

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor: 10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

## BlackBox

Tomáš Vavrinec

Brno 2021

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

## BLACKBOX

## BLACKBOX

<b>AUTOR</b>	Tomáš Vavrinec
<b>ŠKOLA</b>	Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská, příspěvková organizace
<b>KRAJ</b>	Jihomoravský
<b>ŠKOLITEL</b>	Mgr. Miroslav Burda
<b>OBOR</b>	10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Brno 2021

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma *BlackBox* 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 znění.

V Brně dne: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Tomáš Vavrínek

## 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 \[35\]](#)), ale pokročilejším studentům již tento hardware nemusí stačit. Proto jsem navrhl nový systém, který má mnohem více možností a je zároveň i vhodný pro různé zážitkové akce.

BlackBox má k dispozici rozmanitou senzorku: gyroskop, akcelerometr, magnetický kompas, enkodér, barometr, RTC a velice zajímavá tlaková plocha. Dále také disponuje možností komunikace po IR, WiFi a bluetooth modulem, možností programování po USB-C a nebo i bezdrátově. V neposlední řadě je vybaven ojedinělým výstupním systémem ve formě světelného kruhu.

## 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 designed a new system that has many more options and is also suitable for various adventure events.

The BlackBox has a variety of sensors: gyroscope, accelerometer, magnetic compass, encoder, barometer, RTC and very interesting pressure area. It also has possibility of communication via IR, WiFi and bluetooth module, possibility of programming via USB-C or even wirelessly. Last but not least, it is equipped with a unique output system in the form of a light circle.

## **Keywords**

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

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Cíle práce</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Vývoj</b>	<b>12</b>
3.1	První verze . . . . .	12
3.2	Druhá verze . . . . .	13
3.3	Třetí verze . . . . .	14
3.4	Čtvrtá verze . . . . .	15
3.4.1	Rozšíření elektroniky . . . . .	15
3.4.2	Princip zamykání . . . . .	16
3.4.3	Ovládání . . . . .	16
3.4.4	Napájení . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Mechanický trezor</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Elektronický trezor</b>	<b>18</b>
5.1	Přehled . . . . .	18
5.2	Napájení . . . . .	20
5.3	Nabíjení . . . . .	25
5.4	ESP32 a jeho programátor . . . . .	26
5.5	Senzorika . . . . .	27
5.6	Ovládání západky a IR komunikace . . . . .	33
5.7	Mechanika tlakové desky . . . . .	35

5.8	Elektronika tlakové desky . . . . .	37
5.9	Zámek . . . . .	39
5.10	Úkosy . . . . .	40
5.11	LED kruh . . . . .	41
5.12	Výroba mechanických dílů . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Využití</b>	<b>43</b>
6.1	Použití trezoru . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>45</b>
<b>A</b>	<b>Zpráva od uživatelů BlackBoxu</b>	<b>49</b>
<b>B</b>	<b>Obrazová příloha</b>	<b>52</b>
B.1	Vzhled druhé elektronické varianty . . . . .	52
B.2	Vzhled třetí elektronické varianty . . . . .	53
B.3	Vzhled poslední mechanické varianty . . . . .	54
B.4	Kopyto na jednu část formy těla dveří . . . . .	55
B.5	Simulace pevnosti tlakové desky . . . . .	56
B.6	Obrázky DPS . . . . .	59
B.7	Schémata . . . . .	62
<b>C</b>	<b>Ostatní přílohy</b>	<b>70</b>
C.1	Seznam tabulek . . . . .	70
C.2	Literatura . . . . .	71
C.3	Seznam obrázků . . . . .	76

# Kapitola 1

## Úvod

Na konci července roku 2019 jsem dostal za úkol navrhnout výrobek pro děti na příměstský tábor pobočky DDM Helceletova Brno, [Robotárny](#) [37]. 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 výrobku. Proto jsem začal vyvíjet elektronický trezor. Postup vývoje trezoru je popsán v kapitole 3.

Z původní vize trezoru se ale rychle vyvinulo poměrně univerzální elektronické zařízení, kterému zůstala schopnost sloužit jako trezor. Také využití se rozšířilo – přibyly nové funkce a hlavním cílem už není pouze trezor s dětmi stavět a programovat, ale také ho využívat jako herní prvek při táborových i jiných hrách. I proto jsme zařízení přestali nazývat trezor a přejmenovali jej na BlackBox.

BlackBox 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 BlackBoxu je v kapitole 5.

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

# Kapitola 2

## Cíle práce

Na základě dosavadních zkušeností získaných v průběhu předchozího vývoje, testování raných verzí BlackBoxu a na základě požadovaných schopností BlackBoxu byly stanoveny následující požadavky na jeho elektroniku (seřazené podle důležitosti):

- Zámek  
pro možnost zamykání menších předmětů
- LED kruh  
pro možnost zobrazování libovolných výstupů
- Tlaková plocha  
jakožto hlavní ovládací prvek BlackBoxu
- Wifi  
pro připojení k internetu, vytváření webových serverů atd.
- Bluetooth  
pro jednodušší bezdrátovou komunikaci
- Gyroskop  
pro možnost měření změny náklonu, např. u pohybových gest

- Akcelerometr  
pro možnost měření zrychlení, např. u pohybových gest
- Magnetický kompas  
pro možnost určení světových stran
- RTC (hodiny reálného času)  
pro znalost skutečného času i při vypnutí zařízení
- Programátor s možností zákazu programování  
pro možnost zakázat přeprogramování ve chvíli, kdy není povoleno
- Barometr  
pro možnost určování nadmořské výšky
- Nabíječka  
aby uživatel nemusel měnit baterie, ale jen připojil kabel
- GPS  
pro znalost své polohy, například pro možnost navigace nebo detekce několika metrových až mnohakilometrových gest
- GPRS  
pro možnost přijímání SMS, připojení na internet přes mobilní síť atd.
- IR komunikace  
pro jednoznačnou identifikaci BlackBoxu

# Kapitola 3

## Vývoj

### 3.1 První verze

Dal jsem se tedy do návrhu trezoru. Pochopitelně ne nějaké nedobytné pevnosti, ale malé krabičky,<sup>1</sup> na které se dají ukazovat základy programování.

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

Jako základ pro elektroniku jsem použil univerzální desku [ALKS](#)<sup>2</sup> [33], kterých jsem měl dostatečnou zásobu. Ovládací prvky,<sup>3</sup> jsem umístil na horní stranu trezoru. ALKS má v původní variantě tři tlačítka. Já jsem však jedno musel pomoci 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.

---

<sup>1</sup>128x128mm

<sup>2</sup>Arduino Learning Kit Starter

<sup>3</sup>dvě tlačítka, dva potenciometry a tři barevné LED



## 3.2 Druhá verze

Druhá elektronická verze trezoru (označení E2) už byla vybavená signalizačním kruhem o dvanácti LED kolem uprostřed dveří umístěného enkodéru. Jako základ trezoru jsem použil, tehdy nový, první mechanický trezor a doplnil jej o servo, řídicí 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 popisuji, je jen konkrétní možnost, kterou jsem použil.

Vzhled tohoto trezoru najdete na obrázku [obr. [B.1](#)/str. [52](#)].

### 3.3 Třetí verze

Třetí verze (E3) do značné míry vycházela z předchozí verze a dále na ní stavěla. Asi nejvýraznější změna bylo navýšení počtu LED z dvanácti (hodiny) na šedesát (minuty), což pochopitelně znamenalo i zvětšení kruhu. Na desku se ale přidaly i nové funkcionality, a to gyroskop,<sup>4</sup> akcelerometr,<sup>5</sup> magnetický kompas,<sup>6</sup> RTC<sup>7</sup> a GPS.<sup>8</sup> Také jsem použil, po vzoru mechanického trezoru, rotační západku, což znamenalo, že na stejný trezor se daly použít jak mechanické tak elektronické dveře.

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

Tato verze měla dvě varianty, které se lišily motorem. Motor vlevo na obrázku [obr. 3.1/str. 14] byl použit na dřívější verzi a později jsem jen vyměnil za motor napravo, díky čemuž jsem dveře mohl udělat tenčí.



Obrázek 3.1: Fotografie obou testovaných motorů

<sup>4</sup>pro možnost znalosti náklonu zařízení

<sup>5</sup>pro znalost směru a velikosti zrychlování

<sup>6</sup>pro určení světových stran

<sup>7</sup>Real Time Clock, hodiny reálného času, pro znalost přesného času

<sup>8</sup>pro možnost určení svojí polohy

## 3.4 Čtvrtá verze

### 3.4.1 Rozšíření elektroniky

Čtvrtá verze (E4) byla co se elektroniky týče přímým pokračováním předchozí verze 3.3, kterou dále rozšiřuje. Trezor získal oproti minulé verzi schopnost komunikace pomocí IR z důvodu identifikace různých dveří, dále získal magnetický enkodér, pro možnost snazšího ovládní 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.



Obrázek 3.2: Rendery dveří trezoru E4 – vlevo přední pohled, vpravo zadní pohled

Podstatnou změnou také bylo rozdělení elektroniky do dvou různých desek, protože na jedné by nebyl dostatek místa. Jedna deska [obr. B.18/str. 68], [obr. B.10/str. 60] tak obsahuje kruh LED [24] a čip LDC1614 [25] nebo LDC1314 se čtyřmi cívkami, které měří vzdálenost tlakové desky. Na druhé desce je vše ostatní, tedy procesor [12], akcelerometr s gyroskopem [15], [26], magnetický kompas [15], [27], RTC [16], barometr [19], IR vysílač [21] a přijímač [20], magnetický enkodér [23] [29], programátor [9], řešení napájení, řízení motoru a nabíječka [7].

### 3.4.2 Princip zamykání

Na trezoru se dále změnilo princip zamykání a ovládání.

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

Zamykání je založeno na mechanismu 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 dovřeny).

### 3.4.3 Ovládání

Předchozí varianty měly jako hlavní ovládací prvek enkodér s tlačítkem, ten jsem v nynější variantě odstranil, aby přední stěna neměla tak velký výstupek. I proto jsem tento prvek nahradil indukční tlakovou deskou (viz kapitola 5.8), která vyplnila vnitřek kruhu LED (viz kapitola 5.11). Zbytek ovládání víceméně přetrval, jen kvůli nedostatku času a pandemií způsobenému nedostatku součástek trezor přišel o GPS.<sup>9</sup> Na druhou stranu ale získal barometr s rozlišením schopným detekovat změnu výšky o půl metru.

### 3.4.4 Napájení

Předchozí verzím sloužila jako napájení powerbanka. Ta však kladla poměrně 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 [6], [obr. 5.4/str. 22], který spíná napětí z 3,5 V až 4,2 V na 5 V, a původně stepdown, později lineární stabilizátor [obr. 5.5/str. 23], který poskytuje 3,3 V. BlackBox také dostal vlastní nabíječku, aby pro nabíjení baterií stačilo připojit kabel, stejně jako třeba u mobilu.

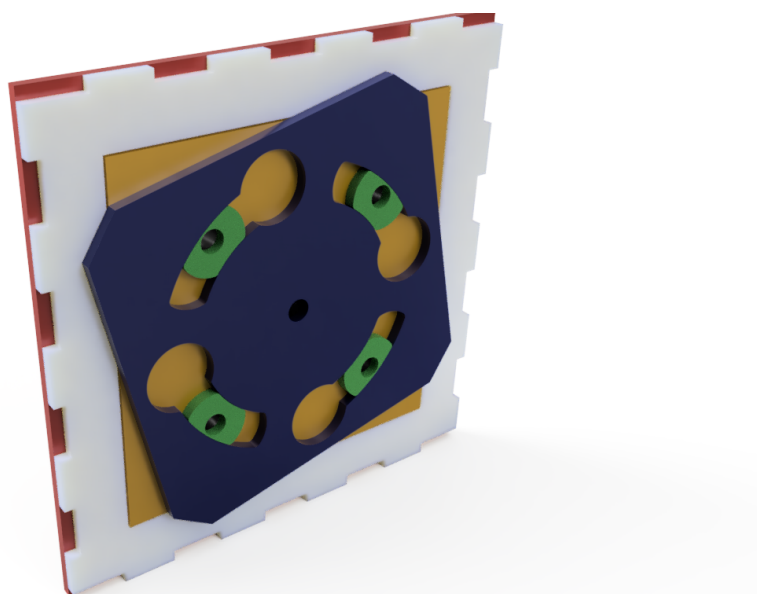
---

<sup>9</sup>deska má ale stále možnost připojení GPS pomocí konektoru

# Kapitola 4

## Mechanický trezor

Vedle elektronické varianty jsem navrhl i variantu čistě mechanickou, abych měl jednodušší a levnější trezor pro mladší účastníky táborů a jiných akcí. Mechanická varianta měla opět několik vývojových verzí. Jednotlivé verze a jejich vlastnosti jsou popsány v samostatné příloze. V přílohách jsou také přiloženy výkresy poslední mechanické verze. Pro představu je v příloze tohoto souboru uveden obrázek poslední mechanické verze [B.3](#).



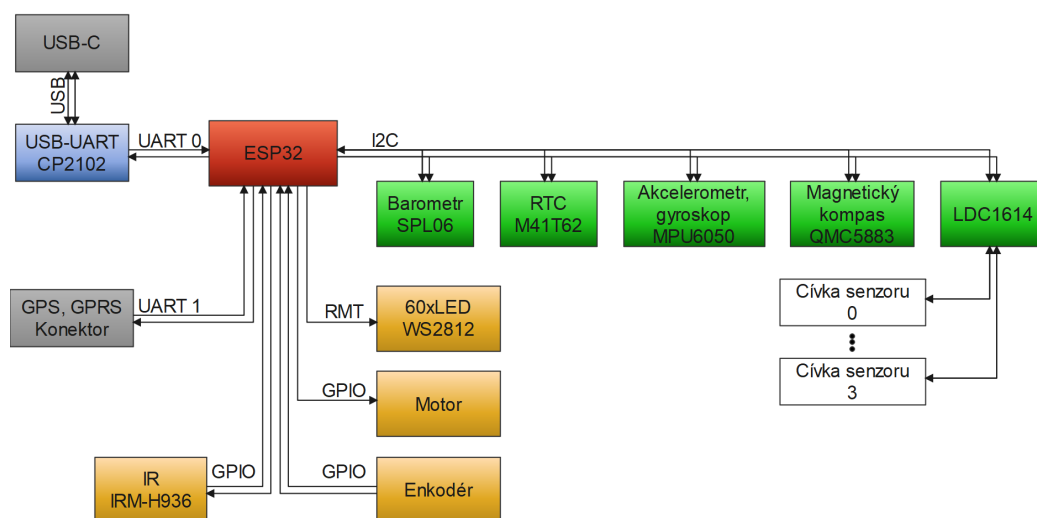
Obrázek 4.1: Vzhled mechanismu zamykání u mechanické verze

# Kapitola 5

## Elektronický trezor

### 5.1 Přehled

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



Obrázek 5.1: Blokové schéma logických částí BlackBoxu

Elektronika je vybavena čipem ESP32 [12], [11], který obsahuje dva procesory Xtensa LX6, WiFi a bluetooth. Dále je trezor vybaven čipem BMX055 [15] nebo dvojicí čipů MPU6050 [26] a QMC5883 [27], které poskytují gyroskop, akcelerometr a magnetický kompas. Dále je zde SPL06 [19], barometr

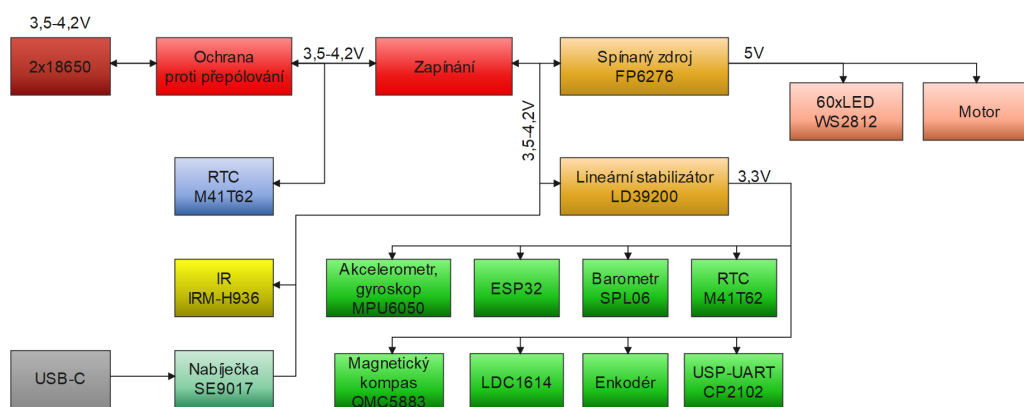
s rozlišením 0,06 hPa, který umožňuje rozeznat změnu nadmořské výšky o polovinu metru. Další systém trezoru je možnost IR komunikace, která je zde pro možnost jednoznačné identifikace dveří, ale pochopitelně může sloužit i pro jiný účel. Deska je také vybavena RTC a má vlastní programátor pro usnadnění programování. Vedle ESP32 je zde asi nejvýznamnějším čipem LDC1614 [25], případně LDC1314, který umožňuje funkci tlakové plochy (viz kapitoly 5.7, 5.8).

