

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Inteligentní brána pro IoT

Vojtěch Vosáhlo

Vedoucí: Ing. Vít Záhlava, CSc.
Obor: Elektronika a komunikace
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vosáhlo** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **498828**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Inteligentní brána pro IoT

Název bakalářské práce anglicky:

Intelligent gateway for IoT

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou IoT a jejich vzájemnou komunikací, primárně pak s protokoly Zigbee, Matter a technologií Bluetooth Low Energy. Proveďte rešerši dostupných zařízení.
- 2) Navrhněte vlastní řešení. Jako řídicí IC použijte procesor umožňující komunikaci pomocí nejmodernějších protokolů (Zigbee, Matter konkurenčně s BLE), například od firem STM či Nordic Semiconductor.
- 3) Navrhněte desku plošného spoje.
- 4) Otestujte funkčnost zařízení.
- 5) Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- 1) JOHNSON, Howard a Martin GRAHAM. High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic. Pearson, 1993. ISBN 978-0133957242.
- 2) ANDERSEN, Audun. Application Note AN043: Small Size 2.4 GHz PCB antenna [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/swra117d/swra117d.pdf>
- 3) Zigbee Specification R22 (v 1.0) [online]. Zigbee Alliance. Dostupné z: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2022/01/docs-05-3474-22-0csg-zigbee-specification-1.pdf>
- 4) Matter Specification Version 1.0 [online]. Connectivity Standards Alliance. Dostupné z: https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2022/11/22-27349-001_Matter-1.0-Core-Specification.pdf

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vít Záhlava, CSc. katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Vít Záhlava, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji panu Ing. Vítu Záhlavovi, CSc. za jeho expertízu a pomoc při návrhu zařízení popsaného v této práci.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 25. května 2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem brány umožňující překlad mezi IoT a IP sítí. Nastihuje základní myšlenku Internetu Věcí a popisuje jeho prvky a používané komunikační standardy. Dále se zaměřuje na návrh vlastního zařízení od konceptu, přes schematický návrh po návrh desky plošných spojů a její osazení a otestování.

Klíčová slova: DPS, Internet Věcí, brána, BLE, Zigbee

Vedoucí: Ing. Vít Záhlava, CSc.

Abstract

This work is mainly concerned with the design of a custom gateway enabling translation between IoT and IP network. It outlines the idea of Internet of Things and describes its components and used communication standards. Further it focuses on the design of the custom device from the concept through schematic design to the design of the printed circuit board and its assembly and testing.

Keywords: PCB, Internet of Things, gateway, BLE, Zigbee

Title translation: Intelligent gateway for IoT

Obsah

1 Úvod	1	5.4.3 Stínění prokovy	34
2 Internet of Things	3	5.4.4 Anténa	35
2.1 Definice pojmu	3	5.5 Finální DPS	36
2.2 Prvky IoT sítě	3	6 Mechanická zástavba	39
2.2.1 Řídící server	4	7 Ověření funkčnosti zařízení	41
2.2.2 Brána	4	7.1 Přizpůsobení a ladění antény	41
2.2.3 Opačovač	4	7.2 Nahrání software	43
2.2.4 Koncové zařízení	4	7.2.1 Zephyr RTOS	43
2.3 Používané topologie	5	7.2.2 Driver pro W5100	44
2.3.1 Topologie hvězda	5	7.3 Ověření dosahu	44
2.3.2 Topologie mesh	6	8 Závěr	47
2.4 Komunikační protokoly v IoT	6	A Bibliografie	49
2.4.1 Bluetooth Low Energy	7	B Seznam použitých zkratk	53
2.4.2 Zigbee	8	C Schéma zařízení	55
2.4.3 Thread	9		
2.4.4 Matter	9		
3 IoT brána	11		
3.1 Požadavky na řešení	11		
3.2 Mé řešení	12		
3.3 Porovnání s existujícími řešeními	12		
4 Schematický návrh řešení	15		
4.1 Výběr řídicího mikrokontroléru	15		
4.1.1 Mikrokontroléry Nordic Semiconductor	15		
4.1.2 Mikrokontroléry STMicroelectronics	16		
4.1.3 Mikrokontroléry Espressif Systems	16		
4.2 Mikrokontrolér nRF5340	16		
4.3 Radiový FEM	19		
4.4 Power over Ethernet	19		
4.4.1 Spínaný zdroj PoE	20		
4.5 Ethernetové rozhraní	21		
4.6 Napájení a USB	22		
5 Realizace desky plošných spojů	25		
5.1 Skladba desky plošných spojů	25		
5.2 Řídící procesor	27		
5.3 Rychlé datové sběrnice	28		
5.3.1 Diferenciální přenos	29		
5.3.2 Diferenciální pár	29		
5.3.3 USB	30		
5.3.4 Ethernet	31		
5.4 RF sekce na DPS	32		
5.4.1 Páskové vedení	32		
5.4.2 Ohyby vedení	33		

Obrázky

2.1 Typické uspořádání IoT sítě. Převzato z [2].	3	5.18 Vrstvy IN3 (napájecí) a IN4 (zemnicí).	37
2.2 Topologie hvězda. Převzato z [3].	6	6.1 Navržená krabička pro DPS.	39
2.3 Topologie mesh. Převzato z [4].	6	6.2 Rendery navržené krabičky.	39
2.4 Rozložení kanálů BLE v 2,4 GHz pásmu. Převzato z [6].	7	7.1 Závislost činitele stojatého vlnění a útlumu odrazu antény na frekvenci před přizpůsobením a laděním.	41
2.5 Porovnání rozložení kanálů BLE a Zigbee v 2,4 GHz pásmu. Převzato z [8].	8	7.2 Smithův diagram antény před přizpůsobením a laděním. Změřená rezonanční frekvence antény 1,7 GHz je vyznačena červeným bodem.	42
4.1 Dostupná pouzdra mikrokontroléru. Převzato z [15].	17	7.3 Závislost činitele stojatého vlnění a útlumu odrazu antény na frekvenci po přizpůsobení a naladění.	42
4.2 Řídící procesor nRF5340.	18	7.4 Smithův diagram antény po přizpůsobení a naladění. Změřená rezonanční frekvence antény 2,45 GHz je vyznačena červeným bodem.	43
4.3 Flash paměť MX25R3235F.	18		
4.4 Front-end modul nRF21540.	19		
4.5 Si3402 PoE čip.	20		
4.6 Konektor RJ45 spolu s ESD ochranami.	21		
4.7 W5100S ethernetové rozhraní.	22		
4.8 Napájení a regulace.	22		
5.1 Stackup JLC06161H-3313A. Převzato z [23].	26		
5.2 Pouzdro aQFN. Převzato z [15].	27		
5.3 Rozmístění součástek a routing v okolí mikrokontroléru.	28		
5.4 Signály při diferenciálním přenosu. Převzato z [26].	29		
5.5 Výpočet parametrů diferenciálního páru USB.	30		
5.6 Diferenciální pár USB.	30		
5.7 Výpočet parametrů diferenciálního páru Ethernetu.	31		
5.8 Diferenciální páry Ethernetu.	32		
5.9 Koplanární vedení s uzeměnou plochou. Převzato z [29].	33		
5.10 Impedance koplanárního vedení s uzeměnou plochou.	33		
5.11 Ohyby ve vlnovodu.	34		
5.12 Stínění vlnovodu prokovy.	35		
5.13 Anténa SWRA117D. Převzato z [33].	35		
5.14 Render desky plošných spojů.	36		
5.15 Osazená DPS.	36		
5.16 Vnější vrstvy.	37		
5.17 Vnitřní vrstvy IN1 (zemnicí) a IN2 (signálová).	37		

Tabulky

3.1 Porovnání zařízení dostupných na trhu s mým řešením.	13
5.1 Organizace vrstev DPS.	26
7.1 Porovnání dosahu BLE USB adaptéru, mobilního telefonu a mého zařízení.	45



Kapitola 1

Úvod

Zařízení Internetu Věcí se v posledních letech stala nedílnou součástí každodenního života. Technologický vývoj v této oblasti napomohl snížení nákladů na integraci IoT prvků do další elektroniky, což mělo za následek rozšíření jak v průmyslu, tak v domácnostech. Každé koncové zařízení je schopno pracovat jako solitérní prvek a pouze poskytovat informace či služby uživateli. Lidská interakce je ale velice neefektivní a síla IoT sítě tkví primárně ve vzájemném propojení zařízení a provádění akcí na základě nasbíraných dat. V každé IoT síti se tedy téměř vždy vyskytuje centrální prvek, který komunikuje se všemi zařízeními na síti a na základě sesbíraných dat a uživatelského programu provádí požadované akce automaticky. Pro připojení rozhodovacího prvku do sítě je ale nutné zajistit podporu protokolů využívaných v IoT. K tomuto účelu se využívá tzn. gateway, neboli brána typicky převádějící pakety ze sítě IoT do lokální IP sítě.

Cílem této práce je na základě průzkumu trhu definovat požadavky na ideální IoT bránu. Dle zjištěných požadavků poté navrhnout koncept vlastní IoT brány, zařízení realizovat, konkrétně navrhnout schéma a desku plošných spojů, a otestovat jeho funkčnost.

Kapitola 2

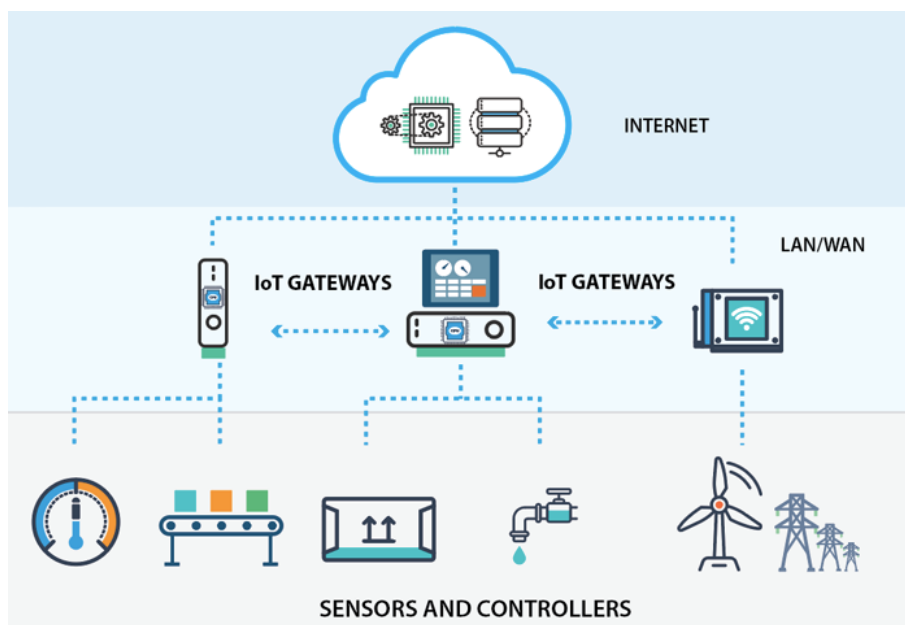
Internet of Things

2.1 Definice pojmu

Internet of Things je koncept, popisující síť vzájemně propojených zařízení. Tato zařízení, vybavená senzory, aktuátory a případně rozhodovací logikou, si v síti IoT vzájemně předávají data, nebo je přeposílají, například do IP sítě či cloudu. Data jsou poté zpracována, vyhodnocována a na jejich základě prováděny požadované akce. [1]

2.2 Prvky IoT sítě

Téměř každá IoT síť je tvořena uspořádáním několika základních prvků, které dohromady zajišťují její správnou funkci. V této kapitole popisují vybrané důležité prvky sítě a jejich význam.



Obrázek 2.1: Typické uspořádání IoT sítě. Převzato z [2].

■ 2.2.1 Řídící server

Řídící server je nezbytnou součástí Internetu Věcí. Prvky v síti slouží buď jako senzory, nebo jako aktuátory interagující s okolním světem. Jedny tedy data sbírají a druhé data očekávají. Aby bylo na základě nasbíraných dat možné provádět další akce, nachází se v síti řídicí server. Na řídicím serveru běží obslužná aplikace, která vyhodnocuje vstupy a na jejich základě provádí uživatelsky definované akce. V případě domácích IoT sítí je jako obslužná aplikace v široké míře využíván software Home Assistant.

Home Assistant je open source software pro domácí automatizaci snažící se zjednodušit uživateli veškerou interakci s jeho chytrou domácností. Software integruje základní podporu důležitých funkcionalit jako je záznam dat do databáze, vyhodnocování dat a provádění akcí na jejich základě. Také umožňuje velmi jednoduše vytvořit ovládací rozhraní uzpůsobené specifickým potřebám uživatele. Pro připojení různých ekosystémů a zařízení jsou dostupné obslužné balíčky, software tak lze propojit s téměř libovolným zařízením na trhu díky balíčkům od výrobců i komunity. V případě potřeby však Home Assistant umožňuje mnohem komplexnější ovládání pomocí jazyka YAML a integraci vlastních funkcí a balíčků. Lze jej tedy upravit pro libovolné aplikace. Distribuovaný je pro mnoho platforem a je k němu dostupná i aplikace pro mobilní zařízení.

■ 2.2.2 Brána

Brána nebo také koordinátor či hub je centrálním prvkem celé sítě, starajícím se mimo jiné o její správnou funkčnost. Primárně se však stará o její připojení k řídicímu serveru, překládá tedy adresaci a data ze sítě IoT do jiné, typicky privátní IP sítě a přeposílá je na server. Vcelku běžné také bývá opatření brány dostatečným výpočetním výkonem tak, aby byla schopna sama zastupovat řídicí server či data zabezpečit a přeposílat je na servery v cloudu. Dle implementovaných komunikačních standardů může být bran v síti i více, což přidává redundantní spoj a zvyšuje tak odolnost sítě. Starší komunikační standardy však nemusí tuto funkcionalitu podporovat.

■ 2.2.3 Opakovač

Opakovač je prvkem umožňujícím zvýšit dosah celé IoT sítě. Typicky se jedná o zařízení, které samo zajišťuje funkcionalitu koncového zařízení (například chytrá zásuvka), zároveň však slouží také jako opakovač paketů od okolních zařízení. Jelikož musí být opakovač stále aktivní a připravený přeposílat pakety a tedy stále spotřebovává nemalé množství elektrické energie, není pro tuto aplikaci vhodné využít zařízení napájené z baterií.

■ 2.2.4 Koncové zařízení

Koncové zařízení je v síti zdrojem či cílem přenosu dat. Jedná se tedy o senzor, aktuátor, či jejich kombinaci. V případě senzoru je koncové zařízení

typicky optimalizované pro velice nízkou spotřebu a je napájeno z baterií, je tak snadno miniaturizovatelné a lze jej libovolně přemísťovat i do míst bez přístupu k jiným napájecím zdrojům. Jelikož senzor ve většině případů pouze periodicky odečítá měřený element a neočekává žádná příchozí data, může také zbytek volného času fungovat v režimu velmi nízkého odběru a komunikovat pouze, když potřebuje odeslat nová data. Proto lze u takových zařízení dosáhnout i s malou kapacitou baterie až několikaletého provozu. Aktuátory či kombinovaná koncová zařízení využívají mnohem častěji napájení z jiných zdrojů, protože musí být k síti připojena stále a připravena reagovat na příchozí informace.

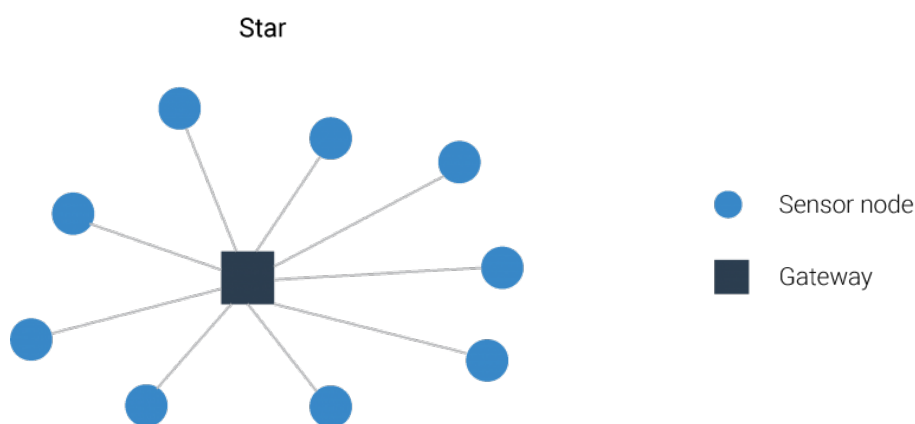
■ 2.3 Používané topologie

Jednotlivé prvky sítí jsou při tvorbě sítě specificky propojeny do takzvané topologie. V sítích IoT se lze nejčastěji setkat s topologiemi dvojího typu: topologií hvězda a topologií mesh.

