



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

ELEKTRONICKÁ CIGARETA

ELECTRONIC CIGARETTE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Brím

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Veronika Junasová

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Lukáš Brím

ID: 211222

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Elektronická cigareta

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte elektronickou cigaretu. Nejprve se zaměřte na prostudování problematiky týkající se mechanické a elektrické stránky uvedeného zařízení. Dále proveďte rešerši dostupných možností a popište adekvátní náležitosti, kterými bude zařízení disponovat. Součástí práce bude obvodový návrh a realizace osazené desky plošných spojů, která bude schopna fungovat v několika režimech. Vybrané funkce a režimy elektronické cigarety řádně otestujte, přičemž všechny kroky detailně popište v textové části bakalářské práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 1.6.2023

Vedoucí práce: Ing. Veronika Junasová

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

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh elektronické cigarety. Práce popisuje části, ze kterých se elektronické cigarety skládají. Celé zařízení napájí bateriový článek, kterou lze nabíjet v zařízení přes USB konektor. Navrhnuté zařízení funguje na principu zahřívání odporového drátu v podobě spirály. Celé zařízení je ovládané pomocí mikrokontroleru, díky kterému lze ovládat jednotlivé pracovní režimy. Zařízení dokáže pracovat ve třech režimech, a to konkrétně v bypass režimu, režim teplotní kontroly a wattový režim. Nastavení daných režimů probíhá pomocí taktálních spínačů a následně nastavený výkon či teplota se zobrazuje na displeji.

Klíčová slova

Elektronická cigareta, Li-Ion, bypass režim, režim teplotní kontroly, wattový režim, mikrokontroler PIC, I2C sběrnice.

Abstract

This bachelor thesis focuses on the design of an electronic cigarette. The thesis describes the parts that make up an electronic cigarette. The whole device is powered by a battery cell that can be charged in the device via a USB connector. The designed device works on the principle of heating a resistive wire in the form of a spiral. The whole device is controlled by a microcontroller, which makes it possible to control the different modes of operation. The device can operate in three modes namely bypass mode, temperature control mode and watt mode. The setting of the modes is done using tactile switches and then the set power or temperature is displayed on the display.

Keywords

Electronic cigarette, Li-Ion, bypass mode, temperature controll mode, watt mode, microcontroller PIC, I2C bus.

Bibliografická citace

BRÍM, Lukáš. *Elektronická cigareta*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2023. 34 s., 9 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Veronika Junasová.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Lukáš Brim</i>
VUT ID studenta:	<i>211222</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/23</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Elektronická cigareta</i>

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 jsem si 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.

V Brně dne 1. června 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Veronice Junasové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji své rodině, kolegům a kamarádům za morální podporu.

V Brně dne: 1. června 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
ÚVOD	9
1. TEORIE NÁVRHU.....	10
1.1 REŽIMY ELEKTRONICKÉ CIGARETY	10
1.1.1 <i>Bypass režim</i>	11
1.1.2 <i>Wattový režim</i>	11
1.1.3 <i>Režim teplotní kontrola</i>	11
1.2 BATERIOVÉ ČLÁNKY	12
1.2.1 <i>Lithium-Iontová baterie</i>	12
1.2.2 <i>Lithium-Polymerová baterie</i>	13
1.3 MĚŘENÍ TEPLoty	14
1.3.1 <i>Termočlánky</i>	14
1.3.2 <i>Termistory</i>	14
1.4 SÉRIOVÉ SBĚRNICE	16
1.4.1 <i>UART sběrnice</i>	16
1.4.2 <i>Serial Periphetal Interface sběrnice</i>	18
1.4.3 <i>Inter-Integrated Circuit sběrnice</i>	19
2. NÁVRH ZAŘÍZENÍ	21
2.1 NAPÁJENÍ ELEKTRONICKÉ CIGARETY	21
2.1.1 <i>Nabíjecí obvod s měřením proudu</i>	22
2.2 MĚNIČE NAPĚTÍ.....	24
2.2.1 <i>Měnič napětí z baterie</i>	24
2.2.2 <i>Měnič napětí pro řídicí část</i>	26
2.3 VOLBA MIKROKONTROLERU	27
2.3.1 <i>Výběr programátoru</i>	28
2.4 GRAFICKÉ A UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ.....	29
2.5 SYSTÉM ŽHAVENÍ	30
3. OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ.....	32
3.1 OSAZENÍ A OŽIVENÍ.....	33
3.1.1 <i>Osazení</i>	33
3.1.2 <i>Oživení</i>	33
ZÁVĚR	34
LITERATURA.....	35
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	39
SEZNAM PŘÍLOH.....	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozdělení elektronických cigaret, převzaté z [2]	10
Obrázek 2: Vybíjecí charakteristika Li-Ion baterie, převzaté z [10]	12
Obrázek 3: Vybíjecí charakteristiky Li-Po baterie, převzaté z [12]	13
Obrázek 4: Základní zapojení termoelektrického snímače, převzato z [14]	14
Obrázek 5: Teplotní závislost NTC termistoru, převzaté z [17]	15
Obrázek 6: Teplotní závislost PTC termistoru, převzatá z [19]	16
Obrázek 7: Datový paket UARTu, převzato z [20]	17
Obrázek 8: Zapojení SPI, převzato z [24]	18
Obrázek 9: I2C protokol, převzato z [28]	19
Obrázek 10: Datový paket, převzato z [27]	19
Obrázek 11: Blokové schéma elektronické cigarety	21
Obrázek 12: Zapojení USB-C konektoru	22
Obrázek 13: Nabíjecí obvod baterie	23
Obrázek 14: Schéma zapojení pro měření proudu	24
Obrázek 15: Schéma zapojení asynchronního budícího měniče na 5 V	25
Obrázek 16: Schéma zapojení měniče napětí s nízkým úbytkem napětí	26
Obrázek 17: Schéma zapojení mikrokontroleru	27
Obrázek 18: Schéma zapojení programátoru	28
Obrázek 19: Schéma zapojení k modulu SSD1306	29
Obrázek 20: Schéma zapojení taktálních spínačů	30
Obrázek 21: Schéma zapojení systému žhavení	31
Obrázek 22: Výsledný návrh zařízení	32

ÚVOD

V posledním dvacetiletí se rozmohl velký fenomén s elektronickými cigaretami. Elektronická cigareta má pomoci lidem se odnaučit kouřit postupným, ale trvalým způsobem. Pomocí snižováním dávky nikotinu v náplni si tak kuřáci pomalu odvyknou a přestanou úplně kouřit.

Bohužel elektronické cigarety jsou v mnoha uzavřených prostorách tolerovány a někdy bývá účinek opačný. Elektronická cigareta nezapáchá jako klasická cigareta, takže člověk má tendenci ji mít pořád při sobě. V elektronické cigaretě nedochází k hoření papíru, tabáku a jiných látek, a proto je elektronická cigareta zásadně méně škodlivá než klasická cigareta.

Na světovém trhu existuje spousta zařízení, které mají chytřejší elektroniku a jsou někdy až překombinovaná a složitá na ovládání. Běžnému uživateli to může připadat matoucí. Tato bakalářská práce má poukázat na to, jak lze navrhnout elektronickou cigaretu bez složitého dostávání se do nastavení.

Vzhledem ke zmíněným okolnostem a faktu, že na trhu není český výrobce elektronických cigaret, jsem se rozhodl zpracovat bakalářskou práci na téma elektronická cigareta. K rozhodnutí přispělo i to, že sám elektronickou cigaretu užívám jako prostředek pro odnaučení kouření.

V první části této práce budou popsány pracovní režimy elektronické cigarety a všechny druhy elektronických cigaret. Podrobněji rozebrané nejčastěji používané bateriové články, teplotní senzory. Budou zde představeny nejčastější sériové datové sběrnice mikrokontrolerů a jak v nich funguje přenos dat.

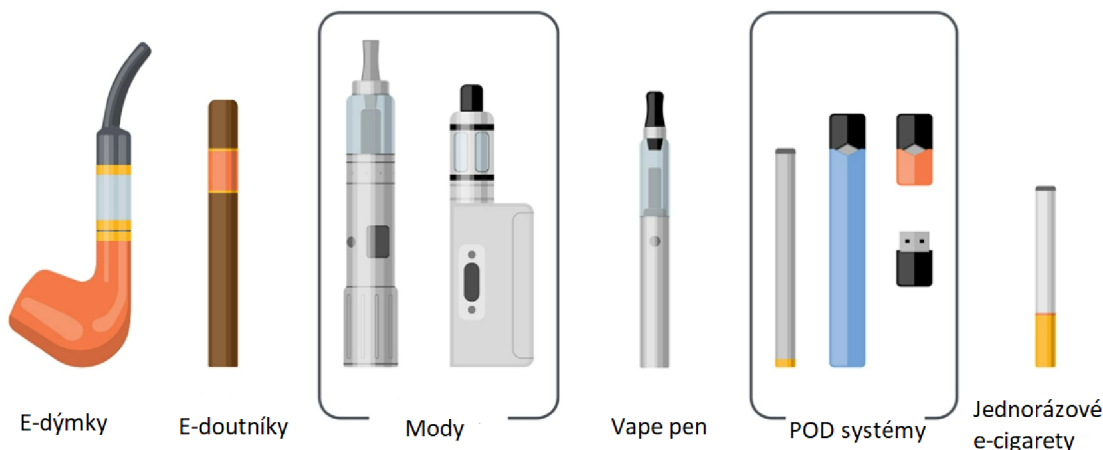
V druhé části bakalářské práce bude představeno blokové schéma celého zařízení a následně popsána funkčnost jednotlivých bloků a propojení mezi nimi. Tato část se také zaměří na detailnější popis návrhu jednotlivých částí obvodu. Tato část práce se také zaměřuje na výpočty parametrů při návrhu schémata.

V poslední části bude vysvětlen návrh desky plošných spojů, zvolená patřičná technologie výroby a následné osazení a pájení celého obvodu danými postupy. Dále bude popsáno oživení jednotlivých částí zařízení a popsány případné zjištěné problémy a jejich řešení.

1. TEORIE NÁVRHU

Elektronické cigarety (později jen E-cigarety) existují v mnoha tvarech a velikostech. Zařízení mají buď externí baterii, anebo mají vyjímatelný bateriový článek, zahřívací složku a nádrž pro uchování náplně. E-cigarety zahříváním liquidu (náplně) produkují aerosol, který může i nemusí obsahovat nikotin – návykovou látku, která je v klasických cigaretách, žvýkacích tabácích a v jiných tabákových výrobcích. Liquid obsahuje také příchut' a jiné složky na podporu aerosolu. Uživatelé vdechují tento aerosol do svých plic.

E-cigarety jsou známy pod různými jmény. Někdy jsou nazývány „Vape“, „Vapo“, „Elektronka“, „mody“, „Vape pen“. Některé se dělají tak, aby vypadaly jako klasické cigarety, doutníky a dýmky, anebo, aby napodobovaly nejobyčejnější předměty, například propisky, Flash disky a další. Vzhled E-cigaret lze vidět na obrázku 1. Větší zařízení, jako jsou třeba tank systémy „mody“ se nepodobají tabákovým výrobkům. [1]



Obrázek 1: Rozdělení elektronických cigaret, převzaté z [2]

V následujících podkapitolách budou popsány základní režimy elektronické cigarety a jaké se používají baterie. Následně budou vysvětlené termistory, které se používají nejen pro měření teploty na spirále a bude uvedeno, jaké datové sběrnice používá mikrokontroler.

1.1 Režimy elektronické cigarety

Od dob začátků vapingu uběhla nějaká doba a v průběhu let se technologie měnila. Dnes v E-cigaretách existuje řada zajímavých a užitečných funkcí a režimů, které mohou být pro nezkušeného kuřáka matoucí. Každá E-cigareta má uvnitř alespoň jednu takovou funkci. Například jednorázové E-cigarety mají podtlakový senzor pro sepnutí žhavení topné spirály a nemusí tak obsahovat tlačítka, tím pádem jsou kompaktnější. [3]

1.1.1 Bypass režim

Režim *bypass* patří k základním a nejjednodušším režimům elektronické cigarety. *Bypass* režim obchází veškerou řídicí elektroniku a žhavicí spirálou prochází napětí přímo z baterie. Jakmile u baterie dojde k poklesu napětí, tak klesne i celkový výkon celého zařízení, bez kontroly kapacity baterie by došlo k jejímu podbití. Tento režim využívají tzv. mechanické e-cigarety, kde cigareta má pouze baterii a spínací tlačítko. *Bypass* režim u e-cigaret s řídicí elektronikou však nevynechává bezpečnostní prvky, jako je například příliš nízký odpor žhavicí spirály nebo vybití baterie. [4]

1.1.2 Wattový režim

Wattový neboli výkonový režim je pro jeho jednoduchost a efektivnost nejčastěji používaný režim e-kuřáky. Pomocí tohoto režimu se nastavuje přímý výkon na žhavicí spirálu. Zobrazený výkon na displeji znázorňuje watt za sekundu na spirále a dále je zobrazeno napětí na spirále. [5]

Tento režim také nabízí funkci předžhavení spirály, který při sepnutí žhavicího tlačítka pošle na spirálu větší výkon. Po dosažení požadované teploty je výkon nastaven opět na námi zvolenou hodnotu. Této funkce se využívá především při používání robustnějších a složitějších žhavicích spirál. Typ předžhavení lze u většiny modelů nastavit pomocí písmen H/N/S (Hard/Normal/Soft). Pro wattový režim se používá odporový drát z nerezové oceli, kanthalu a nichromu. [6]

1.1.3 Režim teplotní kontrola

Tento režim dovoluje nastavit danou teplotu na spirále, při které se bude e-liquid odpařovat. E-cigareta si na základě nastavené teploty nastaví potřebný výkon, a tím způsobí, že teplota na žhavicí spirále bude konstantní. V momentě, kdy teplotní režim funguje správně, tak se předchází kouření na sucho. Toto je jev, kdy se vata ve spirále nestíhá zasažit e-liquidem. Žhavicí spirála vydrží déle díky udržování stálé teploty než při používání jiného režimu. [7]

Odpor je hlavní veličinou pro teplotní kontrolu neboli množství proudu, které prochází žhavicí spirálou. Některé odporové materiály mají stálý odpor při změně teploty, ale ty, které potřebujeme, tak mají proměnlivý odpor při vzrůstající teplotě. Jakmile se spirála začne zahřívat, tak jí poroste i její odpor a teplotní kontrola bude regulovat proud na požadovanou teplotu. Vzniká tak zpětnovazební smyčka, která udržuje teplotu a poskytuje konzistentní kouření. [7]

Pro teplotní kontrolu se dříve využíval odporový drát z niklu nebo titanu, ale pro větší univerzálnost se používá drát z nerezové oceli, který se dá použít i na wattový režim. Titan ani nikl nelze použít pro wattový režim, protože při vyšších teplotách uvolňují karcinogenní látky. [6]

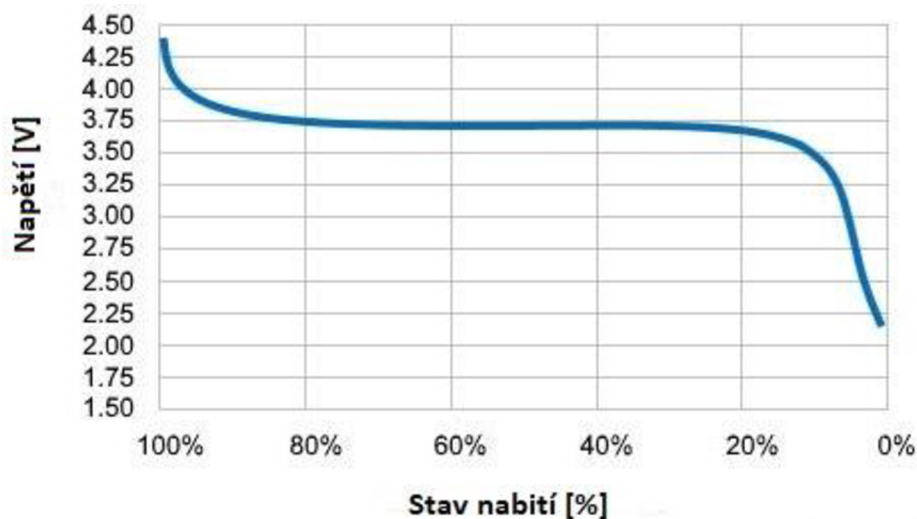
1.2 Bateriové články

Bateriové články jsou už od dob začátku elektronických cigaret jejich nedílnou součástí a docházelo k jejich vývoji. Dříve se používaly Lithium-Polymerové, pro jejich tvárnost a jejich vlastnosti. Po rozšíření trhu s e-cigaretami se začala implementovat větší a chytřejší elektronika a Lithium-Polymerové baterie nestačily s jejich kapacitou. Začaly se používat Lithium-Iontové baterie. V této podkapitole budou popsány oba bateriové články.

1.2.1 Lithium-Iontová baterie

Lithium-Iontová (dále jen Li-Ion baterie) je tvořena z anody, katody, separátoru, elektrolytu a dvěma sběrači proudu (pozitivní a negativní). Anoda a katoda uchovávají lithium. Elektrolyt nese kladně nabitě ionty lithia z anody ke katodě, a naopak přes separátor. Pohyb lithiových iontů způsobí vytvoření volných elektronů na anodě, které vytvoří elektrický náboj na kladném sběrači proudu (pólu). Elektrický proud následně teče z kladného pólu přes nabíjené zařízení (mobilní telefon, elektronická cigareta atd.) až k negativnímu pólu. Separátor blokuje proud elektronů uvnitř baterie. [8]

Jedna z hlavních výhod Li-Ion baterií je vysoká hustota energie oproti ostatním druhům bateriových článků. Díky tomu je lze použít například pro mobilní telefony nebo třeba pro elektronické cigarety (články 18650 a 21700/20700). Další výhodou je napětí článku, které je okolo 3,6 V a je konstantní po celou dobu výdrže baterie, než se baterie vybijí úplně. Vybíjecí charakteristiku lze vidět na obrázku 2. [9]



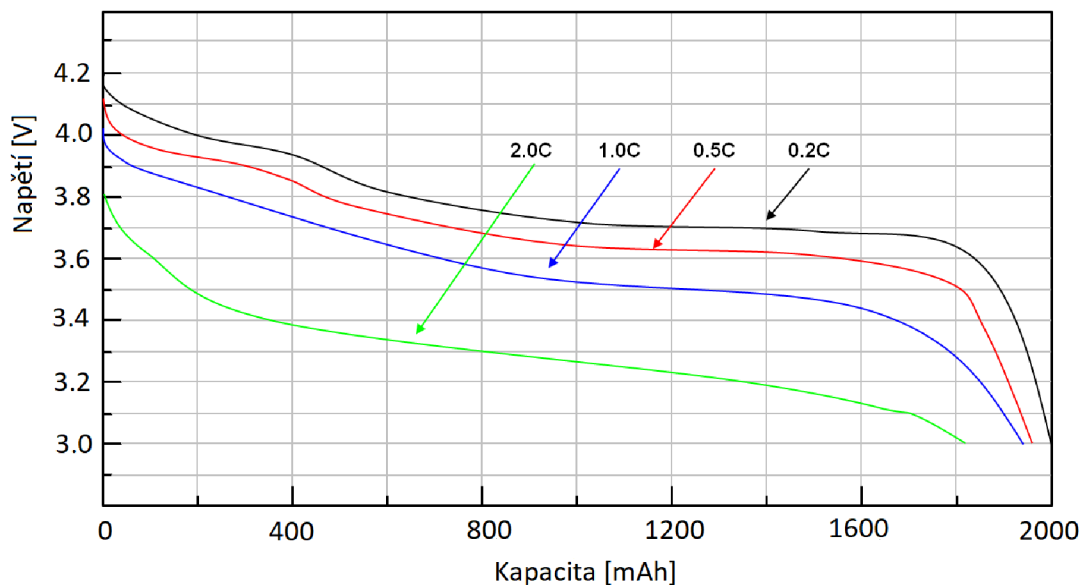
Obrázek 2: Vybíjecí charakteristika Li-Ion baterie, převzaté z [10]

Stárnutí baterie patří mezi hlavní nevýhody Li-Ion baterie. Mají 500–1000 nabíjecích cyklů, než se jejich kapacita zmenší a jejich následná výměna je obtížnější při zabudování baterie v zařízení. Další z nevýhod je přeprava baterií. Při přepravě ať už letecké, pozemní nebo lodní, musí být každý článek speciálně zabalen a jednotlivé póly musí být zakryty

před vyzkratováním a počet převážených baterií může být omezen, což způsobí zdražení baterie. [9]

1.2.2 Lithium-Polymerová baterie

Lithium-Polymerová (dále jen Li-Po baterie) je vyrobena vrstvením anody, katody a separátoru do obdélníkovitého nebo válcovitého tvaru. Jednotlivé anody a katody jsou vždy spojené spirálovitě. Mezi nimi je vložena vysoko porézní polyethylenová vrstva. V Li-Po bateriích se používá organický tekutý elektrolyt. Kvůli nežádoucím efektům, jako je přehřátí baterie, či následná exploze, se do baterie umísťují bezpečnostní termočlánky s kladným teplotním koeficientem (PTC, z angl. *Positive Temperature Coefficient*). Bateriové články mají napětí 3,6 V a vybíjecí charakteristiku lze vidět na obrázku 3. Články lze zapojovat k sobě sériově nebo paralelně dle požadovaného celkového napětí. [11]



Obrázek 3: Vybíjecí charakteristiky Li-Po baterie, převzaté z [12]

Li-Po baterie jsou dobíjitelné a dají se vyrobit v různých tvarech. Tyto dvě vlastnosti jsou velkými výhodami oproti ostatním bateriím. Mezi výhody také patří i nízká míra samovybíjení, přibližně 5 % za měsíc. [12]

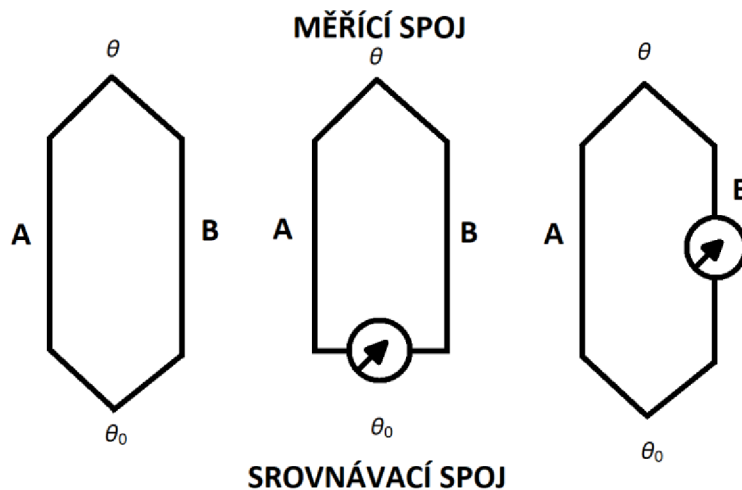
Nevýhodou Li-Po bateriových článků je méně nabíjecích cyklů, mezi 500 až 800 cykly. V náročnějších zařízeních mají životnost zhruba 250 až 500 nabíjecích cyklů. Bateriové články je složitější skladovat kvůli náchylnosti chemických vazeb uvnitř článku. Kvůli špatnému skladování může dojít až k explozi baterie. Další nevýhodou je i složitější a dražší přeprava. [12]

1.3 Měření teploty

Nedílnou součástí elektronických cigaret je měření teploty, které může být zaobstaráno různými teplotními senzory. Tato podkapitola je věnována popisu termočlánků, jak fungují a vysvětlení jejich vlastností a tvarů, následně budou popsány jejich charakteristiky.

1.3.1 Termočlánky

Termočlánky fungují na principu Seebeckova jevu, kdy dva vodiče A a B rozdílných materiálů jsou spojeny na konci v jednom bodě a na druhém konci do měřicího přístroje. Ohřátím jednoho konce vzniká termoelektrické napětí vlivem rozdílné práce elektronu z kovu. Tomuto jevu se říká Seebeckův jev. Při měření termoelektrického napětí lze využít zapojení termoelektrického snímače, viz obrázek 2. [13, 14]



Obrázek 4: Základní zapojení termoelektrického snímače, převzato z [14]

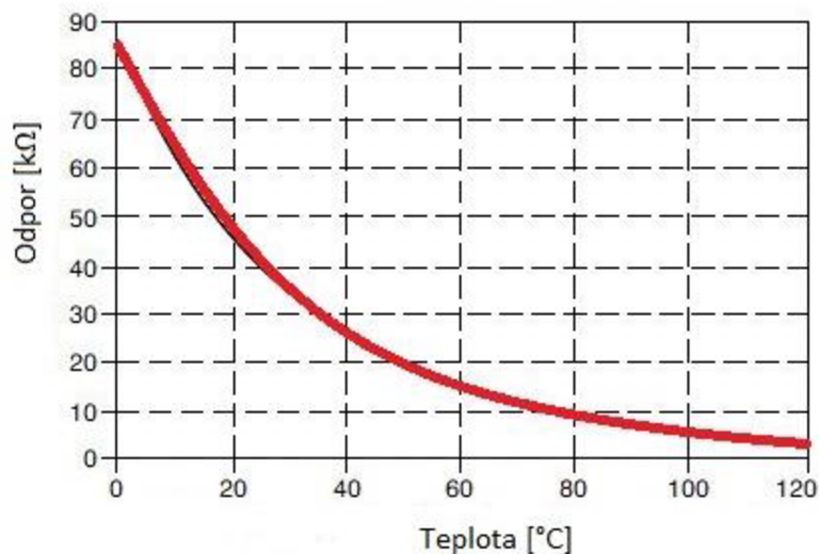
Jeden z bodů spojení označujeme jako měřicí spoj, druhý jako srovnávací spoj. Teplota srovnávacího spoje θ_0 musí být konstantní, nebo se kompenzuje vliv termoelektrického napětí. Pro změření termoelektrického napětí se musí připojit měřicí přístroj. [14]

1.3.2 Termistory

Termistory jsou teplotně závislé rezistory. Slovo termistor je odvozeno z anglického jazyka „thermal“ a „resistor“ a jsou tvořeny z oxidů kovů, které jsou tvořeny nejčastěji do perliček, disků a tyček (podobně jako rezistory). Termistory se dělí podle typu na termistory se záporným teplotním koeficientem (NTC, z angl. *Negative Temperature Coefficient*) a termistory s kladným teplotním koeficientem PTC. [15]

Termistory se záporným teplotním koeficientem

U NTC termistorů při vzrůstající teplotě jejich hodnota odporu klesá, viz obrázek 3. Jsou tvořeny z manganu, kobaltu, mědi, titanu, železa a niklu. Na výrobu se používají směsi dvou a více metaloxidových prášků těchto kovů. Díky různým poměrům a kombinacím prášků vzniká velká škála druhů termistorů a jejich závislostí. Provozní teploty NTC termistorů mohou dosahovat od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z hlediska tvaru se NTC termistory vyrábějí ve tvaru perliček, které mají vývody z platinové slitiny zasazené přímo do těla termistoru. Dále se vyrábějí s metalizovanými kontakty, které jsou vytvořeny metalizací plošek na povrchu termistoru, nejčastěji jako disky, SMD apod. [16]



Obrázek 5: Teplotní závislost NTC termistoru, převzaté z [17]

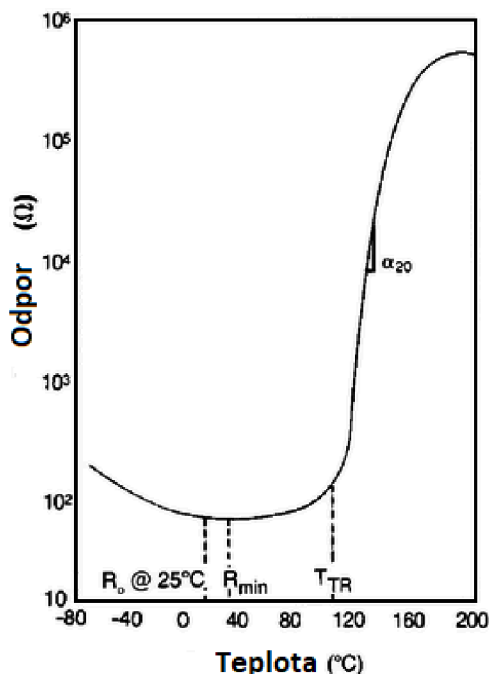
NTC termistory jsou velikostně menší a mají rychlou odezvu oproti ostatním teplotním sensorům. Jeho výhodou je značná citlivost, stabilita a přesnost při nižších teplotách, než je to u termočlánků. [18]

Termistory s kladným teplotním koeficientem

Tyto termistory jsou teplotně závislé keramické rezistory, které se používají při potřebě velkého přírůstku odporu v určitém rozsahu teplot. Existují dva typy PTC termistorů, jsou to silistory, které jsou teplotně závislé křemíkové rezistory a druhý typ jsou pozistory. Pozistory se řadí mezi klasické PTC termistory, které jsou tvořeny například z feroelektrické keramiky a používají se jako pojistky. [16]

Silistory mají téměř konstantní kladný teplotní koeficient (okolo $0,77\text{ }^{\circ}\text{C}$), ale při teplotě nad $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ mohou vykazovat i záporný. Tyto druhy se nejčastěji používají k teplotní kompenzaci obvodů s polovodiči v rozsahu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. [16]

PTC termistory mají nelineární závislost odporu na teplotě. Jak lze vidět na obrázku 4. Odpor termistoru nejdříve mírně klesá a po dosažení Curieovy teploty začne strmě růst. Když vzroste odpor zhruba o tři řády a teplota se tak rapidně nezvětší, hodnota odporu začne mírně klesat. [19]



Obrázek 6: Teplotní závislost PTC termistoru, převzatá z [19]

Počáteční odpor termistoru je R_0 při pokojové teplotě, minimální odpor R_{min} , teplota přechodu T_{TR} a teplotní koeficient α , který dosahuje svého maxima tehdy, kdy dosahuje několik stupňů od přechodné teploty T_{TR} . T_{TR} je teplota, při které je odpor termistoru v poměru R_{min} . [19]

1.4 Sériové sběrnice

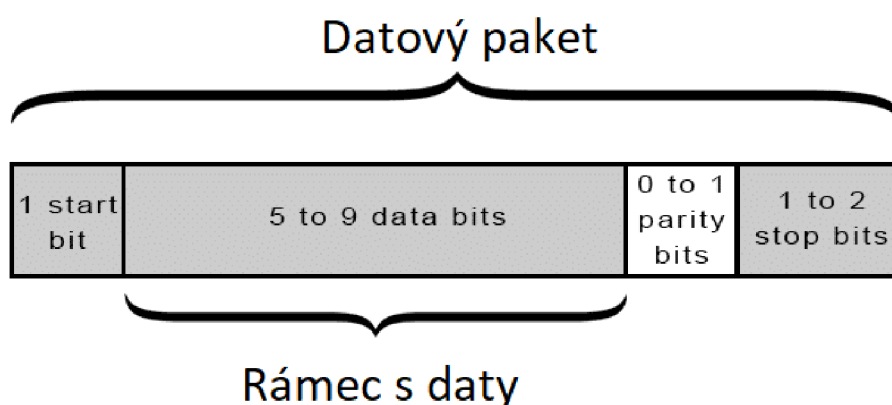
V této podkapitole budou popsány základní datové sběrnice mikrokontroleru, které se používají pro různé účely, ať už pro zobrazování dat na displeji nebo pro A/D, D/A převodníky.

1.4.1 UART sběrnice

Univerzální asynchronní přijímací/vysílací (UART, z angl. *Universal Asynchronous Receiver — Transmitter*) sběrnice posílá data na dvou vodičích. Jeden vodič je pro přijímání Rx (z angl. *Receive*) a druhý je pro odesílání Tx (z angl. *Transmit*). Tyto dva vodiče jsou propojené vždy mezi dvěma UART-y jednotlivých zařízení a funguje tu úplný duplex (oboustranný přenos dat). UART posílá data bez hodinového signálu, který by data posílal synchronně a za každý paket s daty přiřadí startovací a ukončovací bit.

Komunikace mezi UART-y musí probíhat na stejné přenosové rychlosti (angl. *baud rate*). Přenosová rychlost udává rychlost přenášených dat, které se měří v jednotkách bitů za jednu sekundu (z angl. bps, *bit per second*). Rychlost mezi dvěma UART-y se může lišit maximálně o 10 %, než data začnou být příliš nečitelná. [20]

Data jsou posílána paralelně z datové sběrnice přes UART do datové sběrnice mikrokontroleru, procesoru, nebo do jiného zařízení. Jakmile vysílací UART obdrží data ze sběrnice, přiřadí jim paritní bit a ukončovací bit (STOP bit), tím se vytvoří datový paket, který lze vidět na obrázku 7. [20]



Obrázek 7: Datový paket UARTu, převzato z [20]

Startovacímú bitu je přidělena napěťová úroveň 1, když se neodesílají žádná data a před začátkem přenosu se nastaví na 0. Jakmile přijímací strana zaznamená změnu napěťových úrovní, začne číst data z datového rámce. [21]

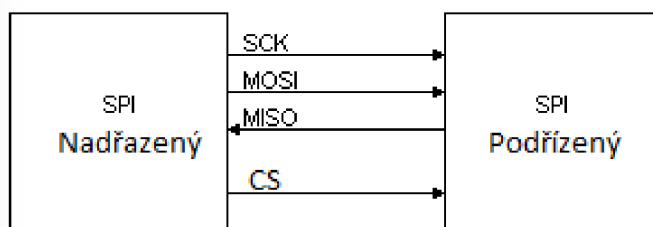
V datovém rámci se nacházejí odesílaná data, která mohou být 5-bitová, eventuálně 9-bitová, případně 8-bitová při použití paritního bitu. Data se posílají od nejméně významného bitu (LSB, z angl. *Least Significant Bit*). [21]

Paritní byt se stará o lichost nebo sudost odeslaných bitů, které mohou být během přenosu poškozeny elektromechanickým rušením, neshodou přenosové rychlosti nebo velkou vzdáleností mezi UART-y. Přijímací UART si přečte data a následně spočítá počet bitů s napěťovou úrovní 1 a určí, jestli je lichý nebo sudý. V okamžiku, kdy je počet sudý, tak parita je v 0 (sudá parita), parita bude v 1 pro lichý počet. Přenos dat je úspěšný v případě, že se data shodují s paritou, ale jakmile parita je na 0 a data jsou lichá, nebo naopak parita je 1 a data jsou sudá, tak UART ví, že se data pozměnila. [21, 22]

Ukončovací bit označuje konec datového paketu a může být velký 1 až 2 bity. Pro ukončení přenosu je potřeba, aby se tento bit udržoval na vyšší napěťové úrovni — logická 1. [22]

1.4.2 Serial Periphetal Interface sběrnice

Serial Periphetal Interface (dále jen SPI) sběrnice je jedna z několika sériových externích datových sběrnic, které se vyznačují propojením dvou a více komunikujících uzlů. Jeden uzel se vždy považuje za nadřazenou sběrnici a ostatní uzly musí být nastavené jako podřízené sběrnice. Tato nadřazená sběrnice generuje hodinový signál a je vedena vodičem označován jako SCK. Signál je následně rozeslán do všech ostatních komunikačních uzlů a dochází tak k obousměrnému a synchronnímu přenosu dat. Kromě SCK jsou uzly propojeny dvěma vodiči MISO (*Master In, Slave Out*) a MOSI (*Master Out, Slave In*), které se starají o oboustranný přenos. Poslední z důležitých signálů, který se používá k výběru některé podřízené sběrnice je CS (*Chip Select*). Zapojení mezi nadřazenou a podřízenou sběrnici lze vidět na obrázku 8. [23]



Obrázek 8: Zapojení SPI, převzato z [24]

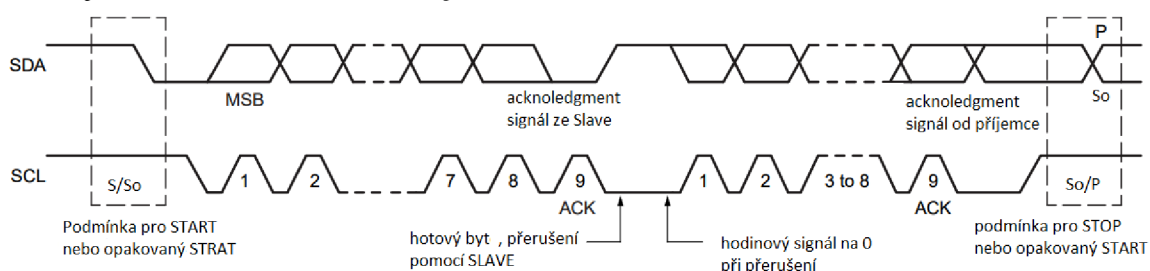
Přenos dat funguje na principu posílání jednotlivých bitů postupně mezi zařízeními, s tím, že se zároveň pošle hodinový signál z nadřazeného zařízení. Pomocí posuvného registru se data MOSI posílají společně s SCK a ve stejnou chvíli, kdy další posuvný registr obdrží data z MISO. Nadřazené zařízení vždy zahajuje přenos pomocí hodinového signálu a podřízené zařízení jsou vybírány pomocí CS, který je řízen softwarově. [25]

Díky své implementační jednoduchosti se SPI sběrnice používají ke komunikaci pro paměti EEPROM (z angl., *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), A/D a D/A převodníky a mnoho dalších. Jedna z výhod SPI sběrnice je její vysoká rychlost. Běžně se frekvence pohybuje v rozsahu od 1 MHz po 10 MHz a při malé kapacitě spoje je možné dosáhnout až 70 MHz, tudíž počet přenesených bytů za sekundu je $140 \cdot 10^6$. Další výhodou je elektrické rozhraní sběrnice a přenosový protokol, protože SPI je v podstatě řada externě zapojených posuvných registrů, tím pádem posun je tvořen jednotným hodinovým signálem. [23]

Jedna z nevýhod SPI sběrnice je možnost pouze jednoho zařízení, které funguje jako nadřazené zařízení. Použití více nadřazených zařízení by vyžadovalo zkomplikování celé topologie SPI. U SPI je možné použít několik metod pro synchronizaci dat hodinovým signálem, jako je například synchronizace na náběžnou, či sestupnou hranu. To způsobí, že mikrokontrolery obsahují konfigurační registry, kterými se určuje, která metoda se zvolí. Poslední nevýhodou je použití čtyř vodičů pro oboustranný přenos dat. [23]

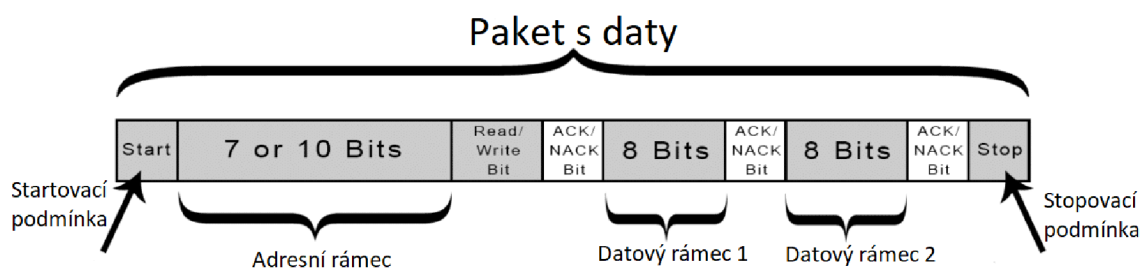
1.4.3 Inter-Integrated Circuit sběrnice

Inter-Integrated Circuit (I2C) sběrnice je kombinací UART a SPI. Lze použít několik podřazených zařízení a připojit je na jedno nadřazené, ale lze připojit i několik nadřazených zařízení k ovládání jednoho podřazeného. Toto je vhodné, jestliže se požaduje zapisování dat do paměti od několika mikrokontrolerů najednou a následné zobrazení na displeji. Jako to je u UART sběrnice, I2C sběrnice používá dva vodiče pro oboustrannou komunikaci. Jeden je pro sériová data (SDA, z angl. *Serial Data*), který slouží pro přenos dat mezi nadřazeným a podřazeným zařízením a druhý sériový hodinový signál (SCL, z angl. *Serial Clock*). K vodičům SDA a SCL jsou připojeny na napájení mikrokontroleru přes *pull-up* rezistory. I2C protokol je mnohem složitější než u UARTu nebo SPI, jak lze vidět na obrázku 9. [26,27]



Obrázek 9: I2C protokol, převzato z [28]

Podmínku pro START zařizuje nadřazené zařízení, které dává najevo podřazeným, že se připravuje ke komunikaci. Jakmile se tato podmínka spustí, všechna podřazená zařízení odposlouchávají data na sběrnici a nadřazené nastaví SDA na 0 a SCL na 1. V případě módu několikanásobného nadřazeného zařízení, kdy se připojí více nadřazených zařízení najednou, se připojí to, které bylo rychlejší. Celý paket dat lze vidět na obrázku 10. [28]



Obrázek 10: Datový paket, převzato z [27]

Dále se posílá adresní rámeček, který je poslán během celé komunikace hned po první startovací podmínce. Nadřazené zařízení určí adresu podřazenému zařízení, se kterým chce komunikovat. Komunikovat je možné pomocí 7-bitové nebo 10-bitové adresace. V 7-bitové adresaci se posílá jako první adresa s nejvýznamnějším bitem (MSB, z angl. *Most Significant Bit*). Následuje bit pro čtení/zapisování (R/W, z angl. *Read/Write*), kde

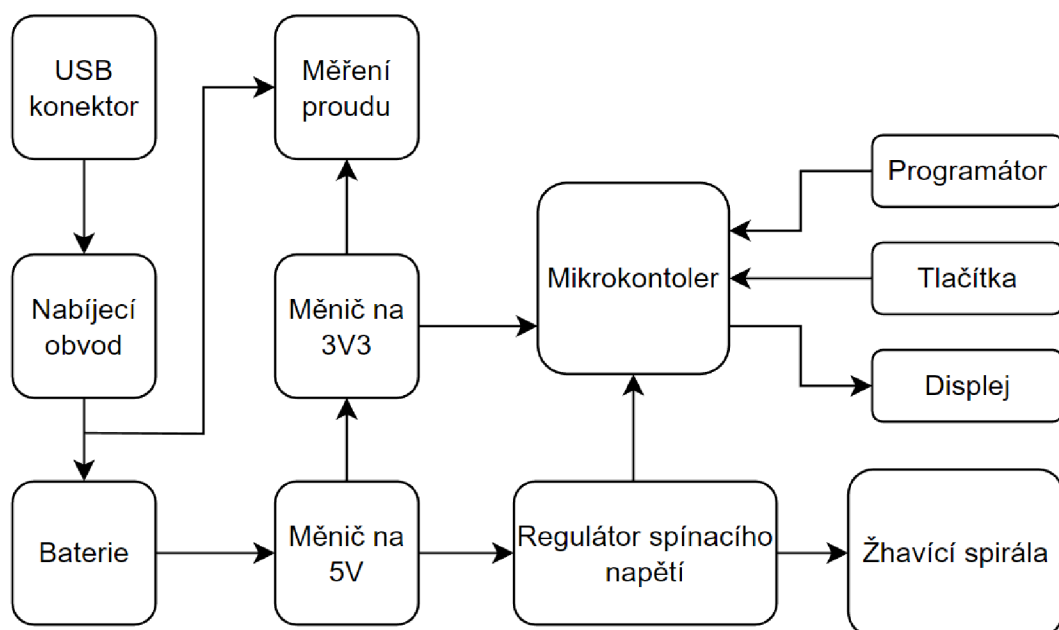
0 znázorňuje zápis a 1 čtení. Tato adresace je limitována pouze na 127 zařízení, a proto se pro složitější komunikaci používá 10-bitová adresace, kde počet zařízení je zhruba desetinásobný. [28]

Datový rámeček se posílá těsně po adresním rámečku. Tento rámeček lze posílat obousměrně, záleží na R/W bitu. Nadřazené zařízení bude pokračovat v posílání hodinového signálu a zařízení může posílat požadovaná data. Každý datový rámeček se posílá po osmi bitech, ale MSB jde jako první. Za každým datovým rámečkem následuje schvalovací bit (ACK/NACK, z angl. *Acknowledge/Not Acknowledge*). ACK musí být doručen před dalším odesláním datového rámečku. [28]

Nadřazené zařízení musí poslat podmínku pro STOP podřazeného zařízení, po odeslání všech datových rámečků. Podmínka pro STOP je skok napětíové úrovně z 0 na 1 na SDA a z 0 na 1 pro SCL, které zůstane na logické 1. [28]

2. NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Hlavním cílem návrhu je vytvoření vlastní elektronické cigarety dle vlastních požadavků. Návrh obsahuje napájení, měření proudu na baterii, napěťové měniče, mikrokontroler a jeho programátor, OLED (z angl., *Organic Light-Emitted Diode*) displej, regulátor spínacího napětí a žhavicí spirálu jakožto zátěž. Přepínání mezi pracovními režimy elektronické cigarety je provedeno pomocí tlačítek. Zapojení jednotlivých funkčních bloků je na obrázku 11.



Obrázek 11: Blokové schéma elektronické cigarety

V této kapitole jsou detailně popsány jednotlivé bloky návrhu elektronické cigarety. Dále jsou zde provedeny výpočty pro správnou funkčnost jednotlivých komponentů.

2.1 Napájení elektronické cigarety

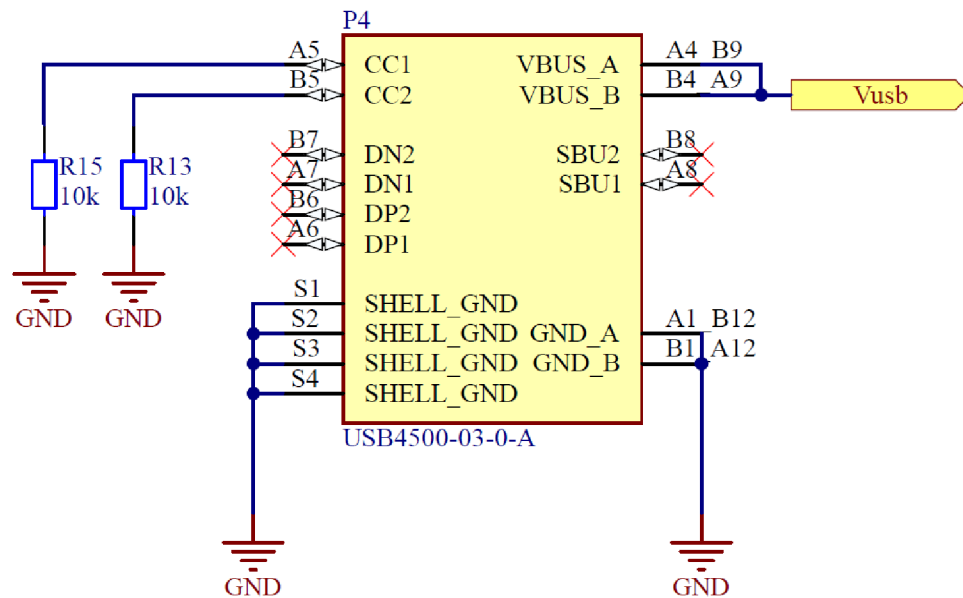
Elektronické cigarety jsou napájeny Li-Ion bateriovým článkem buď zabudovaným, nebo odnímatelným článkem typu 18650 nebo 21700. [29] Pro tento návrh je potřeba, aby byl zvolen bateriový článek takový, který dodá v bypass režimu alespoň 100 W. Potřebný proud I je dle vztahu:

$$I = \frac{P}{U} [A], \quad (2.1)$$

kde P je požadovaný výkon a U je maximální napětí baterie. Po dosažení hodnot do rovnice 2.1 se získá minimální požadovaný proud:

$$I = \frac{100}{4,2} = 23,8 \text{ A.} \quad (2.2)$$

Jelikož baterie 21700 poskytuje větší proud při nepřetržitém vybíjení, byl zvolen typ INR21700-30T od firmy Samsung. [30] Kapacita baterie je 3000 mAh s maximálním napětím 4,2 V. Její jmenovité napětí je 3,6 V a maximální proud při nepřetržitém vybíjení je 35 A. Bateriový článek se dá nabíjet dvěma způsoby. Jeden je pomocí externí nabíječky a druhý zvolený způsob je nabíjení v zařízení přes USB-C konektor. O nabíjení baterie se stará nabíjecí obvod, který je napájen ze sítě skrze USB-C konektor, jehož zapojení je znázorněno na obr. 12. [30]

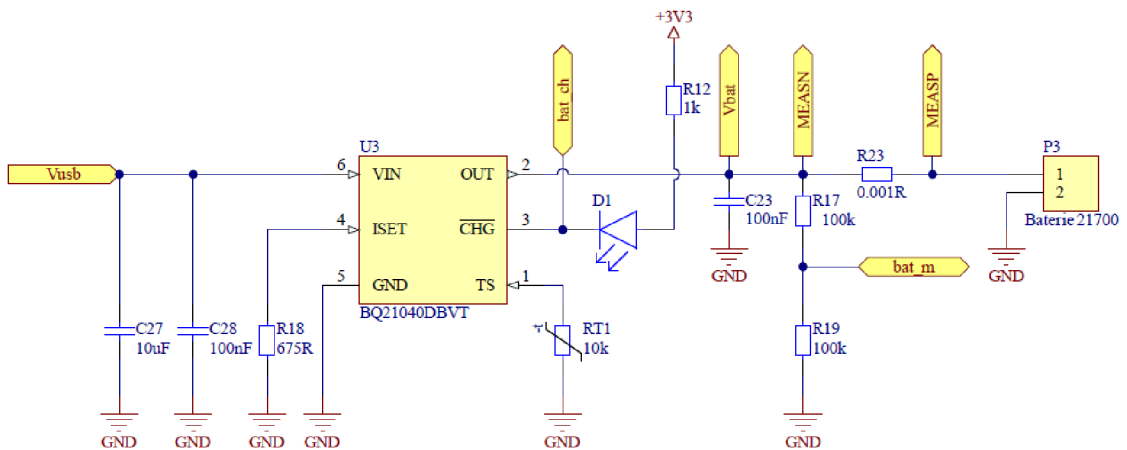


Obrázek 12: Zapojení USB-C konektoru

Konektor P4 slouží k připojení USB kabelu na dobíjení baterie, a proto byl zvolen USB4500-03-0-A. Vývody SHELL_GND, GND_A a GND_B jsou uzemněné z důvodu stínění signálu. Jelikož přes USB konektor se pouze nabíjí baterie, tak vývody DN a DP, které slouží pro přenos dat, jsou nezapojené.

2.1.1 Nabíjecí obvod s měřením proudu

Nabíjecí obvod se stará o nabíjení baterie, aniž by bylo zapotřebí vyjmout baterii ze zařízení. Nabíjecí čip byl vybrán BQ21040 od firmy Texas Instrument. [31] Tento čip je schopen nabíjet Li-Ion a Li-Pol baterie a svojí velikostí se hodí pro obvody s limitovaným prostorem na desce plošných spojů. Navrhnutý nabíjecí obvod je na obrázku 13.



Obrázek 13: Nabíjecí obvod baterie

Zvolený čip umožňuje nabíjet proudem maximálně 0,8 A. [31] Hodnotu nabíjecího proudu udává rezistor R18, jehož hodnota je dána rovnicí:

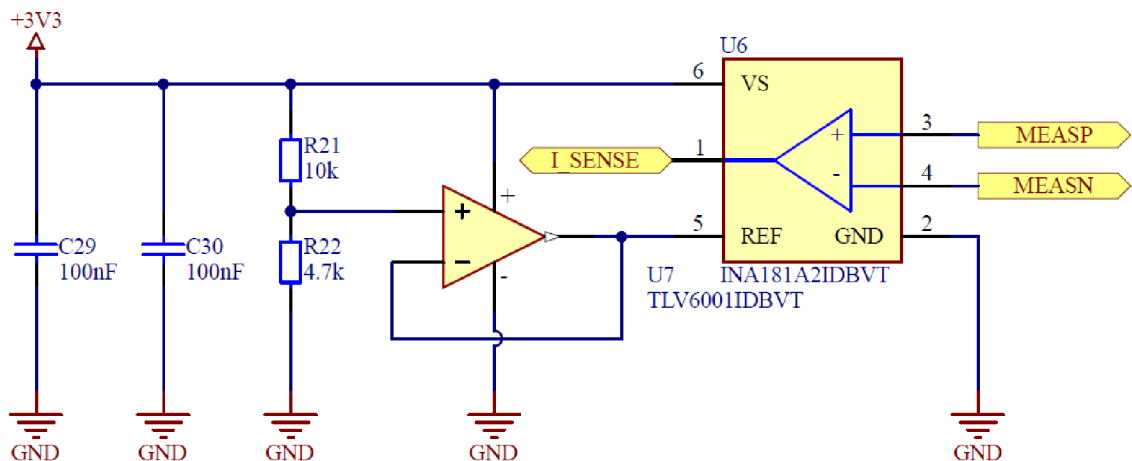
$$R_{ISET} = \frac{K_{ISET}}{I_{OUT}} [\Omega], \quad (2.3)$$

kde K_{ISET} je koeficient zesílení uvedený v katalogovém listu, jeho typická hodnota je $540 \text{ A}\Omega$ a I_{OUT} je požadovaný nabíjecí proud. Po dosazení hodnot do rovnice 2.3 vychází odpor následovně: [32]

$$R_{ISET} = \frac{540}{0,8} = 675 \Omega. \quad (2.4)$$

Nabíjecí obvod disponuje LED diodou D1, která signalizuje, jestli se baterie nabíjí nebo jestli nabíjení skončilo. Součástí čipu je bezpečnostní desetihodinový časovač, který vypne nabíjení baterie ve chvíli, když nabíjení překročí čas 10 hodin. Dále do obvodu je přiveden termistor NTC, který zabrání přehřátí baterie. Termistor musí být umístěn přímo na baterii. Pro sledování stavu nabití baterie byl použit dělič napětí R17 a R19, který umožní sledovat stav nabíjení pomocí displeje. [31]

Měření proudu na baterii se děje na rezistoru R23. Jedná se o přesný měřicí rezistor, na který jsou kladeny větší požadavky než na ostatní součástky. Samotné měření provádí integrovaný zesilovač směru proudu INA181A2IDBVT od Texas Instrument [33], který je označen jako U6. Zapojení integrovaného zesilovače směru proudu lze vidět na obrázku 14.



Obrázek 14: Schéma zapojení pro měření proudu

Tento zesilovač má na vstupu právě rezistor R23. Zesilovač měří proud obousměrně, tzn. měří nabíjecí i vybíjecí proud. Pro tento typ zesilovače je šířka pásma 210 kHz. K tomuto zesilovači je dále připojen operační zesilovač U7, který je zapojen jako sledovač TLV6001IDBVT s napětovou referencí, která je tvořena napětovým děličem R21 a R22. Protože měřený proud není v obou směrech stejný, byla napětová reference nastavena na 1,055 V pomocí vztahu [32]:

$$V_{REF} = U_{IN} \frac{R_{22}}{R_{22} \cdot R_{21}} [V], \quad (2.5)$$

kde U_{IN} je stejné napájecí napětí jako u zesilovače. Po dosazení hodnot do rovnice 2.5 vyjde hodnota referenčního napětí následovně:

$$V_{REF} = 3,3 \cdot \frac{4,7 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 \cdot 4,7 \cdot 10^3} = 1,055 V. \quad (2.6)$$

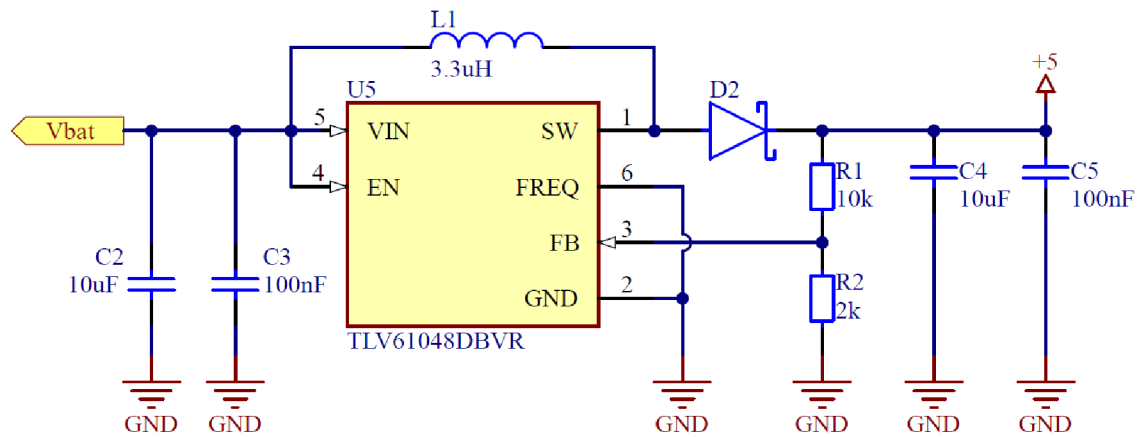
2.2 Měníče napětí

Baterie se postupně vybíjí a nemá tak konstantní napětí, je tedy nutné zapojit do obvodu měniče napětí, které toto napětí budou udržovat na požadovaných hodnotách. Byly navrženy dva regulátory napětí, protože ne všechny komponenty fungují na stejném napětí.

2.2.1 Měníč napětí z baterie

Měníč napětí z baterie na 5 V napájí výkonovou část obvodu a byl zvolen asynchronní budící měnič TLV61048DBVR od firmy Texas Instrument [33]. V obvodu je označen jako U5 a jeho zapojení viz obrázek 15. Měníč pracuje v proudovém režimu s kvazi konstantní frekvencí se zaimplementovanou kompenzační smyčkou. Spínací frekvence je

volitelná mezi 600 kHz a 1 MHz. Kvůli velikosti součástek byla zvolena frekvence 1 MHz. Hlavní výhodou vyšší spínací frekvence je také nižší zvlnění výstupního napětí. Této frekvence dosáhneme tím, že se uzemní vývod FREQ. [33]



Obrázek 15: Schéma zapojení asynchronního budícího měniče na 5 V

Hodnotu výstupního napětí určuje dělič napětí R1 a R2, který je závislý na referenčním napětí měniče. Pro výpočet děliče napětí je nutné si zvolit hodnotu odporu R2 a dále provést výpočet dle rovnice:

$$R_1 = \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \cdot R_2 \quad [\Omega], \quad (2.7)$$

kde V_{OUT} je požadované napětí, V_{REF} je referenční napětí měniče a R2 je určený odpor. Po dosazení hodnot do rovnice 2.7 vyjde odpor následovně:

$$R_1 = \left(\frac{5}{0,8} - 1 \right) \cdot 2 \cdot 10^3 = 10,5 \text{ k}\Omega, \quad (2.8)$$

kde výsledný odpor se zvolí podle odporové řady E24 a nejbližší hodnota je 10 kΩ. Zvolení hodnoty cívky L1 závisí na proudu, který jí prochází. Proud cívkou I_L lze určit vztahem:

$$I_L = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{IN} \cdot \eta} \quad [mA], \quad (2.9)$$

kde V_{OUT} je výstupní napětí měniče, I_{OUT} výstupní proud měniče, V_{IN} napětí na baterii a η je efektivita měniče, která je 80 %. Kvůli rezervě ve výpočtech byly zvoleny hodnoty pro vybitou baterii a maximální proud zátěže. Po dosazení hodnot do rovnice 2.9 se získá proud, který prochází cívkou:

$$I_L = \frac{5 \cdot 200 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 100} = 2,86 \text{ mA}. \quad (2.10)$$

Dále je potřeba vypočítat proudové zvlnění $\Delta I_{L(P-P)}$, které je podle vztahu:

$$\Delta I_{L(P-P)} = \frac{V_{IN} \cdot (V_{OUT} + 0,8 - V_{IN})}{L \cdot f \cdot (V_{OUT} + 0,8)} \text{ [mA]}, \quad (2.11)$$

kde L je zvolená indukčnost $3,3 \mu\text{H}$ a f je frekvence. Po dosazení hodnot do rovnice 2.11 vyjde proudové zvlnění následovně:

$$\Delta I_{L(P-P)} = \frac{3,5 \cdot (5 + 0,8 - 3,5)}{3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot (5 + 0,8)} = 420,5 \text{ mA}. \quad (2.12)$$

Poté lze vypočíst špičkový proud $I_{L(P)}$, který prochází cívkou dle vztahu:

$$I_{L(P)} = I_L + \frac{\Delta I_{L(P-P)}}{2} \text{ [mA]}, \quad (2.13)$$

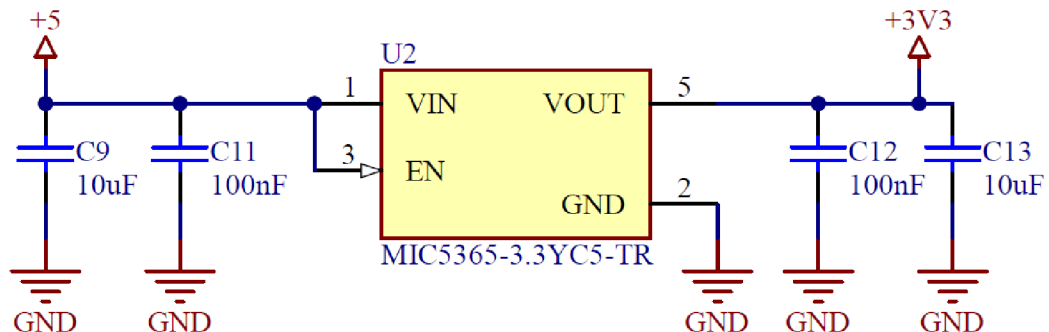
Po dosazení hodnot do rovnice 2.13 se získá špičkový proud:

$$I_{L(P)} = 2,86 + \frac{420,5}{2} = 213 \text{ mA}. \quad (2.14)$$

Pro usměrnění proudu na výstupu byla použita Schottkyho dioda, protože má menší úbytek napětí než klasická polovodičová dioda, a také protože zvládá frekvenci 1 MHz.

2.2.2 Měnič napětí pro řídicí část

Jelikož je potřeba napájet zbytek zařízení $3,3 \text{ V}$ a baterie nám poskytuje nestabilní napětí, byl navrhnut měnič napětí s nízkým úbytkem napětí tzv. LDO (z angl. *Low Drop-Out regulator*). Pro náš případ byl zvolen lineární LDO MIC5365-3.3YC5-TR od firmy Microchip [35], který poskytuje úbytek napětí 150 mV a přesnost na výstupním napětí $\pm 2 \%$. Tento měnič reguluje napětí z 5 V na $3,3 \text{ V}$ a je označen U2 viz obrázek 16. [34]



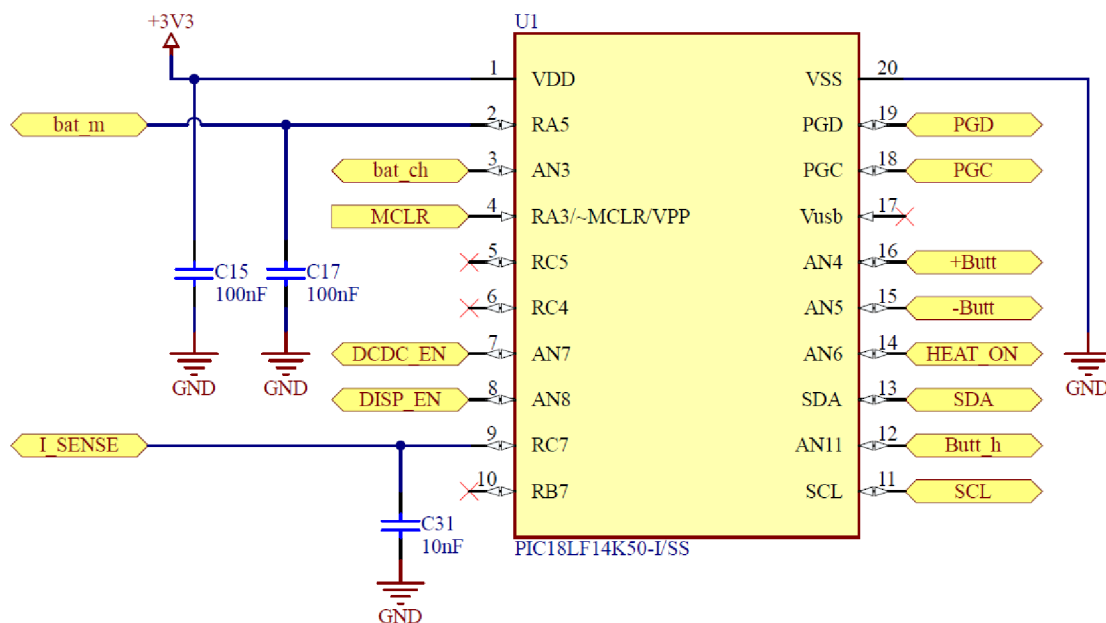
Obrázek 16: Schéma zapojení měniče napětí s nízkým úbytkem napětí

Když je signál přiveden na vstup *ENABLE*, regulátor napětí je aktivován a začne dodávat výstupní napětí na svých výstupních vývodech. Naopak, když je signál na *ENABLE* vývodu vypnutý, nebo je na něm přítomno nízké napětí, regulátor napětí je deaktivován a přestává dodávat výstupní napětí. [34]

2.3 Volba mikrokontroleru

Výběr mikrokontroleru spočíval v dostatečné paměti a vstupně výstupních vývodech, proto byl zvolen mikrokontroler PIC18LF14K50 od firmy Microchip. [35] Jedním z požadovaných parametrů tohoto mikrokontroleru je 14 vývodů GPIO (z angl. *General-Purpose Input Output*) a také 256 B paměť EEPROM. Dále je zde požadováno 7 analogových vstupů a jedna sériová datová sběrnice I2C. [35]

Napájecí napětí tohoto mikrokontroleru je v návrhu 3,3 V. Na mikrokontroler jsou připojeny výstupní signály z nabíjecího obvodu pro sledování stavu baterie a signalizace nabíjení, také jsou zde přivedeny spouštěcí signály pro systém žhavení a pro modul s OLED displejem. Také jsou zde připojeny blokovací kondenzátory pro zamezení statické elektřiny a jejich zapojení lze vidět na obrázku 17.



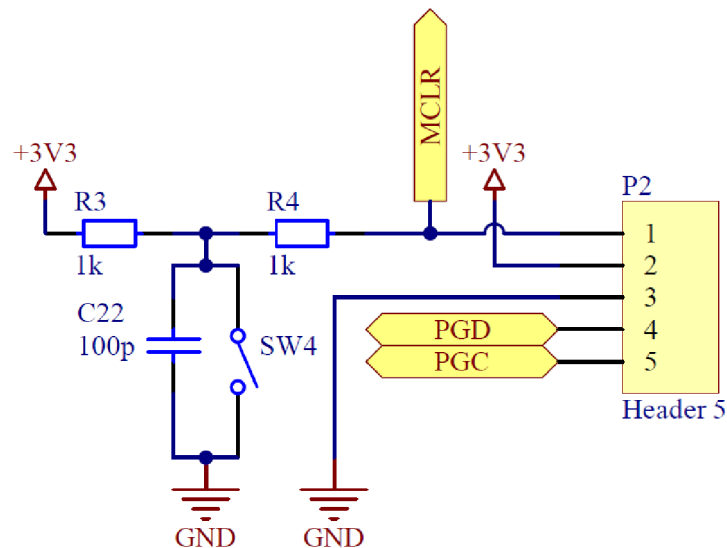
Obrázek 17: Schéma zapojení mikrokontroleru

Vývod ~MCLR (z angl. *Master Clear*) je pouze vstupní a poskytuje metodu pro spuštění externího resetu mikrokontroleru. Reset se spustí, jakmile je hodnota na vývodu v logické 0. Tento způsob restartu mikrokontroleru poskytuje tlačítko a k němu paralelně zapojený kondenzátor. [35]

Vývody PGD a PGC slouží jako programovací vstupy a výstupy mikrokontroleru. Poskytují propojení mezi programátorem a mikrokontrolerem. Dvojice vývodů SDA a SCL slouží ke komunikaci s I2C sběrnici. Jelikož tyto vývody nemají vnitřní pull-up rezistory, je třeba jejich fyzické zapojení. Pomocí sběrnice I2C mikrokontroler komunikuje s displejem. [35]

2.3.1 Výběr programátoru

Nedílnou součástí k výběru mikrokontroleru je také volba programátoru a jeho správné zapojení. Programátor má své napájení vyvedené přímo ze zařízení a je napájen 3,3 V, dále jsou vyvedeny programovací vývody PGD a PGC. Pro správné fungování byl navrhnout resetovací taktilní spínač s pull-up rezistory na \sim MCLR mikrokontroleru. Propojení programátoru s navrhnutým obvodem je za pomoci vývodový konektoru viz obrázek 18.

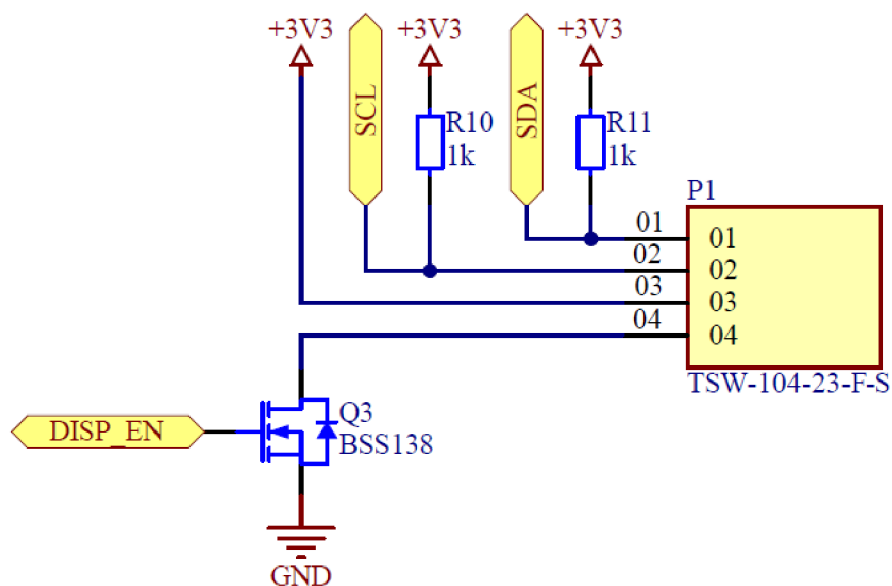


Obrázek 18: Schéma zapojení programátoru

Taktilní spínač FSMSMTR označen jako SW4 slouží k zmíněnému resetu programátoru, pomocí kterého se resetuje daný program. K vývodovému konektoru P2 je následně připojen programátor MPLAB® PICkit™ 4 In-Circuit Debugger od firmy Microchip [36] Tento programátor podporuje zmíněný mikrokontroler. Programování probíhá pomocí vývojového prostředí MPLAB X IDE a nahrávání programu je zprostředkováno pomocí micro USB kabelu. Dále je požadována ochrana proti přepětí na desce z napájecího napětí. Programátor disponuje konektorem, který slouží k propojení s navrhnutým obvodem. Orientace konektoru je označena šipkou a jeho vývody korespondují s návrhem. [36]

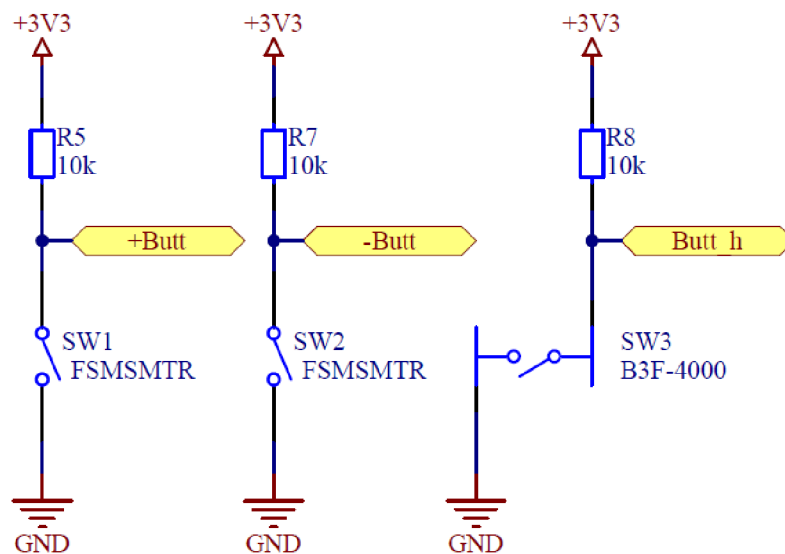
2.4 Grafické a uživatelské rozhraní

OLED displej používá ke komunikaci sériovou datovou sběrnici I2C, která je připojena na vývody SDA a SCL mikrokontroleru. Pro návrh elektronické cigarety byl vybrán OLED displej s řadičem SSD1306 [37]. OLED displej na modulu je v zapojení se společnou katodou. Jak již bylo zmíněno v první části kapitoly 2.3, je třeba k displeji fyzicky připojit pull-up rezistory, protože komunikují skrze sériovou I2C sběrnici. Modul není součástí schématu a připojuje se pomocí pinového konektoru viz obrázek 18. [37] Unipolární tranzistor NMOS, který je označen jako Q3, slouží k zhasnutí displeje, jakmile není potřeba vidět nastavované hodnoty.



Obrázek 19: Schéma zapojení k modulu SSD1306

Uživatelské rozhraní, pomocí kterého je možné ovládat elektronickou cigaretu, se skládá ze tří ovládacích taktilních spínačů. Dva taktilní spínače FSMSMTR plus a minus (nahoru a dolů) slouží pro zvolení hodnoty výkonu nebo pro pohyb v ovládacím menu a jsou označena jako SW1 a SW2. Třetí taktilní spínač B3F-4000 je použit k vypnutí, nebo zapnutí celého zařízení a také pro spuštění žhavení, je označen SW3. Tento spínač je velikostně větší z důvodu rozlišení ovládacích spínačů od žhavicího. Zapojení taktilních spínačů lze vidět na schématu na obrázku 19.



Obrázek 20: Schéma zapojení taktálních spínačů

Ke každému spínači je nutné připojit pull-up rezistor a spínače jsou propojeny s mikrokontrolerem.

2.5 Systém žhavení

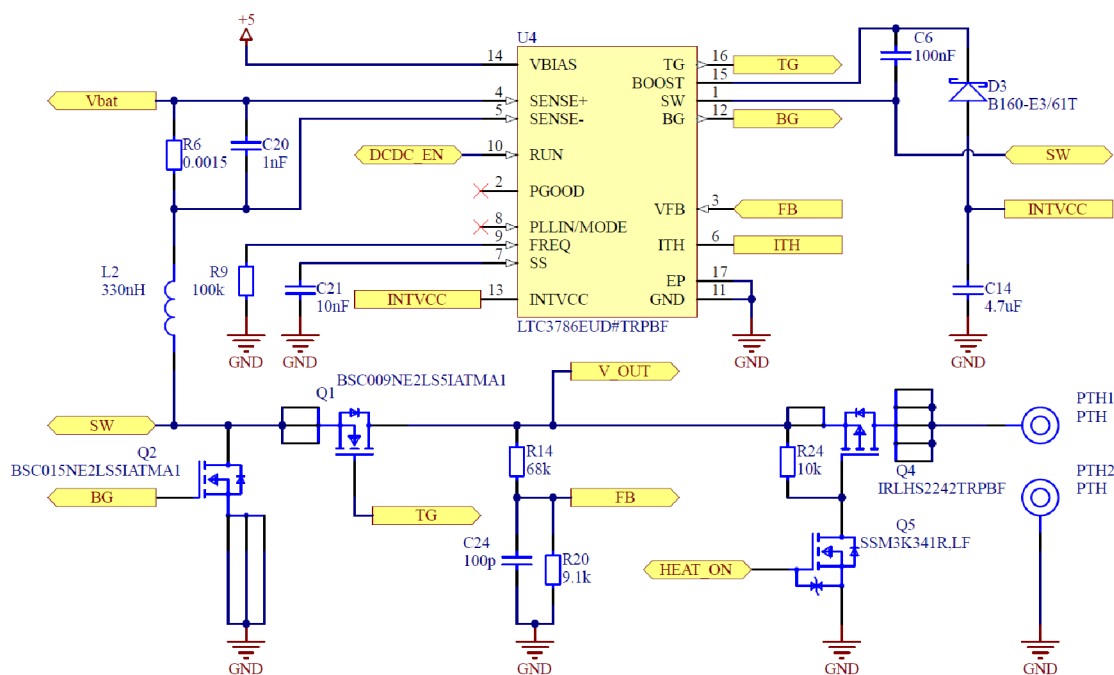
Výstupem elektronické cigarety je žhavicí spirála, která odpařuje e-liquid. Na to, aby se žhavicí spirála zahřála na patřičnou teplotu, je potřeba velkého výkonu, avšak maximální výkon nám udává napětí a proud baterie. Pro zvolenou baterii viz kapitola 2.1 je maximální výkon 147 W dle vztahu:

$$P = U * I [W], \quad (2.15)$$

kde U je maximální napětí baterie, a I je maximální proud při nepřetržitém vybíjení. Po dosazení hodnot do rovnice 2.15 získáme maximální výkon baterie:

$$P = 4,2 * 35 = 147 W. \quad (2.16)$$

Pro nedostatečné spínání unipolárních tranzistorů v asynchronním posilovači napětí byl navrhnut synchronní posilovací měnič (z angl. *Synchronous boost converter*), který žhavicí spirále dodá stabilní nastavený výkon bez ohledu na aktuální stav nabití baterie. Synchronní posilovací měnič byl vybrán LTC3786 od firmy Analog Devices a s pomocí unipolárních tranzistorů je schopen na spirálu dodat až 100 W. [36] Zapojení celého žhavicího systému se synchronním posilovacím měničem lze vidět na obrázku 20.



Obrázek 21: Schéma zapojení systému žhavení

Posilovací měnič je napájen napětím 5 V. Při předpětí z výstupu posilovacího měniče nebo jiného pomocného zdroje může tento posilovací měnič pracovat po spuštění již od 2,5 V. Klidový proud bez zátěže je 55 μA [38], který zajišťuje delší dobu provozu v daném rozsahu při napájení z baterie. Jelikož obvod má nastavitelnou frekvenci v rozsahu 75 kHz až 850 kHz, je potřeba danou frekvenci nastavit. Očekává se velice rychlé sepnutí, takže zvolená frekvence je 760 kHz a je nastavena pomocí rezistoru R9 jehož hodnota je 100 k Ω . [38]

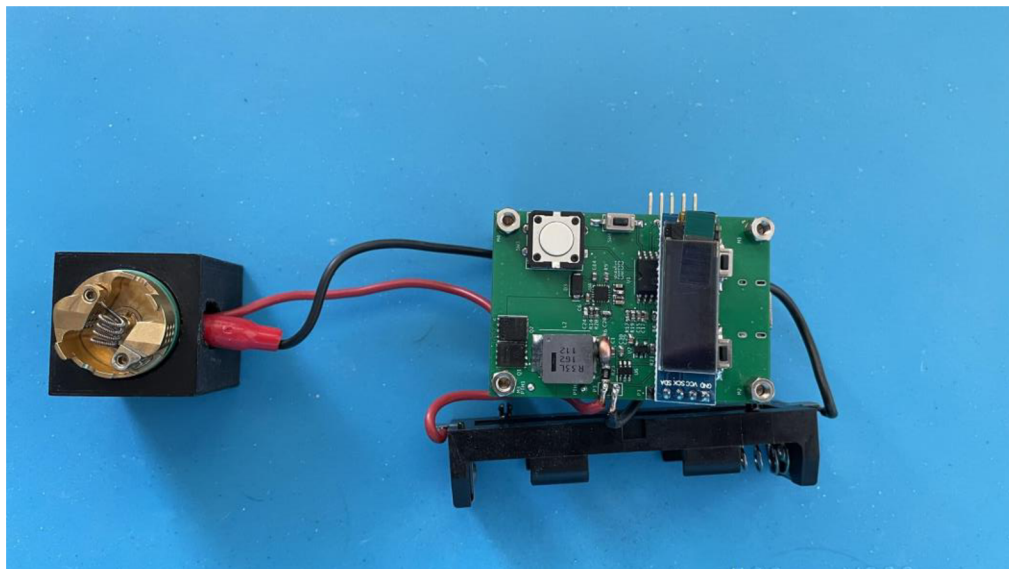
Samotné spínání tohoto synchronního posilovače probíhá na NMOS tranzistorech Q1 a Q2, které jsou řízeny z posilovače. Dále PMOS tranzistor Q4 a NMOS Q5 mají ochranou funkci proti neustálému žhavení spirály, které jsou dále ovládané mikrokontrolerem.

Výstupní napětí a proud je přiveden na závit 510, na který je následně našroubován atomizér s žhavicí spirálou. Kontakty na závitu jsou označeny jako prokované díry PTH, kde PTH1 je označen kladný pól závitu a PTH2 záporný. Atomizér byl použit jednospirálový RBA (z angl. *Re-buildable Atomizer*) typu C4 od firmy Asmodus. [39]

3. OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ

Celý návrh desky plošných spojů (DPS) byl proveden v návrhovém programu *Altium Designer ver. 22.3.1*. Realizace DPS byla provedena na 4 vrstvách. Volba 4-vrstvé desky byla provedena na základě odvedení tepla rovnoměrně po desce z výkonové části desky. Dále 4-vrstvá deska umožňuje propojení všech uzemnění komponentů. Jedna z vnitřních vrstev slouží pro vedení signálu a druhá vnitřní vrstva je napájecí. Horní a spodní vrstva je signálová. DPS byla vyrobena společností JLCPCB. Při návrhu byly dodrženy minimální parametry, které je schopna firma vyrobit. Šířka vodivé cesty je 0,1 mm s rozstupem taktéž 0,1 mm. Jednotlivé prokovy mají velikost 0,3 mm s roztečí 0,4 mm. Vnitřní vrstvy jsou široké 17,5 μm a vnější vrstvy jsou široké 35 μm . Výrobní materiály DPS nám umožňují vést vodivé cesty s kontrolovanou impedancí 50 Ω , která platí pro všechny vedené signály.

Kritická situace v návrhu vznikla u umístování součástek výkonové části. Vzhledem k této situaci byl kladen důraz na správnost návrhu. Výsledný návrh DPS společně se žhavicí spirálou je na obrázku 21 a zobrazení jednotlivých vrstev DPS je v příloze B.



Obrázek 22: Výsledný návrh zařízení

Po porovnání s konkurenční firmou *Evolv*, která poskytuje hotové DPS pro elektronické cigarety, tak cena jejich DPS činí 1659,05 Kč. Jedná se o model *DNA 100 Color*, který má stejný výstupní maximální výkon 100 W. [40] Tento model má však displej součástí DPS a třetí nastavovací taktilní spínač. Navržená DPS i s cenou součástek je 1633,66 Kč. Lze tedy vyhodnotit, že konkurenční DPS je cenově srovnatelná s navrženou.

3.1 Osazení a oživení

V této podkapitole je popsán postup, jakým způsobem byla DPS osazena a oživena. Také je zde uveden pájecí postup. Tato podkapitola také poukazuje na chyby v návrhu a následné odstranění chyb.

3.1.1 Osazení

Jelikož navržená DPS je relativně malá 60 x 40 mm a byl vyroben pouze jeden testovací kus, tak osazení elektronické cigarety proběhlo ručním osazením pomocí pinzety. Jako pájecí procesy se zvolily ruční pájení mini vlnou a horkovzdušné pájení. Pájecí slitina byla zvolena s příměsí olova, jelikož se jednalo o prototypovou výrobu.

3.1.2 Oživení

Oživení desky plošných spojů probíhalo na laboratorním zdroji, který dodává potřebné napájecí napětí. Jako první byla oživena výkonová část se synchronním posilovačem. Nastala chyba u dodavatele, kde došlo k zaměnění řádu hodnot u jednoho z rezistorů, a tak bylo navrženo jiné řešení pomocí měděného drátu, který má požadovaný odpor. Po přivedení napájecích napětí pro tento obvod byly na výstupu naměřeny hodnoty, které odpovídaly teoretickému návrhu. Měření výstupního napětí nejprve probíhalo na rezistoru o velikosti 47 k Ω pro ověření správného zapojení. Bylo naměřeno napětí 10 V, což je požadovaná hodnota. Následně byl výstupní odpor zmenšen na 7,5 Ω a výstupní napětí bylo opět 10 V. Jelikož laboratorní zdroj byl schopný dodávat proud do 2 A, tak nebylo možné dále nahrazovat baterii a bylo nutno pokračovat v měření až po oživení zbylých komponent.

Dále proběhlo oživení měniče napětí, kde po připojení vstupního napětí na měnič, který mění vstupní napětí na 5 V, bylo naměřeno 4,8 V. Posléze bylo naměřeno na výstupu lineárního měniče 3,34 V. Odchytky mohly být způsobeny tolerancemi součástek.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s částmi, ze kterých se elektronická cigareta skládá. V první kapitole byly popsány druhy elektronických cigaret a jednotlivé pracovní režimy, kterými disponují. Dále byly popsány dva základní druhy baterií pro elektronické cigarety a teplotní senzory. Následně byly detailně vysvětleny tři sériové datové sběrnice, se kterými pracují mikrokontrolery.

V části návrhu zařízení bylo popsáno blokové schéma s funkčními bloky s jejich navázáním. Byl proveden výpočet potřebného proudu, který musí baterie dodávat a následně zvolen typ baterie. Dále byl navržen nabíjecí obvod s měřením proudu a proveden výpočet měřícího rezistoru a vybrán nabíjecí konektor.

V další části návrhu byly navrženy dva měniče napětí, jeden z napětí na baterii a druhý pro řídicí elektroniku. Proběhly výpočty pro patřičné klíčové komponenty k těmto měničům. Pokračoval návrh a výběr mikrokontroleru. Zvolený mikrokontroler byl navržen tak, aby poskytoval zvolené parametry. Dále bylo popsáno zapojení programátoru. Plynule pokračoval návrh grafického a uživatelského rozhraní, kde byly popsány jednotlivé funkce taktálních spínačů.

Následoval návrh žhavicího systému, který obsahoval synchronní posilovací měnič s tranzistory pro vypnutí žhavení. Dále tento posilovací měnič měl vyvedený výstup na závit, na kterém byl předělán atomizér s žhavicí spirálou.

V poslední části bakalářské práce byl popsán proces návrhu desky plošných spojů a její výrobní technologie dle výrobce. Následovalo zvolení pájecího procesu a následné osazení komponent. Proběhlo popsání postupu oživování jednotlivých částí zařízení.

LITERATURA

- [1] *About Electronic Cigarettes (E-Cigarettes)* [online]. 2022 [cit. 2022-10-29]. Dostupné z: https://www.cdc.gov/tobacco/basic_information/e-cigarettes/about-e-cigarettes.html#print
- [2] *E-Cigarettes (Vaping)*. In: College of Saint Benedict and Saint John's University [online]. USA: College of Saint Benedict and Saint John's University, 2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.csbsju.edu/health-promotion/health-resources/e-cigarettes>
- [3] *ARTMAN, Jason. What Are the Different Vaping Modes and What Do They Mean?*. In: Vapejuice.com [online]. Phoenix, Arizona, USA: Jason Artman, 2021 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://vapejuice.com/blogs/vape-juice-news/vaping-modes>
- [4] JOHNSON, Lee. Vaping Modes Explained. Ashtray blog [online]. 2021 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.ecigarettedirect.co.uk/ashtray-blog/2020/02/vaping-modes.html>
- [5] What Mode Should I Use On My Vape?: Wattage/Voltage (Power Mode). Vape store blog [online]. USA, 2018 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://blog.180smoke.ca/what-mode-should-i-use-on-my-vape/>
- [6] Vaping Modes Explained: Wattage Mode. Vapekit [online]. UK, 2018 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://vapekit.co.uk/vape-kits-c932/vaping-modes-explained-c1427>
- [7] Temperature Control Mode: How it Works and Why You'll Love It. Versed Vaper [online]. USA: Versed Vaper Team, 2021 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://versedvaper.com/temperature-control-mode-guide/>
- [8] *How Does a Lithium-ion Battery Work?* [online]. 2017 [cit. 2022-10-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/articles/how-does-lithium-ion-battery-work>
- [9] Lithium Ion Battery Advantages & Disadvantages [online]. [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php
- [10] Li-ion Voltage Analysis. *Silicon lightworks* [online]. USA, Florida [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://siliconlightworks.com/li-ion-voltage>
- [11] *What is Lithium Polymer Battery?*. Dnkpowers [online]. Shenzhen City, Guangdong Province, China, 2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.dnkpowers.com/lithium-polymer-battery-guide/#chapter2>
- [12] *What is Lithium Polymer Battery?*. Dnkpowers [online]. Shenzhen City, Guangdong Province, China, 2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.dnkpowers.com/lithium-polymer-battery-guide/#chapter3>

- [13] AGARWAL, Tarun. *What is a Thermocouple : Working Principle & Its Applications*. EL-PRO-CUS [online]. Indie: Elprocus, 2018 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/what-is-a-thermocouple-definition-working-principle-diagram-applications/>
- [14] *Měření teploty*. Měření teploty [online]. Česká republika: VŠCHT, 2018 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [15] *Thermistor Basics*. Application Note AN-TC11 [online]. 2013, Rev A, 6 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.teamwavelength.com/download/applicationtechnotes/an-tc11.pdf>
- [16] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 2. díl*. Praha: BEN – technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-161-2.
- [17] HOW TO SIZE A RESISTOR TO READ A 10K OHM THERMISTOR. ESP8266 Community Forum [online]. 2016 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.esp8266.com/viewtopic.php?p=45320>
- [18] NTC Thermistor. EEPower [online]. USA, 2010 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/#>
- [19] Měření teploty – polovodičové odporové senzory teploty. Vyvoj.hw.cz [online]. Praha: Redakce HW serveru, 2004 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [20] BASICS OF UART COMMUNICATION [online]. USA, 2007 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>
- [21] PEŇA, Eric a Mary G. LEGASPI. UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. Analog [online]. USA, 2020 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>
- [22] Basics of UART Communication [online]. 2017 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/basics-uart-communication/>
- [23] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Externí sériové sběrnice SPI a I²C. Root.cz [online]. 2008, 1 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>
- [24] NICOLLE, Jean. SPI 1 - What is SPI?. In: FPGA4fun [online]. 2010 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.fpga4fun.com/SPI1.html>
- [25] MAIN, John. SPI interface Tutorial. TronicsBench [online]. United Kingdom, 2006 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.best-microcontroller-projects.com/spi-interface.html>
- [26] Inter Integrated Circuit. O'REILLY [online]. USA: O'Reilly Media, 2002 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.oreilly.com/library/view/designing-embedded-hardware/0596003625/ch09s02.html>

- [27] CAMPBELL, Scott. BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL. Circuit Basics [online]. USA, 2007 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>
- [28] I²C – Inter-Integrated Circuit. Electro Some [online]. 2017 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://electrosome.com/i2c/>
- [29] Beginner's guide to vaping. INOKIN [online]. Shenzhen, Čína [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://www.innokin.com/guide-to-vaping>
- [30] INR21700-30T, Samsung [online katalogový list]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/d6147ab6f2b82f7e0b98d79910473d06/samsung-INR21700-30t-datasheet.pdf>
- [31] BQ21040, Texas Instrument [online katalogový list]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq21040.pdf?ts=1684757926532&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fpower-management%252Fbattery-management%252Fcharger-ics%252Fproducts.html%253FkeyMatch%253DBATTERY%2BCHARGER
- [32] INA181A2IDBVT, Texas Instrument [online katalogový list]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf?ts=1685113668023&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA181%252Fpart-details%252FINA181A2IDBVT%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dcpc-tistore-promo-asc_opn_en-cpc-storeic-google-ww%2526utm_content%253DDevice%2526ds_k%253DINA181A2IDBVT%2526DCM%253Dyes%2526gclid%253DCjwKCAjwscGjBhAXEiwAswQqNNkNlBb4ttDw_3rHXzag4rD5vjhksoK_UiicvNfipaDceL8sQVQHhoC9BcQAvD_BwE%2526gclidsrc%253Daw.ds
- [33] TLV6104DBVR, Texas Instrument [online katalogový list]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv61048.pdf?ts=1685127343755>
- [34] MIC5365-3.3YC5-TR, Microchip [online katalogový list]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic5365.pdf>
- [35] PIC18(L)F1XK50 [online katalogový list]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/Product Documents/DataSheets/40001350F.pdf>
- [36] MPLAB® PICKit™ 4 In-Circuit Debugger, Microchip [online katalogový list]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002751F.pdf>
- [37] SSD1306 [online katalogový list]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/ssd1306.pdf
- [38] LTC3786, Analog Devices [online katalogový list]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3786fc.pdf>

- [39] C4, Asmodus [online]. Ostrava, Česká republika [cit. 2023-05-30]. Dostupné z:
<https://www.vaporism.cz/asmodus-c4-lp-single-coil-rda-P/>
- [40] Evolv DNA 100 Color, [online]. Ohio, USA [cit. 2022-05-29]. Dostupné z:
<https://www.evolvapor.com/products/evolv-dna-100-color>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické
E-cigareta	Elektronická cigareta
H/N/S	Hard/Normal/Soft
E-liquid	Náplň pro elektronické cigarety
Li-Ion	Lithium-Iont
Li-Po	Lithium-Polymer
PTC	Positive Temperature Coefficient
NTC	Negative Temperature Coefficient
SMD	Surface Mount Device
A/D	Analogově/Digitální
D/A	Digitálně/Analogový
UART	Universal Asynchronous Receiver – Transmitter
Rx	Receiver
Tx	Transmit
bps	bit per second
LSB	Least Significant Bit
SPI	Serial Peripheral Interface
SCK	Serial Clock
MISO	Master In, Slave Out
MOSI	Master Out, Slave In
CS	Chip Select
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
I2C	Inter-Integrated Circuit
SDA	Serial Data
SCL	Serial Clock
MSB	Most Significant Bit
R/W	Read/Write
ACK	Acknowledge
NACK	Not Acknowledge
OLED	Organic Light-Emitted Diode
USB	Universal Serial Bus
LED	Light-Emitted Diode
LDO	Low Drop-Out
GPIO	General-Purpose Input Output
MCLR	Master Clear
NMOS	N-type Metal-Oxide Semiconductor
PMOS	P-type Metal-Oxide Semiconductor
DPS	Deska plošných spojů
Kč	Korun českých

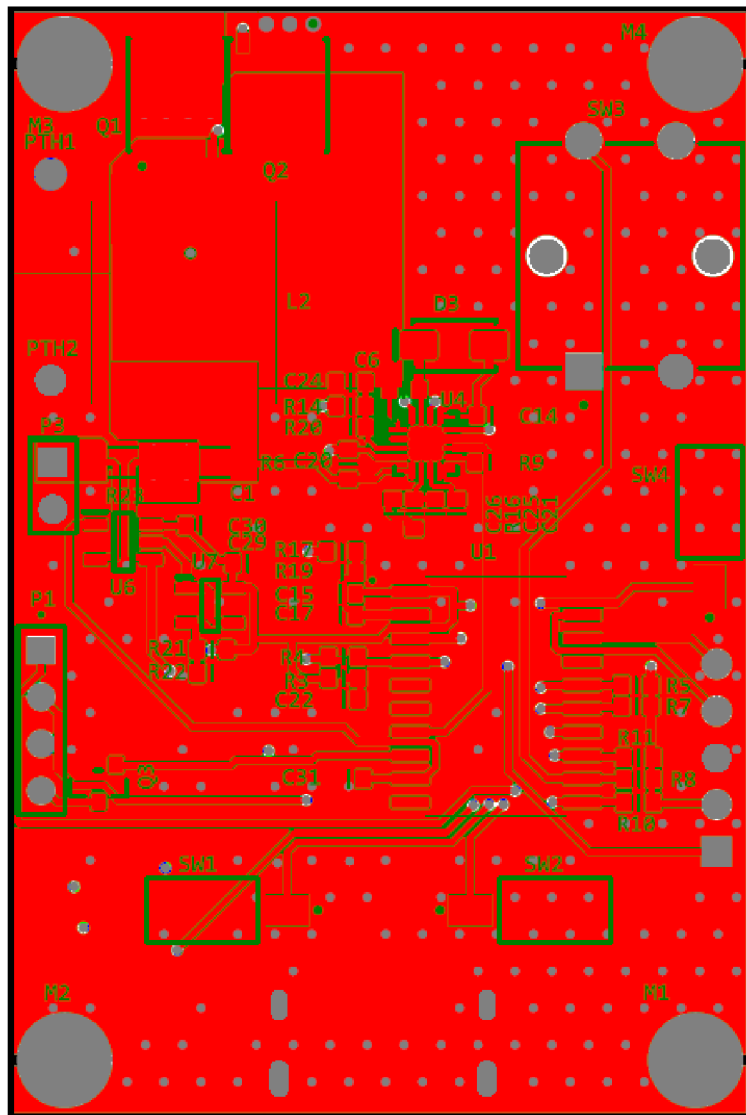
Symboly:

U	Napětí	(V)
t	Teplota	(°C)
R	Odpor	(Ω)
f	Frekvence	(Hz)
I	Proud	(A)
C	Kapacita baterie	(Ah)
P	Výkon	(W)

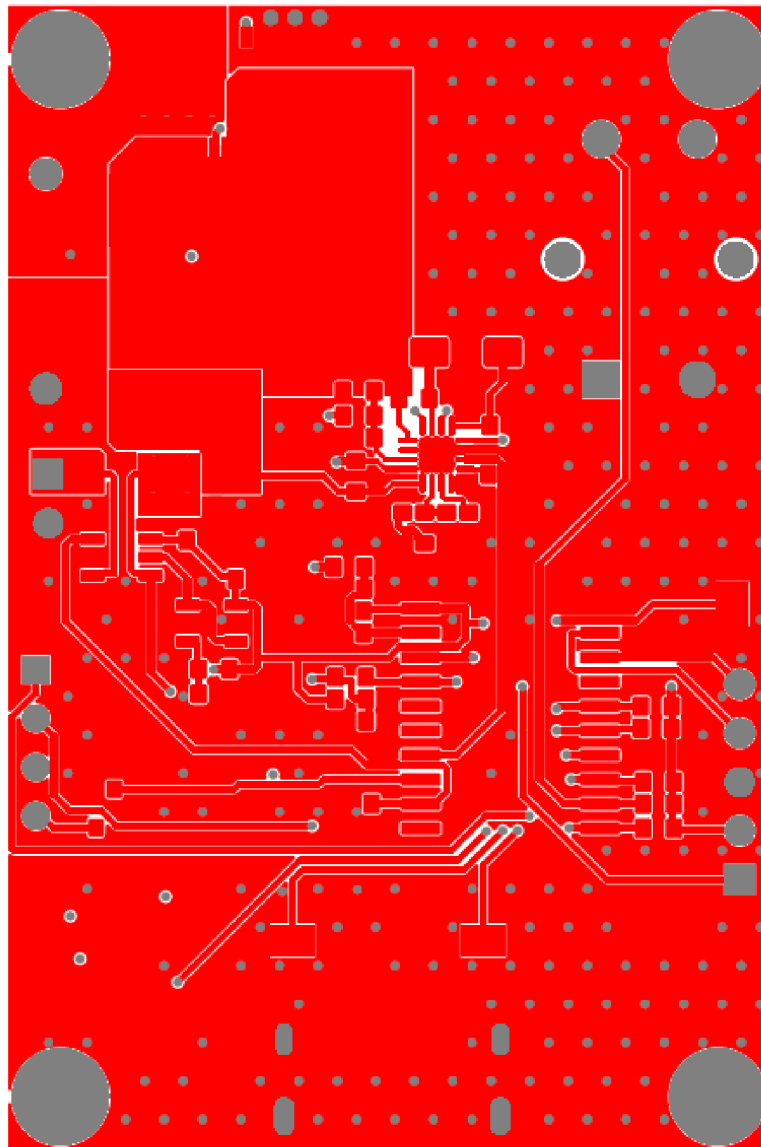
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ELEKTRONICKÁ CIGARETA	42
---	----

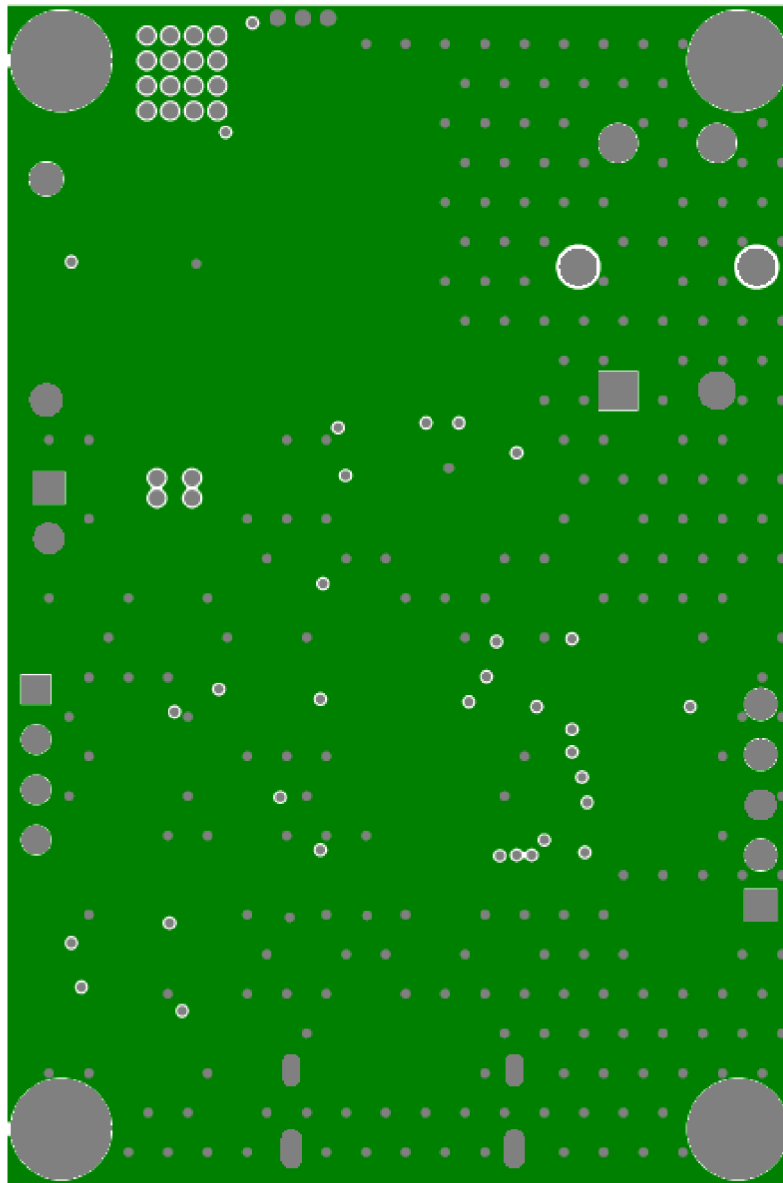
Příloha A - Elektronická cigareta



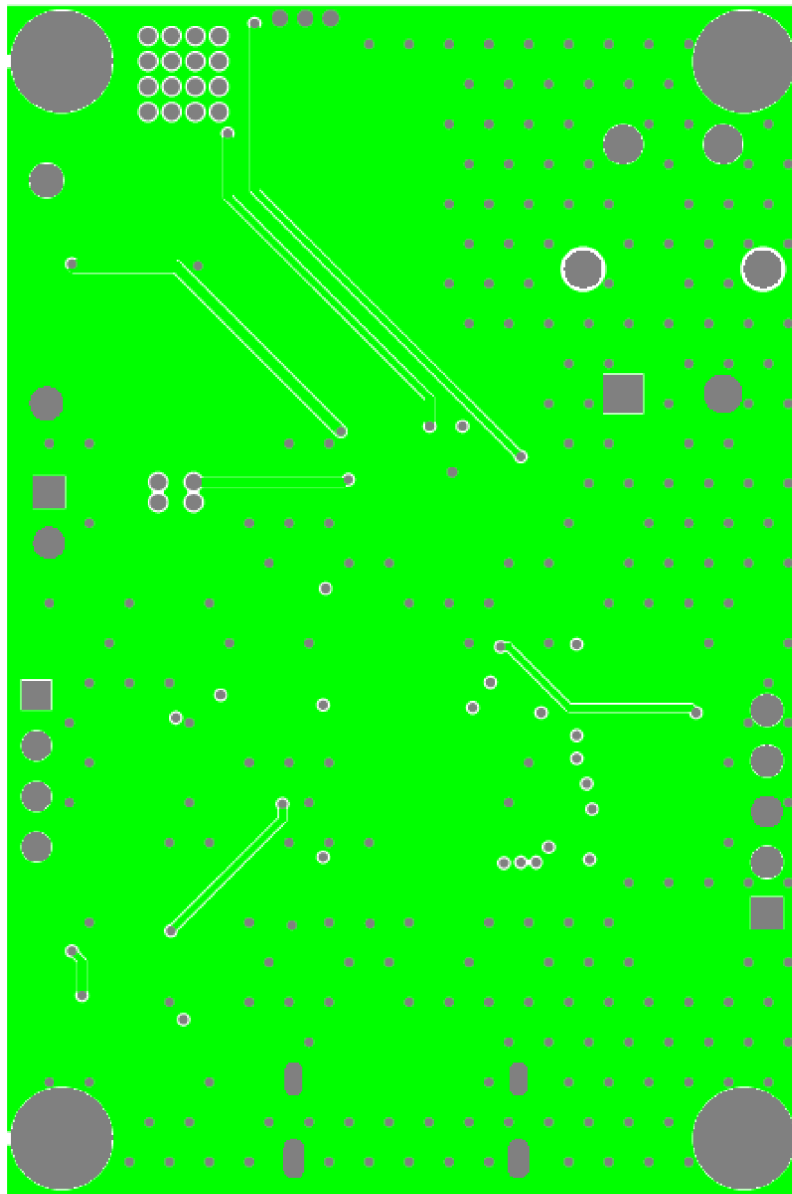
Obrázek A 1: Všechny vrstvy DPS



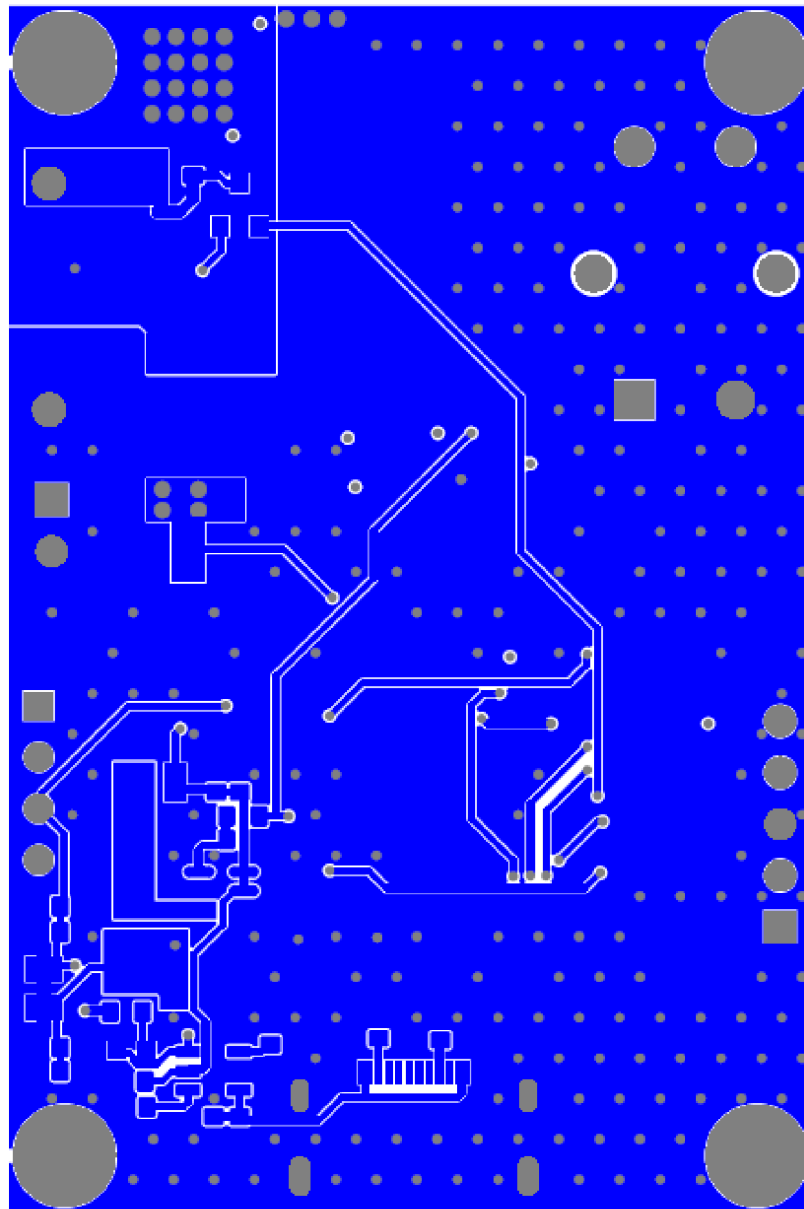
Obrázek A 2: Vrchní vrstva



Obrázek A 3: Vnitřní vrstva GND

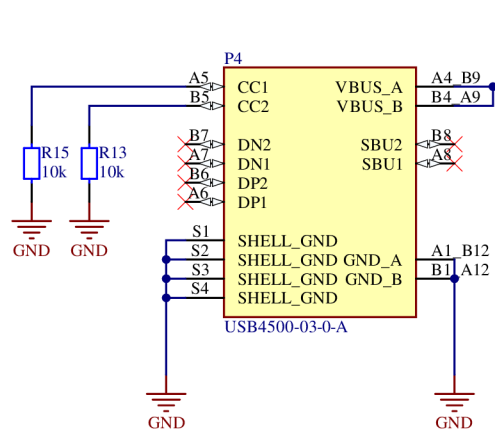


Obrázek A 4: Vnitřní vrstva signálová

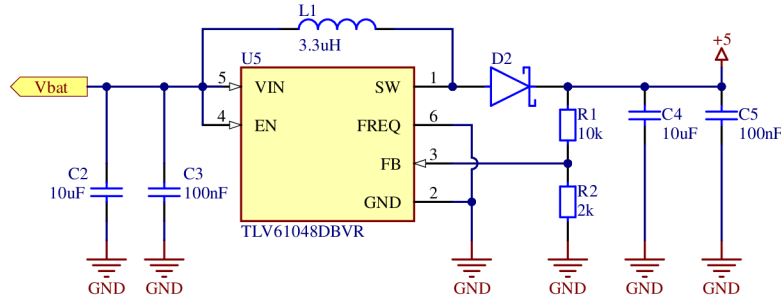


Obrázek A 5: Spodní vrstva

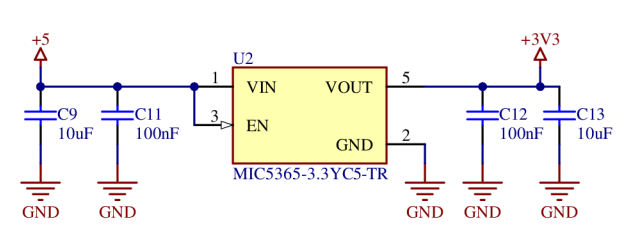
USB konektor



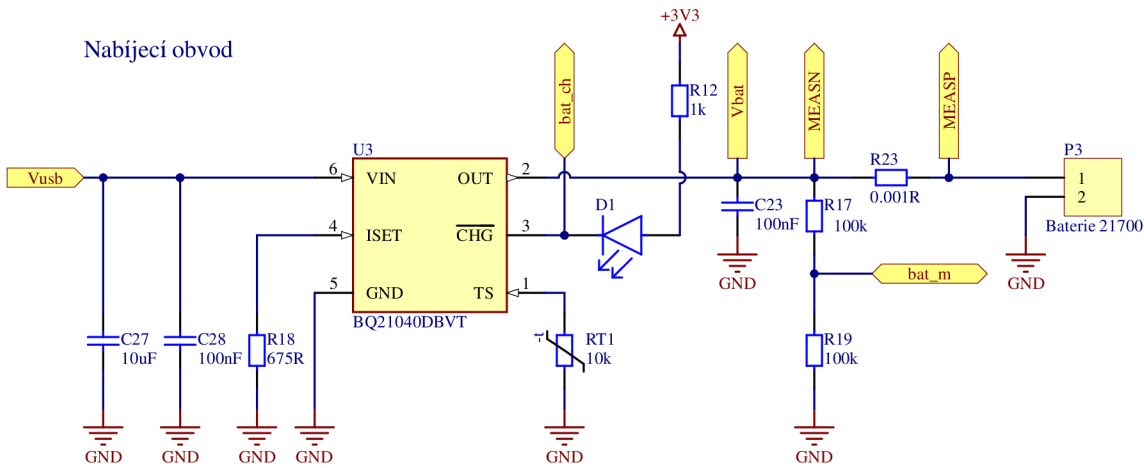
Napětí z baterie na 5V



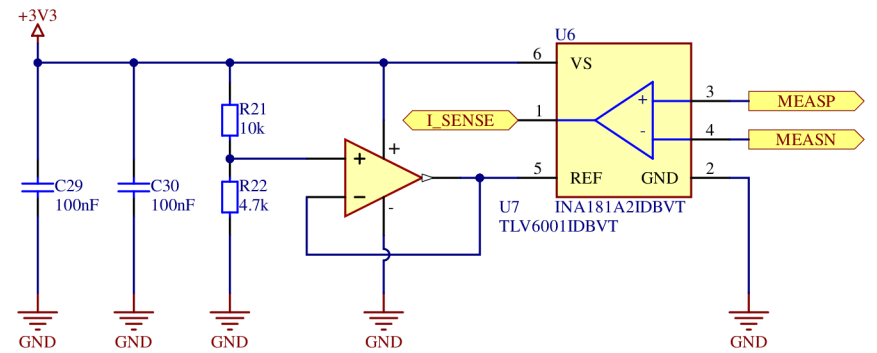
Napětí z baterie na 3V3



Nabíjecí obvod



Měření proudu

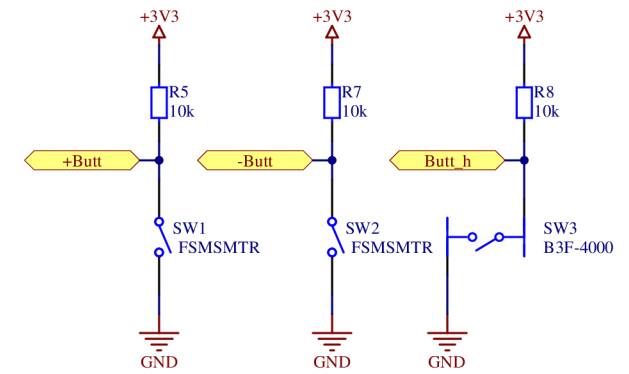
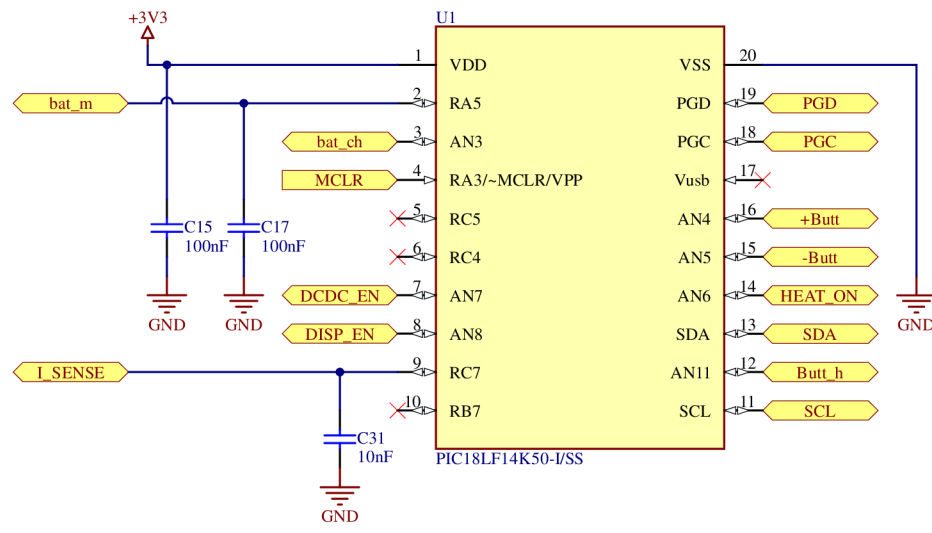


Montážní díry

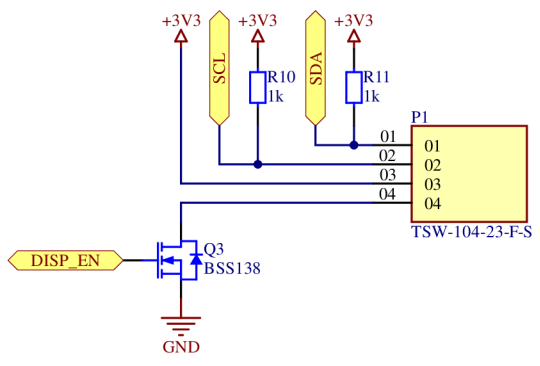


Title		
Napájení		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	6.01.2023	Sheet of 1/3
File:	D:\bc\...\Napajeni.SchDoc	Drawn By: Lukáš Brim

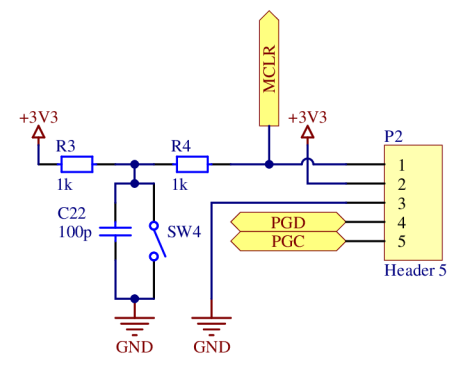
Mikrokontroler



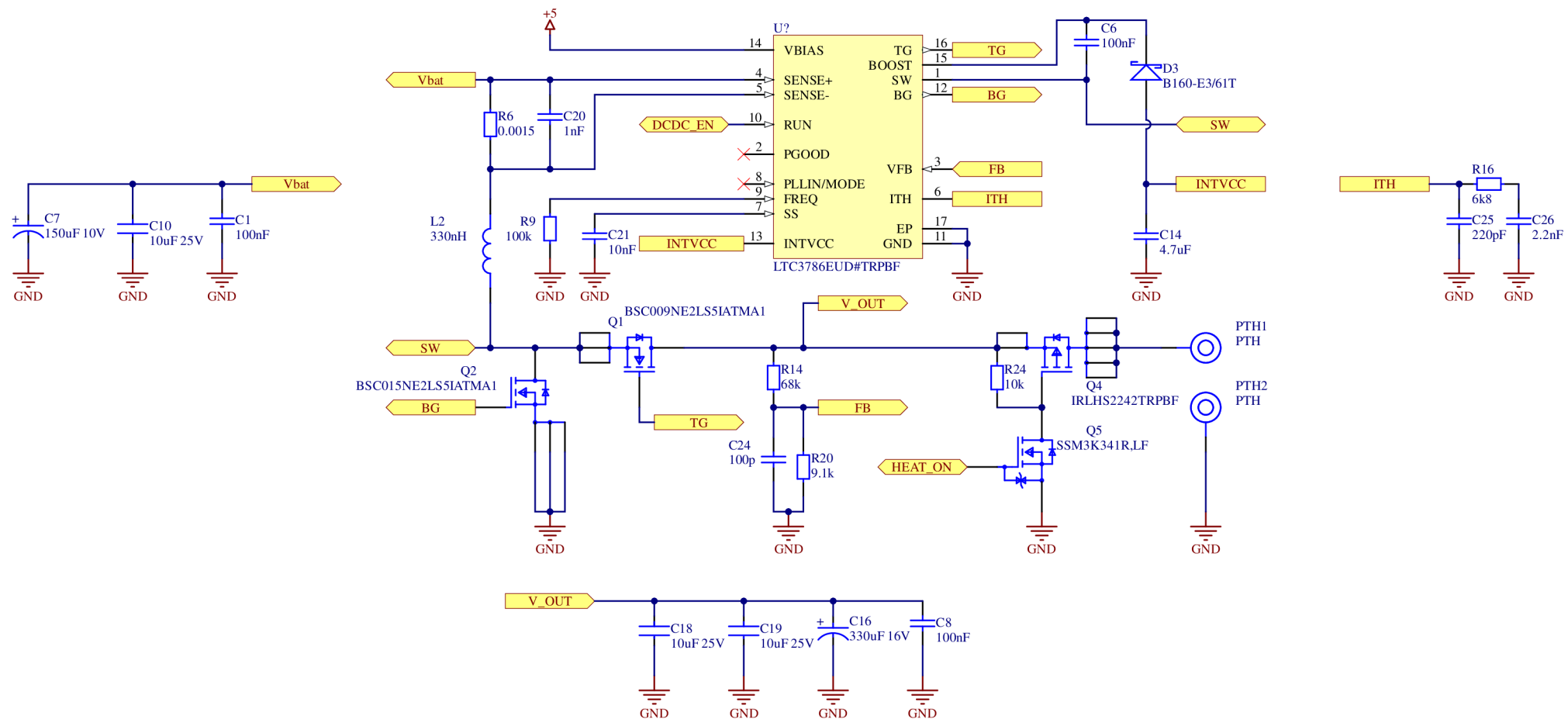
OLED Displej



Pinout k programátoru



Title		
Řídicí elektronika		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	6.01.2023	Sheet of 2/3
File:	D:\bc\..Řidici_elektronika.SchDoc	Drawn By: Lukáš Brim



Title		
System žhavení		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	6.01.2023	Sheet of 3/3
File:	D:\bc\...\System_zhaveni.SchDoc	Drawn By: Lukáš Brim