

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 použil jsem pouze zdroje uvedené v seznamu zdrojů.

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

V Trutnově dne 3.3.2022 Milan Kopper

Poděkování

V první řadě děkuji svému konzultantovi Bc. Jakubu Šenkýřovi za to, že podpořil můj nápad a usměrnil ho svými věcnými připomínkami. Dále děkuji SPŠ Trutnov za poskytnutí materiálu, vybavení a prostor pro výrobu prototypu, zejména Ing. Vladimíru Beránkovi za umožnění užití školních laboratoří pro testování projektu. V neposlední řadě chci poděkovat ostatním členům školního kroužku mechatroniky za podporu a možnost si v této skvělé komunitě předávat například poznatky o nových výrobních postupech.

Anotace

Cílem tohoto projektu bylo vytvořit regulovatelný zdroj napětí a proudu, který by dosahoval velikosti standardní DVD mechaniky, byl by snadno přenosný, a to i za příznivé ceny.

Zařízení se skládá z OEM zdroje, řídicího systému, pulzního regulátoru a lineárních regulátorů proudu a napětí. Centrem řídicího systému je mikrokontroler STM32, pro zobrazování je použit OLED display.

Maximální výstup zdroje je dimenzován na 19V a 2,8A.

Klíčová slova

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

Anotace

The aim of this project was to create a controllable voltage and current source that would reach the size of a standard DVD drive, be easily portable, even at affordable prices.

The device consists of an OEM power supply, control system, switching regulator and linear current and voltage regulators. The control system is build on the STM32 microcontroller, the OLED display is used for informing user.

The maximum rated output of the source is 18V and 2.6A.

Keywords

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

Obsah

1.	Úvod.....	7
2.	Hardwarová část.....	8
2.1.	Ovládací panel.....	10
2.1.1.	Enkodér.....	10
2.1.2.	Tlačítka.....	11
2.1.3.	Ergonomie.....	11
2.1.4.	Mechanické provedení.....	11
2.2.	Řídící deska.....	12
2.2.1.	Napájení MCU.....	12
2.2.2.	Převodník logických úrovní.....	12
2.2.3.	Regulace chlazení.....	13
2.2.4.	EEPROM.....	13
2.2.5.	MCU.....	13
2.3.	Buck regulátor.....	14
2.3.1.	Vlastní obvod buck regulátoru.....	14
2.3.2.	Stavitelný napěťový dělič.....	15
2.3.3.	Ověření funkčnosti a stanovení přesných hodnot výstupu.....	16
2.4.	Deska lineárních regulátorů.....	18
2.4.1.	Přepínání napájení regulátorů.....	18
2.4.2.	Lineární zdroj napětí.....	18
2.4.3.	Lineární zdroj proudu.....	20
2.5.	Chlazení.....	20
3.	Softwarová část.....	21
3.1.	Funkce ovládání periférií.....	22
3.1.1.	OLED display.....	22
3.1.2.	A/D převodník.....	22
3.1.3.	D/A převodník.....	24
3.1.4.	Pulzní regulátor.....	24
3.1.5.	Termistor a PWM řízení ventilátoru.....	25
3.1.6.	Snímání enkodéru.....	25
3.2.	Standardní pracovní režimy.....	26
3.2.1.	Mód 0 – měření.....	26

3.2.2.	Mód 1 – nastavování výstupu.....	26
3.2.3.	Mód 2 a 3 – servisní údaje	27
3.3.	Spouštěcí sekvence	27
3.4.	Detekce poruch	27
4.	Závěr.....	29
5.	Zdroje	30
6.	Zkratky	31
7.	Seznam obrázků	32
8.	Seznam tabulek	33
9.	Seznam grafů.....	33
10.	Přílohy	33
10.1.	Schéma spínaného zdroje.....	34
10.2.	Schéma desky lineárních regulátorů	35
10.3.	Schéma řídicí desky	36
10.4.	Schéma zapojení enkodéru.....	37
10.5.	Schéma panelu tlačítek.....	37

1. Úvod

K vytvoření tohoto projektu jsem byl inspirován dvěma zásadními impulzy. Jednak potřebou na školních akcích, jako například veletrhy středních škol či dny otevřených dveří, napájet rozmanité spektrum výtvorů studentů, jež obvykle nedisponují vlastním zdrojem a mohou vyžadovat i nestandardní parametry napájení. Za tímto účelem jsme používali klasické laboratorní zdroje, ty jsou však těžké a objemné, proto je jejich přeprava nadbytečnou přítěží.

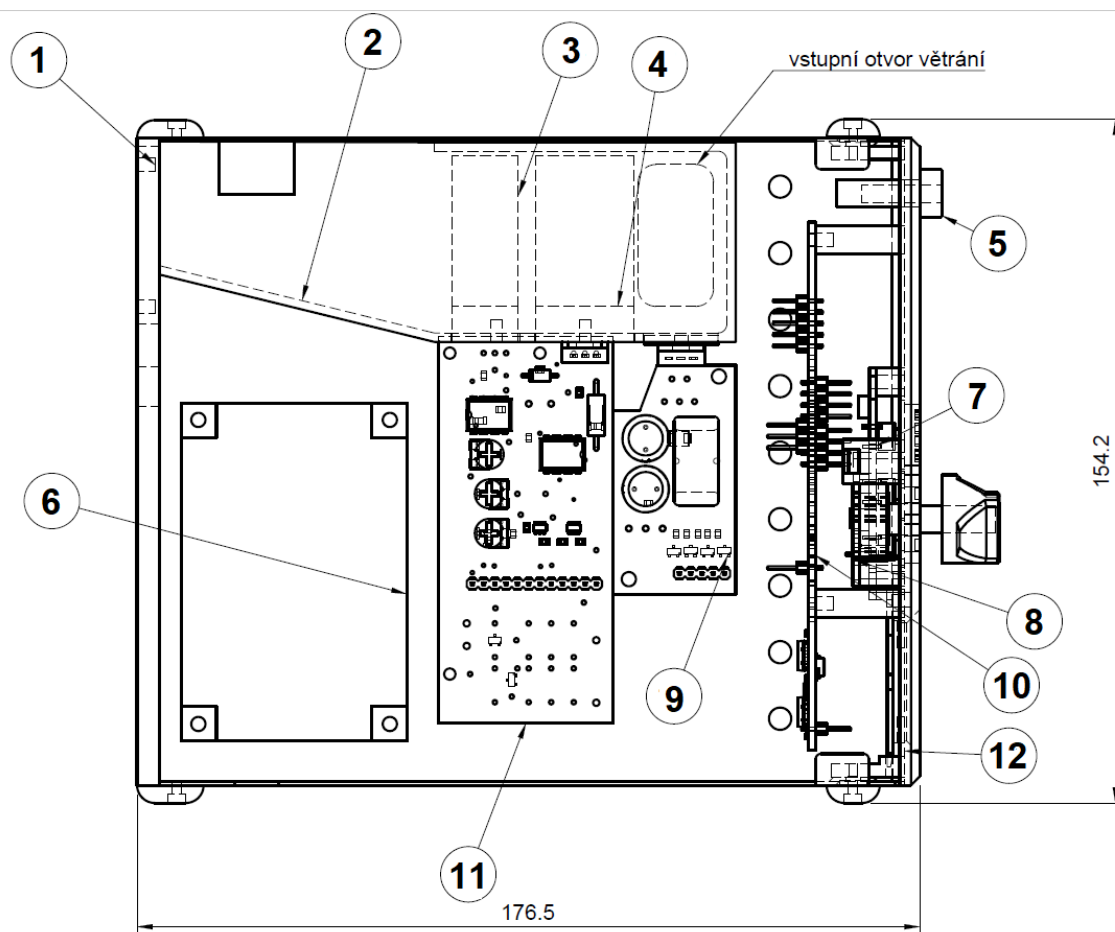
Druhým z aspektů bylo, že i já jakožto student jsem si chtěl opatřit pro vlastní potřeby regulovatelný zdroj, ceny komerčně dostupných modelů mi však přišly příliš vysoké. Rozhodl jsem se tedy zabudovat LM317 s 12V 1,5A OEM zdrojem do pouzdra CD/DVD mechaniky. Ukázalo se však, že dochází k poměrně velkému zahřívání a výstupní výkon a napětí zdroje nejsou dostatečné.

Rozhodl jsem se proto pro stavbu vlastního lineárního sériového regulátoru, který pro snížení ztrát bude vybaven předřazeným pulzním regulátorem. Následně jsem prozkoumal různá řešení, která již byla zpracována, ta však většinou užívala BUCK-BOOST regulátor a již za ním nenásledoval další regulační stupeň nebo nebyl v dokumentaci postižen.[5] To by zabraňovalo ve využívání zdroje jako zdroje proudu, což je podstatné například pro dobíjení olověných baterií.

Vzhledem k požadovaným kompaktním rozměrům a předchozím kladným zkušenostem s topologií BUCK jsem se rozhodnul vydat tímto směrem. Zdroj je vybaven automatickým nastavováním výstupu BUCK regulátoru do několika úrovní, což bylo inspirováno řešením přepínání vývodů transformátoru u lineárních zdrojů. Zdroj je napájen z OEM spínaného zdroje 24V-2,98A, nastavení hodnoty výstupního napětí a kontrola jeho hodnoty je řešena digitálně za pomoci MCU STM32. Dále také řídicí systém umožňuje vypsát některé další užitečné informace, jako například teplotu a stav chlazení nebo příkon zátěže. Mimo jiné byl opatřen i funkcí detekující některé podstatné hardwarové chyby. Vývoj softwaru jsem se rozhodl provést v jazyce C na úrovni abstrakce hardwaru.

2. Hardwarová část

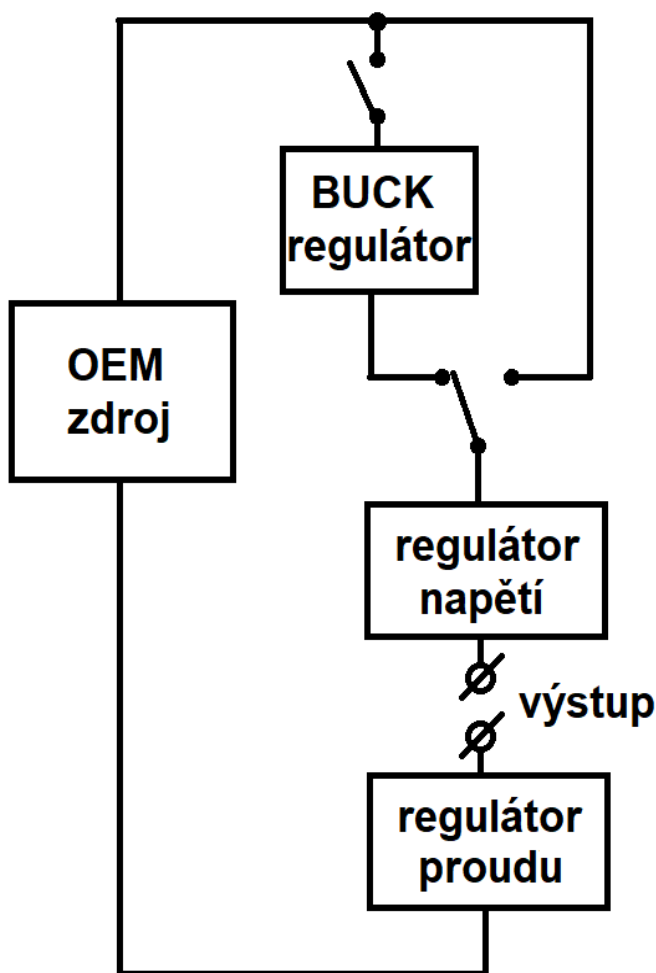
Pro vestavbu zdroje byla zvolena plechová část pouzdra vyřazené mechaniky CD-ROM. Pro výrobu předního a zadního krytu vlastního návrhu byla zvolena metoda 3D tisku. Zařízení je zamýšleno v třídě ochrany I., jestli jí však zcela splňuje, nebylo ověřeno. Odvod tepla je zajištěn aktivně pomocí 40mm ventilátoru. Jako zdroj pro napájení regulátoru byl vzhledem k bezpečnostním a legislativním důvodům a také ceně použit OEM spínaný zdroj, konkrétně CINCON CFM70S240, který je schopen dodávat až 2,94A při výstupním napětí 24V.



