



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

AUTOMATICKÉ HERNÍ STANOVÍŠTĚ

AUTOMATIC GAME STAND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Vavrinec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2025



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Tomáš Vavrinec

ID: 240893

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Automatické herní stanoviště

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci bakalářské práce navrhněte a otestujte zařízení pro automatizaci stanoviště outdoorových hry. Zařízení navrhněte tak, aby bylo schopné bezdrátově komunikovat s ostatními zařízeními, které se hry účastní. Uživatelské rozhraní musí být dostatečně odolné pro venkovní použití a také dostatečně univerzální pro běžné outdoorové hry. Dosažené parametry a funkce ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 5.6.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem práce je navrhnut a zprovoznit elektronické zařízení pro využití v outdoorových hrách. Primárně jde o návrh automatického herního stanoviště, ale došlo i k návrhu jednoduchého osobního zařízení. Tato práce se zabývá návrhem a následným oživením elektroniky a navíc návrhem jejího krytu. Je kláden důraz na výběr vhodných systémů k aplikaci ve hrách a z nich vycházející návrh elektroniky. Práce je rozdělena do několika skupin, uvod popisující požadavky her, návrh osobního zařízení a návrh herního stanoviště, který se zabývá primárně návrhem jádra a následné zhodnotecní výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrokontrolér, ESP32, ESP32-C3-MINI-1, ESP32-S3, ESP32-S3-WROOM, outdoorové hry, herní stanoviště, herní zařízení

ABSTRACT

The goal of this thesis is to design and operate an electronic device for use in outdoor games. The primary goal, to create an automated game station, was extended to design a simple personal device as well. This thesis aims to design and to create a working electronic device with its own cover shell. It emphasizes the right choice of system solutions for the application in the outdoor games and the correct design of the electrical circuits. The thesis is divided into several parts - the introduction describes the requirements of the games, the design of a simple personal device and the design of a game with the primary goal of designing a core and evaluating game results.

KEYWORDS

microcontroller, ESP32, ESP32-C3-MINI-1, ESP32-S3, ESP32-S3-WROOM, outdoor games, gaming stations, gaming facilities

VAVRINEC, Tomáš. *Automatické herní stanoviště*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing.. Pavel Šteffan, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Tomáš Vavrinec

VUT ID autora: 240893

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2024/25

Téma závěrečné práce: Automatické herní stanoviště

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za konzultace, trpělivost a návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat svému švagrovi Ing. Janu Kirchnerovi za užitečné návrhy ke konstrukci krytů zařízení, k technologii jejich výroby a především za umožnění využití jeho pětihlavé tiskárny. Také bych rád poděkoval mé matce Ing. Věře Vavrincové, přítelkyni Bc. Lucii Rebrově a především kolegovi Mgr. Petru Kubicovi za kontrolu a připomínky k textové stránce práce.

Obsah

1 Důvody elektronizace zážitkových her	11
1.1 Hry	11
1.1.1 King of the Hill	11
1.1.2 Špiónské sítě	12
1.1.3 Než se čas naplní	12
1.1.4 Duchové	13
2 Požadavky na zařízení	14
2.1 Dynamická zařízení	14
2.2 Statická zařízení	14
2.3 Využití telefonu	17
2.4 Moduly	17
2.4.1 Modul dvířka	17
2.4.2 Zvukový modul	19
3 Návrh statického zařízení	20
3.1 Elektronické systémy zařízení	21
3.1.1 LED deska	21
3.1.2 Hlavní deska	22
3.1.3 Výběr mikrokontroléru	23
3.1.4 Tlaková plocha	24
3.1.5 Propojení hlavní desky a LED desky	25
3.1.6 Modulový konektor	26
3.1.7 Konektor programátoru	27
3.1.8 USB-C	27
3.1.9 Správa zapínání	28
3.1.10 Výkonová napájecí větev	32
3.1.11 Jednoduchá signalizační LED	34
3.1.12 Odhad spotřeby zařízení	35
3.2 Mechanická stavba	36
4 Návrh dynamického zařízení	39
4.1 Výběr součástek	39
4.2 Návrh schématu a DPS	40
4.3 Prototypy	40
4.4 Mechanická stavba	41

5	Testování statického zařízení	45
5.1	Tlaková plocha	45
5.2	Spotřeba	45
6	Testování dynamického zařízení	46
6.1	Spotřeba	46
6.2	Dosah WiFi	47
	Závěr	48
6.3	Použité zdroje	49
	Seznam symbolů a zkratek	55
	Seznam příloh	56
A	Schémata AHS	57
B	Topologie DPS AHS	70
C	Schémata Semisemaforu	72
C.1	Původní schéma Semisemaforu	72
C.2	Výsledné schéma Semisemaforu	74
D	Topologie DPS Semisemaforu	76

Seznam obrázků

2.1	Úvodní blokové schéma zařízení	15
2.2	Základní blokové schéma zařízení	16
2.3	Blokové schéma modulu dvířka	18
3.1	Návrh vzhledu zařízení	21
3.2	Princip převodu vzdálenosti na indukčnost	25
3.3	Nástin principu snímání tlakové plochy	26
3.4	Původní verze správy zapínání	29
3.5	Nová verze správy zapínání	32
3.6	Spínač výkonové větve	33
3.7	Zapojení prosté signalizační RGB LED	34
3.8	Odrazná plocha a přepážky Radiálního světelného kruhu	37
3.9	Sestava krytu bez elektroniky a terčíku tlakové plochy	38
4.1	Zarušená komunikace s LED	40
4.2	Vzhled Semisemaforu	41
4.3	Soustava modelů pro tisk	42
4.4	DPS Semisemaforu opatřena vložkou	43
4.5	Řez tlačítky	44
4.6	Reálný kus Semisemaforu	44
6.1	Mapa zobrazující polohu komunikujících zařízení [39]	47
B.1	DPS LED desky AHS	70
B.2	DPS hlavní desky AHS	71
D.1	Původní DPS Semisemaforu	76

Úvod

Pravděpodobně si každý z nás dokáže vybavit nějakou hru, která se odehrává venku, někde v lese nebo na louce. Podobné hry bývají typické pro letní tábory nebo třeba skauty. Často se jedná o hru s jasnými pravidly na přesně vymezeném hřišti jako je třeba fotbal nebo třeba vlajkovaná, kde je cílem přenést vlajku soupeře na své území. Často jde také o hry, které se odehrávají v širším okolí a průběh se neskládá jen z jednoho cíle, jako dát gól, ale spíš z řady samostatných úkolů, které na sebe navazují. Tyto hry také mívají méně či více výrazný příběh, který hráčům vysvětluje, proč právě dělají, to co dělají. Takové hry budu označovat jako zážitkové hry.

Zážitkové hry bývají často složeny ze stanovišť, na kterých mají hráči plnit různé úkoly. Aby bylo možné tyto úkoly zadat a vyhodnotit jejich výsledek, je většinou nutné, aby na stanovišti byl nějaký organizátor a stanoviště obsluhoval. Tyto úkoly jsou ale často poměrně prosté a není tak problém je automatizovat, což může organizátory uvolnit k jiné činnosti. Zážitkové hry by navíc znatelně oživila aktivní komunikace mezi stanovištěmi, která by tak vytvořila prostor pro nové herní mechaniky.

Řada zážitkových her využívá různá podomácku vyrobená zařízení, které někdo z organizátorů postavil za účelem konkrétní hry. Takové zařízení ale autora stojí velké množství času, protože jej musí celé od základu navrhnout, vyrobit a pak je jej schopen obsluhovat jen on. Navíc je takové zařízení typicky použito jen u jedné nebo dvou her, po kterých jej autor buď rozebere, nebo bezpečně uloží někam, kde si jej náhodou všimne o deset let později při úklidu. V neposlední řadě bývají jakýmsi zlatým hřebem celé akce např. týdenního tábora a jejich kouzlo je především v odlišnosti od zbytku akce.

Z těchto důvodů padlo rozhodnutí na vývoj univerzálního automatického herního stanoviště, které bude možné opakováně použít na různé hry i ve větším počtu. Podstatnou součástí je pochopitelně i pokud možno co nejintuitivnější ovládání, aby uživatele nezdržovalo od zábavy.

1 Důvody elektronizace zážitkových her

Zážitkové hry mají často příběh, který se dá vyprávět konkrétními úkoly na stanovištích. Na některých stanovištích proto musí být lidská obsluha, na jiných ale může být lidská obsluha z příběhového pohledu nežádoucí. Když má hráč například vyřadit automatický bezpečnostní systém je technické řešení vhodnější než lidská obsluha. Její realizace je totiž bližší příběhovému popisu a hráče tak více vtáhne do příběhu hry.

Podobná stanoviště proto bývají realizována pomocí různých papírků a provázků. To určitě má své kouzlo, ale i tak je u podobného stanoviště vhodné mít obsluhu, která vysvětlí co a jak se tu dělá. Elektronické řešení podobných stanovišť ale může otevřít úplně nový svět možností.

Aby bylo možné vytvořit univerzální automatické herní stanoviště, je potřeba si nejprve ujasnit, jaké vlastnosti by takové zařízení mělo mít. Za tímto účelem popíší několik her, které jsou většinou navrženy bez použití elektroniky a popíše, jak by se tyto hry mohly použitím elektroniky změnit.

1.1 Hry

1.1.1 King of the Hill

Tato hra je převzata z portálu hranostaj.cz [1].

Hra se typicky hraje se dvěma týmy které se snaží obsadit nějaké území. Uvnitř hracího pole se nachází obsazovaná oblast, typicky kruh, který se hráči snaží obsadit tak, že do něj vběhnou. Ve stejné vzdálenosti od obsazovaného kruhu leží základny týmů, ze kterých hráči na začátku hry vyrážejí, aby kruh obsadili. Hráči po sobě také mohou házet papírové koule, jejichž zásah znamená, že se zasažený hráč musí vrátit do základny, než bude hrát dál.

Aby tým kruh obsadil musí v něm hráč daného týmu nějakou dobu vydržet bez zásahu a bez přítomnosti hráčů z druhého týmu. V kruhu nebo alespoň v jeho blízkosti tedy typicky musí být vedoucí, který měří čas hráčům a rozhoduje, kdy došlo k jeho obsazení.

Je tedy vhodné, aby tento úkol vykonávalo automatické stanoviště, které bude všechny časy měřit samostatně. Tímto způsobem se tak zjednoduší využitelnost hry, které by rovněž proběhlo automaticky. Zároveň se mohou stavy oblastí v průběhu hry zobrazovat např. v základnách obou týmů, které by tak měli přehled o dění v poli. Hra se také dá rozšířit o další herní prvky, například o možnost získat nějaké bonusy, když tým obsadí území v určitém čase. Také mohou přibýt další obsaditelná území, aby týmy musely bojovat na více frontách a pro výhru by musely zabrat více území naráz.

1.1.2 Špiónské sítě

Tato hra je převzata z portálu hranostaj.cz [2] a je určena k hraní na pozadí jiné akce, typicky letního tábora.

Hra se hraje na pozadí jiné akce, např. táboru jako doplnění v čase, kdy neprobíhá jiný program. Hráči jsou na začátku tajně rozděleni do několika týmů a jejich cílem je zjistit, kdo další do jejich týmu patří. To dělají pomocí nenápadných otázek a odpovědí jako např. „To máme dnes hezky že?“ s odpovědí „Ani ne, je mi trochu zima.“. Konkrétní kombinaci otázky a odpovědi dostávají hráči na začátku hry během rozdělení do týmů. Podle počtu hráčů a podle případného příběhu se určí kolik bude týmů. Pokud některý hráč najde kolegu, získá bod. Bod získá i v případě, kdy odhalí hráče jiného týmu.

Tato hra se dá použitím elektroniky rozšířit. Například o úschovu a předávání důležitých předmětů, třeba klíčů nebo tajných fotografií. Každý hráč by tak dostal předmět, který by musel předat někomu jinému. Za tímto účelem by každý hráč měl svoji zamýkatelnou přihrádku, která by se dala otevřít jen po zadání hráčem nastaveného hesla. Protože jsou ale všichni špioni a navzájem se neznají, hráč přímo neví, komu má předmět předat. Má pouze jeho popis a musí tedy zjistit, kdo to je. Body by pak šlo získat dvěma způsoby, úspěšným předáním objektu a odcizením cizího objektu. Hráči tedy mají motivaci tvářit se jako osoba, které má jiný hráč předat svůj objekt, aby se tak dozvěděli heslo k jeho přihrádce a mohli mu jeho předmět odcizit. Je faktum, že po úspěšném předání zůstává přihrádce stejně heslo jako předtím, pokud jej tedy dotyčný sám nezmění. Pokud tak neučiní, riskuje, že mu jeho předchozí kolega předmět odcizí, protože už toto heslo zná.

1.1.3 Než se čas naplní

Tato hra je převzata z portálu hranostaj.cz [3].

Tato hra se hraje ve dvou týmech z nichž je jeden výrazně menší než druhý. Menší tým jsou teroristé, kteří někde schovali bombu. Druhý tým jsou sily dobra, které se snaží bombu najít a zneškodnit, v čemž se jim teroristé snaží zabránit. Hra končí zneškodením bomby a vítěstvím sil dobra, nebo výbuchem bomby a vítěstvím teroristů. Ve hře existují tři různé role, terorista, voják a pyrotechnik. Pyrotechnik je jako jediný známý od začátku hry, zatím co ostatní své role skrývají. Hráči tedy přesně neví, kdo je s nimi a kdo ne. Herním územím je větší oblast, např. celá vesnice s blízkým okolím. Protože na takhle velkém území není možné najít schovanou bombu (papírek s nápisem Bomba) bez návodů, mají hráči k dispozici nějak zašifrovaná vodítka.

Teroristé mohou vytvářet falešné stopy a vojáky, resp. pyrotechniky, vyřazovat ze hry. Vyřadit protihráče ze hry mohou v případě, kdy jsou s daným hráčem sami

tím, že mu vyjeví svou herní roli. Daný voják nebo pyrotechnik tak vypadává za hry, zatím co jinému teroristovi se nic nestane. Pokud je však na dohled této akce jiný voják nebo pyrotechnik, vyřazení ze hry postihne útočníka.

V této hře se elektronika dá využít na měření času, který zbývá do výbuchu bomby a identifikaci jednotlivých povolání. Úspěšným vyluštěním jedné z šifer by tak hráči mohli získat nějaký předmět, který by jim poskytl výhodu a to třeba částečně i bez jejich vědomí. Teroristé tak mohou získat třeba zbraň, co jim umožní vyřadit více než jednoho protihráče naráz a vojáci naopak například neprůstřelnou vestu, která je může ochránit před útokem teroristy. Při deaktivaci bomby by také mohlo být se správným vybavením možné, aby pyrotechnik na dálku naváděl vojáka při zneškodňování bomby.

1.1.4 Duchové

Tato hra počítá už v základu s elektronikou a je na ní založena.

Ve hře jsou tři typy zařízení: nabíječka, artefakt a lucernička. Hráči mají za úkol nabít pět artefaktů na určených místech. K tomu jim slouží lucernička, kterou má každý hráč svoji a nosí ji s sebou, dále nabíječka, která je společná pro všechny a během hry se nepohybuje. Každá lucerna je schopna uchovat pouze část energie potřebné k nabití artefaktu. Na nabití artefaktu je tak třeba více nabitých lucerniček. Lucernička se nabíjí přiblížením k nabíječce, stejně tak se nabíjí i artefakt z lucerničky. Jak artefakt tak lucernička se časem sama lehce vybije. Ve chvíli, kdy lucernička není v dosahu artefaktu ani nabíječky a hráč na ni stiskne tlačítko, začne se vybíjet výrazně rychleji. Při stisku tlačítka se ale také lucernička rozsvítí, svítí tak hráči na cestu a odpuzuje duchy. Když se duch dotkne hráče, hráč nakrátko vypadává ze hry. Další nebezpečí duchů ale spočívá v tom, že mohou vybíjet artefakty i lucerničky. Hráči si tedy musí dát pozor, aby jim duchové nevybili artefakt během jejich cesty k nabíječce a zpět.

Tuto hru je vhodné hrát v co největší tmě, aby hráči potřebovali světlo svých lucerniček. Tma navíc umožňuje duchům pohybovat se ve skrytu, což výrazně ovlivňuje herní zážitek.

2 Požadavky na zařízení

Z potřeb popsaných her vyplývají požadavky na zařízení. Tato zařízení lze rozdělit na statická a dynamická, podle toho, zda je má hráč nosit všude s sebou nebo s nimi jen interaguje na nehybném stanovišti. V obou dvou případech je vhodné mít co možná nejjednodušší metodu vytváření her. Není tedy vhodné program pro každou hru psát v samostatném projektu v jazyce C. Proto je potřeba mít nějakou metodu, která umožní vytvářet hry v nějakém jednodušším jazyce, např. v Pythonu a nebo JavaScriptu.

Podstatným požadavkem na obě zařízení, je také dostatečná odolnost zařízení, aby nedošlo k jeho poškození během normálního venkovního užití. Měla by tedy odolat například dešti nebo pádu z nevelké výšky. S obojím se totiž zařízení mohou běžně setkat.

2.1 Dynamická zařízení

Dynamická zařízení jsou ta, která má hráč nosit s sebou. Tato zařízení by tedy měla být co nejmenší a nelehčí, aby hráči nepřekáželo při pohybu. Zároveň by měla být co nejlevnější, aby se dala nasadit v dostatečném množství. Potřebuje také optický výstup pro zobrazování herních stavů a jednoduchý vstup pro ovládání.

2.2 Statická zařízení

Statická zařízení jsou ta, u nichž nepředpokládám, že je bude hráč nosit s sebou. To ovšem neznamená, že mohou být libovolně velká a těžká, pořád je potřeba, aby bylo snadné je přesunout z místa na místo.

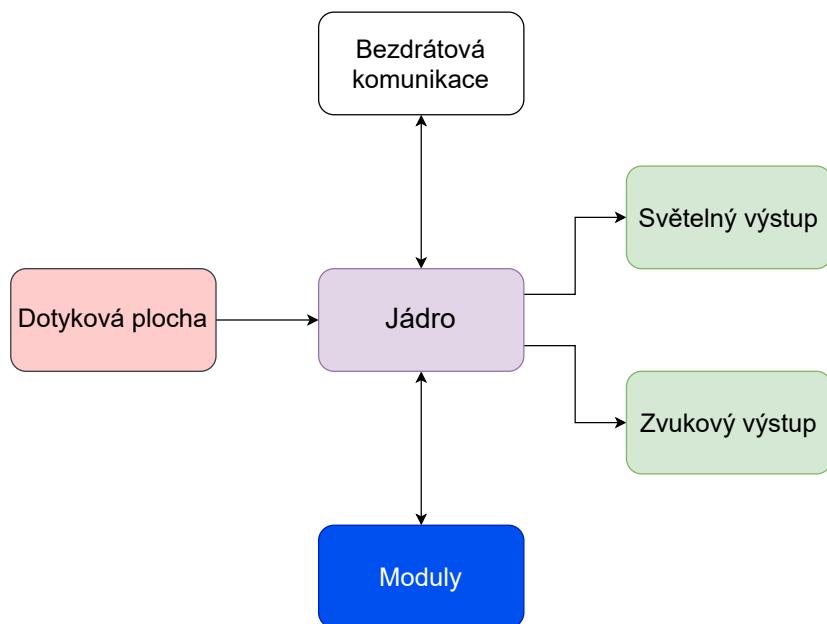
Stejně jako dynamická zařízení potřebují optický výstup, aby bylo možno signalizovat herní stav a reagovat na hráče. Také je potřeba vstup, na což většinou stačí obyčejná tlačítka.

Problém je ale určit jaké a kolik jich bude potřeba. Některé hry vyžadují třeba jen jedno, ale takové, aby se dalo co nejpohodlněji stisknout v běhu, protože je zrovna cílem ke stanovišti rychle doběhnout (např.: hra King of the hill, viz podsekce 1.1.1). Jiná hra může vyžadovat tlačítek více, ale už není potřeba, aby byla tak velká, protože hráč při jejich používání nebude tak akční, ale bude třeba zadávat heslo (např.: hra Špionská síť, viz podsekce 1.1.2).

Univerzálnější je tedy nepoužívat tlačítka, ale nějaký systém, který se dá softwarově přizpůsobit. Příkladem může být dotyková plocha, která se dá softwarově rozdělit na různé oblasti sloužící jako tlačítka a i během hry se tak dá počít tlačítek měnit.

Další důležitou vlastností je možnost komunikace s ostatními zařízeními, která do hry přináší novou možnost jak stanoviště propojit a také pohodlnou metodu jak stanoviště nastavit přes telefon. V neposlední řadě je vhodné mít zvukový výstup, který může být použit např. jako potvrzení zadaného hesla, nebo odezva na prostý klik na dotykovou plochu.

Aby ale bylo možné zařízení použít v různých hrách, je potřeba, aby bylo možné ho přizpůsobit konkrétním potřebám. Z toho důvodu považuji za vhodné k základnímu zařízení moci připojit modul pro konkrétní herní mechaniky. Z toho tedy plyne návrh, který je vyobrazený na obr: 2.1.



Obr. 2.1: Úvodní blokové schéma zařízení

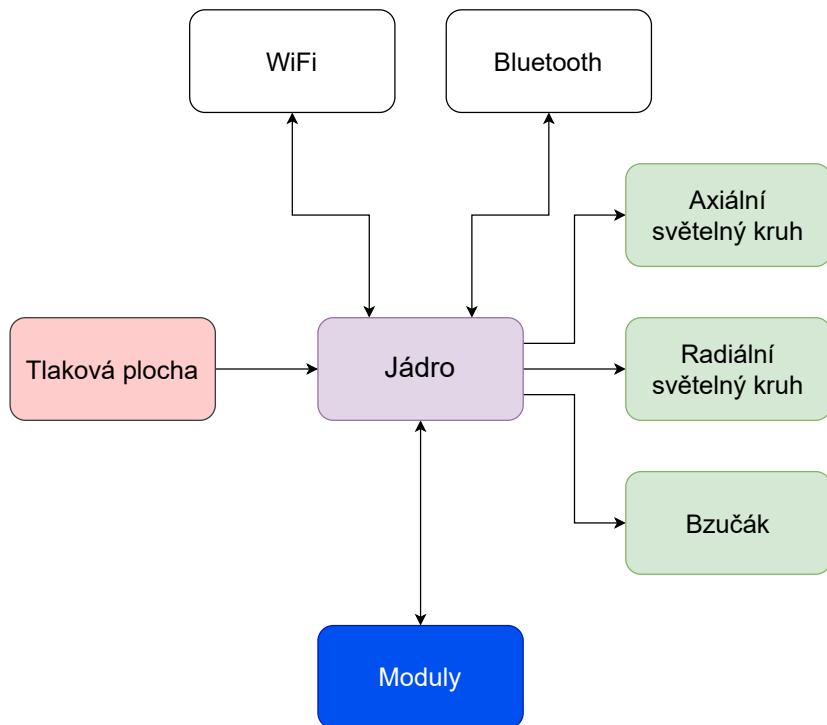
Co se světelného výstupu týče, na signalizaci různých stavů je vhodné používat různé barvy světel. Jak je vysvětleno v následující podsekci 2.3, není potřebné suplovat grafický display, za tímto účelem se dá použít propojení s telefonem.

Informace, kterou zařízení bude často poskytovat, je čas a směr, např. čas do konce kola nebo směr k dalšímu úkolu. Podobné informace se dají elegantně zobrazit na kruhu. Je vhodné zobrazování rozdělit na dva režimy, čtení na dálku a čtení na blízko. Pro čtení na blízko je cílem přímá interakce se zařízením, např. u zadávání hesla. Čtení na dálku je naopak určeno pro předávání informací hráči, když právě přímo neinteraguje se stanovištěm, např. který tým má zrovna povolený pří-

stup do zařízení. Proto je vhodné mít kruhy více, aby bylo možné zobrazovat tyto informace na různých kruzích, které mohou navíc být svému účelu přizpůsobeny. Jeden kruh tak může svítit jen jedním směrem, aby ho hráč viděl celý najednou pro blízkou interakci, zatímco druhý kruh může svítit do všech stran, aby byl vidět z co nejvíce míst.

Potřeba propojení s telefonem nám omezuje možnosti co se týče typu bezdrátové komunikace, protože telefony jsou většinou vybaveny Bluetooth a WiFi. Také se v telefonech rozšiřuje NFC, to je však pro tuto aplikaci z důvodu krátkého dosahu nevhodné.

