

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**System snímání a vyhodnocení polohy pedálu  
elektrovozidla**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Adam TROJAN**  
Osobní číslo: **E17B0100P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Téma práce: **System snímání a vyhodnocení polohy pedálů elektrovozidla**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Zásady pro vypracování

Student v práci provede návrh systému pro snímání a vyhodnocení polohy pedálů elektrovozidla v souladu s platnými normami a doporučeními SAE a FSG.

1. Proveďte shrnutí platných norem a doporučení ve spojení se snímáním a vyhodnocením polohy pedálů elektrovozidel.
2. Výběr vhodného principu snímání polohy.
3. Proveďte vlastní návrh obvodu a DPS pro vyhodnocení a zpracování polohy pedálů elektrovozidel.
4. Navržený obvod realizujte na DPS.
5. Experimentálně ověřte správnou funkci analogové části obvodu.

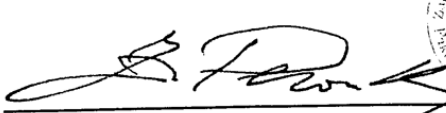
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**



#### Seznam doporučené literatury:

1. Formula Student Germany: International Design Competition [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: [fsg.one/rules](http://fsg.one/rules)
2. Senzory a měřicí obvody: Stanislav Ďaďo, Marcel Kreidl. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996. 315 s.: 351 obr., lit. ISBN 80-01-01500-9.
3. Analogové elektronické systémy. 1. část: Jiří Pinker, Václav Koucký. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 142 s.: il. ISBN 80-7043-284-5 (1.část).
4. Analýza signálů a soustav: Pavel Nevřiva. 1. vyd. Praha: BEN, 2000. 671 s.: il., grafy; 21 cm. Přehled základních použitých matematických vzorců. ISBN 80-7300-004-0.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Zavřel**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
  
**Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na shrnutí platných norem a doporučení v souvislosti se snímáním polohy pedálů elektrovozidla. V práci jsou popsány běžně používané principy snímání polohy pedálu a jejich alternativy. Je proveden výběr vhodného principu pro aplikaci ve spojení s plynovým pedálem studentské elektroformule, konkrétně snímání polohy pedálu pomocí dvojice Hallových sond. Práce taktéž popisuje postup při návrhu elektrického schématu a jeho realizaci na desce plošných spojů. Obsahuje také záznam z experimentálního měření, ověřujícího správnou funkčnost vyrobeného prototypu snímače.

## **Klíčová slova**

Snímač polohy, plynový pedál, Hallova sonda, permanentní magnet, bezkontaktní snímání, operační zesilovač, operační síť

## **Abstract**

This bachelor's thesis is focused on the current standards and recommendations in application with sensing the position of the electric vehicle pedals. The thesis summarizes the commonly used principles of sensing the position of the pedal and their alternatives. A selection of a suitable principle for application in conjunction with the accelerator pedal of the student electrical formula is made, specifically sensing the position of the pedal using a pair of Hall probes. The work also describes the procedure for the design of the electrical diagram and its implementation on the printed circuit board. It also contains a record of experimental measurements, verifying the correct functionality of the manufactured prototype sensor.

## **Key words**

Position sensor, accelerator pedal, Hall probe, permanent magnet, contactless sensing, operational amplifier, operational network

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.6.2020

Adam Trojan

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Zavřelovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>OBSAH</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>ÚVOD</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....                                       | <b>11</b> |
| <b>1 SHRNUÍ NORMY</b> .....   | <b>12</b> |
| 1.1 DRÁHA PEDÁLU .....  | 12        |
| 1.2 SNÍMAČ AKCELERAČNÍHO PEDÁLU .....                                       | 12        |
| 1.3 VYHODNOCENÍ DAT Z AKCELERAČNÍHO PEDÁLU .....                            | 12        |
| <b>2 PRINCIPY SNÍMÁNÍ POLOHY</b> .....                                      | <b>13</b> |
| 2.1 ODPOROVÉ SNÍMÁNÍ POLOHY .....   | 13        |
| 2.1.1 Napěťový dělič .....  | 14        |
| 2.1.2 Konstrukce potenciometrických snímačů polohy .....                    | 14        |
| 2.1.3 Vhodnost pro realizaci pedálu elektroformule .....                    | 16        |
| 2.2 INDUKČNÍ SNÍMÁNÍ POLOHY .....   | 16        |
| 2.2.1 Indukční senzor s proměnnou vzduchovou mezerou .....                  | 16        |
| 2.2.2 Indukční senzor s posuvným magnetickým „zkratem“ .....                | 18        |
| 2.2.3 Transformátorový indukční senzor .....                                | 19        |
| 2.3 OPTICKÉ SNÍMÁNÍ POLOHY .....  | 22        |
| 2.3.1 Inkrementální optoelektronické senzory .....                          | 22        |
| 2.3.2 Optoelektronický senzor polohy s prostorovým kódem .....              | 23        |
| 2.4 SNÍMÁNÍ POLOHY POMOCÍ HALLOVY SONDY .....                               | 24        |
| 2.4.1 Vlastnosti Hallovy sondy pro realizaci senzoru polohy .....           | 26        |
| <b>3 NÁVRH ELEKTRICKÉHO SCHÉMATU</b> .....                                  | <b>27</b> |
| 3.1 VÝBĚR KOMPONENTŮ PRO SNÍMACÍ ČÁST .....                                 | 27        |
| 3.1.1 Hallova sonda SS49E .....   | 27        |
| 3.1.2 Výběr permanentního magnetu .....                                     | 28        |
| 3.2 NAPÁJECÍ ZDROJE .....   | 29        |
| 3.2.1 Step-down konvertor TPS5140 .....                                     | 30        |
| 3.2.2 Lineární stabilizátory MCP1825 a MCP1826 .....                        | 31        |
| 3.3 NÁVRH ROZLOŽENÍ HALLOVÝCH SOND A PRŮBĚHY NAPĚTÍ .....                   | 32        |
| 3.3.1 Prvotní návrh rozložení Hallovy sond .....                            | 32        |
| 3.3.2 Náprava chyb vzniklých při prvním návrhu .....                        | 34        |
| 3.4 ANALOGOVÁ ČÁST SNÍMAČE .....  | 35        |
| 3.4.1 Úprava přímých signálů ze sond pro ADC .....                          | 35        |
| 3.4.2 Zpracování signálů pro získání signálu úměrnému stlačení pedálu ..... | 38        |
| 3.4.3 Poruchové stavy a chování jednotlivých signálů .....                  | 42        |
| 3.5 ČÍSLICOVÁ ČÁST SNÍMAČE .....  | 43        |
| 3.5.1 Pomocné obvody procesoru .....  | 43        |
| 3.5.2 Vstupy analogových signálů .....                                      | 45        |
| 3.5.3 Sběrnice CAN .....  | 45        |
| 3.5.4 Rozhraní JTAG .....   | 46        |
| 3.5.5 Dodatečné vstupy a výstupy GPIO .....                                 | 46        |
| <b>4 NÁVRH A VÝROBA PLOŠNÉHO SPOJE</b> .....                                | <b>46</b> |
| 4.1 ROZMÍSTĚNÍ ZÁKLADNÍCH SOUČÁSTEK .....                                   | 46        |
| 4.2 VÝROBA .....  | 48        |
| 4.3 OSAZENÍ .....   | 48        |
| <b>5 MĚŘENÍ</b> .....   | <b>49</b> |
| 5.1 NAPÁJECÍ NAPĚTÍ .....   | 50        |



---

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 5.2  | HODINOVÝ SIGNÁL PROCESORU .....               | 51        |
| 5.3  | VSTUPNÍ SIGNÁLY AD PŘEVODNÍKU PROCESORU ..... | 52        |
| <b>ZÁVĚR .....</b>                                   |   | <b>57</b> |
| <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b> |   | <b>59</b> |
| <b>PŘÍLOHY .....</b>                                 |   | <b>61</b> |
| PŘÍLOHA A: SCHÉMA NAPÁJECÍ ČÁSTI .....               |   | 61        |
| PŘÍLOHA B: SCHÉMA ANALOGOVÉ ČÁSTI .....              |   | 62        |
| PŘÍLOHA C: SCHÉMA ČÍSLICOVÉ ČÁSTI .....              |   | 63        |
| PŘÍLOHA D: NÁVRH DPS – HORNÍ VRSTVA (TOP) .....      |   | 64        |
| PŘÍLOHA E: NÁVRH DPS – SPODNÍ VRSTVA (BOTTOM) .....  |   | 65        |

## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na shrnutí platných norem a doporučení v souvislosti se snímáním polohy pedálů elektrovozidla, shrnutí principů snímání polohy, výběru vhodného principu a návrhu a realizaci elektrického schématu, spolu s deskou plošného spoje. Vyrobená verze má být použita ve studentské elektroformuli pro snímání polohy akceleračního pedálu.

Text bakalářské práce je rozdělen do pěti částí. První se zabývá rešerší norem a doporučení, druhá uvádí použitelné principy snímání v souvislosti s touto aplikací, jejich výhody a nevýhody. Třetí část se věnuje výběru vhodných komponentů a návrhu elektrického schématu snímače, pracujícímu na principu bezkontaktního snímání polohy pomocí dvojice Hallových sond. Ve čtvrté části je nastíněný návrh desky plošných spojů a jeho výroba s osazením. V poslední (páté) části jsou uvedeny výsledky z experimentálního měření, které mělo ověřit funkčnost vyrobeného snímače.

## Seznam symbolů a zkratek

|                     |  |     |
|---------------------|--|-----|
| <i>ABS</i> .....    | Anti-lock Brake System – protiblokovací systém brzd                |     |
| <i>ADC</i> .....    | Analog to Digital Converter – analogově digitální převodník        |     |
| <i>ASR</i> .....    | Anti-Slip Regulation – regulace prokluzu kol                       |     |
| <i>CAN</i> .....    | Controller Area Network – komunikační sběrnice                     |     |
| <i>DC</i> .....     | Direct Current – stejnosměrný proud                                |     |
| <i>DPS</i> .....    | Deska plošných spojů   |     |
| <i>DRC</i> .....    | Design Rule Check – kontrola návrhových pravidel                   |     |
| <i>FET</i> .....    | Field-Effect Transistor – tranzistor řízený elektrickým polem      |     |
| <i>FSG</i> .....    | Formula Students Germany   |     |
| <i>JTAG</i> .....   | Joint Test Action Group – standard pro programování procesorů      |     |
| <i>LDO</i> .....    | Low-Drop Regulator – nízko úbytkový regulátor napětí               |     |
| <i>LED</i> .....    | Light-emitting diode – svítivá dioda                               |     |
| <i>MOSFET</i> ..... | Metal–oxide–semiconductor FET                                      |     |
| <i>OZ</i> .....     | Operační zesilovač   |     |
| <i>PMOS</i> .....   | P-type metal-oxide-semiconductor                                   |     |
| <i>PWM</i> .....    | Pulse Width Modulation – pulsně šířková modulace                   |     |
| <i>S1, S2</i> ..... | Označení Hallových sond snímače                                    |     |
| <i>SMT</i> .....    | Surface mount technology – technologie povrchové montáže           |     |
| <i>THT</i> .....    | Through-hole technology – technologie součástek s drátovými vývody |     |
| <i>C</i> .....      | Kapacita   | [F] |
| <i>I</i> .....      | Elektrický proud   | [A] |
| <i>L</i> .....      | Indukčnost   | [H] |
| <i>M</i> .....      | Vzájemná indukčnost  | [H] |
| <i>R</i> .....      | Elektrický odpor   | [Ω] |
| <i>U</i> .....      | Elektrické napětí  | [V] |

# 1 Shrnutí normy

Pro dopravní prostředky se spalovacími i elektrickými motory existují různá doporučení, normy a pravidla, která jsou důležitá zejména z důvodu bezpečnosti. Ze stejného důvodu existují předpisy i pro studentské formule [2]. Ty pojednávají o kompletním provedení formule a část je tedy věnována i problematice akceleračního pedálu. Tyto předpisy musí studentská elektroformule splňovat, aby se mohla účastnit závodů.

V následujících bodech jsou stručně vyňata nejdůležitější ustanovení ze zmíněné normy [2], která se týkají akceleračního pedálu u elektricky poháněné formule.

## 1.1 Dráha pedálu

Dráha pedálu je v normě definována procentuálně, přičemž 0 % značí plně uvolněný pedál a 100 % plně sešlápnutý. Pedál musí být při uvolnění přitahován do 0 pozice pomocí minimálně dvou pružin, přičemž tyto nesmějí být součástí senzoru, a musí být natolik silné, aby i při selhání jedné pružiny bylo zajištěno spolehlivé vrácení do 0 polohy. Dále musí mít pedál mechanický doraz zabraňující mechanickému namáhání, či dokonce zničení senzoru [2].

## 1.2 Snímač akceleračního pedálu

Norma [2] definuje snímač akceleračního pedálu jako senzor polohy, který musí obsahovat nejméně dva separátní snímací prvky. Separátní zde znamená, že nesdílí napájecí nebo signálové cesty. U analogových snímačů, je nutné zajistit, aby jejich přenosové charakteristiky byly rozdílné, nebo byly jednotlivé snímače vůči sobě prostorově posunuty.

## 1.3 Vyhodnocení dat z akceleračního pedálu

Pokud se data o poloze pedálu z jednotlivých senzorů liší o více než 10 % celkové dráhy pedálu, nebo nastal-li zkrat mezi signálovými cestami, a tyto poruchy trvají déle než 100 ms, je nutné neprodleně ukončit trakci. K tomu stačí pouze vypnutí napájení motoru řídicí jednotkou, přičemž není nezbytně nutné vypínat celý systém řízení trakce. Stejný následek musí mít i rozpojení signálových cest, či jejich zkrat na napájecí napětí nebo kostru vozidla v případě, jsou-li vedeny kabelem. Při použití třech senzorů je dovoleno, vznikne-li odchylka

jednoho senzoru od ostatních o již zmíněných 10 % dráhy, data z chybného senzoru ignorovat a řídit akceleraci vozidla dle dat ze zbylých dvou senzorů [2].

Přenášíme-li data o poloze pedálu v digitální formě, musí být detekovatelné poškození těchto dat. K tomu lze využít metody jako např. kontrolní součet [2].

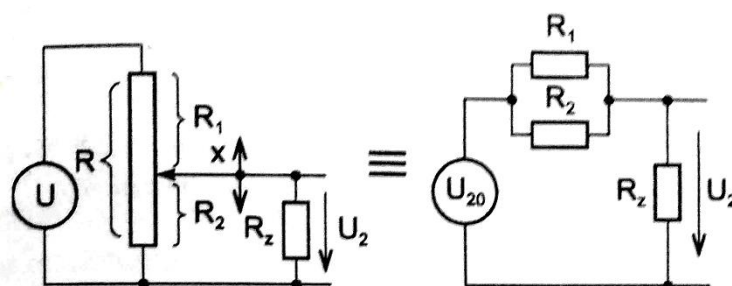
K ověření všech výše zmíněných funkcionalit, musí být možné samostatně rozpojit signálovou cestu od snímače [2].

## 2 Principy snímání polohy

K snímání polohy pedálu je potřeba senzor polohy. Existuje velké množství senzorů polohy, kde každý má své výhody a nevýhody v dané aplikaci. Následující odstavce se proto budou zabývat vybranými principy snímání polohy, které by bylo možné teoreticky použít pro snímání polohy akceleračního pedálu.

### 2.1 Odporové snímání polohy

Tato metoda je založena na odporových potenciometrech. Potenciometr se skládá z jezdcce a odporové dráhy, po které se sune jezdec. Jezdec je tedy pohyblivý kontakt, který dělí odporovou dráhu na dvě části. Při napájení dráhy stabilizovaným napětím, se potenciometr chová jako dělič napětí s proměnným dělicím poměrem závislým na poloze jezdcce [1].



Obr. 2.1: Náhradní schéma potenciometru jako snímače polohy [1]

### 2.1.1 Napěťový dělič

Rovnice (2.1) udává teoretický vztah pro nezatížený napěťový dělič tvořený rezistory  $R_1$  a  $R_2$  obdobný jako na obrázku (2.1).

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

Obrázek (2.1) dále ukazuje, že pokud je k děliči připojena zátěž  $R_Z$ , lze dělič převést do ekvivalentní podoby pomocí Theveninovy věty [9]. Z takového zapojení (jedná se o další nezatížený napěťový dělič) je již zcela patrná rovnice (2.3) pro zatížený napěťový dělič, kde  $U_{20}$  je ekvivalentní napětí dle Theveninovy věty dáno dle rovnice (2.2).

$$U_{20} = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

$$U_2 = U_{20} \cdot \frac{R_Z}{R_Z + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad (2.3)$$

Úpravou těchto rovnic získáme rovnici (2.4):

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2 R_Z}{R_1 R_2 + R_1 R_Z + R_2 R_Z} \quad (2.4),$$

pro zatížený napěťový dělič, kde  $U$  je napětí stejnosměrného stabilizovaného zdroje,  $R_1$  a  $R_2$  jsou odpory tvořící dělič a  $R_Z$  odpor zátěže. Z těchto rovnic vidíme, že bude našim požadavkem mít co největší zátěž  $R_Z$ , aby co nejméně tento dělič zatěžovala. Toho se v praxi dosahuje připojením výstupu děliče na vstup operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení, který má velkou vstupní impedanci [8].

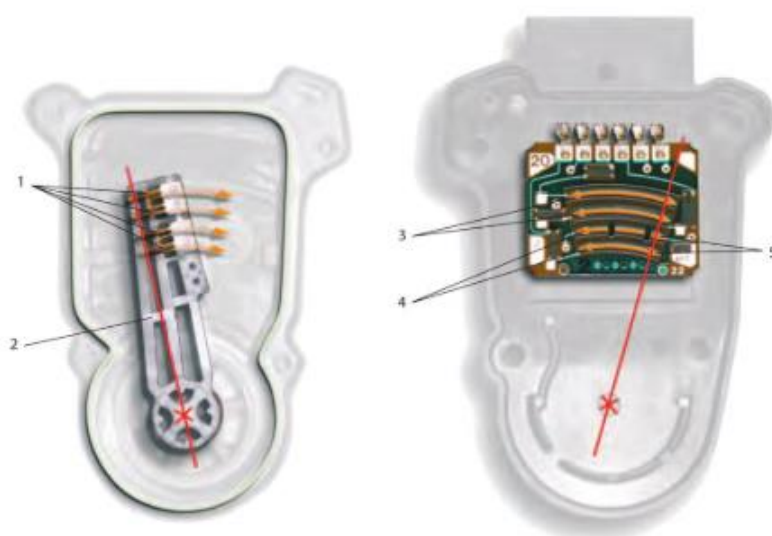
### 2.1.2 Konstrukce potenciometrických snímačů polohy

Konstrukce potenciometrů jsou různé, ale nejčastější jsou potenciometry rotační a posuvné (lineární). Odporové dráhy jsou obvykle vyrobeny z uhlíkové (grafitové) vrstvy. Tento způsob snímání polohy se často využívá pro snímání polohy akceleračního pedálu v automobilech [1][3].



- 1 Raménko se sběracími kontakty
- 2 Destička tištěných spojů s třecími dráhami

Obr. 2.2: Akcelerační pedál z vozu Škoda Fabia II [3]



- 1 sběrací kontakt
- 2 raménko

- 3 třecí dráha snímače G79
- 4 třecí dráha spínače F8
- 5 třecí dráha spínače F60

Obr. 2.3: Detail odporových drah a jezdců ve voze Škoda Fabia II [3]

Příklad provedení je na obrázcích (2.2 a 2.3). Jezdec je tvořen kovovými plíšky na pohyblivém raménku připevněném přímo na osu pedálu. Tyto plíšky dosedají na dvě odporové dráhy, čímž je zkratují. Pohybem plíšků po drahách tedy dochází ke zkracování/prodlužování obou drah, a tvoří tak jeden potenciometr.

Pro zvýšení spolehlivosti jsou v tomto provedení použity dva nezávislé potenciometry tj. 4 odporové dráhy (na obrázku 2.3 vyznačeny číslem 3 a 4). Tyto dráhy mají navíc různé průběhy odporových charakteristik. Další dráhy jsou obdobným konstrukčním řešením použity jako spínače koncových poloh pedálu [3].

### 2.1.3 Vhodnost pro realizaci pedálu elektroformule

Takové provedení je zcela kompatibilní s našimi předpisy [2] z 1. kapitoly. Realizace drah na DPS, stejně tak raménka s jezdcí, obdobně jako na obrázku (2.3), je v našich podmínkách složitá. Proto bychom takový senzor polohy pravděpodobně realizovali jako tandemové spojení dvou potenciometrů v klasickém rotačním provedení připojených svou osou na osu pedálu, nebo na dva potenciometry připojené z každé strany pedálu.

To by si vyžadovalo konstrukční řešení dorazů. Pokud bychom navíc nerealizovali vhodné převody, vzhledem k relativně malému úhlu otáčení pedálu v jeho ose, nevyužívali bychom celou délku odporové dráhy. Jezdec by se tedy pohyboval jen po malé části dráhy. Tím by utrpěla zejména přesnost měření jeho polohy. Proto toto konstrukční provedení v našich podmínkách není zcela vhodné.

## 2.2 Indukční snímání polohy

Indukční senzory jsou senzory, u kterých změna polohy vyvolá změnu indukčnosti cívky. Senzory se dělí na senzory s otevřeným magnetickým obvodem a uzavřeným magnetickým obvodem. Výpočet indukčnosti snímačů s otevřeným magnetickým obvodem je zásadně obtížnější než s uzavřeným obvodem, jelikož je magnetické pole okolo feromagnetika nehomogenní [1]. Následující podkapitoly se zaměřují na přiblížení několika vybraných možností realizace.

### 2.2.1 Indukční senzor s proměnnou vzduchovou mezerou

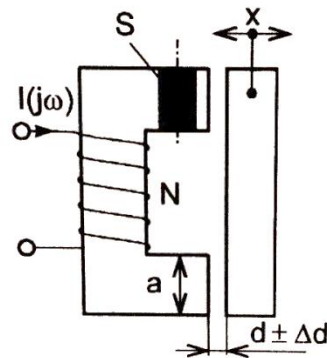
Pokud platí, že  $d \ll a$ , kde  $d$  je velikost vzduchové mezery a  $a$  průměr feromagnetické části obvodu, lze zanedbat rozptyl okolo vzduchové mezery [1]. Zároveň pokud se s frekvencí na indukčnosti budeme pohybovat zhruba do 10 kHz, lze zanedbávat i ztráty ve feromagnetiku. V takovém případě lze indukčnost cívky  $L$  vypočítat vztahem:

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (2.5),$$

kde  $N$  je počet závitů cívky a  $R_m$  je magnetická reluktance, která lze vyjádřit pomocí délky střední siločáry  $l_i$ , plochy průřezu magnetického obvodu  $S_i$  a permeability  $\mu_i$  jako:

$$R_m = \sum_i \frac{l_i}{\mu_i S_i} \quad (2.6) [1].$$





Obr. 2.4: Indukční senzor s proměnlivou vzduchovou mezerou [1]

Pro příklad z obrázku (2.4) platí:

$$R_m = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_{rFe} S_{Fe}} + \frac{2d}{\mu_0 S_d} \tag{2.7} [1],$$

kde  $l_{FE}$  je délka střední siločáry v železném jádru,  $S_{FE}$  je plocha řezu jádra,  $S_d$  plocha řezu vzduchové mezery,  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [1]),  $\mu_{FE}$  relativní permeabilita železa a  $d$  délka vzduchové mezery.

