

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](#)), ale pokročilejším studentům již tento hardware nemusí stačit. Proto jsem začal pracovat na 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 started working on a new system that has more options.

Keywords

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

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 9 |
| 1 Vývoj | 10 |
| 1.1 První trezor | 10 |
| 1.2 První mechanická varianta | 12 |
| 1.3 Druhá elektronická varianta | 13 |
| 1.4 Druhá mechanická varianta | 15 |
| 1.5 Třetí elektronická varianta | 17 |
| 1.6 Dnešní mechanická varianta | 19 |
| 1.7 Dnešní elektronická varianta | 20 |
| 2 Mechanická varianta | 22 |
| 2.1 Úvodní shrnutí | 22 |
| 2.2 Popis jednotlivých součástek a důvody konkrétního tvaru . . . | 23 |
| 3 Elektronická varianta | 24 |
| 3.1 Úvodní shrnutí | 24 |
| 3.2 Mechanika tlakové desky | 25 |
| 3.3 Zpětná západka | 29 |
| 3.4 Úkosy | 33 |
| 3.5 Elektronika tlakové desky | 35 |
| 3.6 LED kruh | 39 |
| 3.7 Napájení | 40 |
| 3.8 Nabíjení | 45 |

| | | |
|------|--|-----------|
| 3.9 | ESP32 a jeho programátor | 46 |
| 3.10 | Senzorika | 49 |
| 3.11 | Ovládání západky a IR komunikace | 54 |
| 3.12 | Krabice | 58 |
| | Závěr | 59 |
| | Přílohy | 60 |
| | Literatura | 60 |
| | Seznam obrázků | 61 |
| | Seznam tabulek | 62 |

Úvod

Na konci července roku 2019 jsem dostal za úkol navrhnut výrobek pro děti na příměstský tábor pobočky D.D.M.Helceletova Brno, Robotárny. Požadavkem byla jednoduchá a levná konstrukce, kterou děti zvládnou sestavit za pár dní a ve zbytku času tábora si stihnu vyzkoušet základy programování s využitím tohoto výrobku. Z tohoto důvodu jsem začal vyvíjet elektronicky řízený trezor. Původní vize trezoru se ale rychle změnila na poměrně univerzální zařízení, kterému zůstala schopnost sloužit jako trezor. Také se přidala čistě mechanická varianta pro mladší účastníky táborů.

Trezor byl pro mě poněkud změnou oproti mé dřívějším práci, která se do té doby vždy točila kolem různých létajících nebo častěji jezdících robotů s velkým důrazem na orientaci v prostoru. Trezor je oproti těmto vozítkům daleko statictější a protože se sám nepohybuje má jeho vnímání prostoru jiné požadavky. Vozítka také vždy počítaly s jistou univerzalitou senzoriky i mechaniky zatímco trezor by měl být upravitelný jen po stránce softwaru. Další odlišností je menší konkurence která je u různých robotických stavebnic poměrně veliká jak si můžete přečíst v má dřívější práci [Postav s svého prvního robota](#).

Kapitola 1

Vývoj

Na konci července roku 2019 jsem dostal za úkol navrhnout výrobek pro děti na příměstský tábor pobočky D.D.M.Helceletova Brno, Robotárny. Požadavkem byla jednoduchá a levná konstrukce, kterou děti zvládnou sestavit za pár dní a ve zbytku času tábora se jim ukážou základy programování s využitím tohoto výrobku. Proto, a také pro poněkud nižší věk účastníků, jsme se s vedoucím Robotárny, Jiřím Váchou, rozhodli jít cestou „trezoru“. To byl rozdíl oproti našim běžným výrobkům, které většinou měly možnost pohybu, ale byly pro děti náročnější na výrobu a pochopitelně i cena u nich šla nahoru.

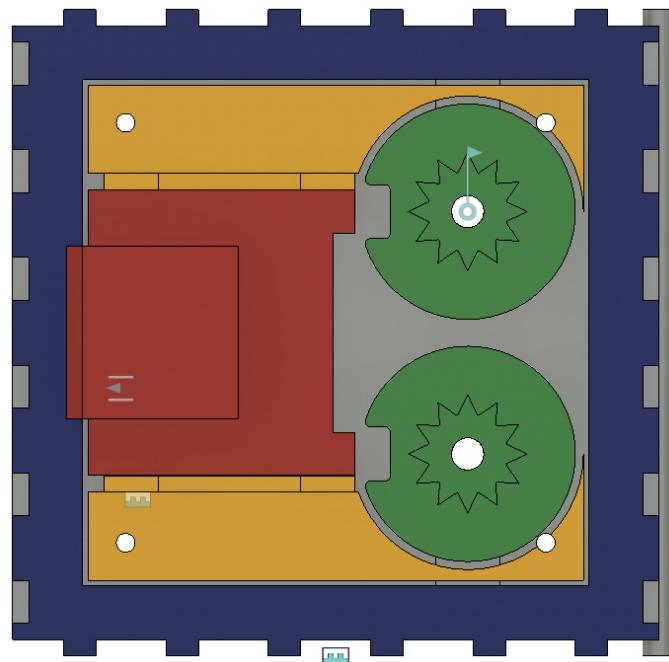
1.1 První trezor

Dal jsem se tedy do kreslení trezoru. Pochopitelně ne nějaké nedobytné pevnosti, ale malé krabičky, na které se dají ukazovat principy elektronických zámků. Jelikož se mi na podobné výrobky osvědčila jako materiál překližka, navrhoval jsem vše s úmyslem výroby z překližky za využití laseru. Konstrukce byla z velké části přizpůsobená dostupné elektronice, kterou jsem měl k dispozici a která musela být stejně použita poněkud odlišně, než jak byla zamýšlena. Neměl jsem totiž čas, a vlastně ani rozpočet, navrhovat a především vyrábět konkrétní elektroniku pro výrobek, který se měl

předložit dětem ani ne za týden. Použil jsem tedy starší univerzální desku ALKS ([Arduino Learnikg Kit Starter](#)), kterých jsem měl dostatečnou zásobu. Ovládací prvky, dvě tlačítka, dva potenciometry a tři barevné ledky, tedy celý ALKS 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 velice 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. Tato konstrukce měla kvůli uspěchanému návrhu spoustu problémů. Většinou však šlo o problémy, které by nebylo těžké odstranit a nebylo tedy třeba předělávat celý koncept návrhu. 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.

1.2 První mechanická varianta

První čistě mechanická varianta vznikla začátkem srpna 2019, brzy po výše popsané elektronické variantě. Měla stále poměrně klasický vzhled trezoru – zamykatelná skříňka, která obsahovala dvě kódovací kola, která ovládala možnost pohybu jednoduché západky. Na rozdíl od její elektronické předchůdkyně bylo vše zajímavé uvnitř dveří. Také byla určena jako základ pro případný upgrade na elektronickou variantu. Na podobné vylepšení mělo stačit odstranění kódovacích kol a přidělání elektronické části. Toto sice fungovalo obстоje, zároveň i jako motivace, ale kvůli pozdější změně konceptu mechanizmu tento nápad padl. Tato varianta se také ukázala jako nevhodná (kvůli přílišným nárokům na přesnost) pro stavbu s malými dětmi, pro které byla určena jakožto předstupeň k variantě elektronické (která vyžaduje i znalosti nebo alespoň ochotu k učení se programování).

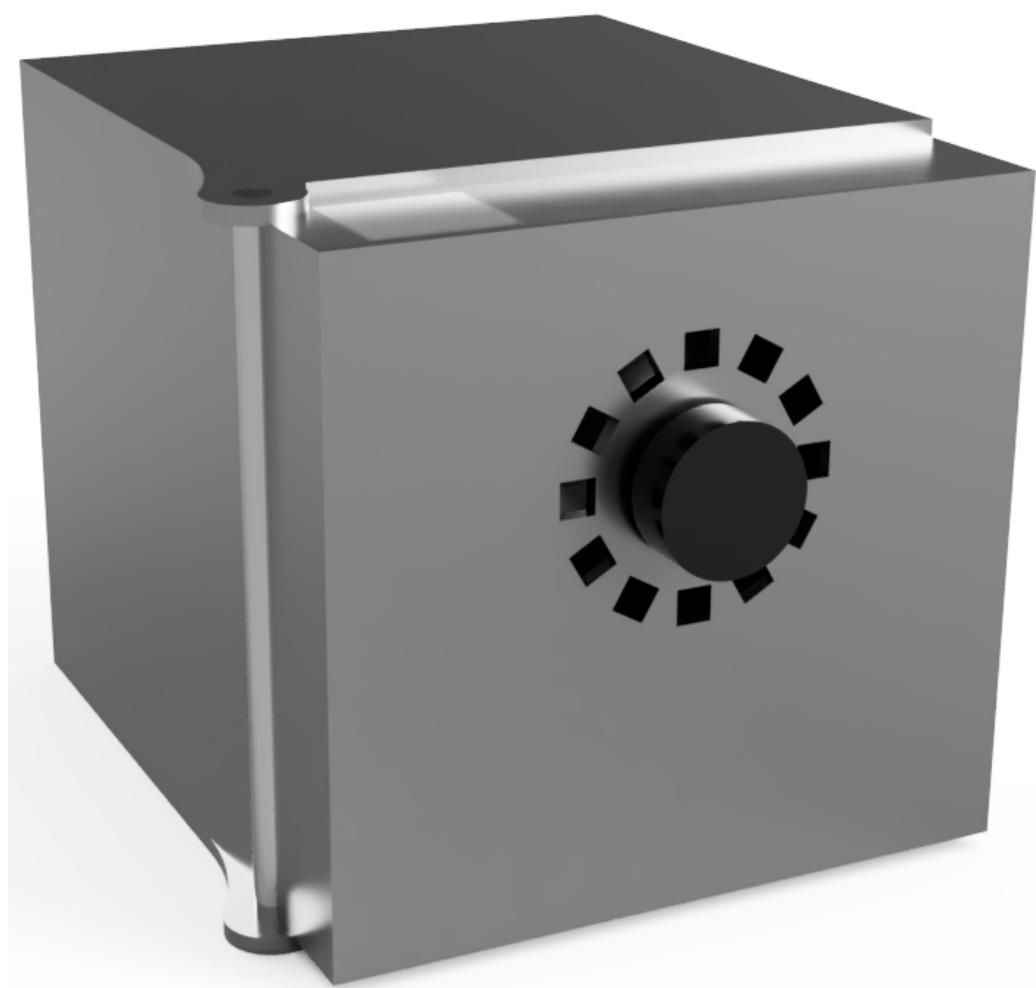


Obrázek 1.1: Zelená barva značí kódová kola, červená západku, modrá pevnou část trezoru a žluté díly tvoří distanci

1.3 Druhá elektronická varianta

Druhá verze elektronické varianty testovala použitelnost signalizačního kruhu, o dvanácti ledkách, kolem uprostřed dveří umístěného enkodéru. Jako základ trezoru jsem použil první mechanickou variantu, ze které jsem odstranil zamykací kola a doplnil ji o servo, řídící elektroniku a již zmíněný kruh ledek a enkodér. Vzhledem k tomu, že se jednalo jen o hrubý prototyp, neměl specializovanou desku a elektroniku tedy tvořila jen změť kabelů a kousek univerzální desky, takže nemám elektronickou variantu tohoto zapojení.

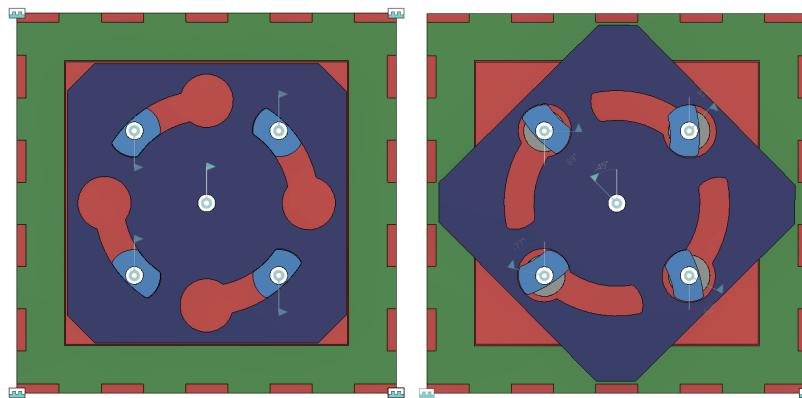
Trezor měl pro komunikaci s uživatelem tedy kruh o dvanácti ledkách a jeden vstupní prvek, enkodér s tlačítkem. Ovládání tedy bylo od tohoto odvozené a trezor se zmáčknutím zapnul a tlačítko pak dál sloužilo jako potvrzování výběru. Člověk tak mohl pomocí enkodéru vybírat jedinou rozsvícenou ledku a stiskem potvrdit, vstupní kód tedy mohl vypadat například jako čas, a uživatel ho zadal na kruhu odvozeném od ručičkových hodin, proto právě dvanáct ledek. 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.