Obrázek 1: Rozkres základních komponent zdroje

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. Zadní kryt | 7. DPS ovládacích tlačítek |
| 2. Clona obtoku vzduchu | 8. DPS enkodéru |
| 3. Chladič lineárního regulátoru napětí | 9. DPS BUCK regulátoru |
| 4. Chladič regulátoru proudu | 10. DPS řídící desky |
| 5. Výstupní zdířky | 11. DSP desky lineárních regulátorů |
| 6. OEM zdroj | 12. Přední kryt |

Uchycení vodorovně umístěných PCB je zajištěno pomocí plastových úchytek vlastního návrhu. Jsou 6mm vysoké a obsahují dva otvory pro závitové vložky M2 na opačných stranách příchytky, jejíž středy jsou vzdálené 6,3mm. Jejich účelem je zajistit dostatečnou izolaci mezi DPS a kovovým obalem zařízení, jež je uzemněn. Krom podložek jsou tyto desky ze spodní strany opatřeny také folií, která by měla minimalizovat riziko zkratu, i pokud dojde například prudkým nárazem k rozlomení úchytky.



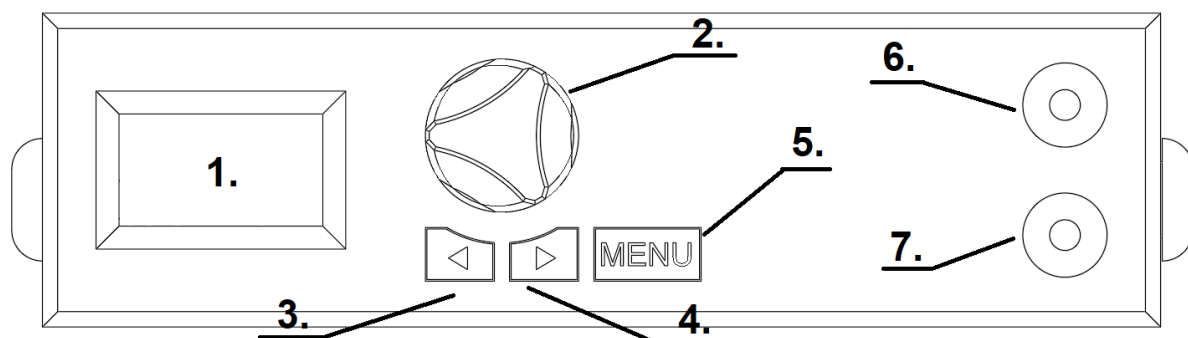
Obrázek 2: Blokové schéma silové části

nárokům na její kvalitu deska lineárních regulátorů. Desky jsou vzájemně silově propojeny vodiči CYA 1x0,75, signálové propojení je pak řešeno buď konektory 2,54“ DuPont, nebo vodiči LIYV 1x0,25.

Z elektrického hlediska sestává zdroj z několika částí. Silová část je tvořena třemi v sérii řazenými regulátory. Regulátor napětí a regulátor proudu jsou v obvodu zapojeny permanentně, spínaný regulátor napětí je do obvodu přiřazován, pokud lineárním regulátorům postačuje pro udržení požadovaných výstupních veličin napětí nižší než 24V. Za pomoci přiřazovacích relátků lze také výstup zdroje zcela odstavit.

Zdroj sestává z několika desek plošného spoje vlastního návrhu. K němu bylo použito programů Fusion360 a Eagle. Většina desek byla vyrobena svépomocí fotocestou. V důsledku toho, že tato metoda výroby v našich 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. Jedinou deskou, jež byla vyrobena na zakázku, byla vzhledem k její velikosti a vysokým

2.1. Ovládací panel



Obrázek 3: 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	

2.1.1. 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 pull-up rezistoru.

U enkodéru se ukázaly být velkým problémem zákmity, vzhledem k možné vyšší rychlosti otáčení je navíc MCU snímá pomocí přerušení, což problém zhoršuje. Softwarová řešení využívající minimální dobu mezi pulzy se ukázala jako nepřiliš přesná a zachytávající velké množství falešných impulzů, 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 vybití 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:

$$U_{90\%} = U_{in}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Z čehož:

$$-t = \ln\left(\frac{U_{in}-U_{90\%}}{U_{in}}\right) \cdot \tau \Rightarrow t = 933\mu s$$

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

$$\omega = \frac{2\pi}{20 \cdot 4 \cdot t} = 84,17 \text{ rad/s}$$

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

2.1.2. 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 řídicí desku jsou u DPS tlačítek použity SMD plošky, k nimž jsou připájeny vodiče, a to především kvůli prostorové úspornosti.

2.1.3. Ergonomie

Rozvržení ovládacích prvků zdroje bylo vytvořeno s myšlenkou udržení výstupních zdírek co nejdále od displeje tak, aby se snížila pravděpodobnost zakrytí výhledu na displej kabely připojenými ke zdroji. 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.

2.1.4. Mechanické provedení

Návrh ovládacího panelu byl proveden v programu Fusion 360. 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 řídicí 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.

2.2. Řídicí deska

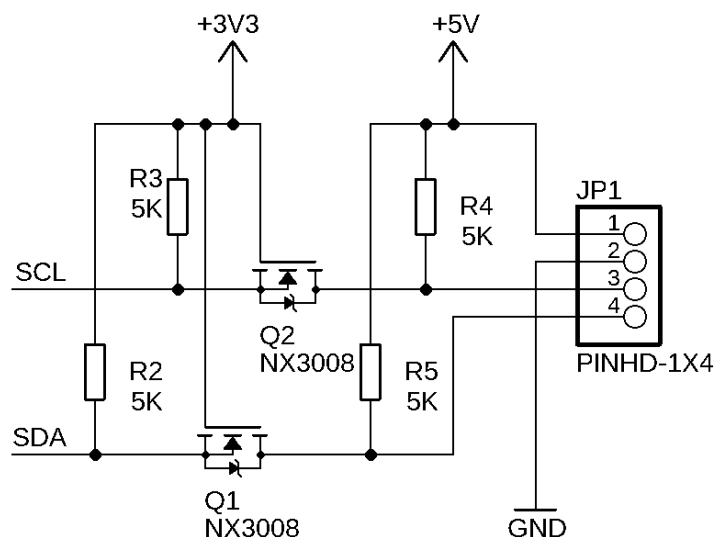
Řídicí deska je použita k napojení MCU vývojové desky bluepill ke konektorům periférií, umístění regulátorů k jejich napájení, a také je zde umístěn MOSFET převodník úrovní pro I2C1. Deska je pevně přichycena k ovládacímu panelu a pro její vyjmutí je třeba demontáž ovládacího panelu.

2.2.1. Napájení MCU

K napájení je použita série regulátorů počínající regulací 24V na 12V za pomoci TS78M12CP v pouzdru DPAK, za ním následuje regulace na 5V zajištěná IC TS1117CP, 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.

2.2.2. Převodník logických úrovní

Převodník je použit pro komunikaci s OLED displejem, který pracuje s napětíovou 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 2N7002 v pouzdru SOT23, jako pull-up rezistory v pouzdru 0805 o odporu 5,7KΩ.



Obrázek 4: Převodník log. úrovní (výňatek ze schématu řídicí desky)

2.2.3. Regulace chlazení

Snímání teploty je prováděno termistorem NTCM-10K-B3380. Jedná se o NTC termistor s parametry $R_{25}=10k\Omega$ a $\beta = 3380$. Je spojen do série jako napěťový dělič s rezistorem o hodnotě $10k\Omega$. Napojení termistoru je řešeno vodiči LIYV 1x0,25. Výstupní napětí děliče je přivedeno na pin MCU PA3.

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

2.2.4. EEPROM

Pro možné budoucí rozšíření funkcí softwaru 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 binární hodnotu 1010000. Je používán na 3,3V logice.

2.2.5. MCU

Na desce je osazený modul bluepill s mikrokontrolerem STM32F103C8. Ta je umístěna v precizních patičkách 2,54“, a to za účelem snadné demontáže modulu pro jeho výměnu nebo nahrání jiné verze SW, avšak za zachování co nejnižšího přechodového odporu. Deska obsahuje regulátor pro napájení mikrokontroleru 3,3V. Vzhledem k tomu, že je regulátor schopen pokrýt větší spotřebu, než je potřebná pro provoz MCU, slouží deska i jako zdroj 3,3V napájení pro obvody DAC převodníků a převodníku logických úrovní.

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

2.3. Buck regulátor

Obvod BUCK regulátoru byl navržen za účelem možného předřazení před lineární regulátor 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 řídicí desky, silová část sestávající ze 3 vodičů je napojena na desku lineárního regulátoru, která zajišťuje předřazování.

2.3.1. Vlastní obvod buck regulátoru

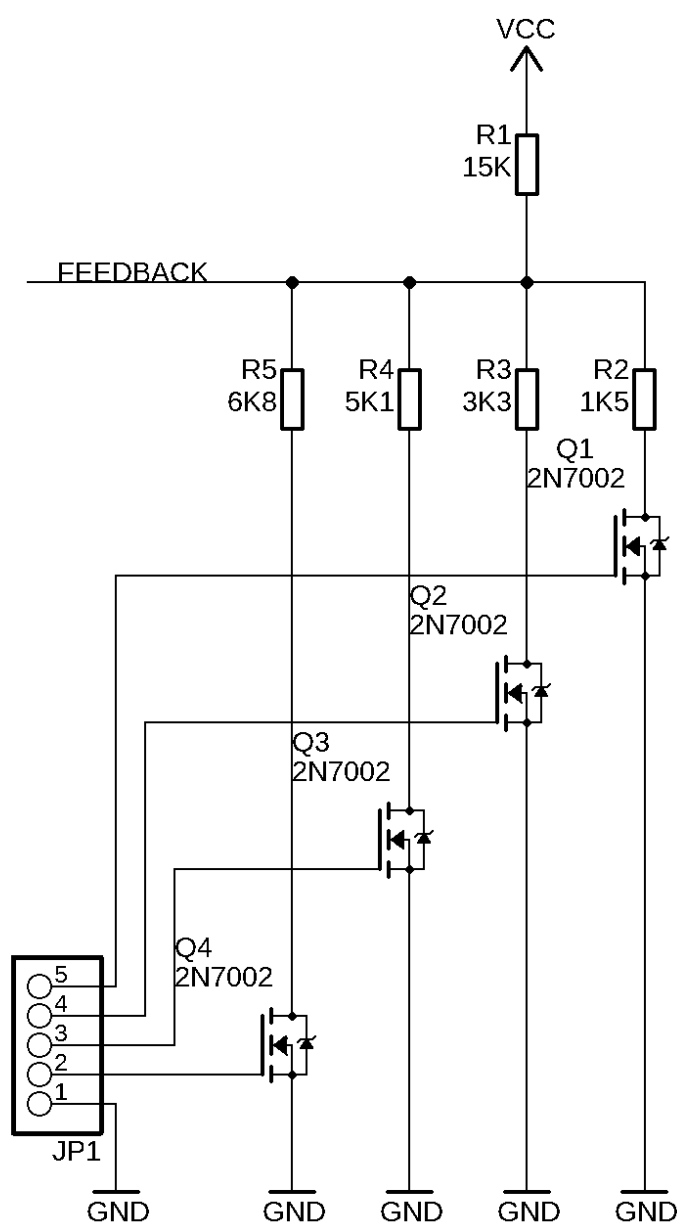
Obvod je založen na IO AP1501, jehož maximální výstupní proud činí 3A. Výrobce dále uvádí, že jeho efektivita se pohybuje okolo 73%. [3] Zapojení regulátoru vychází z doporučeného zapojení výrobce [4]. Byly použity kondenzátory se jmenovitým napětím 35V, jejich hodnota byla zaokrouhlena vzhůru na 1000uF 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 vybití obvodu při jeho odpojení od zátěže i v případě, že by nebyl otevřen žádný z tranzistorů stavitelného děliče.

