



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

# VÝVOJ ŘÍDICÍ ELEKTRONIKY PRO MAGNETOREOLOGICKÉ TLUMIČE VOZIDLA FORMULA STUDENT

DEVELOPMENT OF CONTROL ELECTRONICS FOR MAGNETORHEOLOGICAL DAMPERS IN FORMULA STUDENT  
VEHICLE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vladimír Skřivánek

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Adámek

BRNO 2022

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Vladimír Skřivánek</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Roman Adámek</b>
Akademický rok:	2021/22

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:

## Vývoj řídicí elektroniky pro magnetoreologické tlumiče vozidla Formula Student

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vozidla vytvořená v rámci soutěže Formula Student jsou rok od roku vyspělejší a následují nejnovější trendy v rámci špičkového motorsportu. S tím souvisí i implementace moderních prvků, jako jsou magnetoreologické (MR) tlumiče, které umožňují spojitě měnit svou tuhost jen s pomocí speciální kapaliny a cívký, bez nutnosti dalších mechanických komponent. Cílem bakalářské práce bude navrhnout řídicí elektroniku pro řízení těchto tlumičů a otestovat její funkčnost.

### Cíle bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši na téma MR tlumičů. Popište jejich vlastnosti, konstrukci, použití, modelování a metody řízení.
2. Navrhněte elektroniku pro řízení MR tlumičů. Elektronika bude umožňovat proudové řízení tlumičů na základě vstupních dat získávaných po sběrnici CAN a již známého řídicího algoritmu.
3. Navrhněte a otestujte přizpůsobení signálů z jednotlivých senzorů vozidla tak, aby byly vhodné pro řídicí algoritmus.
4. Otestujte funkčnost vyvinuté řídicí elektroniky na MR tlumičích. Změřte charakteristiku tlumiče pro kinematické buzení s různou frekvencí.

### Seznam doporučené literatury:

MURRAY, Richard M. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, 1994, ISBN 9780849379819.

NELLES, Oliver. Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-364-2086-748.

LJUNG, Lennart. System identification: theory for the user. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999. ISBN 978-0136566953.

VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1276-X.

NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-722-50-0-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## Abstrakt

Tématem této bakalářské práce je návrh řídicí desky magnetoreologických tlumičů. Deska má být schopna přijímat vstupní data z dataloggeru po sběrnici CAN. Z nich má následně, pomocí již známého řídicího algoritmu, vypočítat požadovaný proud a ten zpětnovazebně pomocí PI regulátoru regulovat. Dále má být schopna měřit teplotu magnetoreologické kapaliny v tlumiči pro možnost korekce degradace tlumící síly vlivem narůstající teploty. Další součástí této práce je otestování implementace tohoto řídicího algoritmu a změření F-v charakteristiky magnetoreologického tlumiče pro různé hodnoty proudu.

## Summary

The topic of this bachelor thesis is the design of a control board for magnetorheological dampers. The board has to be able to receive input data from a datalogger over the CAN bus. From these data, it has to calculate the required current using a known control algorithm and has to be able to regulate it by feedback using a PI controller. Furthermore, it should be able to measure the temperature of the magnetorheological fluid in the damper to be able to correct the degradation of the damping force due to increasing temperature. Another part of this work is to test the implementation of this control algorithm and measure the F-v characteristics of the magnetorheological damper for different values of current.

## Klíčová slova

Magnetoreologický tlumič, Adaptivní tlumení, Řídicí elektronika, Formula Student, TU Brno Racing.

## Keywords

Magnetorheological damper, Adaptive damping, Control electronics, Formula Student, TU Brno Racing.

## Bibliografická Citace

SKŘIVÁNEK, V. *Vývoj řídicí elektroniky pro magnetoreologické tlumiče vozidla Formula Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 59 s., Vedoucí diplomové práce: Ing. Roman Adámek.



Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Vývoj řídicí elektroniky pro magneto-reologické tlumiče vozidla Formula Student* vypracoval samostatně s připomínkami mého vedoucího a s použitím materiálů a zdrojů uvedených v seznamu literatury.

**Vladimír Skřivánek**

Brno . . . . .

. . . . .

Děkuji svému vedoucímu Ing. Romanu Adámkovi za ochotu, vstřícnost, cenné rady a vedení mé bakalářské práce správným směrem.

**Vladimír Skřivánek**

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Rešerše</b>	<b>10</b>
2.1	Vlastnosti MR kapaliny . . . . .	10
2.2	Konstrukce tlumičů . . . . .	12
2.2.1	Jednoplášťový pasivní tlumič . . . . .	12
2.2.2	Dvoupplášťový pasivní tlumič . . . . .	12
2.2.3	Jednoplášťový MR tlumič . . . . .	13
2.2.4	Dvoupplášťový MR tlumič . . . . .	14
2.3	Použití MR tlumičů . . . . .	15
2.3.1	Tlumení pozemních staveb . . . . .	15
2.3.2	Kolejová vozidla . . . . .	15
2.3.3	Automobily . . . . .	16
2.4	Modelování MR tlumičů . . . . .	17
2.5	Metody řízení . . . . .	20
2.5.1	Fuzzy řízení . . . . .	20
2.5.2	PI-regulátor . . . . .	21
2.6	Formula student . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Postup a výsledky řešení</b>	<b>24</b>
3.1	Požadavky na řešení . . . . .	24
3.1.1	Spalovací formule student . . . . .	24
3.1.2	Elektrická formule student . . . . .	24
3.2	První řídicí deska . . . . .	25
3.2.1	Zjištěné hardwarové nedostatky . . . . .	28
3.2.2	Zjištěné softwarové nedostatky . . . . .	28
3.2.3	Ověření proudové regulace . . . . .	30
3.2.4	Ověření implementace řídicího algoritmu . . . . .	32
3.3	Druhá řídicí deska . . . . .	36
3.4	Zhodnocení experimentů . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>40</b>
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>41</b>
	<b>Literatura</b>	<b>42</b>

Seznam příloh	45
A Schéma první desky	46
B Schéma druhé desky	48
C Návrh DPS první desky	54
D Návrh DPS druhé desky	57

# 1 Úvod

Motorsport je velice kompetitivní prostředí a soutěž Formula Student není žádnou výjimkou. Každý tým hledá jakoukoliv možnost, jak získat výhodu nad svými soupeři. Tak jako v závodech Formule 1 i zde je snaha dostat maximum ze svých pneumatik. Podstatnou část v tom hraje roli odpružení auta. Klasické pasivní systémy mají omezené možnosti. Při jejich nastavení se jedná vždy o kompromis. Naproti tomu aktivní systémy dovolují měnit nastavení podvozku auta v reálném čase. Tyto systémy jsou však velice energeticky náročné. Z tohoto důvodu se jeví jako výhodnější používat semi-aktivní odpružení. Jednou z možností je právě použití magnetoreologických (MR) tlumičů.

MR tlumič umožňuje v reálném čase měnit svoji tlumicí charakteristiku. Jeho správným řízením se tedy dá značně ovlivnit dynamika celého vozu. Umožňuje správně distribuovat síly působící na pneumatiky. V týmu TU Brno Racing byl navržen a vyroben prototypový MR tlumič. Následně byl vyvinut a v simulaci otestován řídicí algoritmus, který podle vstupních signálů vyhodnocoval proud potřebný pro nejlepší tlumicí sílu. Součástí celého systému je také řídicí elektronika. Ta zajišťuje, aby tlumičem protékal požadovaný proud.

Celý projekt byl ve fázi, kdy bylo potřeba navrhnout a otestovat řídicí elektroniku. Protože jsem chtěl při studiu něco opravdového vytvořit, rozhodl jsem se těchto úkolů ujmout. Lákalo mě si navrhnout vlastní desku plošných spojů (DPS). Vyzkoušet si práci v týmu a zjistit, zda jsem schopen použít znalosti nabyté ve škole při řešení reálného problému.

## 2 Rešerše

### 2.1 Vlastnosti MR kapaliny

V této kapitole bude popsána MR kapalina a základní princip MR efektu.

MR kapalina patří do skupiny tzv. chytrých materiálů. Chytrý materiál je takový, jenž dokáže měnit své mechanické vlastnosti v závislosti na vnějším působení. Jako příklady vnějšího působení si můžeme představit např. teplotu, světlo, tlak nebo v případě MR kapaliny je to intenzita magnetického pole, ve kterém se nachází.

Tato kapalina se skládá z magneticky měkkých částic, obvykle  $Fe_3O_4$ , které se svojí velikostí pohybují v řádech jednotek mikrometrů, jenž jsou rozptýlené v nosném médiu. Nejčastěji jde o silikonové či syntetické oleje. Jako opatření proti usazování a shlukování částic jsou ve směsi přítomny i surfaktanty, často to bývá kyselina olejová.

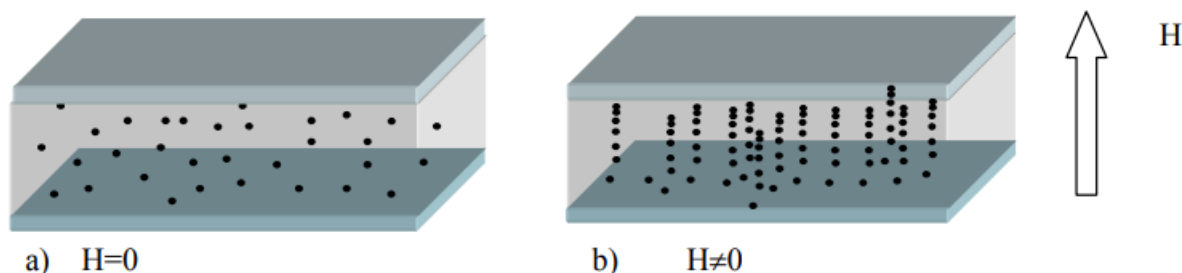
Dále se přidávají ještě látky, které mohou upravovat výsledné pH nebo antioxidační číslo MR kapaliny, za účelem prodloužení životnosti částic a zlepšení jejich odolnosti. [7]

#### Magnetoreologický efekt

V případě, kdy se MR kapalina nenachází uvnitř žádného indukovaného magnetického pole, jsou pevné částice volně rozptýleny v objemu, který MR kapalina zaujímá.

Jedná se o tzv. *neaktivní stav*.

Pokud však vytvoříme indukované magnetické pole, např. proudem procházejícím cívkou, začnou se částice spojovat do řetízků ve směru siločár magnetického pole, jak je vidět na obrázku 2.1. Tato situace se nazývá *aktivní stav*. Částice v řetízcích na sebe vzájemně působí silami, jejichž velikost závisí na velikosti indukovaného magnetického pole. MR kapalina se poté chová jako pevná látka až do doby, kdy je aplikovaným smykovým napětím překonána *mez kluzu* (mez tekutosti).



Obrázek 2.1: Rozložení železných částic a) bez působení a b) při působení vnějšího magnetického pole [3]

Největší nevýhodou MR kapaliny je sedimentace kovových částic. Ta se značně liší jak mezi výrobci, tak i mezi jednotlivými druhy produktů jednotlivých výrobců. [8] Na obrázku 2.2 můžeme vidět usazeninu v prototypovém tlumiči týmu TU Brno Racing, která

se vytvořila po dvou letech, kdy tlumič většinu času ležel v krabici. Další nevýhodou je degradace tlumicí síly s rostoucí teplotou kapaliny. K ohřívání kapaliny bude docházet vždy, jelikož MR tlumič jako každý jiný disipuje energii ve formě tepla. Tento problém se dá do jisté míry kompenzovat, jestliže jsme schopni snímat aktuální teplotu kapaliny a řídicí elektronika společně s konstrukcí cívky umožňuje využívat většího proudu pro vybudení většího indukovaného magnetického pole.



Obrázek 2.2: Sedimentace MR kapaliny

## 2.2 Konstrukce tlumičů

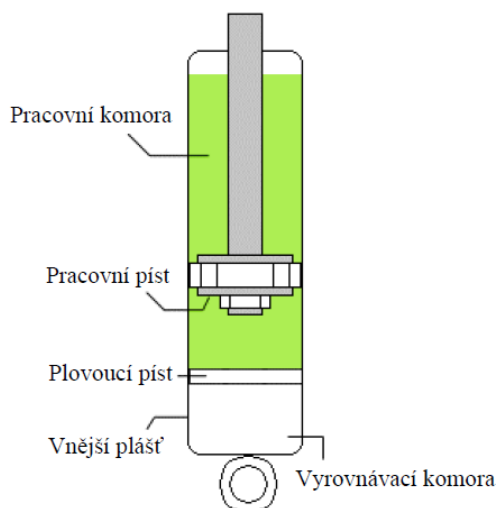
Následující část popisuje základní konstrukční provedení pasivních tlumičů a jejich MR derivátů.

### 2.2.1 Jednoplášťový pasivní tlumič

Jednoplášťový teleskopický tlumič je dnes typickou výbavou osobních vozidel. Tlumicí jednotka se skládá ze dvou komor (pracovní a vyrovnávací) a dvou pístů (pracovního a plovoucího). Vyrovnávací komora může být buď součástí těla tlumiče, nebo může být vyvedena mimo něj. Zároveň se tlakem ve vyrovnávací komoře dá mírně upravit hodnota tlumicí síly. Hlavní účel, proč je v komoře tlak, je předejití vzniku kavitace oleje. Ta má neblahý vliv na křivku tlumení a zároveň může poškodit funkční komponenty.

Jednoplášťové tlumiče mají díky většímu průměru pístu možnost dosáhnout vyšších tlumicích sil. Lépe odvádějí teplo, které se disipuje v kapalině a přes jeden plášť snáze přechází do okolí. Jednodušší konstrukce také znamená lehčí servisovatelnost.

Naopak vyšší hodnota tlaku v komoře, jež zapříčiňuje tlakové pulzace, má za následek nežádoucí zvýšení vnitřního tření těsnění. Pakliže umístíme vyrovnávací komoru do těla tlumiče, přichází s tím i nárůst rozměrů, které mohou v kritických zástavbových případech hrát velkou roli.



Obrázek 2.3: Řez jednoplášťovým teleskopickým tlumičem, převzato z [4]

### 2.2.2 Dvouplášťový pasivní tlumič

Nejpoužívanějším tlumičem v automobilním průmyslu je ovšem dvouplášťový plyno-kapalinový tlumič. Je složen ze dvou komor, vyrovnávacího ventilu a pístu s pístnicí. Typicky probíhá škrcení kapaliny v pracovním pístu a přepouštěcím ventilu, který spojuje pracovní a vyrovnávací komoru tlumiče. Pracovní komora je celá zaplněná kapalinou a pohybuje se v ní píst s pístnicí. Jelikož objem pístnice, která se nachází v pracovní komoře, se mění v závislosti na pohybu tlumiče, dochází ve vyrovnávací komoře ke stlačování nebo rozepínání plynu.

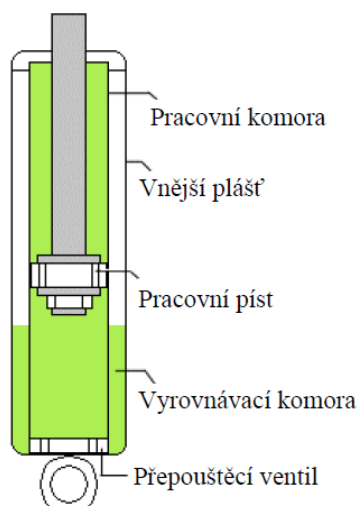
Objem plynu ve vyrovnávací komoře tedy musí být větší než je objem ponořené pístnice, aby nedošlo k poškození samotného tlumiče. Poněvadž se zde nachází rozhraní plynu a kapaliny, jsou obě skupenství v přímém kontaktu. Z tohoto důvodu není možné tlumič



provozovat v jakékoliv poloze, jelikož by mohlo dojít k zavzdušnění oblasti se škrťícím ventilem. Maximální doporučené naklonění od vertikální polohy se v odborné literatuře uvádí jako  $45^\circ$ .

Výhodami této konstrukce jsou menší zástavbové rozměry a pokud v případě poškození dojde k porušení vnějšího obalu, vnitřní plášť pracovní komory zůstává nedeformovaný.

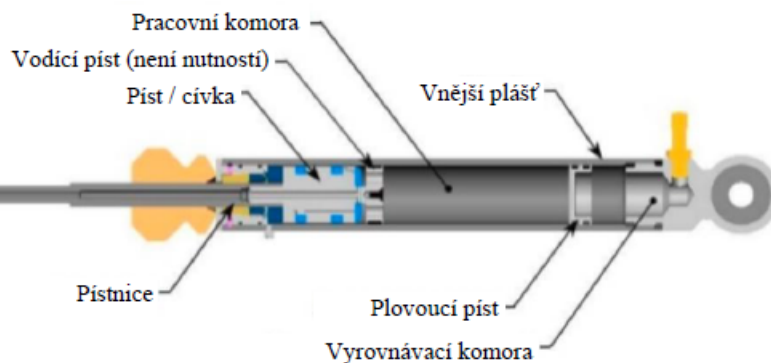
Nevýhodami je výše zmiňovaná podmínka pro uchycení a horší odvod tepla oproti jednoplášťové verzi. [4]



Obrázek 2.4: Řez dvouplášťovým teleskopickým tlumičem, převzato z [4]

### 2.2.3 Jednoplášťový MR tlumič

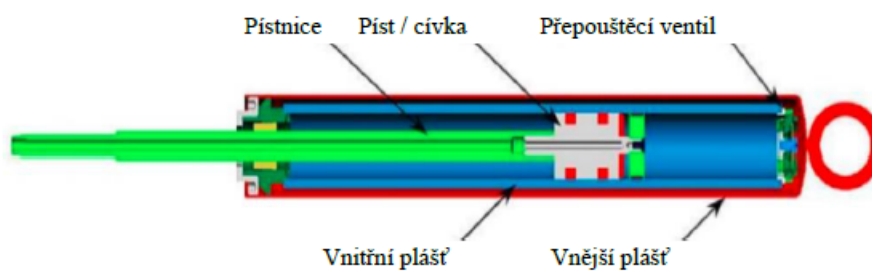
Jednoplášťový MR tlumič se od klasického pasivního jednoplášťového tlumiče liší tím, že součástí pístu je i cívka. Pakliže nejde o hybridní provedení (kombinuje MR kapalinu a hydraulický olej), je jeho konstrukce ještě jednodušší, jelikož zde není přítomen žádný složitý jednocestný ventil, který pasivním tlumičům umožňuje měnit jejich tlumicí charakteristiku. Nachází se zde pouze skupina kanálů o konstantním průřezu, díky kterým působí indukované magnetické pole cívky na MR kapalinu. Na pístu se mohou nacházet i obtokové kanálky, kde naopak magnetické pole na kapalinu nepůsobí a to způsobuje změnu tlumicí charakteristiky v oblasti před dosažením meze toku kapaliny. Stejně jako u klasických pasivních tlumičů můžeme i u MR tlumičů vidět vyrovnávací komoru vyvedenu do externí nádoby anebo, jak je tomu na obrázku 2.5, je součástí těla tlumiče. Pokud se jedná o provedení s oboustrannou pístnicí nemusí být vyrovnávací komora nutností, avšak stále je žádoucí mít dostatečně vysoký referenční tlak v tlumiči z důvodu zabránění vzniku možné kavitace. [4]



Obrázek 2.5: Jednoplášťový MR tlumič, převzato z [6]

#### 2.2.4 Dvouplášťový MR tlumič

S tímto provedením se setkáme jen ojediněle. Obyčejný pasivní dvouplášťový tlumič je limitován maximální tlumicí silou a zároveň hydraulickou nestabilitou, která je způsobena významným tlakovým poklesem za pracovním pístem v průběhu komprese. Obě tyto vlastnosti bohužel dědí i MR verze. [4]



Obrázek 2.6: Dvouplášťový MR tlumič, převzato z [6]

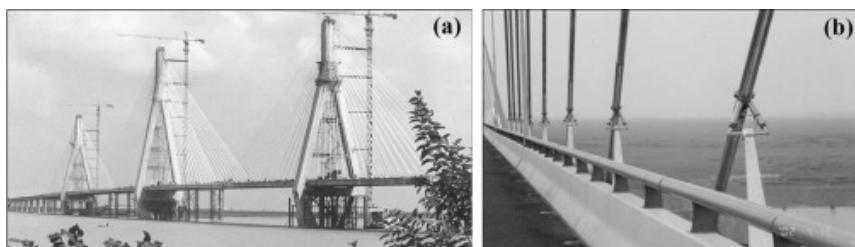
## 2.3 Použití MR tlumičů

V této kapitole je shrnuto, kde a proč se MR tlumiče používají.

