

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor: 10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Postav si svého druhého robota

Tomáš Vavrinec

Brno 2021

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

POSTAV SI SVÉHO DRUHÉHO ROBOTA

BUILD YOUR SECOND ROBOT

AUTOR Tomáš Vavrinec

ŠKOLA Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská, příspěvková organizace

KRAJ Jihomoravský

ŠKOLITEL Mgr. Miroslav Burda

OBOR 10. Elektrotechnika, elektronika
a telekomunikace

Brno 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma *Postav si svého druhého robota* jsem vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Miroslava Burdy a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném změně.

V Brně dne: _____

Tomáš Vavrinec

Poděkování

Děkuji svému školiteli Mgr. Miroslavu Burdovi za obětavou pomoc, podnětné připomínky a hlavně nekonečnou trpělivost, kterou mi během práce poskytoval.

Tato práce byla provedena za finanční podpory Jihomoravského kraje.



Anotace

Robotika se stává čím dál tím významnějším oborem, což s sebou nese i potřebu vzdělávání v tomto oboru. Při výuce robotiky jsou proto potřeba různé pomůcky, na kterých se mohou žáci učit potřebné dovednosti. Jednou z takovýchto pomůcek by mohl být například SchoolBoard (viz práce [Postav si svého prvního robota \[soc2020\]](#)), ale pokročilejším studentům již tento hardware nemusí stačit. Proto jsem navrhl novém systému, který má více možností.

Klíčová slova

trezor, ESP32, ESP32 Wrover, inteligentní LED, WS2812, BMX055, LDC1614, LDC1314, open-source hardware

Annotation

Robotics is becoming an increasingly important field, which brings with it the need for education in this field. When teaching robotics, therefore, various aids are needed on which students can learn the necessary skills. Once with such aids could be, for example, SchoolBoard (see the work Build Your First Robot), but for more advanced students this hardware may no longer need suffice. That's why I design a new system that has more options.

Keywords

safe, ESP32, ESP32 Wrover, smart LED, WS2812, BMX055, LDC1614, LDC1314, open-source hardware

Obsah

Kapitola 1

Úvod

Na konci července roku 2019 jsem dostal za úkol navrhnout výrobek pro děti na příměstský tábor pobočky DDM Helceletova Brno, [Robotárny](#). Požadavkem byla jednoduchá a levná konstrukce s elektronikou, kterou děti zvládnou sestavit za pár dní a ve zbytku času tábora si stihnou vyzkoušet základy programování s využitím tohoto výrobcu. Z tohoto důvodu jsem začal vyvíjet elektronicky řízený trezor. Postup vývoje trezoru je popsán v kapitolách ?? a ??.

Z původní vize trezoru se ale rychle vyvinulo poměrně univerzální elektronické zařízení, kterému zůstala schopnost sloužit jako trezor. Také využití trezoru se rozšířilo – přibyly mu nové funkce a hlavním cílem už není pouze trezor s dětmi stavět a programovat, ale také ho využívat jako herní prvek při táborových hrách. Trezor se tedy dá s dětmi jak stavět a učit s jeho pomocí programování, tak ho využívat jako hotové zařízení při hrách pořádaných Robotárnou a dalšími subjekty. Popis možností současné verze trezoru je v kapitole ??.

Dále přibyl požadavek na vývoj čistě mechanické varianty trezoru pro volnočasové aktivity, jednorázové akce nebo mladší účastníky táborů. Mechanický trezor je z pochopitelných důvodů výrazně levnější než elektronický. Tím pádem se dá počítat s výrobou tohoto trezoru i na menších a levnějších akcích, ze kterých si účastníci trezor odnesou, což by v případě elektronické

varianty znamenalo výrazně vyšší cenu i časovou náročnost. Původně byla mechanická i elektronická verze vyvíjené tak, aby se mechanická verze dala jednoduše upravit na elektronickou, což popisují v kapitole ??.

Z důvodů došlo oddělení obou verzí (viz kapitola)

Kapitola 2

Vývoj elektronického trezoru

2.1 První verze

Dal jsem se tedy do kreslení trezoru. Pochopitelně ne nějaké nedobytné pevnosti, ale malé krabičky,¹ na které se dají ukazovat základy programování.

Jelikož se mi na podobné výrobky osvědčila jako materiál překližka, navrhoval jsem trezor s úmyslem výroby z překližky za využití laseru.

Jako základ pro elektroniku jsem použil univerzální desku **ALKS**² [**ALKS**], kterých jsem měl dostatečnou zásobu. Ovládací prvky,³ jsem umístil na horní stranu trezoru. ALKS má v původní variantě tři tlačítka. Já jsem však jedno musel pomocí magnetu a jazýčkového magnetického konektoru použít jako kontrolu, zda jsou dveře otevřeny či zavřeny. Jako zámek jsem pak použil obyčejné servo SG90, které jednoduše zajelo svou páčkou do drážky ve dveřích, a tím jim zabránilo se otevřít. Celý systém pak napájela malá powerbanka, která se dala vyjmout a nabít a používala se i ve dvou dalších verzích.

V těsném závěsu za touto elektronickou variantou jsem ale dostal požadavek i na čistě mechanickou verzi trezoru. To byl následně jeden z důvodů velkých změn, a to i změny samotného konceptu zařízení.

¹128x128mm

²Arduino Learning Kit Starter

³dvě tlačítka, dva potenciometry a tři barevné LED

2.2 Druhá verze

Druhá elektronická verze trezoru (označení E2) už byla vybavená signalačním kruhem o dvanácti LED kolem uprostřed dveří umístěného enkodéru. Jako základ trezoru jsem použil první mechanický trezor (viz kapitola??) a doplnil jej o servo, řídící elektroniku a již zmíněný kruh LED a enkodér.

Trezor měl pro komunikaci s uživatelem tedy kruh o dvanácti LED a jeden vstupní prvek – enkodér s tlačítkem. Ovládání bylo od výbavy trezoru odvozené a trezor se zmáčknutím tlačítka na enkodéru zapnul a tlačítko pak dál sloužilo jako potvrzování výběru. Uživatel tak mohl pomocí enkodéru vybírat jedinou rozsvícenou LED a stiskem potvrdit.

Vstupní kód tedy mohl vypadat například jako čas a uživatel ho zadal na kruhu odvozeném od ručičkových hodin, proto právě dvanáct LED. Konkrétní ovládání je pochopitelně závislé na nahraném programu a mohlo by se tedy jednoduše změnit do libovolné podoby – to, co popisují, je jen konkrétní možnost, kterou jsem použil.

Vzhled tohoto trezoru na obrázku [obr. ??/str??].

2.3 Třetí verze

Třetí verze (E3) do značné míry vycházela z předchozí verze a dále na ní stavěla. Asi nejvýraznější změna bylo navýšení počtu ledek z dvanácti (hodiny) na šedesát (minuty), což pochopitelně znamenalo i zvětšení kruhu. Na desku se ale přidaly i nové funkcionality, a to gyroskop,⁴ akcelerometr,⁵ magnetický kompas,⁶ RTC⁷ a GPS.⁸ Také jsem použil, po vzoru mechanického trezoru, rotační západku, což znamenalo, že na stejný trezor se daly použít jak mechanické tak elektronické dveře.

⁴pro možnost znalosti náklonu zařízení

⁵pro znalost směru a velikosti zrychlování

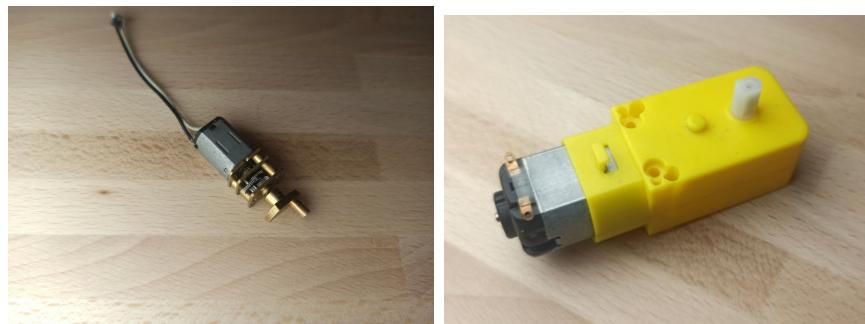
⁶pro určení světových stran

⁷Real Time Clock, hodiny reálného času, pro znalost přesného času

⁸pro možnost určení své polohy

Z důvodů použití převodů pro otáčení rotační západky byly nově také použité délky tištěné na 3D tiskárně.

Tato verze měla dvě varianty, které se lišily motorem. Motor vpravo na obrázku [obr. ??/str??] byl použit na dřívější verzi a později jsem jen vyměnil za motor nalevo, díky čemuž jsem dveře mohl udělat tenčí.



Obrázek 2.1: Fotografie obou testovaných motorů

2.4 Čtvrtá verze

2.4.1 Rozšíření elektroniky

Čtvrtá verze (E4) byla co se elektroniky týče přímým pokračováním předchozí verze ??, kterou dále rozšiřuje.

Trezor získal oproti minulé verzi schopnost komunikace pomocí IR z důvodu identifikace různých dveří, dále získal magnetický enkodér, pro možnost snazšího ovládání motoru zámku. Další inovací byl programovací systém s USB-C, na místo USB-micro jako dřív. Nový programátor má možnost úplně si odpojit napájení, a to v rámci šetření energie, když trezor programátor nevyužívá. Zároveň umožňuje zákaz přeprogramování.

Podstatnou změnou také bylo rozdělení elektroniky do dvou různých desek, protože na jedné by nebyl dostatek místa. Jedna deska [obr. ??/str??] [obr. ??/str??] tak obsahuje kruh LED[**WS2812**] a čip LDC1614[**LDC1614**] nebo LDC1314 se čtyřmi cívkami, které měří vzdálenost tlakové desky. Na

druhé desce je vše ostatní, tedy procesor [**ESP32**], akcelerometr s gyroskopem [**bmx055**], [**mpu6050**], magnetický kompas [**bmx055**], [**qmc5883**], RTC [**m41t62**], barometr [**spl06**], IR vysílač [**ir19-21c/tr8**] a přijímač [**irm-h936**], magnetický enkodér [**mh253**] [**ss360nt**], programátor [**cp2102**], řešení napájení, řízení motoru a nabíječka [**se9017**].

2.4.2 Princip zamykání

Na trezoru se dále změnily princip zamykání a ovládání.

Důvodem změn bylo náročné uložení rotační západky, které vyžadovalo ozubený věnec a několik dalších tisknutých dílů.

Zamykání je založeno na mechanizmu bajonetu a zamčení je zajištěno západkou, která zabraňuje zpětnému otočení. Západka je ovládána motorem, který otáčí magnetem a přitahuje nebo odpuzuje magnet na západce. Důvodem pro magnetické ovládání byla možnost západku ovládat i přes pevnou stěnu, a také pružné spojení, které takto vznikne, takže se trezor například dá zavřít, i když je už zamčen (když například dveře nejsou dovršeny).



Obrázek 2.2: Rendery dveří trezoru E4 – vlevo přední pohled, vpravo zadní pohled

2.4.3 Ovládání

Předchozí varianty měly jako hlavní ovládací prvek enkodér s tlačítkem, ten jsem v nynější variantě odstranil, aby přední stěna neměla tak velký výstupek. Proto jsem tento prvek nahradil indukční tlakovou deskou (viz kapitola ??), která vyplnila vnitřek kruhu LED (viz kapitola ??). Zbytek ovládání víceméně přetrval, jen kvůli nedostatku času a pandemií způsobenému nedostatku součástek, trezor přišel o GPS.⁹ Na druhou stranu ale získal barometr s rozlišením schopným detektovat změnu výšky o půl metru.

2.4.4 Napájení

Předchozí verzím sloužila jako napájení powerbanka. Ta však kladla poměrné velké omezení, dokázala poskytnout proud pouze jednoho ampéru, a proto jsem jí nahradil vlastním zdrojem, dvěma bateriemi 18650. To samozřejmě znamenalo nutnost vlastního řešení stabilizace napětí, díky čemuž trezor dostal stepup FP6276 [fp6276a] [obr. ??/str??], který spíná napětí z 3,5 V až 4,2 V na 5 V, a původně stepdown, později lineární stabilizátor [obr. ??/str??], který poskytuje 3,3 V.

Trezor také dostal vlastní nabíječku, aby pro nabíjení baterií stačilo připojit kabel, stejně jako třeba u mobilu.

⁹deska má ale stále možnost připojení GPS pomocí konektoru

Kapitola 3

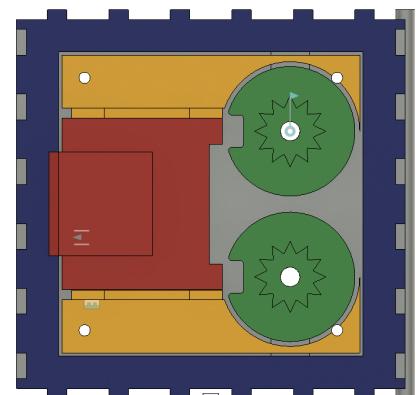
Vývoj mechanického trezoru

3.1 První verze

První čistě mechanická varianta, označovaná jako M1, vznikla začátkem srpna 2019, brzy po první elektronické variantě. Měla stále poměrně klasický vzhled trezoru – zamyskatelná skříňka se dvěma kódovacími koly, která ovládala možnost pohybu jednoduché západky.

Tato verze byla také určená jako základ pro plánovaný upgrade na další elektronickou variantu. Na podobné vylepšení mělo stačit odstranění kódovacích kol a přidělání elektronické části. Toto sice fungovalo obstojně, zároveň i jako motivace, ale kvůli pozdější změně konceptu mechanizmu uzavírání trezoru¹ tento nápad padl.

Tato varianta se také ukázala jako nevhodná² pro stavbu s malými dětmi, pro které byla určena jakožto předstupeň k variantě elektronické (která vyžaduje i znalosti programování nebo alespoň ochotu se jej učit).



Obrázek 3.1: Zelená barva značí kódovací kola, červená západku, modrá pevnou část trezoru a žluté díly distanci

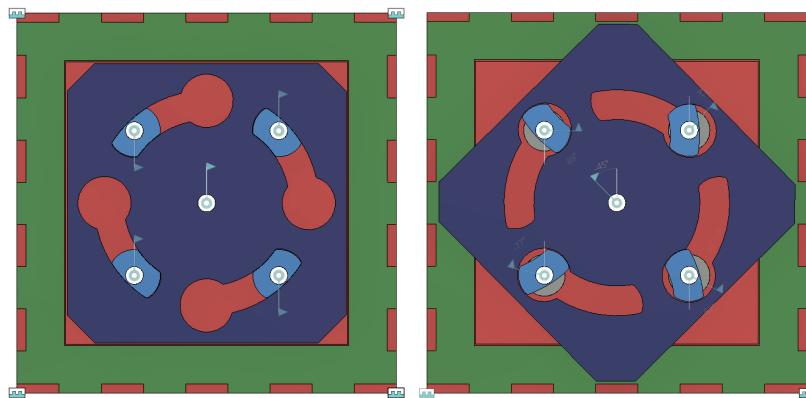
¹místo rotační západky mechanizmus bajonetu – viz kapitola

²kvůli přílišné náročnosti na přesnost sesazení

3.2 Druhá verze

Druhá mechanická varianta (M2) má oproti první verzi daleko větší počet možných kombinací hesla. Ovládá se pěti koly. Čtyři z nich nastavují heslo a páté otáčí s rotační západkou, která drží dveře na svém místě.

Tato varianta taky přichází s možností dveře úplně oddělit od skříněho tresoru. To by při využití jako trezor, který má za úkol jen ochraňovat svůj obsah, sice neprinášelo žádný užitek, ale dveře potom půjde využít jako samostatný herní prvek. Vzhled tohoto tresoru je na obrázku [obr. ??/str??].

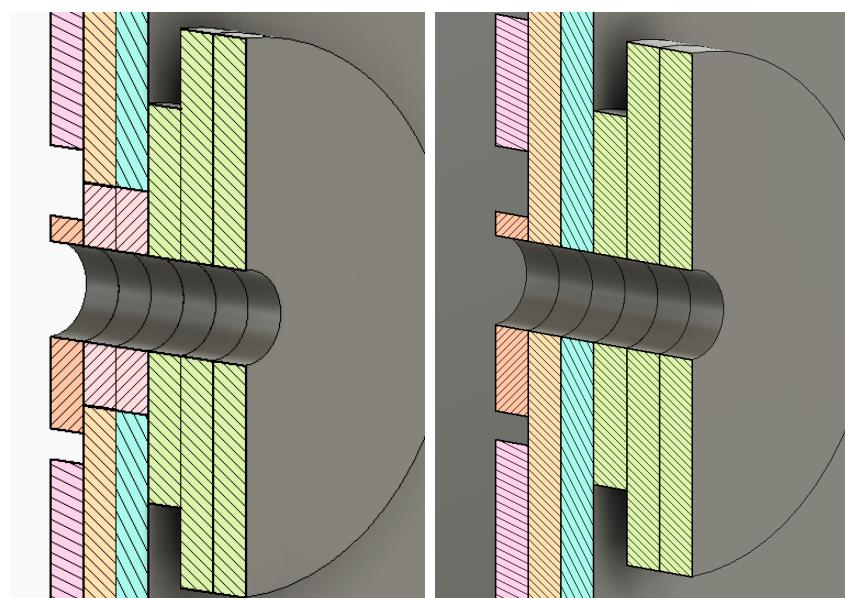


Obrázek 3.2: Zamýkací mechanizmus varianty M2

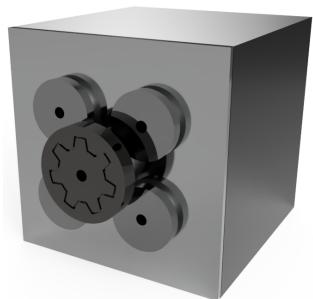
3.3 Třetí verze

Dnešní mechanická varianta (M3) je téměř stejná jako druhá verze, rozdíl je jen v uložení kol, které kolem hrídel získalo distanční kroužky, které zjednodušují lepení.

