



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**NÁVRH REGULAČNÍHO OBVODU MOBILNÍHO  
DYNAMOMETRU**

DESIGN OF CONTROL CIRCUIT FOR TOWING DYNAMOMETER

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Rýznar

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Cejpek

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Jan Rýznar**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení  
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Cejpek**  
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 regulačního obvodu mobilního dynamometru

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mimo dlouhodobých zkoušek na osobních vozidlech se provádí také krátkodobé intenzivní testy, které mají za úkol simulovat extrémní zatížení, jež by mohlo nastat v běžném provozu. Pro simulaci podobného extrémního zatížení se při moderním vývoji osobních vozidel využívá mj. mobilních dynamometrů, které dokáží tyto extrémní podmínky opakovatelně navodit.

### Cíle bakalářské práce:

- 1) Student vypracuje popis mobilního dynamometru – zařízení sloužícího k zatěžování osobních vozidel pro potřeby testů mechanické a teplotní odolnosti jednotlivých komponentů.
- 2) Student vytvoří dynamický model simulující významné dynamické vlastnosti již existujícího mobilního dynamometru. Tento model ověří na základě srovnání s hodnotami naměřenými na skutečném systému.
- 3) Student navrhne vhodný regulační systém se třemi režimy regulace a to režimem regulace rychlosti, režimem regulace brzdného momentu a režimem regulace brzdného výkonu. Ověření stability, kvality a přesnosti regulace student provede měřením na reálném prototypu mobilního dynamometru.

Po zhodnocení dosažených výsledků navrhne případné úpravy systému.

### Seznam doporučené literatury:

ŠVARC, Ivan, MATOUŠEK, Radomil, ŠEDA, Miloš a VÍTEČKOVÁ, Miluše. Automatické řízení. Brno: CERM - Akademické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.

NOSKIEVIC, P. Modelování a identifikace systémů. Ostrava, Montanex, 1999.

GILLESPIE, T. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale (PA, USA): Society of Automotive Engineers, Inc., 1992. 519 s. ISBN 1 1-56091-199-9.

CHAU, K. T. Electric vehicle machines and drives: Design, analysis and application. 1st edition. Singapore: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-75252-4.

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

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh regulačního obvodu pro mobilní dynamometr. V úvodní části práce je zpracován podrobný popis mobilního dynamometru včetně jeho hlavních částí, které jsou nezbytné pro správnou funkci. Následující kapitola je věnována tvorbě dynamického modelu již existujícího prototypu pomocí programu Simscape. Dále je na základě podmínek z dynamického modelu navržen regulační obvod, který je zaveden v podobě programu do řídicí jednotky mobilního dynamometru. Na základě naměřených dat z přechodových charakteristik, je postupně odladěna funkce regulátoru k uspokojivému výsledku. V závěru je funkce regulačního obvodu vyhodnocena a následně navrhnutá opatření ke zlepšení stability, kvality a přesnosti regulace.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis is focused on design of a control circuit for a towing dynamometer. In the introductory part of the thesis is a detailed description of the towing dynamometer, including its main parts, which are necessary for proper operation. The next chapter is devoted to creating a dynamic model of an existing prototype using Simscape. Furthermore, based on the conditions from the dynamic model, a control circuit is designed, which is introduced in the form of a program into the control unit of the towing dynamometer. Based on the measured data from the transient responses, the function of the controller is gradually tuned to a satisfactory result. Finally, the function of the control circuit is evaluated and then measures to improve the stability, quality and accuracy of control are proposed.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Mobilní dynamometr, retardér, regulační obvod, dynamický model, Simscape, PID regulátor, NXP, ARMKeil,  $\mu$ Vision

## **KEYWORDS**

Towing dynamometer, retarder, control circuit, dynamic model, Simscape, PID controller, NXP, ARMKeil,  $\mu$ Vision



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

RÝZNAR, Jan. *Návrh regulačního obvodu mobilního dynamometru*, Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Cejpek.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat nejen své rodině, která mě v maximální možné míře podporovala při studiu, ale také kolegům ze zaměstnání, kteří neváhali obětovat významnou část svého času a pohodlí k tomu, aby mě podpořili při tvorbě této práce. Poděkování také patří mému vedoucímu práce panu Ing. Zdeňku Cejpkovi, který mi umožnil samostatně zpracovat téma blízké mé profesi.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 21. 5. 2021

.....

Jan Rýznar





# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MOBILNÍ DYNAMOMETR.....</b>	<b>17</b>
2.1	Popis konstrukce a základní komponenty .....	17
2.1.1	Brzdná soustava .....	18
2.1.2	Chladicí soustava .....	18
2.1.3	Hnací náprava s pružením .....	18
2.1.4	Oblast balastu .....	18
2.1.5	Zdroj elektrické energie .....	19
2.1.6	Řídicí a měřicí elektronika .....	19
2.2	Způsob tvorby brzdného momentu .....	20
2.2.1	Hydrodynamická brzda .....	21
2.2.2	Elektrodynamická brzda .....	21
2.3	Komerční mobilní dynamometry .....	22
2.3.1	Taylor Dynamometer .....	23
2.3.2	Volke Dynamometer .....	24
<b>3</b>	<b>DYNAMICKÝ MODEL.....</b>	<b>27</b>
3.1	Popis fyzického prototypu .....	27
3.1.1	Brzdná soustava .....	28
3.1.2	Elektrodynamický retardér .....	28
3.2	Tvorba modelu .....	29
3.2.1	Modelovací nástroj Matlab/Simscap .....	29
3.2.2	Definice jízdních odporů .....	30
3.2.3	Model MD .....	31
3.2.4	Definice limitních podmínek pro regulační obvod .....	31
<b>4</b>	<b>REGULAČNÍ OBVOD .....</b>	<b>33</b>
4.1	Definice regulačního obvodu se zpětnou vazbou .....	33
4.2	Typy regulátorů .....	33
4.2.1	P regulátor .....	33
4.2.2	I regulátor .....	33
4.2.3	D regulátor .....	33
4.2.4	PID regulátor .....	34
4.3	Řídicí HW/SW .....	34
4.3.1	Main ECU .....	35
4.3.2	Gateway .....	36
4.3.3	Telma iRCS .....	36
4.4	Ovládací HW/SW .....	37
4.4.1	Vector VN1630A .....	37
4.4.2	Vector CANalyzer .....	37
4.5	Měřicí technika .....	38
4.5.1	Tenzometrický snímač síly včetně zesilovače .....	38
4.5.2	Snímač otáček .....	39
4.6	Režim regulace brzdné síly a výkonu .....	40
4.6.1	Postup odladění regulace .....	40
4.6.2	Výsledky regulace .....	40
4.7	Režim regulace rychlosti .....	40
4.7.1	Postup odladění regulace .....	40

4.7.2	Výsledky regulace.....	40
<b>5</b>	<b>ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>49</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>53</b>

# 1 ÚVOD

Automobilový průmysl se nachází v nelehké době. Z jedné strany je nucen do významných opatření z důvodu redukce emisí CO<sub>2</sub> a na straně druhé se snaží vyhovět náročným požadavkům zákazníka na kvalitu, spolehlivost, bezpečnost, a hlavně nízkou cenu vozidla. Zmíněné skutečnosti si z hlediska výzkumu a vývoje žádají nové přístupy a způsoby provádění jízdních zkoušek na osobních vozidlech. Jízdní zkoušky se rozlišují na dlouhodobé, které mají za úkol prověřit vozidlo jako celek z hlediska celkového opotřebení, teplotní a mechanické trvanlivosti. Naopak krátkodobé zkoušky se soustředí na specifickou sestavu dílů nebo konkrétní díl tak, že ověřují jejich vlastnosti při daných limitních podmínkách. Obecně mají za úkol simulovat a navozovat extrémní podmínky, které mohou v zákaznickém provozu nastat. Aby bylo možné podobné podmínky vytvořit a případně s danou přesností replikovat, využívá se v moderním vývoji osobních vozidel mj. mobilních dynamometrů, které jsou navrženy k vytvoření těchto podmínek dle zadaných vstupních parametrů.

V úvodní části této bakalářské práce bude obecně vysvětlena problematika mobilních dynamometrů. Bude popsána jejich konstrukce, základní komponenty a provozní vlastnosti. Následovat bude definice jejich oblastí použití a porovnání s jinými alternativními způsoby provádění obdobných jízdních zkoušek.

Stěžejní částí práce bude tvorba dynamického modelu mobilního dynamometru v programu Matlab Simulink/Simscape, který bude nezbytný k definování podmínek regulace. Následně bude navržen a realizován regulační obvod pro již existující prototyp mobilního dynamometru, který je konstrukčně navržen dle aktuálních požadavků na jízdní zkoušky v automobilovém průmyslu. Regulační obvod bude mít za úkol regulovat brzdnu sílu dynamometru tak, aby splnil požadavky zadané obsluhou. Na základě regulace brzdné síly budou vytvořeny tři režimy, které umožní udržovat konstantní brzdnu sílu, konstantní brzdňý výkon a konstantní rychlost. Zmíněná regulace bude zprostředkována na základě automotive mikroprocesoru NXP na architektuře ARM.

Funkce navrženého regulačního obvodu bude otestována a ověřena na prototypu dynamometru v reálných podmínkách. Následně bude zhodnocena jeho stabilita, kvalita a spolehlivost.



## 2 MOBILNÍ DYNAMOMETR

Mobilní dynamometr (MD) je zařízení určené k aktivnímu brzdění tažného vozidla. Obvykle je zařízení realizováno formou přípojného vozidla – Obr. 1, tedy přívěsu nebo návěsu. Brzdný moment se přenáší z retardéru na kola přípojného vozidla pomocí spojovacích hřídelů a rozvodových převodovek. Existují však speciální typy MD, které nemají mechanické spojení s koly, ale staticky brzdí točivý moment z externího zdroje, např. z výstupních hnacích hřídelů zemědělské techniky určených pro různorodé příslušenství.

Smyslem MD je vytvořit v reálném jízdním cyklu umělý odpor, který simuluje provozní situaci dle předem zadaných parametrů. Lze tedy vytvořit simulaci jízdy do stoupání, jízdu s přívěsem, který nemá optimální aerodynamické vlastnosti, simulaci valivého odporu nebo odporu zrychlení. Možnosti využití jsou široké a záleží jen na požadavcích daného provozovatele, který bude následně volit výkonové parametry MD.

Zmíněný typ MD v zásadě doplňuje, v dynamických zkouškách, standardní válcové zkušebny, které také umožňují, mimo měření výkonových parametrů vozidla, simulovat jízdní odpory. Hlavní nevýhodou je ale nemožnost věrně simulovat proudění vzduchu a přizpůsobovat teplotu okolí, jako v případě MD.

Vzhledem k širokému spektru variant a typů, budou v této závěrečné práci podrobně zpracovány MD určené k brzdění osobních vozidel.



Obr. 1: Mobilní dynamometr s tažným vozidlem [1]

### 2.1 Popis konstrukce a základní komponenty

Z hlediska svého určení je nezbytné, aby tvar konstrukce MD umožňoval zástavbu specifických komponentů, které jsou nezbytné k jeho navrhované funkci. Další důležitou podmínkou je minimalizace vlivu pasivních odporů samotného přípojného vozidla, u kterého je nežádoucí výrazný vliv aerodynamického a valivého odporu z důvodu omezení výsledného rozsahu simulovaných odporů. Jednotlivé komponenty a sestavy základních komponent budou podrobně popsány v následujících odstavcích.

### 2.1.1 Brzdná soustava

Hlavním prvkem celého systému MD je brzdná soustava, která vytváří potřebný brzdný moment k dosažení požadované brzdné síly. Soustava musí zaručit možnost plynulé regulace brzdného momentu a zároveň schopnost daný brzdný moment dlouhodobě udržet. Vzhledem k náročným zástavbovým a provozním podmínkám musí splňovat náročné požadavky na mechanickou odolnost, spolehlivost a jednoduchost. V závislosti na konkrétní aplikaci se do brzdné soustavy volí konkrétní typy brzd, jež budou popsány v následující podkapitole.

### 2.1.2 Chladicí soustava

Souvisejícím prvkem celého brzdného systému je chladicí soustava, která odvádí přebytečné teplo ze systému. Vzhledem k tomu, že ve valné většině aplikací dochází k přeměně kinetické energie na teplo, je nutné zajistit odvod tepelného výkonu v řádech stovek kW ze systému. Nejčastěji je chladicí soustava tvořena aktivními ventilátory a olejovými chladicími okruhy, které dokážou efektivně odvádět přebytečné teplo do okolí. Chladicí soustava musí být navržena tak, aby v provozu nedošlo k degradaci brzdného výkonu nebo poškození jednotlivých součástí z důvodu přehřátí.