2.3.2. 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, přičemž se následně výstupní napětí řídí vztahem:

$$U_{OUT} = 1,23 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$



Výrobce uvádí, že velikost odporu R_2 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 R_1 . Odpor R_2 je zastoupen čtyřmi rezistory řazenými paralelně, jejichž sepnutí do obvodu je řízeno signálním N-MOSFET tranzistorem. Gate těchto tranzistorů je přiveden na konektor, odkud je napojen na řídicí 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 hodnota 6,8kΩ. Celkový součet odporů pak musel poskytnout výstupní napětí 24V. Odporů mezi těmito hodnotami byly voleny, tak aby byly zhruba poloviční oproti odporu 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

Obrázek 5: Schéma stavitelný dělič

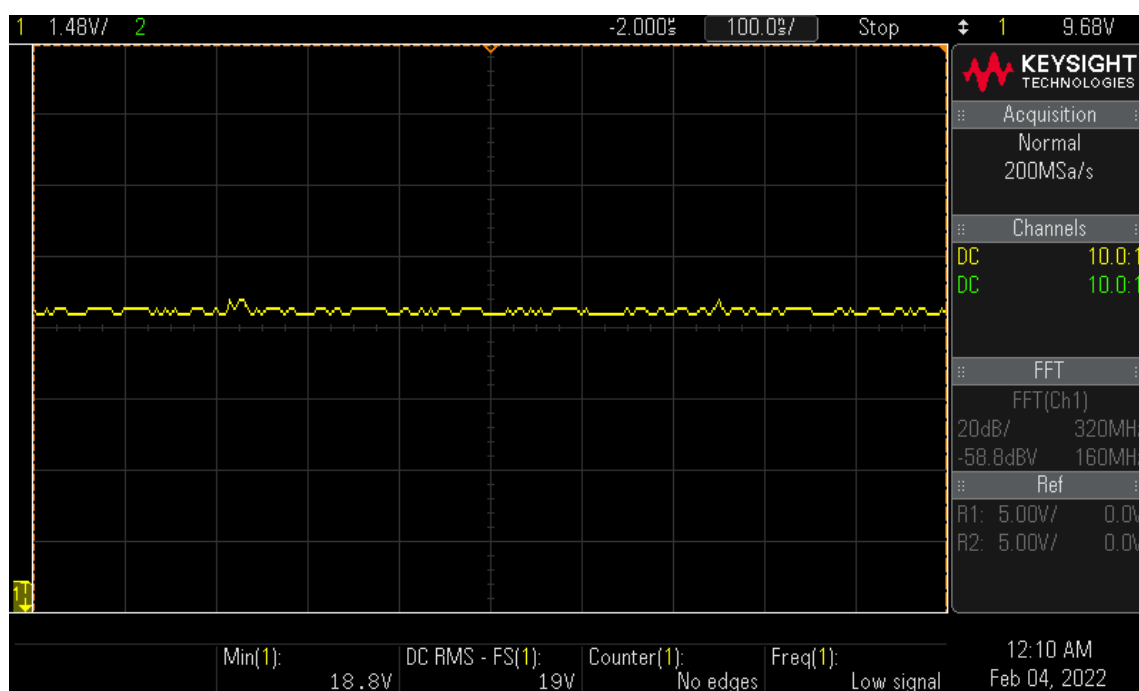
odpor přiřazený se může pohybovat v mezích této tolerance

2.3.3. Ověření funkčnosti a stanovení přesných hodnot výstupu

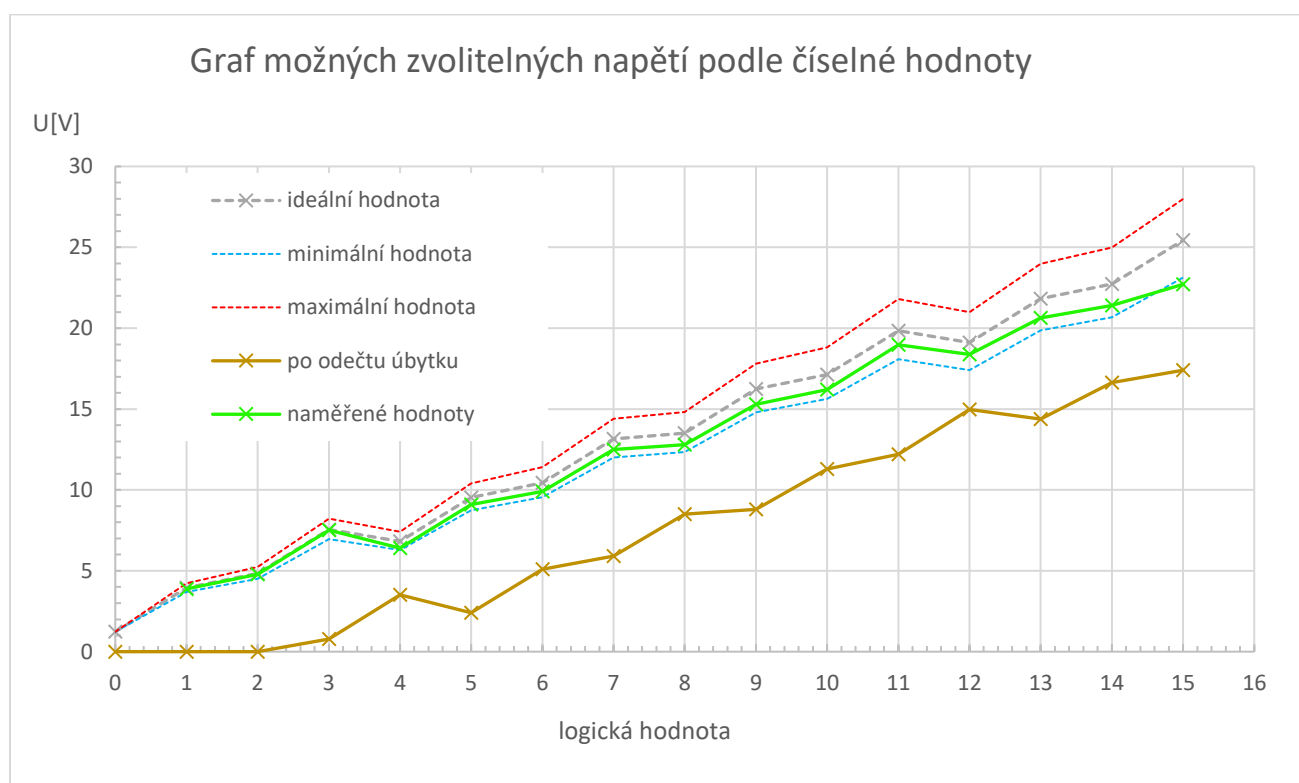
Vzhledem možnému velkému rozptylu výstupních hodnot způsobenému tolerancemi rezistorů bylo přistoupeno ke kontrolnímu měření, z něž vzešly hodnoty požité pro softwarovou část zařízení a které jsou platné jen pro tento konkrétní kus regulátor. Samotné měření bylo realizováno za pomoci umělé zátěže pracující 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	U _{in} =	24V
	I _{out} =	3A
vstupní data	Zátěž [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 6: Příklad zvlnění výstupu



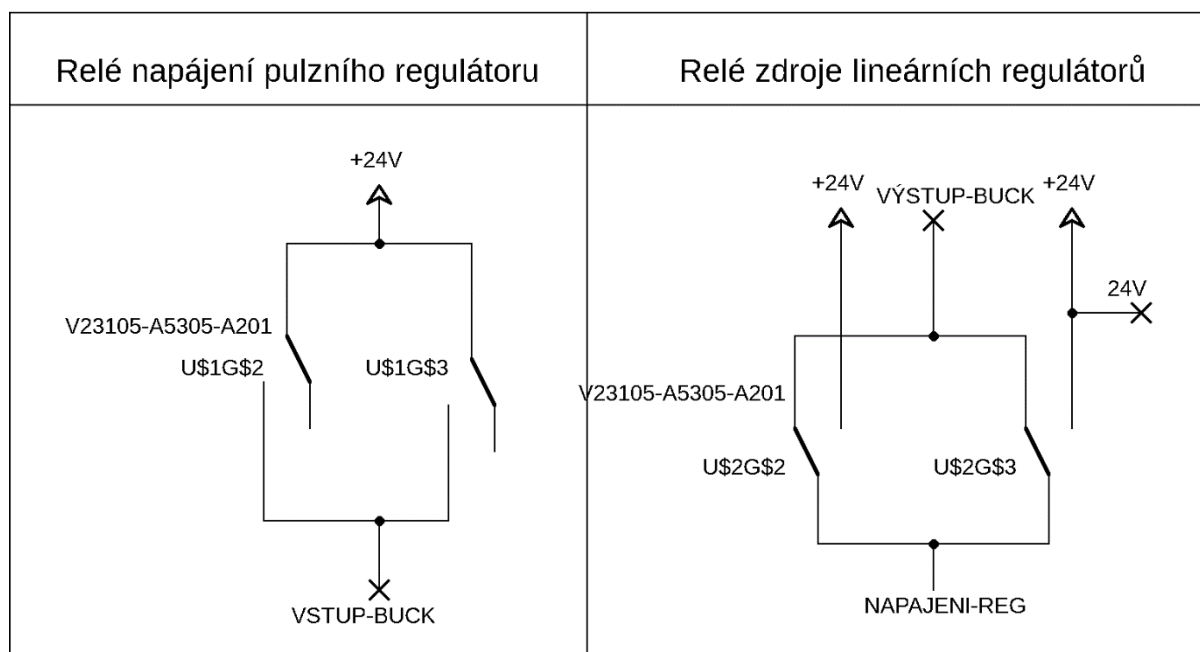
Graf 1: Výstupní napětí spínaného regulátoru

2.4. Deska lineárních regulátorů

Deska lineárních regulátorů je centrální deskou celého zařízení. Je na ní přivedeno napájení z OEM zdroje, které je dále distribuováno do řídicí desky a k jednotlivým regulátorům. Na desce se také nacházejí obvody zajišťující převod digitálních hodnot na analogové a úpravu analogových vstupních hodnot tak, aby jejich napětí nepřesáhlo 3,3V