Podrobnější popis mechanického tresoru M3 je v následující kapitole.



Obrázek 3.4: Řez kódovacím kolem trezoru M2 vpravo a řez kódovacím kolem trezoru M3 vlevo



Obrázek 3.3: Render varianty M3

Kapitola 4

Mechanický trezor

Vedle elektronické varianty jsem navrhl variantu mechanickou, abych měl jednodušší a levnější trezor pro mladší účastníky táborů a jiných akcí.

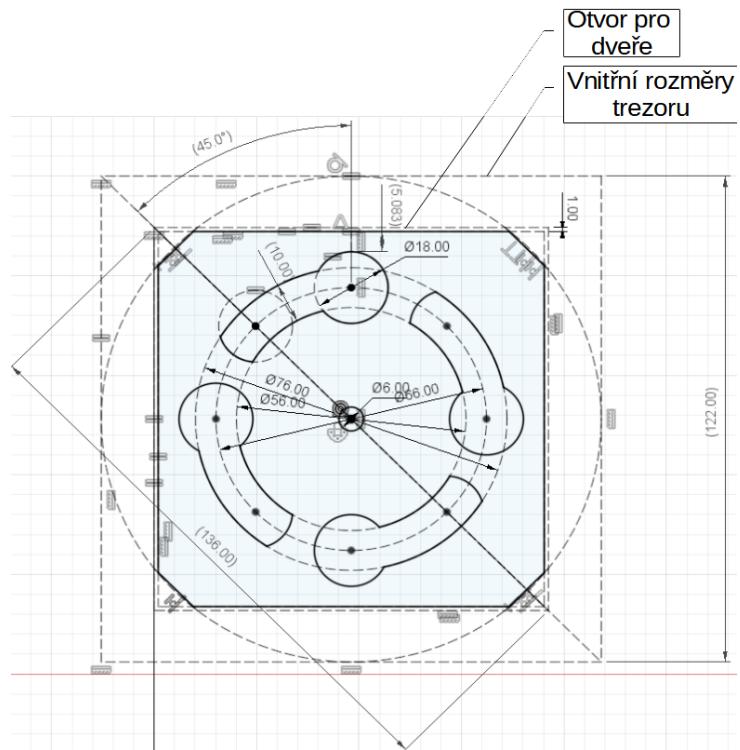
4.1 Popis součástí

Trezor (verze M3) má tvar krychle o délce hrany 128 mm. Násobek šestnácti jsem zvolil kvůli jednoduché návaznosti na tzv. dřívka.¹ Protože je trezor vyroben z překližky o síle 4 mm, jsou jeho vnitřní rozměry o 4 mm na každé straně menší (takže 122 mm).

Trezor se zamyká pomocí rotační západky a čtyř kódovacích kol, která blokují západku v zamčeném stavu. Princip mechanizmu je na obrázku [obr. ??/str??].

Geometrie západky Protože se západka otáčí, musí pro ni být zajištěn dostatek prostoru, zároveň však otvor pro dveře je lepší mít větší, protože se potom trezor dá použít pro větší objekty. Z tohoto důvodu jsou hrany

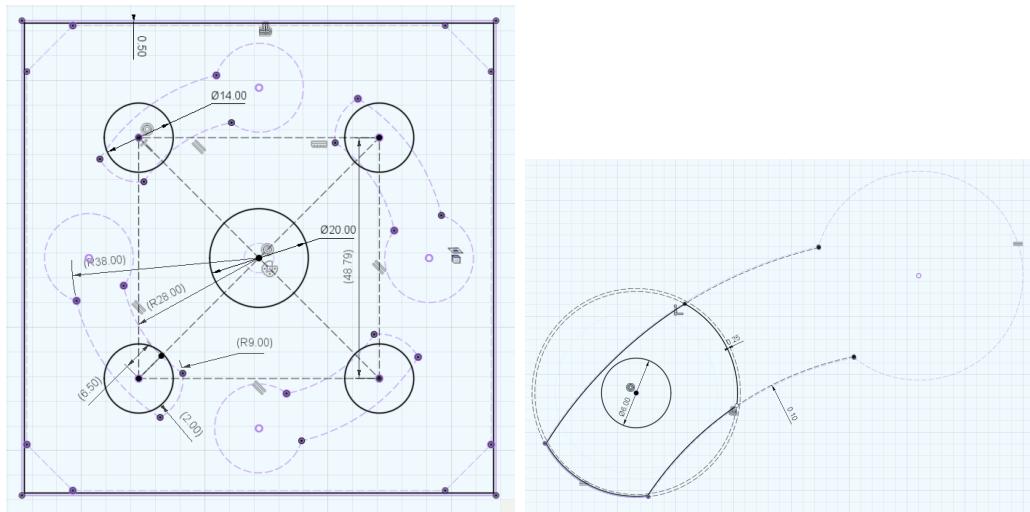
¹Jedná se o pevná dřevěná dřívka s obdélníkovým průřezem 3x16 mm nebo 2x16 mm. Tato dřívka používáme s dětmi na Robotárně se skvělým ohlasem již několik let. Jedná se vlastně o dřevní odpad z výroby skládacích metrů. Proto jsou velmi přesně vyrobená a nádherně se z nich staví nejrůznější modely nebo jednoduše a velmi rychle vyrobitelné doplňky a rozšíření k robotům.



Obrázek 4.1: Náčrt západky

západky definovány kružnicí o průměru délky vnitřní hrany trezoru. Západka má v rozích sražení ze dvou důvodů. Za prvé, aby byl otvor pro dveře větší a za druhé, aby namáhání působící v západce působilo na větší délce.

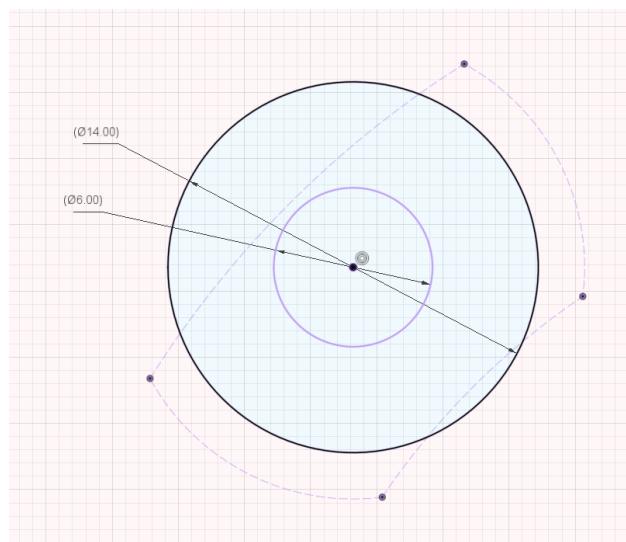
Distanční deska Aby se západka dostala za desku přední stěny bedny tresoru, je potřeba jí od přední stěny dveří posunout právě o tloušťku stěny. To zajišťuje jednoduchá čtvercová deska jen s pěti otvory pro průchod ovládacích kol.



Obrázek 4.2: Náčrt distanční desky a stavítka

Stavítko, který zajišťuje kód, má z části tvar drážky, ve které jezdí, a z části tvar kruhu, který se může otáčet v kruhovém otvoru na jedné staně drážky. Uprostřed má kruhový otvor o průměru 8 mm pro kolík, který stavítkem otáčí.

Lepící distanční kroužek Tyto distanční kroužky jsou zde čistě z technologického důvodu. Při lepení kolíku totiž měly děti problém s lepidlem, které jim zatékalo do prostoru mezi kolíkem a stěnou dveří, čímž znemožňovalo otáčení kol. Proto jsem přidal tyto kroužky, do kterých když zateče lepidlo, tak se nic neděje.



Obrázek 4.3: Náčrt lepícího distančního kroužku

Kapitola 5

Elektronický trezor

5.1 Přehled

Dnešní verze elektronického trezoru se zamyká pomocí mechanizmu bajonetu a magneticky řízené zpětné západky.

Elektronika je vybavena čipem ESP32 [[ESP32](#)], [[ESP32-WROVER-B](#)], který obsahuje dva procesory Xtensa LX6, WiFi a bluetooth. Dále je trezor vybaven čipem BMX055 [[bmx055](#)] nebo dvojicí čipů MPU6050 [[mpu6050](#)] a QMC5883 [[qmc5883](#)], které poskytují gyroskop, akcelerometr a magnetický kompas. Dále je zde SPL06 [[spl06](#)], barometr s rozlišením 0,06 hPa, což umožňuje rozeznat změnu nadmořské výšky o polovinu metru. Další systém trezoru je možnost IR komunikace, která je zde pro možnost jednoznačné identifikace dveří, ale pochopitelně může sloužit i pro jiný účel. Deska je také vybavena RTC a má vlastní programátor pro usnadnění programování. Vedle ESP32 je zde asi nejvýznamnějším čipem LDC1614 [[LDC1614](#)], případně LDC1314, který umožňuje funkci tlakové plochy (viz kapitoly ??, ??).

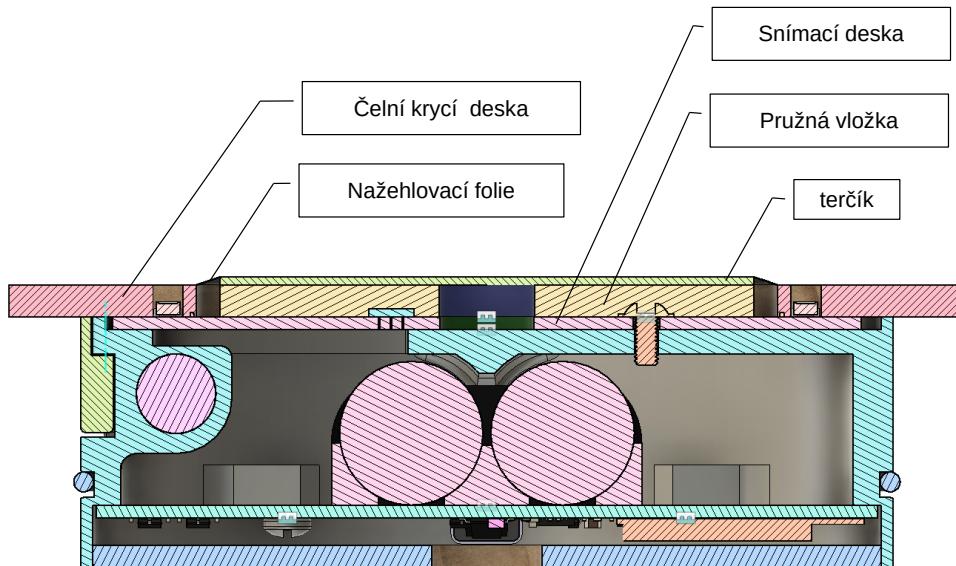
5.2 Mechanika tlakové desky

Indukčně snímaná tlaková deska funguje díky čtyřem cívkám na desce plošných spojů, které mění svojí indukčnost podle vzdálenosti snímané desky,

čip	popis	poznámky
ESP32	dva procesory Xtensa LX6, WiFi a bluetooth	
BMX055	gyroskop, akcelerometr, magnetický kompas	
SPL06	barometr	možno nahradit dvojicí čipů MPU6050 a QMC5883
IRM-H936 a IR led	IR komunikace	rozlišení až 0,06hPa, což umožňuje rozpoznat změnu nadmořské výšky o 0,5 m
LDC1614	snímání tlakové desky	počítá se s možnou zájmennou za LDC1314
CP2102	programátor	s hardwarově zajistěným odpojováním napájení, pokud není využíván

Tabulka 5.1: Shrnutí elektronického vybavení

terčíku. Z tohoto důvodu se terčík při používání naklání, čímž zároveň mění svojí vzdálenost od jednotlivých cívek. Z toho také plyne nutnost uložit terčík částečně volně. Terčík je proto od snímací desky oddelen pružnou vložkou, která je zároveň předepnuta pomocí nažehlovací fólie, která kryje přední stranu dveří a spojuje terčík s čelní krycí deskou. Díky nažehlovací fólii je také přední část dveří voděodolná.



Obrázek 5.1: Řez varianty E4

Díky zkušenostem z jiného podobného projektu jsem zjistil, že ovládací

prvek by měl být co možná největší. Zároveň by měl odolat i poměrně silným ranám, které děti v zápalu hry zařízení uštědřují. Tlaková deska tedy počítá s možností působení síly o velikosti až 500 N, což samozřejmě zároveň znamená, že tělo dveří tomuto zatížení musí odolat. Vzhledem k tomu, že nemám možnost vyrobit tělo z kovu a jsem odkázán na 3D tisk a laserovou řezačku, a zároveň chci mít dveře co možná nejmenší, musel jsem napočítat kritické části těla tak, aby odolaly a zároveň nebyly příliš mohutné. Z tohoto důvodu jsem v programu Fusion 360, ve kterém jsem trezor vyvíjel, dělal simulaci, kterou k práci přikládám na obrázcích [obr. ??/str??] a [obr. ??/str??].

Jako materiál těla jsem v první fázi zvolil standardní fotopolymer pro tiskárny typu SLA, s pevností v tahu 46 až 67 MPa. V budoucnu bych ale chtěl tělo odlévat z nějakého houževnatého polyuretanu, aby se zlevnila výroba a zároveň stoupala odolnost.

5.3 Zpětná západka

Zpětnou západkou pohybuje motor pomocí magnetu. Pro zajištění voděodolnosti je motor od západky oddělen stěnou, což je také jeden z důvodů použití magnetického spojení.



Obrázek 5.2: Render západky

Západka v průběhu vývoje Západka se ve vývoji pochopitelně objevila společně s bajonetem, ale v první verzi byla jen částí těla dveří a teprve v dalších verzích se stala samostatnou součástkou. První tělo využívající bajonet jsem tiskl na FDM tiskárně z plastu PLA a západka byla jen jeho pružnou částí. Toto řešení sice z počátku fungovalo a mělo výhodu jednoduší výroby, ale PLA po několika měsících začalo ztráct pružnost a západka se už nepohybovala v celém rozsahu. Toto jsem z počátku chtěl řešit samostatnou západkou ve spojení s tažnou pružinou. Pružiny však nebyla třeba a naprostě stačí magnet na motoru a v západce. Západka proto zůstala v této podobě a jen se přidala mechanická přepážka kvůli voděodolnosti.

Západka je také v neposlední řadě navržena tak, aby odolala pokusu o vylomení za působení kroutícího momentu až $5000 \text{ N}\cdot\text{mm}$, výsledky simulace najdete na obrázku [obr. ??/str??].

5.4 Úkosy

Aby bylo jednoduší při zavírání dveře správně natočit, mají zarážky na vnitřní straně velké úkosy, které tak zvětšují na vnitřní straně vůli a při zasouvání navedou dveře do správné pozice.

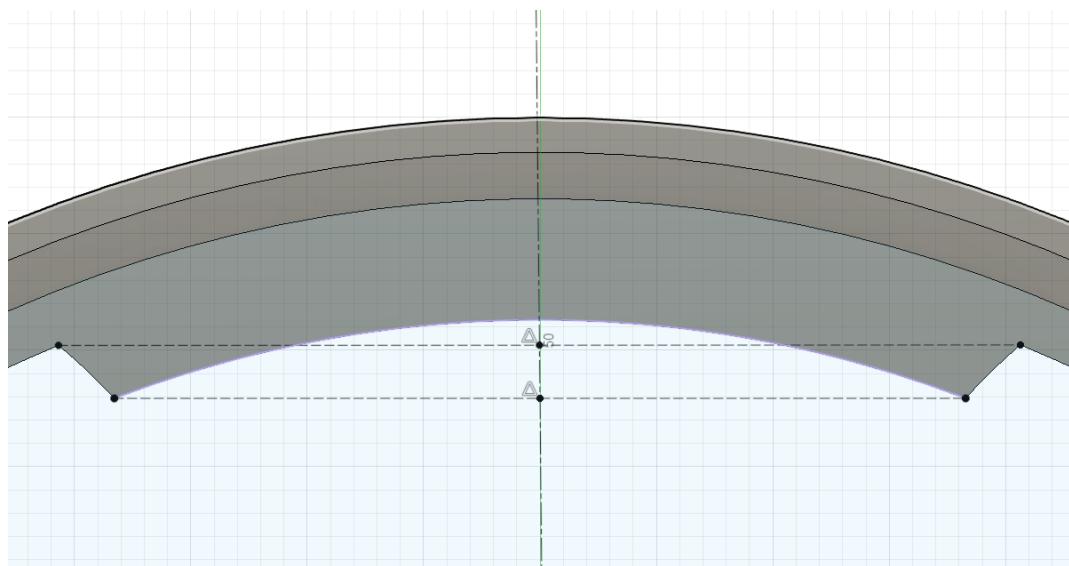
Zarážky na obvodu otvoru mají obě kontaktní plochy stejné. Sice by mohlo být výhodné přizpůsobit tvar strany, kolem které se pohybuje západka, pohyb západky. Západka by tak mohla mít vedení v průběhu celého pohybu. Pro symetrii jsem se však rozhodl kvůli možnosti díl s otvorem otočit. To je zvlášť výhodné při stavbě s dětmi, kvůli zmenšení počtu možných chyb, kterých se děti mohou při stavbě dopustit, a ztráta vedení není tak zásadní.