čip	popis	poznámky
ESP32	dve jádra Xtensa LX6, WiFi a bluetooth	
BMX055	gyroskop, akcelerometr, magnetický kompas	možno nahradit dvojicí čipů MPU6050 a QMC5883
SPL06	barometr	rozlišení až 0,06 hPa
IRM-H936 a IR led	IR komunikace	
LDC1614	snímání tlakové desky	počítá se s možnou záměnou za LDC1314
CP2102	programátor	s hardwarově zajištěným odpojováním napájení

Tabulka 5.1: Shrnutí elektronického vybavení

## 5.2 Napájení

Jako napájení celého trezoru slouží dvě li-on baterie 18650 každá o uváděné kapacitě 3400 mAh. Dva tyto články tak poskytují BlackBoxu dostatek energie na 32 hodin provozu se spuštěným světelným kruhem v módu DarkMode 5.11. Napětí článků však nevyhovuje potřebám trezoru, a tak je na trezoru lineární stabilizátor NCP708 [28], který zajišťuje napětí 3,3 V pro většinu systému. Kromě LD39200 je zde také step-up FP6276 [6], který zajišťuje napájení 5 V sloužící primárně pro LED WS2812 a v druhé řadě napájí motor zámku. Zapojení stabilizátoru a step-upu je přiloženo na obrázku v příloze [obr. B.13/str. 63].

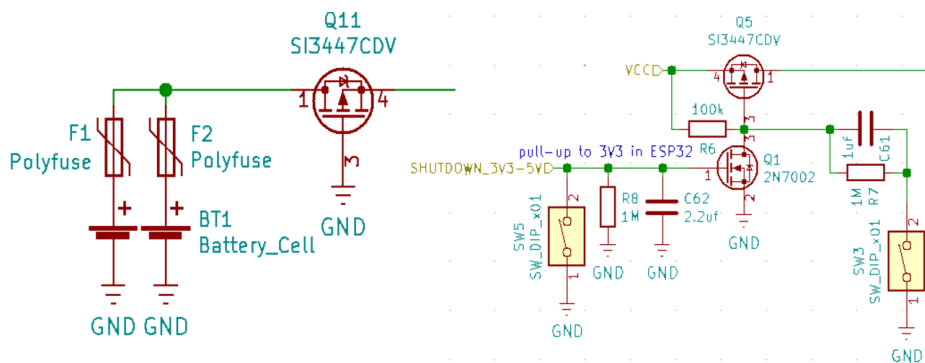


Obrázek 5.2: Blokové schéma rozvržení napájení



**Zapínání** Aby se trezor mohl vypnout a tak šetřit energii, je vybaven obvodem, který to umožňuje [obr. 5.3/str. 21].

Při připojení článků se napětí dostane nejprve na PTC<sup>1</sup> [1], které slouží jako ochrana proti nadproudu, například v případě, kdy uživatel připojí dva různě nabitě články nebo jeden z nich přepóluje. Pokud se proud dostane skrz PTC, dostane se na tranzistor Q11 [2], skrz který projde, jen pokud jsou články správně pólovány. Když se napětí dostane přes ochranu proti přepólování, dostane se na vývod source tranzistoru Q5 [2], 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-up<sup>2</sup> 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 zapne. Pokud v takové chvíli procesor stáhne dráhu SHUTDOWN\_3V3-5V na GND, nebo dojde ke stisku SW5, opět se uzavře Q1 a skrz R6 projde na gate Q5 napětí, které Q5 uzavře a tak elektroniku opět vypne.



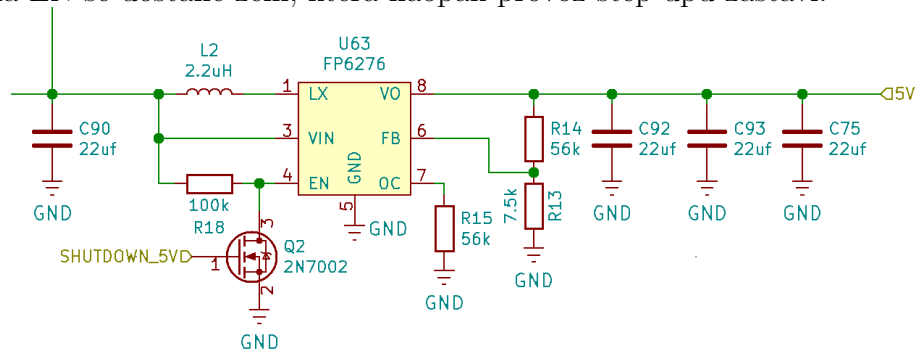
Obrázek 5.3: Ochrana proti přepólování a zapínání

<sup>1</sup>polymerová PTC, vratná pojistka

<sup>2</sup>Na obrázku [obr. 5.3/str. 21] vpravo je jen poznámka, reálná součástka je ve schématu společně s ESP32 na obrázku [obr. B.15/str. 65].

**Step-up vysvětlení funkce** Zapojení step-upu<sup>3</sup> je o něco složitější než zapojení stabilizátoru, 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 cívka připne mezi napájení a zem, začne skrz ní tést prod. V okamžiku, kdy se pak jedna strana cívky odpojí od zdroje, musí se stále tekoucí proud kompenzovat změnou napětí. Takže ve chvíli, kdy se cívka odpojí od záporného pólu vzroste na této straně cívky napětí. Jak moc napětí stoupne se pak odvíjí od velikosti proudu, který skrz cívku před odpojením tekl.

**Step-up zapojení na desce trezoru** Pro ovládání spínání step-upu jsem zvolil FP6276. Tento obvod jsem si vybral, protože mi vyhovoval jak po stránce napětí, tak po stránce efektivity a ceny a zároveň byl v nabídce firmy JLCPCB.<sup>4</sup> Obvod jsem z většiny zapojil dle doporučení výrobce, mojí prací bylo vlastně jen správně určit hodnoty jednotlivých součástí. Na ovládání pinu EN, který FP6276 vypíná, jsem připojil pull-up k napájení a pro možnost step-up vypnout tranzistor Q2 [3]. 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.

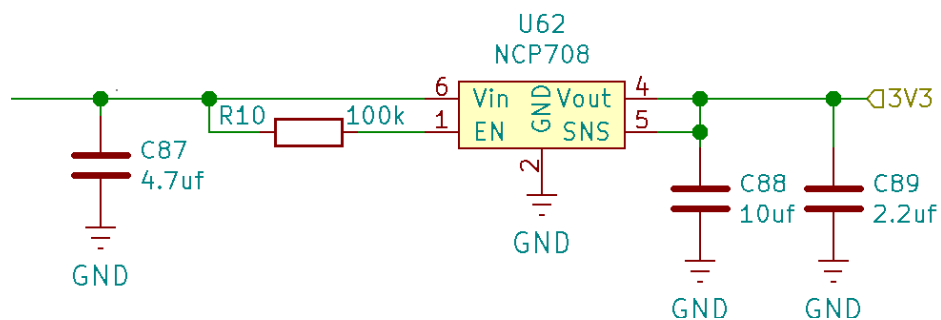


Obrázek 5.4: Zapojení step-upu

<sup>3</sup>Spínaný zdroj, který spíná vstupní napětí na vyšší napětí.

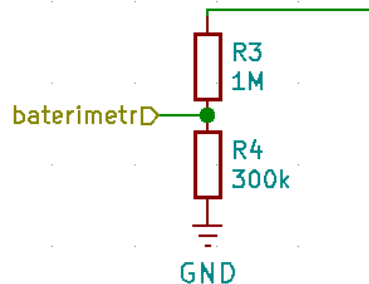
<sup>4</sup>Firma, u které jsem desky vyráběl a osazoval.

**Stabilizátor** Stabilizátor LD39200 [28] má pin EN, který slouží k jeho vypínání. Pokud je na něm logická 0, je stabilizátor vypnut a pokud 1, je zapnut. Vzhledem k tomu, že v mém zapojení toto vypínání 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 5.5: Zapojení stabilizátoru

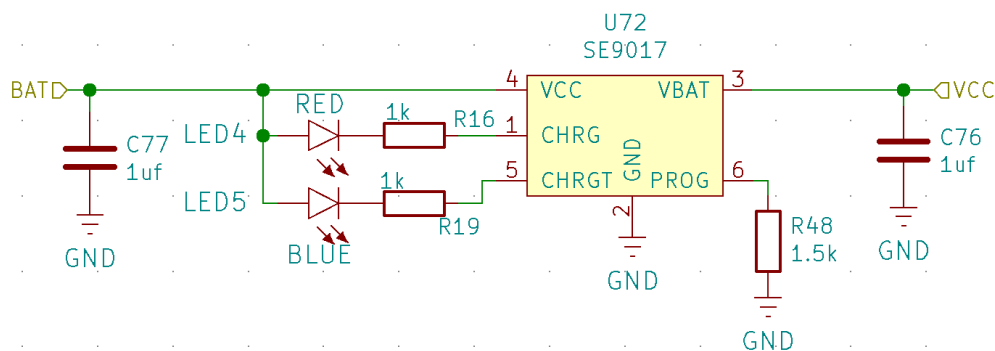
**Měření napětí baterií** Aby trezor mohl zjistit, že má vybité baterie, musí mít možnost jim měřit napětí. ESP32 obsahuje AD převodník, takže není problém měřit napětí baterie i poměrně přesně. Kde však problem nastává, je maximální napětí, které je schopen měřit, a to 1,1 V. ESP32 má možnost připojit 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 M $\Omega$  a druhého 300 k $\Omega$ , takže při plně nabitých bateriích bude na výstupu děliče 0,97 V.



Obrázek 5.6: Měření napětí baterií

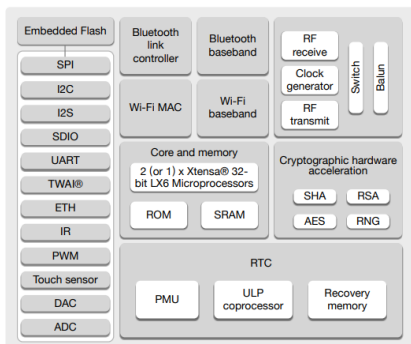
## 5.3 Nabíjení

Aby se dveře trezoru nemusely pokaždé rozebírat kvůli nabíjení, je deska vybavena lineární nabíječkou SE9017 [7]. Tento nabíjecí obvod jsem zvolil z nabídky JLCPCB [36] kvůli volitelnému nabíjecímu proudu, který jsem pomocí R48 [obr. 5.7/str. 25] stanovil na 700 mA, a také kvůli malému pouzdru a nízké ceně. Pro signalizaci, zda je baterie dobíta, 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 dobíta, svítí LED5, která svítí modře.



Obrázek 5.7: Zapojení nabíječky

## 5.4 ESP32 a jeho programátor



Obrázek 5.8: Zapínání a ochrana proti přepólování

Mozkem celého trezoru je čip [ESP32-wrover](#) [11]. Obsahuje dva dvařicetibitové procesory Xtensa LX6 taktované až na 240Mhz. ESP32 [12] 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 PSRAM<sup>5</sup> o velikosti 32 Mbit, [ESP-PSRAM32](#) [14].

Kompletní zapojení je na obrázku [obr. [B.15](#)/str. 65].

ESP32 také vyžaduje mít při startu definované úrovně na některých pinch, proto jsou zde čtyři pull-upy<sup>6</sup> a dva pull-downy,<sup>7</sup> které definují výchozí stav pinů IO0, IO2, IO5, IO12, IO15 a EN [12].

<b>IO0</b>	ovládá boot procesoru	LOW při resetu ESP vstupuje do bootloderu
<b>IO2</b>	potvrzení pro spuštění bootu	LOW potvrzuje
<b>IO5</b>	nastavuje vzorkování SPI	využívám HIGH
<b>IO12</b>	určuje napětí komunikace s flash	LOW znamená napětí 3,3 V a HIGH 1,8 V
<b>IO15</b>	ovládá zprávy bootloderu do UART	LOW zprávy vypíná a HIGH zapíná
<b>EN</b>	reset pin	LOW ESP je drženo v resetu

Tabulka 5.2: Popis funkce pinů

<sup>5</sup>Pseudo Static RAM

<sup>6</sup>Rezistor je připojen mezi dráhu a napájení.

<sup>7</sup>Rezistor je připojen mezi dráhu a zem.

## Programátor

Aby mohl uživatel trezor jednoduše naprogramovat, je na desce převodník USB-UART, [CP2102](#) [9]. 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 s DIP switchem SW4 využit pro možnost zákazu programování, viz obrázek [obr. [B.15](#)/str. [65](#)].

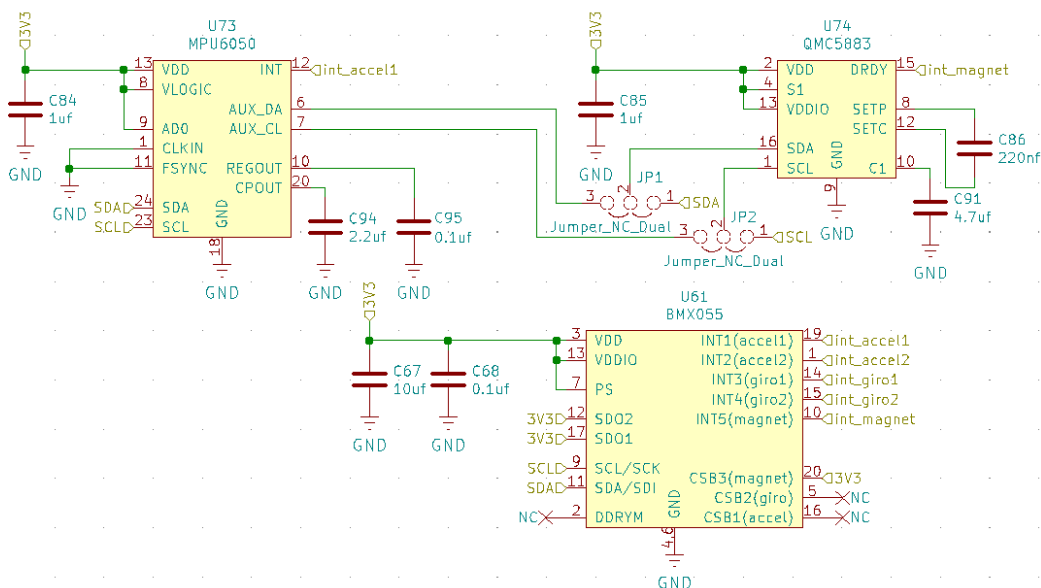
## 5.5 Senzorika

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 ovládní 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. [B.16](#)/str. [66](#)] 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. [B.16](#)/str. [66](#)]. To je užitečné, protože komunikaci na I2C řídí ESP32. Pokud se tedy ESP32 nerozhodne zeptat se jiného čipu na jím naměřená 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** [15], protože však tento čip nebyl jednoduše dostupný, přidal jsem na další verzi i čip **MPU6050** [26], který obsahuje akcelerometr a gyroskop a čip **QMC5883** [27], 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 5.9: Zapojení čipů BMX055, MPU6050 a QMC5883

**Akcelerometr** U čipu BMX055 akcelerometr disponuje rozlišením  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$  neboli  $0,097\text{mg}$  při rozsahu měření  $\pm 2g$ . Jeho rozsah se ale dá nastavit, a to na  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$ , podle rozsahu se také mění přesnost



měření. Přesnost je totiž omezena velikostí dvanáctibitového registru, do kterého se ukládají informace, a při využívání většího rozsahu měření už tento registr není dostatečně velký, aby uchovával stejnou přesnost.

MPU6050 má vedle BMX u akcelerometru stejné rozsahy měření, disponuje však šestnáctibitovými registry, a tak je sto dosáhnout i větší přesnosti. Jeho maximální rozlišení je tak  $60\mu g$ . Výměnou čipu BMX055 za čip MPU6050 jsem si tak polepšil i po straně přesnosti, přesto, že tuto přesnost pravděpodobně nikdy BlackBox nevyužije.

**Gyroskop** U čipu BMX055 je gyroskop sto poskytovat informaci o úhlové rychlosti s rozlišením na  $0,004^\circ/s$ , opět ale záleží na rozsahu měření kvůli stále stejné velikosti dvanáctibitového registru. Můžete si u něj vybrat z rozsahu  $\pm 125^\circ/s$ ,  $\pm 250^\circ/s$ ,  $\pm 500^\circ/s$ ,  $\pm 1000^\circ/s$ ,  $\pm 2000^\circ/s$ .

Po přechodu na čip MPU6050 jsem si opět po polepšil po straně přesnosti, i u gyroskopu totiž disponuje šestnáctibitovými registry a rozsahy měření jsou opět stejné jako u BMX055.

**Magnetický kompas** Čip BMX055 je sto měřit sílu magnetického pole s přesností až na  $0,3\mu T$  v rozsahu  $\pm 1200\mu T$  u osy  $x$  a  $y$ , u osy  $z$  pak v rozsahu  $\pm 2500\mu T$ .

Magnetometr, který poskytuje čip QMC5883, pak měří v rozsahu  $\pm 8$  Gs, což pro srovnání odpovídá  $\pm 800\mu T$  a s přesností až 2 mGs opět pro srovnání to odpovídá  $\pm 0,2\mu T$ . Na rozdíl od BMX055 se u QMC5883 dá volit rozsah měření, a tak si můžete vybrat z  $\pm 2$  Gs a nebo ze zmíněných  $\pm 8$  Gs.