### 2.3.1 Tlumení pozemních staveb

Hlavními důvody, proč jsou MR tlumiče využívány ve stavebním inženýrství, je jejich spolehlivost, nízká energetická náročnost, považují se za fail-save systém (i při nulovém budícím proudu stále fungují jako pasivní tlumič) a mohou kombinovat výhody aktivního i pasivního řízení, jenž se potom nazývá semi-aktivní řízení.

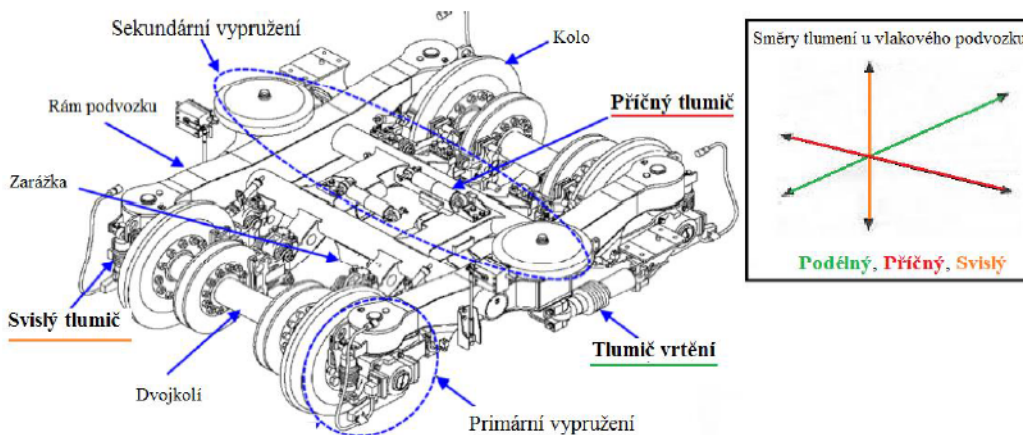
MR tlumiče se používají na tlumení strukturálních vibrací pozemních staveb, jenž způsobuje silný vítr a zemětřesení. Pánové Wang, Zhang a Yin [15] zkoumali účinek MR tlumičů při jejich použití ve vodní elektrárně, kde vibrace vznikají v přírodním potrubí. První stavbou, kde byly MR tlumiče použity, je most přes Dongting Lake (obrázek 2.7) v Číně v roce 2003. [12]



Obrázek 2.7: a) Dongting Lake Bridge b) konfigurace MR tlumičů, převzato z [12]

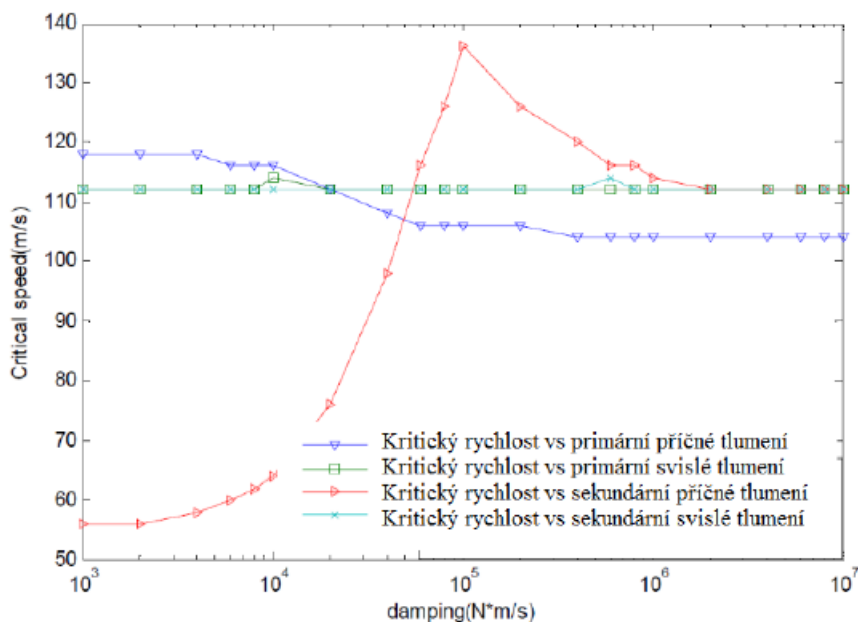
### 2.3.2 Kolejová vozidla

U osobních kolejových vozidel hraje velkou roli tzv. kritická rychlost. Je to rychlost, při které hrozí nebezpečí vykolejení soustavy z důvodu příliš velkých příčných oscilací (vrtění soupravy). Na hodnotu této rychlosti má největší vliv sekundární příčné tlumení, jednotlivé vlivy jsou vidět na obrázku 2.9. Zároveň je kritická rychlost ovlivněna i pozicí vozu v soupravě a také tím, zda je souprava tažena či tlačena.



Obrázek 2.8: Schéma bezkolébkového podvozku vysokorychlostního kolejového vozidla [9]

Při použití pasivních tlumičů vrtění se jejich tlumicí charakteristika volí jako kompromis mezi potřebami tlumení pro jízdu po přímé trati vysokou rychlostí (stabilita) a



Obrázek 2.9: Ovlivnění kritické rychlosti při navýšení tlumení v dané části [9]

pro průjezd zatáčkou (opotřebení kolejí i podvozku). K uspokojení obou požadavků je proto nutné použít tlumiče s možností nastavení tlumicí charakteristiky v reálném čase. Ideálním řešením, které se nabízí, jsou MR tlumiče. Návrhem jejich konstrukce se dá zajistit minimální tlumicí síla, která bude i při selhání aktivního řízení zajišťovat bezpečný provoz kolejového vozidla a při správném aktivním řízení zmenšovat opotřebení kolejí a podvozku a zajišťovat lepší stabilitu soupravy při vyšších rychlostech. Zároveň může být tlumicí síla různá pro každou samostatnou nápravu v závislosti na pozici vozu v soupravě. [9]

### 2.3.3 Automobily

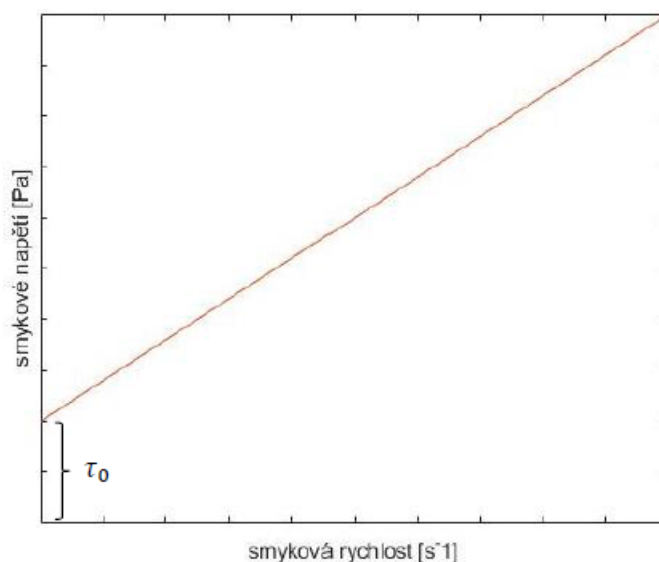
U automobilů se liší cíle v oblasti tlumení podle toho, zda se jedná o závodní monopost, kde je cílem, aby byla pneumatika neustále zatížena ideální vertikální silou, nebo jde o osobní automobil, ve kterém hraje prim komfort posádky. Při použití pasivních tlumičů jde v obou případech o hledání optimálního nastavení a dělání kompromisů mezi pohodlím a bezpečností v případě osobních aut. [17]

Jednou z možností, jak dosáhnout co nejlepších výsledků, je použití aktivního systému odpružení, ten dokáže měnit jak charakteristiky pružiny, tak i tlumiče. Nevýhodou je však velká energetická náročnost. U systému vyvinutého společností Lotus je to až 10 kW [27].

Semi-aktivní systémy jsou levnější a méně energeticky náročné než systémy aktivní, z tohoto důvodu jsou mezi výrobci automobilů používané častěji. Tyto systémy mění tlumicí charakteristiku ve většině případů dvěma způsoby. Buď změnou viskozity kapaliny v tlumiči nebo přivíráním ventilů. Energetická náročnost se zde pohybuje v nízkých desítkách wattů. Do této kategorie patří právě MR tlumiče. [18]

## 2.4 Modelování MR tlumičů

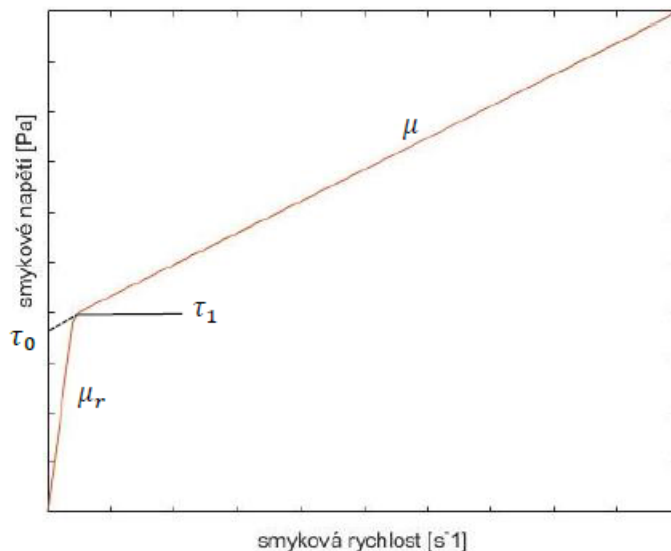
Pro popis MR kapaliny se využívají různé modely v závislosti na přesnosti. Nejjednodušší je model Binghamovy Newtonské kapaliny, obrázek 2.10. Tento model předpokládá, že mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí je lineární závislost, kterou popisuje dynamická viskozita  $\mu$  a jenž má počátek v nenulové hodnotě  $\tau_0$ , také nazývána jako mez toku kapaliny. Dá se tedy říct, že Binghamova Newtonská kapalina se může nacházet pouze ve



Obrázek 2.10: Binghamova Newtonská kapalina [5]

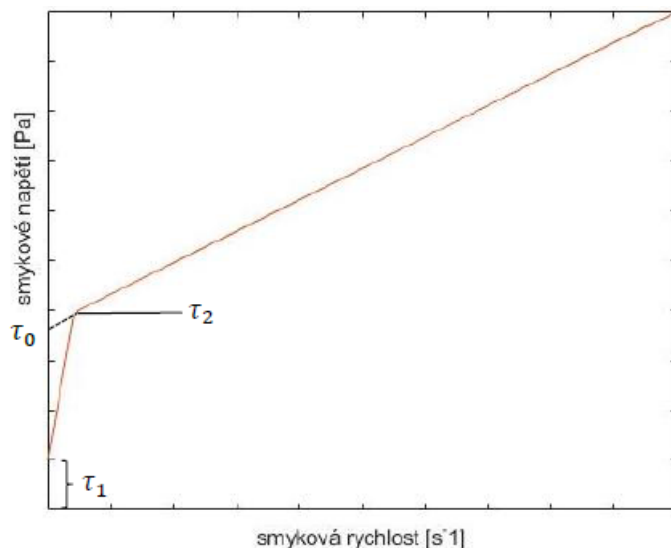
dvou stavech. První stav, kdy se kapalina chová jako pevná látka, nastává, pokud na kapalinu nepůsobí větší smykové napětí, než které odpovídá mezi toku  $\tau_0$ . Při překonání této hodnoty je kapalina v druhém stavu, kdy se její vlastnosti podobají Newtonské kapalině. [5]

Dalším modelem používaným pro popis MR kapaliny je bi-viskózní model, obrázek 2.11. Ten na rozdíl od předchozího modelu popisuje chování kapaliny ve fázi, kdy ještě nedošlo k překonání statické meze toku  $\tau_1$ , lineární závislostí, jenž se nazývá předsmyková viskozita  $\mu_r$ . Po překonání statické meze toku  $\tau_1$  je znovu pro popis lineární závislosti smykového napětí na smykové rychlosti uvažována dynamická viskozita  $\mu$ . [25]



Obrázek 2.11: Bi - viskózní charakteristika [25]

Poslední model, který zde uvedu, se nazývá bi-plastická Binghamova kapalina 2.12. Tento model v sobě spojuje oba výše jmenované. Pakliže není v kapalině dosaženo smykového napětí o hodnotě  $\tau_1$ , uvažuje kapalinu jako pevnou látku. Pokud se smykové napětí pohybuje v rozmezí hodnot  $\tau_1$  a  $\tau_2$  je lineární závislost popsána hodnotou předsmykového napětí  $\mu_r$ . V poslední oblasti, kdy je smykové napětí větší než hodnota  $\tau_2$ , vyjadřuje hodnotu lineární závislosti dynamická viskozita  $\mu$ . [26]

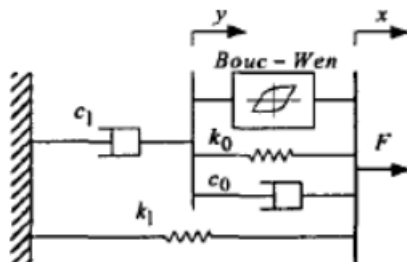


Obrázek 2.12: Bi - plastická Binghamova charakteristika, [26]

### Dynamický model

K výše zmíněné nelinearitě MR kapaliny se ještě přidává hystereze, která je nedílnou součástí spousty dalších fyzikálních soustav. Pro zachycení této vlastnosti se využívá Bouc-Wenův hysterezní model. Nejpoužívanější model MR tlumiče je Bouc-Wenův hysterezní model upravený Spencer et al, který je vidět na obrázku 2.13. [11]. Parametry tohoto modelu se odhadují na základě zkušeností nebo v porovnání s reálným systémem. Tento

model dále různí autoři upravují podle svých potřeb a problémů, které zrovna řeší. Například Weber [13] do tohoto modelu přidal ještě Stribeckův efekt (popisuje přechod mezi statickým třením a Coulombovým). ElSinawi, Jhmei a AlHamaydeh tento model pomocí MATLAB System Identification toolbox zjednodušili na nelineární auto-regresivní model osmého řádu, který dále využili pro návrh řízení. Tento model se z 93 % shodoval s naměřenými daty. [14] Pánové Chang a Roschke [19] navrhli neparametrický model pomocí



Obrázek 2.13: Modifikovaný Bouc-Wenův model MR tlumiče [14]

neuronové sítě. Použili dopřednou neuronovou síť, kde učení a predikce závisí na všech vstupních a výstupních informacích o MR tlumiči. [10]

## 2.5 Metody řízení

V celém systému skládajícím se z MR tlumičů a řídicí elektroniky nejprve řídicí algoritmus určí požadovaný proud, který se následně snaží řídicí elektronika regulovat. Níže je popsán nejběžnější způsob řízení takového systému a regulátor nejčastěji používaný k regulaci požadovaného proudu.

### 2.5.1 Fuzzy řízení

Fuzzy řízení patří do tzv. **měkkého programování**. To se na rozdíl od tvrdého programování, kde musejí být jak vstupy, tak výstupy pevně definované, podobá více rozhodování lidského mozku. Hlavními výhodami měkkého programování jsou možnosti zpracování nepřesností, nejistoty a neúplně platných údajů.

Princip fuzzy řízení spočívá v tom, že pro každou ostrou vstupní hodnotu fuzzy regulátor určí její příslušnost k jedné nebo více předem definovaných lingvistických proměnných (fuzzy množin), jež se skládají z lingvistických hodnot označované jako termy. Příklad:

Lingvistická proměnná	teplota
Lingvistické hodnoty - termy	záporná, nulová, kladná

Tento proces se označuje jako **fuzzyfikace**. Poté následuje vyhodnocení rozhodovacích pravidel, která jsou formulována jako implikace:

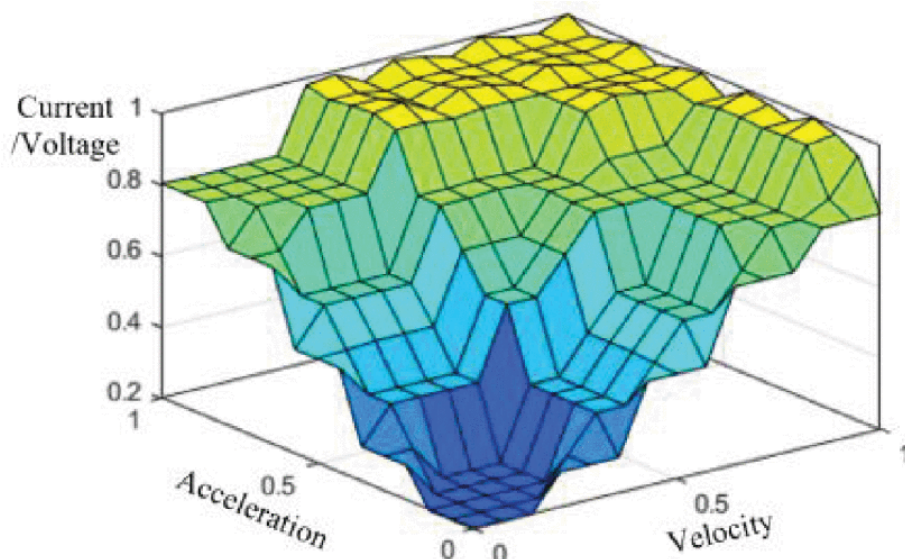
JESTLIŽE <fuzzy výrok>, PAK <fuzzy výrok>

Výstupem tohoto procesu je získání souboru funkcí příslušnosti pro jednotlivé hodnoty výstupních lingvistických proměnných. Nakonec přichází proces **defuzzyfikace**. Existují různé metody defuzzyfikace. Všechny dělají to samé – neostrým lingvistickým termům přiřazují ostrou hodnotu akční veličiny.

Důvodem, proč se fuzzy regulátory používají pro řízení MR tlumičů, je jejich schopnost zvládat řídit nelineární systémy, jímž MR tlumič je. Ačkoliv se vždy nedá vyhodnotit stabilita systému řízeného fuzzy regulátorem, v tomto případě to nevádí, jelikož MR tlumiče jsou fail-save, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3. [16]

Na obrázku 2.14 můžeme vidět výslednou plochu fuzzy pravidel na množině vstupů rychlosti a zrychlení (lingvistické proměnné) tlumeného objektu vůči referenci. Lingvistické termy byly zvoleny jako NL = Negativ Large, NS = Negativ Small, ZO = Zero, PS = Positive Small a PL = Positive Large. Jak vstupní, tak výstupní hodnoty byly normované, pro to jsou osy grafu v rozsahu 0 až 1. [15]





Obrázek 2.14: Plocha fuzzy pravidel [15]

### 2.5.2 PI-regulátor

Jak již bylo zmíněno výše, součástí systému MR tlumičů by měl být zpětnovazební proudový regulátor. Ten zajišťuje, že do cívky v tlumiči 2.2.3, teče požadovaný proud udaný řídicím algoritmem. Nejjednodušším řešením je použití PI-regulátoru. Samotný proporční regulátor nestačí, jelikož umí pracovat pouze s nenulovou regulační odchylkou, což v této aplikaci nechceme. [21]

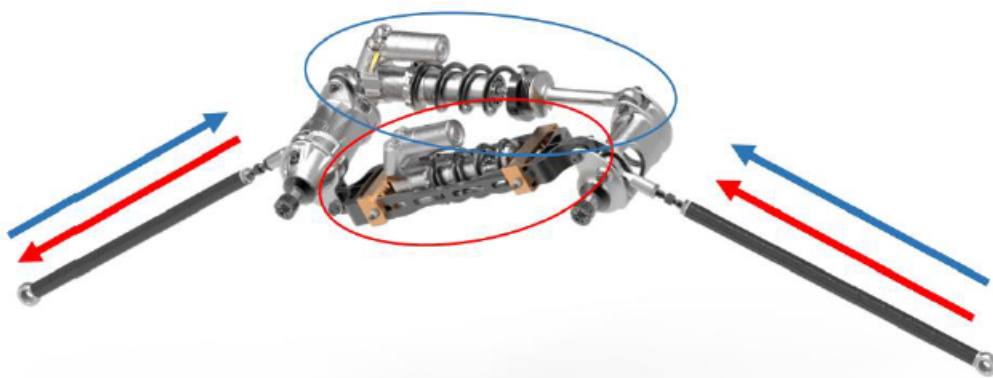
## 2.6 Formula student

Soutěž Formula Student je mezinárodní projekt, kterého se mohou účastnit studenti bakalářského a magisterského studia vysokých škol. Úkolem je navrhnout a vyrobit závodní monopost, přičemž nestačí být pouze nejrychlejší, týmy musí mít celkově dobré výsledky z oblastí konstrukčního návrhu, výkonnosti monopostu v porovnání s ostatními týmy a ekonomické stránky návrhu. Součástí soutěže je totiž vytvořit fiktivní prodejní plán pro výrobu 1000 kusů takovýchto vozů ročně. [23]

Na závody se jednotlivé týmy mohou přihlásit ve třech různých kategoriích. Jedná se o spalovací vozy, elektrické vozy a driverless monoposty. Přičemž nejprestižnější závod Formula Student Germany již nemá spalovací kategorii a aby mohl tým pomýšlet na nejvyšší příčky, musí se zúčastnit i kategorie driverless. Němečtí pořadatelé tím tak sledují trend a vývoj dnešních automobilů v oblasti elektrických a autonomních vozů.