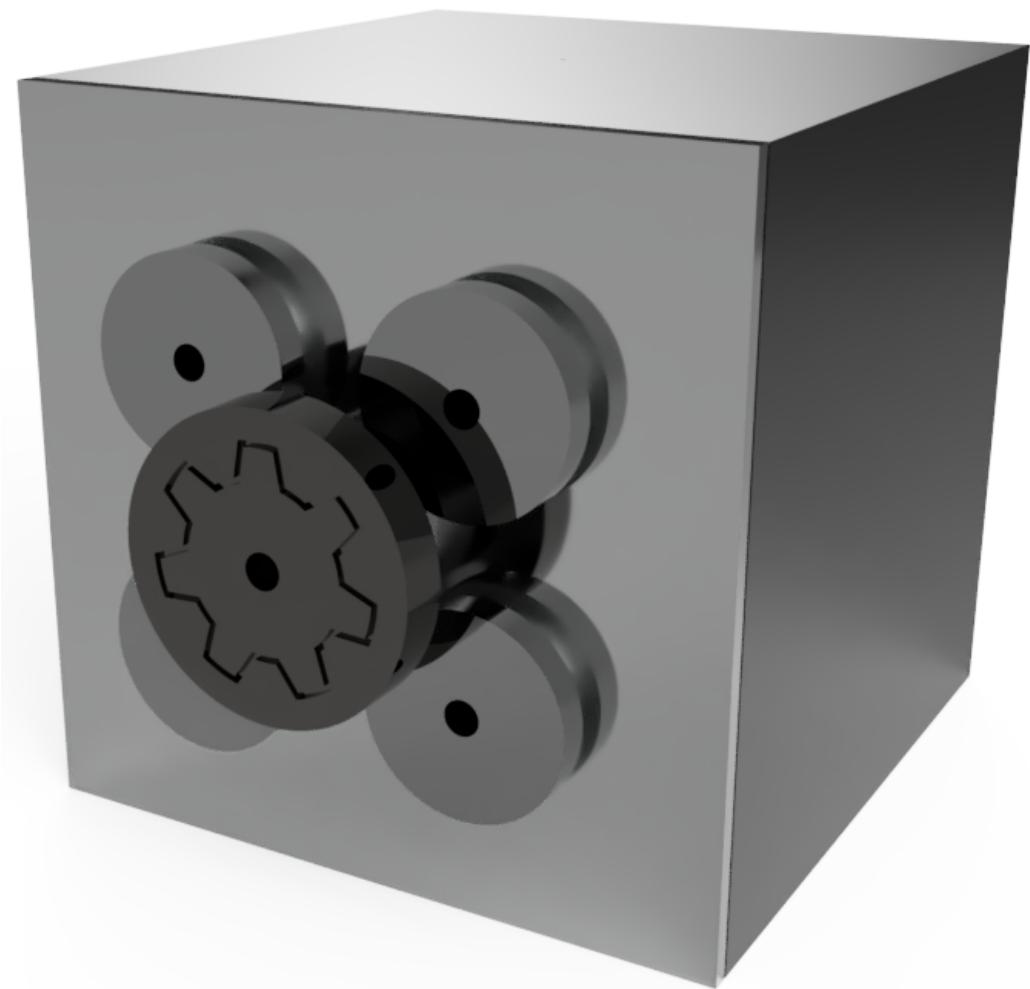
Obrázek 1.2: render varianty E2

1.4 Druhá mechanická varianta

Druhá mechanická varianta má oproti první verzi daleko větší počet možných kombinací. Ovládá se pěti koly, z nichž čtyři zajišťují heslo a páté otáčí s rotační západkou, která drží dveře na svém místě. Tato varianta taky přichází s možností dveře úplně oddělit od skříně trezoru. To by při využití jako trezor, který má za úkol jen ochraňovat svůj obsah, sice nepřinášelo žádný velký užitek, ale při mém využití, spíše jako herní prvek než trezor, to může být užitečné.



Obrázek 1.3: zamýkací mechanizmus varianty M2

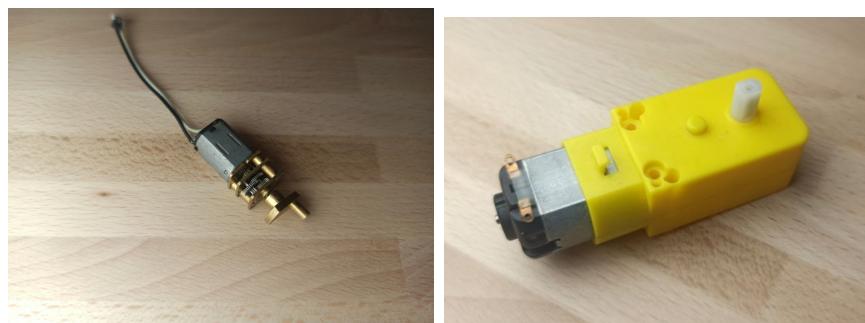


Obrázek 1.4: render varianty M2

1.5 Třetí elektronická varianta

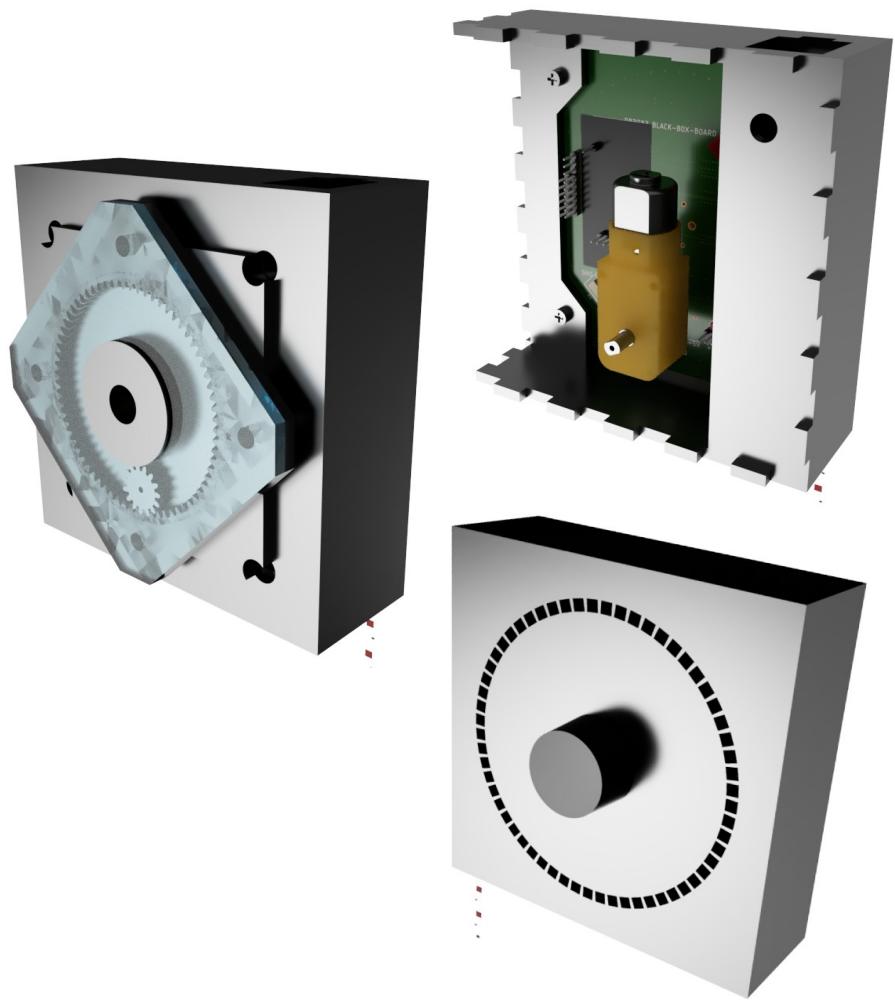
Třetí verze elektronické varianty do značné míry vycházela z předchozí, druhé verze, a dále na ní stavěla. Asi nejvýraznější změna bylo navýšení počtu ledek z dvanácti (hodiny) na šedesát (minuty), což pochopitelně znamenalo i zvětšení kruhu. Na desku se ale přidaly i nové funkcionality, a to gyroskop pro možnost znalosti náklonu zařízení, akcelerometr pro znalost směru a velikosti zrychlování, magnetický kompas pro určení světových stran, RTC (Real Time Clock, hodiny reálného času), pro znalost přesného času a také GPS pro možnost určení své polohy. Také jsem použil, po vzoru mechanické varianty, rotační západku, což znamenalo, že na stejný trezor se daly použít jak mechanické tak elektronické dveře.

Tato verze měla dvě podverze, které se lišily motorem.



Obrázek 1.5: fotografie obou testovaných motorů

Přes velké množství funkcí jsem, kvůli několika věcem, ale opět koncept přepracoval. Hlavním důvodem změn bylo náročné uložení rotační západky, které vyžadovalo ozubený věnec a několik dalších tisknutých dílů.



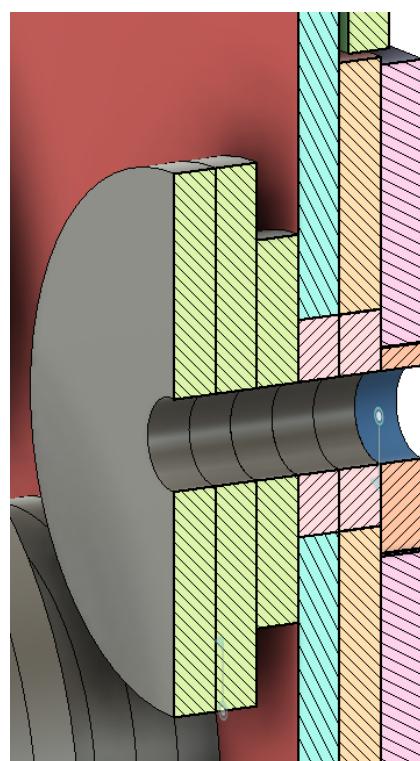
Obrázek 1.6: render varianty E3

1.6 Dnešní mechanická varianta

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



Obrázek 1.7: render varianty M3



Obrázek 1.8: Řez kódovacím kolem

1.7 Dnešní elektronická varianta

Čtvrtá elektronická varianta byla co se elektroniky týče přímým pokračováním předchozí verze. Hlavní dvě věci, co se změnily, bylo ovládání a princip zamykání.

Princip mechanizmu

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 1.9: rendery trezoru E4

Shrnutí změn oproti minulé verzi

Trezor získal možnost komunikace pomocí IR, pro možnost 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. Tento programátor má možnost úplně si odpojit napájec-

ní, a to v rámci šetření energie, když ho trezor nevyužívá, a zároveň možnost zákazu přeprogramování. Podstatnou změnou také bylo rozdelení elektroniky do dvou různých desek, protože na jedné by nebyl dostatek místa. Jedna deska tak obsahuje ledkový kruh a čip LDC1614 nebo LDC1314 se čtyřmi cívkami, které měří vzdálenost tlakové desky. Na druhé desce pak bylo vše ostatní, tedy procesor, akcelerometr, gyroskop, magnetický kompas, RTC (Real Time Clock, hodiny reálného času), barometr, IR vysílač a přijímač, magnetický enkodér, programátor, řešení napájení, řízení motoru a nabíječka.

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, která vyplnila vnitřek kruhu ledek. Zbytek ovládání víceméně přetrval, jen kvůli nedostatku času a pandemií způsobenému nedostatku součástek, trezor přišel o GPS. Na druhou stranu získal barometr s rozlišením schopným detektovat změnu výšky o půl metru.

Napájení

Předchozí verzím sloužila jako napájení powerbanka. Ta však kladla poměrné velké omezení, dokázala poskytnout proud pouze jedné ampéry, a proto jsem jí nahradil vlastním zdrojem, dvěma bateriemi 18650. To však samozřejmě znamenalo nutnost vlastního řešení stabilizace napětí, díky čemuž trezor dostal stepup, který spíná napětí z 3,5 V až 4,2 V na 5 V, a původně stepdown, později lineární stabilizátor, který poskytoval 3,3 a 5 V. Trezor také dostal vlastní nabíječku, aby pro nabíjení baterií stačilo připojit kabel, stejně jako třeba u mobilu.

Kapitola 2

Mechanická varianta

2.1 Úvodní shrnutí

Dnešní mechanická varianta se zamyká pomocí rotační západky a čtyř kódovacích kol, která blokují západku v zamčeném stavu.