■ 2.3.1 Topologie hvězda

Topologie hvězda, schematicky znázorněná na obrázku 2.2, je velmi obvyklou topologií. Nachází se v ní jeden centrální prvek, kterým je brána. Všechna ostatní zařízení v síti pak navazují spojení bod-bod s centrálním prvkem a sama nijak neinteragují. Výhodou této topologie je velice jednoduchá implementace, jelikož se jedná o separátní bod-bod spoje. Také není nutné implementovat směrování paketů v síti. Velkou nevýhodou je však absence redundance. Pokud není možné spojení mezi koncovým zařízením a centrálním prvkem navázat, nelze data přenést, například přes dostupné sousední zařízení.

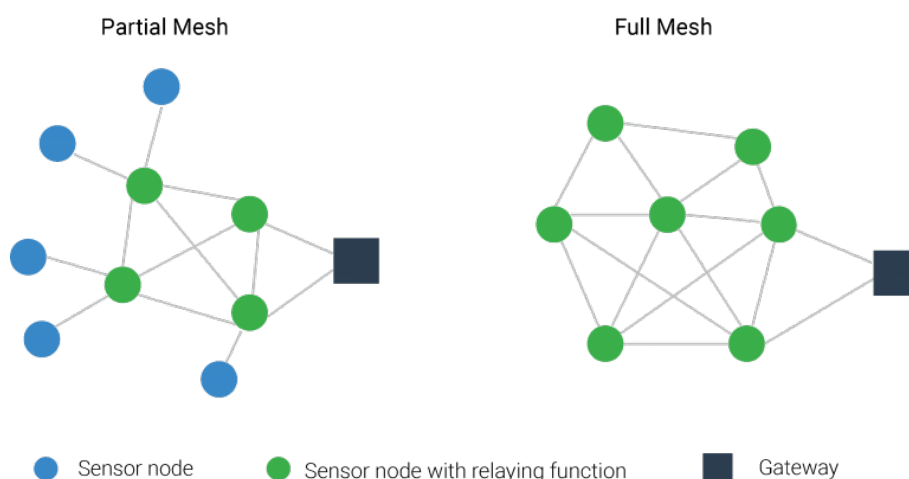
Speciálním případem topologie hvězda je topologie strom, při které se vrství topologie hvězda do stromové struktury. K tomu dochází hlavně u sítí implementujících směrovače. Na směrovač je v tomto případě typicky připojeno několik zařízení, celá tato podsít je však ještě přes směrovač připojena k centrálnímu prvku.



Obrázek 2.2: Topologie hvězda. Převzato z [3].

2.3.2 Topologie mesh

Topologie mesh, znázorněná na obrázku 2.3, je více obvyklá u modernějších sítí, které ji implementují ve svých komunikačních standardech. Centrální prvek v tomto případě stále existuje, jeho propojení s dalšími zařízeními v síti už však není realizováno pouze jedním spojem. Všechna zařízení v síti mohou být propojena navzájem. Výhodou je přidaná redundance ve formě alternativních cest k cílovému prvku. Nevýhodou je však přidaná komplexnost. Síť musí implementovat směrování paketů, obdobně jako IP síť. Také musí být schopna optimalizovat cestu packetu. Síť s topologií mesh tedy typicky používají směrovací protokoly srovnatelné s těmi v sítích IP.



Obrázek 2.3: Topologie mesh. Převzato z [4].

2.4 Komunikační protokoly v IoT

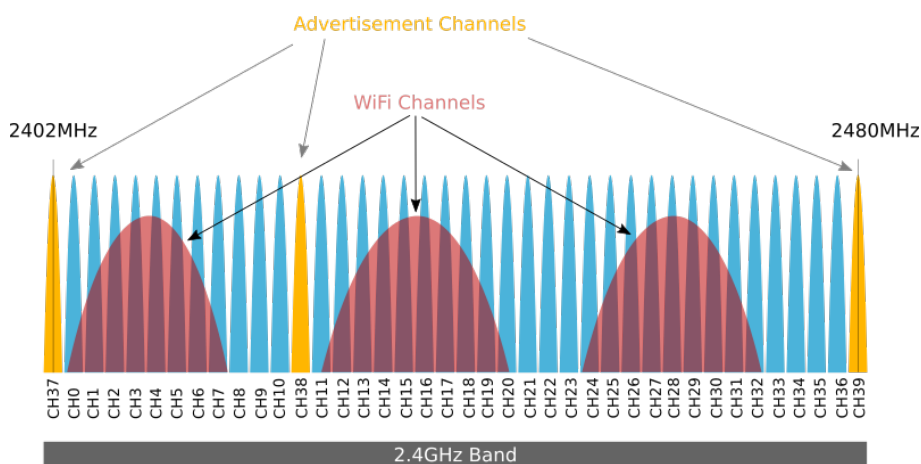
Zařízení v síti Internet of Things nejsou nutně vázány k využívání jednoho komunikačního protokolu. Typicky se tak v jedné síti můžeme setkat s hned

několika standardy komunikace, které nejsou vzájemně kompatibilní. Důvod pro tuto různorodost je jednoduchý: výběr komunikačního standardu je silně závislý na účelu, kterému zařízení slouží. Pro zařízení napájené z baterie a odesílající pouze malé množství dat je zapotřebí použít standard optimalizovaný pro malou spotřebu elektrické energie. Pro zařízení s přístupem k síťovému napájení, které odesílá velké množství dat, je naopak vhodné využít standard umožňující vysoké přenosové kapacity jako například WiFi. V této kapitole představím nejrozšířenější standardy využívané pro komunikaci v domácích IoT sítích.

2.4.1 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy je dle [5] standard vyvinutý organizací Bluetooth Special Interest Group jako alternativa k Bluetooth Classic. Je optimalizovaný pro nižší spotřebu a díky této optimalizaci si získal oblibu v mnoha baterií napájených aplikacích, nejvíce pak v nositelné elektronice a senzorech. Oproti Bluetooth Classic také přináší další topologie sítě doplňující existující bod-bod, jmenovitě mesh a broadcast.

I když samotný standard BLE popisuje širokou škálu pokročilých funkcí, jako například pozicovací služby, v domácích IoT sítích je primárně používán v topologii broadcast pro přenos malých dat pomocí advertisingu. Advertising je simplexní přenos dat bez navázání spojení mezi zařízeními. Vysílající zařízení využívá broadcast topologie, která umožňuje rozesílání packetů na všechna zařízení v síti bez ohledu na jejich adresu. Pakety rozesílá ve vyhrazených advertising kanálech, kde je mohou další libovolná zařízení přijmout. Komunikace BLE probíhá ve 40 kanálech v ISM pásmu 2,4 GHz - 2,5 GHz. Na advertising jsou vyhrazeny tři kanály, zbylé kanály jsou datové a mohou být použity jako sekundární pro advertising. Využití kanálů je naznačeno na obrázku 2.4. Pro kódování komunikace je využito GFSK. [5]

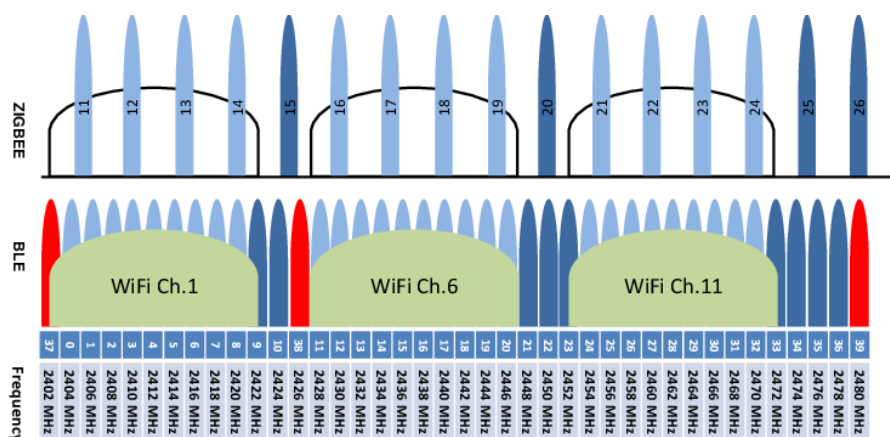


Obrázek 2.4: Rozložení kanálů BLE v 2,4 GHz pásmu. Převzato z [6].

2.4.2 Zigbee

Zigbee je komunikační standard vyvinutý The Zigbee Alliance (nyní Connectivity Standards Alliance) specificky pro miniaturní zařízení s nízkou spotřebou přenášející malá data. Díky cílení na nízkou spotřebu je Zigbee široce adoptované zařízeními pro chytrou domácnost, primárně pak jednoduchými, bateriemi napájenými senzory. Využíváno je ale i v zařízeních s přístupem k síťovému napájení (chytré zásuvky, žárovky). Zigbee specifikace [7] popisuje tři topologie sítě - hvězdu, strom a mesh - a tři primární typy zařízení - koncové, router (či opakovač) a coordinator (koordinátor). Koncové zařízení je prvek vysílající či přijímající datový packet, router umožňuje datový packet přesměrovat a prodloužit tak dosah koncových zařízení a coordinator spravuje síť a nastavuje její důležité parametry. V topologii hvězdy tak komunikují pouze koncová zařízení s koordinátorem, ve stromové topologii jsou přidány routery, které směřují pakety ke koordinátoru. V mesh topologii mohou všechna zařízení komunikovat vzájemně, routery pak v této topologii zastávají obdobnou roli jako v IP sítích: směřují pakety nejoptimálnější cestou ke koordinátoru nebo jinému cíli.

Na fyzické vrstvě staví Zigbee dle [7] na standardu IEEE 802.15.4, který popisuje bezdrátovou PAN pro zařízení přenášející malé objemy dat. Komunikace může probíhat v nelicencovaném pásmu 868 MHz¹ na jednom kanálu a v pásmu 2,4 GHz - 2,5 GHz na 16 kanálech. Porovnání rozložení kanálů BLE a Zigbee je nastíněné na obrázku 2.5. V pásmu 868 MHz je použito kódování BPSK a přenosová rychlost dosahuje 20 kbit/s. V pásmu 2,4 GHz - 2,5 GHz používá Zigbee kódování OQPSK a přenosová rychlost zde dosahuje až 250 kbit/s. Ač je Zigbee možné provozovat ve více pásmech, majoritní je provoz právě v ISM pásmu 2,4 GHz. Tato vlastnost zároveň umožňuje konkurenční provoz Zigbee spolu s WiFi a BLE na jednom integrovaném transceiveru, což velice zefektivňuje jeho integraci.



Obrázek 2.5: Porovnání rozložení kanálů BLE a Zigbee v 2,4 GHz pásmu. Převzato z [8].

¹Toto pásmo je využito pro Evropu, pro Ameriku a Austrálii využívá Zigbee 915 MHz.

■ 2.4.3 Thread

Thread vyvinulo uskupení Google, Amazon a Apple ve spolupráci s The Zigbee Alliance s cílem vytvořit univerzální otevřený komunikační standard pro zařízení v chytré domácnosti s nízkým odběrem. Thread si klade podobné cíle jako Zigbee, primárně nízkou spotřebu. Jak uvádí [9], je také založen na IEEE 802.15.4 a komunikace v síti probíhá v topologii mesh. Přináší ale zásadní inovaci: implementuje IPv6 adresování a přidává funkcionalitu pro přístup do cloudu. Toto umožňuje velmi elegantní a jednoduchou integraci zařízení podporujících Thread do LAN či internetu. Thread kromě koncových zařízení a routerů definuje také tzv. *border router*. Jedná se o zařízení, které má na starost přemostění sítě Thread do LAN. V jedné síti může existovat těchto routerů více. To přináší redundantní spojení, které u Zigbee není z důvodu použití pouze jednoho koordinátoru možné.

■ 2.4.4 Matter

Matter vznikl jako snaha o propojení všech běžně využívaných technologií v domácích IoT sítích a tedy vytvoření jednotného komunikačního standardu, který by byl shodný pro všechny výrobce chytrých zařízení a podporoval rozšířené komunikační technologie, viz specifikace [10]. Každé zařízení podporující Matter tedy musí být schopno komunikovat s dalším Matter zařízením, bez ohledu na výrobce. Matter ve svém jádru integruje primárně komunikaci pomocí WiFi, Ethernetu a Threadu. Zároveň ale dovoluje existenci překladačů na jiné standardy tak, aby bylo možné do sítě zapojit i existující zařízení, která Matter nepodporují. Při jeho použití v domácí síti IoT se tak vytrácí nutnost volit pro své výrobky ekosystém jednoho výrobce a je možné, bez nutnosti implementace různých bran pro výrobky různých firem, zapojit do sítě libovolné Matter zařízení.

Kapitola 3

IoT brána

V předchozí kapitole jsem nastínil funkci brány v IoT síti a vysvětlil její význam. Brána, ač v různých formách a pod různými názvy, je používána ve všech zmíněných komunikačních standardech a je tak neodmyslitelným prvkem sítě. Při její volbě je tak nutné dobře dbát na požadované parametry.

3.1 Požadavky na řešení

Prvním důležitým požadavkem na IoT bránu je podpora komunikačních standardů. Mnoho zařízení dostupných na trhu slouží jako jednoúčelové zařízení podporující pouze jeden standard, tedy například překlad ze Zigbee do IP sítě. Toto řešení je ale pro uživatele velice nevýhodné, jelikož jej nutí k využívání více bran a tudíž více ekosystémů různých výrobců. Data z těchto bran je pak nutné centralizovat v řídicím serveru, což může být z důvodu různorodosti systémů zbytečně komplikované. Ideálním řešením je tak jedno zařízení, které umožňuje komunikaci všemi standardy, které uživatel ve své síti požaduje.

Druhým důležitým požadavkem je možnost připojení brány k samotnému centrálnímu serveru. Typicky je bránu možné připojit do lokální IP sítě a komunikace se serverem probíhá pomocí vybraného protokolu, například TCP. Toto připojení je pak možné realizovat dvěma způsoby: bezdrátově přes WiFi nebo po metalickém vedení přes rozhraní Ethernet. Optické spoje nejsou v domácích sítích obvyklé, jelikož objem přenášených dat je ve většině případů velmi malý. Pro uživatele je v tomto ohledu důležitá flexibilita. Nė vždy lze zařízení umístit poblíž metalické přípojky a je tak potřeba použít bezdrátové připojení. Naopak často není bezdrátové připojení dostupné a je tak mnohem výhodnější připojení drátové. V ideálním případě by tedy IoT brána měla podporovat obě možnosti připojení do lokální sítě: jak WiFi, tak Ethernet. Další možností je pak připojení brány k serveru přímo, například přes USB. Brána může přes USB emulovat ethernetové rozhraní a posílat pakety přes něj, nebo sloužit přímo jako rozhraní do dané IoT sítě.

Nelze opomíjet také možnost napájení zařízení. Vzhledem k větší spotřebě se u bran většinou nepočítá s možností bateriového napájení. Typicky jsou tedy brány napájené přes USB či jiný zdroj stejnosměrného napětí. Toto řešení může být ale pro mnoho uživatelů také nevýhodné, jelikož je nutné

Tabulka 3.1: Porovnání zařízení dostupných na trhu s mým řešením.

Název	BLE	Zigbee	WiFi	Ethernet	PoE	Velikost
SONOFF ZBBridge	Ne ¹	Ano	Ano	Ne	Ne	62x62x20 mm
Mikrotik RB924i	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	122x87x26 mm
Tuya AS-TYGWZ	Ano	Ano	Ne	Ano	Ne	90x90x23 mm
Mé řešení	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano	50x50x27 mm

¹ Hardware zařízení technologii podporuje ale není implementovaná ve firmware.