Jelikož první člen z rovnice (2.7) vyjadřující reluktanci magnetického obvodu výrazně menší než druhý člen, vyjadřující reluktanci dvojité vzduchové mezery, je možné jej zanedbat, a do vztahu (2.5) dosadit jen druhý člen, čímž dostaneme vztah (2.8) pro indukčnost senzoru v závislosti na velikosti vzduchové mezery  $d$ , resp. na posuvu  $x$ .

$$L = \frac{N^2}{2d} \mu_0 S_d \tag{2.8} [1]$$

### 2.2.1.1 Vhodnost použití v řešené aplikaci

Tento způsob snímání je vhodný jen pro malé posuvy. To je dáno hyperbolickou závislostí  $L$  na  $d$  ze vztahu (2.8), ze kterého plyne, že největší změna indukčnosti  $L$  bude pro co nejmenší vzdálenosti  $d$ , tzn. že pro větší  $d$  je tedy citlivost velmi malá, případně již žádná, jelikož neplatí podmínka  $d \ll a$ , a magnetický obvod se již uzavírá plně pomocí rozptylových toků [1].

Výše uvedené vlastnosti, a také nutnost vyrobit dva kusy takových senzorů [2], které jsou navíc konstrukčně náročné, jsou důvodem, proč od tohoto způsobu realizace v elektroformuli upustíme.

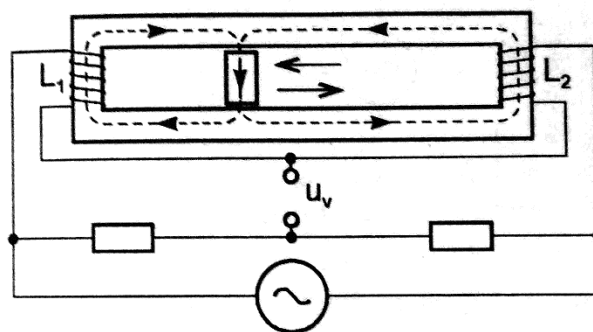
## 2.2.2 Indukční senzor s posuvným magnetickým „zkratem“

Tento senzor se skládá ze dvou cívek navinutých na společném jádře. Tyto cívky jsou v můstkovém zapojení a můstek napájen střídavým napětím. Jádro obsahuje pohyblivý střední sloupek, který tvoří magnetický zkrat. Pokud je střední sloupek uprostřed, tj. v nulové poloze, pak jsou délky středních siločar obou cívek stejné. Je-li stejný průřez sloupku i pohyblivého jádra, a stejný je i materiál, z něhož jsou vyrobeny, pak i magnetické reluktance obou cívek (dle vztahu 2.6) budou stejné. Stejně budou i indukčnosti cívek  $L_1$  a  $L_2$  (rovnice 2.9), mají-li stejný počet závitů  $N$ .

$$L_1 = \frac{N^2}{R_{m1}} = \frac{N^2}{R_{m2}} = L_2 \quad (2.9)$$

Díky tomu je můstek vyvážený a měřené napětí  $U_v$  je nulové. Navíc kvůli diferenčnímu zapojení do můstku se dvounásobně zvýšila citlivost senzoru oproti senzoru s proměnnou vzduchovou mezerou. Dále se také se snížila nelinearita [1].

Změnou polohy sloupku se změní také délky středních siločar a důsledkem je změna indukčností a rozvážení můstku ( $U_v \neq 0$ ).



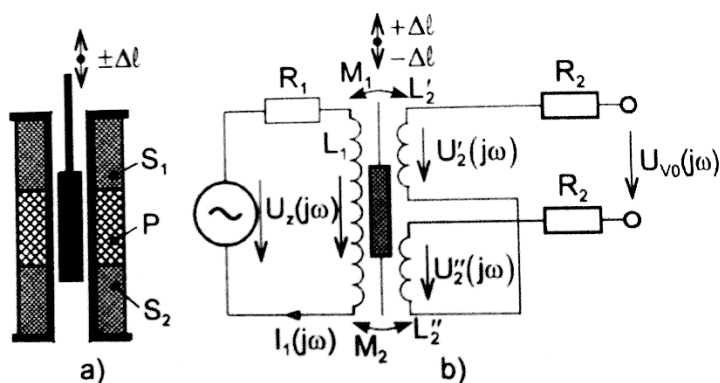
Obr. 2.5: Indukční senzor s pohyblivým magnetickým zkratem [1]

### 2.2.2.1 Vhodnost použití v řešené aplikaci

K snímání je sice využito dvou cívek v diferenčním zapojení, a současně tento senzor odstraňuje nedokonalosti předchozího typu, nicméně stále se jedná o konstrukčně složitý senzor v našich podmínkách nesnadno realizovatelný.

### 2.2.3 Transformátorový indukční senzor

Transformátorový senzor polohy je induktivní senzor s otevřeným magnetickým obvodem. Nejčastěji se realizuje jako diferenční senzor, a to z důvodu možnosti rozpoznání směru pohybu od středové rovnovážné polohy. Základní myšlenkou je pohyblivé jádro uvnitř nemagnetické kostry, na které jsou navinuty jednotlivé cívky, jako je na obrázku (2.6a). Princip je založen na změně vzájemných indukčností  $M_1$  a  $M_2$  mezi primární cívkou a sekundárními cívkami. Napětí na jednotlivých cívkách sekundární strany jsou dány vztahy (2.10) [1].



Obr. 2.6: Transformátorový senzor polohy [1]

a) řez ( $P$  – primární cívka,  $S_1$  a  $S_2$  – sekundární cívky), b) ekvivalentní schéma

$$\overline{U}_2' = j\omega M_1 \overline{I}_1, \quad \overline{U}_2'' = j\omega M_2 \overline{I}_1 \quad (2.10) [1]$$

Z výše uvedeného vztahu (2.10) je tedy patrné, že pokud bude těsnější vazba mezi cívkou  $L_1$  a  $L_2'$ , což znamená, že pohyblivé jádro bude na obrázku (2.6) posunuto nahoru ze základní polohy, napětí  $\overline{U}_2'$  bude vyšší než napětí  $\overline{U}_2''$  na druhé sekundární cívce  $L_2''$  [1].

Fázor proudu  $\overline{I}_1$  na primární straně je dán vztahem:

$$\overline{I}_1 = \frac{\overline{U}_Z}{R_1 + j\omega L_1} \quad (2.11) [1],$$

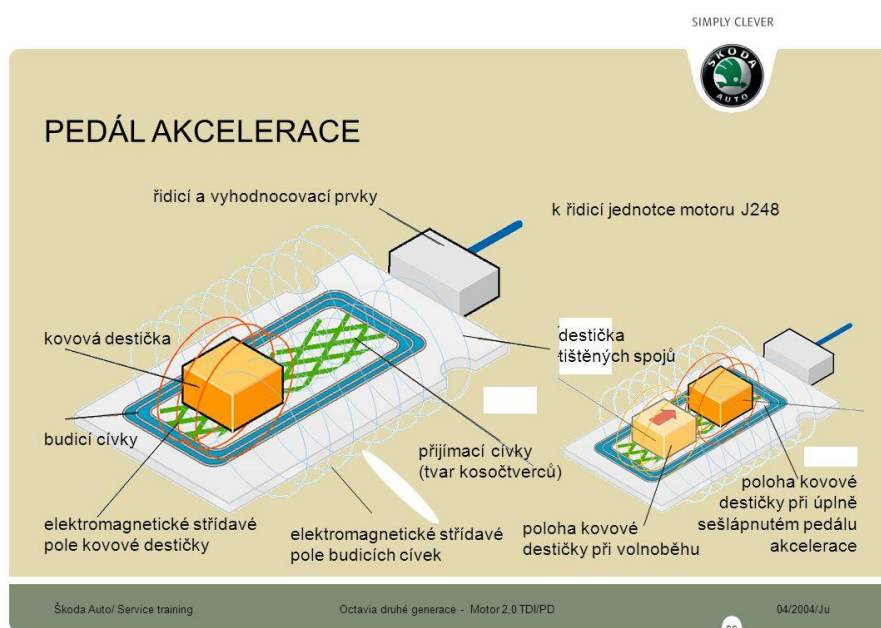
Kde  $\overline{U}_Z$  je fázor napětí střídavého napětového zdroje s frekvencí  $\omega$ ,  $R_1$  odpor stejnojmenného rezistoru a  $L_1$  indukčnost primární cívky. Zmíněné diferenční zapojení znamená sériové spojení sekundárních cívek proti sobě, takže fázor napětí  $\overline{U}_{V0}$  bude roven rozdílu fázorů napětí na jednotlivých sekundárních cívkách.

To lze vyjádřit ze vztahů (2.10 a 2.11) jako:

$$\overline{U_{V0}} = j\omega(M_1 - M_2) \cdot \frac{\overline{U_Z}}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{\overline{U_Z}}{R_1} \cdot \frac{j\omega(M_1 - M_2)}{1 + j\omega\tau} \quad (2.12) [1],$$

kde  $\tau$  je časová konstanta ( $\tau = \frac{L_1}{R_1}$ ) [1].

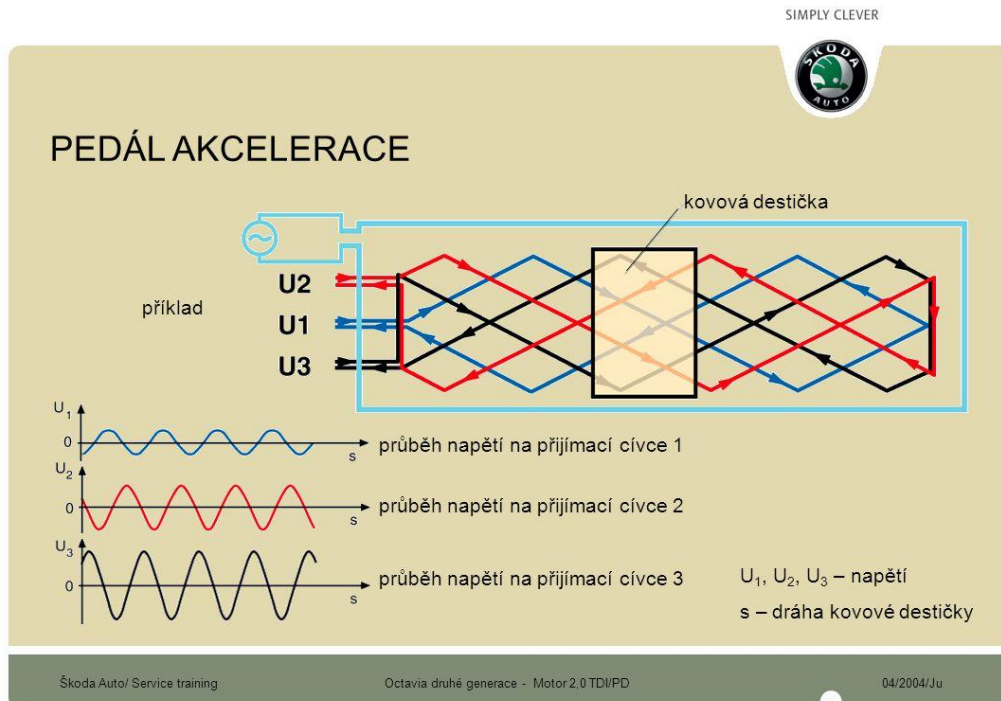
Tento typ senzoru se dá realizovat i na desce plošných spojů a používá se i pro snímání polohy akceleračního pedálu v některých automobilech. Příklad z automobilu Škoda Octavia II je na obrázku (2.7) [4].



Obr. 2.7: Transformátorový senzor realizovaný na DPS ve voze Škoda Octavia II [4]

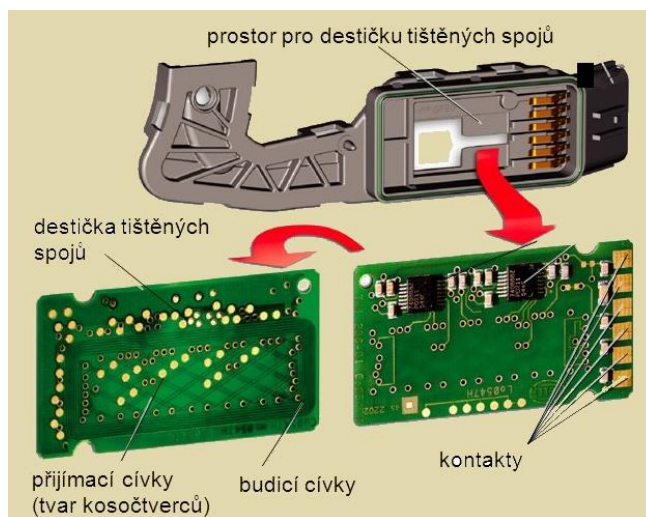
V tomto případě jsou použity tři snímací cívky tvořeny cestami na DPS. Tyto závitky mají tvar kosočtverců a jsou vzájemně prostorově posunuty. Okolo těchto snímacích cívek je vytvořena budící cívka, která je napájena střídavým napětím.

Na akceleračním pedálu je umístěna kovová destička, která tvoří pomyslné jádro transformátoru. Skrz tuto destičku se indukuje elektrické napětí do snímacích cívek. Při změně polohy této destičky, resp. při změně polohy akceleračního pedálu se změní také amplituda indukovaných napětí na snímacích cívkách. To je následně analyzováno vyhodnocovacími prvky a přenášeno do řídicí jednotky motoru [4].



Obr. 2.8: Příklad provedení senzoru a průběhy napětí ve voze Škoda Octavia II [4]

Na obrázku (2.8) lze vidět, že při překrytí destičky co největší plochy daného závitu (na obrázku závit cívky 3), je amplituda napětí indukovaného na této cívce nejvyšší.



Obr. 2.9: Ukázka mechanického provedení senzoru v automobilu Škoda Octavia II [4]

### 2.2.3.1 Vhodnost pro realizaci pedálu elektroformule

Diferenciální transformátorové senzory mají na výstupních cívkách rozdílné napětí, které odpovídá rozdílným přenosovým funkcím, což normu splňuje [2]. Napájecí zdroj by ovšem musel být střídavý, což je další komplikací, vzhledem k používání stejnosměrného palubního napětí z akumulátorů. Proto od této metody také ustoupíme.

## 2.3 Optické snímání polohy

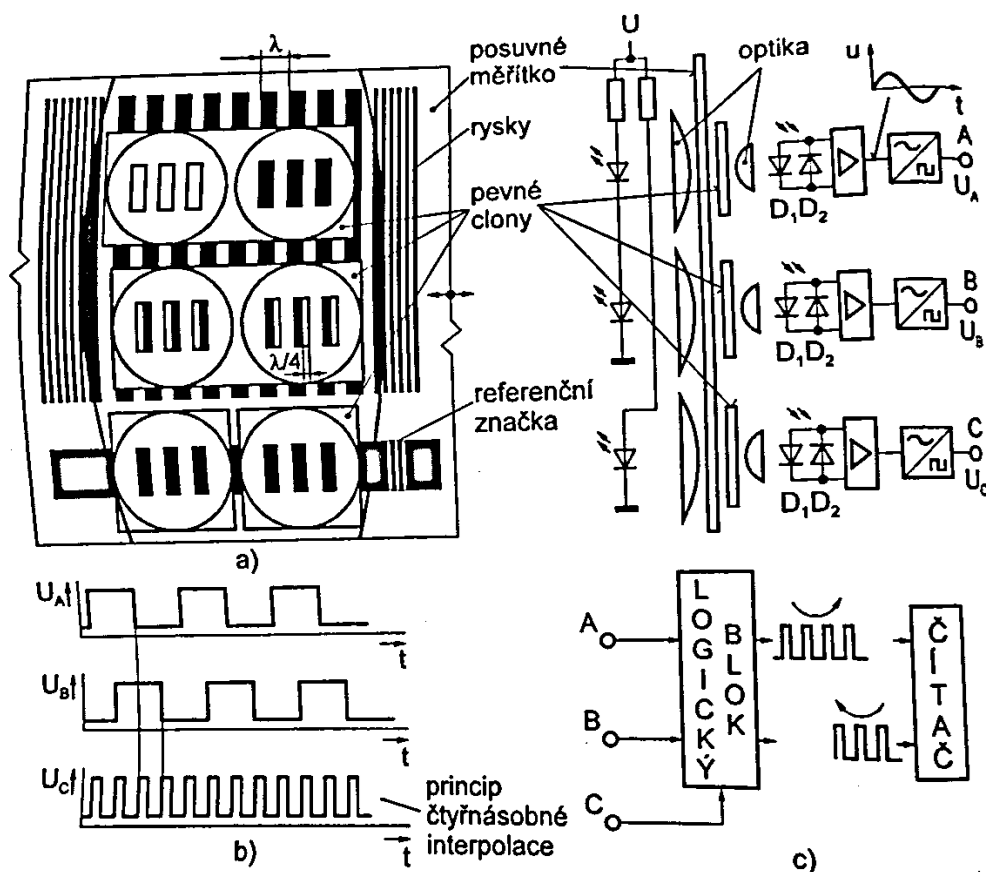
Optické senzory se skládají ze zdroje světelného signálu a detektoru. Pro realizaci měření polohy a posunu se využívá závislosti, které nějakým způsobem ovlivňují světelný paprsek vyslaný zdrojem záření, či přímo vlastnosti zdroje záření. Vzhledem k nutnosti snímání polohy plynového pedálu kontinuálně můžeme rovnou vyřadit dvoustavové optické senzory, a v dalších odstavcích se zabírat senzory, které dokáží informovat o poloze pedálu po celé dráze.

### 2.3.1 Inkrementální optoelektronické senzory

Inkrementální senzory využívají pravítka (případně kotouč), na kterém jsou (např. fotochemickou cestou) vytvořeny průsvitné a neprůsvitné úseky – kroky [1]. Takové pravítka je postavené do cesty světelného paprsku a pevně upevněno na objekt, jehož polohu snímáme. Světelný detektor snímá paprsek procházející skrz pravítka. Při pohybu pravítka, resp. objektu o jeden krok, je tento paprsek přerušen a na detektoru vznikne pulz. Tento pulz je po vhodné úpravě na unifikovaný tvar přiveden na čítač, který inkrementuje. Poloha se tedy měří od referenční polohy, tj. polohy ve které byl čítač naposledy vynulován [1].

Tento způsob s jednoduchým pravítkem s jednou clonící drahou neumožňuje sledovat směr posuvu [1]. Proto se používají pravítka, která mají na sobě více clonících drah s danými kroky obvykle značenými písmenem  $\lambda$ . Snímací detektor je tak tvořen stejným počtem fotocitlivých prvků (kanálů), jako je drah na pravítku. Před prvky jsou umístěny clony s otvory rozměrově shodnými s krokem  $\lambda$  jednotlivých drah. Příklad senzoru se třemi kanály (A, B a C) je na obrázku (2.10).

Clona kanálu B je vůči cloně kanálu A posunuta o  $n\lambda + \lambda/4$ , čímž je dosaženo fázového posunu napěťových pulzů [1]. Sled těchto signálů pak určuje směr posuvu. Pro určení nulové polohy (začátku pravítka) pro reset čítače se využívá další dráhy s referenční značkou (na obr. 2.10 dráha C).



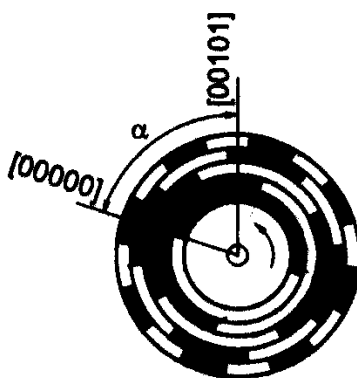
Obr. 2.10: Inkrementální senzor polohy [1]  
 a) uspořádání, b) signály z kanálů c) vyhodnocení směru pohybu

### 2.3.1.1 Nevýhody pro použití v řešení aplikaci

U těchto senzorů je nevýhodou to, že pokud dojde z nějakého důvodu k napačítání falešných impulsů čítačem, nedozvíme se to, dokud nedojde k posuvu přes referenční značku. To je v náročných aplikacích (jako je i použití pro snímání akceleračního pedálu) zcela nevhodné. Pro odstranění tohoto problému byly vyvinuty senzory s prostorovým kódem [1].

### 2.3.2 Optoelektronický senzor polohy s prostorovým kódem

Pravítka, resp. kotouče takových senzorů, jsou navrhovány s více stopami, v nichž se opět střídají průsvitné a neprůsvitné úseky. Rozmístění těchto úseků je dáno vhodným kódem, který musí disponovat snadnou opravitelností. Nejčastěji se obrazce rozmisťují dle Grayova kódu [7], který zajišťuje změnu oproti minulé poloze vždy jen o jeden bit. Jednotková vzdálenost sousedních poloh minimalizuje vliv rušivých vlivů tím, že pokud nastane z jakéhokoliv důvodu změna více než jednoho bitu, lze z předchozí polohy odhalit chybný bit.



Obr. 2.11: Kotouč optoelektronického senzoru polohy s prostorovým kódem [1]

Kódový kotouč nemusí být nutně určen pro optické snímače. Jednotlivé proužky lze nahradit např. vodivými a nevodivými úseky, či magnetickými a nemagnetickými úseky. Magnetické značky se pak mohou číst např. Hallovými senzory [1].

### 2.3.2.1 Vlastnosti senzoru pro použití v řešení aplikaci

Nevýhodou všech optických senzorů je náchylnost na prach. Senzor, který je zanesen prachem, obvykle vykazuje chyby, protože prach zabraňuje správnému prosvícení drážek kotouče. To by bylo možné odstranit nahrazením optického snímání již zmíněnými metodami, které ovšem mají také své nedostatky.

Použití Grayova kódu a fakt, že tento senzor má pro každou polohu absolutní kódové označení, odstraňuje hlavní nevýhody inkrementálního senzoru. Nevýhodou ovšem je vysoká náročnost na přesnost výroby, aby nedocházelo ke vzájemnému čtení signálu sousedních detektorů [1].