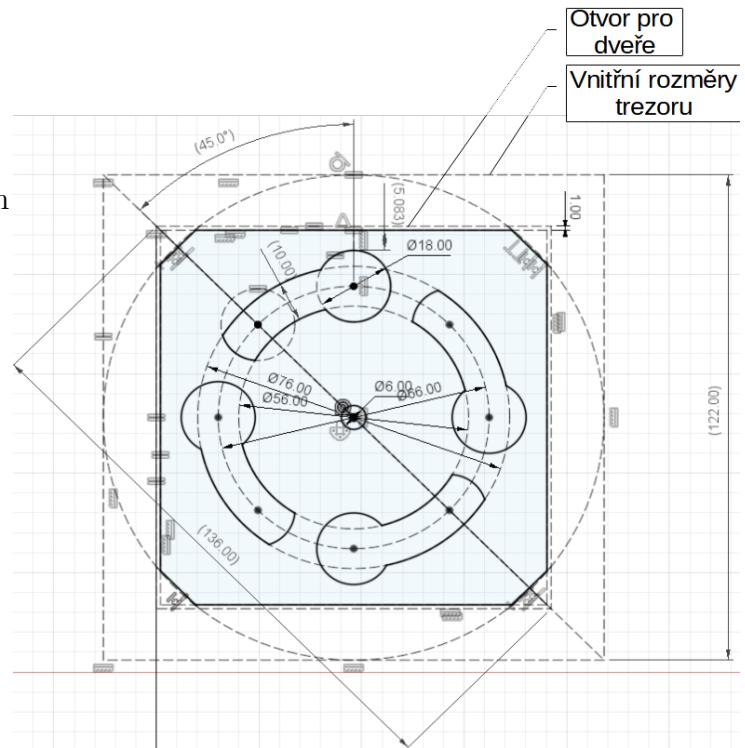
Princip mechanizmu viz obrázek 1.3.

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

2.2 Popis jednotlivých součástek a důvody konkrétního tvaru

Geometrie západky

Trezor má tvar krychle a délku hrany má 128 mm, násobek šestnácti jsem zvolil kvůli jednoduché návaznosti na dřívka, dřevěná dřívka s obdélníkovým průřezem 3x16 mm nebo 2x16 mm. Protože je trezor vyroben z překližky o síle 4 mm, jsou jeho vnitřní rozměry o 4 mm na každé straně menší (takže 122 mm).



Obrázek 2.1: náčrt

Kapitola 3

Elektronická varianta

3.1 Úvodní shrnutí

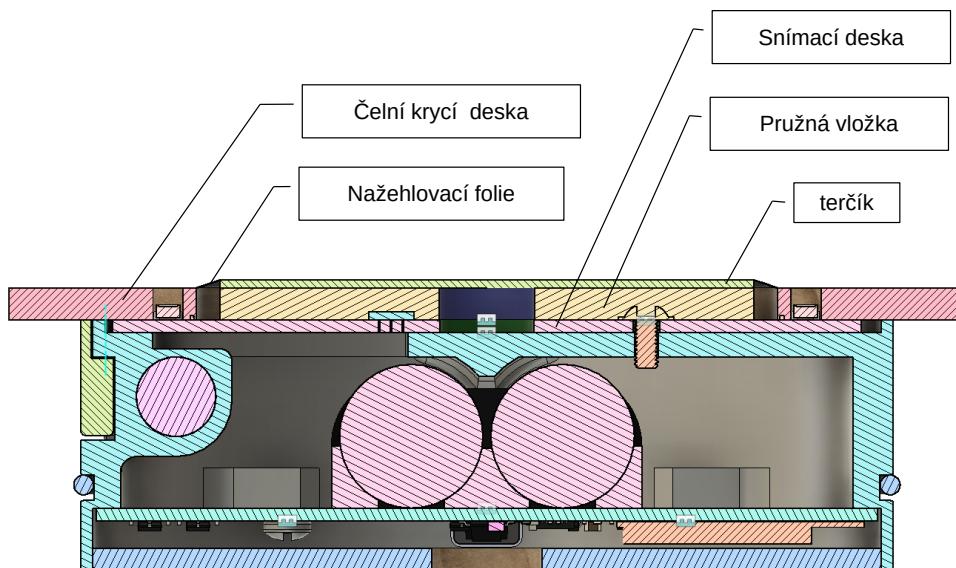
Dnešní vzhled elektronické varianty se zamyká pomocí mechanizmu bajonetu a magneticky řízené zpětné západky. Elektronika je pak vybavena čipem ESP32, který obsahuje dva procesory Xtensa LX6, WiFi a bluetooth. Dále je trezor vybaven čipem BMX055 nebo dvojicí čipů MPU6050 a QMC5883 které poskytují gyroskop, akcelerometr a magnetický kompas. Dále je zde SPL06, barometr s přesností měření 0,06 hPa, což umožňuje rozeznat změnu nadmořské výšky o polovinu metru. Další systém trezoru je IR s přijímačem a vysílačem, který je zde pro možnost jednoznačné identifikace dveří, ale pochopitelně může sloužit i pro jiný učel. Deska je také vybavena hodinami reálného času a má vlastní programátor pro usnadnění programování. Vede ESP32 je zde asi nejvýznamnějším čipem LDC1614, případně LDC1314, který umožňuje funkci tlakové plochy.

| | | |
|--------------------------|--|---|
| ESP32 | dva procesory Xtensa LX6, WiFi a bluetooth | |
| BMX055 | gyroskop, akcelerometr, magnetický kompas | možno nahradit dvojicí čipů MPU6050 a QMC5883 |
| SPL06 | barometr | rozlišení až 0,06hPa což umožňuje rozeznat změnu nadmořské výšky o 0,5m |
| 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, pokud není využíván |

Tabulka 3.1: shrnutí elektronického vybavení

3.2 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. Terčík je proto od snímací desky oddělen 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.

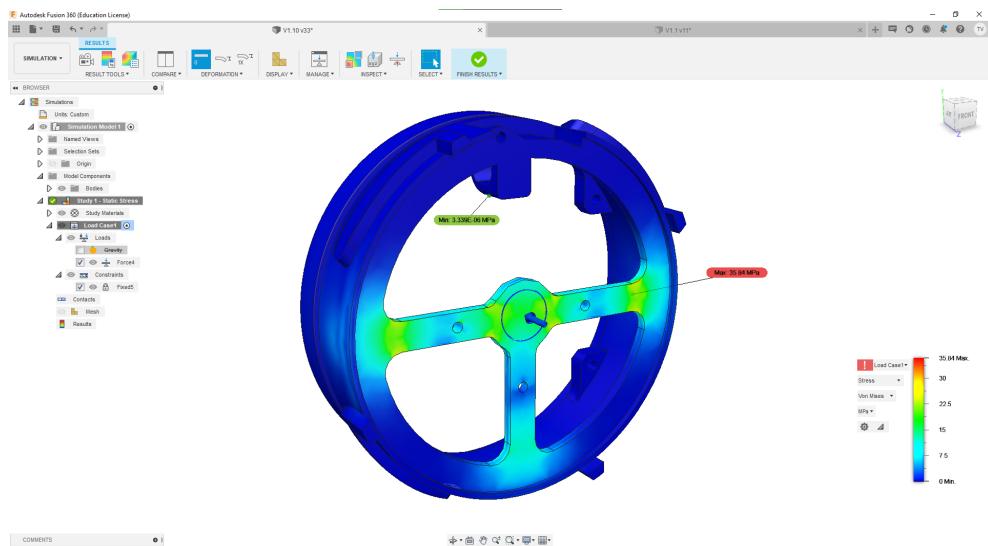


Obrázek 3.1: řez varianty E4

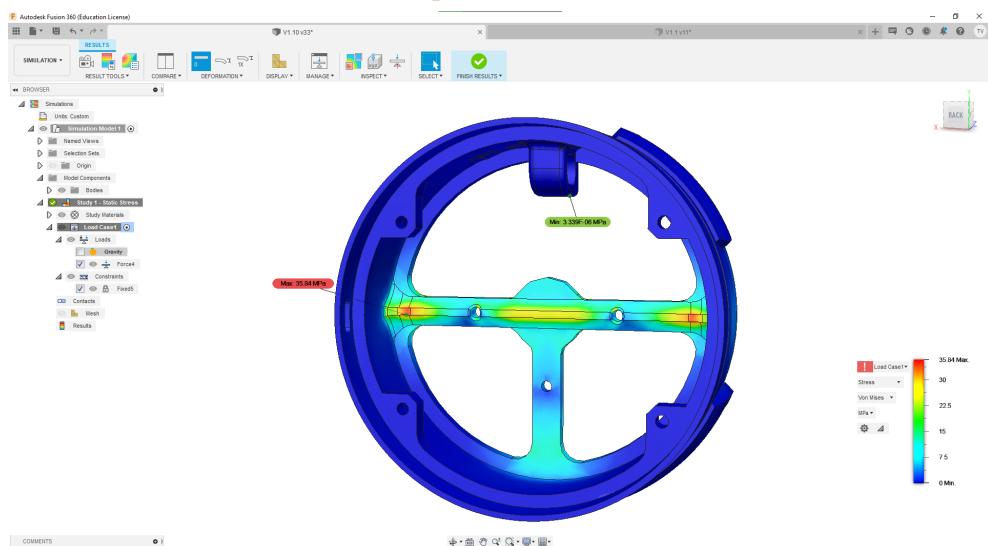
Tlaková deska zárově počítá s možností působení síly o velikosti až 500 N, což samozřejmě zároveň znamená, že tělo dveří tomuto zatízení musí odolat. Vzhledem k tomu, že nemám možnost vyrobit tělo z kovu a jsem odkázán na 3D tisk a laserovou řezačku, a zároveň chci mít dveře co možná nejmenší,

musel jsem napočítat kritické části napřesno. Z tohoto důvodu jsem v programu Fusion 360, ve kterém jsem trezor vyvíjel, dělal simulaci, kterou zde přikládám.

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.

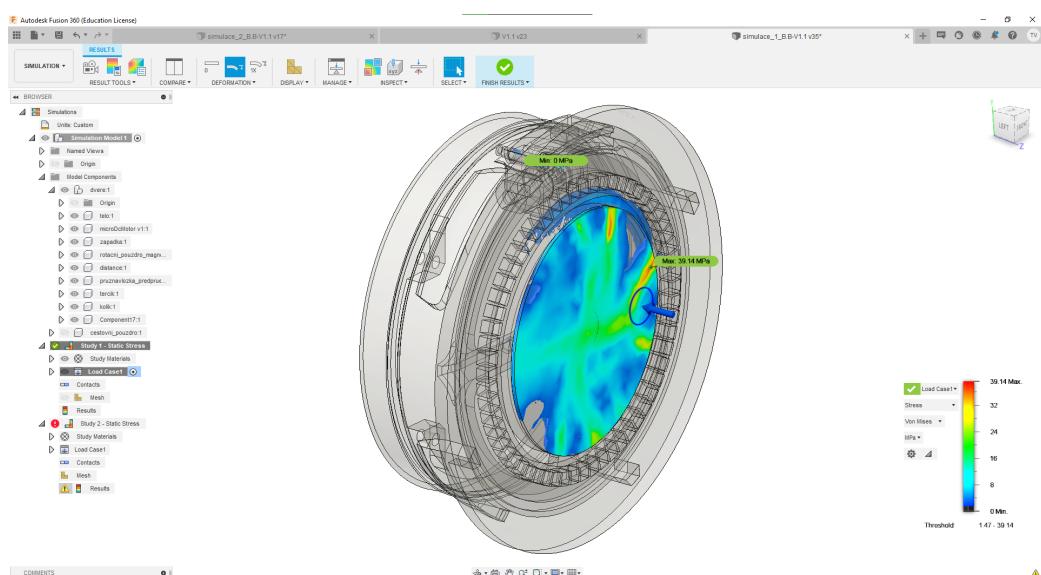


Obrázek 3.2: pevnostní simulace těla



Obrázek 3.3: pevnostní simulace těla 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 3.4: 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.