### Tým TU Brno Racing

Tým TU Brno Racing se soutěže Formula Student účastní od roku 2010. Za tuto dobu postavil 10 spalovacích monopostů a jeden elektrický. Tuto sezónu (2021/2020) probíhá stavba druhé generace elektrické formule. Tým se od 9. generace spalovacího monopostu drží konceptu *roll-heave* odpružení, který je vidět na obrázku 2.15. Na každou nápravu

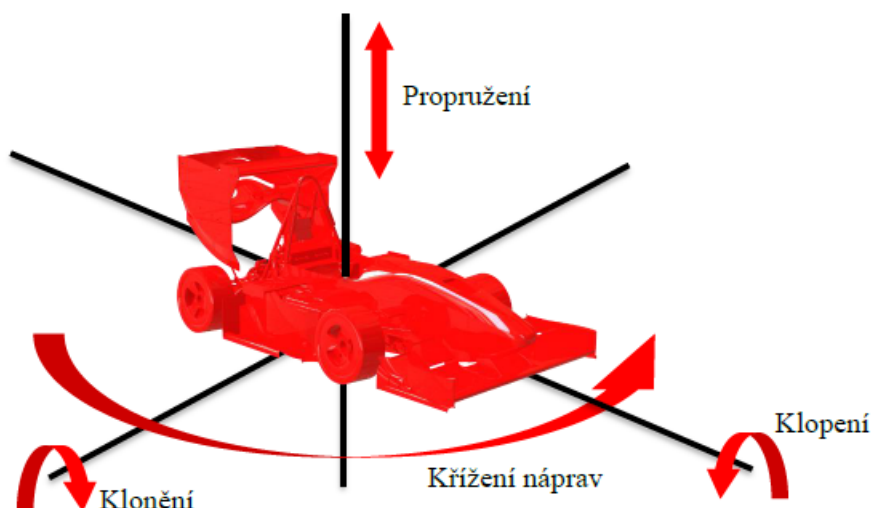


Obrázek 2.15: Roll-heave systém používaný týmem TUBrnoRacing, převzato z [4]

připadají dva tlumiče. Jeden (heave-ový) pro ovlivnění jízdních vlastností při jízdě po rovině (pohyby karoserie klonění a propružení) a druhý (roll-ový) při jízdě v zatáčkách (pohyb karoserie klopení). Jednotlivé pohyby karoserie jsou vidět na obrázku 2.16. [28]

V týmu byl vyvinut a vyroben první prototypový jednopláškový MR tlumič v roce 2019, na něm se provedla validace simulací magnetického obvodu a F-v charakteristiky. Tento tlumič byl však přizpůsobený konvenčnímu uspořádání tlumičů, kdy na každé kolo připadá jeden. Další návrh už počítal s použitím systému roll-heave a zároveň s požadavkem na zaměnitelnost se standardními pasivními tlumiči Ohlins TTX25 FSAE. Z těchto důvodů byla vyrovnávací komora vyvedena do externí nádoby. Dále byly odstraněny obtokové kanálky z pístu. Byla změněna izolace vývodů cívky v oblasti přechodu mezi pístem a pístnicí. Také bylo použito na zakázku zhotovené těsnění namísto standardního hydraulického, které snížilo velikost Coulombova tření o 60,3 %, jelikož jeho původní hodnota byla poměrně velká.

S těmito úpravami, které jsou podrobněji popsány v [4], byly vyrobeny dva heavové



Obrázek 2.16: Pohyby karoserie, převzato z [4]

tlumiče (přední a zadní mají každý jiný rozměr, rollové jsou stejné). Znovu byly změněny F-v charakteristiky pro validaci konstrukčních změn. Následně byl vytvořen řídicí algoritmus pro adaptivní tlumení v prostředí MATLAB Simulink, který byl testován v MultiBodySoftware (MBS) programu MSC ADAMS. V týmu vzniknul i první návrh schématu řídicí elektroniky MR tlumičů.

# 3 Postup a výsledky řešení

## 3.1 Požadavky na řešení

### 3.1.1 Spalovací formule student

Spalovací monoposty Dragon 1–X měly 12V nízkonapěťový systém (angl. low voltage system – LVS, podle pravidel soutěže jsou jako LVS klasifikovány elektrická spojení, mezi kterými se může objevit napětí 60 V DC nebo 25 V AC RMS viz [29]). Systém se skládal z  $LiFePO_4$  baterie, kterou dobíjel alternátor. Většina signálů ze senzorů šla přímo do dataloggeru Omega L2 nebo do řídicí jednotky LifeRacing F88. Ty je poté do dalších jednotek posílaly prostřednictvím sběrnice CAN.

Požadavky na řídicí desku, které vyplynuly z výše zmíněných faktů, byly následující:

- musí zvládat být napájena z 12 až 14 V
- má být schopna přijímat data ze sběrnice CAN
- musí zvládat regulovat proudový výstup
- má měřit teploty MR kapaliny jednotlivých tlumičů

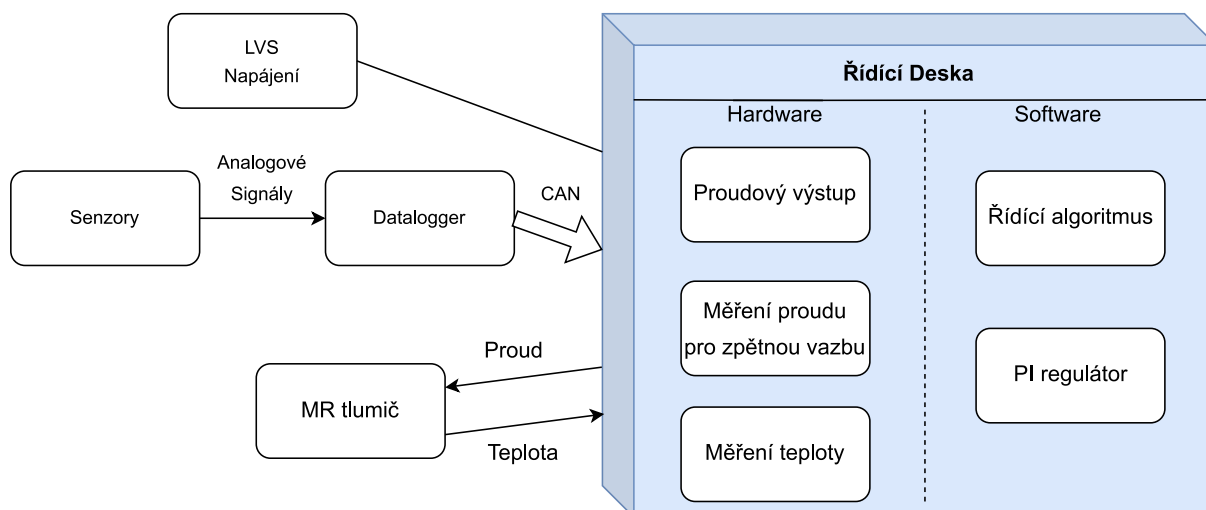
Verze této desky měla být otestována pouze s použitím heavových tlumičů na autě, jelikož rollové doposud nebyly vyrobeny.

### 3.1.2 Elektrická formule student

Elektrické formule, počínaje Dragonem e1, mají 24V LVS. Všechny požadavky kromě napájecího napětí byly stejné ze spalovací verze. Dále se k nim ze zástavbových důvodů přidal požadavek na zmenšení a rozdělení řídicí desky pro přední a zadní nápravu zvlášť.

#### Shrnutí

Celé funkční schéma je na obrázku 3.1. řídicí deska je napájena z LVS auta, napájecí napětí je různé v závislosti, jestli se jedná o spalovací nebo elektrický monopost. Analogové signály ze senzorů na autě zaznamenává datalogger Omega L2 se vzorkovací frekvencí 100 Hz. Tato data následně pošle přes sběrnici CAN. Implementovaný řídicí algoritmus z nich dále vyhodnotí požadovanou hodnotu proudu. Číslicový PI regulátor určí hodnotu střídavy v závislosti na změřeném skutečném proudu tekoucím do tlumiče. Na řídicí desce se zároveň měří i teplota MR kapaliny v tlumiči pro korekci požadovaného proudu, jelikož vlivem rostoucí teploty dochází k degradaci tlumicí síly, jak bylo zmíněno v kapitole 2.1.



Obrázek 3.1: Funkční schéma základních bloků systému

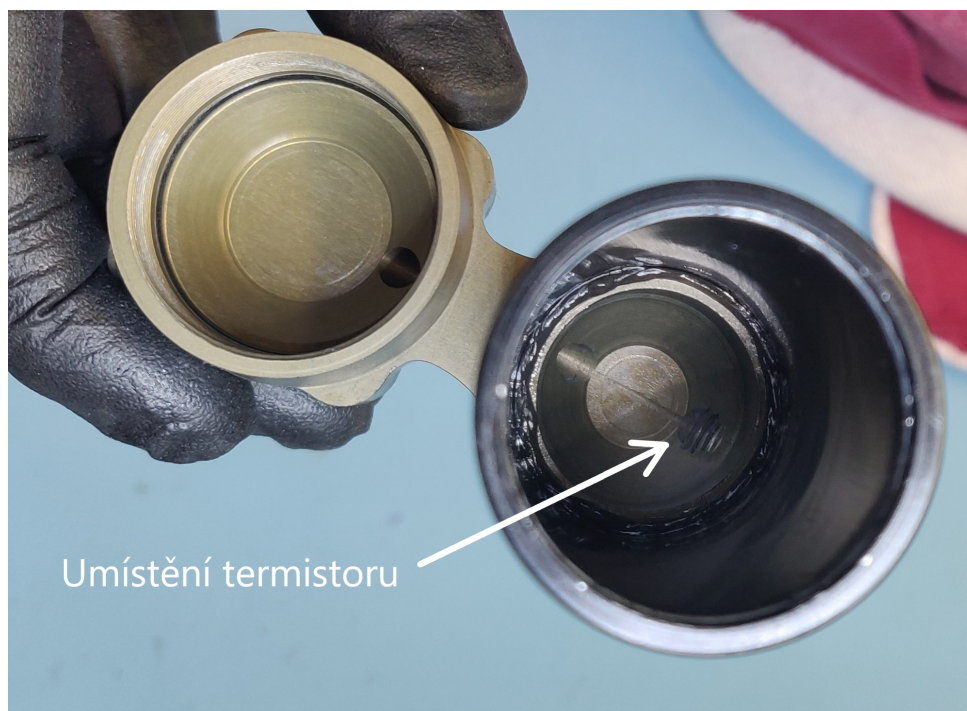
## 3.2 První řídicí deska

V týmu bylo navrženo schéma řídicí desky. To bylo upraveno podle nových standardů, které v týmu zavedla nově vzniklá sekce *Electric Powertrain*, jež se starala o vývoj prvního elektrického monopostu Dragon e1.

Provedené úpravy:

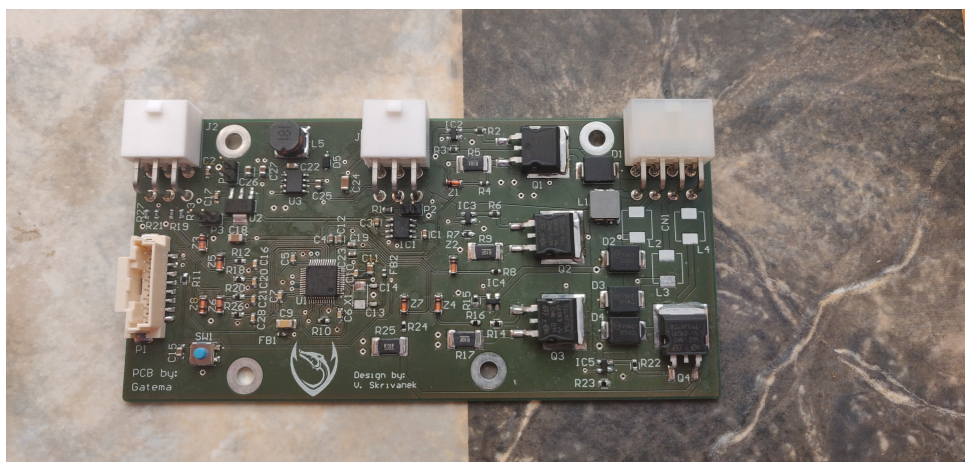
- Pomocí nástroje WEBENCH Power Designer [20] byl navržen spínaný 5V zdroj s čipem LM22674MR od firmy Texas Instruments. Z tohoto zdroje jsou napájeny termistory v MR tlumičích a lineární regulátor LM1117 v 3.3 V verzi, který dále stabilizuje napětí pro mikrokontrolér (MCU).
- Původní MCU STM32F469NI v pouzdře LQFP208 bylo z důvodů velkého počtu nevyužitých pinů a předimenzovanosti výpočetního výkonu změněno na STM32F103CB v pouzdře LQFP48 (16krát menší).
- Připojení přes USB bylo nahrazeno programovacím konektorem pro připojení programátoru ST-Link.
- Z původního návrhu tedy byly zachovány proudové výstupy a měření teploty MR kapaliny. Měření teploty se provádí na odporu v sérii s termistorem, který je umístěn ve šroubu, jenž slouží zároveň jako vypouštěcí otvor. Umístění termistoru je vidět na obrázku 3.2.





Obrázek 3.2: Umístění termistoru

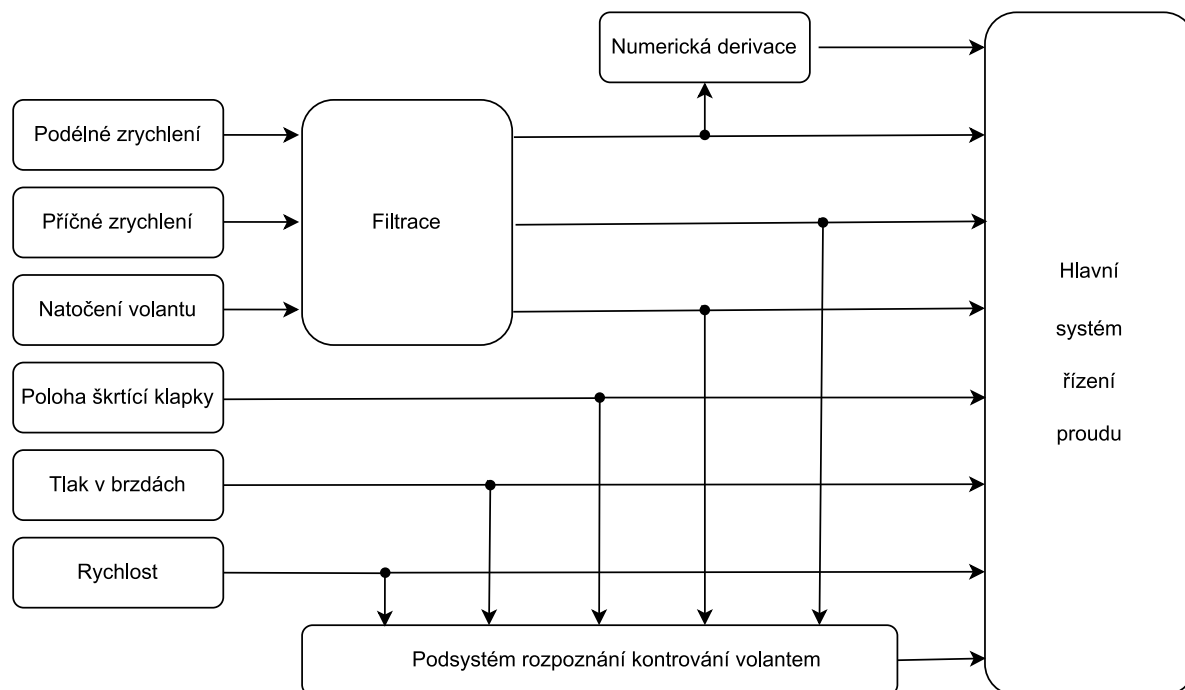
Proudový výstup je řešen podobně jako impulzní transformátor (viz [2]). MR tlumič jakožto cívka je jedním koncem připojen na zdroj napětí a druhý konec se pomocí spínacího tranzistoru typu MOSFET připojuje na zem. K cínce je antiparalelně připojena dioda, která zajišťuje vyproudění ve chvíli, kdy je spínací tranzistor zavřen. Za tranzistorem je v sérii ještě bočníkový odpor pro snímání proudu kvůli zpětnovazební regulaci. Takto navržená deska byla vyrobena a osazena, jak je vidět na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Osazená první deska

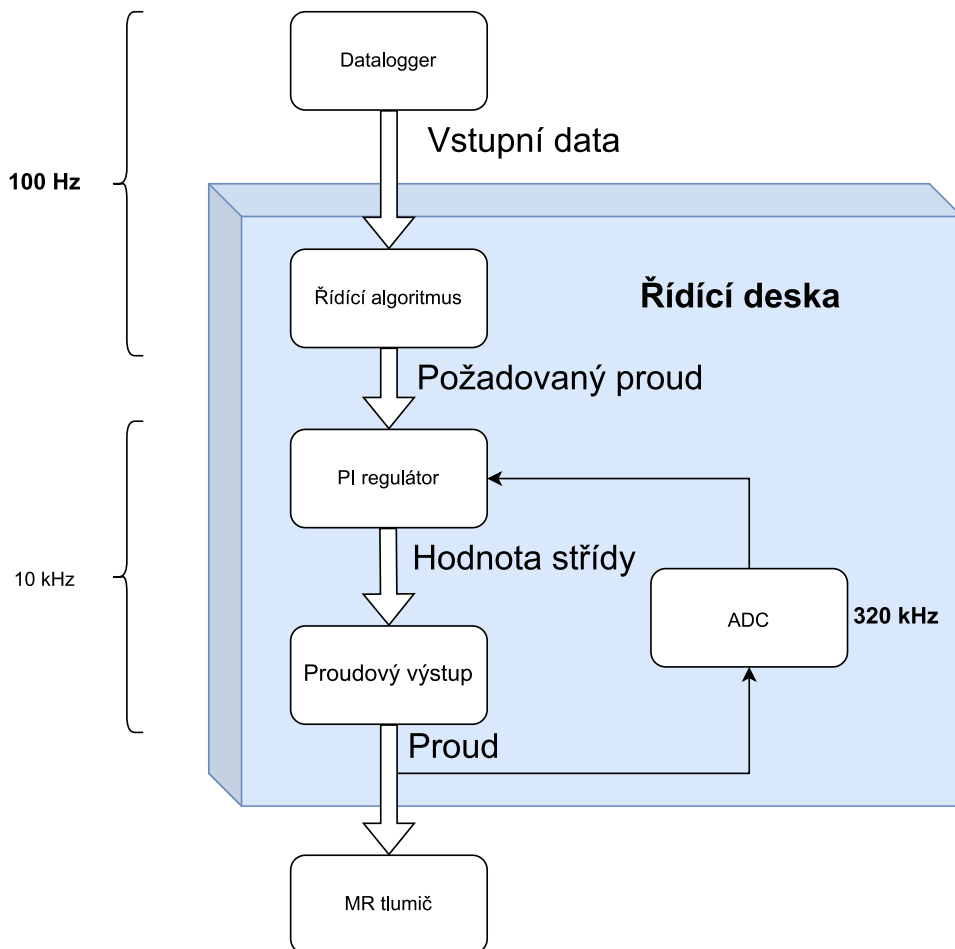
Zmiňovaný řídicí algoritmus pro řízení proudu do předního heavového tlumiče má jako vstupní proměnné hodnoty podélného zrychlení, jeho derivace, příčného zrychlení, natočení volantu, polohy škrtkové klapky, tlaku v brzdách a aktuální rychlost. Součástí algoritmu je také logika pro rozpoznání kontrovaní volantem. Všechny tyto hodnoty následně vstupují do funkce, jejímž výstupem je požadovaná hodnota proudu. Algoritmus je tedy statický, jelikož jeho výstupní hodnota závisí pouze na aktuálních vstupech a není nijak

ovlivněna předchozími vstupy (až na numerickou derivaci, kdy je potřeba znát předchozí hodnotu derivované veličiny). Toto bylo společně s logikou pro rozpoznání kontrovaní volantem a zpracováním dat ze sběrnice CAN implementováno v programovacím jazyce C do MCU. Diagram řídicího algoritmu je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Diagram řídicího algoritmu pro přední heavový tlumič

Pro zpětnovazební regulaci proudu byla využita a odladěna volně dostupná struktura PID regulátoru, vytvořená Philipem Salmonym [24], ze které byly využity pouze složky P a I. Struktura kódu s frekvenčním taktem jednotlivých úkonů je vidět na obrázku 3.5. Jelikož průběh proudu tlumičem v rámci jedné periody PWM není ani po částech lineární, jak je vidět na obrázku 3.20, nedá se pro určení střední hodnoty proudu použít pouze jedno měření v polovině střídy, jak se to dělá u měničů. Z tohoto důvodu byla pro měření využita periferie DMA (Direct Memory Access), která umožňuje provádět měření na vysoké vzorkovací frekvenci, jelikož A/D převodník (ADC) nemusí obsluhovat samotný procesor. Frekvence měření byla zvolena 320 kHz, protože při frekvenci PWM 10 kHz to dělá 32 hodnot, ze kterých se poté jednoduše bitovým posuvem (dělení mocninami 2) dá získat střední (průměrná) hodnota proudu.



