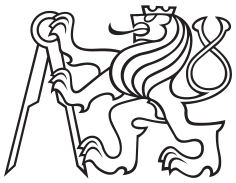
Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Bezdrátové zařízení pro přenos zvukového signálu

Tomáš Koudelka

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Květen 2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koudelka** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **510666**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**

Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Bezdrátové zařízení pro přenos zvukového signálu

Název bakalářské práce anglicky:

A Wireless Device for Transmitting an Audio Signal

Pokyny pro vypracování:

Úkolem práce je návrh systému pro bezdrátový přenos zvukového signálu snímaného mikrofonem s následujícími požadavky: srozumitelně a spolehlivě snímat a přenášet komunikaci minimálně dvou lidí v místnosti o velikosti cca 25m2 s minimálními požadavky na prostorové umístění. Zařízení musí být schopno na povel nebo samostatně iniciovat a uskutečnit přenos signálu pomocí komunikační sítě 4G (obousměrná komunikace). Modul bude napájen baterií s výdrží min. jednotek dnů při velikosti modulu srovnatelné s velikostí baterie Li-Pol cca 1200mAh.
Proveďte rešerši vhodných obvodových prvků pro daný účel a navrhněte elektrické zapojení hardwarové části včetně DPS. Dále navrhněte ovládací software pro daný účel. Dle možností realizujte funkční vzorek modulu a ověřte jeho funkci a parametry.

Seznam doporučené literatury:

[1] KRČMÁŘ, Petr. Mobilní sítě 2G tu s námi budou minimálně do roku 2028. In: Root [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z https://www.root.cz/zpravicky/mobilni-site-2g-tu-s-nami-budou-minimalne-do-roku-2028/
[2] Quectel: komunikační moduly [online], [cit. 2024-1-29]. Dostupné z: https://www.quectel.com/
[3] Simcom: komunikační moduly [online], [cit. 2024-1-29]. Dostupné z: https://en.simcom.com/

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka katedra teorie obvodů FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka podpis vedoucí(ho) práce	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

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi za jeho pomoc, věcné připomínky a umožnění zpracování vlastního tématu. Dále děkuji zadavateli společnosti SHX Trading s. r. o. za uhrazení nákladů a za možnost být součástí vývoje nových zařízení.

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 dne 20. 5. 2024

.....

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem bezdrátového zařízení pro přenos zvukového signálu v síti čtvrté generace. Vzhledem k postupnému vypínání v bezpečností technice stále využívaných sítí druhé generace bude do budoucna nutné zajistit přechod směrem k 4G či 5G. Na základě provedené rešerše byl zvolen komunikační modul SIM7600 od společnosti SIMCom, od kterého se dále dle definovaných požadavků odvíjí návrh elektrického schématu a desky plošných spojů. Po dokončení hardwarové části byl v rámci vývojového prostředí STM32CubeIde vytvořen základ řídicího firmwaru mikrokontroléru řady STM32. Výsledkem práce je prototyp 4G odposlechu, který byl otestován z hlediska funkčních požadavků a technických parametrů, a který již v současném stavu překonává svou funkcionalitou a nízkou spotřebou komerčně dostupná 2G zařízení. Závěrem jsou zmíněny návrhy k vylepšení a nastíněn možný budoucí vývoj.

Klíčová slova: odposlech, špionážní technika, 4G, LTE, komunikační modul, STM32, audio kodek, návrh DPS

Abstract

Bachelor's thesis deals with the design of a wireless device for audio signal transmission in a fourth-generation network. Due to the gradual shutdown of second-generation networks, still used in security technology, it will be necessary to ensure a transition towards 4G or 5G in the future. Based on the research conducted, the SIM7600 communication module from SIMCom was selected, from which the design of the electrical schematic and printed circuit board was developed according to defined requirements. After completing the hardware part, the basic control firmware for the STM32 microcontroller series was created within the STM32CubeIde development environment. The result of the work is a prototype of a 4G listening device, which has been tested for functional requirements and technical parameters, and already in its current state surpasses commercially available 2G devices in terms of functionality and low power consumption. Finally, suggestions for improvements and possible future developments are outlined.

Keywords: spybug, spy technology, 4G, LTE, cellular module, STM32, audio codec, PCB design

Obsah

1 Úvod **1**

2 Teoretický rozbor **3**
2.1 Síť 4G 3
2.2 Koncept zařízení a funkční požadavky 5
2.3 Bloková struktura zařízení 6
2.4 Rešerše a výběr obvodových prvků 7
2.4.1 Komunikační modul 7
2.4.2 Mikrokontrolér 10

3 Elektrické schéma **13**
3.1 Napájení 13
3.2 Komunikační modul SIM7600 . . 15
3.3 Audio kodek NAU8810 18
3.4 Mikrokontrolér STM32 19
3.5 Zvuková detekce 20

4 Deska plošných spojů **23**
4.1 Rozložení komponent 24
4.2 Impedačně přizpůsobený spoj . . 27
4.3 Výsledná deska plošných spojů . 29

5 Firmware mikrokontroléru STM32 **31**
5.1 Vývojový diagram 31
5.2 UART komunikace 33
5.3 Konfigurace periferií 35
5.4 Finální běh programu 37

6 Vyhodnocení **45**
6.1 Chyba v návrhu DPS 45
6.2 Funkce zařízení 46
6.3 Kvalita zvuku a test zvukové detekce 48
6.4 Spotřeba zařízení 50
6.5 Porovnání s komerčním 2G odposlechem 51
6.6 Možné vylepšení a úpravy 51

7 Závěr **53**

Literatura **55**

Obrázky

2.1 Koncept MIMO komunikace [38]. 4
2.2 Mapa pokrytí sítí 4G v České republice [39]. 4
2.3 Odposlech LONGLIFE 20 PRO K+ [40]. 5
2.4 Bloková struktura zařízení. 7
2.5 Vývojový kit s komunikačním modulem SIM7600 [41]. 10
2.6 Vývojová deska NUCLEO-L152RE [42]. 11

3.1 Bloková struktura elektrického schématu. 13
3.2 Elektrické schéma napájecí části zařízení. 14
3.3 Elektrické schéma zapojení komunikačního modulu SIM7600. . 17
3.4 Elektrické schéma obvodů souvisejících s komunikačním modulem SIM7600. 18
3.5 Elektrické schéma zapojení audio kodeku NAU8810. 19
3.6 Elektrické schéma zapojení mikrokontroléru STM32. 20
3.7 Elektrické schéma zvukové deteke. 21

4.1 Svrchní strana desky plošných spojů. 25
4.2 3D model svrchní strany desky plošných spojů. 25
4.3 Spodní strana desky plošných spojů. 26
4.4 3D model spodní strany desky plošných spojů. 26
4.5 Porovnání mikropásku, koplanárního vlnovodu a stripline [43]. 27
4.6 Online nástroj pro výpočet šířky impedančně přizpůsobeného spoje. 28
4.7 Vysokofrekvenční část desky plošných spojů. 28
4.8 Svrchní část osazené desky plošných spojů. 29
4.9 Spodní část osazené desky plošných spojů. 29

5.1 Vývojový diagram firmwaru mikrokontroléru STM32. 32
5.2 Konfigurované piny mikrokontroléru STM32. 36

6.1 Pouzdra spínacích MOSFETů. . . 45
6.2 Výsledný vzhled 4G odposlechu. 46
6.3 Výsledný vzhled 4G odposlechu. 47
6.4 Časový průběh vstupního a výstupního signálu audio kodeku NAU8810. 49
6.5 Detailní časový průběh pulzní kódové modulace. 49
6.6 Časový průběh signálů zvukové detekce. 50

Tabulky

2.1 Přehled komunikačních modulů. . 9

4.1 Nadefinované šířky cest desky plošných spojů. 24

6.1 Proudový odběr zařízení v jednotlivých režimech. 51

6.2 Porovnání zařízení s komerčním 2G odposlechem. 51

Kapitola 1
Úvod

Bezpečností technika hraje v moderní společnosti zásadní roli. Na její neustálé inovaci stojí bezpečnost státu, infrastruktury i občanů. Samostatné odvětví tvoří technika špionážní. Ta slouží ke skrytému monitorování prostor, vozidel či zájmových osob. Využití nachází při prevenci kriminality nebo rozkrývání organizovaného zločinu. Nejčastěji se jedná o zařízení poskytující skrytý audio či video přenos. Do první kategorie patří bezdrátová zařízení pro přenos zvukového signálu.

Úkolem takových zařízení je zprostředkovávat audio přenos z monitorovaného prostoru. Kromě živého odposlechu dokáží některá ukládat záznam nebo iniciovat přenos na základě vnějších vlivů. Společným znakem bývá zpravidla napájení z vlastního akumulátoru a bezdrátový přenos. Ten je nejčastěji uskutečňován skrz mobilní síť nebo Wi-Fi, které zaručují spojení na globální úrovni. V současnosti málo využívané jsou technologie Bluetooth nebo RF, které jsou omezeny na vzdálenost maximálně desítek metrů. Vzhledem k potřebě monitorování objektů či vozidel, která nejsou pokryta sítí Wi-Fi, je stále nejpoužívanější technologií mobilní síť.

Pomineme-li profesionální vybavení užívané státními složkami, nejvíce běžně dostupných zařízení využívá stále mobilní síť druhé generace (2G). Ta má i po 28 letech své existence v České republice stále své místo. Přestože všichni tři operátoři již vypnuli své sítě třetí generace, 2G zůstává stále v provozu a bude tomu tak minimálně do roku 2028 [1]. Nepostradatelná je především pro uživatele starších mobilních telefonů, ale i pro velkou část moderních smartphonů z důvodu nedostatečné podpory VoLTE (Voice over LTE) ze strany operátorů [1]. V jiných částech světa je ovšem situace rozdílná. Zejména mimo Evropu již v řadě států došlo k úplnému vypnutí sítě 2G. Takovým příkladem jsou Spojené státy Americké, Japonsko, Singapur, Thajsko a další [2]. I v České republice se tedy musíme postupně připravit na okamžik, kdy dojde k úplnému vypnutí této sítě a veškerá komunikace bude přesunuta na novější sítě čtvrté (4G) a páté generace (5G).

Cílem této práce je navrhnout funkční vzorek 4G zařízení pro přenos zvukového signálu, ověřit jeho funkci a parametry. Zařízení by mělo srozumitelně a spolehlivě snímat a přenášet komunikaci minimálně dvou osob v místnosti o velikosti cca 25 m^2 s minimálními požadavky na prostorové umístění. Dále musí být schopno na povel nebo samostatně iniciovat a uskutečnit přenos sig-

nálu pomocí komunikační sítě 4G. Napájení má být zajištěno akumulátorem Li-Pol s výdrží minimálně jednotek dnů v klidovém režimu.

První kapitola práce uvádí obecné informace o 4G síti, zároveň jsou definovány funkční požadavky, bloková struktura zařízení a provedena rešerše a výběr vhodných obvodových prvků pro daný účel. Speciální pozornost je věnována výběru 4G komunikačního modulu. Od druhé kapitoly se práce zabývá praktickým návrhem. V kapitole 2 je detailně popsán každý blok zařízení, z jakých elektrických komponent se skládá a jaké je jejich zapojení. Po tvorbě schématu následuje v rámci třetí kapitoly návrh desky plošných spojů s důrazem na aplikovaná pravidla, zejména rozložení komponent a návrh impedančně přizpůsobeného spoje antény. Čtvrtá kapitola stručněji popisuje kostru řídicího firmwaru mikrokontroléru od vývojového diagramu po finální běh programu. V poslední páté kapitole je zařízení otestováno z hlediska funkčnosti včetně měření reálných parametrů v jednotlivých režimech, zároveň je diskutována možnost praktického využití, možné vylepšení a úpravy.

Kapitola 2
Teoretický rozbor

2.1 Síť 4G

Zkratka 4G označuje čtvrtou generaci mobilních sítí. Tento standard byl definován Mezinárodní telekomunikační unií (ITU) v roce 2008 a specifikuje klíčové vlastnosti, včetně přenosové technologie a datových rychlostí [3]. Oproti předchozím generacím nabízí rychlejší datový přenos až 1 Gbit/s ve směru downlink, nižší latenci a efektivnější využití rádiového spektra [4]. To je zajištěno využitím technologií MIMO (Multiple Input Multiple Output) a OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [3].

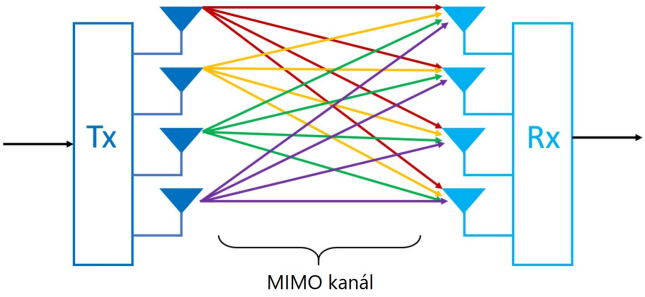
MIMO je architektura, která využívá více vysílacích a přijímacích antén k zajištění vícecestného šíření rádiového signálu na stejném kanálu [5] 2.1. Zařízení přijímají a kombinují několik stejných datových toků, které jsou různě časově zpožděné [5]. Odražené vlny způsobující interferenci v případě systémů s jedinou anténou je možné využít ke zlepšení kvality a síly přijímaného signálu, což je výhodné především v zastavěných oblastech, kde dochází k několikanásobným odrazům [5]. Technologie MIMO umožňuje dosáhnout vyšší přenosové rychlosti při zachování šířky pásma, snížit chybovost a efektivněji využít rádiové spektrum [5].

OFDMA vychází z metody OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), která zprostředkovává přenos na více nosných frekvencích a kombinuje časový a frekvenční multiplex [6]. Frekvenční pásmo je rozděleno do několika subnosných frekvencí, které jsou modulovány tak, aby spektra signálů jednotlivých subnosných byla vzájemně ortogonální, tedy maximum spektra jedné subnosné se překrývá s minimy ostatních [6]. Díky tomu je možné umístit subnosné blízko sebe, čímž se frekvenční pásmo využije efektivněji než u frekvenčního multiplexu (FDMA) [6]. Každá subnosná je dále rozdělena v časové oblasti, kdy každý uživatel má přidělený časový slot, ve kterém může přenášet data [6]. Ve výsledku je celé pásmo rozděleno jak v časové, tak frekvenční oblasti mezi více uživatelů [6].

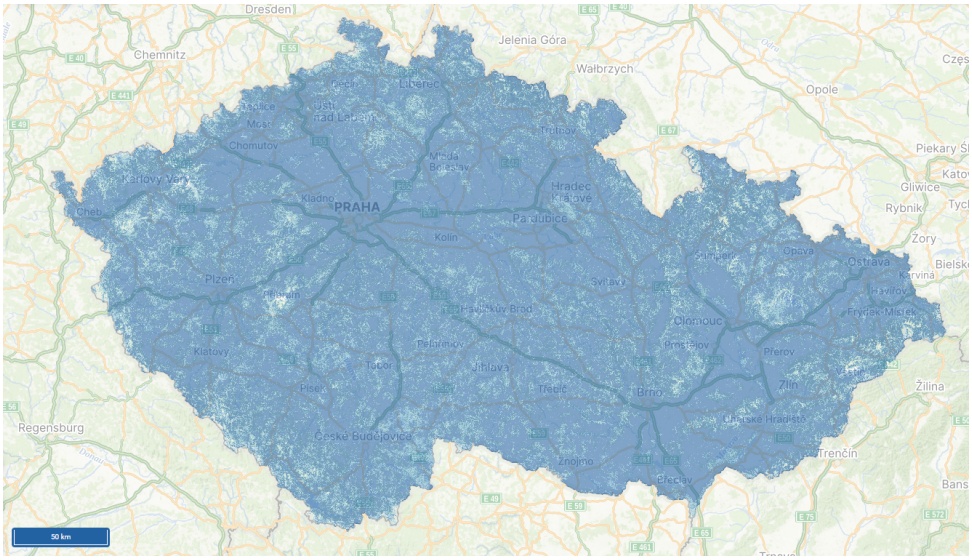
Pod pojmem 4G bývá prezentována technologie LTE (Long Term Evolution). Ta vznikla s cílem usnadnit přechod od 3G, svojí teoretickou přenosovou rychlostí 100 Mbit/s ovšem 4G standard, jak byl definovaný, nesplňuje [3]. V České republice bylo LTE experimentálně nasazeno od roku 2012, celoplošné budování ale začalo až v roce 2014 [7]. V následujících letech docházelo k nárůstu

teoretické přenosové rychlosti směrem k nástupci LTE, kterým je technologie LTE-A (LTE-Advanced), která již splňuje požadavky standardu 4G [3]. Dle dat Českého telekomunikačního úřadu pokrývá v současnosti 4G 99 % obyvatel České republiky [8] 2.2.

Právě dobré pokrytí bylo jedním z faktorů při výběru bezdrátové technologie. Nejnovější 5G sice slibuje až gigabitové přenosové rychlosti, ale zejména v odlehlejších oblastech České republiky nemá pokrytí. Datový tok hovoru se navíc pohybuje okolo desítek kbit/s, tedy mnohem důležitější je dostupnost signálu. Ideální kombinací se ukázala právě síť 4G, která se i přes masivní rozvoj 5G teprve stává globálním standardem.



Obrázek 2.1: Koncept MIMO komunikace [38].



Obrázek 2.2: Mapa pokrytí sítí 4G v České republice [39].

2.2 Koncept zařízení a funkční požadavky

Cílem tohoto projektu je vytvořit funkční vzorek 4G odposlechu, který by v budoucnosti nahradil zařízení využívající síť 2G. Takovým příkladem je LONGLIFE 20 PRO K+ 2.3.

Obrázek 2.3: Odposlech LONGLIFE 20 PRO K+ [40].

LONGLIFE 20 PRO K+ je zařízení s integrovaným akumulátorem, který lze dobíjet pomocí micro USB portu, a externím mikrofonem pro snazší skrytou instalaci. Pro jeho aktivaci je nutné vložit SIM kartu a počkat na spojení se sítí indikované LED diodou. Poté je odposlech připraven k použití. Vytočením čísla SIM karty vložené do zařízení dojde k automatickému zvednutí hovoru a je možné poslouchat zvuky z okolí zařízení. Zasláním SMS daného formátu je možné aktivovat nebo deaktivovat zvukovou detekci. V případě aktivní detekce zařízení samo zavolá na zvolené telefonní číslo v případě, že detekuje hluk v okolí. Obdobným způsobem by měl fungovat i navrhovaný 4G odposlech, včetně některých dodatečných funkcí.

Navrhované zařízení musí splňovat určité požadavky. Ty vycházejí jednak ze zadání od společnosti SHX Trading s. r. o., která je zadavatelem tohoto projektu, jednak z autorovy praxe technika v oboru špionážní techniky. Mezi základní technické požadavky patří spotřeba, rozměry a kvalita zvuku.

Spotřeba je pro výsledné zařízení klíčová. Spolu s kapacitou akumulátoru ovlivňuje výdrž zařízení na jedno nabití, kterou je třeba maximalizovat. Toho je možné dosáhnout vyšší kapacitou akumulátoru za cenu větších rozměrů, nebo snížením spotřeby. Při aktivním hovoru závisí spotřeba na mnoha parametrech, jako je například síla signálu, a její velikost není možné přímo ovlivnit. U většiny odposlechů se pohybuje v rozmezí 100–250 mA. Naopak v režimu nečinnosti je třeba spotřebu snížit na absolutní možné minimum,

při zachování spojení se sítí. Proudový odběr se poté pohybuje řádově v jednotkách mA a odposlech je připraven okamžitě zareagovat na příchozí hovor. To je důležité zejména v situaci, kdy není možný častý vstup do monitorovaného prostoru za účelem dobití zařízení. Při návrhu je tedy třeba implementovat režim spánku takový, aby zařízení bylo schopné vydržet v režimu nečinnosti minimálně po dobu několika dnů.