5.5 Elektronika tlakové desky

Tlaková plocha se díky pružné podložce a nažehlovací fólii může ve všech směrech naklánět, a díky tomu se při používání mění vzdálenost od čtyř snímacích cívek. Tlaková plocha je primárně terčík, který slouží jako sekundární

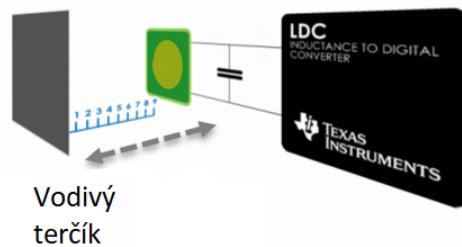


Obrázek 5.3: ukládací úkosy



Obrázek 5.4: Symetrie zarážky

cívka, k cívce vyleptané v mědi. LDC1614 pak při měření do snímacích cívek pouští frekvenci, která se dá nastavit externím zdrojem na 2-40MHz nebo použít interní oscilátor, který je nastaven na 40 MHz. Na základě výřivých proudů se pak dá změřit vzdálenost terčíku.



Obrázek 5.5: Schematické zobrazení cívky a terčíku [LDC-cd1]

Pro snímání terčíku používám čip **LDC1614** [**LDC1614**] nebo **LDC1314**, které se liší prakticky jen rozlišením. LDC1314 disponuje dvanáctibitovým AD převodníkem a LDC1614 dvacetiosmibitovým AD převodníkem a je tak schopen detektovat pohyb terčíku s rozlišením až na 10 nm.

Čip LDC komunikuje po sběrnici I2C, která umožňuje komunikaci jednoho mastera¹ s až 128 slavy.² LDC také umožňuje volbu ze dvou I2C adres, aby se dala adresa změnit v případná kolize s jiným čipem, který by měl stejnou adresu.³

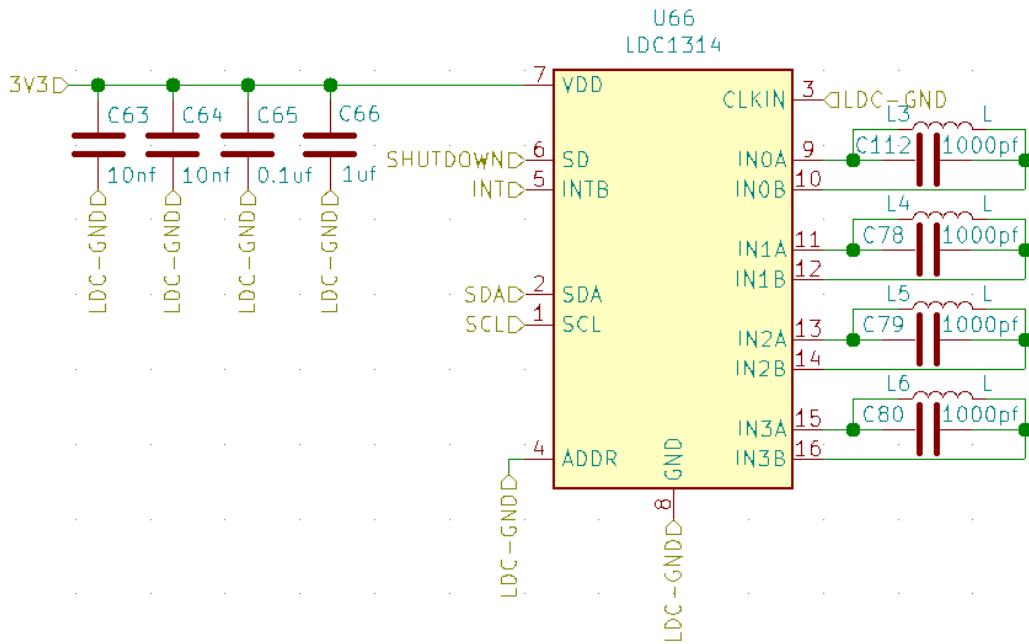
Cívky použité na trezoru jsou vyrobeny jako reliéf ve vrstvě mědi přímo na DPS. Jejich vzhled jsem navrhoval v simulátoru od firmy Texas Instruments, vytvořeném konkrétně pro LDC čipy, a s pomocí popisů reálných aplikací [**LDC-cd0**], [**LDC-cd1**], které firma Texas Instruments zveřejňuje.

Výsledná cívka je vytvořena na dvouvrstvé desce a na každé vrstvě má patnáct závitů s drahou o síle 0,152 mm se stejně velkou mezerou, vzhled je vidět na obrázku [obr. ??/str??].

¹Čip, který řídí komunikaci.

²Čipy, které přijímají příkazy od mastera a pouze mu odpovídají.

³Např. aby se daly použít dva čipy LDC na jedné sběrnici I2C.



Obrázek 5.6: Zapojení čipu LDC1314 na desce trezoru

Celý trezor obsahuje dvě samostatné elektronické desky, přičemž na jedné je osazen jen kruh z ledek WS2812 a snímání tlakové desky, které zabírá většinu této desky což je vidět na obrázku [obr. ??/str??].

5.6 LED kruh

Trezoru vévodí světelný kruh. Slouží jako displej, na kterém trezor může zobrazovat vše, co potřebuje. Kruh obsahuje šedesát jednotlivých ledek **WS2812** [**WS2812**], konkrétně WS2812 mini. Variantu mini jsem zvolil, aby kruh mohl mít menší průměr, který takto vychází na 80 mm. WS2812 mají totiž rozměr pouzdra 3,5x3,5 mm, zatím co ostatní varianty mají rozměry 5x5 mm⁴, což by znamenalo průměr kruhu alespoň 120 mm.

WS2812 nejsou jen LED, ale májí v sobě logiku, díky které je možné jich

⁴V průběhu vývoje se na trhu objevily i WS2812 v pouzdře 2020, které mají rozměru 2x2 mm ty však nebyly v nabídce JLCPCB a navíc byla deska již prakticky hotová.

řetězit velké množství s pomocí jediného pinu, takže na řízení celého kruhu stačí jen jeden pin na ESP32.

Ukázka PCB na obrázek [obr. ??/str??] a zapojení na [obr. ??/str??].

5.7 Napájení

Jako napájení celého trezoru slouží dvě li-on baterie 18650. Napětí článků však nevyhovuje potřebám trezoru, a tak je na trezoru lineární stabilizátor **NCP708** [**LD39200**], který zajišťuje napětí 3,3 V pro většinu systému. Kromě LD39200 je zde také step-up **FP6276** [**fp6276a**], který zajišťuje napájení 5 V sloužící primárně pro LED WS2812 a v druhá řadě napájí motor zámky, jejich zapojení je přiloženo na obrázku [obr. ??/str??].

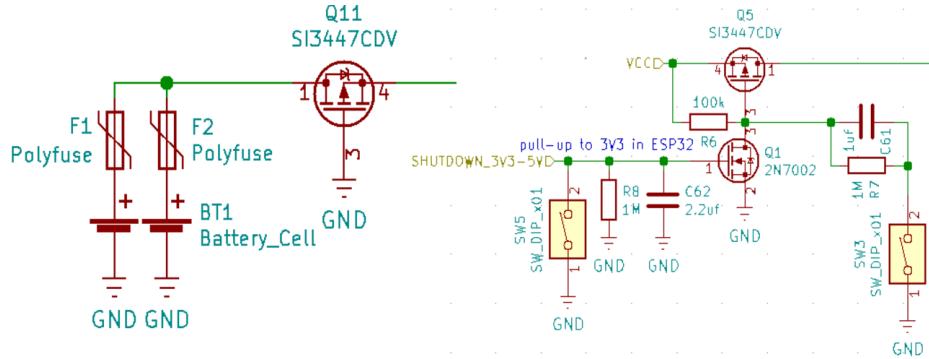
Zapínání Aby se trezor mohl vypnout a tak šetřit energii, je vybaven obvodem, který to umožňuje [obr. ??/str??].

Při připojení článků se napětí dostane nejprve na PTC⁵ [**polyfuse**], které slouží jako ochrana proti nadproudů, například v případě, kdy uživatel připojí dva různě nabité články nebo jeden z nich přepóluje. Pokud se proud dostane skrz PTC, dostane se na tranzistor Q11 [**power·MOSFET**], skrz který projde, jen pokud jsou články správně půlovány. Když se napětí dostane přes ochranu proti přepólování, dostane se na vývod source tranzistoru Q5 [**power·MOSFET**], skrz R6 na vývod drain Q1 a pak skrz R7 na obě strany C61. Pokud v takovéto situaci dojde ke stisku SW3, projde zem skrz C61 na vývod gate tranzistoru Q5. V tu chvíli se Q5 otevře na dostatečně dlouhou dobu, aby naběhla třívoltová větev a skrz pull-up⁶ se zvedlo napětí na gate tranzistoru Q1 na téměř 3,3 V. Q1 se tak otevře a už trvale připojí GND na gate tranzistoru Q5, trezor se tak zapnul. Pokud v takové chvíli procesor stáhne dráhu SHUTDOWN 3V3-5V na GND, nebo dojde ke stisku SW5,

⁵polymerová PTC, vratná pojistka

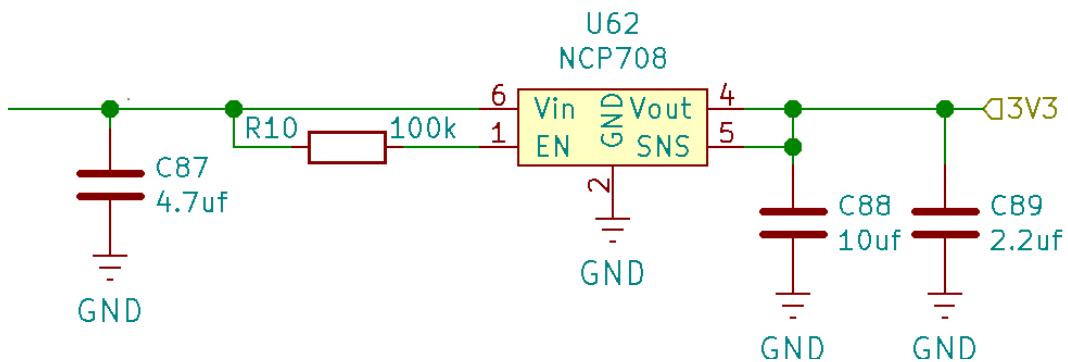
⁶Na obrázku je jen poznámka, reálná součástka je ve schematu společně s ESP32 na obrázku [obr. ??/str??].

opět se uzavře Q1 a skrz R6 projde na gate Q5 napětí, které Q5 uzavře a tak elektroniku opět vypne.



Obrázek 5.7: Ochrana proti přepólovaní a zapínání

Stabilizátor Stabilizátor [LD39200](#) [[ld39200](#)] má pin EN, který slouží k jeho vypínání. Pokud je na nem logická 0, je stabilizátor vypnut a pokud 1, je zapnut. Vzhledem k tomu, že v mému zapojení toto vypínaní nepotřebuji, je pin EN připojen přes R10 přímo na napájecí napětí, a tak je stabilizátor trvale zapnut. Konkrétně LD39200 jsem vybral kvůli malému pádu napětí, který vyžaduje pro svůj provoz, typicky 120 mV při proudu 1 A. Vzhledem k tomu, že na vstupu mám maximálně 4,2 V, tak maximální napěťový pád, který mám k dispozici je 0,9 V, protože na výstupu požaduji napětí 3,3 V. Navíc musím počítat i s vybitou baterií, u které počítám s napětím 3,5 V.



Obrázek 5.8: Zapojení stabilizátoru

Step-up vysvětlení funkce Zapojení step-upu⁷ je o něco složitější než stabilizátor, který stačí připojit a funguje. Spínané zdroje využívají ke své funkci cívku, na které vzniká změna napětí. Proud cívkou se nedá okamžitě zastavit a právě toho se využívá. Když se step-up spustí, připne výstup cívky k zemi. Ve chvíli, kdy napětí klesne pod zadanou úroveň,⁸ přepne se výstup cívky na výstup step-upu. Protože proud cívkou se nedá zastavit a cívku už proud teče, zvedne se napětí za cívku, které začne plnit kondenzátor na výstupu. Když napětí stoupne nad horní hranici požadovaného napětí, výstup cívky se opět přepne na zem. Ve chvíli, kdy napětí na kondenzátorech opět klesne, tím že dodává proud, připojí se cívka. Protože se na dobu pádu napětí na výstupním kondenzátoru, připojila cívka na zem, obnovil se v ní proud a cyklus se tak může opakovat.

Step-up zapojení na desce trezoru ⁹Pro ovládání spínání step-upu jsem zvolil [FP6276](#). Tento obvod jsem zvolil, protože mi vyhovoval jak po stránce napětí tak po stránce efektivity a ceny a zároveň byl v nabídce firmy JLCPCB.¹⁰ Obvod jsem z většiny zapojil dle doporučení výrobce, mojí prací bylo vlastně jen správně určit hodnoty jednotlivých součástek. Na ovládání pinu EN, který FP6276 vypíná, jsem připojil pull-up k napájení a pro možnost step-up vypnout tranzistor Q2 [[cj3134k](#)]. Pokud tedy procesor stáhne dráhu SHUTDOWN 5V k zemi a tak přivede na gate tranzistoru Q2 zem, Q2 se zavře. Tím se na pin EN přivede skrz R18 napájecí napětí, které step-up spustí. Pokud se na gate Q2 přivede naopak logická jedna, Q2 se otevře a na EN se dostane zem, která naopak provoz step-upu zastaví.

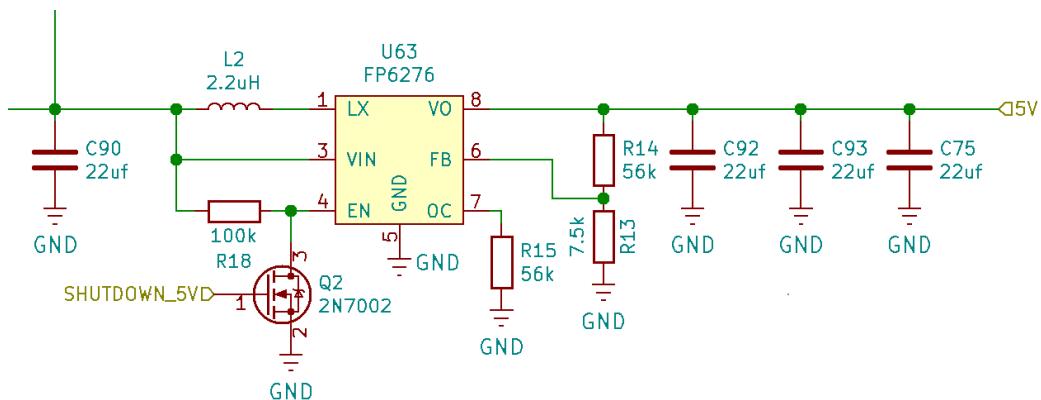
Měření napětí baterií Aby trezor mohl zjistit, že má vybité baterie, musí mít možnost jim měřit napětí. ESP32 obsahuje AD převodník, takže není problém měřit napětí baterie i poměrně přesně. Kde však problem nastává,

⁷Spínaný zdroj, který spíná vstupní napětí na napětí vyšší.

⁸Předpokládá se, že je v tu chvíli proud cívkou dostatečný.

⁹Obvod je na obrázku [obr. ??/str??].

¹⁰Firma u které jsem desky vyráběl a osazoval.

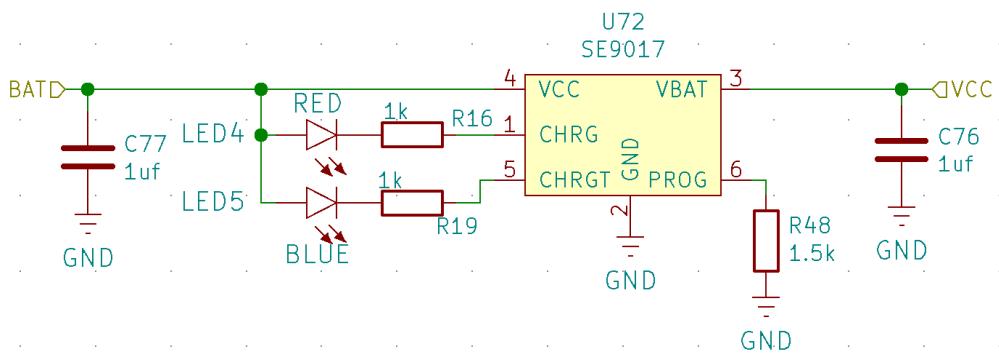


Obrázek 5.9: Zapojení step-upu

je maximální napětí, které je schopen měřit, a to 1,1 V. ESP32 má možnost připojit k AD převodníku dělič, aby se na pin dalo přivést napětí až 3,3 V. To ale pořád není dostatečné, a také se tím snižuje přesnost měření. Proto je na desce jednoduchý dělič napětí složený ze dvou odporů, jednoho s hodnotou $1\text{ M}\Omega$ a druhého $300\text{ k}\Omega$, takže při plně nabité bateriích bude na výstupu děliče 0,97 V.