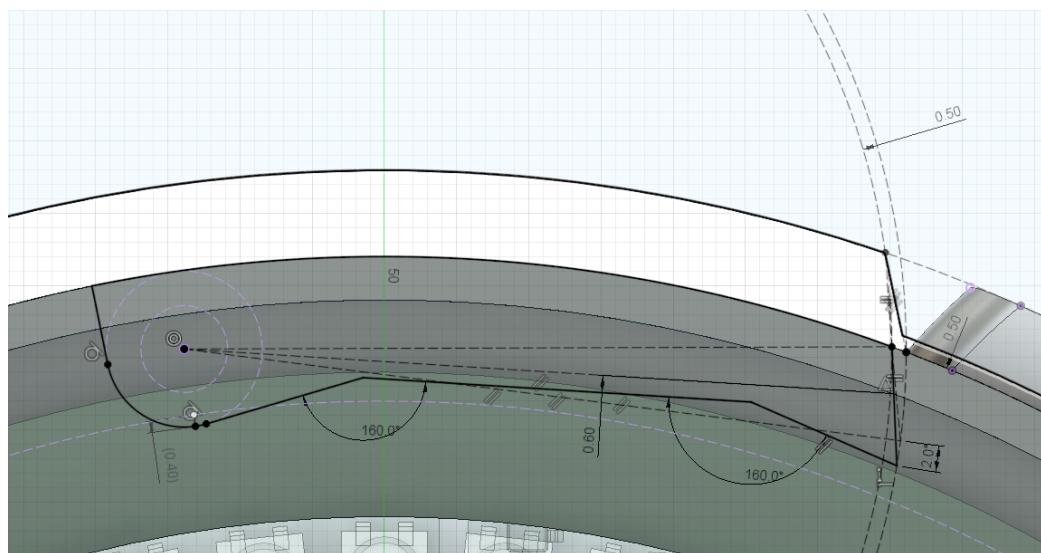
3.3 Zpětná západka

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 3.5: render západky

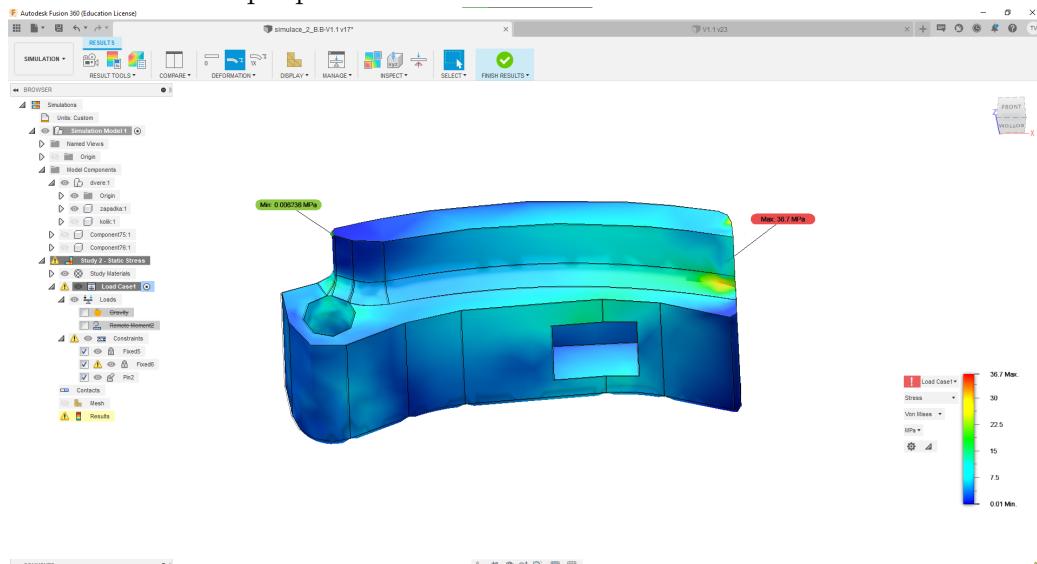
Sklon čela Aby při zamčení západka doléhala na otvor trezoru a zároveň neměla příliš velkou vůli, je potřebné správně navrhnut tvar západky. Jednou z možností je navrhnut čelní plochu jako část válcové plochy. Tuto plochu také musí být zároveň v otvoru pro dveře. Sice teoreticky není problém ji na FDM tiskárně vytisknout, pro západku, a na laseru vypálit v otvoru, ale výsledná plocha je hlavně u tisku nevhledná a je třeba jí obrousit do požadovaného vzhledu. Obrousit válcovou plochu je však náročnější než plochu rovnou, zvlášť v otvoru trezoru, a je tedy pro mě výhodnější navrhnut tuto plochu jako rovinu a jen ji správně sklonit. Špatně navržený sklon by se projevil buď přílišnou vůlí, což by znamenalo, že by se dveře v trezoru viklaly a nebo by západka nebyla samosvorná, což by se projevilo možností trezor otevřít větší silou i bez jeho odemčení.



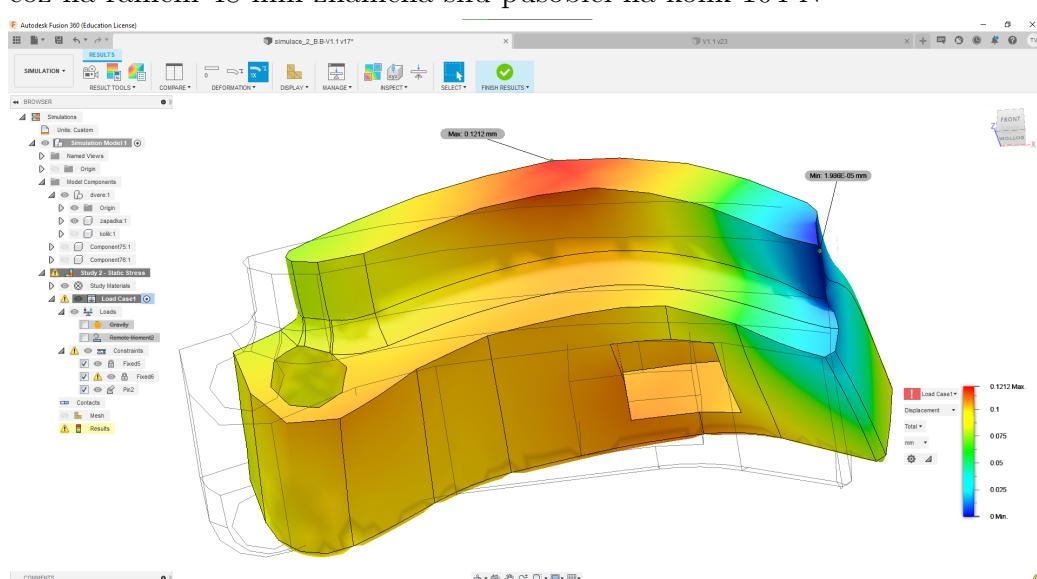
Obrázek 3.6

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.

simulace odolnosti proti násilnému vniknutí Vzhledem k tomu, že západka je součást, která při zamčení brání otevření, je třeba, aby odolala při pokusech dveře otevřít bez odemčení.



Obrázek 3.7: simulace napětí v západce při kroutícím momentu 5000 N.mm což na rameni 48 mm znamená sílu působící na kolík 104 N



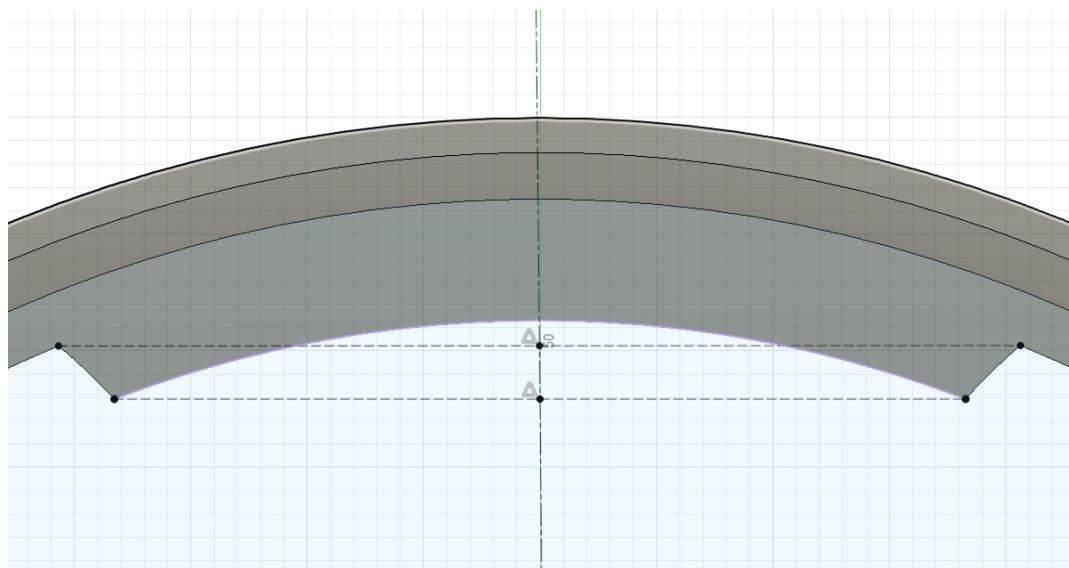
Obrázek 3.8: zobrazení deformace, pro lepší zobrazení je deformace zdeskresitnásobená

3.4 Úkosy



Obrázek 3.9: ukládací 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.

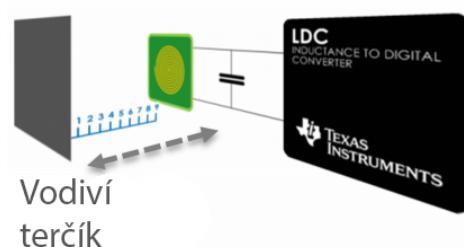


Obrázek 3.10: symetrie zarážky

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 výhodné při stavbě s dětmi, kvůli zmenšení počtu chyb, kterých se děti můžou při stavbě dopustit, a ztráta vedení není tak zásadní.

3.5 Elektronika tlakové desky

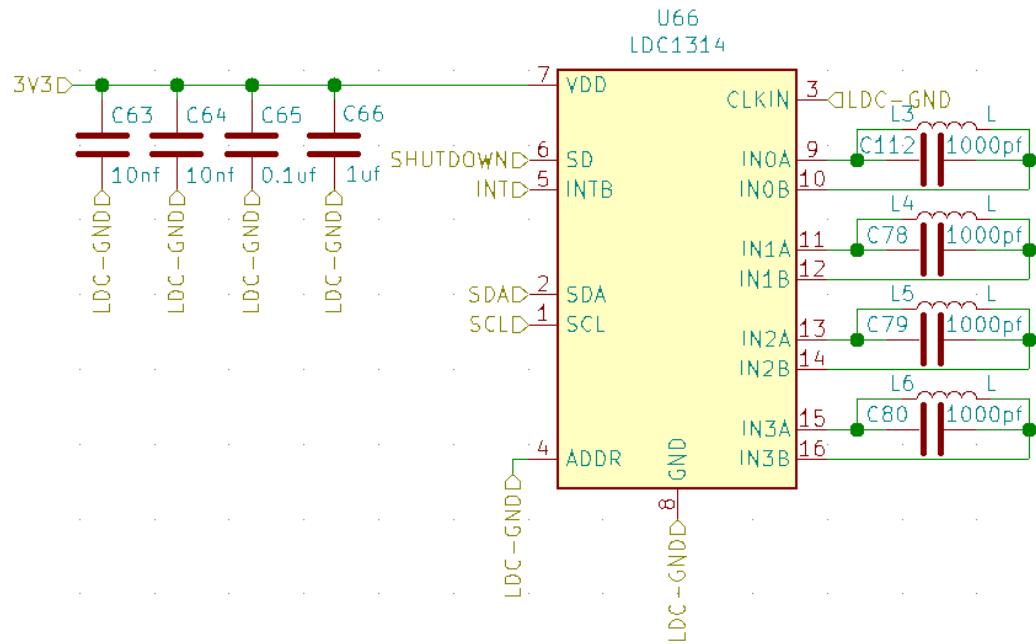
Tlaková plocha se díky pružné podložce a nažehlovací fólii může ve všech směrech naklánět, a díky tomu se při používání mění vzdálenost od čtyř snímacích cívek. Tlaková plocha je primárně terčík, který slouží jako jádro cívky, která zvětšuje svou indukčnost, když se terčík přibližuje a naopak.



Obrázek 3.11: schematické zobrazení cívky a terčíku

Pro snímání indukčnosti používám čip [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.

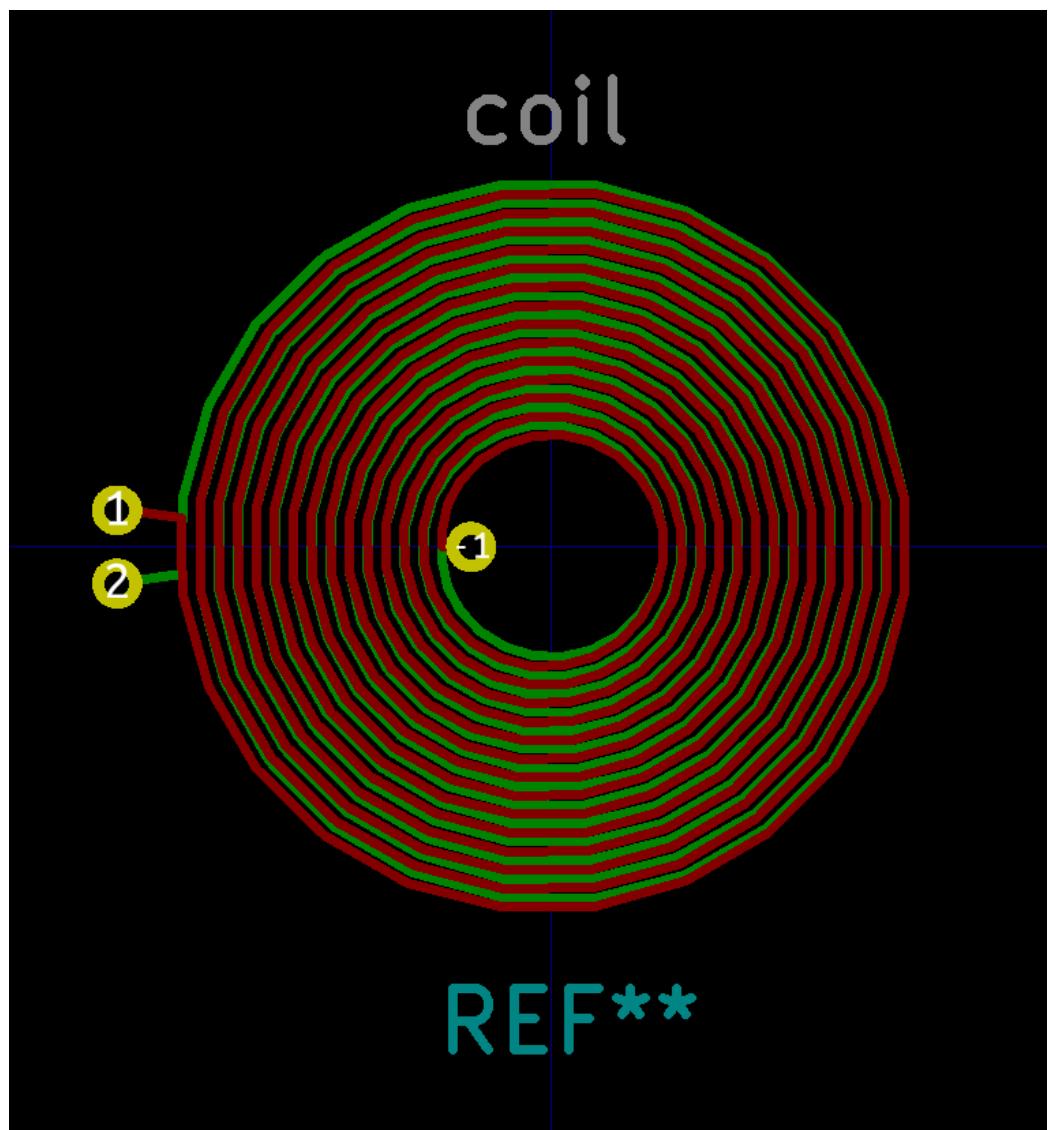
Čip LDC komunikuje po sběrnici I2C, která umožňuje komunikaci jednoho mastera (čip, který řídí komunikaci) s až 128 slavy (čipy, které přijímají příkazy od mastra a pouze mu odpovídají). LDC také umožňuje volbu ze dvou I2C adres, aby se daly použít dva tyto čipy na jednom I2C, nebo aby se dala změnit případná kolize s jiným čipem, který by měl stejnou adresu.