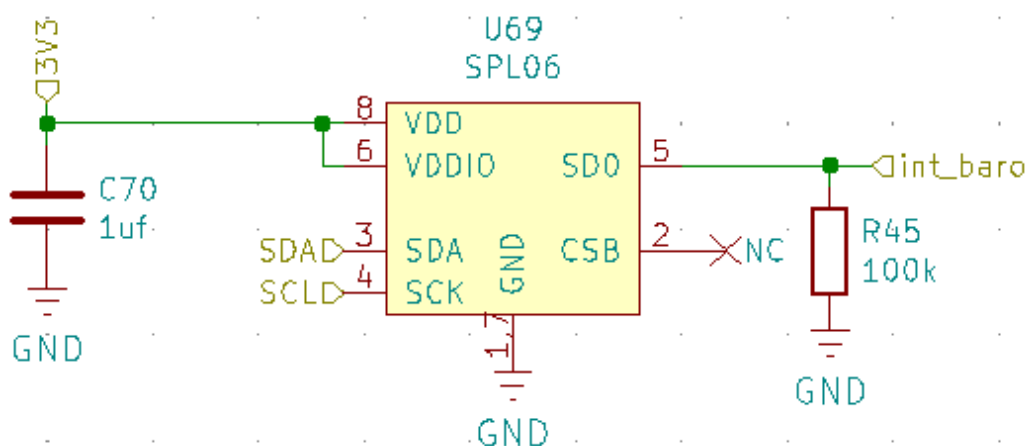
**Barometr, teploměr** Barometr poskytuje informaci o okolním atmosférickém tlaku. Tato informace může sloužit pro rozeznávání nadmořské výšky. BlackBox tak může sloužit i jako jednoduchá meteorologická stanice, s možností měření tlaku i teploty (viz dále).

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.

SPL06 je sto měřit tlak v rozsahu 950 až 1050 hPa s přesností na 0,06 hPa a je tak sto poznat změnu nadmořské výšky o 0,5 m.

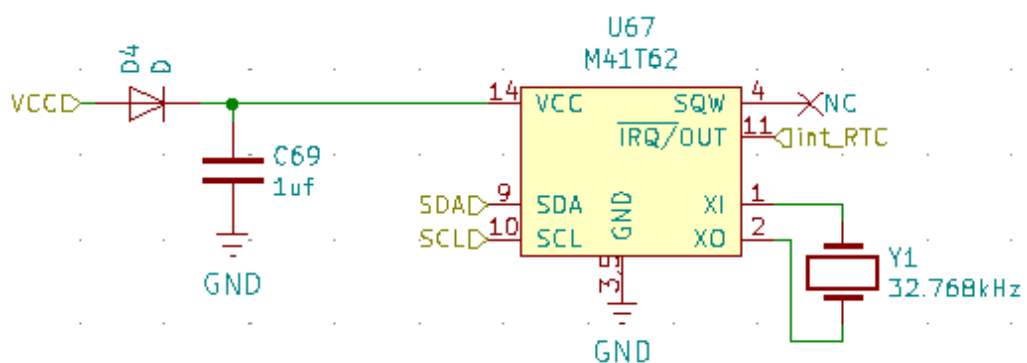
SPL06 má také vedle barometru i teploměr, který je sto měřit teplotu od -40°C do 85°C s rozlišením na 0,01°C.



Obrázek 5.10: Zapojení čipu SPL06

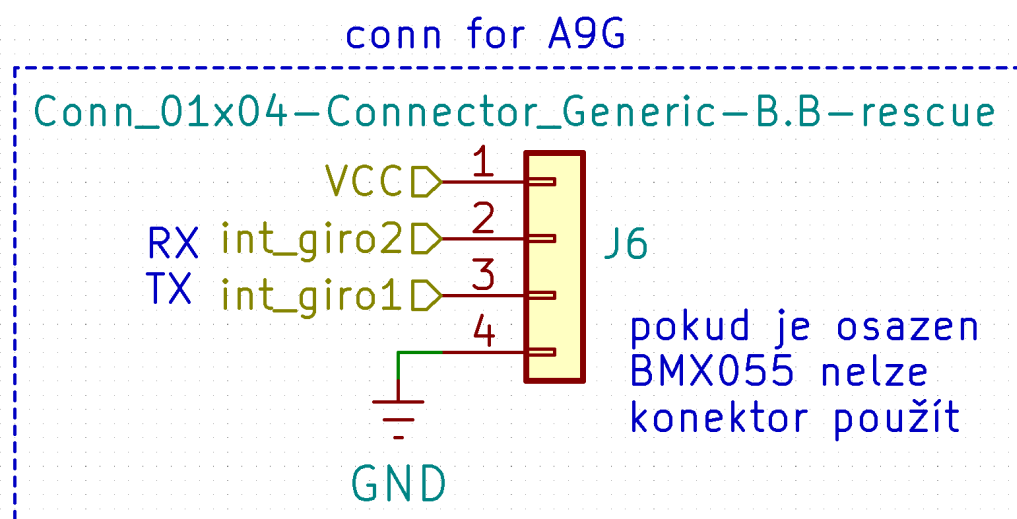
**RTC** Aby si trezor mohl zachovávat povědomí o aktuálním čase i ve chvíli, kdy je vypnut, má k dispozici čip **M41T62** [16].

RTC je napájeno přímo z baterie, hned za ochranou proti přepólování, aby bylo schopný uchovávat čas i ve vypnutém stavu. Z toho důvodu jistě potěší nízká spotřeba 350 nA ve chvíli, kdy jen uchovává čas a 35  $\mu$ A ve chvíli, kdy je aktivní I2C. Maximální odchylka od skutečného času může být 5 s za měsíc provozu.



Obrázek 5.11: 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 A9G<sup>8</sup> komunikuje po sběrnici UART, na rozdíl od ostatních čipů na desce. Pro UART však potřebuji dva piny a ty kolidují s piny přerušování čipu BMX055. Proto se konektor dá použít, jen pokud není osazen BMX055.



Obrázek 5.12: Zapojení konektoru pro A9G

<sup>8</sup>Čip využívám jako GPS a GPRS modul.

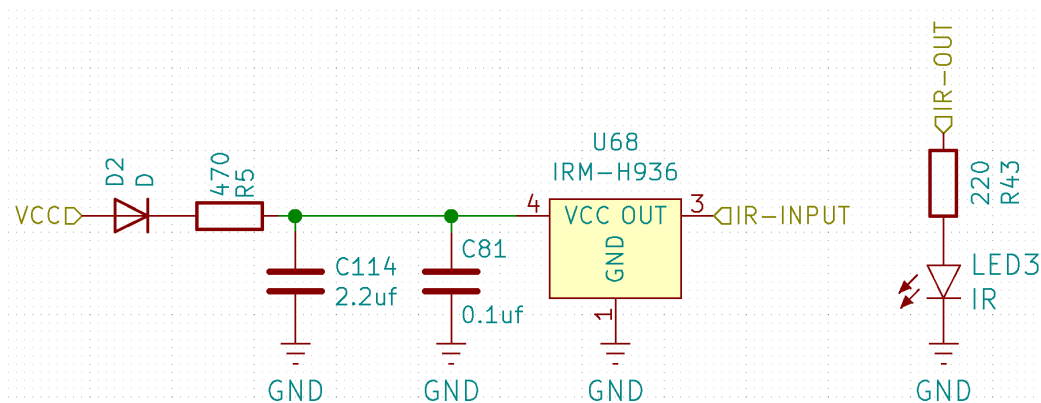
## 5.6 Ovládání západky a IR komunikace

Zapojení je dostupné na obrázku [obr. B.17/str. 67].

**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 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 [36] zvolil **IRM-H936** [20]. V nabídce JLCPCB byly v době nárhu 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.

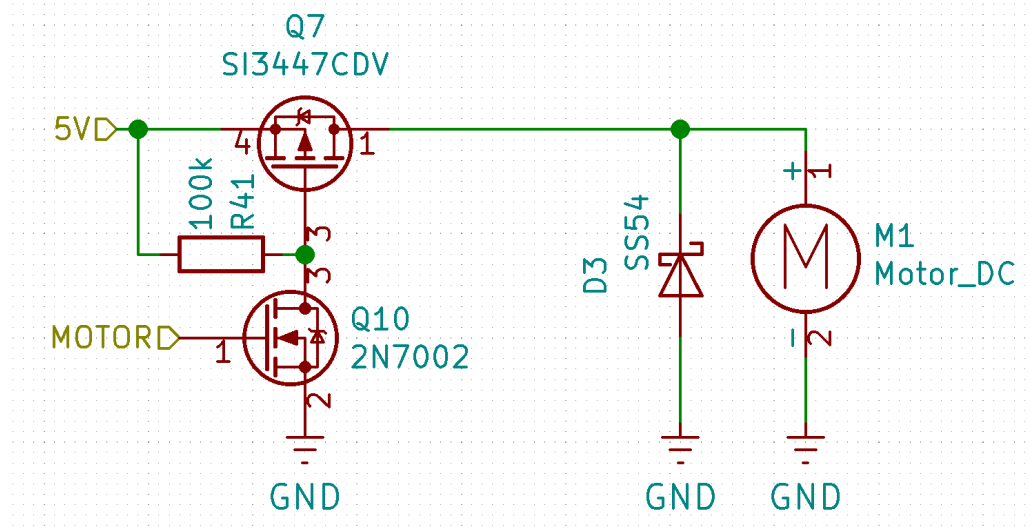
Druhou částí IR komunikace je vysílač, který je zajištěn jednoduše IR LED [21].



Obrázek 5.13: 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 rychlost motoru.<sup>9</sup> 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 rychlostí v závislosti na nabití baterií.



Obrázek 5.14: Zapojení řízení motoru

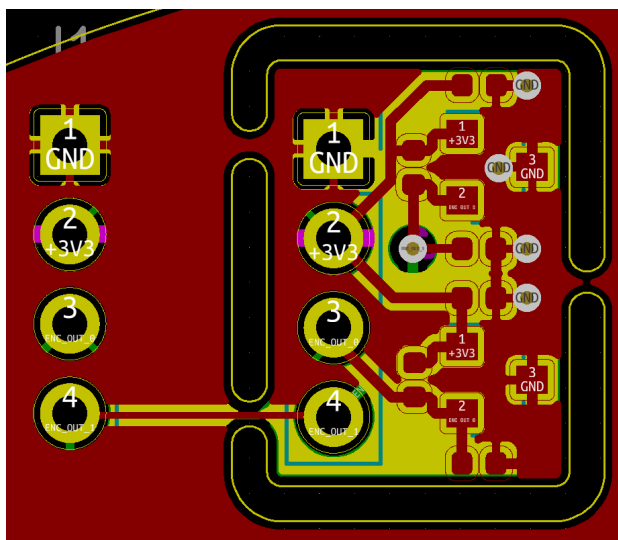
**Enkodér** Aby bylo možno motor polohovat do správné polohy, je nutné mít zpětnou vazbu o jeho poloze. Vzhledem k tomu, že motor otáčí magnetem, samo se nabízí využít magnetický enkodér. Proto jsou na desce dvě digitální Hallovy sondy SS360NT [29], které se překloupí podle toho, u jakého magnetického pólu se nachází.

<sup>9</sup>Otáčky motoru ale přesto mohu snížit dle potřeby.

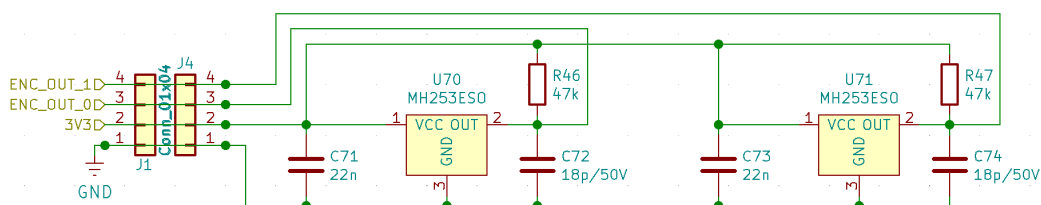
Na desce s LED kruhem by sondy musely být na opačné straně než LED, takže by se musely pájet ručně, protože JL-CPCB osazuje jen z jedné strany. Hlavní deska je ale zase, kvůli velikosti baterií, moc daleko od magnetu.

Abych tedy nemusel dělat třetí desku jen kvůli enkodéru, zvolil

jsem možnost vylomitelného enkodéru. Na hlavní desce jsem tedy nakreslil enkodér s konektorem a objedlal 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. B.11/str. 61].



Obrázek 5.15: Vzhled enkodéru na desce

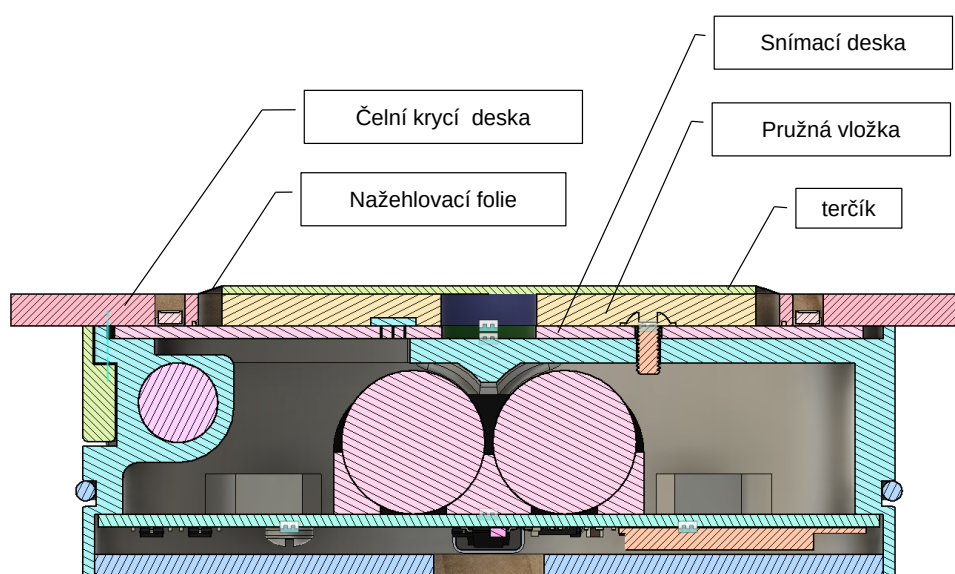


Obrázek 5.16: Zapojení enkodéru

## 5.7 Mechanika tlakové desky

Indukčně snímaná tlaková deska funguje díky čtyřem cívkám na desce plošných spojů, které mění svojí indukčnost podle vzdálenosti snímané desky, 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. Terčik je proto od snímací desky oddělen pružnou vložkou, která je zároveň předepnuta pomocí nažehlovací fólie, která kryje přední stranu dveří a spojuje terčik s čelní krycí deskou. Díky nažehlovací fólii je také přední část dveří voděodolná.



Obrázek 5.17: Řez varianty E4

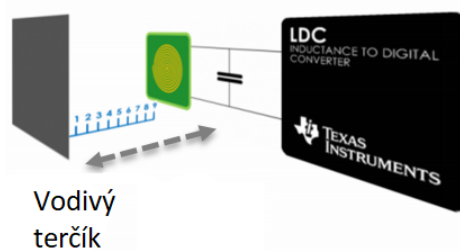
Díky zkušenostem z jiného podobného projektu jsem zjistil, že ovládací prvek by měl být co možná největší. Zároveň by měl odolat i poměrně silným ranám, které děti v zápalu hry zařízení uštědřují. Tlaková deska tedy počítá s možností působení síly o velikosti až 500 N, což samozřejmě zároveň znamená, 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 rezačku, 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. B.5/str. 56] a [obr. B.6/str. 57].



Jako materiál těla jsem v první fázi zvolil standardní fotopolymer pro tiskárny typu SLA, s pevností v tahu 46 až 67 MPa. Později jsem ale přešel na odlévání z houževnatého polyuretanu, aby se zlevnila výroba a zároveň stoupla odolnost (viz kapitola 5.12).

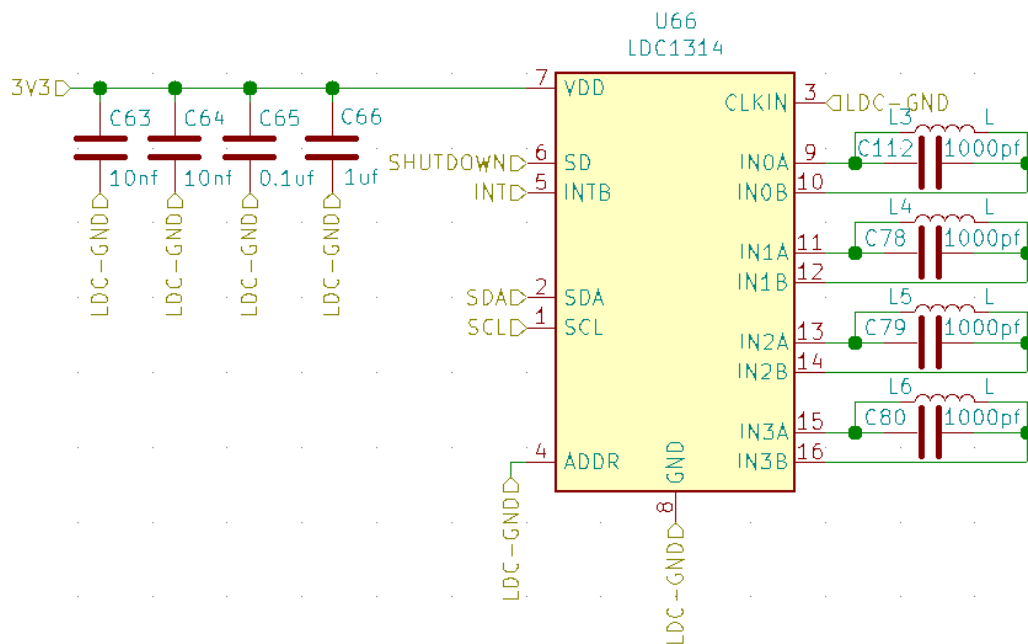
## 5.8 Elektronika tlakové desky

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 především terčím, který slouží jako sekundární cívka k cívce vyleptané v mědi. LDC1614 pak při měření do snímacích cívek pouští frekvenci, která se dá nastavit externím zdrojem na 2-40 MHz nebo použít interní oscilátor, který je nastaven na 40 MHz. Na základě Foucaultových proudů se pak dá určit vzdálenost terčímku od jednotlivých cívek. Vzhledem k citlivosti a vůbec samotnému principu je toto měření však pro každý kus BlackBoxu specifické, protože žádné dva BlackBoxy nebudou stejné. I proto je nutné tlakovou desku při každém spuštění BlackBoxu kalibrovat.