## 2.4 Snímání polohy pomocí Hallovy sondy

Hallova sonda využívá tzv. Hallova jevu [5]. Hallův jev se projevuje na nosičích náboje ve vodiči, protékaném elektrickým proudem, umístěném v magnetickém poli, jako příčná síla, která tyto nosiče vytlačuje k boční stěně tohoto vodiče [5].

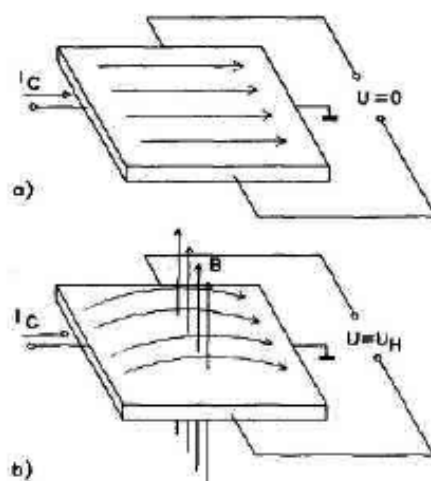
Hallova sonda se realizuje jako polovodičová destička, která má na svých bocích 2 páry protilehlých elektrod. Jedním párem elektrod je skrz polovodičovou destičku protékán stejnosměrný proud. Působením vnějšího magnetického pole v kolmém směru na protékající proud pak na nosiče náboje působí Lorentzova síla ve směru daném pravidlem pravé ruky.



Ta způsobí již zmíněné vychýlení „vláken nosičů náboje“ k boku destičky ve směru této síly. Díky tomu, můžeme naměřit elektrické napětí mezi druhým párem elektrod [5]. Toto napětí se nazývá Hallovo napětí [5]. V případě, že na destičku nepůsobí žádné magnetické pole, nejsou nosiče nábojů nijak vychylovány, a měřené Hallovo napětí bude nulové. Hallovo napětí  $U_H$  je dáno vztahem:

$$U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d} \quad (2.5),$$

kde  $R_H$  je Hallova materiálová konstanta pro daný polovodič,  $d$  tloušťka destičky,  $B$  magnetická indukce, a  $I$  stejnosměrný proud protékající destičkou. Výše zmiňovaný princip Hallovy sondy je znázorněn na obrázku (2.12).

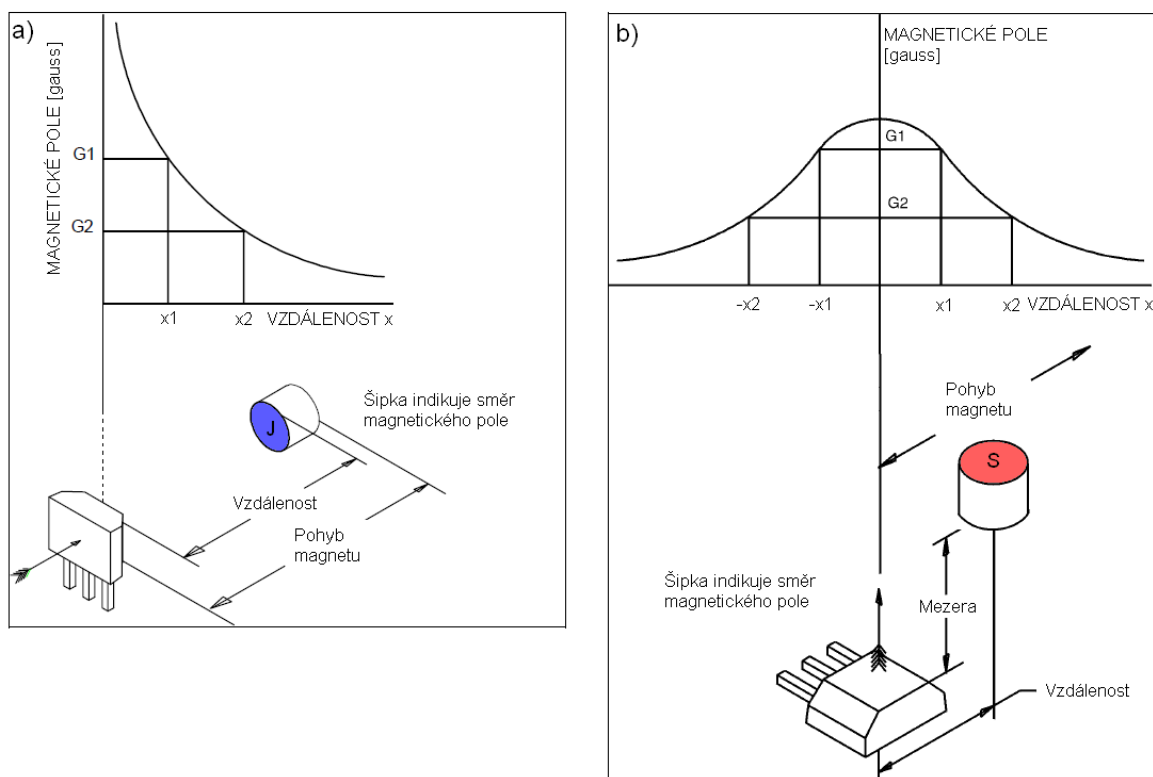


Obr. 2.12: Princip Hallova jevu [5]  
 a) vlákna nosičů náboje bez působení mag. pole,  
 b) vychýlení vláken při působení magnetického pole

Polohu objektu je možné měřit tak, že na sledovaný objekt je umístěn permanentní magnet, jehož magnetické pole sledujeme Hallovo sondou. Při přibližování objektu k sondě, lze pozorovat zvýšení Hallova napětí.

Obrázek (2.13a) ukazuje průběh magnetického pole působícího na Hallovo sondu v závislosti na přibližujícím se magnetu (sledovaném objektu) v kolmém směru. Tato závislosti je hyperbolická.

Pohyb sledovaného magnetu (objektu) podél Hallovy sondy v konstantní vzdálenosti od ní, znázorňuje vedlejší obrázek (2.13b). Pro snímání polohy pedálu bude použit tento způsob – použití dvou Hallových sond.



Obr. 2.13: Průběhy magnetického pole působícího na sondu v závislosti na vzdálenosti od Hallovy sondy, upraveno z [13]

- a) Sledování polohy objektu přibližujícího se k sondě v kolmém směru  
 b) Sledování polohy objektu pohybujícího se ve stejné vzdálenosti od sondy ve směru podélném

Vyráběné Hallovy sondy se produkují s integrovanými diferenciálními zesilovači [13] a různými typy výstupů. Nejběžněji se používají pro snímání otáček elektromotorů, spalovacích motorů, pro snímání otáček kol automobilů (ABS, ASR) apod. Takové aplikace používají Hallovu sondu jen jako spínač ekvivalentní např. jazýčkovému kontaktu, tzn. že je připojena ke komparátoru s hysterezí a obvod klopí jen mezi dvěma stavy – digitální výstup.

#### 2.4.1 Vlastnosti Hallovy sondy pro realizaci senzoru polohy

Předností technologie snímání pomocí Hallovy sondy oproti jiným je především velikost a nepotřebnost pevného spojení mezi pedálem a DPS (stačí umístit na pedál magnet). Při použití dvou Hallových sond vzájemně posunutých v prostoru bude snadno splněn i požadavek normy FSG [2]. Při oddělení signálových linek je tato metoda v plném

souladu s uvedenou normou [2]. Hallova sonda dále nepodléhá (na rozdíl např. od odporových senzorů) mechanickému opotřebenému.

Překážkou v použití takových senzorů může být možnost rušení okolním magnetickým polem, případně i zanesení sondy např. magnetickým prachem. Rušení je možné snížit realizací vhodného odstínění senzorů.

Po zhodnocení výše uvedených vlastností vychází použití dvojice Hallových sond pro snímání polohy akceleračního pedálu jako nejvhodnější a konstrukčně nejjednodušší z uvedených principů snímání polohy. Proto takový způsob bude použit.

### 3 Návrh elektrického schématu

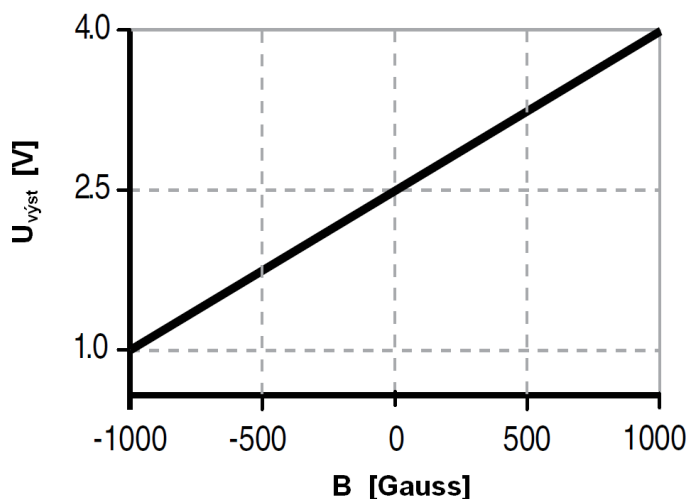
Cílem návrhu je získat čidlo polohy akceleračního pedálu, které bude napájené z palubní sítě elektrovozidla 12 V. S řídicím systémem vozidla má čidlo komunikovat po sběrnici CAN [10]. To vyžaduje použití procesoru schopného komunikovat po této sběrnici. Jelikož budou, jako senzory polohy, použity Hallové sondy, jež mají analogový výstup, musí být součástí návrhu také podpůrné analogové obvody s A/D převodníkem. Celý senzor navíc musí splňovat požadavky normy [2] z 1. kapitoly. Následující odstavce se proto věnují výběru vhodných součástí a popisu návrhu čidla.

#### 3.1 Výběr komponentů pro snímací část

Snímací část, jak již bylo zmíněno, tvoří dvojice Hallových sond. Tyto sondy musí dle normy [2] mít rozdílné charakteristiky. Toho je dosaženo posunutím Hallových sond vůči sobě (viz kapitola 3.3).

##### 3.1.1 Hallova sonda SS49E

Kritérii pro výběr Hallové sondy bylo zejména napájecí napětí, citlivost, rozsah měření a linearita. Výběr padl na sondu SS49E od firmy Honeywell. Sonda má ze všech zvažovaných kandidátů nejvyšší citlivost (1,4 mV/Gauss), a také největší rozsah  $\pm 1000$  Gauss při napájecím napětí 5 V [11]. Sonda má lineární výstup, jehož výstupní charakteristika je znázorněna na obrázku (3.1).

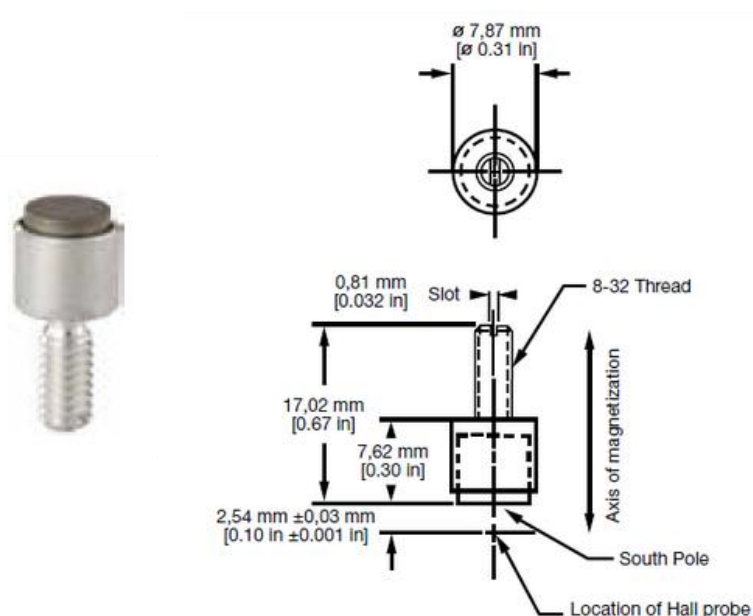


Obr. 3.1: Výstupní charakteristika SS49E při napájení 5 V, upraveno z [11]

### 3.1.2 Výběr permanentního magnetu

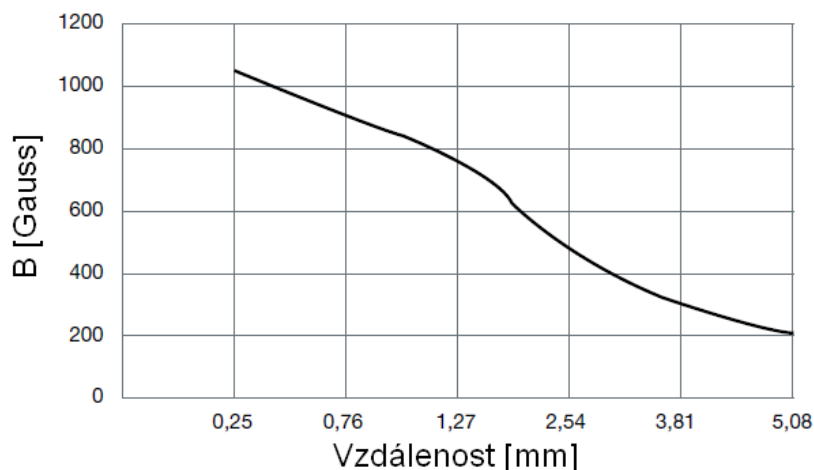
Firma Honeywell, která je výrobcem Hallových sond, dodává také magnety vhodné k použití v kombinaci s těmito sondami. Jedná se o magnety řady MG [19].

Pro snadnou montáž magnetu na pedál by bylo vhodné, aby byl magnet nějakým způsobem připravený k přichycení. Proto byl zvolen magnet 102MG11 (obr. 3.2).



Obr. 3.2: Magnet 102MG11 a jeho rozměry [19]

Tento magnet je usazený v pouzdře se závitem, pomocí kterého jej bude možné uchytit k pedálu. Magnet má průměr necelých 8 mm a je orientován k sondě jižním pólem. Charakteristika magnetické indukčnosti v závislosti na vzdálenosti je na obrázku (3.3).



Obr. 3.3: Magnetická indukce magnetu 102MG11 v závislosti na vzdálenosti [19]

Z charakteristiky je viditelné, že ve vzdálenosti 0,25 mm dosahuje magnetická indukčnost magnetu hodnoty 1050 Gauss [19]. Charakteristika ukazuje přibližování magnetu v přímém směru k sondě, nicméně naše aplikace využívá posuvného pohybu (viz obr. 2.13b).

### 3.2 Napájecí zdroje

Zařízení je napájeno z palubní sítě elektroformule s napětím 12 V DC. Na vstupu je zařízení chráněno vratnou pojistkou. Dále jsou zde umístěny odrušovací tlumivky, a také transil s prahovým napětím 16 V pro ochranu proti přepětí.

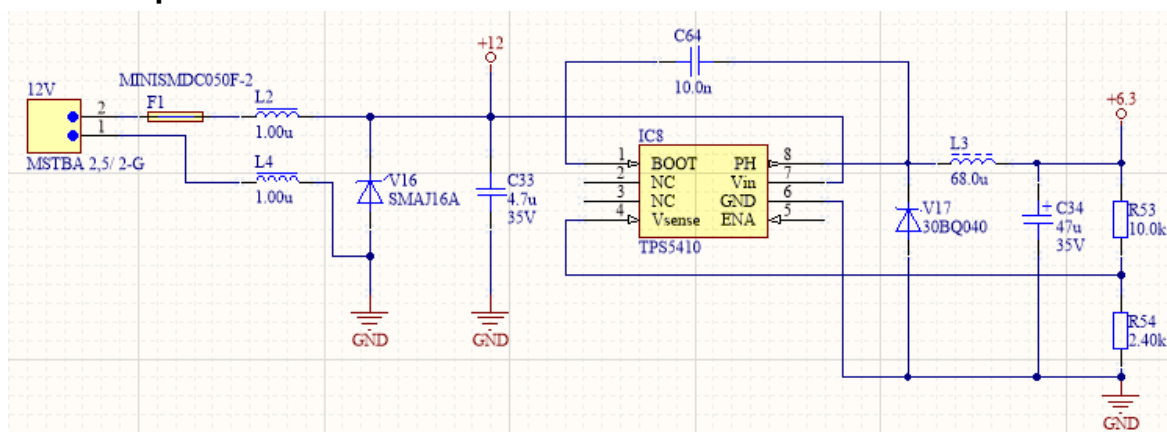
Pro potřeby napájení Hallových sond a operačních zesilovačů je nutné získat stabilizované napětí 5 V, a pro napájení procesoru 3,3 V. Snižovat napájecí napětí 12 V na tato napětí lineárními stabilizátory by, zvláště při pohonu z akumulátorů, nebyla efektivní cesta. Proto se jeví použití DC-DC konvertoru jako lepší varianta. Ovšem z velikostních i cenových důvodů je zase nevýhodné použít dva samostatné DC-DC konvertory pro každé napětí (3,3 a 5 V) zvlášť. Nevýhodou by také bylo relativně velké zvlnění výstupních napětí vlivem spínání. Proto je zvoleno kompromisní řešení sestávající z kaskády obou zmíněných principů.

Palubní napětí 12 V je přivedeno na DC-DC konvertor, který je řízený obvodem TPS5410 (IC8). Jedná se o step-down měnič s volně nastavitelným výstupním napětím. Toto výstupní napětí je nastaveno děličem R53-R54 dle (3.1) na 6,3 V. Toto napětí je pak přivedené na lineární stabilizátor 5 V (IC10). Ten poskytuje napájení sondám, operačním

zesilovačům, ale také dalšímu lineárnímu stabilizátoru na 3,3 V, vytvářejícímu napětí pro procesor. Díky kaskádnímu řešení budou napěťové úbytky na stabilizátorech jen 1,3 a 1,7 V, jsou tedy malé. Díky tomu bude malý, i na nich měřený, ztrátový výkon.

Lineární stabilizátory následně odstraňují většinu zvlnění z předřazeného step-down měniče. Dostupnost obou stabilizovaných napětí je pak signalizována zelenými svítivými diodami (ve schématu značeny 3V3 a 5V).

### 3.2.1 Step-down konvertor TPS5140



Obr. 3.4: Zapojení ochrany a step-down konvertoru TPS5140

Obvod TPS5140 má v sobě integrovaný MOSFET s kanálem typu N. Ten působí jako spínač mezi piny 7 (Vin) a 8 (PH) [16]. Pokud je tento tranzistor sepnutý, dochází k akumulaci energie v indukčnosti  $L3$  a proud indukčností narůstá. V tuto chvíli dioda  $V17$  nevede, jelikož je polarizována závěrně. Po vypnutí tranzistoru (rozepnutí spínače) nemůže proud indukčností okamžitě zaniknout, jelikož je stavovou veličinou. Aby proud nezaničl okamžitě, cívka  $L3$  otočí svou polaritu napětí. Začne se tak chovat jako zdroj. Dioda  $V17$  je díky tomu ve vodivém stavu a umožňuje průtok proudu z indukčnosti do výstupního kondenzátoru  $C34$  a zátěže. Dochází tak k přesunu energie z indukčnosti do kapacity a zátěže.

Dioda  $V17$  je typu Schottky. Je tak zvolena z důvodu její rychlosti, a také z důvodu jejího malého prahového napětí. Díky tomu je na ní menší výkonová ztráta a účinnost konvertoru je tak vyšší.

Na výstupu je zapojen napěťový dělič  $R53$ - $R54$  tvořící zápornou zpětnou vazbu. Velikost výstupního napětí tak určuje dělicí poměr tohoto děliče. Při návrhu děliče se má dle

datasheetu [16] zvolit  $R_{53} = 10\text{ k}\Omega$ . K této hodnotě  $R_{53}$  se dle vztahu (3.1) dopočte druhá hodnota odporu  $R_{54}$ .

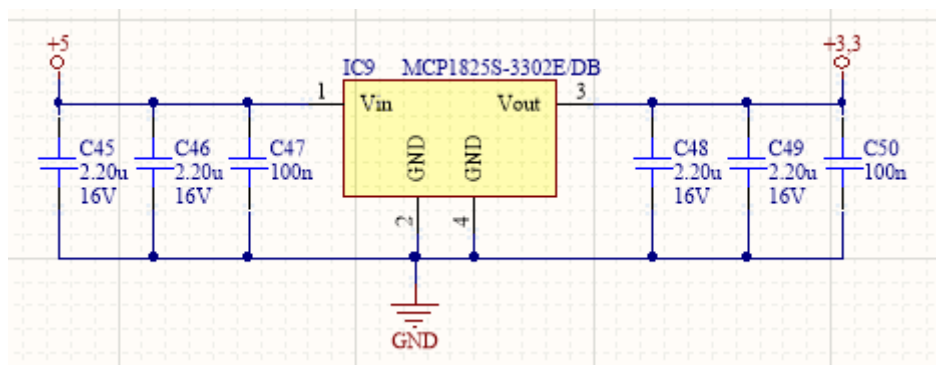
$$R_{54} = \frac{R_{53} \cdot 1,221}{U_{OUT} - 1,221} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 1,221}{6,3 - 1,221} = 2,4\text{ k}\Omega \quad (3.1) [16]$$

Napětí vznikající na odporovém děliči je dále vedeno na pin 4 (Vsense). V čipu toto napětí vede do rozdílového zesilovače spolu s napětím z integrované napěťové reference 1,221 V typu bandgap [16]. Napětí za zesilovačem odpovídá regulační odchylce, čili chybě. Tento signál se pak komparuje s pilovým signálem, a je tak tvořena pulsně šířková modulace s určitou střídou. Tou je řízena gate tranzistoru. Frekvence PWM je u tohoto obvodu neměnná a je dána integrovaným oscilátorem 500 kHz řídicím generátorem pily [16].

Kondenzátor  $C64$  je tzv. Boost Capacitor [16]. Tento kondenzátor zajišťuje napětí potřebné k řízení gate tranzistoru.

### 3.2.2 Lineární stabilizátory MCP1825 a MCP1826

Jak je uvedeno výše, napětí z DC-DC konvertoru 6,3 V je vedeno na kaskádu dvou lineárních stabilizátorů 5 a 3,3 V. Jejich zapojení je podobné a je uvedeno na obrázku (3.5).



Obr. 3.5: Zapojení lineárního stabilizátoru MCP1825

V návrhu jsou použity varianty s pevným výstupním napětím. Tyto stabilizátory obsahují mezi piny 1 (Vin) a 3 (Vout) regulační PMOS tranzistor [17], na němž je realizován takový napěťový úbytek, aby napětí na výstupu odpovídalo konstantnímu požadovanému napětí.