Obrázek 3.12: zapojení čipu LDC1314 na desce trezoru

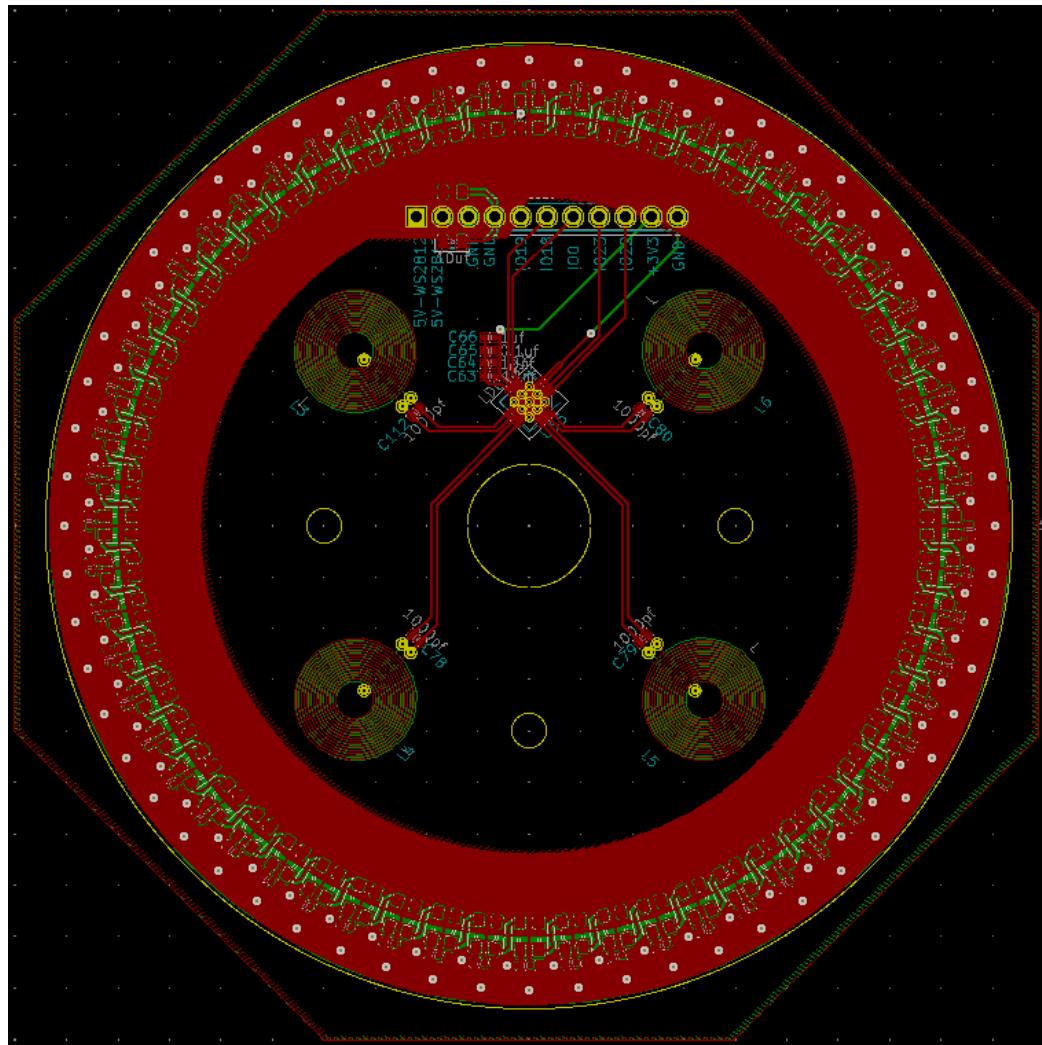
Cívky použité na trezoru jsou vyrobeny jako reliéf ve vrstvě mědi přímo na DPS. Jejich vzhled jsem navrhoval v simulátoru od Texas Instruments, vytvořeného konkrétně pro LDC čipy, a s pomocí popisů dřívějších aplikací, které firma Texas Instruments zveřejňuje.

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.



Obrázek 3.13: vzhled reliéfu cívky

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.



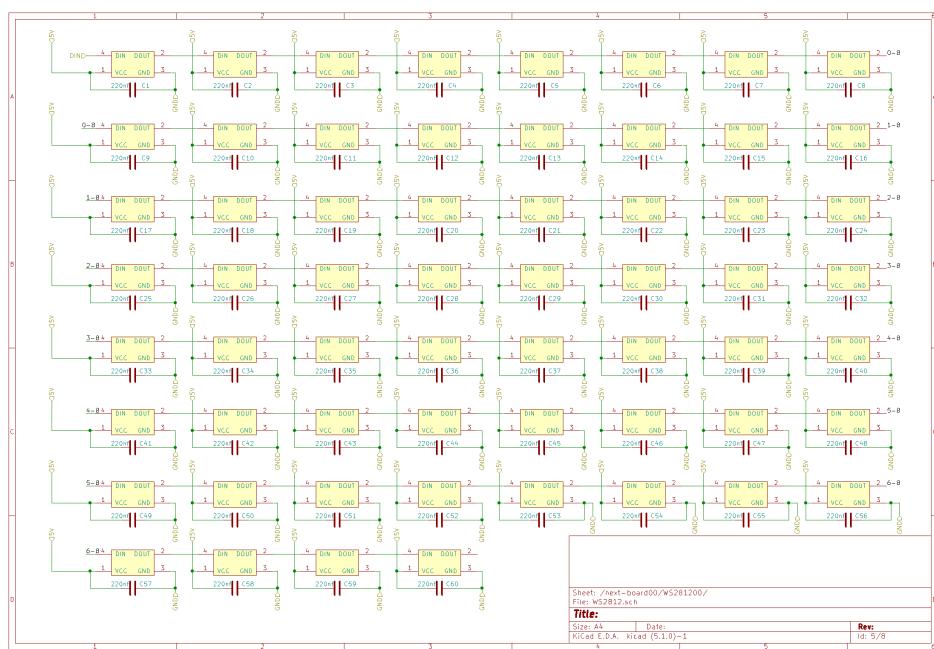
Obrázek 3.14: vzhled desky s kruhem WS2812 a snímáním tlakové desky

3.6 LED kruh

Trezoru vévodí světelný kruh. Slouží jako displej, na kterém trezor může zobrazovat vše, co potřebuje. Kruh obsahuje šedesát jednotlivých ledek 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 mm, což by znamenalo průměr kruhu alespoň 120 mm.

WS2812 není jen ledka, ale má v sobě logiku, díky které je možné je řetězit za sebe, takže na řízení celého kruhu stačí jen jeden pin na ESP32.

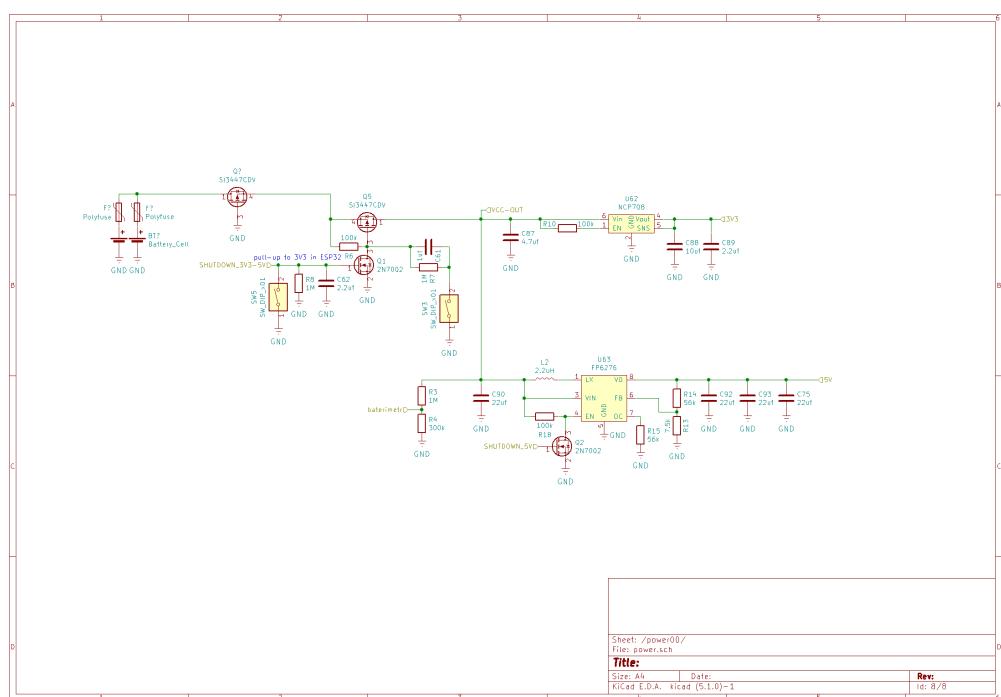
Ukázka PCB viz obrázek 3.14.



Obrázek 3.15: zapojení ledek WS2812 na desce trezoru – schéma

3.7 Napájení

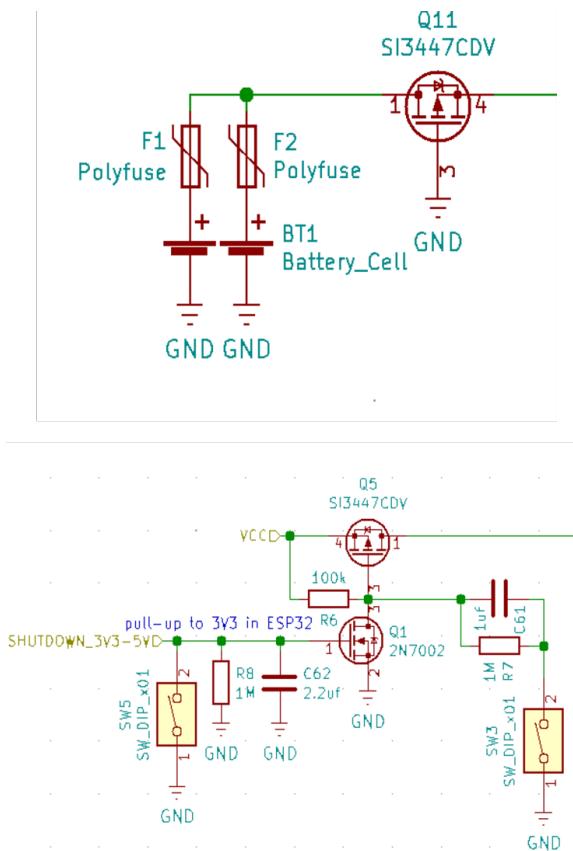
Jako napájení celého trezoru slouží dvě li-on baterie 18650. Napětí článků však nevyhovuje potřebám trezoru, a tak je na trezoru lineární stabilizátor NCP708, který zajišťuje napětí 3,3 V pro většinu systému. Kromě NPC708 je zde také step-up FP6276, který zajišťuje napájení 5 V sloužící primárně ledkám WS2812 a v druhá řadě motoru zámku.