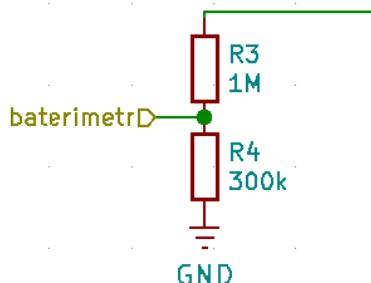
5.8 Nabíjení

Aby se dveře trezoru nemusely pokaždé rozebírat kvůli nabíjení, je deska vybavena lineární nabíječkou [SE9017](#) [[se9017](#)]. Tento nabíjecí obvod jsem zvolil z nabídky JLCPCB [[JLCPCB](#)] kvůli volitelnému nabíjecímu proudu, který jsem pomocí R48 [obr. ??/str??] stanovil na 700 mA, a také kvůli malému pouzdru a nízké ceně. Pro signalizaci, zda je baterie dobita, nebo zda se ještě dobíjí, jsou zde dvě LED, LED4 a LED5. Když se baterie dobíjí, svítí LED4, která svítí červeně, když je pak baterie dobita, svítí LED5, která svítí modře.



Obrázek 5.11: Zapojení nabíječky

5.9 ESP32 a jeho programátor



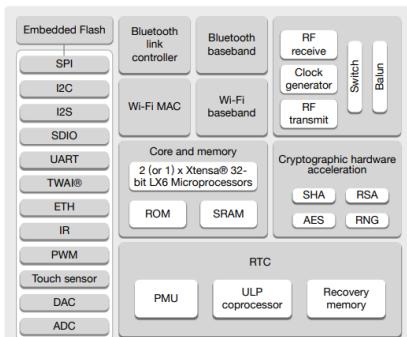
Obrázek 5.10: Měření napětí baterií

Mozkem celého trezoru je čip [ESP32-wrover](#) [**ESP32-WROVER-B**]. Obsahuje dva dvaatřicetibitové procesory Xtensa LX6 taktované až na 240Mhz. **ESP32** [[ESP32](#)] má také na modulu wrover k dispozici 520 KiB SRAM a 4,8 nebo 16 Mb flash paměti. **ESP32** má také k dispozici řadu periferií, z nichž asi nejvýznamnější je WiFi a Bluetooth. Právě integrace WiFi a Bluetoothu je také jeden z primárních důvodů volby tohoto čipu. Dalším podstatným důvodem volby čipu **ESP32** je jeho vysoký výpočetní výkon, alespoň na

poměry mikrokontrolérů a v neposlední řadě také fakt, že s tímto čipem už nějakou dobu pracuji a tak s ním již mám zkušenosti. Konkrétně wrover jsem pak zvolil kvůli dodatečné paměti PSRAM¹¹ o velikosti 32 Mbit, [ESP-PSRAM32](#) [[ESP-PSRAM32](#)].

Kompletní zapojení je na obrázku [obr. ??/str??]

ESP32 také vyžaduje mít při startu definované úrovně na některých pinech, proto jsou zde čtyři pull-upy¹² a dva pull-downy,¹³ které definují výchozí stav pinů IO0, IO2, IO5, IO12, IO15 a EN [[ESP32](#)].



IO0	ovládá boot procesoru	LOW při resetu ESP vstupuje do bootloaderu
IO2	Zapínání a počítání pro spuštění bootu	LOW potvrzuje
IO12	ochrana proti prepólovaní urcuje napětí komunikace s flash	LOW znamená napětí 3,3V a HIGH 1,8V
IO15	ovládá zprávy bootloaderu do UART	LOW zprávy vypíná a HIGH zapíná
EN	reset pin	LOW ESP je drženo v resetu

Tabulka 5.2: Popis funkce pinů

Programátor

Aby mohl uživatel trezor jednoduše naprogramovat, je na desce převodník USB-UART, [CP2102](#) [[cp2102](#)]. Protože však CP2102 není potřeba celou dobu provozu a protože trezor nemá k dispozici neomezený zdroj elektřiny, je převodník zapnut jen ve chvíli, kdy je připojeno USB-C, které slouží jak pro nabíjení, tak pro programování. Vypínání převodníku je zajištěno tranzistorem Q3, který je zároveň společně

¹¹Pseudo Static RAM

¹²Rezistor je připojen mezi dráhu a napájení.

¹³Rezistor je připojen mezi dráhu a zem.

s DIP switchem SW4 využit pro možnost zákazu programování, viz obrázek [obr. ??/str??].

5.10 Senzorika

Mezi podstatné funkce trezoru patří jeho vnímání veličin jako čas, jeho náklon nebo okolní tlak. Deska proto obsahuje tři nebo čtyři čipy (v závislosti na dostupnosti součástek), které trezoru poskytují gyroskop, akcelerometr, magnetický kompas, barometr, RTC a také konektor pro připojení modulu GPS a GPRS. Díky těmto funkcím může trezor poskytnout možnost ovládání pomocí různých gest. Trezor třeba může sloužit, s využitím magnetického kompasu a LED kruhu, jako kompas, nebo se dá využít akcelerometr, aby se dal trezor odemknout jen v konkrétním náklonu.

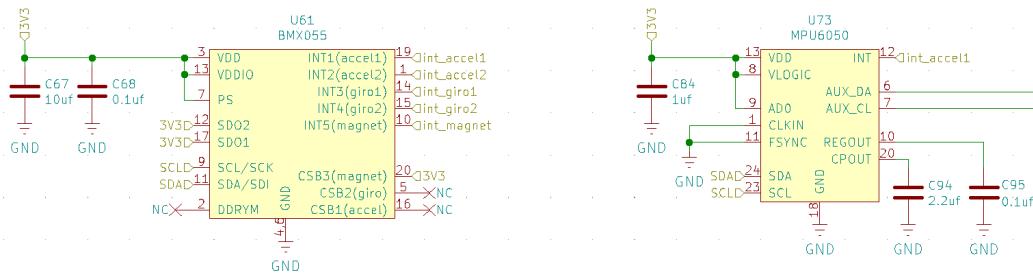
Všechny čipy zobrazené na obrázku [obr. ??/str??] komunikují s ESP32 hlavně pomocí sběrnice I2C. Pro možnost zrychlení reakcí má však každý z čipů také pin určený pro spuštění přerušení na procesoru, zapojení najdete na obrázku [obr. ??/str??].

To je užitečné, protože komunikaci na I2C řídí ESP32. Pokud se tedy ESP32 nerozhodne zeptat se jiného čipu na jím naměřené data, čip mu to po I2C nemá jak sdělit. Zároveň se však procesor nemůže bez ustání ptát na měření ostatních čipů, protože by pak nestíhal dělat nic jiného. Proto jsou čipy vybaveny pinem, který změní svou logickou hodnotu ve chvíli, kdy naměřené hodnoty splní nějaké podmínky. Například může být trezor naprogramován, aby se otevřel v konkrétní čas. Tento čas se potom dá nastavit v RTC jako hodnota, při jejímž dosažení RTC přepne pin přerušení. ESP32 pak jen přečte logickou hodnotu pinu a vlastně ani nemusí komunikovat po I2C.

Akcelerometr, gyroskop a magnetický kompas Tyto funkce trezor má pro možnost sledování své pozice v prostoru. Díky akcelerometru má trezor k dispozici informaci o směru a velikosti svého zrychlení v prostoru.

Gyroskop poskytuje informaci o relativním natočení trezoru, což se může využít jako další podmínka pro otevření trezoru nebo pro různá ovládací gesta. Magnetický kompas pak pochopitelně dodává informaci o natočení vůči zemskému magnetickému poli.

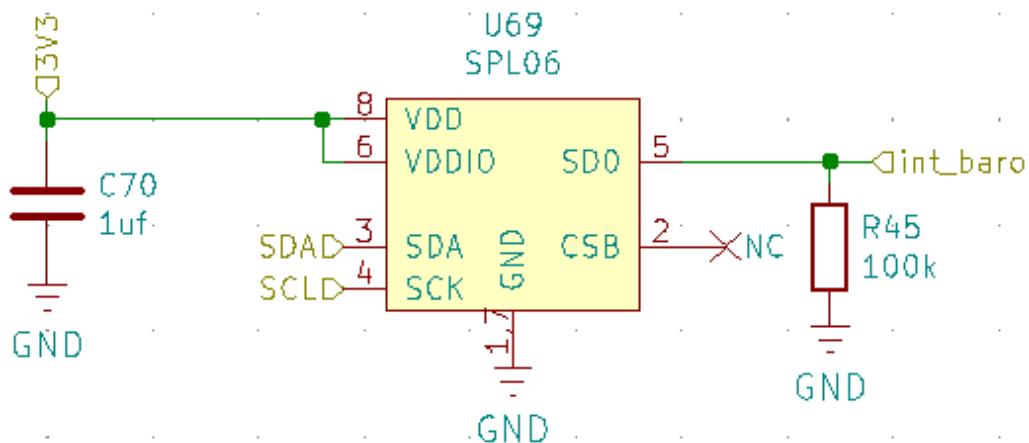
Na prvním prototypu verze E4 poskytoval akcelerometr, gyroskop i magnetický kompas čip **BMX055** [**bmx055**], protože však tento čip nebyl jednoduše dostupný, přidal jsem na další verzi i čip **MPU6050** [**mpu6050**], který obsahuje akcelerometr a gyroskop a čip **QMC5883** [**qmc5883**], který dodává magnetický kompas. Na desce je tak místo pro všechny tři čipy, a pokud není k dispozici BMX055, jednoduše se osadí MPU6050 a QMC5883.



Obrázek 5.13: Zapojení čipů BMX055, MPU6050 a QMC5883

Barometr Barometr poskytuje informaci o okolním atmosferickém tlaku. Tato informace může sloužit pro rozeznávání nadmořské výšky, a to s relativní přesností až na 0,5 m. Také může trezor sloužit i jako jednoduchá meteorologická stanice.

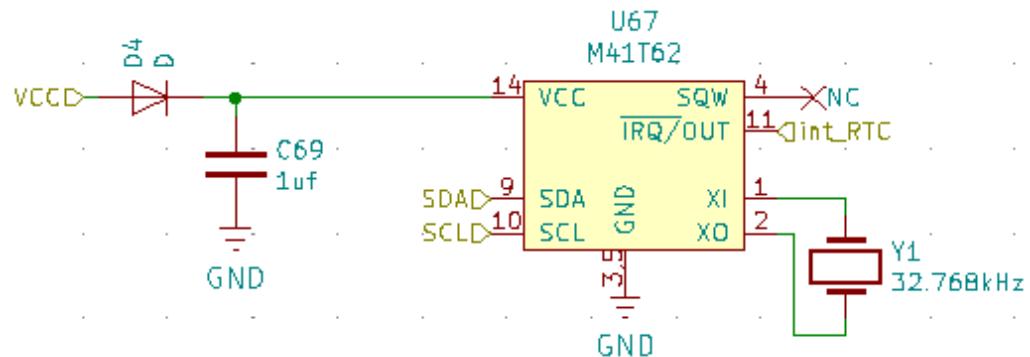
Od doby, kdy jsem z nabídky JLCPCB vybíral čip [SPL06](#), JLCPCB doplnilo do své nabídky několik dalších barometrů a dneska bych tedy dost možná zvolil jiný. Každopádně tehdy jsem volil mezi dvěma čipy, které byly v nabídce JLCPCB dostupné a SPL06 měl vyšší rozlišení a byl za téměř stejnou cenu.



Obrázek 5.14: Zapojení čipu SPL06

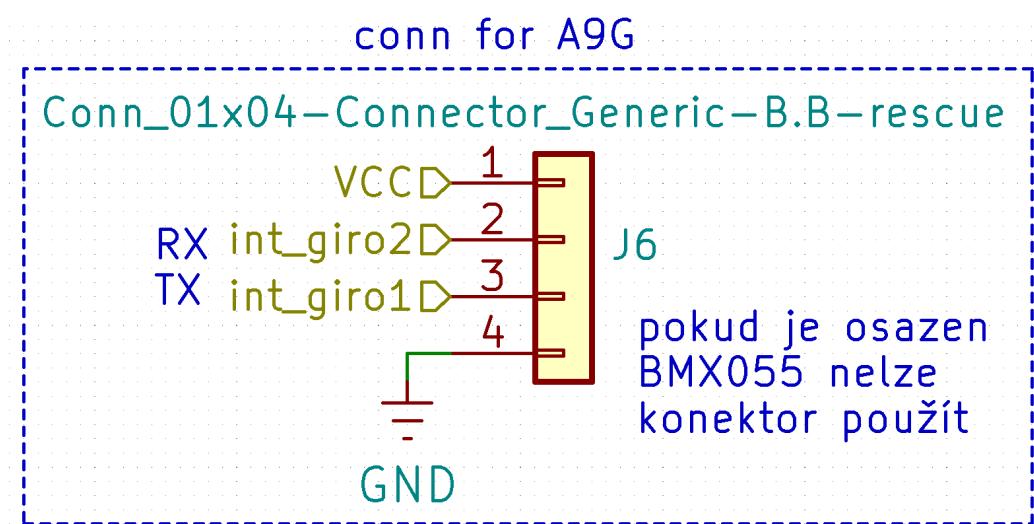
RTC Aby si trezor mohl zachovávat povědomí o aktuálním čase i ve chvíli, kdy je vypnut, má k dispozici čip **M41T62** [**m41t62**].

M41T62 je napájen přímo z baterie a je na ni napojen ještě před zapínacím obvodem, hned za ochranou proti přepólování. To je pochopitelně z důvodu znalosti času i ve vypnutém stavu.



Obrázek 5.15: Zapojení čipu M41T62

Konektor pro GPS/GPRS modul Ve chvíli, kdy jsem na trezor doplňoval čipy MPU6050 a QMC5883, jsem zároveň doplnil i tento konektor. Ve verzi, která je osazena MPU6050 a QMC5883 a nemá tedy osazen čip BMX055, je totiž více volných pinů. BMX055 totiž využívá pět pinů přerušení, zatím co MPU6050 a QMC5883 mají každý po jednom. Proto při nevyužití BMX055 zbudou tři volné piny. Protože čip A9G¹⁴ komunikuje po sběrnici UART, na rozdíl od ostatních čipu na desce. Pro UART však potřebuji dva piny a ty kolidují s piny přerušení čipu BMX055. Proto se konektor dá použít, jen pokud není osazen BMX055.



Obrázek 5.16: Zapojení konektoru pro A9G

5.11 Ovládání západky a IR komunikace

Zapojení je dostupné na obrázku [obr. ??/str??].

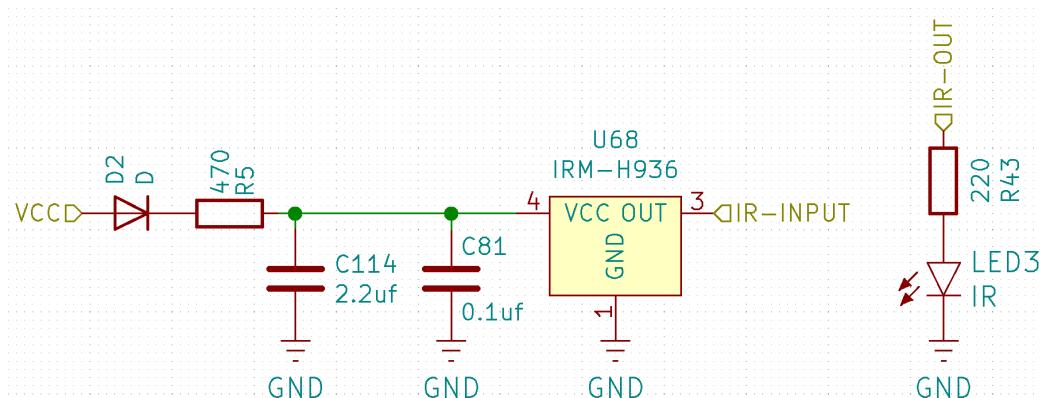
IR komunikace IR slouží primárně pro identifikaci dveří, při vkládání většího množství dveří do stejného trezoru. Trezor totiž počítá s možností vkládání více dveří do jednoho trezoru, což je jedna ze schopností, kterou více

¹⁴Čip využívám jako GPS a GPRS modul.

použije trezor jako hračka, než trezor jako bezpečnostní schránka. Tento trezor s více dveřmi by zároveň mohl sloužit jako jakýsi displej a na to potřebuje vědět, které dveře jsou kde, na což slouží právě IR komunikace.