Z tabulky je zřejmé, že mé řešení je z porovnávaných zařízení nejmenších rozměrů a až na WiFi připojení, které jsem explicitně nepožadoval, podporuje všechny důležité komunikační standardy. Krom zmiňovaného Zigbee má hardware podporu také nastupujících protokolů Thread a Matter, kterou opět výše zmíněná zařízení, kromě SONOFF ZBridge, postrádají.

Kapitola 4

Schematický návrh řešení

V následující kapitole se zabývám schematickým návrhem svého řešení. Veškerý návrh zařízení, tedy schematický a návrh desky plošných spojů, jsem provedl v softwaru KiCad [11].

4.1 Výběr řídicího mikrokontroléru

Prvním důležitým krokem při schematickém návrhu mého řešení byl výběr řídicího mikrokontroléru. Díky velkému rozmachu IoT lze na trhu nalézt mnoho jednočipových mikrokontrolérů, označovaných SoC (System on Chip) s integrovaným RF transceiverem podporujícím jak Bluetooth Low Energy tak Zigbee a další standardy. Nejvýznamějšími výrobci na trhu jsou v tomto ohledu jistě firmy Nordic Semiconductor, STMicroelectronics a Espressif Systems. Nelze však opomíjet i méně známé výrobce, jako například Telink Semiconductor, jejichž mikrokontroléry lze nalézt v IoT produktech firem Ikea a Xiaomi.

4.1.1 Mikrokontroléry Nordic Semiconductor

Výrobce Nordic Semiconductor je pro mou aplikaci zajímavý primárně svou sérií mikrokontrolérů nRF52 a nRF53. Dle dostupné dokumentace [12] se jedná o řadu velice výkonných SoC s jádrem ARM Cortex. Čipy mají výbornou podporu komunikačních standardů, jmenovitě Bluetooth 5.3, Bluetooth mesh, Bluetooth Direction Finding, Zigbee, Thread a Matter. Jsou také vybaveny dostatkem obslužných periférií, jako například rozhraní USB či NFC. Výhodou je také ekosystém periferních integrovaných obvodů, které firma nabízí a jejich SDK integruje potřebné ovladače. Řadí se mezi ně například front-end modul nRF21540, čipy pro správu napájení jako nPM1100 nebo nově uvedené WiFi rozhraní nRF7002. V neposlední řadě je firma známá propracovaností svých čipů a dokumentace k nim. Pro všechna SoC je firmou dodáván SDK s podporou veškerých technologií a implementovaným stackem pro bezdrátovou komunikaci. Mikrokontroléry mají také velice dobrou podporu v RTOS systému Zephyr.

■ 4.1.2 Mikrokontroléry STMicroelectronics

STMicroelectronics mne zaujal svou řadou STM32WB, viz [13]. Jedná se o řadu mikrokontrolérů využívajících jádra Cortex-M4 jako hlavního výpočetního a Cortex-M0+ jako síťového. S řadami nRF52 a nRF53 sdílí výbornou podporu komunikačních standardů, bohužel však v SDK není zmíněna podpora Bluetooth Direction Finding. Vybavenost perifériemi je opět excelentní, chybí ale přímá podpora NFC. Práci při programování opět usnadňuje dodaný SDK a podpora Zephyr.

■ 4.1.3 Mikrokontroléry Espressif Systems

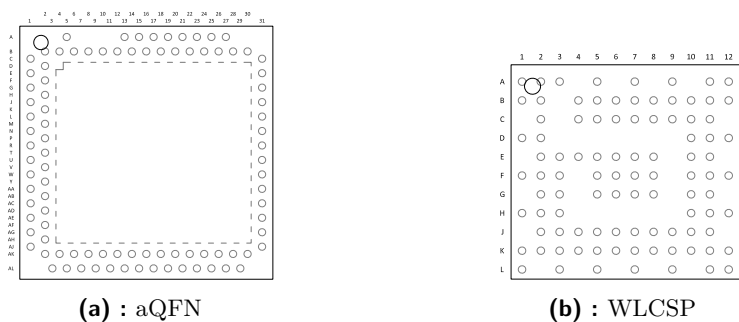
Firma Espressif Systems se proslavila především svou sérií SoC ESP8266 a ESP32, jejichž cena a výborná vybavenost pomohla jejich rychlému rozšíření. Většina SoC, které firma dodává, se však zaměřuje na WiFi a případně Bluetooth připojení. Pro mou aplikaci by tak bylo možné použít pouze sérii ESP32-C6, která, dle [14], jako jediná podporuje požadované standardy. Tato série využívá dvou jader architektury RISC-V a podporuje konektivitu přes Bluetooth 5, Zigbee a Thread, stejně jako výše zmíněné SoC. Navíc ale poskytuje také připojení pomocí WiFi 6, které u předchozích SoC chybí. Opět však není v SDK dostupná podpora Direction Finding a SoC nemá NFC periférii. Na podpoře Zephyr se aktivně pracuje, není však ani zdaleka dokončena. V neposlední řadě je mikrokontrolér prakticky nedostupný, jelikož byl teprve začátkem roku 2023 uveden na trh.

■ 4.2 Mikrokontrolér nRF5340

Pro svou aplikaci jsem se po zvážení alternativ rozhodl využít mikrokontrolér nRF5340 firmy Nordic Semiconductor. Hlavními důvody pro toto rozhodnutí byla podpora NFC, které bych rád využil a Bluetooth Direction Finding, které bych později rád implementoval, aby měla brána možnost lokalizovat zařízení v budovách.

Jak je zmíněno v dokumentaci [15], mikrokontrolér nRF5340 je dvoujádrový System on Chip implementující dvě jádra ARM Cortex-M33. První jádro je jádrem aplikačním a je určeno pro běh uživatelské aplikace. Maximální frekvence hodin jádra je 128 MHz a má dostupný 1 MB flash paměti a 512 kB RAM paměti. Druhé, síťové jádro, je určeno pro běh příslušných komunikačních stacků. Toto jádro má maximální pracovní frekvenci 64 MHz a je mu přiřazeno 256 kB paměti flash a 64 kB paměti RAM. Mikrokontrolér podporuje nejnovější komunikační standardy Bluetooth se všemi dílčími částmi (Direction Finding a Mesh), Zigbee, Thread, Matter a ANT, což je proprietární technologie určená primárně pro fitness náramky a obdobná zařízení. Citlivost přijímače pro BLE je až -104 dBm a pro ostatní standardy až -101 dBm. Výkon vysílací části je konfigurovatelný od -40 dBm do 3 dBm. Mezi periférie dostupné na čipu patří SPI s maximální rychlostí 32 MHz, I2C, UART, I2S, ADC, USB full speed a NFC. Téměř každá periférie pak

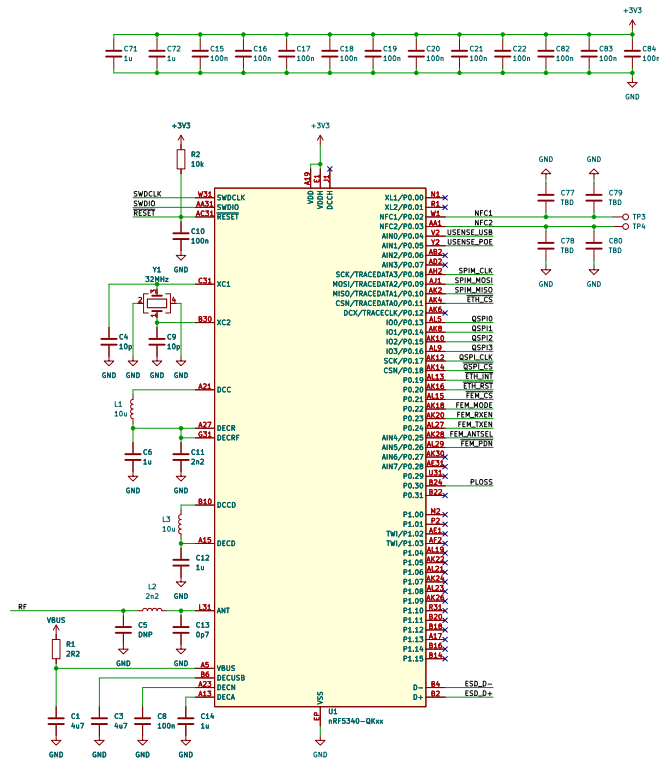
může být pomocí multiplexoru namapována na libovolný pin. Mikrokontrolér také obsahuje mnoho interních periférií určených pro zabezpečení aplikace běžící na čipu. Je dostupný ve dvou pouzdrech: WLCSP, tedy Wafer Level Chip Scale Package, o velikosti přibližně 4,4x4,0 mm s 95 piny nebo aQFN o velikosti 7x7 mm s 94 piny. Z důvodu jednoduššího pájení a routingu jsem se rozhodl pro využití pouzdra aQFN, i toto větší pouzdro s sebou však neslo značné výzvy při návrhu DPS, které zmiňuji v kapitole 5.2.



Obrázek 4.1: Dostupná pouzdra mikrokontroléru. Převzato z [15].

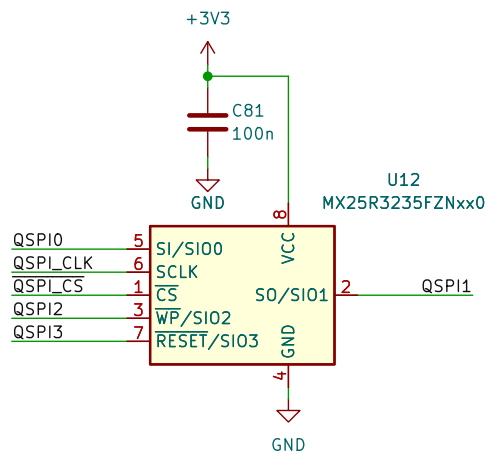
Základní zapojení mikrokontroléru jsem převzal z doporučení v katalogovém listu [15]. Obsahuje především 32 MHz krystal jako zdroj hodinového signálu, pasivní součástky nutné pro chod spínaných regulátorů integrovaných v čipu a blokovací kondenzátory. Na výstupu transceiveru je pak zapojena síť pro přizpůsobení impedance transceiveru na impedanci vedení na DPS, jak je vidět na obrázku 4.2

4. Schematický návrh řešení



Obrázek 4.2: Řídící procesor nRF5340.

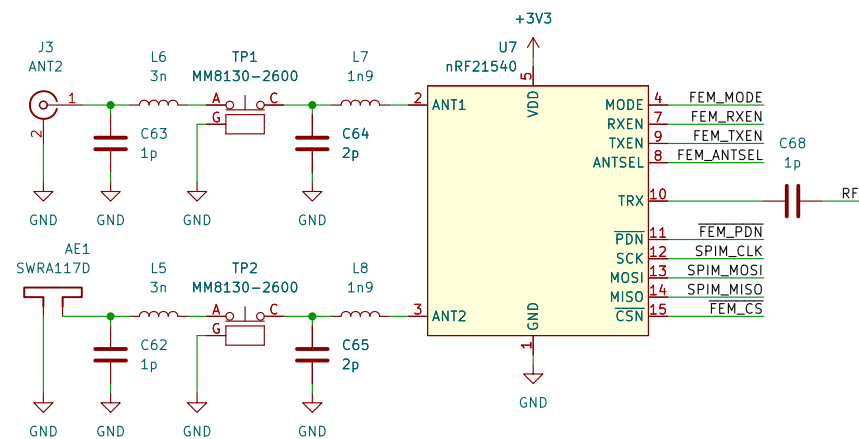
Doplnil jsem jej však o 32 Mbit QSPI flash paměť MX25R3235F určenou pro ukládání dat potřebných pro funkčnost zařízení, jako například konfigurace.



Obrázek 4.3: Flash paměť MX25R3235F.

4.3 Radiový FEM

Výstup transceiveru mikrokontroléru jsem opatřil *front-end modulem* firmy Nordic Semiconductor, konkrétně nRF21540. Tento integrovaný obvod umožňuje zvýšit citlivost přijímače o 13 dB a výkon vysílače až na 22 dBm [16]. Umožňuje také přepínání mezi dvěma anténami, čehož jsem využil pro připojení uFL konektoru pro externí anténu na jeden port a zabudované antény na DPS na port druhý. Integrovaný obvod je možné z hlavního procesoru konfigurovat buď přes kontrolní piny nebo přes sběrnici SPI.



Obrázek 4.4: Front-end modul nRF21540.

Porty jsem také opatřil měřicími body TP1 a TP2. Jedná se o vysokofrekvenční měřicí konektory se spínačem. Při připojení speciální sondy se tak spínačem odpojí anténa od zbytku obvodu a je možné jednoduše změřit a případně upravit její přizpůsobení tak, aby její impedance odpovídala impedanci portu na FEM a nevznikaly odrazy.

4.4 Power over Ethernet

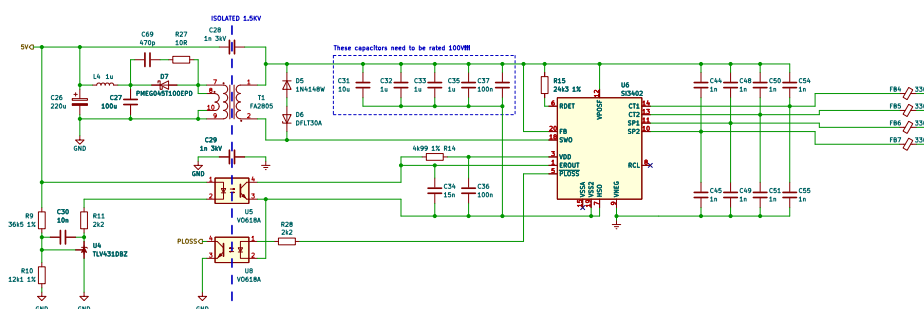
Jak jsem zmínil v požadavcích na zařízení, rozhodl jsem se implementovat také standard PoE. Power over Ethernet je standard vyvinutý IEEE určený pro napájení zařízení přes ethernetový port zároveň s přenosem dat. U síťových zařízení se lze často setkat s implementací tzv. *pasivního PoE*. V tomto případě se na nevyužité páry ethernetového kabelu přivádí na straně zdroje stejnosměrné napětí, na straně zařízení je pak napětí z kabelu odděleno a použito pro napájení zařízení. Tato praktika ale není v souladu se standardem IEEE který PoE popisuje. Využívá se hlavně pro svou jednoduchost, neimplementuje ale žádnou komunikaci mezi zařízeními a při připojení nesprávného napětí může být napájené zařízení zničeno.