Obrázek 3.16: zapojení zdroje

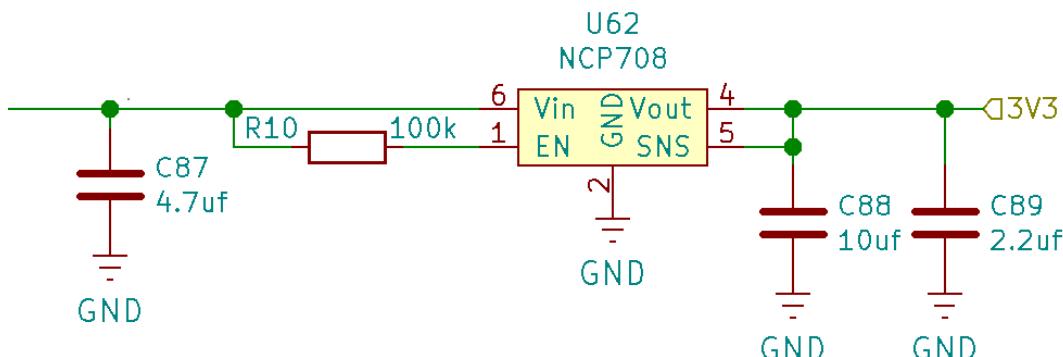
Zapínání Aby se trezor mohl vypnout a tak šetřit energii, je vybaven obvodem, který to zařizuje.

Při připojení článků se napětí dostane nejprve na polyfuse, které slouží jako ochrana proti nadproudům, například v případě, kdy uživatel připojí dva různě nabité články nebo jeden z nich přepóluje. Pokud se proud dostane skrz polyfuse, dostane se na tranzistor Q11, skrz který projde, jen pokud jsou články správně otočeny. Když se napětí dostane přes ochranu proti přepólování, dostane se na S tranzistoru Q5, skrz R6 na D Q1 a pak skrz R7 na obě strany C61. Pokud v takovéto situaci dojde ke stisku SW3, projde zem skrz C61 na G Q5. V tu chvíli se Q5 otevře na dostatečně dlouhou dobu, aby naběhla třívoltová větev a skrz pull-up (na obrázku je jen poznámka, ne reálná součástka) se zvedla napětí na G Q1 na téměř 3,3 V. Q1 se tak otevře a už trvale připojí GND na G Q5, trezor se tak zapnul. 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 G Q5 napětí, které Q5 uzavře a tak elektroniku opět vypne.



Obrázek 3.17: Ochrana proti přepólování a zapínání

Stabilizátor Stabilizátor NCP708 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 mém zapojení toto vypínání nepotřebuji, je pin EN připojen přes R10 přímo na napájecí napětí, a tak je stabilizátor trvale zapnut. Druhý pin, kterým se NCP708 liší od jiných stabilizátorů, je pin SNS, který je vrchní stranou děliče, který určuje výstupní napětí. Vzhledem k tomu, že je dělič nastaven právě tak, jak potřebuji, nemusím ho nijak upravovat, a tak je SNS napojen přímo na výstup stabilizátoru. Konkrétně NPC708 jsem vybral kvůli malému pádu napětí, který vyžaduje pro svůj provoz, typicky 0,25 V 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. Rád bych počítal s napětím ještě nižším, ale v nabídce JLCPCB jsem nenašel stabilizátor s nižším pádem napětí a zároveň dostatečným proudem.



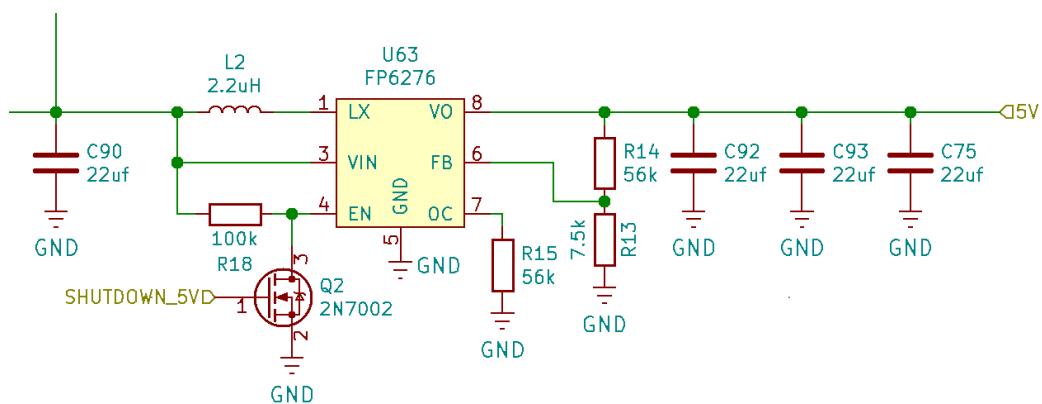
Obrázek 3.18: Zapojení stabilizátoru

Step-up

Step-up vysvětlení funkce Zapojení step-upu je o něco složitější než stabilizátor, který stačí připojit a funguje. Spínané zdroje využívají ke své funkci cívku, na které vzniká změna napětí. V případě step-up je to jeho růst. Proud cívku se nedá okamžitě zastavit a právě to se využívá. Když se

step-up spustí, připne výstup cívky k zemi. Ve chvíli, kdy je proud cívkou dostatečný, přepne se výstup cívky na výstup step-upu. Protože proud cívkou se nedá zastavit a cívka už proud teče, zvedne se napětí za cívkou, 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.

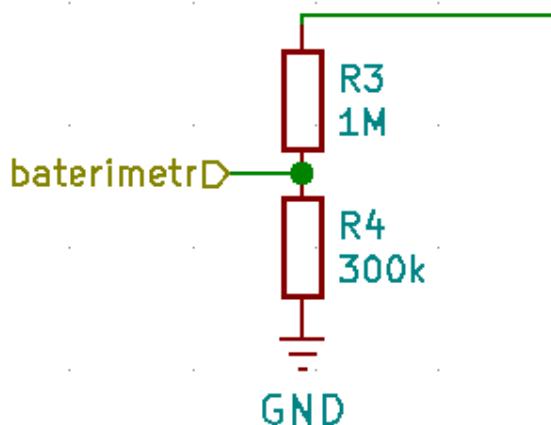
Step-up zapojení na desce trezoru Pro ovládání spínání step-upu jsem zvolil [FP6276](#). Tento obvod jsem zvolil, protože mi vyhovoval jak po stránce napětí tak po stránce efektivity a ceny a zároveň byl v nabídce firmy JLCPCB, u které jsem desky vyráběl a osazoval. Obvod jsem z většiny zapojil dle doporučení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



Obrázek 3.19: zapojení step-upu

Měření napětí baterek

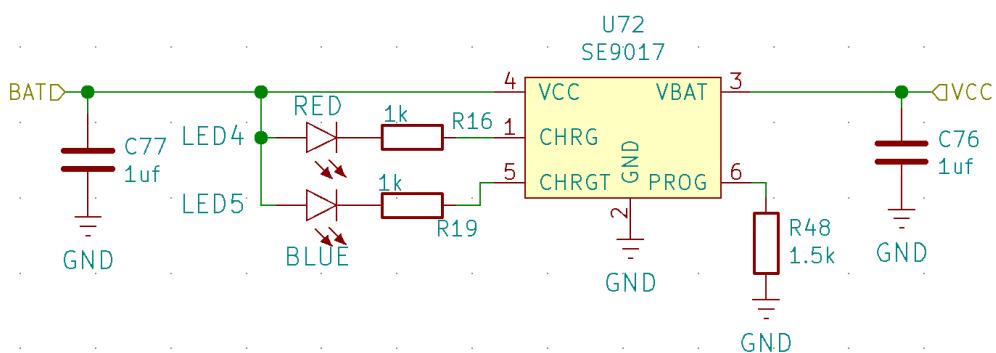
Aby trezor mohl zjistit že má vybité baterie, musí mít možnost jim měřit napětí. ESP32 obsahuje AD převodník takže není problém měřit napětí baterie i poměrně přesně, kde však problem nastává, je maximální napětí, které je schopen měřit, a to 1,1 V. ESP32 sice má možnost připojit k AD převodníku dělič, aby se na pin dalo přivést napětí až 3,3 V, ale to 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 nabitéch bateriích bude na výstupu děliče 0,97 V.



Obrázek 3.20

3.8 Nabíjení

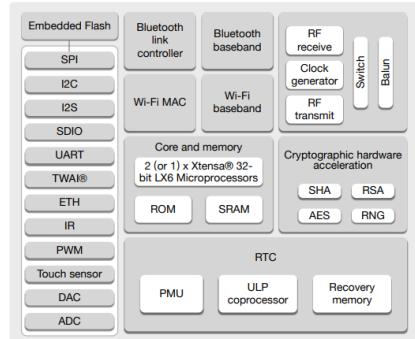
Aby se dveře trezoru nemusely pokaždě rozebírat kvůli nabíjení, je deska vybavena lineární nabíječkou SE9017. Tento nabíjecí obvod jsem zvolil z nabídky JLCPCB kvůli volitelnému nabíjecímu proudu, který jsem pomocí R48 stanovil na 700 mA, a také kvůli malému pouzdrovi a nízké ceně. Pro signalizaci, zda je baterie dobita, nebo zda se ještě dobíjí, jsou zde dvě LED LED4 a LED5. Když se baterie dobíjí, tak svítí LED4, která svítí červeně a když je baterie dobita, svítí LED5, která svítí modře.



Obrázek 3.21: zapojení nabíječky

3.9 ESP32 a jeho programátor

Mozkem celého trezoru je čip [ESP32-wrover](#).



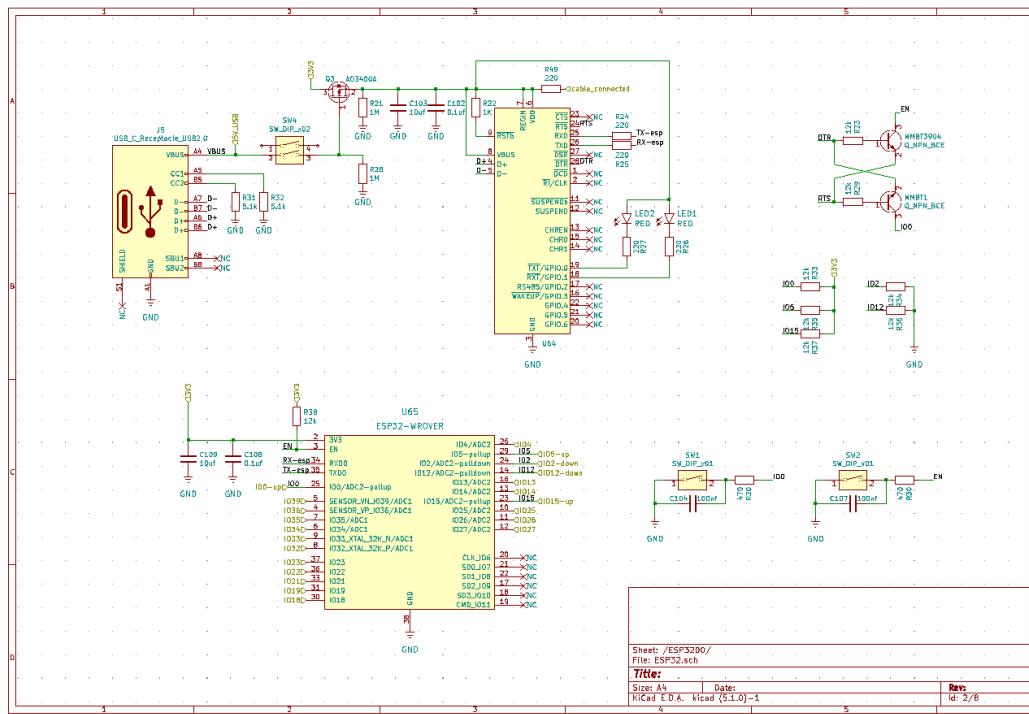
Obrázek 3.22: Ochrana proti přepólování a zapínání

mikrokontrolérů a v neposlední řadě také fakt, že s tímto čipem už nějakou dobu pracuji a tak ho již znám. Konkrétně wrover jsem pak zvolil kvůli dodatečné paměti PSRAM (Pseudo Static RAM), [ESP-PSRAM32](#).