Obrázek 3.5: Vývojový diagram

### 3.2.1 Zjištěné hardwarové nedostatky

V průběhu testování dvakrát odešel integrovaný čip LM22674MR. Pokaždé byl vyměněn, ale po pár dnech se problém opakoval. Na vině byl nejspíše špatný návrh. Z důvodu možnosti testování a hledání dalších chyb byl tento zdroj přemostěn externím modulem.

Původní bočníkový odpor o velikosti  $100\text{ m}\Omega$  se ukázal být jako nevyhovující. Jednak jeho umístění za spínacím tranzistorem, aby byl připojen jedním koncem ke stejné zemi jako ADC a mohl se tak na něm přímo měřit úbytek napětí, umožňovalo měřit proud pouze po dobu sepnutí tranzistoru. To by při malé střídě bylo nedostačující. Jednak využíval jen velmi malou část rozsahu 12-ti bitového ADC, takže získané hodnoty byly velmi ovlivněné šumem. Z těchto důvodů byl nahrazen Halloovým senzorem připojeným na volný pin místo měření teploty.

Zároveň se rozlišení pulzně šířkové modulace (PWM) jevílo jako malé. Se stávajícím MCU (STM32F103) při maximální frekvenci taktu (72 MHz) a frekvenci PWM 10 kHz připadalo na maximální požadovaný proud 2 A pouhých 1200 hodnot časovače. Pokud by se frekvence PWM měla ještě zvýšit, toto rozlišení by se zmenšilo.

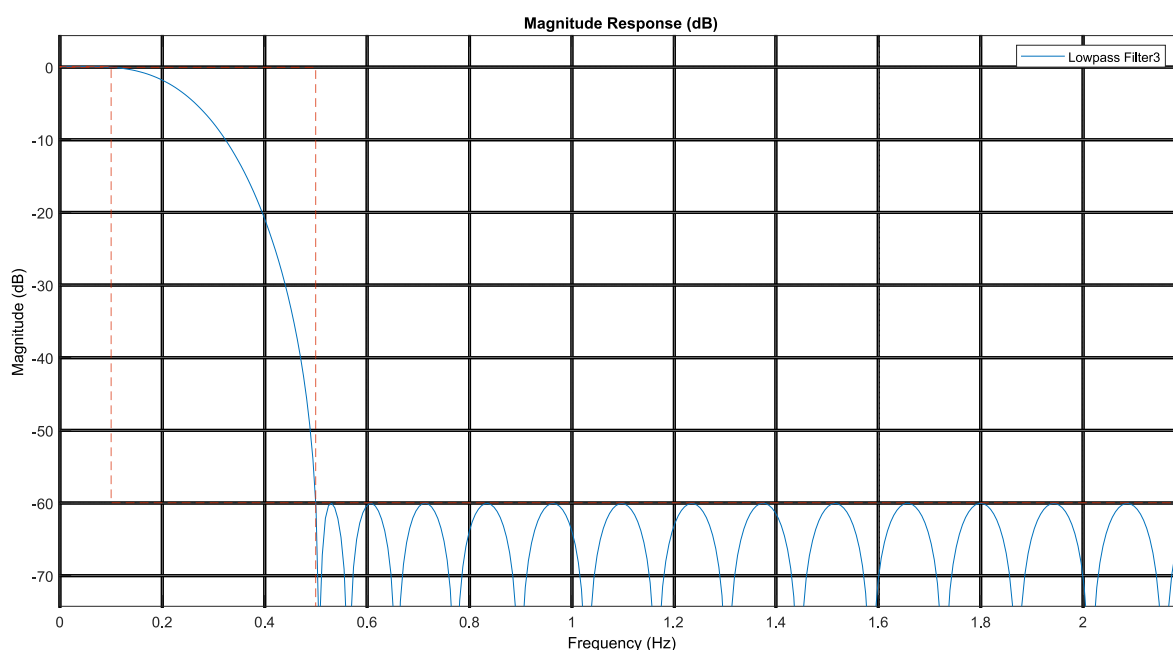
### 3.2.2 Zjištěné softwarové nedostatky

V původní práci [4] je zmíněno, že je nutné vstupní data filtrovat. Softwarová filtrace je však zavržena z důvodu velkého dopravního zpoždění. Je zde provedena transformace záznamu z tratě do amplitudo-frekvenční závislosti a zjištěno, jaké frekvence se mají



vyfiltrovat pomocí hardwarových analogových pasivních filtrů, které se mají umístit před datalogger, aby ten už zaznamenával vyfiltrovaná data. Ta už by poté nebylo nutné dále filtrovat.

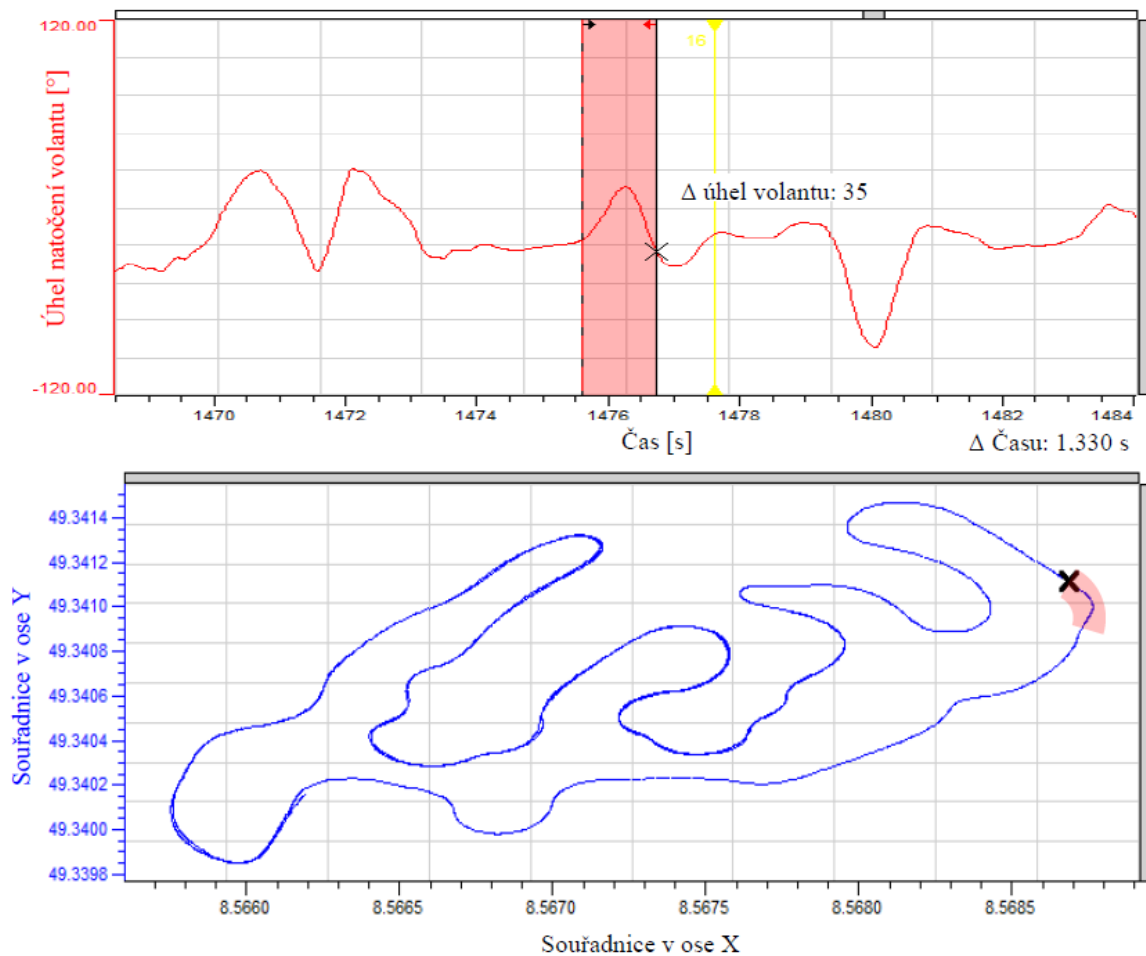
Vývoj a odladění algoritmu však probíhalo v prostředí MATLAB Simulink, kde byly signály filtrovány pomocí bločku Lowpass filter. Tam byly nastaveny hodnoty propustného pásma na 0.1 Hz a nepropustné pásmo už na 0.5 Hz při minimálním požadovaném utlumení 60 dB. Simulink daný filtr vytvořil jako FIR filtry pracující s 350 vzorky (při zaškrtnuté možnosti vytvoření filtru s nejmenším možným počtem vzorků). Toto ovšem znamená na vzorkovací frekvenci 100 Hz dopravní zpoždění 3.5 s. Jeho frekvenční odezva je vidět na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Amplitudová odezva filtru

Z tohoto obrázku je zřejmé, že vytvořit takovýto nebo jakkoliv podobný filtr analogově pomocí pasivních součástek nemá smysl. Filtr by musel být osmého řádu a skládat se z RC kombinace např.  $C = 10\mu\text{F}$  a  $R = 500\text{ k}\Omega$ , která by každá musela být impedančně oddělena sledovači. Řádově větší hodnota kondenzátoru nepřipadá v úvahu, jelikož by se muselo jednat o elektrolytický kondenzátor. Elektrolytické kondenzátory však mají velké tolerance své kapacity a velké svodové proudy. Vzhledem k velikosti odporu jímž potečou proudy v řádech  $\mu\text{A}$ . Takový signál je velice náchylný k zarušení. Tantalové kondenzátory se již dají běžně pořídit s tolerancí 10 %.

Navíc jsou zvolené hodnoty pásem nesmyslné. V práci [4] je uveden záznam z průjezdu trati FSG 2019, kdy průjezd cílovou zatáčkou trvá 1.3 s (obrázek 3.7). Pro vzorkovací frekvenci 100 Hz to dělá 130 vzorků dat, což by mohlo být pro dynamický popis zatáčky dostačující. Avšak při použití tohoto filtru, který má dopravní zpoždění 3.5 s a má pro-



Obrázek 3.7: Záznam z trati FSG 2019, časový detail průjezdu cílovou zatáčkou [4]

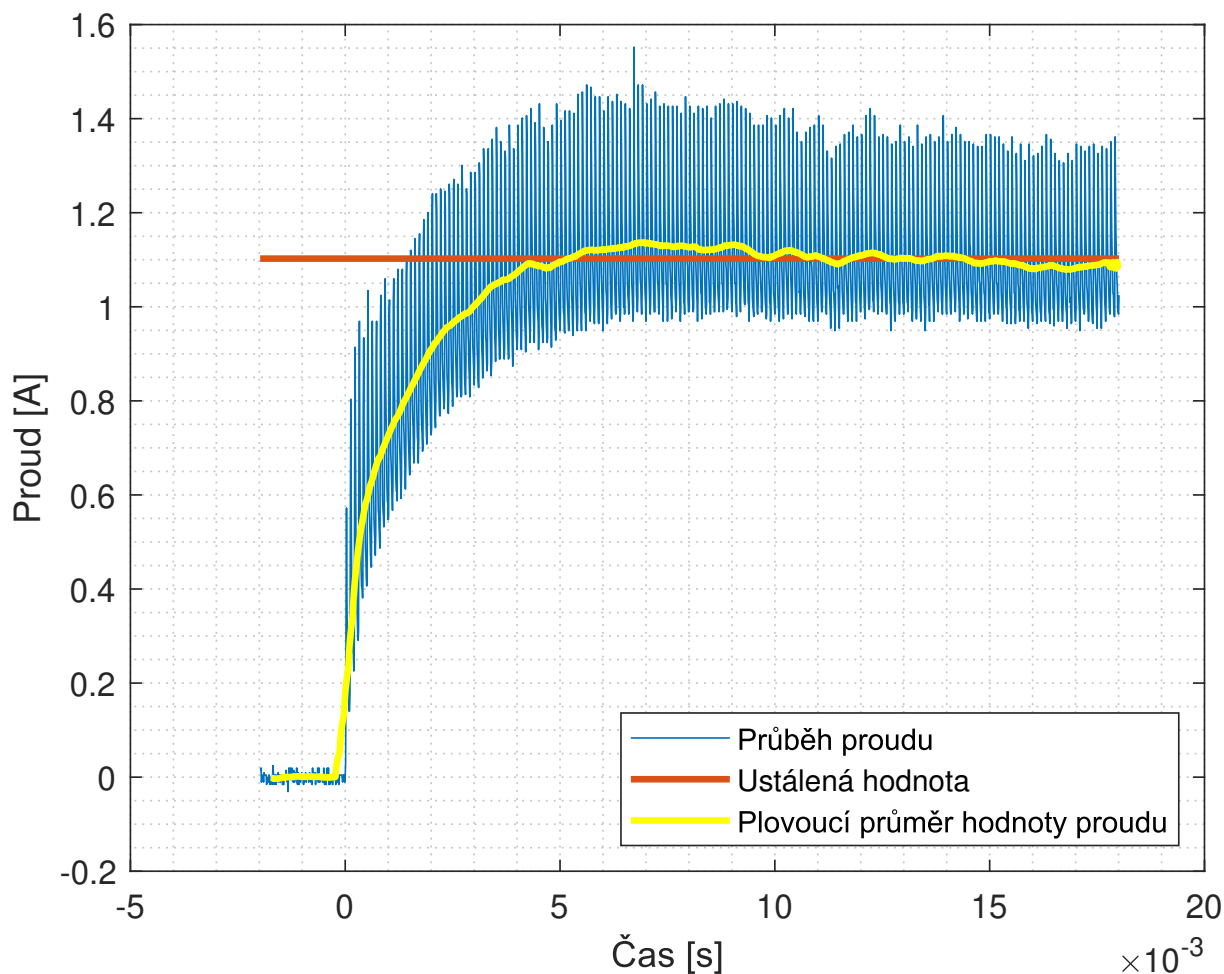
pustit frekvence 0.1 Hz a zadržet vibrace o frekvenci vyšší než 0.5 Hz, to znamená, že danou zatáčku prakticky v reálném čase neukáže. Zároveň se při prvních pokusech na reálných datech ukázalo, že největší vliv na výslednou hodnotu žádaného proudu má hodnota derivace zrychlení. Tu však algoritmus provádí numericky, což je velice nebezpečné a nedoporučované. Další testování implementace algoritmu tedy bylo prováděno na datech vyfiltrovaných původními filtry použitými v simulaci. Při novém návrhu algoritmu by tedy chtělo už přímo pracovat s takovými filtry, jež se používají v aplikacích v reálném čase. Dále by bylo vhodné vyvarovat se velké závislosti výstupní hodnoty na numerické derivaci.

### 3.2.3 Ověření proudové regulace

Požadavek na rychlost regulace bývá udán vzorkovací frekvencí vstupních dat. Je vhodné, aby se požadované hodnoty proudu dosáhlo před její další změnou. Při vzorkovací frekvenci 100 Hz je perioda 10 ms, z tohoto pohledu je přiměřená doba dosáhnouti požadované hodnoty přibližně 5 ms. V práci *Magnetoreologický tlumič s krátkou časovou odezvou pro podvozek kolejového vozidla* [9] je uvedeno, že 63 % požadované hodnoty proudu se u MR tlumičů pro rychlostní vlaky dosahuje za 4 ms pro zabránění vrtění na 8 Hz.