Jako IR přijímač jsem z nabídky JLCPCB [**JLCPCB**] zvolil [IRM-H936](#) [[irm-h936](#)]. V nabídce JLCPCB byly v době návrhu desky jen dva IR přijímače, právě IRM-H936 a [IRM-H638](#), z nichž IRM-H936 má skoro poloviční výšku a širší úhel záběru, a to byl důvod jeho volby.

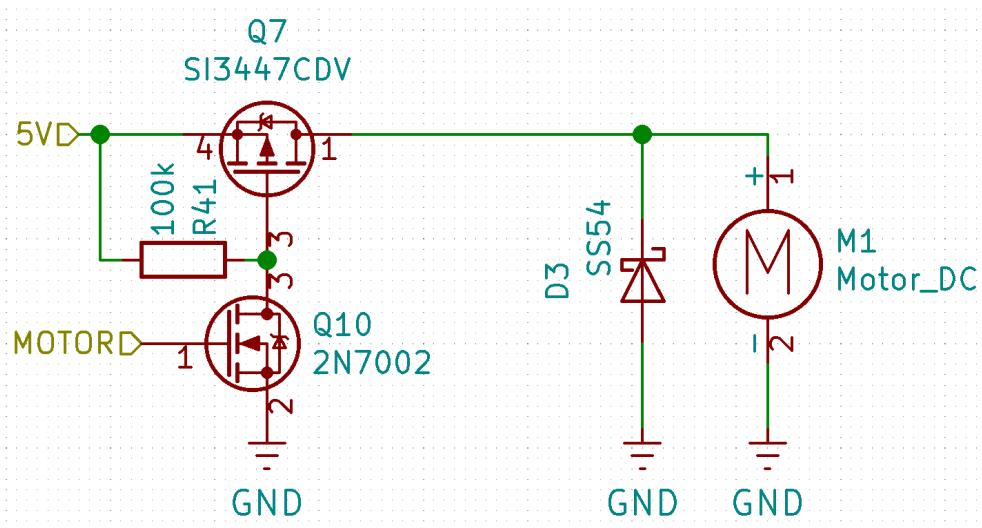
Druhou částí IR komunikace je vysílač, který je zajištěn jednoduše IR LED [[ir19-21c/tr8](#)].



Obrázek 5.17: Zapojení IR vysílače a přijímače

Ovládání motoru Protože motor je napájen z 5 V větve a protože ho připínám k napájení a ne k zemi, nemůžu ho ovládat přímo z procesoru. Proto je Q7 napojen na Q10, který je teprve řízen z ESP. Kvůli napěťovým špičkám, které při běhu vznikají na komutátoru motoru, je zde i zpětná Schottkyho dioda, D3.

Motor bych sice mohl napájet z napětí 3,3 V a nemusel bych tím pádem přidávat tranzistor navíc, ale zároveň bych tím zpomalil rychlosť motoru.¹⁵ Další možností by bylo napájet motor přímo z napětí na bateriích a mohl bych tak motor spustit i bez zapnutí 5 V zdroje. To by však znamenalo nutnost sofistikovanějšího řízení motoru, protože by se motor točil různou rychlosťí v závislosti na nabité baterií.



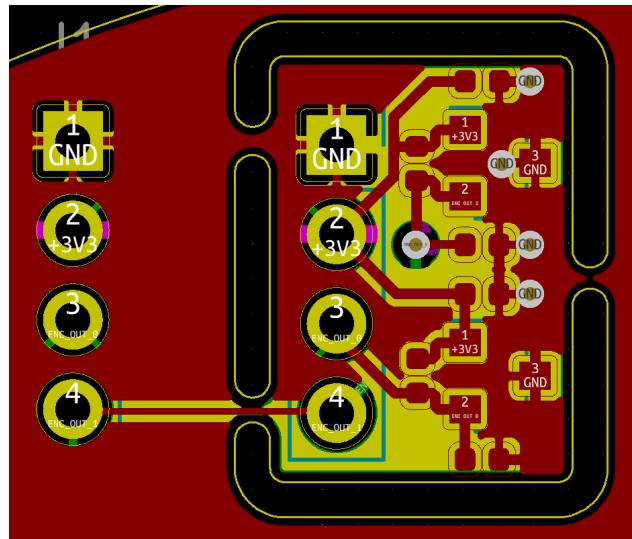
Obrázek 5.18: Zapojení řízení motoru

Enkopodér Aby bylo možno motor polohovat do správné polohy, je nutné mít zpětnou vazbu o jeho poloze. Vzhledem k tomu, že motor otáčí magnetem, samo se nabízí využít magnetický enkopodér. Proto jsou na desce dvě digitální Hallovy sondy SS360NT [ss360nt], které se překlopí podle toho, u jakého magentického pólu se nachází.

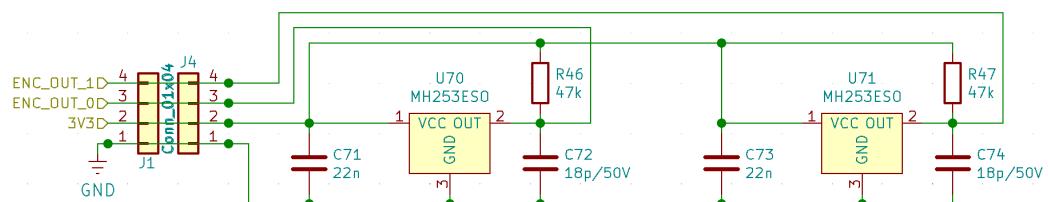
¹⁵otáčky motoru ale přes to mohu snížit dle potřeby

Na desce s LED kruhem by sondy musely být na opačné straně než LED, takže by se musely pájet ručně, protože JL-CPCB osazuje jen z jedné strany. Hlavní deska je ale zase, kvůli velikosti baterií, moc daleko od magnetu.

Abych tedy nemusel dělat třetí desku jen kvůli enkodéru, zvolil jsem možnost vylomitelného enkodéru. Na hlavní desce jsem tedy nakreslil enkodér s konektorem a objel jsem ho frézou, aby se dal při montáži trezoru z desky vylomit a posunout do ideální polohy. Vzhled enkodéru je vidět v horní části obrázku [obr. ??/str??]



Obrázek 5.19: Vzhled enkodéru na desce



Obrázek 5.20: Zapojení enkodéru

Kapitola 6

Využití

6.1 Použití trezoru

První nasazení trezoru na akci pořádané Robotárnou [**robotarna**] proběhlo na příměstském robotickém táboře v srpnu roku 2019. Jednalo se o první variantu trezoru, která kdy spatřila světlo světa (viz kapitola ??). Tábor trval pět dní a děti dostaly první tři dny na stavbu mechaniky a poslední dva dny se programovalo.

Trezor tehdy sklidil úspěch a tak započal vývoj dalších verzí, které už byly specializovanější (viz kapitoly ?? a ??) a přidal se vývoj i mechanických variant (jsou popsány v kapitolách ??, ?? a ??).

Trezor ve volnočasových kurzech robotiky Další používání trezoru probíhalo ve volnočasovém kurzu robotiky, který jsem spoluvedl, a účastníci v něm stavěli nejprve tehdy aktuální mechanickou variantu, verzi M2 (popsaná v kapitole ??). Protože účastníci kurzu byli většinou již docela zkušení, jednalo se u nimi téměř jen o „rozsvičku“, kterou měli za několik kroužků hotovou a následovala stavba trezoru E3.

Bohužel kvůli pandemickým opatřením si ne všichni účastníci stihli trezor E3 postavit a vůbec jsme se nedostali k programování, natož aby jsme si s trezorem zorganizovali nějakou herní akci, jak bylo dříve v plánu.

Trpasličí trezor Chvíli po té, co vznikl trezor M3 ?? ??, proběhla první akce s trezorem, která nebyla pod taktovkou Robotárny. Zároveň to byla také první akce, na které se trezor nestavěl a jen se využíval.

Protože na akci byly menší děti, byl trezor místo klasické číselné stupnice vybaven obrázkovým kódem, jak je vidět na obrázku [obr. ??/str??].

Toto však byla poslední akce která se stihla uskutečnit před započetím pandemických opatření.



Obrázek 6.1: Trpasličí trezor

Kapitola 7

Závěr

Cílem mé práce bylo vyvinout systém v podobě trezoru pro výuku programování, mechanické stavby a náplň různých kolektivních her.

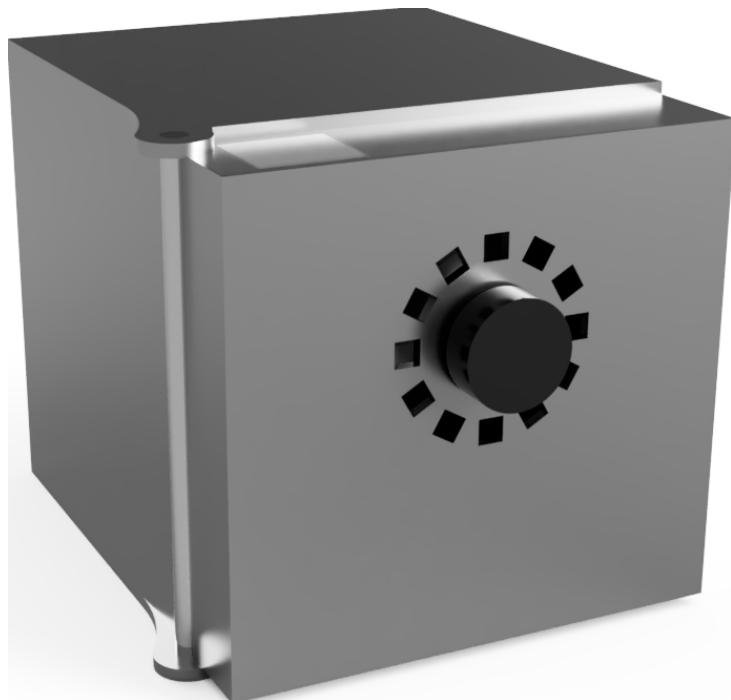
Plánovaných cílů jsem dosáhl, přesto, že se v průběhu vývoje částečně změnil koncept celého systému. Trezor měl původně sloužit primárně pro výuku, ale v průběhu vývoje se objevilo daleko více požadavků a možností na nasazení trezoru jako hotového zařízení např. v nejrůznějších táboryových nebo městských hrách.

Díky této práci jsem se zdokonalil v návrhu tištěních spojů. Také jsem pro návrh DPS začal využívat program KiCad, zatím dříve jsem využíval Eagle, který není špatný ale KiCad mi vyhovuje o něco více. Díky výrobě desek jsem se naučil používat program [KiKit](#) [**KiKit**], který vytvořil Jan Mrázek a který zásadně usnadňuje výrobu podkladu pro reálnou výrobu DPS.