ESP32 také vyžaduje mít při startu definované úrovňě na některých pinech, proto jsou zde čtyři pull-upy a dva pull-downy, které definují výchozí stav pinů IO0, IO2, IO12, IO15 a EN.

| | | |
|-------------|-----------------------------------|--|
| IO0 | ovládá boot procesoru | LOW při resetu ESP vstupuje do bootloaderu |
| IO2 | potvrzení pro spuštění bootu | LOW potvrzuje |
| IO12 | určuje 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 |

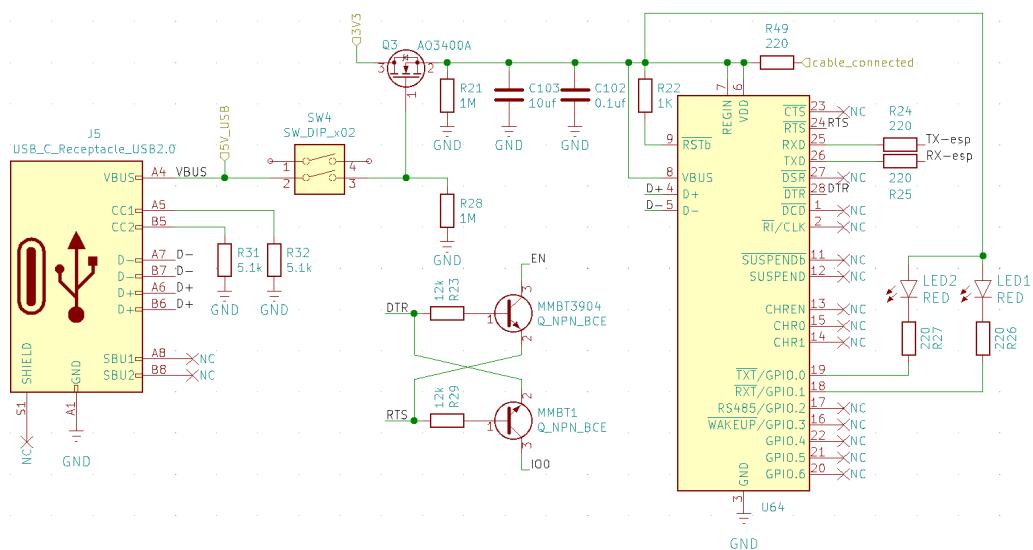
Tabulka 3.2: popis funkce pinů



Obrázek 3.23: zapojení ESP32

Programátor

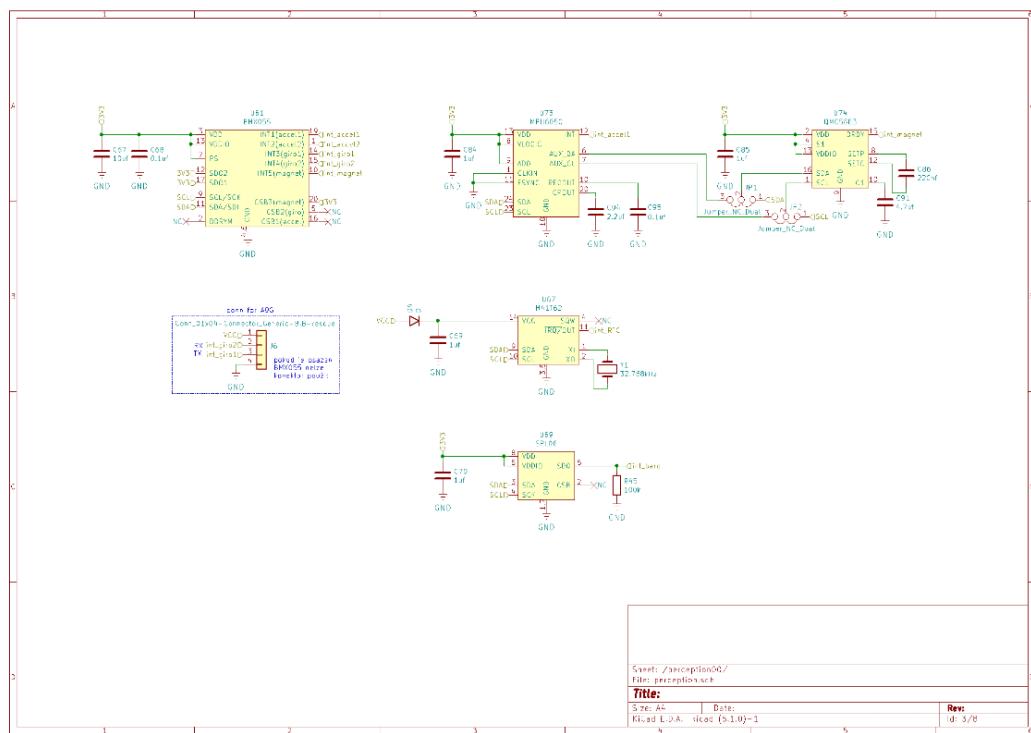
Aby mohl uživatel trezor jednoduše naprogramovat, je na desce převodník USB-UART, [CP2102](#). Protože však CP2102 není potřeba celou dobu provozu a protože trezor nemá k dispozici neomezený zdroj elektřiny, je převodník zapnut jen ve chvíli, kdy je připojeno USB-C, které slouží jak pro nabíjení, tak pro programování. Vypínání převodníku je zajištěno tranzistorem Q3, který je zároveň společně s DIP switchem SW4 využit pro možnost zákazu programování.



Obrázek 3.24: zapojení ESP32

3.10 Senzorika

Mezi podstatné funkce trezoru patří jeho vnímání veličin jako čas, jeho náklon nebo okolní tlak. Deska proto obsahuje tři nebo čtyři, v závislosti na dostupnosti součástek, čipy, které trezoru poskytují gyroskop, akcelerometr, magnetický kompas, barometr, RTC (Real Time Clock, hodiny reálného času) a také konektor pro připojení modulu GPS a QPRS. 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 3.25 komunikují s ESP hlavně pomocí sběrnice I2C. Pro možnost zrychlení reakcí má však každý z čipů také pin určený pro spuštění přerušení na procesoru.

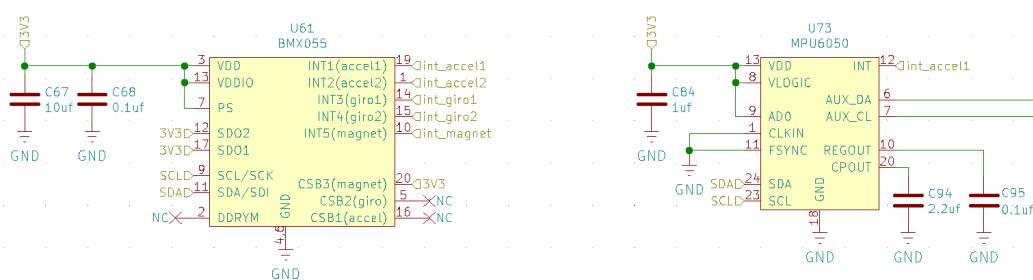


Obrázek 3.25: zapojení senzoriky čipu

To je užitečné z toho důvodu, že komunikaci na I2C řídí ESP. Pokud se tedy ESP nerozhodne zeptat se jiného čipu na jím naměřené data, čip mu to 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, a ESP pak jen přečte logickou hodnotu pinu a 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.

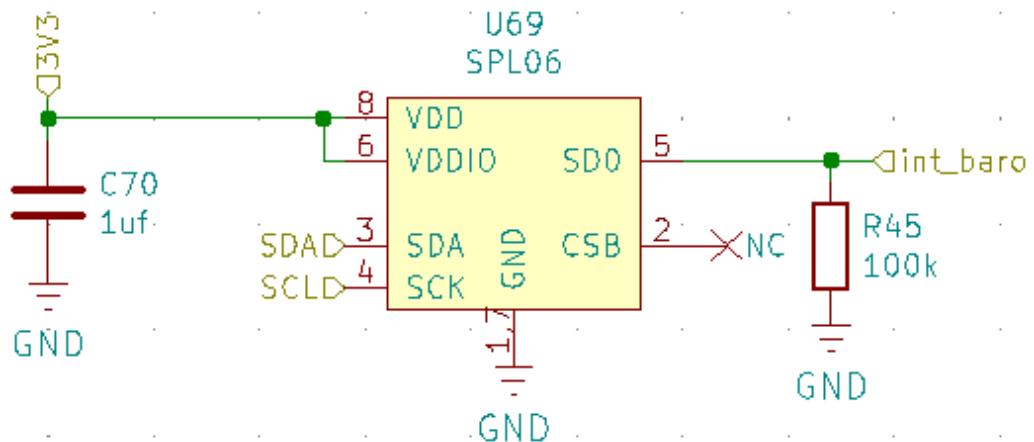
Na prvním prototypu verze E4 poskytoval akcelerometr, gyroskop i magnetický kompas čip [BMX055](#), protože však tento čip nebyl jednoduše dostupný, přidal jsem na další verzi i čipy [MPU6050](#), který obsahuje akcelerometr a gyroskop, a [QMC5883](#), který dodává magnetický kompas. Na desce je tak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



Obrázek 3.26: 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.

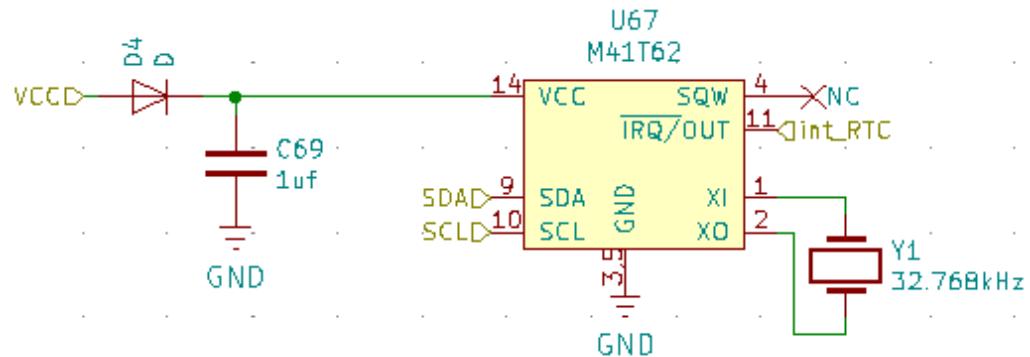
Od doby, kdy jsem z nabídky JLCPCB vybíral čip SPL06, JLCPCB doplnilo do své nabídky několik dalších barometrů a dneska bych tedy asi zvolil jiný. Každopádně tehdy jsem volil mezi dvěma čipy, které byly v nabídce JLCPCB dostupné a SPL06 měl vyšší rozlišení.



Obrázek 3.27: zapojení čipu SPL06

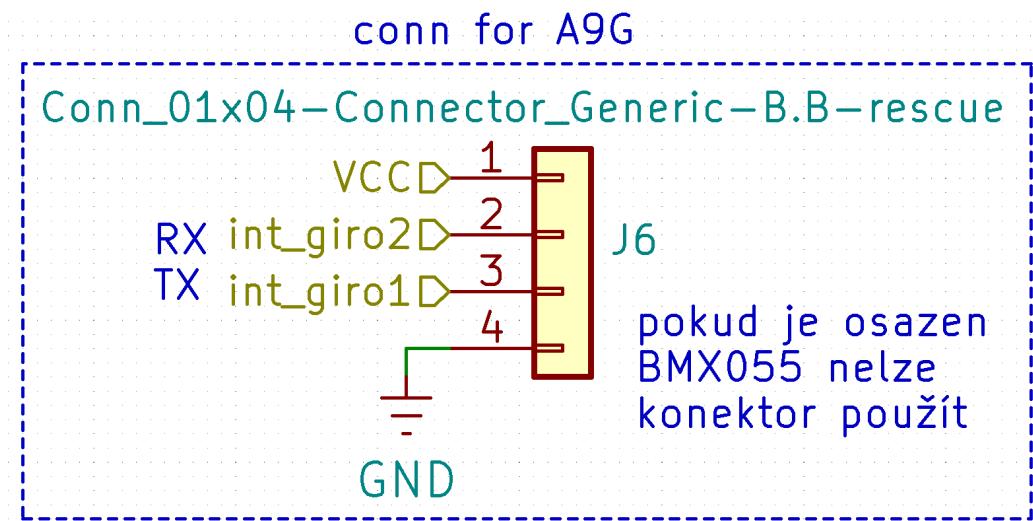
RTC Aby si trezor mohl zachovávat povědomí o aktuálním čase i ve chvíli, kdy je vypnut, má k dispozici čip [M41T62](#).

M41T62 je napájen přímo z baterie a je na ni napojen ještě před zapínacím obvodem, hned za ochranou proti přepólování.



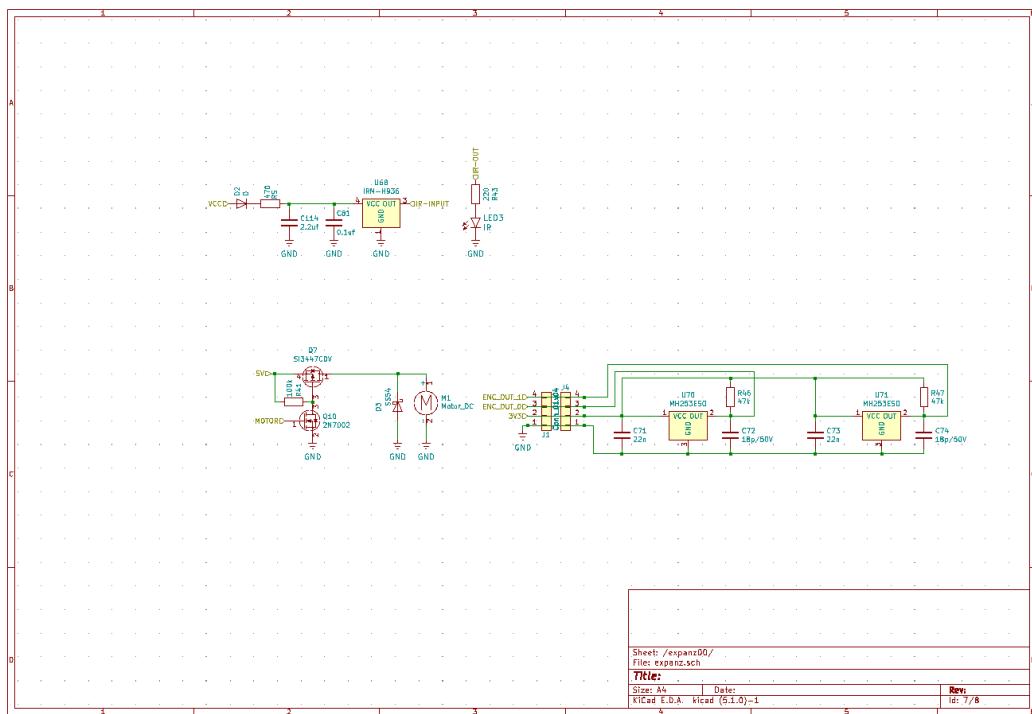
Obrázek 3.28: zapojení čipu M41T62

Konektor pro A9G 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, protože BMX055 využívá pět interrupt pinů, takže zbudou tři volné piny. Protože čip A9G komunikuje po sběrnici UART, na rozdíl od ostatních čipu na desce. Pro UART však potřebuji dva piny a ty kolidují s interrupt piny čipu BMX055, a proto se konektor dá použít, jen pokud není osazen BMX055.