### 2.1.3 Hnací náprava s pružením

Mezi důležité části celého brzdného systému patří podvozková sestava s pružením, která musí zaručit optimální jízdní a trakční vlastnosti. Při návrhu samotné konstrukce je potřeba uvažovat i se správnou zástavbou hnací nápravy tak, aby byla v oblasti těžiště MD a docházelo tak k dostatečnému zatížení nápravy, což je nezbytné k přenosu brzdného momentu na vozovku. Pro potřeby přenosu brzdného momentu je volena zástavba jednonápravového nebo vícenápravového podvozku, kdy je k přenosu brzdného momentu využita minimálně jedna náprava. Pro zlepšení jízdních a trakčních vlastností je v některých případech použito pneumatické odpružení v kombinaci s nezávislým zavěšením náprav, které nabízí pokročilé možnosti nastavení tuhosti tlumení, geometrie a světlé výšky.

### 2.1.4 Oblast balastu

Většina MD je vyráběna s ohledem na co nejnižší hmotnost, aby je bylo možné připojit k široké škále hmotností osobních vozidel. Hlavním záměrem je mít dostatečně dimenzovanou pevnost konstrukce, která dokáže pojmout značnou část přidané hmotnosti (balastu), ale zároveň si udržet nízkou hmotnost. Provozovatel si tak může celkovou hmotnost MD přizpůsobit dle možností tažného vozidla a požadované brzdné síly. Vždy je ale nutné zajistit, aby hmotnost na nápravu (nápravy) byla dostatečná vzhledem k požadované brzdné síle. V opačném případě by mohlo dojít k nežádoucímu prokluzu kol vzhledem k povrchu silnice. Minimální hmotnost MD vzhledem k požadované brzdné síle se vypočítá z rovnice (1), kde  $F_b$  je požadovaná brzdná síla na kolech,  $m_{MD}$  celková nutná hmotnost MD a součinitel adheze  $\mu$  pro daný typ povrchu.

$$m_{MD} = \frac{F_b}{g\mu} \quad (1)$$

### 2.1.5 Zdroj elektrické energie

K napájení veškeré elektrické výzbroje a elektrodynamických strojů je potřebný zdroj elektrické energie s dostatečnou kapacitou. Ten lze vytvořit pomocí akumulátorového úložiště s lokální alternátorovou generací. Akumulátory se vyznačují svým tichým provozem a jejich používání spojené s údržbou je poměrně snadné. Většina alternátorů však není schopna dostatečně efektivně zásobit akumulátory energií při časově dlouhém testování v nízkých rychlostech. Proto se alternátory doplňují nebo nahrazují dieselovým generátorem, který může produkovat dostatečný zdroj elektrické energie bez ohledu na rychlost testování.

### 2.1.6 Řídicí a měřicí elektronika

V moderních aplikacích jsou MD osazeny pokročilou formou řízení pomocí PLC nebo na míru vyvinutou řídicí jednotkou vybavenou mikroprocesorem. Hlavním úkolem řídicí elektroniky je obsluha subsystémů po samotnou regulaci brzdové síly dle požadavků obsluhy. Hlavní řídicí jednotka v MD přijímá vstupy, jako je síla, teplota, napětí, proud, tlak, otáčky a rychlost. Je také schopna počítat brzdový výkon, točivý moment a v některých případech i skutečný sklon. Dále umožňuje komunikaci s obsluhou, která pomocí příkazů v uživatelském rozhraní zadává požadavky testu. Uživatelské rozhraní je obvykle ve formě drátového ovladače nebo v případě sofistikovanějších verzí i pomocí bezdrátové komunikace s programem na PC/tabletu – Obr. 2.

Většina MD nabízí tři jednoduché provozní režimy:

**Režim konstantní rychlosti:** MD udržuje rychlost podle vstupu a obsluha ovládá brzdovou sílu pomocí akcelérátoru tažného vozidla.

**Režim konstantní síly:** MD udržuje brzdovou sílu podle vstupu a obsluha ovládá rychlost pomocí akcelérátoru tažného vozidla.

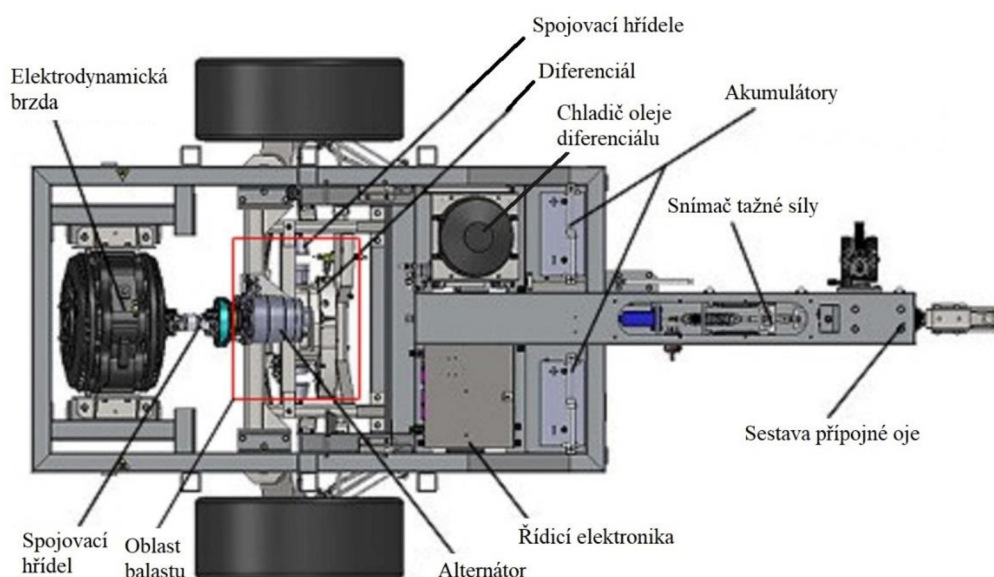
**Režim manuálního řízení:** Obsluha jednoduše zvyšuje nebo snižuje brzdovou sílu pomocí uživatelského rozhraní.



Obr. 2: Uživatelské rozhraní s ovládacím programem [2]

Základní měřicí elektronika se skládá ze snímače síly a snímače otáček. Pro pokročilejší funkce regulace lze MD vybavit snímačem podélného a příčného zrychlení, který nám umožní simulovat odpor zrychlení nebo naopak kompenzovat hodnotu tažné síly v režimu zatěžování s konstantní silou nebo výkonem. Hodnotu příčného zrychlení lze také využít pro aktivní stabilizaci MD při testech s vyšší rychlostí. Snímač okolního barometrického tlaku lze využít při testech v rozdílných nadmořských výškách, kdy potřebujeme při testech kompenzovat aerodynamický odpor nebo vliv hmotnostního průtoku vzduchu na chladiče tažného vozidla a adekvátně tak navýšit brzdovou sílu.

Zástavba jednotlivých komponentů v konstrukci MD je přizpůsobena vždy dané specifikaci a může se v daných případech odlišovat. Základní koncepce je však ve většině případů totožná a lze si ji popsat na obecném modelu – Obr. 3.



Obr. 3: Popis zástavby základních komponentů MD (upraveno z [2])

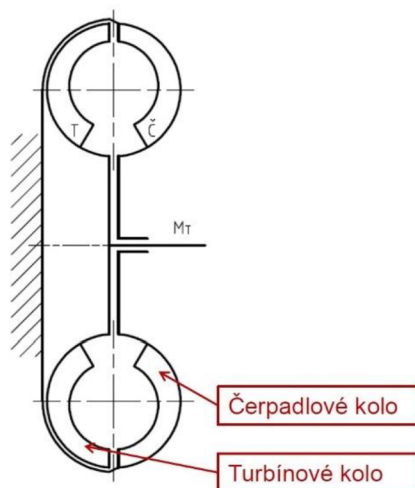
## 2.2 Způsob tvorby brzdného momentu

Brzdný moment lze vytvořit mnoha způsoby, ať už pomocí jednoduchého tření, tak složitějším elektromagnetickým nebo hydrodynamickým strojem. Pro MD se použití třecí brzdy nevažuje z důvodu její krátké živostnosti a neschopnosti udržet dlouhodobě daný brzdý moment bez výrazné degradace účinku vlivem přehřátí. Z těchto podstatných důvodů je zřejmé, že nejvhodnějšími kandidáty jsou vířivé elektrodynamické brzdy s buzeným vinutím nebo hydrodynamické brzdy s hydraulickým olejem.



### 2.2.1 Hydrodynamická brzda

Hydrodynamická brzda, nebo retardér, působí odporem kapaliny v uzavřeném prostoru proti pohybu, který je odvozován od pohybu vozidla. V hydrodynamické brzdě pracují v jedné skříni dvě kola s lopatkami, stator a rotor – Obr. 4. Stator (turbínové kolo) je pevně spojený se skříni brzdy. Proti statoru pracuje rotor (čerpadlové kolo), který je poháněný od spojovacího hřídele. Konstrukce je podobná s kapalinovou spojkou, zde je však turbínové kolo jako stator, jímž se hydrodynamická energie mění v energii tepelnou. Pracovní látkou je olej. Při jízdě není retardér naplněn olejem, a proto se jeho rotor bez odporu otáčí. Při aktivaci retardéru je ze zásobníku rychle naplněn potřebným množstvím oleje a retardér začne pracovat jako hydrodynamická spojka. Vznikající teplo je odváděno pomocí olejového čerpadla k chladiči oleje. Při deaktivaci je olej z retardéru odčerpán. Údržba i opravy hydrodynamických retardérů jsou stejné jako u hydrodynamických spojek a měničů momentu. [3]



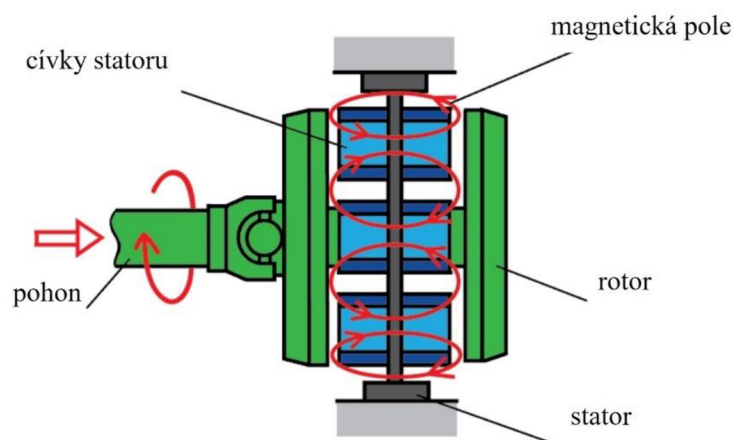
Obr. 4: Schéma hydrodynamického retardéru [4]

### 2.2.2 Elektrodynamická brzda

#### Elektrodynamický retardér

Konstrukce je tvořena státorem, pevně spojeným s rámem vozidla, a rotorem, který je poháněný od spojovacího hřídele – Obr. 5. Stator nese několik cívek, které jsou navinuty tak, aby se na nich pravidelně střídala polarita magnetického pole, protéká-li jimi stejnosměrný proud. Při brzdění jsou cívky napájeny z akumulátoru a intenzita proudu je řízena elektronickým řídicím systémem podle požadavku na brzdny moment. Rotor je tvořen dvěma kotouči, které se otáčejí těsně u pólových nástavců statorových cívek. Je-li retardér aktivován, uzavírá se magnetický tok statorových cívek přes kotouče rotoru. Tím se v nich budí vířivé proudy a rotor je brzděn. Vznikající teplo je odváděno přímo do okolního vzduchu, který proudí dutinami kotoučů, a tím je chladí. Elektromagnetický retardér je nenáročný na údržbu. Jeho předností je samoregulační vlastnost, kdy absorbovaná energie je rovna energii odevzdané do okolí. [3]

Elektrodynamický retardér má brzdný moment závislý na velikosti otáček za minutu. Znamená to, že při malých otáčkách je jeho brzdný účinek prakticky nulový. Naopak při vysokých otáčkách dosahuje velmi vysokých brzdných momentů. [3]



Obr. 5: Schéma elektrodynamickeho retardéru [5]

### Elektrodynamická rekuperačná brzda

Podstatou elektrodynamickej brzdy je využitie trakčného elektromotoru v generátorickom režime. U stejnosmerného elektromotoru dochádza k odpojeniu motoru od zdroja napájania elektrickým prúdom, jeho nabuzení a pripojení ke spotrebiteľovi. Trakčný motor v takovom režime vyrába elektrickú energiu a pôsobí proti smyslu otáčenia brzdým momentom. Třífázový asynchronní motor pracuje jako generátor, pokud je úhlová rychlost točivého magnetického pole menší než úhlová rychlost kotvy. Kotva se pak snaží přiblížit své otáčky točivému poli a opět působí proti smyslu otáčenia brzdým momentem. [6]

Podle způsobu zatížení elektromotoru pracujícího v generátorickém režimu je pak možno rozdělit elektrodynamickeou brzdu na rekuperačnú a odporovú. [6]

## 2.3 Komerční mobilní dynamometry

Na komerčním trhu se vyskytuje malé množství výrobců, kteří se zabývají vývojem a prodejem MD. Ve většině případů se jedná o výrobce, kteří produkují různé typy odlehčovacích brzd pro nákladní nebo kolejová vozidla a MD jsou jejich vedlejším produktem využívající stěžejní produkt firmy, tedy retardér. Vzhledem k tomu, že MD nejsou spotřebním produktem a v provozu vydrží fungovat desítky let, tak jejich produkci lze v celosvětovém měřítku odhadovat pouze na desítky kusů ročně. Ve většině případů se však bude jednat o jedinečné stroje upravené dle požadavků konkrétního zákazníka. Typickým zákazníkem jsou obvykle vývojová oddělení světových automobilek nebo firmy zabývající se testováním a vývojem vozidlových systémů.