Posledním systémem, který je třeba zmínit, je zvukový výstup. Protože většinou stačí jen jednoduchá zvuková odezva, není potřeba plnohodnotný zvukový systém. Pro hry, které budou potřebovat přehrávat libovolnou nahrávku, může být použit samostatný zvukový modul, případně je možnost nahrávku přehrát přes uživatelův telefon. V základním zařízení je proto potřeba jen jednoduchý bzučák, sloužící například jako odezva na kliknutí. Můžeme tedy upravit předchozí návrh. Výsledkem je tak návrh, zobrazený na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Základní blokové schéma zařízení

2.3 Využití telefonu

Podstatný fakt je, že prakticky všichni u sebe dnes mají chytrý telefon, čehož mohu využít. Nemá proto velký význam, aby statické nebo dynamické zařízení suplovalo funkce telefonu. Např. grafický výstup typu display proto v podobném zařízení není potřeba, a v tomto směru už odvádí telefon naprosto dostatečnou práci. Pokud by tedy v rámci hry bylo potřeba například předat hráči text nebo obrázek, může jej zařízení poslat uživateli na telefon. Telefon by se tedy dal zařadit mezi dynamická zařízení. Možnost propojení s telefonem je také velmi významná při nastavování hry. Díky telefonu totiž zařízení nepotřebuje uživatelské rozhraní přizpůsobené k nastavování, ale jednoduše se nastaví z telefonu.

Někdy by se mohlo zdát, že herní stanoviště vlastně ani není potřeba a stačila by mobilní aplikace. Ale přestože je telefon ve hrách dobře využitelný, jsou aplikace, na které jednoduše vhodný není. Pokud má hráč například ze stanoviště získat fyzický objekt, telefon neposlouží. Pro hráče ani organizátory také nemusí být zrovna komfortní před hrou zařizovat, aby měli všichni nainstalovaný správný software. V neposlední řadě jde také o jistý „wow efekt“, který běžné zařízení jako mobil nebo třeba tablet neposkytne.

2.4 Moduly

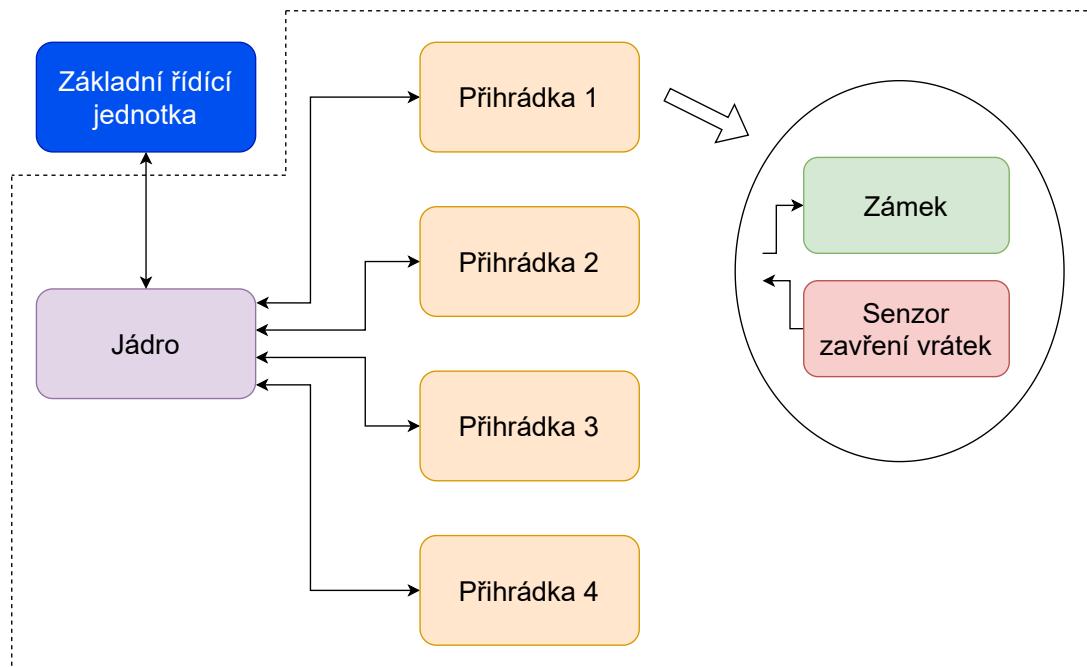
Základní řídící jednotka je schopná poskytnout základní funkce, které jsou potřeba pro většinu her. Některé hry ale mohou vyžadovat nějakou specifickou funkci, kterou základní zařízení nedokáže poskytnout. Proto je vhodné, aby bylo možné k základnímu zařízení připojit externí moduly, bez kterých by se konkrétní hry neobešly.

2.4.1 Modul dvířka

Asi nejzákladnější modul jsou dvířka. Dvířka přidávají uzamykatelné příhrádky. Do stanoviště se tak dá uzamknout předmět potřebný ke splnění úkolu, který hráči získají například po zadání hesla nebo vyřešení zadанého úkolu. Příhrádky pak mohou sloužit pro více týmů nebo třeba uchovávat více objektů do různých částí hry.

Pro jednoduchost jsou dvířka zamykána magneticky. Vrátka jsou uchycena na kloubu ve své horní části a v dolní části se nachází magnet. Pod dnem příhrádky se pak nachází servomotor vybavený druhým magnetem, který tak může dvířka přitáhnout nebo odpudit. Toto řešení neposkytuje bezpečné uzamčení příhrádky, vrátka se dají vypáčit někdy i nehtem, ale pro účely her je to dostačující řešení. Aby bylo možné ověřit, zda se vrátka dovřela, je vedle servomotoru i spínač, který

se sepne při dovření vrátek. Z tohoto řešení vyplynula další možnost jak modul dvírek využít. Vrátka se při odemčení pootevřou, a protože jsou v tu chvíli jen odpuzována magnetem, je možné je stlačit zpět a sepnout tak spínač. Tento fakt se ukázal být užitečný, protože se tak dvířka dají použít zároveň jako velká pohodlná tlačítka. Struktura tohoto modulu je vidět na diagramu zobrazeném na obr. 2.3 ve verzi se čtyřmi příhrádkami.



Obr. 2.3: Blokové schéma modulu dvířka

Jednoduchá hra, která vyžaduje modul dvířka, je např. hra Maják. V této hře jsou hráči rozděleni do týmů a každý tým má svou barvu, od které je odvozena konkrétní příhrádka. Týmy mají za úkol získat co nejvíce sad kartiček. Na hřišti je několik automatických stanovišť s modulem dvířka a v každém z nich je nějaký typ kartičky. Každé stanoviště během hry umožňuje přístup vždy právě jednomu z týmů, který v pravidelném intervalu mění, a čas do změny reprezentuje na jednom z kruhů. Při startu hry si každé stanoviště náhodně vybere tým, kterým začne, a následně se už drží konstantního pořadí. Když někdo dorazí ke stanovišti ve chvíli, kdy je stanoviště zpřístupněné jeho týmu, a klepne na tlakovou plochu, stanoviště mu vydá kartičku. Stanoviště se týmu zpřístupní jen v čase daného týmu a navíc jen jednou za kolo. Hráčům cíleně není představen celý mechanizmus výdeje kartiček, je jim řečeno jen, že se příhrádka otevřá klepnutím do tlakové plochy a že je za-

jímají jen kartičky jejich barvy. Tým tedy musí spolupracovat nejprve na odhalení mechanizmu a následně myslit jak zvítězit.

Podobná hra se buď dá hrát samostatně nebo může jít například jen o metodu, jak získávat suroviny v nějaké komplexnější hře.

2.4.2 Zvukový modul

Další plánovaný modul, který se dá připojit, je zvukový modul. Hra, která vyžaduje zvukový modul, je například hra s názvem Ticho. Tato hra vyžaduje zároveň i modul dvířka. V této hře stanoviště sleduje intenzitu zvuku v okolí a v momentě, kdy hluk klesne pod stanovenou úroveň, stanoviště otevře dvířka. Stanoviště je hráčům představeno jako „magická krabička“ za čárou, kterou nesmí překročit, ale můžou krabičku ovlivnit z dálky. Úkolem hráčů tak je přijít na to, jak krabička funguje a jak ji přesvědčí, aby se otevřela.

V rámci zvukového modulu je i možnost nahrávku přehrát. Tato část zvukového modulu umožňuje intenzivnější vtažení hráče do hry s příběhem. Může jít například o únikovou hru, při které se hráč ocitne v oblasti neznámého bludiště a jeho úkolem je najít cestu ven. Při hledání může narazit na různá stanoviště, která mu nejprve přehrají nějakou část příběhu a následně mu dají úkol nebo radu jak postupovat dál.

3 Návrh statického zařízení

Uživatelským požadavkem je statické zařízení sloužící jako herní stanoviště. Vyžaduje tedy mobilitu jen v rámci transportu na místo hry a zpět, nikoliv v rámci samotné hry. Z toho plynou požadavky na velikost výsledného zařízení.

Zařízení bude mít dva světelné kruhy složené z 60 RGB LED. Číslo 60 jsem zvolil, protože se jedná o dostatečně jemné dělení, aby se daly dělat plynulé efekty. Zároveň jde o číslo, které koresponduje s hodinovým ciferníkem a stupnicí na kompasu. Jeden z kruhů bude radiální a druhý axiální.

Axiální kruh bude umístěn na horní stranu zařízení a bude sloužit primárně jako odezva pro hráče na malou vzdálenost, např. při zadávání hesla. Radiální kruh pak bude umístěn také v horní části zařízení a jeho účelem bude naopak signalizace na delší vzdálenost. Například může sloužit jako maják viditelný ve tmě i na stovky metrů.

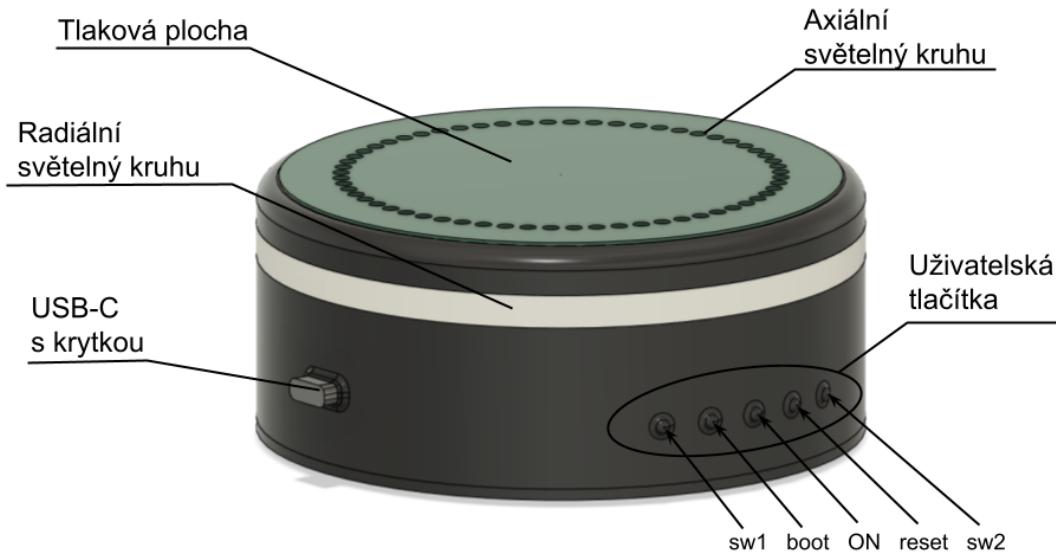
Uvnitř axiálního světelného kruhu se bude nacházet tzv. tlaková plocha. Jedná se o ovládací prvek podobný dotykové ploše s tím rozdílem, že je schopen měřit i sílu, která na něj působí.

Aby bylo stanoviště reálně použitelné při hře, musí celou hru vydržet na baterii. Není ojedinělé, aby měla bojovka čtyři i pět hodin bez přestávky. Plus je nutná časová rezerva a čas na nastavování. Čas, který zařízení zvládne běžet z baterie, silně závisí na činnosti, ale nebylo by zrovna ideální, kdyby baterie byla výrazně omezujícím faktorem. Výdrž na jedno nabítí by tedy měla být alespoň šest hodin.

Vzhledem k plánu připojovat moduly je nutné navrhnut mechanizmus připojení. Bylo by ideální, kdyby si mohl uživatel říct, co bude hrát za hru, a podle toho si sám připojil moduly, které potřebuje. Tomuto určitě nechci bránit, ale přímo to podporovat nese řadu problémů, jak ze strany konektoru a mechaniky, tak ze strany softwaru. Konektor by totiž musel být ideálně beznástrojově rozpojitelný a opětovně spojitelný a přitom dostatečně pevný, aby se zařízení mechanicky chovalo jako jeden celek. Takový konektor je ale poměrně složité vyrobit, tak aby byl spolehlivý, a tak jde v tuto chvíli jen o možnost dalšího vývoje. Ze softwarového pohledu jde pak o problém, jak detektovat konkrétní modul a hlavně o otázku, jak se chovat k modulům, které jsou potenciálně záměnné.

V řadě případů je užitečné mít možnost zvukové zpětné vazby. Ideální by bylo moci přehrát libovolnou nahrávku, většinou ale stačí jednoduchý tón, řekněme jako potvrzení zadaného hesla. Pro možnost přehrávání plnohodnotného zvuku bude proto sloužit samostatný modul a v základní jednotce, postačí jednoduchá sirénka.

Z požadavků mi vyplynulo zařízení, jehož možný vzhled je nastíněn na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Návrh vzhledu zařízení

3.1 Elektronické systémy zařízení

Elektronika bude rozdělena na dvě samostatné DPS. Pujde o hlavní desku, na které bude umístěna většina elektroniky a o desku s hlavním uživatelským rozhraním (LED deska). Kompletní schéma a topologie DPS je k vidění v přílohách (schéma je k vidění v příloze A a DPS v příloze B).

3.1.1 LED deska

Na LED desce budou umístěny oba světelné kruhy a elektronika pro snímání tlakové plochy, tedy LDC1614 [4] a jeho snímací LC články. Právě snímaní tlakové plochy je jeden z hlavních důvodů oddělení této elektroniky na samostatnou desku, zabere totiž na DPS velkou plochu.

Na LED desce se tedy nachází:

- Axiální LED kruh z 60 RGB LED WS2812B v pouzdře 3,5 x 2,8 mm
- Radiální LED kruh z 60 RGB LED WS2812B v pouzdře 3,5 x 2,8 mm
- LDC1614 se čtyřmi snímacími LC články pro snímání tlakové plochy
- konektor na propojení s hlavní deskou

3.1.2 Hlavní deska

Řídícím mikrokontrolérem AHS bude ESP32-S3 (výběr je rozebrán v podsekci 3.1.3). Na hlavní desce bude spolu s mikrokontrolérem také zdroj poskytující správné napájení všech systémů zařízení. Hlavní deska bude tedy zprostředkovávat několik napěťových větví. V neposlední řadě se zde bude nacházet základní uživatelské rozhraní v podobě několika tlačítek, jednoduché RGB LED a sirénky.

Zdroj AHS je tvořen dvěma LiIon články 18650 v paralelním uspořádání. Dva články volím, abych zajistil dostatečnou výdrž baterie a abych využil volné místo v zařízení. Paralelní uspořádání jsem volil, aby nebyl nutný balancer při nabíjení, a tedy abych zjednodušil zařízení.

Elektronika řeší i nabíjení baterie, současně s čímž realizuje i ochranu proti podbití a případnému přebití. Aby nebylo možné softwarově baterii podvybit, má AHS už zmíněnou ochranu proti podvybití řešenou čistě hardwarově. Tato ochrana tak celé zařízení vypne v případě, že dojde k vybití baterie pod napětí 2,8 V. Pochopitelně, software by měl vybitou baterii zaznamenat mnohem dřív a chovat se podle toho, např. neumožnit spustit hru napětí na baterii 3,0 V.

Abych vyhověl napěťovým požadavkům všech použitých systémů, jsou na hlavní desce tři různá napájecí napětí, která se dál dělí do šesti napájecích větví.

- VCC, napětí baterie sloužící jako zdroj pro ostatní napájecí větve a pro napájení komunikačního modulu.
- Napětí 3,3 V na napájení logické části celého základního zařízení.
- Napětí 5,0 V pro LED desku a externí moduly a napájení z USB
 - V-USB, z USB-C konektoru pro nabíjení a programování
 - 5V-A, pro napájení modulu na modulovém konektoru
 - 5V-B, pro napájení LED kruhů
 - 5V, jakožto zdroj pro větvě 5V-A a 5V-B

Napětí větví 3,3 V je tvořeno pomocí LDO. Na vytvoření větve 5V je ale potřeba spínaný zdroj. Především proto, že napětí baterie, ze které se tato větev napájí, má nižší napětí a je jej třeba transformovat na napětí vyšší. Navíc tento zdroj poskytuje do systému proudy o hodnotě až pět ampér a bylo by tedy vhodné použít spínaný zdroj i v případě vyššího vstupního napětí. LDO by tak mělo malou efektivitu převodu a především by vytvářel nemalé množství odpadního tepla, se kterým by se zařízení muselo vypořádat.

Na hlavní desce je také řada konektorů sloužících pro připojení ostatních systémů. Jde o konektory na:

- propojení s LED deskou,
- externí moduly,
- USB-C (nabíjení a programování AHS),

- programátor,
- slot pro SD kartu.

Do konektorů by se také dal zařadit držák na dva LiIon články 18650.

3.1.3 Výběr mikrokontroléru

Požadavky na výbavu mikrokontroléru jsou:

- WiFi,
- Bluetooth,
- alespoň 2 UARTy,
- alespoň 22 GPIO pinů,
- I2C,
- dostatečný výpočetní výkon pro hladký chod interpretru JavaScriptu nebo Pythonu.

Porovnání některých dostupných možností je provedeno v tab. 3.1.

Mikro-kontrolér	Jádro	Počet GPIO pinů	Počet UARTů	Počet I2C	Wi-Fi a Bluetooth
ESP32 [5]	2x Xtensa LX6	34	3	2	✓
ESP32-S3 [6]	2x Xtensa LX7	45	3	2	✓
ESP32-C3 [7]	1x RISC-V	16-22	2	1	✓
ESP32-C6 [8]	1x RISC-V	34	3	2	✓
PIC32MZ-W1 [9]	DS60001192	62	3	2	✓
nRF7000 [10]	-	13	0	0	✓
RTL8710 [11]	ARM Cortex-M3	17	1	3	✓
RTL8721DM [12]	-	17	3	2	✓
STM32WB55 [13]	ARM Cortex-M4	37	1	2	✗
MSP430BT5190 [14]	-	32	4	4	✗

Tab. 3.1: Dostupné vyhovující mikrokontroléry

Abych nemusel návrh komplikovat anténou, použil jsem v návrhu mikrokontrolér na modulu, který má anténu integrovanou, a navíc integruje i flash paměť. Protože už tyto moduly interně používají některé GPIO, klesne množství, které mohu využít.

Jedním z požadavků na zařízení je dostatečný výpočetní výkon pro hladký chod interpretu JavaScriptu nebo Pythonu. Výpočetní výkon se porovnává poněkud složitěji, protože se nejedná tak úplně o jeden parametr. V tomto případě je ale vhodné prozkoumat i dostupnost interpretu pro daný mikrokontrolér. Pro ESP32 a ESP32-S3 je dostupný JavaScriptový interpret Jaculus [15] i interpret jazyka Python MicroPython [16] [17]. Pro PIC32MZ-W1 a ESP32-C6 je dostupný pouze interpret jazyka Python MicroPython [18] [19]. ESP32 a ESP32-S3 tak poskytuje výhodu v možnosti

mikrokontrolér	Počet GPIO pinů	vyhovuje?
ESP32-WROOM [5]	26	✓
ESP32-S3-WROOM [6]	36	✓
ESP32-C3-WROOM [7]	15	✗
ESP32-C6-WROOM [8]	23	✓
WIFI32E01PC [9]	37	✓

Tab. 3.2: Moduly s mikrokontroléry

volby skriptovacího jazyka. ESP32-S3 má oproti starší verzi ESP32 výkonnější jádro a interpret JavaScriptu, resp. Pythonu, na něm tak běží o něco plynuleji.

Další výhodou ESP32-S3 oproti PIC32MZ-W1 je jeho cena, která se pohybuje okolo 4 USD [20]. Zatímco PIC32MZ-W1 je u JLCPCB za 13.65 USD [21]. Navíc u firmy JLCPCB, kde plánuji elektroniku vyrábět, sice je PIC32MZ-W1 v nabídce, ale není na skladě [21], zatímco u ESP32-S3 bylo v době návrhu dostupných hned 19 variant [20].

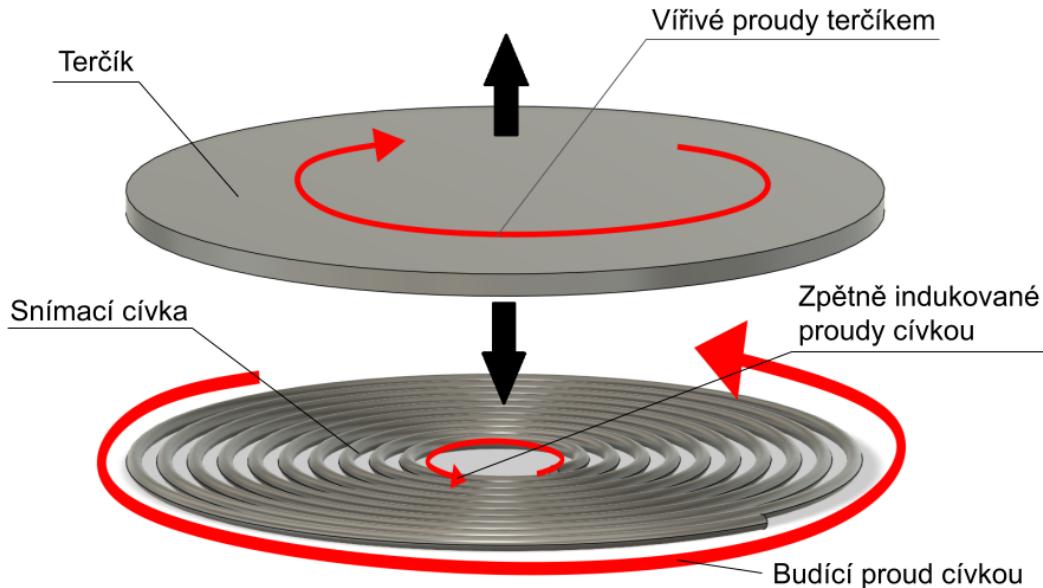
V mém případě má ESP32-S3 ještě jednu podstatnou výhodu, a tou je fakt, že s rodinou mikrokontrolérů ESP32 mám dlouholeté zkušenosti. Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro ESP32-S3.

3.1.4 Tlaková plocha

Tlaková plocha je založena na měření indukčnosti čtyř cívek. Tyto cívky jsou použity spolu s paralelně řazeným kondenzátorem, aby dohromady tvořily rezonanční LC článek. Zároveň jsou cívky vytvořeny jako reliéf v mědi DPS, aby jimi vytvořené magnetické pole sahalo mimo ně a dalo se tak použít pro ovlivnění jejich vlastností.

V objektu vloženém do proměnného magnetického pole vytvářeného cívkou se vytváří výřivé proudy, které následně tvoří magnetické pole ve směru opačném k poli vytvořenému cívkou. Magnetické pole vzniklé z výřivých proudů tak indukuje další proudy zpět v cívce, čímž snižuje její zdánlivou indukčnost. Ve výsledku tak objekt v magnetickém poli cívky ovlivňuje její indukčnost. Velikost indukovaných výřivých proudů a tedy i míra ovlivnění indukčnosti cívky, je závislá na vodivosti daného objektu (terčíku), na jeho rozměrech a na jeho poloze vůči cívce. V případě pohybu terčíku, pouze ve směru kolmém k ploše DPS s vytvořenou cívkou, se tak převádí vzdálenost terčíku a DPS na indukčnost cívky. Vizualizace popsaného mechanizmu sa nachází na obr. 3.2.

Protože pro indukci výřivých proudů v terčíku musí být magnetické pole cívky proměnné, musí být i proud cívkou proměnný a tedy i napětí na celém LC článku. V případě použití čipu LDC1614 je tedy LC článek chvíli buzen nastaveným prou-



Obr. 3.2: Princip převodu vzdálenosti na indukčnost

dem, dokud nedosáhne nastavené napěťové amplitudy. Následně přejde do stavu měření, ve kterém změří rezonanční frekvenci LC článku porovnáváním s referenčním oscilátorem. LDC1614 má interní oscilátor s frekvencí 40 MHz , ale např. v aplikacích náročných na přesnost je možné připojit oscilátor externí. V případě využití více kanálů následně přepne na další kanál a opakuje stejný postup [4].

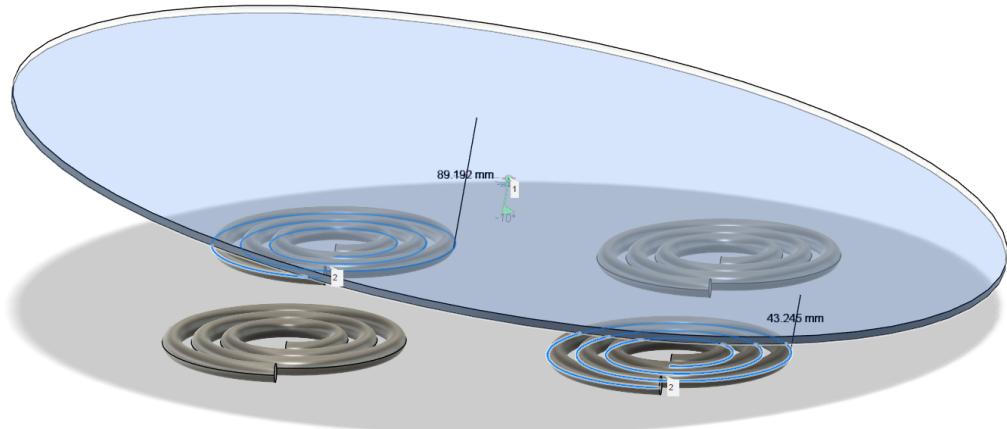
Princip tlakové plochy tedy spočívá ve snímání vzdálenosti terčíku, se kterým přichází do kontaktu uživatel, čtyřmi snímacími cívkami na LED desce. Princip uspořádání je zobrazen na obrázku č.3.3.