2.4.1. Přepínání napájení regulátorů

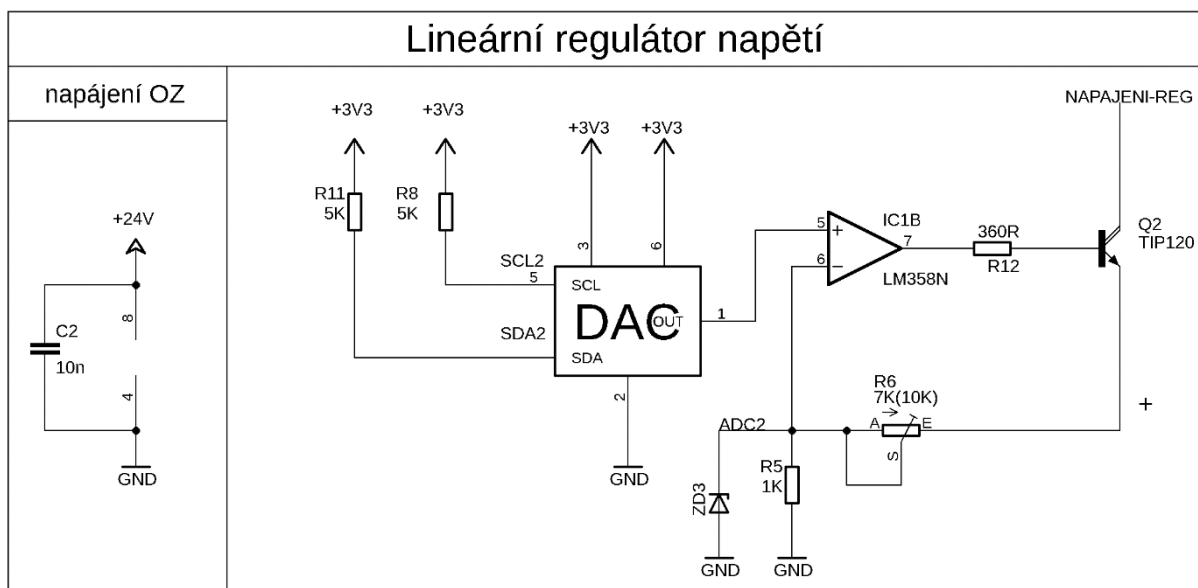
Pro přepínání napájení regulátorů jsou použity dvě relé SIEMENS V23105A5305-A201. Jedná se o relé se dvěma přepínacími kontakty DPDT, jejichž proudová zatížitelnost je 3A, a cívkou určenou na jmenovité napětí 24V. Pro nižší opotřebovávání, vzhledem k vyšším proudům při náběhu spínaného zdroje, jsou kontakty zapojeny u obou relé paralelně. Pro buzení cívek je použito N-MOSFET tranzistorů 2N7002. Vzhledem k parazitní diodě obsažené v tranzistorech typu MOSFET nebyla zařazena žádná další ochrana proti přepětí způsobenému odpojením cívký relé.



Obrázek 7: Schéma kontaktů relé

2.4.2. Lineární zdroj napětí

Pro lineární regulaci napětí je použit lineární zpětnovazební stabilizátor. Jako referenční napětí pro tento stabilizátor slouží DAC převodník MCP4726 s 12-bitovým rozlišením. Jako rozdílový zesilovač je použit obvod LM358. Operační zesilovač je napájen 24V přímo z OEM zdroje. Zpětnovazební člen byl navržen tak, aby napětí 3V na vstupu odpovídalo 24V na výstupu zdroje. Je tak možné snímat i stavy zakázané nad 3V. Tyto stavy by znamenaly selhání obvodu regulátoru. Zpětnovazební dělič má z toho důvodu má nastavenou hodnotu 1:8.



Obrázek 8: Schéma regulátoru napětí

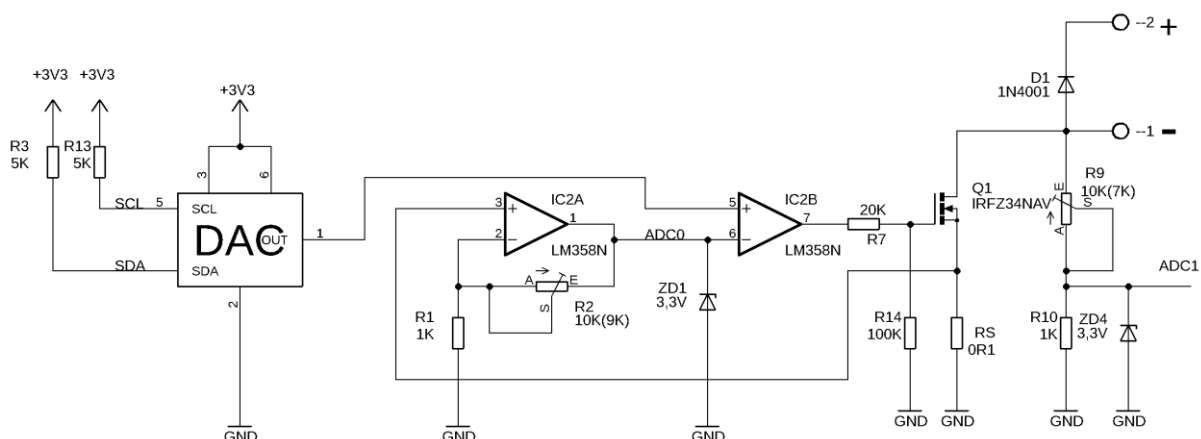
Zpětnovazební dělič zároveň slouží jako vstupní napětí pro ADC mikrokontroleru, je proto vybaven 3,3V ochrannou Zenerovou diodou. Pro přesnější doladění je v děliči použit odporový trimmer, který kompenzuje toleranci rezistoru R₅. Jako regulační je využit Darlingtonův NPN tranzistor TIP120. Jeho proudový zesilovací činitel je 1000 při U_{CE} = 3V. Saturační napětí by v tomto zapojení nemělo překonat 4V[6]. Z těchto hodnot vychází i minimální úbytek napětí na regulátoru, jež činí 4 V. Pro výpočet bázevého odporu R₁₂ muselo být započteno i maximální výstupní napětí operačního zesilovače, které je dle datového listu dáno vztahem[7]:

$$U_{VR} = U^+ - 1,5V$$

Z čehož vyplývá, že:

$$R_{12} = \frac{U_{CE} - U_{BE} - U_{OZ}}{\frac{I_{ce}}{h_{21e}}} = \frac{4 - 1,4 - 1,5}{0,003} = 366,6\Omega \cong 360\Omega$$

2.4.3. Lineární zdroj proudu



Obrázek 9: Schéma lineárního regulátoru proudu

Lineární regulátor proudu je sériový, umístěný mezi nulovou svorkou zdroje a nulovou výstupní svorkou. Jako regulační prvek slouží výkonový N-MOSFET tranzistor IRFZ34NAV. Regulátor pracuje na principu snímání proudu za pomoci odporového bočnicku, za tímto účelem je použit uhlíkový rezistor o odporu 100mΩ, maximálním ztrátovém výkonu 2W a toleranci 5%. Napětí na tomto bočnicku je zesilováno OZ LM358N, konkrétně jeho kanálem A. Vzhledem k vysoké toleranci rezistoru bočnicku je ve zpětnovazebním obvodu použit trimmer pro donastavení přesného zesílení. Tento předzesilovač slouží jednak k zesílení napětí pro umožnění snímání proudu, a také je přiveden na invertující svorku rozdílového zesilovače. Na neinvertující vstup rozdílového zesilovače je přiveden výstup DAC převodníku. Obvod je dimenzován tak, aby napětí po zesílení rovno 1V odpovídalo 1A. Pro ochranu ADC převodníku je zařazena ochranná Zenerova dioda na výstupu předzesilovače. Maximální napětí mezi gate a source tohoto typu tranzistoru je 20V. Pro jeho ochranu je na výstupu rozdílového zesilovače umístěn dělič, který slouží k omezení napětí na gate tranzistoru.

Na zápornou svorku je připojen také dělič napětí nastavený do stejného poměru jako dělič zpětné vazby lineárního zdroje napětí. Slouží k určení úbytku napětí na regulátoru proudu a k detekci módu, ve kterém zdroj operuje.

2.5. Chlazení

Zařízení je třeba udržovat v co nejstálější teplotě, jednak aby bylo zabráněno přehřátí výkonových prvků, ale také aby se co nejméně projevila teplotní závislost prvků obvodu jako například snímacího rezistoru proudu nebo zpětnovazebních odporů vzhledem k tomu, že změna jejich hodnoty by zapříčinila posun pracovních bodů zdroje a snížení přesnosti jeho regulace.

Pro odvod tepla ze zbytku zařízení je ponechán prostor vedle clony tak, aby mohl ventilátorem téct i vzduch ze zbylých prostor zařízení. Vstup vzduchu do těchto prostor je zajištěn otvory o průměru 3mm na spodní straně zařízení v jeho přední části pod řídicí deskou.

Software pro mikrokontroler STM32 byl vyvinut v prostředí STM32CubeIDE v programovacím jazyce C na úrovni abstrakce hardwaru. MCU je provozován na taktu 72MHz se zdrojem 8MHz z vnějšího oscilátoru. Dále bylo oproti výchozímu nastavení upraveno taktování ADC převodníků a časovačů.



3.1. Funkce ovládání periferií

3.1.1. OLED display

Pro ovládání displeje byla použita knihovna s volnou licencí pro užití, modifikaci a šíření dostupná na adrese <https://github.com/SL-RU/stm32libs/tree/master/HAL/ssd1306>. Tato knihovna byla upravena tak, aby při příkazu SSD1306_Clear() došlo pouze ke smazání bufferu připravených dat a nikoliv i následnému zapsání prázdného bufferu na displej.

Displej je připojen k I²C1, které je provozováno ve fast módu na frekvenci 400kHz. S nástroji knihovny pak v hlavním programu pracují funkce drawmenu1, drawmenu2 a drawlogoC. Jejich úkolem je z číselných hodnot a jiných proměnných užívaných v programu vytvořit obsah bufferu displeje. Kromě výpisu číselných hodnot je jejich úkolem i zobrazení kurzoru, což je zajištěno negací hodnot v rámci okénka znaku, a vykreslení piktogramů, jež označují, jestli je zdroj provozován v proudem řízeném režimu (CC) nebo napětím řízeném režimu (VC). Piktogramy jsou uloženy v podobě přímek pro nižší využití paměti.



Obrázek 11: Piktogram módu provozu

3.1.2. A/D převodník

A/D převodník je provozován v režimu DMA – Direct Memory Access neboli přímý přenos dat mezi periferií a pamětí RAM.[9]. Samotný A/D převodník je provozován na frekvenci 2,25MHz. Délka konverze je nastavena na 239,5 cyklu, což je maximum podporované tímto mikrokontrolerem.