Rozměry zařízení jsou důležité z hlediska možnosti skryté instalace v monitorovaném prostoru. Definovány jsou velikostí desky plošných spojů, a především velikostí akumulátoru. Zde je důležité najít vhodný kompromis mezi velikostí akumulátoru a výdrží. U většiny odposlechů nabízených společností Shx Trading s. r. o. je kladen důraz především na výdrž na úkor velikosti. I tak by ale zařízení mělo být diskrétní a navrhovaný plošný spoj by měl být rozměrově úsporný.

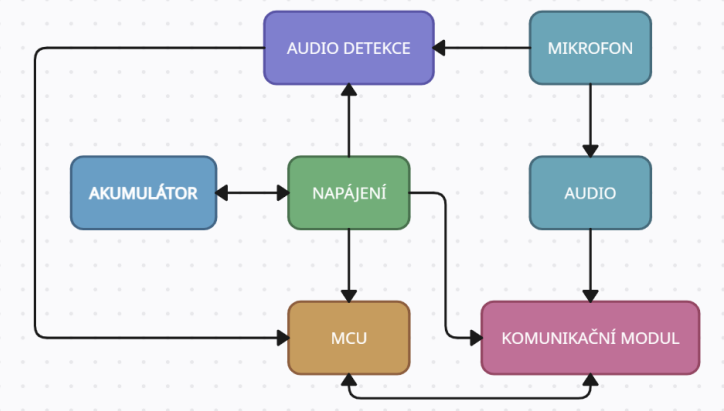
Nejdůležitějším technickým požadavkem je kvalita zvuku. Ta může být vyhodnocena jako souhrn několika parametrů. Mezi ně patří dostatečné zesílení, čistota zvuku, potlačení okolního hluku a další. Jako referenční byla zvolena místnost o velikosti 25 m^2, ze které musí odposlech srozumitelně přenést konverzaci dvou osob při měnící se hlasitosti rozhovoru.

Funkční požadavky vycházejí ze současných 2G odposlechů. Oproti LONG-LIFE 20 PRO K+ má zařízení implementovat několik dalších funkcí. První z nich je možnost nastavení zesílení během aktivního hovoru pomocí číselníku. To je výhodné především mění-li se úroveň hlasitosti v monitorovaném prostoru. Uživateli je umožněno nastavit zesílení přesně tak, aby byl zvuk srozumitelný a zároveň nebyl přebuzený a plechový. Druhou funkcí je detekce zvuku včetně nastavení detekční úrovně pomocí SMS příkazů. Nastavení detekční úrovně umožní přizpůsobit se podmínkám monitorovaného prostoru. U odposlechů, kde není možné nastavit úroveň detekce, dochází k falešné detekci například i na základě ruchu z vedlejší místnosti.

Souhrnně by zařízení mělo fungovat následujícím způsobem. Po vložení SIM karty dojde ke spojení se sítí indikované LED diodou. Následně zařízení přejde do režimu spánku, v němž minimalizuje svoji spotřebu a čeká na příchozí hovor. V případě příchozího hovoru hovor zvedne a na základě kódu z číselníku upravuje hlasitost odposlechu. Po ukončení hovoru opět přejde do režimu spánku. V případě aktivované zvukové detekce může opustit režim spánku i na základě překročení detekční úrovně. Poté následuje automatické vytočení telefonního čísla uživatele. V případě neaktivity zařízení vždy přechází do režimu spánku a redukuje svoji spotřebu.

2.3 Bloková struktura zařízení

Z důvodu lepší orientace při návrhu bylo zařízení rozděleno do několika bloků 2.4. Většina z nich bude integrována na desku plošných spojů, s výjimkou akumulátoru a mikrofonu. Ty jsou ve vývojovém diagramu pouze pro kompletnost a reprezentují pouze jednu komponentu.



Obrázek 2.4: Bloková struktura zařízení.

Prvním blokem je napájení, které zajišťuje jednak dobíjení akumulátoru pomocí standardního výstupního napětí USB portu včetně příslušných ochran, jednak stabilizované napájecí napětí pro ostatní bloky. V rámci napájení bude implementován také spínač, který na základě vsunutí/vysunutí SIM karty celé zařízení zapne/vypne. Dalším blokem je komunikační modul včetně jeho periferií. Ten zprostředkovává komunikaci mezi uživatelem a zařízením, zajišťuje hlasový hovor a zpracování SMS příkazů. S komunikačním modulem úzce souvisí audio část, jejímž úkolem je zpracovat audio signál z mikrofonu pro následný přenos. Mozkem celého zařízení je blok MCU (microcontroller unit), který reprezentuje mikrokontrolér a obvody potřebné pro jeho provoz. Na základě nahraného firmwaru řídí mikrokontrolér pomocí svých periferií chování celého zařízení. Posledním blokem je audio detekce, která snímá hladinu okolního hluku a při překročení nastavené detekční úrovně informuje mikrokontrolér.

2.4 Rešerše a výběr obvodových prvků

2.4.1 Komunikační modul

Nejdůležitějším obvodovým prvkem celého zařízení je komunikační modul. Ten musí splňovat určitá kritéria, na základě kterých budou vyhodnoceny jednotlivé možnosti. Většina z nich koreluje s požadavky, které byly definovány pro celé zařízení v předchozí části. Prvním z požadavků je možnost redukce spotřeby v režimu spánku. Proudový odběr komunikačního modulu se z velké většiny podílí na celkové spotřebě výsledného zařízení, proto je důležité vybrat variantu s nízkou energetickou náročností. Druhým kritériem jsou rozměry. Od nich se bude odvíjet velikost desky plošných spojů i celého zařízení, které by mělo zůstat v rámci možností diskrétní. Jak již bylo zmíněno, rozměry celého zařízení jsou definovány i velikostí zvoleného akumulátoru. V součtu se tedy vždy jedná o kompromis mezi spotřebou, potažmo výdrží na jedno nabití a velikostí. Dále musí komunikační modul disponovat zvukovým rozhraním, minimálně vstupem. Zvukový výstup nebude pro potřeby

odposlechu využitý. Vzhledem k plánovanému využití zařízení v různých regionech je nutné zajistit pokrytí. Hlavní destinací by měla být Evropa, případně Spojené státy Americké. Velkou výhodou by bylo globální pokrytí.

Z prvotní rešerše nabídky trhu vzešly tři hlavní společnosti zabývající se vývojem komunikačních modulů – Quectel, SIMCom, U-blox. Variant existuje mnohem více, ale ne všechny nabízejí dostatečnou technickou dokumentaci, maloobjemový prodej či technickou podporu.

Jako první byla prohledána nabídka společnosti Quectel. Zpočátku velmi slibně vypadající EG800Q se spotřebou 1,1 mA v režimu spánku, rozměry 15,8 x 17,7 mm a možností pokrytí v předpokládaných regionech, byl nakonec zamítnut po bližším pročtení technického listu [9]. Pouze malá poznámka pod čarou zmiňovala, že modul je stále ve vývoji a zvukové rozhraní není dosud dokončené [9]. Na základě této zkušenosti byla následně věnována větší pozornost studování technických listů jednotlivých modulů. S ohledem na definovaná kritéria byly z nabídky zvoleny 3 možnosti k dalšímu porovnání – EG912Y, EG915U a EG912U. EG912Y s rozměry 29 x 25 mm disponuje spotřebou v režimu spánku 1,8 mA [10], EG915U s rozměry 23,6 x 19,9 mm 3,5 mA [11]. Oba moduly jsou dostupné pouze ve variantě EU a nabízejí analogové zvukové rozhraní. EG912U je další z řady EG912x, tedy je velmi podobný EG912Y, včetně rozměrů a spotřeby v režimu spánku [12]. Odlišností je možnost verze GL, tedy globálního pokrytí [12].

Společnost U-blox nabízí tři výrobní řady 4G komunikačních modulů – LEXI R10, LARA R6, LENA R8. První dvě byly postupně zamítnuty. LEXI R10 nedisponuje zvukovým rozhraním [13], LARA R6 nabízí zvukové rozhraní, ale byla vyřazena na základě vysoké ceny přes 100 dolarů [14]. LENA R8 s rozměry 30 mm x 27 mm, spotřebou v režimu spánku 1,2 mA, globálním pokrytím a digitálním zvukovým rozhraním, byla zvolena jako jedna z možných variant [15].

Nabídka společnosti SIMCom otevřela další nové možnosti. Dle požadavků byly zvoleny dvě – A7672 a SIM7600. A7672 nabízí menší pouzdro o rozměrech 24 x 24 mm, spotřebu v režimu spánku 2,5 mA, globální pokrytí a analogové zvukové rozhraní [16]. Větší SIM7600 s rozměry 30 x 30 mm poskytuje globální pokrytí, spotřebu v režimu spánku 2,3 mA a digitální zvukové rozhraní [17]. Výhodou společnosti SIMCom je velmi dobrá dostupnost technických materiálů.

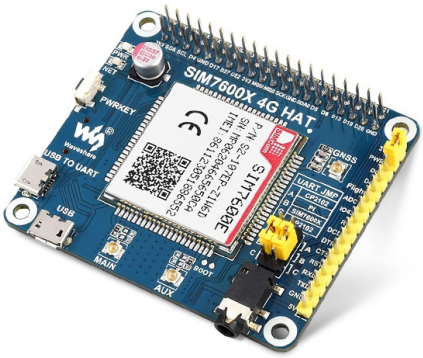
Přehled zvolených modulů nabízí tabulka 2.1, do které bylo navíc přidáno kritérium dostupnost na trhu. Některé moduly jsou velmi dobře dostupné od místních, případně evropských dodavatelů, někde zůstávají jedinou možností čínští dodavatelé z platforem Aliexpress případně Alibaba. Po konzultaci se zadavatelem bylo rozhodnuto zaměřit se pouze na moduly, které nabízejí globální pokrytí. Nejistá dostupnost modulů EG912U a LARA R8 rozhodla ve prospěch modulů od společnosti SIMCom. V tuto chvíli bylo nutné rozhodnout mezi analogovým a digitálním zvukovým rozhraním. Kvalita zvuku je pro výsledné zařízení pravděpodobně nejdůležitějším parametrem. Hlavní výhodou analogového řešení je jednoduchost implementace. Odpadá nutnost externího převodu analogového signálu na digitální, důležité je ovšem navrhnout dobrý

nízkošumový zesilovač, což může přinést další komplikace. Také návrh desky plošných spojů se stává komplikovanější z důvodu náchylnosti analogového signálu k zarušení od ostatních komponent. Zde vyvstává zásadní výhoda digitálního zvukového rozhraní. Celý proces zesílení, filtrace a digitálního převodu je řešen v rámci jednoho integrovaného obvodu – audio kodeku. To zásadně zlepšuje šumové parametry a ulehčuje proces rozmístění vodivých cest na desce plošných spojů. Zároveň se otevírají nové možnosti pomocí digitálního zpracování zvuku. Nevýhodou je složitější implementace, kdy kromě hardwarového návrhu je třeba vyřešit i řízení kodeku v softwarové části. Výsledné kvalita zvuku by však mohla být znatelně lepší. Výhody digitálního zvukového rozhraní spolu s dobrou dostupností samotného modulu i technické dokumentace rozhodly ve prospěch modulu SIM7600. Učiněným kompromisem jsou rozměry – SIM7600 je ze všech modulů největší, čímž se zvětší i výsledná deska plošných spojů a zhorší možnost skryté instalace. U odposlechů dostupných od společnosti SHX Trading s. r. o. je však kladen důraz spíše na kvalitu zvuku a výdrž na jedno nabití. Velikost zařízení je často definovaná spíše velikostí akumulátoru a za cenu větších rozměrů a lepší výdrže je osazeno větším akumulátorem, než je samotná deska plošných spojů.

Tabulka 2.1: Přehled komunikačních modulů.

Modul	Rozměry (mm)	Spotřeba ve spánku (mA)	Zvukové rozhraní	Pokrytí	Dostupnost
EG912Y	29 x 25	1,8	analogové	EU	dobrá
EG915Y	23,6 x 19,9	3,5	analogové	EU	dobrá
EG912U	29 x 25	1,8	analogové	GL	špatná
LARA R8	30 x 27	1,2	digitální	GL	nejistá
A7672	24 x 24	2,5	analogové	GL	dobrá
SIM7600	30 x 30	2,3	digitální	GL	dobrá

Po dokončení rešerše byl zakoupen vývojový kit od společnosti WaveShare, který implementuje samotný modul SIM7600 včetně audio kodeku NAU8810 [18] 2.5. Na vývojovém kitu byla otestována základní komunikace s modulem pomocí AT příkazů přes rozhraní UART, registrace k síti 4G, spotřeba v režimu spánku a proveden testovací hovor. Pomocí rozhraní I2C bylo otestováno řízení audio kodeku NAU8810, který nabízí velké množství nastavení k odladění kvality zvuku, která byla již při výchozím nastavení poměrně dobrá. Tento test prokázal vhodnost vybraného modulu SIM7600. S komunikačním modulem úzce souvisí výběr audio kodeku. Sám výrobce v technickém listu doporučuje kodek NAU8810 [17], který byl osazen i na zakoupeném vývojovém kitu od společnosti WaveShare. Kodek nabízí mnoho funkcí jako 5pásmový ekvalizér, automatické zesílení, šumové potlačení, programovatelné zesílení a standardní PCM nebo I2S zvukové rozhraní. Integrovaný je diferenciální vstup pro mikrofon s mnohastupňovým nastavením zesílení a headset výstup. Vzhledem k dobré dostupnosti a velké variabilitě nastavení bude využitý i pro navrhovaný odposlech.



Obrázek 2.5: Vývojový kit s komunikačním modulem SIM7600 [41].

2.4.2 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér na základě instrukcí řídí pomocí svých periferií chování ostatních bloků. Jeho správná volba je pro výsledné zařízení stejně důležitá jako volba 4G komunikačního modulu. Výrobců mikrokontrolérů existuje celá řada jako například Texas Instruments, STMicroelectronics, Microchip a další. Každý z nich nabízí dále několik vývojových řad, které jsou uzpůsobeny typu použití od nízkopříkonových po vysocevýkonné. Mezi základní druhy mikrokontrolérů patří rodiny PIC, AVR, ARM [19]. Ty se vzájemně liší architekturou, rychlostí, dostupnou pamětí, dostupnými periferiemi a dalšími parametry [19]. Každá z rodin má své specifické použití a výběr závisí především na aplikaci a preferenci uživatele.

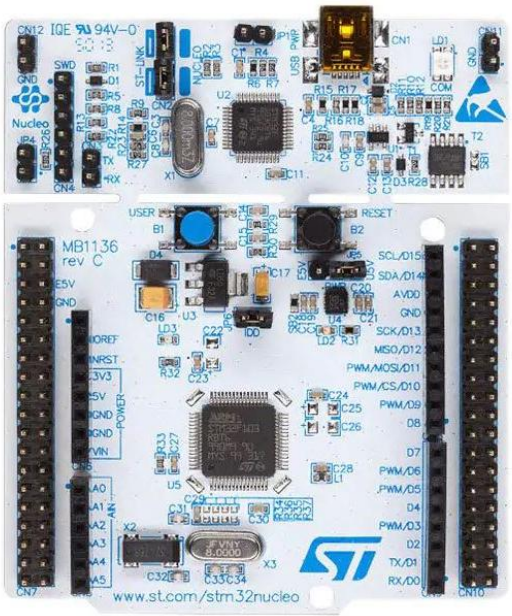
Populární volbu mezi hobby vývojáři tvoří platforma Arduino, především díky jednoduchosti při návrhu prototypů. Uživateli je k dispozici velké množství materiálů, vytvořených knihoven i dobrá komunitní podpora. Uživatelsky přívětivý programovací jazyk platformy Arduino je založen na jazyce Wiring a je implementován v C/C++ [20]. Programování mikrokontrolérů na úrovni jazyka Arduino nabízí možnost rychlého prototypování, nevýhodou je však menší kontrola nad hardwarovou částí a nižší rychlost takto napsaného firmwaru. Z tohoto důvodu byla možnost platformy Arduino ve spojení s populárními mikrokontroléry Atmega, případě ESP32, zamítnuta.

Vzhledem k malým předchozím zkušenostem s programováním mikrokontrolérů na nižší úrovni byla provedena rešerše ohledně současných trendů. Výsledkem této rešerše byla volba mikrokontroléru STM32 založeném na procesoru ARM-Cortex M od výrobce STMicroelectronic. Mikrokontroléry STM32 jsou hojně využívané v různých odvětvích a díky své spolehlivosti, výkonu a variabilitě se stávají špičkou v automobilovém průmyslu, automatizaci i nositelné elektronice [21]. Výrobce nabízí své vlastní vývojové prostředí STM32CubeIDE, dostupné jsou online výukové kurzy, knihy i široká komunita [21]. Programovacím jazykem je standardně C/C++, případně Assembler, což umožňuje vysokou kontrolu nad hardwarovou částí.

Rodina STM32 nabízí 4 základní vývojové řady – High Performance, Mainstream, Ultra-low-power a Wireless [22]. Potřeby navrhovaného zařízení nejlépe vystihuje řada Ultra-low-power. Ta zajišťuje dostatečný výkon pro potřeby komunikace s komunikačním modulem, ovládání I/O (Input/Output) pinů a dalších periferií a nabízí možnost několika režimů spánku až po ultra nízkou spotřebu v řádech mikroampér. Základní řady tvoří STM32L0, STM32L1 a STM32L4 [22]. Ty v součtu nabízejí více než 300 různých mikrokontrolérů, které se liší velikostí, pouzdrem, velikostí paměti i integrovanými periferiemi.

Navrhované zařízení neukládá mikrokontroléru kromě nízké spotřeby příliš přísné požadavky. Z hlediska integrovaných periferií je požadováno UART rozhraní pro komunikaci s 4G modulem, to ovšem splňuje většina mikrokontrolérů STM32. Volba konkrétního mikrokontroléru byla provedena na základě nabídky dodavatele LCSC. Zde byly k dalšímu porovnání zobrazeny pouze mikrokontroléry s dostupnou Flash pamětí alespoň 64 kB a maximálními rozměry 7 x 7 mm. Po prostudování technických listů byl zvolen STM32L151C8T6A. Jedná se o mikrokontrolér založený na procesoru Cortex-M3 s dostupnou Flash pamětí 127 kB v pouzdru LQFP48 7 x 7 mm [23]. Rozsah napájecího napětí je 1,65–3,6 V a nabízené režimy spánku umožňují redukovat spotřebu až pod úroveň 1 μA [23]. Zároveň mikrokontrolér integruje ADC převodník, DAC převodník, low-power komparátory, USB, UART, SPI i I2C rozhraní [23].

Pro seznámení s mikrokontroléry STM32, jejich vývojovým prostředím a programováním byl zakoupen vývojový kit NUCLEO-L152RE od společnosti STMicroelectronic 2.6. Ten obsahuje samotný mikrokontrolér i integrovaný programátor v rámci stejného plošného spoje.



Obrázek 2.6: Vývojová deska NUCLEO-L152RE [42].