Kromě katalogových listů čipu LDC1614 jsem vycházel i z informací uvedených v aplikační poznámce firmy Texas Instruments [22] a ze skript předmětu Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy [23]

3.1.5 Propojení hlavní desky a LED desky

Mezi hlavní deskou a LED deskou je třeba převést napájení a několik signálů. LED deska vyžaduje na konektoru přítomnost dvou napájecích větví, 5 V pro světelné kruhy a 3.3 V pro snímání tlakové plochy. Protože do RGB diod může téct proud až 5 A a může být zároveň i rychle spínaný, považuji za rozumné oddělit napájecím větví zem, abych omezil průnik rušení z diod do snímání tlakové plochy. Oddělení je tedy provedeno už na konektoru hlavní desky a už v kabelu jsou tedy větve vedeny samostatně.

Na samotné propojení jsem se rozhodl použít FFC kabel s roztečí 0.5 mm , pro



Obr. 3.3: Nástin principu snímání tlakové plochy

jeho rozměry a cenovou dostupnost. Jedním vodičem takového kabelu lze vést proud maximálně 0.4 A [24]. Protože ale potřebuji dodat proud až 5 A , použiji 13 vodičů vedle sebe pro jednu cestu, jakožto nejmenší počet, který přenese požadovaný proud v rámci daných mezí.

Mimo napájení je tímto propojením veden i signál s daty pro světelné kruhy a I2C sběrnice se signálem přerušení pro připojení čipu LDC1614 [4]. Výsledný počet vodičů v kabelu je tedy $2 \cdot 13$ pro napájení, 1 pro data k LED kruhům, dále 2 pro I2C, 1 pro signál přerušením a nakonec 2 pro napájení snímání tlakové plochy. Dohromady tedy kabel potřebuje 32 vodičů.

Vzhledem k počtu potřebných vodičů jsem se rozhodl použít běžný FFC kabel se 40 kontakty s tím, že zbylé kontakty se mohou hodit v budoucnu.

3.1.6 Modulový konektor

Modulovým konektorem je vedeno 5 V jako napájení pro moduly a komunikační sběrnice se signálem přerušení pro komunikaci.

Nad volbou komunikační sběrnice jsem strávil značné množství času. Původně jsem uvažoval o využití RS485 jakožto odolné sběrnice, u které by v případě potřeby nemusel být problém ani delší kabel. RS485 má ale nevýhodu v tom, že potřebuje dodatečný hardware, kterému bych se hlavně na modulech rád vyhnul. Obdobný problém nastal u CANu a USB. USB by navíc mělo výhodu kompatibility s velkým množstvím hotových zařízení.

V první úvaze o využití UARTu jsem jej zavrhl kvůli potenciální náročnosti na přenosílání dat mezi moduly. Při standardním použití bych totiž moduly řadil

do řetězu za sebe. Prvnímu modulu by tak chodila data pro všechny ostatní moduly a musel by je přepošílat dál, což by mohlo stát nezanedbatelné množství procesorového času.

V jisté chvíli jsem ale narazil na nestandardní komunikaci pomocí UARTu implementované v projektu Servio [25]. Tato implementace používá UART jako sběrnici. Namísto standardního použití pro komunikace jeden-s-jedním tak může komunikovat jeden-s-více. Na tomto řešení je výhodné, že nevyžaduje žádný dodatečný hardware a prakticky každý dnešní mikrokontrolér je možné k této sběrnici velmi snadno připojit.

Ve srovnání s RS485 je sice mnohem méně odolná proti rušení, ale uvnitř zařízení nebude linka vedena na příliš velkou vzdálenost. Komunikace na delším kabelu je pak jednoduše nahraditelná bezdrátovou komunikací a není tak potřebné, aby to tato sběrnice v základu podporovala.

Všechny moduly jsou připojeny na jeden RX pin AHS. Proto musí firmware AHS zajistit, aby dva moduly nevysílaly současně. Aby se zabránilo možným zkratům, má jako ochranu každý modul své piny UARTu připojeny přes rezistor $180\ \Omega$. Pin přerušení má na modulech naproti tomu jen schopnost signál přizemnit a na straně hlavního zařízení je dráha připojena přes rezistor k napětí $3,3\ V$. Abych alespoň trochu zvýšil odolnost linky proti rušení, přidám na přijímací stranu pull-up rezistor. Cílem je zvýšení komunikačního proudu, aby se případný proud vyvolaný rušením neprojevil. V neposlední řadě mají všechny piny na konektoru ESD ochranu [26].

3.1.7 Konektor programátoru

Zařízení se dá jednoduše programovat přes USB-C, tento kanál je ale možné softwarově narušit a pro takové případy je tu konektor na programátor. Jde o šest plošek, na které se programátor připojuje pomocí pružinkových kontaktů. Programátor sice obsahuje jen jednoduchou elektroniku, která by mohla být i přímo v elektronice AHS, ale ve většině případů by byla zbytečná. Ve chvíli, kdy by byla potřeba, je stejně nutná odborná obsluha a pro tu není problém použít externí programátor.

3.1.8 USB-C

USB-C je použito pro nabíjení a pohodlnější programování zařízení bez potřeby programátoru.

USB-C v základu neposkytuje žádné napájecí napětí, protože je navrženo k obousměrnému provozu a může napájení jak poskytovat, tak spotřebovat. Asi nejjednodušší způsob jak požádat zdroj o napájení, je připojit dráhy *CC1* a *CC2* k zemi přes rezistory o hodnotě $5.1\ k\Omega$. Takto zařízení dostane napětí $5\ V$ s omezením proudu do $0.5\ A$, tedy výkon $2.5\ W$. V tuto chvíli by se zařízení už mohlo nabíjet,

výkonem 2.5 W by se ale nabíjelo velmi pomalu. Proto jsem implementoval další systém, který má za úkol zvýšit nabíjecí výkon a tak zrychlit nabíjení. Čip BQ25895M [27] slouží primárně pro řízení nabíjení, ale zároveň se stará o komunikaci se zdrojem a zprostředkovává tak vyšší nabíjecí proud. Velikost nabíjecího proudu se navíc dá v případě potřeby nastavit přes I²C sběrnici z ESP32-S3.

3.1.9 Správa zapínání

Zařízení je vybaveno obvodem umožňujícím vypnutí jak uživatelské, tak programové a v případě hrozícího podbití i automaticky. Tento obvod zároveň kontroluje i potenciální přebití baterie a v takovém případě odpojuje napájení nabíječky.

Původní verze správy zapínání je vidět na obr. 3.4 (zapojení zapínacího tlačítka je zjednodušeno, protože jeho zapojení je složitější z důvodu jeho čtení z procesoru).

Na úvod popisu funkce je vhodné říct, že rezistor R_5 slouží pro definici napětí na G tranzistoru Q_2 ve chvíli vypnuté větve $3V3$ a má dostatečně velký odpor, aby se při ostatních úvahách dal zanedbat. Hlavní spínač je PMOS tranzistor Q_{p1} , který je řízený NMOS tranzistory Q_1 a Q_2 . Obvod U_1 kontroluje stav baterie a v případě nízkého napětí na dráze *Baterie* předpokládá, že došlo k limitnímu vybití baterie a připojí na vývod *OD* (Over Discharge) 0 V [28]. To znamená zavřený tranzistor Q_1 , což znamená, že se rozepne i tranzistor Q_{p1} , protože se jeho elektroda G vybije skrz rezistor R_2 . Pokud je baterie naopak nabita dostatečně, je na vývod *OD* obvodu U_1 přivedeno jeho napájecí napětí [28], v našem případě tedy napětí baterie, které je tak přivedeno na G tranzistoru Q_1 . Tranzistor Q_1 je tak otevřený, což znamená, že zařízení má povolení k zapnutí. Když v tuto chvíli dojde ke stisku zapínacího tlačítka, přivede se 0 V na G tranzistoru Q_{p1} a dojde k jeho otevření. Následně naběhne napájecí větev $3V3$, na které bylo do té doby 0 V . Přes rezistor R_4 se tak přivede napětí $3V3$ na G tranzistoru Q_2 a dojde k jeho otevření. Po otevření tranzistoru Q_2 je tranzistor Q_{p1} trvale otevřen a zařízení je tak zapnuto.

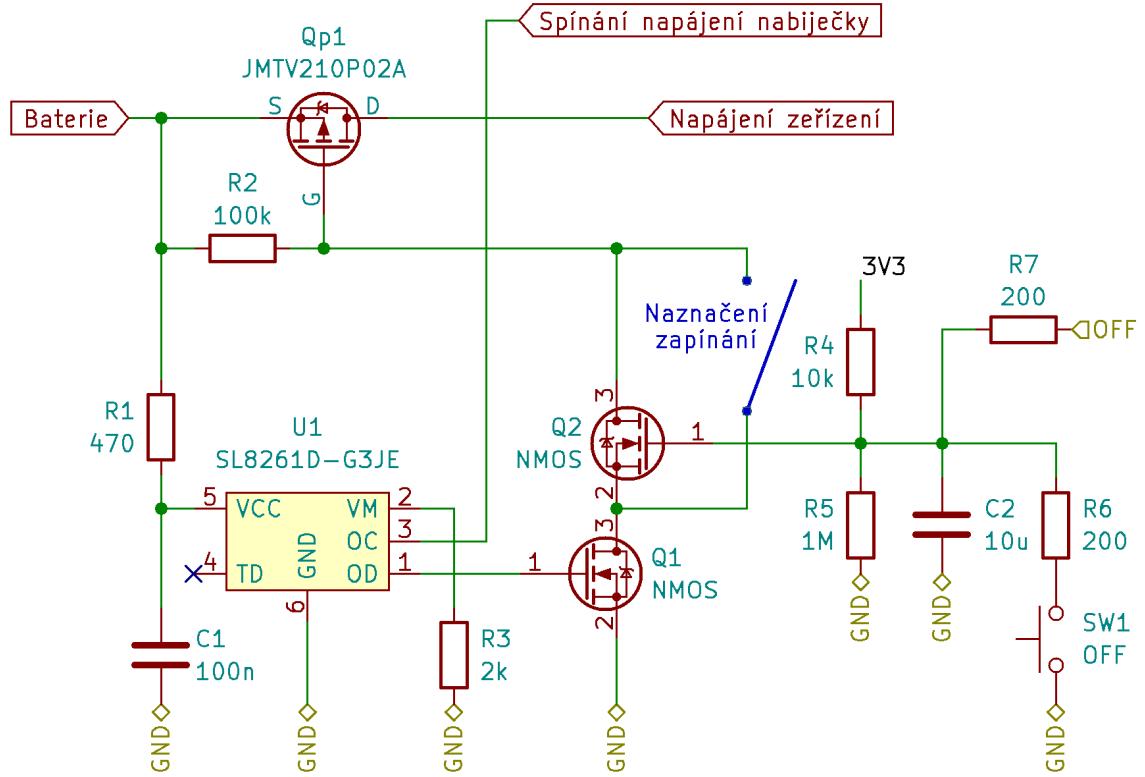
Následné vypnutí je možné třemi cestami:

- vybití baterie,
- povel z procesoru,
- uživatelské tlačítko (v pozdější verzi bylo odstraněno).

Ve chvíli, kdy dojde k vybití baterie, zareaguje na to obvod U_1 rozepnutím tranzistoru Q_1 , čímž pomocí rezistoru R_2 rozepne i tranzistor Q_{p1} a zařízení se tak vypne.

Když procesor dostane příkaz k vypnutí zařízení, stáhne dráhu *OFF* k zemi, čímž vybije kapacitu C_2 a současně kapacitu G tranzistoru Q_2 , čímž dojde k rozepnutí tranzistoru Q_2 . Následně dojde k rozepnutí tranzistoru Q_{p1} a poklesu napětí na napájecí věti $3V3$. Z této věti běží mimo jiné i procesor a není tedy jisté, že udrží

dráhu *OFF* na napětí 0 V až do konce vypínání. To je důvodem přítomnosti kondenzátoru C_2 , který sice zpomalí reakci obvodu na příkaz k vypnutí, ale následně zajistí, že se obvod skutečně vypne. Stisk tlačítka *OFF* má reakci obdobnou.



Obr. 3.4: Původní verze správy zapínání

Tato varianta však měla jeden problém způsobený absencí hystereze u čipu kontrolující napětí baterie SL8261 [28]. Ve chvíli, kdy se baterie dostane do stavu, kdy je potřeba ji odpojit, kontrola ji skutečně odpojí. To by bylo správně, jenže z baterie v tu chvíli pořád teče proud, který způsobuje úbytek jejího napětí. Při přerušení proudu z baterie se tak napětí baterie lehce zvedne a ochrana podbití tak znovu se pne. Během této doby se nestihne vybít kapacita na napájecí větvi a zařízení se tak nestihne plně vypnout. Obvod tak začne oscilovat a skončí teprve až napětí na baterce klesne natolik, aby odpojení znova nezvedlo napětí nad rozpoznávací úroveň čipu SL8261.

Tento problém má dvě potenciální řešení. Budě vyměnit obvod SL8261 za jiný s vhodnou hysterezí nebo upravit zapojení tak, aby v případě, kdy se čip SL8261 rozhodne zařízení vypnout, se zařízení stihlo vypnout. Následně tak už nezáleží zda kontrola baterie zapnutí opět povolila, protože zařízení je vypnuto klasickým způsobem. Tato možnost navíc umožňuje zařízení uživatelsky znovu zapnout a pokud by zároveň výrazně klesla spotřeba, zařízení se ještě chvíli udrží zapnuté a uživateli

tak může zahlásit vybití. To může být výhodné, např. v situacích, kdy se stanoviště vybije ve chvíli, kdy nikdo není poblíž a když následně uživatel přijde, nemusí dlouho přemýšlet, co se stalo.

Obvod jsem tedy přepracoval a doplnil jsem do něj jeden bit paměti, do kterého může kontrola baterie nebo mikrokontrolér zapsat a tím zahájit vypínání. Zároveň jsem odebral vypínačí tlačítko s tím, že vypínání se bude provádět programově za pomoci běžného tlačítka, aby bylo možné nastavit časové chování tlačítka, např. vypnutí až po delším stisku. Ve chvíli, kdy je vypínání zahájeno, zařízení se už nedá znova zapnout až do doby, než klesne napětí na napájecí větví výrazně pod napětí, při kterém by mohlo dojít k samovolnému zapnutí (cca 1.5 V). Výsledný obvod je vidět na obr. 3.5.

Hlavní spínač je v tomto zapojení PMOS tranzistor Q_{p2} , který je řízený okolním zapojením. Přivedením napětí 0 V na G tranzistoru Q_{p2} dojde k jeho sepnutí a následnému startu zařízení. K tomu může dojít sepnutím NMOS tranzistorů Q_6 a Q_7 . Tranzistor Q_4 má stejnou funkci jako tranzistor Q_1 v předchozím zapojení, tedy když obvod U_2 rozezná kriticky vybitou baterii, tranzistor rozepne. Naopak když obvod rozezná nabítkou baterii, povolí zapnutí sepnutím tranzistoru Q_4 . Ve chvíli, kdy je zapnutí povoleno a uživatel stiskne ON tlačítko, otevře tranzistor Q_5 , čímž přivede 0 V na G tranzistoru Q_{p2} . Tranzistor Q_{p2} se tak sepne, v reakci na což se uvede do provozu napájecí větev $3V3$. To znamená, že se začnou skrz rezistory R_{12} a R_{13} nabíjet kapacity G tranzistorů Q_7 , Q_8 a Q_6 .

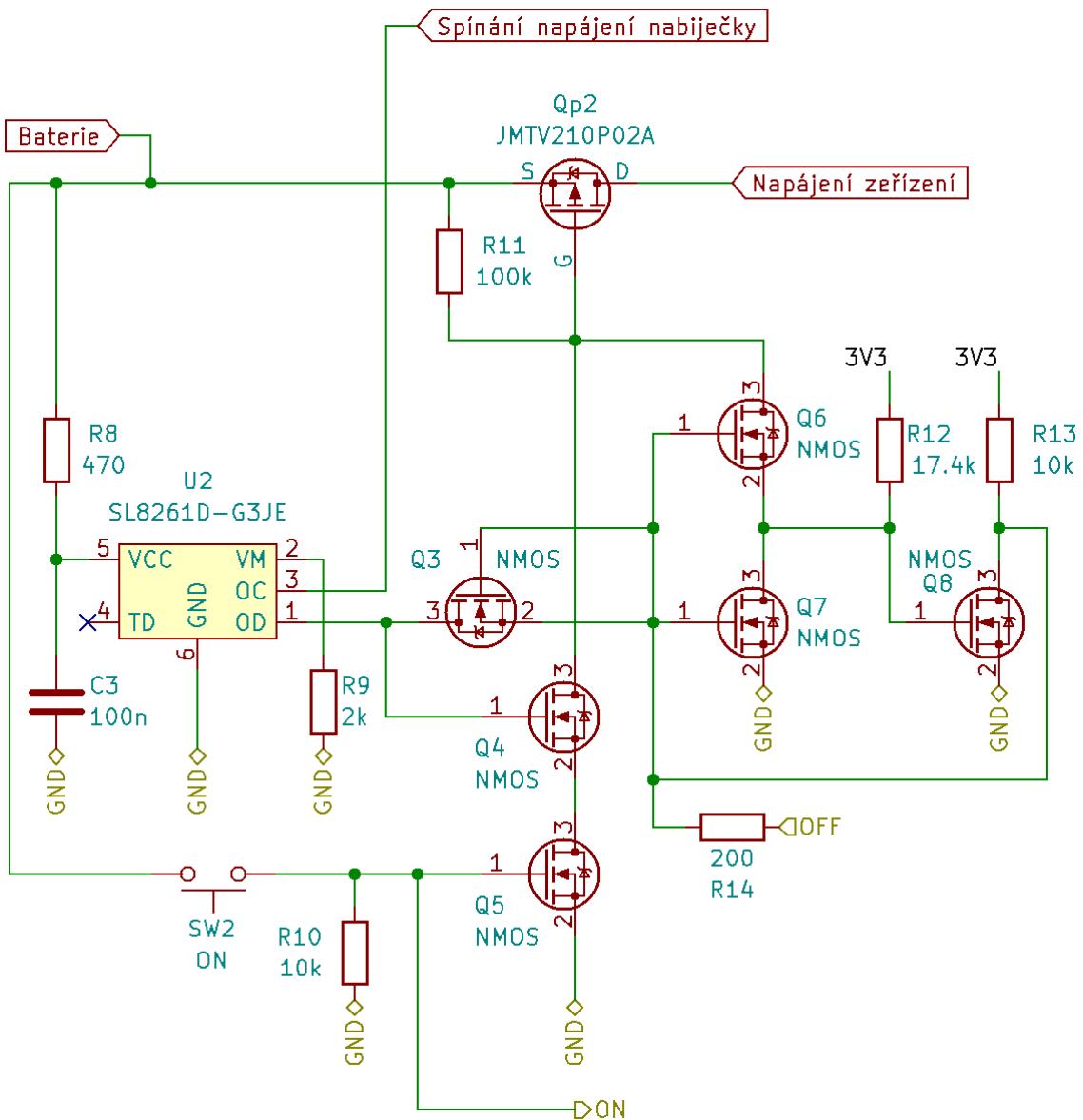
Tranzistory Q_7 a Q_8 spolu s rezistory R_{12} a R_{13} vytváří dvě do kruhu zapojené inverze, které tak vytváří jednoduchou paměť. Stav této paměti je čitelný na vývozech G obou tranzistorů, kde vždy existuje logická nula i jednička, které se mohou mezi sebou prohazovat a tím udržovat informaci. Zapnutý stav znamená logickou jedničku na G tranzistoru Q_7 a nulu na G tranzistoru Q_8 . Při startu je nutné, aby toto pořadí naběhlo správně a nikoliv opačně (což by znamenalo, že ihned po zapnutí dojde k vypnutí). Aby tedy se paměť při startu správně inicializovala, mají rezistory R_{12} a R_{13} různé hodnoty, přesněji R_{12} má větší odpor a napětí na G tranzistoru Q_8 tak bude nabíhat pomaleji. Napětí na G tranzistoru Q_7 tak dosáhne jeho otevření dříve, čímž přivede 0 V na G tranzistoru Q_8 , který tak zavře, čímž se stav paměti ustálí. Zvláštní hodnota rezistoru R_{12} je způsobena snahou o minimalizaci současťek. Tuto hodnotu jsem již použil jinde na zařízení a abych tedy nemusel přidávat další hodnotu rezistoru, použil jsem tuto.

Aby měly takto vytvořené paměti smysl, je nutné zajistit, aby žádný ze zdrojů neměl dvojčinný [push-pull] výstup nebo aby alespoň uměl pracovat v režimu s vysokou impedancí. Výstup z mikrokontroléru toto umí zajistit jednoduše programově. Obvod U_1 hlídající napětí baterie má ale výstup dvojčinný z důvodu potřeby přímého řízení tranzistoru NMOS a musím ho to tedy ošetřit jinak. Zvolil jsem řízení

na straně logické jedničky v zapnutém stavu, aby vypnutí znamenalo stažení dráhy k zemi. Alternativou by totiž bylo tahat dráhu k napájecí věti $3V3$, což by znamenalo dodatečné zapojení, protože obvod U_2 je napájený jiným napětím než mikrokontrolér a tedy než tato paměťová buňka. Mikrokontrolér stažením dráhy *OFF* spojí dráhu ze zemí přes, pro naši úvahu zanedbatelný, ochranný rezistor R_{76} . Ochrana podbití je pak připojena přes tranzistor Q_3 , z něhož je využita jen jeho dioda. Namísto tranzistoru Q_3 by mohla být zapojena jen samostatná dioda, tranzistor je zde použit z obdobného důvodu jako zvláštní hodnota rezistoru R_{12} a to, aby nebylo nutné do zařízení přidávat další typ součástky.

Ve chvíli, kdy do zapojení přijde povel k vypnutí, zapíše se povel nejprve do této paměti. Toto je ostatně další důvod, proč se do paměti zapisuje přes G tranzistoru Q_7 a ne G tranzistoru Q_8 . Kdyby totiž zápis probíhal z druhé strany, zařízení by se začalo vypínat už v době zápisu do paměti, protože by probíhal na straně, která řídí tranzistor Q_{p2} . Když tedy dojde k zápisu do paměti a tranzistor Q_{p2} se rozepne, začne padat napětí na napájecí věti $3V3$, na rozdíl od dřívějšího zapojení, ale během toho nemůže dojít k samovolnému zapnutí. Protože aby mohlo dojít k zapnutí, musel by se sepnout tranzistor Q_7 , což se ale stát nemůže, protože je sepnut tranzistor Q_8 . Tranzistor Q_8 se rozepne teprve ve chvíli, kdy napětí na napájecí věti $3V3$ poklesne natolik, aby už neudrželo tranzistor sepnutý a v tu chvíli už nemůže dojít k sepnutí tranzistoru Q_7 .

Přestože G tranzistoru Q_{p2} je řízený stranou paměti G tranzistoru Q_8 , tyto dráhy musí být částečně odděleny. V případě přímého spojení by totiž paměťová buňka nemohla správně plnit svoji funkci, protože by na ni bylo skrz rezistor R_{11} ve vypnutém stavu přivedeno napětí baterie. To by mělo za následek růst spotřeby ve vypnutém stavu zaviněný částečným startem zařízení a především nemožnost normálního startu. Skrze resistory R_{11} a R_{12} by se totiž dostalo napětí baterie na napájecí větev $3V3$, kde by mohlo některé systémy uvést do provozu. Proud tekoucí přes rezistory R_{11} a R_{12} by dosahoval řádově desítek mikroampér, což by spotřebu ve vypnutém stavu navýšilo přibližně o řád. Významnější problém by ale byl otevřený tranzistor Q_8 , který by tak držel zavřený tranzistor Q_7 , což by znemožnilo nemožnost správného startu zařízení. Řešením tohoto problému je tranzistor Q_6 , který se sepne jen ve chvíli, kdy je v paměti zapsána správná hodnota. Tehdy je jeho S připojeno skrze tranzistor Q_7 k zemi a jeho G skrze rezistor R_{13} k napětí $3,3\text{ V}$ a je tedy plně otevřen. Naopak ve chvíli, kdy je do paměti zapsán povel k vypnutí, je na jeho S připojeno skrze rezistor R_{12} napětí napájecí větve $3V3$ a jeho G skrze tranzistor Q_8 k zemi a je tedy plně uzavřen. Tímto způsobem je tedy zajištěno oddělení paměťové buňky od G tranzistoru Q_{p2} .