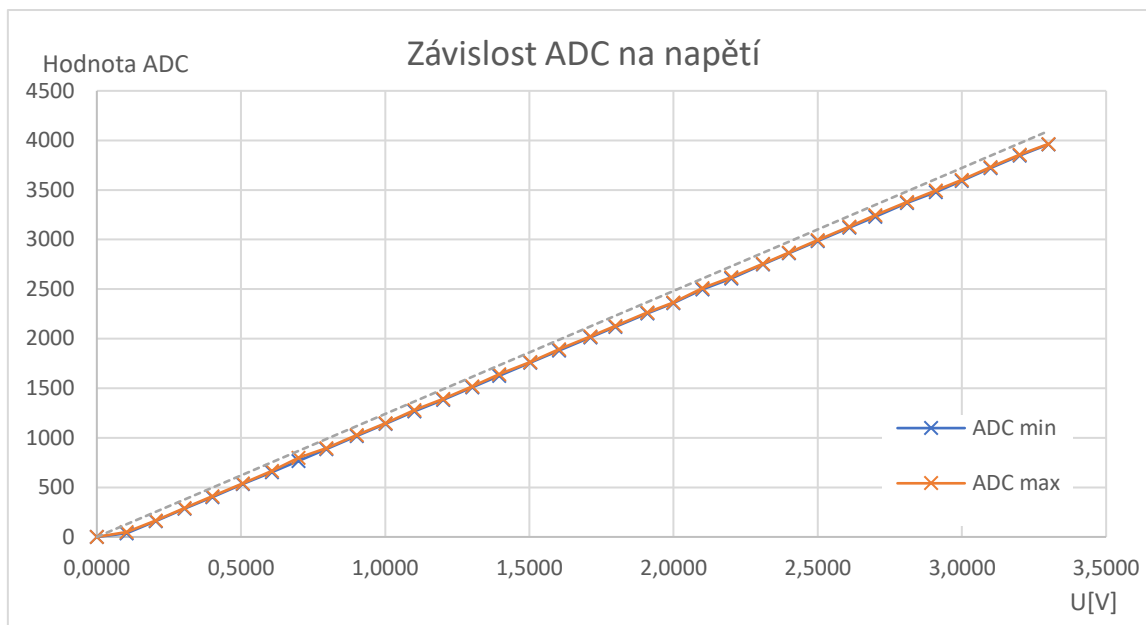
Pro zpřesnění přepočtu výstupu ADC převodníku na napětí bylo provedeno měření závislosti výstupu ADC převodníku na napětí. Měření bylo prováděno při napájení MCU z regulátoru umístěného na vývojové desce blue-pill, aby se referenční napětí co nejvíc blížilo reálným podmínkám v zařízení. Cejchovacím měřidlem byl multimetr Extol 8831250, jehož největší relativní chyba v tomto měření byla do 3,3%. Vždy bylo pro dané napětí odečteno 20 hodnot s intervalem 100ms mezi měřeními, z těchto hodnot byla zapsána maximální a minimální. Z jejich průměru byly následně odvozeny další výpočty.

Na základě výsledků měření byla převodní charakteristika rozdělena na dvě přímky, a to v intervalech $<0;161>$ a $<161;4095>$. V prvním z intervalů byl přepočet určen ze spojnice trendu jako $U_{out} = \frac{ADC}{365} [V]$. U druhého z intervalů pak vyplývá ze spojnice trendu závislost $U_{out} = \frac{ADC}{1226,9938} + 0,0693 [V]$. Hodnoty získané z A/D převodníku jsou dále zpracovány pomocí krácejícího průměru o 50 vzorcích.

Vzhledem k možnému rozdílnému nastavení trimmerů a s tím spojené neobjektivitě měření lze pouze konstatovat že během testování byla zjištěna nemožnost snímat napětí menší než 0,8V ve zbytku rozsahu se pak maximální absolutní chyba napěťového rozsahu pohybovala pod 0,25V a to při požadovaném napětí 16V.

Tabulka 4: Závislost ADC na napětí

chyba[V]	chyba[%]	U[V]	ADC min	ADC max	ADC avg	U adc	chyba [%]
0,0005	-----	0,0000	0	0	0,0	0,000	----
0,0013	1,2826	0,1036	38	50	44,0	0,104	0,49188
0,0066	3,2510	0,204	161	167	164,0	0,203	-0,50980
0,0074	2,4447	0,304	284	291	287,5	0,304	-0,12746
0,0082	2,0469	0,401	401	410	405,5	0,400	-0,30361
0,0091	1,7862	0,507	535	540	537,5	0,507	0,07150
0,0099	1,6237	0,607	654	667	660,5	0,608	0,10009
0,0106	1,5143	0,700	768	798	783,0	0,707	1,06358
0,0114	1,4281	0,796	887	895	891,0	0,795	-0,06721
0,0122	1,3543	0,902	1018	1027	1022,5	0,903	0,07068
0,0130	1,2995	1,001	1142	1149	1145,5	1,003	0,18807
0,0138	1,2537	1,102	1266	1280	1273,0	1,107	0,43512
0,0146	1,2163	1,201	1382	1392	1387,0	1,200	-0,10782
0,0154	1,1840	1,302	1510	1520	1515,0	1,304	0,15553
0,0162	1,1582	1,396	1626	1641	1633,5	1,401	0,32970
0,0170	1,1327	1,503	1758	1766	1762,0	1,505	0,15503
0,0178	1,1119	1,603	1882	1895	1888,5	1,608	0,33859
0,0187	1,0921	1,712	2014	2022	2018,0	1,714	0,11508
0,0194	1,0779	1,799	2120	2129	2124,5	1,801	0,09825
0,0203	1,0619	1,909	2256	2265	2260,5	1,912	0,13659
0,0660	3,3000	2,00	2359	2365	2362,0	1,994	-0,28349
0,0668	3,1810	2,10	2498	2509	2503,5	2,110	0,45965
0,0676	3,0727	2,20	2609	2620	2614,5	2,200	0,00535
0,0685	2,9645	2,31	2748	2756	2752,0	2,312	0,09438
0,0692	2,8833	2,40	2863	2869	2866,0	2,405	0,21209
0,0700	2,8000	2,50	2986	2995	2990,5	2,507	0,26231
0,0709	2,7157	2,61	3120	3131	3125,5	2,617	0,25221
0,0716	2,6519	2,70	3232	3246	3239,0	2,709	0,33649
0,0725	2,5794	2,81	3368	3379	3373,5	2,819	0,30970
0,0733	2,5182	2,91	3480	3497	3488,5	2,912	0,08342
0,0740	2,4667	3,00	3593	3603	3598,0	3,002	0,05567
0,0748	2,4129	3,10	3723	3732	3727,5	3,107	0,23267
0,0756	2,3625	3,20	3846	3858	3852,0	3,209	0,27126
0,0764	2,3152	3,30	3960	3965	3962,5	3,299	-0,03825



Graf 2: Závislost ADC na U_{in}

3.1.3. D/A převodník

Použité IC MCP4726 mají vzhledem k tomu, že pocházejí ze stejné výrobní série, stejnou pevně nastavenou adresu pro komunikaci na I2C sběrnici.[8] Z toho důvodu komunikují DAC převodníky na různých sběrnících. Komunikace s DAC převodníkem vychází z údajů v datovém listu. Data v každém příkazu jsou složena ze 3 bajtů. První bajt tvoří příkaz 0x40, který zapíše hodnotu a využívá referenci z napájení integrovaného obvodu. Následující bajt obsahuje 8 nejvýznamnějších bitů, následující bajt poté na 4 nevýznamnějších pozicích obsahuje zbývající bity. Převodníky jsou napájeny 3,3V větví, která zároveň napájí i MCU, jako referenční je proto použita servisní konstanta U_{dac} .

3.1.4. Pulzní regulátor

Pulzní regulátor je řízen 4-bitovým dvoustavovým signálem, vzhledem ke standardizaci odporů do řady E24 však tyto hodnoty nejsou stejně vzdálené a ve dvou případech ani neodpovídají číselnému pořadí. Vzhledem k tomu byla vytvořena dvě pole. První pole `napetiBUCK[]` obsahuje floatové hodnoty dosažitelných napětí seřazené vzestupně za sebou. Tyto hodnoty jsou již poníženy o 4V, což je saturační napětí lineárního regulátoru. Druhé pole `dataBUCK[]` obsahuje hodnoty, jež je nutné vypsát na výstup, aby bylo dosaženo stejné napětí, které je na odpovídající pozici v poli `napetiBUCK[]`. Program následně hledá nejbližší vyšší napětí k napětí požadovanému.

3.1.5. Termistor a PWM řízení ventilátoru

Výpočet teploty na termistoru je řešen výpočtem vycházejícím z elektrických vlastností termistoru.

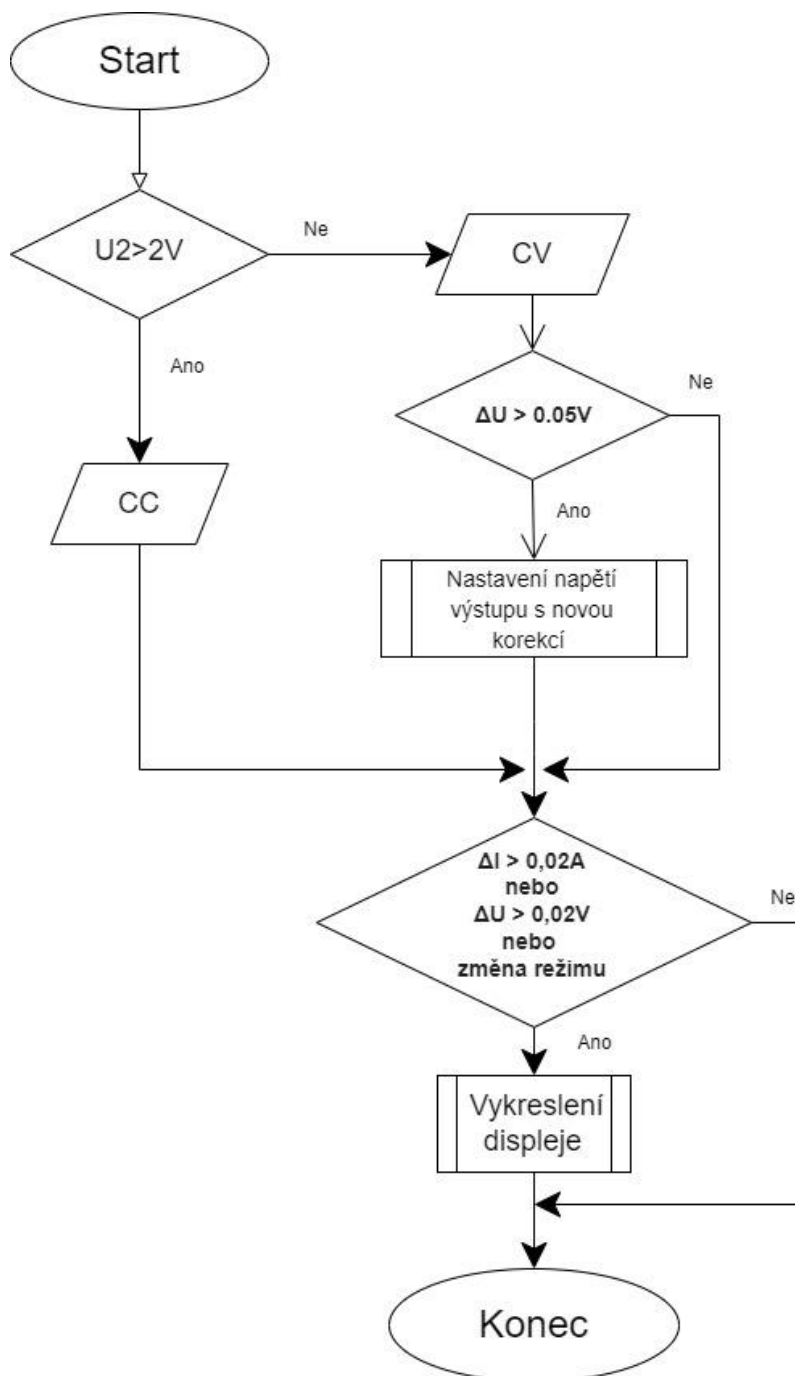
PWM ventilátoru je řízeno časovačem TIM2, jeho velikost je omezena na 8-bitů vzhledem k malým nárokům na přesnost řízení. K sepnutí ventilátoru dojde při překročení teploty 30°C, jeho vypnutí pak nastane, pokud teplota klesne pod 28°C. Výkon ventilátoru v procentech je pak dán vztahem $D = 2(t - 25^\circ) + 50$ [%]

3.1.6. Snímání enkodéru

Enkodér je snímán periferií hardwarového přerušení. Tato metoda byla zvolena vzhledem k tomu, že v případě snímání pullingem by mohlo dojít ke zpoždění, které by zapříčinilo špatné odečtení směru otáčení. Přerušení detekuje sestupnou hranu signálu A. Rutina přerušení vyvolá v případě detekce sestupné hrany funkci HAL_GPIO_EXTI_Callback. V této funkci je nejprve odečtena hodnota signálu enkodéru B, dále je posouzeno, zdali se jedná skutečně o přerušení vyvolané pinem enkodéru, a následně je upravena hodnota v proměnné náležící módu 1 na příslušné pozici displeje.