Příloha A

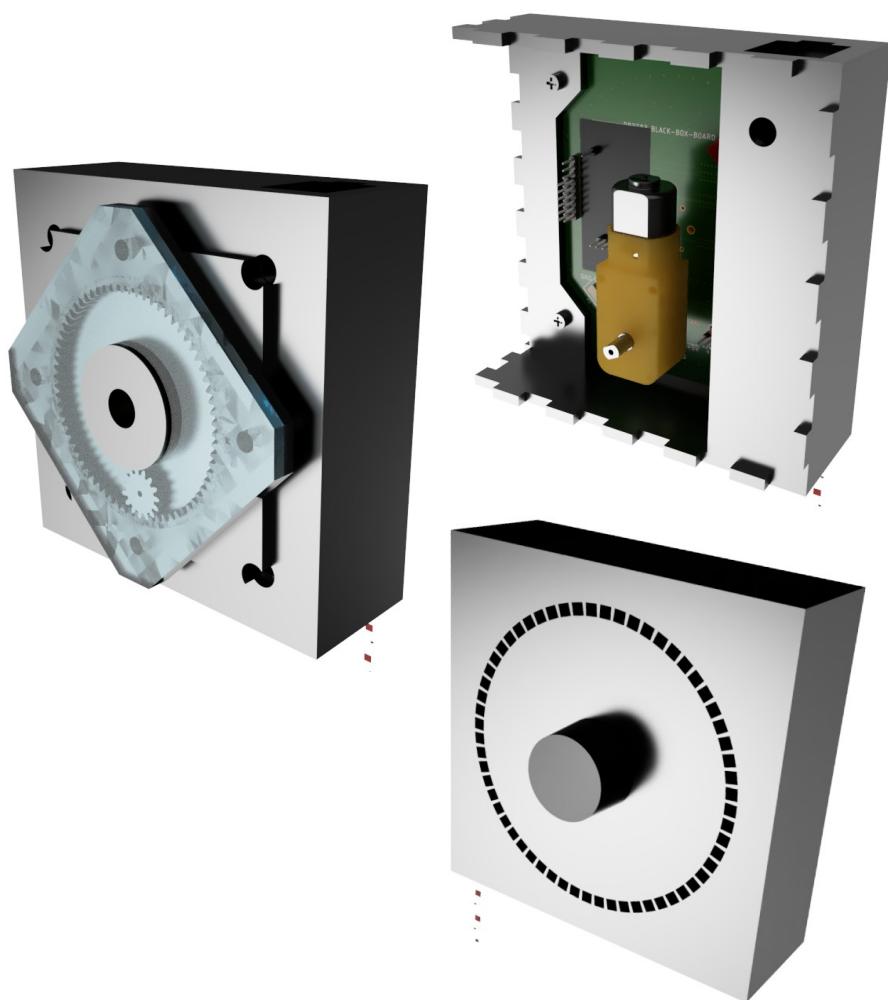
Obrazová příloha

A.1 Vzhled druhé elektronické varianty



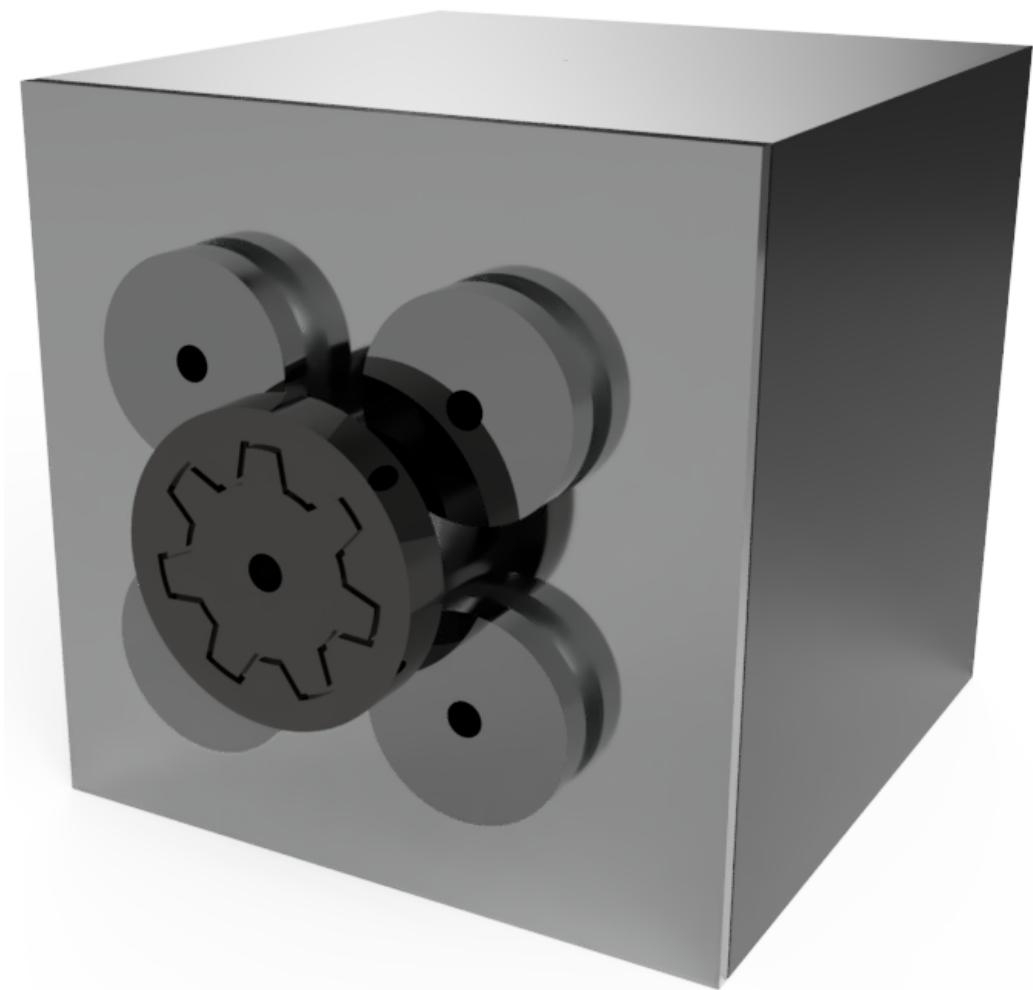
Obrázek A.1: Render varianty E2

A.2 Vzhled třetí elektronické varianty



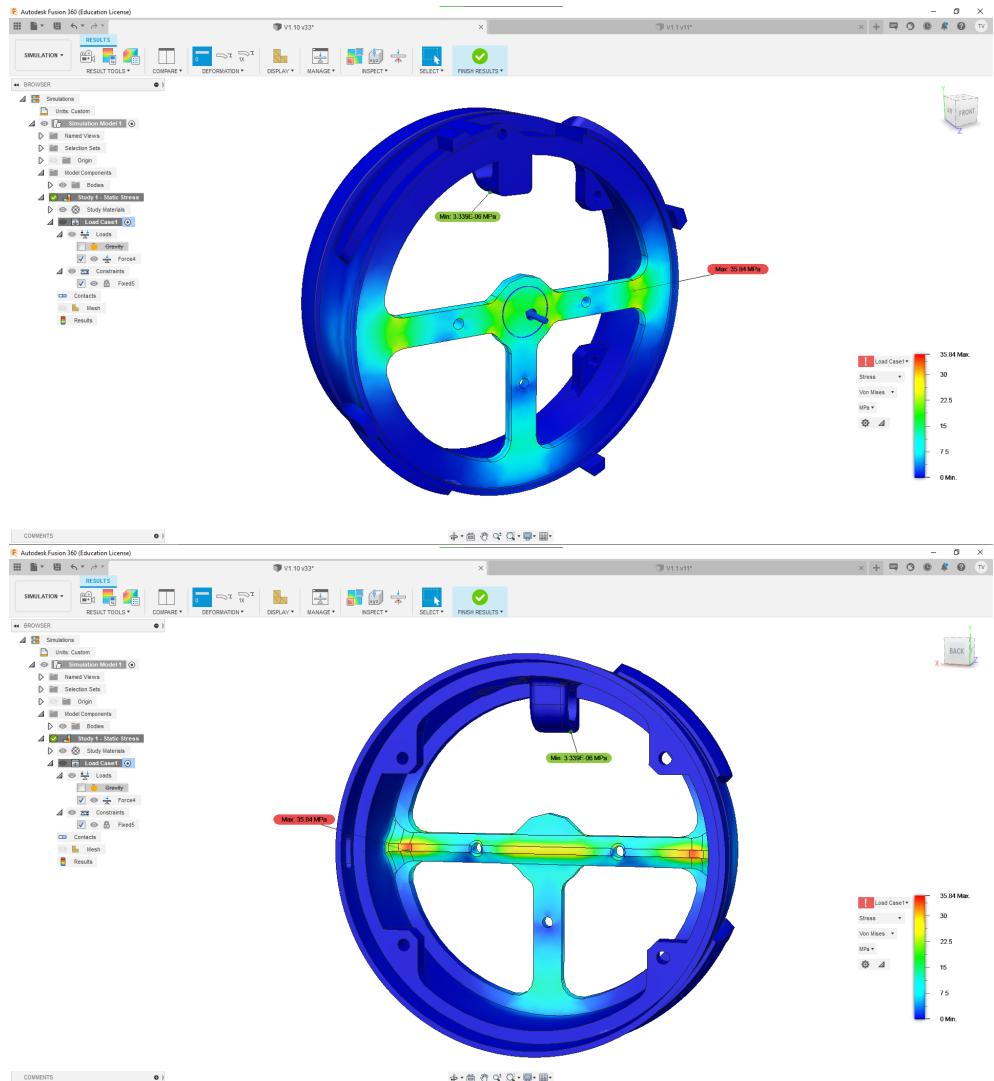
Obrázek A.2: render varianty E3

A.3 Vzhled druhé mechanické varianty



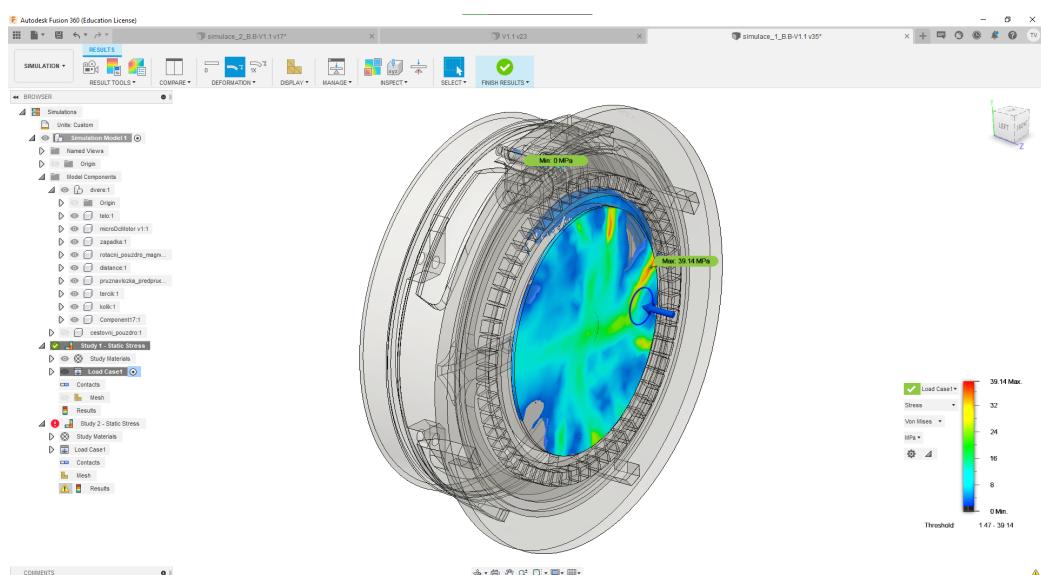
Obrázek A.3: Render varianty M2

A.4 Simulace pevnosti tlakové desky



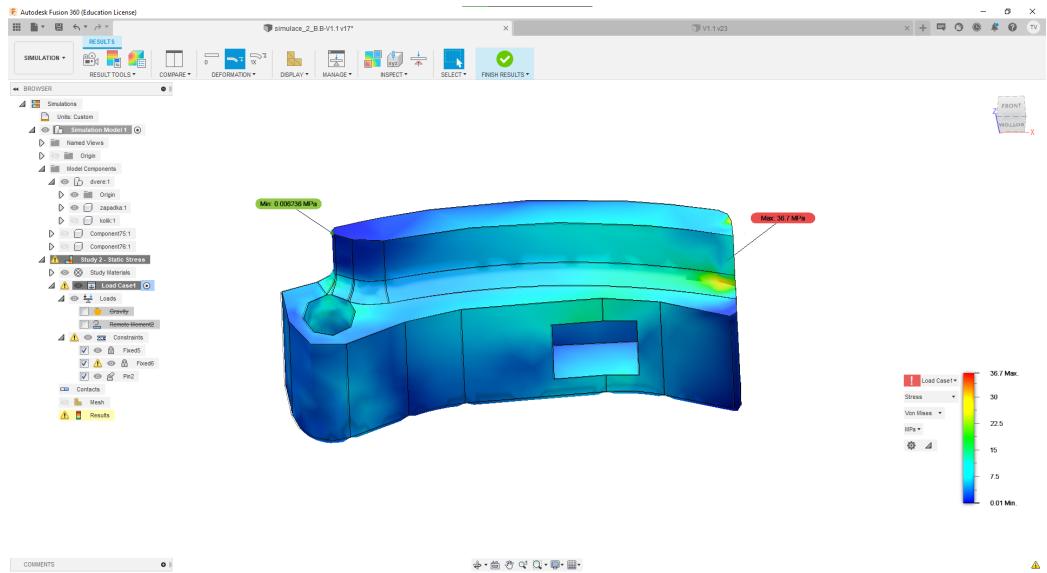
Obrázek A.4: Pevnostní simulace těla nahoře je pohled zepředu a dole
pohled zezadu

Tato simulace testuje působení síly přímo na tělo, což není působení, které by v provozu nastávalo. Takovéto namáhání je ale o dost náročnější než to, které by reálně nastalo.

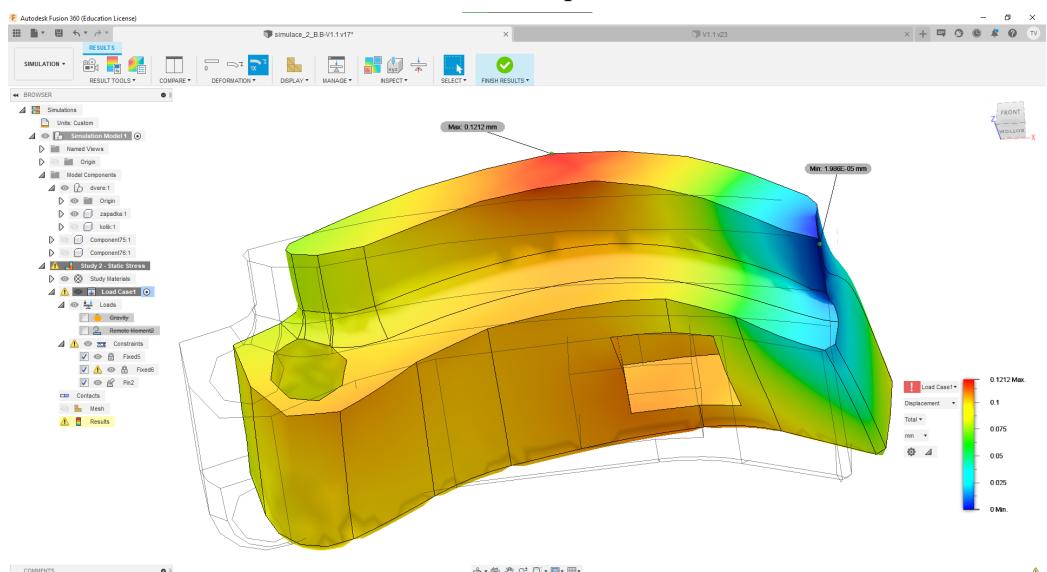


Obrázek A.5: Simulace sestavy

Jak je vidět, tak i sílu 100 N dokaže, sendvič z terčíku, pružné podložky a snímací desky rozložit na dostatečnou plochu, aby napětí v těle nestouplo nad cca 3 MPa. Na obrázku je zobrazené jen napětí nad 1,5 MPa.

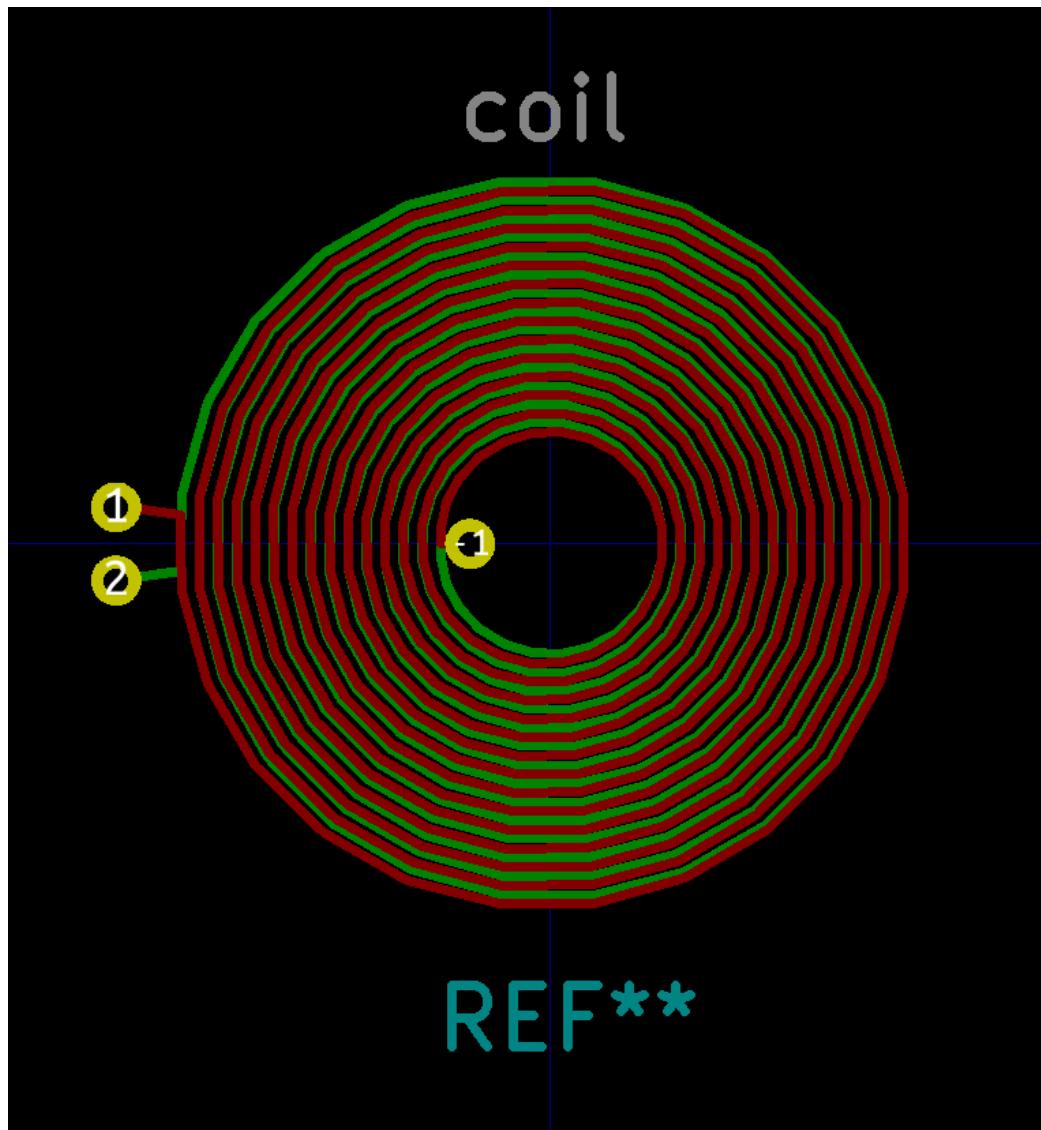


Obrázek A.6: Simulace napětí v západce při kroutícím momentu 5000 N · mm což na rameni 48 mm znamená sílu působící na kolík 104 N

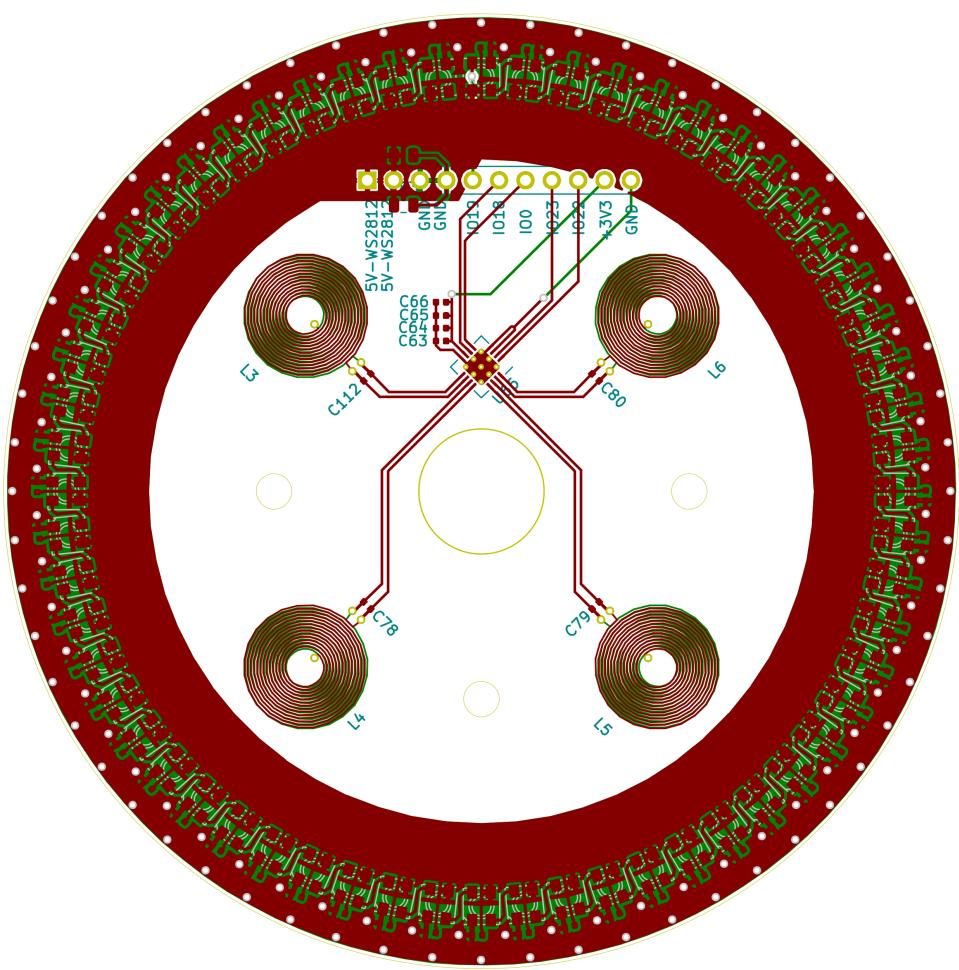


Obrázek A.7: Zobrazení deformace, pro lepší zobrazení je deformace zdesezinásobená