Obr. 3.5: Nová verze správy zapínání

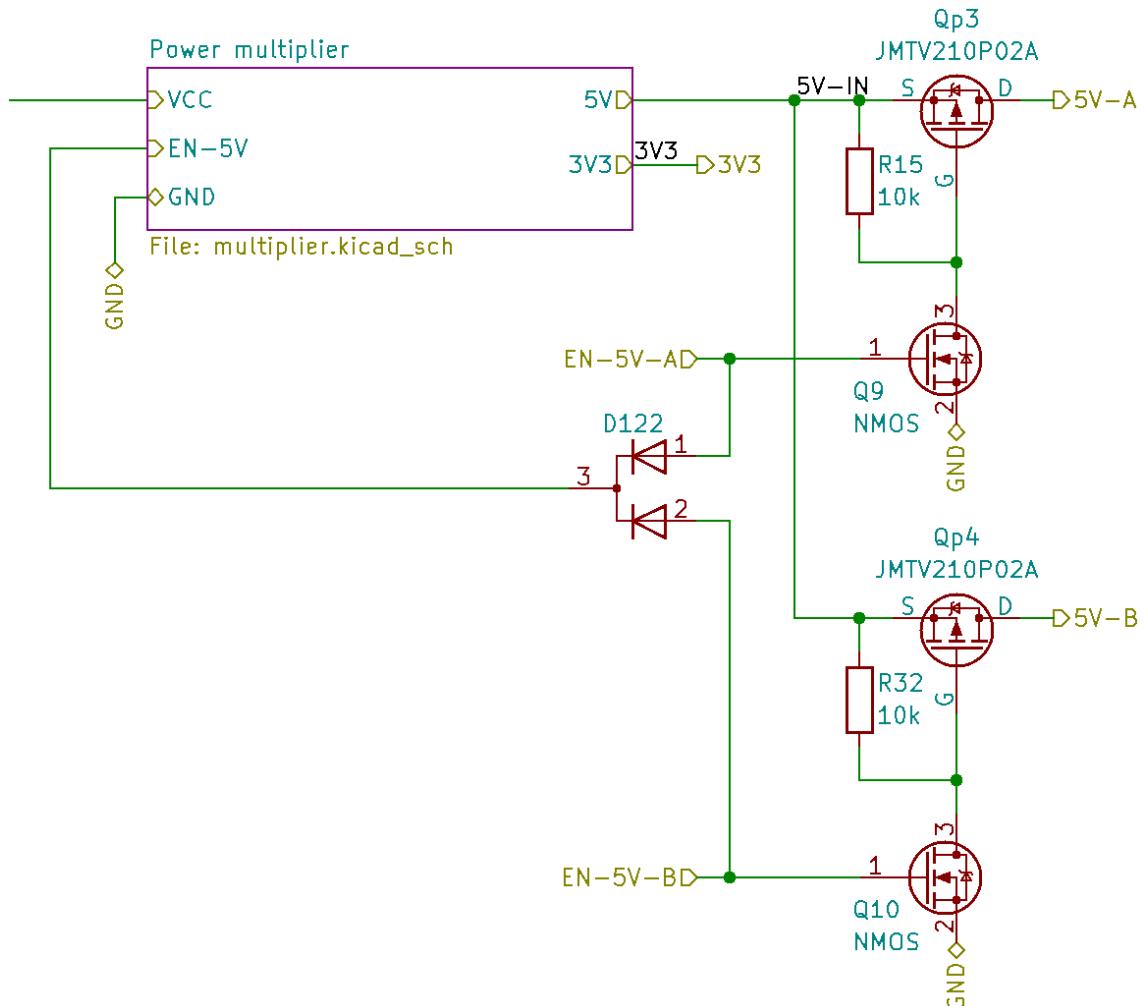
3.1.10 Výkonová napájecí větev

Jako napájecí napětí pro výkonové části zařízení slouží napětí 5 V, protože toto napětí využívají světelné kruhy, skládající se z LED WS2812 [29]. Tyto LED mají rozsah napájecího napětí 3,5 až 5,3 V, a právě proto volím napájecí napětí 5 V. Stačilo by sice i napětí nižší, ale s větví 3,3 V bych výkonovou větev tak jako tak nespojil. Především by tak však byl nutný složitější spínaný zdroj, který by musel spínat nejen na vyšší napětí, ale i na nižší, podle toho jaké napětí je zrovna na baterii. Navíc je napětí 5 V vhodný i pro napájení na modulovém konektoru.

Vznikají tak dva systémy, které jsou napájeny napětím 5 V, především LED

kruhy ale také moduly připojené na modulovém konektoru. Protože oba tyto systémy mohou mít nezadanou spotřebu i ve chvíli, kdy nejsou používány, je vhodné mít možnost odpojit je od napájení. Použité LED mají totiž spotřebu i ve vypnutém stavu $0,5\text{ mA}$, což při počtu 120 LED dělá klidovou spotřebu 60 mA . U modulu toto sice neumím říct dopředu, ale dá se předpokládat, že bude výhodné moduly vypínat.

Čím jemnější dělení, tím lépe půjde optimalizovat spotřeba. Protože jsou všechny moduly připojeny na stejném konektoru, znamená to dvě samostatně ředitelné větve. Navíc je vhodné vypínat i samotný zdroj obou větví ve chvíli, kdy není využíván. Za tímto účelem jsem tedy implementoval schéma na obr.3.6



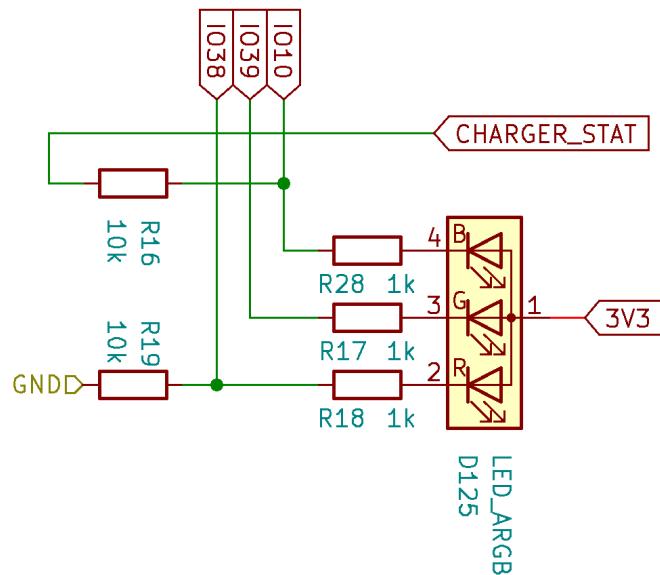
Obr. 3.6: Spínač výkonové větve

Výchozí stav vstupů $EN-5V-A$ a $EN-5V-B$ je 0 V , což je definováno pomocí rezistorů, které tyto dráhy připojuje k zemi. Tyto rezistory však ve schématu na obr.3.6 nenajdete, protože jsou součástí schématu s mikrokontrolérem. Tam jsou zároveň použity k definici výchozího stavu pinů $IO45$ a $IO46$, které se používají při startu

procesoru. Ve výchozím stavu druh *EN-5V-A* a *EN-5V-B* je tedy 0 V , což znamená rozpojené tranzistory Q_9 a Q_{10} . Výsledkem rozpojení tranzistorů Q_9 a Q_{10} je tedy za pomocí rezistorů R_{15} a R_{32} i rozpojení tranzistorů U_9 a U_{15} . Současně s tím je 0 V i na dráze *EN-5V*, která řídí spínaný zdroj základní pěti voltové větve. Výchozí stav této dráhy je opět definovaný připojením k zemi přes rezistor, který je tentokrát umístěn ve schématu spínaného zdroje. Ve chvíli, kdy dojde z procesoru povel k zapnutí jedné z větví, řekněme větve *5V-A*, mikrokontrolér přivede napětí $3,3\text{ V}$ na dráhu *EN-5V-A*. Tedy přivede napětí $3,3\text{ V}$ na *G* tranzistor Q_9 , čímž jej sepne a zároveň skrze jednu diodu D_{122} na *EN-5V*, čímž uvede do provozu spínaný zdroj a tedy přivede napětí na dráhu *5V*. Následkem sepnutí tranzistoru Q_9 se přivede 0 V na *G* tranzistoru U_9 , čímž se sepne a přivede napětí 5 V na dráhu *5V-A*. Obdobně pak v případě aktivace dráhy *5V-B*.

3.1.11 Jednoduchá signalizační LED

Pro signalizaci některých stavů jsem do zařízení přidal i obyčejnou RGB LED. Je řiditelná z mikrokontroléru, ale ve chvíli, kdy ji mikrokontrolér aktivně neřídí, může slabým svitem signalizovat i některé hardwarové stavы. Červeným kanálem signalaže, že je zařízení v chodu a modrým kanálem informuje o stavu nabíjení. Když nabíjení probíhá, svítí modrý kanál trvale. Když nabíjení neprobíhá, např. když je dokončeno, modrý kanál nesvítí a v případě, že nabíjecí obvod BQ25895 [27] detekuje nějaký problém, bliká s frekvencí 1 Hz . Zapojení LED je vidět na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Zapojení prosté signalizační RGB LED

Zdvojení řízení LED umožňují dodatečné odpory R_{16} a R_{19} . Ve chvíli, kdy je tak např. pin mikrokontroléru pin *IO38* ve stavu vysoké impedance, je červený kanál

diody vlastně připojen přes odpor $11\ k\Omega$ k zemi. Výsledný jas diody sice není vysoký, ale informaci uživateli předá.

3.1.12 Odhad spotřeby zařízení

Spotřeba zařízení bude silně záviset na typu využívání. Některé hry například mohou vyžadovat jen jednu-dvě svítící LED naráz a jiné naopak mohou pracovat se všemi naráz. Navíc budou spotřebu ovlivňovat aktuálně připojené moduly. Pro odhad tedy budu předpokládat spíše náročnější podmínky, aby byl odhad spíše skepticky.

Předpokládám využití jednoho světelného kruhu s osmdesáti procentním jasem jednoho kanálu LED. Zároveň předpokládám běžící tlakovou plochu a bezdrátovou komunikaci. U spínaného zdroje, který zprostředkovává napájení větve $U_{OUT} = 5\ V$ předpokládám efektivitu $\mu = 95\%$ [30]. Nakonec aktuální napětí baterie $U_{bat} = 3,5\ V$.

- LED WS2812 [31]
 - spotřeba jednoho kanálu je dle dokumentace $12\ mA$, při osmdesáti procentním jasu tedy $I_{LED-k} = 9,6\ mA$
 - fixní spotřeba řídící elektroniky celé LED $I_{LED-d} = 0,5\ mA$
- Moduly
 - průměrnou spotřebu modulu předpokládám na $I_{mod} = 50\ mA$ (předpokládám, že moduly budou pracovat jen malé procento času)
- Tlaková plocha
 - spotřeba LDC1614 je $I_{LDC} = 35\ \mu A$ [4]
- ESP32-S3
 - spotřebu při využívání WiFi odhaduji na základě měření uvedeného v dotazu na ESP32 foru [32] jako $I_{ESP} = 150\ mA$

$$I_{bat} = \frac{U_{OUT}}{U_{bat} \cdot \mu} \cdot (60 \cdot (I_{LED-k} + I_{LED-d}) + I_{mod}) + I_{LDC} + I_{ESP} = \frac{5}{3,5 \cdot 0,95} \cdot (60 \cdot (12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 10^{-3}) + 50 \cdot 10^{-3}) + 35 \cdot 10^{-3} + 150 \cdot 10^{-3} = 1,17\ [A]$$

Při kapacitě jednoho článku baterie $C_{čla} = 3400\ mAh$ [33], tedy dvojnásobné kapacitě celé baterie, tak můžeme určit výdrž na jedno nabítí jako:

$$t_{vyd} = \frac{2 \cdot C_{čla}}{I_{bat}} = \frac{2 \cdot 3,4}{1,17} = 5,8\ [h] \text{ resp. } 5\ hodin + 48\ minut$$

To sice vychází na trochu míň, než jsem na začátku kapitoly požadoval, ale dá se předpokládat, že během nastavování bude spotřeba nižší. Předpokládám totiž, že při nastavování nebudou LED svítit tak vysokým jasem.

Kromě spotřeby za provozu je také vhodné určit spotřebu zařízení ve vypnutém stavu. Nebylo by totiž vhodné, aby během nečinnosti došlo k podbití baterie a tím

pádem k jejímu poškození.

Na spotřebu ve vypnutém stavu má vliv několik součástek. Jde především o proud, tekoucí do nabíjecího obvodu bq25895M [27], ale také o ochranu baterie SL8261D [28] a několik tranzistorů v zapínacím obvodu uvedeném na obr. 3.5.

- Dokumentace nabíjecího obvodu bq25895M [27] udává spotřebu ve stavu nečinnosti $I_{nab} = 12 \mu A$.
- Ochrana baterie SL8261D [28] udává spotřebu v sepnutém stavu $I_{och} = 3 \mu A$.
- Hlavní spínací MOS transistor [**WSD20L75DN33**] udává proud v rozepnutém stavu maximálně $I_{PMOS} = 1 \mu A$.
- Dva logické MOS transistor [34] udává proud v rozepnutém stavu maximálně $I_{NMOS} = 1 \mu A$.

Výslednou spotřebu ve vypnutém stavu tak můžeme určit jako:

$$I_{vyp} = I_{nab} + I_{och} + I_{PMOS} + I_{NMOS} = (12 + 3 + 1 + 1) \cdot 10^{-6} = 17[\mu A]$$

Při této spotřebě tedy určíme dobu za kterou by se zařízení vybilo jako:

$$t_{vyd} = \frac{2 \cdot C_{ela}}{I_{vyp}} = \frac{2 \cdot 3.4}{17 \cdot 10^{-6}} = 3.9 \cdot 10^5 [h] \text{ resp. } \frac{3.9 \cdot 10^5}{24 \cdot 365} \approx 46 [let]$$

Spotřeba ve vypnutém stavu je tedy víc než dostatečně malá. Nepodařilo se mi najít hodnoty samovybíjení použitých článků, ale dá se předpokládat, že budou řádově větší než spotřeba elektroniky ve vypnutém stavu.

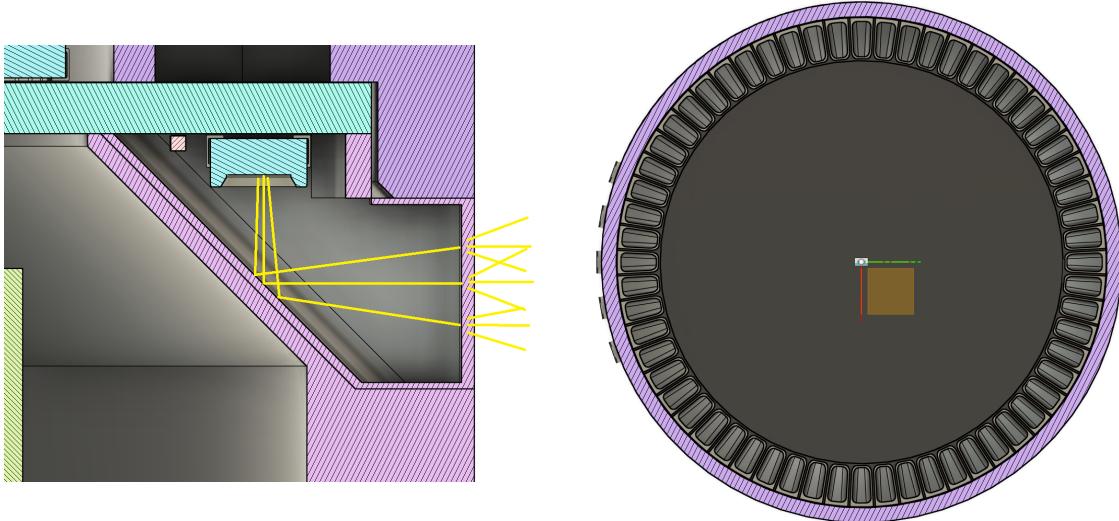
3.2 Mechanická stavba

Celé zařízení bude mít tvar krátkého válce. Na horní stranu je umístěn axiální světelný kruh, do kterého je umístěna tlaková plocha. Na bocích je pak umístěn radiální světelný kruh a základní uživatelské ovládání.

Z důvodu minimalizace součástí je výhodné LED radiálního světelného kruhu umístit na LED desku místo na samostatný díl. Zároveň je to způsob, jak se vyhnout montáži současně radiální i axiální. Na prvním prototypu jsem totiž zvolil možnost osadit jen axiální kruh a radiální jsem vytvořil pomocí LED pásku, který jsem omotal kolem krytu zařízení. Výsledkem byla neprakticky komplikovaná montáž, kterou se i touhle cestou snažím co možná nejvíce zjednodušit bez ztráty výsledné kvality.

Axiální kruh osazený přímo na DPS ovšem znamená další komplikaci, jeho účelem je totiž svítit ve směru rovnoběžném s plochou DPS. Použité LED tedy musí svítit v ose rovnoběžné s plochou desky. To se dá zařídit buď do strany svítícími LED nebo zajistit odraz světla do stran, tak aby mohly diody svítit ve směru kolmém na plochu DPS a aby přesto vzniklý světelný kruh svítil radiálně.

Do strany svítící inteligentní LED sice existují, ale nemají vhodné rozměry a navíc jsou výrazně dražší. Proto jsem se rozhodl použít stejné diody jako na axiálním kruhu a doplnit tělo zařízení o odraznou plochu, která zajistí správný výsledný směr světla. Zároveň, abych pokud možno zachoval rozlišitelnost jednotlivých LED, jsem mezi ně přidal přepážky. Jejich cílem je minimalizovat přesvity jednotlivých diod do prostoru diod sousedních. Obojí je vidět na obr.3.8.



Obr. 3.8: Odrazná plocha a přepážky Radiálního světelného kruhu

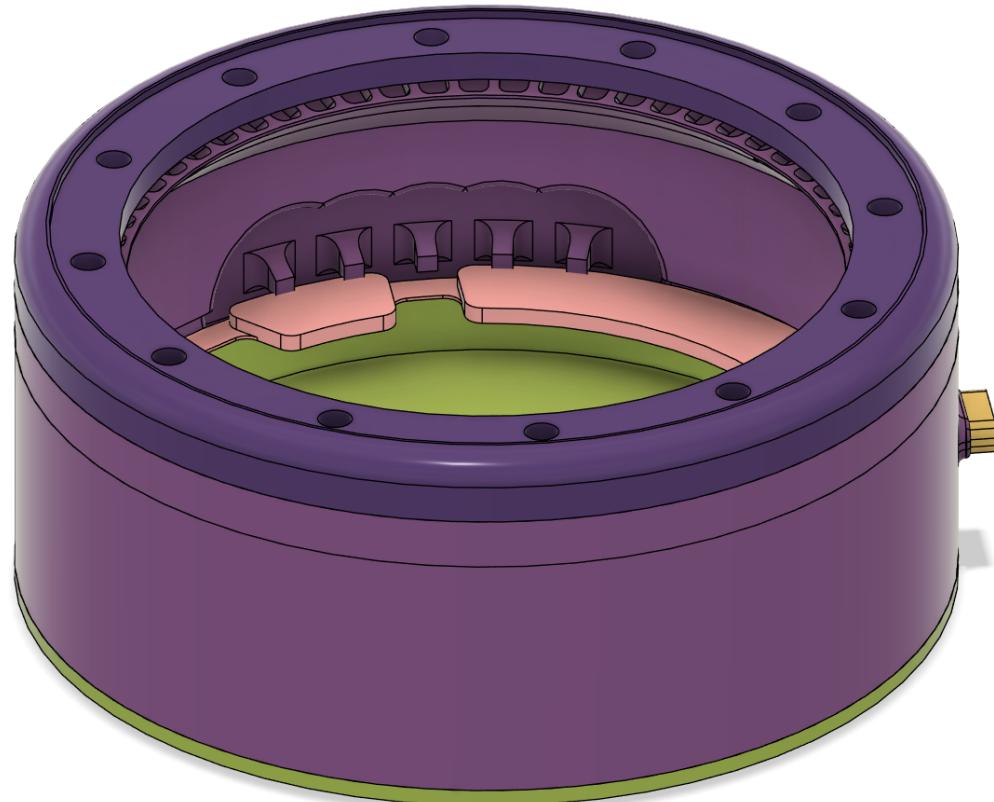
Významnou mechanickou částí je také uložení tlakové plochy. Tento systém se skládá ze snímací části, která je součástí LED desky a snímané části, terčíků, se kterou je v kontaktu uživatel. Terčíky se musí při používání pohybovat, sice málo ale za to konzistentně, aby bylo možné výsledek použít jako ovládací prvek. Protože se navíc tlaková plocha nachází uvnitř axiálního světelného kruhu, je nutné, aby byl terčík buď průsvitný nebo uchycený až uvnitř kruhu. Uchycení uvnitř kruhu by ale znamenalo zmenšení snímatelné plochy a potřebu poměrově výraznějších deformací, aby se dosáhlo stejné změny indukčnosti. Abych minimalizoval velikost nesnímaných okrajů, rozhodl jsem se pro průsvitnou variantu.

V první verzi jsem tedy terčíky řešil tenkým plošným spojem, na kterém jsem odleptal vše kromě kruhu o něco málo menšího než vnitřní průměr světelného kruhu. Měď tak sloužila jako vodivý terčík. Sklolaminát, který tvoří nosnou část DPS, sice není úplně čirý a způsobuje tak difuzi světla, ta ale v tomto případě nevadí. Tuto DPS jsem následně přilepil na tělo zařízení, těsně nad LED desku na mezikruží obklopující světelný kruh. Zvolil jsem tedy 0.6 mm tlustá FR4 DPS. Tloušťku jsem zvolil tak, aby umožnil co možná největší deformace a ulehčil tak rozlišování skutečného stisku od nežádoucího šumu.

Tato metoda však měla pár nedostatků. Především 0.6 mm tlustá FR4 DPS nebyla dostatečně stálá a docházelo k její postupné trvalé deformaci. Po několika měsících tak DPS začala tvarem připomínat misku, což vedlo k porušení lepidla a bylo tak nutné ji lepit znovu. Rozhodl jsem se proto DPS zesílit, aby trvalým deformacím lépe odolala.

Samotný kryt zařízení jsem rozdělil na několik částí, jejichž sestava je vidět na obr.3.9

- Hlavní tělo, jehož součástí je odrazná plocha pro radiální světelny kruh a hmatník tlačítek, který je součástí těla z důvodu těsnosti zařízení
- Horní okraj, který překrývá okraje LED desky a usazuje DPS terčíku
- Zadní víko, které se šroubuje do závitu v hlavním těle a zajišťuje tak uchycení hlavní desky a zároveň uzavírá zařízení
- Distanční přítlačná vložka, zajišťující rovinost plochy hlavní desky v místech kontaktu s šroubovacím víkem
- Dodatečný díl, který by ideálně byl součástí hlavního těla, ale pro usnadnění tisku je oddělen, tisknut zvlášť a následně pomocí pozičních výstupků zapožcován a nalepen k hlavnímu tělu



Obr. 3.9: Sestava krytu bez elektroniky a terčíku tlakové plochy

4 Návrh dynamického zařízení

Z praktických důvodů jsem tomuto zařízení dal jméno Semisemafor. Idea zařízení totiž částečně vychází z projektu Semafor [35], který často sloužil podobně jako dopravní semafor, podle kterého dostal své jméno.

Vstup Semisemaforu bude realizován pomocí dvou tlačítek a šestiosého IMU, pro možnost používání gest. Světelný výstup bude realizován pomocí dvanácti RGB LED uspořádaných do kruhu. Číslo dvanáct bylo zvoleno proto, aby korespondovalo s hodinami, typicky pro hry, kde probíhá nějaký odpočet.

Aby nebylo nutné starat se o baterii, je napájení zajištěno pomocí USB-A konektoru a malé powerbanky, která se tak dá třeba i snadno vyměnit za nabítou.

4.1 Výběr součástek

Protože zařízení bude vyráběno u firmy JLCPCB, je výhodné využívat součástky, které mají ve své nabídce. Dá se sice zařídit, aby firma osadila i součástky od externího dodavatele, ale je to o něco složitější a je tak jednodušší se tomu vyhnout.

Aby nebylo nutné pro práci se Semisemaforem a AHS používat různá prostředí, je výhodné použít stejný mikrokontrolér nebo alespoň mikrokontrolér ze stejné rodiny. Proto byl zvolen mikrokontrolér ESP32-C3-MINI-1, který je ve srovnání s ESP32-S3 výrazně levnější a aplikaci plně dostačuje. ESP32-S3 má stejně jako ESP32-S3 USB periferii, která se dá využít na programování kontroleru. I tady je ale problém, že se tato metoda dá softwarově narušit a Semisemafor je proto vybaven stejným programovacím konektorem jako ESP32-S3 na AHS.

Protože mám dobré zkušenosti s LED WS2812B, zvolil jsem na LED kruh jejich typickou pětimilimetrovou variantu.