Obrázek 5.18: Schematické zobrazení cívky a terčímku [31]

Pro snímání terčímku používám čip **LDC1614** [25] nebo **LDC1314**, které se liší prakticky jen rozlišením. LDC1314 disponuje dvanáctibitovým AD převodníkem a LDC1614 dvacetiosmibitovým AD převodníkem a je tak schopen detekovat pohyb terčímku s rozlišením až na 10 nm.



Obrázek 5.19: Zapojení čipu LDC1314 na desce trezoru

Čip LDC komunikuje po sběrnici I2C, která umožňuje komunikaci jednoho mastera<sup>10</sup> s až 128 slavy.<sup>11</sup> LDC také umožňuje volbu ze dvou I2C adres, aby se dala adresa změnit v případná kolize s jiným čipem, který by měl stejnou adresu.<sup>12</sup>

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 [30], [31], 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. B.9/str. 59].

Celý trezor obsahuje dvě samostatné elektronické desky, přičemž na jedné je osazen jen kruh z LED WS2812 a snímání tlakové desky, které zabírá většinu této desky což je vidět na obrázku [obr. B.10/str. 60].

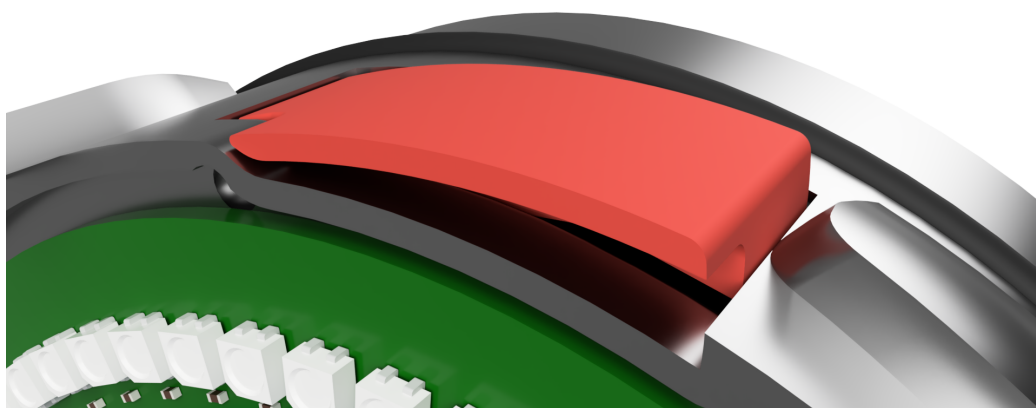
<sup>10</sup>Čip, který řídí komunikaci.

<sup>11</sup>Čipy, které přijímají příkazy od mastera a pouze mu odpovídají.

<sup>12</sup>Např. aby se daly použít dva čipy LDC na jedné sběrnici I2C.

## 5.9 Zámek

Zámek je založen na mechanizmu bajonetu se zpětnou západkou, která brání otevření ve chvíli, kdy je BlackBox zamčený. 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 5.20: 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 součástí. 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 jednodušší výroby, ale PLA po několika měsících začalo ztrácet 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 naprosto stačí magnet na motoru a v západce. Západka proto zůstala v této podobě a jen se přidala mechanická přepážka kvůli voděodolnosti.

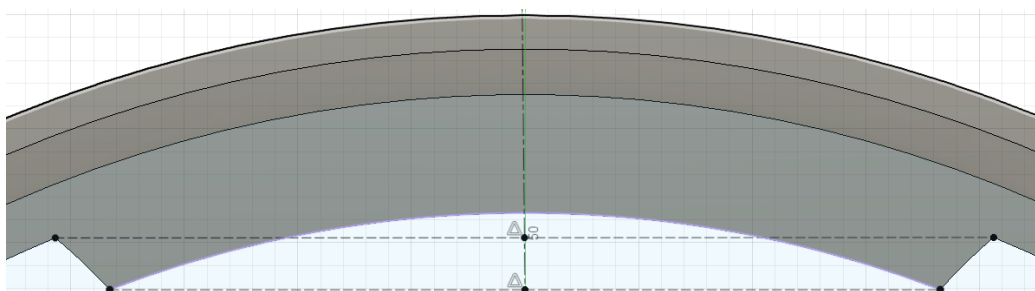
Západka je také v neposlední řadě navržena tak, aby odolala pokusu o vy-lomení za působení kroutícího momentu o velikosti až 5000 N·mm, výsledky simulace najdete na obrázku [obr. B.8/str. 58].

## 5.10 Úkosy

Aby bylo jednodušší 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.



Obrázek 5.21: Ukládací úkosy



Obrázek 5.22: Symetrie zarážky

Zarážky na obvodu otvoru mají obě kontaktní plochy stejné. Sice by mohlo být výhodné přizpůsobit tvar strany, kolem které se pohybuje západka, pohybu 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 zvláště výhodné při stavbě s dětmi, kvůli zmenšení počtu možných chyb, kterých se děti mohou při stavbě dopustit, a ztráta vedení není tak zásadní.

## 5.11 LED kruh

Trezoru vévodí světelný kruh. Slouží jako displej, na kterém trezor může zobrazovat vše, co potřebuje. Kruh obsahuje šedesát jednotlivých LED [WS2812](#) [24], konkrétně variantu mini. Tuto variantu 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 mm,<sup>13</sup> což by znamenalo průměr kruhu alespoň 120 mm.

WS2812 nejsou jen LED, ale mají v sobě logiku, díky které je možné jich řetězit velké množství za sebe. Díky tomu na řízení celého kruhu stačí jediný pin na ESP32. Ukázka PCB na obrázku [obr. B.10/str. 60] a zapojení na [obr. B.19/str. 69].

Číslo šedesát jsem zvolil primárně kvůli zobrazování času, každá minuta v hodině nebo sekunda v minutě má tak svoji LED. Zároveň toto číslo dobře navazuje i na zobrazování úhlů, což koresponduje s magnetickým kompasem, kterým BlackBox disponuje.

V momentální verzi softwaru se světelný kruh ovládá pomocí jedné z periférií ESP32, RMT a dá se používat ve dvou základních módech. V módu pro interakci s uživatelem označeném jako DarkMode, který omezuje jas na 4%<sup>14</sup> plného jasu, aby se na displej dalo koukat. Druhý mód zapíná plný jas LED, je určen pro dálkovou signalizaci nebo pro prosté svícení a dokáže si říct až o 1,4 A.

---

<sup>13</sup>V 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.

<sup>14</sup>Jas každého ze tří kanálů RGB se dá ovládat v rozmezí jednoho bajtu a v DarkMode je plný jas jen 10 místo 255.

## 5.12 Výroba mechanických dílů

Prototypové verze trezoru jsem vyráběl pomocí laserové řezačky a 3D tisku, a to technologiemi **FDM** a **SLA**. Po odzkoušení prototypů jsem však u 3D tisknutých dílů přešel na odlévání polyuretanu do silikonové formy.

**Výroba silikonové formy** Před tím, než se dá začít odlévat hotový díl, musí se pochopitelně udělat forma. Jako materiál formy jsem zvolil silikon pro jeho pružnost. Ta mi umožňuje odlévat i záporné převisy, u kterých bych musel běžnou formu rozdělit na velké množství dílů. Konkrétně jsem zvolil dva lukoprény **N8200** a **N5221**, který používám na formy různých dílů. N8200 je totiž ve srovnání s N5221 odolnější, ale má vyšší viskozitu, a tak nezateče do úzkých skulin. Proto na některé formy používám N8200 a na jiné N5221, abych formu byl vůbec sto vyrobit. Forma na odlévání těla dveří dokonce kombinuje oba dva, jelikož je dvoudílná a jeden z dílů je tvarově náročný.

Abych ale mohl formu vyrobit, potřebuji mít vyrobené kopyto<sup>15</sup> [obr. B.4/str. 55]. Abych jej získal, využil jsem znovu 3D tisku. Tentokrát 3D tisk SLA, který umožňuje dosažení daleko vyšší přesnosti než technologie FDM. Do vyrobeného kopyta se naleje dobře promíchaná a vyvakuovaná směs kaučukové pasty a katalyzátoru. Ta se následně nechá z vulkanizovat a vyjme se z kopyta.

Při odlévání vícedílné formy, ve chvíli, kdy se jeden díl odlévá podle již hotového dílu, je třeba natřít kontaktní plochy na hotovém díle separátorem, aby se výsledek neslepil. Pro tento účel jsem používal **parafínový separátor**.

**Odlévání polyuretanu** Konkrétně jsem zvolil polyuretan **TASK 4** s vyváženými mechanickými i technologickými vlastnostmi. Složky polyuretanu se smísí a ve vakuové komoře řádně promíchají. Následně se polyuretan nalije do formy a vloží do přetlakové komory, protože polyuretany jsou sto, za zvýšeného tlaku, pohlit nějaké množství vzduchu. Zbylé vzduchové bublinky, které se do polyuretanu dostaly, se tak v polyuretanu rozpustí.

---

<sup>15</sup>Forma určená pro výrobu další formy.

# Kapitola 6

## Využití

### 6.1 Použití trezoru

První nasazení trezoru na akci pořádané Robotárnou [37] proběhlo na příměstském robotickém táboře v srpnu roku 2019. Jednalo se o první variantu trezoru, která kdy spatřila světlo světa (viz kapitola 3.1). Tábor trval pět dní a děti dostaly první tři dny na stavbu mechaniky a poslední dva dny se programovalo.

Trezor tehdy sklídl úspěch, a tak započal vývoj dalších verzí, které už byly specializovanější (viz kapitoly 3.2 a 3.3) a přidal se i vývoj mechanických variant (viz kapitola 4).

V průběhu vývoje se trezor použil na řadě akcí:

- Příměstský tábor 2019
- Robotický kroužek 2019/20
- Zážitková stavební akce 2020
- Skautská akce 2020
- Akce instruktorů 2020
- Robotický tábor 2020

Celkově BlackBox v nějaké verzi použilo alespoň 110 lidí, pravděpodobně ale víc, přesné číslo bohužel neznám.

**Trezor ve volnočasových kurzech robotiky** Další používání trezoru probíhalo ve volnočasovém kurzu robotiky, který jsem spoluvodl, a účastníci v něm stavěli mechanickou variantu. Protože účastníci kurzu byli většinou již docela zkušení, jednalo se u nimi téměř jen o „rozcvičku“, kterou měli za několik kroužků hotovou a následovala stavba elektronického BlackBoxu.

Bohužel kvůli pandemickým opatřením si ne všichni účastníci stihli BlackBox 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** Chvilí po té, co vznikl mechanický BlackBox (viz kapitola 4), proběhla první akce s BlackBoxem, 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. 6.1/str. 44].

Toto však byla poslední akce, která se stihla uskutečnit před započatím 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 zážitkových akcí.

Zhodnocení použití BlackBoxu na DDM Helceletova Brno je v příloze [A](#) na straně 49.

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

Navrhl a vyrobil jsem dvě verze trezoru – mechanickou pro mladší uživatele a jednodušší použití a elektronickou s rozsáhlými možnostmi využití pro náročné zájemce – viz [Shrnutí dosažených výsledků](#).

K oběma verzím jsem také připravil výkresovou dokumentaci (v příložených souborech).

Díky této práci jsem se zdokonalil v návrhu tištěných spojů. Také jsem pro návrh DPS začal využívat program KiCad, zatímco dříve jsem využíval Eagle. Díky výrobě desek jsem se naučil používat program [KiKit](#) [34], který vytvořil Jan Mrázek a který zásadně usnadňuje přípravu podkladů pro reálnou výrobu DPS navržených v KiCadu.

## Shrnutí dosažených výsledků

- **Zámek**

Zámek (viz kapitola 5.9) je plně funkční a je realizován pomocí mechanismu bajonetu, který je opatřen zpětnou západkou ovládanou motorem a magnetickou spojkou. Díky magnetické spojce může být zámek vodotěsný a tzv. měkký (dá se zamknout, i když je již zamčen).

- **LED kruh**

LED kruh (viz kapitola 5.11) je plně funkční a je realizován pomocí 60 inteligentních RGB LED [WS2812](#) [24].

- **Tlaková plocha**

Tlaková plocha (viz kapitoly 5.8 a 5.7) je plně funkční, je schopná detekovat jak polohu doteku, tak jeho sílu. Plocha je realizována pomocí čipu [LDC1614](#) [25], který měří deformaci vodivého terčíku. Měření tlaku je navíc natolik přesné, že se plocha dá využít i jako váha schopná detekovat i tělesa vážící desetiny gramu.

- **Wifi a Bluetooth**

WiFi a Bluetooth (viz kapitola 5.4) jsem vyřešil v rámci volby řídicího modulu [ESP32-wrover](#) [11], který má integrovaný Wifi a Bluetooth modul.

- **Gyroskop**

Gyroskop (viz kapitola 5.5) jsem vyřešil pomocí čipu [MPU6050](#) (dříve [BMX055](#) [15]).

- **Akcelerometr**

Akcelerometr (viz kapitola 5.5) jsem vyřešil pomocí čipu [MPU6050](#) (dříve [BMX055](#) [15]).

- **Magnetický kompas**

Magnetický kompas (viz kapitola 5.5) jsem vyřešil pomocí čipu [QMC5883](#) [27] (dříve [BMX055](#) [15]).

- **RTC** (hodiny reálného času)  
RTC (viz kapitola 5.5) jsem vyřešil pomocí čipu [M41T62](#) [16].
- **Programátor** s možností zákazu programování  
Programátor (viz kapitola 5.4) je plně funkční a řešení jeho odpojení navíc šetří energii ve chvíli, kdy programátor není využíván.
- **Barometr**  
Barometr (viz kapitola 5.5) je plně funkční a realizován na čipu [SPL06](#) s přesností měření 0,06 hPa. Je tak schopen rozpoznat změnu nadmořské výšky o 0,5 m.
- **Nabíječka**  
Nabíječka (viz kapitola 5.2) je plně funkční a je realizována pomocí čipu [SE9017](#) [7].
- **GPS**  
GPS (viz kapitola 5.5) bohužel z důvodu nedostatku času není implementována přímo na desce a je pro ní vyhrazen jen konektor. Realizována by ale byla pomocí modulu A9, který je i v plánu na nynějších verzích používat prostřednictvím zmíněného konektoru. Na budoucích verzích pak bude modul osazen přímo na desce a bude zároveň používán jako koprocessor.
- **GPRS**  
GPRS (viz kapitola 5.5) bylo v plánu realizovat stejně jako GPS pomocí modulu A9.
- **IR komunikace**  
IR komunikace (viz kapitola 5.6) je plně funkční.

Díky tomuto vybavení trezor poskytuje možnost ovládání pomocí různých gest, například otáčení nebo naklápění. Trezor také může určovat svoji polohu nebo se po určité době provozu s minimální spotřebou „vzbudit“ a začít vysílat a přijímat signály nebo reagovat na své senzory.

Výrobní podklady a historie vývoje hardwaru BlackBoxu je na webu [github.com/RoboticsBrno/RB3203-BlackBox](https://github.com/RoboticsBrno/RB3203-BlackBox). Softwarovou část zpracoval v samostatné práci s názvem *Software pro BlackBox* můj kolega Tomáš Rohlínek a je dostupná na adrese [github.com/RoboticsBrno/BlackBox\\_library](https://github.com/RoboticsBrno/BlackBox_library).

BlackBox již svoje využití našel a do budoucna se s ním počítá nejen na Robotický tábor 2021, ale i na spoustu dalších akcí, ať už pořádaných Robotárnou nebo kýmkoliv jiným (jen co skončí pandemie).

# Příloha A

## Zpráva od uživatelů BlackBoxu

## Informace o využitelnosti projektu BlackBox (SOČ 2021)

Projekt BlackBox (v technickém i softwarovém řešení) vznikl v úzké spolupráci s Domem dětí a mládeže Helceletka, především s ohledem na jeho další využitelnost v různých volnočasových aktivitách realizovaných naší organizací. Oba autoři konzultovali řešení projektu od samého začátku - od ideových záměrů, a to nejen s pracovníky odborného pracoviště Robotárna, ale také s dalšími zaměstnanci - pedagogy volného času se specializací na gamedesign a outdoorové a zážitkové aktivity. Konstrukce i software tak značnou měrou odráží požadavky plánovaného využití (odolnost, různá úroveň náročnosti nastavování, možnost programování zařízení v rámci výukové aktivity, vysoká variabilita použití atd.).