3.2. Standardní pracovní režimy

3.2.1. Mód 0 – měření



Obrázek 12: Vývojový diagram Módu 0

Jedná se o výchozí pracovní mód, který je v činnosti, pokud nejsou splněny podmínky pro provoz v jiném módu.

Slouží ke korekci výstupního napětí v napětím řízeném režimu. Odstraňuje tak proměnný úbytek napětí na regulátoru proudu a snímacím bočníku.

V tomto módu jsou na obrazovku vypsány reálné výstupní parametry zdroje. Jejich vypisování je vzhledem k časové náročnosti optimalizováno tím, že údaje jsou na obrazovce zobrazeny pouze, pokud se liší v oblasti platných cifer. Druhým možným důvodem pro vykreslení je změna operačního módu. Její detekce probíhá tak, že pokud je napětí na regulátoru proudu vyšší než 2V, program tento úbytek přestane vyrovnávat.

Software je také schopen upravit napětí nastavené na výstupu dle potřeby o 0,1V oběma směry.

3.2.2. Mód 1 – nastavování výstupu

Tento mód je aktivovaný stlačením tlačítek MENU, vpravo, vlevo, případně stiskem enkodéru. Od tohoto okamžiku je tento mód aktivován na dobu 1 sekundy. Tento časový interval je

resetován při jakékoliv interakci uživatele s ovládacím prvkem. Po uplynutí časového intervalu jsou hodnoty nastavené v tomto módu zapsány do proměnných řídicích výstupní napětí.

3.2.3. Múd 2 a 3 – servisní údaje

Múd 2 se aktivuje po stlačení tlačítka menu, pokud je zobrazení v módu 1. Dalším stisknutím tlačítka menu zdroj přejde do módu 3. Tyto módy zobrazení nemají časový limit a k jejich opuštění je nutno stlačení tlačítka menu v módu 3.

V módu 2 jsou zobrazeny následující údaje:

Pz – výkon na zátěži, je vypočten součinem naměřených hodnot, měrnou jednotkou je watt.

Tep – teplota uvnitř tunelu pro odtok vzduchu, vychází z výpočtů pro spínání ventilátoru, měrnou jednotkou je stupeň celsia.

Vent – Aktuální výkon ventilátoru v %, jedná se o přepočet z 8-bitové hodnoty pro komparační registr PWM.

V módu 3 jsou zobrazeny aktuální hodnoty kanálů 0, 1, 2 ADC převodníku. Jedná se o 12-bitové číslo zobrazené v desítkové soustavě.

3.3. Spouštěcí sekvence

Pro omezení proudu odebíraného při spouštění je po dobu 200ms zobrazen nápis „ZdrojOS“, oba ADC jsou nastaveny na 0V, relé zůstávají v pozici vypnutí obou napájení. Po uplynutí časového intervalu dojde k přestavení relé do pozice napájení z BUCK regulátoru. Zdroj automaticky přejde do módu 0.

3.4. Detekce poruch

V případě, že některá z částí programu zaznamená zakázaný stav, vyvolá se funkce error(). Při jejím volání daná část programu použije číslo eventu, které dále ovlivní obsah zprávy pro uživatele. Ta vždy začíná prvním řádkem ve znění „error:“, na následujícím řádku je poté uvedena zpráva uživateli. Poslední řádek vždy uvádí „OK=>RESET“.

Tabulka 5: Chybové kódy

Kód	Popis chyby	Zobrazená zpráva	Podmínky aktivace
0	Chyba měření teploty	mereni tep.	Teplota < 1°C Teplota > 100°C
1	Přehřátí zařízení	Prehrati	Teplota > 70°C
2	Chyba čtení analogové hodnoty U_0	Chyba U0	$U_0 > 3V$
3	Chyba čtení analogové hodnoty U_1	Chyba U1	$U_1 > 3V$
4	Chyba čtení analogové hodnoty U_2	Chyba U2	$U_2 > 3V$

Řídicí systém při spuštění funkce error automaticky nastaví napájení do stavu 00 neboli odpojí jak lineární, tak spínaný regulátor. Následně sepne ventilátor na plný výkon. Po vypsání zprávy pro uživatele se spustí prázdná smyčka podmíněná uvolněním tlačítkem OK. V případě jeho stisknutí dojde k vyvolání funkce start(). Poté se systém vrátí k normálnímu chodu. Pro spuštění funkce error budou stále platit stejné podmínky. Nebude-li tedy chyba odstraněna, zdroj téměř ihned opět spustí funkci error.

4. Závěr

Mým cílem bylo vytvořit snadno přenosný zdroj pro napájení nestandardních zařízení a občasné využití jako laboratorního zdroje. Zdroj se pro tyto účely ukázal být funkčním a splňujícím technické požadavky. I přes to však setrvávají určité problémy, jež plánuji v budoucnu odstranit.

Nejvíce problémů se objevilo v oblasti softwaru. Nejzásadnější z potíží se ukázalo být rozpoznávání módu, ve kterém je zdroj provozován, hlavně při nízkých napětích výstupu. Díky provozování zdroje s trvale přiřazeným regulátorem proudu se výstupní hodnoty chovají správně, pouze interface je neuvěřitelně interpretovat. Problémem se také ukázalo celkem velké kmitání ADC převodníků, možným budoucím rozšířením by tak mohly být externí ADC převodníky s vyšší přesností. Ty v tomto projektu zatím nebyly využity kvůli jejich ceně.

Kromě softwarových bugů do budoucna plánuji zlepšit přesnost a stabilitu lineárních regulátorů. Ač jsou podle počítačových simulací současné regulátory v podstatě ideální, v realitě naráží na mnoho problémů způsobených především šumem. Tyto problémy by mohly být vyřešeny použitím jiného rozložení DPS, odrušovacími přepážkami z vodivého materiálu mezi jednotlivými částmi zdroje nebo jinými řešeními, která jsou v současné době mimo moje znalosti a schopnosti.

Za úspěch považuji vytvoření funkčního digitálního řízení zdroje s příjemným uživatelským rozhraním, díky kterému bylo možné snížit počet ovládacích prvků a ponechat do budoucna otevřenou možnost dalšího rozšíření funkcí softwarového rozhraní.

Osobně mě tento projekt velmi posunul. Před tímto projektem jsem neměl žádné zkušenosti s mikrokontrolery rodiny STM. Také mohu říct, že po absolvování mnoha přešlapů a sumarizaci chyb tohoto zdroje bych zřejmě v budoucnu již přistupoval k vývoji trochu rozdílným způsobem a některá svá rozhodnutí přehodnotil, převážně v oblasti lineárních regulátorů, kde dochází k velkým úbytkům napětí. Kromě toho jsem se také leccos naučil po stránce mechanických konstrukcí v elektrotechnických zařízeních.

5. 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 Application note. Diodes incorporated [online]. 2006 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: https://www.diodes.com/assets/Part-Support-Files/AP1501/ANP002_AP1501.pdf
5. CIMORADSKÝ, Jan. Regulovaný spínaný zdroj napájený z baterie. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka.
6. TIP 120, TIP 121, TIP 122, TIP125, TIP127 datasheet. St.com [online]. 2021 [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/tip125.pdf>
7. LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers. Ti.com [online]. 2000 - revize 2014 [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>
8. MCP4726. Microchip [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP4726#document-table>
9. DMA. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/DMA>

6. Zkratky

Zkratka:	Anglický význam:	Český význam:
MCU	microcontroller unit	mikrokontroler
HW	hardware	hardvare
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 šířková modulace
EXTI	external interrupt	vnější přerušení
TIM	timer/counter	čítač/časovač
CH	chanel	kanál
LSB	least significant bit	nejméně významný bit
VR	voltage range	rozsah napětí
DPS	printed circuit board	deska plošného spoje

7. Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozkres základních komponent zdroje	8
Obrázek 2: Blokové schéma silové části	9
Obrázek 3: Ovládací panel	10
Obrázek 4: Převodník log. úrovní (výňatek ze schématu řídicí desky).....	12
Obrázek 5: Schéma stavitelný dělič	15
Obrázek 6: Příklad zvlnění výstupu	17
Obrázek 7: Schéma kontaktů relé.....	18
Obrázek 8: Schéma regulátoru napětí	19
Obrázek 9: Schéma lineárního regulátoru proudu.....	20
Obrázek 10: STM32CubeIDE – nastavení taktu jádra a periférií	21
Obrázek 11: Piktogram módu provozu	22
Obrázek 12: Vývojový diagram Módu 0.....	26

8. Seznam tabulek

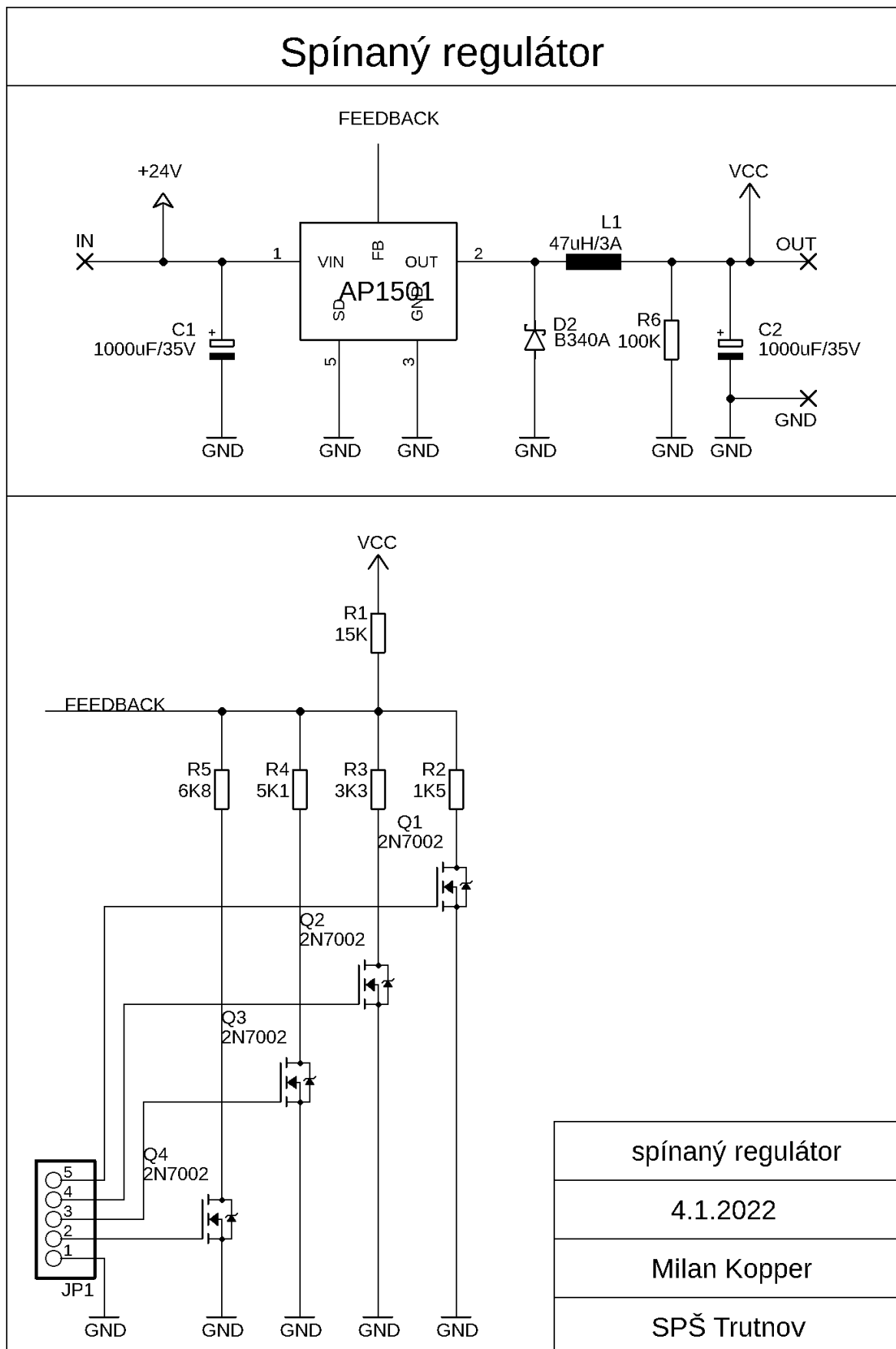
Tabulka 1: Přehled ovládacích prvků	10
Tabulka 2: Přehled použitých pinů.....	14
Tabulka 3: Výstup spínaného regulátoru.....	16
Tabulka 4: Závislost ADC na napětí	23
Tabulka 5: Chybové kódy	28