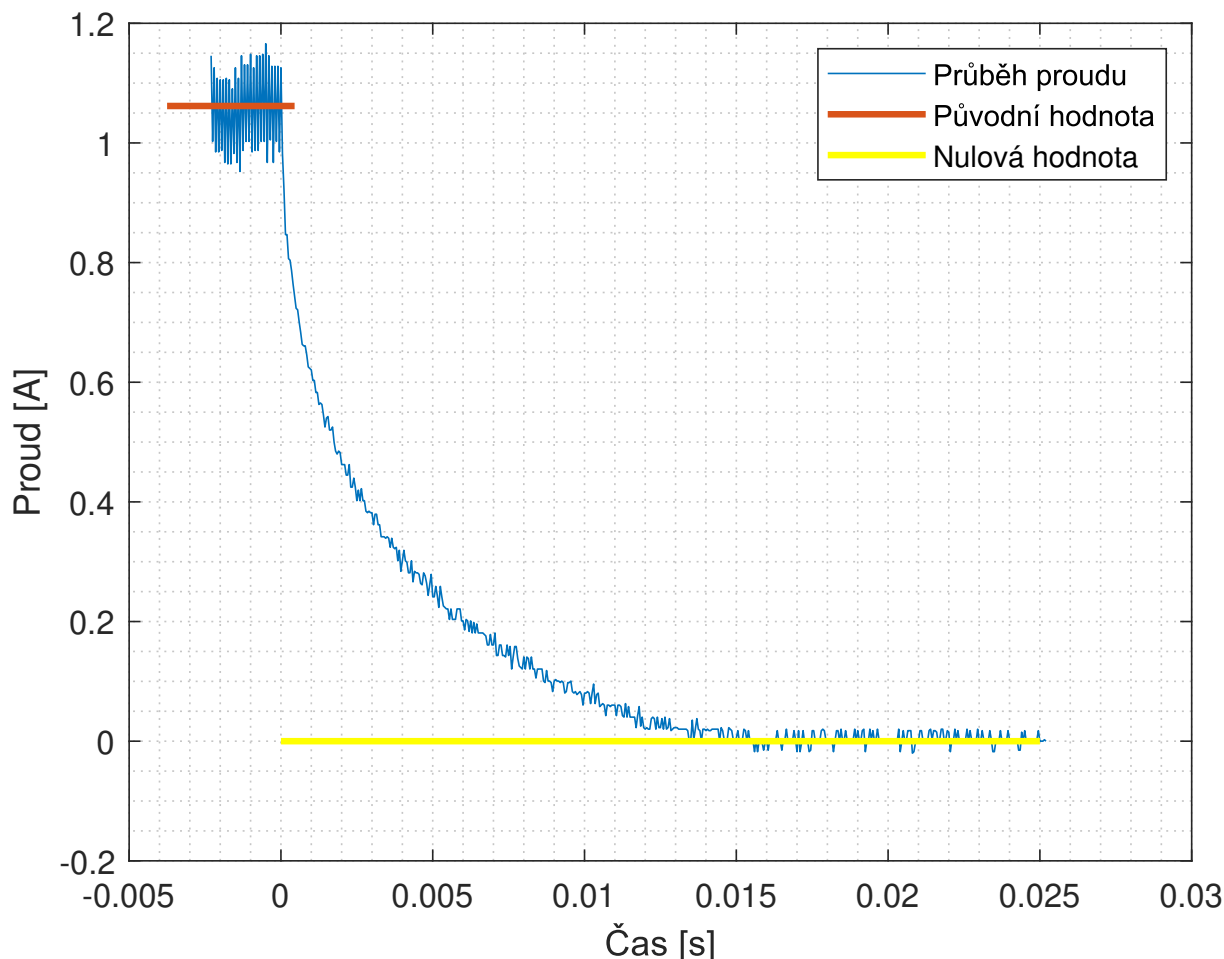
Chování regulátoru se ověřovalo pomocí odezvy na jednotkový skok. Na prvním obrázku 3.8 je vidět reakce při změně z nulové hodnoty na hodnotu 1 A. Pro lepší vizualizaci byla v MATLABu vypočtena plovoucí průměrná hodnota proudu pomocí funkce

movmean()). K dosažení požadované hodnoty dojde poprvé v čase 5 ms a k ustálení hodnoty dochází po čase 8 ms. Důvodem, proč je ustálená hodnota 1.1 A ne požadovaná hodnota 1 A, je chyba měření proudové sondy HANTEK. Hallův senzor použitý pro zpětnovazební měření na desce byl cejchován s pomocí elektronické zátěže. Přitom byl proud snímán proudovou sondou a zobrazován na osciloskopu. Průměrná hodnota tohoto signálu se však lišila od hodnoty nastavené na elektronické zátěži. Vzhledem ke kvalitě obou přístrojů se jako rozhodující vzala pro ocejchování hallova senzoru elektronická zátěž.



Obrázek 3.8: Odezva na jednotkový skok z počáteční nulové hodnoty

Na dalším obrázku 3.9 je reakce při změně proudu z hodnoty 1.06 A na hodnotu 0 A. Zde je vidět, že hodnoty proudu 0 A je dosaženo až po 16 ms. Je to dáno topologií desky, kdy ke snížení proudu dochází pouze mařením energie na jednotlivých prvcích obvodu. Možné vylepšení je změna topologie, tak jako tomu je v návrhu pánů Naserimojarad, Tadayoninejad a Eghtesad [22].

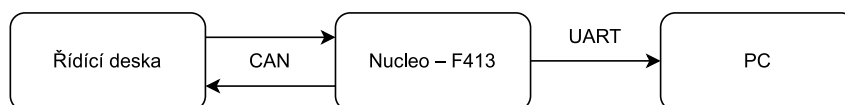


Obrázek 3.9: Odezva na jednotkový skok z počáteční nenulové hodnoty

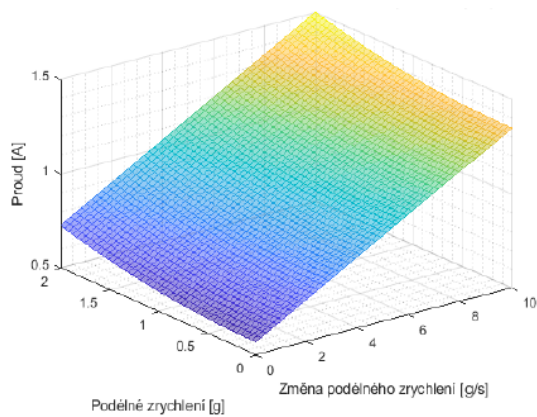
### 3.2.4 Ověření implementace řídicího algoritmu

Z důvodů zmíněných výše nebyla správnost implementace řídicího algoritmu zkoušena na reálných datech přímo z dataloggeru. Jelikož řídicí algoritmus pracuje se sedmi vstupy (podélné zrychlení a jeho derivace, příčné zrychlení, pozice škrticí klapky, tlak v brzdovém okruhu, aktuální rychlost a natočení volantu) byly jeho výstupy v předchozí práci vizualizovány pro kombinace vstupů podélné zrychlení a jeho derivace, podélné zrychlení a poloha škrticí klapky a jako poslední dvojice podélné zrychlení a tlak v brzdách. Ostatní vstupy byly nulové. Snahou tedy bylo výstupy při těchto kombinacích vstupů zreprodukovat, aby se prokázala správnost implementace alespoň samotného algoritmu.

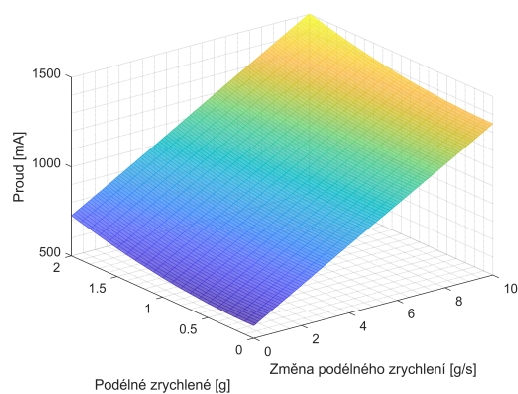
Jednotlivé kombinace dvojic vstupů byly nahrány do paměti vývojové desky Nucleo-144 s čipem STM32F413, která je dále posílala po sběrnici CAN na dané vzorkovací frekvenci 100 Hz. V řídicí desce došlo k vypočtení požadovaného proudu a tato informace byla zpětně poslána na terminál v PC, odkud byla data uložena a vizualizována pomocí MATLABu. Na obrázku 3.10 je vidět schéma tohoto testu. Obrázky 3.11, 3.12, 3.13 a



Obrázek 3.10: Schéma testování implementace algoritmu

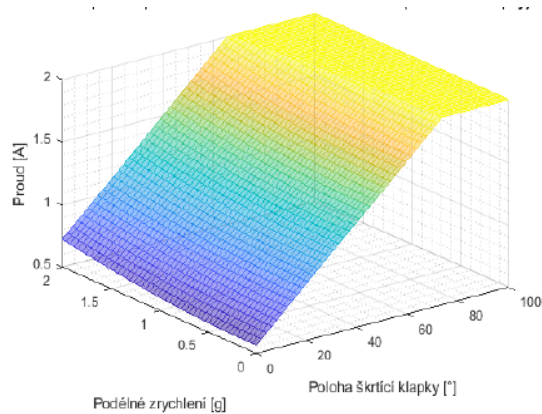


(a)

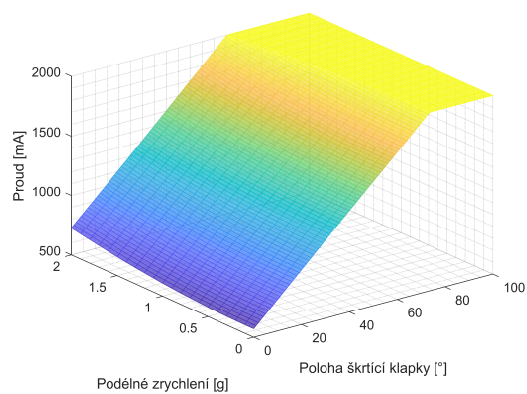


(b)

Obrázek 3.11: Změna proudu předního tlumiče klonění – akcelerace (vliv změny zrychlení)



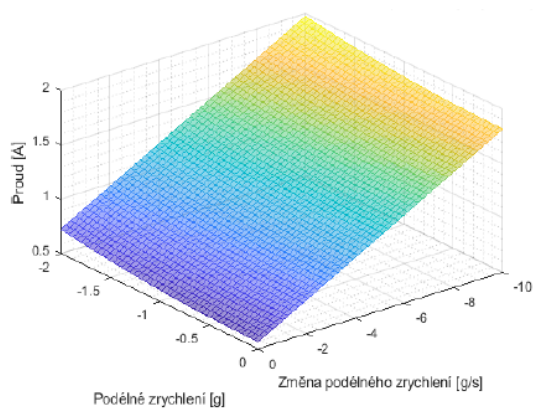
(a)



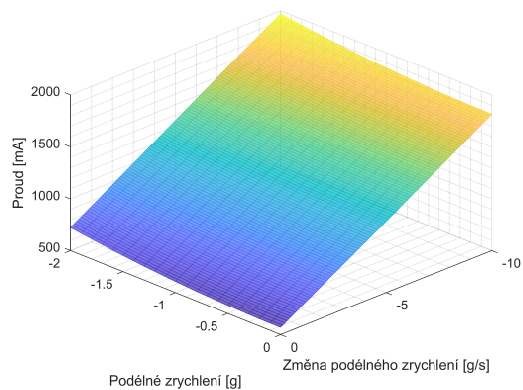
(b)

Obrázek 3.12: Změna proudu předního tlumiče klonění – akcelerace (vliv polohy škrťací klapky)

3.14 ukazují v porovnání výstupní hodnoty proudu z předchozí práce (a) [4] a hodnoty získané z řídicí desky po implementaci algoritmu (b).

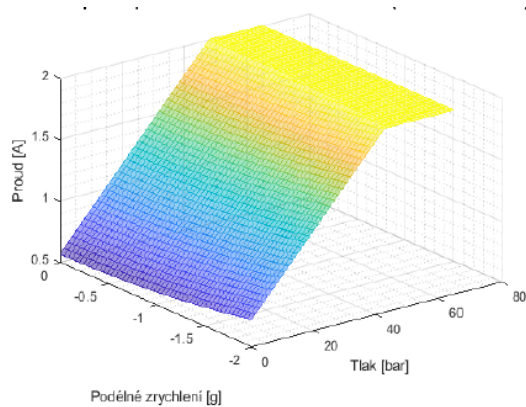


(a)

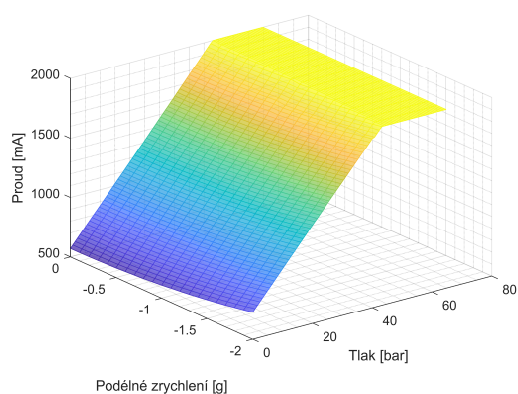


(b)

Obrázek 3.13: Změna proudu předního tlumiče klonění – decelerace (vliv změny zrychlení)



(a)



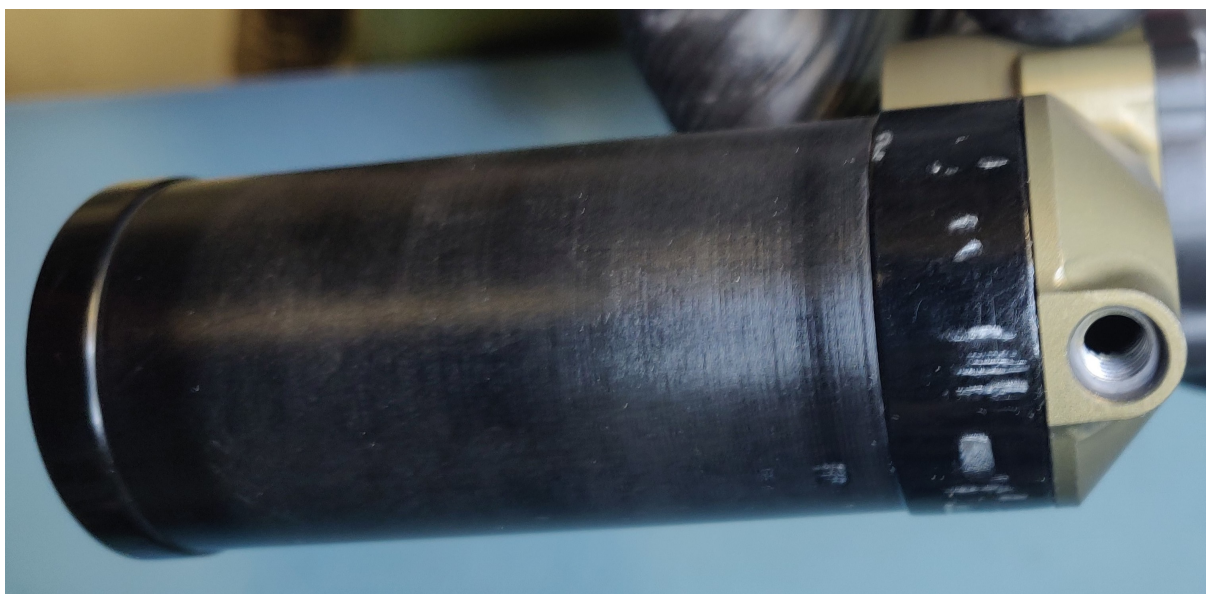
(b)

Obrázek 3.14: Změna proudu předního tlumiče klonění – decelerace (vliv tlaku v brzdách)



Pro ověření funkčnosti řídicí elektroniky byla znovu změřena F–v charakteristika s cílem dosáhnout stejných výsledků jako v předchozí práci [4], kde původní měření F–v charakteristiky bylo provedeno s laboratorním zdrojem konstantního proudu. Bylo potřeba ověřit, zda pulzně šířkové řízení proudu nemá na tuto charakteristiku nežádoucí vliv. Tj. zvolená nosná frekvence a hodnota střídny jsou vyhovující.

K tomu však bylo nejdříve nutné tlumič odvzdušnit. Při rozebírání tlumiče byla zjištěna nejpravděpodobnější příčina úniku tlaku. Byla to výrobní vada, kdy závit na externí vyrovnávací komoře zasahoval i do drážky pro těsnění. To se podařilo nouzově odstranit zvětšením drážky a použitím většího těsnění. Zároveň se odhalily některé nedostatky pro demontáž tlumičů, např.: externí vyrovnávací komora by mohla být vyrobena se šestihrannou hlavou, aby se zabránilo při montáži/demontáži poškození vnějšího povrchu, jak je vidět na obrázku 3.15.

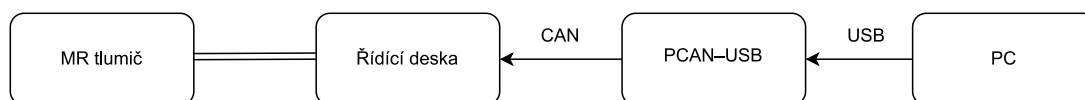


Obrázek 3.15: Poškození vnějšího povrchu externí vyrovnávací komory

Při odvzdušnění se také celý tlumič vyprázdnil od MR kapaliny. Ta se znovu rozmíchala, jelikož v průběhu času došlo k její sedimentaci (viz obrázek 2.2).

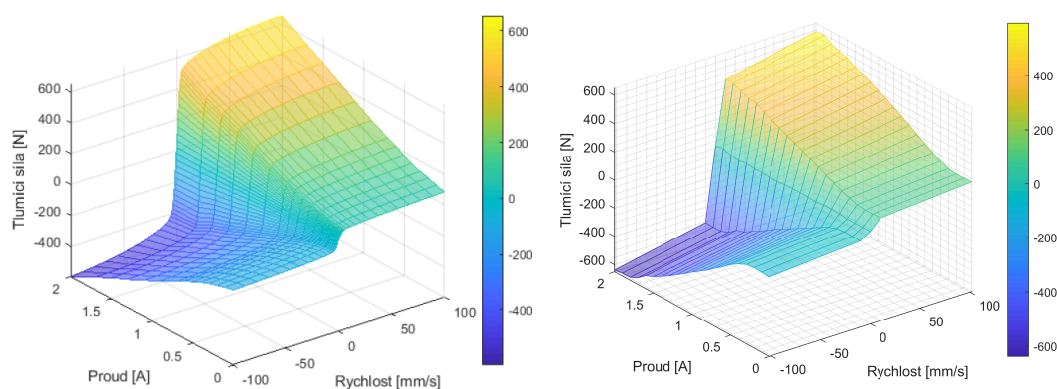
Po úspěšném znovu složení tlumiče byla změřena jeho charakteristika na stroji MTS EMA-234 2K (obrázek 3.18) na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství.

Při měření byl z počítače v softwaru PCAN-View přes PCAN-USB [30] zadáván požadovaný proud v rozmezí 0–2 A po kroku 0.1 A. Schéma zapojení měření je vidět na obrázku 3.16 Pro každou hodnotu proudu byla změřena F–v charakteristika tlumiče.



Obrázek 3.16: Schéma měření

Výsledky jsou v porovnání s původním měřením vidět na obrázku 3.17.



(a) Původní měření

(b) Nové měření s řídicí elektronikou

Obrázek 3.17: F–v charakteristika MR tlumiče



Obrázek 3.18: Měření F-v charakteristiky

### 3.3 Druhá řídicí deska

Při návrhu druhé desky byl výběr jednotlivých komponent prováděn s ohledem na dostupnost a další využitelnost v týmu. Byla snaha o použití co nejvíce stejných součástek, které zbyly z předchozí verze.

Jelikož původní použité hradlové budiče (MIC4416YM4) mají maximální napájecí napětí pouze 18 V, avšak LVS elektrického monopostu je 24 V (zmíněno v kapitole 3.1.2), nebylo možné použít pro napájení výstupní proudové části přímo LVS auta. Za poslední rok se v týmu standardizovalo zapojení zdrojů napájení pro 5 a 3.3 V. Pro zdroje 5 V se využívají produkty firmy TRACO, které už jsou odzkoušené v praxi. Z tohoto důvodu se pro napájení výstupů použily spínané regulátory TSR 2-2450, které zvládají dodávat konstantní proud 2 A při napětí 5 V.

Nedostatky předchozí verze zmíněné výše (kapitola 3.2.1) byly vyřešeny následovně:

- Spínaný 5V zdroj byl nahrazen spínaným regulátorem TSR 1-2450.
- Pro lepší snímání proudu byl použit čtyřbodový bočníkový odpor a proudový senzor řady INA181A2, který umožnil využít větší rozsah ADC mikroprocesoru.