Obdobně, jako tomu je u TPS5140, tvoří zpětnou vazbu dělič napětí. Zde ovšem není externí, ale je integrovaný. Obvod také obsahuje napěťovou referenci a rozdílový zesilovač [17]. Signál úměrný chybě řídí přímo otevření tranzistoru a reguluje tak napětí na výstupu.

Obvod obsahuje i teplotní a nadproudovou ochranu. Topologie je podobná známým obvodům řady 78xx.

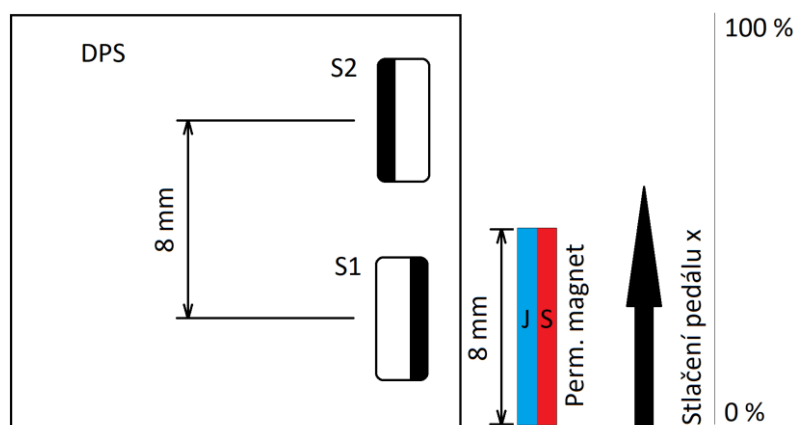
### 3.3 Návrh rozložení Hallových sond a průběhy napětí

Tato podkapitola je rozložena do dvou částí. První je prvotní teoretický návrh použitý pro návrh první verze plošného spoje. Po oživení vyplynuly jisté nedostatky. Pro pochopení chyb je proto v první části vysvětlený postup tohoto návrhu. Nápravě nedostatků se pak věnuje část druhá (kapitola 3.3.2).

#### 3.3.1 Prvotní návrh rozložení Hallových sond

Jak bylo předesláno výše, tento návrh se ukázal jako chybný, a je zde uvedený pro úplnost a pochopení chyb. Funkční návrh je na obrázku (3.8) v kapitole 3.3.2.

První návrh rozložení snímacích sond senzoru je na obrázku (3.6). Dvojice Hallových sond je umístěna na DPS tak, že jedna sonda (na obrázku S2) je umístěna opačně, než první sonda (S1). Permanentní magnet je umístěn na pedálu, takže jeho poloha se sešlápnutím mění ve směru naznačené šipky.



Obr. 3.6: Znárodnění polohy a orientace snímacích sond a perm. magnetu – první (chybná) varianta

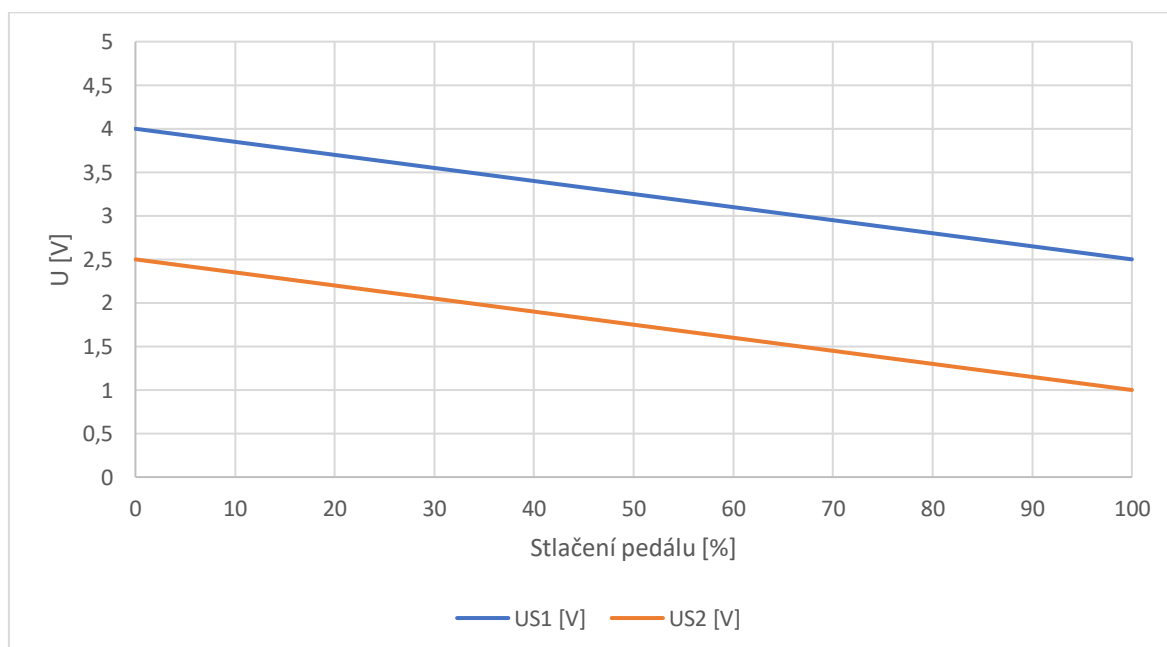
Z obrázku (3.6) je vidět, že orientace magnetu připevněného na pedálu se vůči sondám během sešlápnutí nemění. Z charakteristiky (3.1) vyplývá, že při magnetické indukci



+1000 Gauss (+ znamená jižní pól k sondě [13]), je napětí na výstupu sondy 4 V. Sonda S1 by tedy měla mít v ideálním případě na výstupu 4 V při nulovém stlačení pedálu. Na sondu S2 by při nulovém stlačení pedálu neměla působit žádná magnetická indukce z permanentního magnetu a výstupní napětí by mělo být 2,5 V.

Při plném stlačení pedálu by mělo na sondu S2 působit největší magnetické pole permanentního magnetu, a to by mělo způsobit největší výchylku napětí na výstupu. Jelikož je sonda otočená oproti S1 o  $180^\circ$ , je působení magnetické indukce +1000 Gauss ve stejném smyslu, jako na sondu S1, vyhodnoceno sondou S2 jako -1000 Gauss. V ideálním případě by tak na výstupu S2 mělo být napětí 1 V. Na sondu S1 by pak ideálně nemělo působit žádné pole z permanentního magnetu, a tudíž by měla mít na výstupu napětí 2,5 V.

V případě stlačení pedálu na 50 % bylo předpokládáno, že pokud bude dodržena osová vzdálenost sond od sebe rovná šířce magnetu, pak na obě sondy bude působit magnetické pole magnetu přibližně z poloviny, ideálně tedy magnetickou indukcí 500 Gauss. To se později ukázalo jako zásadní chyba. Z výstupní charakteristiky sond (3.1) by potom plynulo, že výstupní napětí na S1 bude 3,25 V a na S2 1,75 V. Předpokládané průběhy napětí na výstupech sond v závislosti na stlačení pedálu jsou znázorněny v grafu (3.7).

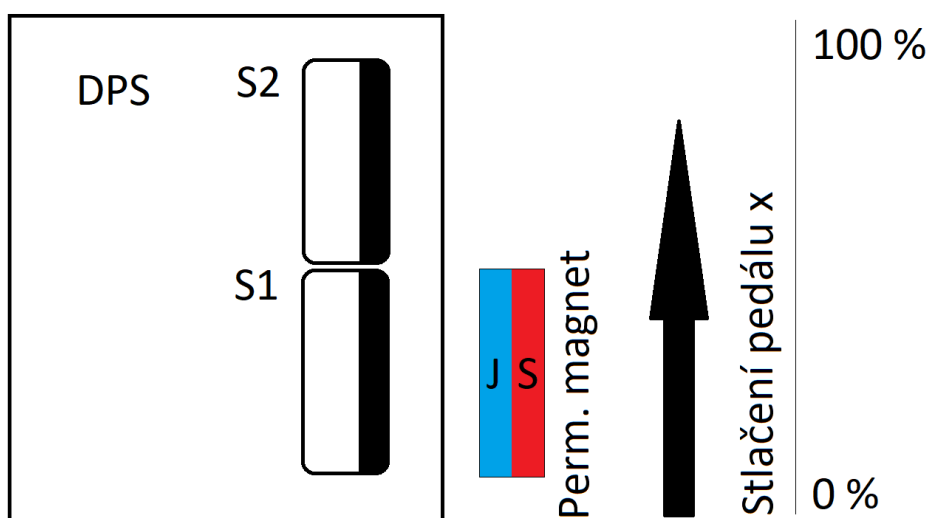


Obr. 3.7: Předpokládaná závislost výstupního napětí Hallových sond na stlačení pedálu

### 3.3.2 Náprava chyb vzniklých při prvním návrhu

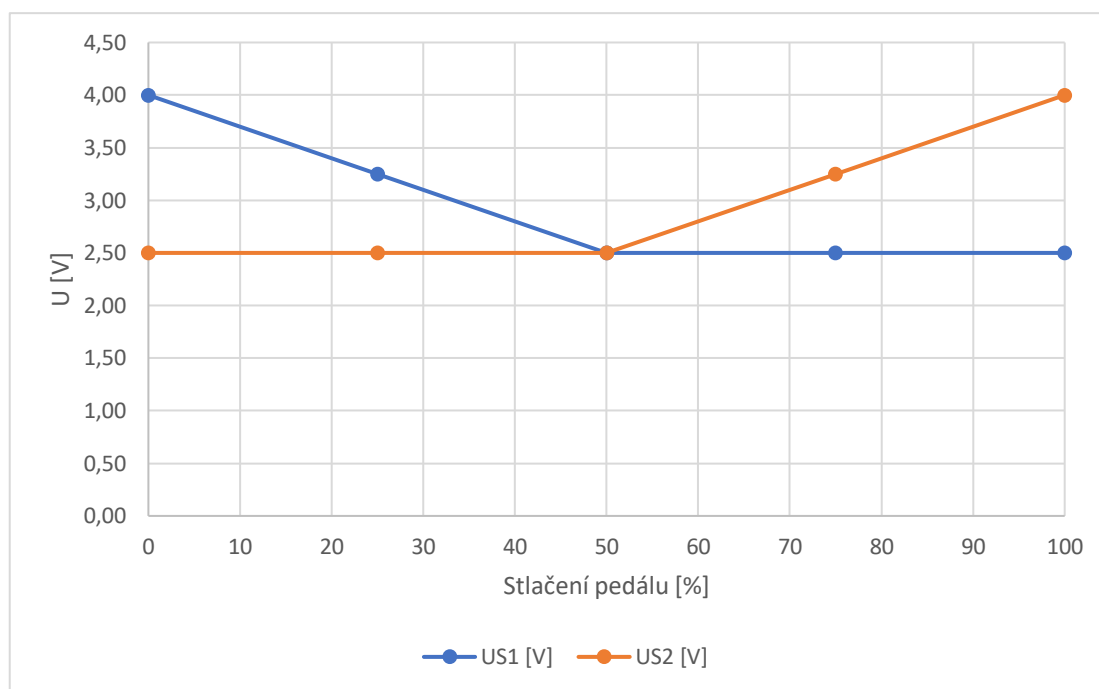
Chybou na výše popsaném předpokladu byla právě geometrie snímání sond. Tento předpoklad vycházel z toho, že sondy mají tak široký úhel snímání, že při vzdálenosti středů sond od sebe, stejně jako je šířka magnetu, by byly vybuzeny na polovinu.

Ve skutečnosti sondy „vidí“ v podstatě jen přímo před sebe. Z toho důvodu je nutné sondy přemístit přímo vedle sebe, aby byl pokryt celý prostor, kde se magnet pohybuje a nevznikala „slepá místa“. Toho bylo na prvním prototypu DPS dosaženo přiohnutím sond k sobě.



Obr. 3.8: Upravené rozložení snímacích sond

Dále se jeví jako výhodné mít sondy otočené obě stejně. Na prototypu je proto sonda S2 dodatečně otočena. Takové rozložení je naznačeno na obrázku (3.8). Po těchto úpravách je výsledná charakteristika znázorněna na obrázku (3.9).



Obr. 3.9: Výstupní napětí z jednotlivých sond v závislosti na stlačení pedálu (posunu magnetu)

### 3.4 Analogová část snímače

Na vstupy analogového digitálního převodníku jsou přivedeny celkem 3 signály. Dva reprezentují napětí z jednotlivých sond, a třetí, analogově upravený signál, reprezentuje přímo míru stlačení pedálů.

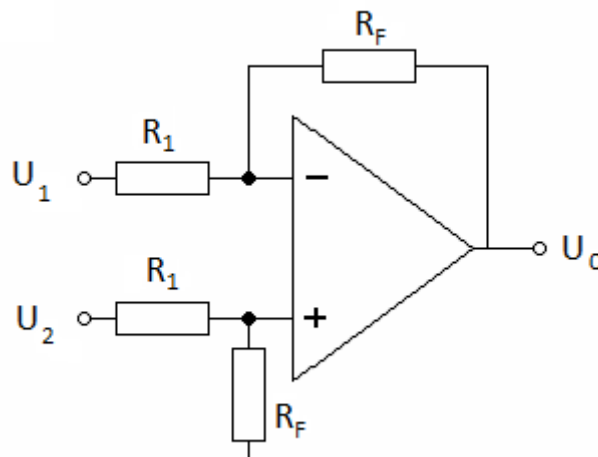
Operační zesilovače mají důležitý parametr SR (Slew Rate), neboli rychlost přeběhu. Aby bylo zajištěno, že operační zesilovače budou stíhat přebíhat, jsou rychlosti změn omezeny aktivním filtrem typu dolní propust. Mezní kmitočet filtru je zvolen na 100 Hz. Takové omezení zároveň eliminuje možné drobné kmity nohy jezdce, případně rušení.

Další zpracování signálů je, jak bylo naznačeno výše, dvojitě. Jedna větev upravuje jednotlivé signály ze sond tak, aby byl plně využit napěťový rozsah ADC (0 až 3,3 V), čímž je zajištěno nejvyšší rozlišení. Druhá větev připravuje signály ze sond tak, aby po přivedení signálu na diferenční zesilovač bylo výstupní diferenční napětí úměrné stlačení pedálu.

#### 3.4.1 Úprava přímých signálů ze sond pro ADC

Aby bylo zajištěno nejvyšší rozlišení ADC, který má vstupní napěťový rozsah (0 až 3,3 V), musí být signály z jednotlivých sond (3.9) posunuty tak, aby nejnižší napětí daného

signálu bylo co nejbližší 0 V a nejvyšší napětí maximálně 3,3 V. To je zajišťováno pomocí OZ v zapojení jako rozdílový (diferenční) zesilovač (obr. 3.10).



Obr. 3.10: Zapojení OZ jako rozdílového zesilovače, upraveno z [12]

Napětí na výstupu takového zapojení ( $U_0$ ) je dáno dle vztahu (3.2):

$$U_0 = A \cdot (U_2 - U_1) = \frac{R_F}{R_1} \cdot (U_2 - U_1) \quad (3.2) [8],$$

kde  $A$  znázorňuje rozdílové zesílení, které se nastavuje poměrem odporů rezistorů  $R_F$  a  $R_1$ .

Jak je vidět ze vztahu (3.2), zapojení realizuje rozdíl napětí. Pro zmíněnou potřebu posunu charakteristiky dolů stačí od přiváděné hodnoty napětí (neinvertující vstup) odečíst vždy konstantní napětí přivedené na druhý (invertující) vstup. Toto referenční napětí by mělo být tak velké, jako minimální napětí, kterého může dosáhnou signál na prvním (neinvertujícím) vstupu. To je z toho důvodu, aby rozdíl v případě přivedení tohoto minimálního napětí dal právě 0 V na výstupu. Z průběhů na obrázku (3.9) je vidět, že nejnižší výstupní napětí ze sond je v obou případech 2,5 V. Z toho důvodu je vhodné, aby konstantní referenční napětí bylo oněch 2,5 V. K tomu je použit integrovaný obvod, poskytující konstantní referenční napětí 2,5 V dále zvaný jako napěťová reference.

Diferenční zesílení je pak nastaveno tak, aby nejvyšší výstupní napětí ze sondy po odečtení referenčního dávalo 3,3 V.

Nejvyšší možné napětí na výstupu tohoto zapojení v případě bez zesílení ( $A = 1$ ) je po odečtení napěťové reference 1,5 V. Abychom toto napětí zvýšili na 3,3 V, je třeba nastavit zesílení  $A$  na 2,2 (viz výpočet 3.3).

$$A = \frac{U_{ADCmax}}{U_{S1max} - U_{REF}} = \frac{3,3}{4 - 2,5} = \frac{3,3}{1,5} = 2,2 \quad (3.3)$$

ze vztahu (3.2):

$$A_3 = \frac{R_1}{R_3}$$

zvoleno  $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ , pak:

$$R_1 = A \cdot R_3 = 2,2 \cdot 10 \cdot 10^3 = 22 \text{ k}\Omega$$

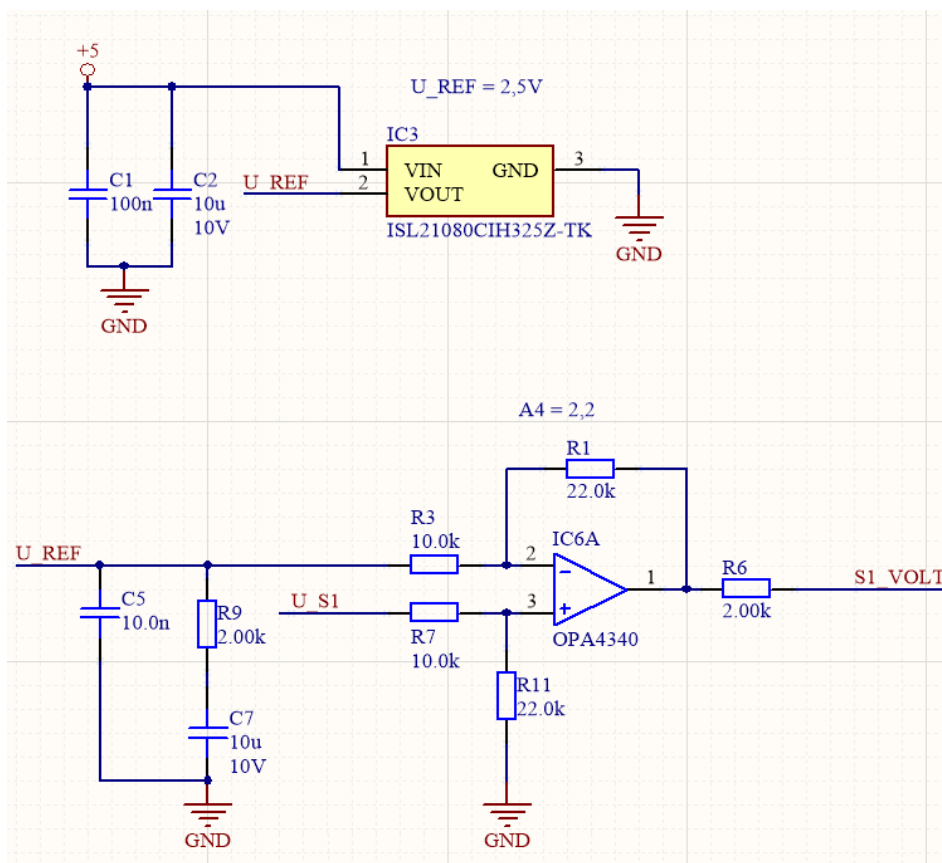
Aby platil vztah (3.2) musí být splněna podmínka ve vztahu (3.4):

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_{11}}{R_7} \quad (3.4) [12],$$

kterou lze nejjednodušeji splnit zvolením:

$$R_1 = R_{11} = 22 \text{ k}\Omega \text{ a } R_3 = R_7 = 10 \text{ k}\Omega$$

Obrázek (3.11) zobrazuje takto navržené zapojení rozdílového zesilovače společně s napěťovou referencí 2,5 V ( $IC3$  na obr. 3.11). Naprosto shodně je řešena úprava druhého signálu ze sondy S2.



Obr. 3.11: Zapojení diferenčního zesilovače s napětovou referencí

Pozn.: Jelikož první návrh vycházel ze zmíněných špatných předpokladů, je na první realizované DPS místo pro dvě napětové reference pro každou sondu zvlášť. To bylo realizováno z důvodu otočení jedné sondy o  $180^\circ$  oproti druhé. Pak by byly potřeba reference dvě. Funkční prototyp má tedy referenci jen jednu společnou, propojenou na oba vstupy.

### 3.4.2 Zpracování signálů pro získání signálu úměrnému stlačení pedálu

Aby výsledný signál se stlačení pedálu rostl, je vhodné signál z první sondy zmenšit oproti druhému signálu, který je vhodné naopak zesílit. Poté je rozdíl těchto signálů vždy kladný a s posunem pedálu (magnetu) od sondy S1 k sondě S2 roste. Tento rozdíl získáme pomocí OZ, v již zmiňovaném zapojení jako rozdílový zesilovač. Signál (rozdíl) na výstupu tohoto zesilovače je požadovaný signál úměrný stlačení pedálu.

Zesílení signálu ze sondy S2 (označený jako  $U_{S2}$ ) bylo navrženo tak, aby se maximální napětí, kterého může dosáhnout, co nejvíce blížilo napájecímu tj. 5 V. Z poměru těchto 5 V a maximálního napětí na výstupu sondy tj. 4 V bylo vypočteno ideální potřebné zesílení. První

rezistor  $R_{18}$  byl zvolen. Druhý rezistor  $R_{13}$  poté dopočten ze vztahu pro neinvertující zesilovač. Vypočtený rezistor byl pro jistotu ve schématu nahrazen nižším z řady vyráběných odporů z důvodu úbytku na operačním zesilovači. Reálné zesílení vycházející ze zvolených hodnot je pak  $A_2 = 1,22$ . Výše popsany výpočet je uvedený níže a vychází z uvedených vztahů (3.5 a 3.6).

$$A_2 = \frac{U_{cc}}{U_{S2max}} = \frac{5}{4} = 1,25 \quad (3.5)$$

$$U_0 = U_{S2} \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{18}}\right) \Rightarrow A_2 = \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{18}}\right) \quad (3.6) [8]$$

zvoleno  $R_{18} = 15 \text{ k}\Omega$

$$A_2 - 1 = \frac{R_{13}}{R_{18}} \rightarrow 0,25 = \frac{R_{13}}{R_{18}} \Rightarrow R_{13} = 0,25 \cdot R_{18} = 3,75 \text{ k}\Omega$$

→ nižší v řadě: 3,3 kΩ

pak skutečné zesílení  $A_2$  je:

$$A_2 = \left(1 + \frac{3,3 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^3}\right) = 1,22$$

Pro zmenšení signálu ze sondy S1 (napětí  $U_{S1}$ ), je použit napěťový dělič  $R_{23}$ - $R_{26}$  (obr. 3.12). Jeho poměr  $A_1$  je odvozený tak, aby se výsledné napětí (značeno  $U_1$ ) při nulovém stisku pedálu (tzn. magnet je přímo před sondou) po rozdílu s napětím  $U_2$  v diferenciálním zesilovači tento rozdíl rovnal nule. Jinak řečeno, aby se oba zpracované signály odečetly, je nutné, aby tento signál dosahoval maximálně nejnižší napěťové úrovně druhého signálu.

Pro co nejmenší zatížení tohoto napěťového děliče je na jeho výstup připojen OZ v zapojení, jako napěťový sledovač. Výpočet pak může počítat, jako kdyby byl dělič nezatížený a je uveden níže (3.7), přičemž pomocí vztahu pro napěťový dělič (2.1) z 2. kapitoly získáváme potřebné rezistory.

$$A_1 = \frac{U_{2min}}{U_{S1max}} = \frac{U_{S2min} \cdot A_2}{U_{S1max}} = \frac{2,5 \cdot 1,22}{4} = 0,76 \quad (3.7)$$

$$U_1 = U_{S1} \cdot \frac{R_{26}}{R_{23} + R_{26}} \Rightarrow A_1 = \frac{R_{26}}{R_{23} + R_{26}}$$

zvoleno  $R_{26} = 10 \text{ k}\Omega$ , pak:

$$R_{23} = R_{26} \cdot \left( \frac{1}{A_1} - 1 \right) = 10 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{1}{0,76} - 1 \right) = 3,2 \text{ k}\Omega, \quad \text{vyšší v řadě: } 3,3 \text{ k}\Omega,$$

proto reálné zesílení, resp. zeslabení  $A_I$  je:

$$A_1 = \frac{R_{26}}{R_{23} + R_{26}} = \frac{10 \cdot 10^3}{3,3 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} = 0,75$$

Takto upravená napětí jsou přivedena na vstup diferenčního zesilovače. Napětí  $U_1$  je přivedeno na invertující vstup a  $U_2$  na neinvertující. Rozdílové zesílení  $A_3$  je zvoleno tak, aby při maximálním sešlápnutí pedálu rozdílový signál dosáhl maximálního vstupního napětí ADC tj. 3,3 V. Při maximálním sešlápnutí je vstupní napětí rozdílového zesilovače  $U_1$  na svém minimu (značeno  $U_{1min}$ ) a napětí  $U_2$  je nejvyšší (značeno  $U_{2max}$ ). Výpočetní vztah (3.8) je níže, a kombinací se vztahem pro diferenční zesilovač (3.2) získáváme první potřebné hodnoty rezistorů (podobně jako ve výpočtech 3.3).

$$\begin{aligned} U_{1min} &= A_1 \cdot U_{S1min} = 0,75 \cdot 2,5 = 1,875 \text{ V} \\ U_{2max} &= A_2 \cdot U_{S2max} = 1,22 \cdot 4 = 4,88 \text{ V} \\ A_3 &= \frac{U_{ADCmax}}{U_{2max} - U_{1min}} = \frac{3,3}{4,88 - 1,875} = 1,1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

ze vztahu (3.2):

$$A_3 = \frac{R_{16}}{R_{17}}$$

zvoleno  $R_{17} = 20 \text{ k}\Omega$ , pak:

$$R_{16} = A_3 \cdot R_{17} = 1,1 \cdot 20 \cdot 10^3 = 22 \text{ k}\Omega$$

Aby platil vztah (3.2), musí být opět splněna následující podmínka (3.9):

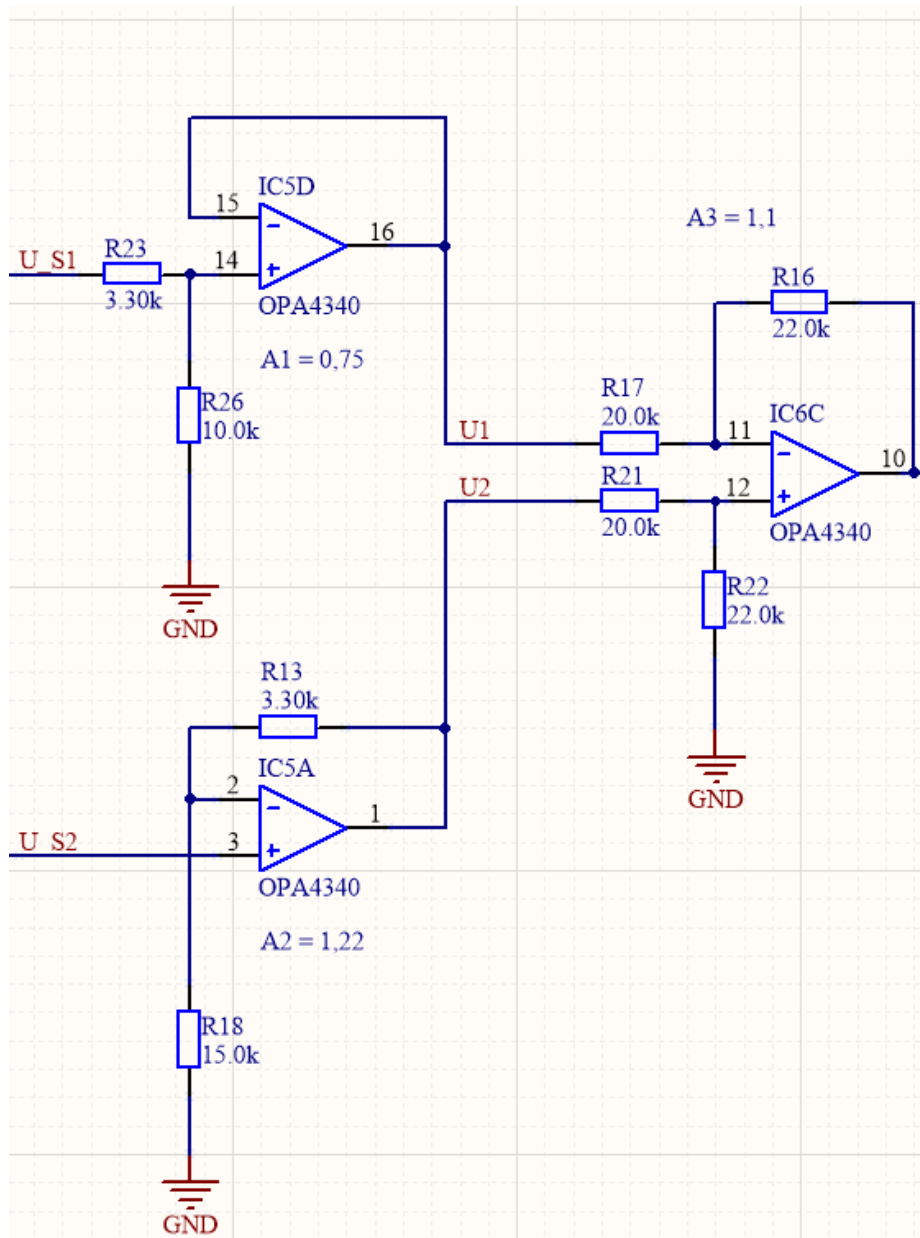
$$\frac{R_{16}}{R_{17}} = \frac{R_{22}}{R_{21}} \quad (3.9) [12],$$

toto lze nejjednodušeji splnit zvolením:

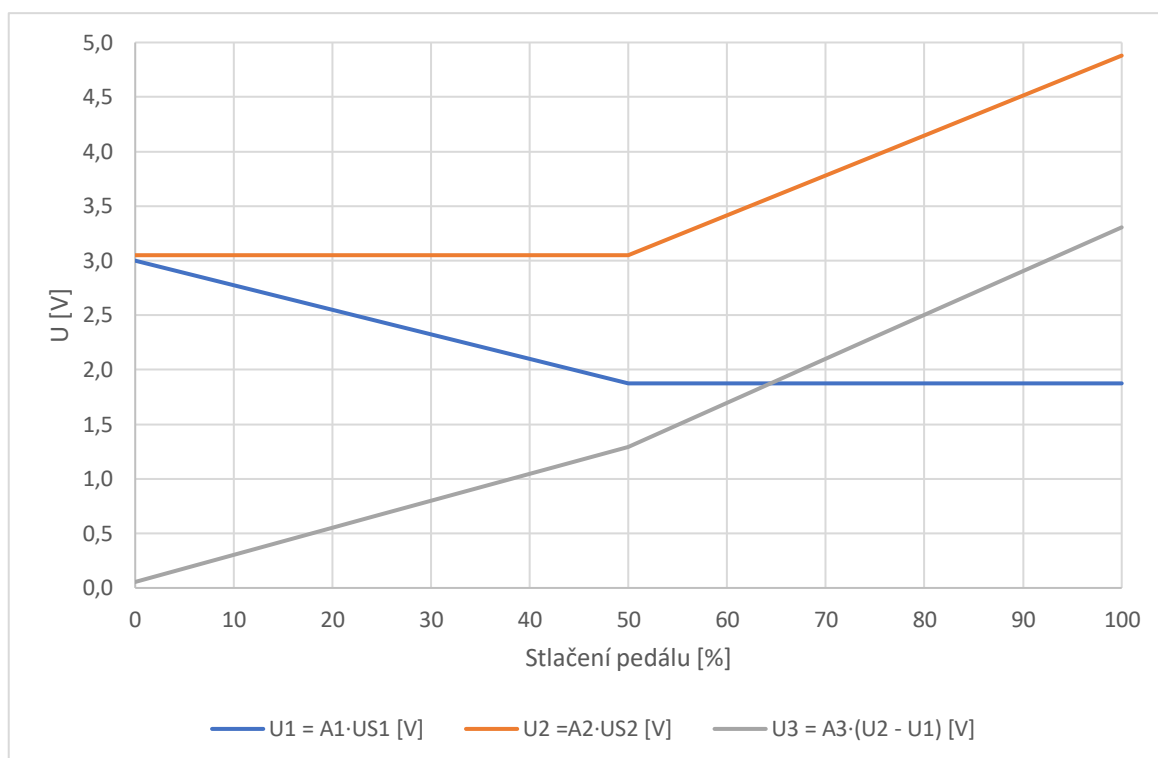
$$R_{16} = R_{22} = 22 \text{ k}\Omega \quad \text{a} \quad R_{17} = R_{21} = 20 \text{ k}\Omega$$

Teoretická výstupní charakteristika rozdílového signálu je na obrázku (3.13) šedou barvou. Modrou barvou je znázorněn signál nazývaný ve výpočtu i schématu (obr. 3.12)  $U_I$ , tedy menší, oranžovou barvou signál nazývaný  $U_2$  neboli menšenec.





Obr. 3.12: Zapojení operační sítě pro signál stisknutí pedálu



Obr. 3.13: Přibližná výstupní charakteristika rozdílového zesilovače (šedá) se vstupními signály

*Pozn.: Kvůli špatným předpokladům, vysvětleným v části 3.3.2, jsou na prvním vyrobeném kusu DPS prohozeny vstupy rozdílového zesilovače. Pro opravu chyby byly na tomto prototypu dodatečně překříženy.*

### 3.4.3 Poruchové stavy a chování jednotlivých signálů

V případě, že by magnet z pedálu upadl, by mělo být na obou sondách napětí 2,5 V. Pak se na výstupu rozdílového zesilovače objeví rozdílové napětí  $U_3 = 1,293$  V. Důkaz tohoto je uvedený v následujícím výpočtu.

$$U_{S1} = U_{S2} = 2,5 \text{ V}$$

$$U_1 = A_1 \cdot U_{S1} = 0,75 \cdot 2,5 = 1,875 \text{ V}$$

$$U_2 = A_2 \cdot U_{S2} = 1,22 \cdot 2,5 = 3,05 \text{ V}$$

$$U_3 = A_3 \cdot (U_2 - U_1) = 1,1 \cdot (3,05 - 1,875) = 1,293 \text{ V}$$

Pohledem na charakteristiku (3.13) je vidět, že takové napětí by odpovídalo sešlápnutí pedálu asi na 50 %. Proto je nezbytné, aby procesor sledoval napětí i na výstupech z jednotlivých sond. V případě, že magnet upadne, žádná ze sond jej nedetekuje, a proto jsou v takovém případě tato napětí nulová (viz výpočet dále).

$$U_{S1_p} = A \cdot (U_{S1} - U_{REF}) = 2,2 \cdot (2,5 - 2,5) = 0 \text{ V}$$

$$U_{S2_p} = A \cdot (U_{S2} - U_{REF}) = 2,2 \cdot (2,5 - 2,5) = 0 \text{ V}$$

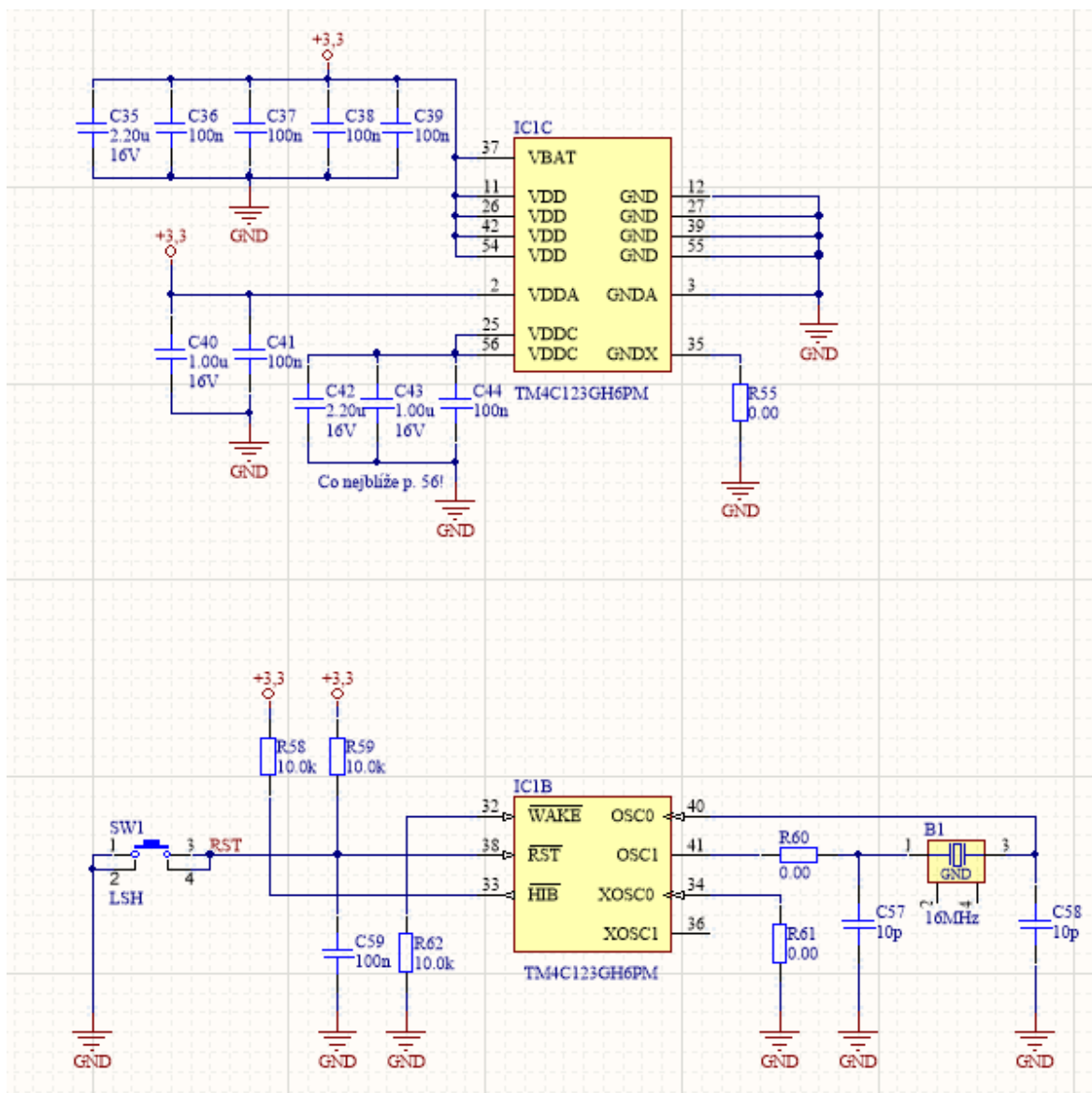
Žádný ze signálů by v běžném provozu neměl překročit napětí 3,3 V, pokud by z nějakého důvodu přeci jen tento stav nastal, jsou vstupy procesoru chráněny navíc diodovými omezovači.

### 3.5 Číslicová část snímače

Číslicová část snímače je tvořena procesorem od firmy Texas Instruments Tiva™ TM4C123GH6PM s jádrem ARM Cortex-M4F [14]. Tento procesor byl zvolen kvůli dobrým zkušenostem s jeho použitím na katedře KEV. Obsahuje také všechny potřebné periferie, a to sběrnici CAN a dostačující počet analogově digitálních převodníků [14].

#### 3.5.1 Pomocné obvody procesoru

Procesor je napájen ze zdroje 3,3 V. Blokování je řešeno pěticí keramických kondenzátorů o hodnotách 100 nF a 2,2 μF označených ve schématu (na obrázku 3.14) C35 až C39. Vstup VDDA je vstupem pro napěťovou referenci analogově digitálních převodníků, a její blokování řeší kondenzátory C40 a C41. Procesor obsahuje integrovaný nízko úbytkový (LDO) regulátor napětí 1,2 V pro jádro procesoru. Ten vyžaduje připojení dalších kondenzátorů pro filtraci a blokování (C42 až C44) co nejbližší pinu 56 [14].



Obr. 3.14: Schématické zapojení pomocných obvodů procesoru

Procesor využívá externí krystalový oscilátor s krystalem na obrázku (3.14) značeným *B1*, jehož rezonanční frekvence je 16 MHz. Po připojení napájecího napětí k snímači je dobré provést reset procesoru před ustálením všech napájecích napětí. To zajišťuje obvod tvořený rezistorem *R59* a kondenzátorem *C59*. Po objevení napájecího napětí na procesoru je kondenzátor vybitý, a tudíž drží resetovací pin procesoru na zemi a procesor se resetuje. Po nabití kondenzátoru je přes pull-up rezistor *R59* přivedena na /RST pin vysoká logická úroveň, '1'. V případě potřeby resetovat procesor manuálně je paralelně ke kondenzátoru *C59* připojeno resetovací tlačítko *SW1*, které při stisku přivede nízkou napěťovou úroveň na vstup /RST přímo, a také zajistí vybití kondenzátoru *C59*.

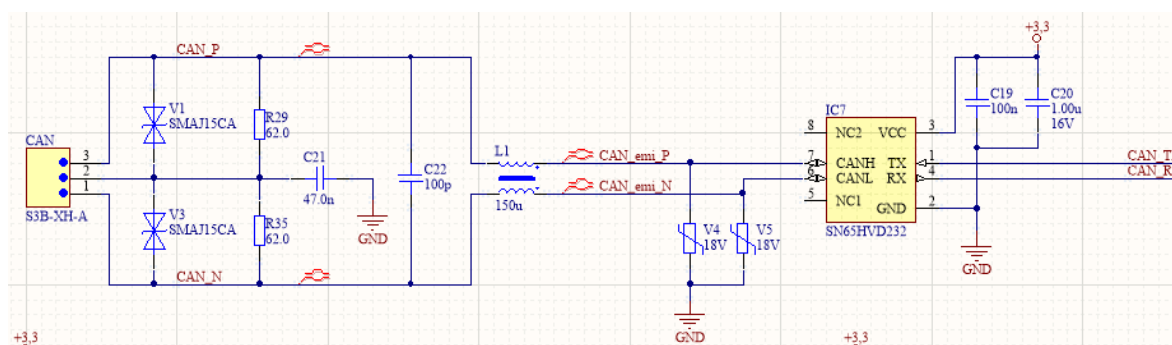
Vstupy /WAKE a /HIB slouží pro přechody mezi stavy hibernace a pracovním stavem. Jelikož se jedná o procesor v aplikaci, kde je nutná stálá pozornost, režim hibernace nebude potřeba, a tak jsou tyto piny připojeny nastálo k napájecímu napětí tedy log. '1'.

### 3.5.2 Vstupy analogových signálů

Signály z výše popsaných analogových obvodů zpracovávajících napětí ze snímacích sond jsou přivedeny na piny 6, 7 a 8. Tyto piny mají připojeny periferie analogově digitálních převodníků AIN0 až AIN2 [14]. Předchází jim v těsné blízkosti připojený ještě pasivní filtr typu dolní propust, tvořící zde tzv. anti-aliasing filtr. Tento filtr je důležitý pro omezení šířky pásma před vzorkovačem ADC tak, aby byl dodržen Shannon-Kotělnikovův vzorkovací teorém. RC filtr má mezní frekvenci nastavenou přibližně na 4,8 MHz.

### 3.5.3 Sběrnice CAN

Zvolený procesor celkem obsahuje dva moduly CAN [14]. Navržený snímač využívá modul CAN0. Ten využívá piny 59 a 60, kde pin 59 je pro přijímání zpráv, pin 60 pro vysílání. Tyto piny jsou dále připojeny na budič sběrnice CAN (SN54HVD232) v obrázku (3.15) IC7. Tento obvod má za úkol převádět komunikaci CAN sběrnice na diferenciální linky a naopak. Obvod plní také ochranou funkci [15].



Obr. 3.15: Zapojení diferenciálních linek CAN sběrnice

Vstupy diferenciálního vedení jsou chráněny proti přepětí varistory na 18 V, jelikož nejvyšší vstupní napětí obvodu IC7 je 25 V [15]. Dále je vřazena do linek tlumivka k potlačení souhlasného rušení. Diferenciální vedení je na závěr přivedeno na konektor, v jehož blízkosti jsou ještě umístěny transily V1 a V3 s prahovým napětím 18,5 V a zakončovací rezistory R29 a R35.

Adresa snímače na sběrnici CAN se nastavuje trojnásobným přepínačem ve schématu označeným jako CAN\_ADR. Výstupy z tohoto přepínače představují bity a jsou přivedeny

na piny 17, 18 a 19 procesoru. Rozpojený stav přepínače je zajištěný pull-down rezistory ( $R32 - R34$ ), které způsobí, že na vstupu procesoru bude v takovém případě log. '0'.

### 3.5.4 Rozhraní JTAG

Pro možnosti programování a dodatečného debugování je na desce snímače umístěn i standardní 14 pinový konektor rozhraní JTAG. Toto rozhraní má tři vstupy a jeden výstup. Vstupy jsou značeny TCK (Clock), TDI (Data Input), TMS (Test Mode Select), a ve schématu jsou ošetřeny pull-up rezistory. Výstupní signál je značen TDO (Data Output) [14]. Stejně, jako ostatní externě vyvedené výstupy a vstupy procesoru, jsou i tyto chráněny diodovými omezovači napětí.

### 3.5.5 Dodatečné vstupy a výstupy GPIO

Z procesoru jsou pro možnosti dalšího použití vyvedeny i 2 výstupy a 2 vstupy na precizní hřebeny. Ve schématu jsou značeny *AOUT* a *AIN*. Vysoká úroveň na výstupech je signalizována LED *AOUT1*, resp. *AOUT2*. Vstupy mají připojeny pull-down rezistory. Překročení napětí nad, pro procesor nebezpečnou úroveň, je na vstupech i výstupech ošetřeno opět diodovými omezovači.

## 4 Návrh a výroba plošného spoje

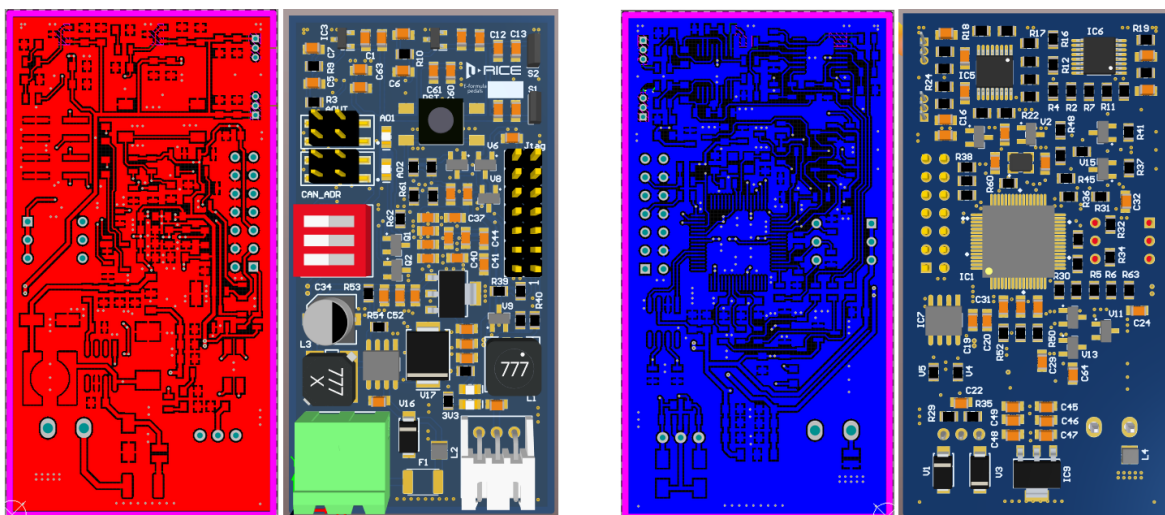
Návrh plošného spoje byl realizován v programu Altium Designer 19. Cílem návrhu bylo vytvoření co nejmenšího plošného spoje. Z tohoto důvodu byla zvolena oboustranná montáž a drtivá většina prvků ve variantách SMT. Pouzdra veškerých rezistorů a keramických kondenzátorů byla zvolena 0805.

Před začátkem kreslení byly nastaveny potřebné hodnoty pravidel pro DRC dle údajů výrobce [18].

### 4.1 Rozmístění základních součástek

Návrh počítá s umístěním mezi plynovým a brzdovým pedálem, tj. vlevo od plynového pedálu. Bylo proto nutné umístit sondy do pravého horního rohu destičky. V podstatě pevnou pozici měly také konektory CAN a napájení, jež musely být umístěny v části co nejbližší řídicí, jelikož předpokládaná kabeláž povede do řídicí jednotky tímto směrem.

Umístování dalších součástek již probíhalo ve snaze co nejvíce dodržet správnou a logickou posloupnost danou schématem. Důraz byl kladen zejména na blokové kondenzátory, které musí být umístěny co nejblíže prvkům, kterým přísluší, a také, aby byla splněna správná posloupnost vedení napájení.



## Horní vrstva

## Spodní vrstva

Obr. 4.1: Navržená dvoustranná deska snímače akceleračního pedálu

Výsledkem je DPS na obrázku (4.1). Jak je vidět, na vrchní vrstvě jsou umístěny ovládací prvky, veškeré konektory a těžší součástky. Dále je zde umístěn DC-DC konvertor a stabilizátor 5 V. Velkou část součástek na vrchní vrstvě tvoří blokové a filtrovací kondenzátory, zejména pro procesor, který je umístěn na druhé (spodní) straně.

V horním rohu je možno vidět Hallové sondy SS49E v pouzdrech TO130. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.2, na tomto prvním vyrobeném exempláři, sondy jsou od sebe osově vzdáleny o šířku magnetu tj. 8 mm. Druhá verze tištěného spoje je bude mít umístěny přímo vedle sebe a otočené stejným směrem.

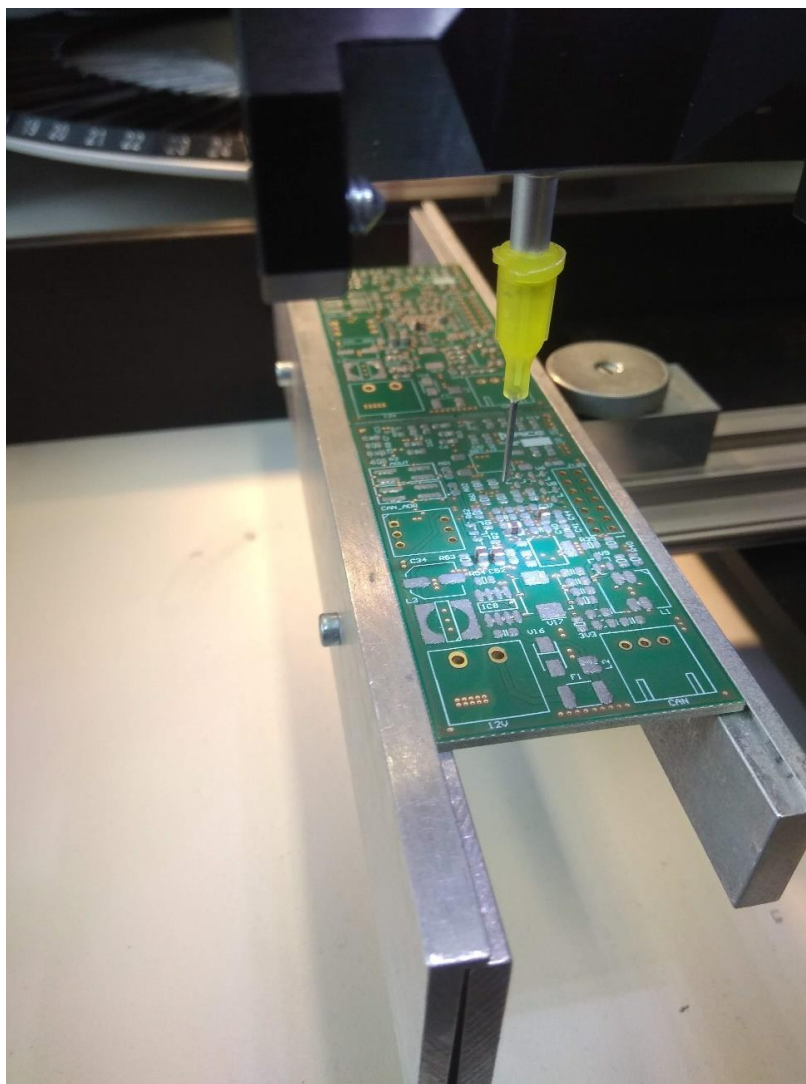
Ve spodní vrstvě je umístěný, jak již bylo napsáno, procesor. V jeho nejbližším okolí je krystal a filtry před A/D převodníky. Dále jsou zde umístěny obvody s operačními zesilovači. Ve spodní části pak zdroj 3,3 V pro napájení procesoru a CAN budiče.

## 4.2 Výroba

Deska plošného spoje byla vyrobena v Německu výrobcem Multi-cb. Vyrobena byla dva stejné tištěné spoje a na laserovém řezáku i šablony pro nanášení pájecí pasty. Konečná velikost tištěného spoje je 36,6 mm na šířku, 69,5 mm na výšku. Substrát je tvořený známým sklolaminátem FR4 o tloušťce 1,55 mm s vrstvou mědi tlustou 35  $\mu\text{m}$ . Šablony pro nanášení pasty jsou z plechu tlustého 100  $\mu\text{m}$  [18].

## 4.3 Osazení

Na DPS byla z vrchní strany, pomocí zmíněných šablon a stěrky, nanášena vrstva pájecí pasty. Do této pasty byly následně, pomocí ruční osazovačky (obr. 4.2) s mikroskopem, osazeny veškeré komponenty umístěné na této vrstvě, kromě komponentů v THT provedení.



Obr. 4.2: Ruční osazovačka – pohled na osazovací jehlu a tištěné spoje



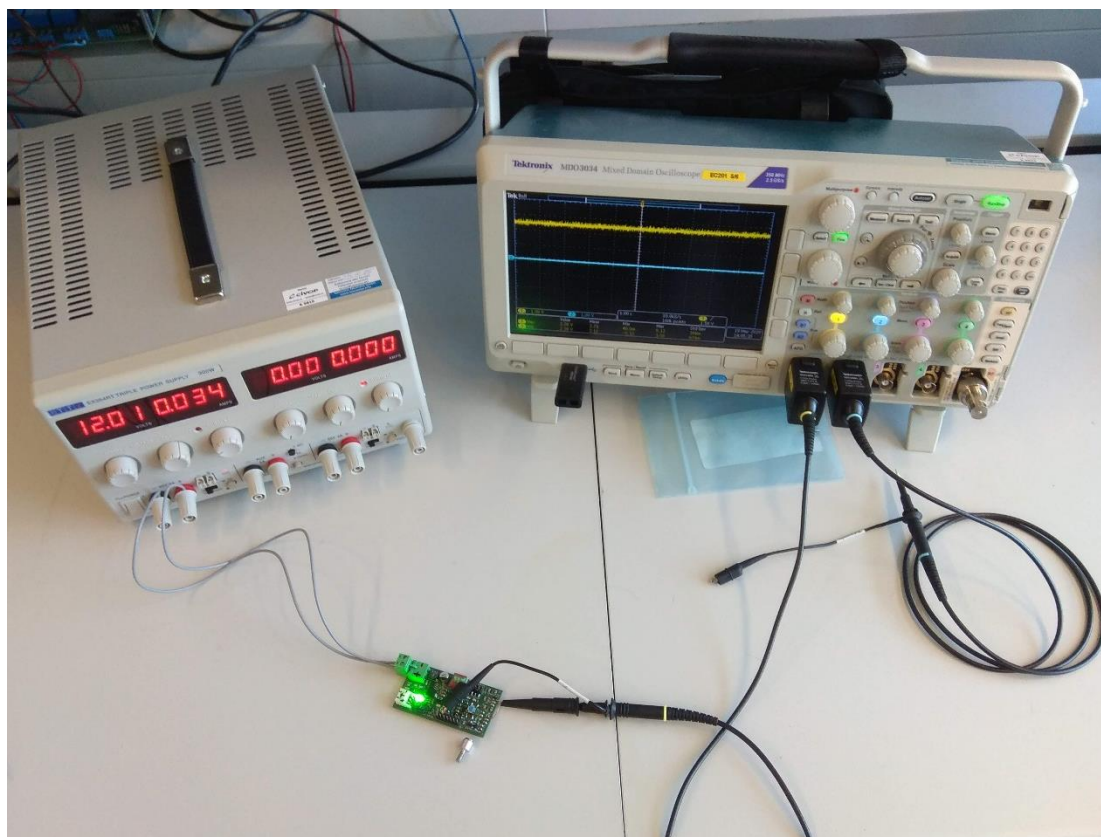
Po umístění všech součástek na tuto vrstvu byla celá DPS protažena pecí. Tím došlo k připájení jednotlivých komponentů. Stejným způsobem byla osazena a zapájena i druhá strana DPS. Lehčí součástky se na druhé straně DPS udrží i při druhém průtahu desky pecí. Těžší součástky byly pro jistotu zajištěny kaptonovou páskou.

Po vychladnutí desek byla provedena optická inspekce jednotlivých pájecích bodů, zejména procesorů a jiných integrovaných obvodů, které mají výstupní piny blízko sebe. Případné slití spojů bylo odstraněno odsávací licnou a páječkou.

Nakonec byly ručně připájeny zbylé komponenty v provedení THT, tedy sondy, přepínače a konektory.

## 5 Měření

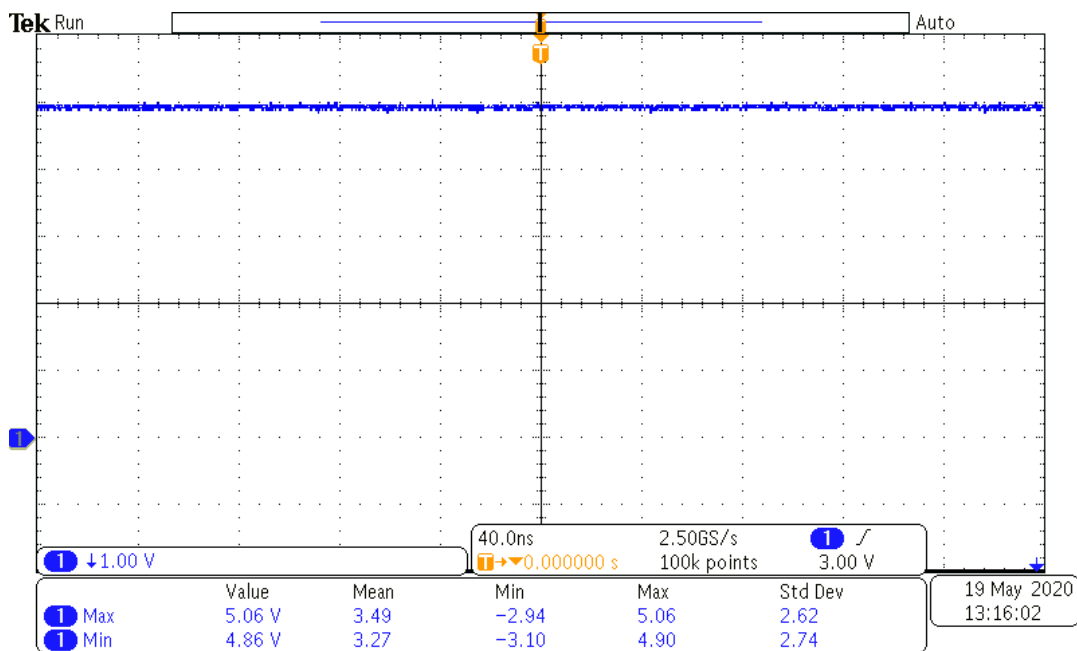
Po osazení součástek přišlo na řadu oživení a kontrola základních signálů. Obvod byl připojen na napájecí napětí 12 V ze stabilizovaného zdroje TTI EX354RT. Odběr prototypu při tomto napájení činí 34 mA. Pro prověření důležitých průběhů byl použit osciloskop značky Tektronix MDO3034. Ukázka pracoviště je vyfotografována na obrázku (5.1).



Obr. 5.1: Ukázka měřícího pracoviště

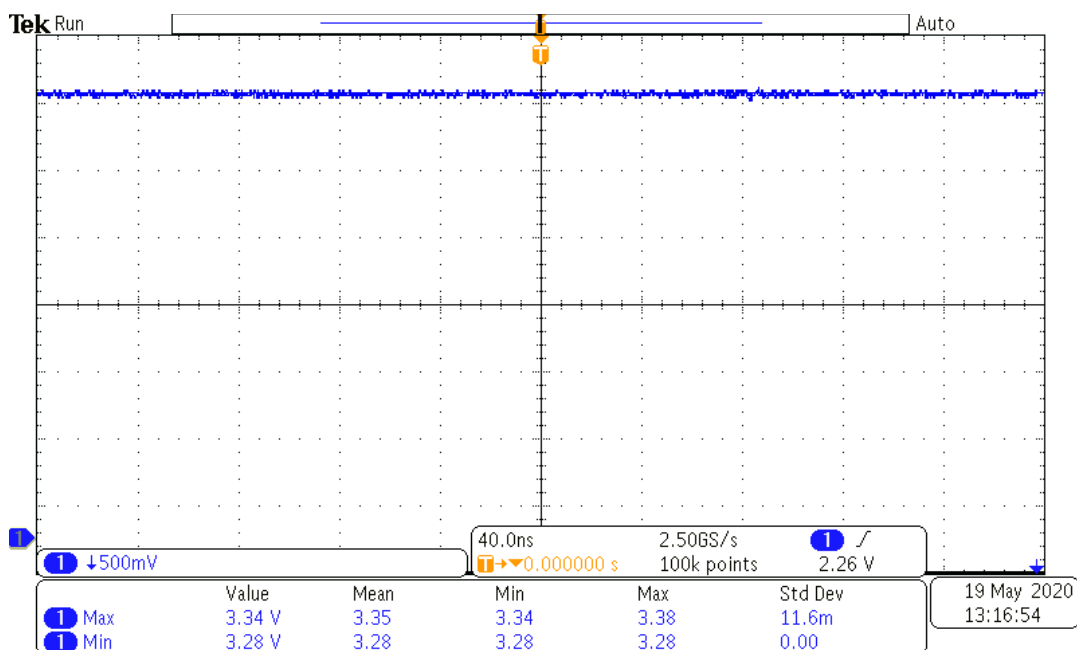
## 5.1 Napájecí napětí

Po připojení výrobku ke stabilizovanému zdroji došlo k naběhnutí step-down měniče 6,3 V a stabilizátorů 5 a 3,3 V. To bylo zřetelné rozsvícením zelených indikačních LED. Následně byl zachycený průběh na obrázku (5.2). Na něm je napájecí napětí za filtračními kondenzátory na výstupu stabilizátoru 5 V.

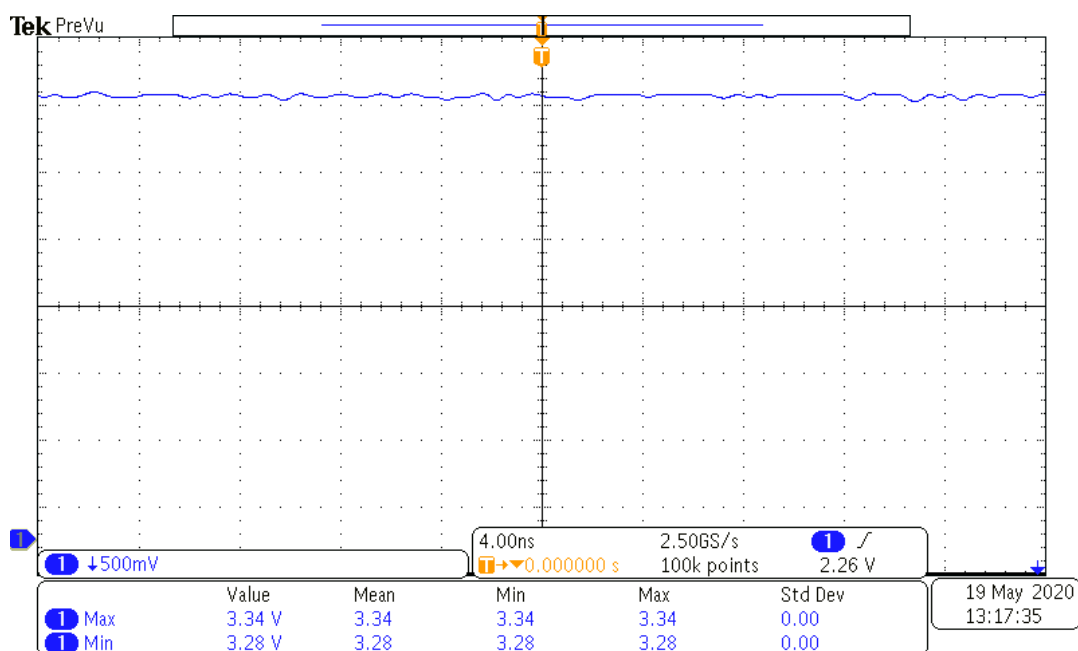


Obr. 5.2: Vyfiltrované napětí za stabilizátorem 5 V

Další pohled osciloskopu byl zaměřen na ověření správné funkce stabilizátoru 3,3 V. Tento průběh je na obrázku (5.3) a detailnější pohled na zvlnění na druhém obrázku (5.4).



Obr. 5.3: Vyfiltrované napětí za stabilizátorem 3,3 V

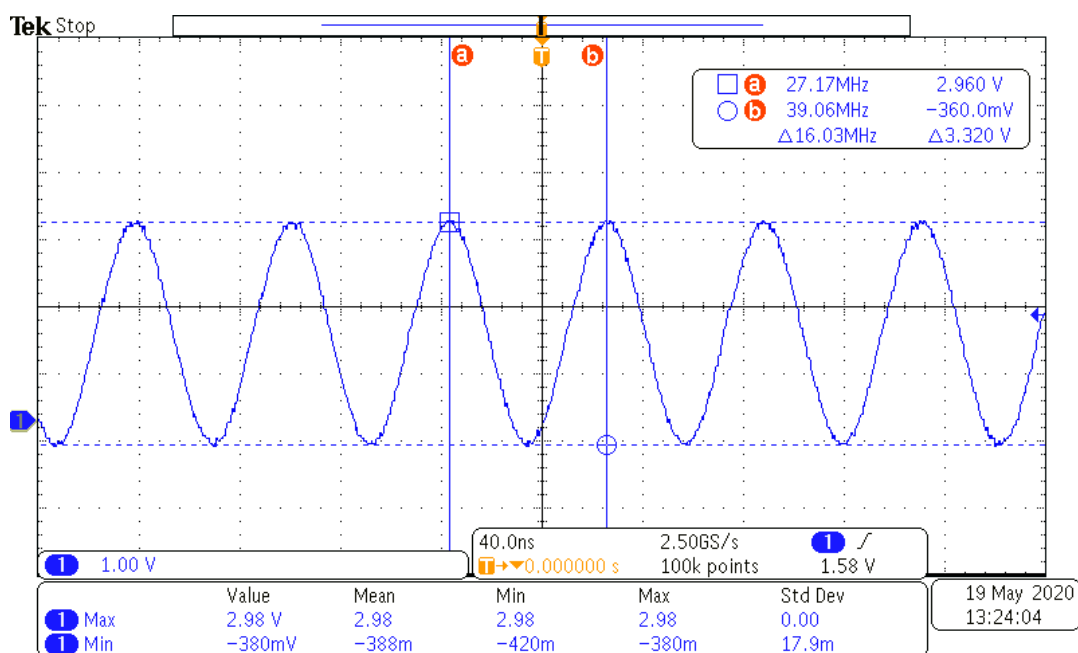


Obr. 5.4: Detailní pohled na zvlnění na výstupu stabilizátoru 3,3 V

Z průběhu (5.4) je patrné mírné zvlnění napětí. Maximální napětí je 3,34 V, minimální 3,28 V, což dává po rozdílu zvlnění 60 mV.

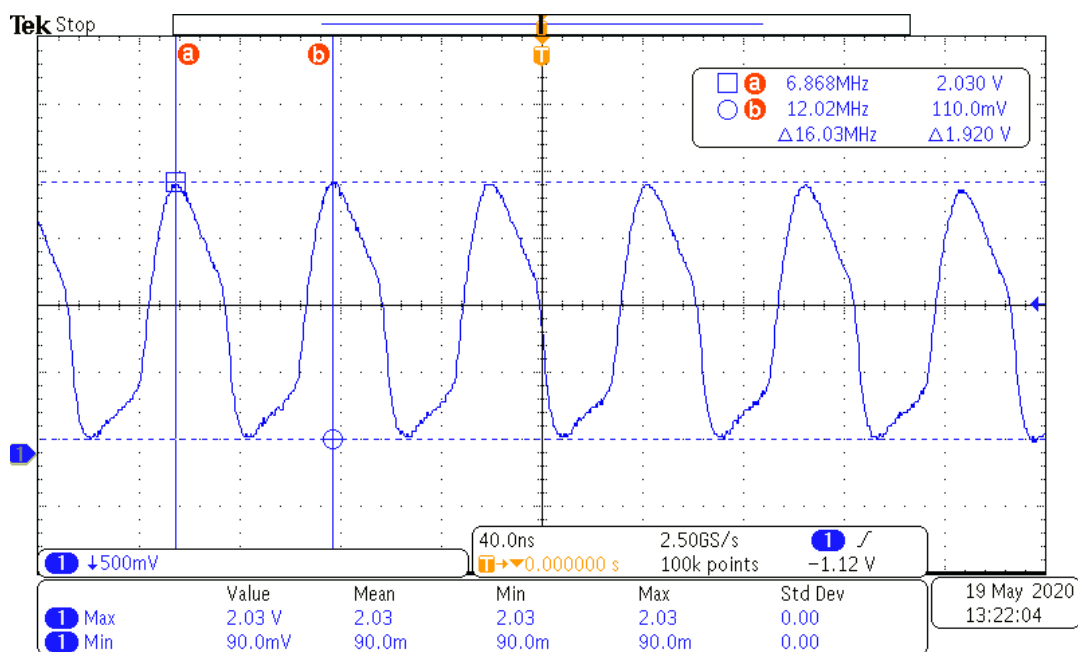
## 5.2 Hodinový signál procesoru

Hodinový signál procesoru je signál z krystalového oscilátoru (ve schématu B1). Signály byly měřeny na pomocných kondenzátorech C57 a C58 (obr. 3.14). Z kurzorů na obou obrázcích (5.5 a 5.6) je viditelné, že krystal osciluje na správné frekvenci 16 MHz.



Obr. 5.5: Průběh napětí krystalového oscilátoru hodin procesoru (C57)

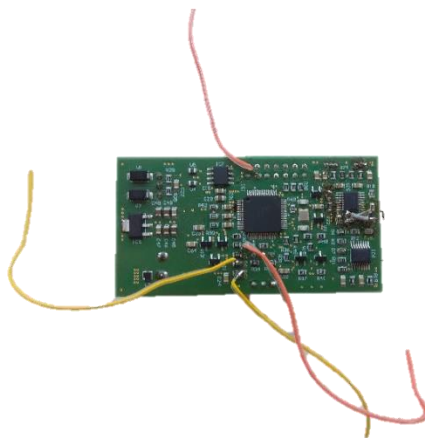
Průběh z obrázku (5.5) je měřený na kondenzátoru C57 a odpovídá v podstatě přesné sinusovce, jejíž amplituda je 3,3 V. Na druhém obrázku (5.6) je průběh měřený na kondenzátoru C58 značně deformovaný a má amplitudu jen 1,92 V. To je dáno tím, že kondenzátor C58 je připojený na pinu 40 procesoru, což je dle datasheetu [14] vstup do procesoru, který působí na signál jako zátěž. Kondenzátor C57 je na pinu 41, což je výstup poskytující napájení krystalovému oscilátoru – proto žádná deformace.



Obr. 5.6: Průběh napětí krystalového oscilátoru hodin procesoru (C58)

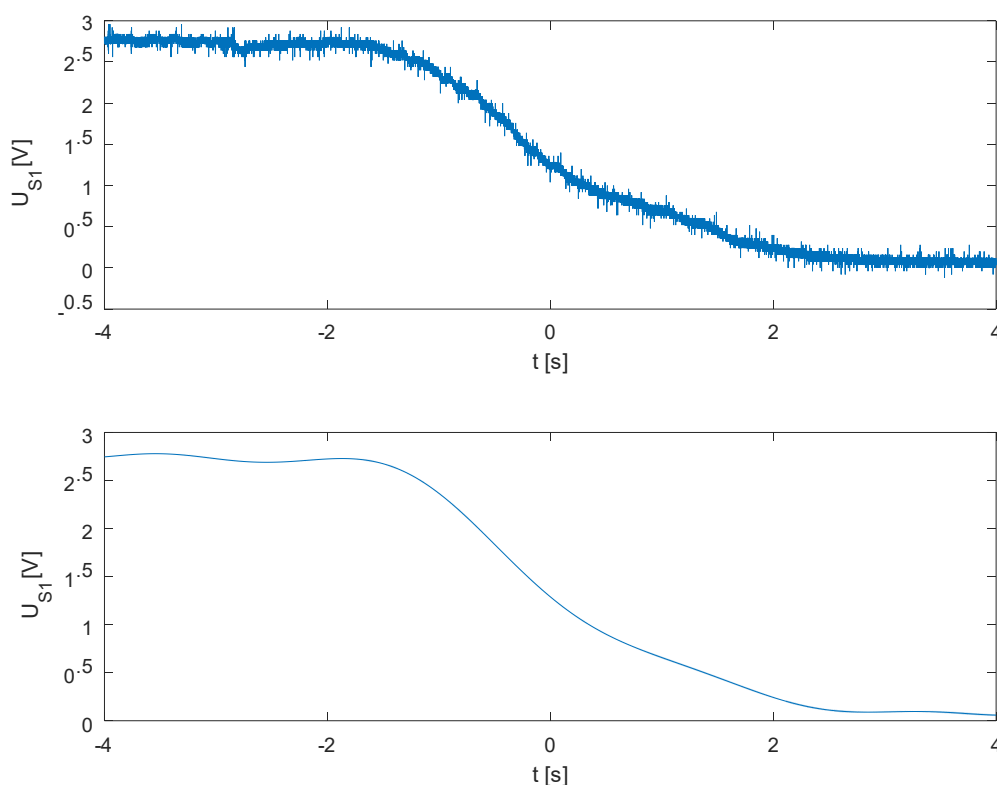
### 5.3 Vstupní signály AD převodníku procesoru

Následující signály byly měřeny na rezistorech R5, R6 a R63. Aby bylo možné pohybovat magnetem kolem sond, přičemž byl zajištěný dobrý kontakt měřících sond osciloskopu, byly na prototyp napájeny provizorní drátky (obr. 5.7).



Obr. 5.7: Drátky provizorně připojené pro měření průběhů

Měření signálů probíhalo tak, že byl magnet pomalu posouván ve směru pohybu budoucího pedálu, přičemž signály zaznamenával digitální osciloskop při velmi dlouhé časové základně. Obrázek (5.8) zachycuje takový průběh na sondě S1. Je vidět, že na začátku měření byl magnet přímo před sondou. Jak docházelo k postupnému posunu magnetu, ten přestával působit na sondu, a napětí klesá.

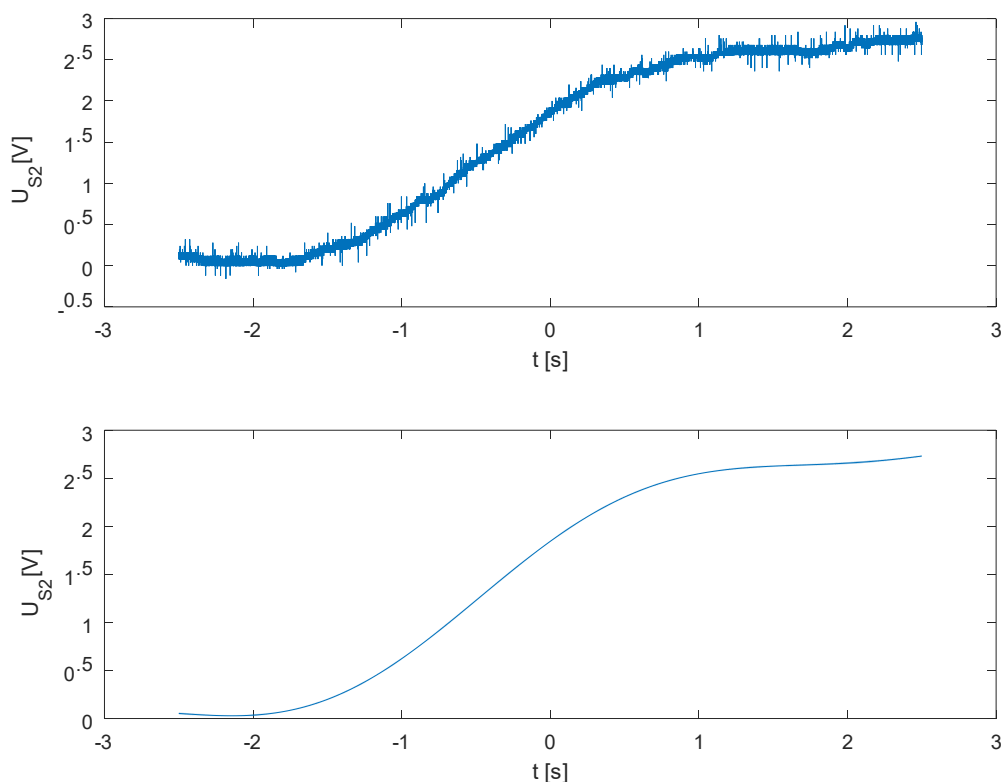


Obr. 5.8: Průběh signálu z 1. sondy (S1) v závislosti na poloze pedálu (magnetu) – nahoře a jeho proložená varianta – dole

Jelikož byl magnet držen jen v ruce, mohlo docházet během posunu ke změnám vzdáleností magnetu a sond. Proto jsou naměřené charakteristiky v některých místech prohnuté. „Otřepení“ signálů je zas způsobené pravděpodobně rušením, které se mohlo na signál dostat zejména díky měřicím drátkům z obrázku (5.7). Pro zbavení se tohoto jevu byla naměřená data proložena polynomem a ten vykreslen ve spodním grafu.

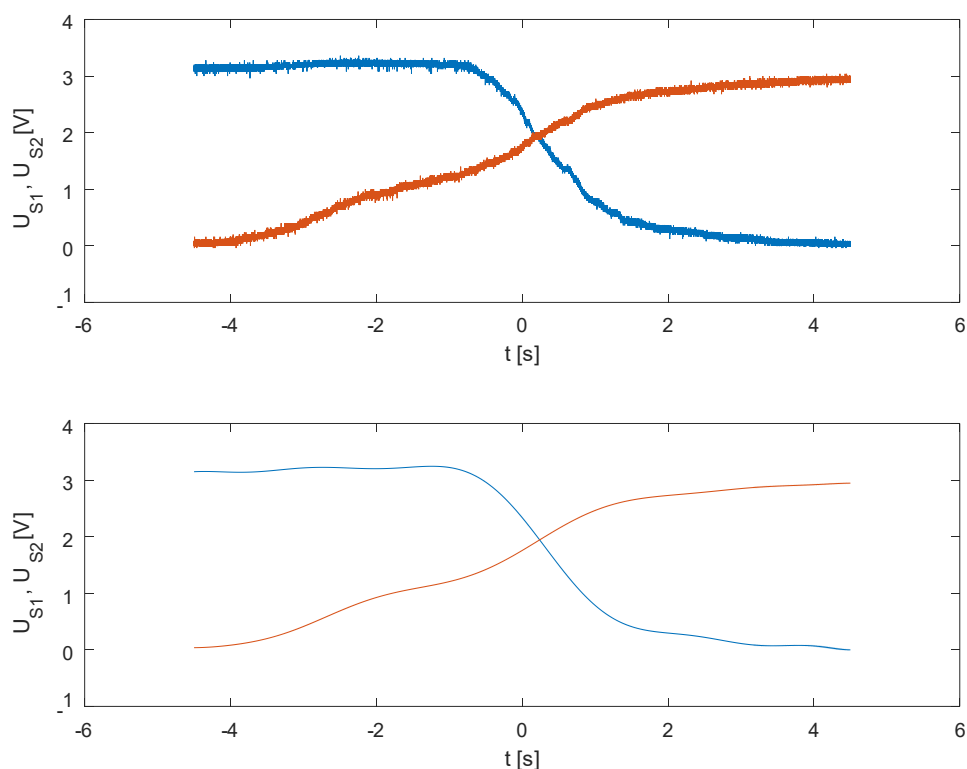
Obrázek (5.9) vykresluje obdobnou charakteristiku pro druhou sondu S2. Zde je vidět to, že na začátku magnet na sondu vůbec nepůsobí a napětí je 0 V. Po posunu magnet začíná působit a napětí roste.

Návrh počítal s maximálním napětím 3,3 V při magnetu přímo před sondou. Toho, jak je vidět na obrázcích, není dosaženo. Je to opět vzdáleností magnetu od sond, a také možnou odchylkou jak sond od svých charakteristik, tak magnetu, který nemusí dosahovat plné magnetické indukce 1000 Gauss.



Obr. 5.9: Průběh signálu z 2. sondy (S2) v závislosti na poloze pedálu (magnetu) – nahoře a jeho proložená varianta – dole

Obrázek (5.10) ukazuje předešlé charakteristiky v jednom grafu. Při posunu magnetu napětí na sondě S2 (oranžová) postupně roste, zatímco na sondě S1 (modrá) klesá. Vystává pak otázka, proč oranžový průběh (S2) roste dříve, než začíná klesat modrý průběh (S1). Odpověď je pravděpodobně opět v geometrii sond, a to konkrétně v tom, že na prototypu je jedna sonda (konkrétně S2) otočena dodatečně, přičemž toto nešlo udělat tak, aby byla zcela rovně. To způsobilo, že sondy nejsou natočeny zcela přesně vedle sebe, jelikož to již vývody neumožňovaly. Proto sonda S2 reaguje na magnet o něco dříve.

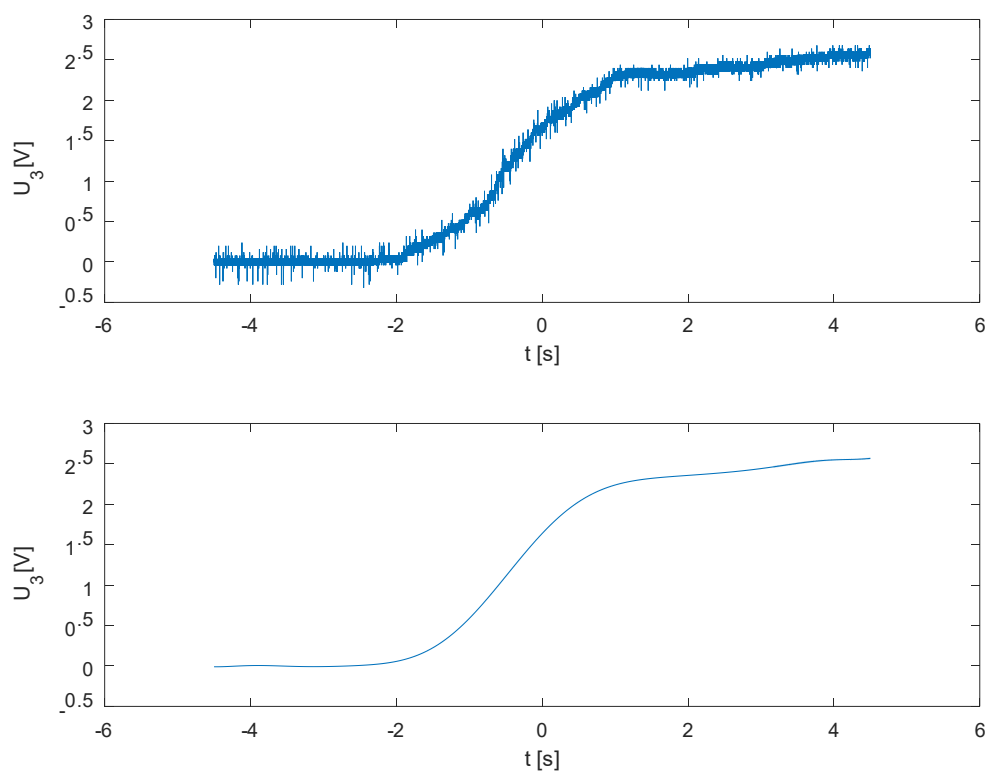


Obr. 5.10: Vykreslení obou průběhů ze sond při pohybu magnetu – nahoře a totéž proložené polynomy – dole

Poslední měřený průběh je signál z rozdílového zesilovače reprezentující přímo míru posunu (stlačení) pedálu. Takový průběh je na obrázku (5.11). Signál roste s posuvem od téměř 0 V do necelých 3 V. To, že signál nedosahuje 3,3 V, je pravděpodobně ze stejného důvodu, jako u předchozích průběhů.

Z předchozích kapitol plyne, že ačkoli první návrh počítal s lineárním výstupem, po dodatečných úpravách již lineární zcela být nemá. Tato nelinearita spočívá v mírné změně sklonu přibližně v polovině stisknutí pedálu. V originálních změřených datech na obrázku (5.11) nahoře je tato změna při bližším pohledu patrná. Polynom na obrázku (5.11) dole svým proložením tuto skutečnost zamaskoval.

Při bližší inspekci si ovšem lze všimnout, že je tam ještě jedna změna sklonu. Tato skutečnost je vysvětlitelná z předchozího obrázku (5.10) tím, že sonda S2 roste rychleji, a proto je výsledný rozdíl v jedné chvíli strmější.



Obr. 5.11: Signál úměrný stlačení pedálu (nahore) a proložená varianta (dole)



## Závěr

V bakalářské práci je provedeno shrnutí platných norem ve spojení se snímáním a vyhodnocením polohy pedálu elektrovozidla, se zvláštním přihlédnutím k normě FSG [2].

Dále byly vybrány určité způsoby snímání polohy, které by bylo možné teoreticky použít pro snímání stlačení pedálů. S přihlédnutím k normám a doporučením, míře složitosti realizace, ale také k případnému zvýšenému opotřebovávání pohyblivých dílů u některých technik, bylo zvoleno snímání pomocí Hallových sond.

Výběr padl na sondy od firmy Honeywell SS49E. Následně bylo vytvořeno schéma zapojení prvního prototypu snímače. Ten se skládá ze dvou kusů sond, operační sítě zpracovávající signály ze sond, procesoru s integrovanými analogově digitálními převodníky a napájecích zdrojů.

Navržený obvod byl realizován na DPS. Po oživení tohoto prototypu byly změřeny první hodnoty charakteristik, z nichž vyplynuly určité nedostatky. Ty jsou důsledkem nedostatečných zkušeností s geometrií snímání Hallových sond. Tyto nedostatky byly na prototypu provizorně odstraněny a provedené změny zaneseny do nové verze schématu. Na opraveném prototypu bylo provedeno experimentální měření, které ověřilo funkci tohoto obvodu. Výsledkem je funkční prototyp.

Jednu nechtost tento snímač má, a bude ho mít i eventuálně vyrobená nová verze dle opraveného schématu. Je to mírná nelinearita výsledného průběhu reprezentující stlačení pedálu. Tato nelinearita by ovšem neměla působit značné problémy, jelikož by neměla být na nožním pedálu jezdcem téměř postřehnutelná.

Odstranění nelinearity by mělo být možné použitím vhodnějšího zapojení operační sítě, nevyužívajícího neinvertující zesilovač, či napěťový dělič. Tato zapojení mění sklony charakteristik, jelikož násobí, resp. dělí tyto charakteristiky v každém bodě. Jednou z variant, která se nabízí, je použití operačních sítí se sumátory a rozdílovými zesilovači. V kombinaci s přivedením konstantních referenčních napětí na vhodné vstupy tato zapojení nemění sklon, ale realizují pouze posun celých charakteristik, jelikož odečítají, či přičítají

konstantní referenční hodnotu v každém bodě k původním průběhům. S takovým zapojením a správnou pozicí Hallových sond by měl být průběh signálu s posuvem lineární.

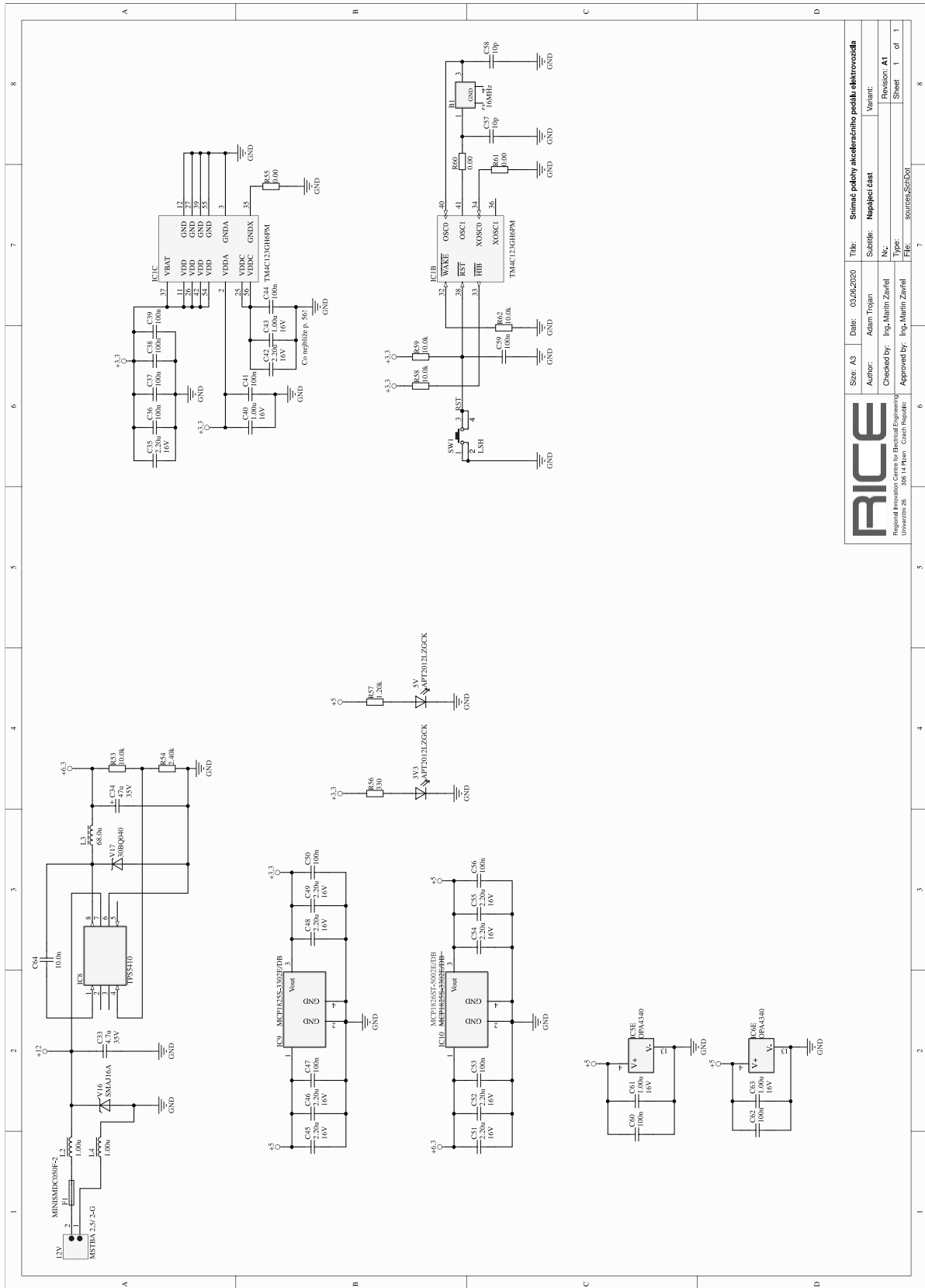
Deska plošných spojů je se svou velikostí 36,6 mm na šířku a 69,5 mm na výšku malá. Pravděpodobně by ovšem šla ještě více zmenšit. Toho by mohlo jít dosáhnout např. přesunutím zdroje 3,3 V na horní vrstvu DPS.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 8001020576.
- [2] *FORMULA STUDENT GERMANY: Rules for FSG 2020* [online]. 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [3] SCHWARZ, Jiří. *Automobily Škoda Fabia II: konstrukce, technika, údržba*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2155-2.
- [4] ŠKODA AUTO, Service Training. Motor 2,0 l 103 kW/100 kW TDI/PD OCTAVIA DRUHÉ GENERACE. In: *SlidePlayer* [online]. Vermont: SlidePlayer.cz, 2019, 2004 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2356022/>
- [5] ELUC: Hallův jev. *ELUC* [online]. Olomouc: ELUC, 2019 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/617>
- [6] Hallova sonda. *ELUC* [online]. Olomouc: ELUC, 2019 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/616>
- [7] Grayův kód. Wikipedie [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2006 [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Grayův\\_kód](https://cs.wikipedia.org/wiki/Grayův_kód)
- [8] PINKER, Jiří a Václav KOUCKÝ. *Analogové elektronické systémy*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-708-2506-5.
- [9] ELUC: Théveninova věta. *ELUC* [online]. Olomouc: ELUC, 2019 [cit. 2019-12-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/512>
- [10] Sběrnice CAN (Controller Area Network). MIKROKONTROLÉRY INFINEON TECHNOLOGIES [online]. Praha: Ladislav Radvan [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://noel.feld.cvut.cz/vyu/scs/prezentace2002/Infineon/can.htm>
- [11] Magnetoresistive Sensor ICs, Nanopower Series Product Datasheet: Linear Hall-effect Sensor ICs [online]. Douglas Drive North: Honeywell International, 2015 [cit. 2020-03-09]. 005850-4-EN IL50. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2007294.pdf>
- [12] ELUC: Rozdílové zapojení operačního zesilovače. *ELUC* [online]. Olomouc: ELUC, 2012 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/692>
- [13] Sensing and Control: Hall effect sensing and application [online]. Illinois: Honeywell, [1998], 126 s. [cit. 2020-04-14]. 005715-2-EN IL50. Dostupné z: <https://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>
- [14] Tiva™ TM4C123GH6PM Microcontroller: Datasheet [online]. (Rev. E). Dallas: Texas Instruments, ©2020, 1409 s. [cit. 2020-05-01]. DS-TM4C123GH6PM-15842.2741 SPMS376E. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pm.pdf>
- [15] 3.3-V CAN TRANSCEIVERS [online]. Dallas: Texas Instruments, ©2011, 33 s. [cit. 2020-05-01]. SLOS346K. Dostupné z: <https://riceproject.fel.zcu.cz/Altium/PDF/Semiconductor/Logic/Driver/sn65hvd230-232.pdf>. SN65HVD232 Datasheet.
- [16] Wide Input Range, Step-Down Converter: TPS5410 1-A [online]. Dallas: Texas Instruments, ©2020, 31 s. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://riceproject.fel.zcu.cz/Altium/PDF/Semiconductor/Analog/Regulator/tps5410.pdf>. Datasheet.

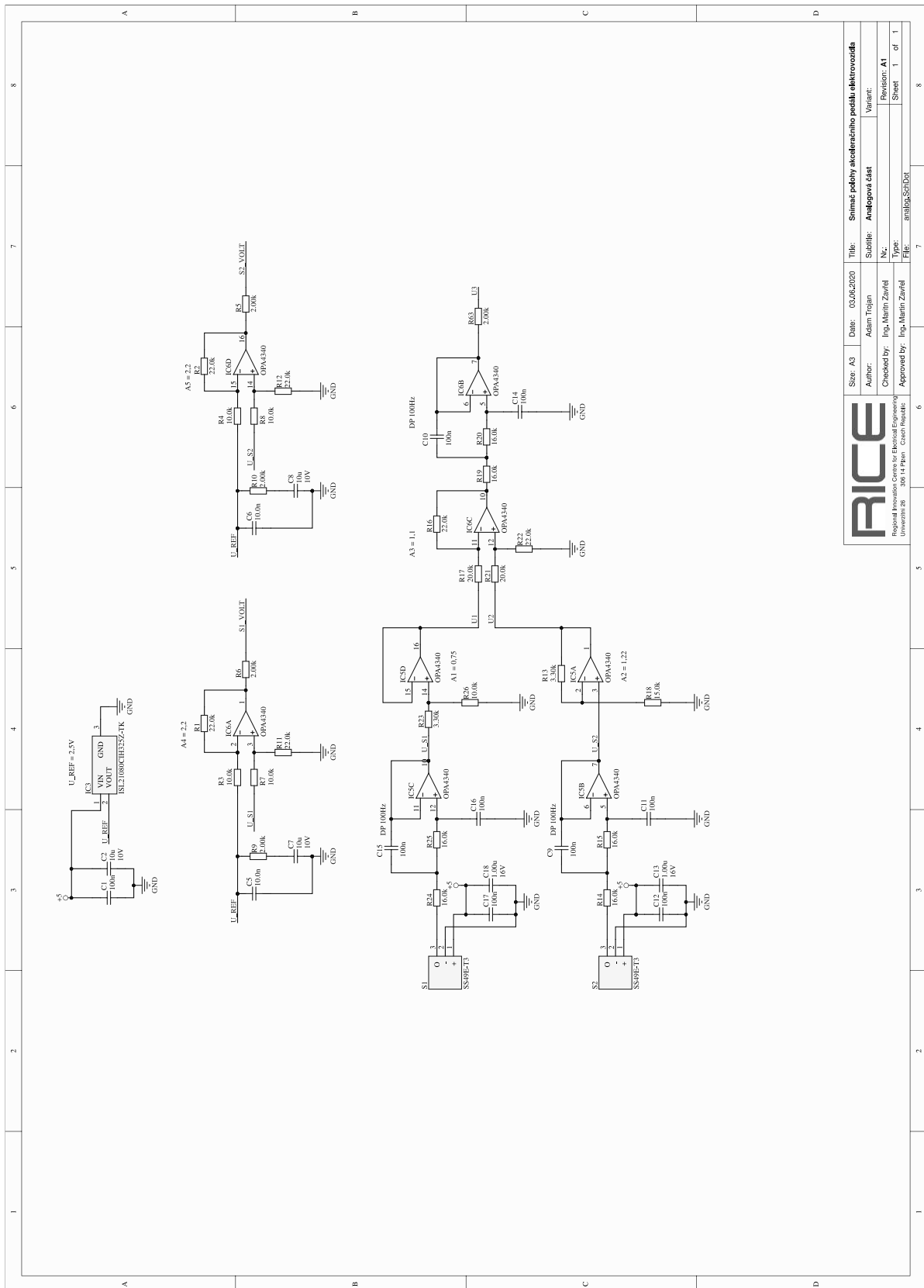
- [17] MCP1825/MCP1825S: 500 mA, Low Voltage, Low Quiescent Current LDO Regulator [online]. Chandler (Arizona): Microchip, ©2008, 38 s. [cit. 2020-05-01]. DS22056B. Dostupné z: [https://riceproject.fel.zcu.cz/Altium/PDF/Semiconductor/Analog/Regulator/MCP1825\\_MCP1825S.pdf](https://riceproject.fel.zcu.cz/Altium/PDF/Semiconductor/Analog/Regulator/MCP1825_MCP1825S.pdf). Datasheet.
- [18] Printed Circuit Boards Technology: Technical capabilities. PCB Manufacturer: Multi Circuit Boards [online]. Brunthall: Multi Circuit Boards, ©2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.multi-circuit-boards.eu/en/products/printed-circuit-boards.html>
- [19] MG Series Magnets [online]. Douglas: Honeywell, 2014 [cit. 2020-05-04]. 005972-1-EN IL50 GLO. Dostupné z: [https://sensing.honeywell.com/index.php?ci\\_id=150634](https://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=150634). Datasheet.

# Přílohy



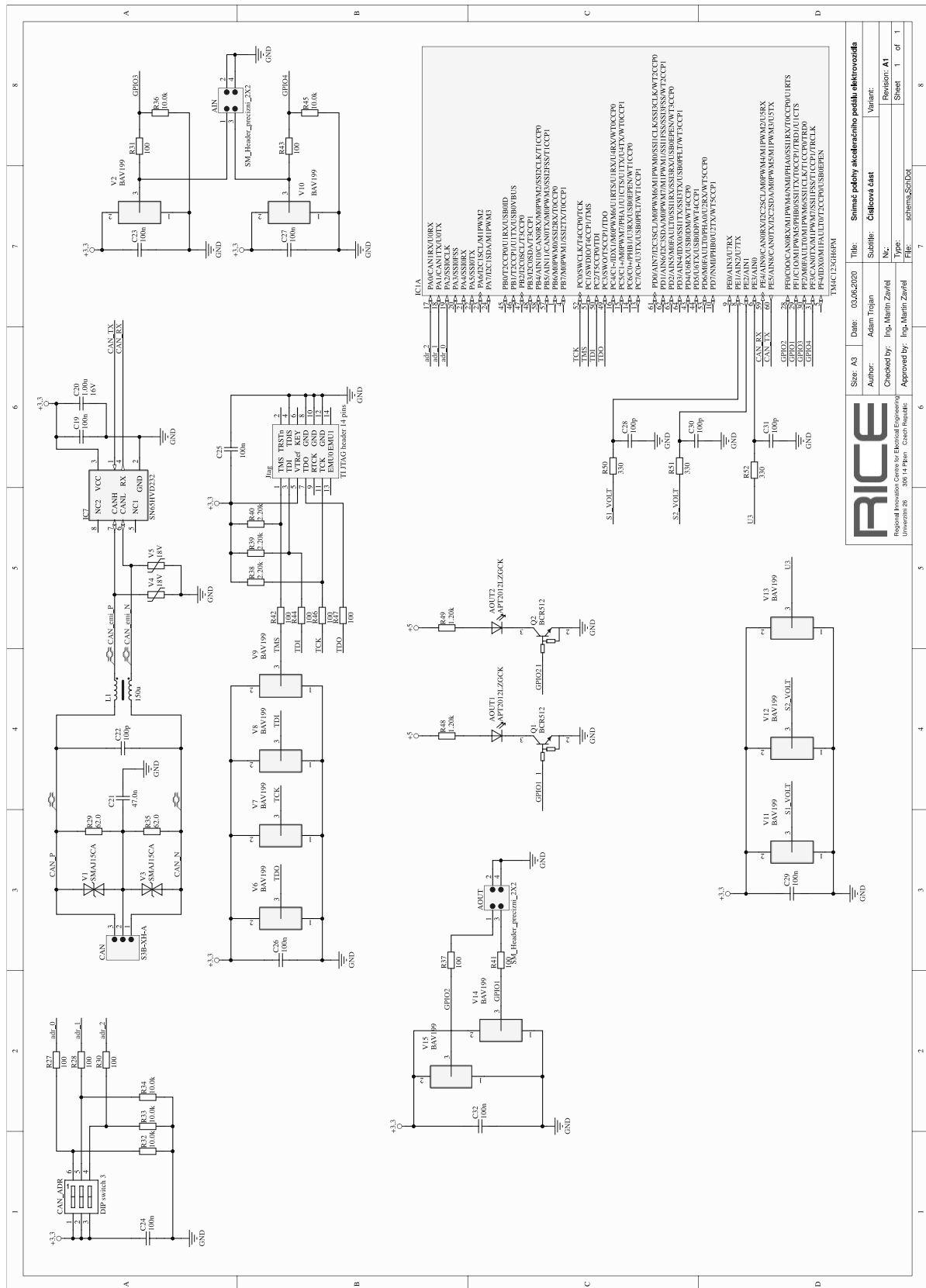
|                                 |                         |  |
|---------------------------------|-------------------------|--|
| Sheet: A3                       | Date: 03.06.2020        | Title: Snímání polohy akcelerčního pedálu elektrovozidla |
| Author: Adam Trojan             | Subtitle: Napájecí část | Variant:   |
| Checked by: Ing. Martin Závřel  | Nr.:                    | Revision: A1   |
| Approved by: Ing. Martin Závřel | Type: sources_SchDoc    | Sheet 1 of 1   |
| University: 308 14 Plyn         | Crash Handle:           | File: sources_SchDoc                                     |

Příloha A: Schéma napájecí části

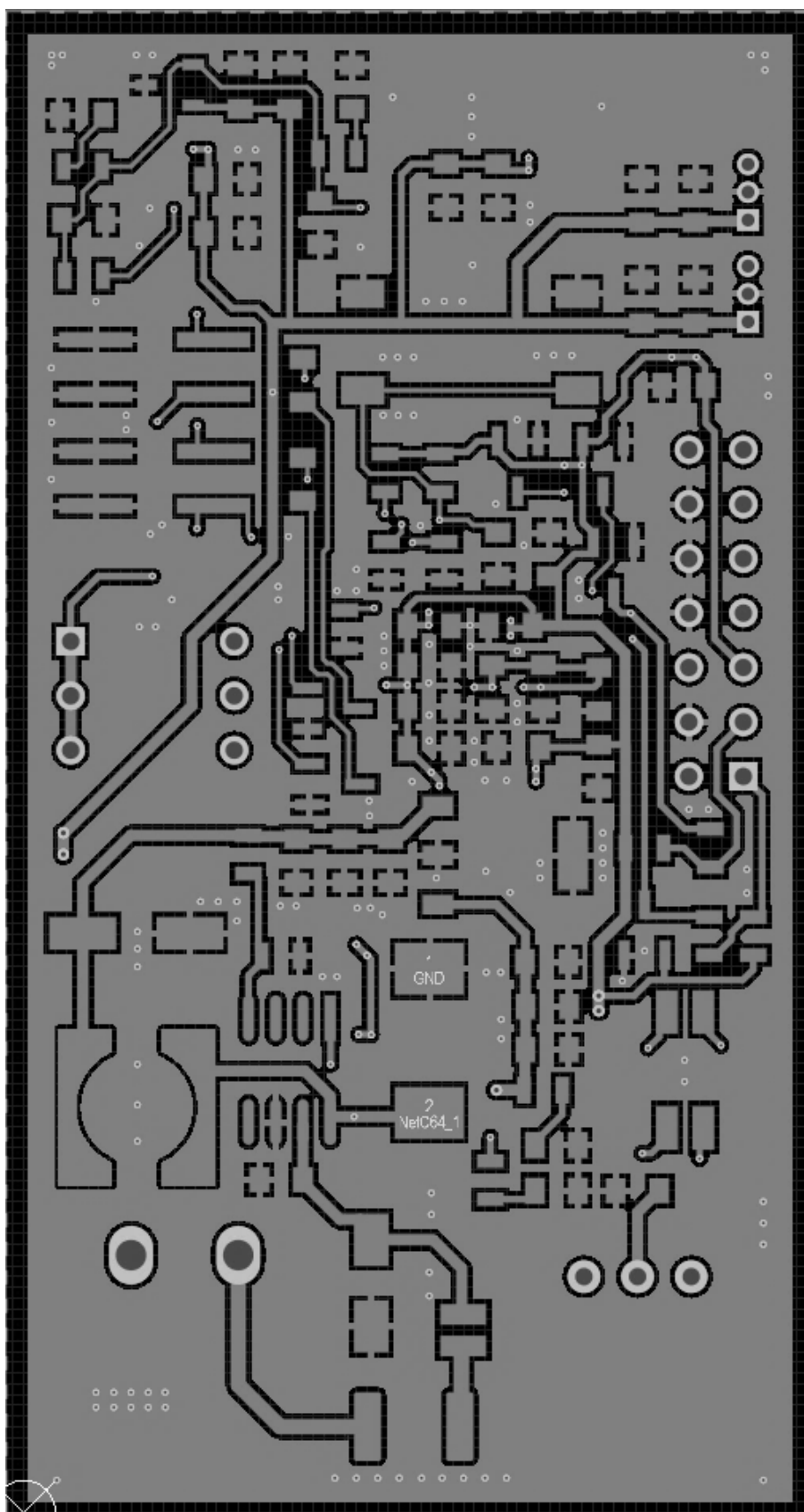


|  |                          |  |
|--|--------------------------|--|
| Size: A3   | Date: 03.05.2020         | Title: Snímání polohy akcelerčního pedálu elektrovozidla |
| Author: Adam Trojan  | Subtitle: Analogová část | Variant:   |
| Checked by: Ing. Martin Závřel   | Nr.:                     | Revision: A1   |
| Approved by: Ing. Martin Závřel  | Type: analog.Schéma      | Sheet 1 of 1   |
| Regional Innovation Centre for Electrical Engineering<br>University of Pavol Šafárik, Czech Republic |                          | Fig.:  |

Příloha B: Schéma analogové části

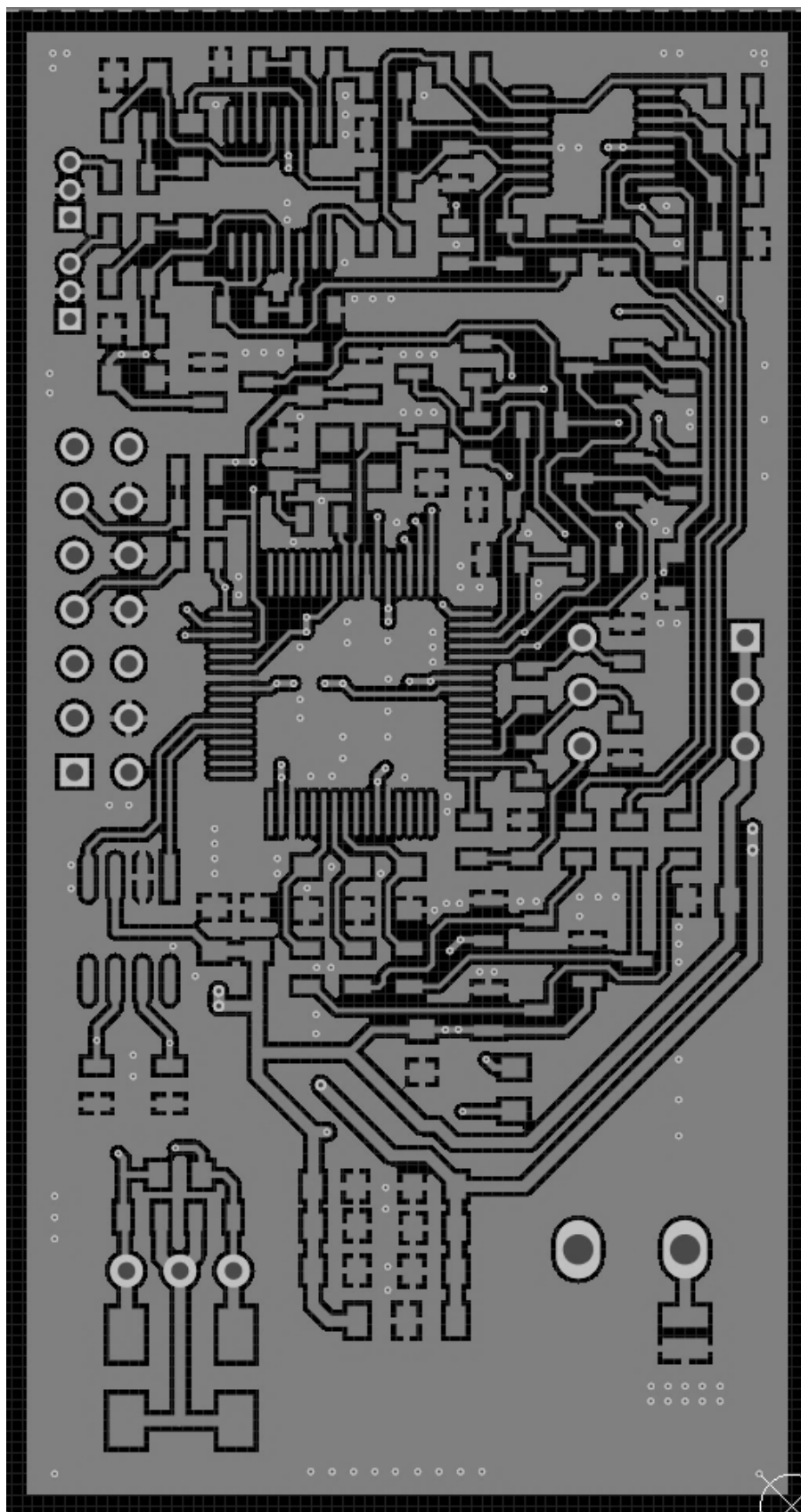


Příloha C: Schéma číslicové části



**Příloha D: Návrh DPS – horní vrstva (TOP)**





Příloha E: Návrh DPS – spodní vrstva (BOTTOM)