IMU na semaforu nemá sloužit pro žádná přesná měření, ale např. pro detekci jednoduchých gest nikoliv pro přesné měření zrychlení, nezáleží proto tolik na jeho přesnosti. Při jeho výběru šlo proto primárně o cenu a zvoleno bylo LIS2DH12TR [36], které komunikuje po SPI nebo I2C, ze kterých jsem zvolil SPI.

Mikrokontrolér ESP32-C3 i LIS2DH12TR mají rozsah napájecího napětí do 3,6 V [7][36]. Není proto možné je napájet přímo z napětí na USB, na kterém je k disposici napětí 5 V a bude tedy potřeba měnič. ESP32-C3 požaduje zdroj se schopností dodat 0,5 A¹ a jeho typická spotřeba ze zkušenosti nepřesáhne 200 mA, LIS2DH12TR pak vyžaduje zanedbatelných 185 µA (v závislosti na vzorkovací frekvenci i výrazně méně, viz [36] strana 17, tabulka 12). Považuji proto za vhodné pro jeho napájení

¹specifikováno v katalogovém listu [7] na straně 20, v tabulce 10

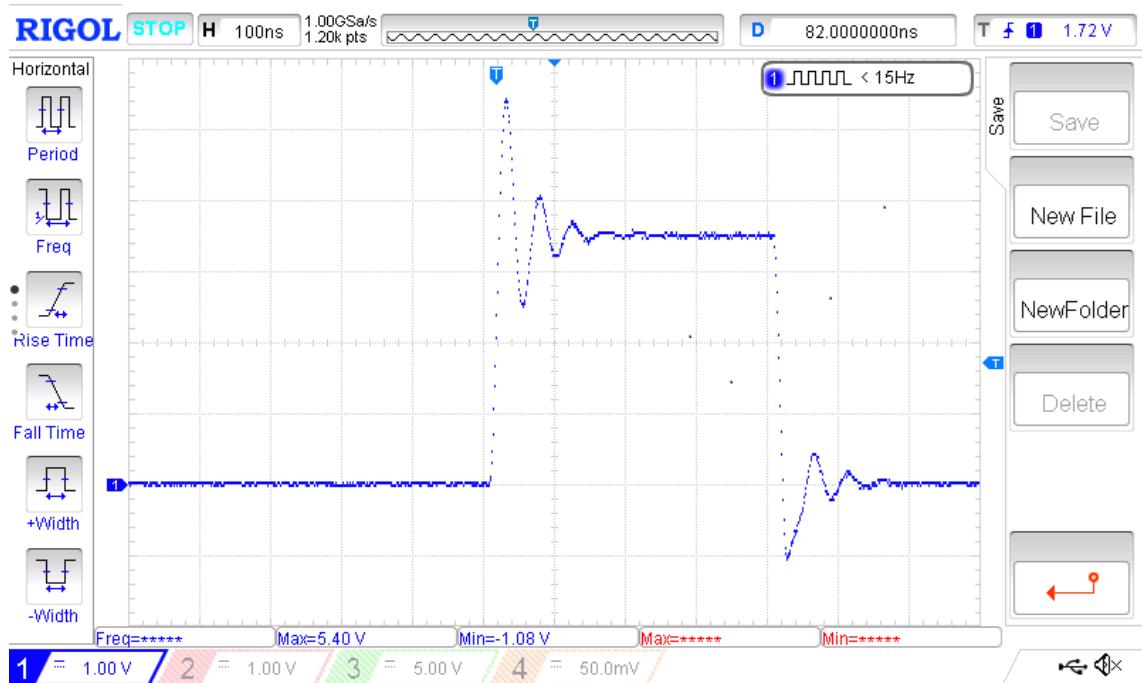
použít LDO. Z nabídky JLCPCB jsem proto zvolil LD39200 [37] pro jeho elektrické parametry a malé pouzdro.

4.2 Návrh schématu a DPS

Doplnil jsem blokovací kondenzátory dle doporučení výrobců, zpětnovazební dělič k LDO a k tlačítkům jsem připojil kondenzátor proti odskokům. Také jsem doplnil rezistory připojující pin mikrokontroleru, využívané při startu procesoru, k napájení resp. k zemi, podle jejich účelu. Dostal jsem tak schéma, umístěné v příloze C.1.

4.3 Prototypy

Při testování první verze, byl problém s neovladatelnými LED. Výsledkem pokusů o nastavení barvy bylo jen náhodné rozsvěcování a zhasínání. Když jsem připojil osciloskop na řídící signál diod, obdržel jsem signál 4.1



Obr. 4.1: Zarušená komunikace s LED

Tento problém jsem vyřešil doplněním feritu do cesty řídícího signálu, abych utlumil vyšší harmonické složky.

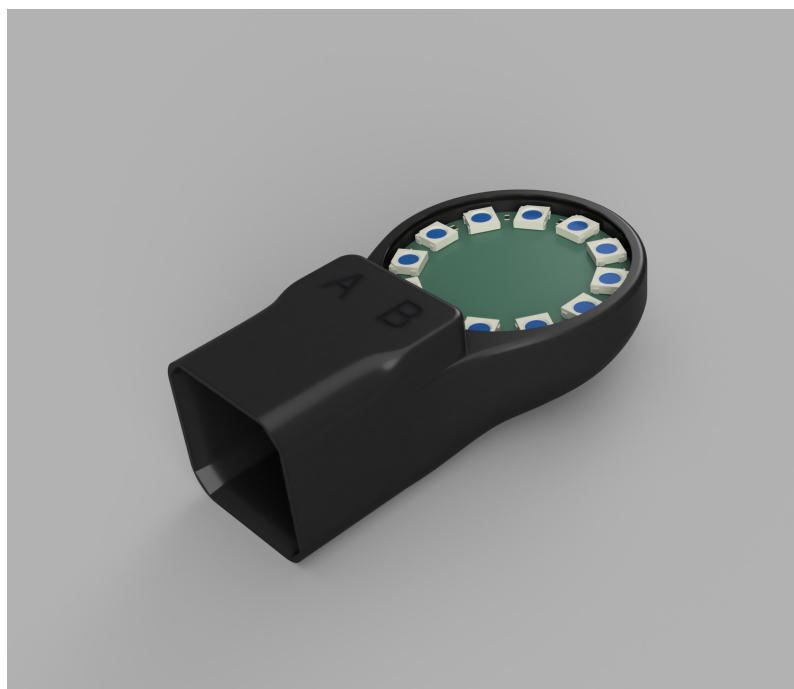
Kvůli servisním zákrokům a konstrukci krytu jsem navíc přidal i další dvě kontaktní plošky pod USB konektor. Důvodem doplnění těchto plošek je volba nerozebíratelného krytu zařízení a potenciální možnost narušení programování prostřednictvím USB. Plošky tak umožní dostat zařízení do správného stavu pro nahrání programu bez nutnosti zničení krytu. Výsledné schéma je umístěné v příloha C.2 a z něj navržená topologie DPS je vyobrazena v příloze D.1.

4.4 Mechanická stavba

Jedním z podstatných požadavků byla jistá úroveň krytí proti vodě, aby se zařízení dalo používat i za deště. To nutně neznamená úplnou vodotěsnost, dá se totiž předpokládat, že zařízení bude používáno v poloze, kdy otvor pro powerbanku směruje k zemi. Stačí tedy zajistit těsnost proti stékající vodě v jednom směru.

Navíc se během testování objevil ještě požadavek na zpětnou vazbu tlačítka v podobě jeho kliknutí. Uživatel totiž musí vědět, že tlačítko skutečně stiskl, na což je mechanická odezva samotného tlačítka ideální.

Po několika iteracích jsem obdržel výsledný vzhled (viz obrázek 4.2)



Obr. 4.2: Vzhled Semisemaforu

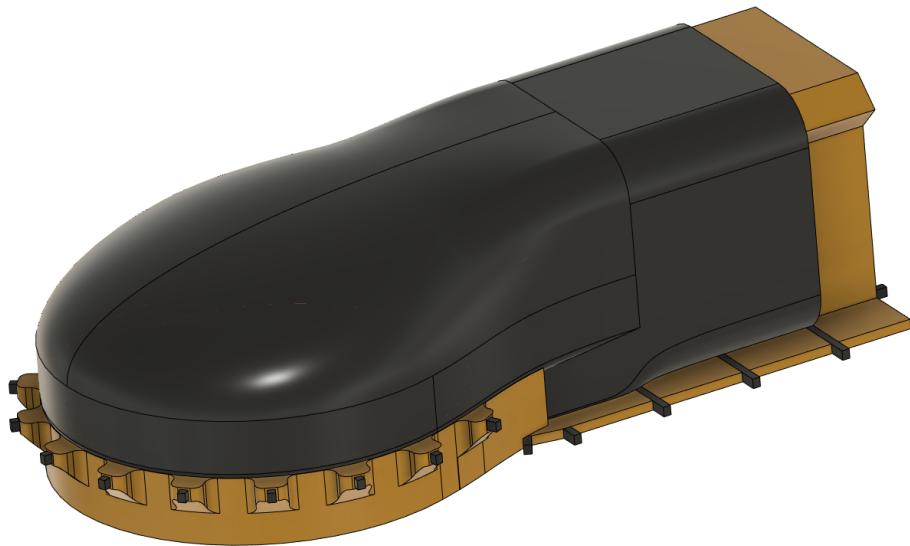
Jako technologii výroby jsem zvolil obyčejný FDM 3D tisk. Původně jsem chtěl použít materiál ASA pro jeho UV odolnost. Ukázalo se však, že jsem nebyl schopen navrhnut mechaniku celého zařízení tak, aby byl výsledek dostatečně voděodolný

a zároveň měla tlačítka uspokojivou zpětnou vazbu. ASA bylo příliš tuhé a cvaknutí mikrospínače tak utlumilo natolik, že bylo uživatelem nezaznamenatelné. Obdobné výsledky jsem měl u materiálů PETG, PLA, ABS a několika dalších. Jediný materiál, u kterého jsem dosáhl uspokojivých výsledků, byl polypropylen (PP).

Problém tisku polypropylenu je jeho tepelná roztažnost, za běžných teplot proto má při tisku silnou tendenci se kroutit, což značně zesložituje jeho tisk. Jednou s možností by bylo celý tisk provádět při teplotě přes 120°C , kde začíná probíhat rekrystalizace a polypropylen se začíná výrazně smršťovat. Tato možnost ale nese nutnost použití speciální tiskárny, která umožnuje tiskový prostor vyhřát na takto vysokou teplotu, a proto byla zvolena méně spolehlivá ale jednodušší metoda.

Použitá metoda je založena na vícemateriálovém tisku, přičemž primární je užitečný tisknutý objekt z polypropylenu a druhý dobře tisknutelný materiál tvoří podpěry a přítlak. Aby tak bylo možné vytisknout i tvar, který nemá vhodná místa pro umístění přítlaku, musí být opatřen technologickými výstupky, které se po tisku mohou odříznout.

Tiskový model jsem tedy doplnil o další objekt zajišťující přítlak a zároveň i podpěry. Výsledek je vidět na obr.4.3.



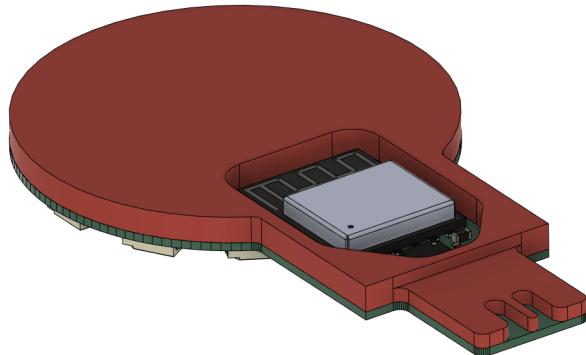
Obr. 4.3: Soustava modelů pro tisk

Aby nebylo nutné pouzdro tisknout na více dílů, zvolil jsem možnost zatiskávání DPS během tisku. Pokaždé, když tisk dospěl do správného bodu, pozastavil se, aby bylo možné vložit elektroniku a následně pokračoval.

Kromě elektroniky jsem stejným postupem umisťoval i průhledové „sklíčko“. Z důvodu zachování odolnost proti vodě, je toto „sklíčko“ také z polypropylenu, aby se během tisku přivařilo k okolní hmotě a vytvořilo tak vodotěsný spoj.

Protože je DPS semaforu oboustranně osazena, byl při zatiskávání ještě jeden problém. DPS by se dala vložit zarovnaná plochou substrátu s aktuální tiskovou vrstvou. Což by však znamenalo, že by tisková hlava mohla narazit do nějaké z vystupujících součástek.

Alternativou by bylo zarovnat aktuální tiskovou vrstvu s nejvyšším bodem nejvyšší součástky, což by ale znamenalo, že by elektronika nebyla pevně uchycena. Tento problém jsem proto vyřešil vložkou, která se před zatištěním přilepí na spodní stranu DPS a srovná ji tak do roviny. Vložka navíc umožnila přítomnost dodatečných kontaktních plošek z druhé strany USB, protože bez ní by se tyto plošky vyzkratovali o stínění USB konektoru. Za tímto účelem jsem také DPS nechal vyrobit v tloušťce 0.8mm, aby byly tyto dodatečné plošky lépe kryty. DPS opatřena vložkou je vidět na obr 4.4.

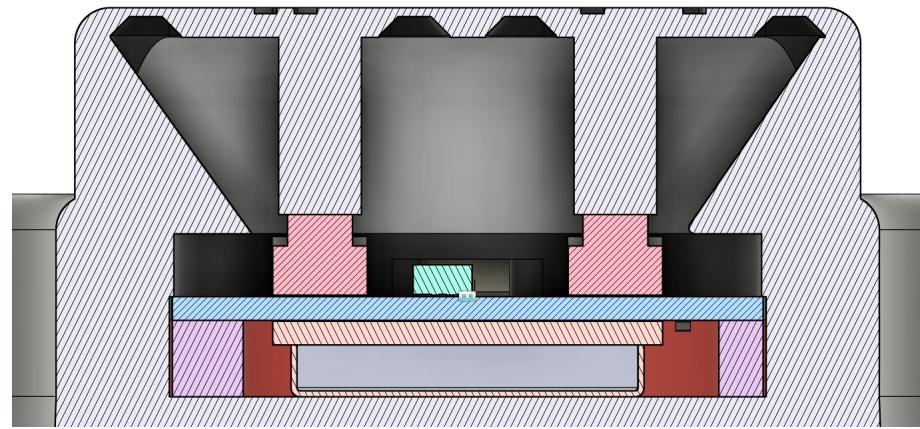


Obr. 4.4: DPS Semisemaforu opatřena vložkou

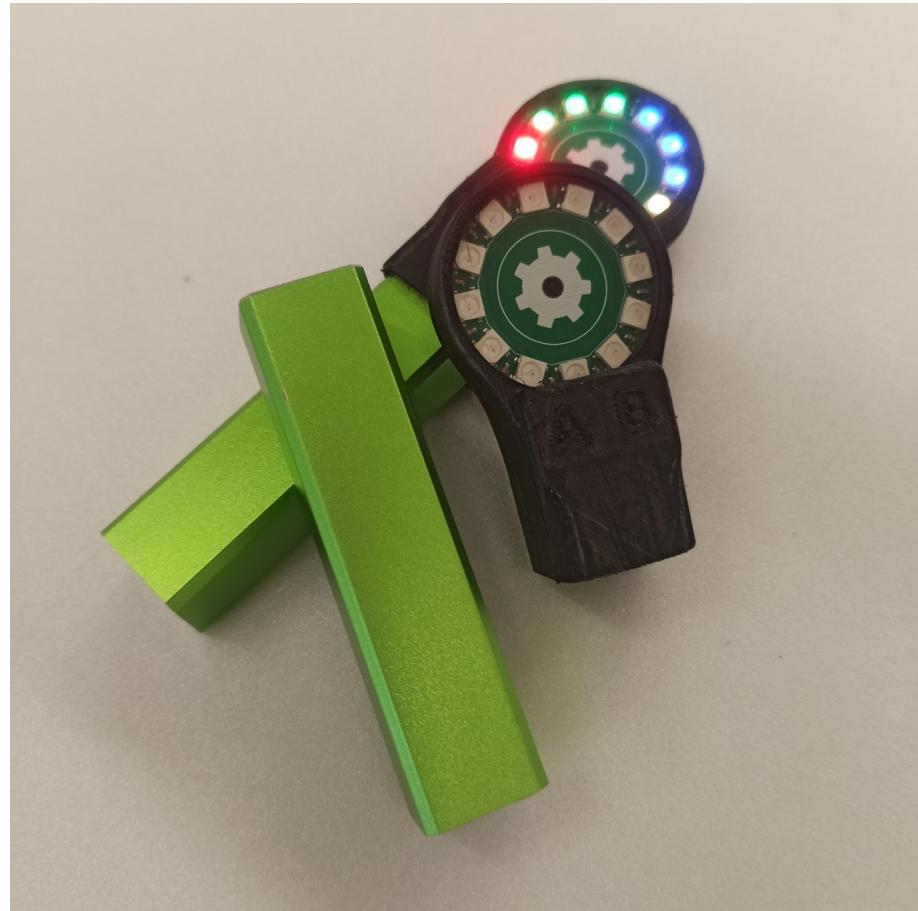
Aby bylo tlačítko dostatečně měkké, mělo dostatečně silnou odezvu a zároveň bylo odolné vůči vodě, zvolil jsem tenkou membránu, ze které vede šoupátko k tlačítku. Při stisku membrány je tak pomocí šoupátka stisknuto i tlačítko. Zároveň aby nebylo nutné mačkat přesně na místo, kde je uchyceno šoupátko a aby se zabránilo možnému sklouznutí šoupátka z tlačítka, zesílil jsem střed membrány, takže se z membrány stal hmatník po obvodu uchycený k tělu Semisemaforu, jak je vidět na obr. 4.5

Abych ještě zvýšil odolnost proti vodě, přidal jsem na desku konformní povlak jako poslední vrstvu ochrany proti vlhkosti. Ve chvíli, kdy se tak dostane vlhkost dovnitř Semisemaforu, elektronika přesto zůstane částečně chráněna.

Reálná fotografie dvou Semisemaforů je k vidění na obr. 4.6.



Obr. 4.5: Řez tlačítky



Obr. 4.6: Reálný kus Semisemaforu

5 Testování statického zařízení

5.1 Tlaková plocha

V rámci testování tlakové plochy jsem testoval primárně schopnost určit polohu stisku a také citlivost na působící sílu. Rozpoznávání polohy stisku je primárně programový problém a poměrně rychle jsem jej tak posunul na kolegu, který se zabýval právě programem výsledného zařízení. Kolega Tomáš Rohlínek poměrně rychle dodal program, který je sto vyhodnotit polohu stisku tlakové plochy a zobrazit ji na axiálním světelném kruhu. Člověk tak může určovat, která LED z kruhu svítí a silou stisku jí regulovat barvu.

Sám jsem pak testoval citlivost plochy na působící sílu, konkrétně její schopnost fungovat jako váha. Nejmenší zkoušený objekt, který jsem byl sto tlakovou plochou rozeznat, byl SMD rezistor v pouzdře 0603, vážící pravděpodobně jednotky miligramů (mikrováhou měřící od 0.01 g jsem jej nerozeznal). Při testování citlivosti jsem však průměroval výstup plochy z posledních deseti sekund a pro praktické užití tak tato přesnost není, navíc jde už o tak malé rozlišení, že zde hraje roli řada okolních podmínek. Podstatné je také zmínit, že terčík byl tvořen 0.6 mm tlustou FR4 DPS a zároveň plní funkci pružné části systému. Výsledné chování tudíž nebylo zcela konzistentní v čase. Při použití plochy jako váhy by bylo vždy nutné provést kalibraci a vzít tak v potaz aktuální deformaci DPS.

Výsledkem tohoto testování je každopádně potvrzení funkčnosti tlakové plochy. Testování navíc potvrzuje její vysokou citlivost a schopnost sloužit jako ovládací prvek.

5.2 Spotřeba

Podstatným parametrem zařízení je jeho spotřeba a tedy doba, po kterou může běžet z baterie.

V rámci prostého měření proudu baterií jsem měřil spotřebu v „menu“ zařízení, tedy při využívání tlakové plochy a obou světelných kruhů. Axiální kruh slouží pro nastavení jasu zařízení a je rozdělen na čtvrtiny, které svítí s různou intenzitou. Jas radiálního kruhu se pak mění dle aktuálního nastavení. Měření tedy neprobíhalo za plného jasu všech LED, ale jen při takovém jasu, který odpovídá skutečnému použití. Spotřebu jsem tak při jejím měření mohl nastavováním jasu regulovat.

Při napětí 4 V, tedy při napětí odpovídající cca z poloviny nabité baterii, jsem při nastaveném maximálním jasu naměřil proud 780 mA a naopak při minimálním, neboli 4% jasu, 320 mA. Při kapacitě baterie 4400 mAh to tak odpovídá výdrži $4400/780 = 5.64$ h až $4400/320 = 13.75$ h.

6 Testování dynamického zařízení

6.1 Spotřeba

Podstatným parametrem zařízení je jeho spotřeba a tedy doba, po kterou je možné zařízení provozovat z powerbanky.

V rámci prostého měření vstupního proudu při využívání všech periferií vyjma WiFi a Bluetooth, jsem při napětí 5 V změřil vstupní proud v rozsahu 35 mA až 195 mA v závislosti na aktuálním využití LED kruhu. Provozní příkon je tedy v rozsahu $35[mA] \cdot 5 [V] = 175[mW]$ až $195[mA] \cdot 5 [V] = 975[mW]$. Jako zdroj budeme používat powerbanku s kapacitou 2200[mAh]/ 3,7[V] neboli 8,14 Wh. Efektivitu převodu napětí u konkrétní powerbanky bohužel neznám, využil jsem tedy výsledku měření 73 různých powerbanek na stránce GeekBoy [38] a dále předpokládám efektivitu v hodnotě mediánu tohoto měření, tedy 86%. Dobu provozu zařízení tedy můžeme určit jako:

$$t_{min} = \frac{C\eta}{P_{in_max}} = \frac{8.14 \cdot 0.86}{0.975} = 7[h]$$
$$t_{max} = \frac{C\eta}{P_{in_min}} = \frac{8.14 \cdot 0.86}{0.175} = 40[h]$$

Během využívání WiFi stoupne vstupní proud při vypnutém LED kruhu na 90 mA, což odpovídá výdrži 15,6 h. Naopak při současném využívání LED kruhu (střídání plného jasu jednotlivých barevných kanálů) stoupla průměrná spotřeba na 278 mA, což odpovídá 5 h provozu.

K měření jsem použil osciloskop Rigol DS1045 a proudovou sondu I-prober 520, kterou jsem připojil na kabel z laboratorního zdroje, který jsem použil místo powerbanky, abych mohl připojit proudovou sondu. Uvedené hodnoty jsou pak střední hodnotou z 2,4 s dlouhého měření.

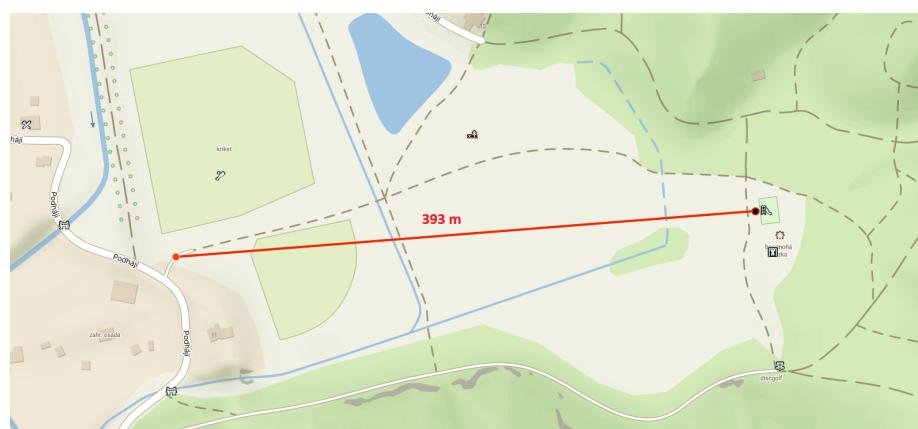
Další test výdrže jsem provedl prostým spuštěním hry s maximálním jasem. Výsledek, čtyři hodiny padesát minut. Výsledek tedy téměř přesně sedí na odhad založený na prostém měření proudu. Navíc je podstatné zmínit, že při reálných hrách je zařízení málokdy spuštěno na plný jas, a výdrž se tak může výrazně zvětšit.

Při následném testu s desetiprocentním jasem, který je pro noční hru víc než dostatečný, jsem naměřil výdrž 11,5 hodiny.

6.2 Dosah WiFi

V rámci testování dosahu WiFi jsem napsal kód zobrazující sílu přijímaného signálu na LED kruhu Semisemaforu, abych sebou během testování nepotřeboval další vybavení. ESP32-C3 umí sílu signálu změřit v rozsahu 10 dBm do -100 dBm . Protože mě ale zajímal především maximální dosah, zobrazoval jsem jen rozsah mezi -88 dBm a -100 dBm , jedna LED na jeden dBm . Případné odpojení klienta od serveru jsem pak signalizoval červeným blikáním, abych jasně viděl ztrátu spojení.

Samotný test jsem prováděl v Zamilovaném hájku v Brně v Řečkovicích, kde jsem předpokládal dostatek prostoru, abych narazil na limit spojení na přímou viditelnost. K mému překvapení se tak nestalo a i na vzdálenost 393 m měl pořád přijatý signál výkon kolem -95 dBm . Poloha měření je vidět na obrázku 6.1



Obr. 6.1: Mapa zobrazující polohu komunikujících zařízení [39]

Při testování v lese se dosah výrazně zkrátí, především pokud v cestě signálu stojí např. hustý keř. Přesto jsem ale většinou neměl problém navázat spojení na vzdálosti do padesáti metrů.

Závěr

V práci je popsáno několik outdoorových her, které nevyužívají elektroniku a následně je rozebrána možnost jejich rozšíření za využití elektroniky. Navíc je popsána i jedna hra, která od základu s elektronikou počítá. Na základě těchto her jsou odvozeny požadavky, které jsou na elektronická zařízení v hrách kladený. Následně byl proveden návrh a výroba dvou zařízení, která tyto požadavky plní a je tak možné je v outdoorových hrách nasadit.

Jednodušší zařízení je určeno k tomu, aby jej hráč nosil sebou, a jeho cílem je být dostatečně malé a levné, aby jej bylo možné používat při hrách ve velkém počtu. Využívá mikrokontrolér ESP32-C3 [7], dvanáct LED WS2812B [29] a jako zdroj malou powerbanku.

Druhé zařízení je určeno k tomu, aby zastoupilo organizátora na stanovišti a umožnilo mu tak zapojení do hry jiným způsobem. Toto zařízení tedy už nemusí být tak malé ani levné, protože se nepředpokládá nasazení v tak velkém počtu a je potřeba, aby bylo dobře viditelné. Zařízení je rozděleno na základní řídící jednotku a moduly, které jsou k základní jednotce připojeny pomocí atypicky použitého UARTu. Nestandardně je UART použit pro komunikaci jeden s více, namísto standardního jeden s jedním (viz podkapitola 3.1.6). To má za cíl umožnit připojení více modulů k jedné základní jednotce bez potřeby přeposílání zpráv skrz moduly. Zařízení má už vlastní baterii a elektroniku, která se stará o její nabíjení a chrání ji proti podbití a přebití. Řídícím mikrokontrolerem je ESP32-S3 [6] a také jsou zde využity LED WS2812B tentokrát ve větším množství. Významnou částí základní jednotky je také tlaková plocha (viz kapitoly 3.1.4 a 5.1), která umožňuje hráčům interagovat se základním zařízením pomocí doteku a tlaku.

Pro obě zařízení bylo také nutné vytvořit vhodný obal, který dokáže odolat např. dešti, kterému mohou být za provozu vystaveny. Zařízení byla také zprovozněna a ověřena jejich funkce.

Přestože jsou obě zařízení elektronicky i mechanicky funkční, je pro využití jejich potenciálu třeba další vývoj na straně programu obou zařízení. Také bude třeba vyvinout moduly k AHS, např. v práci zmíněný zvukový modul. Do budoucna bych také rád zřítil web, na kterém by byly dostupné již hotové hry, a který by umožňoval nahrávat hry přímo do zařízení. Touto cestou by totiž bylo možné výrazně usnadnit používání zařízení.

6.3 Použité zdroje

Online články a dokumenty

1. ON. *King of the Hill*. 2023-12-11. Dostupné také z: <https://www.hranostaj.cz/hra4170>.
2. T, M O. *Špiónské sítě*. 2023-12-11. Dostupné také z: <https://www.hranostaj.cz/hra5099>.
3. HOBIT. *Než se čas naplní*. 2023-12-11. Dostupné také z: <https://www.hranostaj.cz/hra4257>.
12. CORP., Realtek Semiconductor. *RTL8721DM*. 2023-12-10. Dostupné také z: <https://www.realtek.com/en/products/communications-network-ics/item/rtl8721dm>.
15. KUBICA, Petr. *Jaculus: Approachable Programming of Embedded Devices via Javascript*. 2023. Dostupné také z: <https://is.muni.cz/th/xf5wo/>.
16. MUSSARED, Jim. *MicroPython - ESP32-S3*. cca 2025-1-13. Dostupné také z: https://github.com/micropython/micropython/tree/master/ports/esp32/boards/ESP32_GENERIC_S3.
17. MUSSARED, Jim. *MicroPython - ESP32*. cca 2025-1-13. Dostupné také z: https://github.com/micropython/micropython/tree/master/ports/esp32/boards/ESP32_GENERIC.
18. BENPOON-MICROCHIP. *MicroPython on PIC32MZ W1*. 2023-12-13. Dostupné také z: https://github.com/MicrochipTech/PIC32MZ_W1_MicroPython.
19. MUSSARED, Jim. *MicroPython - ESP32-C6*. cca 2025-3-13. Dostupné také z: https://github.com/micropython/micropython/tree/master/ports/esp32/boards/ESP32_GENERIC_C6.
20. JLCPCB. *Vyhledávání hesla "ESP32-S3"*. 2023-12-10. Dostupné také z: <https://jlcpcb.com/parts/componentSearch?searchTxt=ESP32-S3>.
21. JLCPCB. *Vyhledávání hesla "WFI32"*. 2023-12-10. Dostupné také z: <https://jlcpcb.com/parts/componentSearch?searchTxt=WFI32>.
23. ING. JAROMÍR HUBÁLEK ET AL., prof.. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*. 2024. Dostupné také z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/836828/mod_resource/content/2/verze_2024.pdf.
25. KONIARIK, Jan. *Servio*. 2023. Dostupné také z: <https://github.com/emsro/servio/tree/main>.

32. LEAFMUNCHER. *ESP32 S3 WROOM + WiFi Power usage*. cca 2023-13-16. Dostupné také z: <https://esp32.com/viewtopic.php?t=37348>.
33. BOTLAND. *18650 Li-Ion Panasonic NCR-18650B*. Dostupné také z: <https://botland.cz/li-ion-baterie/5658-bunka-18650-li-ion-panasonic-ncr-18650b-3400mah-5903205772107.html>.
35. JAKUB ANDRÝSEK, Martin Ptáček a. *Herní zařízení semafor*. cca 2023-1-1. Dostupné také z: <https://github.com/RoboticsBrno/semafor>.
38. GEEKBOY. *Test powerbank*. 2025-5-15. Dostupné také z: <https://www.geekboy.cz/test-powerbank/>.
39. SEZNAM.CZ. *Mapy.com (bývalé mapy.cz)*. 2025-5-15. Dostupné také z: <https://mapy.com/en/zakladni?mereni-vzdalenosti&rm=9mKcyx8GarfA2H3&x=16.5941704&y=49.2418235&z=18>.
43. CORPORATION, Panasonic. *OVERCHARGE/OVERDISCHARGE/OVERCURRENT SAFETY CIRCUITS*. 2007. Dostupné také z: https://web.archive.org/web/20101122230718/https://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_LiIon_Charging.pdf.
45. HORÁKOV, VZA BUNKR - Veřejný zábavní areál. *Veřejný zábavní areál Bunkr...* 2022-07. Dostupné také z: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=479921317466390&set=a.479921297466392>. Příspěvek na Facebooku.
46. LUPA.CZ. *Sigfox se v Česku odmlčel. Zda je to konec této sítě internetu věcí, její provozovatelé nekomentují*. 2023-04. Dostupné také z: <https://www.lupa.cz/aktuality/sigfox-se-v-cesku-odmlcel-zda-je-to-konec-teto-site-internetu-veci-jeji-provozovatele-nekomentuje/>. 2023-12-8.
47. SEMTECH. *LoRa™ Modulation Basics*. 2015-04. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20190718200516/https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>. 2023-12-8.
48. PECH, Jiří. *IOT TECHNOLOGIE: LORA A LORAWAN (3/5)*. 2019-02. Dostupné také z: <https://www.eman.cz/blog/iot-technologie-lora-a-lorawan-3-5/>. 2023-12-8.
49. ALLIANCE, LoRa. *What Are The Differences Between LoRaWAN And NB-IoT?* 2023-04. Dostupné také z: <https://blog.velosiot.com/difference-between-lorawan-nbiot#:~:text=One%20of%20the%20key%20differences,to%20access%20NB-IoT%20solutions>. 2023-12-8.
50. VODAFONE. *Sítě NB-IoT a Cat-M pro efektivnější podnikání*. 2023-12-9. Dostupné také z: <https://www.vodafone.cz/podnikatele/internet-veci/iot-site/>.

51. SEMICONDUCTOR, Nordic. *Our Wi-Fi companion IC*. 2023-12-10. Dostupné také z: <https://www.nordicsemi.com/Products/Wireless/WiFi/Products?lang=en#infotabs>.
52. INC., Microchip Technology. *Standalone and Fully-Certified Wi-Fi Module Designed for Industrial IoT Applications*. 2023-12-10. Dostupné také z: <https://www.microchip.com/en-us/product/WFI32E01PC#sampling-options>.

Katalogové listy důležitých součástek

4. INCORPORATED, Texas Instruments. *LDC1612, LDC1614 Multi-Channel 28-Bit Inductance to Digital Converter (LDC) for Inductive Sensing*. 2018. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1614.pdf>.
5. COPYRIGHT, Espressif Systems. *ESP32 Series*. 2023. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
6. COPYRIGHT, Espressif Systems. *ESP32-S3 Series*. 2023. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf.
7. COPYRIGHT, Espressif Systems. *ESP32-C3-MINI-1 ESP32-C3-MINI-1U*. 2024. Ver. 1.8. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-mini-1_datasheet_en.pdf.
8. COPYRIGHT, Espressif Systems. *ESP32-C6 Series*. 2023. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c6_datasheet_en.pdf.
9. INC., Microchip Technology. *PIC32MZ1025W104 MCU and WFI32E01 Module with Wi-Fi® and Hardware-Based Security Accelerator Data Sheet*. 2023. Dostupné také z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/WSG/ProductDocuments/DataSheets/PIC32MZ-W1-and-WFI32E01-Family-Data-Sheet-DS70005425.pdf>.
10. SEMICONDUCTOR, Nordic. *nRF7000*. 2023. Dostupné také z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF7000_PS_v1.0.pdf.
11. SEMICONDUCTOR, Nordic. *RTL8710 WiFi Module*. 2017. Dostupné také z: https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/seeed%20technology/113990294_web.pdf.

13. STMICROELECTRONICS. *Multiprotocol wireless 32-bit MCU Arm®-based Cortex®-M4 with FPU, Bluetooth® 5.4 and 802.15.4 radio solution*. 2023. Dostupné také z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wb55cc.pdf>.
14. INCORPORATED, Texas Instruments. *MSP430BT5190 Mixed-Signal Microcontroller*. 2020. Dostupné také z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430bt5190.pdf?ts=1702232109620&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fmsp430bt5190.
22. INCORPORATED, Texas Instruments. *Sensor Design for Inductive Sensing Applications Using LDC*. 2021. Dostupné také z: https://www.ti.com/lit/an/snoa930c/snoa930c.pdf?utm_source=chatgpt.com&ts=1748191982114&ref_url=https%253A%252F%252Fchatgpt.com%252F.
24. JUSHUC. *2304231848 JUSHUO-AFC07-S32FCC-00 C11061*. 2004. Dostupné také z: https://manual.lcsc.com/lcsc/2304231848_JUSHUO-AFC07-S32FCC-00_C11061.pdf. FFC konektor.
26. INSTRUMENTS, Texas. *TPD4E02B04 4-Channel ESD Protection Diode for USB Type-C and HDMI 2.0*. Ver. 2. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpd4e02b04.pdf>.
27. INSTRUMENTS, Texas. *bq25895M I 2C Controlled Single Cell Fast Charger with MaxChargeTM Technology for High Input Voltage and Adjustable Voltage 3.1 A Boost Operation*. 2018. Dostupné také z: https://wmsc.lcsc.com/wmsc/upload/file/pdf/v2/lcsc/2001181534_Texas-Instruments-BQ25895MRTWR_C485917.pdf.
28. SLKOR. *Kontrola napětí baterie*. [B.r.]. Dostupné také z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2210101800_Slkor-SLKORMICRO-Elec--SL8261D-G3JE_C5186027.pdf.
29. WORLDSEMI. *Intelligent control LED integrated light source*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf>.
30. INCORPORATED, Texas Instruments. *TPS61088 10-A Fully-Integrated Synchronous Boost Converter*. 2021. Dostupné také z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61088.pdf?ts=1698858563376&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
31. XINGLIGHT. *IXL-3528RGBW-WS2812B*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://jlcpcb.com/api/file/downloadByFileSystemAccessId/858891999528333120>.

34. CO., JIANGSU CHANGJING ELECTRONICS TECHNOLOGY. *SOT-723 Plastic-Encapsulate MOSFETS*. [B.r.]. Dostupné také z: https://wmsc.lcsc.com/wmsc/upload/file/pdf/v2/lcsc/2004141706_Jiangsu-Changjing-Electronics-Technology-Co---Ltd--2SK3541_C504051.pdf.
36. STMICROELECTRONICS. *MEMS digital output motion sensor*. 2017. Ver. 6. Dostupné také z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_1810010329_STMicroelectronics-LIS2DH12TR_C110926.pdf.
37. STMICROELECTRONICS. *2 A high PSRR ultra low drop linear regulator with reverse current protection*. 2018. Ver. 3. Dostupné také z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2010270935_STMicroelectronics-LD39200DPUR_C880590.pdf.
40. *Úprava, odevzdávání a zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací na VUT v Brně*. Brno: VUT v Brně, 2009. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/uredni-deska/vnitri-predpisy-a-dokumenty/smernice-rektora-f34920/>. Směrnice rektora č. 2/2009.
44. INCORPORATED, Texas Instruments. *LDC1612/LDC1614 Linear Position Sensing*. 2015. Dostupné také z: https://www.ti.com/lit/an/snoa931a/snoa931a.pdf?ts=1702491346939&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLDC1614.
53. COPYRIGHT, Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) Datasheet*. 2018. Dostupné také z: https://www.mouser.com/datasheet/2/891/esp-wroom-32_datasheet_en-1223836.pdf.
54. COPYRIGHT, Espressif Systems. *ESP32-S3-WROOM-1 ESP32-S3-WROOM-1U*. 2023. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf.
55. COPYRIGHT, Espressif Systems. *ESP32-C6-WROOM-1 ESP32-C6-WROOM-1U*. 2023. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c6-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf.
56. INCORPORATED, Texas Instruments. *BQ24179 I₂C Controlled, 1- to 4-Cell, 5-A Buck-Boost Battery Charger with Dual-Input Selector*. 2022. Dostupné také z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24179.pdf?ts=1698854511988&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fpower-management%252Fbattery-management%252Fcharger-ics%252Fproducts.html.

57. INCORPORATED, Texas Instruments. *BQ298xyz Voltage, Current, Temperature Protectors with an Integrated High-Side NFET Driver for Fast/Flash Charging Single-Cell Li-Ion and Li-Polymer Batteries*. 2022. Dostupné také z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq2980.pdf?ts=1701078971409&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ2980.
58. INCORPORATED, Diodes. *HIGH-PERFORMANCE USB PD SINK CONTROLLER*. 2023. Dostupné také z: <https://www.diodes.com/assets/manuals/AP33772.pdf>.
59. INCORPORATED, Texas Instruments. *LDC1312, LDC1314 Multi-Channel 12-Bit Inductance to Digital Converter (LDC) for Inductive Sensing*. 2014. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1314.pdf>.
60. SOLUTIONSLIMITED, SIMCom Wireless. *SIM7600X-M2HardwareDesign*. 2020. Dostupné také z: https://files.waveshare.com/upload/0/02/SIM7600X-M2_Hardware_Design_V1.01.pdf.
61. SEMICONDUCTOR, Winsok. *WSD20L75DN33*. 2023. Dostupné také z: <https://jlcpcb.com/api/file/downloadByFileSystemAccessId/8588900305022406656>.

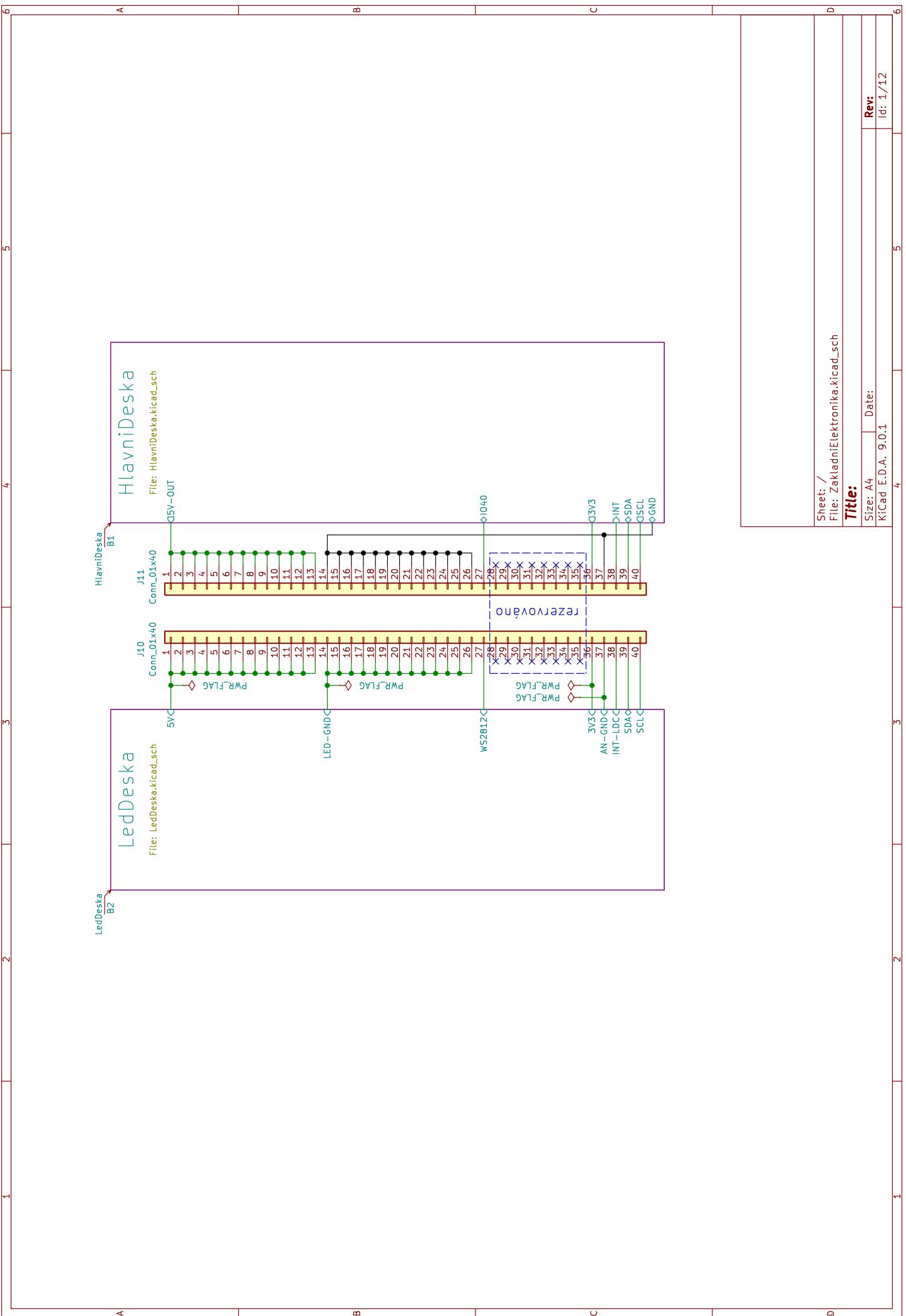
Seznam symbolů a zkratek

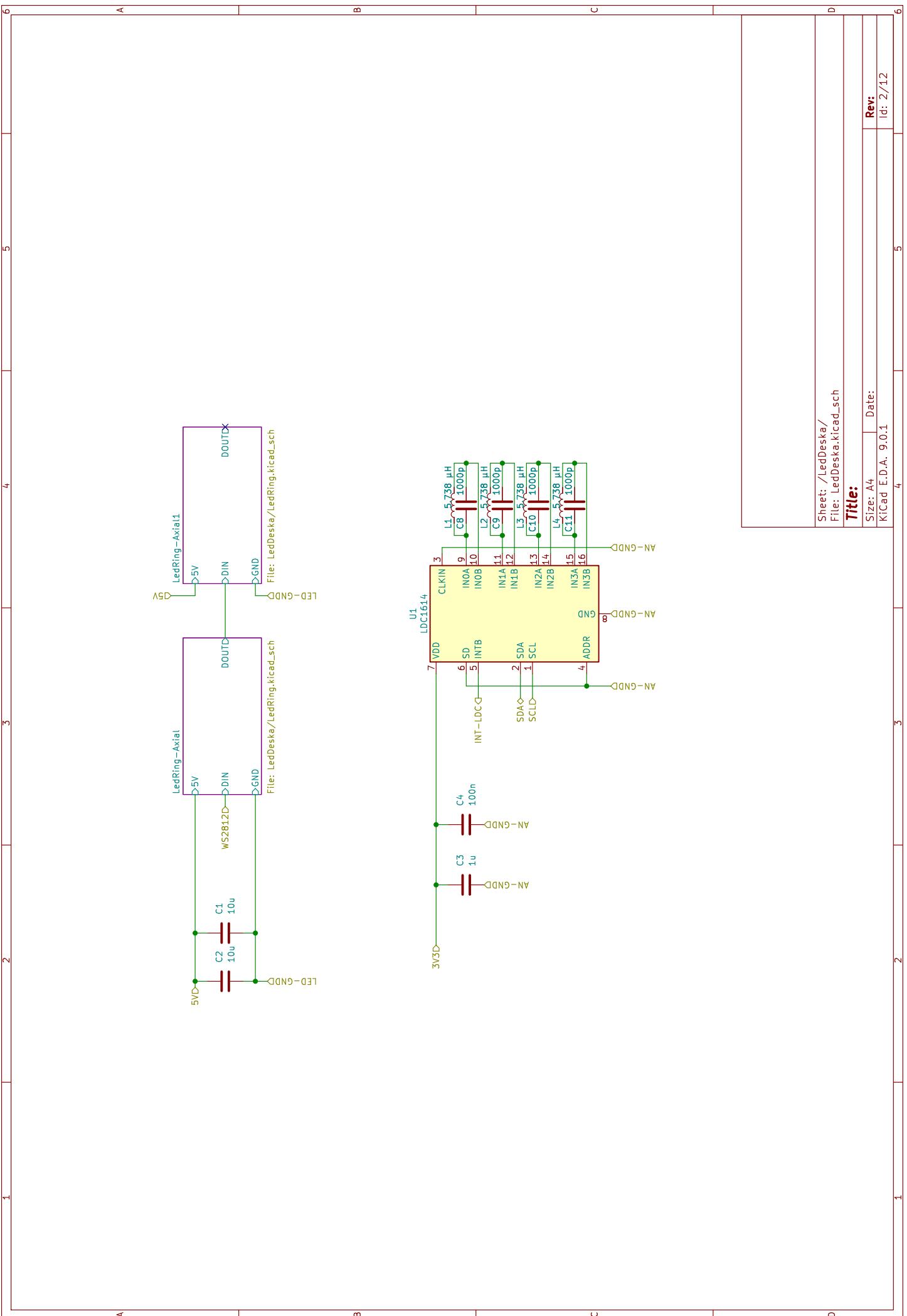
AHS	Automatické Herní Stanoviště
LDO	Low-dropout regulator - regulátor napětí s nízkým úbytkem
FFC	Flexible Flat Cable - plochý ohební kabel
DPS	Deska Plošných Spojů
FDM	Fused Deposition Modeling
IMU	Inertial Measurement Unit - inerciální měřící jednotka

Seznam příloh

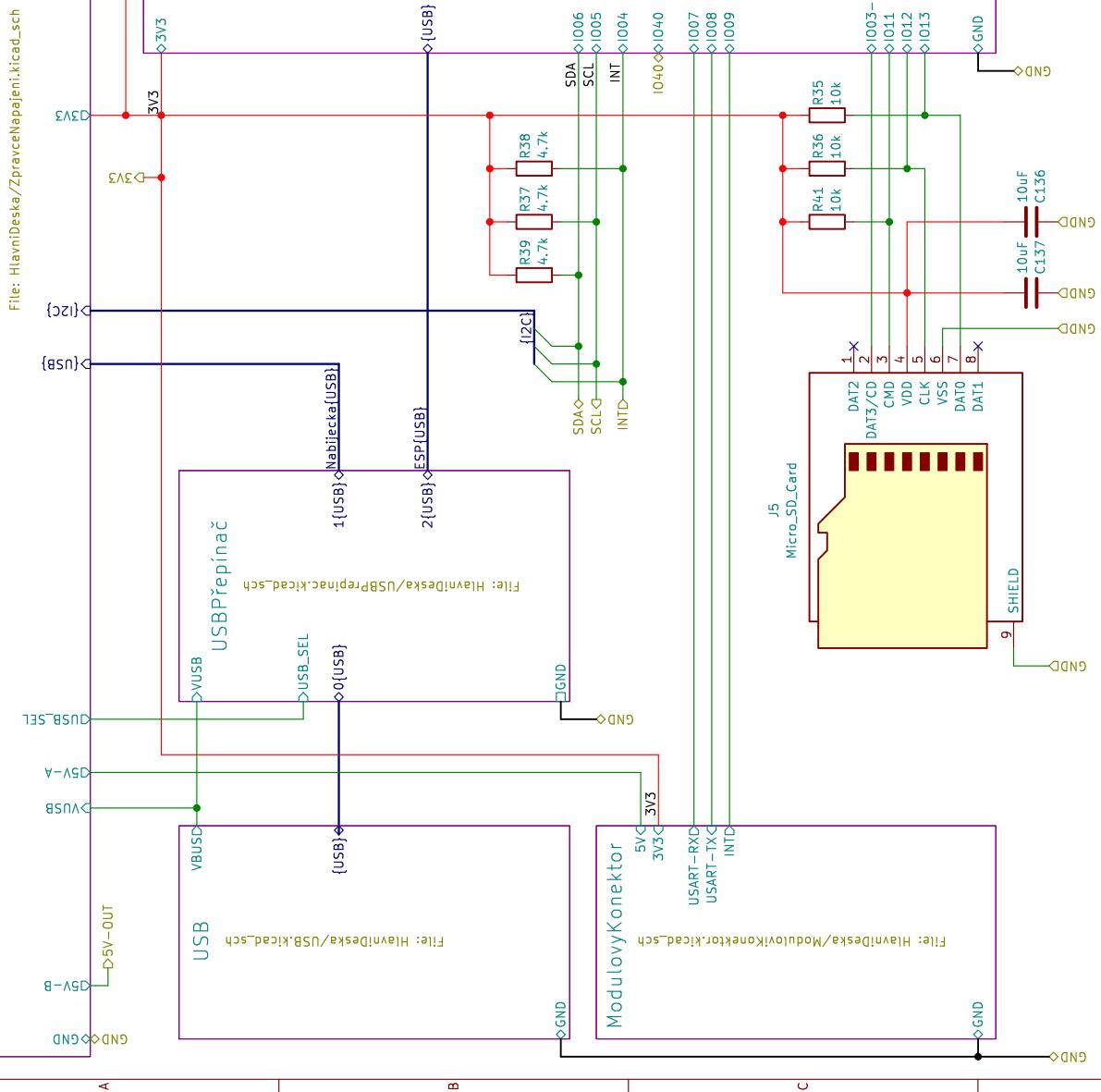
A Schémata AHS	57
B Topologie DPS AHS	70
C Schémata Semisemaforu	72
C.1 Původní schéma Semisemaforu	72
C.2 Výsledné schéma Semisemaforu	74
D Topologie DPS Semisemaforu	76

A Schéma AHS





Správce Napajení



6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

A

B

C

D

3

A

B

C

D

2

A

B

C

D

1

A

B

C

D

6

A

B

C

D

5

A

B

C

D

4

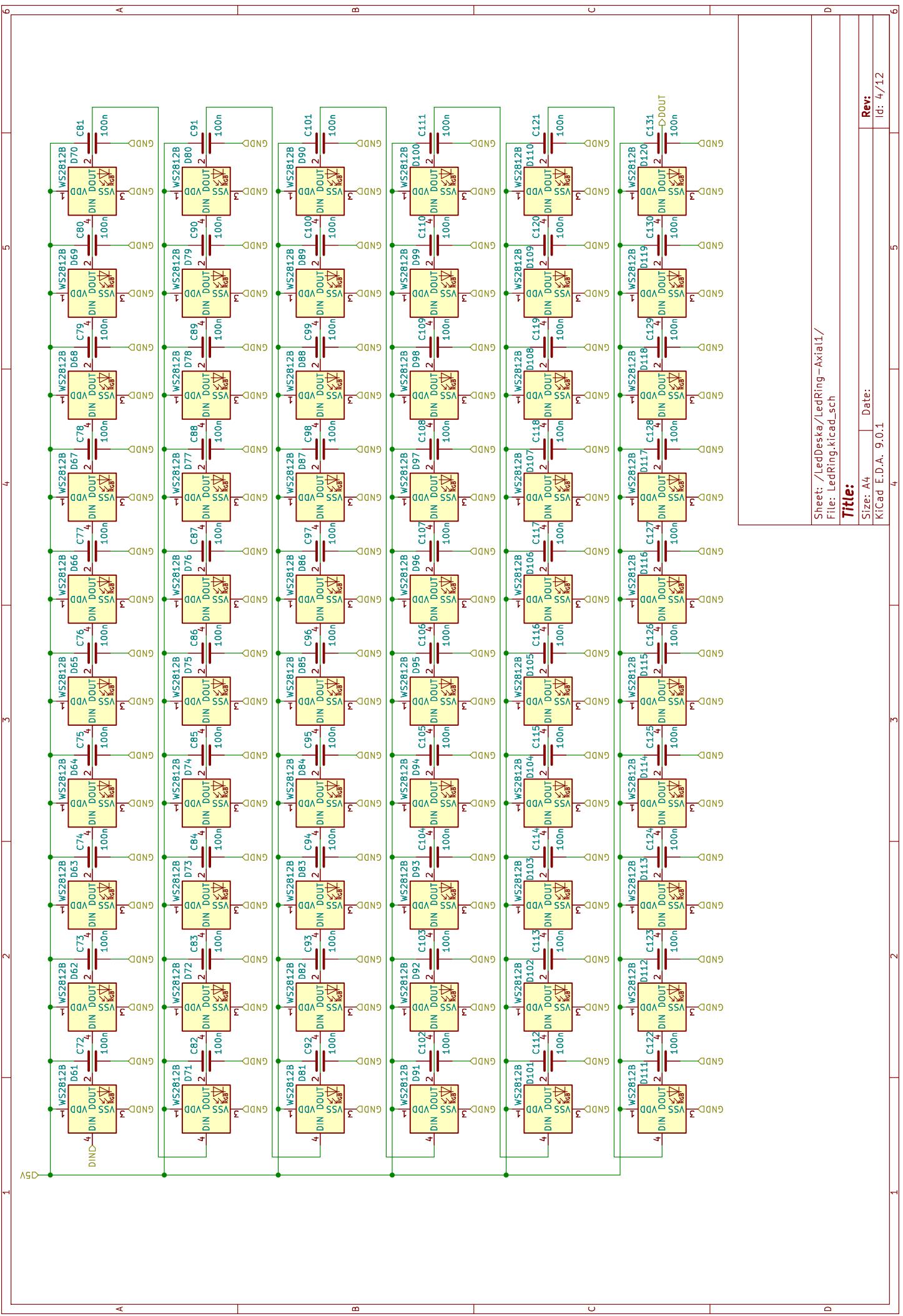
A

B

C

D

3

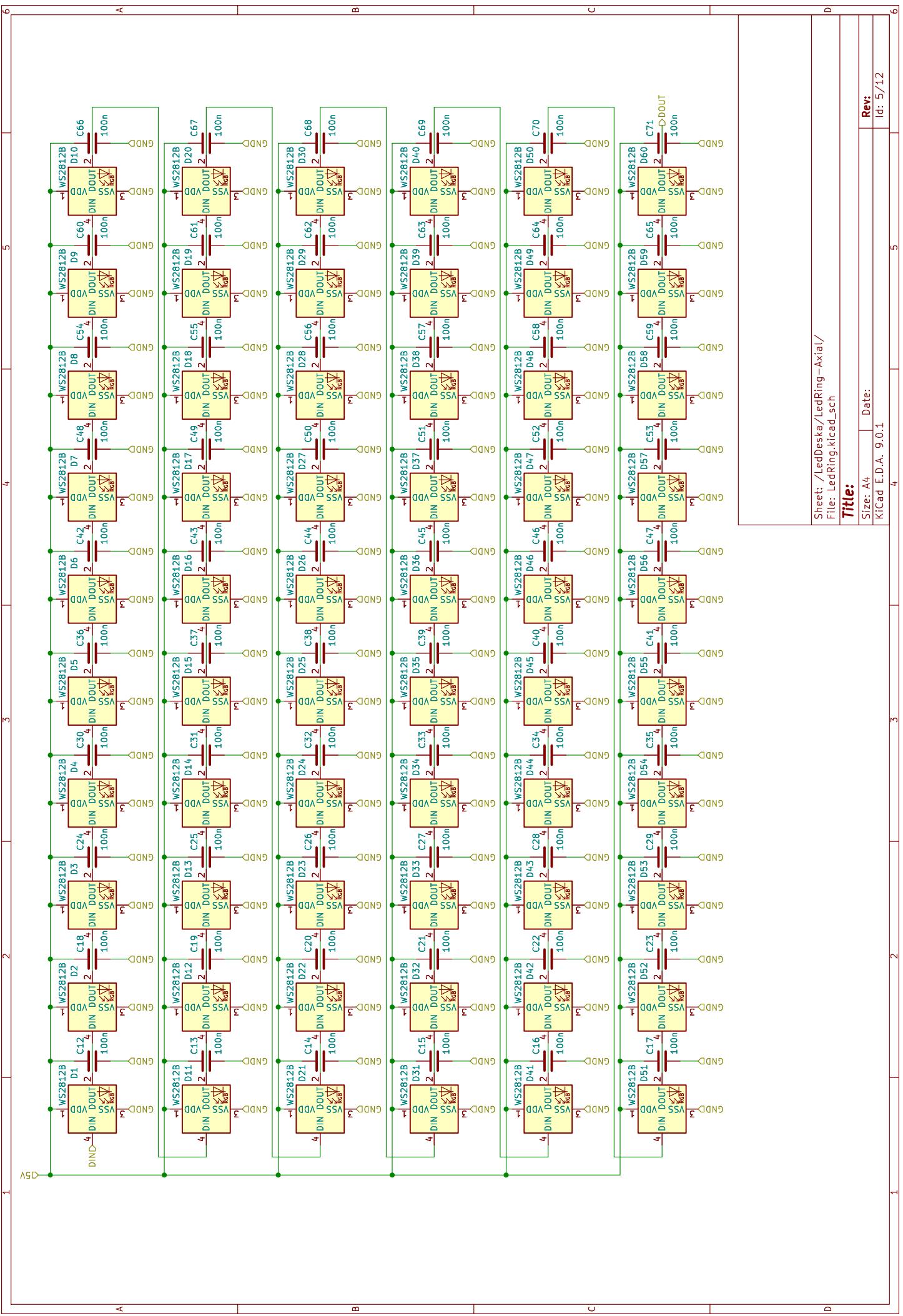


Sheet: /LedDeska/LedRing-Axial1/
File: LedRing_kicad_sch

Title:

Size: A4
KICad E.D.A. 9.0.1
Date:
Id: 4/12

Rev:



Sheet: /LedDeska/LedRing-Axial/
File: LedRing_kicad_sch

Title:

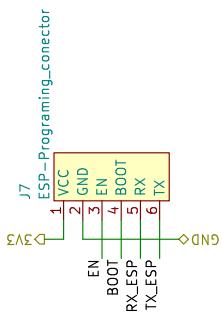
Size: A4
KiCad E.D.A. 9.0.1
Date:
Rev:
Id: 5/12

4
5
6

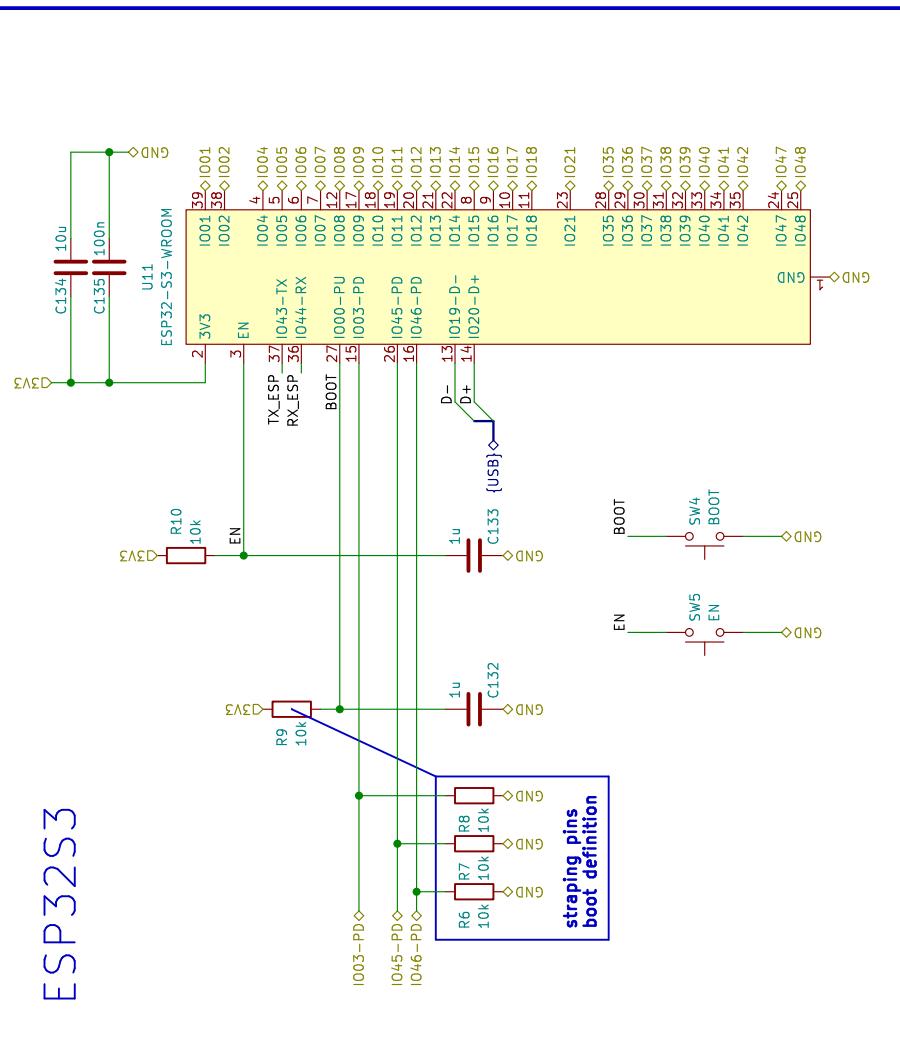
2
3

1

Konektor na programator



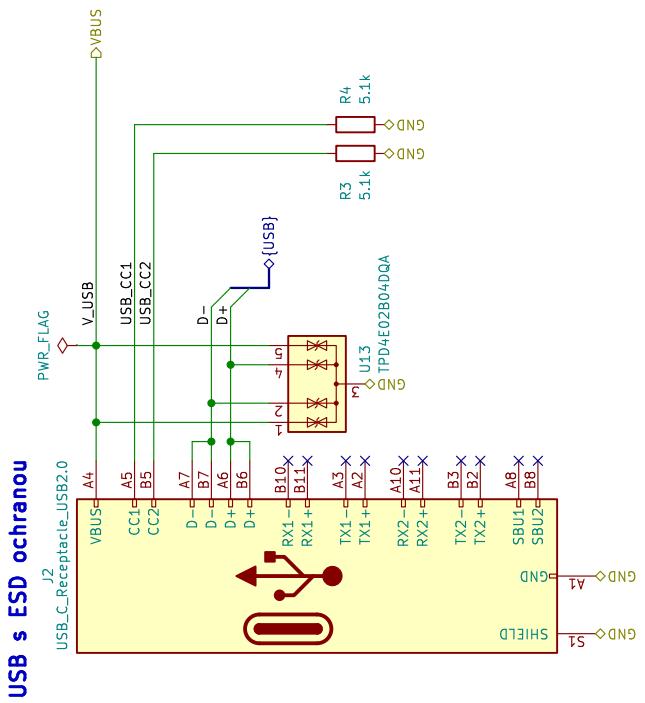
ESP32S3

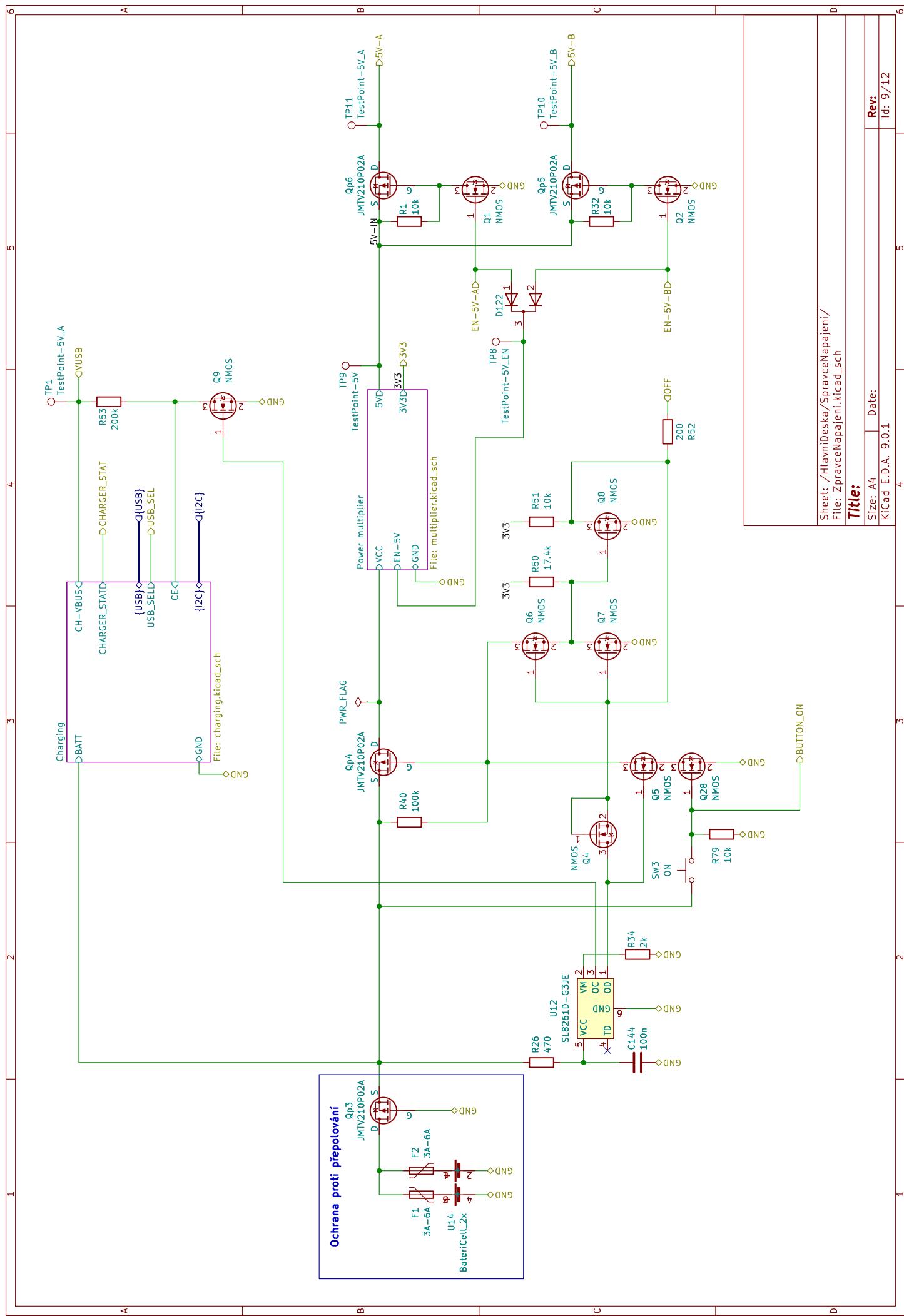


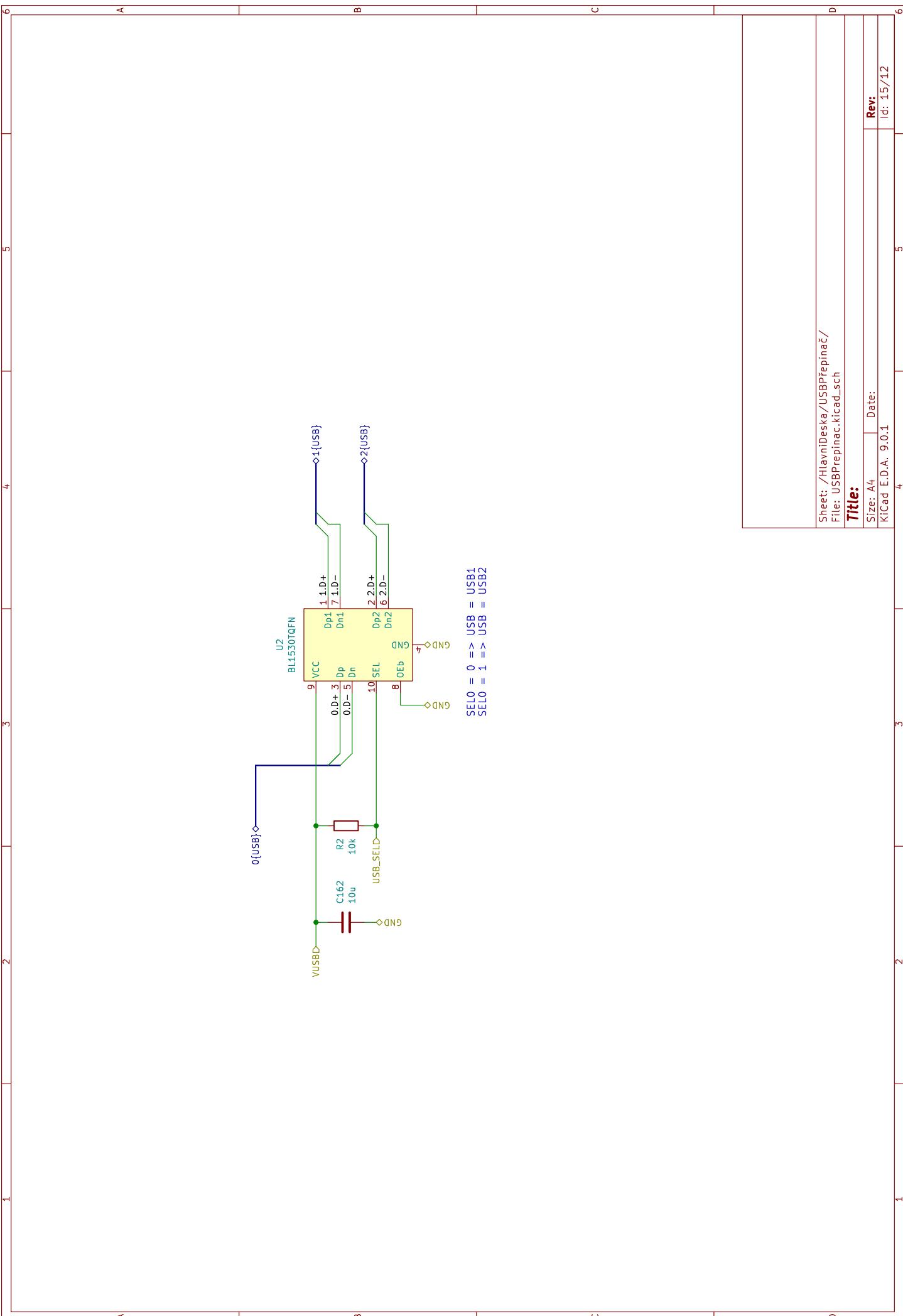
Sheet: /HlavníDeska/ESP32S3/
File: ESP32S3.kicad_sch

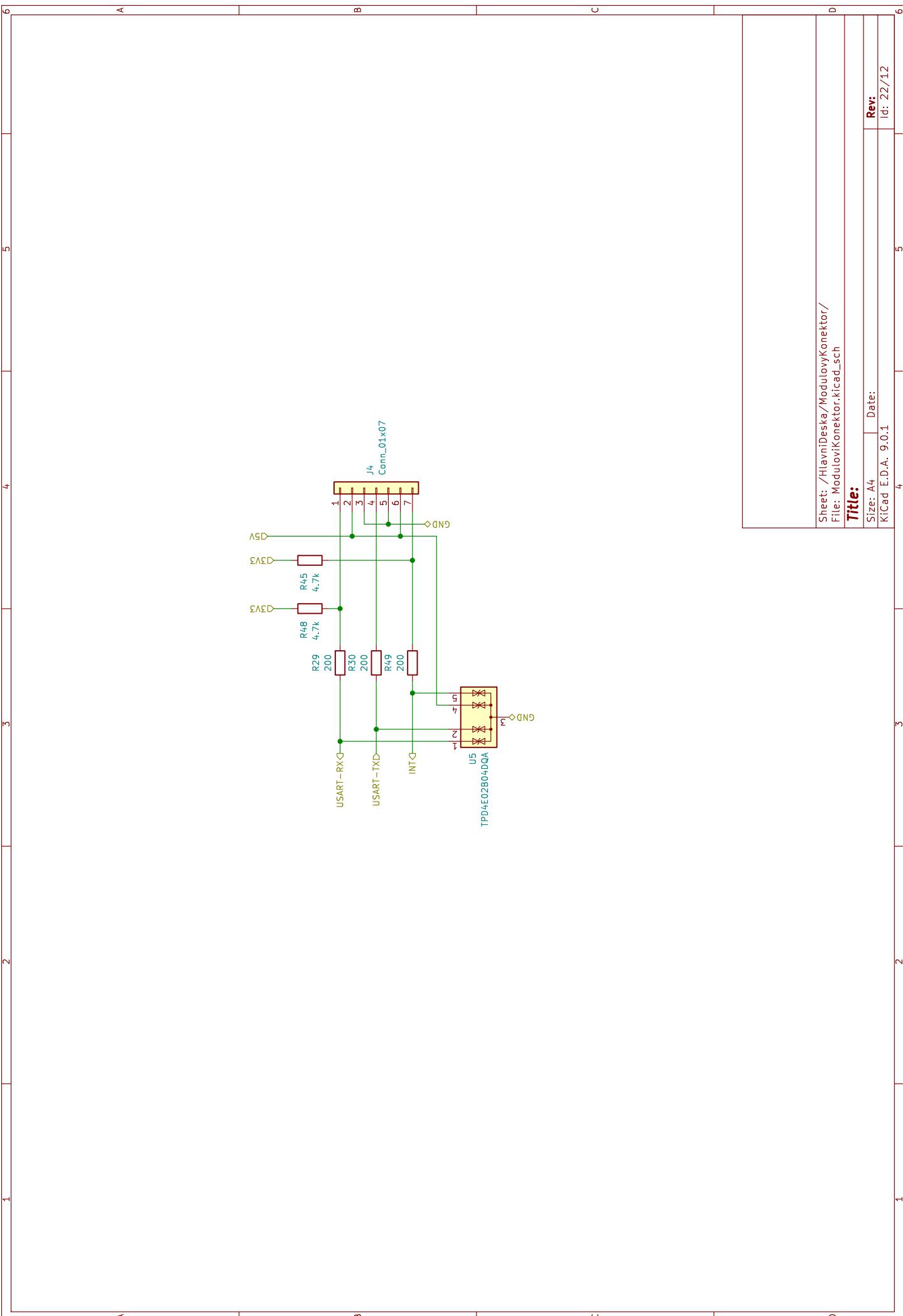
Title:

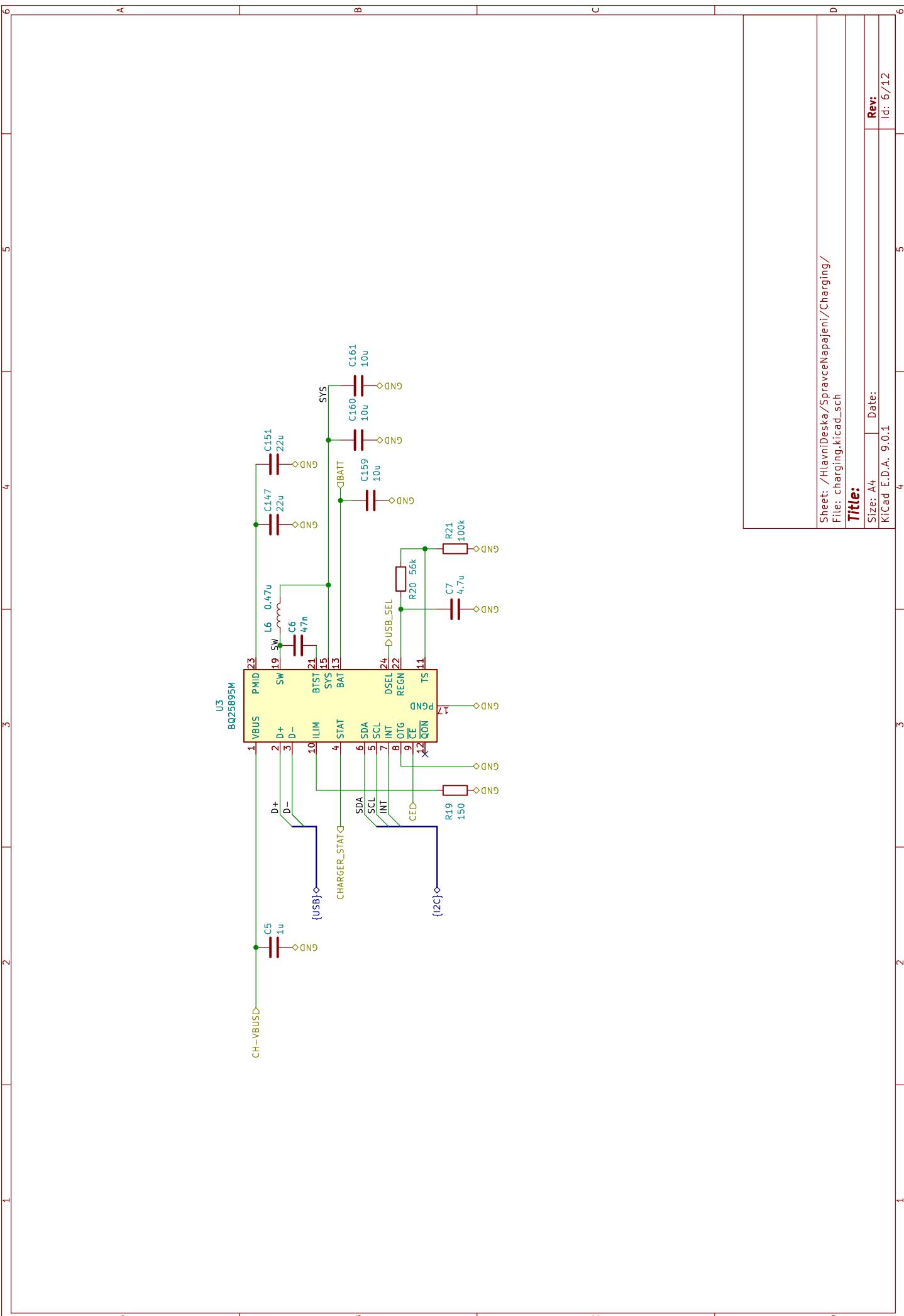
Size: A4
KiCad E.D.A. 9.0.1
Rev: 1
Id: 1/12

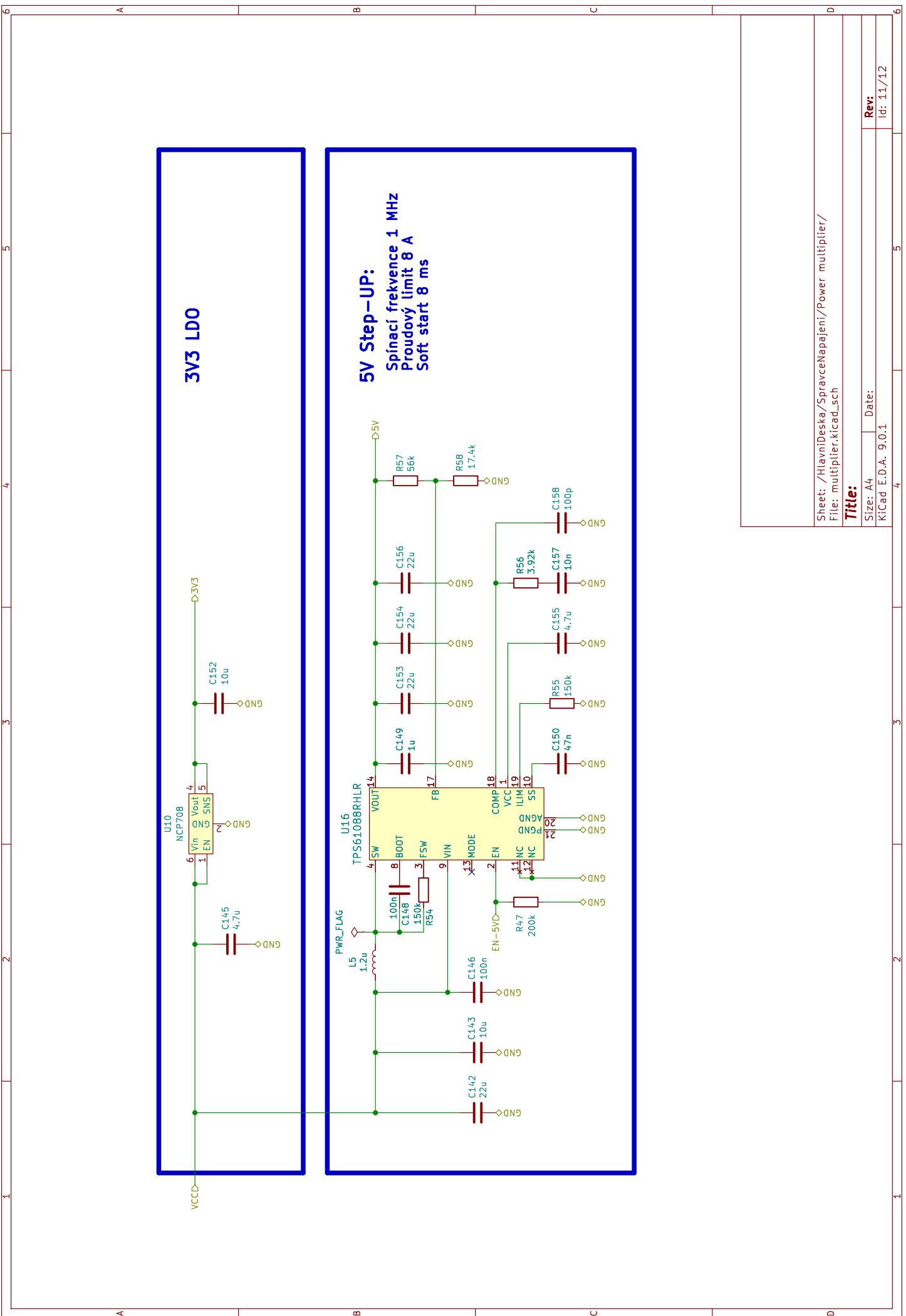




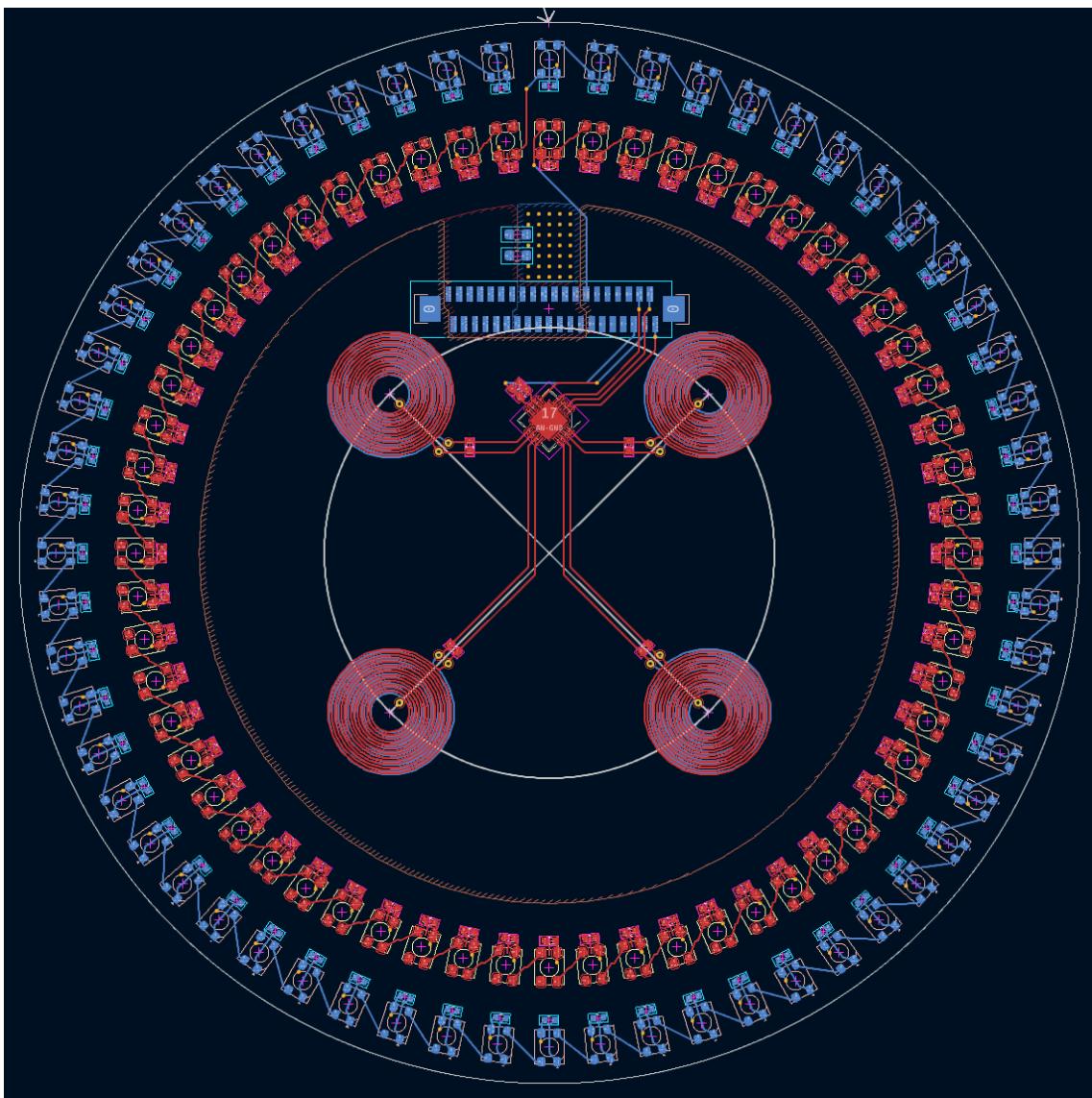




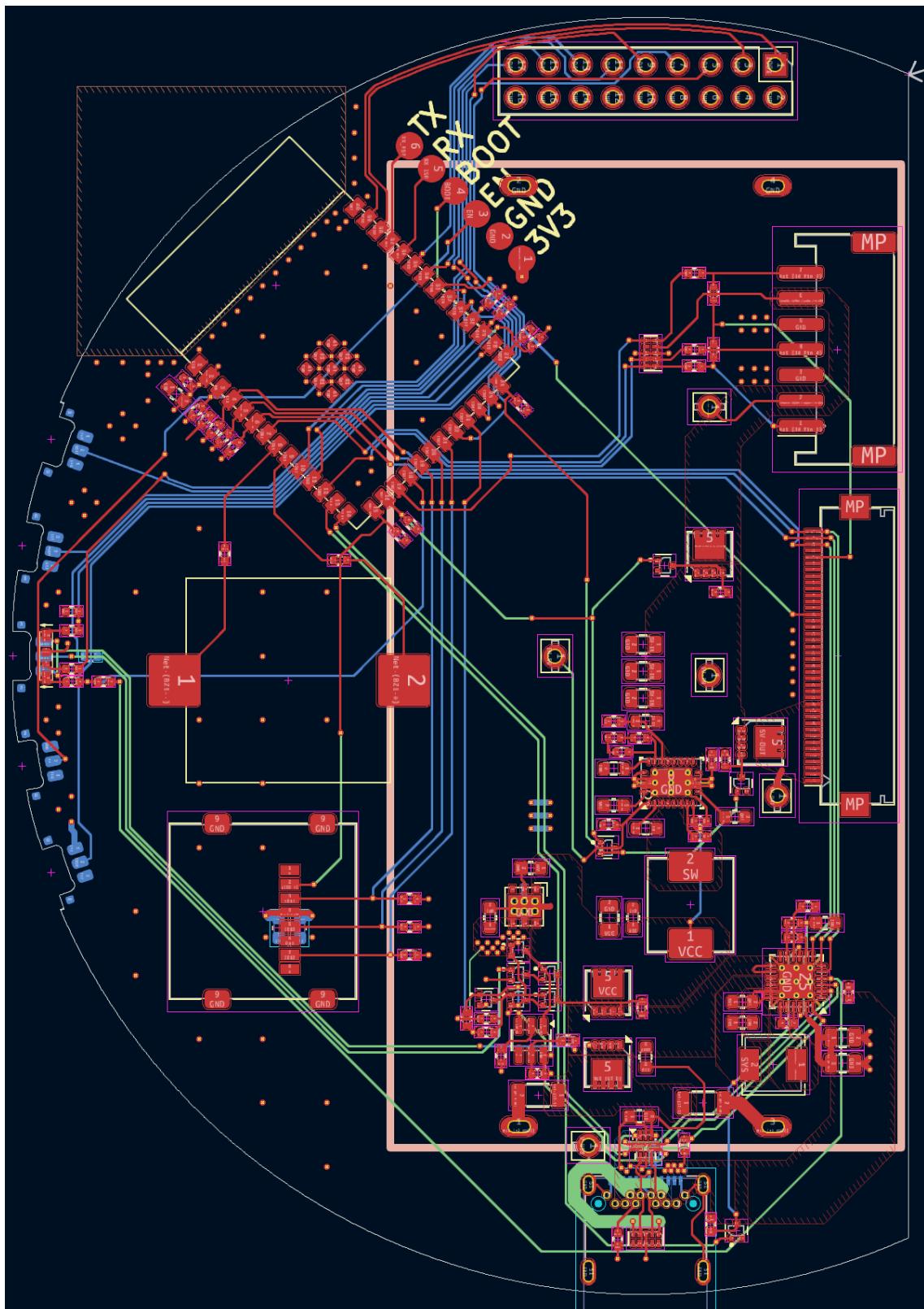




B Topologie DPS AHS



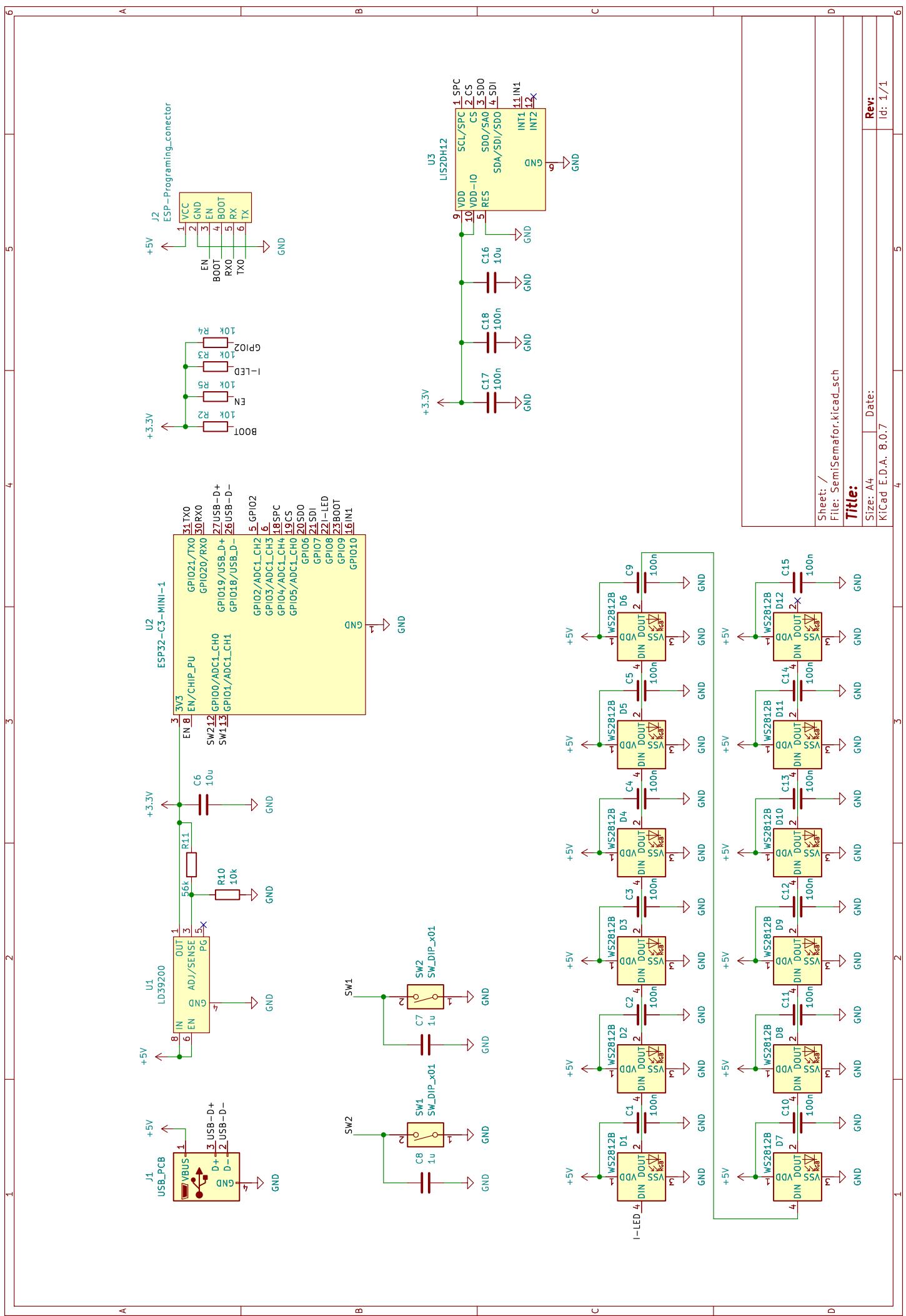
Obr. B.1: DPS LED desk AHS



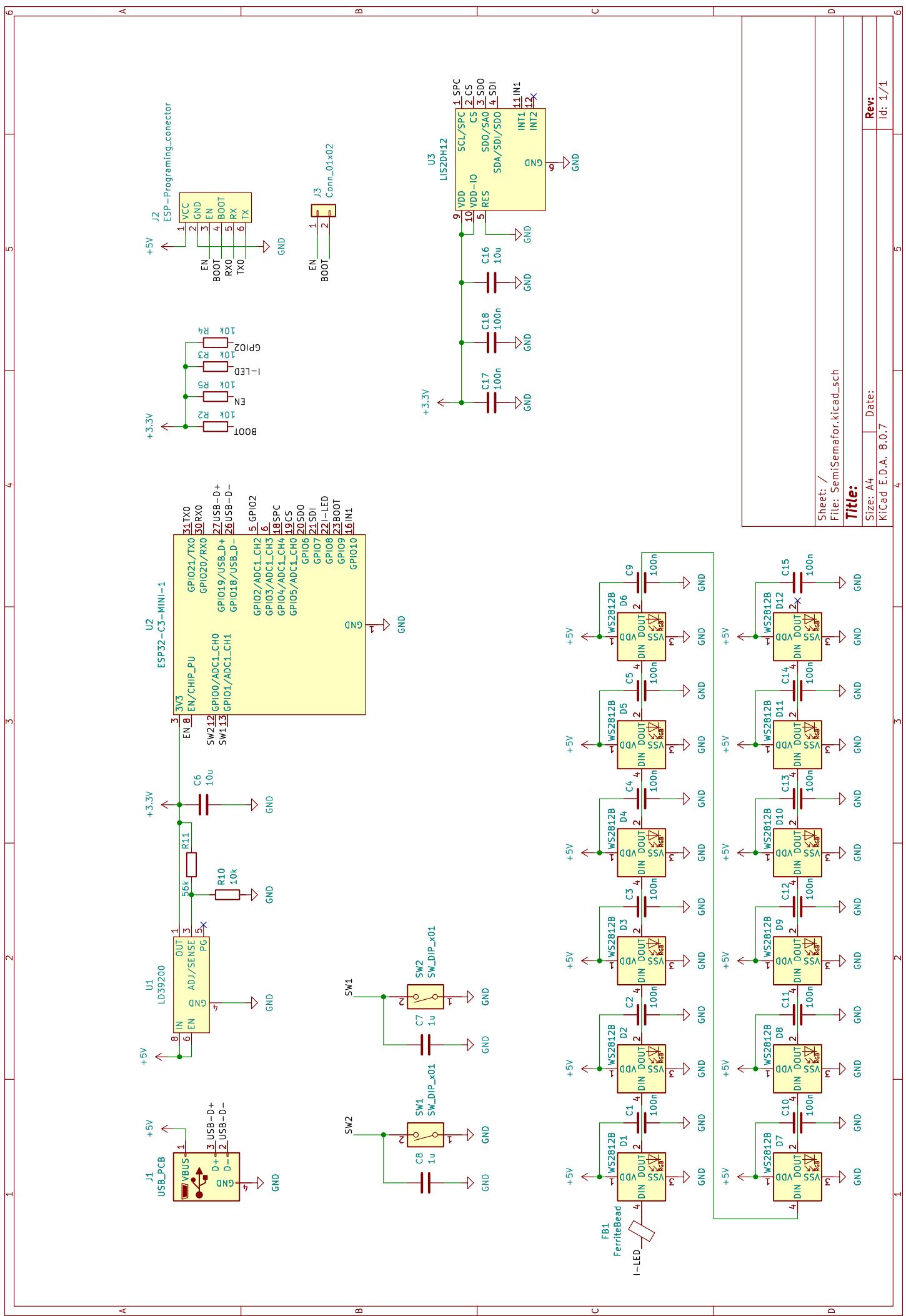
Obr. B.2: DPS hlavní desky AHS

C Schémata Semisemaforu

C.1 Původní schéma Semisemaforu



C.2 Výsledné schéma Semisemaforu



D Topologie DPS Semisemaforu



Obr. D.1: Původní DPS Semisemaforu