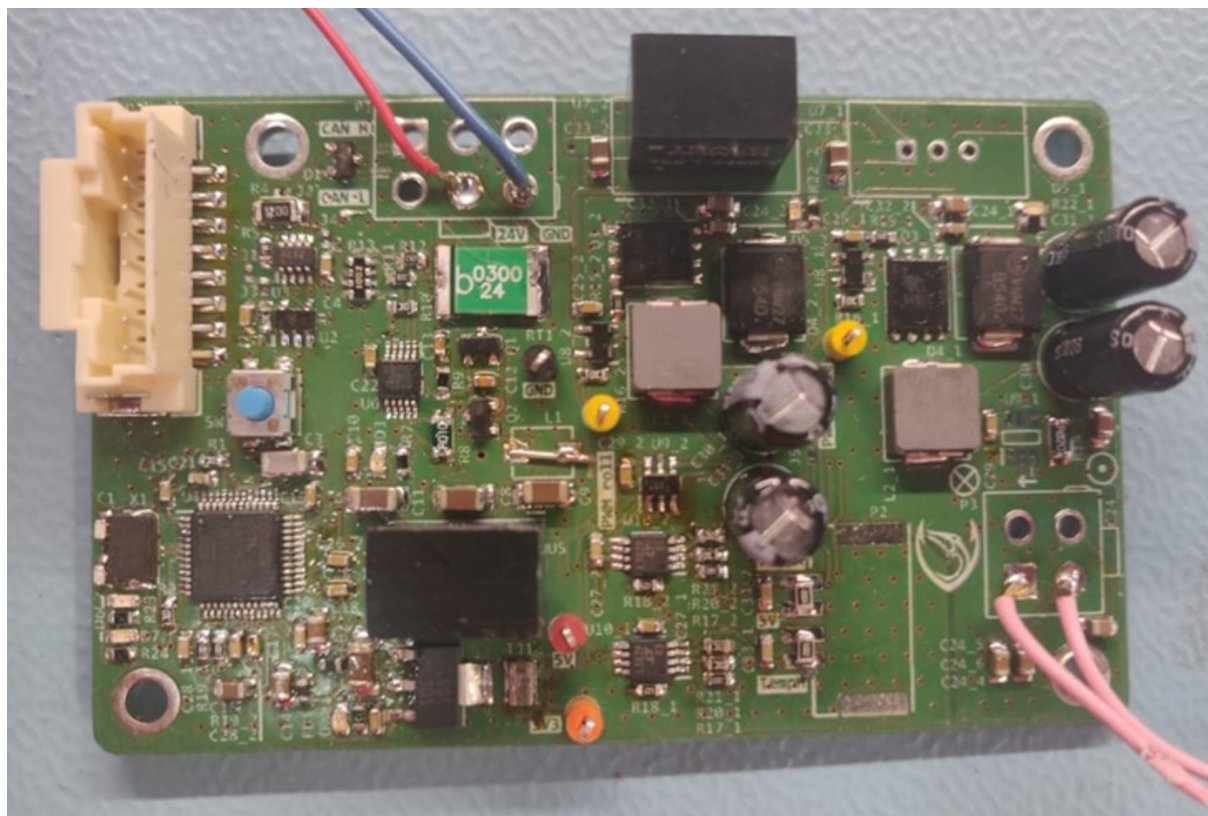
- Byl použit jiný mikroprocesor a to STM32G473CCT6, který umožňuje vyšší taktovací frekvence (až 170 MHz). To umožnilo zvětšit rozlišení PWM. Celkově se také zvětšila střída  $s$  potřebná pro zajištění stejného proudu v cínce kvůli snížení napájecího napětí  $U_d$  z 12 na 5 V. Což vyplývá ze základního vztahu pro proud cívkou:

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt, \quad (3.1)$$

kde hodnota integrálu  $\int u_L(t) dt$  odpovídá  $U_d \cdot s$ .

- Měření teploty bylo změněno na snímání napětí na úhlopříčce měřícího můstku, kde je jeden odpor nahrazen termistorem. Pro zesílení napětí je použit přístrojový zesilovač LT6370IMS8, jak je doporučeno v [1]. Toto zapojení bylo zvoleno též kvůli standardizaci v týmu.

Největší důraz byl kladen na zmenšení rozměrů celé desky. Druhá deska je vidět na obrázku 3.19. Rozdíly v rozměrech obou desek jsou vidět v přílohách na konci dokumentu4. Celkově se podařilo řídicí desku 2krát zmenšit.



Obrázek 3.19: Osazená druhá deska

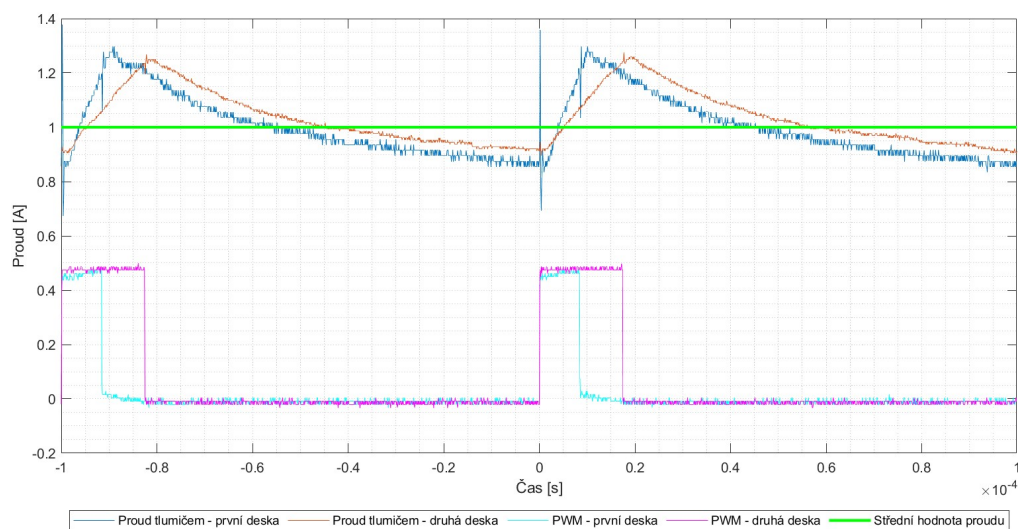
### Ověření funkčnosti proudových výstupů nové desky

Druhá verze desky byla osazena až na spínané regulátory TSR 2-2450 a proudové SENZORY INA181A2 z důvodů nečekaného prodloužení dodací doby. Regulátory byly v rámci testu nahrazeny regulátorem TSR 1-2450, který má poloviční výkon. I tak se však ukázal

jako postačující, pouze se při proudu 2 A více zahřival. Porovnání proudových průběhů můžeme vidět na obrázku 3.20. Můžeme si všimnout zvětšení potřebné střídy pro udržení stejného proudu tlumičem a zároveň skoro totožného zvlnění proudu. Zvlnění proudu je dáno vztahem:

$$\Delta I = \frac{U_d \cdot s(1 - s)}{Lf}. \quad (3.2)$$

Výsledné zvlnění proudu je přibližně stejné, dokonce o trochu lepší, ačkoliv se zvětšila střída  $s$ . Zároveň se ale zmenšilo napětí  $U_d$ .



Obrázek 3.20: Porovnání průběhů proudu ve dvou periodách na obou deskách

### 3.4 Zhodnocení experimentů

V rámci této práce byly provedeny následující experimenty:

- ověření proudové regulace,
- ověření správnosti implementace řídicího algoritmu,
- měření F-v charakteristiky MR tlumiče,
- porovnání proudových průběhů v rámci jedné periody obou desek.

Ověření proudové regulace se provedlo pozorováním odezvy na jednotkový skok. Odezva systému při požadavku změny proudu z nulového na 1 A je vidět na obrázku 3.8. Požadované hodnoty je dosaženo v čase 5 ms s překmitem 5 % a k ustálení dochází po 8 ms. Pokud bychom se spokojili s větším překmitem a kolísáním kolem požadované hodnoty, dá se jí poprvé dosáhnout v čase 2 ms. Druhý obrázek 3.9 zobrazuje odezvu systému při změně z ustáleného nenulového proudu na nulový. Tento děj trvá podstatně déle,

a to celých 16 ms. Příčinou je, že PI regulátor nemůže požadovat menší střídu než 0. Energie uložené v cívce se tedy musí celé zmařit na jednotlivých prvcích obvodu. Pro zlepšení je možné použít jinou topologii proudového výstupu, jak je zmíněno v kapitole 3.2.3.

Test správné implementace algoritmu byl proveden pro 4 kombinace dvou vstupních signálů. Důvod, proč se ověření neprovedlo se všemi reálnými vstupy, je uveden v kapitole 3.2.2. Z obrázků 3.11, 3.12, 3.13 a 3.14 je vidět, že implementovaný algoritmus se stejnými daty funguje správně a na výstupu je totožná žádaná hodnota proudu do MR tlumiče (obrázky (b)) jako při simulacích v předchozí práci [4] (obrázky (a)).

Měření F-v charakteristiky MR tlumiče bylo provedeno za účelem ověření, že použití topologie proudového výstupu na desce, zvolená frekvence PWM a zvlnění proudu nemají na chování tlumiče nežádoucí vliv. Původní měření v předchozí práci [4] totiž proběhlo s laboratorním zdrojem konstantního proudu. Porovnání původního a nového měření je vidět na obrázku 3.17. Oba výsledky jsou skoro totožné. Malé rozdíly můžeme přisoudit tomu, že měřicí přístroj výsledky průměruje a linearizuje. Určitý vliv také mohlo mít rozebrání a znovu složení tlumiče.

Cílem posledního měření bylo ověřit, zda použití spínaných regulátorů řady TSR od firmy TRACO a výkonnějšího MCU je vyhovující a nese s sebou kýžené zlepšení rozlišení střídy PWM. Na první desce proud tlumičem dosahoval hodnoty 2 A zhruba při 1200 hodnotách časovače na frekvenci 10 kHz a maximálním taktu MCU STM32F103CB (72 MHz). Na druhé desce s MCU STM32G473CCT6 při taktu 144 MHz (maximum je 170 MHz, tedy možnost navýšení je ještě dalších 18 %) připadalo pro požadovaný proud 2 A okolo 4500 hodnot časovače. Což je skoro 4krát více. To dává prostor pro možné zvýšení nosné frekvence PWM na víc než 10 kHz se stále dostačujícím rozlišením střídy. Porovnání obou průběhů pro dvě periody při žádaném proudu 1 A je vidět na obrázku 3.20.

## 4 Závěr

V rešersní části této bakalářské práce byly popsány základní typy konstrukce MR tlumičů, jejich použití a způsoby, jakými se modelují a řídí.

Výsledkem bakalářské práce je deska plošných spojů s proudovými výstupy pro magnetoreologické tlumiče týmu TU Brno Racing. Deska je schopná přijímat vstupní signály přes sběrnici CAN od ostatních jednotek v autě a sama je schopna snímat teplotu v MR tlumičích a zpětnovazebně regulovat proud, který do nich teče.

Původní filtry použité v simulaci při návrhu řídicího algoritmu pracovaly s 350 vzorky signálu z dataloggeru. To však při vzorkovací frekvenci 100 Hz, kterou datalogger umožňuje, způsobuje dopravní zpoždění 3.5 sekundy. Sestrojit hardwarové pasivní analogové filtry, které by zvládaly v reálném čase upravit vstupní signály do stejné podoby, jakou mají v původním návrhu řídicího algoritmu, je nereálné. Pro získání vhodných vstupních dat je nutné zvýšit vzorkovací frekvenci ze 100 Hz aspoň na 2 až 5 kHz a tato data dále filtrovat numericky. Dále by se při návrhu nového algoritmu mělo pracovat s reálnějšími a smysluplnějšími filtry. Propustné pásmo by mělo být alespoň 10 Hz a nepropustné pásmo od 100 Hz výše. Pro přesnější určení hodnot těchto pásem je potřeba nejdříve získat reálná data z trati při vzorkování 2 až 5 kHz. Při návrhu nového řídicího algoritmu by bylo dobré změnit model MR tlumičů ze statického na dynamický kvůli všem vlastnostem, které MR tlumiče mají (bi-viskózní charakter, hysterezi a další nelinearity). Dále by bylo vhodné vyhnout se numerickým derivacím jako směrodatným hodnotám pro akční zásah. Pro úpravu vstupních signálů v rámci simulace používat filtry, které se dají aplikovat i v reálném čase.

Funkčnost první desky a správnost implementace řídicího algoritmu byla tedy ověřena s použitím stejných signálů jako v původní simulaci. Podařilo se zrekonstruovat stejné grafy výstupních hodnot jako v předchozí práci.

Na druhé desce se podařilo ověřit, že použití spínaných regulátorů řady TSR od firmy TRACO pro napájení proudových výstupů druhé desky je plně postačující řešení. Měření teploty MR kapaliny můstkovým zapojením odporů a termistoru je přesnější a vyhovující.

Možnost vylepšení řídicí elektroniky se nachází ve změně topologie, která by umožňovala rychlejší snížení hodnoty proudu cívkou.

# Seznam zkratek

- MR** Magnetoreologický
- PID** Proporčně-Integračně-Derivační regulátor
- PWM** Pulse Width Modulation
- CAN** Controller Area Network
- LVS** Low Voltage System
- ADC** Analog-to-Digital Converter
- MCU** MicroController Unit
- DPS** Deska Plošných Spojů
- CAN** Controller Area Network
- DMA** Direct Memory Access

# Literatura

- [1] VOREL, Pavel a Miroslav PATOČKA. *Průmyslová elektronika*. Brno, 2007.
- [2] VOREL, Pavel a Petr PROCHÁZKA. *Řídící členy v elektrických pohonech*. El. skriptum FEKT VUT Brno, 2010.
- [3] GENC, S., DERIN, B. *Field Responsive Fluids - a Review, Key Engineering Materials Vol.521* .(2012) pp 87-99 Dostupné z WWW: <http://www.scientific.net/KEM.521.87>
- [4] MÍŠA, Jiří. *Adaptivní řízení magnetoreologických tlumičů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125018>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 159 s. Vedoucí práce Lubor Zháňal.
- [5] ŠOB, František, *Hydromechanika*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-802-1435-780.
- [6] DAHALE, Ameya Sanjay. *Magneto-rheological Dampers*. College of Engineering, Pune.
- [7] KŮREČKA, Jan. *Magnetické kapaliny používané ve fluidním inženýrství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 34 s. Vedoucí práce Ing. Simona Fialová, Ph.D.
- [8] BERKA, P. *Sedimentace MR kapaliny při startu nového vesmírného nosiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.
- [9] ŠEBESTA, Karel. *Magnetoreologický tlumič s krátkou časovou odezvou pro podvozek kolejového vozidla*. Brno, 2020.125 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/124664>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Michal Kubík.
- [10] DAI-HUA W., WEI-HSIN L., *Neural network modeling and controllers for magnetorheological fluid dampers*, 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. (Cat. No.01CH37297), 2001, pp. 1323-1326 vol.2, doi: 10.1109/FUZZ.2001.1008902.
- [11] SPENCER B. F., DYKE S. J., SAIN M. K., CARLSON J. D., *Phenomenological model for magneto-rheological dampers*, Journal of Engineering Mechanics, vol. 123, no. 3, pp. 230-238, 1997.

- [12] AGRAVAL, A. K. a M. AMJADIAN. 22 - Seismic component devices. *Innovative Bridge Design Handbook*. (Second Edition). Butterworth-Heinemann, 2022, s. 637-662. ISBN 9780128235508.
- [13] WEBER, F. *Bouc–Wen model-based real-time force tracking scheme for MR dampers*. Smart Materials and Structures [online]. 2013, 11 March 2013, 2013(22) [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/22/4/045012/meta?casa\\_token=5Tsw0uIt61QAAAAA:z1l6dgb7Y-A00SMtoWjITdT6auaL6pceIzZ\\_nkrtiTozmQRJUjSl\\_WULEF10kt60ULxdqZthg0Y](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/22/4/045012/meta?casa_token=5Tsw0uIt61QAAAAA:z1l6dgb7Y-A00SMtoWjITdT6auaL6pceIzZ_nkrtiTozmQRJUjSl_WULEF10kt60ULxdqZthg0Y)
- [14] ELSINAWI A. H., JHEMI A., ALHAMAYDEH M., *Adaptive seismic isolation of structures using MR-fluid dampers*, 2013 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICMSAO.2013.6552603.
- [15] WANG S., ZHANG L., YIN G., *Study on fuzzy control of magnetorheological dampers in a hydropower house*, 2021 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR), 2021, pp. 1631-1636, doi: 10.1109/ICHCE-SWIDR54323.2021.9656348.
- [16] BŘEZINA, Tomáš a kol. *Studijní podpora - Řízení Mechatronických Soustav*. Mechatronic Lab. Brno, 2004.
- [17] DOLEŽAL, K. *Regulovatelné tlumiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 35 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura, Ph.D..
- [18] VRBA, Michal. *Hydraulický tlumič v dopravních prostředcích a jiných aplikacích*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124393>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 52 s. Vedoucí práce Ondřej Blaťák.
- [19] CHANG C. C., ROSCHKE P., *Neural network modeling of a magnetorheological damper*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 9, pp. 755-764, 1998.
- [20] WEBENCH® POWER DESIGNER. WEBENCH® POWER DESIGNER [online]. Texas Instruments Incorporated, c1995–2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator>
- [21] BONGGEUN Cho, Lee DONGRAK, Lee DONGHOON and Boo KWANGSUCK, *Design of a current driver controller for MR CDC dampers*, 2007 International Conference on Control, Automation and Systems, 2007, pp. 283-286, doi: 10.1109/IC-CAS.2007.4406923.
- [22] M. M. Naserimojarad, A. Tadayoninejad and M. Eghtesad, *An innovative design of fast current controller circuit for MR dampers*, The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation, 2011, pp. 1086-1090, doi: 10.1109/ICCI-Autom.2011.6356812.

- [23] Concept of Formula Student. *Formula Student German* [online]. 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/concept/>
- [24] SALMONY, Philip. Pms67 / PID. *Github* [online]. June 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://github.com/pms67/PID>
- [25] GOŁDASZ, Janusz P. a Bogdan SAPIŃSKI. *Insight into magnetorheological shock absorbers*. Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-13232-7.
- [26] GOLDASZ, Janusz a Bogdan SAPINSKI. *Nondimensional characterization of flow-mode magnetorheological/electrorheological fluid dampers*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2012, 23(14), 1545-1562. DOI: 10.1177/1045389X12447293. ISSN 1045-389X. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X12447293>
- [27] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel: Pneumatiky a kola, Zavěšení kol, nápravy, odpružení, řídicí ústrojí, brzdové systémy*. 3. aktualiz. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2006. 464s. ISBN 80-239-6464-X.
- [28] *TU Brno Racing* [online]. Brno, c2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/>
- [29] Formula Student Rules 2022. *Formula Student* [online]. 2022, 2022 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2022/rules/FS-Rules\\_2022\\_v1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf)
- [30] *PEAK Systems* [online]. Germany, c2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.peak-system.com/?&L=1>

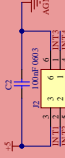
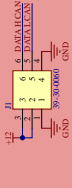


# Seznam příloh

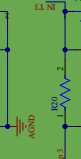
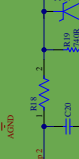
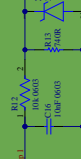
- A Schéma první desky
- B Schéma druhé desky
- C Návrh DPS první desky
- D Návrh DPS druhé desky