Při aktivním PoE popsaném normou IEEE 802.3 probíhá mezi zařízeními nejdříve rozeznání identifikace a vyjednávání výkonových limitů, až poté

následuje samotné napájení. Komunikace a napájení pak může být realizováno po nevyužitých vodičích (tzv. *mód B*) ale i po stejných vodičích, po kterých probíhá datová komunikace se zařízením (tzv. *mód A*). Norma existuje v několika úpravách, jmenovitě 802.3af, 802.3at a 802.3bt. Varianta 802.3af dovoluje maximální příkon uzlu 12,95 W a identifikace zařízení probíhá přes identifikační rezistory. Varianty 802.3at respektive 802.3bt dovolují maximální příkony uzlu 25,5 W respektive 71,3 W a umožňují navíc identifikaci pomocí tzv. *Link Layer Discovery Protocol*. Pro své zařízení jsem zvolil podporu normy 802.3af, jelikož jeho spotřeba bude možnostmi této třídy zcela jistě pokryta a její implementace je vcelku jednoduchá. Dle IEEE 802.3af při proceduře identifikace aplikuje zdrojové zařízení na využívané páry identifikační napětí. Koncové zařízení poté obsahuje identifikační rezistor, který určuje jeho výkonovou třídu. Zdrojové zařízení tak může po přiložení identifikačního napětí na rezistor v koncovém zařízení odečíst, zda podporuje PoE a nastavit své parametry dle jeho výkonové třídy. Po úspěšné komunikaci mezi zařízeními následně začne zdrojový síťový prvek napájet koncové zařízení stejnosměrným napětím v rozmezí 44 V - 57 V. [17]

4.4.1 Spínaný zdroj PoE

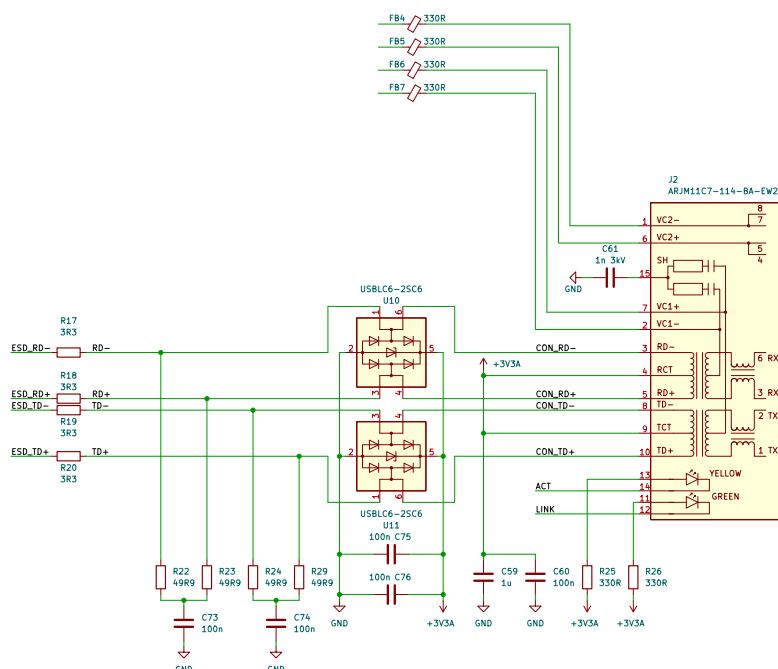
Pro řízení identifikace PoE ve svém zařízení jsem vybral integrovaný obvod Si3402 podporující právě identifikaci dle 802.3af. Obvod zároveň integruje usměrňovač, který umožňuje práci v obou módech PoE a také řízení pro spínaný regulátor [18]. Vstupní PoE napětí lze tedy přímo regulovat na požadované nízké výstupní napětí. Jelikož bude zařízení navíc možno napájet přes USB port, bylo nutné aby byl celý ethernetový port galvanicky oddělen od zbytku zařízení, což požaduje i samotná norma. Využil jsem tedy aplikační schéma pro galvanicky oddělené zapojení spínaného zdroje, dostupné z [19], a doplnil jsem jej o napěťový dělič pro monitorování výstupního napětí regulátoru řídicím mikrokontrolérem a indikátor ztráty napájení.



Obrázek 4.5: Si3402 PoE čip.

Pro co možná největší jednoduchost zapojení a jeho miniaturizaci jsem pro připojení k LAN zvolil konektor RJ45 s integrovaným oddělovacím transformátorem pro datové páry. Konektor má také vývody pro PoE napájení a integrované signalizační LED diody. Doplnil jsem jej pouze o ESD ochrany

USBLC6, které ochrání citlivou elektroniku řídicího rozhraní před elektrostatickými výboji.



Obrázek 4.6: Konektor RJ45 spolu s ESD ochranami.

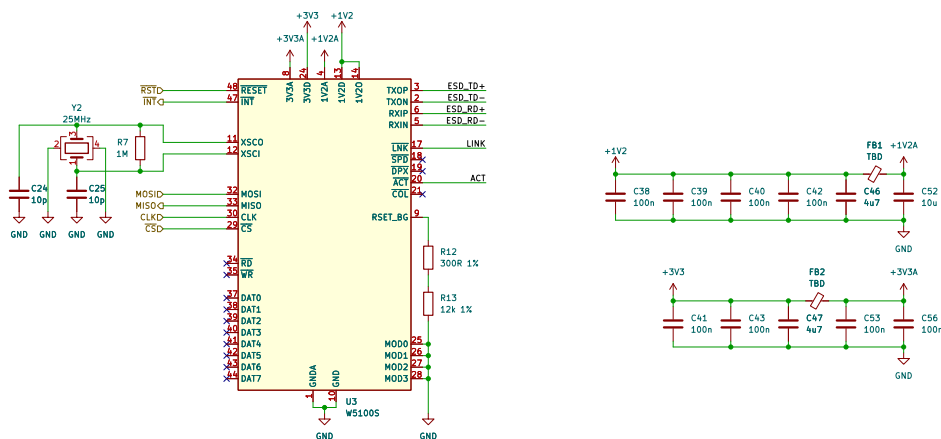
4.5 Ethernetové rozhraní

Jelikož využitý mikrokontrolér neintegruje periférii pro připojení k Ethernetu, byl jsem nucen využít externí ethernetový kontrolér. Pro tento účel jsem se rozhodl použít integrovaný obvod W5100S firmy Wiznet podporující širokou škálu funkcí. Díky malému množství externích součástek je navíc jednoduše implementovatelný.

W5100S integruje obvody pro řízení přístupu k přenosovému médiumu MAC a fyzický transceiver podporující standardy 10Base-T/100Base-TX. Zároveň kontrolér integruje obslužné rutiny k mnoha internetovým protokolům jako IPv4, TCP, UDP, ICMP či ARP a stará se o jejich chod, řídicí procesor tedy není komunikací zatížen. Integrovaný obvod obsahuje čtyři nezávislé komunikační sockety a 16 kB paměti pro přijímaná či odesílaná data. Každému socketu lze pak přiřadit vlastní konfiguraci (IP adresu, používaný protokol...) a řídicím procesorem pouze vyčítat přijatá data, případně data odesílat. V neposlední řadě také kontrolér obsluhuje indikační LED. Komunikace mezi kontrolérem a řídicím mikrokontrolérem může probíhat po paralelní sběrnici nebo sběrnici SPI. Pro svou aplikaci jsem využil sběrnice SPI o rychlosti

4. Schematický návrh řešení

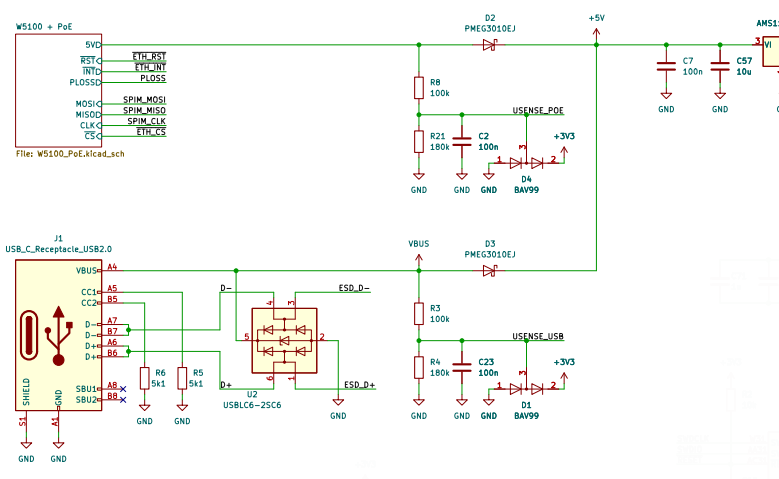
32 MHz, jelikož by má aplikace nebenefitovat z přidané rychlosti při použití paralelního rozhraní [20].



Obrázek 4.7: W5100S ethernetové rozhraní.

4.6 Napájení a USB

Požadavkem na zařízení byla také možnost napájení a komunikace přes USB. K tomuto účelu jsem využil moderního konektoru USB C. Datové linky a napájení je opět ochráněno proti ESD výbojům. O obsluhu USB komunikace se poté stará přímo mikrokontrolér se svou integrovanou periferií. Přidal jsem také napěťový dělič pro monitorování napětí na USB. Napájení z obou zdrojů (PoE a USB) je přes diody smíšeno a následně pomocí lineárního regulátoru regulováno na 3,3 V.



Obrázek 4.8: Napájení a regulace.

Jelikož bude zařízení v klidovém stavu pravděpodobně odebírat proud v řádu desítek miliampér, neimplementoval jsem zdroj spínaný. Použitý obvod

AMS1117, se svým maximálním proudovým zatížením 1 A, viz [21], je pro tuto aplikaci naprosto dostačující. Pokud bych uvažoval maximální možné vstupní napětí $U_{\max} = 5,5 \text{ V}$ a maximální odebíraný proud $I_{\max} = 0,6 \text{ A}$, lze dopočítat výkonovou ztrátu na napěťovém regulátoru dle 4.1.

$$P_{\text{loss}} = (U_{\max} - U_{\text{out}}) \cdot I_{\max} = (5,5 - 3,3) \cdot 0,6 = 1,32 \text{ W} \quad (4.1)$$

Na tuto výkonovou ztrátu je nutné dbát při návrhu plošného spoje a zajistit dostatečné chlazení lineárního regulátoru. Je však nutné dodat, že tato ztráta je maximální odhadovaná a pokud nastane, bude tomu tak pouze špičkově ve velice krátkém intervalu, například při simultánní bezdrátové a ethernetové komunikaci. Odhadovaný průměrný ztrátový výkon bude pravděpodobně dosahovat maximálně 200 mW.

Kapitola 5

Realizace desky plošných spojů

V této kapitole se věnuji problematice návrhu plošného spoje pro mé zařízení.

5.1 Skladba desky plošných spojů

Při počátku návrhu desky plošných spojů je velice důležité vzít v úvahu její skladbu, takzvaný *stackup*. S dnešními výrobními procesy lze dosáhnout velice vysokého počtu vrstev a různých vlastností desky změnou použitých materiálů. S ohledem na počet vrstev je následně nutné dobře zvolit na jakých vrstvách budou rozmístěné zemnicí a napájecí plochy a na kterých signály. V případě, že je návrh desky proveden nesprávně, může negativně ovlivnit funkčnost celého zařízení: zařízení bude vyzařovat rušení do okolí, bude citlivé na příjem rušení z okolí a nebude pracovat efektivně.

Pro svou aplikaci jsem využil desky plošných spojů o šesti vrstvách. Teoreticky by bylo možné provést routing i na čtyřvrstvé DPS, hustota signálů by však byla tak velká, že by nemuselo být možné dodržet optimální rozestupy a nejlepší praktiky. Rozhodl jsem se tedy, i za cenu vyšších výrobních nákladů, využít více vrstev.

Pro rozmístění vrstev jsem využil doporučení z [22] a realizoval pořadí naznačené v tabulce 5.1. Obě vnější vrstvy na desce a vnitřní vrstva IN2 jsou určeny jako signálové, zbylé nevyužité plochy mezi signály jsem vyplnil rozlitou mědí připojenou na GND. Vnitřní vrstvy IN1 a IN4 jsou dedikované pouze pro rozlitou měď připojenou na GND. Ač by se mohlo zdát, že rozlitá měď ve dvou vrstvách je nadbytečná a bylo by možné jednu z vrstev využít jako signálovou, není tomu tak. Tato organizace mi umožní vést diferenciální datové páry bez obav na obou stranách desky plošného spoje se stejnými parametry. Zemnicí vrstva co nejbližší vrstvám signálovým také zajistí cestu pro návratové proudy o co nejmenší impedanci. Poslední vrstva IN3 je dedikovaná jako napájecí a signálová zároveň. Opět je zde výhodou její pozice poblíž vrstvy zemnicí. Z rovnice pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru 5.1,

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (5.1)$$

kde S je plocha desky a d vzdálenost mezi deskami je zřejmé, že s menší vzdáleností mezi deskami kondenzátoru roste jeho kapacita. Napájecí vrstva

poblíž vrstvy zemnicí tedy přirozeně tvoří blokovací kondenzátor, který ještě napomáhá elektrickým vlastnostem celé napájecí sítě.

Tabulka 5.1: Organizace vrstev DPS.

Vrstva	Určení
TOP	Signálová
IN1	Zemnicí
IN2	Signálová
IN3	Napájecí
IN4	Zemnicí
BOT	Signálová

Mimo výběr pořadí vrstev bylo také nutné vybrat materiály pro výrobu desky a jejich tloušťky. Svou desku jsem se rozhodl vyrobiť u firmy JLCPCB, využil jsem tedy jimi nabízený stackup s označením JLC06161H-3313A. Výhodou zmíněného stackupu je velice malá vzdálenost mezi vnějšími vrstvami a zemnicími vrstvami, pouze 0,0994 mm. Bohužel jsou však vnitřní vrstvy IN2 a IN3 od zemnicích ploch odděleny relativně silným jádrem tloušťky 0,55 mm. Výrazně tedy klesne kapacita mezi zemnicí a napájecí plochou. Tento stackup byl však v době návrhu DPS nejlepším dostupným na stránce výrobce, proto jsem jej i přes zmíněné kompromisy zvolil.

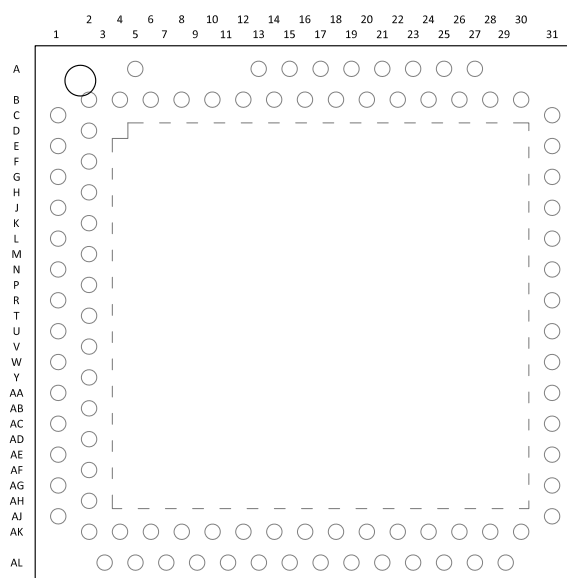
layer	Material Type	Thickness	
Layer	Copper	0.035mm	
Prepreg	3313*1	0.0994mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	0.55mm (without copper)
Core	Core	0.55mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	
Prepreg	2116*1	0.1088mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	0.55mm (without copper)
Core	Core	0.55mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	
Prepreg	3313*1	0.0994mm	
Layer	Copper	0.035mm	

Obrázek 5.1: Stackup JLC06161H-3313A. Převzato z [23].

5.2 Řídící procesor

Při routingu řídicího procesoru jsem se primárně zaměřil na vhodné rozložení blokovacích kondenzátorů. U nich je nutné zajistit cestu k napájecím plochám s co možná nejmenší indukčností, aby blokovací kondenzátory efektivně pohlcovaly proudové špičky. Je tedy potřeba minimalizovat parazitní indukčnost cest ke kondenzátoru a velikost uzavírající se proudové smyčky. Základem je v tomto případě umístění kondenzátoru co nejbližší napájecím pinům a dobré prokovení do napájecích ploch.

Problémem při routingu řídicího procesoru se stalo jeho pouzdro. Jak jsem zmínil v kapitole 4.2, největší pouzdro ve kterém je mikrokontrolér dodáván je pouzdro aQFN, což je kombinace standardního BGA pouzdra a QFN pouzdra s chladičí ploškou o vnějších rozměrech 7x7 mm. Kontaktní plošky pouzdra mají však průměr a vzájemný rozestup pouze 0,2 mm.



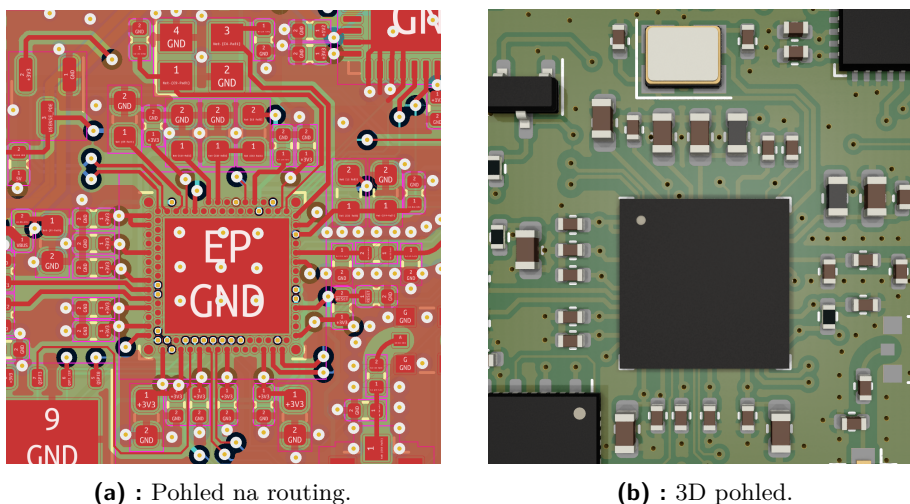
Obrázek 5.2: Pouzdro aQFN. Převzato z [15].