### 2.3.1 Taylor Dynamometer

Tato americká firma sídlící ve státě Wisconsin je výrobcem dynamometrů s 40letou tradicí. Zabývá se vývojem a výrobou motorových, podvozkových a mobilních dynamometrů. Zmíněné MD nabízí v širokém portfoliu velikostí a typů. Pro osobní vozidla nabízí typy RSL-5.4K a RSL-8K – obr. 6, které disponují maximální brzdou silou až 8 kN. Technické parametry daných typů jsou uvedeny v tab. 1. Provozní výkonové parametry jsou zobrazeny na obr. 7 a silové na obr. 8.

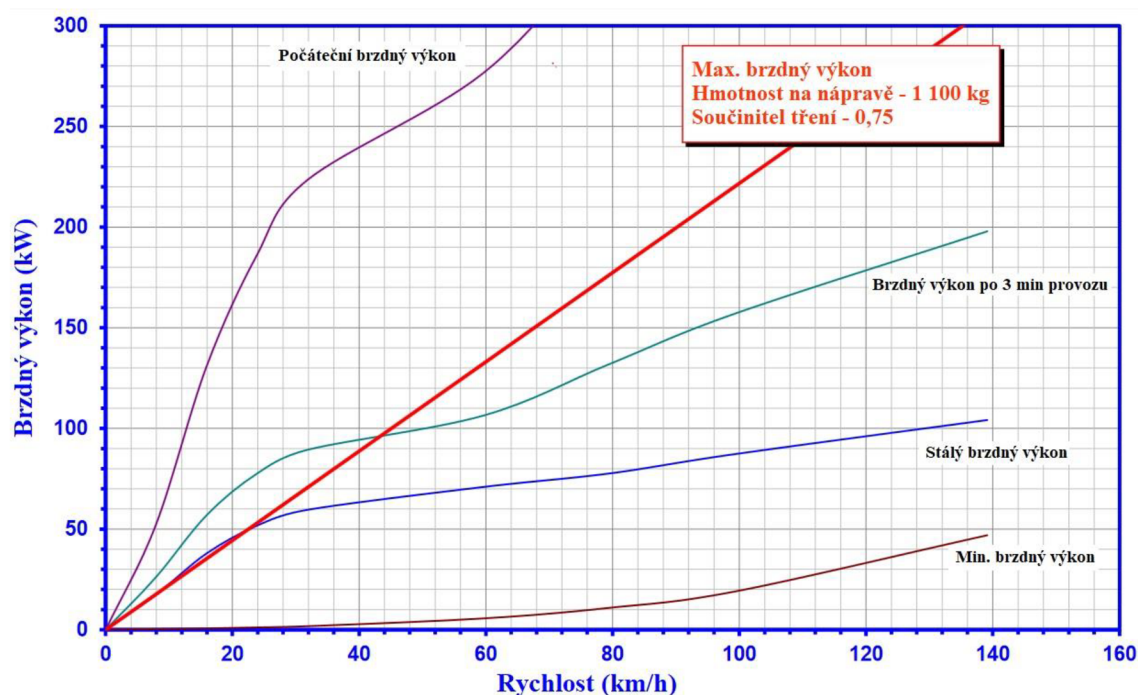
Tab. 1: Technické parametry MD pro osobní vozidla firmy Taylor [2]

Model	RSL-5.4K	RSL-8K
Max. rychlost [km/h]	112	120
Max. brzdňý výkon [kW]	112	112
Max. brzdňá síla [N]	5 400	8 000
Hmotnost bez balastu [kg]	816	1 100
Typ momentové brzdy	Elektrodynamická	Elektrodynamická
Způsob generace el. energie	Alternátor	Alternátor

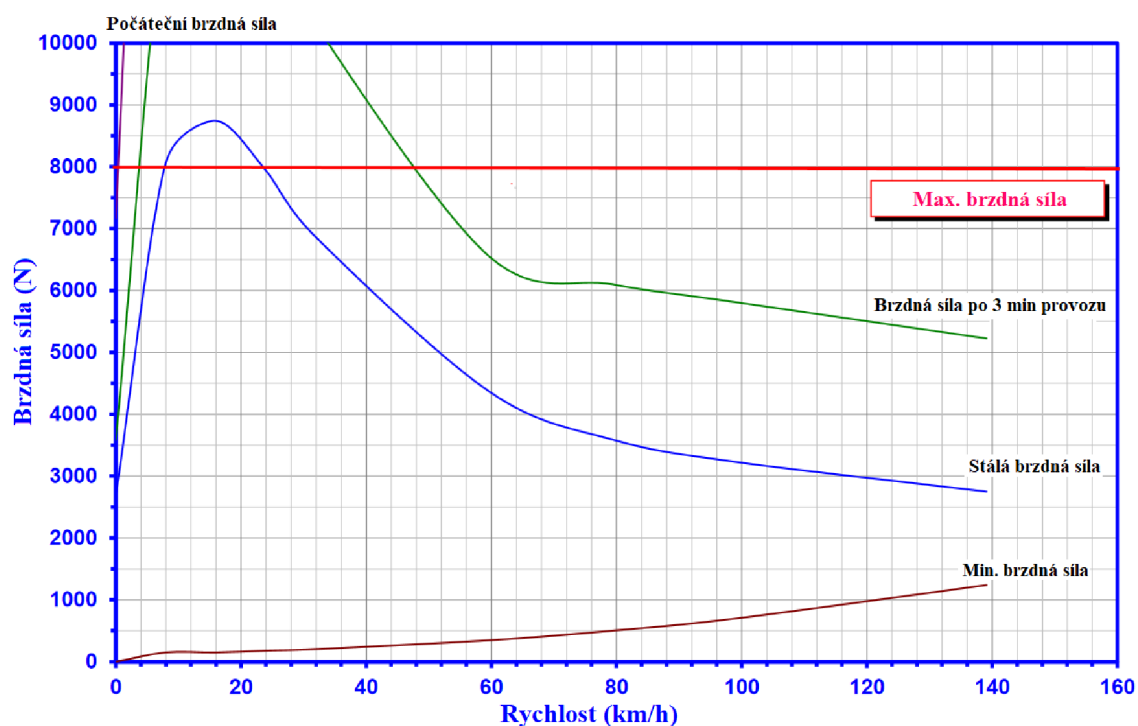


Obr. 6: Mobilní dynamometr Taylor RSL-8K (upraveno z [2])

MD firmy Taylor jsou vybaveny moderní řídicí technikou, která umožňuje simulovat stoupání, hmotnost jízdní soupravy a aerodynamický odpor. Data z měření následně program zpracovává pro přehlednou analýzu. Ke komunikaci s obsluhou využívá rozhraní WiFi, přes které se nastavují, pomocí aplikace DynPro, parametry testu.



Obr. 7: Graf provozních výkonových parametrů RSL-8K (upraveno z [2])



Obr. 8: Graf provozních silových parametrů RSL-8K (upraveno z [2])

### 2.3.2 Volke Dynamometer

Volke GmbH je německá společnost pro technický vývoj v automobilovém průmyslu. Již více než 30 let vyvíjí koncepty vozidel od počátečního nápadu až po připravenost k sériové výrobě. Navrhuje motory, inteligentní podvozky, karoserie a elektrické systémy. Zabývá se dynamikou vozidel a testováním bezpečnosti a komfortu vozidla jako celku. Pro vlastní potřeby testování byl vyvinut MD, který byl časem uvolněn do malosériové



produkce a uveden na komerční trh. Aktuálně firma nabízí širokou řadu modelů a specifikací, které lze dle požadavků zákazníka přizpůsobit danému účelu. [7]

Pro testování osobních vozidel nižší a vyšší střední třídy nabízí typy VBA15-5xx a VBA12-5xx – obr. 9, které disponují maximální brzdou silou až 15 kN. Technické parametry daných typů jsou uvedeny v tab. 2. Provozní silové a výkonové parametry typu VBA12-5xx jsou zobrazeny na obr. 10.

Tab. 2: Technické parametry MD pro osobní vozidla firmy Volke [7]

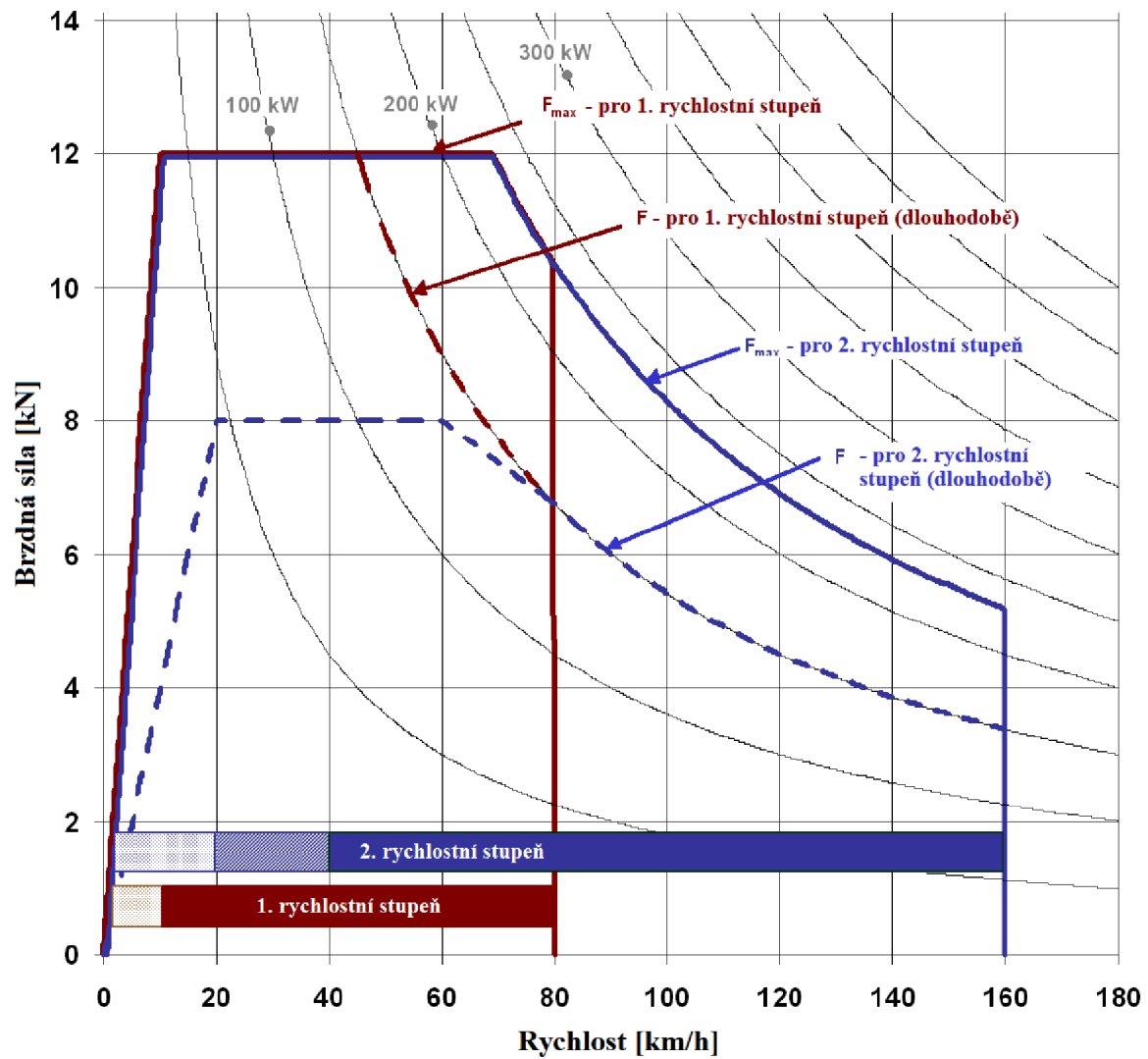
Model	VBA12-5xx	VBA15-5xx
Max. rychlost [km/h]	160	160
Max. brzdny výkon [kW]	230	300
Max. brzdna síla [N]	12 000	15 000
Hmotnost/s balastem [kg]	1 500/2 100	1 600/2 550
Typ momentové brzdy	Elektrodynamická	Elektrodynamická
Způsob generace el. energie	Alternátor	Alternátor



Obr. 9: Mobilní dynamometr Volke VBA15-5xx [7]

MD Volke si zakládají na variabilitě použití. Díky integraci víceúrovňové převodovky Xtrac je možné nastavovat rozsah velikosti brzdného momentu dle potřeby. Další konkurenční výhodou je možnost provádět zkoušky až do rychlosti 160 km/h, kde lze testovat dlouhodobou udržitelnost maximálního výkonu tažného vozidla. Standardně podporuje, jako ostatní MD, simulaci jízdy do stoupání dle předem zadaného profilu. Dále umožňuje simulaci s konstantní brzdou silou, výkonem a rychlostí, kterou si určuje obsluha dle míry sešlápnutí akcelérátoru.