Obrázek 3.29: zapojení konektoru pro A9G

3.11 Ovládání západky a IR komunikace

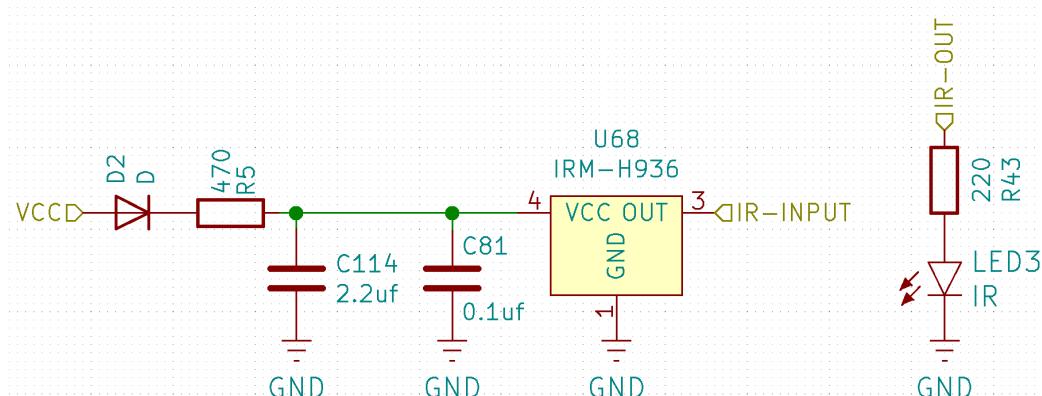


Obrázek 3.30: zapojení řízení motoru, enkodéru a IR komunikace

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 vše 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.

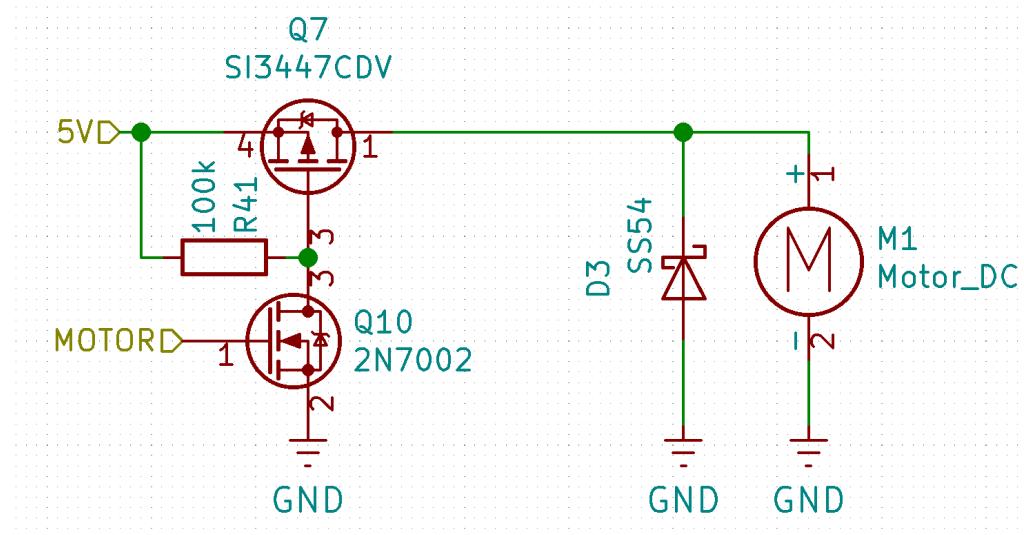
Jako IR přijímač jsem z nabídky JLCPCB zvolil [IRM-H936](#). V nabídce JLCPCB jsou v této době jen tři IR-přijímače, jeden z nich je THT a je namířen rovnoběžně s deskou a z tohoto důvodu nevyhovuje. Druhé dva jsou právě IRM-H936 a [IRM-H638](#), z nichž IRM-H936 má skoro poloviční výšku a širší úhel záběru, a to byl důvod jeho volby.

Druhou částí IR komunikace je vysílač, který je zajištěn jednoduše IR ledkou.



Obrázek 3.31: 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.

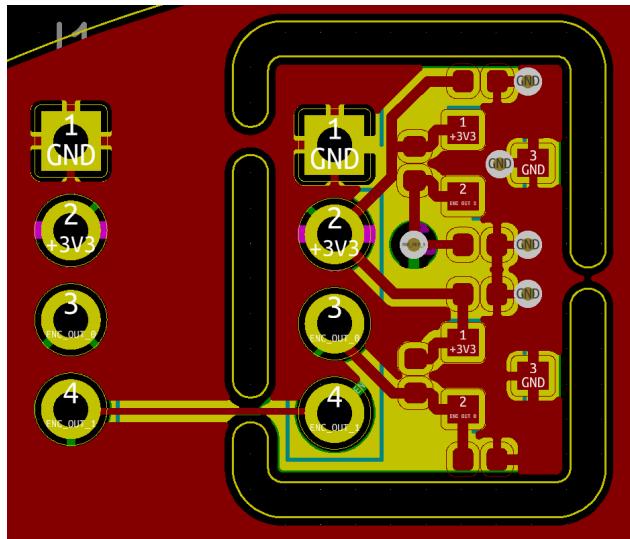


Obrázek 3.32: zapojení řízení motoru

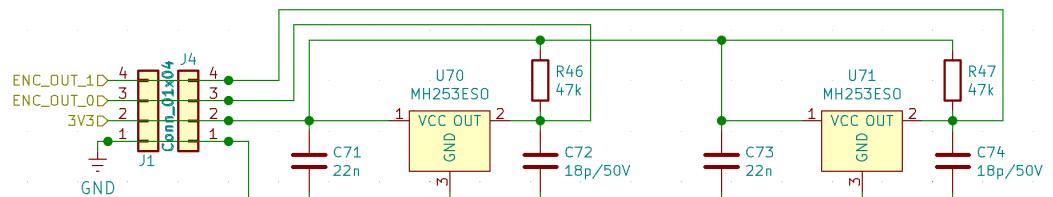
Enkodér Aby bylo možno motor polohovat do správné polohy, je nutné mít zpětnou vazbu o jeho poloze. Vzhledem k tomu, že motor otáčí magnetem, samo se nabízí využít magnetický enkodér. Proto jsou na desce dvě digitální Hallovovy sondy **MH253ESO**, které se překlopí podle toho, v jakém pólu se nachází.

Na desce s LED kruhem by sondy musely být na opačné straně než ledky, takže by se musely pájet ručně, protože JLCPCB 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.



Obrázek 3.33: vzhled enkorédu na desce

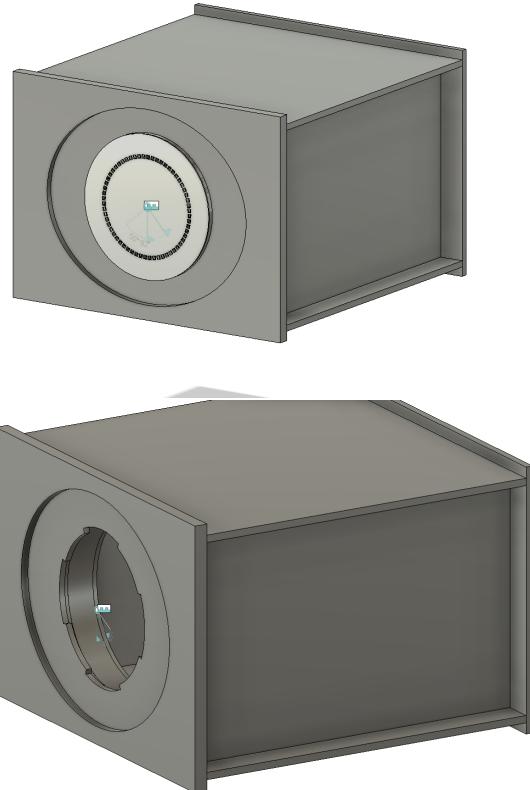


Obrázek 3.34: zapojení enkodéru

3.12 Krabice

Vzhledem k tomu, že dveře trezoru (o kterých je tato práce) jsou schopny se zamknout do čehokoli se správným tvarem otvoru, je možné velice jednoduše navrhnout libovolnou krabici, které by mé dveře sloužily jako zamykatelné víko.

Aby trezor mohl sloužit (alespoň teoreticky) jako opravdový trezor, a ne jen jako hračka, navrhl jsem i bezpečnostní stránku do zdi. Vzhledem k velikosti dverí by totiž ani nedobytná schránka nebyla bezpečná, jelikož by se dala jednoduše přenést celá. Proto jsem zvolil schránku umístěnou ve zdi.



Obrázek 3.35: Krabice

Tato krabice by měla mít odolnou přední stěnu, ty ostatní by pak měly zajišťovat jen pevné uchycení ve stěně.

Závěr

V závěru by mělo být:

- Rekapitulace cíle práce
- Dosáhnul jsem jej? Ano, nebo ne?
- Zhodnocení průběhu práce
- Co mi práce dala?

Seznam obrázků

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Zelená barva značí kódová kola, červená západku, modrá pevnou část trezoru a žluté díly tvoří distanci | 12 |
| 1.2 | render varianty E2 | 14 |
| 1.3 | zamykací mechanizmus varianty M2 | 15 |
| 1.4 | render varianty M2 | 16 |
| 1.5 | fotografie obou testovaných motorů | 17 |
| 1.6 | render varianty E3 | 18 |
| 1.7 | render varianty M3 | 19 |
| 1.8 | Řez kódovacím kolem | 19 |
| 1.9 | rendery trezoru E4 | 20 |
| 2.1 | náčrt | 23 |
| 3.1 | řez varianty E4 | 25 |
| 3.2 | pevnostní simulace těla | 27 |
| 3.3 | pevnostní simulace těla pohled ze zadu | 27 |
| 3.4 | simulace sestavy | 28 |
| 3.5 | render západky | 29 |
| 3.6 | | 30 |
| 3.7 | simulace napětí v západce při kroutícím momentu 5000 N.mm což na rameni 48 mm znamená sílu působící na kolík 104 N . . | 32 |
| 3.8 | zobrazení deformace, pro lepší zobrazení je deformace zdeskatinásobená | 32 |
| 3.9 | ukládací úkosy | 33 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.10 | symetrie zarážky | 34 |
| 3.11 | schematické zobrazení cívky a terčíku | 35 |
| 3.12 | zapojení čipu LDC1314 na desce trezoru | 36 |
| 3.13 | vzhled reliéfu cívky | 37 |
| 3.14 | vzhled desky s kruhem WS2812 a snímáním tlakové desky | 38 |
| 3.15 | zapojení ledek WS2812 na desce trezoru – schéma | 39 |
| 3.16 | zapojení zdroje | 40 |
| 3.17 | Ochrana proti přepólovaní a zapínání | 41 |
| 3.18 | Zapojení stabilizátoru | 42 |
| 3.19 | zapojení step-upu | 43 |
| 3.20 | | 44 |
| 3.21 | zapojení nabíječky | 45 |
| 3.22 | Ochrana proti přepólovaní a zapínání | 46 |
| 3.23 | zapojení ESP32 | 47 |
| 3.24 | zapojení ESP32 | 48 |
| 3.25 | zapojení senzoriky čipu | 49 |
| 3.26 | zapojení čipů BMX055, MPU6050 a QMC5883 | 50 |
| 3.27 | zapojení čipu SPL06 | 51 |
| 3.28 | zapojení čipu M41T62 | 52 |
| 3.29 | zapojení konektoru pro A9G | 53 |
| 3.30 | zapojení řízení motoru, enkodéru a IR komunikace | 54 |
| 3.31 | zapojení IR vysílače a přijímače | 55 |
| 3.32 | zapojení řízení motoru | 56 |
| 3.33 | vzhled enkorédu na desce | 57 |
| 3.34 | zapojení enkodéru | 57 |
| 3.35 | Krabice | 58 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---------------------------------|----|
| 3.1 | shrnutí elektronického vybavení | 24 |
| 3.2 | popis funkce pinů | 46 |