Tyto požadavky reflektují do jisté míry koncepční záměry kladené na výstupy dlouhodobého projektu organizace zaměřeného na propojování zážitkové (nebo explicitně táborové) pedagogiky se světem technologií. V rámci tohoto projektu byl také BlackBox (v různých fázích vývoje) vyzkoušen v několika různých aktivitách s velmi dobrými výsledky. K zásadnějšímu „nasazení“ je ale plánován až v letní táborové sezóně 2021. BlackBox by se měl postupně stát páteří součástí té větve projektu, která bude postupem času výsledky naší práce přinášet odborné veřejnosti - pedagogům volného času, táborovým vedoucím, různým neziskovým organizacím (organizátorům volnočasových aktivit), ale i specializovaným subjektům zaměřeným na outdoorové aktivity dospělých. V rámci projektu se pro zařízení, která v rámci něj vznikají, zažila zkratka TEF (zkracující nadsázkou vyjádřený záměr vytvářet Technologické Ekvivalenty Fáborků). Právě BlackBox by měl představovat určitý základní TEF.

To je možné díky obrovské variabilitě, kterou zařízení pro organizaci zážitkových outdoorových aktivit nabízí. Z hlediska použití je myslitelná ve hrách a aktivitách pobytových i příměstských táborů, zážitkových kurzů a akcí, v hrách typu City-bound, včetně masových akcí. Z hlediska zhodnocení konkrétních možností, kterými BlackBox může vstoupit do jednotlivých programů, chci podtrhnout zejména následující tři:

Prvně jde o znatelný dopad na **motivaci účastníků** pro program a práci s jejich flow, tedy zaujetím aktivitou, soustředěním, tím jak je aktivita „pohltí“. Design Blackboxu a možnosti jeho interakce s hráči (účastníky aktivit) odpovídají v podstatě běžně chápanému rozměru chytrých zařízení. Fakt, že je taková technologie součástí táborové hry nebo volnočasové aktivity, velmi pozitivně ovlivňuje vztah účastníků k programu.


Za druhé je to **různorodost rolí**, které BlackBox v jednotlivých aktivitách zastane. Může být interaktivním stanovištěm hry, osobním průvodcem konkrétní hrou, může být finálním artefaktem, šifrou nebo jiným prvkem brzdícím postup aktivitou anebo naopak jejím akcelerátorem (pokud například odpočítává čas). Ve strategických hrách může dobře distribuovat herní suroviny, stejně jako omezovat (podmiňovat) vstup do určitých lokalit. Ve fyzicky náročných aktivitách může diktovat směr postupu, vyžadovat rozluštění šifry, monitorovat pohyb týmu v makroměřítku nebo citlivě reagovat na to, co s ním týmy provádějí. V bojových hrách zastane dobře roli statického terče, ale třeba i výbušniny s časovačem, tajné špiónské schránky, atd. Naprosto specifickou představou o jeho



použití jsou pak velké týmové hry v městském (a explicitně nočním) prostředí. Obliba těchto aktivit u mladých lidí stoupá, stejně jako fenomén únikových her. Blackbox pak může představovat skvělého průvodce takovým typem her. I vzhledem k řešení dotykového displeje je k tomu také předurčen.

Třetí rozměr, který je nutné ocenit, je velký zájem obou autorů na tom, aby zařízení bylo schopno nabídnout prostor pro **pedagogickou činnost v technických oblastech**. Tedy, aby se v určitém ohledu chovalo (nebo mohlo chovat) i jako složitější stavebnice s možností uživatelsky poměrně přívětivé programovatelnosti. Tento koncept jednoznačně navazuje na dobrou tradici Robotických táborů, jejichž integrální součástí je právě zájem o to, aby se účastníci podíleli na vzniku různých herních (aktivitních) prvků. To dobře koresponduje s určitou společenskou poptávkou po popularizaci a rozvoji technického vzdělávání, která byla před současnou pandemickou situací poměrně znatelná.

BlackBox se bezpochyby stane součástí herní a zážitkové reality na letních táborech Helceletky a to i v osvědčeném modelu sdílených aktivit pro příměstské tábory. Pandemická situace výrazně ovlivnila další plány, které s TEF organizace měla - zejména velké noční hry v ulicích města. Výhledově s nimi pořád počítáme. Stejně tak trvá naše představa o sdíleném hřišti s aktivitami s těmito zařízeními, kterých by se mohli účastnit také klienti dalších organizátorů (v přibližně stejném modelu jako navštěvují například bazény nebo lanové parky). Má bezpochyby potenciál stát se vlajkovým produktem řady zařízení typu TEF, které chceme dále podporovat a připravovat je pro nabídku mimo organizaci - ať už by šlo o prodej zařízení, nebo organizaci kurzů pro pedagogy. Zásadní roli bude hrát také v rámci rodící se spolupráce na projektu v rámci programu ÉTA Technologické agentury České republiky, na které by naše organizace měla participovat s Pedagogickou fakultou a Filozofickou fakultou Univerzity Hradec Králové a Pedagogickou fakultou Univerzity Palackého v Olomouci. Projekt bude zaměřen na využití moderních technologií ve volnočasových aktivitách s výrazným přesahem do edukační reality.



Digitálně  
podepsal Mgr.  
Petr Sedlář  
Datum: 2021.04.08  
18:52:17 +02'00'

V Brně, 8. 4. 2021

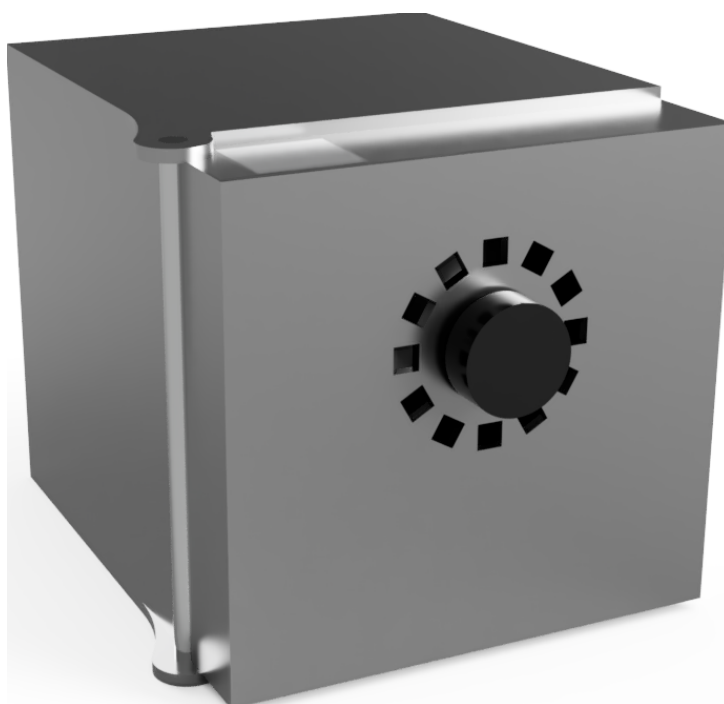
Mgr. Petr Sedlář  
zástupce ředitelky



# Příloha B

## Obrazová příloha

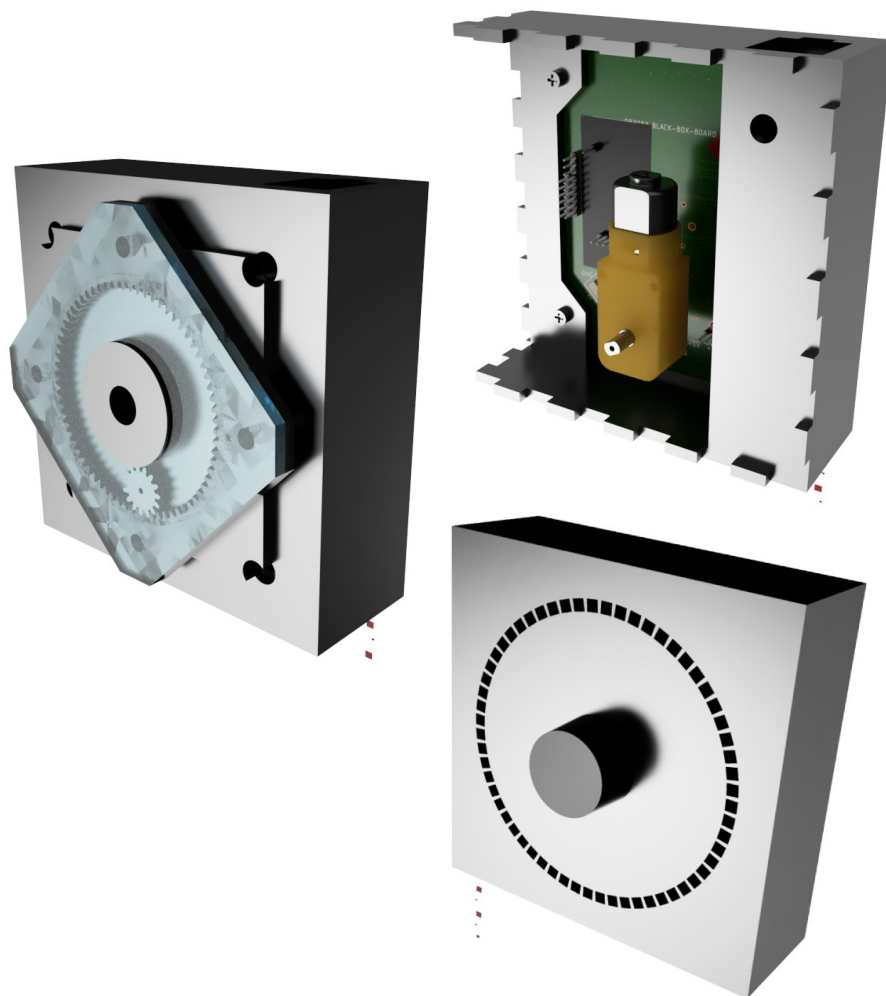
### B.1 Vzhled druhé elektronické varianty



Obrázek B.1: Render varianty E2

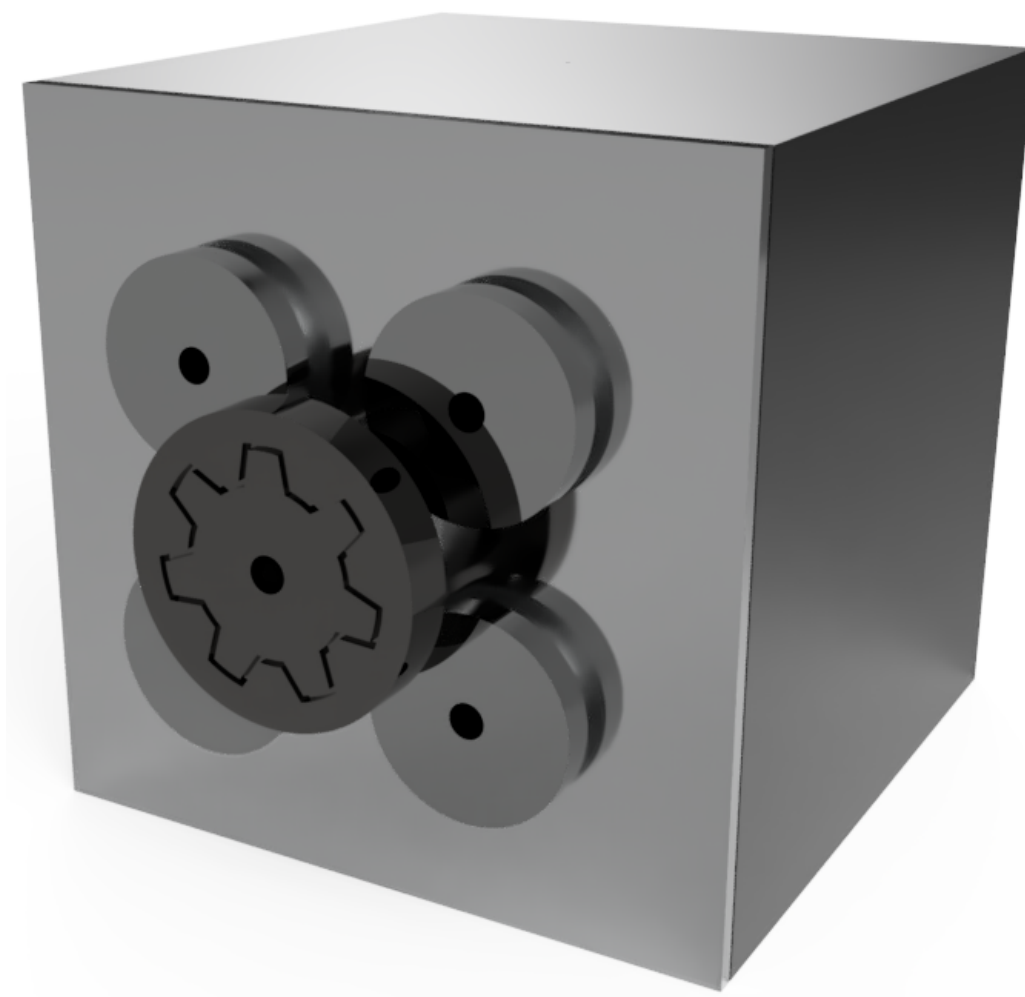


## B.2 Vzhled třetí elektronické varianty



Obrázek B.2: Render varianty E3

### B.3 Vzhled poslední mechanické varianty



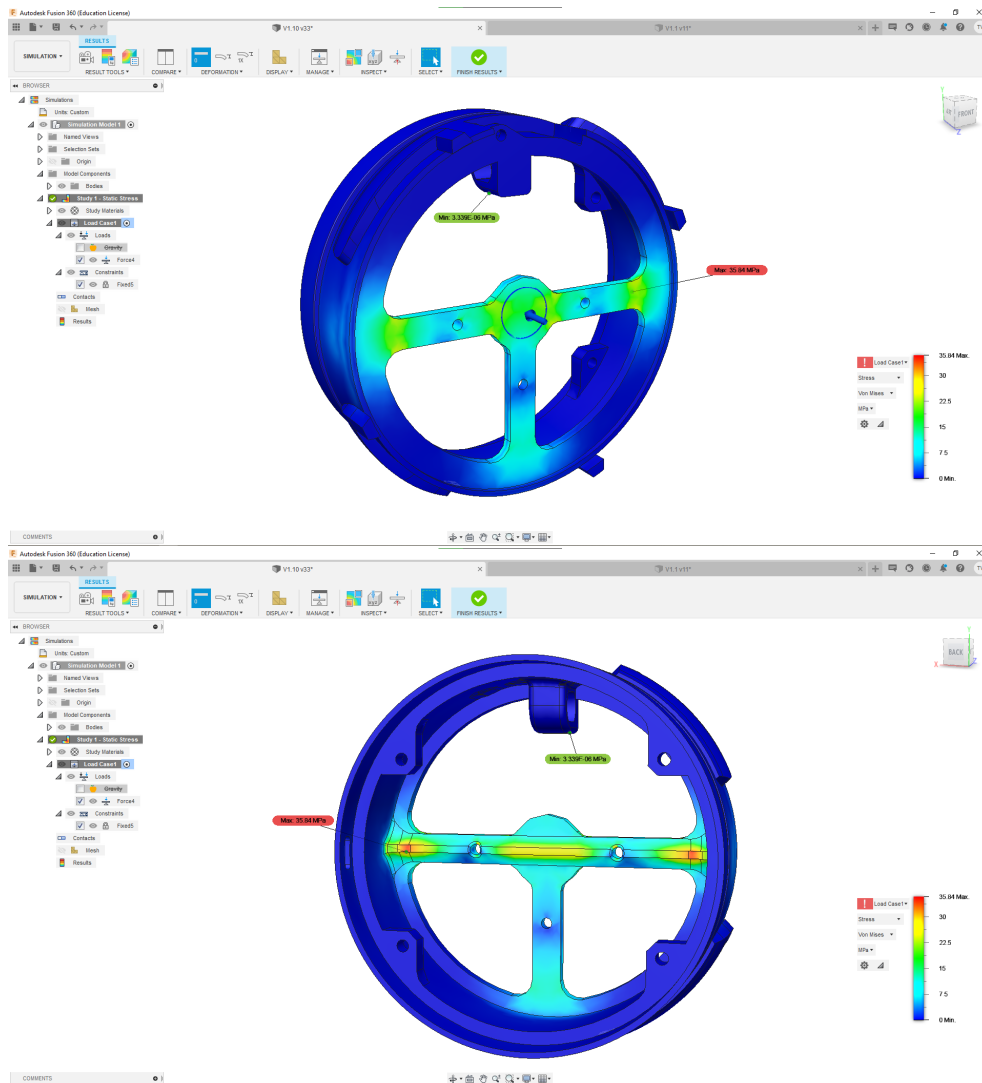
Obrázek B.3: Render poslední mechanické varianty

## B.4 Kopyto na jednu část formy těla dveří



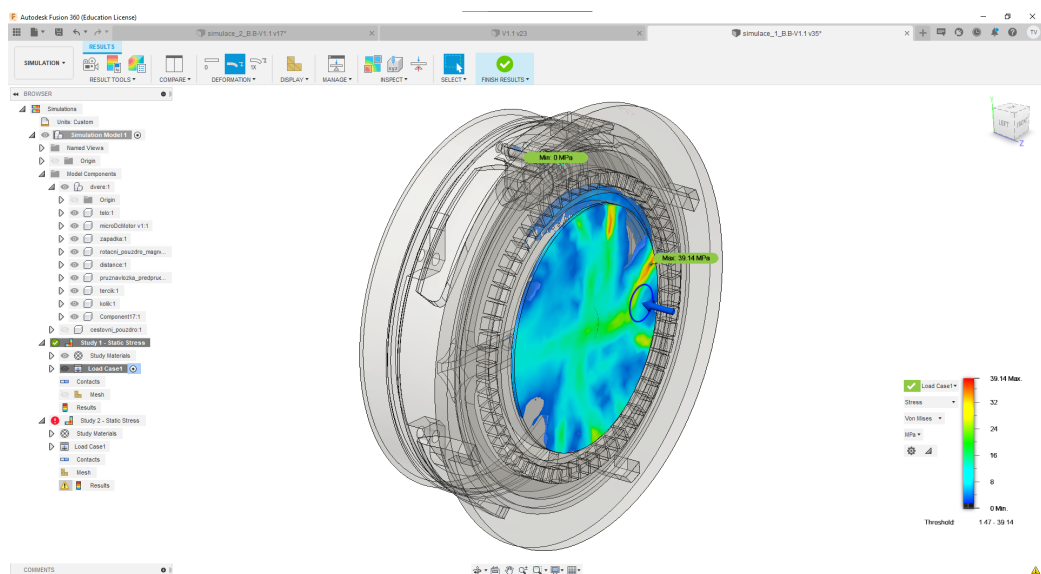
Obrázek B.4: Fotografie jednoho z kopyt na silikonovou formu