9. Seznam grafů

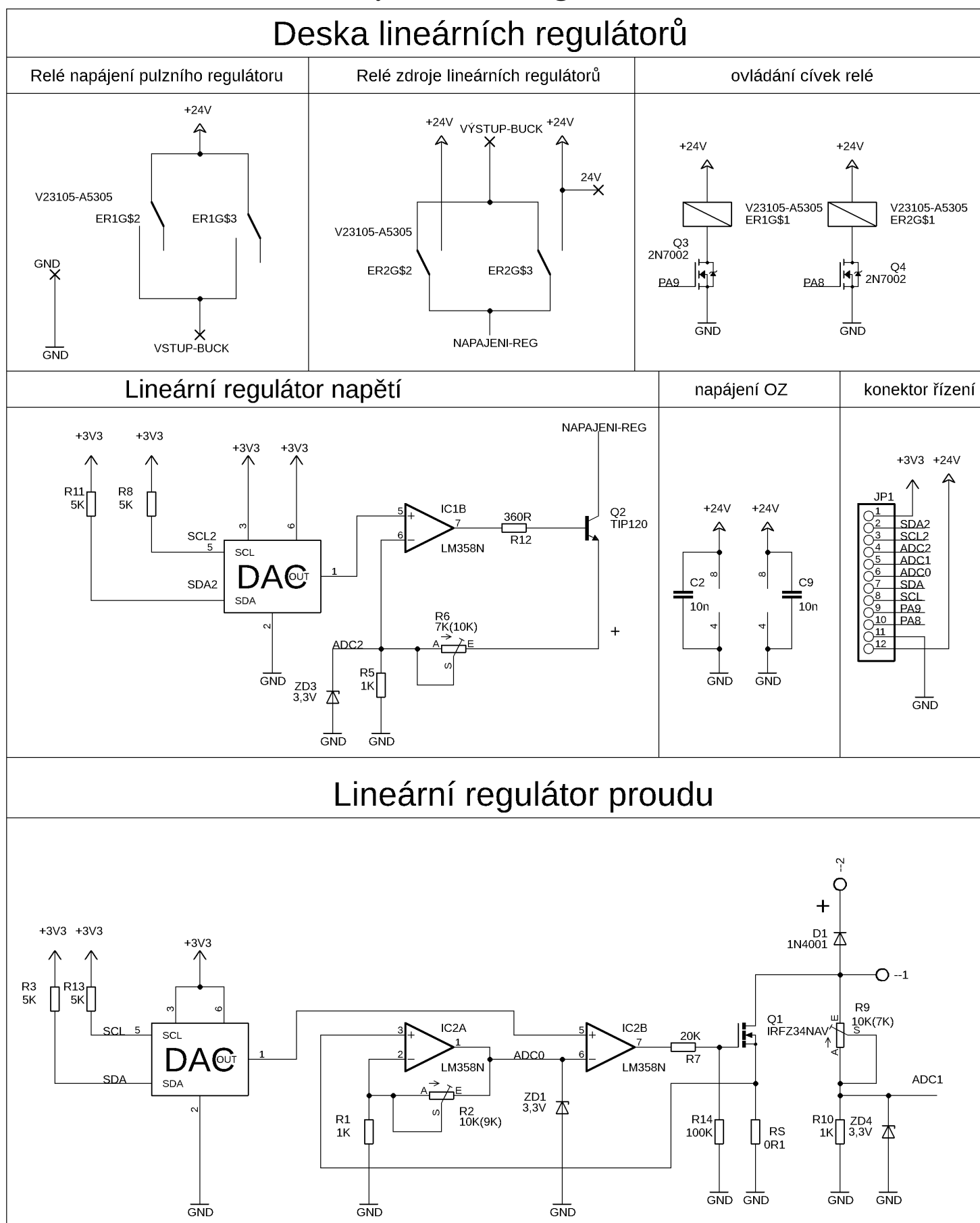
Graf 1: Výstupní napětí spínaného regulátoru	17
Graf 2: Závislost ADC na U_{in}	24

10. Přílohy

10.1. Schéma spínaného zdroje



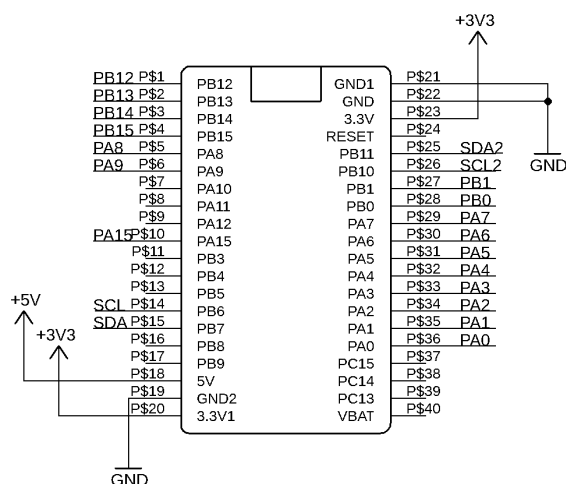
10.2. Schéma desky lineárních regulátorů



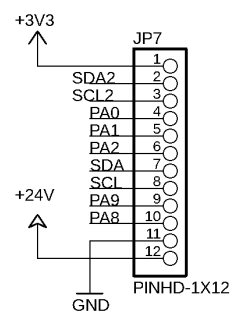
10.3. Schéma řídící desky

Řídící deska

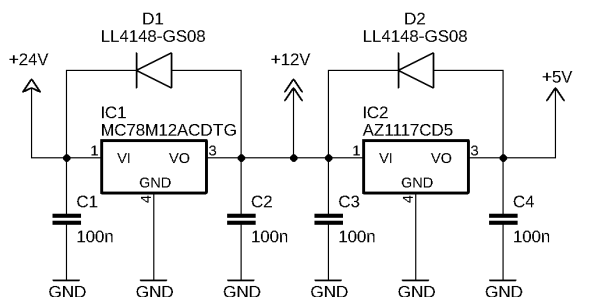
Deska microkontroleru
STM32F103C8T6



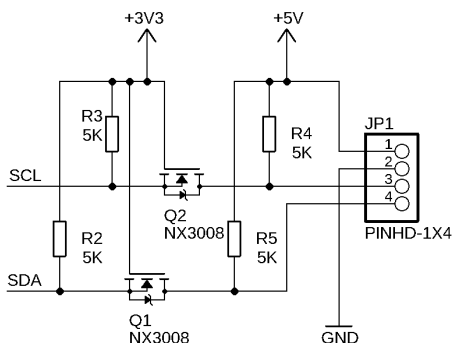
Konektor desky
regulátoru



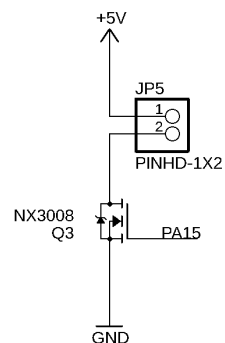
Kaskádový regulátor vstupního napětí



Převodník úrovní I2C1

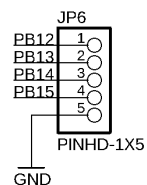


PWM řízení
ventilátoru

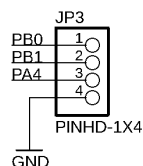


Konektory

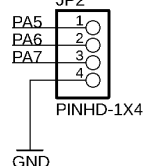
řízení sp.
regulátoru



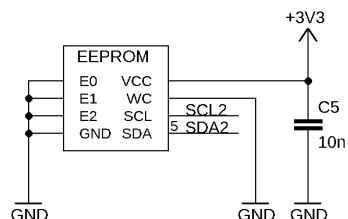
enkodér



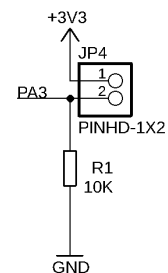
tlačítka
frontpanel



Externí EEPROM



Obvod
termistoru



autor:

Milan Kopper

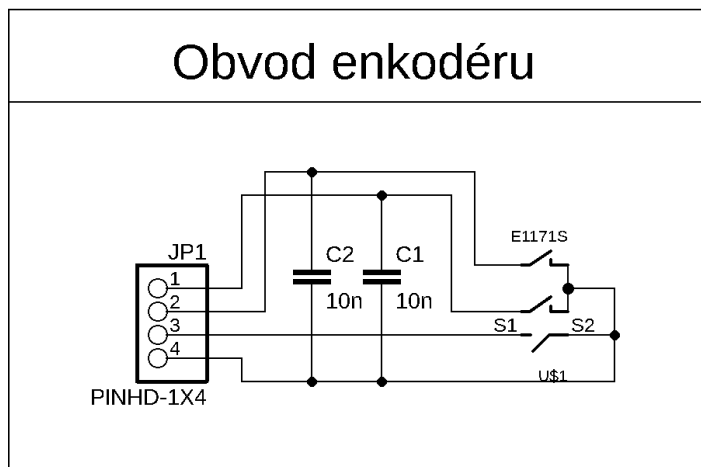
datum:

16.01.2022

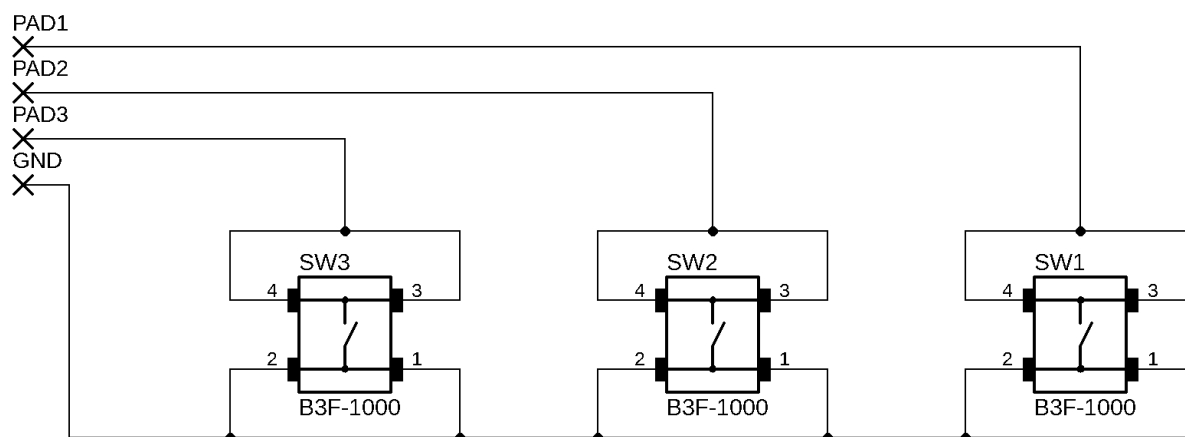
projekt:

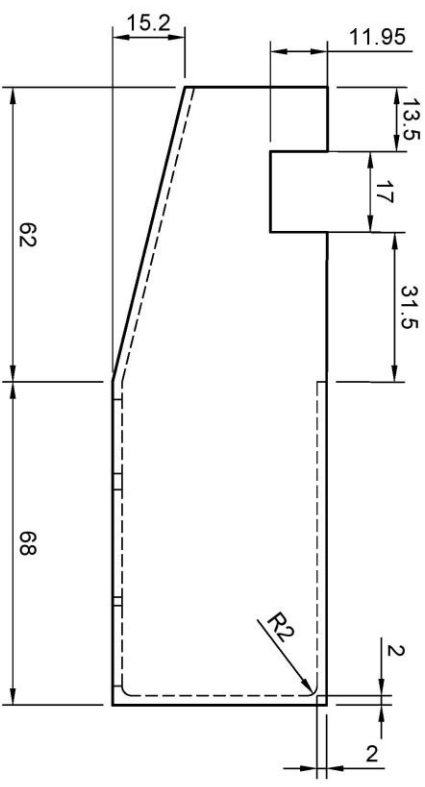
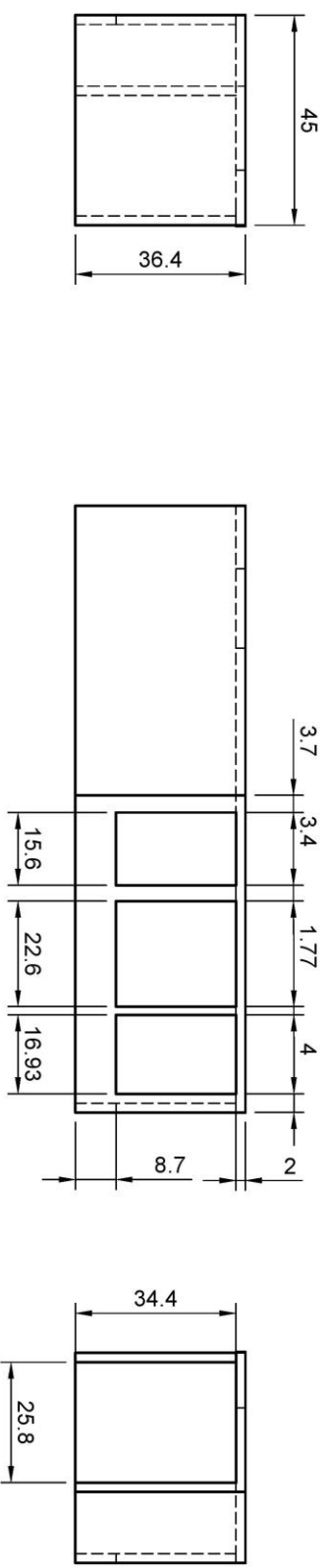
laboratorní zdroj

10.4. Schéma zapojení enkodéru

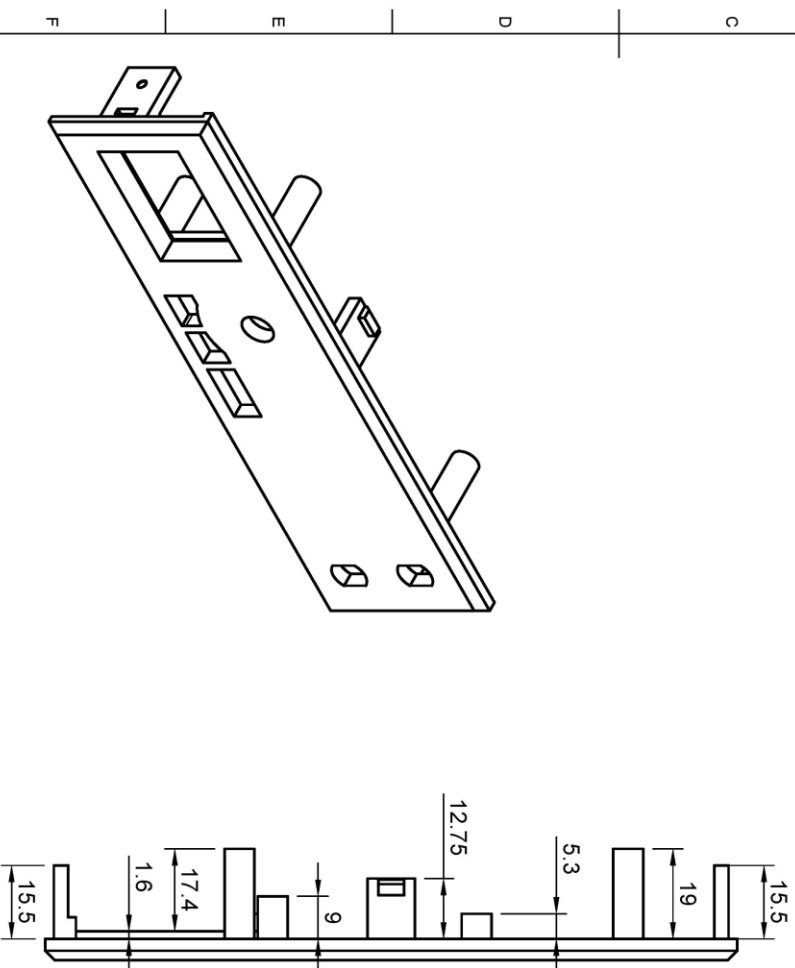
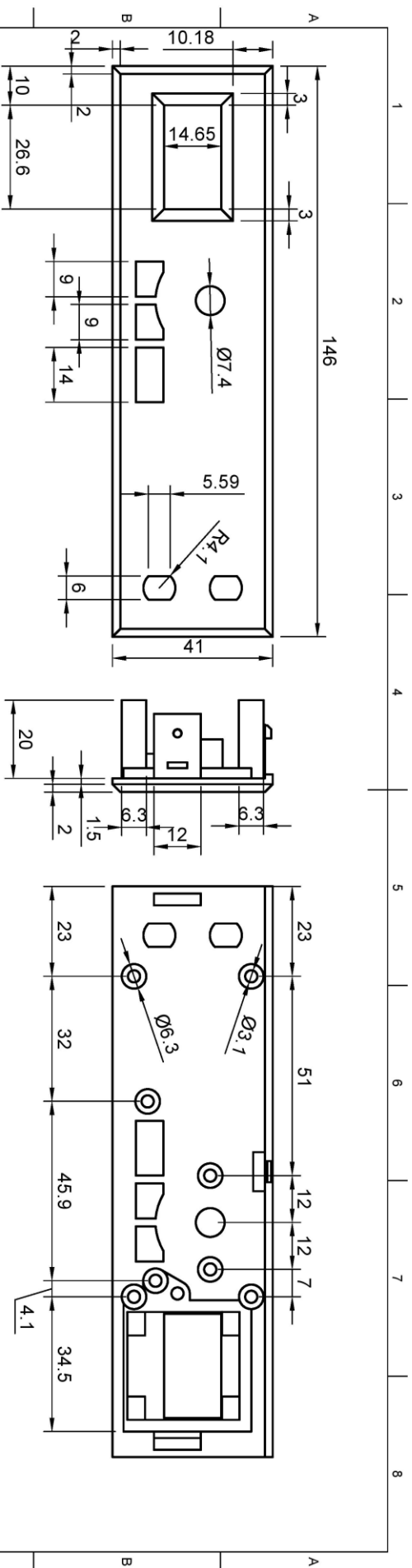


10.5. Schéma panelu tlačítek

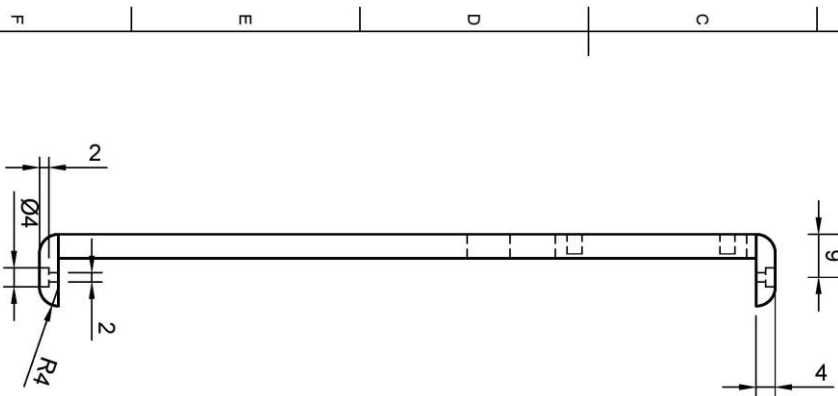
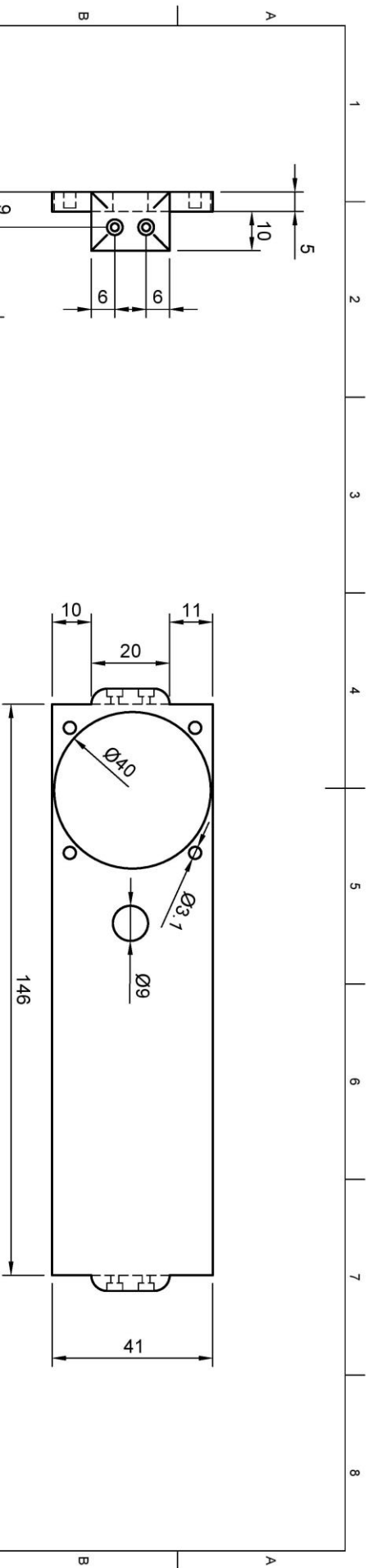




Depl.		Technical reference		Created by		Approved by	
				Milan Kopper 02.03.2022			
				Document type		Document status	
				Title		DWG No.	
				clona			
				Rev.		Date of issue	
						Sheet	
						1/1	



Dept.	Technical reference	Created by	Document type	Approved by	Document status
		Milan Kopper	02.03.2022		
Title		Document No.			
		Ovládací panel			
Rev.	Date of issue	Sheet			
		1/1			



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Milan Kopper 02.03.2022	
		Document type	Document status
		Title	DWG No.
		Zadni kryt	
Rev.	Date of issue	Rev.	Sheet
			1/1