Uživatelské rozhraní je součástí přenosného ovládání s TFT displejem. Ovládání je přizpůsobeno náročným podmínkám formou přehledných tlačítek, multifunkčních otočných ovladačů a joysticků. Komunikace mezi MD a ovládáním je realizována pomocí drátové sběrnice CAN nebo rádiového spojení.



Obr. 10: Graf provozních parametrů VBA12-5xx (upraveno z [7])

### 3 DYNAMICKÝ MODEL

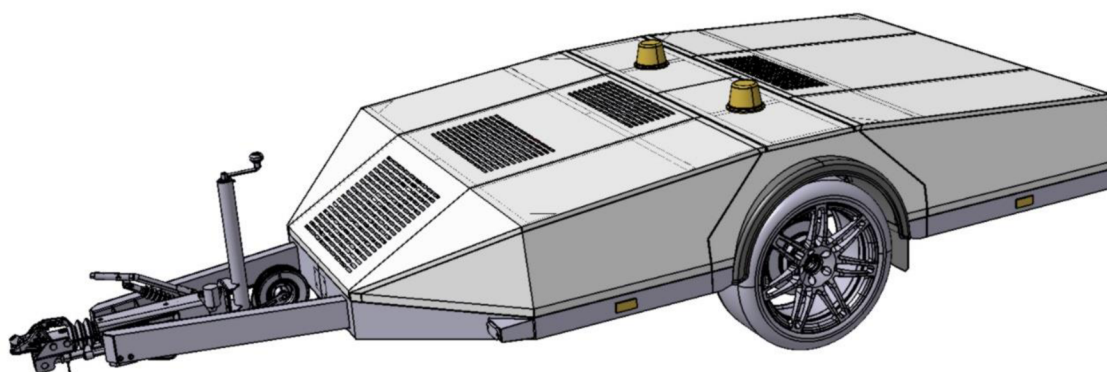
V této kapitole bude popsán fyzický prototyp MD včetně brzdné (rotační) soustavy. Na základě dat z reálného měření prototypu a dat vypočtených, bude vytvořen jednoduchý dynamický model, ze kterého budou vyvozeny limitní podmínky pro regulační obvod (regulaci brzdného momentu).

#### 3.1 Popis fyzického prototypu

Prototyp na obr. 11 je postaven na základech nerezové příhradové konstrukce, která umožňuje zástavbu až dvou elektrodynamických retardérů pro možnost budoucího vylepšení výkonnostních parametrů. Retardér je umístěn v přední části hned za podvozkovou sestavou. Podvozek je převzatý z osobního SUV Audi Q7, což výrazně urychlilo vývoj a umožnilo zástavbu pokročilého systému pneumatického odpružení, které výrazně napomáhá jízdě stabilitě a přenosu brzdného momentu na vozovku. Nelze také opomenout možnost nastavení světlé výšky dle aktuálního zatížení balastem. Balast je tvořen ocelovými bloky (každý po 20 kg), které se podle potřeby vloží do připravených schránek s jištěním. Celkově lze navýšit hmotnost z provozní 1 500 kg až na 2 000 kg.

Z hlediska elektrické výzbroje je MD vybaven dvěma alternátory o celkovém maximálním výkonu 6 kW. Aby bylo možné zajistit dostatek elektrické energie pro elektrodynamický retardér i v nízkých rychlostech (spotřeba retardéru dosahuje až 3 kW), je v zadní části zastavěn akumulátorový blok o celkové kapacitě 6 kWh, který zároveň působí jako protizávaží retardéru v přední části.

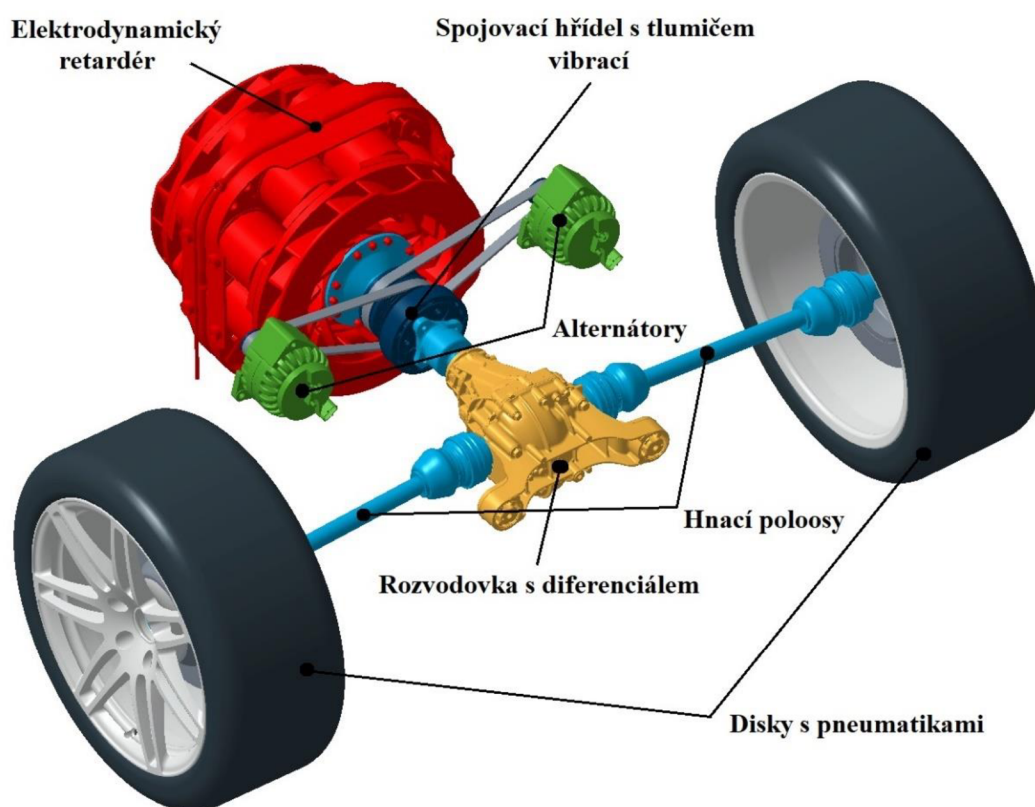
Ostatní komponenty, jako olejový chladič s čerpadlem, chladičí ventilátory, majáky, vzduchový kompresor se zásobníkem jsou vhodně zastavěny v rámu.



Obr. 11: Zobrazení prototypu MD pomocí 3D modelu

### 3.1.1 Brzdná soustava

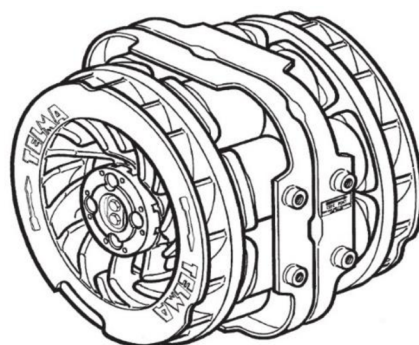
Neboli soustava rotačních hmotných částí MD se skládá z elektrodynamického retardéru (producent brzdného momentu), spojovacích hřídelí, alternátorů, řemenic, ozubených kol v rozvodovce s diferenciálem, hnacích poloos a disků včetně pneumatik i brzdných kotoučů. Soustava na obr. 12 zobrazuje všechnu rotační hmotu, která, dle vypočtených dat z modelovacího prostředí CATIA V5, odpovídá hodnotě  $3,18 \text{ kgm}^2$ .



Obr. 12: Zobrazení brzdné soustavy MD pomocí 3D modelu

### 3.1.2 Elektrodynamický retardér

K tvorbě brzdného momentu prototypu slouží elektrodynamický retardér francouzského výrobce Telma, model Axial AC83-00 – obr. 13. Technické parametry retardéru jsou uvedeny v tab. 3 a na obr. 14.

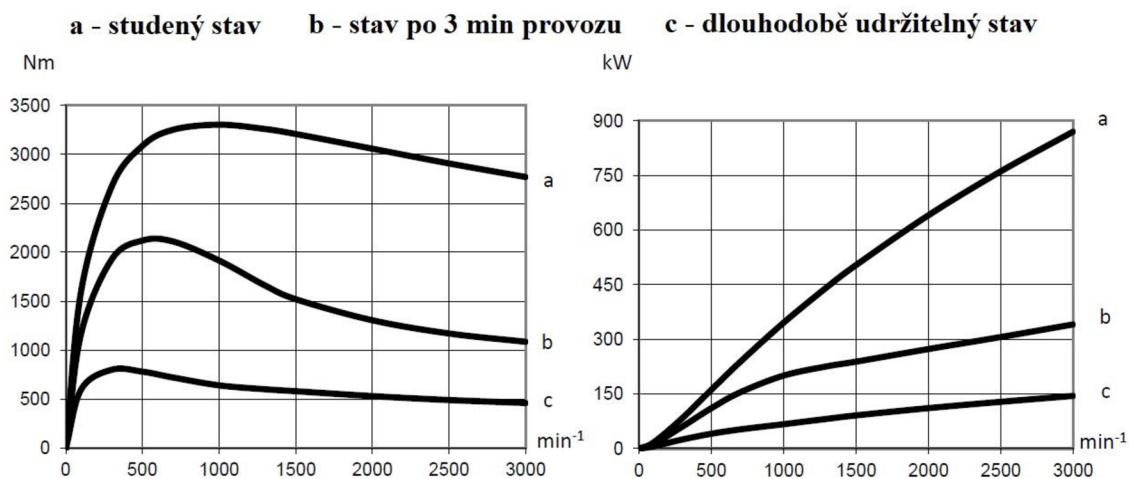


Obr. 13: Elektrodynamický retardér Telma AC83-00 [8]



Tab. 3: Technické parametry elektrodynamického retardéru Telma Axial AC83-00 [8]

Model	Axial AC83-00
Celková hmotnost [kg]	364
Hmotnost statoru [kg]	276
Hmotnost rotorů [kg]	88
Max. brzdný moment [Nm]	3 000
Moment setrvačnosti [kgm <sup>2</sup> ]	2,92
Max. otáčky [1/min]	3 000
Napájecí stejnosměrné napětí [V]	24



Obr. 14: Graf degradace výkonových parametrů z důvodu teploty (upraveno z [8])

## 3.2 Tvorba modelu

### 3.2.1 Modelovací nástroj Matlab/Simscope

Simscope rozšiřuje Simulink o nástroje pro modelování a simulace tzv. „multi-domain“ fyzikálních systémů sestávajících z mechanických, elektrických, hydraulických a dalších komponent. Simscope poskytuje základní stavební prvky v těchto fyzikálních oblastech a zavádí do simulačních schémat reálné fyzikální veličiny, jako jsou síly, momenty, napětí, proudy, tlaky, průtoky atd. Podobně jako při montáži reálného systému, vzniká model v Simscope grafickým propojením bloků, které přímo odpovídají fyzickým prvkům reálného systému (fyzikální modelování). Bloky se spojují do sítě, ve které spojení mezi elementy odpovídají přenosům energie v systému. Tento přístup umožňuje systémy modelovat přímo popisem jejich fyzické struktury a odbourává se potřeba manuálního odvozování příslušných matematických vztahů mezi sledovanými veličinami, které si odvodí Simscope automaticky. Simscope obsahuje knihovny základních prvků z oblasti mechanické (translační a rotační), elektrické, hydraulické, pneumatické, magnetické,

tepelné, termo-hydraulické a z oblasti dvoufázových tekutin. Základní prvky umožňují vytvářet další uživatelské bloky a schémata komplexnějších komponent systému. Využití Simscape je široké, uplatnění najde především v automobilovém průmyslu. [9]

### 3.2.2 Definice jízdních odporů

Jízdní odpory jsou síly, které působí proti pohybu vozidla. Tyto jízdní odpory musí být překonány hnací silou od motoru. Celkový jízdní odpor vypočítáme součtem všech jednotlivých odporů působících na vozidlo. [10, 11]

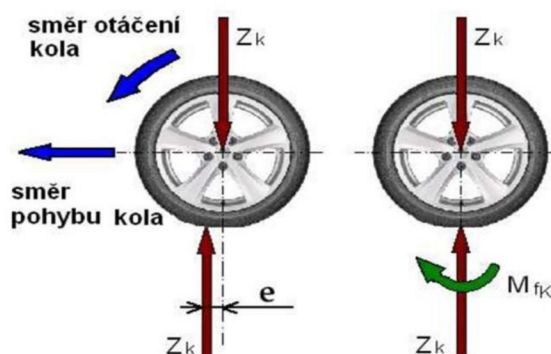
Rozlišení jednotlivých jízdních odporů, které jsou relevantní k vytvářenému modelu je následující:

#### Odpor valivý

Vzniká při styku pneumatiky s vozovkou a její deformaci při valení – obr. 15. Pneumatika se stýká s vozovkou jen určitou plochou, kterou nazýváme stopou. Pneumatiky přenáší veškeré síly z vozidla na vozovku a naopak. Mezi tyto síly patří svislé (tíhové), tečné (hnací nebo brzděné) a boční, které vedou vozidlo. [10, 11]

Reakce vozovky na pneumatiku  $Z_k$  je stejně velká jako zatížení kola, tzn., že vzniká silová dvojice neboli moment, který působí proti směru otáčení kola. Celkový valivý odpor určíme sečtením valivých odporů na jednotlivých kolech vozidla. Pro jedno kolo platí vztah (2). [10, 11]

$$O_{fk} = Z_k \cdot f_k \quad (2)$$



Obr. 15: Moment valivého odporu kola [10]

#### Odpor prostředí

Je vyvolán odporem vzduchu, který vozidlo obklopuje a brání tak v jeho pohybu. Jedná se o sílu, která směřuje proti relativnímu pohybu vozidla. Celkový vzdušný odpor se vypočítá ze vztahu (3). [10, 11]

$$O_v = \frac{1}{2} \rho S_x C_x v_r^2 \quad (3)$$

Při jízdě proudí část vzduchu kolem horní hrany karoserie a zbývající část proudí prostorem mezi spodní hranou vozidla a vozovkou. Proudnice se za vozidlem neuzavírají, ale nastává víření. Velikost této vzdušné síly je dána výslednicí normálových tlaků

vzduchu na povrch karoserie a třecích sil, které působí v tečném směru proudění vzduchu kolem karoserie. [10, 11]

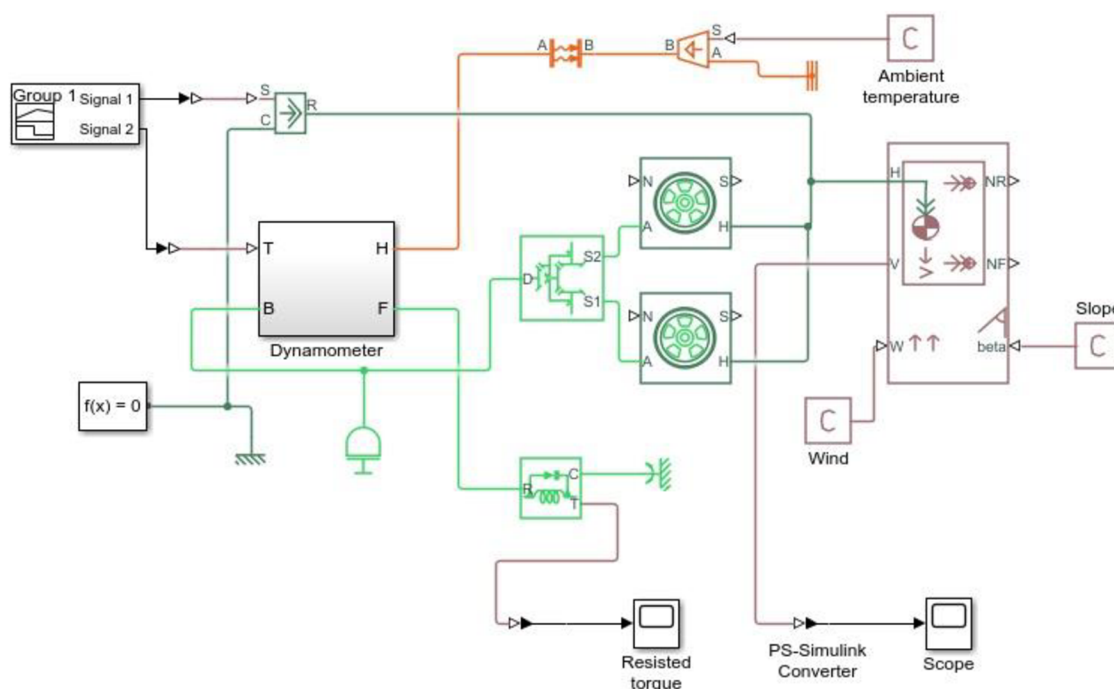
### Odpor zrychlení

Dle definice 3. Newtonova pohybového zákon je nutné uvažovat, že na každé zrychlující se těleso působí setrvačná síla v opačném směru. U vozidel tento zákon platí obzvláště z důvodu velkého množství rotačních součástí. Odpor zrychlení je určen vztahem (4). [11]

$$O_z = \vartheta m \ddot{x} \quad (4)$$

### 3.2.3 Model MD

Model MD jen na obr. 16.



Obr. 16: Model MD v programu Simscape

### 3.2.4 Definice limitních podmínek pro regulační obvod

Dle chování dynamického modelu lze odvodit následující podmínky nebo intervaly regulace:

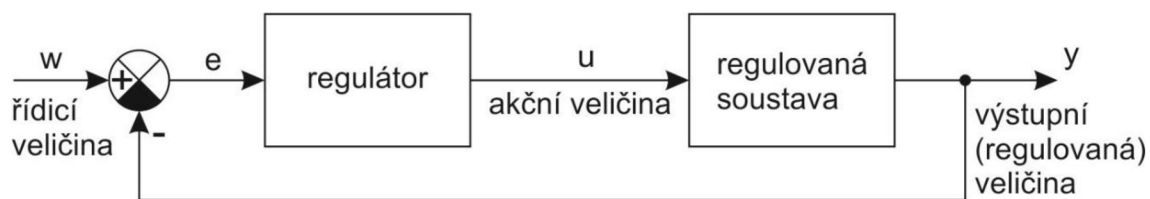
- Regulaci je možné aktivovat pouze v případě, když se rychlost MD pohybuje v intervalu od 30 do 90 km/h.
- Vzhledem k tomu, že součet pasivních odporů MD se blíží hodnotě 800 N, je potřeba nastavit interval regulované brzdné síly od 1 000 N do 5 000 N. Horní hranice je nastavena z důvodu dlouhodobé udržitelnosti této brzdné síly.



## 4 REGULAČNÍ OBVOD

### 4.1 Definice regulačního obvodu se zpětnou vazbou

Princip zpětnovazebního řízení je znázorněn na obr. 16. Regulační odchylka  $e$  se získá jako rozdíl řídicí veličiny – žádané hodnoty a regulované veličiny – skutečné hodnoty  $e = w - y$ . Na základě velikosti regulační odchylky a zvoleného řídicího algoritmu regulátor působí akční veličinou  $u$  na regulovanou soustavu tak, aby byla dosažena na jejím výstupu požadovaná hodnota regulované veličiny  $y$ . [12]



Obr. 17: Regulační obvod se zpětnou vazbou [13]

### 4.2 Typy regulátorů

#### 4.2.1 P regulátor

Nejjednodušším regulátorem je proporcionální regulátor. Typickým představitelem tohoto typu regulátoru je (ideální) zesilovač, tzn. že statická charakteristika je lineární a bez omezení. Dynamické vlastnosti zesilovače se se vzrůstajícím kmitočtem zpracovávaného signálu nemění. Akční veličina na výstupu regulátoru je proporcionální (přímo úměrná) regulační odchylce na vstupu regulátoru. Akční veličinu na výstupu z regulátoru lze vyjádřit vztahem (5). [13]

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) \quad (5)$$

#### 4.2.2 I regulátor

Další základní typ regulátoru je integrační regulátor. Je to regulátor, který i při nulovém vstupním signálu (regulační odchylce) má nenulový výstup. Akční veličinu na výstupu regulátoru lze vyjádřit vztahem (6). [13]

$$u(t) = r_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + u(0) \quad (6)$$

#### 4.2.3 D regulátor

Dalším typem je derivační regulátor, který nelze samostatně fyzikálně realizovat. Používá se pouze ve složených typech regulátorů PD, PID. Výstup regulátoru (akční veličina) je přímo úměrný derivaci regulační odchylky (vstupní veličině). Nese informaci o

budoucích hodnotách regulační odchylky. Zavádí se pro urychlení přechodového děje a do určité míry předvídá změny, které teprve nastanou. Akční veličinu na výstupu regulátoru lze vyjádřit vztahem (7). [13]

$$u(t) = r_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

#### 4.2.4 PID regulátor

Proporcionálně integračně derivační regulátor je složený regulátor. Je spolu s PI regulátorem nejpoužívanějším regulátorem z uvedených základních typů regulátorů a má ve výstupním (akčním) signálu obsaženy všechny tři složky, z nichž první je úměrná regulační odchylce, druhá jejímu integrálu a třetí její derivaci. Akční veličinu na výstupu regulátoru lze vyjádřit vztahem (8). [13]

$$u(t) = r_0 \cdot e(t) + r_d \frac{de(t)}{dt} + r_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + u(0) \quad (8)$$

Vzhledem k velkým a rychlým změnám v regulovaném zkoumaném systému je volba PID regulátoru opodstatněná.

### 4.3 Řídicí HW/SW

#### HW

V této části se nachází základní popis a periférie mikrokontroléru rodiny S32K od výrobce NXP. Řídicí jednotky (Main ECU a Gateway) jsou postaveny právě na základě automotive mikrokontroléru S32K14x.

Jedná se o 32bitový mikrokontrolér, zaměřený na univerzální automobilové a vysoce spolehlivé průmyslové aplikace. Je založen na jádře ARMCortex-M4. Umožňuje běh procesoru ve vysokorychlostním režimu (až 112 MHz) s podporou DSP (Digital Signal Processor) a FPU (Floating point unit). Velikost Flash paměti je až 2 MB. [14]

V normálním režimu umožňuje běh procesoru až 80 MHz. Dále podporuje režimy jako VLPR (Very Low Power Run) a VLPS (Very Low Power Stop). [14]

Analogové moduly obsahují až dva 12bitové analogově-digitální převodníky (ADC) s až 32kanálovými analogovými vstupy na modul. Dále jeden analogový převodník (High-speed comparator CMP) s interním 8bitovým digitálně-analogovým převodníkem (DAC). [14]

Ke komunikačnímu rozhraní patří:

- Až 3 univerzální asynchronní přijímače a vysílače s nízkou spotřebou energie (LPUART).
- Až 3 sériové periferní rozhraní s nízkou spotřebou energie (Low-Power Serial Peripheral Interface-LPSPI).

- Až 2 LPI2C (Low-Power Inter-Integrated Circuit) s podporou přímého přístupu do paměti.
- Až 3 FlexCan moduly a modul FlexIO pro flexibilní a vysoce výkonné sériové rozhraní.

Napájení I/O podporuje 2,7 V až 5,5 V. V normálním běhu se teplota okolí může pohybovat od -40 °C do 125 °C. Ve vysokorychlostním běhu se teplota okolí může pohybovat od -40 °C do 105 °C. Mikrokontrolér je zastavěn do standardizovaného pouzdra 100 LQFP (Low Profile Quad Flat Pack). [14]

## SW

K tvorbě řídicího a regulačního SW bylo využito vývojové prostředí ARMKeil  $\mu$ Vision 5, které je přizpůsobeno pro ARM mikrokontroléry.

ARMKeil  $\mu$ Vision 5 je oficiální vývojové prostředí společnosti ARM, které je plně vybaveno. Jde o komerční produkt, který ve volné verzi omezuje velikost výsledného kódu na hodnotu 32KB. Pro jednodušší projekty tato hodnota ale postačuje. Práce s ARMKeil  $\mu$ Vision 5 je doporučena zkušenějším uživatelům, protože zprovoznění projektu vyžaduje hlubší znalosti s prací ARM mikrokontroléry, vložení potřebných knihoven a správné nastavení inicializace mikrokontrolerů. [15]

V ARMKeil  $\mu$ Vision 5 nalezneme dobrou podporu programovacích a ladicích prostředků (debuggeru), konkrétně ULINK Pro Cortex Debugger, který byl využit v tomto projektu. [15]

### 4.3.1 Main ECU

Hlavní ŘJ – obr. 17 obstarává komunikaci s výkonovou jednotkou retardéru (iRCS) přes separátní CAN sběrnici. Zároveň komunikuje přes hlavní CAN Trailer sběrnici s ŘJ Gateway. Dále zpracovává analogové signály ze zesilovače snímače síly (Burster 9243) a snímačů otáček kol. Měřené signály na základě interních funkcí filtruje a upravuje tak, aby byl výsledný signál použitelný k funkci regulace brzdného momentu.