## B.5 Simulace pevnosti tlakové desky



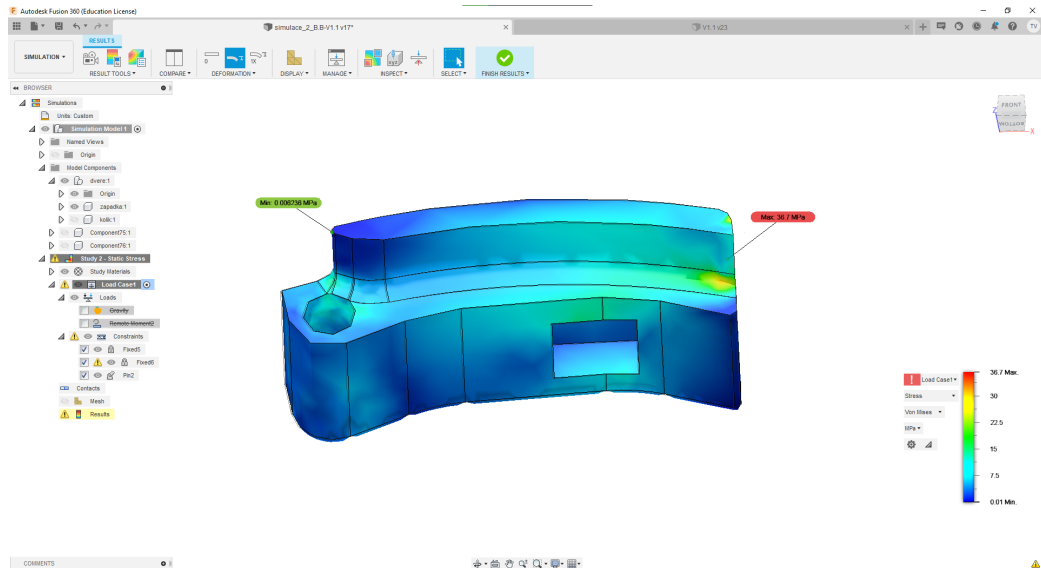
Obrázek B.5: Pevnostní simulace těla, nahoře je pohled zepředu a dole pohled zezadu

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.

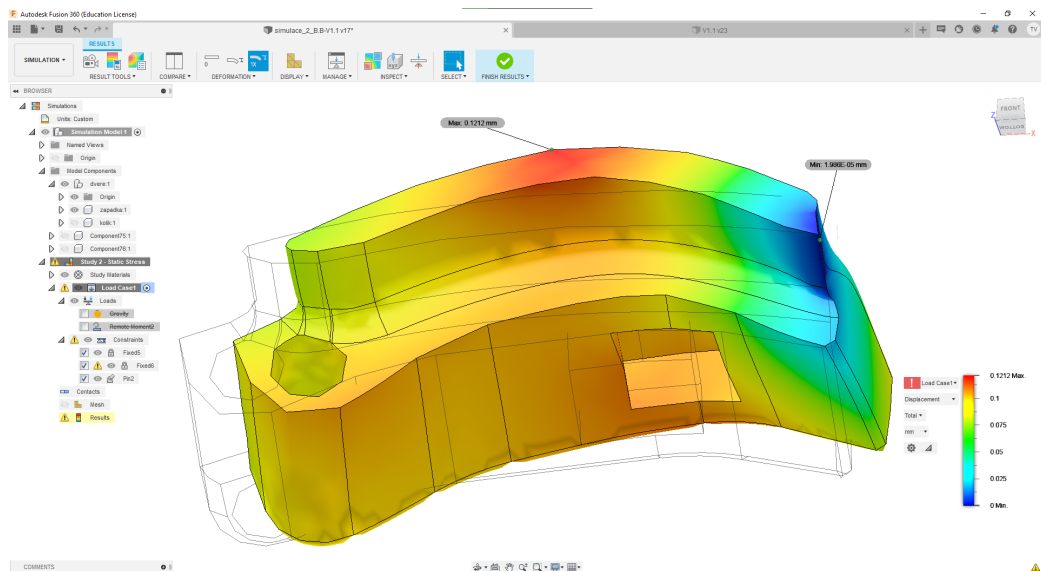


Obrázek B.6: Simulace sestavy

Jak je vidět, tak i sílu 100 N dokáže sendvič z terčiku, 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.

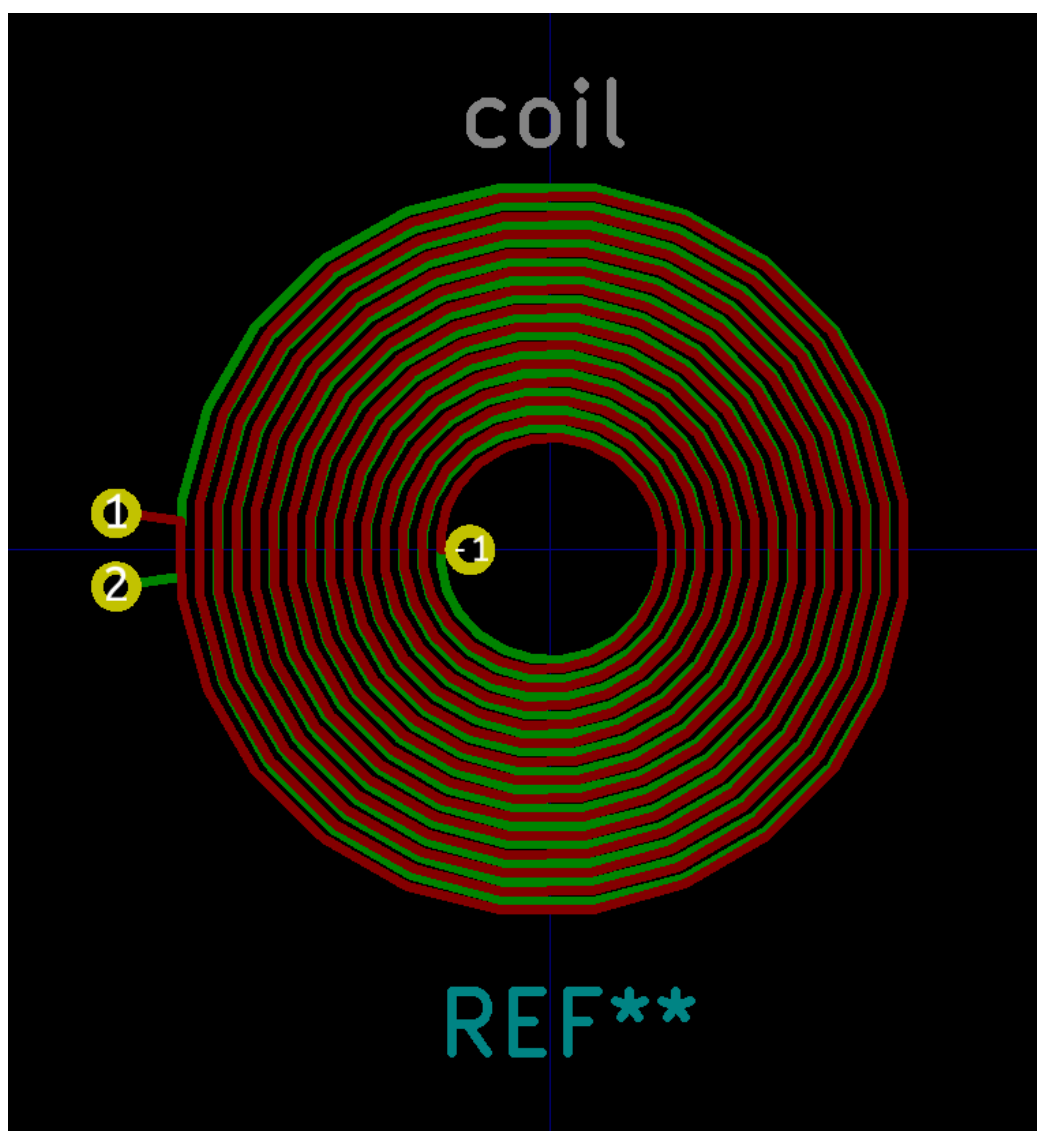


Obrázek B.7: Simulace napětí v západce při kroutícím momentu  $5000 \text{ N} \cdot \text{mm}$ , což na rameni  $48 \text{ mm}$  znamená sílu působící na kolík  $104 \text{ N}$

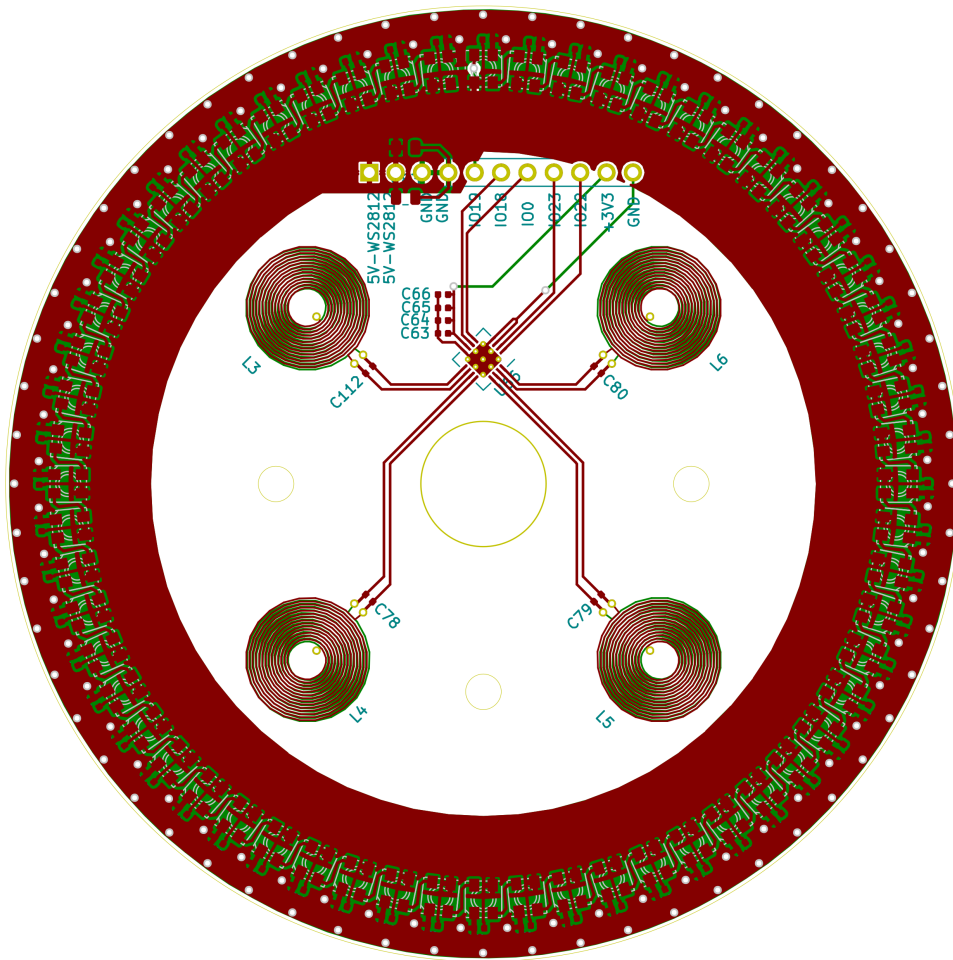


Obrázek B.8: Zobrazení deformace, pro lepší zobrazení je deformace zdesetinásobená

## B.6 Obrázky DPS

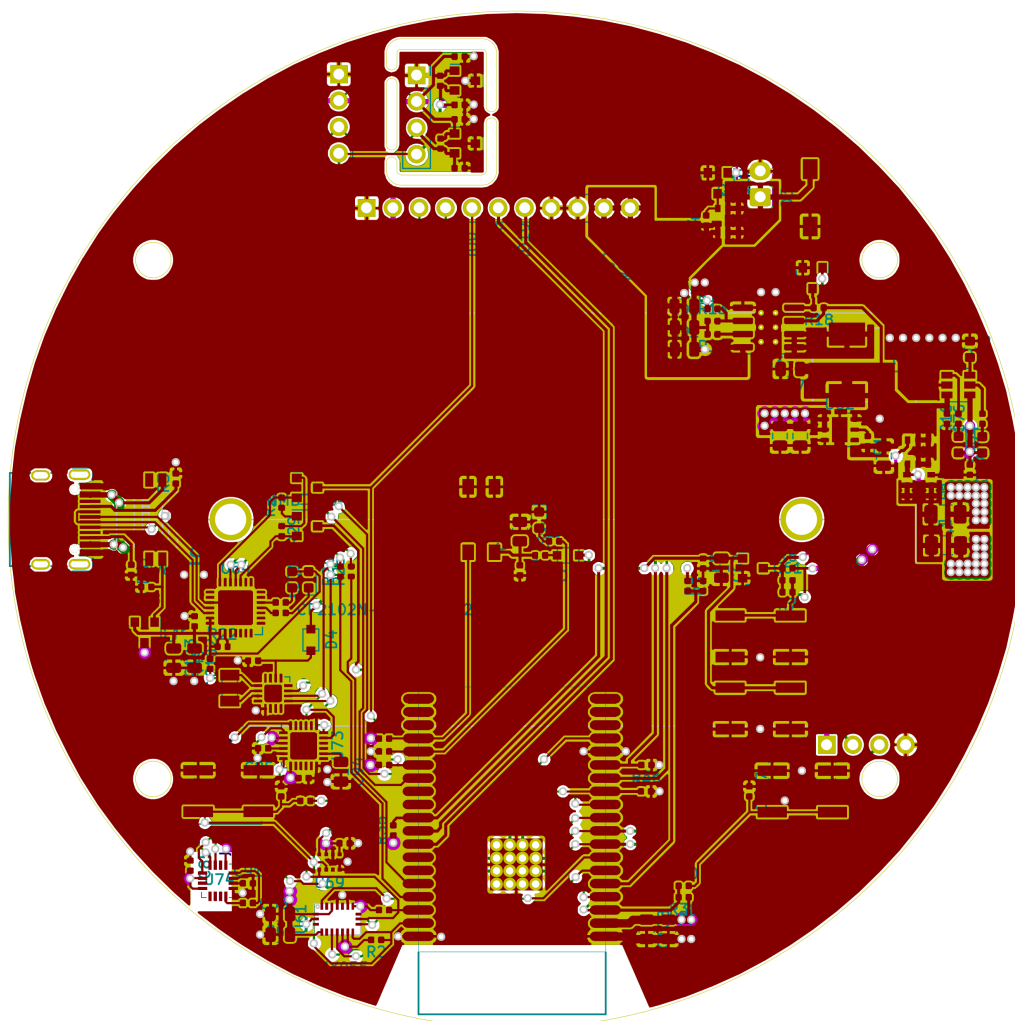


Obrázek B.9: Vzhled reliéfu cívky



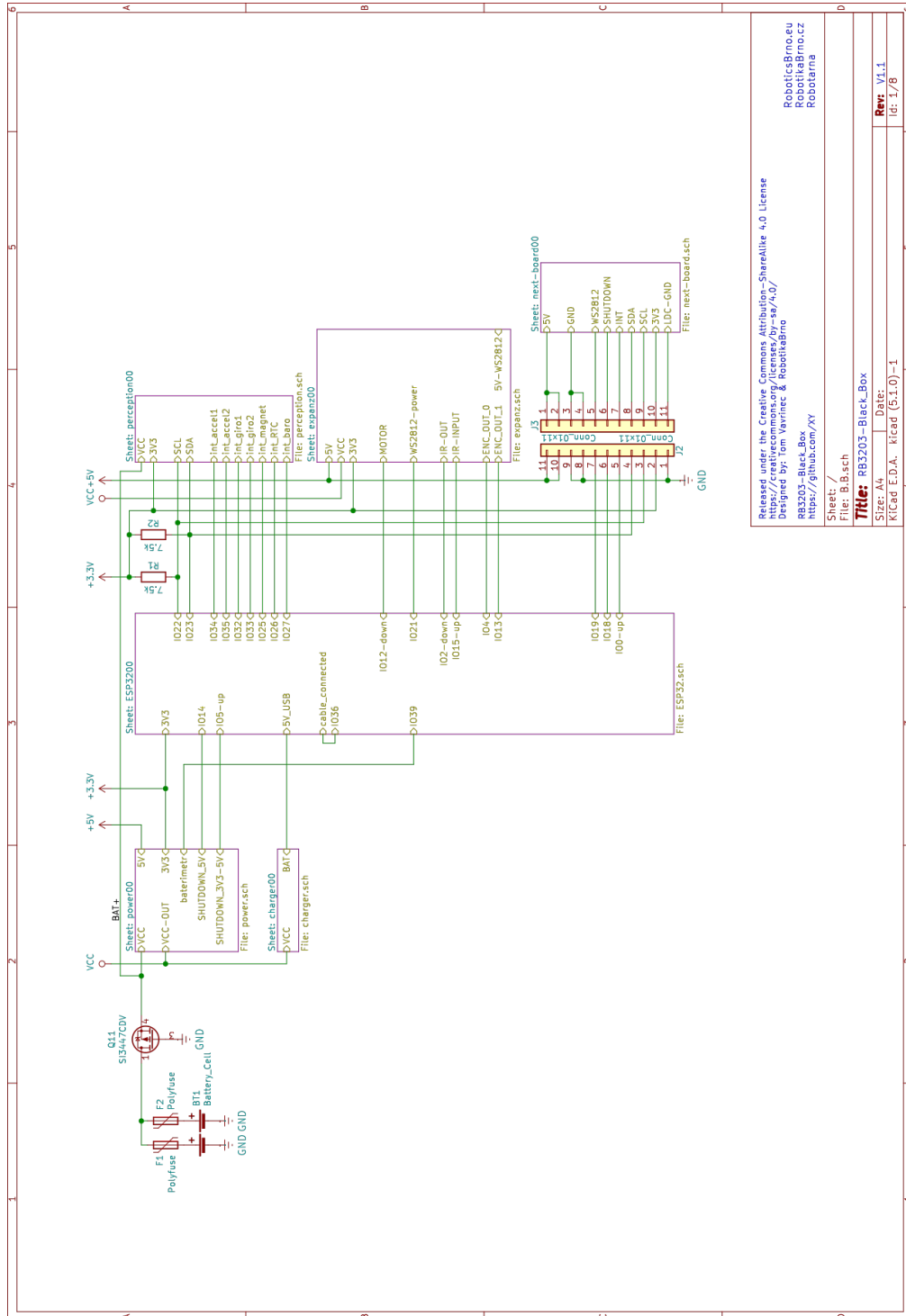
Obrázek B.10: Vzhled desky s kruhem WS2812 a snímáním tlakové desky