# A Schéma první desky

## Konektory

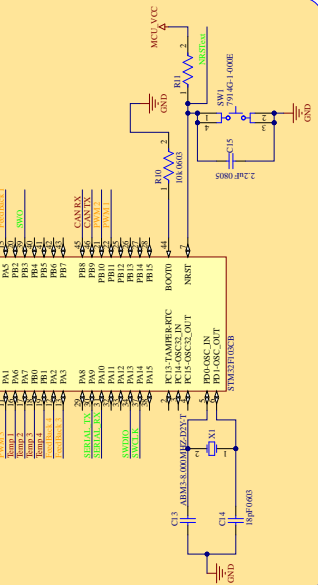


## Termistory

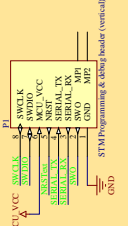


Zemní termistory - PTH-20K 100K

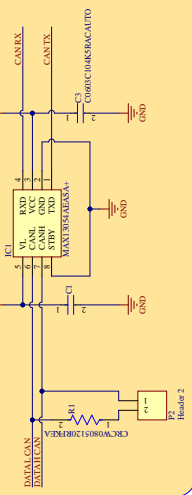
## MCU



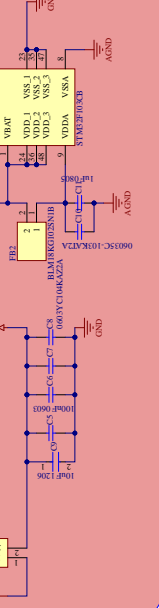
## Programming header



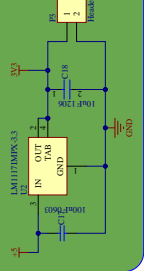
## CAN transceiver



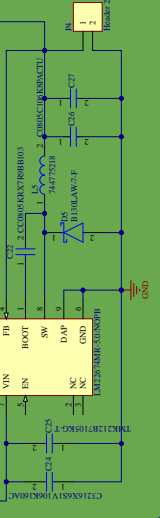
## Napájení MCU



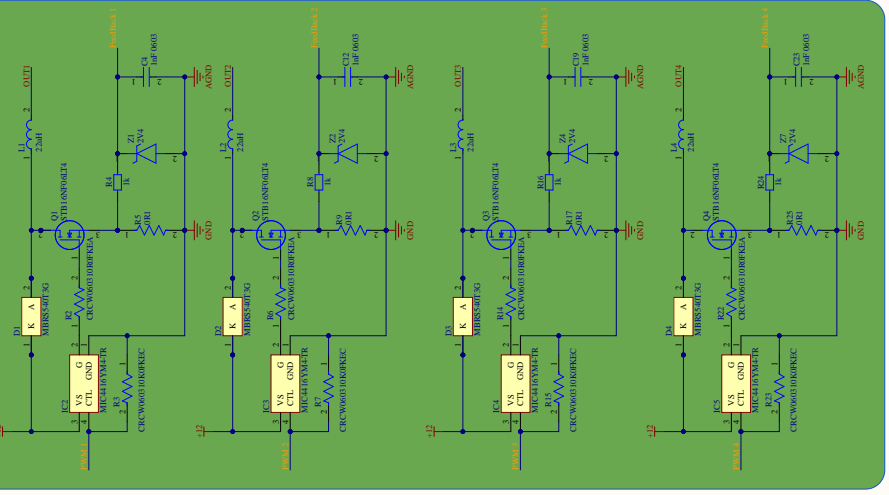
## DCDC 5V -> 3V3 @max 800mA



## DCDC 12V -> 5V @ 300mA

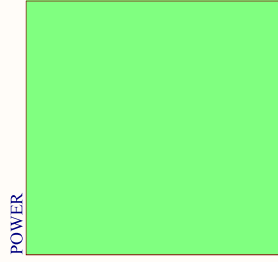


## Výstup do tlumičů

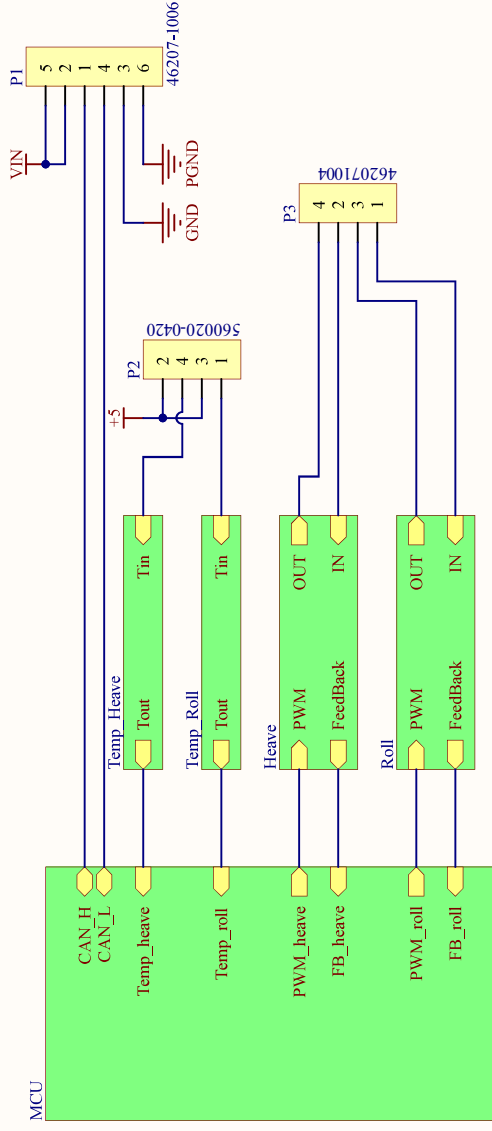


## B Schéma druhé desky

POWER

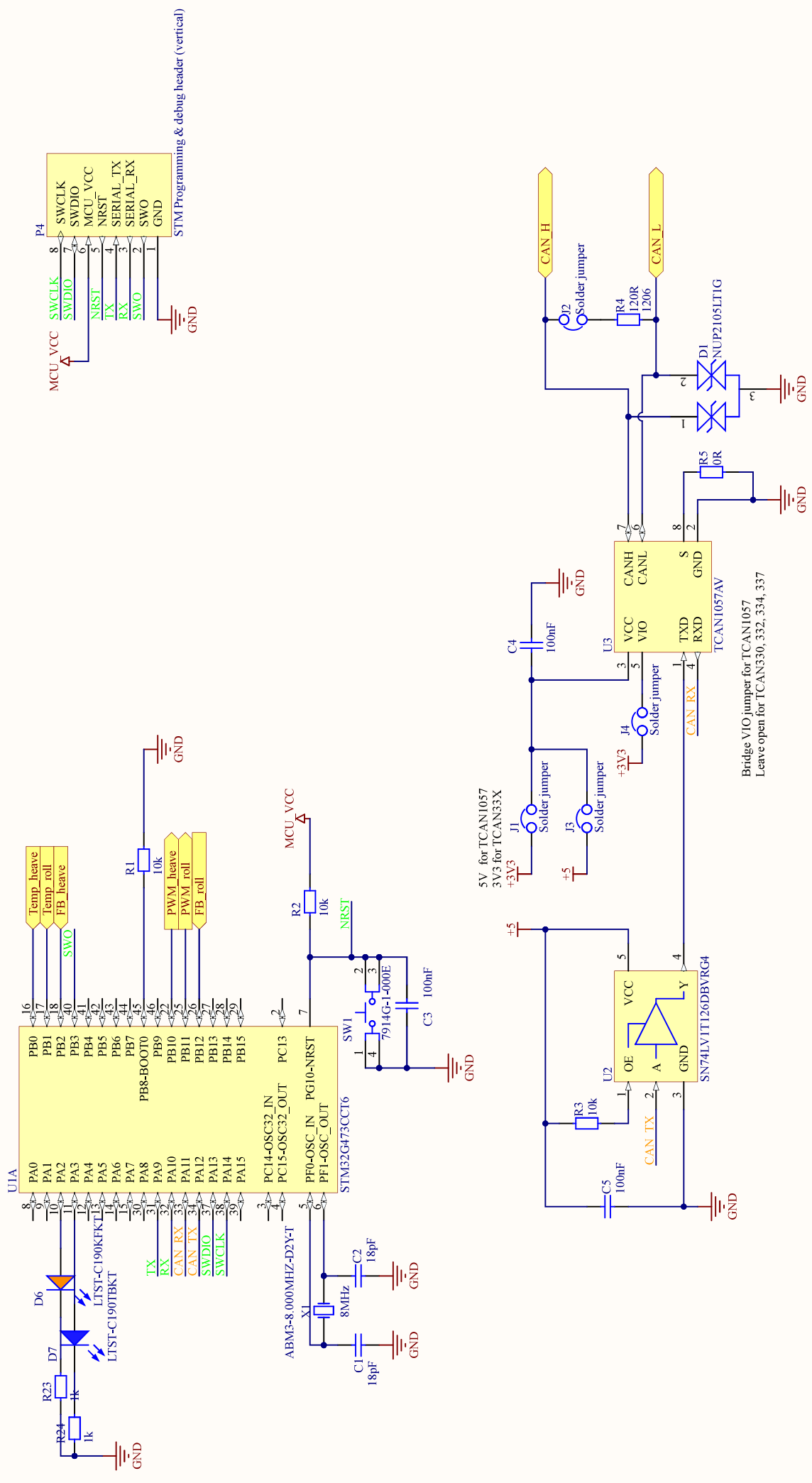


- M1 M2 M3
- M5 screw hole

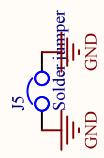


Title: <b>System</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>MR Dumpers V2.0</b>		Checked by: <b>VS, RT, MM</b>	
Car: <b>eD2</b>		Date: <b>11.05.2022</b>	
Sheet: 1/5	Rev. A	Format: A4	Contact: <b>skrivanek@tubmoracing.cz</b>



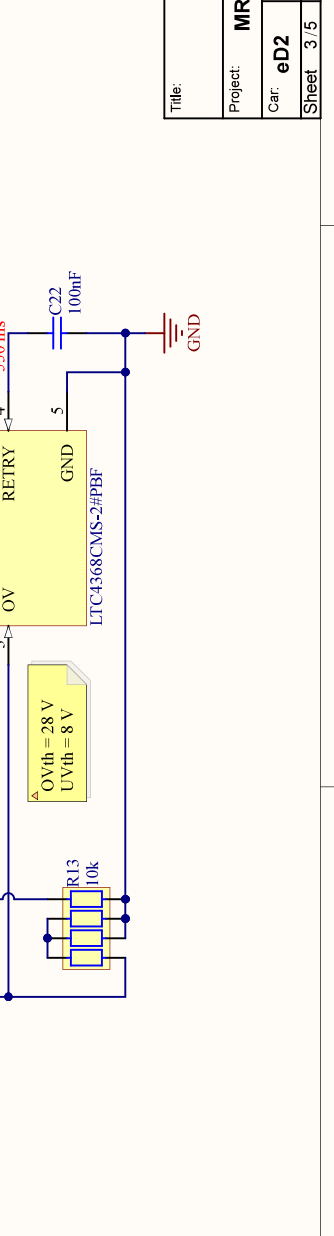
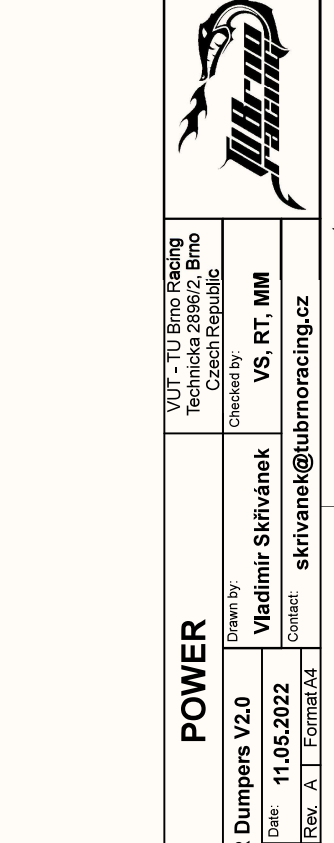
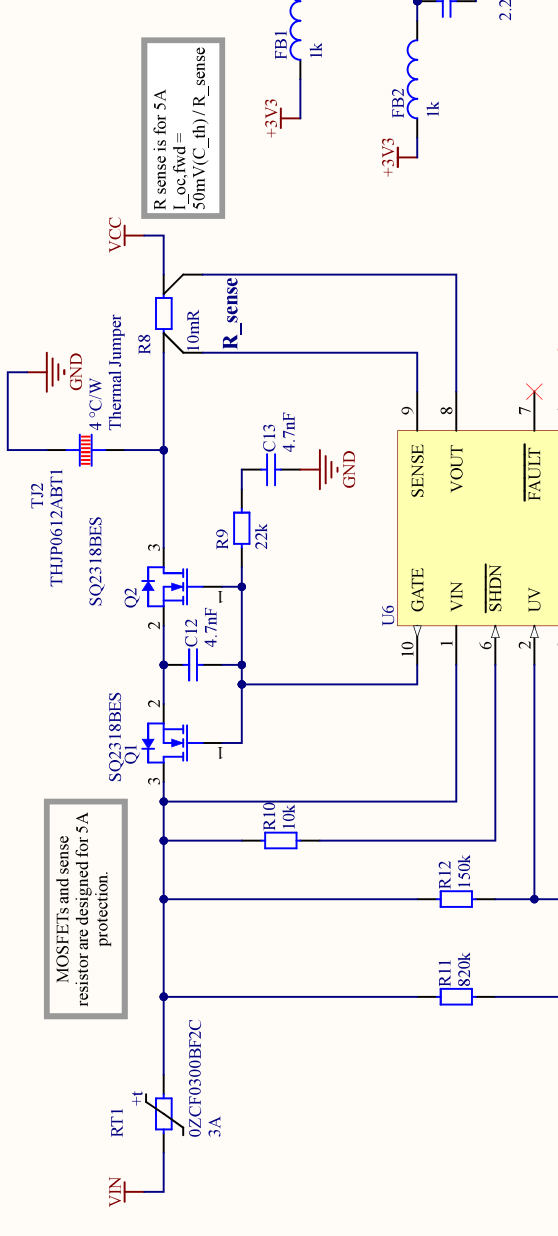
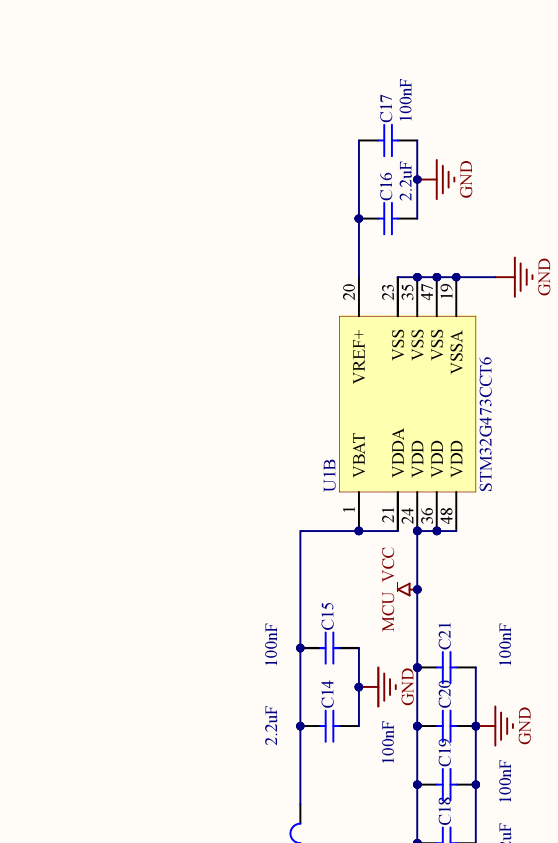
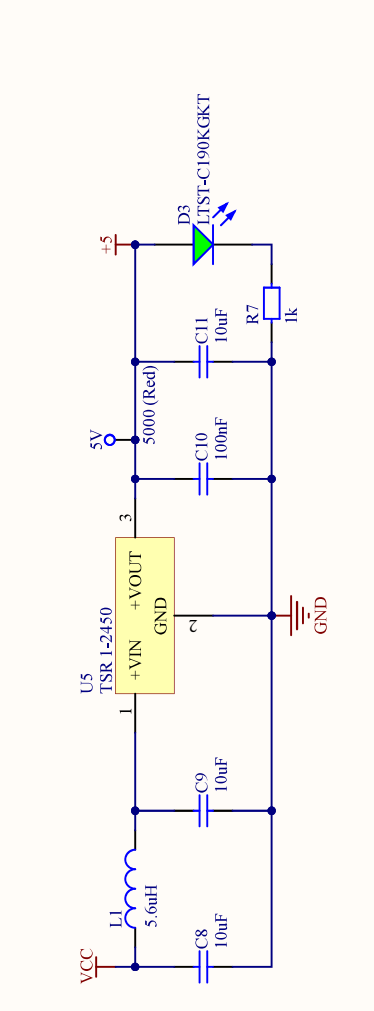
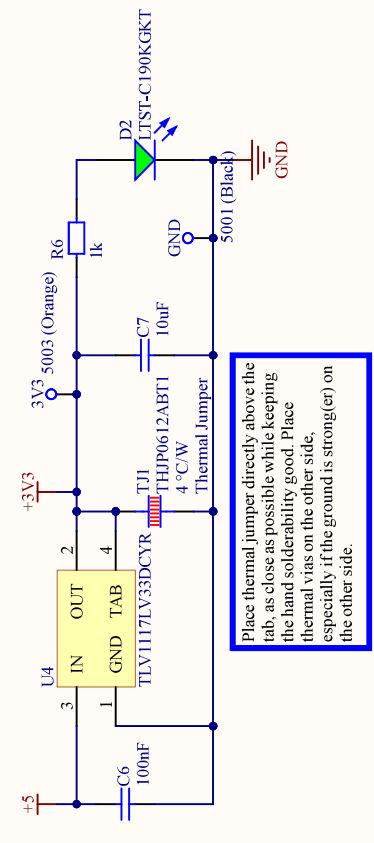


Bridge VIO jumper for TCAN1057  
Leave open for TCAN330, 332, 334, 337



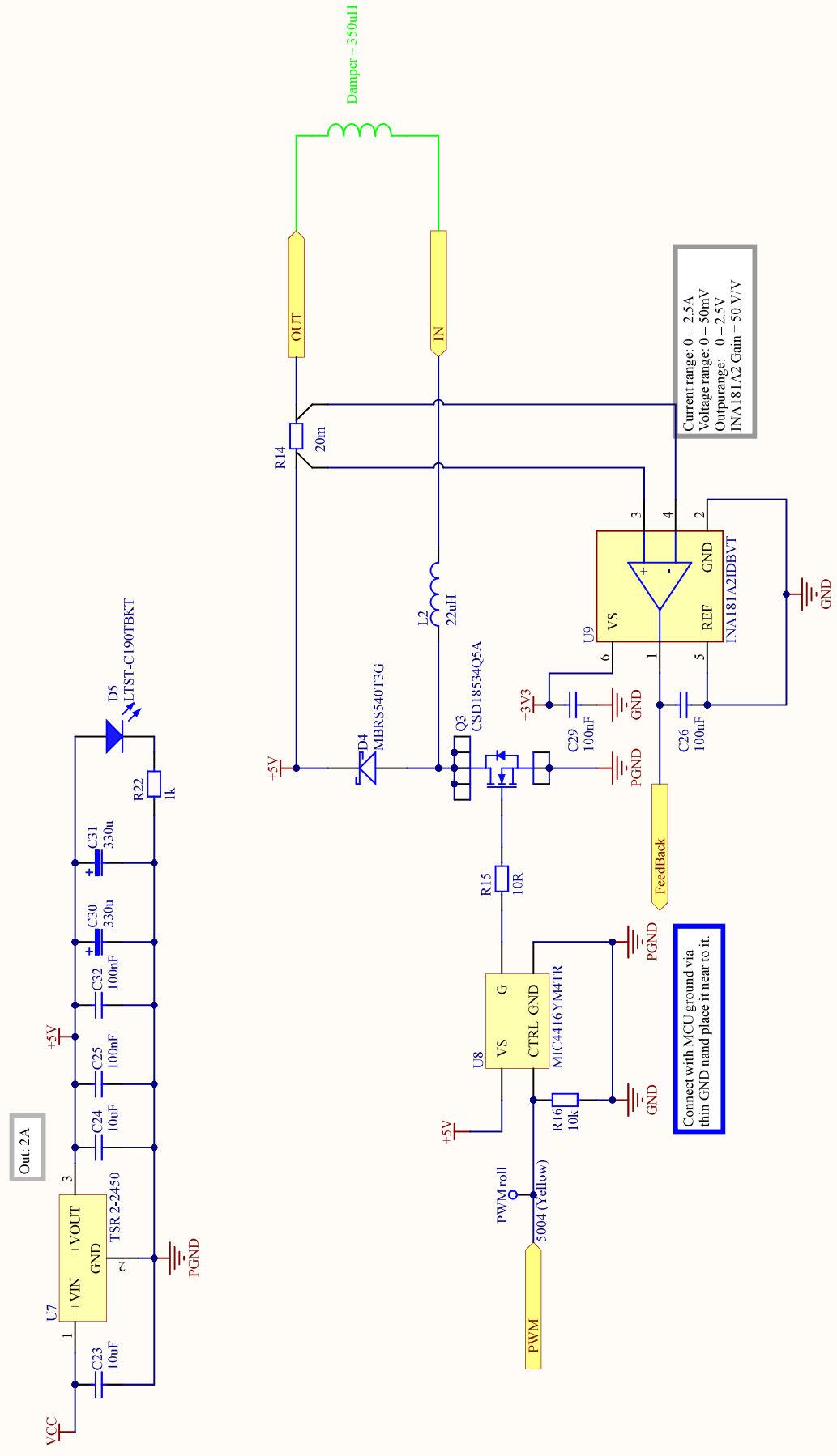
Title: <b>MCU</b>	
Project: <b>MR Dumpers V2.0</b>	Drawn by: <b>Vladimir Skřivánek</b>
Car: <b>eD2</b>	Date: <b>11.05.2022</b>
Sheet: 2 / 5	Rev. A   Format A4
VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Checked by: <b>VS, RT, MM</b>	
Contact: <b>skrivanek@tubmoracing.cz</b>	