Jelikož výrobce JLCPCB uvádí, že šířka nejmenšího vyrobitelného spoje a nejmenší mezery je 0,09 mm, viz [24], nebylo by možné táhnout cesty z vnitřní řady plošek ven bez použití prokovů. Na prokovy mezi ploškami však také není dostatek prostoru a umístění obyčejných prokovů přímo do kontaktních plošek není žádoucí, jelikož může cín prosakující otvory v prokovech způsobit komplikace při pájení. Jediným možným řešením bylo v tomto případě využití přeplátovaných prokovů.

Přeplátované prokovy jsou zpočátku výrobního procesu naprosto shodné s klasickými prokovy. Po pokovení je však zaplněn otvor v prokovu epoxidem a ploška prokovu je opět pokovena. Tím vznikne prokov propojený do nižších vrstev ale neobsahující otvor, kterým by mohl být odsáván cín. Zároveň je možné prokov přímo použít jako pájecí plošku. Při použití přeplátovaných prokovů je tedy možné propojit vnitřní řady plošek do nižší vrstvy a cesty

realizovat v ní. Jedinou nevýhodou je v tomto případě indukčnost přidaná prokovy. Napájecí piny, ke kterým musí být umístěny blokovací kondenzátory, jsou však rozmístěny v řadách vnějších a přidaná indukčnost tak není v mé aplikaci problémem.

Při rozmísťování blokovacích kondenzátorů v okolí mikrokontroléru jsem přihlédl k doporučení v datasheetu [15]. Zároveň jsem do blízkosti mikrokontroléru umístil krystalový oscilátor a QSPI paměť. Pro přepřátované prokovy jsem zvolil průměr vrtání $20\ \mu\text{m}$ a velikost plošky $30\ \mu\text{m}$. Ploška by dle doporučení v katalogovém listu měla být v ideálním případě ještě menší, výrobce však neumožňuje výrobu menších prokovů. Výsledný routing okolo mikrokontroléru je vidět na obrázku 5.3.



(a) : Pohled na routing.

(b) : 3D pohled.

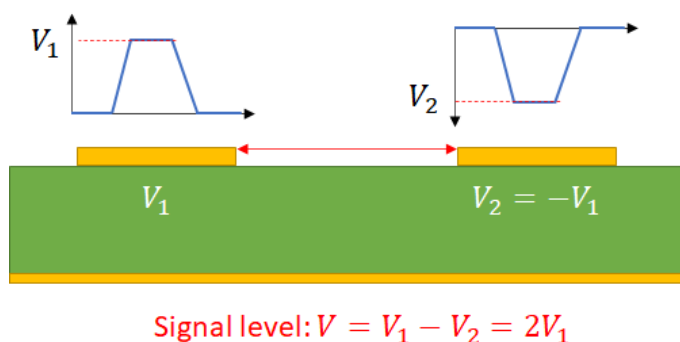
Obrázek 5.3: Rozmístění součástek a routing v okolí mikrokontroléru.

5.3 Rychlé datové sběrnice

Při použití rychlých datových sběrnic, jako je USB či Ethernet, je nutné začít o spojích na DPS uvažovat jako o vedení [25]. Výraznou roli tedy začne hrát dodržení správné impedance. Při špatně provedeném návrhu a tudíž nedodržení impedance požadované specifikací komunikačního standardu budou na vedení vznikat odrazy. Tyto odrazy pak typicky způsobují zarušení přenášené informace nebo se vyzáří do okolí jako elektromagnetické rušení. Nižší než očekávaná impedance vedení může mít také za následek přetížení vysílacích obvodů a jejich zbytečné zahřívání, které může vést k snížení životnosti či destrukci. Kromě správné impedance vedení vyžadují také vysokorychlostní sběrnice, u kterých jsou data přenášena paralelně či diferenciálně, správný souběh hran signálů [25]. Při rozdílných délkách vedení, resp. rozdílných dobách šíření signálu po vedení, může nastat případ, kdy nedorazí k přijímači hrany signálu ve stejnou dobu a může tak být přijímačem odečtena jiná než vyslaná hodnota.

5.3.1 Diferenciální přenos

Diferenciální přenos je způsob přenosu informace na fyzické vrstvě. Z dat se ve vysílači vytvoří dva shodné signály, pouze s opačnou polaritou, viz obrázek 5.4. Po dvou vodičích, typicky diferenciálním páru, se data přenáší do přijímače, který provede diferenci dvou přijatých signálů. Výstupem difference je signál obsahující zakódovanou informaci.



Obrázek 5.4: Signály při diferenciálním přenosu. Převzato z [26].

Výhodou diferenciálního přenosu je odolnost vůči souhlasnému rušení: přijímač signály odečítá, rušení se tedy, při nulovém časovém posunu mezi oběma polaritami signálu, odečte a přenesená data jím nejsou ovlivněna. Při vysílání se také kompenzují elektromagnetická pole v obou vodičích a minimalizuje se tak EMI. Nevýhodou je nutnost využití dvou vodičů pro přenos, tato nevýhoda je však silně kompenzována možnou dosažitelnou přenosovou rychlostí při diferenciálním přenosu. Díky svým vlastnostem je diferenciální přenos využit v nespočtu moderních rychlých sběrnic jako například USB, Ethernet, HDMI, SATA, LVDS či PCI-E.

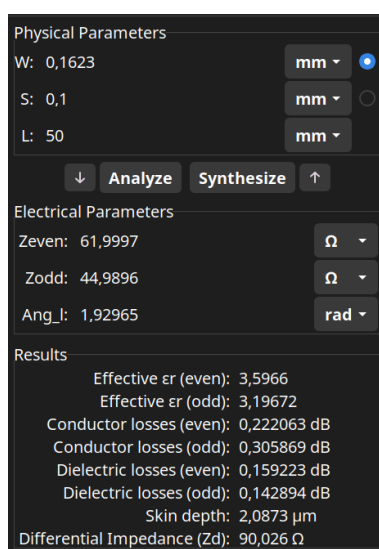
5.3.2 Diferenciální pár

Diferenciální pár je symetrické vedení o dvou vodičích určené pro přenos diferenciálních signálů. Toto vedení má specificky uzpůsobené vlastnosti, primárně impedanci, vhodné pro přenos dle využívaného standardu. V kabelech jsou poté diferenciální páry nejčastěji realizovány pomocí kroucené dvojlinky. U desek plošných spojů se diferenciální pár realizuje pomocí dvou pospolu vedených cest o stejné šířce, oddělených přesně definovanou mezerou. Typicky je pod tímto vedením rozlita zemnicí plocha.

Jelikož každý přenosový standard definuje požadovanou impedanci diferenciálního páru, je nutné volit mezeru a šířku cesty dle výsledné požadované impedance. Šířku a mezeru by bylo možné dopočítat dle rovnic odvozených pro tento účel, vstupuje do nich však velké množství proměnných a tudíž je jednodušší využít některý z dostupných výpočetních nástrojů. Tyto nástroje typicky implementují velmi přesný výpočet a umožňují vstupní parametry zadat jednoduše v grafickém rozhraní. Já jsem pro své výpočty využil nástroj PCB Calculator integrovaný do softwaru KiCad.

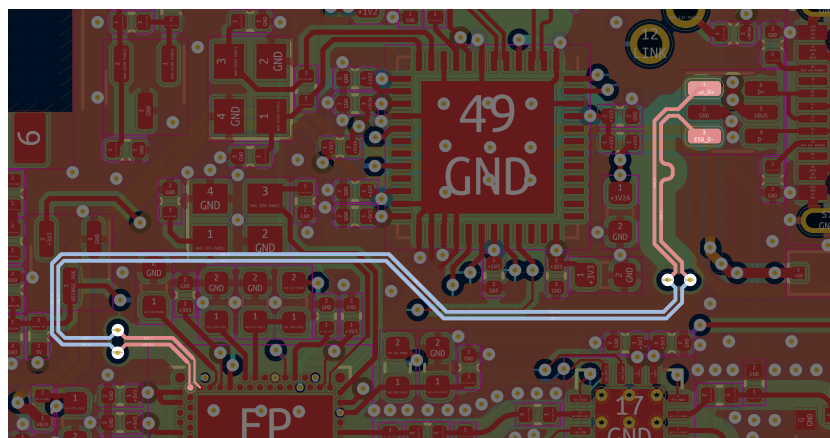
5.3.3 USB

Dle specifikace USB má být impedance páru pro diferenciální signál Z_{diff} rovna $90\ \Omega$ a impedance páru pro souhlasný signál Z_{comm} rovna $30\ \Omega$. Po zadání parametrů mé DPS do výpočetního nástroje PCB Calculator jsem zvolil šířku spoje $162,3\ \mu\text{m}$ a mezeru mezi spoji $100\ \mu\text{m}$. Pár s těmito parametry má mít dle výpočetního nástroje diferenciální impedanci $90,026\ \Omega$, viz obrázek 5.5. Impedanci pro souhlasný signál Z_{comm} lze dopočítat z impedance Z_{even} (impedance jedné cesty při buzení souhlasným signálem) jako $Z_{\text{comm}} = Z_{\text{even}} \cdot 0,5 = 61,997 \cdot 0,5 = 30,999\ \Omega$. Tyto výsledky jsou v doporučené toleranci $\pm 10\%$ dle [27] a jsou tedy naprosto dostatečné, obzvláště při využívání USB pouze v pomalejším módu full speed.



Obrázek 5.5: Výpočet parametrů diferenciálního páru USB.

Po výpočtu jsem zadal návrhová pravidla pro šířku a mezeru páru do návrhového softwaru a provedl routing páru, který je vidět na obrázku 5.6.

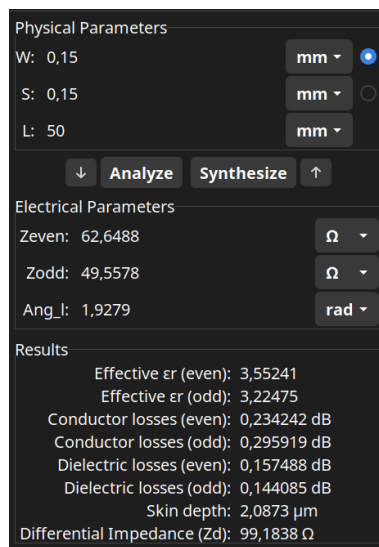


Obrázek 5.6: Diferenciální pár USB.

Navíc jsem také přidal odstup páru od okolní rozlité mědi, která by měla na výsledné parametry páru vliv. Při routingu u mikroprocesoru jsem byl nucen návrhová pravidla porušit a využít tenčích cest, aby bylo možné napojit se na malé plošky. Toto porušení je však na tak malé délce vedení, že by nemělo být na výsledných vlastnostech znatelné. Také jsem byl nucen vést pár z velké části ve spodní vrstvě desky. Tato skutečnost však nemá na pár vliv, jelikož je skladba desky symetrická a pár ve vrstvě BOT má stejné parametry jako ve vrstvě TOP. Jediné možné ztráty se v tomto případě mohou tvořit na prokovech do spodní vrstvy, které tvoří na vedení nehomogenitu. U konce diferenciálního páru (na obrázku 5.6 vpravo) jsem také dorovnal délky obou vodičů pomocí meandru. Tímto jsem zajistil shodnou dobu šíření signálů na obou vodičích.

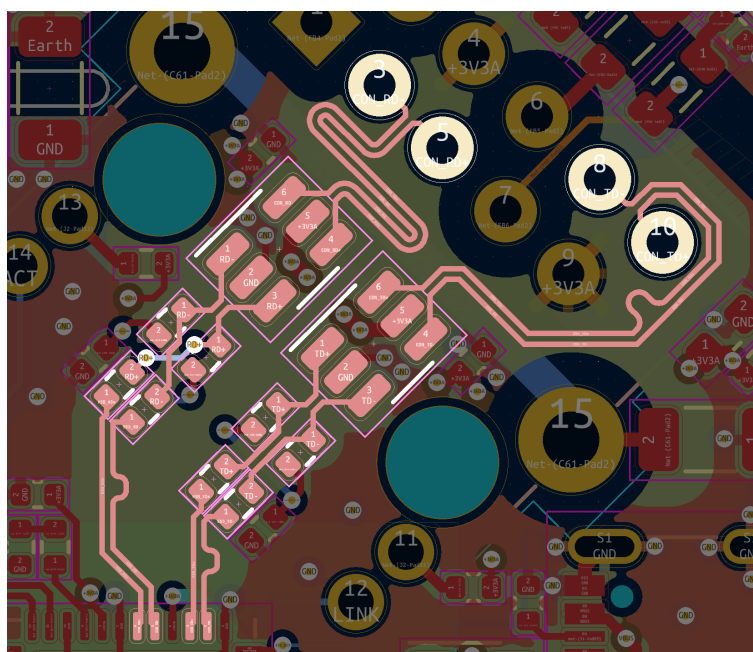
5.3.4 Ethernet

Diferenciální impedance párů pro Ethernet má být $100\ \Omega$, viz [28]. Parametry jsem opět zadal do výpočetního nástroje a pro šířku cesty $150\ \mu\text{m}$ a šířku mezery $150\ \mu\text{m}$ obdržel aproximovanou impedanci $Z_{\text{diff}} = 99,1838\ \Omega$, viz obrázek 5.7. Po uvážení tolerance $\pm 10\%$ doporučené v [28] lze opět prohlásit, že dopočtené hodnoty impedance jsou dostačující.



Obrázek 5.7: Výpočet parametrů diferenciálního páru Ethernetu.

Po zadání parametrů do návrhového softwaru jsem opět provedl routing, viz obrázek 5.8. I u ethernetového diferenciálního páru jsem přidal odstup rozlité mědi. Byl jsem také nucen, kvůli pozici konektoru a řídicího integrovaného obvodu, kompenzovat vzájemnou délku obou párů, nikoli pouze vodičů v páru, jelikož Ethernet používá k přenosu páry dva. Meandr pro kompenzaci délky párů je vidět na obrázku nahoře. Meandry pro kompenzaci délky vodičů v páru jsou umístěny u integrovaného obvodu a u konektoru.



Obrázek 5.8: Diferenciální páry Ethernetu.

Na obrázku je také vidět, že jsem nebyl z technických důvodů schopen kvůli realizaci pinoutu konektoru dodržet větší izolační vzdálenost mezi datovými linkami a piny pro napájení PoE (piny 1, 2, 6 a 7). Ačkoliv jsem tedy implementoval izolovaný spínaný zdroj s izolačním napětím 1500V, je pravděpodobné, že piny PoE a datové linky jsou u sebe tak blízko, že izolační bariéra nedodrží požadavek 1500 V. Odstup cest a pinů jsem v tomto místě maximalizoval, izolační drážka, která by mohla problém vyřešit, by ale nebyla v těchto místech vyrobitelná. Pro návrh desky bych tedy v příští revizi volil jiný konektor, se kterým je možné dostatečné izolace dosáhnout.

5.4 RF sekce na DPS

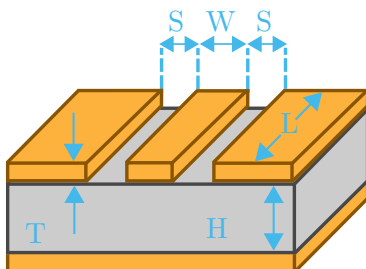
Jelikož se na mé DPS nachází krom datových sběrnic také RF transceiver, bylo nutné na desce realizovat i vedení pro RF signál a anténu, která jej vyzáří. Při návrhu vedení bylo také velice důležité dbát na správná návrhová pravidla a správné impedance, speciálně proto, že odrazy na tomto vedení mohou mít na elektromagnetickou kompatibilitu zařízení při nesprávném provedení fatální vliv a mohou vést ke zničení citlivých obvodů v transceiveru.

5.4.1 Páskové vedení

Pro vedení RF signálu jsem se ve své aplikaci rozhodl využít strukturu koplanárního vedení s uzemněnou plochou, schematicky znázorněnou na obrázku 5.9. Skládá se z vodivého pásku šířky W a tloušťky T ležícího na dielektrickém substrátu výšky H . Pásek je z obou stran obklopen vodivou

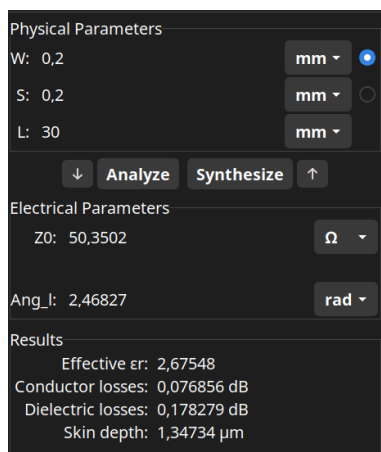
uzemněnou plochou, která je od pásku oddělena mezerou šířky S . Na spodní straně substrátu se poté nachází uzemněná vodivá plocha.

Tento typ vlnovodné struktury zakládá na výhodách obyčejného koplanárního vedení, primárně malých rozměrech a dobré vyrobiteľnosti. Přidáním zemnicí plochy, a typicky ještě stínění prokovy, viz 5.4.3, však dosahuje mnohem lepšího odstínění přenášeného signálu. V miniaturizovaných zařízeních je tedy hojně využíván, jelikož poskytuje velmi malé vyzařování do okolí a nezaruší tak zbytek zařízení.



Obrázek 5.9: Koplanární vedení s uzeměnou plochou. Převzato z [29].

Pro výpočet parametrů koplanárního vlnovodu jsem opět využil integrovaného nástroje PCB Calculator. Jelikož jsou všechny obvody přizpůsobeny na $50\ \Omega$, bylo nutné u vedení dodržet shodnou charakteristickou impedanci. Tomu v mém případě odpovídá koplanární vedení s šířkou pásku i mezery $200\ \mu\text{m}$. Impedance takového vedení je dle výpočetního nástroje $50,35\ \Omega$, viz obrázek 5.10. Pro mou délku vedení, která je cca $30\ \text{mm}$, pak výpočetní nástroj odhadl i velikost útlumu ve vodiči a v dielektriku na frekvenci $2,4\ \text{GHz}$ na $0,255\ \text{dB}$.



Obrázek 5.10: Impedance koplanárního vedení s uzeměnou plochou.

5.4.2 Ohyby vedení

Jelikož jsem byl ve své aplikaci omezen místem, nebylo možné vést vlnovodnou strukturu přímo, bez ohybů. Každý ohyb pro vedení však znamená možné ztráty způsobené změnou charakteristické impedance v místě ohybu a také

různou délkou šíření na vnitřní a vnější straně ohybu. Tyto vlivy je nutné při návrhu minimalizovat. Ohyby ve vlnovodných strukturách se typicky realizují dvěma metodami: zaobleným ohybem nebo zkoseným ohybem.

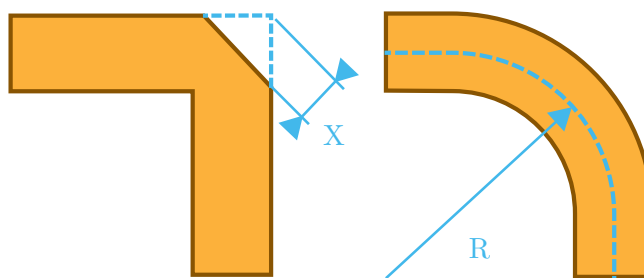
Zaoblený ohyb vedení je jednodušší realizovat. Šířka W vodivého pásku zůstává ve všech místech ohybu shodná, není tedy nutné dopočítávat dodatečné rozměry. Jediné důležité pravidlo hovoří o poloměru ohybu. Aby se na vedení neprojevil jeho vliv, je nutné aby jeho poloměr byl větší než trojnásobek šířky vodivého pásku W , tedy $R > 3W$. Toto pravidlo vychází z měření v [30], strana 50, graf g.

Zkosený ohyb je náročnější na realizaci, jelikož vyžaduje pro zachování správné impedance dopočet zkosení. Pro vedení se šířkou pásku W a výškou dielektrika H lze zkosení X vypočítat dle rovnice 5.2 převzaté z [31], vzorec 5.

$$X = \frac{W}{\sqrt{2}} \cdot \left(0,52 + 0,65 \cdot e^{-1,35 \cdot \frac{W}{H}} \right) \quad (5.2)$$

Tato rovnice má omezenou platnost pouze pro $0,25 \leq \frac{W}{H} \leq 2,75$ a pro $2,5 \leq \varepsilon_r \leq 25$.

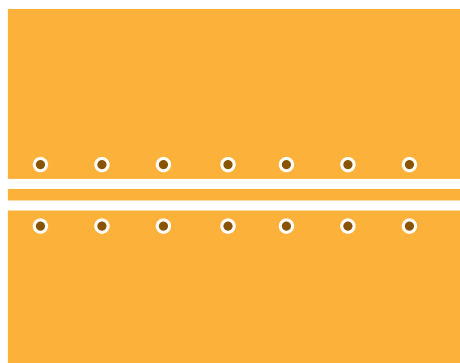
Pro své zařízení jsem, primárně kvůli jednoduchosti realizace, tvořil ohyby vedení zaoblením.



Obrázek 5.11: Ohyby ve vlnovodu.

5.4.3 Stínění prokovy

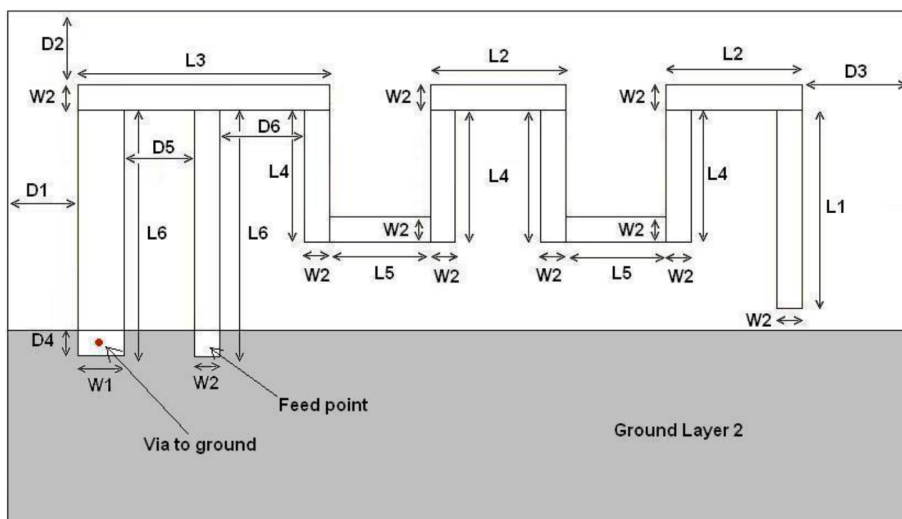
Jak jsem zmínil v kapitole 5.4.1, stínění prokovy, také *via fencing*, je při návrhu vlnovodů velice rozšířenou praktikou využívanou primárně pro vylepšení izolace vlnovodu od zbytku DPS. Realizuje se přidáním prokovů do rozlité zemnicí plochy po celé délce vlnovodu. Pokud se dodrží dostatečně malá mezera mezi prokovy, nejméně $\frac{\lambda}{10}$, optimálně pak $\frac{\lambda}{20}$ kde λ je vlnová délka přenášeného signálu, vznikne klec, která vlnovodnou strukturu velice dobře odstíní. Simulace vyzařování ze stíněného vlnovodu je možné nalézt například v [32]. Schematický příklad stínění je na obrázku 5.12.



Obrázek 5.12: Stínění vlnovodu prokovy.

5.4.4 Anténa

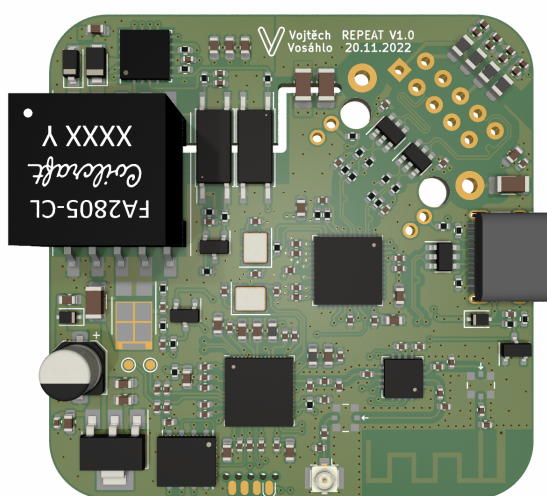
Antény integrovatelné na DPS jsou typicky dvojího typu. Buď anténa na čipu, která se na desku osadí jako SMD součástka, nebo anténa vyleptaná přímo do motivu mědi na desce. Já jsem se pro své zařízení rozhodl využít anténu vyleptanou na motiv z důvodu výrobních nákladů. Bylo by jistě možné anténu navrhnout specificky pro mé zařízení, rozhodl jsem se však využít existující řešení, konkrétně anténu SWRA117D navrženou firmou Texas Instruments [33]. Jedná se o invertovanou F anténu se vstupní impedancí $50\ \Omega$ na $2,45\ \text{GHz}$. Nemělo by tedy být nutné ji přizpůsobovat, jelikož impedance vedení na DPS je shodně $50\ \Omega$. Disponuje také velmi malými rozměry, konkrétně $15,2\ \text{mm} \times 5,7\ \text{mm}$. Šířka pásma antény, definována v dokumentaci antény jako interval kde je více než 90 % vstupního výkonu vyzářeno anténou, je ve volném prostoru $250\ \text{MHz}$. Výkres antény je na obrázku 5.13, rozměry jsou specifikovány v dokumentaci.



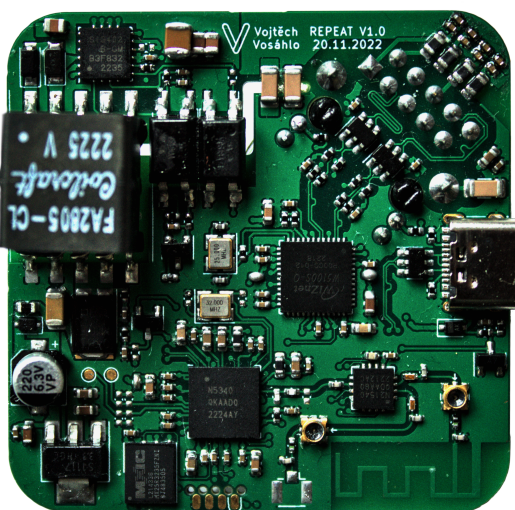
Obrázek 5.13: Anténa SWRA117D. Převzato z [33].

5.5 Finální DPS

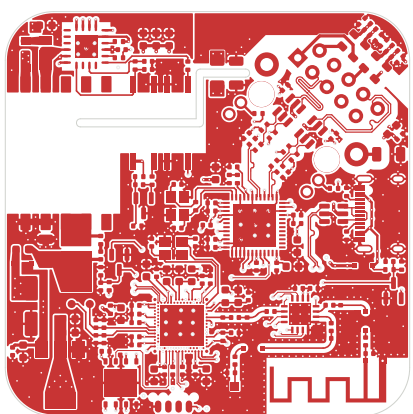
Zkompletovaný návrh desky plošného spoje jsem ponechal vyrobit u firmy JLPCB se všemi potřebnými procesy jako jsou přeplátované prokovy a řízená impedance. K desce jsem si také nechal vyhotovit osazovací šablonu pro zjednodušení následného osazení. Vyrenderovaná deska plošných spojů je na obrázku 5.14. Desku jsem osadil ručně, za pomoci pájecí pasty, šablony a horkovzdušné stanice. Osazená deska je vyfocena na obrázku 5.15. Motivy jednotlivých vrstev mědi jsou poté na obrázcích 5.16, 5.17 a 5.18.



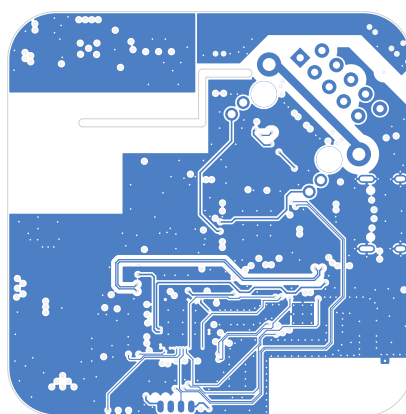
Obrázek 5.14: Render desky plošných spojů.



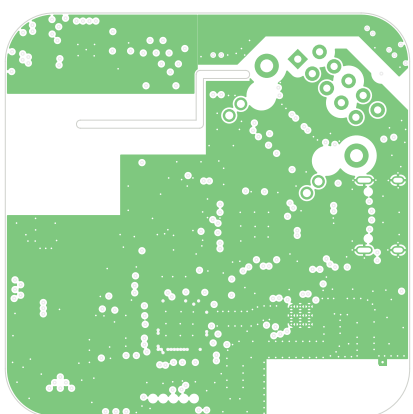
Obrázek 5.15: Osazená DPS.



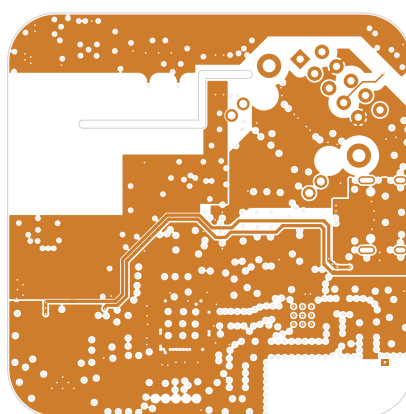
(a) : Vrstva TOP.



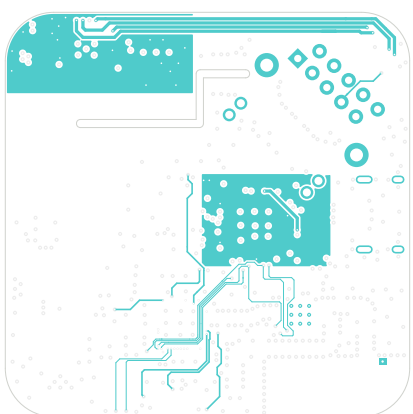
(b) : Vrstva BOT.

Obrázek 5.16: Vnější vrstvy.

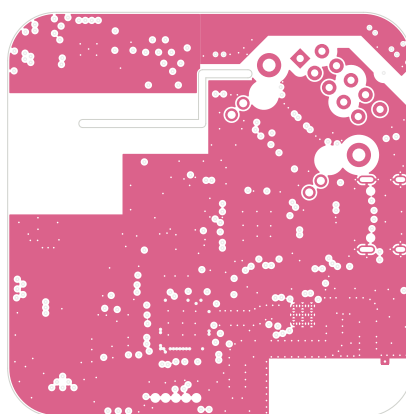
(a) : Vrstva IN1 (zemnicí).



(b) : Vrstva IN2 (signálová).

Obrázek 5.17: Vnitřní vrstvy IN1 (zemnicí) a IN2 (signálová).

(a) : Vrstva IN3 (napájecí).



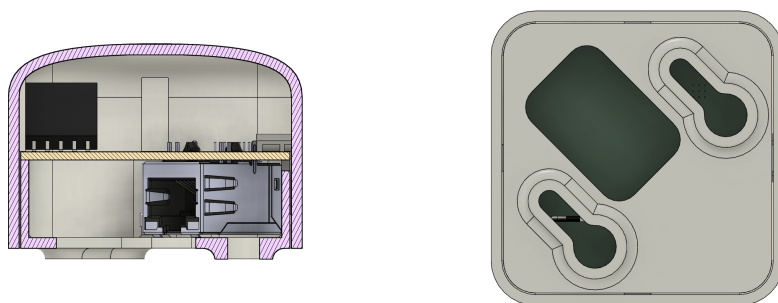
(b) : Vrstva IN4 (zemnicí).

Obrázek 5.18: Vrstvy IN3 (napájecí) a IN4 (zemnicí).

Kapitola 6

Mechanická zástavba

Aby bylo možné zařízení jednoduše namontovat na zeď či strop, rozhodl jsem se pro něj navrhnout mechanickou zástavbu. Hlavním požadavkem na tento návrh byla možnost uchycení za pomoci dvou děr pro šrouby. Dále pak jednoduchá rozebíratelnost. V neposlední řadě také jednoduchý design tak, aby nepůsobila krabička v domácnosti rušivě. Krabičku jsem navrhl v softwaru Fusion 360 s intencí realizovat její výrobu 3D tiskem. Na obrázku 6.1 je vidět umístění desky plošných spojů v krabičce a rozložení úchytných děr spolu s průchodkou na ethernetový kabel.

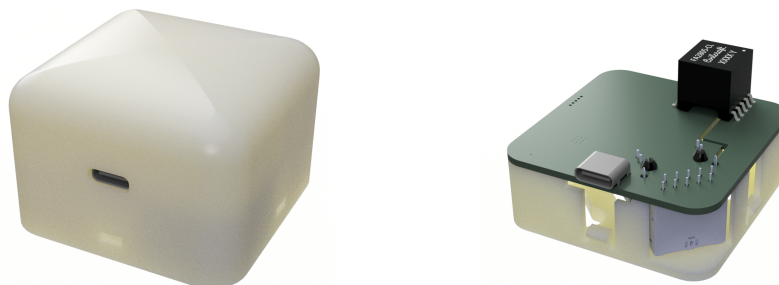


(a) : Pohled v řezu.

(b) : Pohled na díry pro ukotvení krabičky.

Obrázek 6.1: Navržená krabička pro DPS.

Na obrázku 6.2 je vyrenderovaná krabička v zavřeném a otevřeném stavu.



(a) : Pohled na celou uzavřenou krabičku.

(b) : Vnitřní umístění DPS.

Obrázek 6.2: Rendery navržené krabičky.

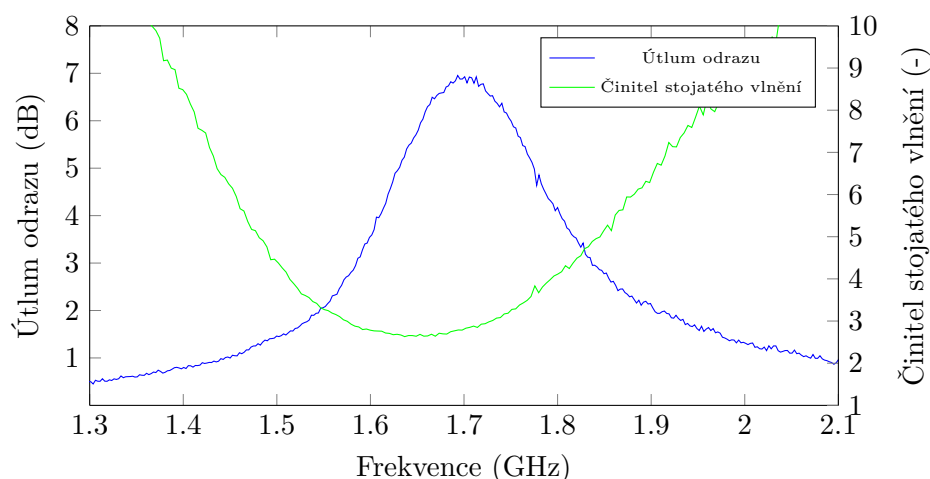
Oba díly krabičky drží pohromadě plastové úchytky na spodní části, které se při uzavření zacvaknou do otvorů v části horní. Takto je krabička jednoduše rozebíratelná bez nutnosti využití dalšího nářadí. Krabičku jsem ponechal vytisknout na FDM 3D tiskárně z materiálu PLA.

Kapitola 7

Ověření funkčnosti zařízení

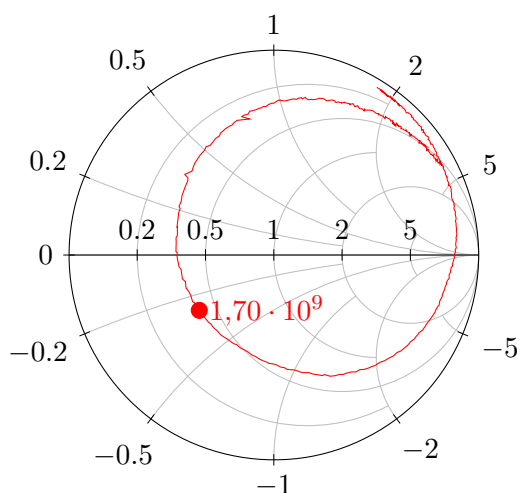
7.1 Přizpůsobení a ladění antény

Prvním krokem při ověření správné funkčnosti zařízení bylo proměření parametrů antény na DPS. I přesto, že byla anténa navržena na rezonanční frekvenci 2,45 GHz, je velice pravděpodobné, že vlivem osazení okolních součástek, jiným materiálem DPS a dalšími vlivy, se rezonanční frekvence antény výrazně odchýlí od navrhované hodnoty. Výše zmíněné faktory mají vliv také na přizpůsobení antény, které bylo nutné ověřit. Pro měření přizpůsobení a rezonanční frekvence antény jsem využil vektorového analyzátoru NanoVNA-F V2, připojení k anténě jsem provedl pomocí měřicích bodů zmíněných v kapitole 4.3 a provedl měření S parametrů. Před měřením jsem však byl nucen přesunout část přizpůsobovacích obvodů z obrázku 4.4 (konkrétně komponenty L5, L6 a C62, C63) před měřicí konektor k nRF21540, jelikož jsem je při návrhu umístil chybně až za něj. Po přesunutí a proměření celého frekvenčního pásma jsem zjistil, že rezonanční frekvence antény byla místo navrhovaných 2,45 GHz posunuta na 1,7 GHz, jak je vidět z grafu 7.1.



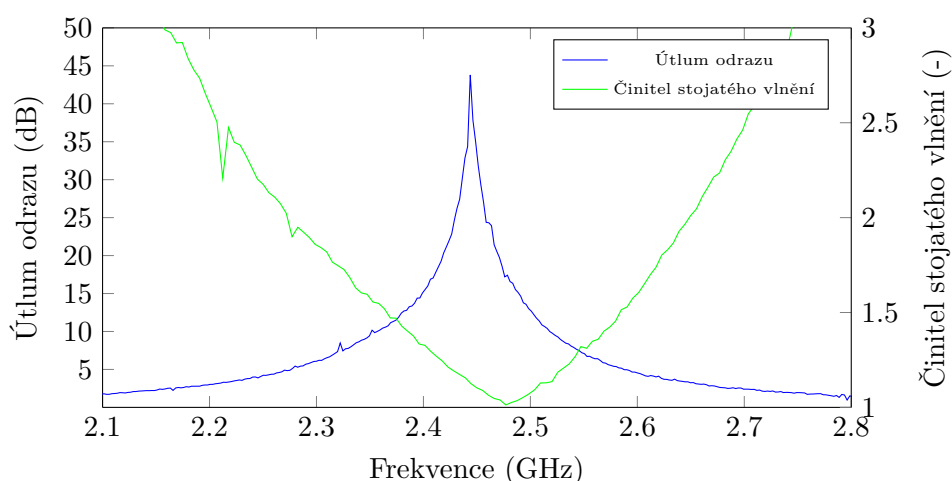
Obrázek 7.1: Závislost činitele stojatého vlnění a útlumu odrazu antény na frekvenci před přizpůsobením a laděním.

Anténa je na této posunuté frekvenci navíc velice špatně přizpůsobena. Útlum odrazu na rezonanční frekvenci je pouze 6,95 dB, ač by se měl u přizpůsobené antény v jejím frekvenčním pásmu dle [33] pohybovat nad hranicí 10 dB. Stejně tak je nepřizpůsobení vidět na činiteli stojatého vlnění, který by měl být dle [33] v celém pásmu 2,4 GHz - 2,5 GHz pod hodnotou 2, jeho minimální hodnota 2,63 je tedy v tomto případě nad limitem. Na smithově diagramu 7.2 je poté přesně vidět chybná impedance, která by při optimálním přizpůsobení měla být umístěna ve středu diagramu.



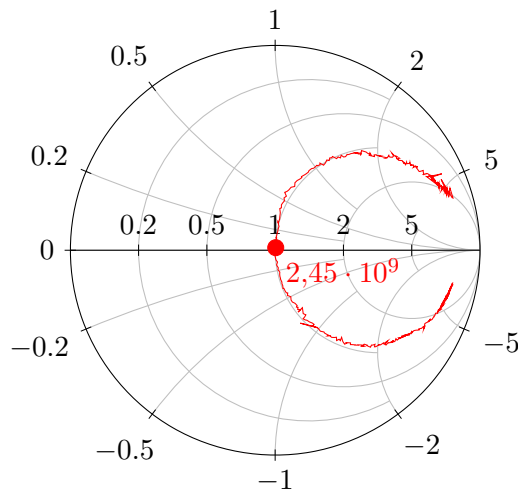
Obrázek 7.2: Smithův diagram antény před přizpůsobením a laděním. Změřená rezonanční frekvence antény 1,7 GHz je vyznačena červeným bodem.

Rezonanční frekvenci antény jsem upravil jejím postupným zkracováním tak, aby došlo k posuvu na 2,45 GHz. Přizpůsobení po posuvu frekvence nebylo nutné provádět. Závislost činitele stojatého vlnění a útlumu odrazu na frekvenci pro naladěnou přizpůsobenou anténu je vidět na grafu 7.3.



Obrázek 7.3: Závislost činitele stojatého vlnění a útlumu odrazu antény na frekvenci po přizpůsobení a naladění.

Z obou průběhů je zřejmé, že se anténu povedlo velice dobře naladit. Útlum odrazu v celém pásmu 2,4 GHz - 2,5 GHz se pohybuje nad hranicí 15 dB, což velice dobře odpovídá měření v [33]. Činitel stojatého vlnění se také pohybuje pod limitem 2 stanoveném v [33]. Ze smithova diagramu 7.4 je zřejmé, že je impedance antény téměř čistě reálná, její číselná hodnota při frekvenci 2,45 GHz je $(50,600 - 0,005i) \Omega$.



Obrázek 7.4: Smithův diagram antény po přizpůsobení a naladění. Změřená rezonanční frekvence antény 2,45 GHz je vyznačena červeným bodem.

7.2 Nahrání software

Dalším krokem při hlubším ověření funkčnosti zařízení bylo spojení programátoru s mikrokontrolérem a nahrání software. Pro zjednodušení vývojového procesu jsem se rozhodl využít podpory mikrokontroléru nRF5340 v Zephyr RTOS a otestování zařízení provést pomocí tohoto operačního systému.

7.2.1 Zephyr RTOS

Zephyr je operační systém reálného času optimalizovaný pro embedded zařízení s velmi omezeným výpočetním výkonem. Zároveň je však škálovatelný a velice flexibilní, lze jej tedy přizpůsobit téměř libovolné aplikaci. Ve svém jádru integruje velké množství podporovaných zařízení, architektur a periferií, vývoj aplikace tedy může být omezen pouze na psaní funkčního kódu bez nutnosti vývoje driverů a obslužných rutin například pro ethernetový stack [34]. Kromě této podpory poskytuje také mnoho příkladů urychlujících fázi softwarového vývoje při testování.

7.2.2 Driver pro W5100

Ačkoliv má Zephyr výbornou podporu periferních obvodů, chyběla v něm v mém případě podpora ethernetového rozhraní W5100S. Díky jednoduché rozšiřitelnosti systému jsem však byl schopen vytvořit vlastní driver pro toto rozhraní a ověřit tak jeho funkčnost. Má implementace majoritně využívá existujícího driveru pro velice populární rozhraní W5500. To má ale oproti W5100S více dostupných socketů a paměti. Bylo tedy nutné upravit paměťové rozsahy. Dále jsem upravil zápis a adresaci některých registrů, které se v rozhraní W5100S nevyskytují a způsob přenosu adresy v SPI rámci. Výsledný softwarový modul driveru je dostupný z [35].

7.3 Ověření dosahu

Pro ověření funkčnosti vysokofrekvenčních obvodů jsem zvolil test dosahu při použití standardu Bluetooth Low Energy. Test jsem realizoval na přímou viditelnost bez jakýchkoliv překážek a pro porovnání jej provedl pro mé zařízení, BLE adaptér který aktuálně ve své chytré domácnosti využívám a mobilní telefon. Výše zmíněná zařízení sloužila pouze jako přijímače. Porovnání dosahu při vysílání jsem nerealizoval, vzhledem k tomu, že vliv funkčnosti vysokofrekvenčních obvodů je při příjmu i vysílání shodný a IoT brána při reálném provozu v domácnosti data primárně přijímá. Ze stejného důvodu jsem test nerealizoval pro standard Zigbee, jelikož přenos probíhá ve stejném frekvenčním pásmu. U Zigbee lze však očekávat lepší dosah, vzhledem k použití nižší přenosové rychlosti, viz 2.4.2.

Jako vysílač jsem využil teplotního čidla Xiaomi LYWSD03MMC s upraveným firmware. Čidlo LYWSD03MMC je vybaveno Bluetooth 4.2 transceiverem TLSR8251 s maximálním vysílacím výkonem až 10 dBm, já jsem však zařízení nakonfiguroval na vysílací výkon $-19,27$ dBm, abych simuloval útlum na trase způsobený překážkami typickými pro provoz v domácnosti. Je důležité zmínit, že BLE 4.2 narozdíl od novějšího 5.0 nepodporuje nižší přenosové rychlosti než 1 Mbit/s. U BLE 5.0 existuje podpora tzv. *coded PHY*, tedy aplikace dopředné korekce chyb na fyzické vrstvě, která při snížení přenosové rychlosti až na 125 kbit/s zvýší odolnost při přenosu a tedy i dosah zařízení až na dvojnásobek. Čidlo při měření každou sekundu vysílalo advertising packet s daty a ten byl výše zmíněnými přijímači dekodován. V tabulce 7.1 uvádím pro každé z porovnávaných zařízení vzdálenost od vysílače při které došlo k výpadku komunikace a průměrnou úroveň výkonu detekovanou přijímačem těsně před výpadkem komunikace.

Tabulka 7.1: Porovnání dosahu BLE USB adaptéru, mobilního telefonu a mého zařízení.

Zařízení	Dosah (m)	Výkon při ztrátě spojení (dBm)
USB adaptér	4	-86
Mobilní telefon	26	-101
Mé zařízení	34	-99

Z porovnání je zřejmé, že mé dosavadní řešení pomocí Bluetooth adaptéru je silně neefektivní. Adaptér přestal být schopen dekodovat pakety už ve vzdálenosti 4 m od vysílače. Z poměrně vysokého výkonu při ztrátě spojení, konkrétně -86 dBm, lze usuzovat, že transceiver využívaný v adaptéru má výrazně nižší citlivost příjmu než ostatní testovaná zařízení. Mobilní telefon při příjmu dosáhl mnohem lepšího výsledku, kvůli vyššímu útlumu se však úroveň signálu dostala na kritickou hranici citlivosti přijímače dříve a komunikace se přerušila ve vzdálenosti 26 m. Nejlepší dosah mělo v testu mé zařízení s dosahem 34 m, tedy 30% zlepšením oproti mobilnímu telefonu. Výsledek měření dosahu tedy správně koreluje s měřením přizpůsobení vysokofrekvenčních obvodů a ladění antény a potvrzuje, že bylo provedeno korektně a zařízení má oproti konkurenčním zařízením při bezdrátové komunikaci velmi dobré parametry.



Kapitola 8

Závěr

Ve své práci jsem definoval pojem Internetu Věcí a nastínil funkčnost základních prvků této sítě a používaných komunikačních standardů. Provedl jsem průzkum trhu a na základě nedostatků zjištěných u dostupných zařízení jsem navrhl vlastní koncepci. Svou koncepci jsem nejdříve realizoval schematicky a následně provedl návrh plošného spoje. Zmínil jsem důležité kroky při návrhu plošného spoje integrujícího vysokofrekvenční vedení a rychlé datové sběrnice a rozebral tuto problematiku. Nastínil jsem také všeobecné praktiky při návrhu vícevrstvých plošných spojů. Výslednou DPS jsem ponechal vyrobit a osadil veškeré komponenty. V neposlední řadě jsem otestoval funkčnost mého zařízení, proměřil jeho parametry a provedl porovnání dosahu příjmu se stávajícím řešením, které ve své chytré domácnosti využívám.

Z měření je zřejmé, že mé zařízení je plně funkční a v porovnání s komerčními řešeními vykazuje výrazně lepší parametry jako například vyšší dosah při příjmu a lepší vybavenost a konektivitu. Zároveň je díky využití nejmodernějších technologií připraveno na další vývoj v oblasti Internetu Věcí.

Příloha A

Bibliografie

1. MADZA, Afa. Internet of Things (IoT): Concepts, Concerns & Applications [online]. 2018 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://medium.com/@The_Mad_Zaafa/internet-of-things-iot-concepts-concerns-applications-c0647473b461.
2. *What is an IoT Gateway [obrázek]* [online]. 2017. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://openautomationsoftware.com/open-automation-systems-blog/what-is-an-iot-gateway/>.
3. *Star Topology [obrázek]* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://behrtech.com/blog/mesh-vs-star-topology/>.
4. *Mesh Topology [obrázek]* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://behrtech.com/blog/mesh-vs-star-topology/>.
5. *The Bluetooth® Low Energy Primer* [online]. Bluetooth SIG [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2022/05/The-Bluetooth-LE-Primer-V1.1.0.pdf>.
6. *BLE Advertising Channels Spectrum [obrázek]* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.argenox.com/library/bluetooth-low-energy/ble-advertising-primer/>.
7. *Zigbee Specification R22 (v 1.0)* [online]. Zigbee Alliance [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://csa-iot.org/developer-resource/specifications-download-request/>.
8. *Zigbee and Wi-Fi frequencies (occupied) in the 2.4 GHz Band [obrázek]* [online]. 2022. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/community/zigbee-frequency-bands>.
9. *Thread Specification* [online]. Thread Group [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.threadgroup.org/>.
10. *Matter Specification Version 1.0* [online]. Connectivity Standards Alliance [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2022/11/22-27349-001_Matter-1.0-Core-Specification.pdf.
11. *Kicad EDA: A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.kicad.org/>.

12. *Nordic Semiconductor: Bluetooth Low Energy Products* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.nordicsemi.com/Products/Bluetooth-Low-Energy>.
13. *STMicroelectronics: STM32WB Series* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32wb-series.html>.
14. *Espressif: SoC Products* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/socs>.
15. NRF5340 Product Specification v1.3 [online]. 2022 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF5340_PS_v1.3.pdf.
16. NRF21540 Product Specification v1.0 [online]. 2020 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF21540_PS_v1.0.pdf.
17. *PoE in Networking* [online]. Black Box [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.black-box.de/en-de/page/23894/Resources/Technical-Resources/Black-Box-Explains/lan/PoE-in-Networking>.
18. Si3402-B: FULLY-INTEGRATED IEEE 802.3-COMPLIANT POE PD INTERFACE AND LOW-EMI SWITCHING REGULATOR [online]. 2021 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/data-sheets/Si3402-B.pdf>.
19. Si3402BISO-EVB: ISOLATED EVALUATION BOARD FOR THE Si3402B [online]. 2021 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.skyworksinc.com/-/media/Skyworks/SL/documents/public/user-guides/Si3402BISO-EVB.pdf>.
20. W5100S Datasheet Version 1.2.7 [online]. 2018 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: https://docs.wiznet.io/img/products/w5100s/w5100s_ds_v127e.pdf.
21. *AMS1117: 1A LOW DROPOUT VOLTAGE REGULATOR* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>.
22. ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
23. *JLCPCB* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/>.
24. *JLCPCB Capabilities* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>.
25. JOHNSON, Howard; GRAHAM, Martin. *High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic*. 1st ed. Pearson, 1993. ISBN 978-0133957242.

26. PETERSON, Zachariah. *Differential signals Differential signaling on a differential pair carried over a PCB ground plane. [obrázek]* [online]. 2021. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/what-are-differential-pairs-and-differential-signals>.
27. High-Speed Interface Layout Guidelines [online]. 2018 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/spraar7j/spraar7j.pdf>.
28. WOODAHL, Lysny. Ethernet PHY PCB Design Layout Checklist [online]. 2021 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/snla387/snla387.pdf>.
29. *Coplanar Wave Guide with Ground Plane [obrázek]* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: https://gitlab.com/kicad/code/kicad/-/raw/master/resources/bitmaps_png/sources/dark/cpw_back.svg.
30. HOWE, Harlan. *Stripline Circuit Design: Modern Frontiers in Applied Science*. 1st ed. 1974. ISBN 978-0890060209.
31. DOUVILLE, R.J.P.; JAMES, D.S. Experimental Study of Symmetric Microstrip Bends and Their Compensation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1978, roč. 26, č. 3, s. 175–182. ISSN 0018-9480. Dostupné z DOI: 10.1109/TMTT.1978.1129340.
32. PONCHAK, G.E.; CHUN, Donghoon; YOOK, Jong-Gwan; KATEHI, L.P.B. The use of metal filled via holes for improving isolation in LTCC RF and wireless multichip packages. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2000, roč. 23, č. 1, s. 88–99. ISSN 15213323. Dostupné z DOI: 10.1109/6040.826766.
33. ANDERSEN, Audun. *Application Note AN043: Small Size 2.4 GHz PCB antenna* [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/swra117d/swra117d.pdf>.
34. Zephyr Project Overview: A proven RTOS ecosystem, by developers, for developers [online]. 2023 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.zephyrproject.org/wp-content/uploads/sites/38/2023/03/Zephyr-Overview-2023Q1-Master.pdf>.
35. VOSÁHLO, Vojtěch. *Zephyr W5100S Driver* [online]. 2023. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://github.com/WojtaCZ/zephyr-w5100>.

Příloha B

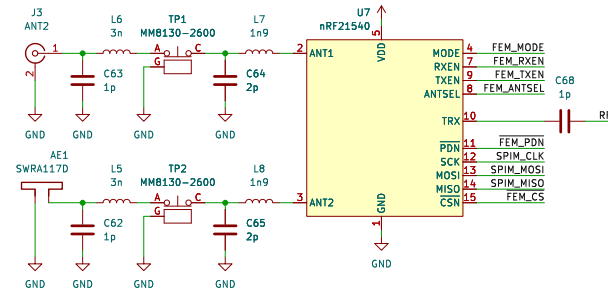
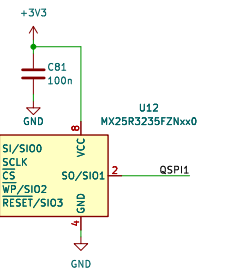
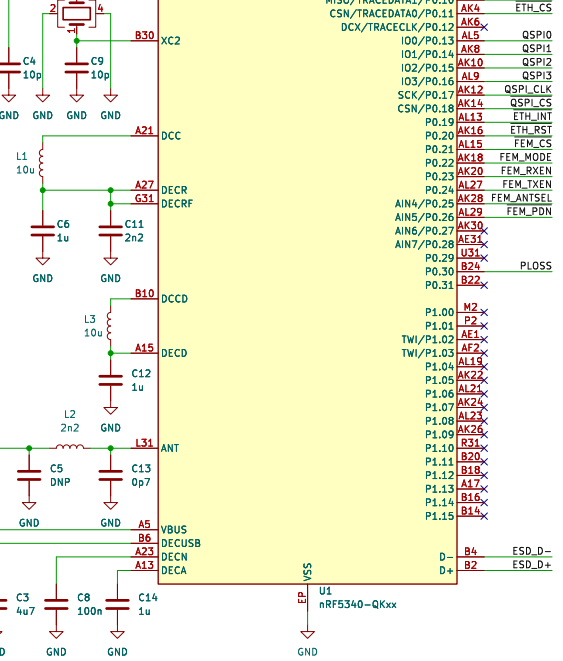
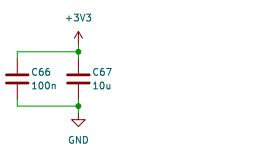
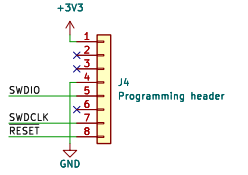
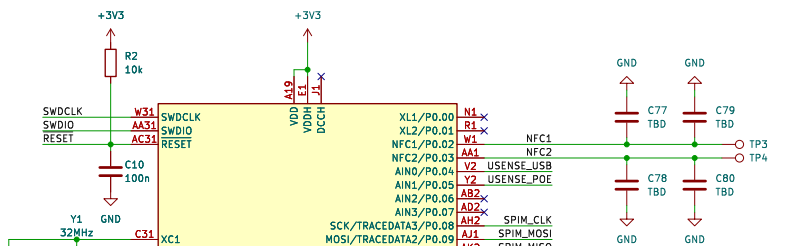
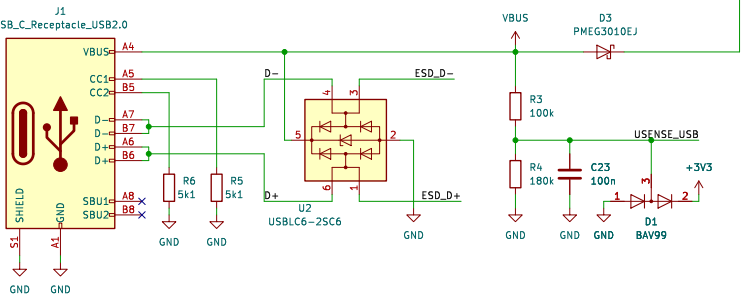
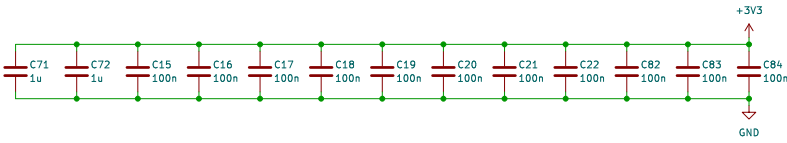
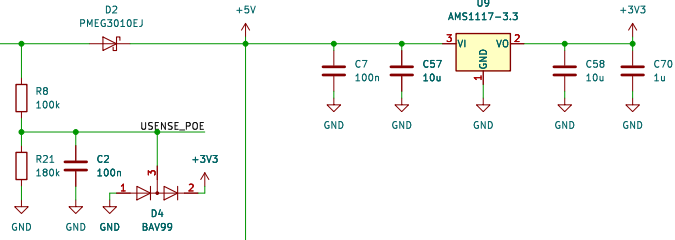
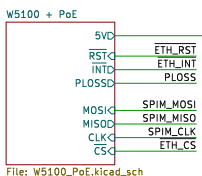
Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam zkratky
IoT	Internet of Things
DPS	Deska plošných spojů
SBC	Single Board Computer
SoC	System on Chip
BLE	Bluetooth Low Energy
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
ARP	Address Resolution Protocol
MAC	Media Access Control
LAN	Local Area Network
WAN	Wide Area Network
PAN	Personal Area Network
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
USB	Universal Serial Bus
PoE	Power over Ethernet
NFC	Near Field Communication
SPI	Serial Peripheral Interface
QSPI	Quad Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
ADC	Analog-Digital Converter
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
FEM	Front End Module
RTOS	Real Time Operating System
SDK	Software Development Kit
RAM	Random Access Memory
ESD	Electro-Static Discharge
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

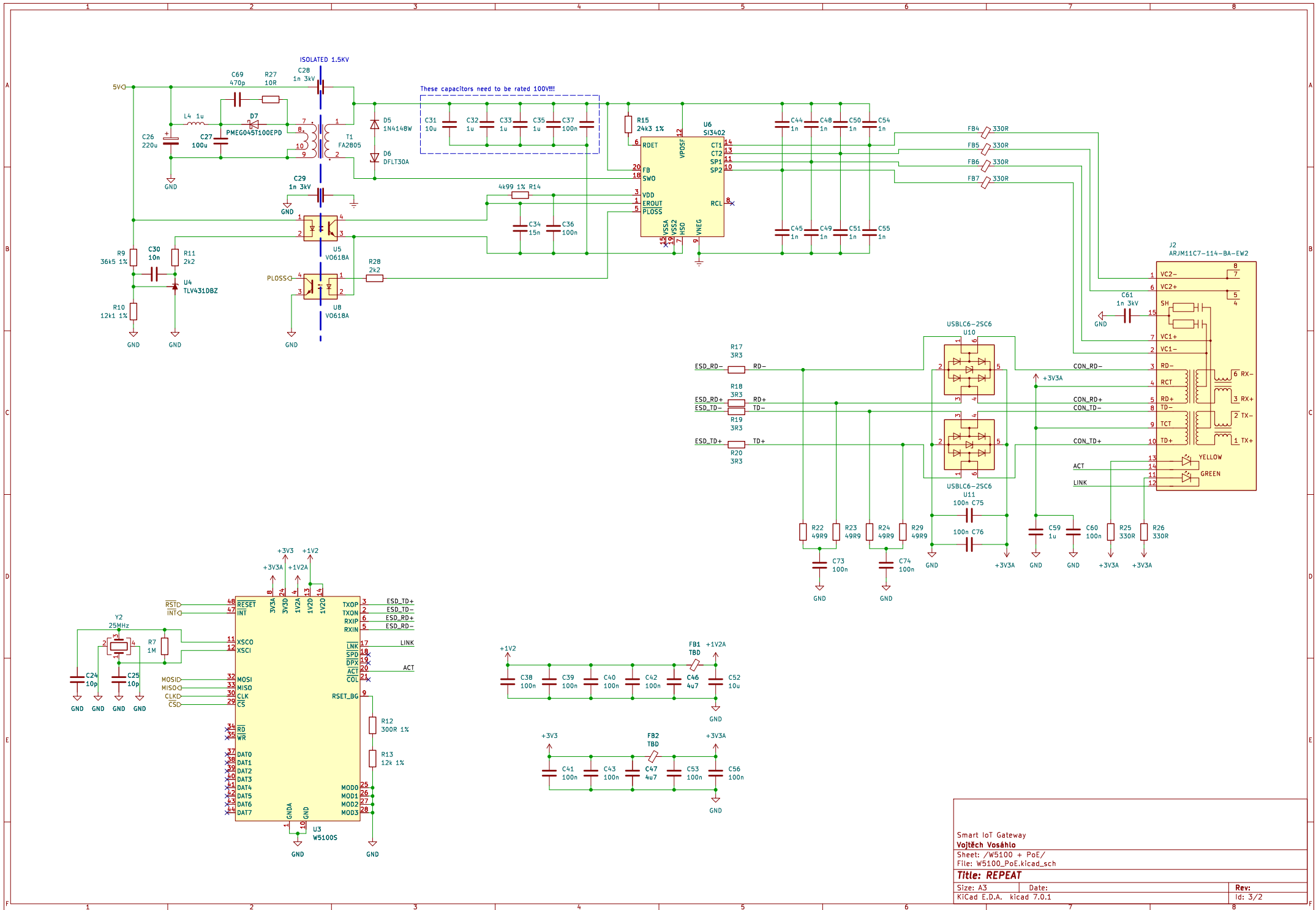


Příloha C

Schéma zařízení



Smart IoT Gateway			
Vojtěch Voshlo			
Sheet: /			
File: repeat-hw.kicad_sch			
Title: REPEAT			
Size: A3	Date:	Rev: 1.0.0	
KiCad E.D.A.	kicad 7.0.1	Id: 1/2	



Smart IoT Gateway		
Vojtěch Vosáhlo		
Sheet: /W5100 + PoE/		
File: W5100_PoE.kicad_sch		
Title: REPEAT		
Size: A3	Date:	Rev:
KiCad E.D.A.	kicad 7.0.1	Id: 3/2