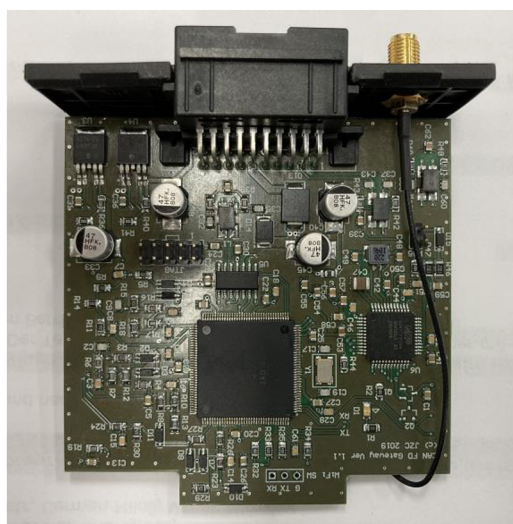


Obr. 18: Fyzická podoba hlavní ŘJ (Main ECU)



### 4.3.2 Gateway

Gateway ŘJ – obr. 18 slouží k obsluze podružných periférií MD (pneumatický podvozek, BMS, komunikace WiFi, alternátory atd.). Vzhledem k tomu, že obsahem této práce je pouze regulační obvod MD, tak zmíněné ostatní periferie dále nebudou uváděny. Další důležitou funkcí tvoří při komunikaci s uživatelským rozhraním Vector, kdy zpracovává požadavky obsluhy, které následně v upravené formě odesílá přes hlavní CAN Trailer sběrnici do hlavní ŘJ, která se soustředí na samotnou regulaci.



Obr. 19: Fyzická podoba ŘJ Gateway

### 4.3.3 Telma iRCS

iRCS (integrováný kontrolní systém retardéru) na obr. 19 je elektronická výkonová jednotka navržena společností Telma, která integruje řídicí a napájecí funkce do jednoho modulu. Inovativní elektronický design výkonové funkce iRCS významně snižuje spotřebu energie retardéru a umožňuje jemnou regulaci velikosti elektrického proudu napájející cívky retardéru, a tím zaručit plynulou regulaci brzdného momentu. Moderní design a flexibilita ovládací části iRCS, stejně jako její kompatibilita s komunikačními sběrnici CAN, zaručuje spolehlivou integraci do různých řídicích systémů. [16]



Obr. 20: Výkonová jednotka Telma iRCS [16]



## 4.4 Ovládací HW/SW

Má za úkol zprostředkovat obsluhu dálkové ovládaní MD (nejčastěji z tažného vozidla). Z důvodu zajištění spolehlivosti komunikace mezi uživatelským rozhraním a ŘJ MD je přenos signálů realizován pomocí fyzické drátové sběrnice CAN. Uživatelské rozhraní umožňující komunikaci s MD je postaveno na komerčních produktech firmy Vector.

### 4.4.1 Vector VN1630A

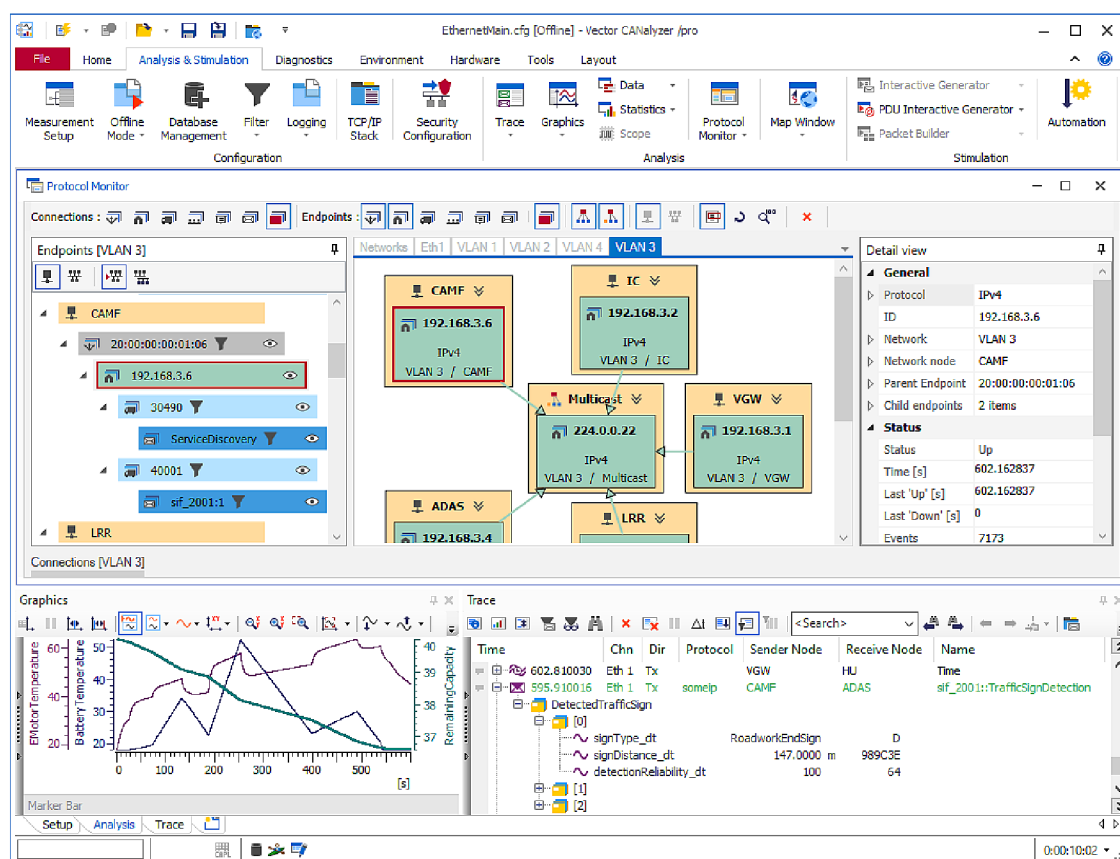
Jedná se o zařízení, které umožňuje propojit PC s elektronickou řídicí jednotkou prostřednictvím rozhraní USB a fyzickou sběrnici CAN nebo LIN – obr. 20. Pomocí aplikace CANalyzer je možné simulovat zbývající část sběrnice nebo z fyzické sběrnice zaznamenávat a odesílat adekvátní zprávy. Pro připojení k fyzické sběrnici je zařízení vybaveno 2 konektory D-SUB s označením DE-9 M (E značí velikost konektoru a číslo 9 počet pinů). Zařízení disponuje 4 kanály, kde na jednom konektoru DE-9 M mohou být 2 CAN kanály nebo kombinace CAN a LIN kanálu. Maximální přenosová rychlost pro sběrnici CAN je 2 Mb/s, pro CAN FD 8 Mb/s a pro LIN 330 kb/s. Na protější straně zařízení je třetí konektor DE-9 M určený k připojení digitálních a analogových vstupních a výstupních signálů. Posledním konektorem je USB typu B, které slouží ke komunikaci s PC a k napájení celého zařízení. [17]



Obr. 21: Zařízení Vector VN1630A (upraveno z [18])

### 4.4.2 Vector CANalyzer

Softwarový nástroj CANalyzer je vyvíjen německou společností Vector Informatik GmbH – obr. 21. Má širokou škálu využití od analýzy a simulace komunikace po jednoduchých sběrnících nebo sítích až po emulaci složitých systémů. Mezi primární účely použití CANalyzeru se řadí sledování komunikace na sběrnici, grafické a textové zobrazení signálů, filtrování, záznam zpráv pro jejich další statistické využití nebo vysílání nadefinovaných zpráv. Navzdory svému názvu CANalyzer podporuje nejen sběrnici CAN, ale i další používané v automobilovém průmyslu (LIN, MOST). [19]



Obr. 22: Uživatelské prostředí programu Vector CANalyzer [20]

## 4.5 Měřicí technika

### 4.5.1 Tenzometrický snímač síly včetně zesilovače

Přesné měření tažné a tlakové síly lze provádět v omezeném prostoru díky miniaturním siloměřům Burster 8432 – obr. 22. Vysoká přesnost, různé měřicí rozsahy, pohodlné aplikace zatížení pomocí závitových kolíků s vnějším vinutím a malými rozměry nabízejí širokou škálu aplikací v laboratořích a výrobě. Pro potřeby měření brzdné síly je na MD zastavěn typ s rozsahem 0-50 kN. [21]

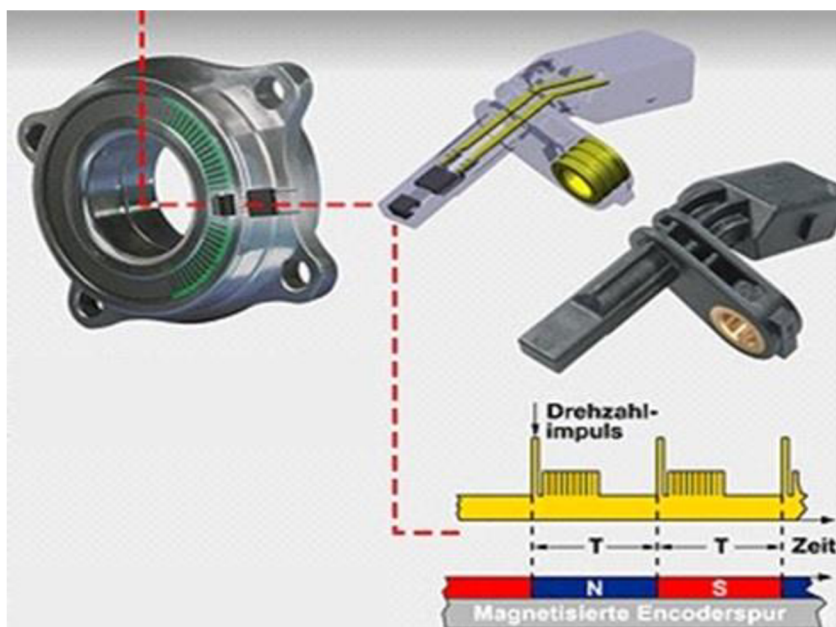
Modul zesilovače Burster 9243 se používá všude tam, kde je třeba převést měřicí signály z tenzometrů, potenciometrických snímačů nebo snímačů DC/DC na standardní signály. Pouhou instalací na konvenční DIN lištu je možné umístit modul zesilovače na místo v blízkosti senzoru. Speciálně pro drsné prostředí je k dispozici varianta s krytím IP65. Výstupní analogový signál lze nastavit pomocí DIP přepínačů. Dle nastavení jsou výstupy  $\pm 5$  V,  $\pm 10$  V nebo 4-20 mA. [22]



Obr. 23: Snímač síly Burster 8432 včetně zesilovače Burster 9243 (upraveno z [21])

#### 4.5.2 Snímač otáček

Ke snímání rychlosti kola je použit snímač otáček – obr. 23, který je založen na principu Hallova jevu. Snímač se skládá z magnetické závory, kterou tvoří Hallův prvek a pólové nástavce, jeden je z magneticky měkkého materiálu a druhý z permanentního magnetu. K ložisku náboje kola je připevněna clonka s otvory vyplňující vzduchovou mezeru mezi nástavci. Pokud bude mezi nástavci otvor clonky, bude vzduchová mezeru volná a magnetická indukce v oblasti Hallova prvku bude maximální a maximální bude i Hallovo napětí. Pokud bude vzduchovou mezeru vyplňovat clonka, magnetické pole se odchýlí a magnetická indukce poklesne natolik, že Hallovo napětí bude téměř nulové. Hallovo napětí má obdélníkový výstup, a tak jej řídicí jednotka pouze zesílí a pomocí definovaného poloměru kola dopočítá rychlost MD. [23]



Obr. 24: Snímač otáček včetně clonky v ložisku náboje kola (upraveno z [23])

## 4.6 Režim regulace brzdné síly a výkonu

Cílem regulace brzdné síly je, aby MD brzdil konstantní silou, kterou mu před zkouškou zadá obsluha. Předpokládá se, že při dané zkoušce je dodržována konstantní rychlost nebo dochází pouze k občasným změnám rychlosti, při kterých má být brzdná síla regulována.

Cíl regulace brzdného výkonu je totožný s regulací brzdné síly, neboť tyto dvě veličiny jsou vzájemně provázané (9). Ve skutečnosti dochází k regulaci brzdné síly dle dané rychlosti. Pro udržení konstantního brzdného výkonu, je nutné zaručit, že s vyšší rychlostí bude i požadavek na brzdnou sílu (brzdný moment) nižší.

$$P = M_k \omega \quad (9)$$

### 4.6.1 Postup odladění regulace

Ladění konstant PID regulátoru bylo realizováno pomocí uživatelského rozhraní CANalyzer, kdy se po daném jízdním cyklu zhodnotila přechodová charakteristika regulace a pokud nevyhovovala, tak se konstanty ručně upravily a jízdni cyklus se opakoval. Konstanty bylo možné měnit i při daném jízdním cyklu, proto bylo možné jejich vliv okamžitě vyhodnotit a případně upravit.

SB	Signalname	Rohwert	Phys. Wert	Einheit	Dec	phys. Step	Inc
20	GW_CTRL_RTD_Reg_D_Const	1	0.001		-	0.5	+
10	GW_CTRL_RTD_Reg_I_Const	6E	0.011		-	0.005	+
0	GW_CTRL_RTD_Reg_P_Const	14	0.002		-	0.005	+

Obr. 25: Ovládací okno pro změnu konstant PID v programu CANalyzer

### 4.6.2 Výsledky regulace

Výsledky regulace konstantní brzdné síly ve formě přechodových charakteristik jsou uvedeny v přílohách. Příloha 4 a 6 zobrazuje nevyhovující a Příloha 5 a 7 vyhovující přechodovou charakteristiku.