Title: <b>POWER</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>MR Dumpers V2.0</b>	Drawn by: <b>Vladimír Skřivánek</b>	Checked by: <b>VS, RT, MM</b>	
Car: <b>eD2</b>	Date: <b>11.05.2022</b>	Contact: <b>skrivanek@tubmoracing.cz</b>	
Sheet: 3 / 5	Rev: A	Format: A4	





Title: <b>Output</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>MR Dumpers V2.0</b>		Checked by: <b>VS, RT, MM</b>	
Car: <b>eD2</b>		Contact: <b>skrivanek@tubmoracing.cz</b>	
Sheet: <b>4 / 5</b>	Rev: <b>A</b>	Format: <b>A4</b>	
Date: <b>11.05.2022</b>	Drawn by: <b>Vladimir Skřivánek</b>		



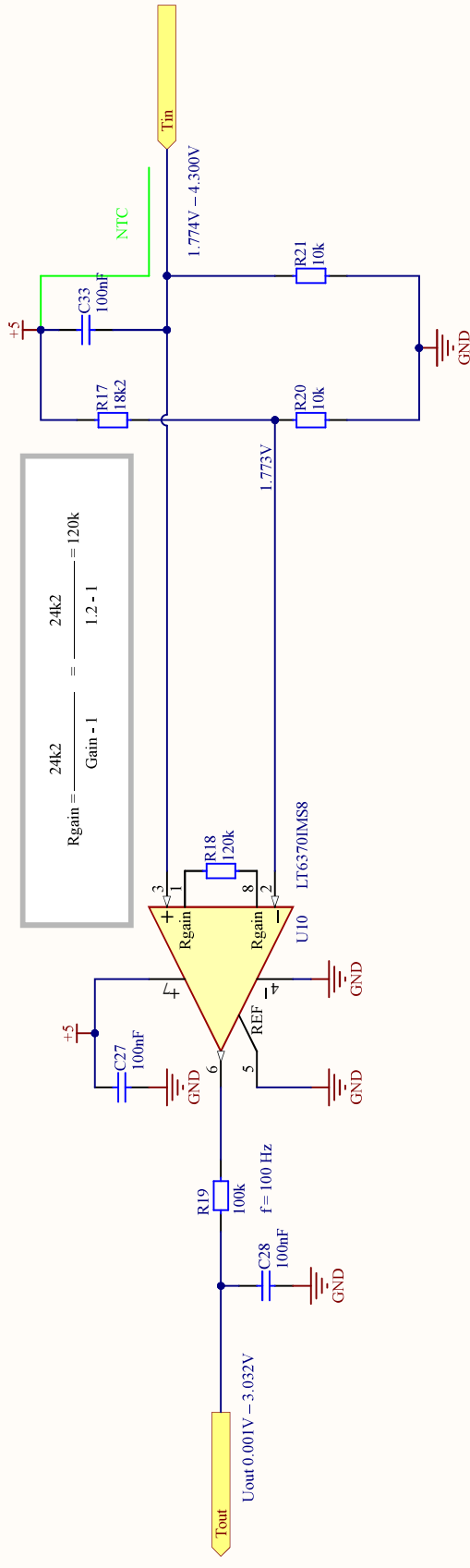
A

B

C

D

t [°C]	R [Ohm]
10	18,187
20	12,136
25	10,000
30	8,284
40	5,774
50	4,103
60	2,967
70	2,182
80	1,629



$$R_{gain} = \frac{24k2}{Gain - 1} = \frac{24k2}{1.2 - 1} = 120k$$

Title: <b>Temperature sensor</b>		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: <b>MR Dumpers V2.0</b>		Checked by: <b>VS, RT, MM</b>	
Car: <b>eD2</b>		Contact: <b>skrivanek@tubmoracing.cz</b>	
Sheet: <b>5/5</b>	Rev: <b>A</b>	Format: <b>A4</b>	



A

B

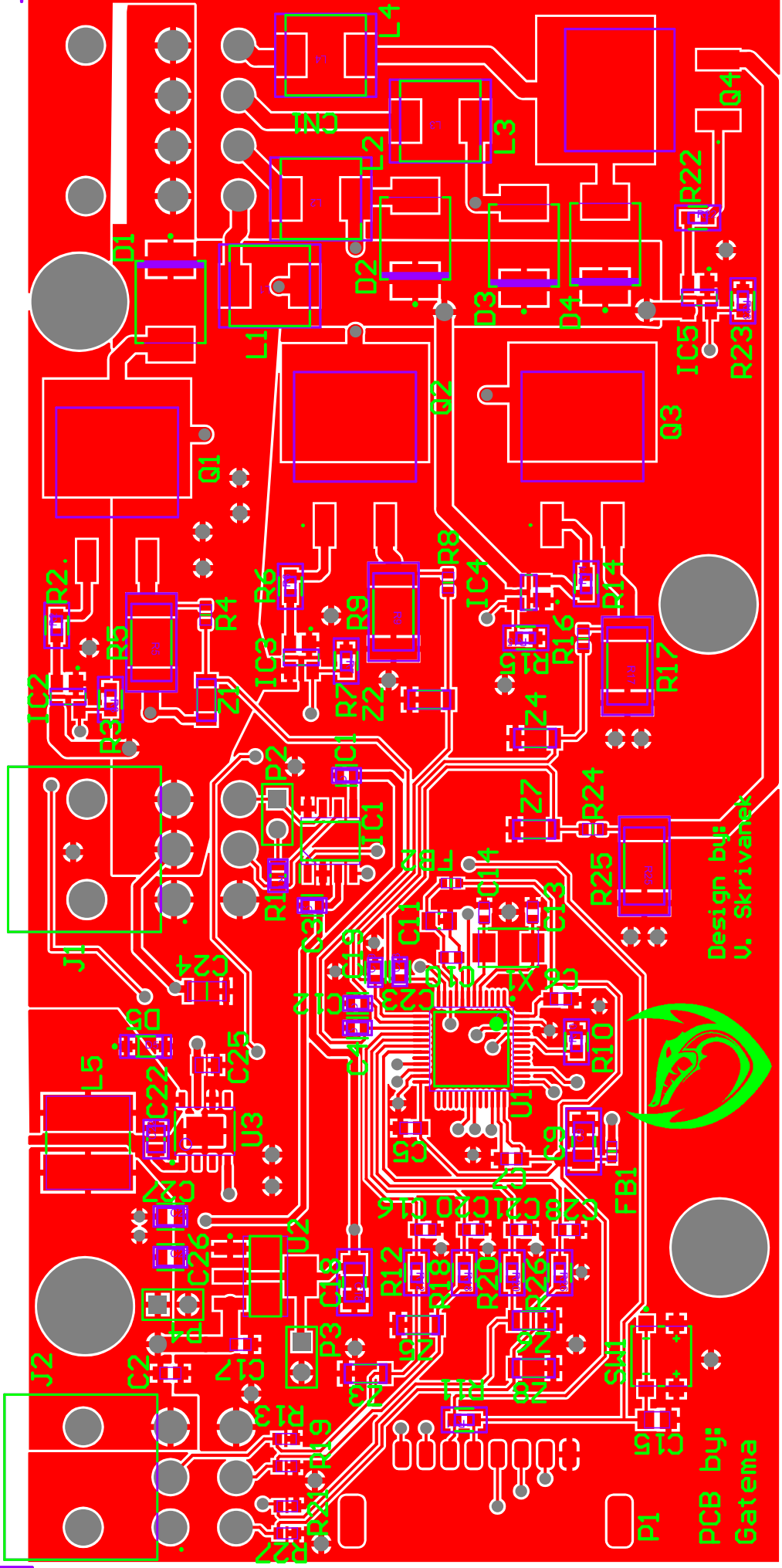
C

D

## C Návrh DPS první desky

131,97mm

64,07mm

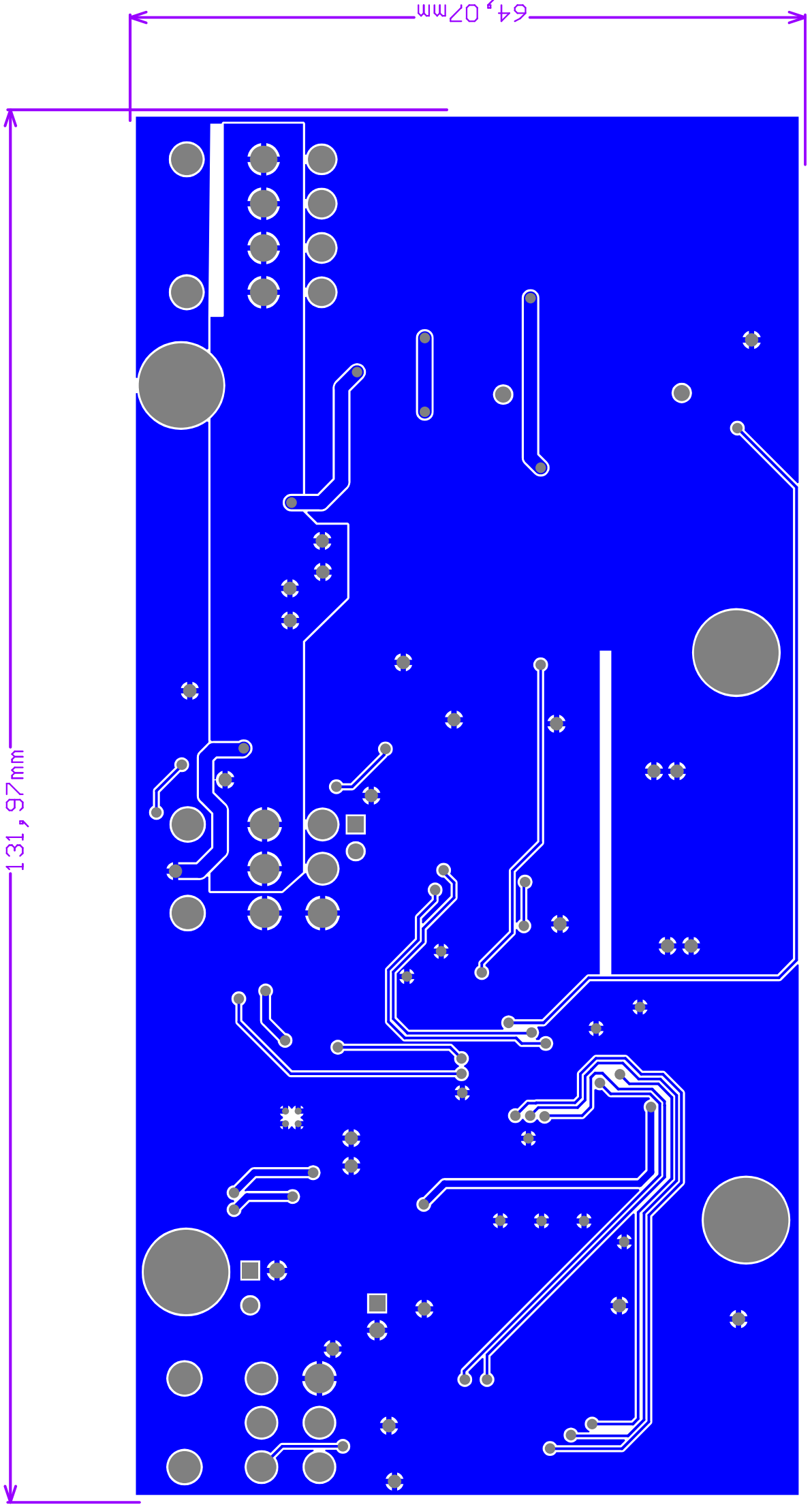


Design by:  
U. Skrivaneh



PCB by:  
Gatema

P1



# D Návrh DPS druhé desky

80,00mm

72,00mm

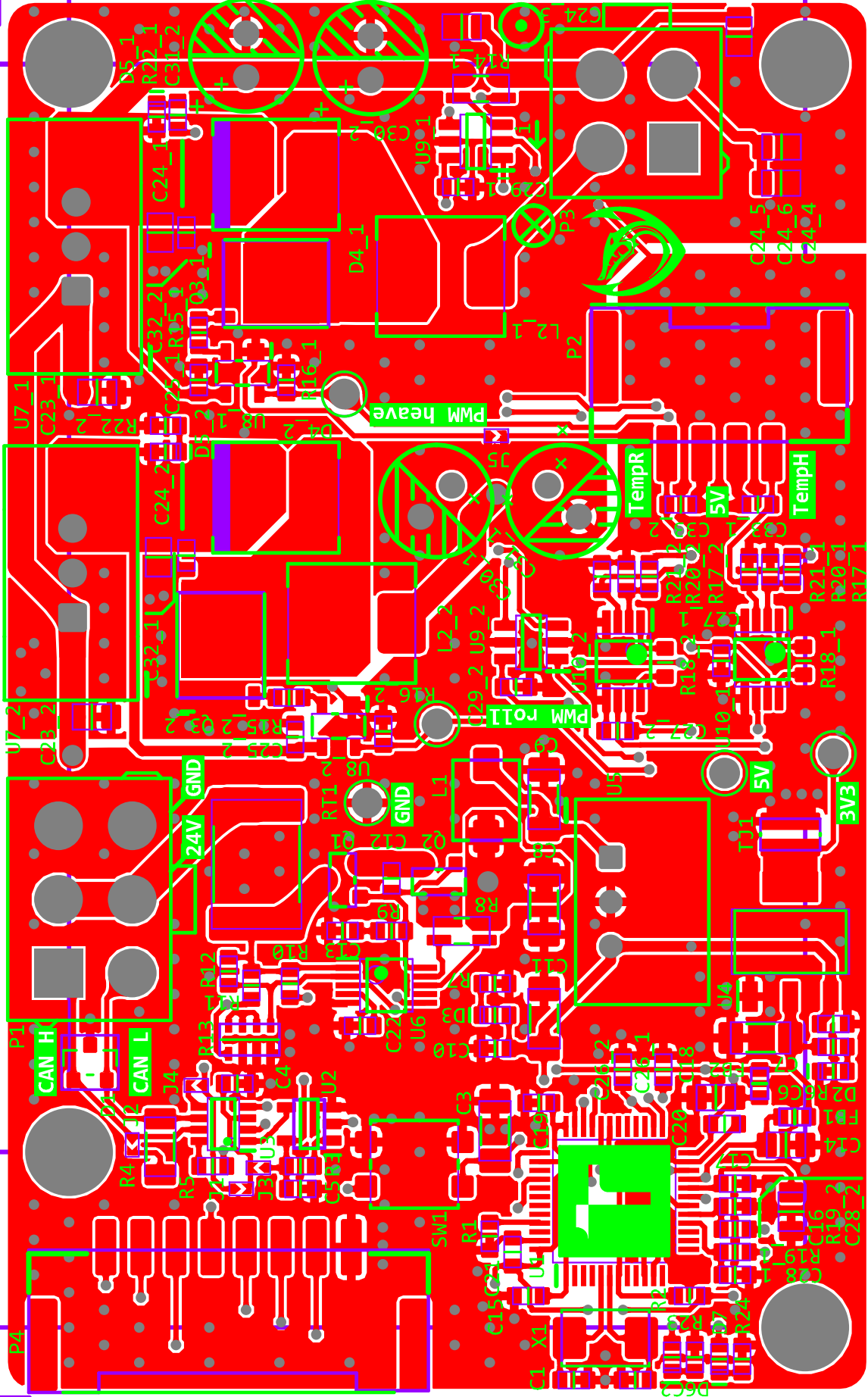
62,00mm

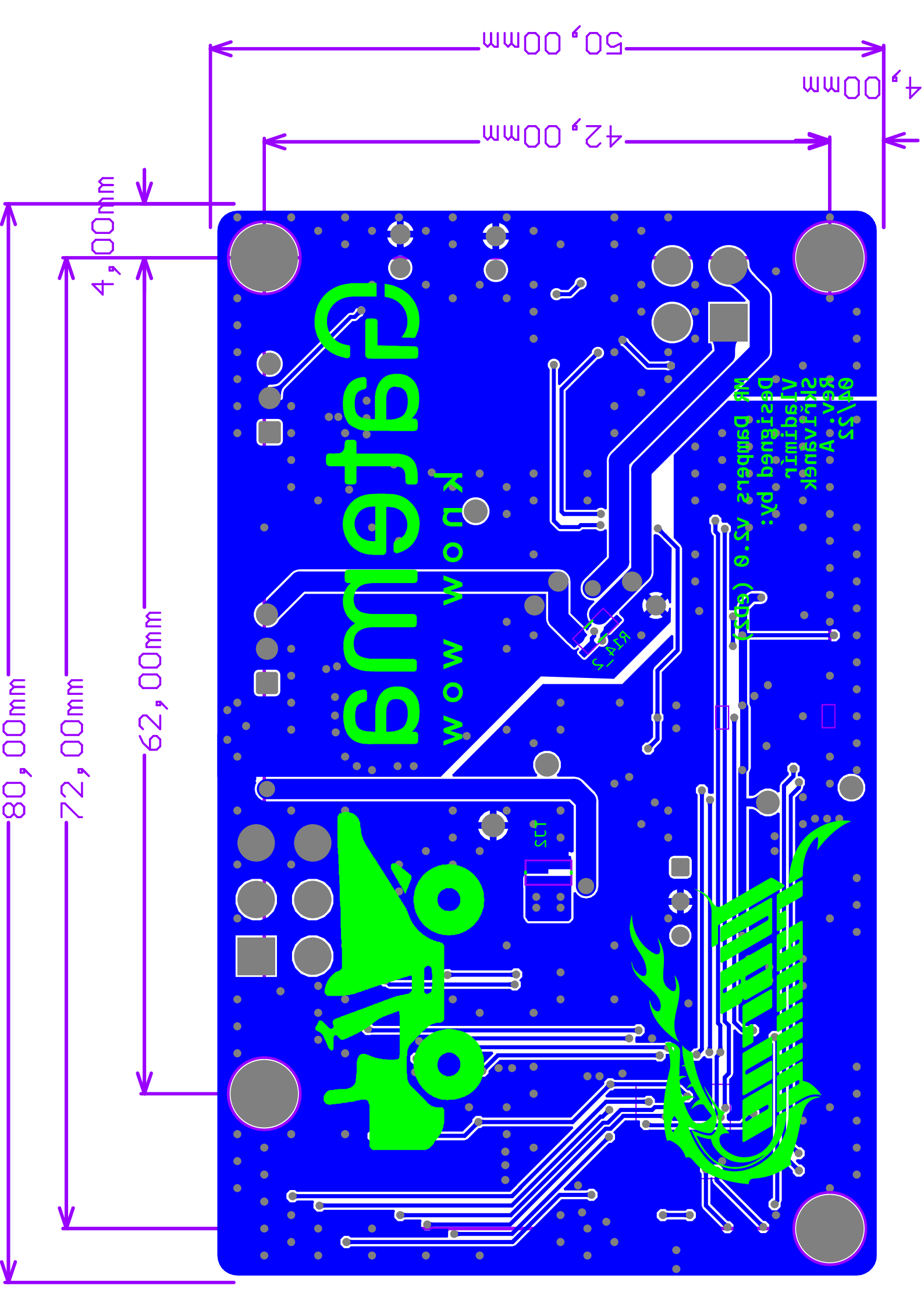
4,00mm

42,00mm

50,00mm

4,00mm





4,00mm

42,00mm

50,00mm

4,00mm

72,00mm

62,00mm

80,00mm

emeta  
wow



04/55  
Rev: A  
SKRIPSI  
ALSIQWIL  
Desain dan Pcb:  
Mr Bambang AS.0 (4055)

R1A1

L1S