Kapitola 3

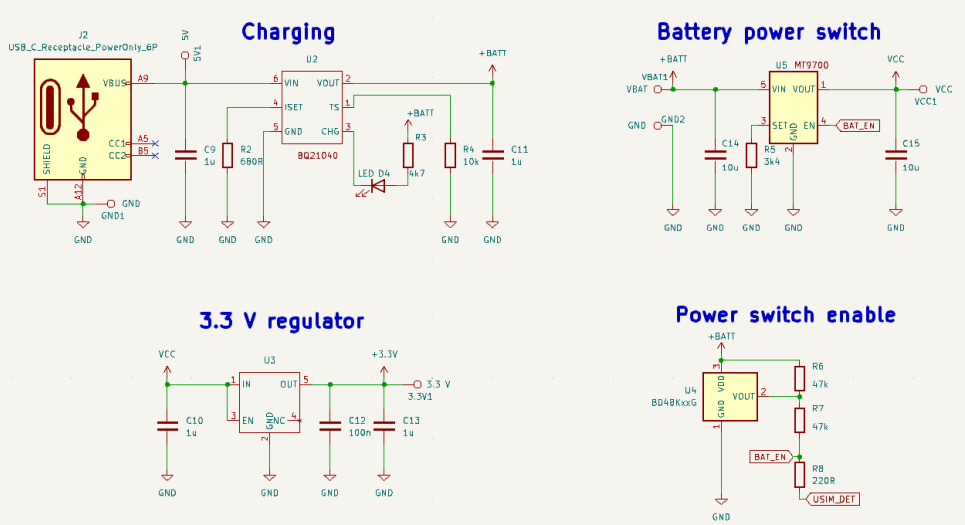
Elektrické schéma

Pro tvorbu elektrického schématu a návrh desky plošných spojů byl použitý program KiCad. Jedná se o volně dostupný software, který je zcela zdarma, bez limitů funkčnosti a nabízí širokou škálu možností. Elektrické schéma vychází z blokové struktury definované v rámci první kapitoly, kdy každý list reprezentuje jiný blok zařízení. Z důvodu lepší přehlednosti byl navíc blok komunikačního modulu rozdělen do dvou listů – SIM7600 a SIM7600_circuits 3.1.

Obrázek 3.1: Bloková struktura elektrického schématu.

3.1 Napájení

Prvním navrhovaným blokem je napájecí část, jejíž schematické zapojení je zobrazeno na obrázku 3.2. Ta má zajistit dobíjení akumulátoru, spínání celého zařízení a stabilní regulované napětí 3,3 V.



Obrázek 3.2: Elektrické schéma napájecí části zařízení.

Prvním obvodem napájecí části je nabíjení. Pro potřeby zařízení napájeného z akumulátoru je třeba zajistit jeho dobíjení. Pro tento účel byl navrženo zapojení založené na integrovaném obvodu BQ21040. Jedná se o nabíječku pro jeden článek akumulátoru typu Li-Ion nebo Li-Pol. Technický list uvádí až 1% přesnost nabíjecího napětí a 10% přesnost nabíjecího proudu, jehož velikost lze nastavit pomocí externího rezistoru až do 0,8 A [24]. Akumulátor je nabíjen ve 2 fázích, nejprve v režimu konstantního proudu, poté v režimu konstantního napětí [24]. Integrovaný obvod dále implementuje ochranu proti přepětí nad 6,6 V, vypnutí zařízení v případě překročení teploty 150 °C, ochranu proti zkratu a možnost sledování teploty nabíjeného článku pomocí termistoru NTC [24].

Vstupní napájecí napětí 5 V je přivedeno na pin VIN a GND pomocí konektoru USB-C, z něhož jsou využité pouze napájecí piny, nikoliv datové. Blízko integrovaného obvodu budou na plošném spoji umístěny decoupling kondenzátory C9 a C11 sloužící jako lokální zdroj energie pro pokrytí impulzních proudů. Rezistor R2 slouží k nastavení maximálního nabíjecího proudu, který je v tomto případě nastaven na maximální možnou hodnotu 800 mA. V technickém listu BQ21040 je uveden postup výpočtu v případě jiné požadované hodnoty nabíjecího proudu, kdy nejnižší možný proud je 50 mA (R2 = 10,8 kΩ) a nejvyšší možný 800 mA (R2 = 675 Ω) [24]. Zde byla využita nejbližší hodnota řady E12, tedy 680 Ω. LED dioda D4 rozsvícením indikuje stav nabíjení, její maximální proud je omezen rezistorem R3 na zhruba 0,5 mA. Pin TS je uzemněn skrz rezistor R4, jehož hodnota vychází z doporučení technického listu v případě nevyužití funkce sledování teploty akumulátoru.

K napájení mikrokontroléru, audio kodeku, zvukové detekce i dalších menších obvodů je implementován lineární stabilizátor napětí U3 spolu s blokovacími kondenzátory C10, C12 a C13. Z hlediska účinnosti by vzhledem k napájení z akumulátoru byl lepší volbou spínaný měnič Buck converter. Rušení spínaného měniče vzniklé při spínání tranzistorů by však mohlo

představovat velký problém pro audio část zařízení. Ve snaze minimalizovat neúčinnost byl vybrán lineární regulátor GS2302 s nízkým vstupním klidovým proudem 40 μA a nízkým úbytkem napětí přechodu 42 mV při 100 mA [25].

Poslední částí napájení je napájecí spínač, který zajišťuje zapnutí/vypnutí celého zařízení na základě přítomnosti SIM karty ve slotu. Sloty zpravidla obsahují pin CD (Card Detection), který je normálně spojen s pinem GND. V okamžiku vsunutí SIM karty dojde k mechanickému rozepnutí kontaktu a pin CD se stává plovoucím. Pro spínání byl zvolen integrovaný obvod MT9700, který kromě výkonového MOSFETU typu P integruje také jeho budič včetně podpěťové ochrany a nastavitelného maximálního výstupního proudu [26]. Opět byl zvolen integrovaný obvod s nízkým napájecím proudem pouze 15 μA v sepnutém stavu [26]. Jeho vstup je připojen přímo na akumulátor a na vstupu i výstupu se nacházejí decoupling kondenzátory C14 a C15. Rezistor R5 určuje maximální výstupní proud před zásahem ochrany. Podle tabulky v technickém listu výrobce byl zvolen rezistor o hodnotě 3,4 kΩ odpovídající maximálnímu proudu 2 A [26], což vystihuje požadavek komunikačního modulu, kdy proudový odběr může špičkově dosáhnout až zmíněných 2 A [17]. Spínání je určeno logickým stavem pinu EN. Ve stavu logické 1 dochází k sepnutí, v logické 0 k rozepnutí [26].

Kromě přítomnosti SIM karty ve slotu je kontrolováno i napětí akumulátoru. Podpěťová ochrana obvodu MT9700 je nastavena příliš nízko na 2,4 V [26], minimální pracovní napětí komunikačního modulu SIM7600 je však 3,4 V [17], proto je dále implementován sledovací integrovaný obvod BD48K34 s nominální hodnotou napětí 3,4 V. Ten na základě napětí na pinu VDD určuje stav pinou VOUT. V případě napětí vyššího než 3,4 V je pin VOUT ve stavu open drain, v případě, že napětí klesne pod 3,4 V, sepne vnitřní MOSFET typu N a propojí pin VOUT s pinem GND [27]. Rezistory R6, R7 a R8 tvoří odporový dělič, který určuje stav pinu EN. V případě, že není vložena SIM karta, je uzel USIM_DET uzemněný a nehledě na napětí akumulátoru se i pin EN přes rezistor R8 nachází ve stavu logické 0. V okamžiku vsunutí SIM karty se uzel USIM_DET reprezentující pin CD stává plovoucím a logický stav je dále určen obvodem BD48K34. Pin VOUT je při napětí vyšším než 3,4 V ve stavu open drain, tedy plovoucí a pin EN je přes rezistory R6 a R7 ve stavu logické 1 – spínač MT9700 spíná. V případě poklesu napájecího napětí pod úroveň 3,4 V je pin VOUT spojen s GND, pin EN je přes rezistor R7 ve stavu logické 0 a spínač MT9700 rozepíná. Vybíjení akumulátoru Li-Pol pouze do úrovně 3,4 V oproti standardním 3,2 V mírně sníží využitelnou kapacitu akumulátoru za cenu jednoduchosti implementace. Pro plné využití by bylo k napájení modulu SIM7600 nutné využít spínaný měnič typu Buck-Boost, který by kromě složitějších implementace vnesl do obvodu nechtěné rušení.

3.2 Komunikační modul SIM7600

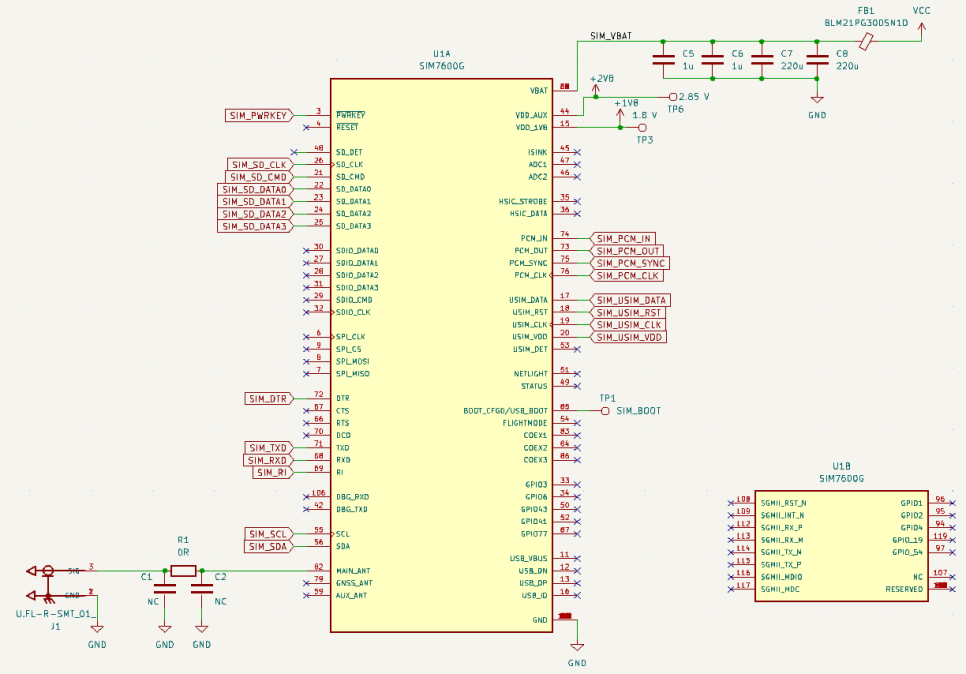
Jak již bylo zmíněno, z důvodu lepší přehlednosti bylo schéma zapojení komunikačního modulu SIM7600 rozděleno do dvou listů. První list obsahuje zapojení samotného modulu, druhý list ostatní související obvody.

Zapojení modulu SIM7600 3.3 vychází z doporučení technického listu Hardware design od výrobce. V symbolu U1A jsou všechny napájecí piny VBAT a GND spojeny dohromady, jejich rozložení spolu s bulk kondenzátory C7, C8 a decoupling kondenzátory C5, C6 bude dále vyřešeno v rámci návrhu desky plošných spojů. Bulk kondenzátory slouží jako lokální zdroj energie a zajišťují stabilitu napájecího napětí, které dle doporučení výrobce nesmí klesnout o více než 300 mV při proudových špičkách až 2 A [17]. Decoupling kondenzátory s nízkým sériovým odporem ESR plní funkci pokrytí krátkých impulzních proudových špiček a zároveň filtrace. Napájení je zajištěno z výstupu spínače MT9700 skrz feritovou tlumivku FB1, která potlačuje vysokofrekvenční šum. Modul SIM7600 dále integruje 2 lineární stabilizátory 1,8 V a 2,85 V, ke kterým byl přidaný test-point a dále budou tyto výstupy využité k napájení dalších obvodů.

Zapojení vysokofrekvenční části je ve schématu velmi přímočaré. Výstupní pin MAIN_ANT je skrz přizpůsobovací obvod typu π propojen s U.FL konektorem J1. Obvod impedančního přizpůsobení slouží k případnému doladění impedance na finálním plošném spoji. V základní konfiguraci nejsou kondenzátory C1, C2 osazeny a rezistor R1 je takzvaný jumper o hodnotě 0 Ω. Návrh impedančně přizpůsobeného spoje antény bude dále rozebrán v následující kapitole.

Piny, které budou dále propojené s přídavnými obvody modulu SIM7600, jsou označeny pomocí štítku. Prvním z nich je PWRKEY, který slouží k zapnutí a vypnutí modulu [17]. Všechny piny označené štítkem SD souvisejí se slotem na SD kartu, který bude také implementován pro pozdější použití. TXD a RXD jsou vstupní a výstupní piny komunikačního rozhraní UART [17], které bude sloužit ke komunikaci mezi modulem a mikrokontrolérem. RI je výstup informující mikrokontrolér o příchozím hovoru, případně příchozí SMS zprávě, DTR zajišťuje probuzení modulu z režimu spánku [17]. Řízení audio kodeku je zajištěno prostřednictvím rozhraní I2C, které reprezentují piny SDA a SCL [17]. Skupina označená štítkem PCM obsahuje piny sloužící k datovému přenosu pulzní kódové modulace mezi audio kodekem a komunikačním modulem, skupina označená USIM slouží k připojení slotu SIM karty [17]. Všechny piny, které nejsou využité jsou ve schématu označené křížkem.

Obvody související s modulem SIM7600 jsou na obrázku 3.4. Prvním z nich je zapojení PWRKEY pro zapnutí/vypnutí komunikačního modulu. Uzel SIM_PWRKEY je propojený s pinem komunikačního modulu, uzel PWRKEY bude připojen k I/O pinu mikrokontroléru. SIM_PWRKEY je interně v rámci SIM7600 propojen do stavu logické 1, 500 ms trvající pulz logické 0 modul zapne, 2500 ms pulz logické 0 modul vypne [17]. NPN tranzistor Q1 zapojený jako spínač otáčí fázi, tedy mikrokontrolér bude následně řídit zapnutí/vypnutí modulu SIM7600 pomocí pulzu logické 1 na příslušném pinu. Tranzistor spolu s rezistorem R9 pro omezení bázového proudu a pull-down rezistorem R11 je využitý z důvodu omezení proudového odběru z výstupního pinu mikrokontroléru. Kondenzátor C17 stabilizuje napětí, aby nedocházelo vlivem rušení k náhodné změně logického stavu. Ochranná ESD dioda D8 chrání obvod před poškozením elektrostatickým výbojem.

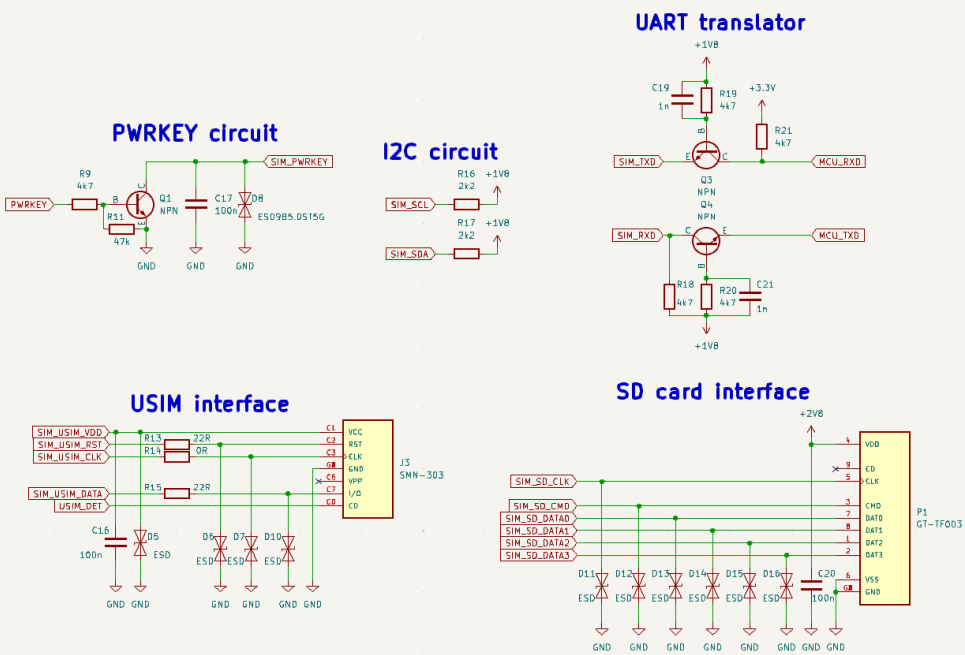


Obrázek 3.3: Elektrické schéma zapojení komunikačního modulu SIM7600.

Komunikační rozhraní I2C vyžaduje na datovém spoji SDA i hodinovém signálu SCL pull-up rezistory. Ty nejsou integrované v rámci komunikačního modulu, proto jsou zde implementovány rezistory R16 a R17 na 1,8V výstup interního lineárního stabilizátoru modulu SIM7600, jak je doporučeno výrobcem [17]

UART rozhraní komunikačního modulu SIM7600 pracuje v 1,8V doméně [17], oproti tomu mikrokontrolér STM32 v doméně 3,3V [23]. K vyřešení tohoto rozdílu je dále implementován překladač napěťových úrovní vycházející z technického listu [17]. Na jedné straně se nacházejí piny modulu SIM_TXD a SIM_RXD, na straně druhé piny mikrokontroléru MCU_RXD a MCU_TXD. Oba tranzistory Q3 a Q4 jsou zapojeny v neinvertujícím zapojení se společnou bází. Na RX pinech se nachází pull-up rezistory R18 a R21 zajišťující stav logické 1 v případě klidového stavu kanálu. Rezistory R19 a R20 omezují bázové proudy.

Zapojení slotu SIM karty a SD karty plně vycházejí z doporučení výrobce. Blízko slotů jsou umístěny decoupling kondenzátory C16 a C20 k potlačení rušení, ESD diody chrání SIM kartu a SD kartu před poškozením elektrostatickým nábojem. Dříve zmíněný pin CD slotu SIM karty je připojen k uzlu USIM_DET a slouží k řízení logické úrovně pro zapnutí a vypnutí celého zařízení na základě přítomnosti SIM karty ve slotu. V rámci tohoto projektu nebude možnost nahrávat záznamy na SD kartu využita, ale směrem k budoucímu vývoji byl již nyní implementován slot pro externí SD kartu.



Obrázek 3.4: Elektrické schéma obvodů souvisejících s komunikačním modulem SIM7600.

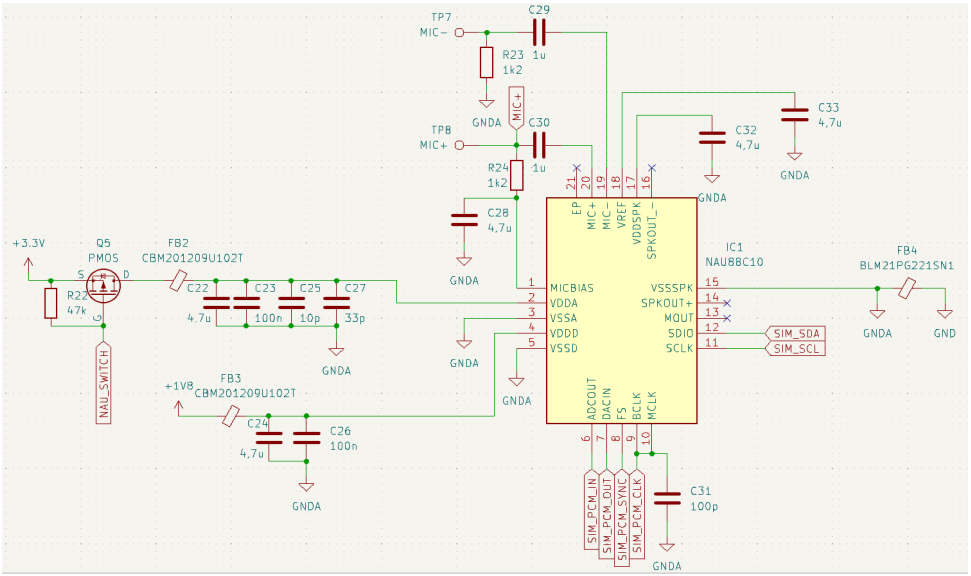
3.3 Audio kodek NAU8810

Zapojení je založené na zvoleném audio kodeku NAU8810 3.5. Ten nabízí kromě diferenciálního vstupu pro mikrofon i zvukový výstup pro headset [28], ten ale v tomto případě nebude použitý a tyto piny jsou ošetřeny dle doporučení výrobce.

Analogová část je napájena z 3,3V regulátoru implementovaného v napájecí části zařízení, digitální část je napájena z interního 1,8V regulátoru modulu SIM7600, jehož PCM rozhraní pracuje v 1,8V doméně [17]. Analogové napájení je z důvodu úspory možno vypnout pomocí MOSFETU Q5. Ten je základně v rozepnutém stavu díky pull-up rezistoru R22. V případě přivedení logické 0 na uzel NAU_SWITCH výstupním pinem mikrokontroléru dojde k sepnutí MOSFETU. Obě napájecí větve obsahují dále feritové tlumivky FB2 a FB3 k potlačení vysokofrekvenčního rušení spolu s bulk a decoupling kondenzátory C22–C27. Feritová tlumivka FB4 slouží k potlačení frekvenčního rušení po spoji GND a vytváří analogovou zem.

Kodek NAU8810 integruje nízkošumový napájecí obvod mikrofonu, jehož výstupem je pin MICBIAS [28]. Ten je dále stabilizován pomocí bulk kondenzátoru C28. Diferenciální vstup mikrofonu MIC+ a MIC- je buzen výstupem mikrofonu připojeného k padům TP7 a TP8 s oddělenou stejnosměrnou složkou pomocí blokovacích kondenzátorů C29 a C30. Napájení mikrofonu je zajištěno pomocí rezistoru R24 nastavitelným napětím MICBIAS. Stabilizační bulk kondenzátor C32 slouží jako lokální zdroj pro interní analogovou referenci, kondenzátor C33 ošetřuje nevyužitý napájecí výstup

pro reproduktor. Uzle označené štítky symbolizují spojení s dalšími obvody. Všechny PCM piny jsou přímo propojeny s piny modulu SIM7600, stejně tak piny SDIO a SCLK rozhraní I2C. Filtrační kondenzátor C31 slouží k potlačení rušení na hodinovém signálu PCM rozhraní.



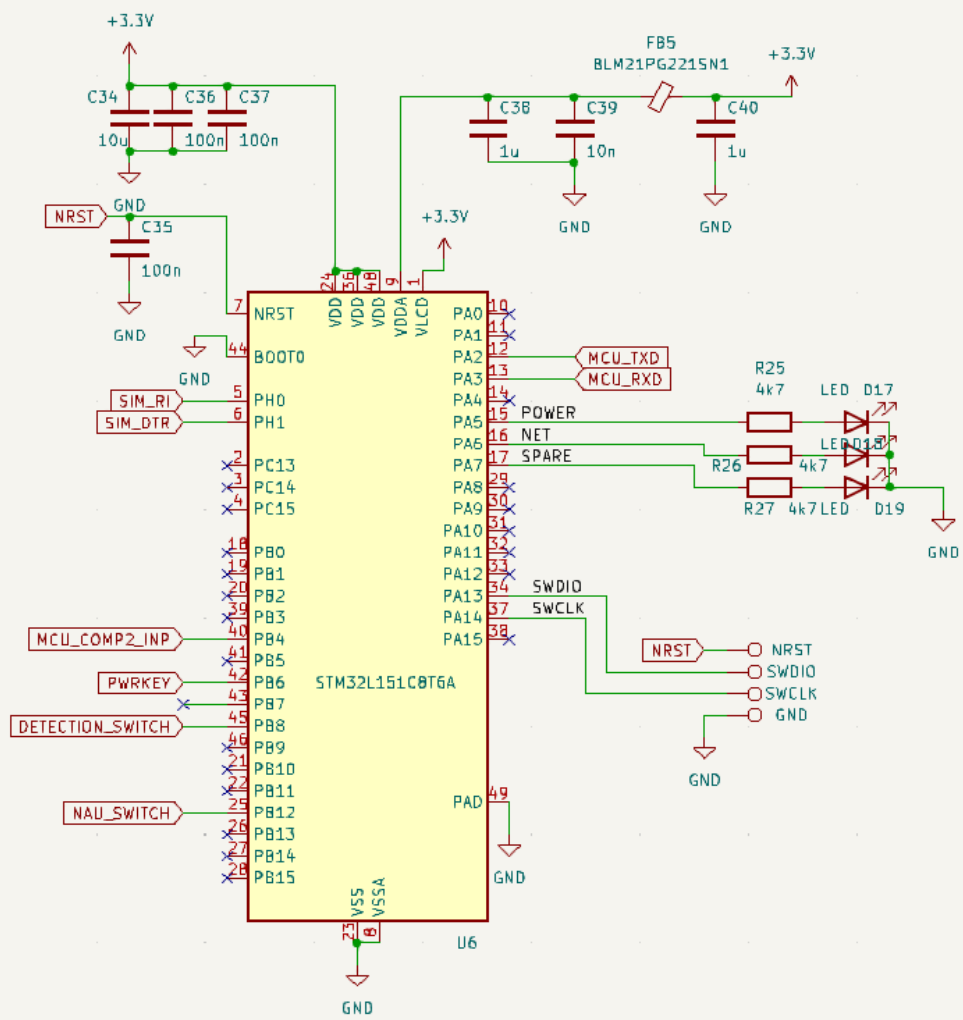
Obrázek 3.5: Elektrické schéma zapojení audio kodeku NAU8810.

3.4 Mikrokontrolér STM32

Schematické zapojení mikrokontroléru STM32 je zobrazeno na obrázku 3.6. Napájení je zprostředkováno z výstupu 3,3V regulátoru implementovaného v napájecí části zařízení. Digitální i analogové napájecí vstupy jsou stabilizovány pomocí bulk a decoupling kondenzátorů C34–C40. Analogový vstup je dále ošetřen proti vysokofrekvenčnímu rušení feritovou tlumivkou FB5.

I/O pin PH0 tvoří digitální vstup pro signalizační SIM_RI signál modulu SIM7600. Ten je v případě zapnutého komunikačního modulu ve stavu logické 1 a pulzy logické 0 informuje o příchozím hovoru či příchozí SMS zprávě [17], což bude dále implementováno jako přerušení mikrokontroléru. Pin PH1 je opět přímo spojen s komunikačním modulem a svou výstupní logickou úrovní rozhoduje o povolení režimu spánku. V případě stavu logické 1 umožňuje modulu SIM7600 přejít do režimu spánku, ze kterého se probouzí na základě stavu logické 0 [17]. Signály MCU_COMP2_INP a DETECTION_SWITCH nebyly dosud definované a představují vstup interního komparátoru mikrokontroléru STM32 a signál ovládající spínač zvukové detekce, která bude popsána později. Pin PB6 je výstupním pinem řídícím zapnutí a vypnutí komunikačního modulu na základě generovaného impulzu logické 1. Další spínacím pinem je PB12, který ovládá zapnutí/vypnutí audio kodeku NAU8810, který je z důvodu úspory energie pokaždé, kdy není využitý, vypnutý. Na piny

PA2 a PA3 je připojený napěťový překladač úrovní komunikačního rozhraní UART. LED diody D17–D18 spolu s rezistory R25–R27 omezujícími jejich proud indikují na základě blikání/svícení aktuální stav zařízení. Poslední částí jsou 4 pájecí plošky NRST, SWDIO, SWCLK a GND určené k nahrání firmwaru mikrokontroléru pomocí externího programátoru. Signál NRST je dále ošetřen proti náhodným změnám stavu kondenzátorem C35.



Obrázek 3.6: Elektrické schéma zapojení mikrokontroléru STM32.

3.5 Zvuková detekce

Poslední částí navrženého schématu je zvuková detekce 3.7. Základní ideou je využití výstupního signálu mikrofonu MIC+, který je následně zesílen a usměrněn. Usměrněný výstup je porovnáván interním komparátorem mikrokontroléru STM32 s nastavenou referenční úrovní a v případě překročení této hodnoty je generováno přerušení. Napájení zvukové detekce je opět zajištěno výstupem lineárního regulátoru 3,3 V spolu s bulk a decoupling kondenzátory

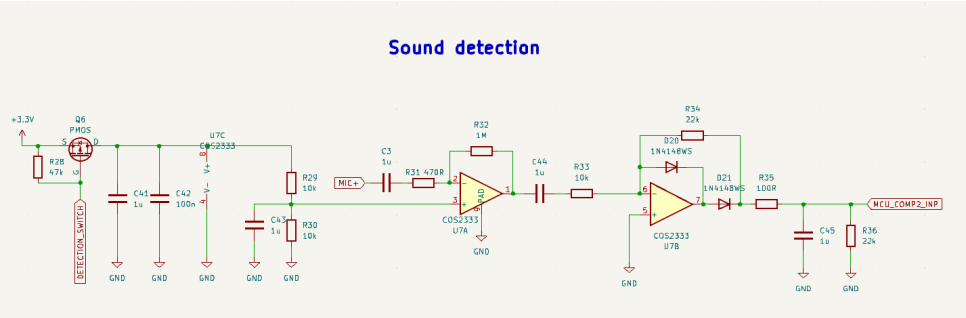
C41 a C42. Z důvodu úspory energie je dále implementován spínač jako v případě kodeku NAU8810. Opět se jedná o Pkanálový MOSFET s pull-up rezistorem R28, který je spínán logickou 0 signálu DETECTION_SWITCH. Obvod zvukové detekce je založen na integrovaném obvodu COS2333, který v rámci pouzdra integruje 2 operační zesilovače s Rail-to-Rail výstupem [29], což je výhodné vzhledem k nízkému napájecímu napětí. Výstupní signál mikrofonu je velmi slabý, proto byl zvolen operační zesilovač s nízkým napěťovým offsetem, typicky 2 μV, a vstupními klidovými proudy 3 pA [29]. První operační zesilovač je zapojený jako standardní invertující zesilovač, jehož zesílení je určeno jako

$$A = -\frac{R_{32}}{R_{31}}, \tag{3.1}$$

a odpovídá hodnotě $A = -2128$. Na invertující svorku je přiveden výstupní signál z mikrofonu s oddělenou stejnosměrnou složkou pomocí kondenzátoru C3. Neinvertující svorka je připojena k výstupu rezistorového děliče R29 a R30 spolu se stabilizačním kondenzátorem C43, jehož výstupní napětí odpovídá přibližně 1,65 V. Stejnosměrná složka zesíleného signálu je poté znovu oddělena kondenzátorem C44 a výstup je skrz rezistor R33 připojen k druhému operačnímu zesilovači. Ten je zapojený jako jednocestný operační usměrňovač se zesílením přibližně 2. V okamžiku, kdy je vstupní signál kladný, dioda D2 je zavřená a výstup se skrz rezistor R2 nachází na virtuální zemi. V případě záporného vstupního signálu se otevře dioda D2, zavře dioda D1 a zesílení je určeno poměrem

$$A = -\frac{R_{34}}{R_{33}}. \tag{3.2}$$

Výhodou operačního usměrňovače je, že nesnižuje výstupní signál o úbytek na diodě, zapojení se 2 diodami zároveň zajišťuje, že operační zesilovač nikdy nepřejde do saturace jako je tomu v případě zapojení s 1 diodou. Výstup je dále skrz rezistor R35 připojen ke kondenzátoru C45 spolu s vybíjecím rezistorem R36 a dále na vstup interního komparátoru mikrokontroléru.



Obrázek 3.7: Elektrické schéma zvukové deteke.

Kapitola 4

Deska plošných spojů

Návrh desky plošných spojů byl proveden opět v programu KiCad. Při přechodu mezi schématem a DPS bylo nutné navolit u komponent jejich pouzdra. U integrovaných obvodů bylo pouzdro dané, u RLC prvků bylo zvoleno většinově pouzdro 0402, které nabízí vhodný kompromis mezi velikostí (1 x 0,5 mm) a náročností při osazování. Pouze pro prvky přizpůsobovacího obvodu vysokofrekvenční části byla zvolena velikost 0201. Tato volba bude vysvětlena dále v textu.

Pro výrobu desky plošných spojů byla zvolena společnost JLCPCB. Parametry, které musí plošný spoj splňovat, aby ho bylo možné vyrobit jsou uvedené na stránkách výrobce. Společnost je schopná vyrobit až 20 vrstvou desku o maximálních rozměrech 400 x 500 mm [30]. Původním záměrem byla deska dvouvrstvá, ale vzhledem k požadavku minimálně čtyřvrstvé desky pro možnost spoje kontrolované impedance byla navržena deska čtyřvrstvá. Další požadavky se týkají minimálního rozestupu mezi vodivými cestami, minimální šířka vodivého spoje, vzdálenost od okraje, minimální rozměry prokovek a mnoho dalších minimálních a maximálních parametrů [30], které je třeba nastavit v programu KiCad, který ohlídá, že nebudou překročeny výrobní možnosti.

V rámci příprav byly zvoleny šířky vodivých cest. Vzorec pro výpočet maximálního elektrického proudu cestou dané šířky vychází ze standardu IPC-2221A

$$I = K \cdot \Delta T \cdot (W \cdot H)^{0.725}, \tag{4.1}$$

kde K je konstanta odpovídající 0,024 pro cesty uvnitř desky nebo 0,048 pro povrchové cesty, ΔT je maximální teplotní změna nad úroveň okolí, W je šířka vodivé cesty a H je tloušťka mědi (zpravidla 35 nebo 70 μm). Za podmínek maximální teplotní změny 10 °C a tloušťky mědi 35 μm byly nadefinovány šířky spojů v tabulce 4.1.

Nejmenší 0,15mm spoje budou využité pro datové propojky, širší 0,5mm pro napájecí obvody a nejširší 1,0 mm v napájecí části komunikačního modulu SIM7600, který odebírá největší elektrický proud, špičkově až 2 A. Základní obecná pravidla užívaná při návrhu zahrnují – nekřížení a oddělení analogových a digitální či vysokofrekvenčních cest, eliminace pravých úhlů vodivých cest, umístění bulk a decoupling kondenzátorů blízko napájecích pinů, dosta-

tečná tloušťka použitých spojů vzhledem k proudovému zatížení a co největší možná vzdálenost mezi vysokofrekvenční a audio částí obvodu.

Tabulka 4.1: Nadefinované šířky cest desky plošných spojů.

Šířka (mm)	Maximální proud (A)
0,15	0,6
0,3	1,0
0,5	1,4
0,7	1,8
1,0	2,4

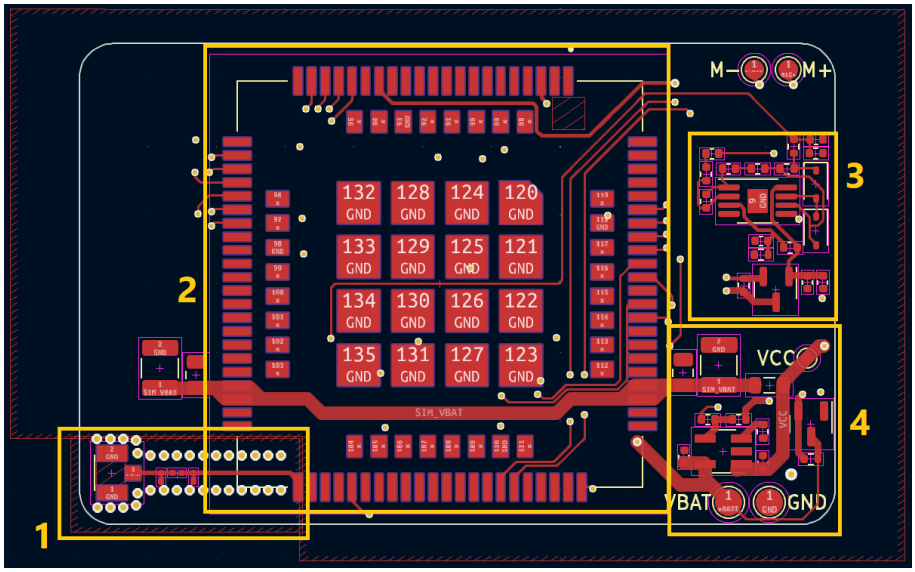
4.1 Rozložení komponent

Svrchní strana desky plošných spojů obsahuje 4 bloky komponent označené čísly 1–4 4.1. Blok číslo 1 zahrnuje konektor pro anténu, přizpůsobovací obvod a impedančně přizpůsobený spoj propojující pin modulu SIM7600 s RF konektorem. Druhý blok představuje samotný komunikační modul SIM7600. Zde byl kladen důraz na umístění bulk a decoupling kondenzátorů blízko napájecích pinů, stejně tak na nízký odpor a indukčnost měděné cesty. Blok číslo 3 obsahuje obvod zvukové detekce, který byl záměrně umístěn diagonálně, tedy co nejdále od rádiové části zařízení. Poslední blok zahrnuje obvod spínače spolu s monitorovacím integrovaným obvodem pro sledování napětí akumulátoru. Šířka měděných cest je uzpůsobena špičkovým proudům odebíraným komunikačním modulem. Na okrajích plošného spoje se nacházejí pájecí plošky VBAT, GND pro připojení akumulátoru a M+, M- pro připojení externího mikrofonu, které jsou opět co nejdále od vysokofrekvenční části, aby nedocházelo k přímému rušení mezi mikrofonem a anténou. Celá svrchní strana je dále vyplněna měděnou vrstvou tvořící takzvaný ground plane. Lepší pohled poskytuje vygenerovaný 3D model 4.2.

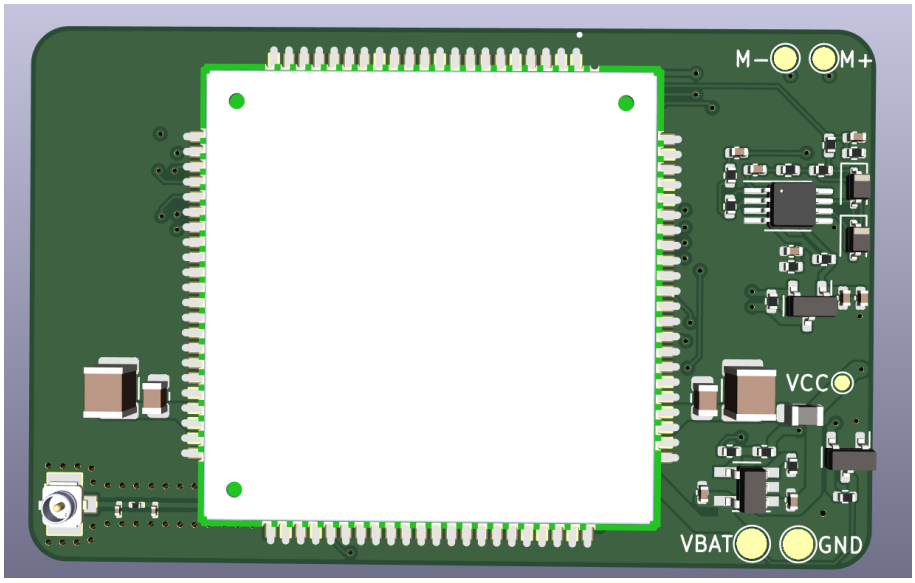
Blokové rozmístění komponent spodní strany desky plošných spojů znázorňuje obrázek 4.3. Pro lepší přehlednost jsou části označené čísly 1–9. Bloky č. 1 a č. 2 zahrnují slot na SD kartu a SIM kartu včetně decoupling kondenzátorů a ochranných ESD diod umístěných v těsné blízkosti slotů. Sloty jsou z důvodu přístupu umístěny na okraje plošného spoje. Třetí blok obsahuje spínací obvod komunikačního modulu SIM7600. Nejkritičtější čtvrtý blok audio kodeku NAU8810 je oddělen na vlastním analogovém ground plane skrz feritovou tlumivku. Audio část je opět umístěna diagonálně od vysokofrekvenční části obvodu, aby nedocházelo k přímému rušení. To se může projevit zhoršenou kvalitou zvuku, především praskáním. Ze stejného důvodu je minimalizována délka analogových cest, které jsou zároveň prostorově oddělené od digitálních spojů rozhraní PCM, a decoupling kondenzátory jsou umístěny v těsné blízkosti pouzdra audio kodeku.

Pátý blok integruje mikrokontrolér, decoupling kondenzátory, signalizační LED diody umístěné k okraji desky plošných spojů a pájecí plošky určené k připojení externího programátoru. Překladač napěťových úrovní rozhraní UART mezi mikrokontrolérem a komunikačním modulem zobrazuje blok č. 6.

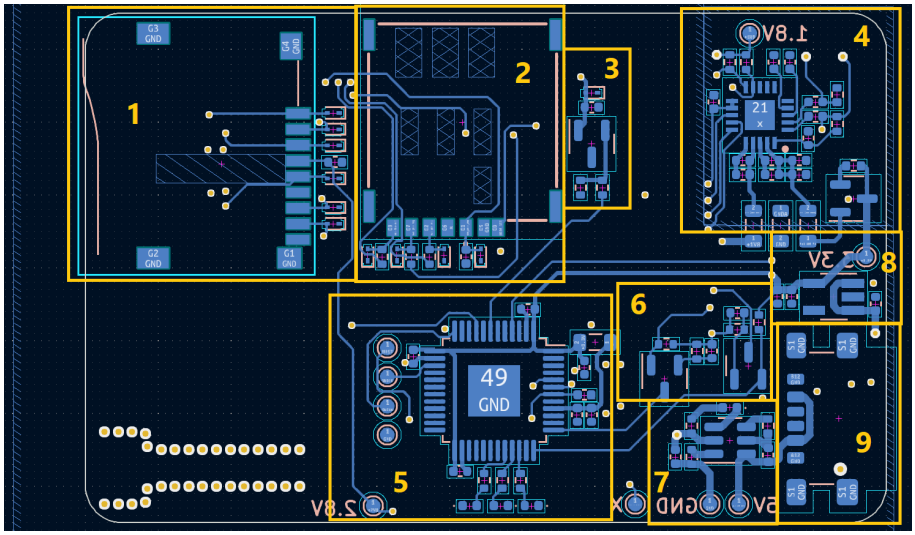
Osmý blok obsahuje integrovaný obvod lineárního stabilizátoru napětí včetně decoupling kondenzátorů umístěných v těsné blízkosti pouzdra. Sedmým obvodem je nabíjecí integrovaný obvod s příslušnými externími komponenty. 5V vstup nabíjení je zajištěn posledním devátým blokem, tedy USB C konektorem. Vzhled spodní strany po osazení zobrazuje vygenerovaný 3D model 4.4.



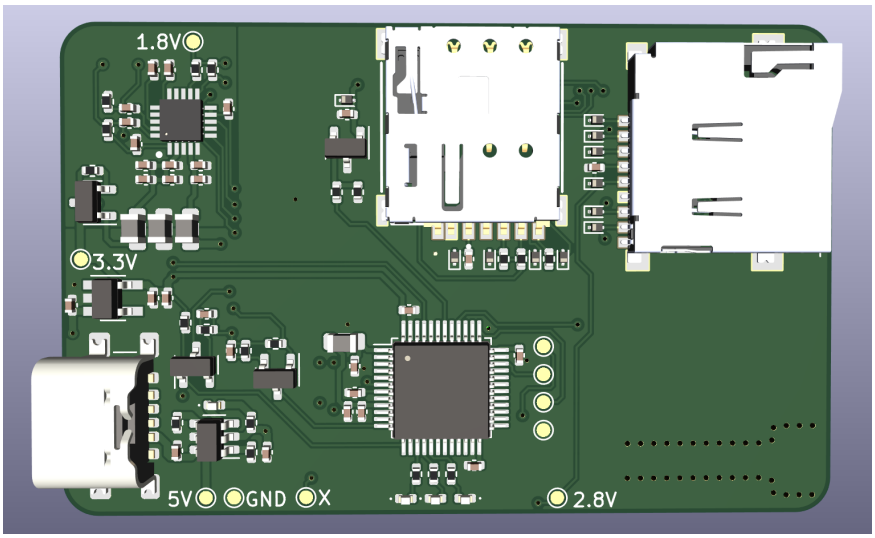
Obrázek 4.1: Svrchní strana desky plošných spojů.



Obrázek 4.2: 3D model svrchní strany desky plošných spojů.



Obrázek 4.3: Spodní strana desky plošných spojů.

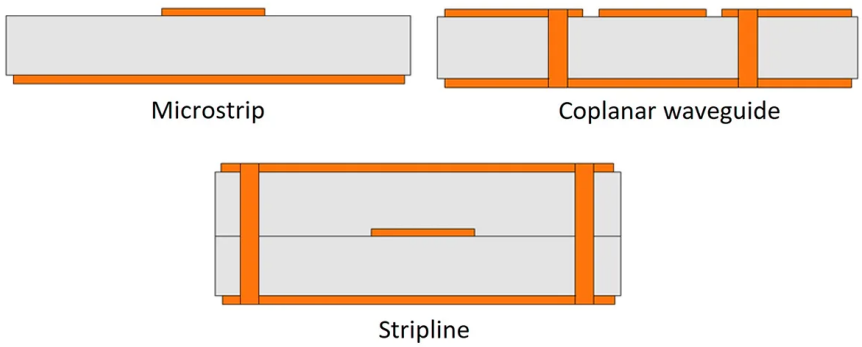


Obrázek 4.4: 3D model spodní strany desky plošných spojů.

4.2 Impedačně přizpůsobený spoj

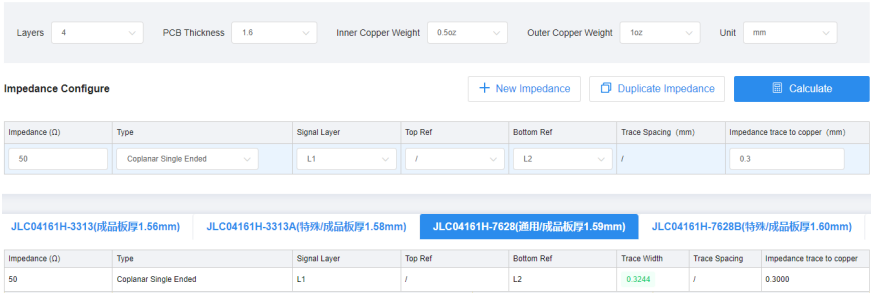
Velmi důležitou součástí návrhu desky plošných spojů je impedančně přizpůsobený spoj propojující anténní pin komunikačního modulu SIM7600 s konektorem antény. Tato cesta musí být kontrolována na impedanci 50 Ω [17]. Kontrolované impedance se využívá ve vysokofrekvenční technice jako je například RF komunikace, telekomunikace, vysokorychlostní výpočetní technika či zpracování signálu. V důsledku impedančního nepřizpůsobení vzniká v obvodu stojaté vlnění, čímž dochází ke zvýšenému namáhání některých částí obvodu [31]. Energie odražená v místě impedančního nepřizpůsobení se může s určitým časovým zpožděním vrátit na vstup a znehodnotit původní signál [31]. Výsledkem je zkreslený signál a snížená energie dodaná do zátěže, v tomto případě antény.

Charakteristická impedance přenosového vedení je formována vodivou cestou a referenční plochou (tzv. ground plane) spolu s dielektrickým materiálem oddělujícím obě vrstvy [32]. Mezi nejčastěji používané spoje kontrolované impedance při návrhu DPS patří mikropáskové vedení, koplanární vlnovod nebo tzv. stripline, který je formován na vnitřní vrstvě desky plošných spojů 4.5. Každá metoda nabízí své výhody i nevýhody a volba závisí především na konkrétní aplikaci. Mikropáskové vedení je relativně snadné na výrobu, nabízí menší dielektrické ztráty, oproti tomu vyšší ztráty vyzařováním a vyžaduje zpravidla větší šířku cesty [32]. Technologicky náročnější koplanární vlnovod nabízí nižší ztráty vyzařováním, lepší integraci s ostatními komponenty DPS a menší náchylnost k rušení [32]. Nejlepší odolnost vůči okolním vlivům a nejnižší ztráty vyzařováním nabízí varianta stripline, která je ovšem technologicky nejnáročnější a zpravidla nejdražší [32]. Z výše uvedených možností byl pro navrhovanou desku plošných spojů zvolen koplanární vlnovod, mezi jehož hlavní výhody patří menší technologická náročnost oproti variantě stripline a lepší technické parametry, než nabízí mikropáskové vedení, především nižší ztráty a větší odolnost vůči rušení.



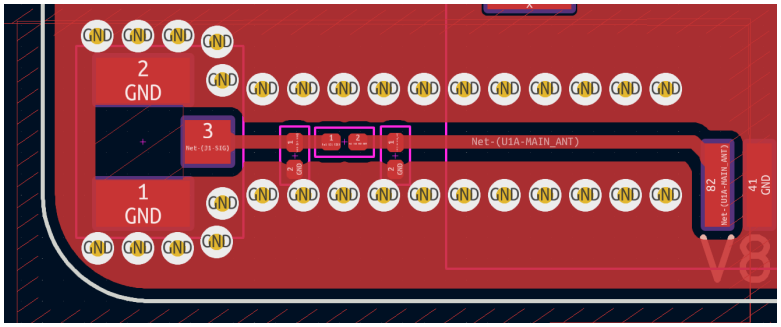
Obrázek 4.5: Porovnání mikropásku, koplanárního vlnovodu a stripline [43].

Výrobce JLCPCB nabízí online nástroj určený pro výpočet kontrolované impedance, pomocí kterého je na základě vstupních hodnot a zvoleného složení vrstev DPS možné určit konkrétní hodnotu šířky vodivého spoje [33]. Velká variabilita umožňuje návrh mikropásku, koplanárního vlnovodu, stripline i diferenciálního páru. V případě koplanárního vlnovodu tvoří vstupní parametry – počet a složení vrstev DPS, tloušťka desky, síla mědi vnitřních a vnějších vrstev, požadovaná impedance, signální a referenční vrstva a dále vzdálenost vodivého spoje od okolní mědi [33]. Využitím výpočetního nástroje přímo od výrobce DPS je zajištěn přesný výpočet, z něhož výrobce vychází i při následné produkci. Na základě vstupních hodnot byla vypočtena šířka vodivého spoje 0,3244 mm 4.6.



Obrázek 4.6: Online nástroj pro výpočet šířky impedančně přizpůsobeného spoje.

Vysokofrekvenční část navržené DPS se skládá z pinu MAIN_ANT komunikačního modulu, impedančně přizpůsobeného spoje o šířce 0,3244 mm, přizpůsobovacího obvodu a konektoru U.FL s impedancí 50 Ω 4.7. Vzdálenost mezi vodivou cestou a okolním ground plane byla v programu KiCad nadefinována na zvolených 0,3 mm. Z důvodu lepší spojitosti šířky vodivé cesty byla pouzdra komponent přizpůsobovacího obvodu nahrazena menšími 0201 (0,6 x 0,3 mm). Přizpůsobovací obvod je v návrhu pouze pro úplnost a případné doladění, v základním stavu nejsou kondenzátory osazeny a rezistor má hodnotu 0 Ω. Ostré přechody mezi vodivou cestou a pájecími ploškami komponent jsou eliminovány postupným rozšiřováním. K uzavření referenční země a dalšímu vylepšení výkonnosti spoje slouží prokovky, které ohraničují vysokofrekvenční část ve vzdálenosti minimálně $2W$, kde W je šířka vodivé cesty, v tomto případě 0,3244 mm.

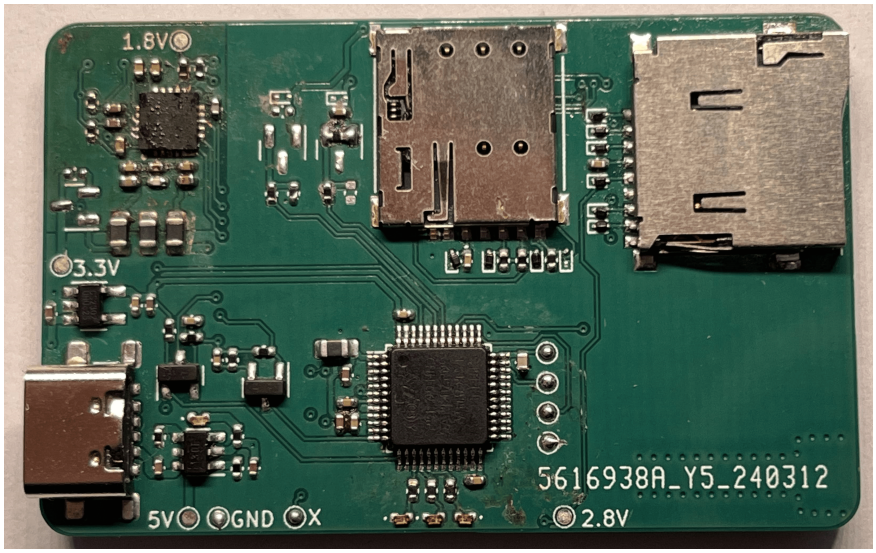


Obrázek 4.7: Vysokofrekvenční část desky plošných spojů.

4.3 Výsledná deska plošných spojů

Po dokončení návrhu byly z programu KiCad vyexportovány výrobní soubory tzv. gerber files, na základě kterých byla zadaná výroba DPS u společnosti JLCPCB. Spolu s deskou plošných spojů byl u výrobce objednán i tzv. stencil pro snazší aplikaci pájecí pasty při osazování. Po obdržení byla deska osazena komponenty, z důvodu malých rozměrů některých pouzder, především za využití metody pájení horkovzdušnou stanicí. Výsledkem celého návrhu hardwarové části zařízení je deska plošných spojů o rozměrech 56 x 35,5 mm 4.8 4.9.

Obrázek 4.8: Svrchní část osazené desky plošných spojů.



Obrázek 4.9: Spodní část osazené desky plošných spojů.

Kapitola 5

Firmware mikrokontroléru STM32

Firmware mikrokontroléru byl vytvořený v programu STM32CubeIDE. Jedná se o pokročilou C/C++ vývojovou platformu, která umožňuje konfiguraci periferií v grafickém rozhraní, generování kódu, jeho kompilaci, nahrání i následný debug [34]. Nespornou výhodou je právě grafické rozhraní pro konfiguraci periferií, které následně vygeneruje kód, ve kterém je zohledněno nastavení registrů periferií a jejich inicializace pomocí knihovny HAL (Hardware Abstraction Layer). V takto předpřipraveném kódu se vyskytují místa označená štítkem /*USER CODE*/, do kterých uživatel píše vlastní sekvenci příkazů. Při dodržení této konvence je možné kdykoliv provést změny v konfiguraci periferií, přičemž nedojde ke ztrátě kódu uživatele.

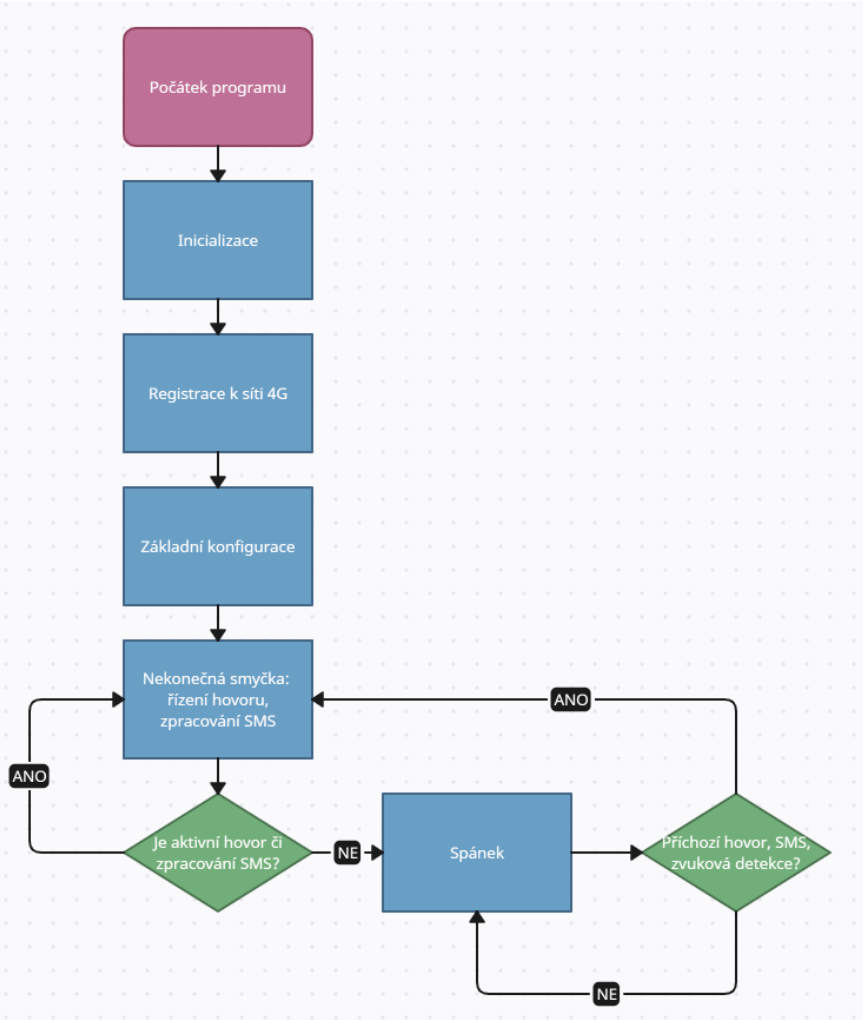
V rámci celého projektu byla využita knihovna HAL, která poskytuje vyšší úroveň abstrakce nad hardwarovou částí mikrokontroléru. Výhodou tohoto přístupu je především jednodušší implementace a úpravy než v případě kódu na úrovni registrů. Zároveň se kód stává přenositelný mezi různými řadami mikrokontrolérů STM32. Nevýhodou je právě zmíněná menší kontrola nad hardwarovou částí, méně efektivní využití systémových prostředků a větší paměťové nároky. Vzhledem k tomu, že je výsledný firmware založen výhradně na manipulaci s I/O piny mikrokontroléru STM32 a komunikaci skrz rozhraní UART, což neklade velké nároky na rychlost a výpočetní výkon, převažují zmíněné výhody knihovny HAL.

Následující část stručně popisuje základní kostru řídicího firmwaru mikrokontroléru STM32. Cílem bylo vytvořit co nejjednodušší funkční prototyp, který ověří funkčnost navrhnuté desky plošných spojů, možnosti komunikačního modulu SIM7600 spolu s audio kodekem NAU8810, a který bude možné dále rozšířit v komplexnější celek.

5.1 Vývojový diagram

Základní princip řidicího firmwaru zobrazuje vývojový diagram 5.1. Na začátku dochází k prvotní inicializaci a spuštění periferií mikrokontroléru STM32 spolu s komunikačním modulem SIM7600, se kterým je zahájena komunikace prostřednictvím rozhraní UART. Následně proběhne registrace k 4G síti včetně ověření spojení. V případě aktivního spojení je provedena základní konfigurace komunikačního modulu SIM7600 a audio kodeku NAU8810. Poté

program přechází do nekonečné smyčky, ve které v případě aktivního hovoru upravuje parametry zvuku, v případě příchozí SMS dochází k jejímu zpracování. Pokud není aktivní hovor ani nedochází ke zpracování SMS, přechází celé zařízení do režimu spánku a redukuje tak svoji spotřebu. K probuzení z režimu spánku dochází na základě příchozího hovoru, příchozí SMS či zvukové detekce.



Obrázek 5.1: Vývojový diagram firmwaru mikrokontroléru STM32.

5.2 UART komunikace

Základem celého firmwaru je komunikace mezi mikrokontrolérem a komunikačním modulem prostřednictvím rozhraní UART. Kód je založen na funkcích knihovny HAL, konkrétně přístupu DMA (Direct Memory Acess). Metoda DMA funguje podobně jako metoda přerušení, přičemž při přenosu dat nedochází k zablokování procesoru a ten může být využitý k ostatním procesům.

Přijímání dat z rozhraní UART probíhá ve smyčce na pozadí 5.1. Na počátku kódu je vytvořen zásobník *MainBuf* a jsou definovány prototypy inicializačních funkcí i vlastních funkcí k odesílání a porovnání dat. Prvotní inicializaci zajišťuje kód vygenerovaný prostřednictvím grafického rozhraní platformy STM32CubeIDE. V hlavní části kódu *main()* dochází k volání inicializačních funkcí knihovny HAL, rozhraní DMA a USART2. Inicializační funkce nastavují zvolené parametry – rychlost 115200 bps, délku rámce 8 bitů, stop bity, paritu, prioritu přerušení a další. Poté je volána funkce *HAL_UARTEx_ReceiveToIdle_DMA()*, která přijímá data z rozhraní USART2 a ukládá je do zásobníku *MainBuf*, dokud není kanál v klidovém stavu. Po dokončení přenosu je vyvoláno přerušení, jehož obsluhu zajišťuje funkce *HAL_UARTEx_RxEventCallback()*, ve které je znovu spuštěn příjem dat. Tím vzniká nekonečná smyčka a data jsou neustále na pozadí přijímána do zásobníku *MainBuf*.

```
1  UART_HandleTypeDef huart2;
2  DMA_HandleTypeDef hdma_usart2_rx;
3  DMA_HandleTypeDef hdma_usart2_tx;
4  static void MX_DMA_Init(void);
5  static void MX_USART2_UART_Init(void);
6
7  int main(void)
8  {
9      HAL_Init();                  // init functions
10     MX_DMA_Init();
11     MX_USART2_UART_Init();
12     // receive data to MainBuf until usart2 is in idle state
13     HAL_UARTEx_ReceiveToIdle_DMA(&huart2, (uint8_t *) MainBuf,
           MainBuf_SIZE);
14     while(1)
15     {
16     }
17 }
18 void HAL_UARTEx_RxEventCallback(UART_HandleTypeDef *huart,
       uint16_t Size)
19 {
20     if (huart->Instance == USART2)
21     {
22         // receive again, disable half transfer interrupt
23         HAL_UARTEx_ReceiveToIdle_DMA(&huart2, (uint8_t *)
               MainBuf, MainBuf_SIZE);
24         __HAL_DMA_DISABLE_IT(&hdma_usart2_rx, DMA_IT_HT);
25     }
26 }
```

Kód 5.1: Inicializace UART komunikace.

K porovnání očekávané a skutečné odpovědi komunikačního modulu SIM7600 na zaslaný AT příkaz byla definovaná funkce *strcomp()* 5.2. Ta je velmi podobná funkci *strcmp()* z knihovny String jazyka C. Nevýhodou funkce *strcmp()* je ukončení v momentě, kdy narazí na terminační znak /0, což představuje při rozsáhlejší odpovědi obsahující terminační znaky problém. Vstupem funkce *strcomp()* jsou 2 znakové řetězce *haystack* a *needle*. Funkce postupně prochází zásobník *haystack* a hledá shodu s prvním znakem řetězce *needle*. Pokud žádnou nenajde, skončí a vrací *NULL*. V případě, že najde shodu, pokračuje v porovnávání znaků zásobníku *haystack* a hledaného řetězce *needle* až do délky řetězce *needle*. Pokud se shodují, vrací adresu počátku řetězce *needle* v zásobníku *haystack*, pokud se neshodují, přerušuje smyčku a hledá další shodu, případně vrací *NULL*.

```
const char* strcomp(const char* haystack, const char* needle)

  for(int i = 0; i < strlen(haystack); i++)
  {
    if(haystack[i] == needle[0])
    {
      for(int j = 0; j < strlen(needle); j++)
      {
        if(haystack[i+j] != needle[j])
        {
          break;
        }
        if(j == (strlen(needle) - 1))
        {
          return &haystack[i];
        }
        }
     }
   }
   return NULL;
}
```

Kód 5.2: Definice funkce *strcomp()*.

Odesílání AT příkazů zajišťují funkce *Send_checkResponse()*, *sendCommand()* a *sendCommand_disIrq()* 5.3. Funkce *Send_checkResponse()* má 2 vstupní parametry – AT příkaz a očekávanou odpověď. Nejprve odesílá AT příkaz metodou DMA, poté čeká 500ms a následně volá funkci *checkResponse()* s parametrem response. Ta na základě shody vrací 1, v případě rozdílnosti 0. Po dokončení je přemazán zásobník *MainBuf*. Funkce *sendCommand()* AT příkaz pouze odesílá a nekontroluje odpověď. Poslední funkce *sendCommand_disIrq()* slouží k odesílání AT příkazu během obsluhy přerušení, kdy je zakázáno další přerušení a metoda DMA se stává nefunkční.

```
int checkResponse(char response[])
{
  if(strcomp(MainBuf, response) != NULL)
  {
    return 1;
  }
  else
  {
    return 0;
  }
}
int Send_checkResponse(char AT_command[], char response[])
{
  HAL_UART_Transmit_DMA(&huart2, (uint8_t *) AT_command, strlen(
      AT_command));
  HAL_Delay(500);
  while(!checkResponse(response))
  {
    HAL_Delay(300);
  }
  memset(MainBuf, '\0', MainBuf_SIZE);
  return 1;
}
void sendCommand(char AT_command[])
{
  HAL_UART_Transmit_DMA(&huart2, (uint8_t *) AT_command, strlen(
      AT_command));
}
void sendCommand_disIrq(char AT_command[])
{
  HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *) AT_command, strlen(
      AT_command), 100);
}
```

Kód 5.3: Definice funkcí UART komunikace.

5.3 Konfigurace periferií

Prvotní konfigurace periferií byla provedena pomocí grafického rozhraní platformy STM32CubeIDE. Následně byl vygenerován kód zahrnující všechny nastavené parametry. Voláním inicializačních funkcí v rámci funkce *main()* dojde k jejich inicializaci. Díky této metodě se konfigurace stává rychlejší, přehlednější a je možné ji kdykoliv snadno změnit.

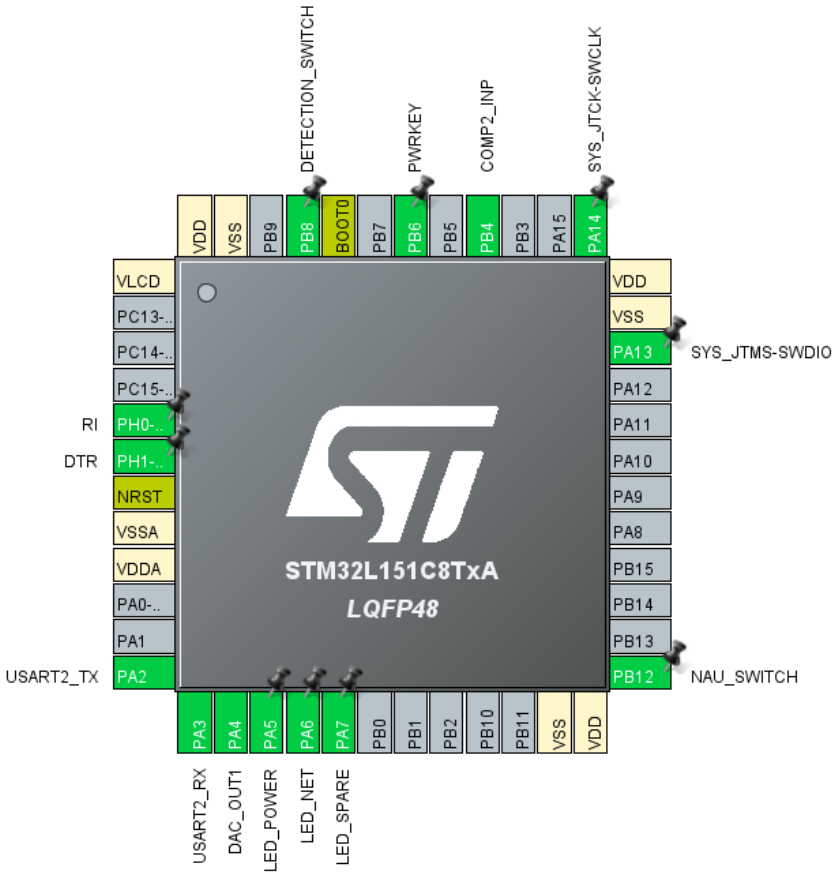
Využité periferie mikrokontroléru STM32 tvoří DMA (Direct Memory Acess), GPIO (General Purpose Input Output), NVIC (Nested Vector Interrupt Control), komunikační rozhraní USART2, vnitřní low-power komparátor COMP2, digitálně analogový převodník DAC a časovač TIMER2. Krátce již bylo zmíněno nastavení rozhraní UART, další důležitá nastavení budou zmíněna dále.

Rozhraní GPIO integruje vstupně výstupní piny. Jejich základní konfiguraci zobrazuje obrázek 5.2. Kromě běžných výstupů typu spínání LED diod stojí za zmínku piny ovládající chování ostatních obvodů. Piny PB8 a PB12 slouží

k zapnutí/vypnutí zvukové detekce a audio kodeku. Jejich výstup je typu open-drain s integrovaným pull-up rezistorem, aby nedocházelo k náhodným změnám stavu. Tyto piny ovládají dále GATE spínacích MOSFETů typu P, k jejichž sepnutí dochází nastavením logické 0. Piny PH1 a PB6 jsou výstupní piny typu push-pull s intergrovaným pull-down rezistorem. Pulzem logické 1 na pinu PB6 dochází k zapnutí/vypnutí komunikačního modulu SIM7600, PH1 příslušnou logickou úrovní povolí/zakáže spánek. Speciální vstup tvoří pin PH0. Jedná se o vstup externího přerušení s detekcí sestupné hrany a integrovaným pull-down rezistorem, který generuje přerušení mikrokontroléru na základě příchozího hovoru či SMS zprávy.

Komparátor COMP2 generuje přerušení na náběžné hraně. Jeho vstup tvoří pin PB4 a druhým vstupem je výstup digitálně analogového převodníku DAC. Při překročení nastavené výstupní úrovně DAC převodníku dochází k přerušení indikující zvukovou detekci.

Časovač TIM2 je nastaven jako běžný časovač buzený interním zdrojem hodin. Jeho předdělička a hodnota AutoReload registru je zvolena tak, aby časovač generoval přerušení po 3 minutách od spuštění časovače TIM2.



Obrázek 5.2: Konfigurované piny mikrokontroléru STM32.

5.4 Finální běh programu

V následující kapitole je popsán finální běh testovacího firmwaru. Jedná se o základní kostru, kterou bude možné následně rozšířit o další komplexnější prvky. První fází běhu programu je počáteční definice proměnných, prototypů inicializačních a vlastních funkcí. Inicializační funkce jsou dále volány na počátku funkce *main()* 5.4.

```
#include "main.h"
#include <string.h>
#define MainBuf_SIZE 100
COMP_HandleTypeDef hcomp2;
DAC_HandleTypeDef hdac;
TIM_HandleTypeDef htim2;
UART_HandleTypeDef huart2;
DMA_HandleTypeDef hdma_usart2_rx;
DMA_HandleTypeDef hdma_usart2_tx;

char MainBuf[MainBuf_SIZE];      // main buffer
uint16_t waitIndex = 0;          // wait index for net connection
uint16_t detValue = 2500;        // default sound detection value
uint32_t random = 0;             // random index for debug
uint8_t activeCall = 0;          // active call index
uint8_t newSMS = 0;              // new SMS index
uint8_t testMode = 0;            // test mode index for sound det

void SystemClock_Config(void);  // init functions prototypes
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_DMA_Init(void);
static void MX_USART2_UART_Init(void);
static void MX_DAC_Init(void);
static void MX_COMP2_Init(void);
static void MX_TIM2_Init(void);

// UART communication functions prototypes
const char* strcomp(const char* haystack, const char* needle);
int Send_checkResponse(char AT_command[], char response[]);
int checkResponse(char response[]);
void sendCommand(char AT_command[]);
void sendCommand_disIrq(char AT_command[]);

int main(void)
{
    // peripherals init
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_DMA_Init();
    MX_USART2_UART_Init();
    MX_DAC_Init();
    MX_COMP2_Init();
    MX_TIM2_Init();
}
```

Kód 5.4: Inicializace periferií mikrokontroléru STM32.

Vlastní kód začíná rozsvícením červené LED diody indikující napájení zařízení, nastavením počáteční výstupní hodnoty DAC převodníku a spuštěním DAC převodníku spolu s komparátorem COMP2 5.5. Následně podmínka ověřuje spuštění komunikačního modulu SIM7600 na základě logické úrovně pinu RI. Pokud není komunikační modul zapnutý, vyšle mikrokontrolér 500ms pulz logické 0 na pin PWRKEY a čeká na odpověď „PB DONE“, která indikuje zapnutí.

```
    // turn on POWER LED
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(2000);
    // set default voice detection value
    HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R,
        detValue);
    // start DAC
    HAL_DAC_Start(&hdac, DAC_CHANNEL_1);
    // start COMP2
    HAL_COMP_Start_IT(&hcomp2);

    // RI pin is not high = SIM7600 is off, turn it on
    if(HAL_GPIO_ReadPin(GPIOH, GPIO_PIN_0) != GPIO_PIN_SET)
    {
        // pull PWRKEY down for 500 ms
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_RESET);
        HAL_Delay(500);
        // pull PWRKEY back up
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_SET);

        // wait for response "PB DONE" - UART is ready
        while(!checkResponse("PB DONE"))
        {
            HAL_Delay(500);
        }
    }
```

Kód 5.5: Spuštění periferií a komunikačního modulu SIM7600.

Další fází je ověření registrace k síti 4G 5.6. Ve výchozím nastavení dochází k registraci automaticky. Každých 800 ms je odeslán AT příkaz „AT+CEREG?“ a je kontrolována odpověď až do očekávané odpovědi 0,1 značící domovskou síť, případně 0,5 značící roaming. Během registrace je proces indikován blikáním oranžové LED diody. Pokud registrace trvá déle než 2 minuty, je resetována RF část komunikačního modulu, pokud déle než 4 minuty, je vypnut modul SIM7600 a resetován celý běh firmwaru.

```
    // check for network registration
    do
    {
        // every 800 ms send "AT+CEREG?"
        sendCommand("AT+CEREG?\r\n");
        HAL_Delay(800);
        // blink NET LED
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_6);
        // increment waitIndex
        waitIndex++;

```

```
12          // not registered for 2 minutes
13          if(waitIndex == 150)
14          {
15              // reset RF stage, set autoregistration
16              Send_checkResponse("AT+CFUN=0\r\n", "OK");
17              HAL_Delay(5000);
18              Send_checkResponse("AT+CFUN=1\r\n", "OK");
19              HAL_Delay(5000);
20              Send_checkResponse("AT+COPS=0\r\n", "OK");
21          }
22
23          // not registered for 4 minutes
24          if(waitIndex == 300)
25          {
26              // turn off SIM7600, reset firmware
27              sendCommand("AT+CPOF\r\n");
28              HAL_Delay(10000);
29              HAL_NVIC_SystemReset();
30          }
31      }
32      while(!(checkResponse("+CEREG: 0,1") || checkResponse("+
            CEREG: 0,5")));
33      // reset wait index
34      waitIndex = 0;
```

Kód 5.6: Ověření registrace k síti 4G.

Po ověření úspěšné registrace indikované rozsvícením oranžové LED diody je provedena výchozí konfigurace 5.7. Pokud by byl z předchozích běhů povolen spánek modulu SIM7600, je zakázán přechod do spánku nastavením pinu DTR na logickou úroveň 0. Následující sekvence vypne echo AT příkazů a znovu ověří odpověď „OK“ na testovací AT příkaz „AT“. Modul SIM7600 nabízí AT příkazy, které pomocí rozhraní I2C přímo manipulují s registry audio kodeku NAU8810. Jedním z nich je „AT+CMICGAIN“, kterým je nastavena výchozí hodnota zesílení mikrofonu. Poté je nastaveno výchozí úložiště příchozích SMS, zvolen výchozí mód a jsou přemazány všechny SMS, které by se mohly vyskytovat na SIM kartě. Dokončení výchozí konfigurace je indikováno zhasnutím obou LED diod, následně komunikační modul SIM7600 i samotný mikrokontrolér přecházejí do režimu spánku a redukují svoji spotřebu.

```
1       // turn on NET LED = successfully registered
2       HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_SET);
3       // disable SIM7600 sleep
4       HAL_GPIO_WritePin(GPIOH, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_RESET);
5       Send_checkResponse("ATE0\r\n", "OK");    // command echo off
6       Send_checkResponse("AT\r\n", "OK");      // AT is OK?
7       // set default mic gain
8       Send_checkResponse("AT+CMICGAIN=7\r\n", "OK");
9       // set SIM storage for SMS and phonebook
10      Send_checkResponse("AT+CPMS=\"SM\",\"SM\",\"SM\"\r\n","OK");
11      Send_checkResponse("AT+CPBS=\"SM\"\r\n", "OK");
12      // set SMS to text mode
13      Send_checkResponse("AT+CMGF=1\r\n", "OK");
14      // delete all SMS
15      Send_checkResponse("AT+CMGD=0,4\r\n", "OK");
```

```
16      // turn off both LEDs to save power
17      HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
18      HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_6, GPIO_PIN_RESET);
19
20      // enable SIM7600 sleep
21      Send_checkResponse("AT+CSCLK=1\r\n", "OK");
22      HAL_GPIO_WritePin(GPIOH, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_SET);
23      // suspend tick, enable STM32 sleep
24      HAL_SuspendTick();
25      HAL_PWR_EnterSLEEPMode(PWR_MAINREGULATOR_ON,
            PWR_SLEEPENTRY_WFI);
```

Kód 5.7: Konfigurace komunikačního modulu SIM7600.

V nekonečné smyčce *while(1)* se zařízení nachází v případě probuzení z režimu spánku, dokud je aktivní hovor, nebo zpracování SMS, poté znovu přechází do režimu spánku. První částí nekonečné smyčky je řízení hlasitosti aktivního hovoru 5.8. Dokud mikrokontrolér neobdrží odpověď „NO CARRIER“ indikující ukončení hovoru, nachází se ve smyčce *while(1)*, ve které kontroluje příchozí kód z číselníku, na jehož základě upravuje zesílení mikrofonu pomocí příkazů „AT+CTXVOL“ a „AT+CTXMICGAIN“, které manipulují s registry audio kodeku NAU8810. Pro přehlednost je zobrazena pouze možnost 0 a 9, skutečný firmware obsahuje možnosti 0–9 s postupným krokem zesílení mikrofonu. Po ukončení hovoru je resetován index aktivního hovoru, vypnut audio kodek NAU8810 a zařízení přechází zpět do režimu spánku. Druhou částí je zpracování příchozí SMS 5.9. Ta je přečtena a zároveň smazána z paměti. Na základě znění je zapnuta/vypnuta zvuková detekce či její testovací režim, případně je nastaven její práh detekce. Pro přehlednost je opět ponechána pouze možnost 1 a 5, skutečný firmware obsahuje možnosti 1–5 s postupným krokem. Po dokončení zpracování je přemazán zásobník *MainBuf*, resetován index nové SMS a zařízení přechází do režimu spánku.

```
1  while (1)
2  {
3    if(activeCall == 1)
4    {
5          // until the call is active
6          while(!checkResponse("NO CARRIER"))
7          {
8              // possible DTMF codes - mic gain
9              if(checkResponse("+RXDTMF: 0"))
10             {
11                 sendCommand("AT+CTXVOL=0x1111\r\n");
12                 HAL_Delay(300);
13                 sendCommand("AT+CTXMICGAIN=1,0x1234\r\n");
14             }
15             if(checkResponse("+RXDTMF: 9"))
16             {
17                 sendCommand("AT+CTXVOL=0xffff\r\n");
18                 HAL_Delay(300);
19                 sendCommand("AT+CTXMICGAIN=1,0xcccc\r\n");
20             }
21         }
```

```
22          // reset the flag
23          activeCall = 0;
24          // turn off audio codec NAU8810
25          HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_12, GPIO_PIN_SET);
26
27          // enable SIM7600 and STM32 sleep
28          HAL_GPIO_WritePin(GPIOH, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_SET);
29          HAL_SuspendTick();
30          HAL_PWR_EnterSLEEPMode(PWR_MAINREGULATOR_ON,
                PWR_SLEEPENTRY_WFI);
31      }
```

Kód 5.8: Řízení aktivního hovoru.

```
1       if(newSMS == 1)
2       {
3           // read and delete the message
4           sendCommand("AT+CMGRD=0\r\n");
5           while(!checkResponse("+CMGRD:"))
6           {
7               HAL_Delay(300);
8           }
9           if(checkResponse("DetON"))  // turn on audio detection
10          {
11              HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_8,GPIO_PIN_RESET);
12          }
13          if(checkResponse("DetOFF")) // turn off audio detection
14          {
15              HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_SET);
16          }
17          if(checkResponse("DetTestON"))  // turn on det test
18          {
19              HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_RESET);
20              testMode = 1;
21          }
22          if(checkResponse("DetTestOFF")) // turn off det test
23          {
24              HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_SET);
25              testMode = 0;
26          }
27          if(checkResponse("Det1"))   // set det threshold
28          {
29              detValue = 3800;
30          if(checkResponse("Det5"))   // set det threshold
31          {
32              detValue = 1800;
33          }
34          // clear main buffer and reset index
35          memset(MainBuf, '\0', MainBuf_SIZE);
36          newSMS = 0;
37          // enable SIM7600 and STM32 sleep
38          HAL_GPIO_WritePin(GPIOH, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_SET);
39          HAL_SuspendTick();
40          HAL_PWR_EnterSLEEPMode(PWR_MAINREGULATOR_ON,
                PWR_SLEEPENTRY_WFI);
41      }
```

Kód 5.9: Zpracování příchozí SMS.

K probuzení mikrokontroléru z režimu spánku dochází automaticky při generování přerušení. První možností je externí přerušení sestupnou hranou pinu RI indikující příchozí hovor či zprávu SMS 5.10. Na začátku funkce sloužící k odbavení přerušení je zakázáno další přerušení po dobu vykonávání obsluhy a následně probuzen modul SIM7600 z režimu spánku. V případě oznámení „+CMTI:“ značící novou příchozí SMS je přemazán zásobník *MainBuf* a nastaven index newSMS. V okamžiku příchozího hovoru značeného oznámením „RING“ je zapnut audio kodek NAU8810, následně je hovor zvednut a je aktivované potlačení šumu. Poté obsluha čeká na oznámení o úspěšném spojení a následně nastaví index *activeCall*. Na konci obsluhy přerušení je opět povoleno nové přerušení a běh programu přechází po dobu aktivního hovoru či zpracování SMS do smyčky *while(1)*.

```
void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin)
{
    __disable_irq();                // disable new interrupt
    if(GPIO_Pin == GPIO_PIN_0)      // RI pin interrupt
    {
        // wake up SIM7600
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOH, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_RESET);
        for(int i = 0; i < 10000; i++);

        if(checkResponse("+CMTI:"))     // new SMS
        {
            // clear main buffer, set index
            memset(MainBuf, '\0', MainBuf_SIZE);
            newSMS = 1;
        }
        if(checkResponse("RING"))       // incoming call
        {
            for(int i = 0; i < 10000; i++);
            // turn on audio codec NAU8810
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_12,GPIO_PIN_RESET);
            // answer the call
            sendCommand_disIrq("ATA\r\n");
            for(int i = 0; i < 50000; i++);
            // turn on noise suppression
            sendCommand_disIrq("AT+CNSLIM=0x7fff\r\n");

            while(!checkResponse("VOICE CALL: BEGIN"))
            {
                for(int i = 0; i < 10000; i++);
            }
            // set index
            activeCall = 1;
        }
    }
    __enable_irq();                 // enable new interrupt
}
```

Kód 5.10: Obsluha přerušení příchozího hovoru či SMS.

Poslední částí firmwaru je obsluha přerušení generovaného vzestupnou hranou výstupu interního komparátoru v případě aktivované zvukové detekce 5.11. Po dobu výkonu obsluhy je opět zakázáno další přerušení a je probuzen modul SIM7600 z režimu spánku. V případě aktivovaného testovacího režimu dochází při detekci k blikání modré LED diody. V testovacím režimu je uživateli umožněno vyzkoušet a doupravit nastavenou mez detekce pomocí SMS příkazů. Pokud je testovací režim vypnutý a neprobíhá aktivní hovor, je vypnuta zvuková detekce a spuštěn časovač nastavený na 3 minuty. Následně je zapnut audio kodek a vytočeno poslední číslo. V okamžiku spojení je zapnuto potlačení šumu a nastaven index *activeCall*, přičemž běh programu přechází zpět do smyčky *while(1)*. Po vypršení 3minutového časovače je generováno přerušení, jehož obsluha znovu spustí zvukovou detekci 5.12. Časovač určuje časový interval, po který je od poslední detekované události zvuková detekce neaktivní a nedochází tak k neustálému prozvánění uživatele v případě zamítnutí hovoru.

```
void HAL_COMP_TriggerCallback(COMP_HandleTypeDef *hcomp)
{
    if(hcomp == &hcomp2)
    {
        // disable new interrupt
        __disable_irq();
        // wake up SIM7600
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOH, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_RESET);
        if(testMode == 1)           // test mode
        {
            // toggle TEST LED
            HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_7);
            for(int i = 0; i < 200000; i++);
        }

        if(testMode == 0 && activeCall == 0)
        {
            // disable sound detection
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_SET);
            // start 3 minute timer
            HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim2);
            // turn on audio codec NAU8810
            HAL_GPIO_WritePin(GPIOB,GPIO_PIN_12,GPIO_PIN_RESET);
            // call last number
            sendCommand_disIrq("ATD>SM1;\r\n");

            if(checkResponse("VOICE CALL: BEGIN"))
            {
                // turn on noise suppression, set index
                sendCommand_disIrq("AT+CNSLIM=0x7fff\r\n");
                activeCall = 1;
            }
        }
        // enable new interrupt
        __enable_irq();
    }
}
```

Kód 5.11: Obsluha přerušení zvukové detekce.

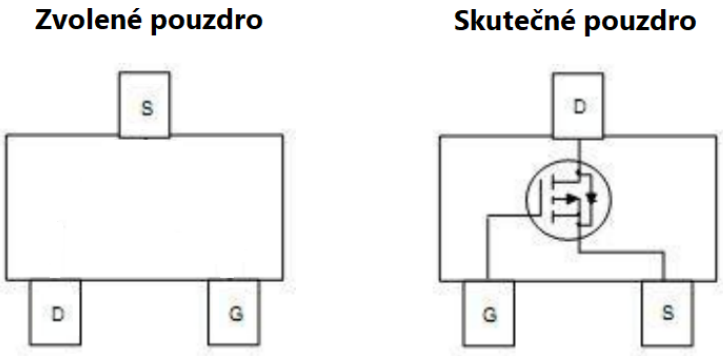
```
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef* htim)
{
    // enable sound detection again
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_RESET);
}
```

Kód 5.12: Obsluha přerušení vypršením časovače TIM2.

Kapitola 6
Vyhodnocení

6.1 Chyba v návrhu DPS

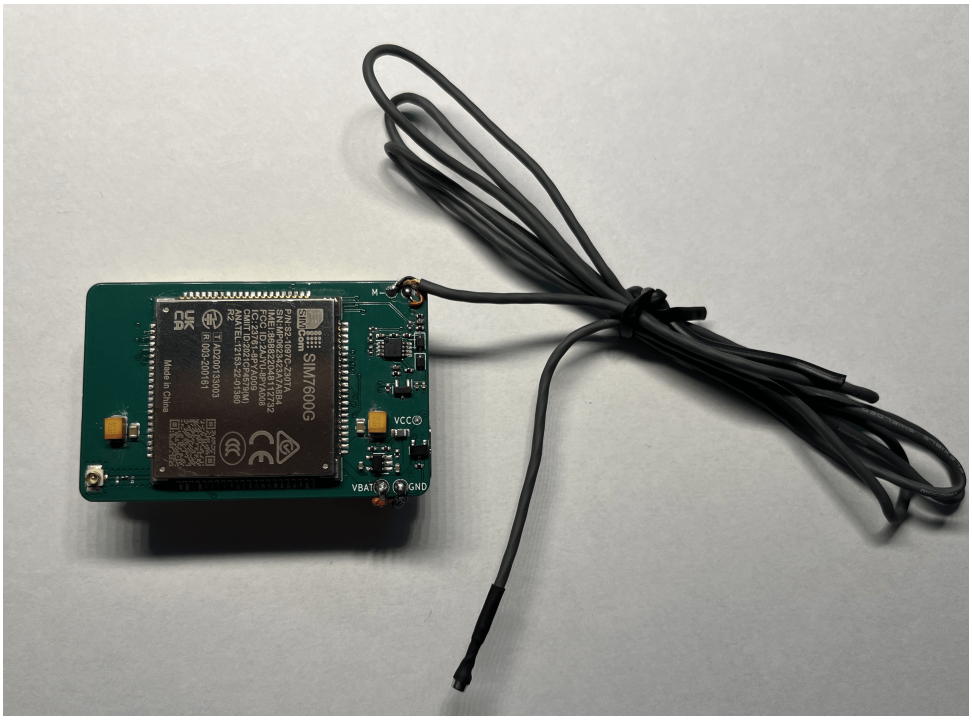
Hned v prvopočátku testování zařízení byla zjištěna nefunkčnost spínání zvukové detekce a audio kodeku NAU8810. Obě části byly trvale vypnuté nehledě na logický stav svorky GATE. Při bližší analýze byla zjištěna chyba v návrhu desky plošných spojů, konkrétně špatně zvolené pouzdro spínacích MOSFETů typu P 6.1 a chybějící spoj mezi pinem mikrokontroléru a svorkou GATE spínacího MOSFETu audio kodeku. Chybějící spoj byl dočasně vyřešen externí propojkou z tenkého měděného vodiče. Spínací MOSFETy byly osazeny tak, aby vyhověly špatně zvolenému rozložení kontaktů na desce. Tím došlo k dočasnému vyřešení problému a všechny části hardwarového návrhu fungují správně. Finálně budou obě chyby opraveny v následující verzi desky plošných spojů.



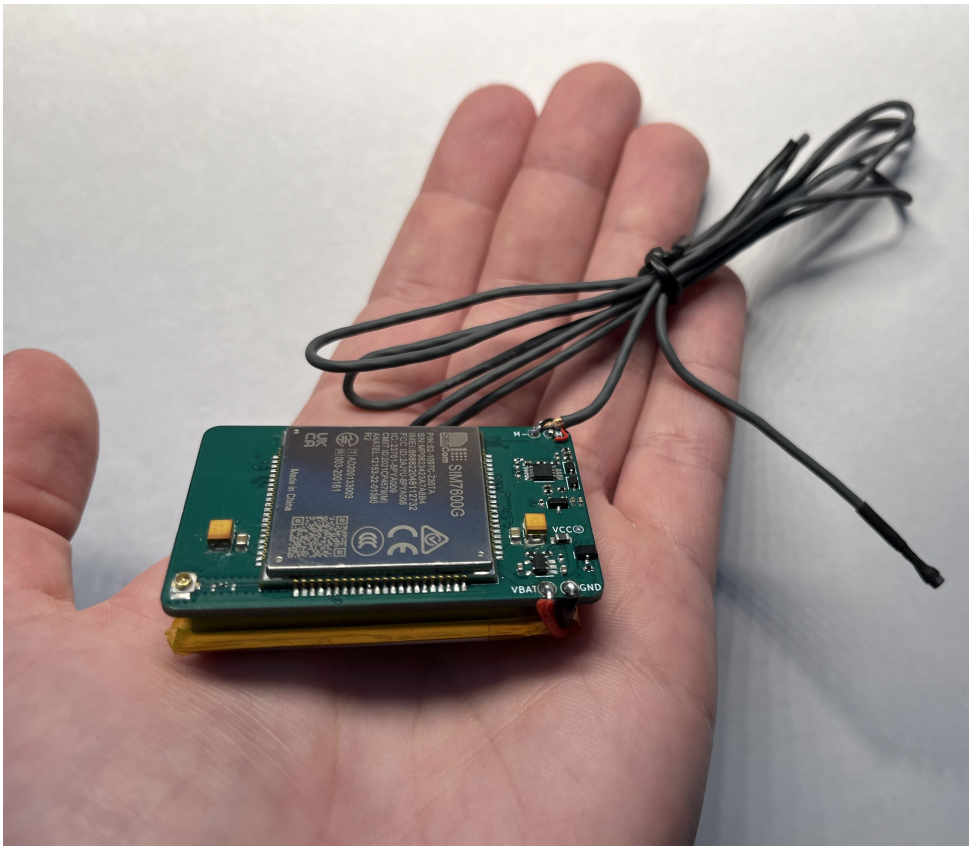
Obrázek 6.1: Pouzdra spínacích MOSFETů.

6.2 Funkce zařízení

Pro účely testování a vyhodnocení bylo zařízení vybaveno mikrofonem Knowles FG-23329-P07 a akumulátorem Li-Pol o kapacitě 1800 mAh, který svou velikostí odpovídá přibližně velikosti desky plošných spojů. Mikrofony Knowles jsou běžně dodávané spolu se současnými 2G odposlechy v nejdražší cenové variantě a disponují nejlepší kvalitou zvuku. Výsledný vzhled zařízení před zatažením do ochranné bužírky zobrazují obrázky 6.2 6.3. V době pořízení obrázků nebyla z důvodu pozdního dodání k dispozici kratší FPC 4G anténa, která bude následně přilepená na spodní straně akumulátoru a propojena s konektorem na svrchní straně DPS.



Obrázek 6.2: Výsledný vzhled 4G odposlechu.



Obrázek 6.3: Výsledný vzhled 4G odposlechu.

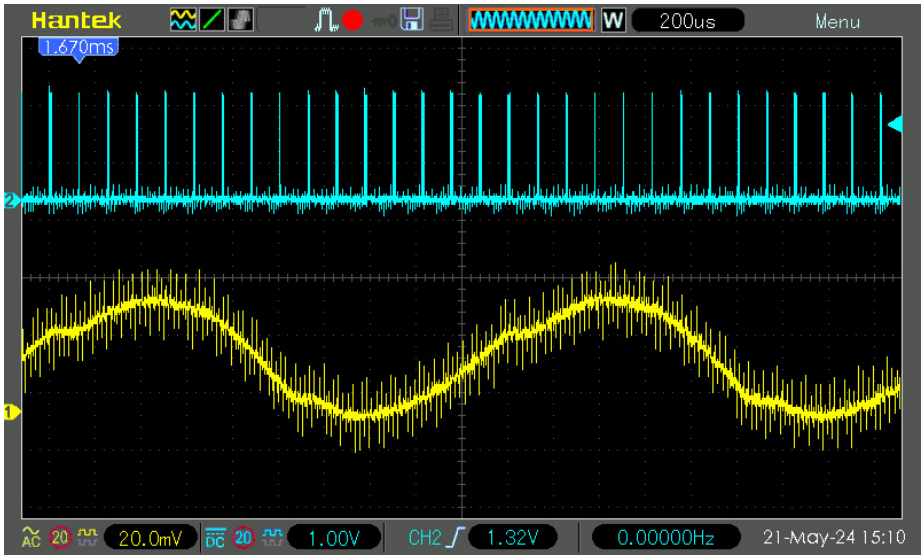
Zařízení bylo postupně podrobeno sérii testů pro ověření všech implementovaných funkcí. V současnosti zařízení splňuje funkční požadavky, které byly definované na začátku práce. Vložením SIM karty dochází k zapnutí zařízení, což je indikováno rozsvícením červené LED diody. Následné blikání oranžové LED diody signalizuje probíhající registraci k síti 4G. V okamžiku zhasnutí obou LED diod je zařízení připravené k použití. Vytočením čísla vložené SIM karty dojde k automatickému spojení hovoru a během hovoru je možné pomocí číselníku upravovat zesílení odposlechu v deseti krocích 0–9. Zasláním SMS příkazů ve tvaru „DetTestON“ a „DetTestOFF“ je možné zapnout/-vypnout režim testování zvukové detekce. Během aktivního testu zařízení indikuje detekci blikáním modré LED diody, což umožňuje uživateli vyzkoušet a doupravit citlivost detekce pomocí příkazů „Det1“–„Det5“ tak, aby nedocházelo k falešné detekci vlivem okolního ruchu. SMS příkazy „DetON“ a „DetOFF“ umožňují zapnout/vypnout samotnou zvukovou detekci. V případě zapnuté detekce zařízení automaticky zavolá na telefonní číslo uživatele v případě, že je překročena detekční hranice, což je následně ověřováno každé 3 minuty.

6.3 Kvalita zvuku a test zvukové detekce

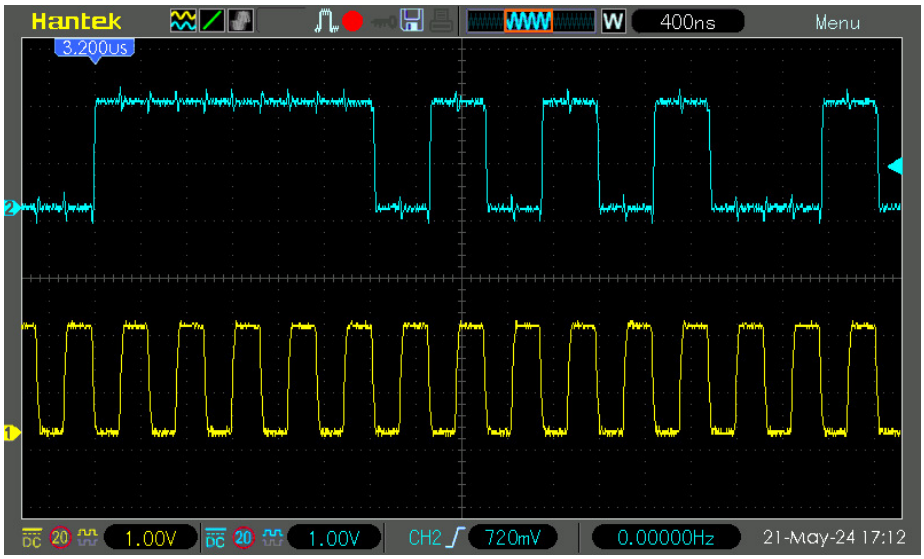
Kvalita zvuku během aktivního hovoru splňuje definovaný požadavek, tedy srozumitelně přenést konverzaci dvou osob v místnosti o velikosti cca 25 m^2. Jako nevhodné se naopak během testů ukázalo nastavení zesílení s postupným krokem. V rozmezí 0–2 je zvukový výstup velmi čistý, ale příliš slabý. Za ideálních podmínek zabírá konverzaci pouze do vzdálenosti cca 1 m od samotného odposlechu. Naopak při nejvyšším zesílení 9 je odposlech i přes zhoršené šumové vlastnosti schopen srozumitelně zachytit i šeptání z vedlejší místnosti. Problém nastává v případě hlasitého rozhovoru v těsné blízkosti odposlechu, kdy se zvuk stává plechový až nesrozumitelný. Nejlepších vlastností bylo dosaženo v rozmezí zesílení 4–7, kdy je zvuk dostatečně čistý, nedochází k přebuzení a spolehlivě pokryje celou místnost, případně i rozhovor z místnosti vedlejší, čímž překonává i současný 2G odposlech LONGLIFE 20 PRO K+. V dalším vývoji bude zesílení přeškálováno více kolem středu tak, aby se odstranily prakticky nepoužitelné možnosti, kdy je zvuk příliš slabý, nebo naopak přebuzený. Test zvuku potvrdil již při základní konfiguraci slušné výsledky a vhodnost zvoleného audio kodeku v kombinaci s komunikačním modulem SIM7600. Audio kodek dále nabízí funkce jako je dodatečná filtrace, nastavitelné potlačení okolního ruchu, automatické řízení hlasitosti, ekvalizér a mnoho dalších, které pro budoucí vývoj otevírají zcela nové možnosti.

V průběhu testování kvality zvuku byly odměřeny časové průběhy analogového vstupu a digitálního výstupu audio kodeku NAU8810 6.4. Zvukový signál byl simulován malým reproduktorem jmenovitého výkonu 500 mW s impedancí 32 Ω buzeným frekvenčním generátorem FeelTech FY3224S sinusovým průběhem o frekvenci 500 Hz. Kanál 1 zobrazuje velmi slabý výstupní signál mikrofonu Knowles FG-23329-P07, kanál 2 poté časový průběh digitální pulzní kódové modulace tvořící výstup audio kodeku NAU8810. Detailnější pohled modulace PCM poskytuje odměřený hodinový signál (kanál 1) a část časového rámce (kanál 2) 6.5.

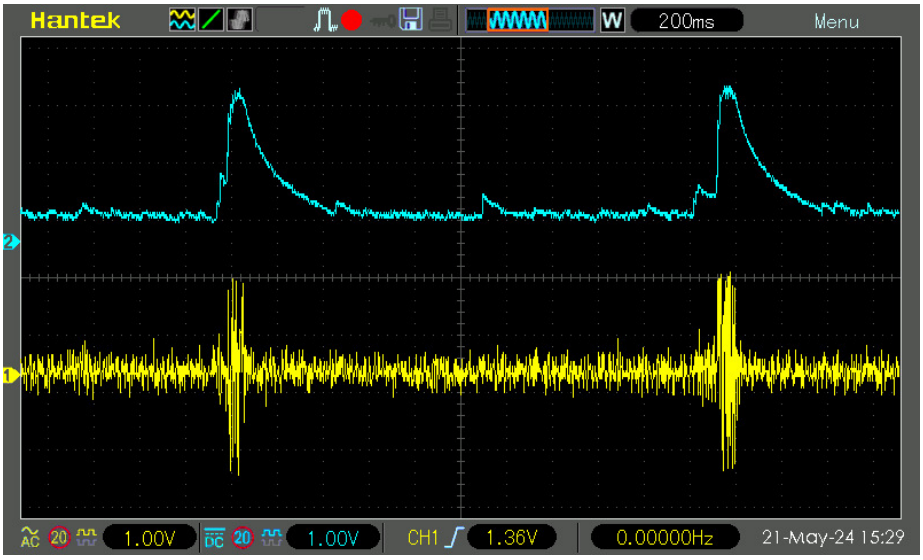
Funkci zvukové detekce přibližují časové průběhy zesíleného výstupního signálu mikrofonu (kanál 1) a výstupního signálu operačního usměrňovače (kanál 2) 6.6. Průběhy byly odměřené na invertující svorce operačního usměrňovače (pin 6) a na rezistoru R36 3.7. Testovací promluva „jedna jedna“ je zachycená impulzy v časovém průběhu kanálu 2. Tento signál je dále porovnán interním komparátorem mikrokontroléru s nastavenou detekční úrovní, jejíž překročení vyvolává přerušení.



Obrázek 6.4: Časový průběh vstupního a výstupního signálu audio kodeku NAU8810.



Obrázek 6.5: Detailní časový průběh pulzní kódové modulace.



Obrázek 6.6: Časový průběh signálů zvukové detekce.

6.4 Spotřeba zařízení

Spotřeba zařízení v jednotlivých režimech byla změřena při napětí akumulátoru V_bat= 3,97 V digitálním multimetrem Proskit MT-1710. Výrobcem udávaná přesnost měření stejnosměrného elektrického proudu v rozsahu 400 mA je ±(1,2 % + 8 digitů) s rozlišením 100 μA [35]. V případě aktivního hovoru se však okamžitá spotřeba dynamicky mění v závislosti na velikosti datového toku. Pro získání průměrné spotřeby za delší časový úsek byl využitý proudový senzor Adafruit 904 založený na integrovaném obvodu INA219 s udávanou přesností měření až 1 % [36]. V rámci platformy Arduino byl vytvořen jednoduchý program, který každých 100 ms vyčítá okamžitou hodnotu proudového odběru a následně vypisuje aritmetický průměr hodnot za posledních 30 sekund. Na základě naměřených hodnot 6.1 je možné vyhodnotit definovaný požadavek nízké spotřeby, konkrétně výdrž minimálně jednotek dnů v klidovém režimu.

Uvážením kapacity akumulátoru 1800 mAh a za velmi zjednodušujícího předpokladu, že proudový odběr bude konstantní, je možné určit výdrž dle vzorce

$$t = \frac{Q}{I}, \tag{6.1}$$

kde t je čas v hodinách, Q je náboj v ampérhodinách a I proud v ampérech. Výsledkem je výdrž přibližně 19 dnů v režimu spánku, případně 17 dnů s aktivní zvukovou detekcí, což jasně splňuje definovaný požadavek. Pro uvedení širšího kontextu jsou tyto hodnoty spolu s dalšími parametry v následující části porovnány s komerčním 2G odposlechem.

Tabulka 6.1: Proudový odběr zařízení v jednotlivých režimech.

Režim	Proudový odběr (mA)
Spánek	3,9
Spánek + zvuková detekce	4,3
Aktivní hovor – ticho	70
Aktivní hovor – zvuk	150

6.5 Porovnání s komerčním 2G odposlechem

Celkové zhodnocení navrhnutého 4G odposlechu je možné učinit na základě porovnání s komerčním 2G odposlechem LONGLIFE 20 PRO K+ 6.2 [37].

Tabulka 6.2: Porovnání zařízení s komerčním 2G odposlechem.

Parametr	Navrhnutý 4G odposlech	Komerční 2G odposlech
Rozměry	56 x 36 x 20 mm	52 x 30 x 17 mm
Komunikační síť	4G	2G
Akumulátor	1800 mAh	1200 mAh
Mikrofon	Knowles FG-23329-P07	Knowles FG-23329-P07
Max. vzdálenost zachycení rozhovoru	8–10 m	5–7 m
Zvuková detekce	Ano	Ano
Nastavitelná citlivost zvuk. detekce	Ano	Ne
Spotřeba v režimu spánku	3,9 mA	3–4 mA
Spotřeba režim spánku + zvuk. detekce	4,3 mA	20–30 mA
Spotřeba při aktivním hovoru	70–150 mA	100–150 mA
Výdrž v režimu spánku	až 19 dnů	až 14 dnů
Výdrž v režimu spánku se zvuk. detekcí	až 17 dnů	až 2 dny
Výdrž při aktivním hovoru	až 12 hodin	až 8 hodin

Na základě porovnání parametrů lze vyhodnotit, že se navrhovaný prototyp 4G odposlechu téměř ve všech kritériích minimálně rovná komerčnímu 2G odposlechu. Zásadní výhodou je možnost nastavitelného zesílení během aktivního hovoru a nastavitelný práh zvukové detekce. Již základní konfigurace audio kodeku NAU8810 nabízí o něco lepší zvuk a zároveň větší dosah. Velký rozdíl tvoří výdrž zařízení při aktivované zvukové detekci, zde vyniká 4G odposlech více než osminásobně. Jediným negativním parametrem jsou celkové rozměry zařízení. Navrhovaný odposlech je větší, ale v kontextu všech nabízených výhod se jedná o přijatelný kompromis.

6.6 Možné vylepšení a úpravy

Současný stav 4G odposlechu nejlépe vystihuje pojem funkční prototyp, na jehož základě byla ověřena vhodnost zvolených komponent, funkčnost hardwarové části a byla nastíněna kostra řídicího firmwaru. Směrem k případné sériové výrobě a komerčnímu prodeji bude nutné provést některé úpravy a vylepšení.

V hardwarové části zařízení bude nutné opravit zvolené pouzdro spínacích MOSFETů a doplnit chybějící spoj napájení audio kodeku. Možným vylepšením by bylo upravit napájecí spínač celého zařízení tak, aby v případě poklesu napětí akumulátoru pod 3,4 V nedocházelo k opětovnému zapnutí zařízení. Pokud je v současnosti akumulátor na spodní hranici vybití, vlivem proudového zatížení klesne jeho napětí pod 3,4 V a dojde k odpojení napájení. Tím poklesne proudové zatížení akumulátoru, jeho napětí opět vzroste nad hranici 3,4 V, a i když už nedojde ke spojení se sítí 4G, zařízení cykluje mezi vypnutým a zapnutým stavem až do úplného vybití.

Firmware mikrokontroléru STM32 by bylo vhodné rozšířit o řešení možných chybových stavů, například vlivem výpadku sériové komunikace UART. Současná funkce *Send_checkResponse()* ověřuje očekávanou a skutečnou odpověď a předpokládá jejich shodu. V případě neshody zůstává firmware v nekonečné smyčce *HAL_Delay()*. Kromě ošetření chybových stavů je třeba přeškálovat nastavitelné zesílení během aktivního hovoru a dále vylepšit kvalitu zvuku pomocí dodatečných funkcí audio kodeku, jako je filtrace, potlačení okolního ruchu, automatické řízení hlasitosti a další. Zásadním rozšířením funkcionality odposlechu by bylo možné nahrávání záznamů na externí SD kartu, což rovněž umožňuje audio kodek NAU8810, a v rámci návrhu hardwarové části zařízení byl slot na SD kartu již implementován.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout prototyp bezdrátového zařízení pro přenos zvukového signálu v síti 4G. Po úvodním rozboru problematiky byla dle definovaných požadavků, zejména nízké spotřeby, provedena rešerše vhodných obvodových komponent, jejíž výsledkem byl výběr komunikačního modulu SIM7600 a mikrokontroléru řady STM32L1. Zvolené komponenty vytvořily základ pro návrh elektrického schématu, který vychází jednak z doporučení výrobců obvodových prvků, jednak z vlastní implementace napájecí části a zvukové detekce. Na základě elektrického schématu byla navržena deska plošných spojů o rozměrech 56 x 36 mm vyrobená společností JLCPCB. Pro testovací účely byl vytvořen základní firmware mikrokontroléru STM32 implementovaný v jazyce C za využití knihovny HAL. Ten zajišťuje prvotní inicializaci, registraci k síti 4G, řízení hlasového hovoru i režim nízké spotřeby.

Výsledný prototyp 4G odposlechu vybavený Li-Pol akumulátorem o kapacitě 1800 mAh byl otestován z hlediska definovaných funkčních požadavků a technických parametrů. Zařízení o rozměrech 56 x 36 x 20 mm splňuje definovaný požadavek srozumitelně přenést konverzaci dvou osob v místnosti o velikosti cca 25 m^2. Díky dodatečné funkci nastavitelného zesílení překonává možnosti komerčního 2G odposlechu a při maximálním zesílení dokáže v případě otevřených dveří srozumitelně zachytit i konverzaci z vedlejší místnosti na vzdálenost zhruba 8–10 m. Dále je zařízení schopné na základě detekovaného zvuku samo iniciovat spojení s uživatelem a díky nastavitelné citlivosti nedochází k falešným detekcím, jako v případě současných 2G odposlechů. Naměřený proudový odběr 3,9 mA v režimu spánku zajišťuje dlouhou životnost až 19 dnů, čímž několikanásobně převyšuje definovaný požadavek výdrže minimálně jednotek dnů. Vynikajícího výsledku je dosaženo v režimu aktivní zvukové detekce, kde zařízení redukuje svůj proudový odběr na 4,3 mA oproti 25 mA komerčního odposlechu. Nevýhodou navrženého zařízení zůstávají větší rozměry, které kvůli velikosti komunikačního modulu SIM7600 nebylo možné dále redukovat. Větší rozměry jsou však kompenzovány řadou výhod, především dodatečnými funkcemi a až o 4 hodiny delší životností zařízení při aktivním hovoru. Celkové testy zařízení potvrdily vhodnost prototypu směrem k budoucímu vývoji, jehož základem bude oprava chyb v návrhu desky plošných spojů a vylepšení firmwaru mikrokontroléru včetně ošetření

chybových stavů. Možným rozšířením funkcionality by mohlo být nahrávání záznamů na externí SD kartu a široká škála možností audio kodeku NAU8810, jako například potlačení okolního ruchu či aktivní řízení zesílení mikrofonu.

Literatura

[1] KRČMÁŘ, Petr. Mobilní sítě 2G tu s námi budou minimálně do roku 2028. In: *Root* [online]. 2021, 16.12.2021 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.root.cz/zpravicky/mobilni-site-2g-tu-s-nami-budou-minimalne-do-roku-2028/

[2] 2G a 3G sítě se globálně vypínají!. In: *Sectron* [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: https://eshop.sectron.cz/2g-a-3g-site-se-globalne-vypinaji/a-6316/

[3] KERNER, Sean Michael. DEFINITION 4G (fourth-generation wireless). In: *TechTarget* [online]. 2003 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/4G

[4] WEBER, Tobias. What Is 4G? Fourth Generation Cellular Networks Explained. In: *Emnify* [online]. 2021, 22.04.2021 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.emnify.com/iot-glossary/4g

[5] KRUMBEIN, Adam. *Understanding the Basics of MIMO Communication Technology* [online]. In: . 2016, s. 1-12 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.rfmw.com/data/swa-mimo-basics.pdf

[6] PRAVDA, Ivan. *Mobilní a bezdrátové sítě* [online]. ČVUT, 2015 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://ecvut.publi.cz/book/236-mobilni-a-bezdratove-site

[7] Základní informace o LTE. In: *ČTÚ* [online]. 2017 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20200219072002/https:/digi.ctu.cz/lte-rk/olte

[8] 5G sítě. In: *ČTÚ* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://ctu.gov.cz/5g

[9] *Quectel_EG800Q-EU_Hardware_Design_V1.0* [online]. In: . 2023, 2023-02-07 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.quectel.com/download/quectel_eg800q-eu_hardware_design_v1-0/

[10] *Quectel_EG91_Series_Hardware_Design_V2.2* [online]. In: . 2021, 2021-07-28 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.quectel.com/download/quectel_eg91_series_hardware_design_v2-1/

[11] *Quectel_EG915U_Series_Hardware_Design_V1.1* [online]. In: . 2023, 2023-01-17 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.quectel.com/download/quectel_eg915u_series_hardware_design_v1-1/

[12] *Quectel_EG912U-GL_Hardware_Design_V1.1* [online]. In: . 2023, 2023-08-17 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.quectel.com/download/quectel_eg912u-gl_hardware_design_v1-1/

[13] LEXI-R10 series. *U-blox* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/en/product/lexi-r10-series

[14] LARA-R6 series. *U-blox* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/en/product/lara-r6-series

[15] LENA-R8 series. *U-blox* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/en/product/lena-r8-series

[16] *A7672X_A7670X_Series_Hardware_Design_V1.03* [online]. In: . 2022, 2022-11-18 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://en.simcom.com/product/A7672X.html

[17] *SIM7600G(-H)_SIM7600NA(-H)_Hardware_Design_V1.09* [online]. In: . 2022, 2022-01-05 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.simcom.com/product/SIM7600G-1.html

[18] WAVESHARE. SIM7600E-H 4G HAT. *Waveshare* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.waveshare.com/wiki/SIM7600E-H_4G_HAT

[19] What is the Difference between 8051, PIC, AVR and ARM? In: *Elprocus* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.elprocus.com/difference-between-avr-arm-8051-and-pic-microcontroller/

[20] Arduino/Processing/Python Language Comparison. In: *Arduino Docs* [online]. 2024, 2024-01-16 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://docs.arduino.cc/tutorials/generic/language-comparison/

[21] Mastering STM32 Programming: Step into the World of Embedded Systems. In: *IIES* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://iies.in/blog/mastering-stm32-programming-step-into-the-world-of-embedded-systems/

[22] STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. *ST* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html

[23] *STM32L151x6/8/B-A, STM32L152x6/8/B-A* [online]. In: . 2017-8 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2304140030_STMicroelectronics-STM32L151C8T6A_C95578.pdf

[24] *Bq21040 0.8-A, Single-Input, Single Cell Li-Ion and Li-Pol Battery Charger* [online]. In: . 2016-4 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.digikey.cz/en/products/detail/texas-instruments/BQ21040DBVR/6036340

[25] *GS2302 Ultra Fast High PSRR Low Noise CMOS LDO Regulator* [online]. In: . [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2305191755_Gainsil-GS2302-33TR5_C6283814.pdf

[26] *MT9700 Adjustable Fast Response Current-Limited Power-Distribution Switch* [online]. In: . [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_1809291208_XI-AN-Aerosemi-Tech-MT9700_C89855.pdf

[27] *Voltage Detector IC Series Standard CMOS Voltage Detector IC* [online]. In: . 2020, 2020-12-11 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2211141030_ROHM-Semicon-BD48K34G-TL_C672199.pdf

[28] *NAU88C10 Mono Audio Codec with 2-Wire Control Interface* [online]. In: . 2024, 2024-03-19 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.nuvoton.com/export/resource-files/en-us–DS_NAU88C10_DataSheet_EN_Rev2.1.pdf

[29] *COS1333, COS2333, COS4333 Zero-Drift Operational Amplifiers* [online]. In: . [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2312251628_COSINE-COS2333MRA_C5139038.pdf

[30] JLCPCB. PCB Manufacturing & Assembly Capabilities. *JLCPCB* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities

[31] ŠKVOR, Zbyněk. *Impedanční přizpůsobení* [online]. In: . [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.skvor.cz/pdf/impmatch2.pdf

[32] Ultimate Guide To Microstrip, Stripline And CPW In PCBs. In: *JHDPCB* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://jhdpcb.com/blog/microstrip-vs-stripline-vs-coplanar-waveguide/

[33] JLCPCB Impedance Calculator. *JLCPCB* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://jlcpcb.com/pcb-impedance-calculator

[34] STM32CubeIDE Integrated Development Environment for STM32. *ST* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html

[35] *Electrical Specifications - ProsKit MT-1710 User Manual* [online]. In: . 2013, 2013-11-21 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.manualslib.com/manual/738267/Proskit-Mt-1710.html#manual

[36] INA219 High Side DC Current Sensor Breakout - 26V 3.2A Max - STEMMA QT. *Adafruit* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.adafruit.com/product/904

[37] GSM odposlech LONGLIFE 20 PRO K+. *SpyObchod* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.spyobchod.cz/gsm-odposlech-longlife-20-pro-k-e123709.htm

[38] MIMO communications concept with multiple transmit and receive antennas [obrázek]. In: *Cadence* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/fundamentals-of-mimo-communication-in-wireless-systems

[39] Mapa pokrytí [obrázek]. In: *ČTÚ* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://vportal.ctu.gov.cz/mobile/mapa

[40] GSM odposlech LONGLIFE 20 PRO K+ [foto]. In: *SpyObchod* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.spyobchod.cz/gsm-odposlech-longlife-20-pro-k-e123709.htm

[41] SIM7600E-H 4G HAT [foto]. In: *Waveshare* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.waveshare.com/wiki/SIM7600E-H_4G_HAT

[42] NUCLEO-L152RE [foto]. In: *SOSelectronic* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.soselectronic.com/sk/products/stmicroelectronics/nucleo-l152re-1-340654

[43] Microstrip-VS-Stripline-vs-coplanar-waveguide [obrázek]. In: *JHDPCB* [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://jhdpcb.com/blog/microstrip-vs-stripline-vs-coplanar-waveguide/