## 4.7 Režim regulace rychlosti

Cílem regulace je udržet konstantní rychlost, která byla zadána obsluhou.

### 4.7.1 Postup odladění regulace

Postup ladění konstant probíhal obdobným způsobem, jako v předchozím případě.

### 4.7.2 Výsledky regulace

Výsledná přechodová charakteristika je uvedena v Příloze 8.

## 5 ZHODNOCENÍ

Regulační obvod splnil základní požadavky na stabilitu, kvalitu a přesnost regulace.

Pro dokonalejší regulaci by bylo vhodné se do budoucna zaměřit na integraci vstupů z CAN sběrnice tažného vozidla tak, aby bylo možné lépe a rychleji předpovídat stavy v regulačním systému.



## 6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout regulační obvod pro reálný prototyp mobilního dynamometru s funkcí regulace tří základních režimů, které umožní regulovat konstantní brzdou sílu, konstantní brzdý výkon a konstantní rychlost.

Tato práce se v úvodní části zabývala studiem současného stavu poznání v oblasti mobilních dynamometrů. Byl vysvětlen jejich účel a smysl použití v automobilovém průmyslu. Následně byly popsány hlavní komponenty, které jsou nezbytné ke správné funkci mobilního dynamometru. Dále byly představeny i aktuálně na trhu dostupné modely dynamometrů od výrobců Taylor a Volke, kteří mají, vzhledem k jejich profesnímu zaměření, k podobným produktům blízko.

V 3. kapitole byl popsán fyzický prototyp mobilního dynamometru včetně jednotlivých komponentů. Mezi hlavní části patřila brzdá (rotační) soustava, která zajišťuje potřebný brzdý moment na kolech.

Na základě popsaného reálného prototypu byl vytvořen jednoduchý dynamický model v programu Simscape, který simuluje pasivní jízdní odpory. Mezi realizované pasivní odpory patřil odpor prostředí, odpor valení a odpor akcelerace, který simuloval odpor rotačních a translačních částí mobilního dynamometru. Dále byl definován aktivní odpor ve formě elektrodynamického retardéru, který se následně přičítal k odporům pasivním. Elektrodynamický retardér byl v modelu definován jako třecí brzda, což výrazně zjednodušilo celý model.

Podle provedených simulací na modelu byly definovány podmínky pro regulační obvod. Mezi podmínky regulace patří intervaly brzdé síly a rychlosti, při kterých bude regulátor aktivně regulovat. Intervaly zajistí, že během aktivního brzdění nedojde ke ztrátě brzdého výkonu retardéru z důvodu přehřátí, dále nedojde k prokluzu kol vlivem velkého brzdého momentu a oblast regulace nebude ovlivněna pasivními odpory samotného mobilního dynamometru.

V další části byl popsán ovládací a řídicí HW/SW, na kterém je realizován PID regulátor pro regulaci brzdé síly dle zvoleného režimu a nastavení. Pro regulaci konstantní brzdé síly a brzdého výkonu byly postupně odladěny konstanty PID regulátoru tak, aby vyhověly regulovanému systému. Konstanty byly následně odladěny i pro regulaci konstantní rychlosti.

V závěrečné části byla zhodnocena stabilita, kvalita a přesnost regulace.





## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOLKE Towing Dynamometer – Kunststoffverarbeitung Sonderformen Modellbau mit GFK CFK | ACCENTFORM. *ACCENTFORM – Einzelanfertigungen und Sonderanfertigungen aus GFK* [online]. Copyright © Copyright 2021 [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <https://accentform.com/volke-towing-dynamometer/?lang=en>
- [2] TAYLOR Dyno – Towing Dynos for Compact to Mid-Sized Light-Duty Vehicles. [online]. 2021 [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <https://www.taylordyno.com/products/towing-dynamometers/light-duty-vehicles/>
- [3] Zpomalovací retardéry. Informace pro žáky ISS Slaný [online]. Dostupné z: <http://zak.iss-slany.cz/?id=153&action=detail&presenter=Material>
- [4] Domů | SPŠ a VOŠ Brno Sokolská [online]. Copyright © [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: [https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY\\_32\\_INOVACE\\_14-19.pdf](https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_14-19.pdf)
- [5] TOŠENOV JAN, D.: Rekonstrukce převodovky pro retardér vozidla Tatra 815, Diplomová práce. Ostrava: VŠB –Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2018, 53 s. Vedoucí práce: Ing. Daniel Pišťáček, Ph.D.
- [6] DIÁK, M: Brzdy vozidel pro vysoké rychlosti, Diplomová práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, 2008, 79 s. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Oppolzer, Ph.D.
- [7] VOLKE, Towing Dynamometer. VOLKE [online]. Copyright © [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <http://www.volke.de/en/areas-of-competence/testing/towing-dynamometer/>
- [8] Welcome To TELMA USA [online]. Copyright © [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <https://www.telmausa.com/Downloads/OC442083.pdf>
- [9] Humusoft. Simscape – Modelování a simulace fyzikálních systémů [online]. Copyright © [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/matlab/simscape/>
- [10] SLECHAN, J. Vehicle dynamics and driving stability, Diplomová práce. Liberec: Technical University of Liberec, Faculty of Mechanical Engineering, 2018. 87 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
- [11] PRACHAŘ, R. Jízdní odpory vozidel, Diplomová práce Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2010. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Rochla.
- [12] ŠVARC, Ivan. Automatické řízení. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.
- [13] OŽANA, Štěpán. Navrhování a realizace regulátorů: učební text. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2605-9.
- [14] BÁRTLOVÁ, D. Sériový bootloader pro mikrokontrolér S32K144, Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2018. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Dostálek, Ph.D.
- [15] HODIC, K. Mikrokontroléry s jádrem ARM, Bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2013. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Petr Krist.
- [16] Retarders Accessories – Telma S. A. Electromagnetic Braking Systems – Telma S.A. [online]. Dostupné z: <https://www.telma.com/produits/accessoires>

- [17] ZOUHAR, Š. Analýza komunikace elektronických řídicích jednotek automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2017. 36 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Spáčil.
- [18] VN1600 Network Interface for CAN, LIN, K-Line, J1708 and IO [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: [https://vector.com/vi\\_vn1600\\_en.html](https://vector.com/vi_vn1600_en.html)
- [19] PAVELEC, J. Simulace řídicího systému vozidla, Diplomová práce. Brno: Masarykova Univerzita, Fakulta informatiky, 2014. 35 s. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Václav Přenosil, CSc.
- [20] Vector Informatik GmbH, CANalyzer [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vector.com/cz/en/products/products-a-z/software/canalyzer/#c652>
- [21] Burster, load cells, Amplifiers [online]. Copyright © [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <https://www.burster.com/en/load-cells/p/detail/8431-8432>
- [22] Burster, Amplifiers [online]. Copyright © [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <https://www.burster.com/en/sensor-electronics/amplifier-and-transmitter-modules/p/detail/9243>
- [23] 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.

## 8 SEZNAM ZKRATEK

CO <sub>2</sub>	Carbon Dioxide
ARM	Advanced RISC Machine
MD	Mobilní Dynamometr
PLC	Programmable Logic Controller
PC	Personal Computer
WiFi	Wireless LAN
LAN	Local Area Network
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
TFT	Thin-Film Transistors
CAN	Controller Area Network
CAN FD	Controller Area Network Flexible Data-Rate
3D	Three-dimensional space
ECU	Electronic Control Unit
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
VLPR	Very Low Power RUN
VLPS	Very Low Power Stop
DSP	Digital Signal Processor
FPU	Floating Point Unit
CMP	High-speed Comparator
LPUART	Low Power Universal Synchron/Asynchronous Receiver and Transmitter
LPSPi	Low Power Serial Peripheral Interface
LPI2C	Low Power Inter-integrated Circuit
LQFP	Low Profile Quad Flat Pack
LIN	Local Interconnect Network
USB	Universal Serial Bus
ŘJ	Řídicí Jednotka
BMS	Battery Management System
DIP	Dual in-line Package
DIN	Deutsche Industrie-Norm



## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Mobilní dynamometr s tažným vozidlem [1] .....	17
Obr. 2: Uživatelské rozhraní s ovládacím programem [2] .....	19
Obr. 3: Popis zástavby základních komponentů MD (upraveno z [2]) .....	20
Obr. 4: Schéma hydrodynamického retardéru [4] .....	21
Obr. 5: Schéma elektrodynamického retardéru [5] .....	22
Obr. 6: Mobilní dynamometr Taylor RSL-8K (upraveno z [2]) .....	23
Obr. 7: Graf provozních výkonových parametrů RSL-8K (upraveno z [2]) .....	24
Obr. 8: Graf provozních silových parametrů RSL-8K (upraveno z [2]) .....	24
Obr. 9: Mobilní dynamometr Volke VBA15-5xx [7] .....	25
Obr. 10: Graf provozních parametrů VBA12-5xx (upraveno z [7]) .....	26
Obr. 11: Zobrazení prototypu MD pomocí 3D modelu .....	27
Obr. 12: Zobrazení brzdě soustavy MD pomocí 3D modelu .....	28
Obr. 13: Elektrodynamický retardér Telma AC83-00 [8] .....	28
Obr. 14: Graf degradace výkonových parametrů z důvodu teploty (upraveno z [8]) .....	29
Obr. 15: Moment valivého odporu kola [10] .....	30
Obr. 16: Model MD v programu Simscape .....	31
Obr. 17: Regulační obvod se zpětnou vazbou [13] .....	33
Obr. 18: Fyzická podoba hlavní ŘJ (Main ECU) .....	35
Obr. 19: Fyzická podoba ŘJ Gateway .....	36
Obr. 20: Výkonová jednotka Telma iRCS [16] .....	36
Obr. 21: Zařízení Vector VN1630A (upraveno z [18]) .....	37
Obr. 22: Uživatelské prostředí programu Vector CANalyzer [20] .....	38
Obr. 23: Snímač síly Burster 8432 včetně zesilovače Burster 9243 (upraveno z [21]) .....	39
Obr. 24: Snímač otáček včetně clonky v ložisku náboje kola (upraveno z [23]) .....	39
Obr. 25: Ovládací okno pro změnu konstant PID v programu CANalyzer .....	40



## 10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Technické parametry MD pro osobní vozidla firmy Taylor [2] .....	23
Tab. 2: Technické parametry MD pro osobní vozidla firmy Volke [7] .....	25
Tab. 3: Technické parametry elektrodynamického retardéru Telma Axial AC83-00 [8]	29





## 11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Schéma hlavní ŘJ (Main ECU)

Příloha 2: Schéma ŘJ Gateway

Příloha 3: Blokové schéma řídicího hardwaru

Příloha 4: Graf přechodové charakteristiky konstantní brzdné síly – NOK

Příloha 5: Graf přechodové charakteristiky konstantní brzdné síly – OK

Příloha 6: Graf přechodové charakteristiky konstantního brzdného výkonu – NOK

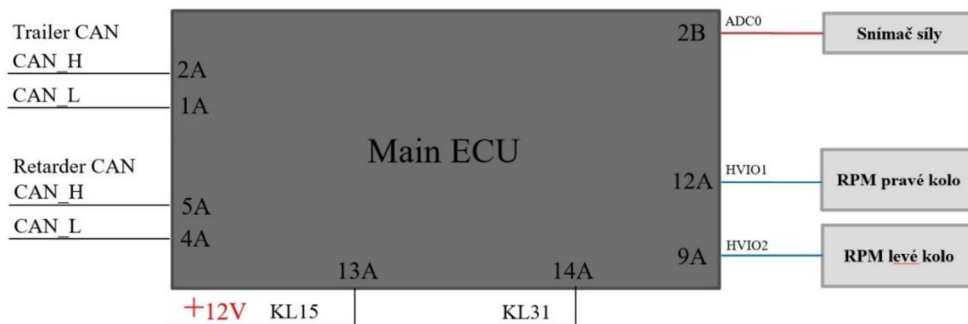
Příloha 7: Graf přechodové charakteristiky konstantního brzdného výkonu – OK