Obrázek B.11: Vzhled hlavní desky

## B.7 Schémata

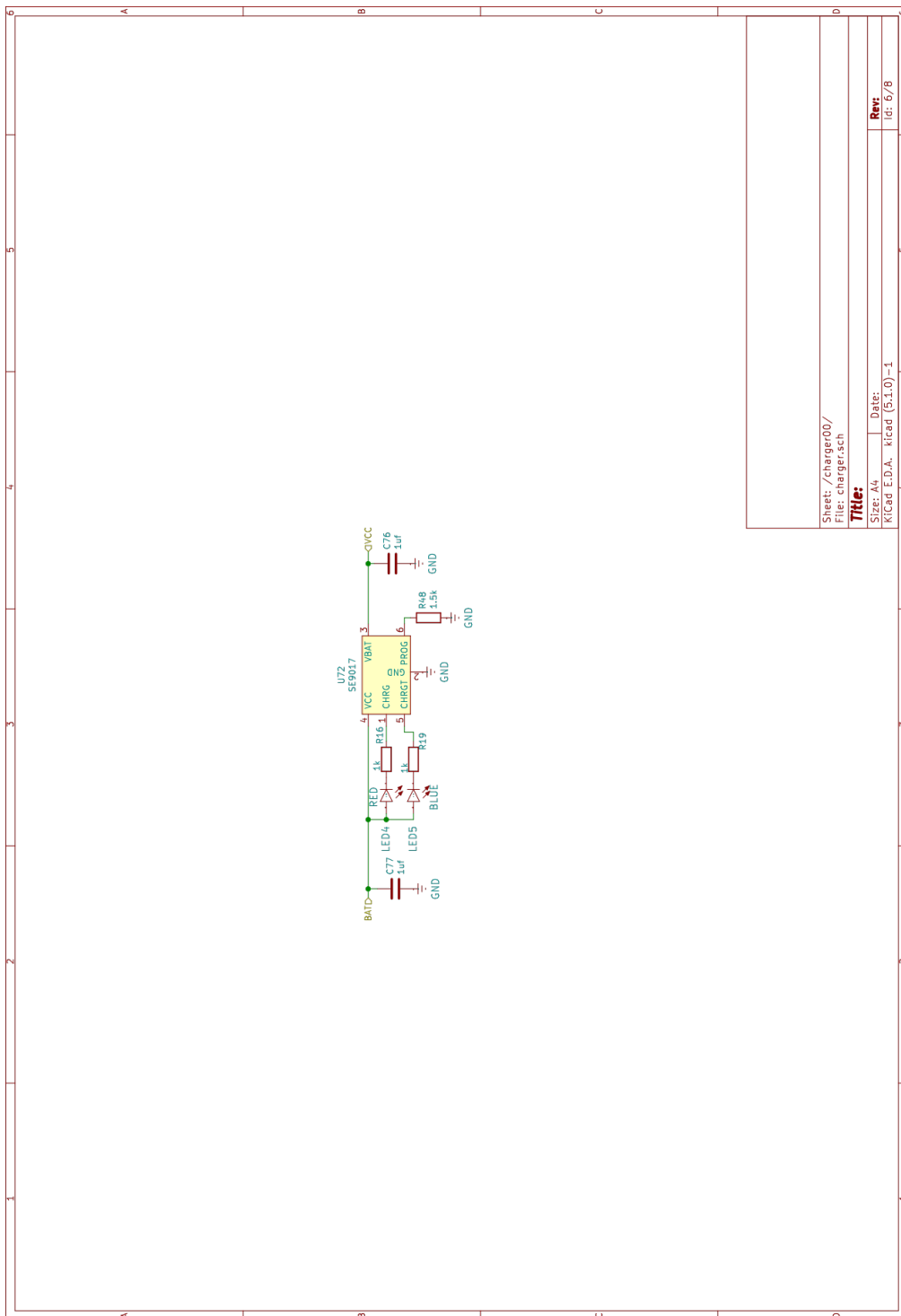


Released under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>  
 Designed by: Tom Vavrinec & RobotikaBrno  
 RoboticsBrno.eu  
 RobotikaBrno.cz  
 Robotarna

Sheet: /  
 File: B.B.sch  
**Title:** RB3203-Black\_Box  
 Size: A4 | Date: R1Cad E.D.A. R1Cad (3.1.0)-1  
**Rev:** V1.1  
 IG: 1/6

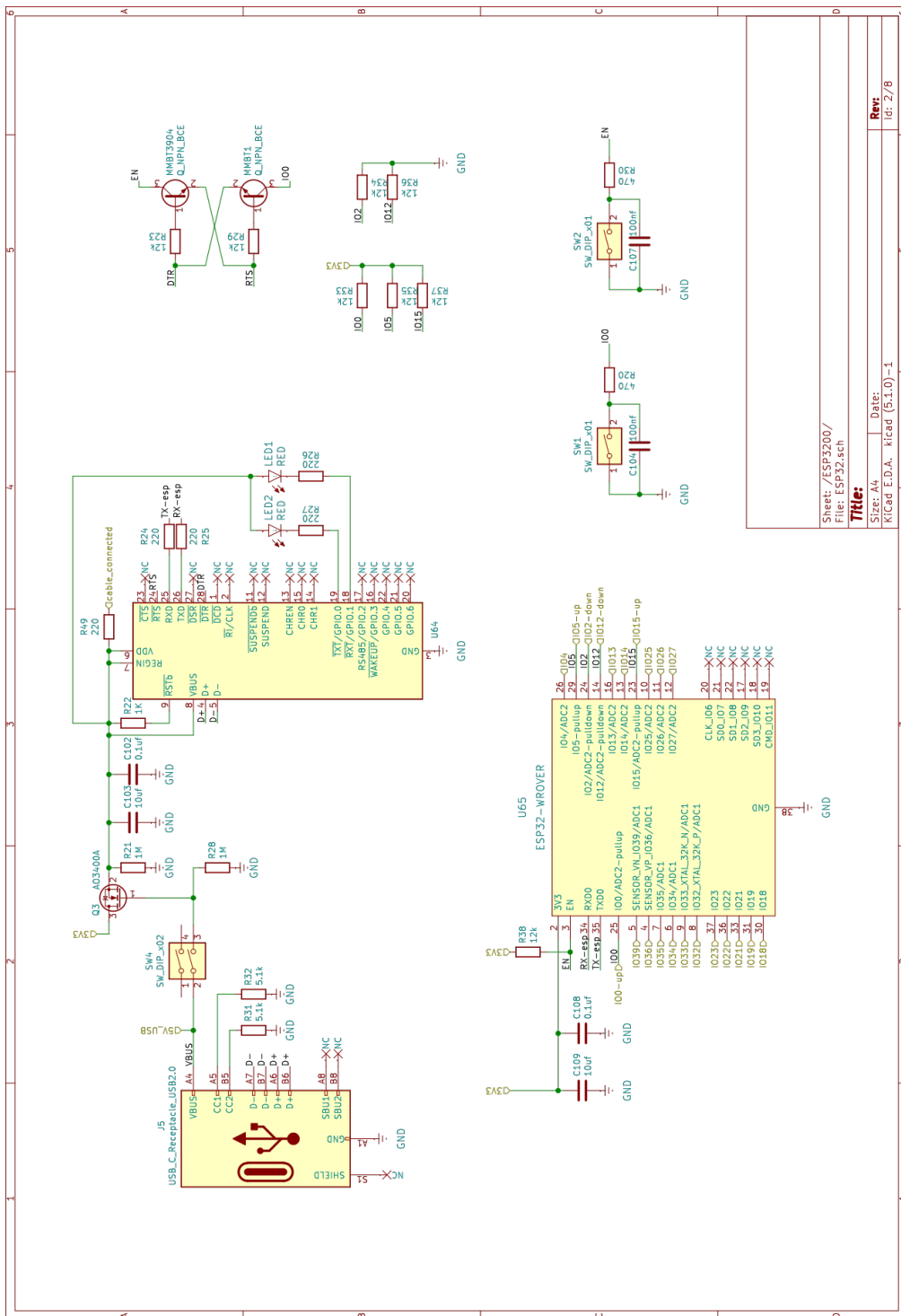
Obrázek B.12: Propojení jednotlivých systémů – schéma



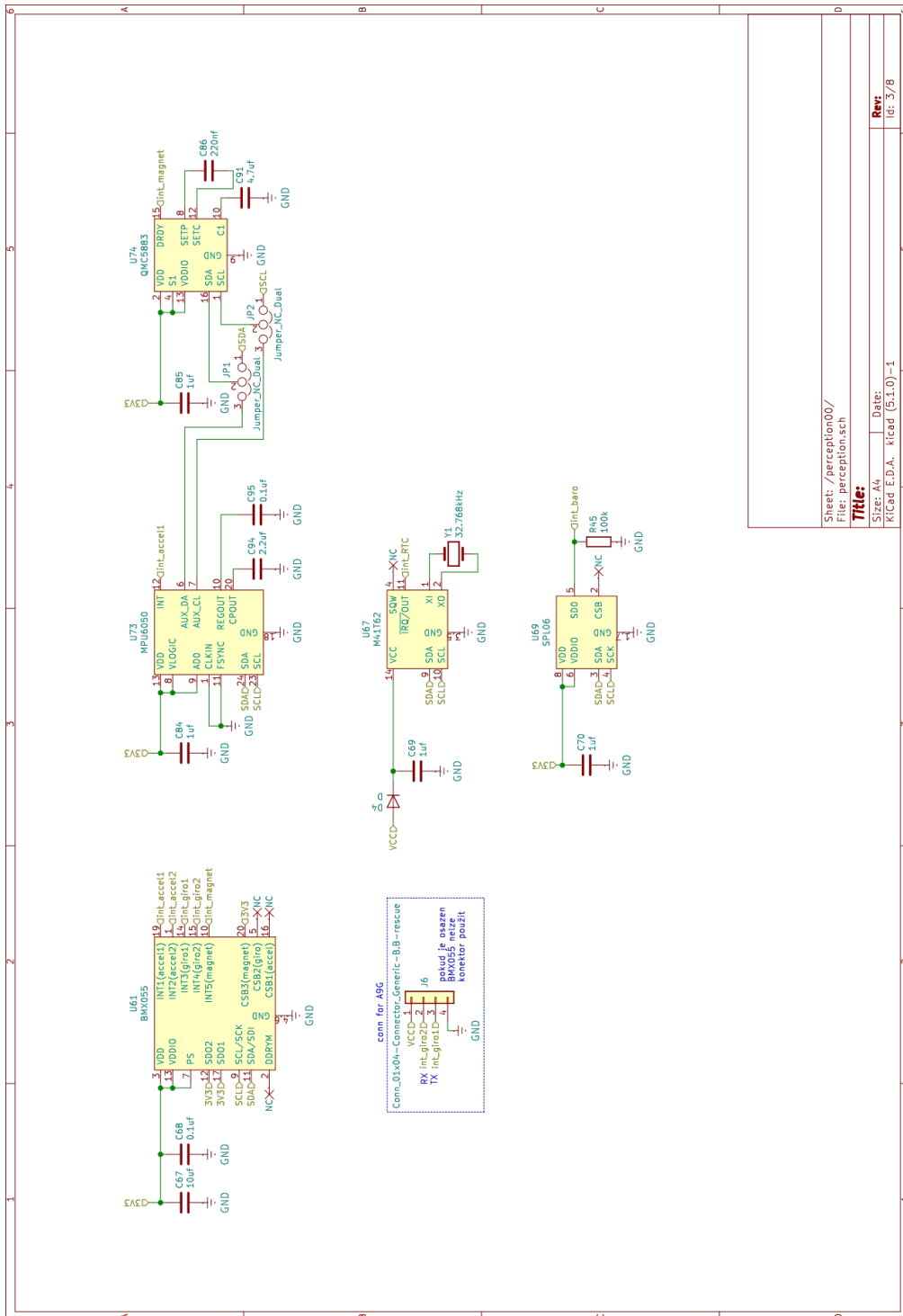


Sheet: /charger00/  
 File: charger.sch  
**Title:**  
 Size: 74  
 Date: KICad E.D.A. Kicad (5.1.0)-1  
 Rev: 6/8

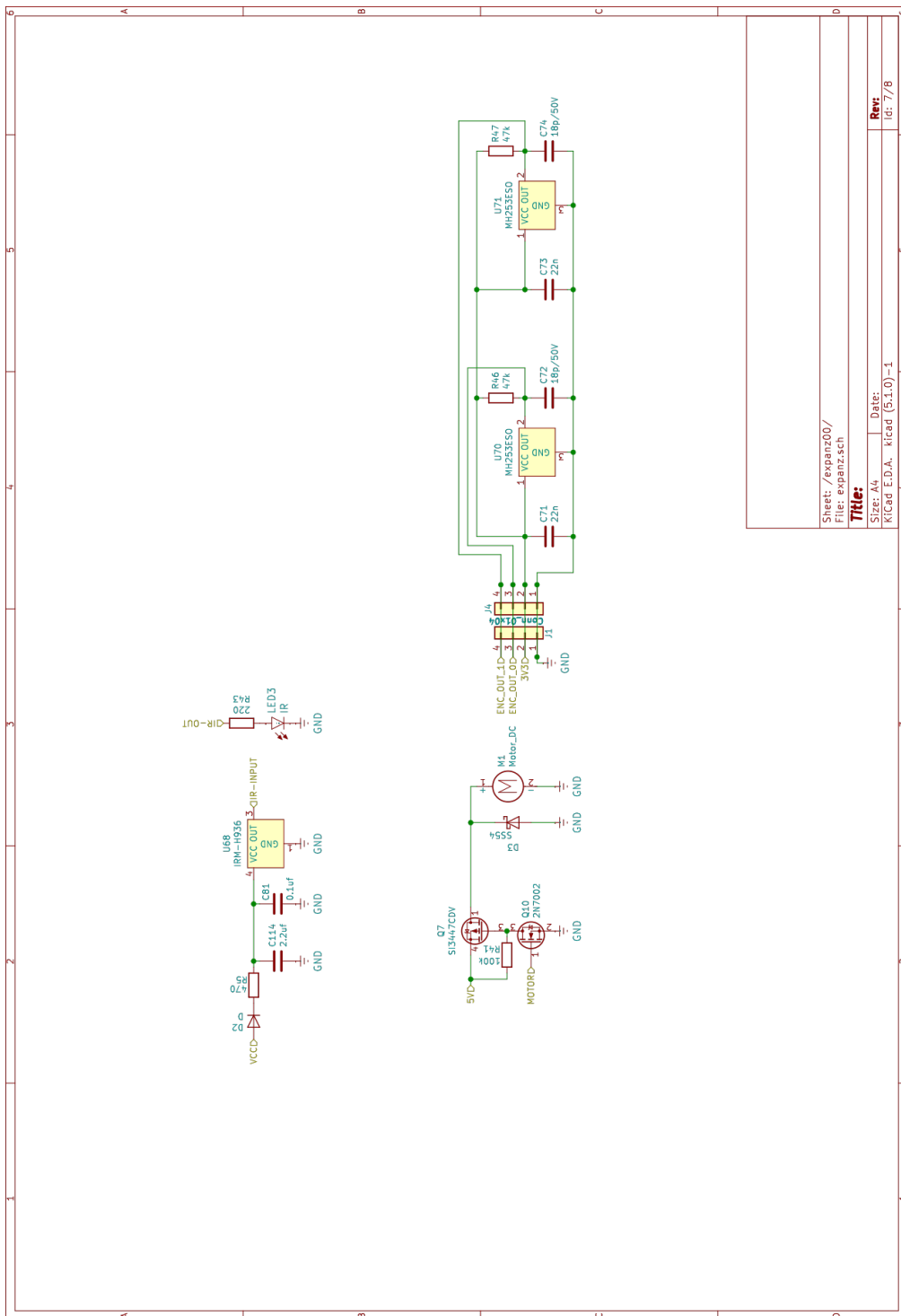
Obrázek B.14: Zapojení nabíjecího obvodu – schéma



