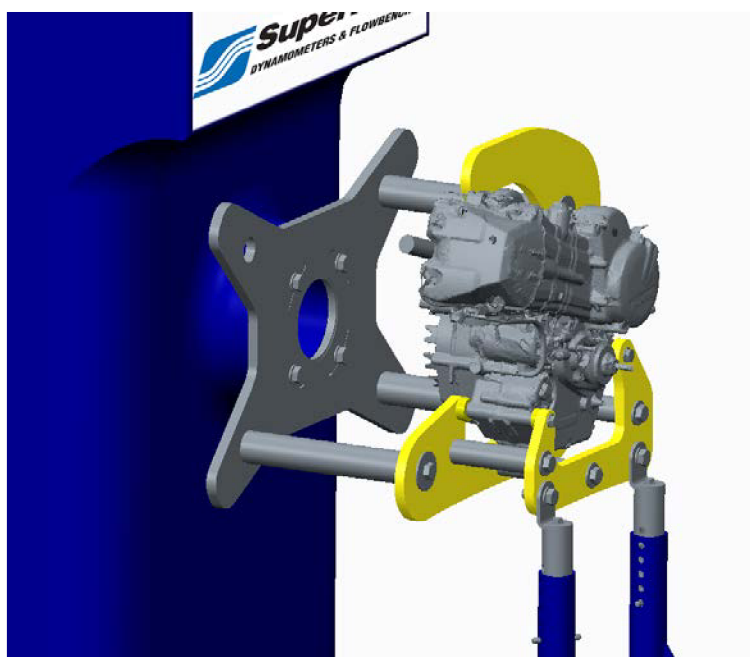
### 3.2.2 UMÍSTĚNÍ MOTORU NA ZÁKLADĚ VIRTUÁLNÍHO MODELU

S využitím montážních rozměrů dynamometru je nyní možné umístit osu spojkového koše přesně proti ose hřídele dynamometru a vytvořit k tomu dostatečně pevné uchycení.

Uchycení je podobné, jako u předchozích řešení, ovšem s ohledem na fakt, že motor bude na zkušebně umístěn obráceně. Proto není možné použít již vyrobené komponenty, ale musí být přizpůsobeny.

Hlavním nosným prvkem je plechový výpalek připevněný k motoru třemi šrouby ve standartních kotevních bodech, který se dále přišroubuje přes válcové kotvy k pevné hvězdici dynamometru.

Vzhledem k hmotnosti motoru vzniká v ukotvení ohybový moment, proto je motor osazen ještě dalším plechovým dílcem z druhé strany. Poloha tohoto dílce se zajistí válcovými kotvami, kterými se spojí oba plechy k sobě. Toto uspořádání dovolí připevnění pomocného vozíku pro transport a vytvoří dostatečnou podporu proti vzniku ohybového momentu, jak můžeme vidět na Obr. 27.



Obr. 27 Souosé uchycení motoru k dynamometru

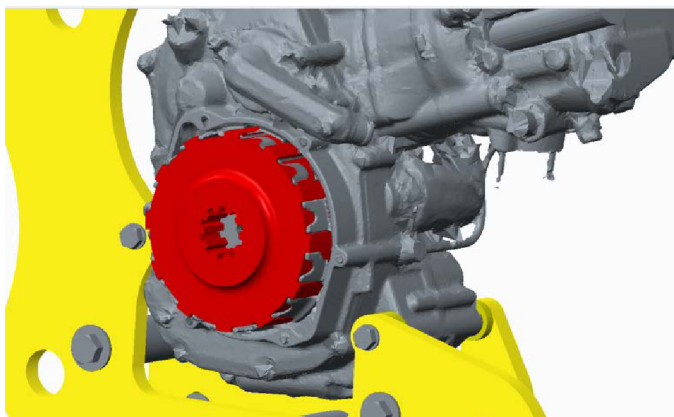
### 3.2.3 PŘENOS TOČIVÉHO MOMENTU

Přenos točivého momentu z klikového hřídele je zajištěn přes primární převod motoru, který pohání vnější spojkový koš. Vyjmutí spojkových lamel umožní, použitím vhodného unášeče, přenést moment ven z motoru bez účasti převodové skříně.



## UNÁŠEČ

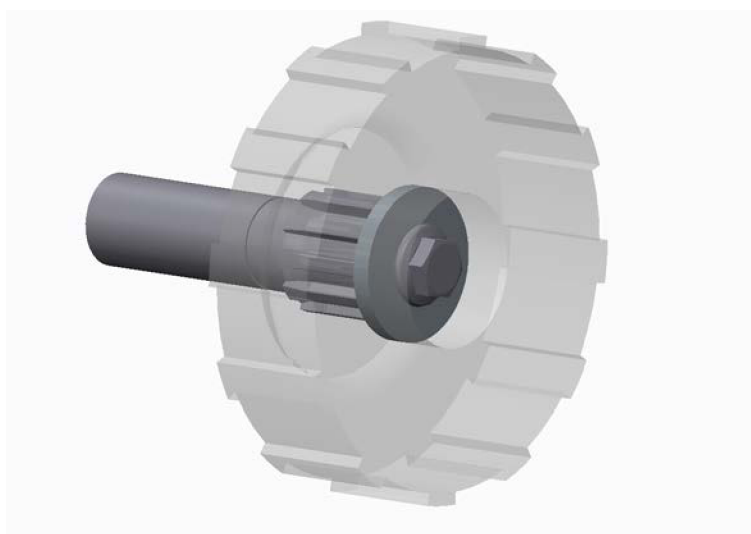
Vnější tvar unášeče je dán tvarem spojkových lamel Obr. 28, délka vnějšího ozubení je dána hloubkou spojkového koše. S výstupním hřídelem spojen drážkováním pro přenos krouticího momentu. To je navrženo s ohledem na volený materiál unášeče, tak aby výsledná součást měla co nejmenší moment setrvačnosti, čemuž napomohou i příčné odlehčovací kapsy.