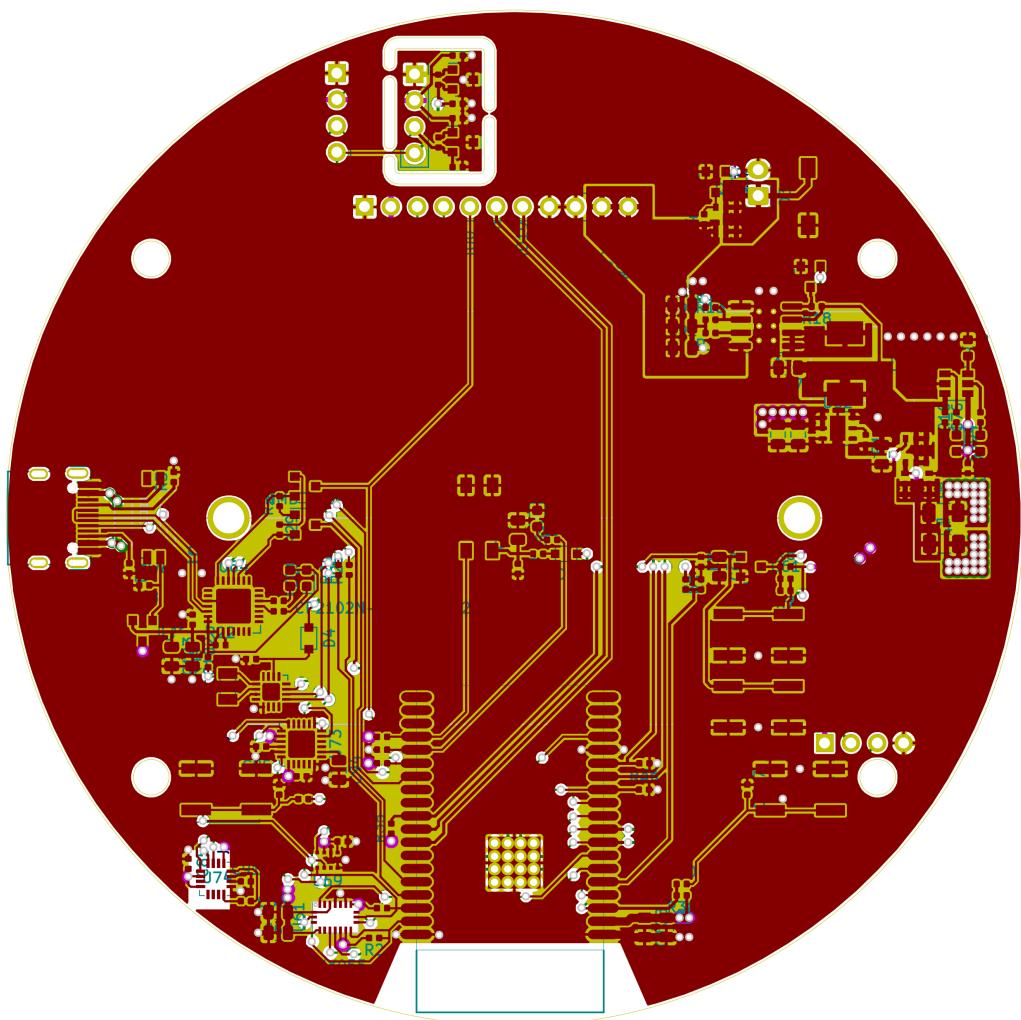
A.5 Obrázky DPS



Obrázek A.8: Vzhled reliéfu cívky

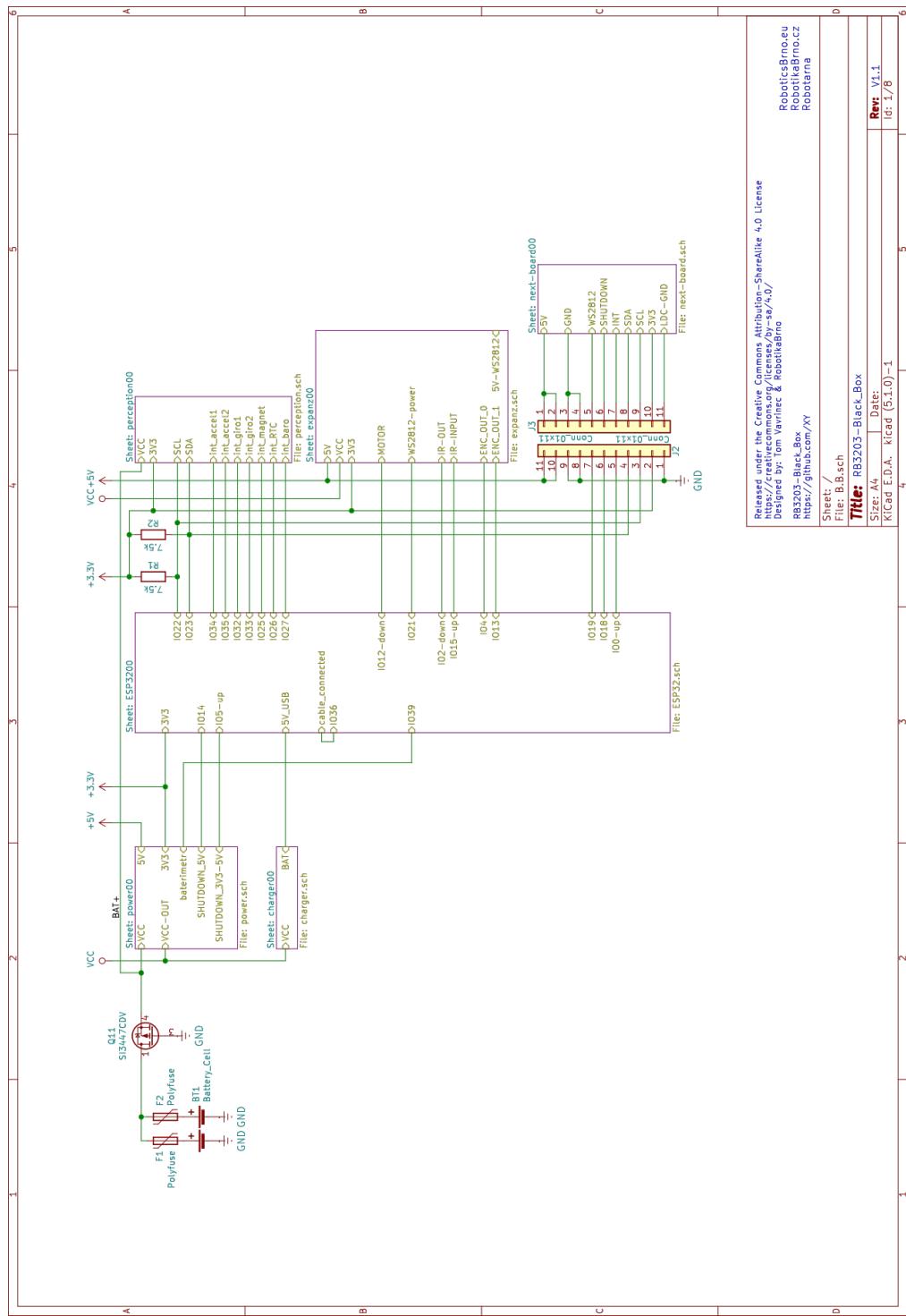


Obrázek A.9: Vzhled desky s kruhem WS2812 a snímáním tlakové desky

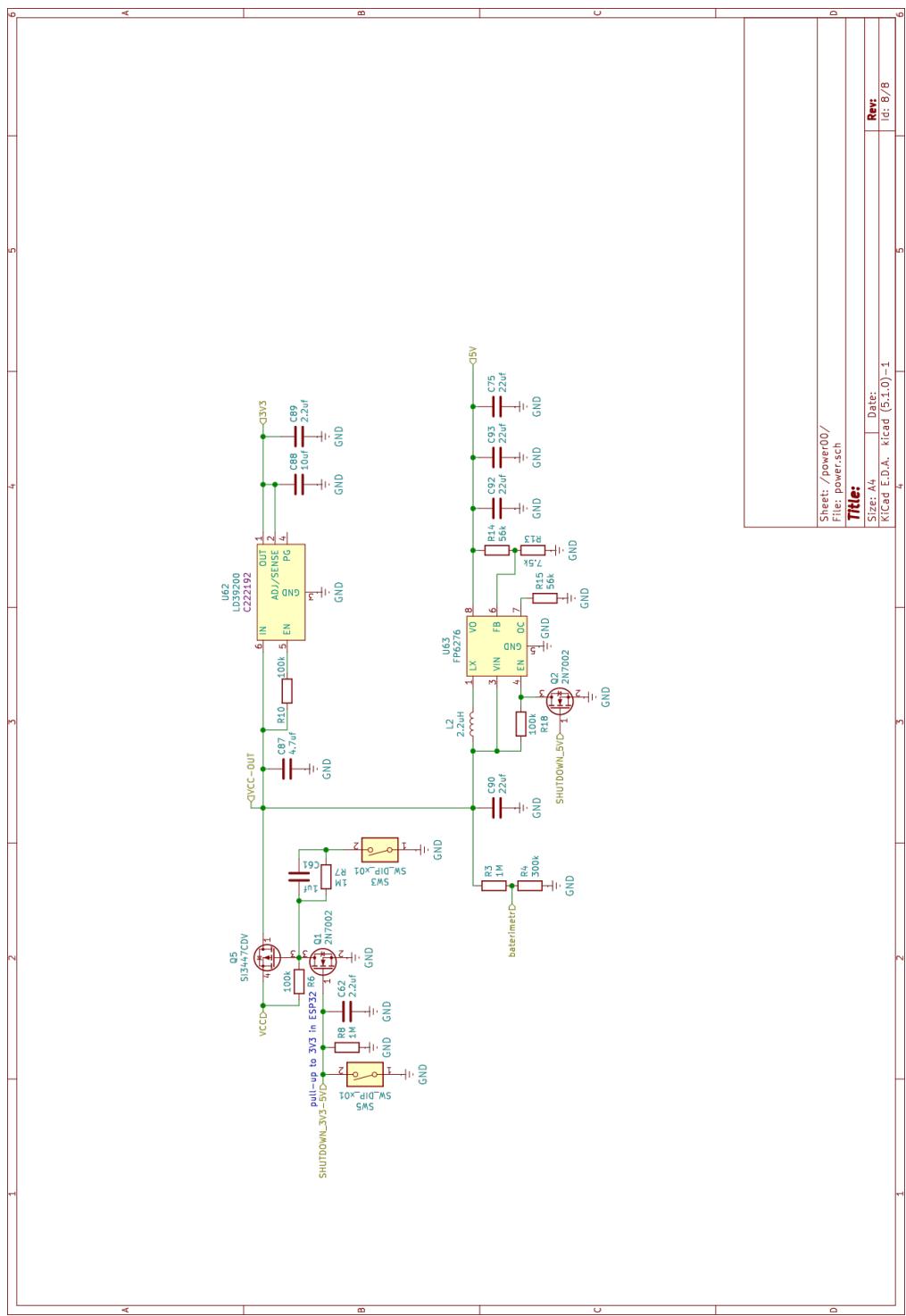


Obrázek A.10: Vzhled hlavní desky

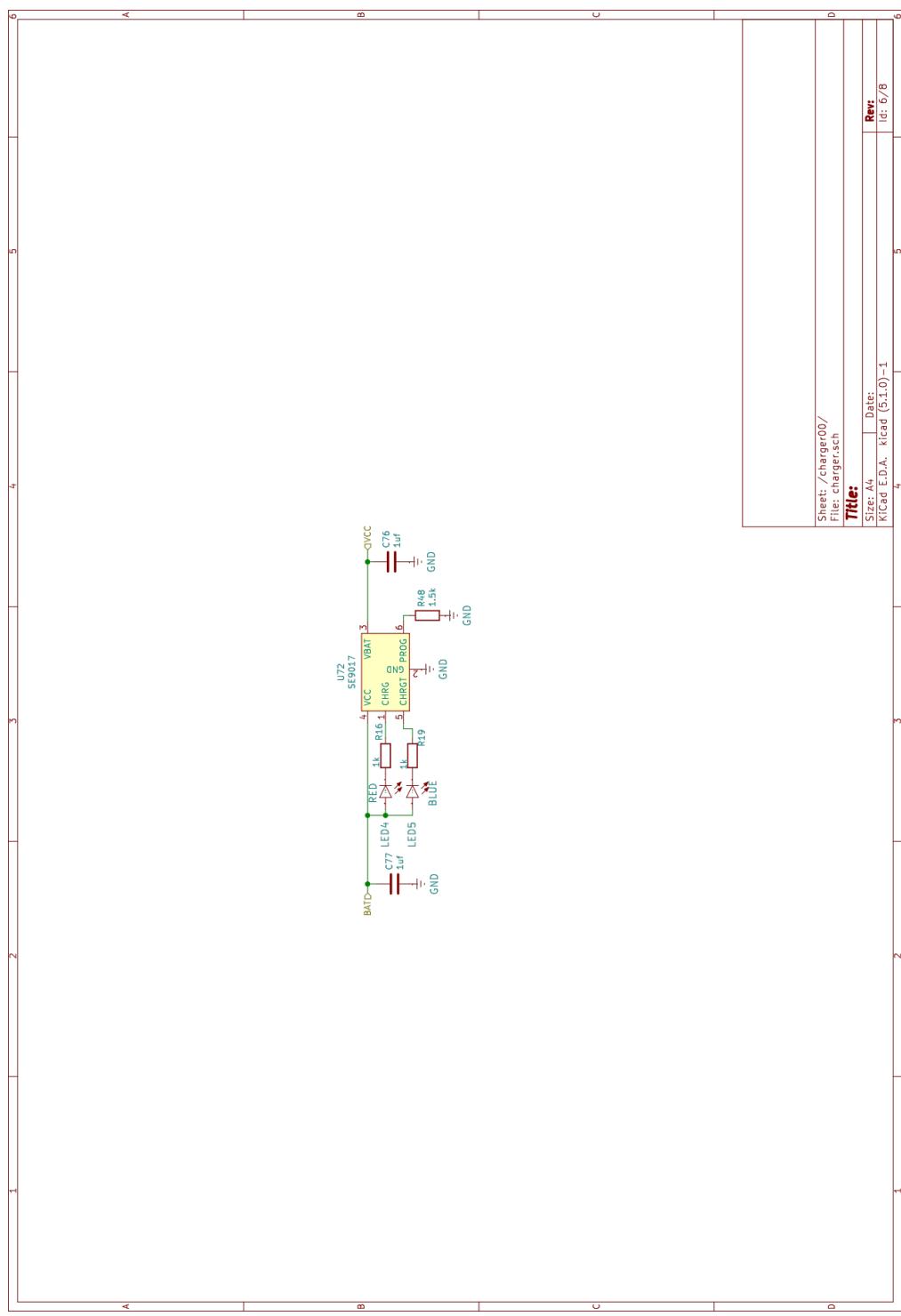
A.6 Schémata



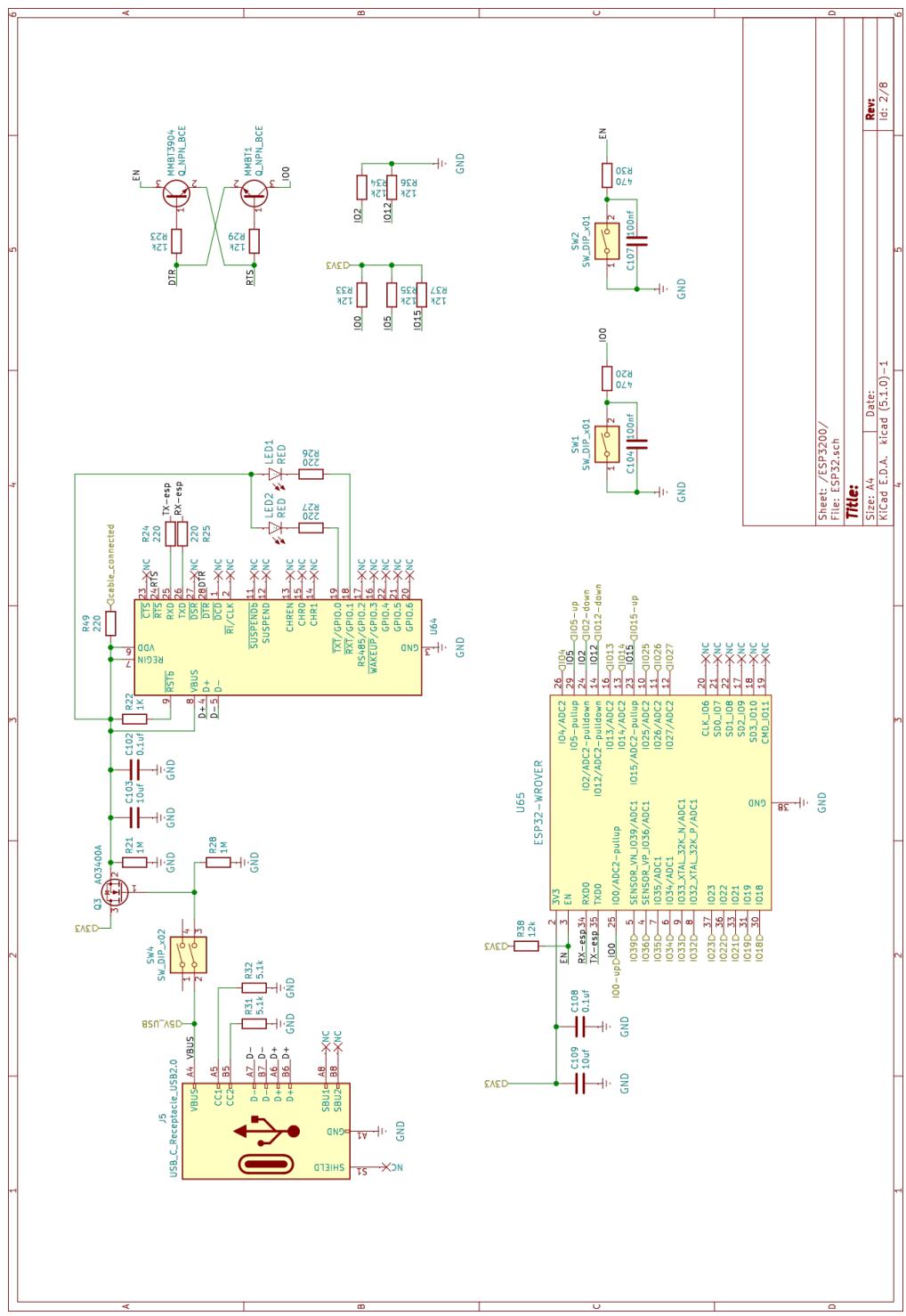
Obrázek A.11: Propojení jednotlivých systémů – schéma