Obrázek B.15: Zapojení ESP32 a programátoru – schéma



Obrázek B.16: Zapojení senzorů BMX055, MPU6050, QMC5883, M41T62, SPL06 a konektoru pro A9G – schéma



Sheet: /expand00/  
File: expand2.sch

Title:

Size: 7/4

Date:

KiCad E.D.A. KiCad (5.1.0)-1

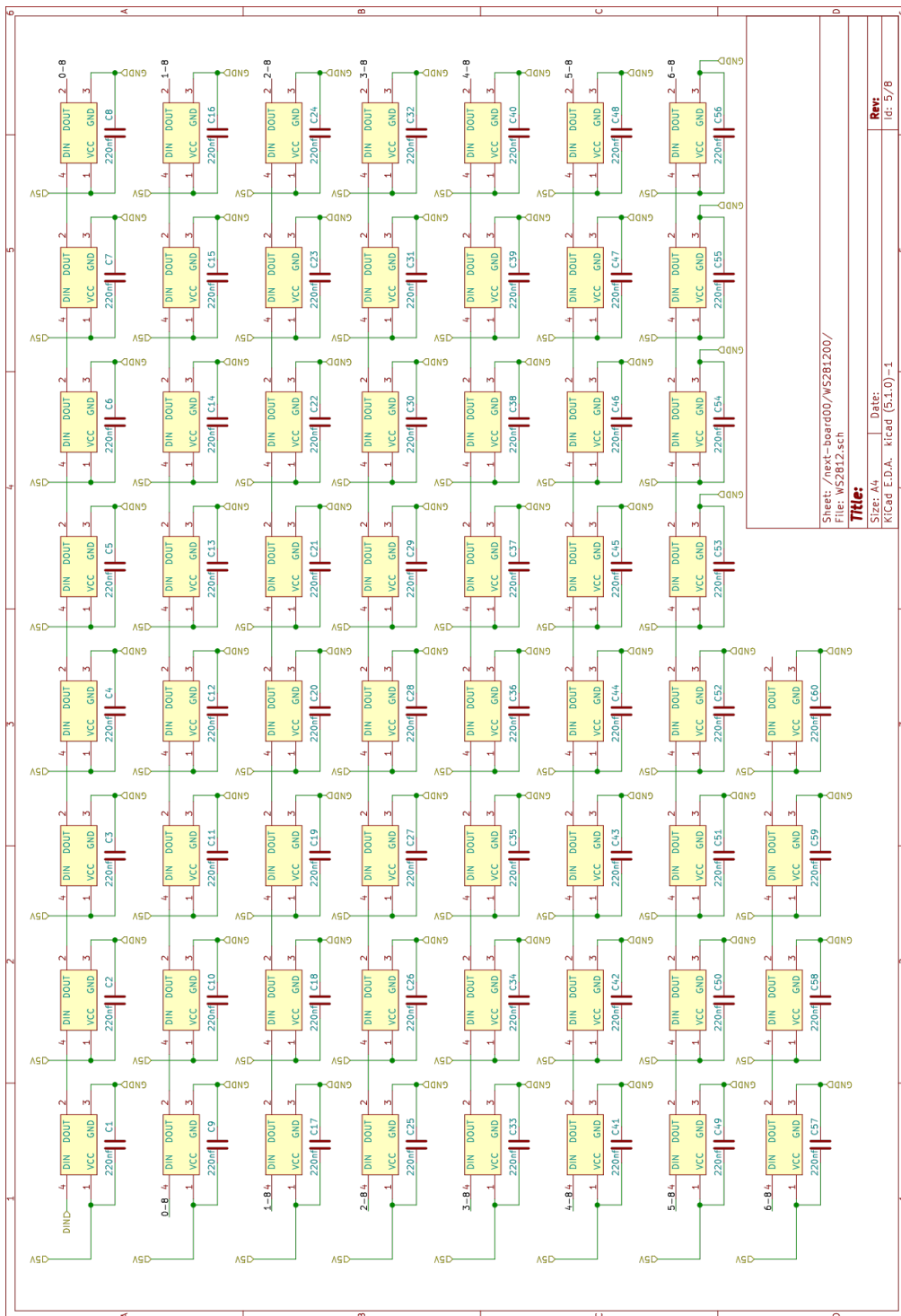
Rev:

IG: 7/8

Obrázek B.17: Zapojení IR komunikace, motoru a enkodéru – schéma







Obrázek B.19: Zapojení LED WS2812 na desce trezoru – schéma

# Příloha C

## Ostatní přílohy

## Seznam tabulek

5.1	Shrnutí elektronického vybavení . . . . .	19
5.2	Popis funkce pinů . . . . .	26

# Literatura

## Technická dokumentace

- [1] *Positive Thermal Coefficient*. SMD1206P200TF. Rev. 01. Circuit Protection System. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Shenzhen-Ruilongyuan-Elec-SMD1206P200TF\\_C20988.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Shenzhen-Ruilongyuan-Elec-SMD1206P200TF_C20988.pdf).
- [2] *P-Channel MOSFET*. Si3447CDV. Rev. 08-Feb-17. JIANGSU CHANGJIANG ELECTRONICS TECHNOLOGY. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Vishay-Intertech-SI3447CDV-T1-E3\\_C145421.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Vishay-Intertech-SI3447CDV-T1-E3_C145421.pdf).
- [3] *N-Channel MOSFET*. CJ3134K. Rev. F, Aug, 2015. Vishay Siliconix. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Changjiang-Electronics-Tech-CJ-CJ3134K\\_C110100.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Changjiang-Electronics-Tech-CJ-CJ3134K_C110100.pdf).
- [4] *Step Down Regulator*. AN<sub>S</sub>Y8009. Rev. 0.71. Silergy Corp. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Silergy-Corp-SY8009BABC\\_C79314.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Silergy-Corp-SY8009BABC_C79314.pdf).
- [5] *Cívka*. YSPI0530-2R2M. Rev. 01. Sunlord. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Sunlord-MWSA0603-2R2MT\\_C112126.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Sunlord-MWSA0603-2R2MT_C112126.pdf).
- [6] *Step Up Regulator*. FP6276A. Rev. 0.6. FEELING TECHNOLOGY. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Feeling-Tech-FP6276AXR-G1\\_C83308.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Feeling-Tech-FP6276AXR-G1_C83308.pdf).

- [7] *Linear charger*. SE9017. Rev. 12/11/2009. SEAWARD ELECTRONICS. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Seaward-Elec-SE9017-HF\\_C115752.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Seaward-Elec-SE9017-HF_C115752.pdf).
- [8] *N-Channel MOSFET*. AO3400A. Rev. 3: Dec 2011. Alpha Omega Semicon. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Alpha-Omega-Semicon-AOS-A03400A\\_C20917.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Alpha-Omega-Semicon-AOS-A03400A_C20917.pdf).
- [9] *USB to UART*. CP2102N. Rev. 1.5. Silicon Labs. 2021-1-3. URL: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/cp2102n-datasheet.pdf>.
- [10] *NPN TRANSISTOR*. MMBT3904. Rev. C.Oct.2012. Alpha Omega Semicon. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Changjiang-Electronics-Tech-CJ-MMBT3904\\_C20526.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Changjiang-Electronics-Tech-CJ-MMBT3904_C20526.pdf).
- [11] *ESP32-WROVER*. ESP32-WROVER-B. Rev. 1.6. Espressif Systems. 2021-1-3. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover-b\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover-b_datasheet_en.pdf).
- [12] *ESP32-WROVER*. ESP32-WROVER-B. Rev. 2020-04-27. Espressif Systems. 2021-1-3. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf).
- [13] *ESP32-Core-Board<sub>s</sub>ch*. ESP32-Core-Board-V2<sub>s</sub>ch. Rev. september 14, 2016. Espressif Systems. 2021-1-3. URL: [https://dl.espressif.com/dl/schematics/ESP32-Core-Board-V2\\_sch.pdf](https://dl.espressif.com/dl/schematics/ESP32-Core-Board-V2_sch.pdf).
- [14] *Pseudo Static RAM*. ESP-PSRAM32. Rev. june 2017. spressif Systems. 2021-1-3. URL: [http://gamma.spb.ru/images/pdf/esp-psram32\\_datasheet\\_en.pdf](http://gamma.spb.ru/images/pdf/esp-psram32_datasheet_en.pdf).
- [15] *9-axis sensor*. BMX055. Rev. November 7, 2014. Bosch Sensortec. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Bosch-Sensortec-BMX055\\_C94022.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Bosch-Sensortec-BMX055_C94022.pdf).

- [16] *RTC*. M41T62. Rev. October 2015. STMicroelectronics. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/STMicroelectronics-M41T62Q6F\\_C113207.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/STMicroelectronics-M41T62Q6F_C113207.pdf).
- [17] *Dioda*. SD103AWS. Rev. 07. SKTechnology. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/SK-SD103AWS\\_C109204.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/SK-SD103AWS_C109204.pdf).
- [18] *Krystal*. NX3215SA. Rev. 01. Nihon Dempa Kogyo. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Nihon-Dempa-Kogyo-NX3215SA-32-768KHZ-STD-MUA-14\\_C156244.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Nihon-Dempa-Kogyo-NX3215SA-32-768KHZ-STD-MUA-14_C156244.pdf).
- [19] *Digital pressure sensor*. SPL06-007. Rev. 01-2017.5.17. Goertek. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1907081118\\_Goertek-SPL06-007\\_C233787.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1907081118_Goertek-SPL06-007_C233787.pdf).
- [20] *IR receiver*. IRM-H936. Rev. August 20, 2010. Everlight. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1912111437\\_Everlight-Elec-IRM-H936-TR2\\_C264266.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1912111437_Everlight-Elec-IRM-H936-TR2_C264266.pdf).
- [21] *IR transmitter*. IR19-21C/TR8. Rev. 07-20-2005. Everlight. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Everlight-Elec-IR19-21C-TR8-AQL\\_C142316.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Everlight-Elec-IR19-21C-TR8-AQL_C142316.pdf).
- [22] *SCHOTTKY BARRIER RECTIFIER*. DO-214AC/SMA. Rev. 01. MDD Jiangsu Yutai Elec. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1903061001\\_MDD-Jiangsu-Yutai-Elec-SS54\\_C22452.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1903061001_MDD-Jiangsu-Yutai-Elec-SS54_C22452.pdf).
- [23] *Hall-effect sensor*. MH253. Rev. 1.04. Magnesensor Technology. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Magnesensor-Tech-MST-MH253ES0\\_C114369.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Magnesensor-Tech-MST-MH253ES0_C114369.pdf).
- [24] *LED*. WS2812B-Mini-V3. Rev. 3.0/23-1-2019. Worldsemi. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2005251033\\_Worldsemi-WS2812B-Mini\\_C527089.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2005251033_Worldsemi-WS2812B-Mini_C527089.pdf).
- [25] *Inductance to Digital Converter (LDC) for Inductive Sensing*. LDC1614. Rev. MARCH 2018. Texas Instruments. 2021-1-3. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1614.pdf>.

- [26] *Gyro and Accelerometer*. MPU6050. Rev. 3.4/08.19.2013. InvenSense. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/TDK-InvenSense-MPU-6050\\_C24112.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/TDK-InvenSense-MPU-6050_C24112.pdf).
- [27] *3-Axis Magnetic Sensor*. QMC5883L. Rev. Feb. 20163. InvenSense. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/QST-QMC5883L-TR\\_C192585.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/QST-QMC5883L-TR_C192585.pdf).
- [28] *Low drop linear regulator*. LD39200. Rev. July 2017. STMicroelectronics. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1808280153\\_STMicroelectronics-LD39200PU33R\\_C222192.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1808280153_STMicroelectronics-LD39200PU33R_C222192.pdf).
- [29] *Hall-effect sensor*. SS360NT. Rev. July 2016. Honeywell. 2021-1-3. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Honeywell-SS360ST\\_C111924.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/Honeywell-SS360ST_C111924.pdf).
- [30] *Konstrukce cívký k LDC*. Texas Instruments. URL: [https://www.ti.com/lit/an/snoa930b/snoa930b.pdf?ts=1614377965173&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsite%252Fsearch%252Fdocs%252Funiversalsearch.tsp%253FsearchTerm%253DLDC](https://www.ti.com/lit/an/snoa930b/snoa930b.pdf?ts=1614377965173&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsite%252Fsearch%252Fdocs%252Funiversalsearch.tsp%253FsearchTerm%253DLDC).
- [31] *Konstrukce cívký k LDC*. Texas Instruments. URL: [https://www.ti.com/lit/an/slya048a/slya048a.pdf?ts=1614368129537&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FFFDC2214](https://www.ti.com/lit/an/slya048a/slya048a.pdf?ts=1614368129537&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FFFDC2214).
- [32] *Konstrukce cívký k LDC*. Texas Instruments. URL: [https://www.ti.com/lit/an/snoaa04/snoaa04.pdf?ts=1614378318596&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLDC1614-Q1](https://www.ti.com/lit/an/snoaa04/snoaa04.pdf?ts=1614378318596&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLDC1614-Q1).

## Ostatní internetové zdroje

- [33] RoboticsBrno. *projekt ALKS*. URL: <https://github.com/RoboticsBrno/ArduinoLearningKitStarter/projects> (cit. 03. 01. 2021).

- [34] Jan Mrázek. *KiKit*. URL: <https://github.com/yaqwsx/KiKit> (cit. 03. 01. 2021).
- [35] Tomáš Vavrinec. *Postav si svého prvního robota*. URL: <https://github.com/TVavrinec/SOC-text/blob/master/SOC.pdf> (cit. 03. 01. 2021).
- [36] *JLCPCB*. URL: <https://jlcpcb.com/parts> (cit. 03. 01. 2021).
- [37] *DDM Helceletova Brno Robotárna*. URL: <https://helceletka.cz/robotarna/> (cit. 03. 01. 2021).

# Seznam obrázků

3.1	Fotografie obou testovaných motorů . . . . .	14
3.2	Rendery dveří trezoru E4 – vlevo přední pohled, vpravo zadní pohled . . . . .	15
4.1	Vzhled mechanismu zamykání u mechanické verze . . . . .	17
5.1	Blokové schéma logických částí BlackBoxu . . . . .	18
5.2	Blokové schéma rozvržení napájení . . . . .	20
5.3	Ochrana proti přepólování a zapínání . . . . .	21
5.4	Zapojení step-upu . . . . .	22
5.5	Zapojení stabilizátoru . . . . .	23
5.6	Měření napětí baterií . . . . .	24
5.7	Zapojení nabíječky . . . . .	25
5.8	Zapínání a ochrana proti přepólování . . . . .	26
5.9	Zapojení čipů BMX055, MPU6050 a QMC5883 . . . . .	28
5.10	Zapojení čipu SPL06 . . . . .	30
5.11	Zapojení čipu M41T62 . . . . .	31
5.12	Zapojení konektoru pro A9G . . . . .	32
5.13	Zapojení IR vysílače a přijímače . . . . .	33
5.14	Zapojení řízení motoru . . . . .	34
5.15	Vzhled enkodéru na desce . . . . .	35
5.16	Zapojení enkodéru . . . . .	35
5.17	Řez varianty E4 . . . . .	36
5.18	Schematické zobrazení cívky a terčíku [31] . . . . .	37



5.19	Zapojení čipu LDC1314 na desce trezoru . . . . .	38
5.20	Render západky . . . . .	39
5.21	Ukládací úkosy . . . . .	40
5.22	Symetrie zarážky . . . . .	40
6.1	Trpasličí trezor . . . . .	44
B.1	Render varianty E2 . . . . .	52
B.2	Render varianty E3 . . . . .	53
B.3	Render poslední mechanické varianty . . . . .	54
B.4	Fotografie jednoho z kopyt na silikonovou formu . . . . .	55
B.5	Pevnostní simulace těla, nahoře je pohled zepředu a dole pohled zezadu . . . . .	56
B.6	Simulace sestavy . . . . .	57
B.7	Simulace napětí v západce při kroutícím momentu 5000 N · mm, což na rameni 48 mm znamená sílu působící na kolík 104 N . . . . .	58
B.8	Zobrazení deformace, pro lepší zobrazení je deformace zdesetinásobená . . . . .	58
B.9	Vzhled reliéfu cívky . . . . .	59
B.10	Vzhled desky s kruhem WS2812 a snímáním tlakové desky . . . . .	60
B.11	Vzhled hlavní desky . . . . .	61
B.12	Propojení jednotlivých systémů – schéma . . . . .	62
B.13	Zapojení zdroje – schéma . . . . .	63
B.14	Zapojení nabíjecího obvodu – schéma . . . . .	64
B.15	Zapojení ESP32 a programátoru – schéma . . . . .	65
B.16	Zapojení senzorů BMX055, MPU6050, QMC5883, M41T62, SPL06 a konektoru pro A9G – schéma . . . . .	66
B.17	Zapojení IR komunikace, motoru a enkodéru – schéma . . . . .	67
B.18	Zapojení LDC1614 – schéma . . . . .	68
B.19	Zapojení LED WS2812 na desce trezoru – schéma . . . . .	69