Příloha 8: Graf přechodové charakteristiky konstantní rychlosti – OK

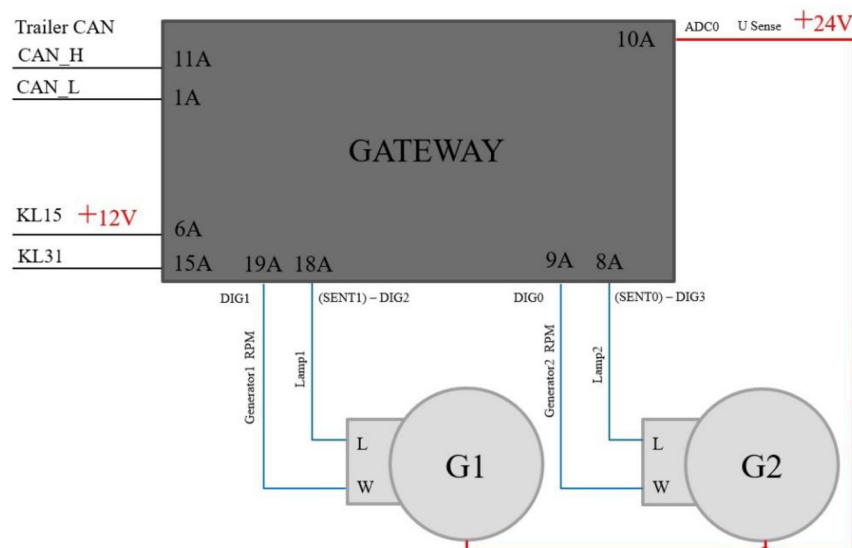


# PŘÍLOHY

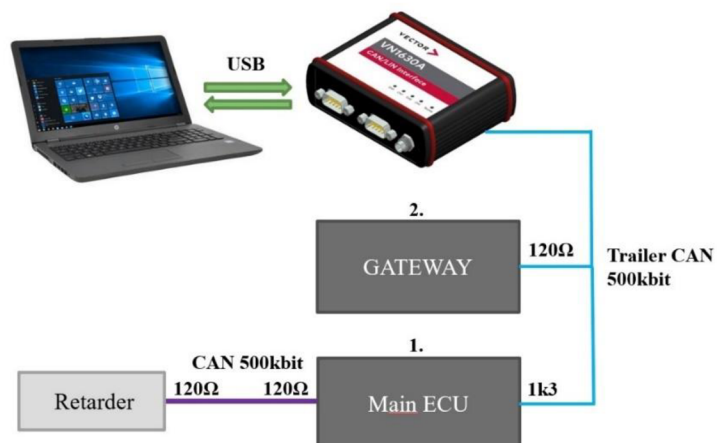
Příloha 1: Schéma hlavní ŘJ (Main ECU)



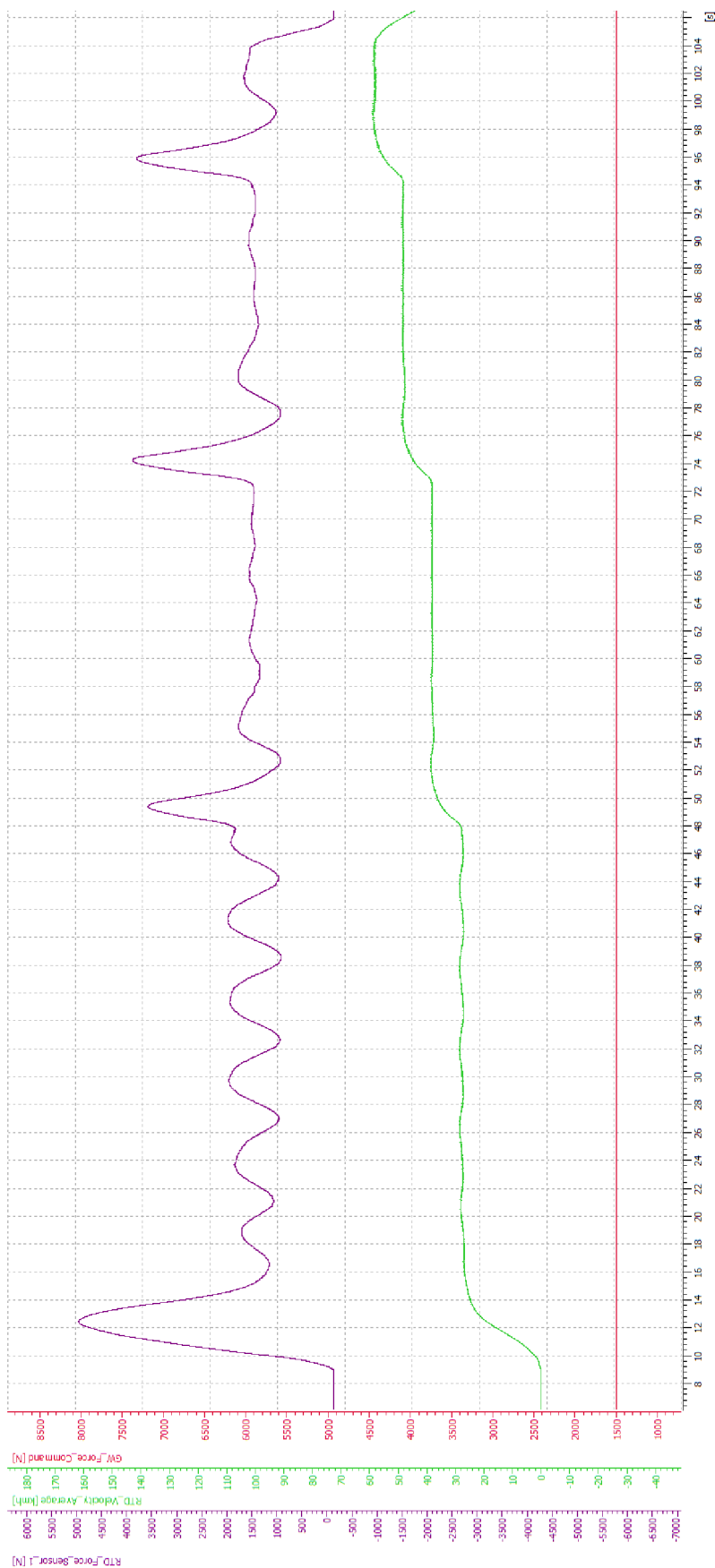
Příloha 2: Schéma ŘJ Gateway



Příloha 3: Blokové schéma řídicího hardwaru



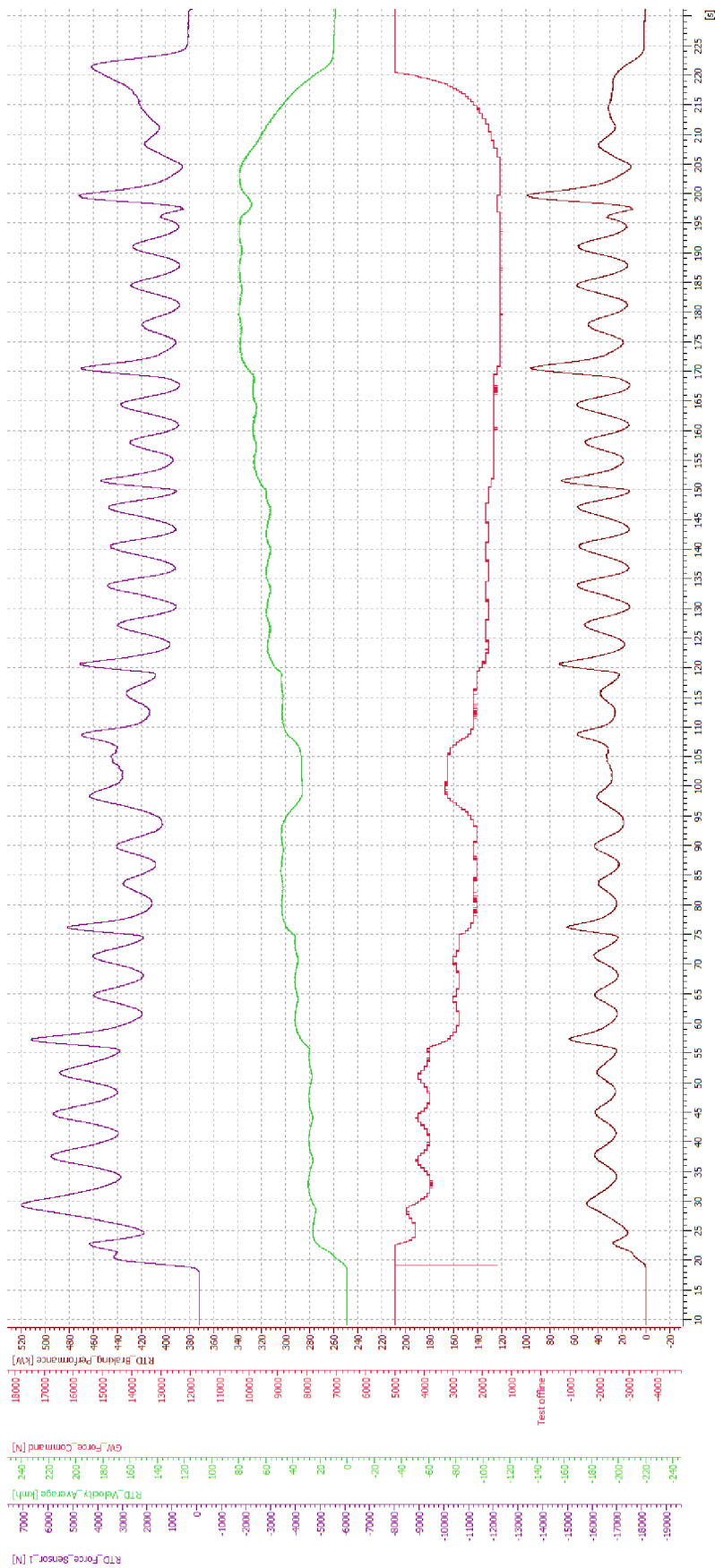
Příloha 4: Graf přechodové charakteristiky konstantní brzdné síly – NOK



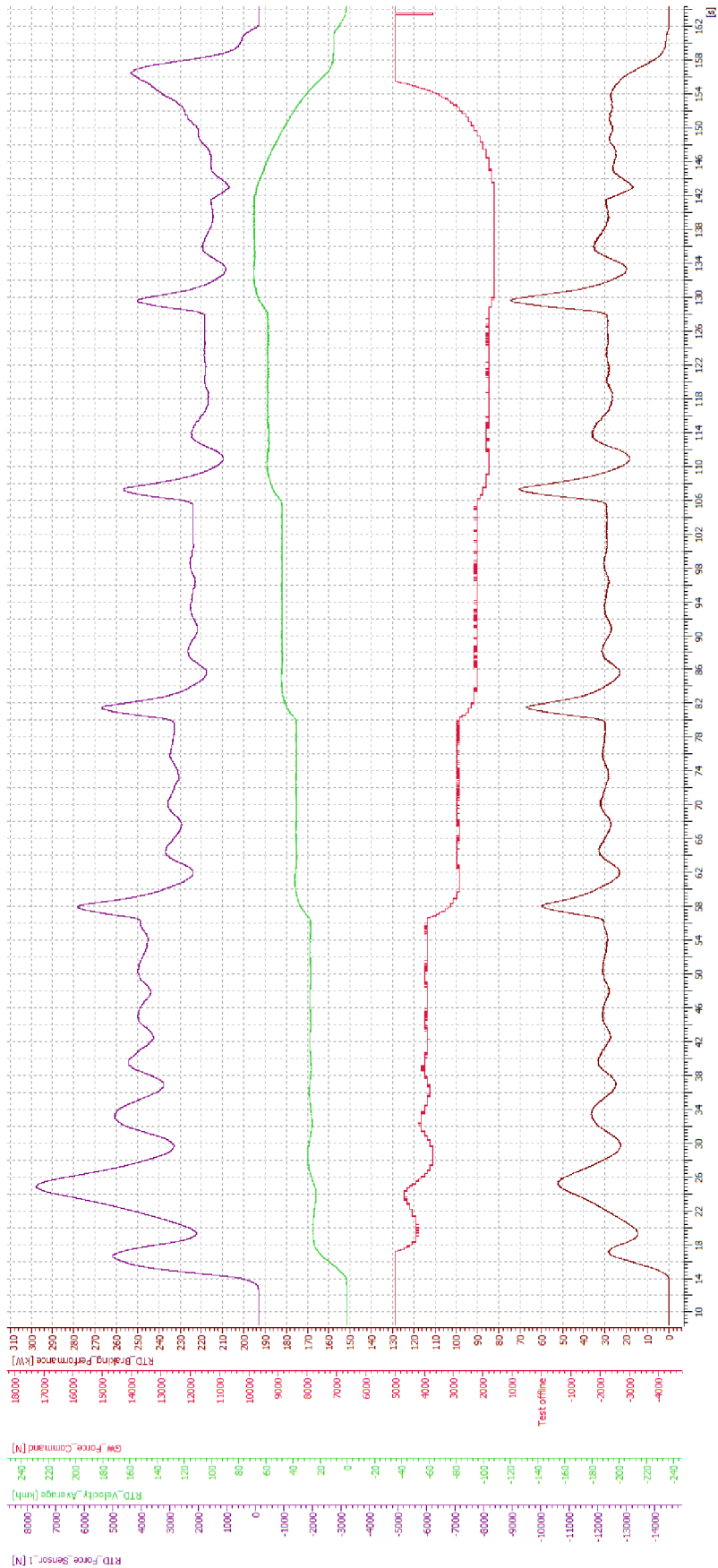
Příloha 5: Graf přechodové charakteristiky konstantní brzdné síly – OK



Příloha 6: Graf přechodové charakteristiky konstantního brzdného výkonu – NOK



Příloha 7: Graf přechodové charakteristiky konstantního brzdného výkonu – OK



Příloha 8: Graf přechodové charakteristiky konstantní rychlosti – OK