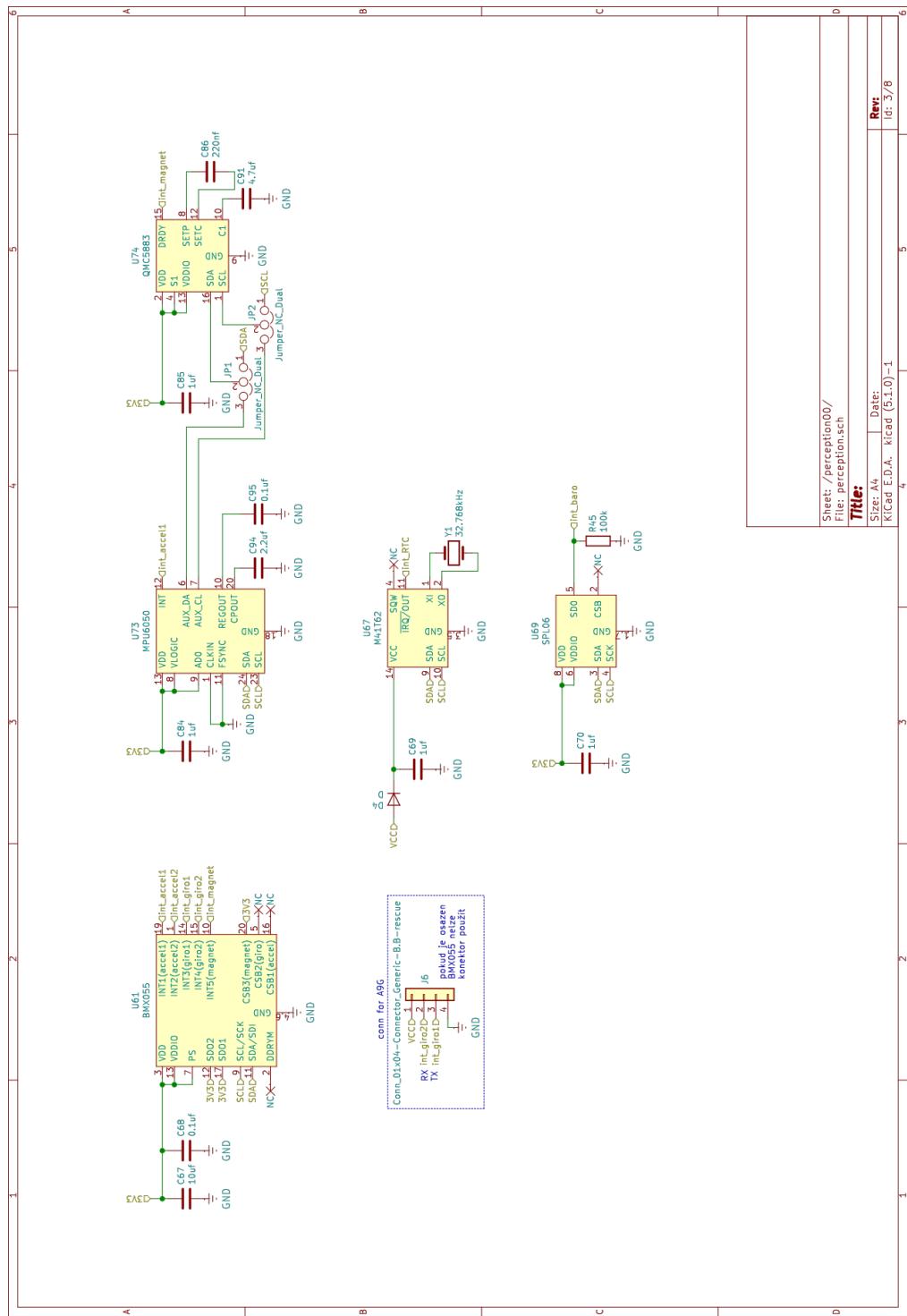
Obrázek A.12: Zapojení zdroje – schéma



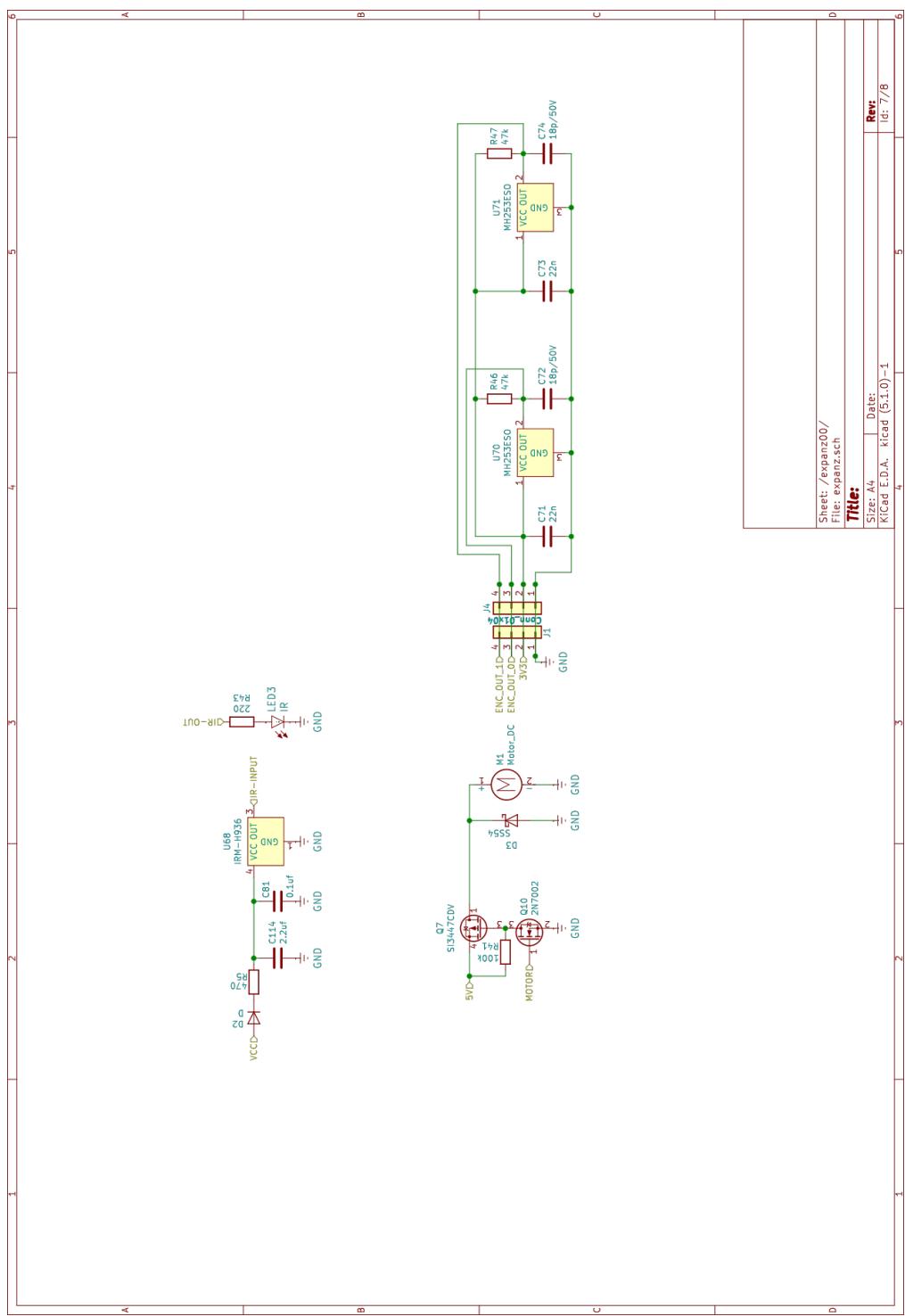
Obrázek A.13: Zapojení nabíjecího obvodu – schéma



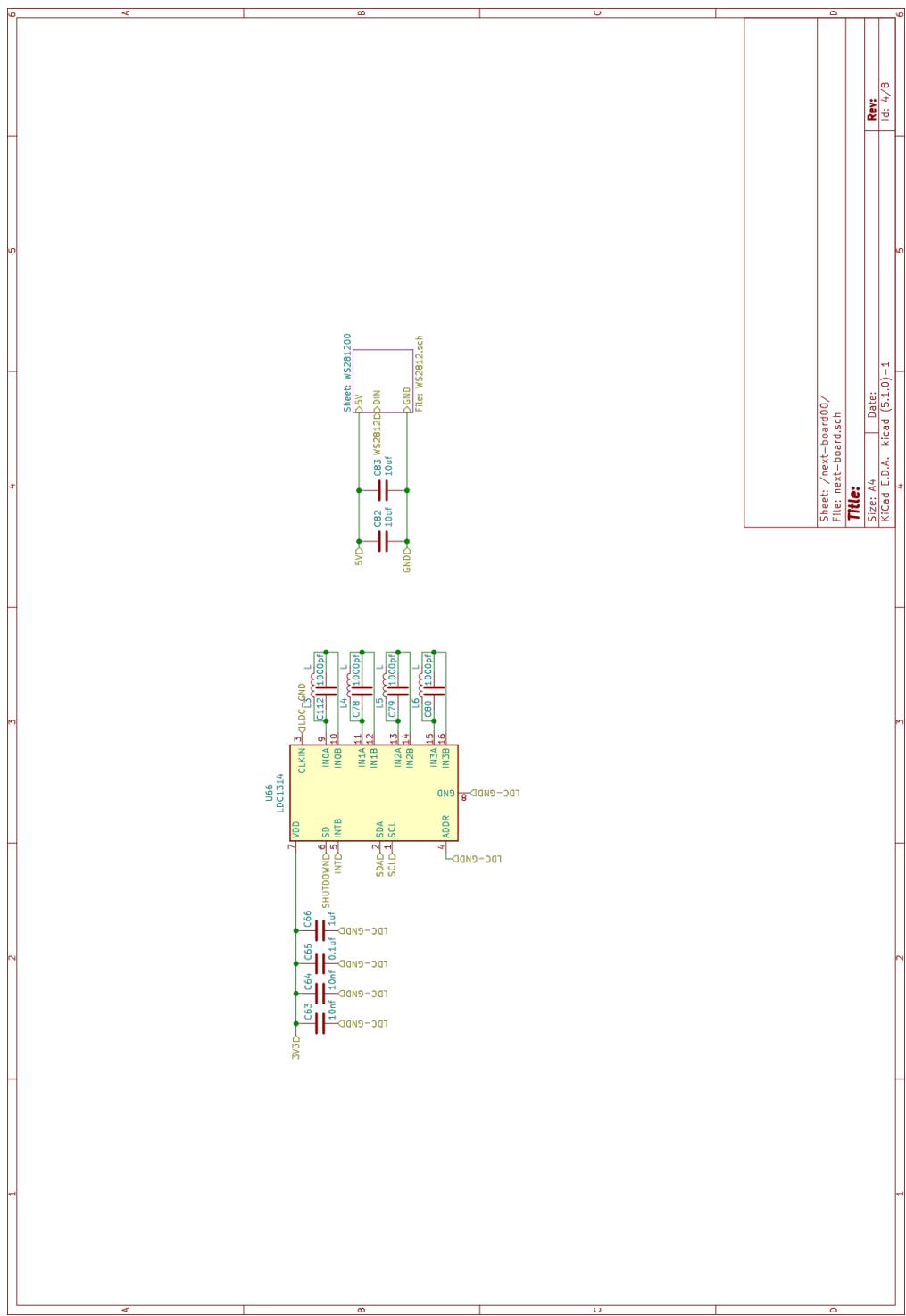
Obrázek A.14: Zapojení ESP32 a programátoru – schéma



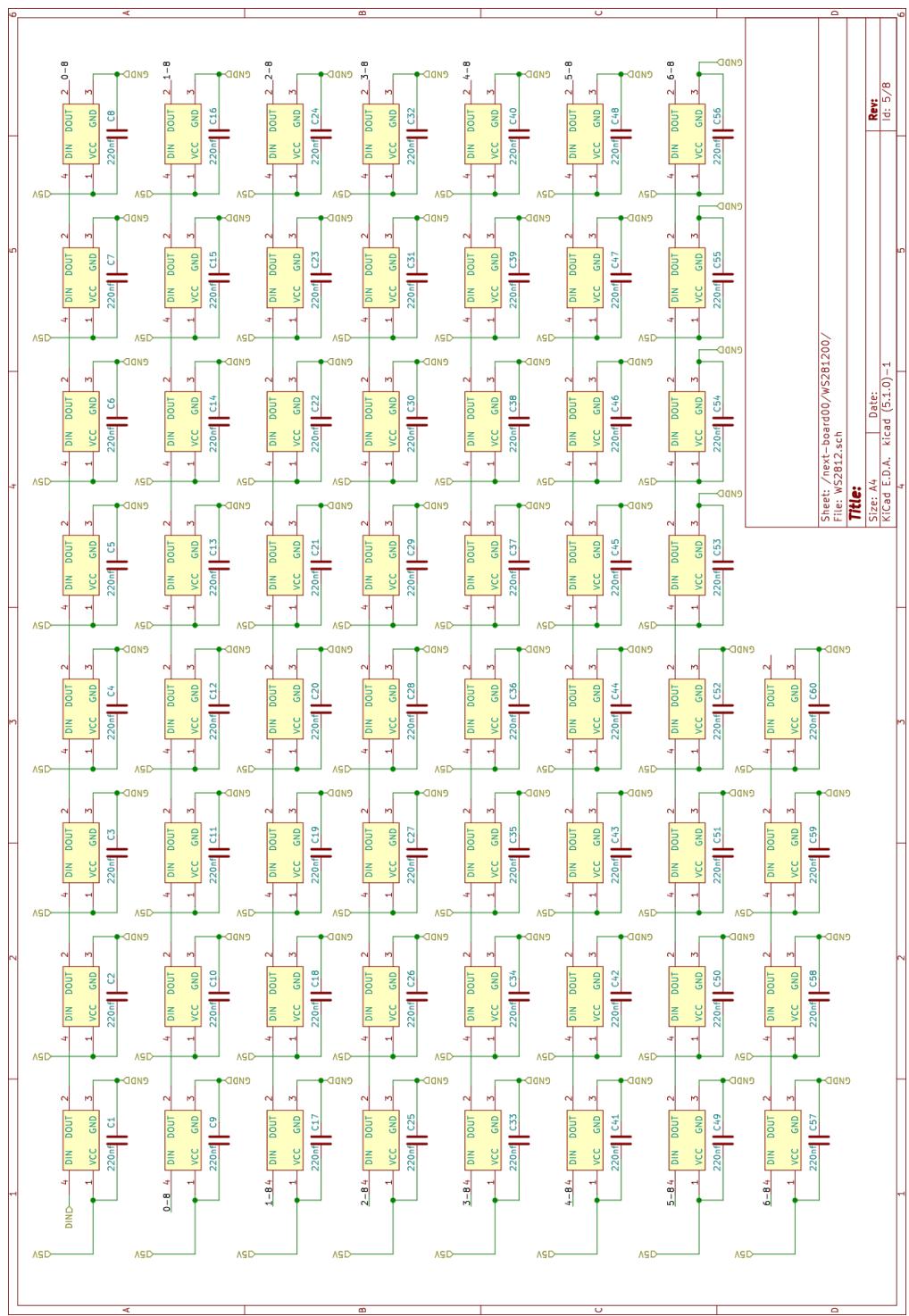
Obrázek A.15: Zapojení senzorů BMX055, MPU6050, QMC5883, M41T62, SPL06 a a konektoru pro A9G – schéma



Obrázek A.16: Zapojení IR komunikace, motoru a enkodéru – schéma



Obrázek A.17: Zapojení LDC1614 – schéma



Obrázek A.18: Zapojení LED WS2812 na desce trezoru – schéma

Příloha B

Ostatní přílohy

Seznam obrázků

Bibliografie

Seznam tabulek