*Obr. 28 Detail unášeče*

## VÝSTUPNÍ HŘÍDEL

Průměr výstupního hřídele je dán přenášeným momentem v závislosti na návrhu tuhosti celé soustavy. Správná délka je navržena podle použitého pružného členu, který je její součástí. Drážkované spojení s unášečem umožňuje přenos krouticího momentu, přičemž axiálnímu posuvu uvnitř drážkování brání šroubový spoj zahlužený v unášeči, jak je možné vidět na Obr. 29.



*Obr. 29 Zajištění výstupního hřídele*

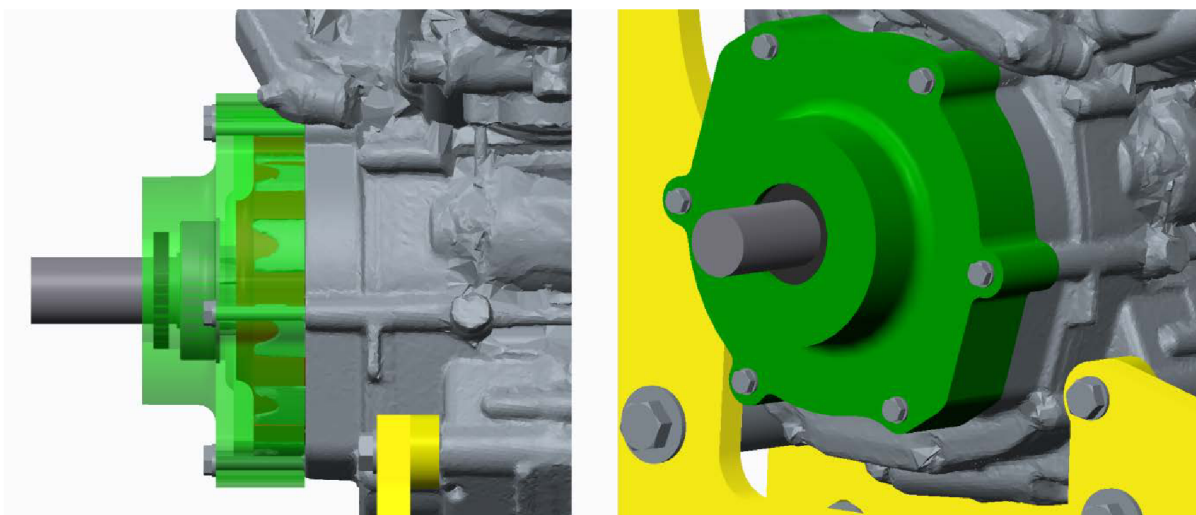


### VÍKO SPOJKOVÉHO PROSTORU A ULOŽENÍ HŘÍDELE

Vzhledem k vnitřní přestavbě spojkového prostoru, není možné použít původní víko, proto je nutné navrhnout nové s ohledem na výrobní náklady.

Jako polotovar je použit duralový plech dostatečné tloušťky, vzhledem k lepším mechanickým vlastnostem a obrobitelnosti. Připojovací rozměry k motoru jsou dány tvarem originálního víka, upraví se pouze čela víka pro výstup a uložení hřídele.

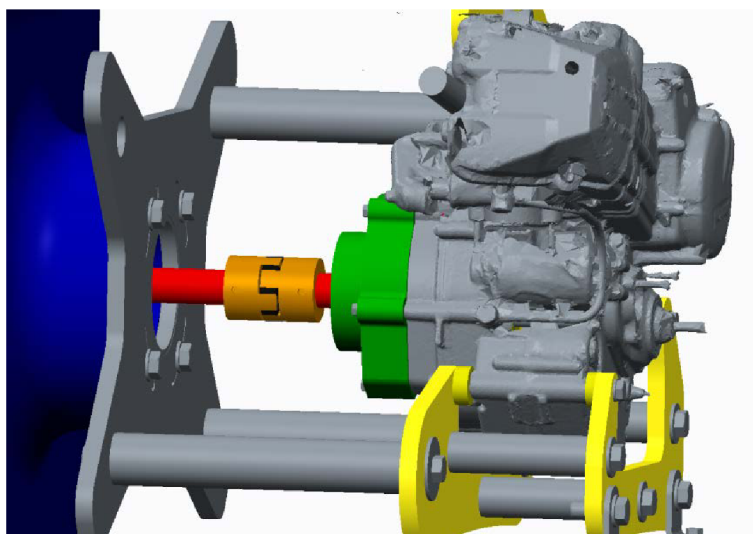
Hřídel je ve víku uložen pomocí kuličkového ložiska, které je dimenzované podle charakteru pružného členu na výstupním hřídeli a tím vzniklého radiálního zatížení. Proti axiálnímu pohybu je zajištěn pomocí vnitřního pojistného kroužku ve víku, směrem k motoru a pomocí vnějšího pojistného kroužku, směrem k dynamometru. Vzhledem k tomu, že spojkový prostor je součástí mazané části, je nutné tento výstupní hřídel utěsnit pomocí pryžového těsnícího kroužku tzv. gufera vhodné velikosti.



