STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

10. elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

**Kompaktní laboratorní zdroj**

Milan Kopper

Trutnov, 2022

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

10. elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

**Kompaktní laboratorní zdroj**

**Compact power supply**

Autor: Milan Kopper

Škola: Střední průmyslová škola, Trutnov, Školní 101

Kraj: Královéhradecký kraj

Konzultant: Bc. Jakub Šenkýř

Trutnov, 2022

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svoji práci SOČ pod vedením Bc. Jakuba Šenkýře vypracoval samostatně a použili jsme pouze zdroje uvedené v seznamu zdrojů.

Prohlašuji, že tištěná a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

V Trutnově dne 28.3.2022 Milan Kopper ………………………………

**Poděkování (přepiš do jednotného čísla!)**

V první řadě děkujeme našemu konzultantovi Bc. Jakubu Šenkýřovi, za to že podpořil náš nápad a usměrnil ho svými věcnými připomínkami - díky nim jsme se zaměřili i na uživatelský pohled na věc. Dále děkujeme naší škole za poskytnutí materiálu, vybavení a prostor pro výrobu prototypu. V neposlední řadě chceme poděkovat ostatním členům školního kroužku mechatroniky za podporu a možnost si v této skvělé komunitě předávat například poznatky o nových výrobních postupech.

**Anotace**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Mauris dolor felis, sagittis at, luctus sed, aliquam non, tellus. Nullam rhoncus aliquam metus. Pellentesque sapien. Nullam justo enim, consectetuer nec, ullamcorper ac, vestibulum in, elit. Suspendisse nisl. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Curabitur sagittis hendrerit ante. Cras pede libero, dapibus nec, pretium sit amet, tempor quis. Nullam lectus justo, vulputate eget mollis sed, tempor sed magna. Vivamus luctus egestas leo. Suspendisse sagittis ultrices augue. Quisque porta. Duis bibendum, lectus ut viverra rhoncus, dolor nunc faucibus libero, eget facilisis enim ipsum id lacus. Aenean id metus id velit ullamcorper pulvinar. Nullam faucibus mi quis velit. In dapibus augue non sapien. Etiam posuere lacus quis dolor.

**Klíčová slova**

STM32, laboratorní zdroj, buck regulátor, proudový zdroj, napěťový zdroj, 3D tisk

**Anotace**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Mauris dolor felis, sagittis at, luctus sed, aliquam non, tellus. Nullam rhoncus aliquam metus. Pellentesque sapien. Nullam justo enim, consectetuer nec, ullamcorper ac, vestibulum in, elit. Suspendisse nisl. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Curabitur sagittis hendrerit ante. Cras pede libero, dapibus nec, pretium sit amet, tempor quis. Nullam lectus justo, vulputate eget mollis sed, tempor sed magna. Vivamus luctus egestas leo. Suspendisse sagittis ultrices augue. Quisque porta. Duis bibendum, lectus ut viverra rhoncus, dolor nunc faucibus libero, eget facilisis enim ipsum id lacus. Aenean id metus id velit ullamcorper pulvinar. Nullam faucibus mi quis velit. In dapibus augue non sapien. Etiam posuere lacus quis dolor.

**Keywords**

STM32, laboratory power supply, buck regulator, current source, voltage source, 3D printing

**Obsah**

[1. Úvod 7](#_Toc94888022)

[2. Hardwarová část 8](#_Toc94888023)

[2.1. Ovládací panel 8](#_Toc94888024)

[2.1.1. Enkodér 9](#_Toc94888025)

[2.1.2. Tlačítka 9](#_Toc94888026)

[2.1.3. Ergonomie 9](#_Toc94888027)

[2.1.4. Mechanické provedení 10](#_Toc94888028)

[2.2. Řídící deska 10](#_Toc94888029)

[2.2.1. Napájení MCU 10](#_Toc94888030)

[2.2.2. Převodník logických úrovní 10](#_Toc94888031)

[2.2.3. Regulace chlazení 11](#_Toc94888032)

[2.2.4. EEPROM 11](#_Toc94888033)

[2.2.5. Přehled použitých pinů MCU 11](#_Toc94888034)

[2.3. Buck regulátor 12](#_Toc94888035)

[2.3.1. Vlastní obvod buck regulátoru 12](#_Toc94888036)

[2.3.2. Stavitelný napěťový dělič 13](#_Toc94888037)

[2.3.3. Ověření funkčnosti a stanovení přesných hodnot výstupu 14](#_Toc94888038)

[3. Softwarová část 16](#_Toc94888039)

[3.1. Standardní pracovní režimy 16](#_Toc94888040)

[3.1.1. Mód 0 – měření 16](#_Toc94888041)

[3.2. Startovní sekvence 16](#_Toc94888042)

[3.3. Detekce poruch 16](#_Toc94888043)

[4. Závěr 17](#_Toc94888044)

[5. Zdroje 18](#_Toc94888045)

[6. Zkratky 19](#_Toc94888046)

[7. Seznam obrázků 20](#_Toc94888047)

[8. Seznam tabulek 21](#_Toc94888048)

[9. Seznam grafů 21](#_Toc94888049)

[10. Přílohy 21](#_Toc94888050)

[10.1. Schéma spínaného zdroje 22](#_Toc94888051)

# Úvod

# Hardwarová část

Zdroj sestává z několika desek plošného spoje, které byly vyrobeny svépomocí fotocestou, v důsledku toho že tato metoda výroby v naších podmínkách neumožňuje prokovení je nutno u THT součástek vždy přivést vodivou cestu na spodní stranu desky tak aby je bylo možno pájkou se součástkou vodivě spojit. V důsledku toho jsou na některých místech umístěny propojky jednotlivých stran desky u konektorů.

## Ovládací panel



Obrázek 1: ovládací panel

Tabulka 1: přehled ovládacích prvků

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1. | OLED display SSD1306, úhlopříčka 0,91“, 128x64 pixelů, I2C | |
| 2. | Inkrementální enkodér s tlačítkem | -Otáčení nastavuje číslici  -Stlačení vstup do menu volby velikostí výstupu nebo jako tlačítko OK |
| 3. | Tlačítko posunu vlevo | O cifru zvýší zapisované číslo |
| 4. | Tlačítko posunu vpravo | O cifru sníží zapisované číslo |
| 5. | Tlačítko menu | Zobrazí další stránku menu |
| 6. | Kladný výstup zdroje | |
| 7. | Záporný výstup zdroje | |

### Enkodér

Byl využit enkodér E1171S, jedná se o enkodér s tlačítkem a rozlišením 20 impulzů na otáčku, společný kontakt přepínače enkodéru a jeden z kontaktů tlačítka je připojen na zem zatímco jsou zbylé piny přivedeny na MCU kde je využito vnitřního enkodéru.

U enkodéru se ukázaly být velkým problémem zákmity, vzhledem k možné vyšší rychlosti otáčení je navíc MCU snímán pomocí přerušení, softwarová řešení využívající minimální dobu mezi pulzy se ukázala jako nepříliš přesná a zachytávající velké množství falešných pulzů, převážně na vzestupné hraně signálu. Bylo tedy přistoupeno k HW řešení na výstupy přepínače byly připojeny dva kondenzátory o kapacitě 10nF které na vzestupné hraně fungují s interními pull-upy jako RC článek, zatímco na sestupné hraně dojde k téměř okamžitému nabití pouze přes odpor spínačů. Sestupná hrana jež je pro přerušení podstatná je tedy velmi ostrá. Je to poměrně obvyklé řešení vzhledem k dostupnosti těchto kondenzátorů. Hodnota pull-up rezistorů v MCU STM32F103C8 je obvykle 40kΩ. [1]

Čas nabytí kondenzátoru na 90% napětí byl určen ze vztahu:

)

Z čehož:

=> t = 933us

Vyjdeme-li z toho že enkodér poskytuje 20 imp/otáčku a nabíjení by muselo trvat ¼ impulzu aby mohlo ovlivnit měření můžeme spočíst maximální rychlost otáčení:

= 84,17 rad/s

To je prakticky nedosažitelná rychlost a proto nemůže tato kapacita ovlivnit chod zařízení tím že by se nacházela v zakázaném pásmu.

### Tlačítka

Vzhledem k tomu, že nebyla očekávána vysoká frekvence impulzů jsou zákmity řešeny pouze softwarově. Tlačítka se spínají proti zemi zatímco jsou připojena na vstupy MCU s interními Pull-up rezistory. To platí i pro tlačítko enkodéru. K napojení na řídící desku jsou u DPS tlačítek použity SMD plošky, k nimž jsou připájeny vodiče, a to především kvůli prostorové úspornosti.

### Ergonomie

Umístění výstupů zdroje bylo zvoleno co nejdál od ovládací a zobrazovacích prvků zdroje aby nedošlo k jejich zablokování případným větším množství kabelů způsobeným například vzájemným spojením více banánků.

Hmatník enkodéru je pak tvarován tak aby ho bylo možno pohodlně uchopit třemi prsty, ovládací tlačítka jsou poté umístěna hned pod ním což zaručuje snadné přehmatávání.

### Mechanické provedení

Pro výrobu ovládacího panelu byla zvolena metoda 3D tisku, díky níž bylo možné na něj umístit jak úchyty pro ovládací a zobrazovací prvky tak úchyty pro řídící desku. Uchycení DPS je řešeno pomocí závitových vložek M2 typu BN1054. OLED displej je na místě uchycen pomocí krytu, jež ho ze zadní strany přidržuje na místě, vzhledem k nevýhodnému umístění montážních otvorů na OLED pro tuto aplikaci. Přichycení ke spodní části krytu je zajištěno sešroubováním s protikusem na vnější straně krytu šrouby velikosti M2. V horním krytu je ovládací panel zajištěn západkou.

## Řídící deska

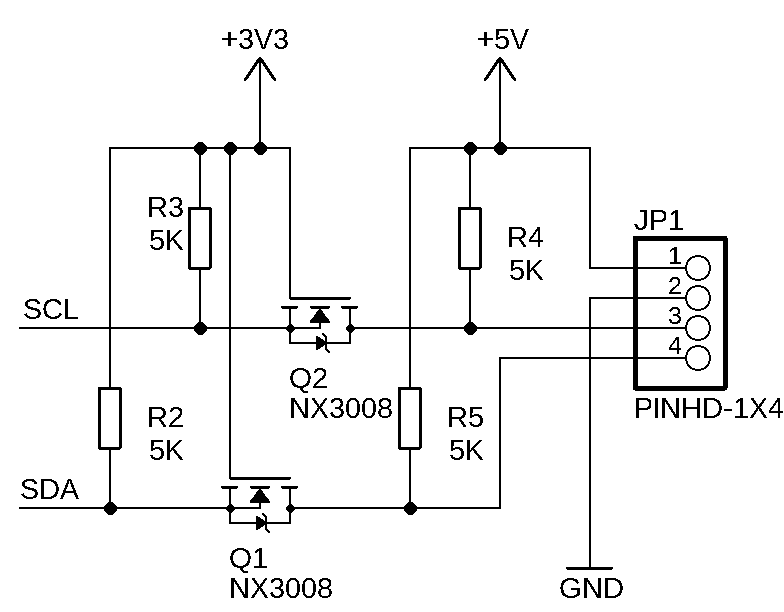
Řídící deska je použita k napojení MCU STM32F103C8 na vývojové desce bluepill ke konektorům, periferii EEPROM a jejímu napájení. Také je zde umístěn MOSFETový převodník úrovní pro I2C1.

### Napájení MCU

K napájení je použita série regulátorů počínající regulací 24V na 12V za pomoci MC78M12CDTG v pouzdru DPAK za ním následuje regulace na 5V zajištěná IC AZ1117CD5, jež využívá stejného pouzdra, regulátory jsou dle doporučeného zapojení doplněny o 100nF MLCC SMD kondenzátory na vstupu i výstupu každého z nich. Dále je ke každému antiparalelně připojena dioda sloužící k ochraně před záporným rozdílem napětí na regulátoru. Regulaci z 5V na 3,3V zajišťuje již samotná vývojová deska.

### Převodník logických úrovní

Převodník je použit pro komunikaci s OLED displejem který pracuje s napěťovou úrovní 5V. Využívá k tomu I2C1. Pro převod je použito poměrně rozšířené řešení převodu za pomoci MOSFET tranzistorů s kanálem typu N. Moduly používající toto zapojení jsou běžně prodávány [2] a ke stavbě bylo přistoupeno pouze z prostorových důvodů. Jako převodní tranzistory byly zvoleny NX3008 v pouzdru SOT23. Jako pull-up rezistory 0805 o odporu 5KΩ, což je doporučovaná hodnota pull-upů pro I2C sběrnici.



Obrázek 2: převodník log. úrovní (výňatek ze schéma řídící desky)

### Regulace chlazení

Snímání teploty je prováděno termistorem NTCM-10K-B3380, jež je typu NTC má R25=10kΩ a B = 3380. Je spojen do série jako napěťový dělič s rezistorem o hodnotě 10kΩ. Napojení termistoru je řešeno vodiči. Výstupní napětí děliče je přivedeno na pin MCU PA3.

Řízení výkonu ventilátoru je řešeno skrze PWM, pro řízení j použit N-MOSFET NX3008. Na gate je přiveden z MCU 1. kanál 2. časovače na pinu PA15. Ventilátor je napájen 5V napájecí větví, vzhledem k tomu, že to byla s ohledem na dostupnost komponent v době stavby jediná možná varianta.

### EEPROM

Pro zapamatování servisních údajů u kterých je možná jejich častější změna je na desce umístěn čip EEPROM M24C01-WMN6P, který je napojen na sběrnici I2C2. Jeho kapacita je 1Kb, jeho adresa byla nastavena za pomoci pinů E0-E2 a to na hodnotu 1010000. Je používán na 3,3V logice.

### Přehled použitých pinů MCU

Tabulka 2: přehled použitých pinů

|  |  |
| --- | --- |
| pin | funkce |
| PA0 | ADC – snímání proudu |
| PA1 | ADC – snímání napětí |
| PA2 | ADC – snímání napětí na prvku proudové regulace |
| PA3 | ADC – měření teploty |
| PA4 | D IN – tlačítko enkodéru |
| PA5 | D IN – tlačítko vlevo |
| PA6 | D IN – tlačítko vpravo |
| PA7 | D IN – tlačítko menu |
| PA8 | D OUT – relé napájení spínaného regulátoru |
| PA9 | D OUT – relé napájení lineárního regulátoru |
| PA15 | TIM2\_CH1 – PWM výstup řízení ventilátoru |
| PB0 | EXTI – signál enkodéru A |
| PB1 | D IN – signál enkodéru B |
| PB6 | I2C1 SCL |
| PB7 | I2C1 SDA |
| PB10 | I2C2 SCL |
| PB11 | I2C2 SDA |
| PB12 | D OUT – řízení pulzního regulátoru MSB |
| PB13 | D OUT – řízení pulzního regulátoru |
| PB14 | D OUT – řízení pulzního regulátoru |
| PB15 | D OUT – řízení pulzního regulátoru LSB |

## Buck regulátor

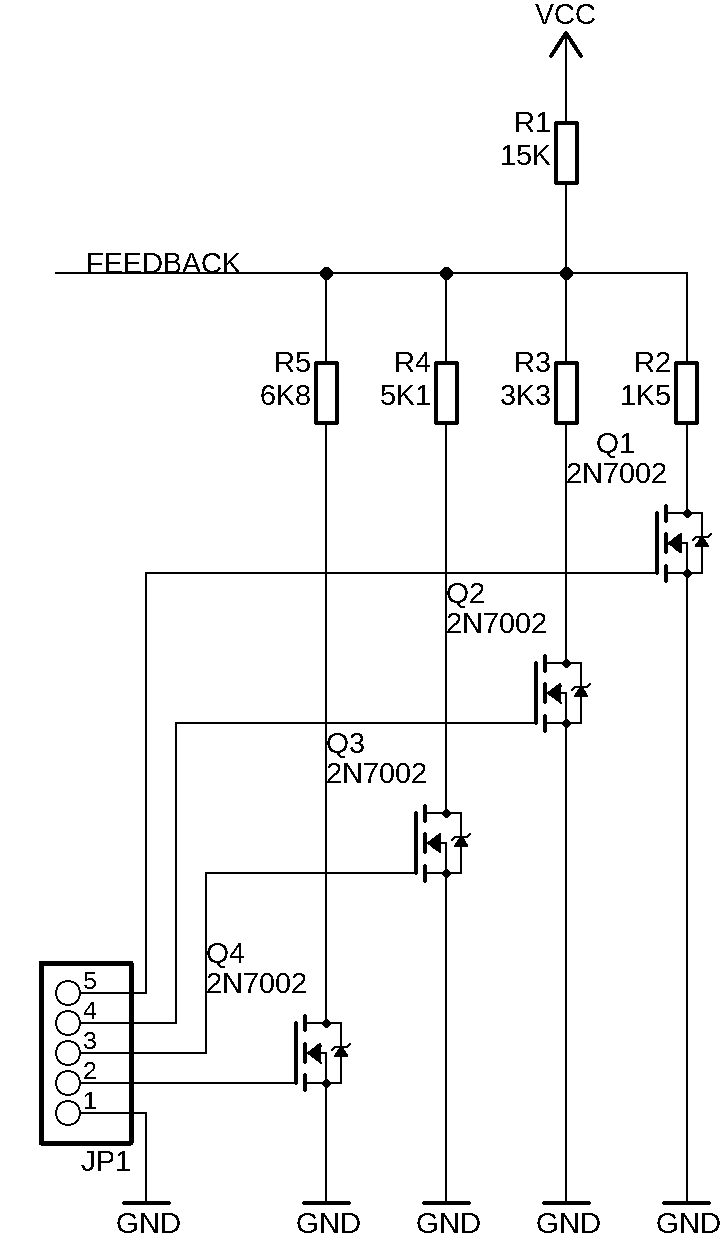
Obvod BUCK regulátoru byl navržen za účelem možného předřazení před lineární regulátoru v případě že bude na výstupu zdroje požadováno malé napětí. Pro snazší vývoj a výrobu je BUCK regulátor realizován na samostatné desce DPS. Byl navržen pro řízení 4-bitovým dvoustavovým signálem vedeným z řídící desky, silová část sestávající ze 3 vodičů je napojena na desku lineárního regulátoru která zajišťuje předřazování.

### Vlastní obvod buck regulátoru

Obvod je založen na IO AP1501, jehož maximální výstupní proud činí 3A výrobce dále uvádí, že se jeho efektivita se pohybuje okolo 73%. [3] Zapojení regulátoru vychází z doporučeného zapojení výrobce [4]. Byly použity kondenzátory s jmenovitým napětím 35V, jejich hodnota byla zaokrouhlena vzhůru na 1000uF vzhledem k dostupnosti těchto kondenzátorů. Jako indukčnost byla použita cívka s toroidním jádrem za účelem snížení vířivých proudů. V souladu s dokumentací výrobce byla použita dioda B340A. Dále byl také na výstup přidán rezistor o hodnotě 100kΩ za účelem vybytí obvodu při jeho odpojení od zátěže i v případě, že by byl otevřen žádný z tranzistorů stavitelného děliče.

### Stavitelný napěťový dělič

Integrovaný obvod AP1501-ADJ je opatřen vnitřní referencí 1,23V kterou interně porovnává s napětím na pinu feedback. Na tento vývod je možno připojit napěťový dělič při čemž se následně výstupní napětí řídí vztahem:

Výrobce uvádí že velikost odporu R2 by se měla pohybovat v rozmezí 1-3kΩ. [3] Vzhledem k volbě odporů ve standardizované řadě E24 a na základě jejich momentální dostupnosti se nepodařilo toto doporučení dodržet.

Stavitelný napěťový dělič obsahuje jeden referenční rezistor R1, Odpor R2 je zastoupen čtyřmi odpory řazenými paralelní jejichž sepnutí do obvodu je řízeno signálním N-MOSFET tranzistorem. Gate těchto tranzistorů je přiveden na konektor odkud je napojen na řídící desku.

Hodnoty odporů byly voleny tak aby byly schopny pokrýt rozsah zhruba od 3,3V do 24V. Podle napětí 3,3V byla vypočtena hodnota rezistoru na pozici LSB, jako nejbližší byla z dostupné řady zvolena hodnoty 6,8kΩ. Celkový součet odporů pak musel poskytnout výstupní napětí 24V. Odpory mezi těmito hodnotami byly voleny, tak aby byly zhruba poloviční oproti odpor sousedního méně významného bitu.

Vzhledem k volbě odporů v řadě E24 s tolerancí 5% bylo stanoveno pásmo ve kterém se může výstupní napětí pohybovat a to s ohledem na to že se jak odpor referenční tak odpor přiřazený.

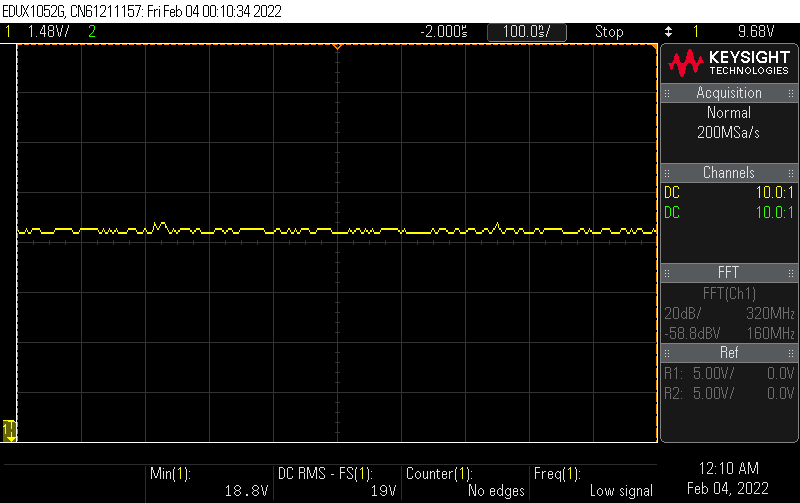
Obrázek 3: schéma stavitelný dělič

### Ověření funkčnosti a stanovení přesných hodnot výstupu

Vzhledem možnému velkému rozptylu výstupních hodnot způsobeném tolerancemi rezistorů bylo přistoupeno ke kontrolnímu měření z nějž vzešly hodnoty požité pro softwarovou část zařízení a které jsou platné je pro tento konkrétní kus regulátor. Samotné měření bylo realizováno za pomoci umělé zátěže pracující v módu konstantního odporu, kdy byl nastaven odpor který odpovídá průtoku 3A při ideálním napětí na výstupu. Výstupní napětí bylo měřeno osciloskopem kde byla odečítána jeho minimální hodnota. Tímto měřením bylo zároveň možné zkontrolovat zvlnění napětí na výstupu, ač toto měření může být zavádějící, vzhledem k tomu, že umělá zátěž může v určitých situacích způsobit částečné rozkmitání. Výsledky měření ukázaly, že se výstup pohybuje v předem vypočtených mezích s výjimkou nejvyšší hodnoty kde již vstupní napětí nepostačuje regulátoru pro udržení požadovaného napětí výstupu.

Tabulka 3: Výstup spínaného regulátoru

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Naměřené hodnoty | | |
| Při | Uin = | 24V |
|  | Iout = | 3A |
| vstupní data | Zatěž [Ω] | U out [V] |
| 0 | ------ | 1,23 |
| 1 | 1,314 | 3,88 |
| 2 | 1,616 | 4,79 |
| 3 | 2,520 | 7,52 |
| 4 | 2,273 | 6,40 |
| 5 | 3,177 | 9,10 |
| 6 | 3,478 | 9,90 |
| 7 | 4,383 | 12,50 |
| 8 | 4,506 | 12,80 |
| 9 | 5,410 | 15,30 |
| 10 | 5,712 | 16,20 |
| 11 | 6,616 | 18,97 |
| 12 | 6,369 | 18,37 |
| 13 | 7,273 | 20,63 |
| 14 | 7,575 | 21,40 |
| 15 | 8,479 | 22,71 |



Obrázek 4: příklad zvlnění výstupu

Graf 1: Výstupní napětí spínaného regulátoru

# Softwarová část

## Standardní pracovní režimy

### Mód 0 – měření

## Startovní sekvence

## Detekce poruch

# Závěr

# Zdroje

1. ST - STM32F103C8. St.com [online]. 2015 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>
2. Drátek.cz: IIC I2C 5V na 3.3V Obousměrný Převodník Logické Úrovně. Diodes incorporated [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1481-iic-i2c-5v-na-3.3v-obousmerny-prevodnik-logicke-urovne.html
3. Datasheet AP1501. Diodes incorporated [online]. 2021 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP1501.pdf>
4. AP1501 Aplication note. Diodes incorporated [online]. 2006 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Part-Support-Files/AP1501/ANP002_AP1501.pdf>

# Zkratky

Zkratka: Anglický význam: Český význam:

MCU microcontroller unit mikrokontroler

HW hardware hardváré

IO integrated circuit integrovaný obvod

Imp impulse impulz

Log. Logical logická

NTC negative temperature coefficient negastor

D digital digitální

ADC Analog digital converter analogově digitální převodník

DAC Digital analog converter digitálně analogový převodník

IN input vstup

OUT output výstup

PWM puls wight modulation pulzně délková modulace

EXTI external interrupt vnější přerušení

TIM timer/counter čítač/časovač

CH chanel kanál

LSB least significant bit nejméně významný bit

# Seznam obrázků

[Obrázek 1: ovládací panel 8](#_Toc94888054)

[Obrázek 2: převodník log. úrovní (výňatek ze schéma řídící desky) 11](#_Toc94888055)

[Obrázek 3: schéma stavitelný dělič 13](file:///D:\mechatronika\zdroj\v3.0\dokumentace.docx#_Toc94888056)

[Obrázek 4: příklad zvlnění výstupu 15](#_Toc94888057)

# Seznam tabulek

[Tabulka 1: přehled ovládacích prvků 7](#_Toc94879708)

[Tabulka 2: přehled použitých pinů 10](#_Toc94879709)

[Tabulka 3: Výstup spínaného regulátoru 12](#_Toc94879710)

# Seznam grafů

[Graf 1: Výstupní napětí spínaného regulátoru 13](#_Toc94879719)

# Přílohy

## Schéma spínaného zdroje