*Obr. 30 Upravené víko spojky pro výstup hřídele*

### PRUŽNÝ ČLEN

Pružný člen musí pohltit veškerou špičku energie vzniklé nepravidelným zatížením od spalovacího tlaku motoru, aby nedošlo k poškození částí mechanismu motoru. V tomto případě je vybrán ze sortimentu pružných spojení hřídelů. Parametry pro jeho výběr se získají z dynamického modelu klikového mechanismu motoru. Na Obr. 31 je zobrazena bezvůlová pružná hřídelová spojka. [12]



*Obr. 31 Detail pružného spojení hřídelů*



*Obr. 32 Uložení motoru na dynamometr*



## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh nové koncepce uložení motoru Husaberg FE 570, používaném týmem TU Brno Racing v mezinárodní soutěži Formula Student. S ohledem na předchozí řešení uložení tohoto motoru bylo nutné provést zhodnocení jejich nedostatků navrhnout nové řešení.

Na začátku bylo žádoucí seznámení se s pravidly soutěže Formula Student, k ověření použitelnosti a omezení pohonných jednotek. Pro konfiguraci motoru nejsou specifikována speciální pravidla, ovšem měření se musí provést na motoru s úpravami kvůli použití ve formuli student.

K uvedení do problematiky měření a konfigurace spalovacích motorů bylo popsáno vybavení a používaná měřicí technika na motorových zkušebnách. Následuje přehled používaných typů dynamometrů, jehož výstupem byl výběr dynamometru pro měření motoru Husaberg FE 570.

Po zhodnocení předchozích nedostatků byla představena nová koncepce, která využívá k přenosu krouticího momentu spojovacího koše, tím se eliminovala účast převodovky. Dále se opírá o pružné spojení s hydrodynamickým dynamometrem, což zaručí požadované dynamické chování soustavy motor-dynamometr, aby nedocházelo k nadměrnému namáhání součástí motoru.

Byl vytvořen model koncepčního řešení zástavby motoru Husaberg FE 570 s otevřeným spojivým prostorem, vyobrazený na Obr. 32. Před samotnou konstrukcí je nutné ověřit návrh výpočtem.





## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] TRUKSA, J. *Návrh upevňovacího rámu pro zkoušení spalovacího motoru*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík
- [2] A.J. MARTYR, A.J.M. *Engine testing theory and practice*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-008-0524-726.
- [3] TOVARYŠ, M. *Hnací ústrojí formule SAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.
- [4] VÉVODA, A. *Modernizace brzdového stanoviště pro spalovací motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.
- [5] PECKA, L. *Přehled a princip činnosti senzorů a akčních mechanismů vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marián Laurinec.
- [6] SUPERFLOW TECHNOLOGIES GROUP. *Superflow SF-902 engine dyno* [online]. 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.superflow.com/Dynamometers/Engine/sf-902.php#>
- [7] FSAE INTERNATIONAL. *FSAE Rules 2013* [online]. 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.com/docs/default-source/fs2013-docs/2013-fsae-rules-02-26-13-final.pdf?sflrsn=0>
- [8] KOUTNÝ, P. *Hmotnostní průtokoměr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [9] WIKIPEDIA. *Prüfstand* [online]. 2013 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://de.wikipedia.org/wiki/Prufstand>
- [10] HAJDUSIANEK, Anna. *Eddy current* [online]. 2012 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/16-06-Hajdusianek.html>
- [11] HUSABERG MOTORCYCLES. *FE 570* [online]. 2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.husaberg.com/Technical-Features.312.9.html?&bikeID=58&cHash=1bb1a1ad74>
- [12] ZEMČÍK, T. *Optimalizace uložení vyvažovacích hřídelů motoru Zetor 4V UR III*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 111 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Rauscher, CSc.
- [13] VLK, František. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2001, 576 s. ISBN 80-239-3717-0.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$M_0$	[Nm]	okamžitý točivý moment
$I$	[kg.m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
$\alpha_0$	[rad.s <sup>-2</sup> ]	okamžité úhlové zrychlení
$P_0$	[W]	okamžitý výkon
$\omega_0$	[rad.s <sup>-1</sup> ]	okamžitá úhlová rychlost
$M$	[Nm]	točivý moment
$P$	[kW]	výkon
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru