



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

BEZPEČNOSTNÍ KOMUNIKÁTOR

SAFETY COMMUNICATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Kuřímský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**
Ústav mikroelektroniky

Student: Lukáš Kuřímský

ID: 195376

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Bezpečnostní komunikátor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci bakalářské práce navrhnete koncept pro bezpečnostní komunikátor pracující na velmi dlouhých vlnách umožňující odeslání záchranného signálu bez pokrytí GSM signálu. V návrhu se zaměřte na návrh protokolu pro přenos dat a základní ověření koncepce. Navržené zařízení realizujte, vytvořte firmware a ověřte jeho funkčnost. Provedte měření důležitých parametrů a porovnáni s teoretickými předpoklady. Dosažené parametry vyhodnotte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 30.5.2019

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

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na návrh konceptu a prototypu bezpečnostního komunikátoru, který dokáže vysílat záchranný signál z nepřístupných prostor, nebo prostor bez pokrytí GSM signálu. Práce obsahuje detailní popis funkce individuálních částí, které jsou nutné pro zpracování a vysílání signálu. Rozebírá způsoby vysílání a zaměřuje se na amplitudovou modulaci formou klíčování amplitudovým posunem pomocí samoopravného protokolu. Dílčí částí je i volba a návrh testovací antény a jejího přizpůsobení.

KLÍČOVÁ SLOVA

bezpečnostní komunikátor, ASK, magnetická smyčková anténa, RF vysílač, RF přijímač

ABSTRACT

The bachelors thesis deals with the draft of a safety communicator and the prototype that is able to transmit a rescue signal from areas that are inaccessible or not covered with GSM signal. The project offers a detailed description of the functions of the individual components necessary for processing and transmitting of the signal. Furthermore, it discusses the methods of transmitting and focuses particularly on one of the forms of amplitude modulation – amplitude shift keying that uses a self-healing protocol. It partly deals also with the process of choosing and designing the test antenna and its tuning.

KEYWORDS

safety communicator, ASK, magnetic loop antenna, RF transmitter, RF receiver

KUŘÍMSKÝ, Lukáš. *Bezpečnostní komunikátor*. Brno, 2019, 88 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a své přítelkyni za psychickou a morální podporu. Pavlu Koudelovi, Miloši Čejkovi a Janu Hofmannovi za pomoc při testování navrhovaných zařízení. Zároveň bych chtěl poděkovat kolegovi Janu Ondřichovi z firmy Resideo za konzultace ohledně problematiky antén a vysílání signálu, a také kolegovi Liboru Palíškovi z firmy Honeywell za pomoc při měření a testování vysílání zařízení. A nakonec podzemnímu krytu 10-Z za poskytnuté prostory při testování.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Komunikace	12
1.1 Radiokomunikace v jeskyních	12
1.2 Komunikace pomocí dvoubodového spoje	13
1.3 Komunikace pomocí záchytných bodů	14
1.4 Bezdrátová komunikace	14
1.5 Přenos dat	14
1.6 Sériová komunikace	15
1.7 Modulace	16
1.7.1 Analogová modulace	16
1.7.2 Digitální modulace	16
1.8 Protokol	18
1.8.1 CRC (Cyclic redundancy check)	18
1.8.2 Samoopravné protokoly	18
1.9 Antény	19
1.9.1 Magnetická smyčková anténa (MLA)	20
1.9.2 Rámová anténa	24
1.10 Rezonanční obvod	24
2 Koncept zařízení	26
2.1 Blokové schéma zařízení	27
2.2 Povolená kmitočtová pásma	27
2.3 Protokol a záchranný signál	28
2.3.1 Protokol pro přenos dat	28
2.3.2 Protokol pro odeslání rychlé zprávy	30
2.3.3 Protokol pro odeslání SOS signálu	30
2.3.4 Protokol pro ověření přenesených dat	31
2.3.5 Překlad přijatých dat a odesílaných dat pomocí převodní tabulky	31
3 Analogové a digitální části zařízení	33
3.1 Generátor sinusového signálu	33
3.2 Neizolovaný zvyšující měnič	35
3.3 Výstupní zesilovač	39
3.4 Anténa	41
3.5 Vstupní zesilovač - 1. stupeň zesílení	44
3.6 Vstupní filtr typu pásmová propust	46

3.7	Vstupní zesilovač - 2. stupeň zesílení	51
3.8	Precizní usměrňovač	53
3.9	Analogové předzpracování	56
3.10	Výstupní komparátor	58
3.11	Napájecí zdroje	59
4	Ověření funkčnosti konceptu	62
4.1	Ověření celé výstupní části na hotovém prototypu	62
4.2	Ověření celé vstupní části na hotovém prototypu	64
4.3	Měření v bezodrazové EMC komoře	66
5	Programové části zařízení	68
5.1	Uživatelské rozhraní	68
5.2	Základní nastavení zařízení a kalibrace antén	68
5.3	Druhy a odesílání jednotlivých druhů zpráv	68
6	Reálné testování zařízení	70
6.1	Testování v elektromagneticky zarušeném prostředí	70
6.2	Testování v podzemním krytu 10-Z	71
7	Závěr	73
	Literatura	76
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	78
	Seznam příloh	79
A	Prototyp zařízení	80
A.1	Schéma zapojení	80
A.2	Top layer - Vrstva součástek	81
A.3	Bottom layer - Vrstva spojů	82
A.4	Osazovací plán - Strana součástek	83
A.5	Osazovací plán - Strana spojů	84
B	Maticová klávesnice	85
B.1	Schéma zapojení	85
B.2	Top layer - Vrstva součástek	86
B.3	Bottom layer - Vrstva spojů	87
B.4	Osazovací plán - Strana součástek	88

Seznam obrázků

1.1	Příklad komunikace v jeskyni pomocí magnetické rámové antény [1]	13
1.2	Znázorněné signály amplitudově modulovaného signálu a signálu amplitudově klíčovaného	17
1.3	Magnetická smyčková anténa s vazební smyčkou uprostřed [13]	20
1.4	Vyzařovací charakteristika magnetické smyčkové antény při vyšších hodnotách efektivity [15]	21
1.5	Středovlnná rámová anténa s křížovou kostrou [13]	24
1.6	Schéma zapojení sériového RLC obvodu	25
1.7	Schéma zapojení paralelního RLC obvodu	25
2.1	Blokové schéma navrhovaného zařízení	27
3.1	Rozložení vývodů a funkční diagram integrovaného obvodu ICL8038 [19]	33
3.2	Schéma zapojení oscilátoru s integrovaným obvodem ICL8038	34
3.3	Průběh generovaného sinusového signálu za oddělovacím kondenzátorem	35
3.4	Průběh sinusového signálu s posunutou napěťovou nesymetrií a zesílený pomocí operačního zesilovače OPA2344 mezi hodnoty 0 až 5 V	36
3.5	Teoretické zapojení zvyšujícího měniče napětí	36
3.6	Schéma zapojení zvyšujícího měniče napětí	37
3.7	Efektivita zvyšujícího měniče napětí [20]	37
3.8	Výstupní napětí zdroje napětí v odezvě na zapnutí zdroje při odpojené zátěži	38
3.9	Výstupní napětí zdroje napětí v odezvě na zapnutí zdroje při připojené zátěži	38
3.10	Schéma zapojení výstupního zesilovače OPA547F	39
3.11	Výstupní napětí operačního zesilovače OPA547F při zesílení signálu z oscilátoru	40
3.12	Antény vyrobené z měděného lakovaného vodiče	42
3.13	Schéma zapojení prvního stupně vstupního invertujícího zesilovače	45
3.14	Teoretický průběh výstupu zesilovače prvního stupně zesílení	45
3.15	Reálný průběh výstupu zesilovače prvního stupně zesílení	46
3.16	Schéma zapojení vstupního pásmového filtru	48
3.17	Teoretická charakteristika AC vstupního filtru i se zobrazením posunu fáze	48
3.18	Reálná naměřená charakteristika vstupního filtru	49
3.19	Teoretický přenesený signál na výstupu filtru	50

3.20	Reálný naměřený signál na výstupu filtru	50
3.21	Reálný naměřený signál na výstupu filtru po přivedení obdélníkového signálu na vstup	51
3.22	Schéma zapojení druhého stupně vstupního invertujícího zesilovače	52
3.23	Teoretický průběh signálu druhého stupně vstupního invertujícího zesilovače	52
3.24	Reálný průběh signálu druhého stupně vstupního invertujícího zesilovače	53
3.25	Schéma zapojení precizního usměrňovače	54
3.26	Teoretický průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 100 mV	54
3.27	Teoretický průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 2 mV	55
3.28	Reálný průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 100 mV	55
3.29	Reálný průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 2 mV	56
3.30	Teoretický průběh integrovaného signálu při vstupním signálu 100 mV	57
3.31	Naměřený průběh integrovaného signálu při vstupním signálu 100 mV	57
3.32	Schéma zapojení RC článku a výstupního komparátoru	58
3.33	Teoretický průběh komparovaného signálu při vstupním signálu 100 mV	59
3.34	Naměřený průběh komparovaného signálu při vstupním signálu 100 mV	59
3.35	Schéma zapojení zdrojů napětí pro celý obvod	61
4.1	Osazené prototypy zařízení	62
4.2	Průběh výstupního signálu výkonového zesilovače na hotovém prototypu při výstupu zatíženém magnetickou smyčkovou anténou	63
4.3	Naměřené průběhy všech čtyř signálů v jednom snímku	64
4.4	Naměřené průběhy všech čtyř signálů s reálnou anténou v jednom snímku	65
4.5	Naměřené kmitočtové pásmo pro nízké frekvence pomocí měřícího přístroje ESR7.	66
4.6	Zapojené pracoviště v bezodrazové komoře	67
6.1	Testování zařízení v elektromagneticky zarušeném prostředí	71
6.2	Testování zařízení v elektromagneticky zarušeném prostředí podzemního krytu 10-Z	72
A.1	Vygenerovaná strana spojů součástek plošného spoje, zvětšení 1.65x	81
A.2	Vygenerovaná strana spojů plošného spoje, zvětšení 1.65x	82
A.3	Osazovací plán strany součástek plošného spoje, zvětšení 1.5x	83
A.4	Osazovací plán strany spojů plošného spoje pro schéma, zvětšení 1.5x	84
B.1	Schéma zapojení maticové klávesnice, zvětšení 1.65x	85
B.2	Vygenerovaná strana spojů součástek plošného spoje, zvětšení 1.65x	86

B.3	Vygenerovaná strana spojů plošného spoje, zvětšení 1.65x	87
B.4	Osazovací plán strany součástek plošného spoje, zvětšení 1.5x	88

Seznam tabulek

1.1	Příklad využití samoopravného protokolu	19
2.1	Seřazené bity navrhovaného přenosového protokolu s jejich časovými hodnotami	29
2.2	Protokol pro přenos rychlé zprávy	30
2.3	Protokol pro přenos SOS signálu	31
2.4	Seřazené bity navrhovaného protokolu pro odpověď správně přijatých dat (ACK) s časovými hodnotami	31
3.1	Naměřené hodnoty mezipásmového filtru použité pro graf na obrázku 3.18	47
3.2	Porovnání teoretických a reálných hodnot vstupního filtru	47
6.1	Provedený test na různé vzdálenosti při různém zesílení zařízení . . .	70
6.2	Provedený test na různé vzdálenosti při různém zesílení zařízení . . .	72

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a vytvořením zařízení pro komunikaci na velmi dlouhých vlnách, které dokáže odeslat záchranný signál z nepřístupných prostor. Dále se zabývá návrhem protokolu pro přenos dat a ověření navrhovaného konceptu.

Výhodou zařízení by měla být komunikace převážně pomocí magnetické složky elektromagnetické vlny, která bude mít dostatečnou energii na průchod nemagnetickou překážkou s minimálním útlumem vysílaného signálu. Pro zařízení je potřeba vytvořit generátor harmonického signálu, nízkofrekvenční zesilovač a přijímací zesilovač se vstupním filtrem.

Vzhledem k cílenému použití zařízení je nutné uvažovat nejen problémy, které by mohly nastat v extrémních situacích, ale zabývat se také rozměrovými požadavky zařízení, výběrem vhodného napájecího zdroje, dimenzování a výběru elektronických součástí do náročných klimatických podmínek.

Primární použití zařízení by mělo být pro záchranáře a jeskyňáře, kteří by dokázali odeslat na povrch záchrannou zprávu. Teoreticky by zařízení mohlo být schopné na základě měření velikosti signálu i zjistit přibližnou polohu druhého zařízení, které záchranný signál vysílá.

Motivací byla tvorba zařízení, které je v České republice téměř nedostupné. Motivací byl navíc i požadavek kamaráda jeskyňáře. Hlavním cílem bylo změřeni všech částí zařízení, zajištění funkčnosti a ověření přenosu dat pomocí antén.

1 Komunikace

Pro navázání spojení mezi zařízeními lze použít různé druhy komunikace. Pro zařízení, vysílající na velmi nízkých kmitočtech a navrhované pro přerušovanou komunikaci je vhodné použití sériové komunikace pomocí předdefinovaných protokolů. Protože by zařízení mělo komunikovat i přes nepřístupné prostory, je nutné využít principu bezdrátové komunikace, nebo komunikace pomocí zachytných bodů. Popsány jsou v následujících podkapitolách všechny tři základní možnosti přenosu dat, avšak bakalářská práce se zabývá pouze přenosem záchranné zprávy pomocí bezdrátové komunikace využívající digitální formu modulace signálu. Protokol obsahuje nejen CRC kód pro detekci chyby přijatých dat, ale i samoopravnou formu protokolu, která lze využít při velmi krátkém výpadku nebo při zarušení spojení. Pro bezdrátovou komunikaci je jako přenosový prostředek využita anténa uvedená do rezonance pomocí rezonančního obvodu.

1.1 Radiokomunikace v jeskyních

Při komunikaci v jeskyních, nepřístupných prostorách a v dolech nelze komunikovat pomocí klasických vysílaček. Kmitočet, na kterém vysílají je velmi vysoký a dochází tak nejen k vysokému útlumu signálu z důvodu silných jeskynních stěn, přes které signál špatně proniká, ale i k mnohočetným odrazům, které ovlivní přijímaný signál. Klasické krátkovlnné vysílačky fungují tedy pouze ve velkých jeskyních síních, nebo otevřených prostorách, ale i tak velice omezeně.

Speciální radiopřijímače nazvané anglicky jako "Cave Radio" byly vyvinuty pro komunikaci přes pevnou skálu. Jejich využití po celé Evropě je stále výjimečné. Polonorky používají už mnoho let nízkofrekvenční komunikaci s pozemními stanicemi tak, že za sebou táhnou dlouhou anténu. To znamená jednu z hlavních nevýhod nízkofrekvenčních radiopřijímačů, neboť antény jsou skutečně velkých rozměrů. Zařízení tak většinou využívají antény, vyrobené z kabelu, který je navinutý v malé smyčce. U takovýchto antén je však velmi nízká efektivita a zařízení tak nemohou pracovat na velké vzdálenosti. [1]

Již v 70. letech se začalo experimentovat s vysílači na velmi dlouhých vlnách, pro zajištění komunikace mezi povrchem a jeskyní. První jeskynní radiostanice byly poměrně velké a pro svou efektivní funkčnost potřebovaly velký výkon baterie. Vyvinuté zařízení nazvané Molefon (anglicky The Molephone) bylo komerčně dostupné, ale jeho návrh a popis funkce zůstal tajný. Veřejně dostupným se však stalo zařízení Ogofon (The Ogophone), které dodnes radioamatéři modifikují. Anténou je smyčka, která má průměr 1 metr, vyrobená z 64 závitů plochého počítačového kabelu. Samotné rádio je postaveno do rozměrově velké bedny. Pro úsporu rozměrů jsou baterie



Obr. 1.1: Příklad komunikace v jeskyni pomocí magnetické rámové antény [1]

umístěny mimo bednu. Takovou komunikaci lze vidět na obrázku 1.1.

Nejčastější využití těchto komunikačních zařízení je ve Velké Británii a speciálně se jím zabývá organizace Cave Rescue Organisation. V případě potřeby je přijímač na povrchu připojen k normálnímu telefonu nebo GSM. Podzemní záchranný tým tak může ihned komunikovat s lékařem nebo nemocnicí. Předchůdce jeskynního rádia se zrodil právě ve Velké Británii, kde anténa se smyčkou zachycovala 3 kHz signál "pípnutí". To bylo užívané k zjištění polohy (umístění podzemního bodu na povrchu). Vysílač/přijímač má zabudovaný tzv. maják (beacon). Pokud je aktivován, vysílá zařízení silný signál Morseovy abecedy, který umožní týmu na povrchu sledovat vysílač na dlouhé vzdálenosti (až několik set metrů). [1]

1.2 Komunikace pomocí dvoubodového spoje

Dvoubodový spoj představuje klasickou komunikaci pomocí rádiových vln, po dvou vodičích nebo více než dvou vodičích mezi koncovými zařízeními. Nejsnadnějším příkladem je telefonní hovor - za předpokladu, že jsou spojena pouze dvě koncová zařízení. Hlas zachycený prvním zařízením vyšle signál do druhého, ve kterém hlas zazní. Dvoubodovým spojením však může být i mikrovlnný spoj nebo obousměrná rádiová komunikace. Při spojení na větší vzdálenosti bylo dříve potřeba, aby byl koncový bod vybavený modemem. Ten konvertoval digitální proud dat na analogový signál a opačně. Při dnešních možnostech se využívá bezdrátové datové komunikace přede-

vším pro internet. Pro komunikaci v uzavřených prostorech (doly) se dnes nejčastěji využívá drátového propojení různých míst systematicky rozložených v prostorech. Toto propojení se používá převážně v podobě pevných telefonních linek. [2]

1.3 Komunikace pomocí záchytných bodů

Poměrně nový způsob komunikace v jeskyních je natažené kabelové spojení mezi vstupem jeskyně a jednotlivými chodbami, odkud jsou systematicky rozmístěna zařízení (označena jako opakovače), schopná bezdrátově komunikovat na vyšší frekvenci na poměrně krátkou vzdálenost. Každý účastník komunikace potom vlastní rozměrově malé zařízení, podobná mobilnímu telefonu, která s opakovači komunikují. Zprávu, kterou opakovač obdrží poté přeposílá na další opakovač a tímto způsobem se poměrně rychle dokáže zpráva přenést na velké vzdálenosti. Zařízení po určitých časových intervalech vysílají signál o své aktivitě. Při přerušení komunikace, nebo jiném problému upozorní ostatní zařízení, kde přibližně k poruše došlo, nebo případně ve kterých místech se naposledy zařízení se ztraceným signálem pohybovalo. Komunikace je rychlá a spolehlivá, avšak při zneprístupnění prostor prakticky nepoužitelná pokud se zařízení dostane do pozice mimo signál zapojeného záchytného bodu.

1.4 Bezdrátová komunikace

Bezdrátovou komunikaci lze podle historického hlediska dělit do dvou skupin rádiových komunikací. Veřejné, u kterých se jedná například o mobilní sítě operátorů a neveřejné, které jsou využívány záchrannými složkami nebo jinými soukromými přenosy. Dnes si však pod tímto výrazem každý představí přenosovou technologii pro datové nebo komunikační přenosy, možnosti připojení k dalším typům sítí nebo konkrétní standardizované služby jako například WiFi. Přijímání a vysílání signálu probíhá pomocí antény. Její primární funkcí je přeměna elektrické energie na elektromagnetickou energii v podobě elektromagnetické vlny šířící se prostorem. Tato vlna je zachytávána druhou anténou, která elektromagnetickou vlnu přemění zpět na elektrickou energii. [3]

1.5 Přenos dat

Přenosem dat je převážně myšlen přenos digitálních zpráv nebo jiného digitalizovaného signálu prostřednictvím přenosového média. Jako přenosové médium může být

použit například optický kabel, kompaktní disk, metalický kabel nebo bezdrátový přenos [4].

Přenosy mezi zařízeními se zpravidla dělí, podle druhu komunikace mezi zařízeními, na duplexní nebo simplexní spojení. Pomocí simplexního spojení dokáže zařízení přenášet informace pouze v jednom směru, zatímco duplexním spojením dokáže komunikovat navzájem. Duplexní spojení se navíc dále dělí na poloviční duplex a plný duplex. Polovičním duplexem je uváděna komunikace mezi zařízeními, které mohou přijímat i odesílat signál, avšak ne současně. Příkladem by mohla být občanská radiostanice. Plným duplexem probíhá obousměrná komunikace zároveň. Nejznámějším příkladem je mobilní telefon využívající GSM [5].

Datová komunikace je celým procesem, jež zahrnuje přípravu k odeslání dat, řízení přenosu a procesy vázané na příjem dat. O tyto procesy se především starají vyšší vrstvy, které zahrnují například i digitalizaci analogového signálu nebo kompresi dat. Přenos dat se dále může dělit na sériový nebo paralelní, synchronní nebo asynchronní.

1.6 Sériová komunikace

V telekomunikacích se využívá převážně sériového sekvenčního přenosu dat. Tyto přenosy jsou realizovány jako posloupnost bitů posílaná pomocí jednoho vodiče nebo sekvenčně optickým přenosem. Sériovým přenosem dat tak dochází k menšímu riziku chybovosti než u paralelního přenosu dat, při kterém dochází k přenosu několika bitů zároveň pomocí komunikačního kanálu nebo sběrnice. Synchronní přenos dat probíhá pomocí tzv. hodinového signálu, který je referenční pro obě zařízení na jehož vzestupné nebo sestupné hraně se mění stav signálu. Asynchronní přenos hodinový signál nepotřebuje, protože má přesně definované doby jednotlivých bitů. Jeho počátek je určen start-bitem a konec stop-bitem. Synchronní přenos dat je tak mnohem rychlejším způsobem, neboť při asynchronním přenosu musí dojít k synchronizaci přijímače a vysílače při přenosu každého dalšího paketu dat [6].

Zařízení, která mezi sebou komunikují pomocí společné sběrnice přenášejí data vždy podle určitých pravidel. Před zahájením přenosu nejprve zařízení inicializuje přenos a oznámí ostatním zařízením, že započne vysílání, aby přenos dat nenarušily. Následně dojde k adresování, neboť každé zařízení připojené ke sběrnici má vlastní adresu (obvykle 4-8 bitové číslo). Tato adresa je uložena v paměti zařízení nebo nastavitelná pomocí přepínačů. Zařízení, které bude vysílat, vyšle adresu na začátku zprávy. Na to se zařízení s danou adresou přichystá na příjem dat, ostatní zařízení nereagují. Před přenosem vlastních dat se někdy objevuje na začátku zprávy tzv. start-bit, který označuje počátek zprávy. Přenos dat je někdy jištěn paritními bity. Ukončení zprávy stejně jako počátek se často vyznačuje vysláním jednoho nebo dvou

zvláštních znaků tzv. stop-bitů. Po dokončení vysílání čeká zařízení, které vysílalo, na potvrzení přijetí zprávy, které ověřuje pomocí parity. [7]

1.7 Modulace

Obecně je modulace ovlivňováním parametru nosného signálu modulačním signálem. Modulace signál posiluje a je tak vhodné ji použít pro přenos signálu na větší vzdálenosti. Modulační signál je signál, nacházející se v základním pásmu, jímž může být například signál z mikrofону, kamery nebo jakýkoliv jiný signál. Pokud je však modulační signál digitální, označujeme ho poté klíčováním (keying). Nosný signál má zpravidla několikanásobně vyšší frekvenci než signál modulační. Nejčastějšími zařízeními, které využívají modulaci jsou například rozhlasový přijímač, televizní přijímač, některé starší modemy, mobilní telefony atd. Důvodem vzniku modulace byla nevhodnost posílání čistých dat na větší vzdálenosti. Zařízení provádějící modulaci se označuje jako modulátor [8]. Zařízení, které provádí zpětné získávání přijatých dat z modulovaného signálu se nazývá demodulátor [8]. Amplitudová modulace i digitální modulace klíčováním amplitudovým posunem jsou zobrazeny na obrázku 1.2.

1.7.1 Analogová modulace

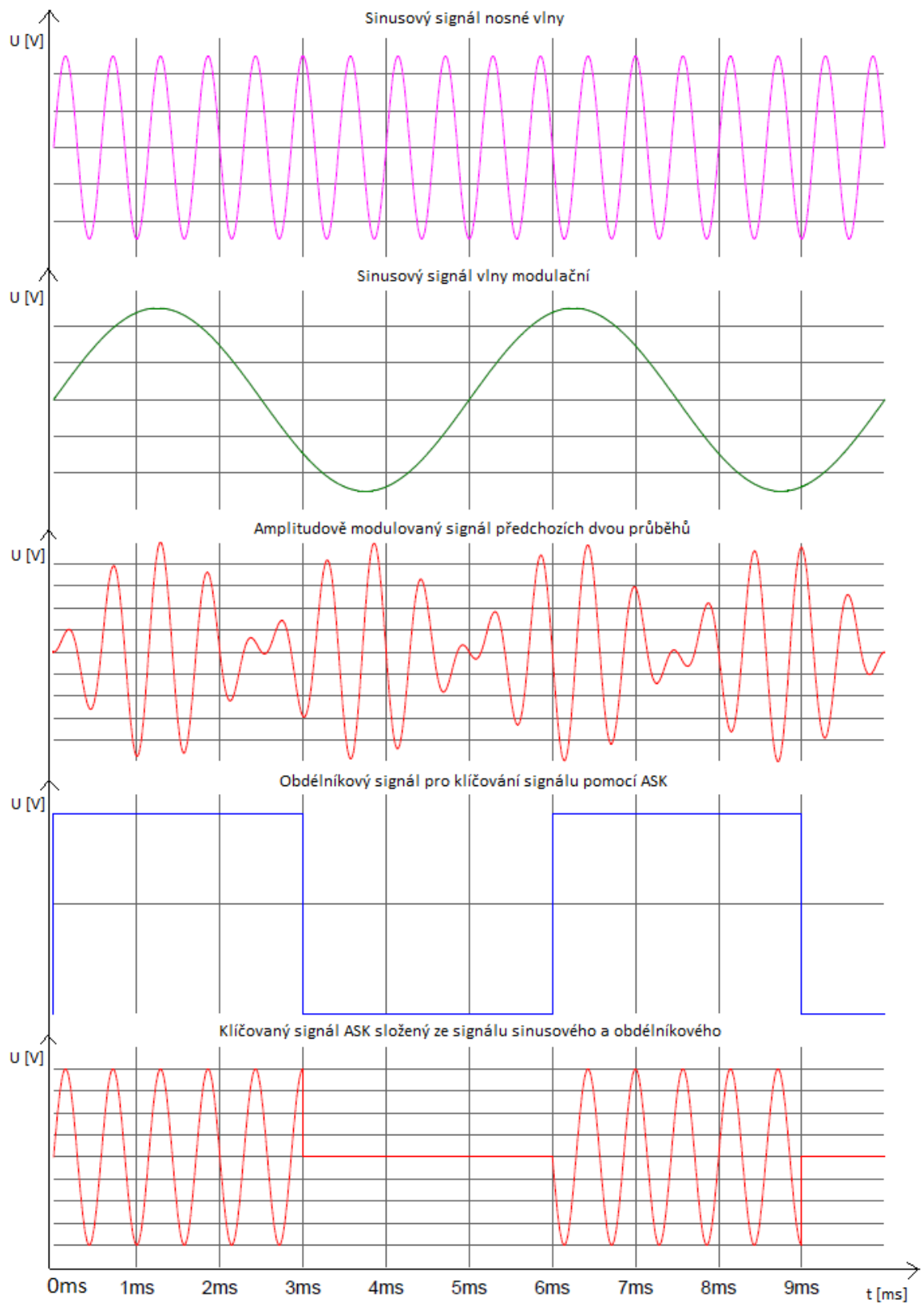
Amplitudová modulace

Amplitudová modulace se uvádí do jednoduchých spojitých modulací. V závislosti na modulačním signálu se mění amplituda signálu nosného. Mění se pouze amplituda, fáze a frekvence nosné vlny se nemění. Historicky se jedná o nejstarší druh modulace, se kterou se začalo experimentovat těsně po roce 1900 rádiovým vysíláním. Frekvenční spektrum tak zobrazuje frekvenci nosné vlny a dvě frekvence (součet a rozdíl modulační a nosné frekvence) jako postranní pásma. Pokud se ve spektru nachází obě postranní pásma, jedná se o modulaci DSB (Dual Side Band). Pokud jen jedno postranní pásmo nazývá se modulace SSB (Single Side Band). [8]

1.7.2 Digitální modulace

Klíčování amplitudovým posunem (ASK)

Jedná se o formu amplitudové modulace, která amplitudu nosné vlny mění podle modulačních digitálních dat. Každá digitální modulace využívá konečný počet diskrétních signálů pro reprezentaci digitálních dat, avšak ASK využívá konečný počet amplitud, kde je každé z nich přiřazen určitý vzorek binárních čísel [9]. Demodulace



Obr. 1.2: Znárodné signály amplitudově modulovaného signálu a signálu amplitudově klíčovaného

takového signálu je pak navržena speciálně pro sadu znaků, které používá modulátor. Původní data získá právě mapováním amplitudy přijatého signálu. Frekvence a fáze nosné vlny se u tohoto typu klíčování nemění. Stejně jako amplitudová modulace je ASK citlivá na atmosferický šum, zkreslení a podmínky šíření v různých místech. Nejjednodušší a nejčastější formou ASK je dvoustavová modulace, u které se běžně využívá krátkého impulsu pro znázornění binární 1 a nepřítomnosti signálu pro znázornění binární 0.

1.8 Protokol

Protokol je standard, podle kterého probíhá komunikace mezi zařízeními. Komunikace může být realizována pouze pro přenos řídicích signálů nebo přenos dat. Nejjednodušší podoba protokolu definuje pravidla, kterými se řídí vzájemná komunikace. Realizace protokolů může být pomocí hardware, software, nebo kombinací obou. Typicky se protokoly specifikují detekcí spojení nebo zjištěním koncových bodů či uzlů, vyjednáváním o různých parametrech spojení, nastavením počátku a konce zprávy, detekce ztrát spojení a ukončení spojení. Významem protokolů je usnadnění přenosu velkých objemů informací ve vzájemné komunikaci.

1.8.1 CRC (Cyclic redundancy check)

Cyklický redundantní součet je speciální hašovací funkce (algoritmus pro převod vstupních dat do relativně malého čísla), která se používá pro detekci chyb během přenosu nebo zápisu dat. Svou jednoduchostí tak zastává rozšířený způsob kontrolního součtu. Kontrolní součet je pak připojen k odesílaným datům. Pro zkontrolování přijatých dat se poté znovu CRC nezávisle vypočítá. Pokud je přijaté CRC a vypočítané CRC shodné, přenos proběhl v pořádku. V určitých případech za pomoci CRC lze poškozená data opravit.

1.8.2 Samoopravné protokoly

Při přenosu dat s nepříliš spolehlivým spojením, je třeba zajistit co nejmenší ztrátovost dat. Tuto ztrátovost může ovlivňovat spousta faktorů - šum, rušení nebo třeba klimatické podmínky. Při ovlivnění těmito faktory by mohlo dojít k celkové ztrátě přijímaných dat. Kromě snahy o bezchybnost je třeba zvažovat jako další parametr i co nejmenší objem posílaných dat. Data, která se odesílají, jsou tvořena posloupnostmi jedniček a nul. Při přenosu dat tak může dojít k chybě, kdy se přijatý bit liší od odeslaného.

Samoopravné protokoly byly vymyšleny právě proto, aby se minimalizovala chyba přenosu dat, například tím způsobem, že každý bit pošleme třikrát. Tedy pokud budeme odesílat hodnotu bitu 0, pak kódujeme posloupnost jako 000, pokud hodnotu bitu 1, pak kódovaná posloupnost bude 111. Při přijmutí dat poté dekódujeme podle jednoduchého pravidla - pokud převládá v trojici bitů hodnota 0 (tedy hodnoty mohou nabývat posloupností 000, 001, 010, 100) pak dekódovaná hodnota bude logická 0, pokud převládá hodnota 1 (hodnoty 111, 110, 101, 011) pak je dekódovaná hodnota označena jako logická 1 [10]. Pravděpodobnost bezchybného dekódování dat při použití samoopravné metody je přibližně 97 %, při kterých musíme použít trojnásobný objem dat [11].

Příklad využití samoopravného protokolu:

Tab. 1.1: Příklad využití samoopravného protokolu

Posloupnost bitů	SB	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	StopB
Připravená data	1	1	0	1	0	1	0	1	1
Odeslaná data	1	111	000	111	000	111	000	111	1
Přijatá data	1	101	000	111	010	110	001	111	1
Dekódovaná data	1	1	0	1	0	1	0	1	1

Z tabulky 1.1 je vidět, že se v některých částech objevily chyby při přenosu dat, avšak samoopravný protokol se o jejich nápravu postaral. Připravená data byla ztrojnásobena do samoopravného protokolu a poté odeslána. Přijatá data byla dekódována pomocí samoopravného protokolu nazpět a po ověření je výsledkem správný přenos dat.

1.9 Antény

Bakalářská práce se zabývá přenosem dat pro nízkofrekvenční signály. Nejvhodnější anténou je pro ně magnetická smyčková nebo rámová anténa. Antény se ostatně dělí především podle vlnové délky přijímaného nebo vysílaného signálu. Nejběžnějším typem antény je drátová anténa. Ta je nejjednodušší anténou vůbec, neboť může být orientována do vertikální i horizontální polohy, prakticky s jakýmkoliv rozměry. Bohužel její parametry jsou velice špatné a nevhodné pro použití na příjem nebo vysílání nízkofrekvenčních signálů. Dobré přijímací parametry však dokáže zajistit feritová anténa. Ta je tvořena feritovým jádrem (tyčinka) s průměrem do 1 cm a vlastní délkou mezi 10 - 15 cm. Na tyčince je navinutá cívka. Použité feritové jádro má velmi vysokou permeabilitu a tudíž se na něm velice dobře soustřeďuje magnetické pole. Rozměry těchto antén jsou tak minimální oproti jiným typům antén o stejném zisku. Při vysílání by se však jádro antény mohlo přesytit a rozladit tak rezonanční obvod.

1.9.1 Magnetická smyčková anténa (MLA)

Magnetická smyčková anténa se skládá ze tří základních částí: hlavní smyčka, ladící kondenzátor a budící obvod. Přijímací i vysílací antény tohoto typu se nejčastěji upevňují nízko nad zemí, přibližně 1,5 m, což prakticky není překážka pro jejich činnost. Magnetická složka vlny proniká hlouběji, tudíž využití tohoto typu antény je možné i tam, kde jiné typy antén nefungují - například v budovách tvořených betonem, v zákopech a podobně. [12]

Magnetická smyčková anténa je zobrazena na obrázku 1.3.

Hlavní smyčka

Obvod hlavní smyčky je odvozen od hodnoty vlnové délky λ (která je zpravidla od $0,1$ do $0,2 \lambda$), pro kterou je magnetická smyčková anténa navržena. Obvykle má hlavní smyčka jeden závit, tvořený stíněním koaxiálního kabelu, nebo jakoukoliv měděnou trubkou. Snahou je minimalizovat ztráty, které tvoří tzv. skin-efekt. Vliv skin-efektu se dá snížit zvýšením povrchové vodivosti (hliníková, měděná či postříbřená trubka), nebo zvětšením průměru trubky a tím zvětšením plochy povrchu.



Obr. 1.3: Magnetická smyčková anténa s vazební smyčkou uprostřed [13]

Ladící kondenzátor

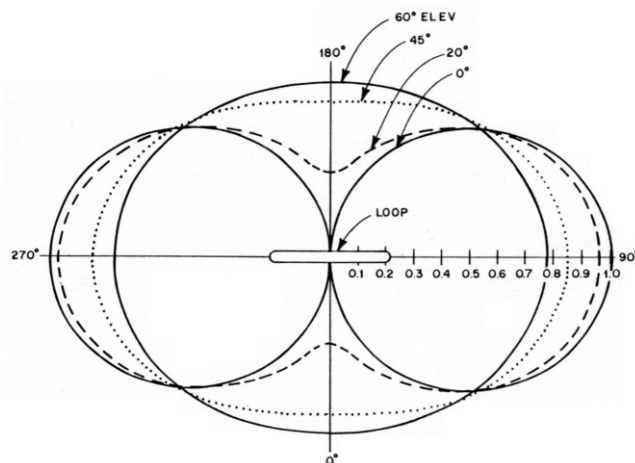
Ladící kondenzátor umožňuje změnu pracovního kmitočtu magnetické smyčkové antény. Jakost Q kondenzátoru by měla být velmi vysoká. Míra přeladění je dána délkou hlavní smyčky U a hodnotou kondenzátoru. Pro přijímací anténu se za normálních podmínek použije klasický laditelný kondenzátor z rozhlasových přijímačů nebo například varicap [14]. Pokud se použije anténa jako vysílací, je nutno zohlednit, že smyčka představuje závit na prázdno, u něhož se na koncích smyčky objeví vysoké napětí (v závislosti na vysílacím výkonu). Důležitým parametrem je tak elektrická pevnost vzduchové mezery mezi deskami otočného kondenzátoru, případně lze použít řadově vyráběné fóliové kondenzátory jako alternativu. Kapacita takového kondenzátoru je doporučována v hodnotě z upraveného Thomsonova vztahu:

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}, \quad (1.1)$$

kde C je kapacita kondenzátoru [F], f je frekvence obvodu [Hz] a L indukčnost antény [H]. Tato hodnota je teoretická a je nutno danou anténu doladit, vzhledem k parazitním vlastnostem LC obvodu.

Budící obvod

Budící obvod může být tvořen vazební smyčkou, což je menší cívka uvnitř hlavní smyčky umístěna přesně naproti ladícímu kondenzátoru. Průměr indukční smyčky většinou bývá 1/5 průměru hlavní smyčky. Doporučená vzdálenost mezi oběma smyčkami je 0 až 6 cm. Budící obvod je velmi dobrým řešením napájení hlavní smyčky.



Obr. 1.4: Vyzařovací charakteristika magnetické smyčkové antény při vyšších hodnotách efektivity [15]

Parametry antény

Magnetická smyčková anténa se vyznačuje svou směrovou charakteristikou s vyzařovacím diagramem ve tvaru číslice 8. Taková charakteristika umožňuje zaručený příjem v předozadním směru. Vidět ji lze na obrázku 1.4.

Uprostřed se nachází smyčka, kolem které je vytvářeno magnetické pole. Uprostřed je magnetické pole téměř nulové a největší je právě v okolí smyčky. Pro obě dané antény je nutné nasměrování rovnoběžně k sobě, aby magnetického pole procházelo právě přes tyto dvě antény a uzavíralo tak siločáry magnetického pole.

Snahou je dosáhnout co nejmenšího ohmického odporu smyčky, co největšího rozměru smyčky a co největšího činitele jakosti Q . Následující vztahy popisují parametry magnetické smyčkové antény a byly převzaty z [16]:

Plocha rámové smyčky [m]

$$A = w^2. \quad (1.2)$$

Indukčnost rámové smyčky [H]

$$L_{LOOP} = 8 \cdot 10^{-7} \cdot N^2 \cdot w \left(\ln \frac{1,4142 \cdot w \cdot N}{(N+1)l} + 0,37942 + \frac{0,3333(N+1)l}{w \cdot N} \right). \quad (1.3)$$

Indukčnost vodiče [H]

$$L_{WIRE} \approx \frac{\mu_0(4Nw)}{2\pi} \cdot \left(2,303 \cdot \log \left(\frac{4(4Nw)}{d} \right) - 1 + \frac{\mu_r}{4} + \left(\frac{d}{2(4Nw)} \right) \right). \quad (1.4)$$

Vyzařovací odpor [Ω]

$$R_{RAD} = Z_0 \frac{2}{3} \pi \left(\frac{h_e}{\lambda} \right)^2 = Z_0 \frac{8}{3} \pi^3 \left(\frac{N\mu_r A}{\lambda^2} \right)^2. \quad (1.5)$$

Odpor ve stejnosměrném obvodu [Ω]

$$R_{DC} = \frac{(4Nw) \cdot \rho}{\pi d^2/4}. \quad (1.6)$$

Odpor ve střídavém obvodu [Ω]

$$R_{AC} = \frac{4Nw}{\pi d} \sqrt{\pi \mu_0 f \rho}. \quad (1.7)$$

Kapacita rámové smyčky [F]

$$C_{LOOP} \approx 3,9685 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{400w}{\pi}\right)^4}{100l}}. \quad (1.8)$$

Účinnost [%]

$$\eta = \left(\frac{R_{RAD}}{2(R_{RAD} + R_{AC})} \right) \cdot 100. \quad (1.9)$$

Činitel kvality [-]

$$Q = \frac{X_L}{2(R_{RAD} + R_{DC})} \sim \frac{f_0}{\Delta f}. \quad (1.10)$$

Indukce magnetického pole B závislá na síle magnetického pole H : [T]

$$B = \mu_0 \mu_r H. \quad (1.11)$$

Intenzita magnetického pole H_{rms} určuje výstupní hodnotu V_{rms} , tedy efektivní hodnoty napětí podle vztahu:

$$V_{rms} = 2\pi \mu_0 \mu_r N A f H_{rms} \cos \phi. \quad (1.12)$$

Frekvence f je kmitočet magnetické smyčkové antény v jednotkách hertz [Hz]. Napětí přeměněné naindukováním magnetického pole na cívku je závislé na úhlu natočení antény a efektivní hodnotě magnetického pole.

Ve vzorcích platí: N je počet závitů cívky, w je délka strany rámu [m], d je průměr vodiče [m], l je tloušťka cívky [m], A je plocha antény [m^2], Z_0 je impedance volného prostoru = 377Ω a λ je vlnová délka [m]. Dále f a f_0 je kmitočet magnetické smyčkové antény [MHz], H je intenzita magnetického pole [A/m], B je magnetická indukce [T], Δf je šířka pásma antény [Hz] a X_L indukance [Ω].

Dalšími důležitými technickými parametry antény jsou [8]:

- zisk antény [dBi], který udává násobek výkonu přijímací antény vůči půlvlnnému dipólu nebo teoretické dokonale všesměrové anténě,
- šířka přenášeného pásma,
- polarizace - ať už horizontální, vertikální, kruhová nebo eliptická,
- směrovost antény - schopnost antény přijímat nebo vysílat elektromagnetické vlny v určitém směru,
- efektivní délka antény - délka, kterou prochází rovnoměrně rozložený vysílací/přijímací proud,
- impedance antény - vlastní impedance antény, shodná s přívodním kabelem aby nedocházelo k odrazům a ztrátám.

Ideální anténa by tak měla nabývat co nejlepšího zisku antény, tedy mít délku úměrnou půlvlnnému dipólu, ideální šířku pásma co nejužší, velice dobrou směrovost antény a přizpůsobenou impedanci k celému obvodu zapojení.

1.9.2 Rámová anténa

Je obdobou magnetické smyčkové antény, která se liší pouze svým tvarem a rozložením závitů. Opět se vytváří hlavní smyčka, která je navinutá směrem ke středu antény a vedlejší smyčka uprostřed antény, která je značně menších rozměrů [17]. Rámová anténa je zobrazena na obrázku 1.5.

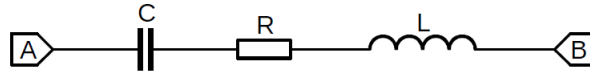


Obr. 1.5: Středovlnná rámová anténa s křížovou kostrou [13]

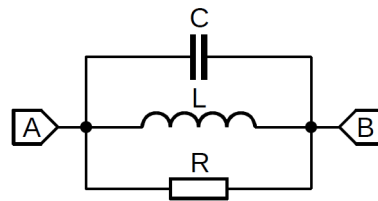
1.10 Rezonanční obvod

Snahou pro vytvoření rezonančního obvodu je docílení rezonance antény, kdy bude na jednom konkrétním kmitočtu zisk signálu největší a ostatní kmitočty úplně ztlumené. Toho nelze docílit pomocí reálných prvků. Reálně se však anténa dostane do rezonance s určitým ziskem a ostatní frekvence jsou oběma směry od rezonanční frekvence utlumovány. Pokud tedy bude obvod vyladěn do rezonance (ať už sériové, nebo paralelní), nebude docházet k fázovému posunu signálu vlivem vyrušení indukčnosti s kapacitací. Dojde tak k neefektivnějšímu přenosu energie z vnějšího zdroje do rezonančního obvodu. [18]

Rezonanční RLC obvod vytváří kombinace kapacitoru (C), induktoru (L) a vodivosti ($G = \frac{1}{R}$), která reprezentuje ztráty v obvodu obou reálných prvků. Schéma sériového RLC obvodu je zobrazeno na obrázku 1.6 a paralelního RLC obvodu je zobrazeno na obrázku 1.7.



Obr. 1.6: Schéma zapojení sériového RLC obvodu



Obr. 1.7: Schéma zapojení paralelního RLC obvodu

Pro impedanci obvodu platí:

$$Z(\omega) = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right), \quad (1.13)$$

kde Z je impedance, C je kapacita, L indukčnost, ω je úhlový kmitočet a φ je fázový posuv.

Je-li obvod buzen harmonicky ze zdroje proudu s amplitudou I , napětí rezonančního obvodu závisí na modulu impedance Z a tedy i na kmitočtu signálu zdroje ω .

$$U = I \cdot |Z| = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = I \cdot Z, \quad (1.14)$$

Rezonance je popsána vzorcem:

$$X_L = X_C, \quad (1.15)$$

Induktance si budou rovnat, a proto po dosazení do vzorce (1.13) se z impedance stane čistě jen vlastní ztrátový odpor. Předchozí rovnice můžeme rozvést do známého tvaru:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (1.16)$$

kde L značí indukčnost [H], C kapacitu [F], X reaktanci [Ω] a ω_0 úhlový kmitočet vlastních kmitů [s^{-1}].

2 Koncept zařízení

Je důležité si uvědomit, jaké jsou na zařízení kladeny požadavky. Vzhledem k cílenému použití zařízení pro dvě skupiny uživatelů - záchranáře a jeskyňáře, jsou jedním z prvních požadavků co nejmenší rozměry zařízení. Anténa by měla být také snadno mobilní a v rámci možností i skladná. Zařízení je třeba napájet zdrojem, který dokáže dodat poměrně velký okamžitý proud, ale to pouze krátkodobě, když bude zařízení vysílat.

Jako napájecí zdroj byl zvolen olověný akumulátor s napětím 12 V a vnitřní kapacitou 5 Ah. Z něho je poté napětí stabilizováno na hodnoty 3,3 V, 5 V a 10 V. Kromě tří stabilizátorů je nutno zajistit i napájecí napětí pro výkonový zesilovač, které zajistí měnič typu step-up. Měnič bude navržen předimenzovaný, připravený na možnost dosáhnout vyššího výstupního proudu měniče z důvodů zvýšení výkonu zařízení pro vysílání.

Oscilátor bude tvořený generátorem signálu s integrovaným obvodem ICL8038. Výstupním signálem bude sinusový signál o frekvenci 1750 Hz, který je nutno operačním zesilovačem zesílit a posunout tak, aby kmital mezi hodnotami 0 V a 5 V, což je příprava pro koncový zesilovací stupeň, který je napájen nesymetricky.

Výstupní zesilovač poté bude mít vstupní signál, bude napájen z nesymetrického zdroje napětí a zesílení signálu nebude tak obtížné. Výstupním zesilovačem bude výkonový operační zesilovač OPA547F, který disponuje svým výstupním proudem 0,5 A kontinuálně a napájecím napětím o maximálních hodnotách ± 30 V, nebo nesymetricky maximálně 60 V. Operační zesilovač však navíc lze spínat pomocí vstupu Enable, který ovládá připojení nebo odpojení výstupu, což v podstatě nahradí funkci směšovače.

Na druhou stranu bude velký problém s návrhem vstupního filtru pro přijímací vstupní signál. Frekvence je velmi nízká a požadované hodnoty kapacit a induktorů pro pasivní filtr budou obrovské. Vytvořit filtr z RC nebo LC článků nelze kvůli útlumu a velikosti hodnot jednotlivých pasivních součástí realizovat. Použití aktivních filtrů s operačními zesilovači je proto správnou volbou.

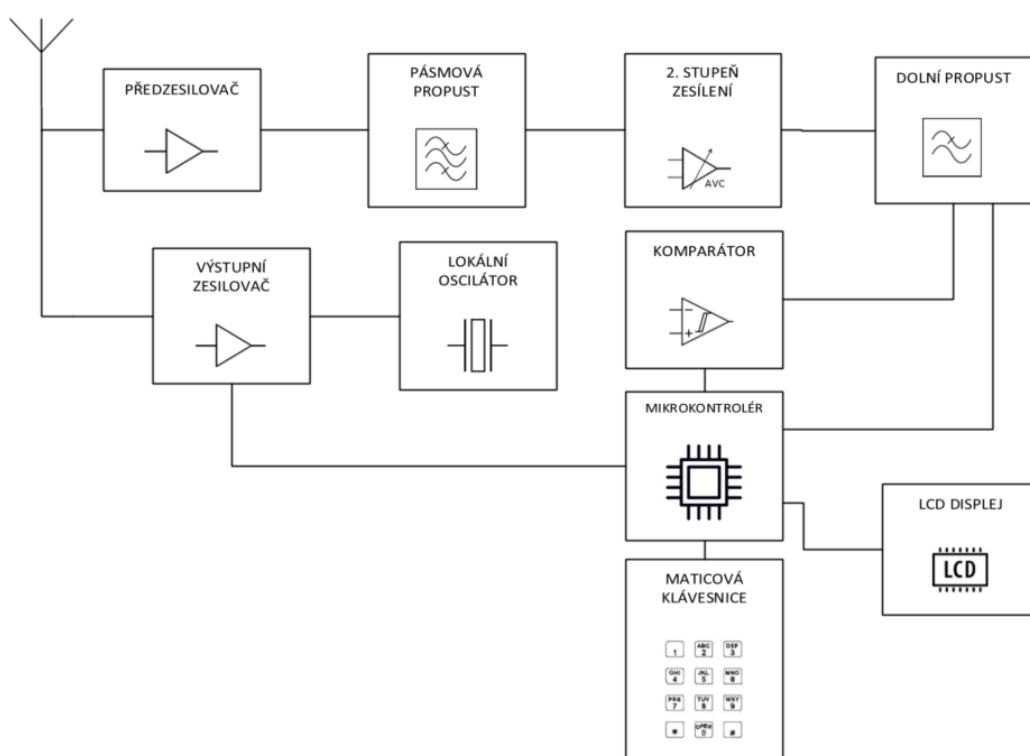
Zařízení bude řídit mikrokontrolér AT90CAN32, který bude obsluhovat displej pro komunikaci s uživatelem a maticovou klávesnici pro možnost ovládání zařízení, odeslání záchranné zprávy nebo kalibraci antén. Samotný mikrokontrolér se bude starat o ovládání všech vstupních nebo výstupních periférií a o přijímání a dekodování dat. Přijatá data půjdou přes první stupeň zesílení, pásmový filtr, druhý stupeň zesílení, precizní usměrňovač, analogové předzpracování a komparátor. Jednotlivé části jsou popsány v další kapitole.

Zapomenout se nesmí ani na ochranu zařízení na vstupu, ochranu mikrokontroléru a dalších citlivých částí zařízení.

Pro komunikaci na velmi nízké frekvenci je frekvenční modulace nerealizovatelná. Problémem není jenom maximální rozsah modulačních frekvencí, ale i fázový posun, který filtr na tak nízké frekvenci nedokáže zachovat a fázi posune. Proto zařízení bude vysílat data pomocí amplitudové modulace, přesněji tedy pomocí klíčování amplitudovým posunem.

2.1 Blokové schéma zařízení

Celý tento rozbor konceptu je popsán v kapitole 3 a zakreslen do blokového schématu na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma navrhovaného zařízení

2.2 Povolená kmitočtová pásma

Rádiové spektrum je obecně podle Českého telekomunikačního úřadu (ČTÚ) rozděleno na devět pásem. Frekvence, ve kterých se komunikace navrhovaného zařízení pohybuje je v řádech jednotek až stovek kilohertz. Podle tabulky rozdělení se tedy jedná o pásma 3, tedy ULF (Ultra Low Frequency) až pásmo 5, zkratkovitě LF (Low Frequency). Pásmo 3 v tabulkách ČTÚ není uvedeno, neboť frekvence nižší než 8,3

kHz není spravována Českým telekomunikačním úřadem. To je jedním z důvodů, proč byla primárně zvolena tato nízká frekvence o hodnotě 1750 Hz. Druhý z důvodů je použití kmitočtu 1750 Hz pro většinu amatérských rádiových systémů v Evropě jako signálů pro otevření převaděče nazývaný jako "Tone burst". Existují však i povolená kmitočtová pásma, která podléhají správě, ale jsou limitována vyzařovaným výkonem. Jeden z rozsahů této frekvenční oblasti se nachází ve frekvenčním pásmu od 135,7 do 137,8 kHz. V tomto pásmu však nelze překročit maximální vyzařovaný výkon 1 W. Maximální vyzářený výkon tak byl kritickým parametrem při výběru frekvence, a proto nebylo toto pásmo zvoleno. I v případě frekvence 1750 Hz je zařízení limitováno při uvádění produktu na trh. Vyzařovaný výkon by pak byl omezen normou ČSN EN 62233, což je norma Metod měření elektromagnetických polí spotřebičů pro domácnost a podobných přístrojů vzhledem k expozici osob. Tato norma by omezovala výkon v rámci ohrožení zdraví osob vyzařovaným elektromagnetickým polem.

2.3 Protokol a záchranný signál

Jelikož se data přenáší pomocí klíčování amplitudovým posunem, tedy amplitudovou modulací, musí být i protokol navržen tak, aby docházelo k co nejmenším ztrátám dat během přenosu. Aby okolí, byť krátce, nedokázalo ovlivnit přijímaná data.

Do jednotlivých protokolů byla pomocí měření uvedena nejkratší časová závislost, aby nedocházelo k chybovosti. Periférie jako vstupní zesilovací stupně, tak i vstupní filtr potřebují nějaký čas, aby se uvedly do správného chodu a signál správně přenesly. Nejedná se jen o dobu náběhu ale i o dobu doznění, která taktéž způsobuje časový posun přijatého signálu.

2.3.1 Protokol pro přenos dat

S daty musíme pracovat asynchronně a proto se využije pro uvedení paketu s daty start bit, který bude přesně definovaný určitou dobou a posloupností, kterou bude vysílat. Jelikož nezáleží na tom, kdo přijímaná data zaslechne, nemusí tak do protokolu být zahrnuto ID zařízení, což nám značnou část odesílaných dat ušetří. Následovat budou data, která budou rozložena pomocí převodní tabulky na 6-ti bitové číslo, které bude uvádět jeden znak. Dále bude vypočítána délka zprávy a uvedena do 5-ti bitového čísla. Za těmito daty bude vypočítán a uveden kontrolní součet (CRC), vytvořený konkrétním algoritmem, pro matematické ověření správně přijatých dat. Za kontrolní součet se zařadí již jen stop bit, který oznamuje konec paketu. Stop bit prakticky slouží jen pro ověření, že celý paket dorazil. Jeho další využití nemá smysl a lze ho zanedbat. Pro zabezpečení správnosti přenosu dat je výstupní kontrolou

ještě ověření přijatého CRC kódu, který je přepočítán a vyhodnocen. Protokol však pracuje, obzvláště na přijímací straně, jako samoopravný protokol. Data jsou tedy segmentována podle uvedené tabulky 2.1.

Tab. 2.1: Seřazené bity navrhovaného přenosového protokolu s jejich časovými hodnotami

StartB	BlankBit	D1 - D6	DL1 - DL5	CRC1 - CRC3	StopB
3x DB	1x délka datového bitu pro každý bit			2x DB	
150 ms	50 ms pro každý bit			100 ms	

V tabulce StartB znamená start-bit, bity D1 - D6 přenášená data, bity DL1 - DL5 je 5 datových bitů poukazujících délku zprávy, bity CRC1 až CRC3 kontrolní součet a bit StopB značí stop-bit. DB označuje datový bit o konkrétní délce.

Start-bit a stop-bit tedy budou mít určenou délku signálu. Data a kontrolní součet chceme zajistit tak, aby v případě mírného zarušení signálu, bylo možno opravit data a přijatý paket nebylo nutno zahazovat. Právě proto dojde k využití samoopravného protokolu s téměř 97 procentní jistotou přenesení správných dat, pokud nedojde k úplnému výpadku nebo jen velmi krátkodobému zarušení signálu. Každý bit od datového BlankBit po CRC3 tedy bude vyslán jednotnou dobu.

Na přijímací straně se zařízení bude vícekrát ptát jaká hodnota je na vstupním signálu a poté kontrolovat, zda byla většinou jeho hodnota logická 0, bit bude považován za logickou nulu, pokud logická 1, bude považován za logickou jedničku. Určení délky start-bitu, stop-bitu a jednotlivých datových bitů a bitů kontrolních součtů vyplývá z frekvence použité pro nosnou vlnu. Periodu jedné vlny lze vypočítat pomocí vzorce:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1750} = 0,57 \text{ ms}, \quad (2.1)$$

kde T je časová perioda a f je frekvence nosné vlny.

Dojde tedy k přenesení jednoho paketu s jedním znakem za dobu 1 vteřiny. Rychlejší by tedy bylo využití druhou z možností a to je odeslání již před připravené zprávy, která je popsána v kapitole 2.3.2.

Obyčejná sériová komunikace jako USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter) používá pro všechny bity, včetně start-bitu a stop-bitu stejnou dobu přenosu dat. V zařízení je však nutno označit počátek a konec protokolu a dat, která budou přenášena. Zvolená doba start-bitu byla kvůli úspoře času pouze 3x delší než doba datových bitů a doba stop-bitu 2x delší než doba datových bitů. Mezi start-bitem a prvním bitem dat se navíc bude nacházet mezera délky jednoho datového bitu, která bude záchytným bodem pro čtení dat mikrokontrolérem. Přenos dat bude sice velice pomalý, ale vzhledem k použití zařízení by

doba přenosu mohla být akceptovatelná, pokud signál prostoupí i přes nepřístupné prostory.

Pro snadné rozklíčování signálu byl zvolen čas jednoho datového bitu změřením náběhu a sestupu datového bitu a časové hodnoty, při které nedojde k narušení hodnoty signálu a správného měření signálu. Datový bit tedy bude nabývat délky 50 ms, Start-bit o délce tří datových bitů s časem 150 ms a stop-bit o délce dvou datových bitů s časem 100 ms. Při této délce bitu by mělo být poměrně snadné dotázat se třikrát na hodnotu demodulované amplitudy, zda nabývá hodnoty logická 1 nebo logická 0. Navazujícím bodem po start-bitu bude prázdný, tedy nulový bit, který pomůže procesoru rozeznat, zda se jedná o šum nebo vlastní signál. Pokud porovnáme hodnoty vstupního signálu při vysílání start-bitu a hodnotu vstupního signálu prázdného bitu, u kterého dojde po chvíli k vysílání, dojde k rozlišení vstupní amplitudy. Také se spustí proces rozpoznání jednotlivých datových bitů, který bude každou uplynulou dobu kontrolovat hodnotu demodulovaného signálu. Celková délka paketu tedy bude okolo 1 vteřiny, což je také délka vysílání jednoho znaku. Až se dokončí vyslání signálu bude vysílací zařízení čekat na odpověď od přijímacího zařízení v podobě nového CRC kódu ve zkráceném protokolu, pod označením ACK.

2.3.2 Protokol pro odeslání rychlé zprávy

Kromě odeslání zprávy vlastní lze odeslat i předdefinovanou zprávu, která je uložena přímo v paměti mikrokontroléru. Takovéto zprávy může předdefinovat každý uživatel přehráním EEPROM paměti mikrokontroléru. Celkem je předdefinovaných zpráv 8, ale je možno jejich počet rozšířit. Každá zpráva je unikátní svou délkou a také následujícím CRC kódem. Tím nejenže druhé zařízení rozpozná, zda je zpráva bez problému přijata, ale i zařízení které odesílá zprávu dostane následnou odpověď, ve které rozpozná, jestli zařízení zprávu správně přijalo. Odeslaná zpráva pak má souslednost podle tabulky 2.2.

Tab. 2.2: Protokol pro přenos rychlé zprávy

StartB	BlankBit	Zpráva	BlankBit	CRC1 - CRC3
600 ms	50 ms	doba zprávy	50 ms	150 ms

2.3.3 Protokol pro odeslání SOS signálu

Záchranným signálem je posloupnost dat, která je odesílána v určitých časových intervalech o stejném znění. Měřením vstupního signálu se lze se zařízením na povrchu přibližovat k zařízení v nepřístupném prostoru a zjišťovat tak přibližnou lokaci, nebo alespoň směr, ze kterého zařízení v nepřístupném prostoru vysílá. Periodicky by měl

být signál vysílán s periodou 2600 milisekund, při čemž bude jednu polovinu času vysílat a druhou polovinu vysílat nebude. Amplituda signálu klesá s druhou mocninou vzdálenosti pro elektromagnetickou vlnu, která se šíří prostorem. Proto s dobrým A/D převodníkem bude schopno zjistit výpočtem o hrubém odhadu přibližnou vzdálenost zařízení, i přes možné zkreslující okolní vlivy. Signál SOS signálu je ve dvou periodách ukázkově zobrazen v tabulce 2.3.

Tab. 2.3: Protokol pro přenos SOS signálu

SOS1	SOS2	SOS1	SOS2
1x SOSB	1x SOSB	1x SOSB	1x SOSB
1300 ms	1300 ms	1300 ms	1300 ms

V tabulce SOSB znamená SOS-bit poukazující jak délku vysílání, tak i dobu, kdy zařízení nevysílá.

2.3.4 Protokol pro ověření přenesených dat

Acknowledgement code ve zkratce ACK označuje řídicí znaky přenosu, které označují, že přijatá zpráva přišla bez poškození. Start-bit se pro odlišení od odesílacího protokolu bude lišit dobou, kde oproti 3-násobku datového bitu bude nabývat pouze 2-násobku a stop-bit bude nabývat pouze 1,5-násobku datového bitu. Nazpět nebudou posílána celá data, ale pouze nulový bit a tři bity vypočítaného CRC. Protokol pro odpověď na přijatá data tedy bude kratší, jeho celková doba bude 370 ms, doba trvání start-bitu 100 ms a doba trvání stop-bitu 75 ms. Protokol ACK je zobrazen v tabulce 2.4:

Tab. 2.4: Seřazené bity navrhovaného protokolu pro odpověď správně přijatých dat (ACK) s časovými hodnotami

StartB	BB	CRC1	CRC2	CRC3	StopB
2x DB	1x délka datového bitu pro každý bit				1,5x DB
100 ms	50 ms pro každý bit				75 ms

V tabulce StartB znamená start-bit, BB nulový bit, CRC1 až CRC3 nový kontrolní součet a StopB značí stop-bit.

2.3.5 Překlad přijatých dat a odesílaných dat pomocí převodní tabulky

Překládací tabulka je vytvořena a bude uložena v paměti zařízení v podobě funkce, která tato data překládá oběma směry, tedy jak na surová data, tak i zpět na znaky

pro výpis na displej. Podobně jako v ASCII tabulce jsou bity seřazeny od čísel přes alfanumerické znaky po speciální znaky. Celkem je pro 6 bitů možné přenášet až 64 různých znaků a v případě potřeby lze protokol libovolně rozšiřovat. Odeslání zprávy o např. 20 znacích i s dobou, kdy zařízení přepočítává CRC a odesílá zpět nové CRC by tedy mělo trvat okolo 20 vteřin. Celkový pokus o odeslání jednoho paketu dat bude proveden třikrát. Po třetím pokusu zařízení oznámí, že se zprávu nepodařilo odeslat, protože zařízení neodpovědělo a nabídne možnost nové kalibrace, která bude provedena pomocí speciálně vysílaného signálu.

Příkladem překladač dat bude znak "1", tento znak bude přeložen pomocí překladač tabulky na hodnotu "000001", jelikož se jedná o první znak v tabulce. Přeložená binární hodnota se roztrídí do jednotlivých bitů a ty budou přeneseny do funkce, která připojí Start bit, vypočítá CRC kód, délku zprávy a připojí ho spolu se Stop bitem k vyslání kompletního paketu dat na vstup Enable výstupního zesilovače, fungujícího jako směšovač a výstupní zesilovač zároveň.

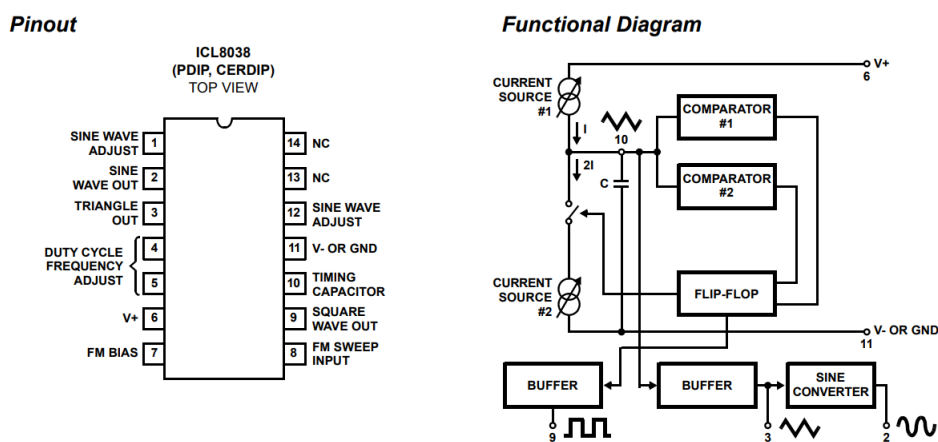
Stejně tak bude fungovat i druhá funkce, která zajistí přesně opačný chod dat. Na výstupu bude pouhý znak zobrazený na displeji a uložený v paměti pod přijatými daty, který se zároveň zkontroluje pomocí CRC kódu.

3 Analogové a digitální části zařízení

Analogové a digitální části slouží ke zpracování vstupního a připravení výstupního signálu pro komunikaci mezi zařízeními. Tyto části jsou popsány v následujících podkapitolách.

3.1 Generátor sinusového signálu

Generátor sinusového signálu je zařízení, které generuje harmonický signál. Signály jsou tedy periodicky proměnné. LC oscilátory ani krystalový oscilátor nejsou vhodné pro použití na nízkých frekvencích. Navíc zkreslení signálu krystalového oscilátoru je značné oproti nezkruslenému sinusovému signálu. Pro tuto činnost byl tedy vybrán integrovaný obvod ICL8038, který vytváří sinusový signál pomocí vnitřního napětově řízeného oscilátoru. Zkreslení výstupního signálu by se mělo za ideálních podmínek pohybovat okolo 1 %. Integrovaný obvod dokáže vytvořit kromě sinusového průběhu i obdélníkový průběh a pilový průběh. Všechny tři průběhy v rozsahu 0.001 Hz až 300 kHz. Nastavitelnými parametry jsou i střída, zkreslení a amplituda. S rostoucí nebo klesající teplotou dochází k mírnému ovlivnění frekvence, které by nemělo přesáhnout 250 ppm/°C.

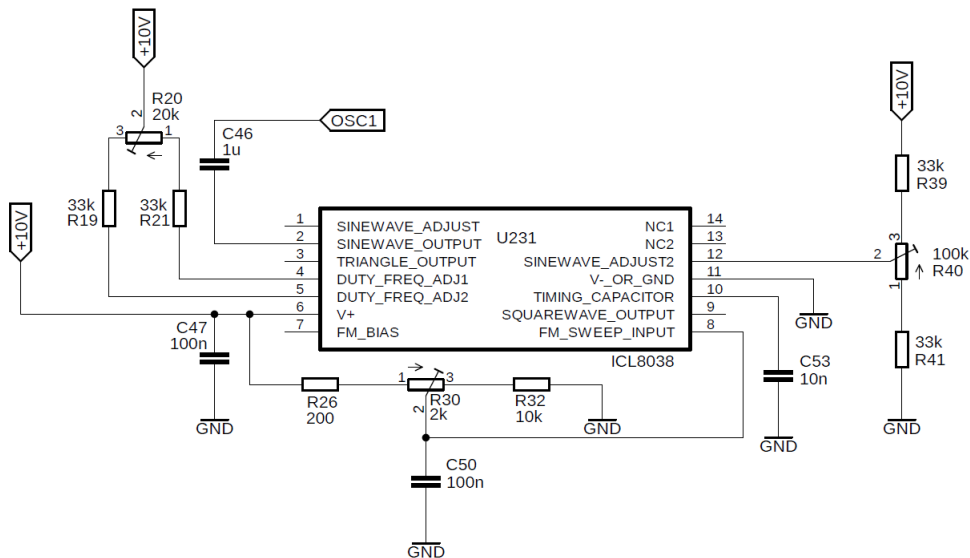


Obr. 3.1: Rozložení vývodů a funkční diagram integrovaného obvodu ICL8038 [19]

Na obrázku 3.1 lze vlevo vidět rozložení vývodů integrovaného obvodu a vpravo vnitřní blokový diagram znázorňující funkci obvodu.

Integrovaný obvod je zapojený podle standardního zapojení, u něhož je možné měnit parametry zkreslení, frekvence a střídý. Pro správnou funkci obvodu je nutné zajistit mu napájení alespoň 10 V při nesymetrickém napájení, nebo symetrické napájení ± 5 V [19]. Nevýhodou nesymetrického napájení je posun střední hodnoty

signálu na určitou hodnotu stejnosměrného napětí. Integrovaný obvod ICL8038 však posouvá hodnotu napěťové nesymetrie na hodnotu napětí přibližně 7,48 V a rozkmit napětí výstupního signálu má hodnotu 2,24 V. Napěťová nesymetrie je pro zpracování velmi vysoká a je nutné posunout její hodnotu tak, aby sinusový signál kmital od napětí 0 V do napětí 5 V. Pro další zpracování je potřeba zesílit rozkmit napětí tohoto signálu, aby mohl být využitý pro buzení výstupního zesilovače. Připojený je proto k obvodu operační zesilovač OP291G (viz. obrázek 3.10) typu Rail-To-Rail, který vytváří jak napěťový offset, tak i zesílení na požadovanou hodnotu.



Obr. 3.2: Schéma zapojení oscilátoru s integrovaným obvodem ICL8038

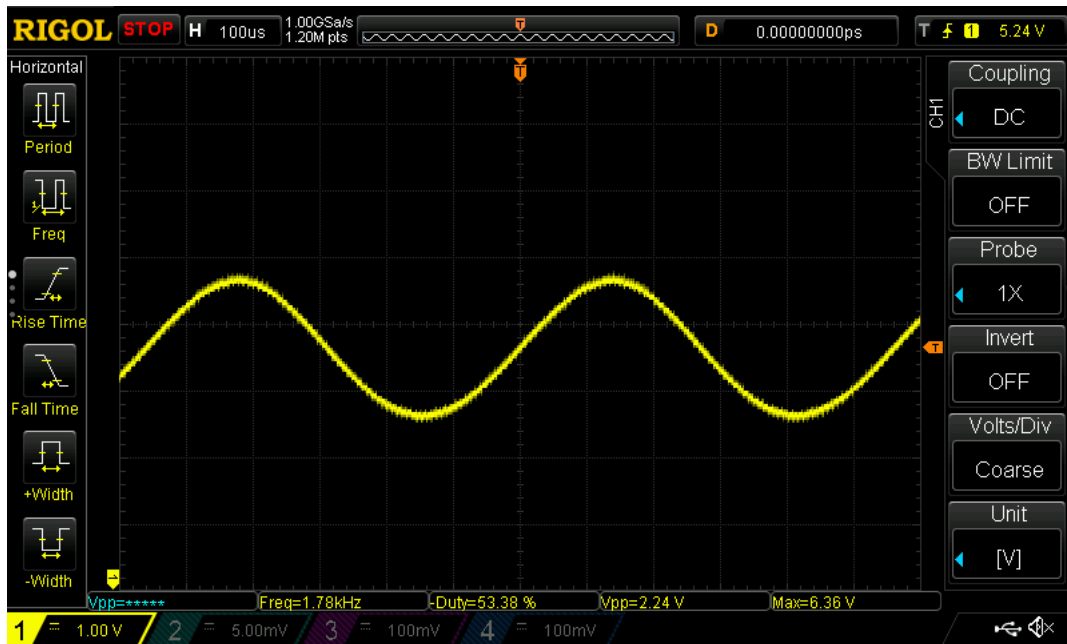
Ve schématu zapojení oscilátoru na obrázku 3.2 je vidět využití všech potřebných vstupů a výstupů. Na 12 pinu je zapojený trimr v děliči napětí určený k nastavení zkreslení výstupního sinusového signálu. Pro nastavení frekvence a střídy slouží trimr R30 a rezistory R26 a R32 připojené mezi vstupy 6 a 8, které s pomocí časovacího kondenzátoru na vstupu 10 určují frekvenci podle vztahu:

$$f = \frac{0,33}{RC}. \quad (3.1)$$

Platí pouze za předpokladu, že $R19 = R21$. Reálné součástky mají však velmi vysokou toleranci a proto je potřeba rezistory pro nastavení frekvence za pomocí osciloskopu doladit. Rezistory R19, R21 a trimr R20 složí k nastavení střídy signálu.

Druhým pinem je výstup sinusového průběhu. K němu je připojen kapacitor pro oddělení stejnosměrné složky. Signál se dále zesiluje a posouvá se mu napěťová nesymetrie na požadované hodnoty podle předchozího popisu využitím operačního

zesilovače. Zapojení obvodu pro další zpracování signálu z generátoru sinusového signálu je uvedeno v kapitole 3.3.



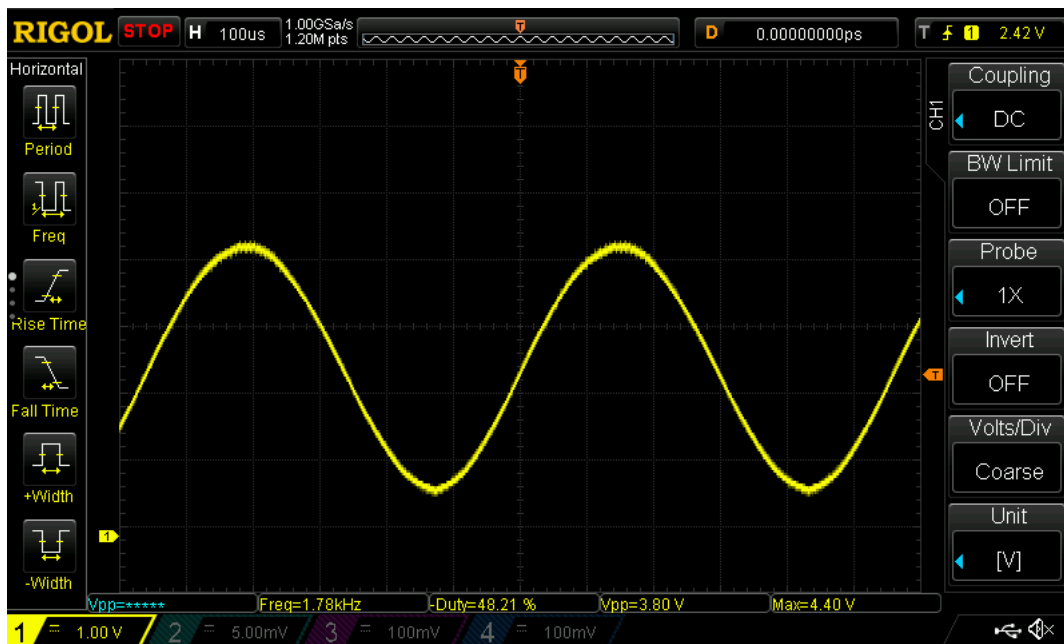
Obr. 3.3: Průběh generovaného sinusového signálu za oddělovacím kondenzátorem

Naměřený signál pomocí osciloskopu na výstupu oscilátoru je zobrazen na obrázku 3.3 a výstup operačního zesilovače na obrázku 3.4. Oba signály jsou mírně zkreslené, z důvodu nedostatečného doladění zkreslení sinusového signálu pomocí trimru.

3.2 Neizolovaný zvyšující měnič

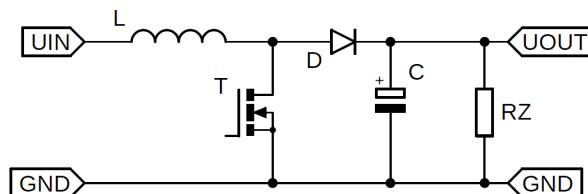
Vzhledem k indukčnosti antény a její celkové impedanci je nutno pracovat s vyšším napětím k dosažení co nejvyšší amplitudy na přijímací anténě. Proto je na koncovém stupni přivedeno toto vyšší napětí, aby byl rozkmit co největší. Zapojený zdroj napětí je nastaven na výstupní napětí 58 V. Výstupní napětí bylo zvoleno tak, aby výstupní operační zesilovač nepracoval s plným maximálním rozsahem. Zvyšující měnič, který je převážně nazývaný jako Step-up nebo Boost měnič, slouží ke zvětšení hodnoty vstupního napětí na výstup.

Celý obvod pracuje tak, že přes akumulaciční cívku L se ve formě magnetického pole akumuluje energie při otevřeném tranzistoru T . Při uzavření tranzistoru T dojde k otočení napětí na cívce podle Lenzova pravidla a stává se z ní zdroj energie. Diody D zabraňuje vybití kondenzátoru C při otevřeném tranzistoru T . Do zátěže dodává energii energie uložená v kondenzátoru C . Při uzavřeném tranzistoru je výstupní



Obr. 3.4: Průběh sinusového signálu s posunutou napětovou nesymetrií a zesílený pomocí operačního zesilovače OPA2344 mezi hodnoty 0 až 5 V

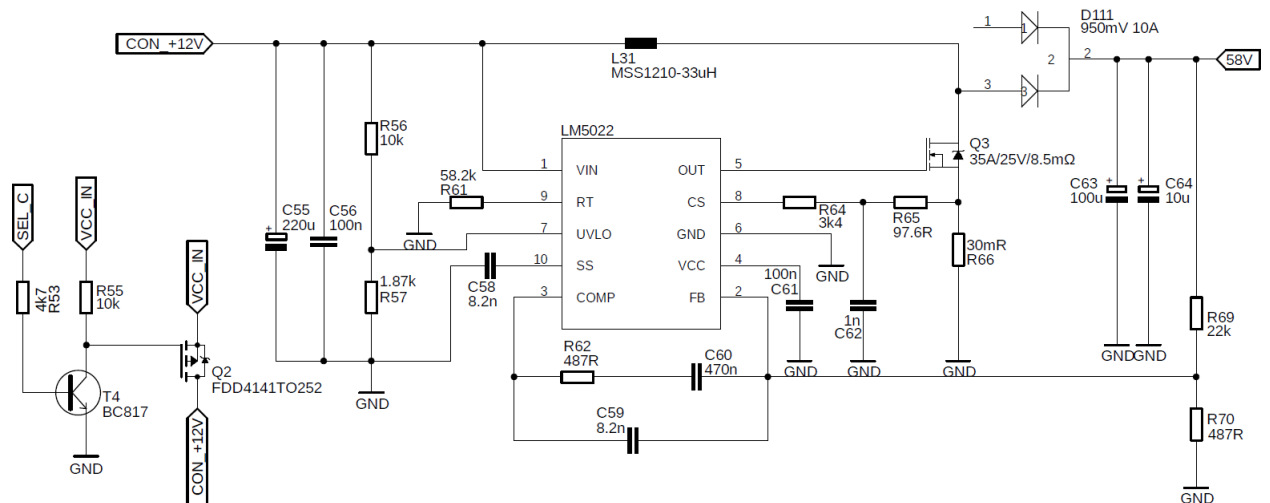
napětí dáno součtem napětí vstupního a zdroje, který představuje napětí na cívce. Při tomto stavu je uzavřen obvod přes cívku, diodu a zátěž.



Obr. 3.5: Teoretické zapojení zvyšujícího měniče napětí

Zapojení měniče je na obrázku 3.6. Tento měnič byl navržen pomocí nástroje WEBENCH® Design Center firmy Texas Instruments Incorporated. Minimální vstupní napětí bylo nastaveno na 10 V, jeho nominální hodnota však na 12 V. Jeho účinnost by měla nabývat hodnoty 92 % při maximálním výstupním proudu 500 mA. Frekvence spínání obvodu je podle návrhu 304,562 kHz. Takto navržený měnič funguje velice dobře a je dostatečně předimenzován pro připojení efektivnější antény, případně pro využití při vyšší vysílací frekvenci. Jednoduchým přepojením zpětnovazebních odporů tak lze dosáhnout i nižšího výstupního napětí.

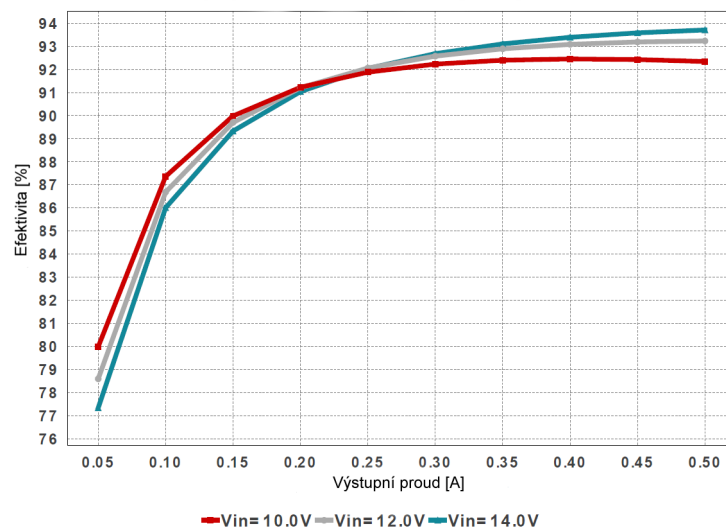
Rezistory R56 a R57 určují minimální hranici vstupního napětí podle vnitřní reference. Rezistor R62 a kondenzátory C59 a C60 fungují jako kompenzace zpětné



Obr. 3.6: Schéma zapojení zvyšujícího měniče napětí

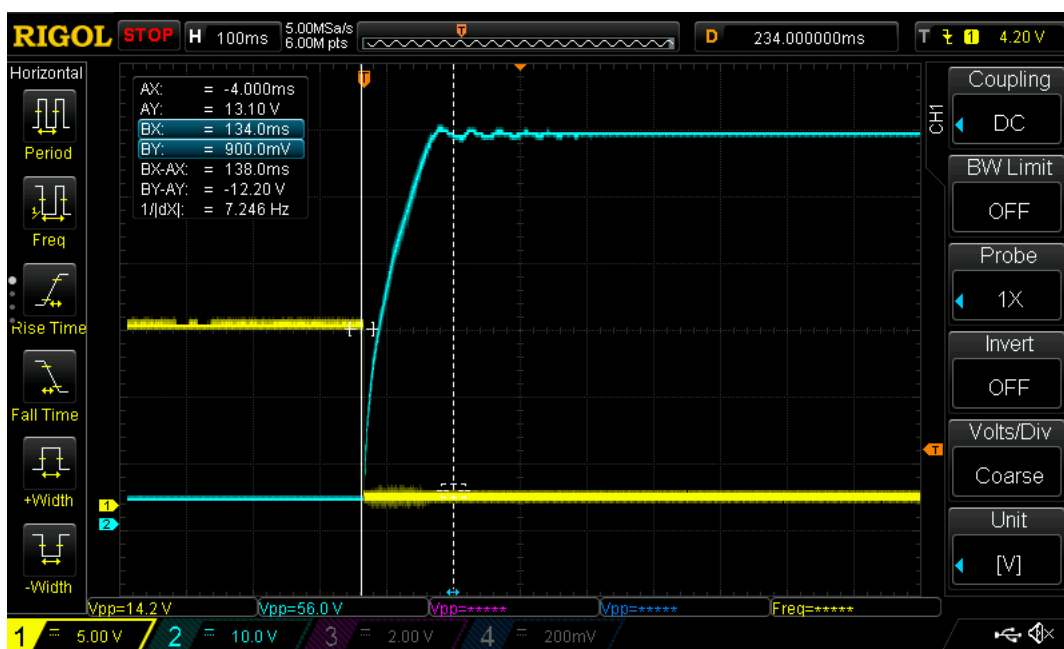
vazby. Dělič tvořený rezistory R69 a R70 tvoří samotnou zpětnou vazbu, která pomocí vnitřní napěťové reference o napětí 1,25 V určuje výstupní napětí. Efektivita výstupního měniče je zobrazena na obrázku 3.7.

Efektivita zvyšujícího měniče napětí s integrovaným obvodem LM5022

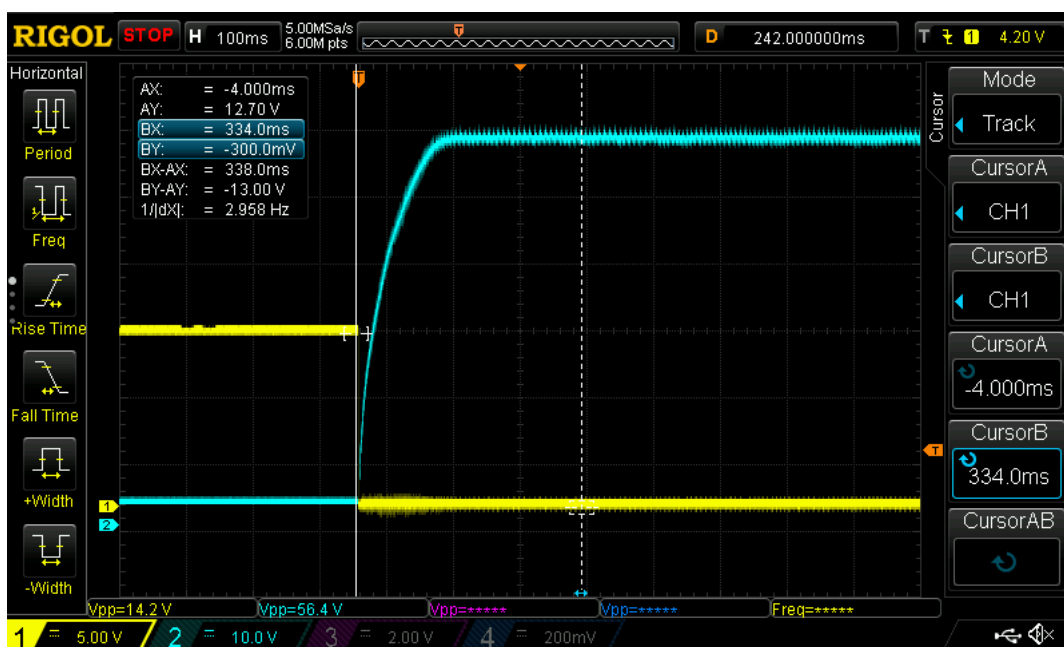


Obr. 3.7: Efektivita zvyšujícího měniče napětí [20]

Změřeny byly charakteristiky jak nezatíženého zdroje, tak i zatíženého při sepnutí unipolárního tranzistoru, který připojuje vstupní napětí pro napájení zvyšujícího měniče napětí. Obě charakteristiky jsou předpokladané a doba trvání náběhu zdroje je okolo 130 ms. Charakteristiky jsou zobrazeny na obrázcích 3.8 a 3.9.



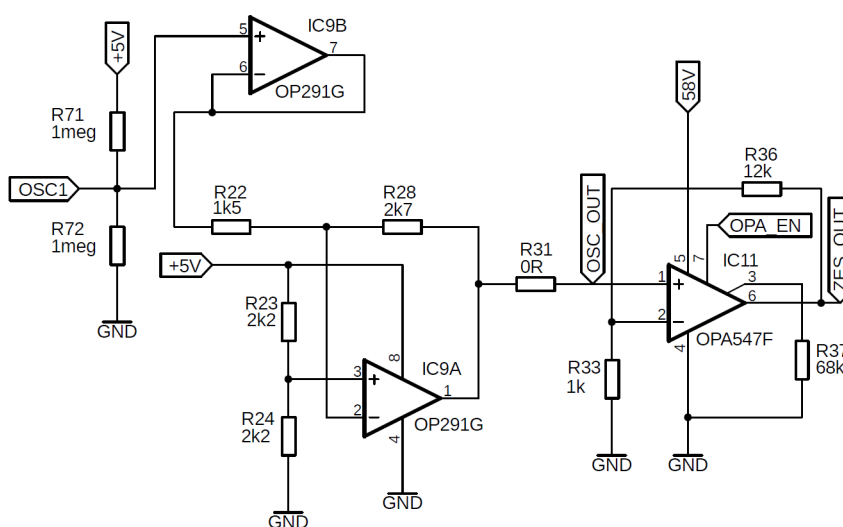
Obr. 3.8: Výstupní napětí zdroje napětí v odezvě na zapnutí zdroje při odpojené zátěži



Obr. 3.9: Výstupní napětí zdroje napětí v odezvě na zapnutí zdroje při připojené zátěži

3.3 Výstupní zesilovač

Pro svou jednoduchost a hlavně dostupnost byl zvolen výstupním zesilovačem výkonový operační zesilovač OPA547F. Operační zesilovač disponuje především svými výjimečnými parametry oproti běžným operačním zesilovačům. Jedním z nich je výstupní proud, který v kontinuálním režimu zvládne dodat až 500 mA a napájecí napětí, které se v symetrickém zapojení pohybuje okolo ± 30 V a v nesymetrickém maximálně 60 V. Kvůli velké indukčnosti antény musíme dosáhnout na výstupu poměrně vysokého napětí, aby anténa dokázala vysílat s maximálním výkonem. Rychlost mezního přeběhu u tohoto operačního zesilovače nabývá hodnot $6 \text{ V}/\mu\text{S}$, což je více než je potřeba ke zvolené frekvenci vysílání signálu [21].



Obr. 3.10: Schéma zapojení výstupního zesilovače OPA547F

Napájecí napětí tohoto operačního zesilovače je podle schématu na obrázku 3.10 zapojeno nesymetricky pod hranicí největšího možného napájecího napětí o hodnotě 58 V. Zapojení zesilovače je jako neinvertující, se zesílením 10-krát, které zajišťuje zpětná vazba tvořená rezistory R36 a R33, která je vypočítaná podle vzorce (3.3). Zesílení je určeno s ohledem na maximální rozkmit zesíleného a posunutého signálu z generátoru sinusového signálu mezi hodnoty 0 V až 5 V. Při zesílení se na výstupu objeví napětí s rozkmitem zhruba 5 V až 55 V. Použít zesílení na maximální napětí oscilátoru není možné, protože se nejedná o operační zesilovač typu rail-to-rail, který dokáže zesilovat až k rozsahu vlastního napájecího napětí, a také z důvodu tepelných a výkonových ztrát. Na nesymetrický vstup je připojen výstup oscilátoru, který je zesilován na výstup. Rezistor R37 nastavuje maximální výstupní proud na 238 mA podle vzorce (3.2) z katalogového listu. Stejnoseměrnou složku na výstupu odděluje kondenzátor CX1 (viz. 3.13).

Rezistor potřebný pro omezení výstupního proudu:

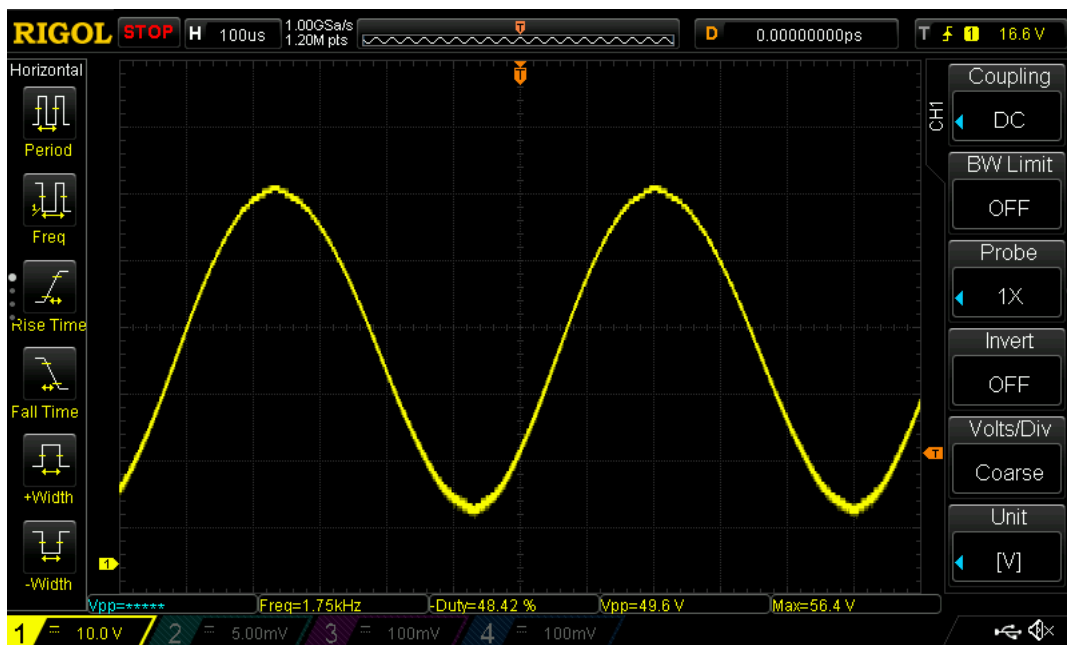
$$R_{CL} = \frac{(5000)(4,75)}{I_{LIM}} - 31600 = \frac{(5000)(4,75)}{0,238} - 31600 = 68000 \Omega, \quad (3.2)$$

kde I_{LIM} znamená maximální proud který propustí operační zesilovač. [21]

Zesílení operačního zesilovače:

$$A_U = -\frac{R_{36}}{R_{33}} = -\frac{10000}{1000} = -10. \quad (3.3)$$

Další výhodou tohoto operačního zesilovače je jeho vstup ENABLE, který zajišťuje připojování nebo odpojování signálu na výstup. Operační zesilovač tak zastane kromě funkce zesilovače i funkci směšovače. Signál tak lze namodulovat na výstup přímo mikrokontrolérem, který bude spínat výstup ENABLE.



Obr. 3.11: Výstupní napětí operačního zesilovače OPA547F při zesílení signálu z oscilátoru

Na obrázku 3.11 lze vidět výstupní signál oscilátoru, zesílený pomocí zapojeného operačního zesilovače. Signál je kvůli nepřesnému nastavení oscilátoru mírně zkreslený a kvůli velké toleranci použitých součástek oscilátoru i s nepřesným kmitočtem. Pro ověření funkce výstupního zesilovače je to však dostatečné. Vstupní filtr je však navíc navržen s poměrně velkou šířkou pásma, a proto přesná frekvence není důležitá.

Při odpojené zátěži dochází k velmi pomalému posunu napěťové nesymetrie směrem k nule. Avšak při zátěži připojené, je tento posun velmi rychlým skokovým dějem, a to v řádech milisekund. Připojením kondenzátoru do série obvodu je anténa

uvedena do rezonance na určité frekvenci. Anténa uvedená do rezonance se chová jako impedance s rezistivním charakterem. Při vysílání signálu je důležité, aby signál nebyl zkreslený a dosahoval co největší amplitudy. Při rezonančním obvodu bude minimální napětí na kapacitoru a větší část napětí na cívce, která představuje anténu. Tím lze vyzářit největší množství energie.

3.4 Anténa

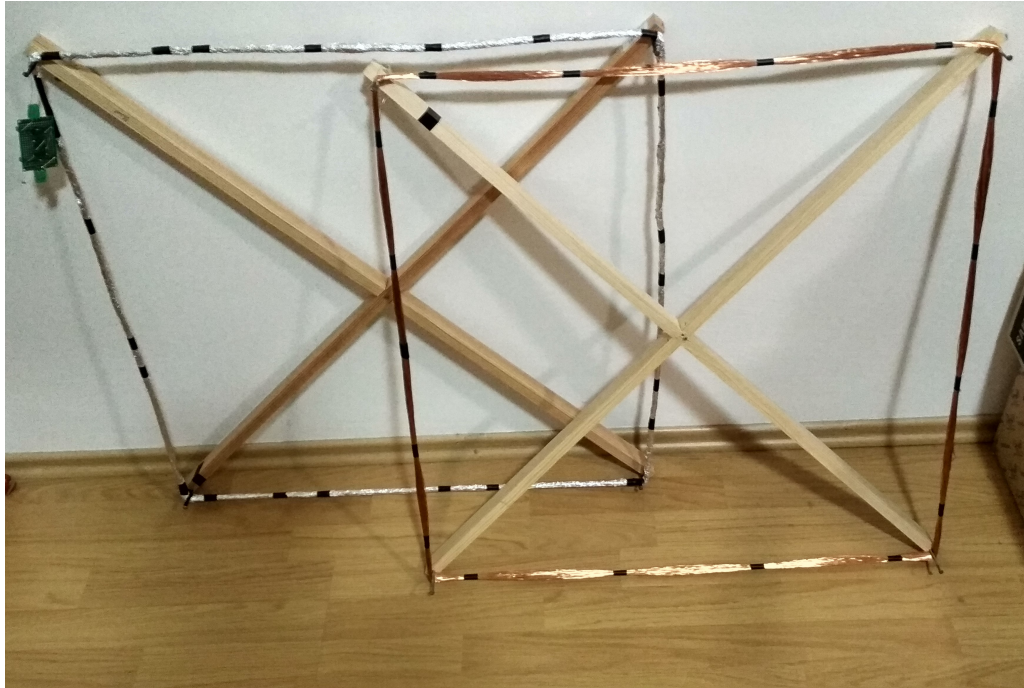
Práce se zabývá pouze návrhem magnetické smyčkové antény pro ověření konceptu. Vyrobena anténa je velmi neefektivní a nelze ji použít pro komunikaci na větší vzdálenosti. Pro frekvence tak nízké, jako využívá navrhované nařízení nepřichází dipól v úvahu, neboť délka vlny pro frekvenci 1750 Hz je podle vztahu vypočítána jako:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300000000}{1750} = 171428,571m, \quad (3.4)$$

kde λ je vlnová délka [m], f je frekvence [Hz] a c rychlost světla ve vakuu [m/s].

Právě pro takovou vlnovou délku není elementární dipól, jakožto základní typ antény vhodný. Jako přijímací anténa může být efektivním řešením feritová anténa, navrhované zařízení ale využívá pro obě činnosti jednu anténu a tou je právě zvolená magnetická smyčková anténa. Tvarově to může být anténa jakéhokoliv symetrického tvaru jako například kruhová, čtvercová, kosočtverečná nebo šesti/osmiúhelníková. Ačkoliv jsou některé z anténních parametrů závislé na tvaru antény, rozměry takovéto antény by měly být okolo 3 - 5 % vlnové délky. Při srovnání magnetické smyčkové antény s klasickou smyčkovou anténou, dipólem, nebo směrovou anténou je magnetická smyčková anténa především rozměrově efektivnější. Zatímco klasická smyčková anténa má obvod striktně roven vlnové délce, pro kterou byla anténa navržena, magnetická smyčková anténa používá obvod okolo 0,1 - 0,2 λ . Výjimečnost oproti ostatním anténám je ve schopnosti generovat a zpracovávat pouze magnetickou složku H vysílaného/přijímaného elektromagnetického pole. Díky této vlastnosti není anténa citlivá vůči elektrické složce elektromagnetického pole rušivých signálů. Tato vlastnost však nebude platit za předpokladu, že magnetická smyčka bude delší než 0,25 λ , v tomto případě by se začala uplatňovat i složka elektrická.

Anténa navržená pro toto zařízení dokáže i přes nízkou efektivitu pracovat, avšak na kratší vzdálenosti. Proto bylo pro hlavní smyčku použito více závitů, aby nebyly rozměry antény velké. Anténa se tím stane méně prostorově náročnější, ale klesne tak i efektivita energetického zisku elektromagnetického pole při příjmu signálu. Indukčnost poté roste s druhou mocninou počtu závitů. [12], [17] a [22]



Obr. 3.12: Antény vyrobené z měděného lakovaného vodiče

Na obrázku 3.12 vidíme dvě ručně navinuté antény z lakovaného měděného vodiče o průřezu $0,4\text{mm}^2$, o celkových délkách vodiče 400 metrů. Jsou navinuty do čtvercového symetrického tvaru a umístěny na dřevěném rámu. Na jedné anténě byla experimentálně navinuta po téměř celém obvodu aluminiová fólie, která by měla odstranit elektrickou složku indukovanou na anténu a tím snížit celkový přijímaný šum na anténě. Anténa však pracovala víceméně stejně, jako anténa která na sobě aluminiovou fólii neměla, čímž se potvrdila vlastnosti přijímat pouze magnetickou složku signálů. Dále jsou uvedeny naměřené a vypočítané parametry pro ověření parametrů antény.

Naměřené parametry realizované antény

Indukčnost cívky: $L = 62\text{ mH}$.

Počet závitů: $N = 150$ závitů.

Odpor ve stejnosměrném obvodu: $R_{DC} = 58\ \Omega$.

Plocha rámové antény: $A = 0,49\text{ m}^2$.

Tloušťka svazku cívky: $l = 0,007\text{ m}$.

Rozměr jedné strany rámu: $D = 0,7\text{ m}$.

Průřez vodiče: $d = 0,4\text{ mm}^2$.

Vypočítané parametry antény

Indukčnost cívky podle vzorce (2.3):

$$L_{LOOP} = 8 \cdot 10^{-7} \cdot N^2 w \left(\ln \frac{1,4142 \cdot w \cdot N}{(N+1)l} + 0,37942 + \frac{0,3333(N+1)l}{wN} \right) =$$
$$8 \cdot 10^{-7} \cdot 150^2 \cdot 0,7 \left(\ln \frac{1,4142 \cdot 0,7 \cdot 150}{(150+1)0,007} + 0,37942 + \frac{0,3333(150+1)l}{0,7 \cdot 150} \right) = 67,1 \text{ mH}.$$

Indukčnost vodiče podle vzorce (2.4):

$$L_{WIRE} \approx \frac{\mu_0(4Nw)}{2\pi} \cdot \left(2,303 \cdot \log \left(\frac{4(4Nw)}{d} \right) - 1 + \frac{\mu_r}{4} + \left(\frac{d}{2(4Nw)} \right) \right) =$$
$$\frac{\mu_0(4 \cdot 150 \cdot 0,7)}{2\pi} \cdot \left(2,303 \cdot \log \left(\frac{4(4 \cdot 150 \cdot 0,7)}{0,4 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 + \frac{\mu_r}{4} + \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{2(4 \cdot 150 \cdot 0,7)} \right) \right) =$$
$$= 1,171 \text{ mH}.$$

Vyzařovací odpor podle vzorce (2.5):

$$R_{RAD} = Z_0 \frac{2}{3} \pi \left(\frac{h_e}{\lambda} \right)^2 = Z_0 \frac{8}{3} \pi^3 \left(\frac{N\mu_r A}{\lambda^2} \right)^2 = 377 \frac{8}{3} \pi^3 \left(\frac{150\mu_r 0,49}{171428,571^2} \right)^2 = 0,1949 \text{ p}\Omega.$$

Odpor ve stejnosměrném obvodu podle vzorce (2.6):

$$R_{DC} = \frac{(4Nw) \cdot \rho}{\pi d^2/4} = \frac{(4 \cdot 150 \cdot 0,7) \cdot 16,78 \cdot 10^{-9}}{\pi(0,4 \cdot 10^{-3})^2/4} = 56,083 \Omega.$$

Odpor ve střídavém obvodu podle vzorce (2.7):

$$R_{AC} = \frac{4Nw}{\pi d} \sqrt{\pi \mu_0 f \rho} = \frac{4 \cdot 150 \cdot 0,7}{\pi \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot 1750 \cdot 16,78 \cdot 10^{-9}} = 0,2056 \Omega.$$

Kapacita rámové smyčky podle vzorce (2.8):

$$C_{LOOP} \approx 3,9685 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{400w}{\pi}\right)^4}{100l}} = 3,9685 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{400 \cdot 0,7}{\pi}\right)^4}{100 \cdot 0,007}} = 177,9390 \text{ pF}.$$

Účinnost magnetické smyčkové antény podle vzorce (2.9):

$$\eta = \left(\frac{R_{RAD}}{2(R_{RAD} + R_{AC})} \right) \cdot 100 = \left(\frac{0,194981 \cdot 10^{-12}}{2(0,194981 \cdot 10^{-12} + 0,2056)} \right) \cdot 100 = 0,473 \cdot 10^{-12} \text{ \%}.$$

Činitel kvality podle vzorce (2.10):

$$Q = \frac{X_L}{2(R_{RAD} + R_{DC})} = \frac{2\pi 1750 \cdot 67,1 \cdot 10^{-3}}{2(0,194981 \cdot 10^{-12} + 56,083)} = 6,5777 [-].$$

Rozdíly naměřených a vypočítaných hodnot jsou s největší pravděpodobností způsobeny nedokonalými rozměry, vypnutím antény a postupem realizace antény, při které nedošlo k absolutnímu utažení závitů. Velice malá účinnost antény je dána rozměry antény oproti vlnové délce. I s takto nízkou účinností lze v rámci možností pracovat.

Ladící kondenzátor

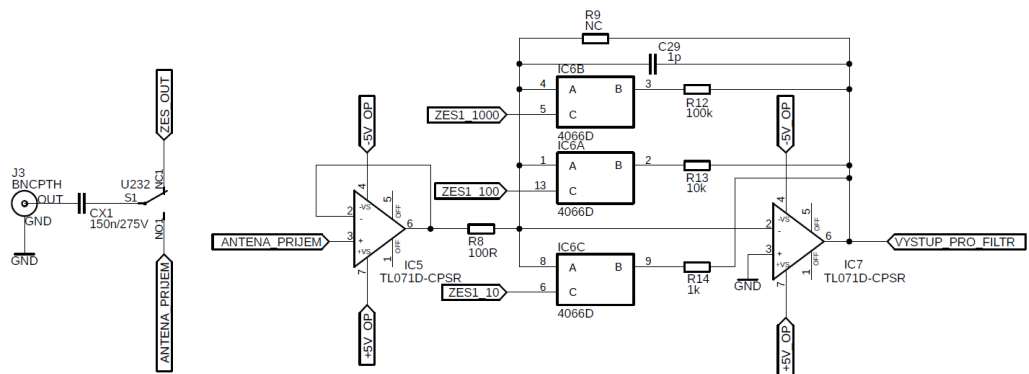
Pro vyráběnou anténu je však problém použít proměnlivý kondenzátor s hodnotami kapacity na takto nízký kmitočet, protože hodnota kapacity se pohybuje v řádech stovek nF. Proměnlivé kondenzátory se vyrábějí s hodnotami jednotek až desítek pF. Ladící kondenzátor byl vypočítán pomocí dosazení do vzorce (2.2):

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} = \frac{1}{((2 \cdot \pi \cdot 1750)^2 \cdot 62 \cdot 10^{-3})} = 133,405 \text{ nF}.$$

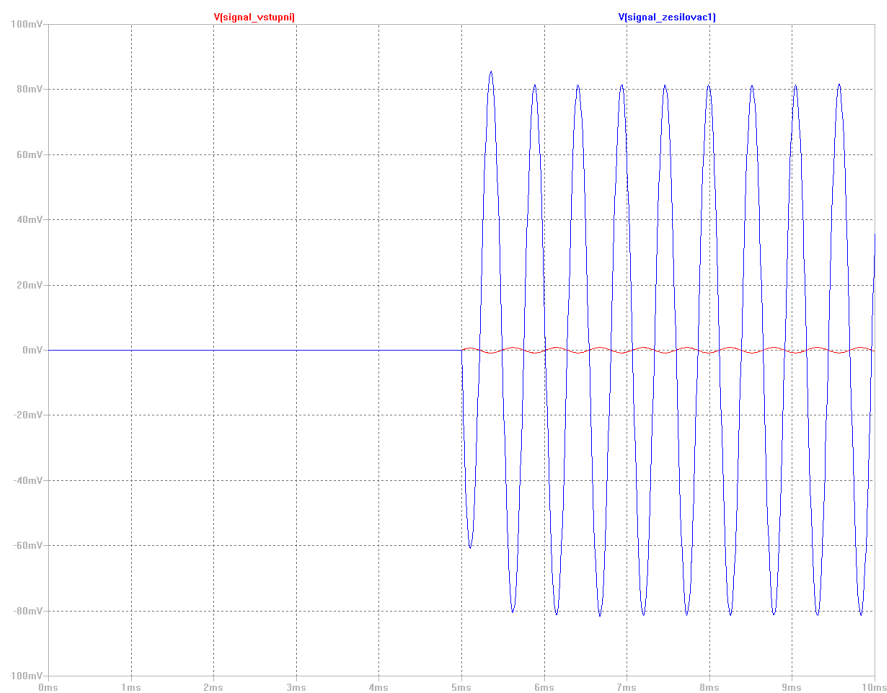
Proto aby se anténa dostala do rezonance, je nutné použít kondenzátor s pevnou hodnotou a to pouze různou kombinací kondenzátorů. Typ zvoleného kapacitoru je fóliový s označením X2. Vzhledem k řadám vyráběných kondenzátorů je nejvhodnější sériová kombinace dvou kondenzátorů o hodnotě 150 nF a 1 uF. Výsledná kapacita tak bude v rozmezí okolo 130 nF, což je dostatečné pro uvedení antény do rezonance.

3.5 Vstupní zesilovač - 1. stupeň zesílení

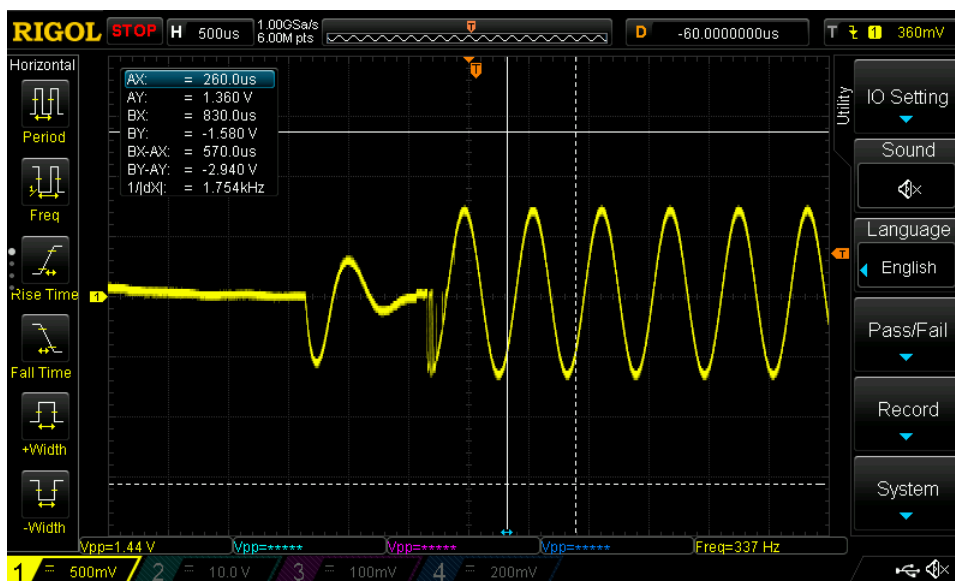
Protože zařízení zpracovává vstupní signál analogově, je nutné po nastavení antény do rezonance na danou frekvenci signál zesílit a dále zpracovávat dalšími funkčními bloky. Prvním takovýmto blokem je vstupní buffer, který zajistí, že při zatížení vstupu antény nedojde k poklesu nebo zkreslení vstupního signálu. Dalším blokem v zapojení je první stupeň zesílení. Zapojení je klasické invertující s operačním zesilovačem, a to s přepínáním rozsahů pomocí analogových přepínačů. Ty připínají rezistory do zpětné vazby invertujícího zesilovače a tím zvětšují zesílení celkového obvodu. Experimentálně byly zvoleny rozsahy prvního stupně vstupního zesílení 1x, 10x a 100x. Schéma zapojení lze vidět na obrázku 3.13. K přepínání mezi vstupním a výstupním signálem dochází pomocí bistabilního relé, které spínají přímo bipolární tranzistory ovládané mikrokontrolérem. Bistabilní relé jsou na napětí 3,3 V, a proto je nutné jejich napájecí napětí oddělit od mikrokontroléru a napětí 3,3 V spínat tranzistorem. Nejkritičtějším parametrem pro vstupní signál byl pronikající proud (current leakage), který má analogový spínač velmi vysoký, proto došlo k oddělení vstupního signálu a tím pádem i k jeho zabezpečení vlivem velkého zatížení tohoto signálu. Všechny operační zesilovače zapojené ve vstupních zesilovačích a filtru byly použity s označením TL071-CSPR, což jsou operační zesilovače typu JFET, které jsou velmi citlivé na vstupní signál, s velmi nízkým šumem a velkou šířkou pásma. Zapojení zesilovačů používá záměrně vysoké hodnoty odporů, pro co nejnižší přetěžování operačních zesilovačů, aby nedocházelo k velkým šumům a také zkreslení signálu. Na obrázcích 3.14 a 3.15 jsou zobrazeny výstupní signály prvního stupně zesílení jak teoretického, tak reálně naměřeného.



Obr. 3.13: Schéma zapojení prvního stupně vstupního invertujícího zesilovače



Obr. 3.14: Teoretický průběh výstupu zesilovače prvního stupně zesílení



Obr. 3.15: Reálný průběh výstupu zesilovače prvního stupně zesílení

3.6 Vstupní filtr typu pásmová propust

Protože se frekvence signálu nebezpečně blíží frekvenci energetických sítí a je i několikrátým násobkem této frekvence, dochází k problémům při použití těchto komunikačních zařízení v zarušeném prostředí a to převážně v centru města. Proto byl filtr navržen s relativně malou šířkou pásma a to hlavně s ohledem na změnu frekvence vlivem teploty u generátoru sinusového signálu, používaného pro generování výstupního signálu. Pro předpoklady byl nejprve navržený filtr pomocí aplikace FilterLab společnosti Microchip Technology. Navrženému filtru byl nejen vygenerovaný NETLIST pro simulaci v jakémkoliv SPICE simulátoru, ale i schématický návrh topologie filtru. Topologie filtru je zobrazena na obrázku 3.16. Aby bylo zajištěno správné přenesení signálu, filtr zároveň i mírně působí jako zesilovač. Jeho zesílení je řádově nižší než zesílení vstupních zesilovačů. Zesílení filtru se pohybuje okolo hodnoty 8,62 dB při nejvyšší amplitudě a to při frekvenci 1687,63 Hz. Mezní pokles filtru o 3 dB dosahuje na levé straně charakteristiky filtru při frekvenci 1,5202 kHz a na pravé straně při frekvenci 1,855 kHz. Pokud budeme považovat za úplný útlum 60 dB, pak frekvence levého útlumu dosahuje frekvence 505,187 Hz a pravého útlumu dosahuje frekvence 5,637 kHz pro teoretický filtr. Šířka pásma tedy dosahuje velikosti 335 Hz. Všechny tyto hodnoty byly odečteny z grafu na obrázku 3.17. Při testování navrženého hardwaru byla tato charakteristika změřena a zobrazena na obrázku 3.18. Je vidět, že se průběh charakteristiky shoduje a naměřené hodnoty útlumu/zesílení filtru jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty mezipásmového filtru použité pro graf na obrázku 3.18

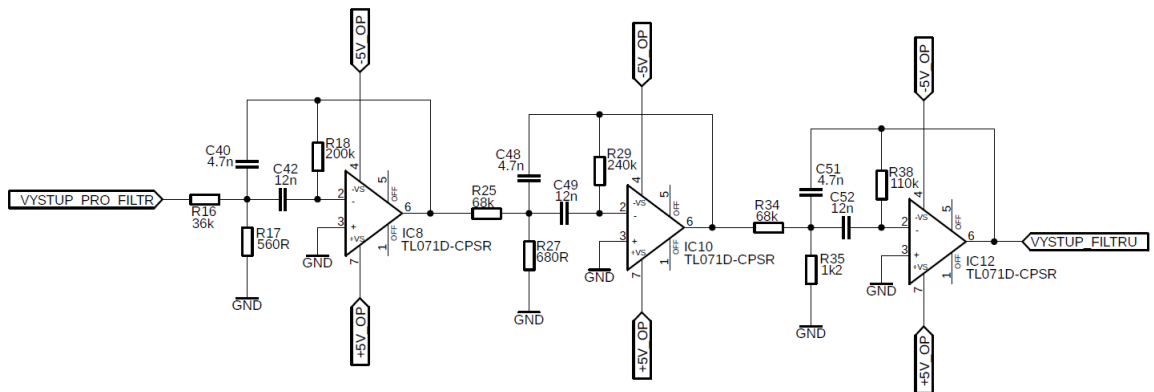
Naměřené hodnoty							
f [Hz]	Au [dB]	f [Hz]	Au [dB]	f [Hz]	Au [dB]	f [Hz]	Au [dB]
1250	-7,1309	1700	8,0280	2150	6,0206	2600	-5,0362
1300	-6,3751	1750	8,8181	2200	3,8624	2650	-6,3751
1350	-5,6799	1800	9,1878	2250	2,1441	2700	-6,3751
1400	-5,0362	1850	9,5424	2300	0,3406	2750	-6,3751
1450	-3,3498	1900	9,8830	2350	-0,7242	2800	-7,1309
1500	-1,5144	1950	10,2109	2400	-2,3837	2850	-9,8970
1550	0,9814	2000	10,103	2450	-2,8533	2900	-11,0568
1600	3,8624	2050	9,3076	2500	-3,8764		
1650	6,5267	2100	7,7477	2550	-5,0362		

V tabulce jsou vidět nejnižší naměřené hodnoty dat s hodnotou -7,958 dB zesílení a to nejspíše kvůli kapacitám vytvořenými mezi vodiči na plošném spoji, které ovlivňují zesílení a také lineárním poklesem signálu s rostoucí nebo snižující se frekvencí.

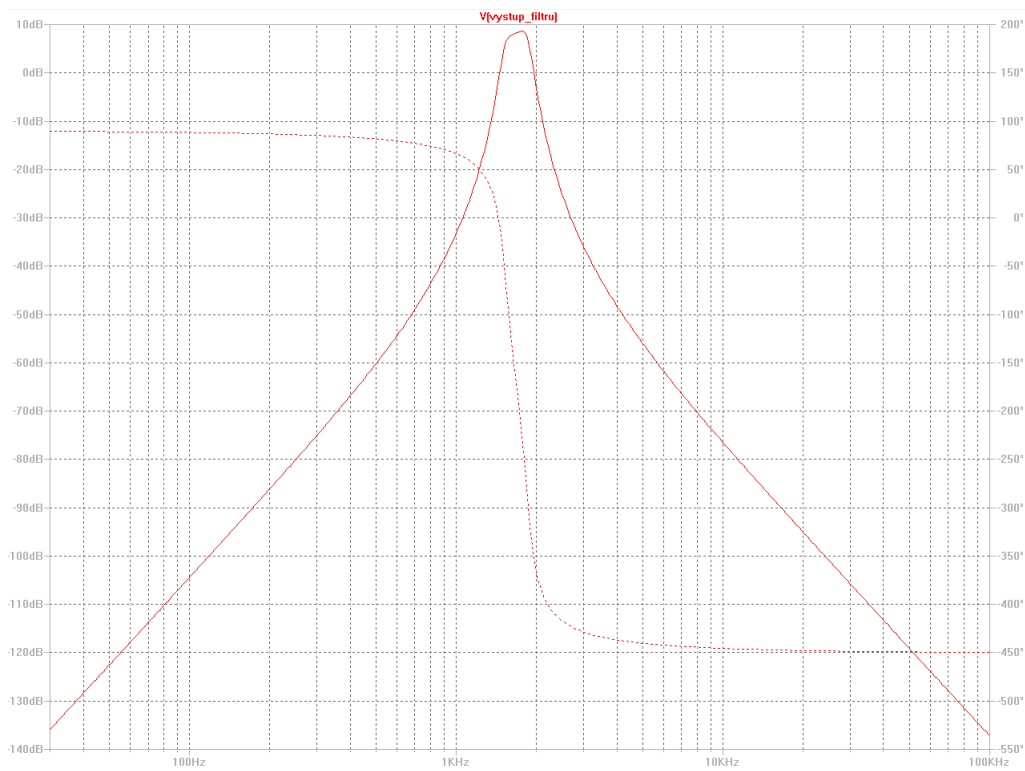
Tab. 3.2: Porovnání teoretických a reálných hodnot vstupního filtru

Teoretické hodnoty		Naměřené hodnoty	
f [Hz]	Au [dB]	f [Hz]	Au [dB]
505	-60	950	-7,958
1520	5,62	1650	6,526
1687	8,62	2000	10,103
1855	5,62	2150	6,020
5637	-60	2800	-7,130

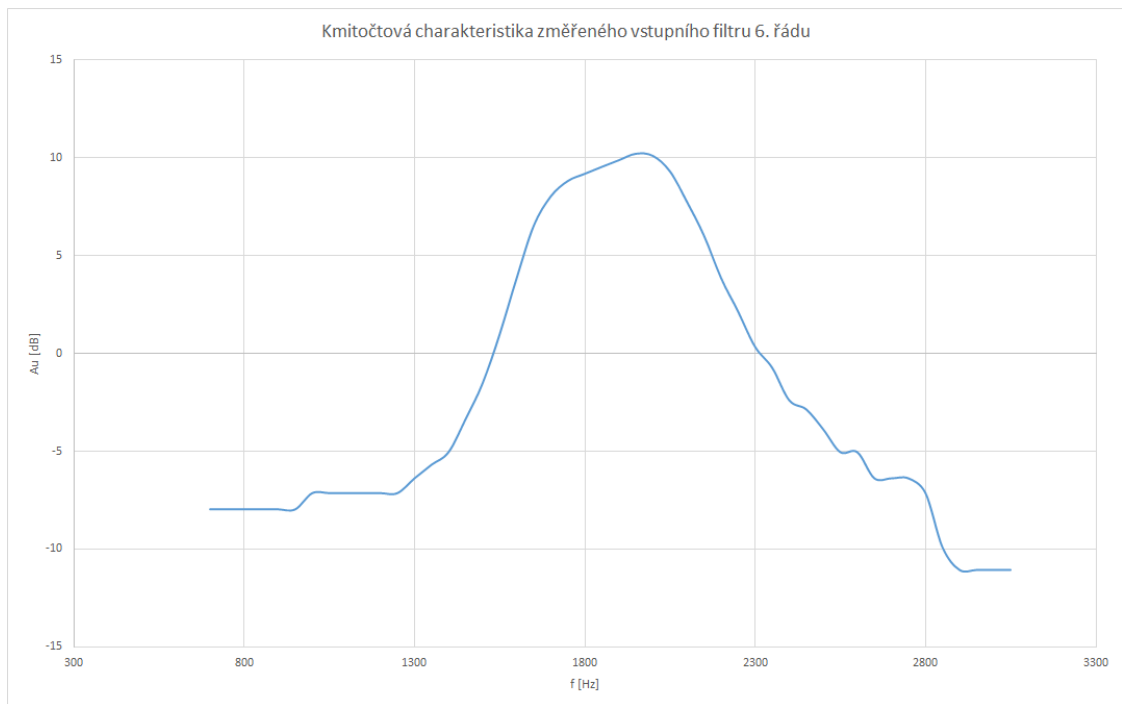
Rozdíl mezi teoretickými a reálnými hodnotami bude s největší pravděpodobností způsoben strmostí filtru a parazitními kapacitami způsobenými při návrhu DPS.



Obr. 3.16: Schéma zapojení vstupního pásmového filtru



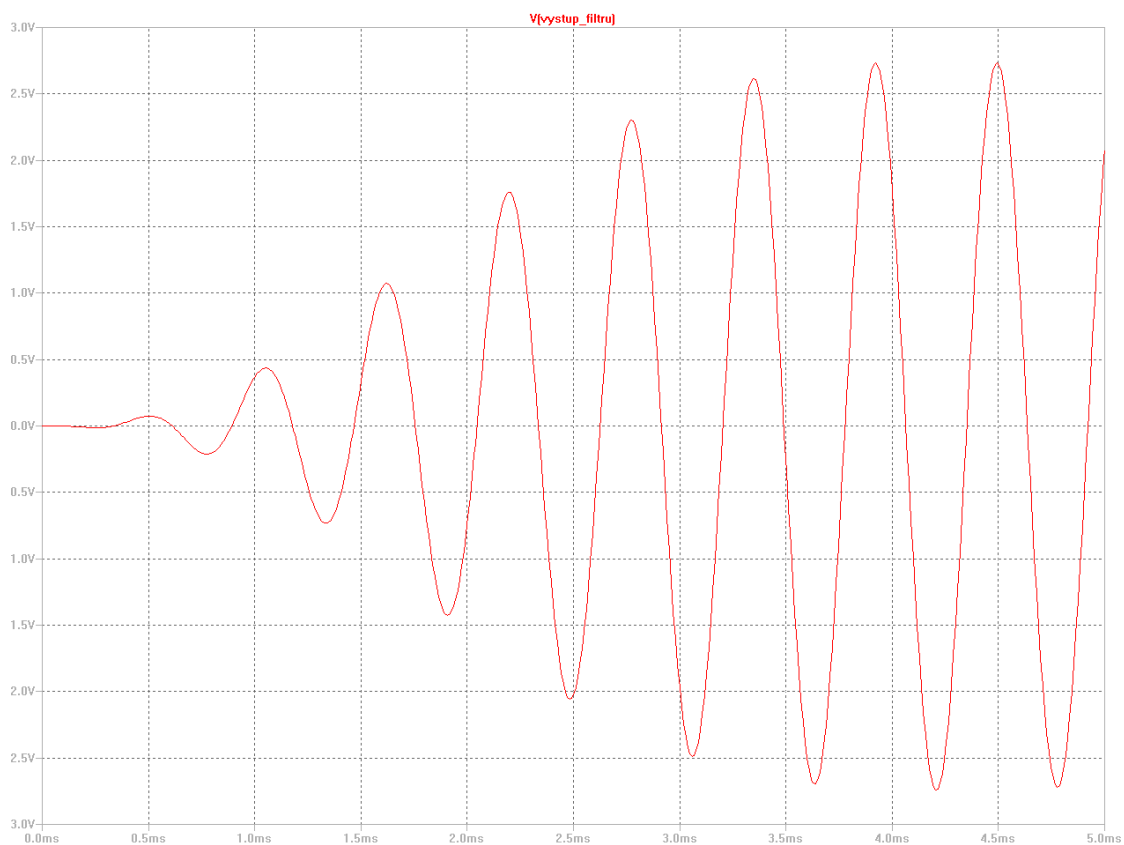
Obr. 3.17: Teoretická charakteristika AC vstupního filtru i se zobrazením posunu fáze



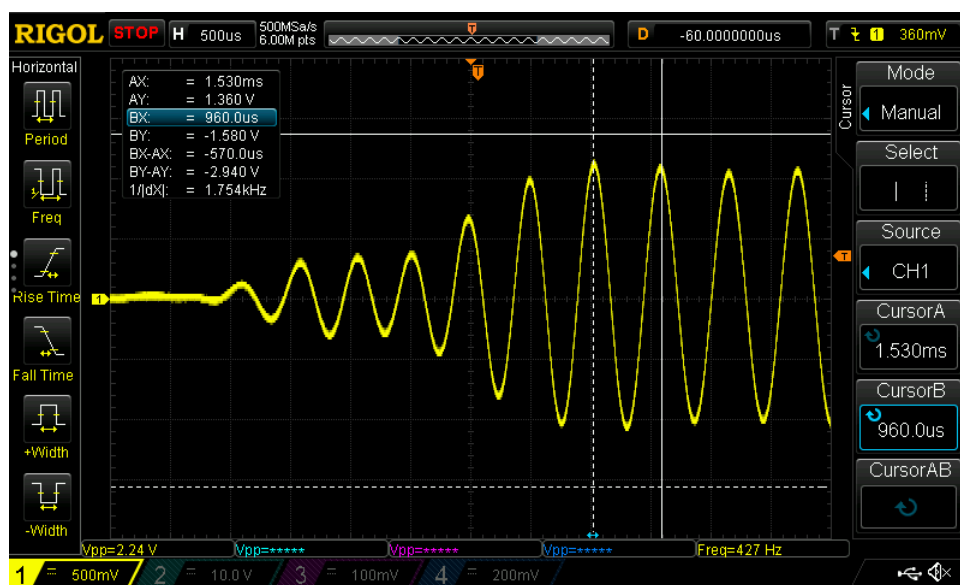
Obr. 3.18: Reálná naměřená charakteristika vstupního filtru

Na obrázku 3.19 je vidět teoretický průběh signálu po průchodu vstupním buferem, prvním stupněm zesílení a pásmovým filtrem. Zesílení zesilovače prvního stupně bylo nastaveno se zesílením 10x, vstupní signál sinusového průběhu nabýval amplitudy 100 mV při frekvenci 1750 Hz. To samé měření bylo prověřeno i na reálném zapojení a zobrazeno na obrázku 3.20. Sinusový signál na vstupu byl vytvářen funkčním generátorem AX-DG1005AF značky Axiomet. Při srovnání těchto dvou charakteristik je vidět o něco menší amplituda signálu změřeného průběhu a to je i výsledkem nižšího zesílení vstupního filtru než byl teoretický předpoklad. Jinak je signál přenesen bez většího zkreslení. Na teoretickém průběhu je vidět vstupní náběh filtru, který trvá přibližně 4 ms do úplného náběhu signálu na maximální hodnoty. Na naměřeném průběhu je vidět signál stejně nabíhající jako na průběhu teoretickém.

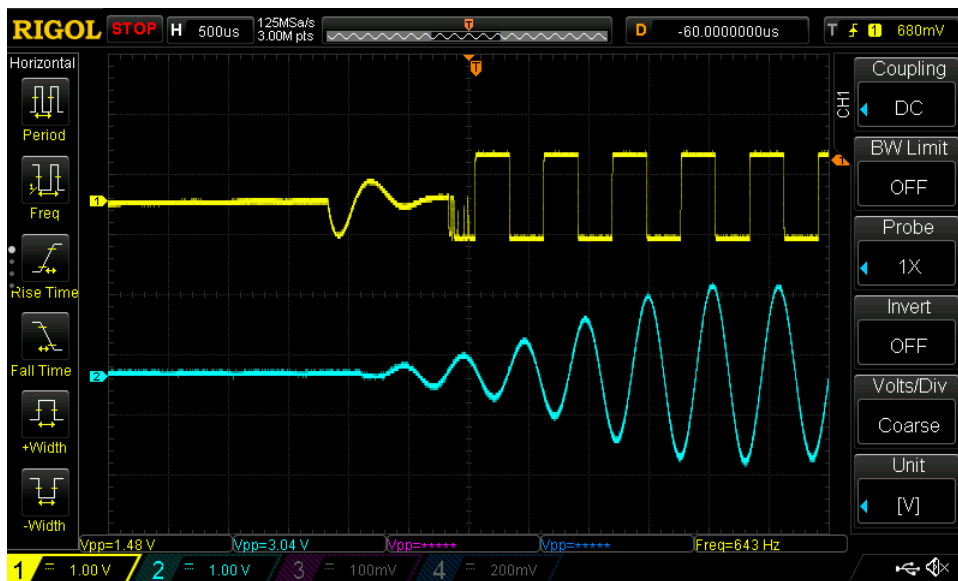
Pro otestování správné funkčnosti filtru byl ještě na vstup přiveden obdélníkový signál o frekvenci 1750 Hz se střídou 50 %, který by měl teoreticky filtr ořezat frekvence vyšší a nižší než je šířka pásma filtru. Přeměněný signál by měl mít sinusový průběh o dané frekvenci propuštěné filtrem. Protože je šířka pásma poměrně velká, nebude to sinusový signál o pouze jedné frekvenční složce, ale o součtu několika takovýchto frekvenčních složek. Výstupní i vstupní signál je zobrazen na průběhu obrázku 3.21.



Obr. 3.19: Teoretický přenesený signál na výstupu filtru



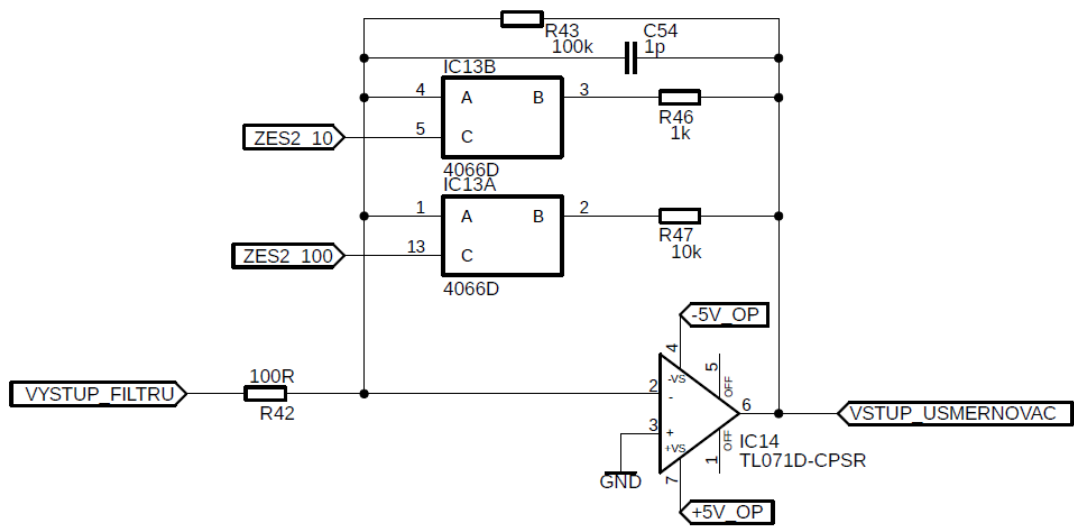
Obr. 3.20: Reálný naměřený signál na výstupu filtru



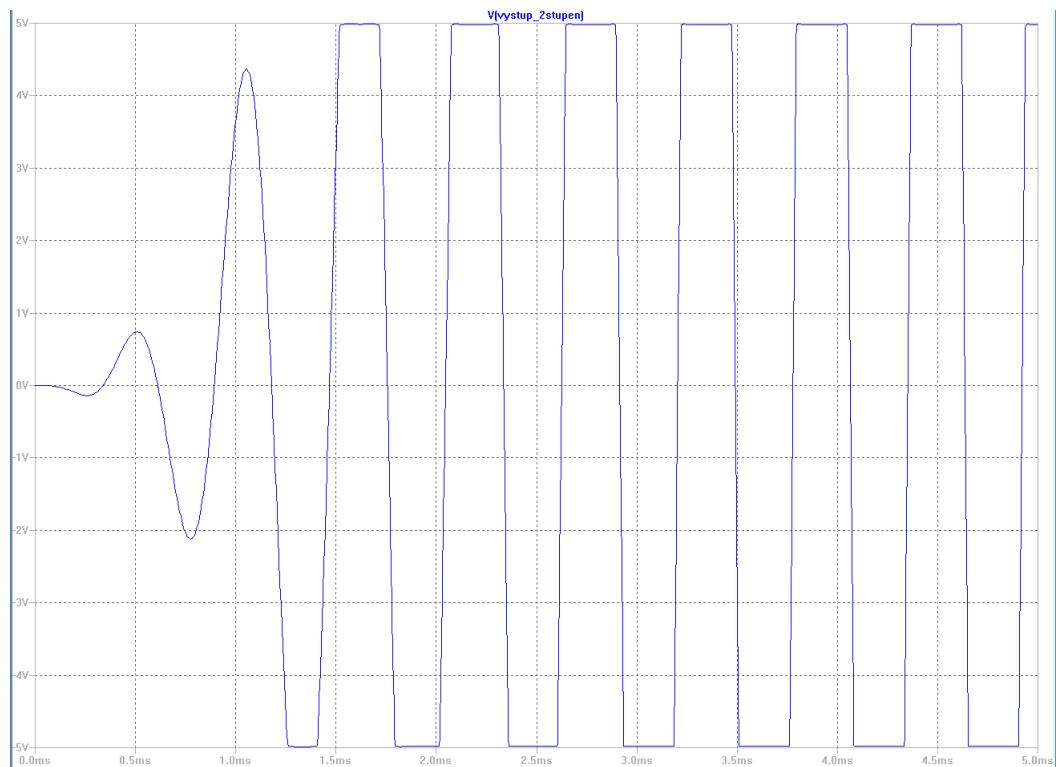
Obr. 3.21: Reálný naměřený signál na výstupu filtru po přivedení obdélníkového signálu na vstup

3.7 Vstupní zesilovač - 2. stupeň zesílení

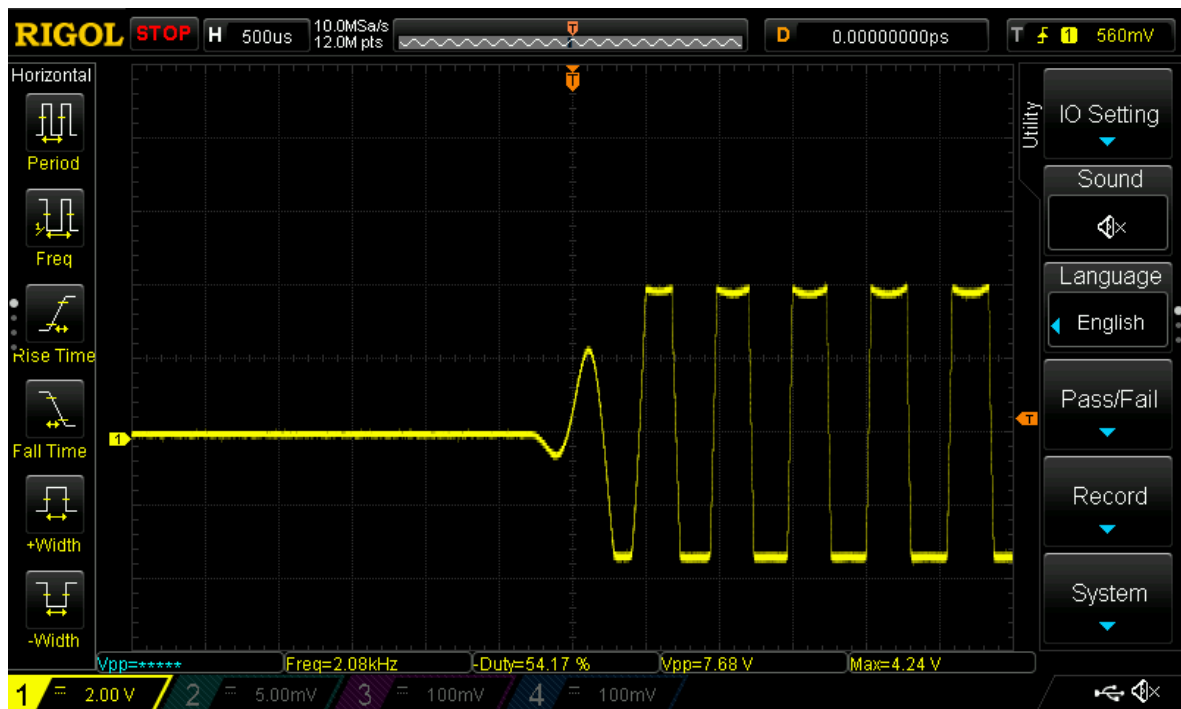
Dalším krokem je zesílení již jednou zesíleného a vyfiltrovaného signálu. Druhý stupeň zesílení je zapojený stejně jako první stupeň zesílení, avšak jeho přepínatelné rozsahy dosahují zesílení 10x, 100x a 1000x. Zapojení je vidět na obrázku 3.22. Teoretický průběh a reálný průběh zesílení zesilovače druhého stupně při nastavení zesílení 10x, amplitudy signálu 10 mV a frekvence 1750 Hz jsou zobrazeny na obrázku 3.23 a 3.24. Průběh signálu jde do saturace operačního zesilovače, což není problém u druhého stupně zesílení. U druhého stupně zesílení dochází k usměrnění signálu a proto je saturace spíše výhodou pro přenos maximální amplitudy signálu. V reálném použití k takovému stavu spíše nedojde. Při srovnání těchto dvou signálů je vidět i vstupní náběh tohoto signálu. Amplitudy signálu jsou srovnatelné, avšak jejich hodnota se neshoduje, neboť teoretický předpoklad je simulovaný s dokonalým operačním zesilovačem typu Rail-to-Rail. Reálně použitý operační zesilovač není typu Rail-to-Rail, neboť tato vlastnost není pro funkční blok potřebná.



Obr. 3.22: Schéma zapojení druhého stupně vstupního invertujícího zesilovače



Obr. 3.23: Teoretický průběh signálu druhého stupně vstupního invertujícího zesilovače

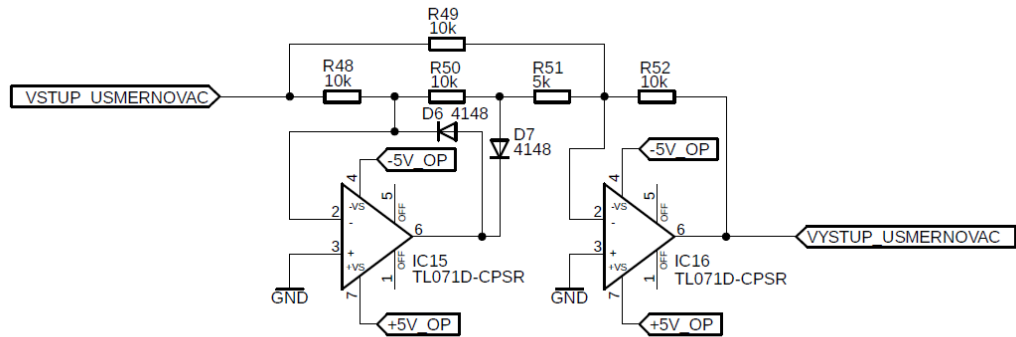


Obr. 3.24: Reálný průběh signálu druhého stupně vstupního invertujícího zesilovače

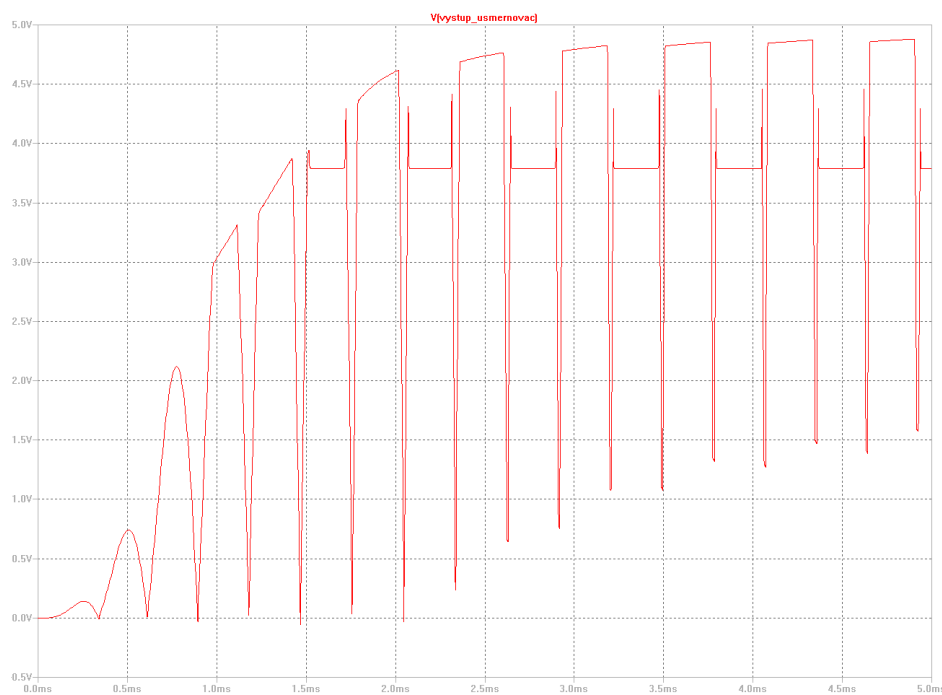
3.8 Precizní usměrňovač

Za druhým stupněm zesílení se nachází další blok a tím je precizní usměrňovač. Ten zajistí otočení záporné polarity sinusového signálu do polarity kladné, což je nejdůležitější krok pro možnost snímání vstupní hodnoty mikrokontrolérem. Samotný precizní usměrňovač je zobrazen na obrázku 3.25. Obvod pracuje jako dvoucestný usměrňovač, který tvoří dva operační zesilovače. První operační zesilovač působí jako jednocestný usměrňovač, zatímco druhý jako součtový zesilovač. Obecně je toto zapojení známo svým velkým zkreslením na frekvencích vyšších než 1 kHz, u kterých dochází ke zkreslení průběhů vlivem uzavřeného stavu diod na přechodovém vstupním bodu, kdy operační zesilovač pracuje bez zpětné vazby. Čím vyšší je frekvence signálu, tím více operační zesilovač omezuje jeho rychlost přeběhu a brání tak rychlému sepnutí diod. To způsobuje zkreslení výstupního signálu. Všechny hodnoty odporu rezistorů v zapojení jsou stejné a to o hodnotě 1 k Ω kromě rezistoru R51, který má odpor poloviční. Aby byly zachovány vstupní parametry signálu, je v teoretickém předpokladu zahrnuté zesílení prvního vstupně 10x, druhého stupně také 10x a samotný filtr zesiluje zhruba 3x. Proto u signálu s takovými parametry dojde k jeho zkreslení vlivem přechodu operačního zesilovače do saturace. Tento jev je zobrazen na obrázku 3.26. Pro ukázkou správného fungování precizního usměrňovače je zobrazen výstupní signál na dalším obrázku 3.27 s nastavenými parametry vstupního signálu 2 mV. Zesílení zůstává stejné jako u předchozího nastavení. Prakticky

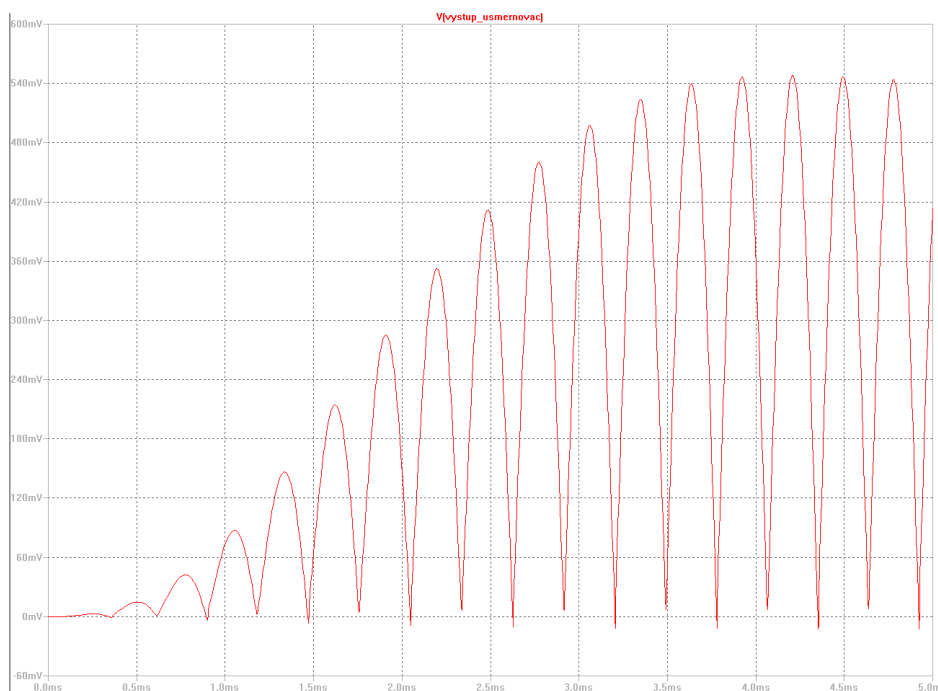
ověřen a zobrazen je na obrázku 3.29. První teoretický předpoklad může být porovnáván s průběhem na obrázku 3.28, kde byl připojen na vstup signál o rozkmitu napětí 100 mV.



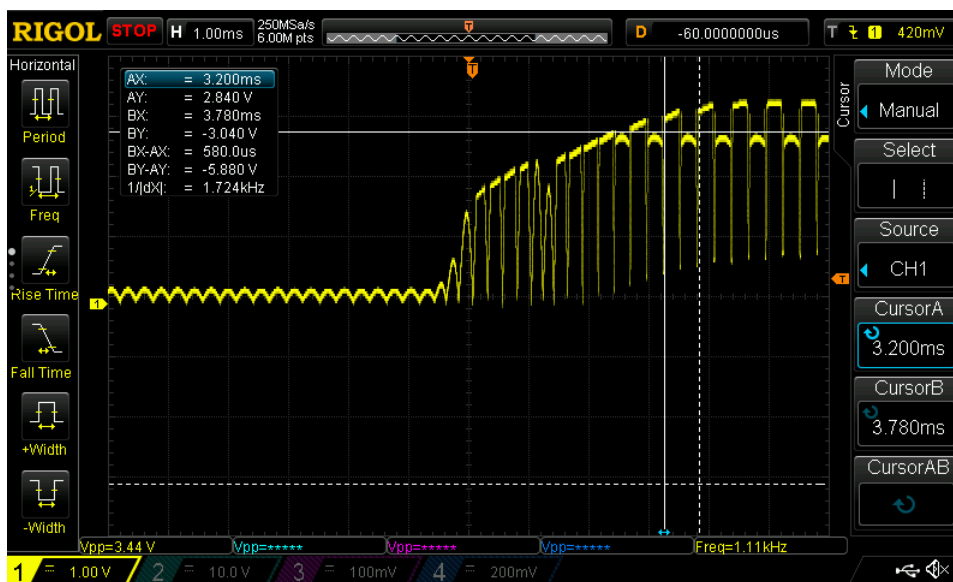
Obr. 3.25: Schéma zapojení precizního usměrňovače



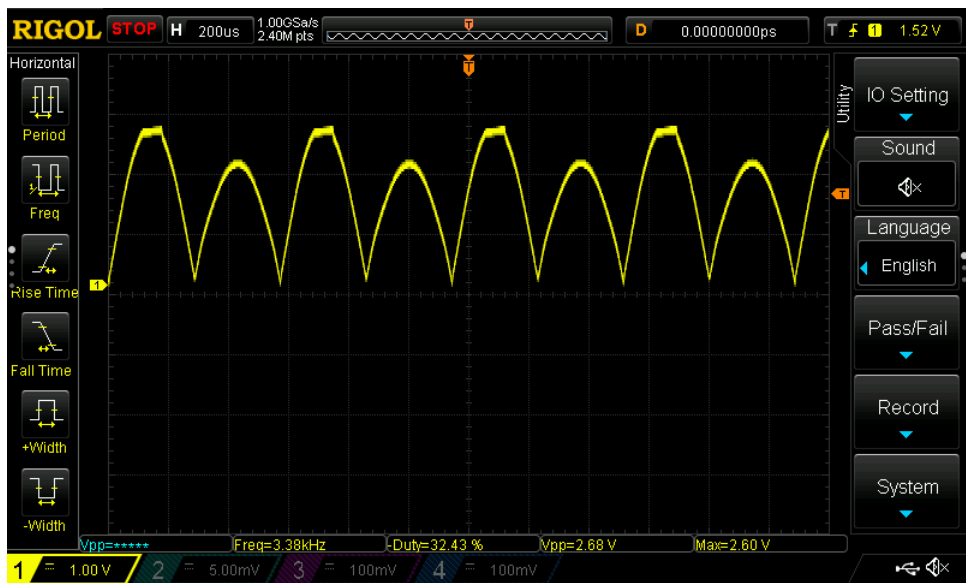
Obr. 3.26: Teoretický průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 100 mV



Obr. 3.27: Teoretický průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 2 mV



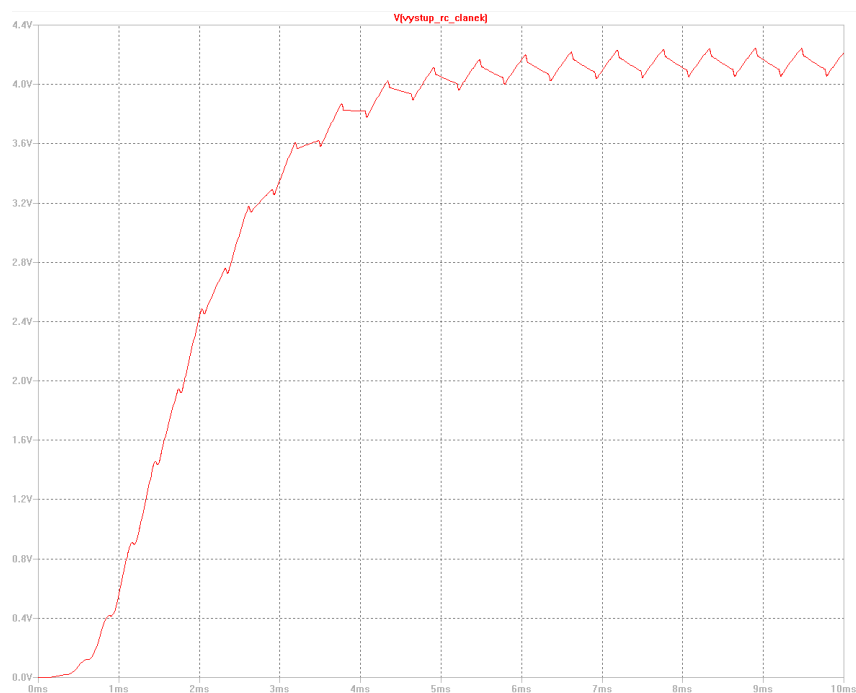
Obr. 3.28: Reálný průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 100 mV



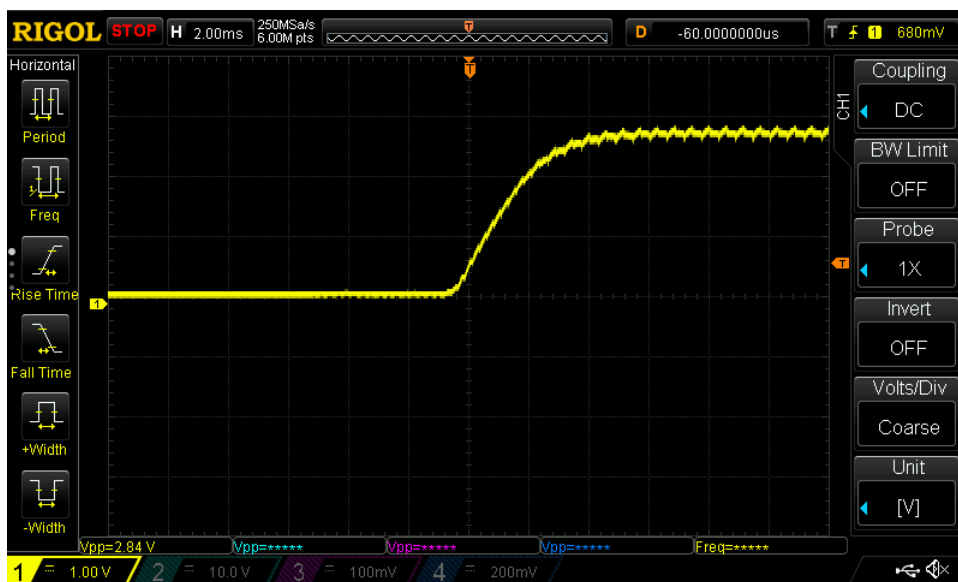
Obr. 3.29: Reálný průběh usměrněného signálu při vstupním signálu 2 mV

3.9 Analogové předzpracování

Usměrněný signál je dále přiveden na vstup analogového předzpracování. Obvod analogového předzpracování je pouhý RC článek, zapojený jako integrátor. Vstupní signál, nacházející se pouze v kladné polaritě se nabíjí přes rezistor R54 na kondenzátor C57. Stejným způsobem se také kondenzátor C57 zpětně vybíjí přes rezistor R54 do země na výstupu operačního zesilovače IC16. Tím dojde k ustálení hodnoty napětí pro snímání A/D převodníkem mikrokontroléru. I přesto, že je napětí na kondenzátoru nestabilní a kmitá, dochází k využívání tohoto děje pro snímání hodnoty vyšší než je hodnota šumu. RC článek je zobrazen v zapojení před výstupním komparátorem na obrázku 3.32. Pro ověření byl použit stejný vstupní signál jako v předchozích bodech, tedy sinusový signál o frekvenci 1750 Hz a amplituda signálu 100 mV. Při srovnání teoretické a měřené hodnoty lze vidět relativně rychlý průběh nabíjení kondenzátoru a o něco nižší maximální hodnotu napětí na měřeném průběhu. Průběhy jsou zobrazeny na obrázcích 3.30 a 3.31. Na obou průbězích lze vidět, že RC článek se nabije na maximální hodnotu za čas přibližně 4 ms.



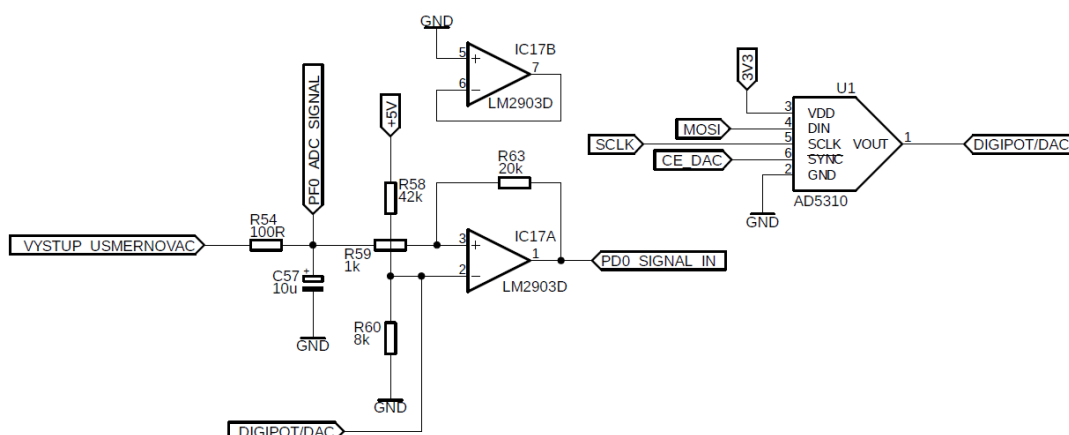
Obr. 3.30: Teoretický průběh integrovaného signálu při vstupním signálu 100 mV



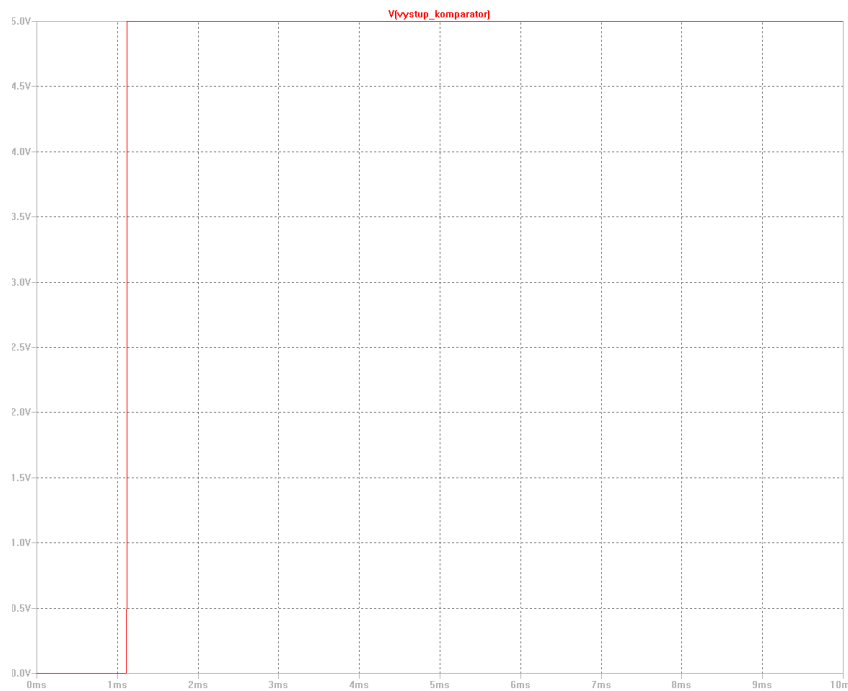
Obr. 3.31: Naměřený průběh integrovaného signálu při vstupním signálu 100 mV

3.10 Výstupní komparátor

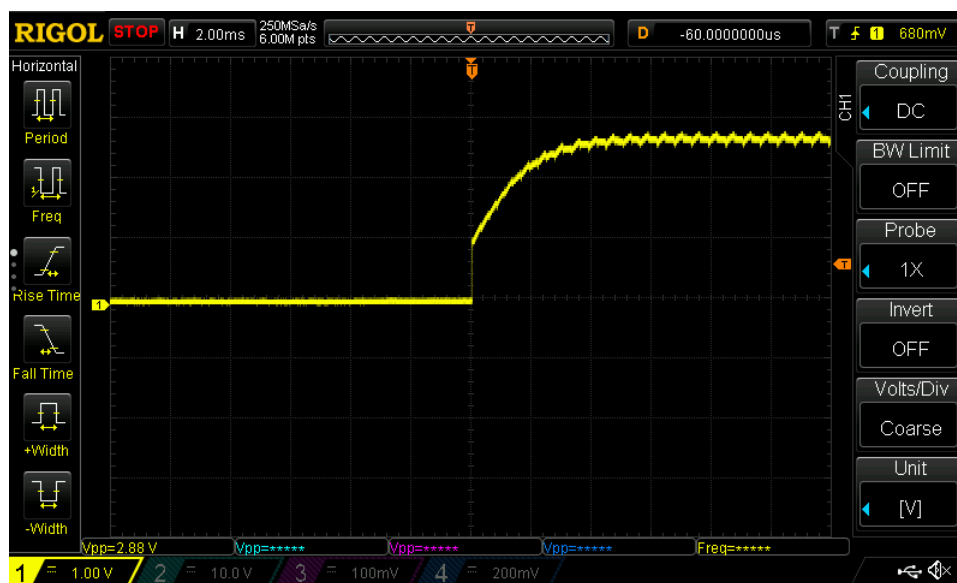
Posledním článkem přijímacího obvodu je výstupní komparátor, reagující na hodnotu napětí na kondenzátoru C57 z předchozího analogového předzpracování. Nastavené napětí pro komparaci je určeno poměrem rezistorů R58 a R60. Nastavené je dle hodnot $R58 = 42 \text{ k}\Omega$ a $8 \text{ k}\Omega$ na napětí 0,8 V. Při překonání této hodnoty se operační zesilovač překlápí a na výstupu nastaví vyšší hodnotu napětí pro spuštění vnějšího přerušení mikrokontroléru. Tím se signalizuje vstupní signál a dále se pracuje jen s analogovou hodnotou napětí na RC článku. Průběhy výstupních signálů jsou zobrazeny na obrázcích 3.33 a 3.34. Naměřený komparovaný signál má nižší maximální hodnotu a to kvůli zapojení komparátoru bez hysterezní smyčky. Komparátor tak nemá nastavený bod, při kterém je signál překlápen při překročení hodnoty vstupního signálu přímo do saturačního napětí. Rozkmit napětí signálu však přesahuje hodnotu porovnávacího napětí, a proto je komparátor v sepnutém stavu. V mikrokontroléru tak bezpečně dojde k vyvolání vnějšího přerušení. Aby komparátor fungoval správně, musel by být zapojen se zpětnovazebním rezistorem, který určuje poměr hystereze.



Obr. 3.32: Schéma zapojení RC článku a výstupního komparátoru



Obr. 3.33: Teoretický průběh komparovaného signálu při vstupním signálu 100 mV

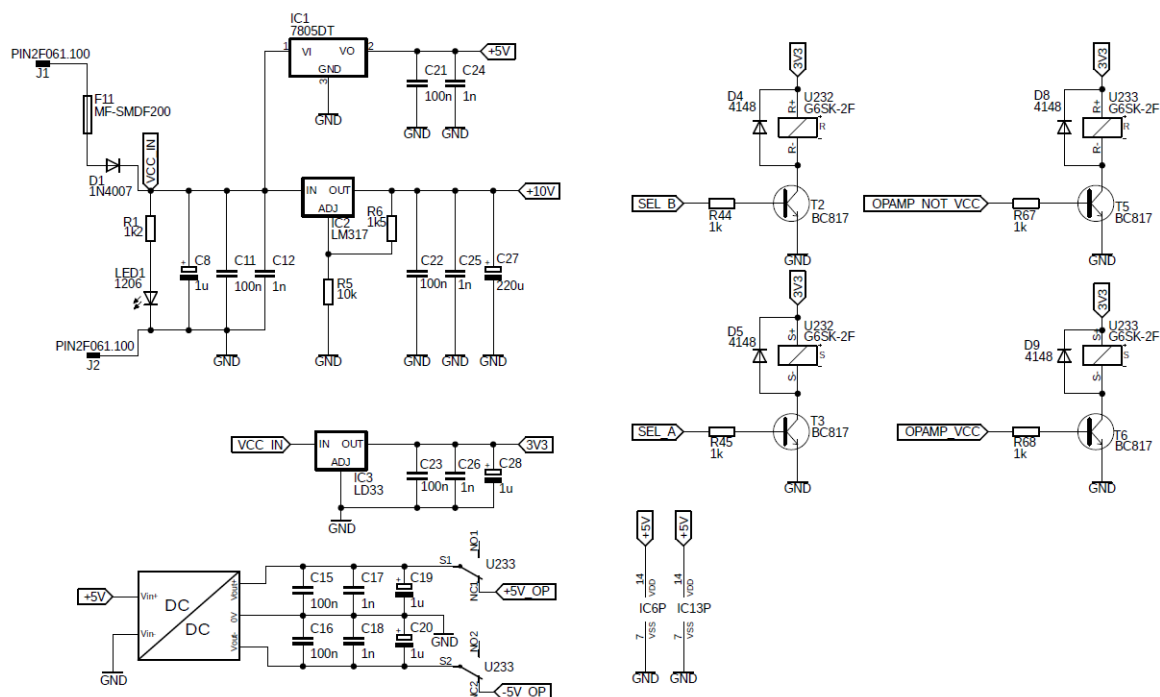


Obr. 3.34: Naměřený průběh komparovaného signálu při vstupním signálu 100 mV

3.11 Napájecí zdroje

Vhledem k různým typům použitých elektronických součástek, jsou potřeba různá napětí v celém obvodu, a proto bylo nutné vytvořit tato napětí z jediného napájecího zdroje. Napájecím zdrojem je pro zařízení 12 V bezúdržbový akumulátor o kapacitě

5 Ah. Napětí akumulátoru je však se snižující se kapacitou vybíjením nelineárně klesající. To musí být předmětem zvážení při výběru akumulátoru. Praktičtější by pro daný obvod bylo zapojení sério-paralelní kombinace Li-Ion článků. Celý obvod je napájen několika různými zdroji napětí tvořenými z 12 V akumulátoru. Potřebné je napětí 3,3 V pro napájení bistabilních relé, 5 V pro mikrokontrolér a ostatní okolní obvody, 10 V pro oscilátor, 58 V pro napájení výstupního koncového zesilovače a symetrické napájení o napětí ± 5 V pro napájení filtru a vstupních zesilovačů. Všechny tyto zdroje jsou vytvořeny pomocí lineárních regulátorů napětí, kromě zdroje napětí pro výstupní zesilovač a zdroje napětí operačních zesilovačů ve filtru a vstupních zesilovačích. Napětí 58 V vytváří spínaný regulátor LM5022, který funguje principem zvyšujícího neizolovaného měniče a napětí ± 5 V je tvořeno integrovaným izolovaným měničem napětí. Země těchto měničů a stabilizátorů jsou však stejně propojené s nulovým potenciálem obvodu. Zapojení zvyšujícího neizolovaného měniče na napětí 58 V je zobrazeno na obrázku 3.6. Ostatní zdroje jsou zobrazeny na obrázku 3.35. Dále jsou zde zobrazeny i bistabilní relé a jejich spínání pro odpojení nebo připojení napájení operačních zesilovačů pro případ rozkmitání se. Pojistka F11 je vratná pojistka typu PolySwitch s maximálním protékajícím proudem o hodnotě 0,7 A. Proti přepólování vstupního akumulátoru slouží dioda D1. Všechny stabilizátory napětí jsou filtrovány kondenzátory pro pochytní napěťových špiček a vyfiltrování napájecího napětí. Tranzistory T2 a T3 slouží k přepnutí bistabilního relé U232, tedy mezi módy příjímání a vysílání. Tranzistory T5 a T6 slouží k přepnutí druhého bistabilního relé U233 k připojení nebo odpojení napájecích zdrojů filtru a vstupních zesilovačů. Samozřejmostí je i filtrování a blokování napětí u každého integrovaného obvodu. Ty slouží především k zabránění proniknutí rušení do jednotlivých elektronických součástí.



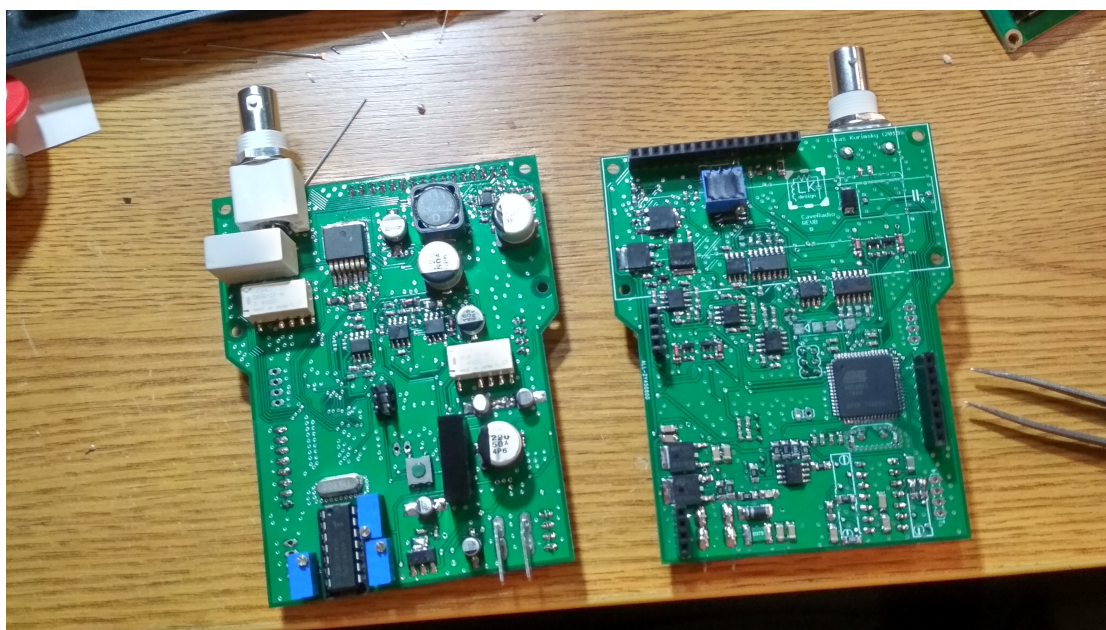
Obr. 3.35: Schéma zapojení zdrojů napětí pro celý obvod

4 Ověření funkčnosti konceptu

Měřením byly ověřeny vstupní i výstupní části zařízení, jež jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.1 Ověření celé výstupní části na hotovém prototypu

Celý navržený obvod byl realizován pomocí návrhového softwaru Eagle 9.3.0. Výstupní soubory návrhu jsou umístěny v přílohách. Osazenou desku plošného spoje lze vidět na obrázku 4.1. Na stranu spojů byly systematicky rozmístěny vyšší součástky jako tlumivka, fóliový kondenzátor, bistabilní relé a podobné THT i SMT součástky, aby mohl z druhé strany být připevněn displej a maticová klávesnice. Všechny tyto desky plošných spojů byly navrženy na míru pro konkrétní aplikaci. Ze strany součástek byly umístěny nižší součástky jako mikrokontrolér, většina operačních zesilovačů a tranzistorů. Displej a maticová klávesnice byly pro snadné manipulování a vylepšování obvodů propojeny pouze přes kolíkovou lištu, která je vsunována do dutinkové lišty. V reálné aplikaci by se pak snížila výška celého zařízení připájením kolíkové lišty přímo mezi obě desky plošných spojů.



Obr. 4.1: Osazené prototypy zařízení

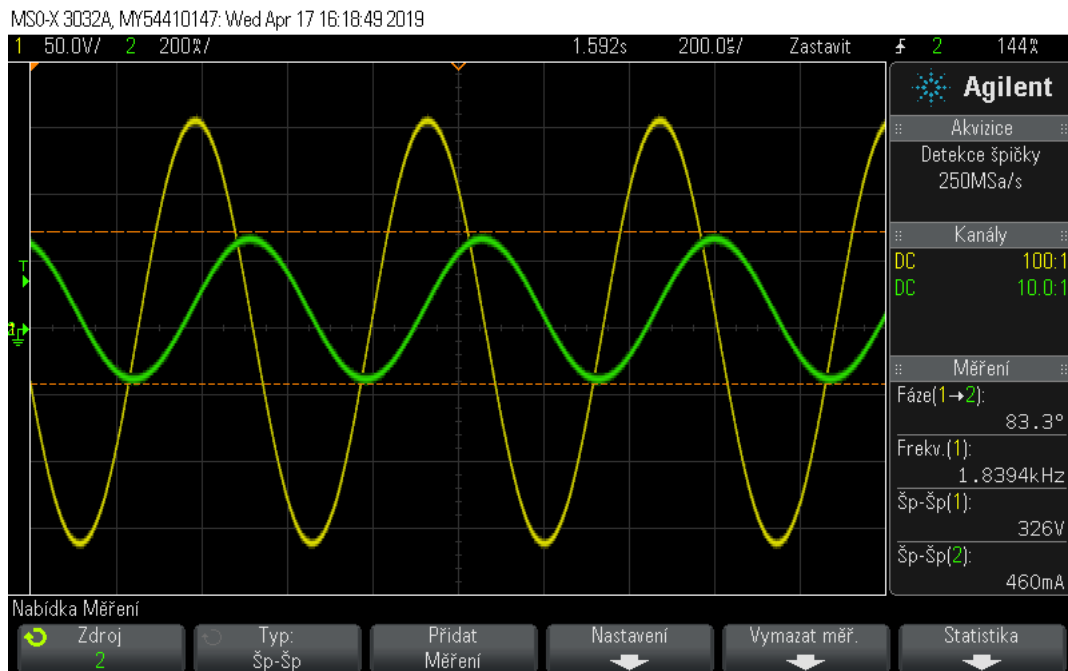
Výstupní signál oscilátoru je uveden na obrázku 3.4 a výstup výkonového zesilovače zapojeného naprázdno, tedy bez zatížení výstupu na obrázku 3.11.

Při zapojení vyrobené magnetické smyčkové antény, která je uvedena do rezonance se na rezonančním obvodu tvořeném těmito dvěma prvky při vysílání objeví

rozkmít napětí 326 V a procházející proud 460 mA. Při naměřeném fázovém posunu $\varphi = 83,3^\circ$ je pak výkon na rezonančním obvodu vypočítán podle vztahu:

$$P = U * I * \cos(\varphi) = (326 * 0,707) * (0,46 * 0,707) * \cos(83,3) = 8,745W, \quad (4.1)$$

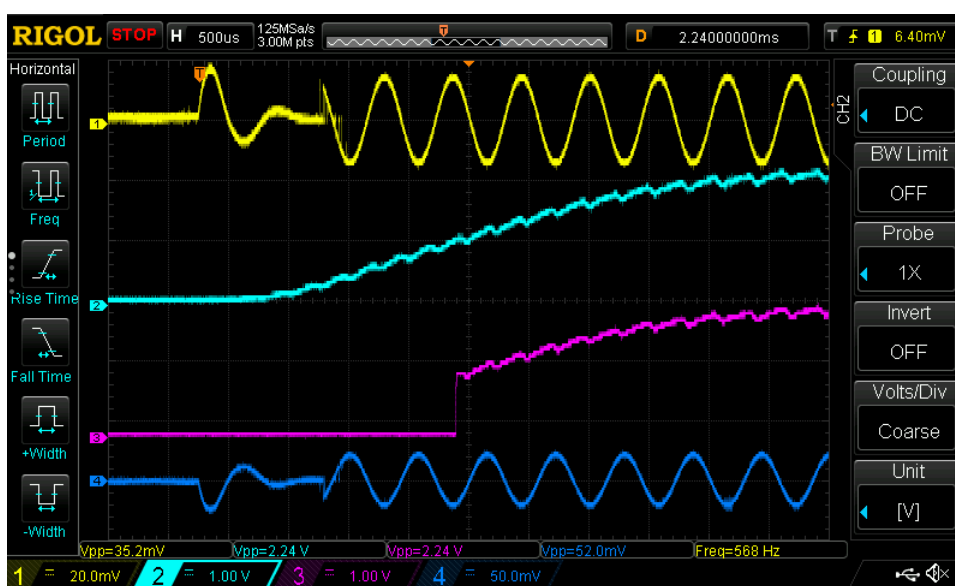
kde naměřený rozkmít napětí i proudu je převeden na efektivní hodnotu.



Obr. 4.2: Průběh výstupního signálu výkonového zesilovače na hotovém prototypu při výstupu zatíženém magnetickou smyčkovou anténou

4.2 Ověření celé vstupní části na hotovém prototypu

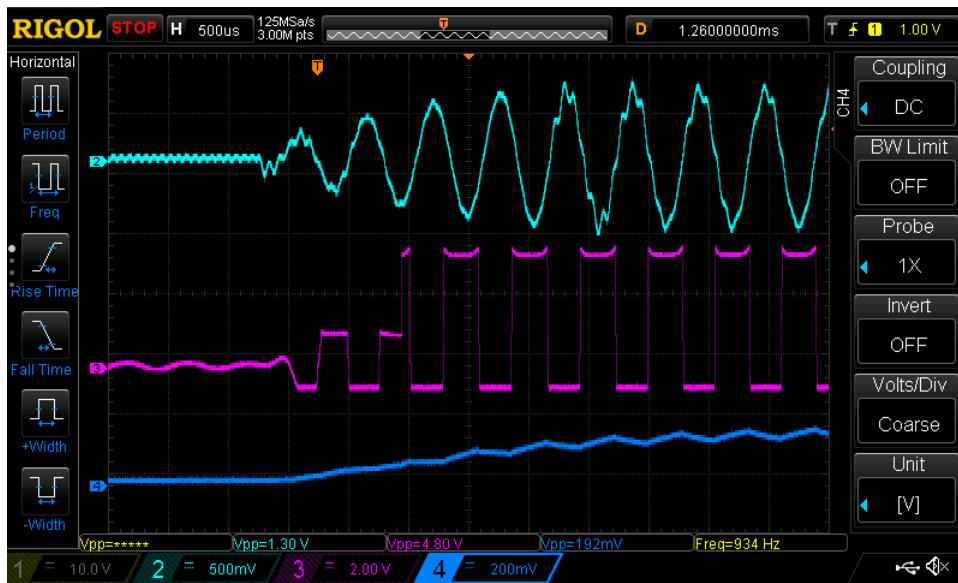
Vzhledem k očekávanému zpoždění signálu je nutné srovnání pro zjištění této minimální doby. Proto byl signál změřen se zachycením signálu pomocí prvního kanálu osciloskopu Rigol DS1054Z, kde byl připojen signál na vstupu, tedy přímo na BNC konektoru testovaného zařízení. Připojený vstupní signál obstarával funkční generátor AXIOMET AX-DG1005AF. Vstupní signál byl nastaven jako sinusový o frekvenci 1750 Hz a s rozkmitem napětí 30 mV. Na kanálu 2 osciloskopu byl připojený výstup pro A/D převodník mikrokontroléru, tedy výstup analogového předzpracování. Třetí kanál byl připojen na výstup komparátoru, kde nebyla nastavena jeho správná hystereze. Na kanálu 4 pak byl připojený výstup prvního stupně zesílení. Výsledné zobrazení signálu je zobrazeno na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Naměřené průběhy všech čtyř signálů v jednom snímku

To samé ověření bylo provedeno i s reálnou anténou na vzdálenost 1,5 metru a je zobrazeno na obrázku 4.4. Vstupní signál nebylo možné se zařízením změřit, neboť byl zachycen pomocí výstupního signálu prvního zařízení, které v rezonanci přesahovalo rozlišení napětí osciloskopu. Měření signálů vstupních bylo provedeno na druhém zařízení. Na druhém kanálu byl připojený vstup na BNC konektoru zařízení, na němž je signál zkreslený zdroji rušení z prostředí, ve kterém bylo měřeno. Na třetím kanálu byl připojený výstup komparátoru, který je rozkmitaný, protože napětí na A/D převodníku je nedostatečné pro překlopení. To má za vliv nedostatečné zesílení signálu ve druhém stupni zesílení. A na čtvrtém kanálu je připojený výstup RC článku pro měření A/D převodníkem mikrokontroléru. I přes problém zakmitávání komparátoru lze se signálem pracovat, neboť komparátor slouží pouze

jako spouštěcí příznak a dále se pracuje pouze s analogovou hodnotou signálu.



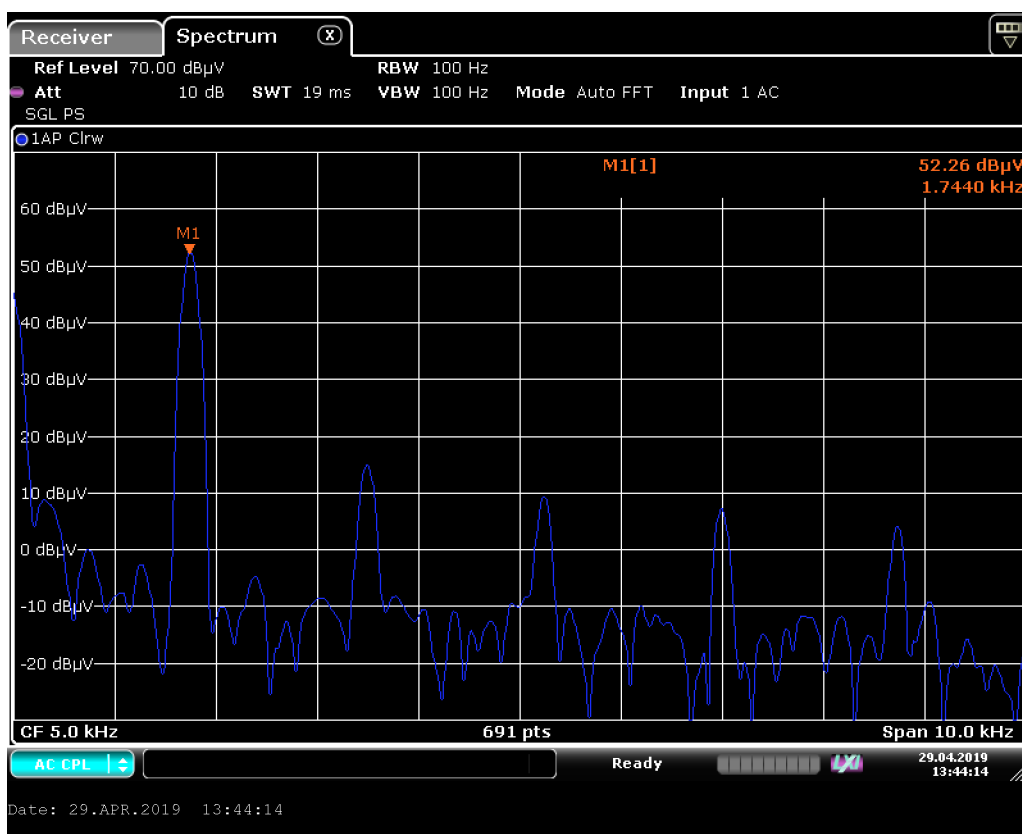
Obr. 4.4: Naměřené průběhy všech čtyř signálů s reálnou anténou v jednom snímku

Vzhledem k malé vzdálenosti jednotlivých antén při měření bylo nutno nastavit nejmenší zesílení obou stupňů, neboť se nepředpokládá použití zařízení na tak malou vzdálenost. Avšak ani tento extrém není problémem, neboť po zachycení vnějšího přerušení mikrokontrolérem dojde k vyvolání tohoto přerušení a program se poté již stará jen o čtení A/D hodnoty. Případně až po určitou dobu na základě rozklíčování, o který typ zprávy se jedná, čte hodnotu na A/D převodníku. Ve chvíli příchozího signálu na vnější přerušení se vnější přerušení zakazuje, a proto se opětovně nevyvolá dokud není přenos dokončený. Sinusový signál na kanálu 2 byl značně zkreslený vlivem blízkého používání různých měřících a napájecích přístrojů.

4.3 Měření v bezdrazové EMC komoře

Vzhledem k tomu, že zařízení pracuje na tak nízkém kmitočtu, je velkým problémem elektromagnetické rušení a rozvody elektrického vedení, které se indukují na magnetickou smyčkovou anténu a vytváří tak šum a rušení pro přenos dat. Proto bylo provedeno měření kmitočtového spektra v bezdrazové komoře, aby bylo vidět, jak dobře pracuje generátor sinusového signálu, ale také spektrum přijímaného signálu.

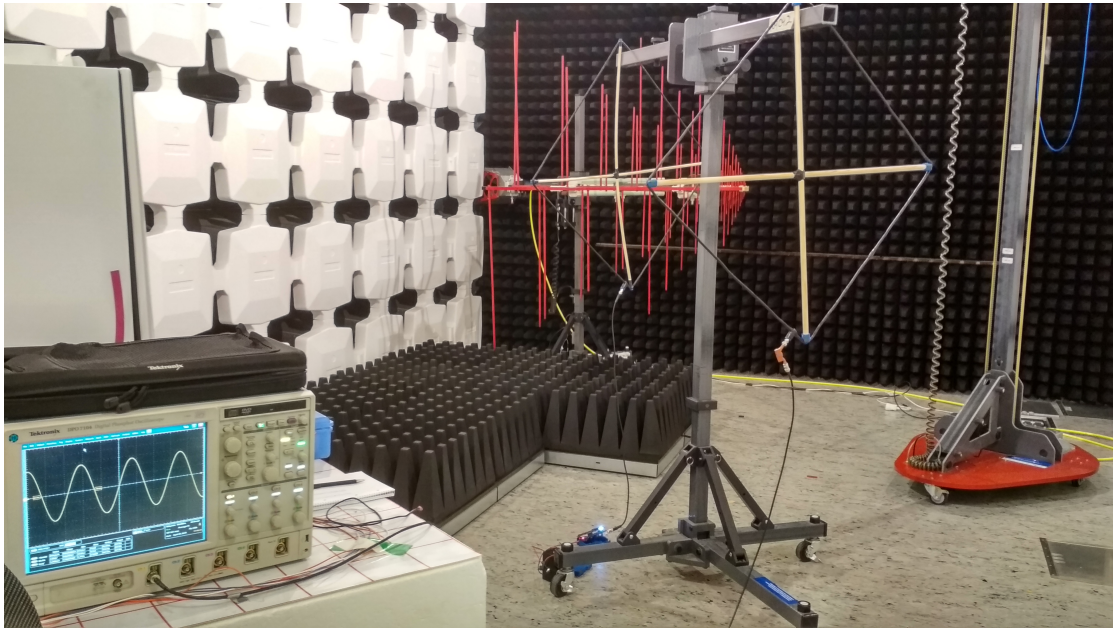
Měřicím přijímacím zařízením byl EMI test receiver ESR7 značky Rohde & Schwarz s připojeným atenuátorem (se zeslabením signálu 20 dB) a měřicí anténou byla použita anténa vyrobená pro bakalářskou práci, která je přizpůsobena měřicímu přístroji. Měřicí přístroj má však vstupní impedanci 50Ω a proto nelze měřit správné hodnoty amplitudy, kvůli rezonančnímu obvodu, který reálně působí jako čistý odpor pouze na rezonanční frekvenci. Pro měření byl požadováným výsledkem pouze jen amplituda signálu na vysílací frekvenci a zobrazení spektra vyzařování sinusového generátoru v zařízení i s dalšími harmonickými frekvencemi. Výsledkem měření je graf zobrazený na obrázku 4.5.



Obr. 4.5: Naměřené kmitočtové pásmo pro nízké frekvence pomocí měřicího přístroje ESR7.

Na frekvenci 1744 Hz byla naměřena amplituda signálu 52,26 dB μ V, reálná hod-

nota tak je $72,26 \text{ dB}\mu\text{V}$, neboť vstupní signál byl naměřen přes atenuátor, který má útlum 20 dB . Hodnota byla naměřena na vzdálenosti $1,2 \text{ metru}$. Reálně však zařízení nepřijímá signál pouze na jedné frekvenci, ale na šířce pásma 300 Hz okolo frekvence 1750 Hz . Součtem všech amplitud by dosaženo výpočtu maximální využitelné amplitudy, kterou zařízení přijímá. Ostatní frekvence jsou tak zatíženy chybou a výpočet vysílaného výkonu by byl náročný, neboť by se musel dopočítat anténní faktor a převodní vztahy pro anténu, tedy přepočet magnetické složky na složku elektrickou. Zapojené pracoviště je na obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Zapojené pracoviště v bezodrazové komoře

Jedna zapojená anténa je připojena přímo k testovanému zařízení, které je uvedeno do stavu vysílání. Druhá anténa je připojena k měřicímu přístroji. Antény jsou zavěšeny na stojanu z dielektrického materiálu, který by nijak neměl ovlivňovat signál. Připojením přijímací antény na EMI test receiver přes atenuátor bylo změřeno spektrum signálů přijaté na zařízení, které je zobrazené na obrázku 4.5.

5 Programové části zařízení

Firmware byl napsán v programovacím jazyce C pomocí prostředí Atmel Studio 7.0. Zdrojový kód zařízení je umístěn v příloze. Napsaný firmware sloužil pouze k ověření základní funkce zařízení a jednoduchého odesílání záchraného signálu.

5.1 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní se skládá z několika víceúrovňových menu, ve kterých se lze pohybovat pomocí kláves ZPĚT a OK. Prvním takovýmto menu je kalibrace antén, druhým odeslání SOS signálu, třetím odeslání předdefinované zprávy, čtvrtým odeslání vlastní zprávy, pátým je testovací menu (ve kterém lze nastavovat a spouštět periférie mikrokontroléru a měnit hlavní nastavení - menu slouží pouze pro testování) a poslední menu je pro samotné nastavení parametrů zařízení.

5.2 Základní nastavení zařízení a kalibrace antén

Základní nastavení zařízení a tedy i první dotaz, na který se zařízení ptá je, zda bude zařízení nastaveno v režimu "Beacon", tedy maják, který se ihned po potvrzení přepne do stavu kalibrace antén a dokud není anténa zkalibrována, tak v určitém časovém rozmezí vysílá a po tomto rozmezí poslouchá, zda v okolí nějaké takové zařízení vysílá. Druhým režimem je "Requestor", tedy žadatel, který má možnost buď zkalibrovat zařízení, k čemuž dojde na základě poslouchání, zda nějaké zařízení vysílá, nebo manuálně nastavit zesílení a vysílat případný SOS signál. Pro zjištění přichozícího signálu jsou přepínány rozsahy přijímacích zesilovačů tak, aby byl zachycen dostatečně silný signál a toto nastavení bylo uloženo. Vzájemná komunikace tak tedy závisí na majáku, který vysílá a podle kterého se zařízení kalibruje. Nazpět po svém úspěšném zkalibrování odesílá kalibrační signál po dobu větší, než je doba vysílání a přijímání majáku. Tato doba by měla být dostatečná pro zkalibrování majáku. Po tomto procesu lze v obou zařízeních pracovat s uživatelským rozhraním a zařízení je zkalibrováno.

5.3 Druhy a odesílání jednotlivých druhů zpráv

Jednotlivé typy zpráv a jejich protokoly jsou popsány v kapitole 2.3. Ověřeny byly z časových důvodů pouze protokoly pro přenos SOS signálu a rychlé předdefinované zprávy. Rychlé předdefinované zprávy jsou uloženy přímo v paměti mikrokontroléru obou zařízení. Každá zpráva je určena svou délkou přijatého signálu a CRC kódem.

Tyto zprávy lze konkrétnímu zákazníkovi nahrát do zařízení. Zařízení pro ověření obsahuje 8 předdefinovaných zpráv.

SOS signál je signál, který s určitou periodou a střídou 50 % oznamuje druhému zařízení, že dochází k nějaké neobvyklé situaci. Pokud zařízení přijme periodu více než 3x, oznámí to uživateli.

Pozdějším modulem mělo být kompletní napsání a odeslání vlastního signálu, které z časových důvodů nebylo dokončeno. Takovýto modul by překládal jednotlivé znaky ve zprávě do protokolu a přenášel pomocí výpočtu CRC kódu a doplněním délky zprávy na druhé zařízení.

Všechny popsané druhy zpráv jsou uvedeny v kapitole 2.3.

6 Reálné testování zařízení

Kromě testování pomocí měřících přístrojů k ověření vlastností analogových a digitálních obvodů bylo provedeno i testování v reálných podmínkách jako test funkce zařízení. Testování proběhlo ve dvou různých místech za různých klimatických podmínek. Třetím testem bylo měření vyzařování v kmitočtovém spektru a to v prostorech akreditované EMC bezodrazové komory.

6.1 Testování v elektromagneticky zarušeném prostředí

První větší testování dosahu signálu těchto zařízení proběhlo přímo v centru Brna na ulici Jaselská. Navádění obsluhy probíhalo pomocí headsetu připojeného k mobilnímu telefonu. To mohl být jeden z hlavních zdrojů rušení, který ovlivňoval zařízení u měření na větších vzdálenostech. Zařízení bylo testováno na téměř všechny jeho rozsahy. K nejhorším výsledkům docházelo při největších zesíleních. Prakticky nebyla kombinace zesílení 1000x a 100x vůbec dosažena, neboť zařízení bylo zarušeno vlivem vnějšího zdroje rušení, kterým mohlo být od rozvodů elektrického vedení, vysílání mobilního telefonu v bezprostřední blízkosti antény až po používání elektrického nářadí v testovaném okolí. U tohoto experimentu došlo k přehodnocení situace ve vstupních zesilovačích a experimentálně byl přidán jeden stupeň zesílení na druhý zesilovací stupeň, který v obvodu určuje zesílení 1000x a u prvního zesilovacího stupně byl přidán zesilovací stupeň, který bude signál pouze přenášet, tedy zesílení 1x. Tento krok slouží k zajištění větší stability a ke snížení rizika zarušení zařízení. Reálná vzdálenost, která byla bez problémů otestována byla okolo 25 metrů. Zařízení bylo nastaveno na zesílení prvního zesilovacího stupně 100x a druhého zesilovacího stupně 10x. Testování bylo zachyceno na obrázku 6.1 a popsáno včetně nastavení zesílení v tabulce 6.1.

Tab. 6.1: Provedený test na různé vzdálenosti při různém zesílení zařízení

Vzdálenost	Komunikace	Zesílení prvního stupně	Zesílení druhého stupně
5 m	Komunikace úspěšná	10x	10x
10 m	Komunikace úspěšná	100x	10x
15 m	Komunikace úspěšná	100x	10x
20 m	Komunikace úspěšná	100x	10x
25 m	Komunikace úspěšná	100x	10x
30 m	Komunikace neúspěšná	100x	10x
30 m	Komunikace neúspěšná	1000x	10x
30 m	Komunikace neúspěšná	100x	100x

Při testování komunikace obou zařízení na maximální zesílení prvního stupně,



Obr. 6.1: Testování zařízení v elektromagneticky zarušeném prostředí

tedy 1000x došlo k úplnému zarušení zařízení, které posléze přestalo správně pracovat a bylo nutné provést reset mikrokontroléru. Problémem bylo s největší pravděpodobností elektromagnetické pole vytvářené mobilním telefonem v těsné blízkosti antény a dalšími okolními rušivými vlivy.

6.2 Testování v podzemním krytu 10-Z

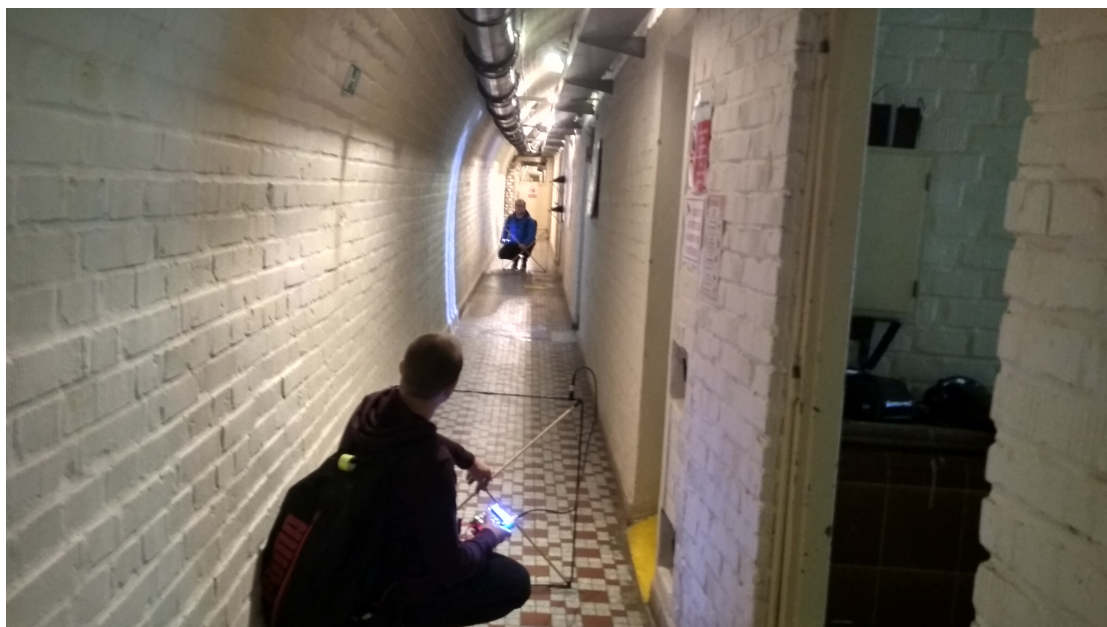
Dalším pokusem o navázání spojení bylo otestování v podzemním protiatomovém krytu 10-Z, který se nachází na ulici Husova v centru města Brna. Zde byl po domluvě umožněn vstup do prostor bunkru a to i do některých normálně nepřístupných částí. Testováno bylo především navázání spojení na určitou vzdálenost a přenos předdefinovaných zpráv po procesu kalibrace antén. I přesto, že se kryt nachází v podzemí, bylo zde značné elektromagnetické rušení, neboť každou chodbou vedly v nosičích velké svazky vodičů a v budově se nacházel velký generátor, který po určitém čase startoval a jeho vlivem se zařízení úplně zarušilo. I přes nepříznivé vlivy při měření se podařilo zkalibrovat anténu na vzdálenost okolo 35 metrů. Před testováním byly doplněny další rozsahy prvního a druhého zesilovacího stupně v přijímací části, díky kterým se zařízení dokázalo lépe zkalibrovat a nezarušilo se na kratší vzdálenosti. Naměřené vzdálenosti a nastavení jednotlivých zesílení jsou uvedeny v tabulce 6.2. Testování je také zachyceno na obrázku 6.2. Vzhledem k velkému zesílení vstupních stupňů při největší měřené vzdálenosti mezi anténami bylo vysílání opět neúspěšné. Opět došlo k velkému zarušení vnějšími vlivy, a to ať už vedením vysokonapěťových vodičů nad zónou testování, spouštěním generátoru napětí po určitých intervalech, nebo spuštěná zařízení uvnitř krytu. Předpokladem však je, že u jeskyní se takové

rušení neobjeví, a proto by mohl být dosah i nejcitlivější zesílení vstupní části bez-problémový.

Tab. 6.2: Provedený test na různé vzdálenosti při různém zesílení zařízení

Vzdálenost	Komunikace	Zesílení prvního stupně	Zesílení druhého stupně
5 m	Komunikace úspěšná	1x	1x
10 m	Komunikace úspěšná	1x	10x
15 m	Komunikace úspěšná	10x	10x
20 m	Komunikace úspěšná	10x	100x
25 m	Komunikace úspěšná	100x	10x
30 m	Komunikace úspěšná	100x	100x
35 m	Komunikace úspěšná	100x	1000x
40 m	Komunikace neúspěšná	100x	100x
40 m	Komunikace neúspěšná	1000x	100x

Jak lze vidět v tabulce 6.2, tak zařízení pracovalo se všemi možnými rozsahy vstupních zesílení. Při nastavení zesílení prvního stupně na 100x a druhého stupně zesílení na 100x na vzdálenost 40 metrů nebyla zařízení schopna detekovat kalibrační signál a při nejvyšším zesílení prvního stupně došlo ke kompletnímu zarušení zařízení, které pro další testy muselo být resetováno. Proto největší vzdálenost byla naměřena a ověřena na 35 metrech.



Obr. 6.2: Testování zařízení v elektromagneticky zarušeném prostředí podzemního krytu 10-Z

7 Závěr

Výstupem práce je kompletní zařízení, které je společně s firmwarem připraveno na vysílání signálu na nízkých frekvencích pro přenos SOS signálu a zpráv z nepřístupných prostor. K efektivnějšímu vysílání by však zařízení muselo být dostatečně upraveno a touto prací byl koncept pouze ověřen.

Práce se zabývá návrhem prototypu zařízení, které by mělo dokázat vysílat signál i z nepřístupných prostor. Úvodní teoretický rozbor přibližuje problematiku přenosu dat a volby protokolu pro takový přenos. Zařízení je navrženo tak, aby přenášená data byla digitálně modulována na analogový signál. Toho je dosaženo pomocí amplitudového klíčování, tedy amplitudovou modulací v digitální podobě. Výstupním signálem pro přenosy logické úrovně HIGH je sinusová vlna o frekvenci 1750 Hz. Zabezpečení přenosu je kromě CRC kódu zajištěno pomocí samoopravné struktury protokolu, tedy při přijímání signálu je vstupní signál plynule kontrolován a výsledný převedený signál díky tomu zabezpečen. Navrhovaná zařízení spolu komunikují pomocí magnetických smyčkových antén na dané frekvenci.

Druhá kapitola se zabývá popisem konceptu zařízení, jehož hlavní řídicí část je mikrokontrolér AT90CAN32 a k němu připojené periférie, jako klávesnice, LCD displej, vysílací a přijímací obvody. Celé blokové schéma zapojení je na obrázku 2.1. Dále jsou v této kapitole popsány všechny protokoly navržené pro přenos předdefinovaných zpráv, vlastních zpráv, SOS signálu a zpětnovazební zprávy.

Prvním krokem konstrukce byla experimentální anténa, která byla později využita pro reálné ověření konceptu. Anténa byla vyrobena z lakovaného měděného vodiče, ve stylu magnetické smyčkové antény. Vlastní indukčnost antény a její rozměry jsou limitující parametry, které pro daný koncept stěžují funkčnost. Impedance této antény uvedené do rezonance omezuje ve velké míře vyzářený výkon. Nosná frekvence komunikačního zařízení je 1750 Hz, což zavádí velké obtíže nejen s návrhem vstupního filtru, ale i se zesilovači signálu. Další postup práce se zabývá návrhem výkonového zesilovače, generátoru sinusového signálu (oscilátoru), vstupního filtru, vstupních zesilovacích obvodů a otestování metody pro bezdrátový přenos informací.

Navrhované zařízení bylo zrealizováno na navržené desky plošných spojů a reálně otestováno s popisem v kapitole 3. Tato kapitola obsahuje detailní popis všech důležitých částí zapojení i s teoretickými předpoklady signálů a jejich reálnými naměřenými průběhy. Všechny části zařízení byly proměřeny za stejných podmínek pomocí generátoru sinusového průběhu o dané frekvenci. Proměřením všech částí zapojení bylo ověřeno, že funkce zařízení je s velmi malými odchylkami stejná, jako teoretické předpoklady, a tudíž i plní svoji funkci v obvodu. Přijatý analogový signál je tak správně upraven pro přijetí zprávy mikrokontrolérem. Oscilátor na frekvenci 1750 Hz zajišťuje signální generátor ICL8038, který s vnitřním napětově řízeným

oscilátorem vytváří sinusový signál s nastavitelnou frekvencí, střídou a zkreslením. Výstupní zesilovač je vytvořený pomocí výkonového operačního zesilovače OPA547F, který dokáže pracovat s poměrně vysokým nesymetrickým napájecím napětím a zesílit tak vysílaný signál přímo na anténu. Pro takový zesilovač byl navržen měnič zvyšující napětí, aby operační zesilovač pracoval v celé své pracovní oblasti. Aktivní vstupní filtr pak spolu se zesilovači vstupního signálu přenáší a zesilují signál, který je dále analogově zpracováván a převáděn na signál digitální jako příznak zachyceného signálu.

Velkou výhodou a zároveň nevýhodou zařízení je frekvence zařízení, která je velmi nízká. Zařízení může vysílat i většími výkony, neboť se nenachází ve spektru signálu spravovanými ČTÚ, ale zároveň je problematické dosáhnout velké vzdálenosti vysílání vzhledem k účinnosti antény a vlnové délce. Zařízení je však technologicky připraveno a předimenzováno na větší vysílací výkon a také je zároveň dostatečně citlivé na vstupní signál. Velkým problémem se jeví navržený filtr, který kvůli parazitním kapacitám a nízkému řádu pro vyfiltrování signálu netlumí dostatečně nežádoucí frekvence. Strmost takového filtru by však šla pomocí lepšího návrhu na plošném spoji a vyššího řádu filtru zlepšit. Vstupní stupeň je dostatečně citlivý díky použitým operačním zesilovačům typu JFET.

Bylo provedeno i reálné ověření všech částí zařízení při vysílání pomocí reálné antény. Ověření dopadlo podle předpokladů a signál byl úspěšně vyslán i přijat na druhém zařízení. Nejprve bylo testování provedeno na vzdálenosti 5 metrů přes místnost, které dopadlo dobře podle očekávání a to s minimálním zesílením vstupního signálu. Signál byl přijat se stejnou amplitudou přes prázdný prostor, stejně jako přes metr širokou zeď. Poté byly provedeny dvě testování v různém prostředí, první bylo na elektromagneticky zarušené ulici, kde zařízení dokázalo zachytit signál a navázat komunikaci na vzdálenost 25 metrů. Vzhledem k rušivým složkám, které se v prostředí nacházely a vzhledem k nízkému útlumu filtru na frekvencích nespádajících do šířky pásma bylo zařízení kompletně zarušeno. Druhé testování proběhlo v reálnějším prostředí pro vyvíjený produkt, avšak i v podzemních prostorách krytu 10-Z bylo velké elektromagnetické rušení a zařízení dokázaly mezi sebou komunikovat na největší vzdálenost 35 metrů. Samozřejmostí bylo i ověření přijatého signálu přes překážku, kterou tvořila metr široká zeď. Měřením se potvrdilo, že překážka má na vlnu takto nízké frekvence minimální vliv a nedochází tak k útlumu. I přesto, že jsou vzdálenosti 25 a 35 metrů malé je nutno si uvědomit, že nemagnetické překážky mají minimální vliv na procházející signál, a proto lze signál přenášet i přes nepřístupné prostory.

Využitím lepšího filtru typu pásmová propust a použitím efektivnější antény by bylo dosaženo mnohem lepších výsledků. Zároveň by krokem k větší efektivitě bylo zvýšení frekvence a tím přepracování celého konceptu, nebo minimálně generátoru

sinusového signálu, výstupního zesilovače a antény, které nejsou přizpůsobeny vyšším frekvencím. Signál průchozí nemagnetizujícím materiálem by tak neměl ztratit energii, avšak signál by byl vysílán s větším výkonem a díky efektivnější anténě efektivněji přijímán. Vstupní zesilovače by mohly být řízeny automaticky pomocí AVC, tedy automatického vyrovnávání citlivosti, které je v projektu řešeno pomocí přepínání rozsahů citlivosti mikrokontrolérem. Dalším zlepšujícím krokem by mohlo být i použití dvou rozdílných antén pro vysílání a pro přijímání. Přijímací anténa pro svou citlivost by mohla být tvořena feritovým jádrem a teoreticky by mohla být i rozměrově menší.

Pro zařízení byl v programovacím jazyce C v prostředí Atmel Studio 7.0 napsán firmware pro řízení vysílání signálu pomocí uživatelského rozhraní. Pomocí rozhraní lze nastavovat nejen parametry nastavení pro vysílání a přijímání, ale i pomocí testovacího menu ovládat jednotlivé periférie.

Literatura

- [1] Caving Technology. *Alberta Speleological Society* [online]. 2005 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2Bxy0xX>
- [2] SVOBODA, Jaroslav. *Telekomunikační technika: průřezová učebnice pro odborná učiliště a střední školy. 2. vyd.* Praha: Sdělovací technika, 2000. Telekomunikace (Sdělovací technika). ISBN 80-901-9363-3.
- [3] MONÍK, Jakub. *Bezdrátová komunikace v infrastruktuře internetových sítí.* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://bit.ly/2Jgu1L1>
- [4] Přenos dat. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 20. 10. 2017 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2SbgdSi>
- [5] STRNAD, Tomáš. ČVUT Praha. *Režimy provozu - simplex, half-duplex, duplex* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2r1IxLy>
- [6] VLČEK, Jiří. *Přenos dat* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2FHHrPr>
- [7] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody.* Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 8001027317.
- [8] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku.* 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2007. ISBN 978-80-7232-324-1.
- [9] ŠEBESTA, V., SMÉKAL, Z. VUT BRNO, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. *Signály a soustavy.* Skriptum. Brno, 2004.
- [10] R. W. Hamming, Error detecting and error correcting codes. *The Bell System Technical Journal* 26,2 (1950), 147-160. [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2QoD3cg>
- [11] KAISER, Tomáš. ZČU Plzeň, Katedra matematiky. *Samoopravné kódy* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2S6XTtM>
- [12] DVORSKÝ, Marek. Vysoká škola báňská technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. *Laděná magnetická anténa.* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2DJh2xR>
- [13] KAPLAN, Jiří. Rámové antény. *OK1MES* [online]. 2003 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2FD4RFv>

- [14] BURDA, Miroslav *Elektronicky laděná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. 53 s. Vedoucí práce byl Ing. Tomáš Urbanec, Ph.d.
- [15] KALMEIJER, Rob. Small, high-efficiency loop antennas. *Rob's web* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2BuYcZU>
- [16] LOUDEL, L. Magnetic Loop Antenna Theory. *Sudden Ionospheric Disturbances Monitoring Station* [online]. 2013 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2DZeBIk>
- [17] OK1IKE. Jednoduchá magnetická rámová anténa. *WEB ZAČÍNÁJÍCÍCH RADIOAMATÉRŮ* [online]. 2017 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2zp9cqk>
- [18] Rezonanční obvod. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné také z: <https://bit.ly/20zAYa4>
- [19] Intersil Corporation. *ICL8038* [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2TDp06d>
- [20] Texas Instruments Incorporated. WEBENCH[®] Design Report. *Design: 14 LM5022MM/NOPB* [online]. 2019 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://bit.ly/2V7zrcF>
- [21] Texas Instruments Inc [on-line]. Datasheet OPA547F. *OPA547F High-Voltage, High-Current OPERATIONAL AMPLIFIER* [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2Savyms>
- [22] ŠÍDLO, Miroslav. Magnetic Loop Antenna pro pásmo 40 metrů. *OK1UFC* [online]. 2015 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://bit.ly/2FSltcD>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

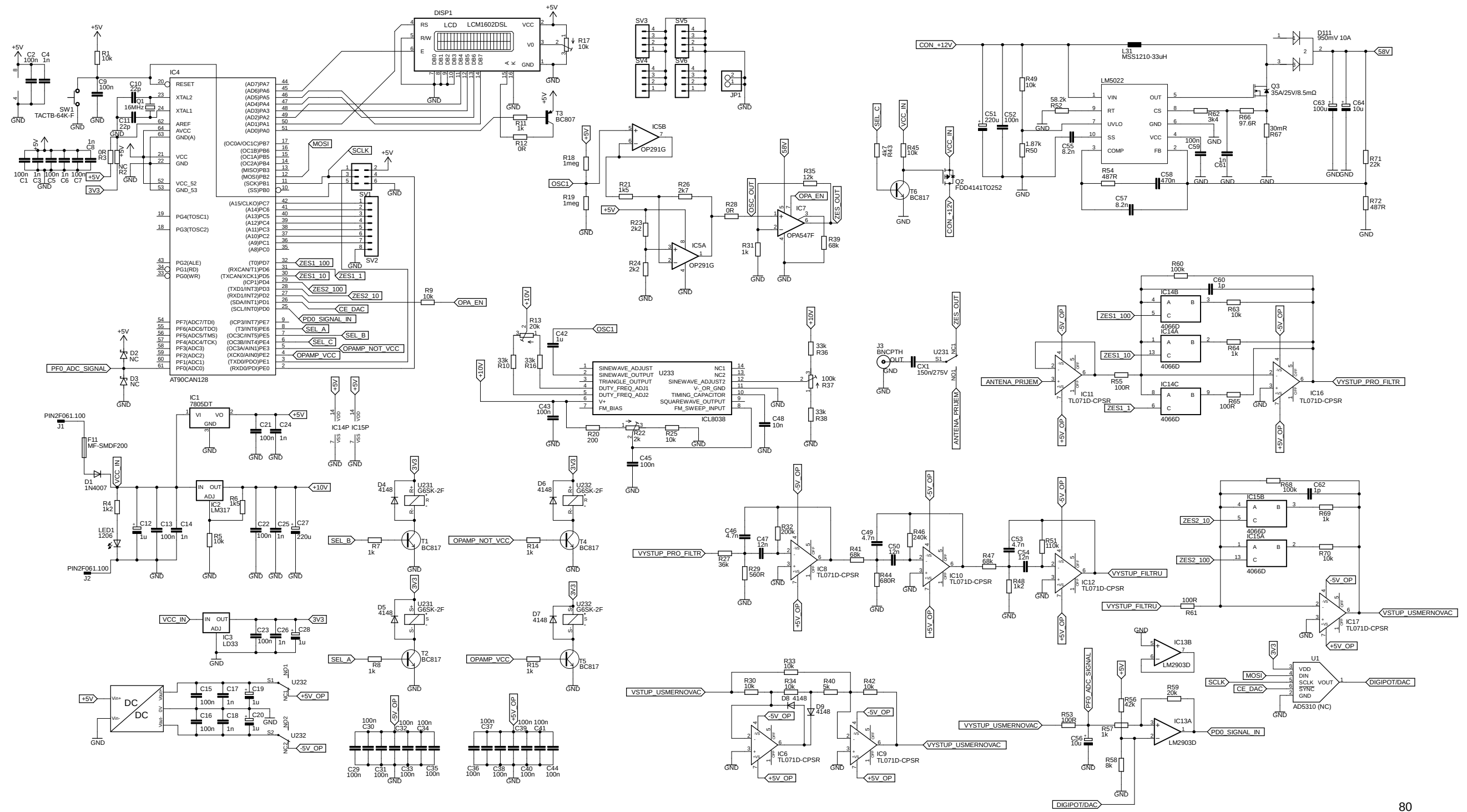
GSM	Nejrozšířenější standard pro mobilní telefony na světě - Global System for Mobile Communications
DSB	Amplitudová modulace obsahující obě postranní pásma i nosnou - Dual Side Band
SSB	Amplitudová modulace obsahující jedno postranní pásmo - Single Side Band
ASK	Klíčování amplitudovým posunem - Amplitude Shift Keying
ČTÚ	Český Telekomunikační Úřad
ULF	Extrémně dlouhé vlny - Ultra Low Frequency
LF	Dlouhé vlny - Low Frequency
MLA	Magnetická smyčková anténa - Magnetic Loop Antenna
PSV	Poměr stojatých vln
AVC	Automatické vyrovnávání citlivosti
CRC	Cyklický redundantní součet - Cyclic redundancy check
ASCII	Americký standardní kód pro výměnu informací - American Standard Code for Information Interchange
ACK	Řídící znaky procesu, že zpráva došla v pořádku - Acknowledgement code
USART	Univerzální synchronní/asynchronní vysílání a příjem - Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter

Seznam příloh

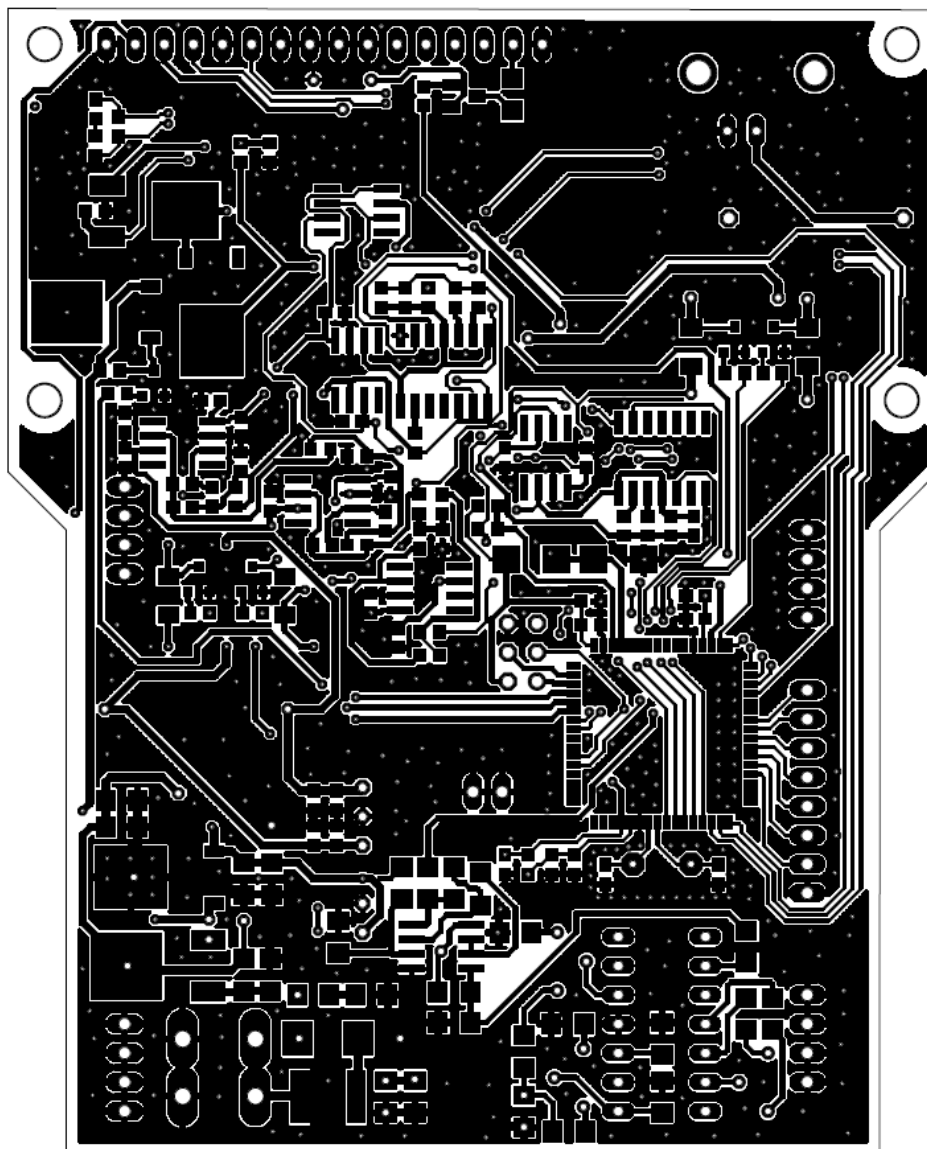
A	Prototyp zařízení	80
A.1	Schéma zapojení	80
A.2	Top layer - Vrstva součástek	81
A.3	Bottom layer - Vrstva spojů	82
A.4	Osazovací plán - Strana součástek	83
A.5	Osazovací plán - Strana spojů	84
B	Maticová klávesnice	85
B.1	Schéma zapojení	85
B.2	Top layer - Vrstva součástek	86
B.3	Bottom layer - Vrstva spojů	87
B.4	Osazovací plán - Strana součástek	88

A Prototyp zařízení

A.1 Schéma zapojení

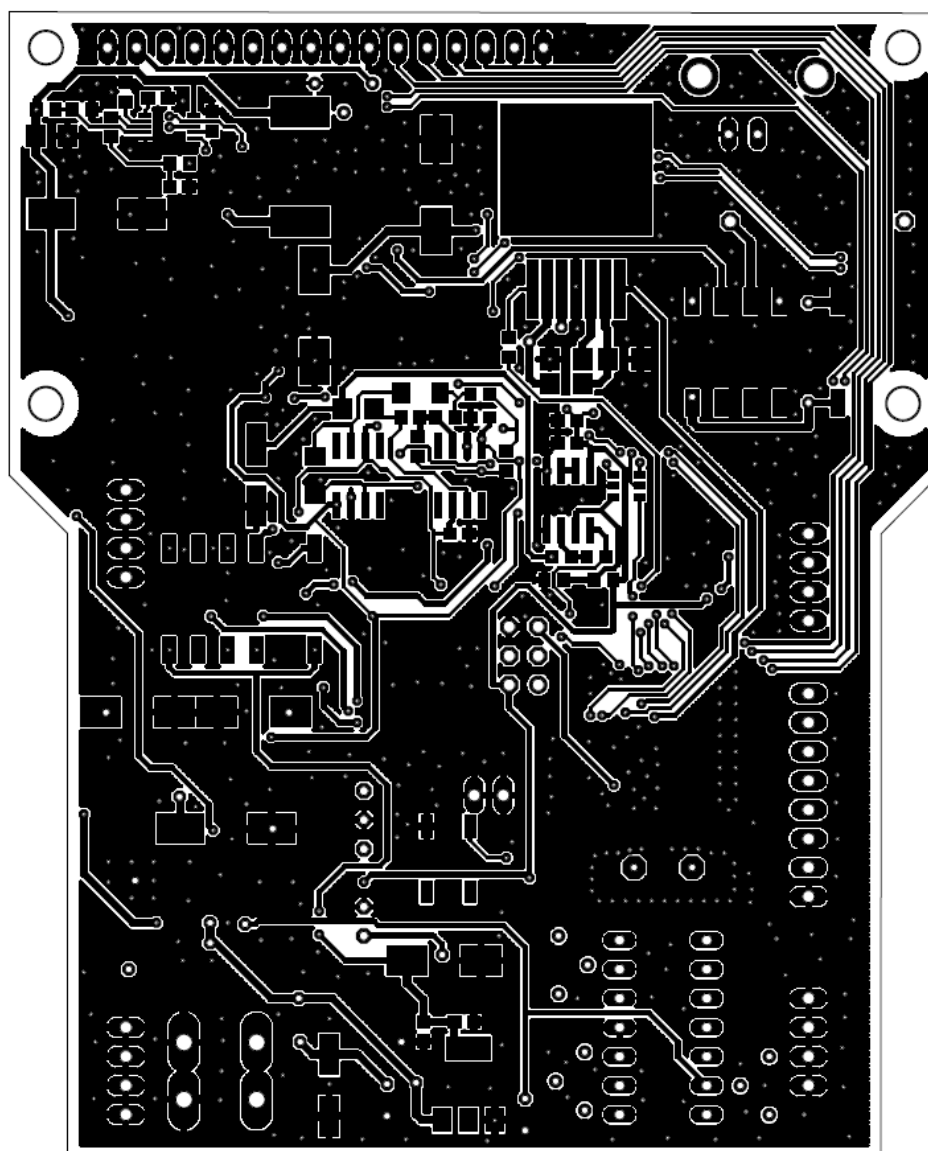


A.2 Top layer - Vrstva součástek



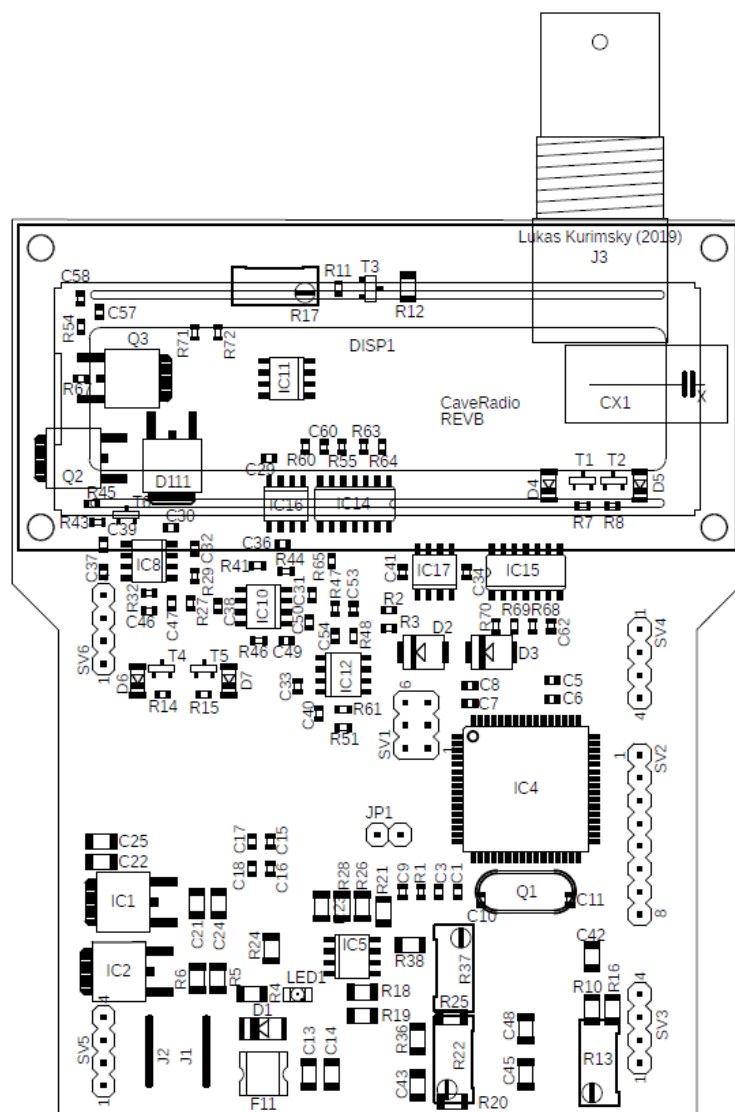
Obr. A.1: Vygenerovaná strana spojů součástek plošného spoje, zvětšení 1.65x

A.3 Bottom layer - Vrstva spojů



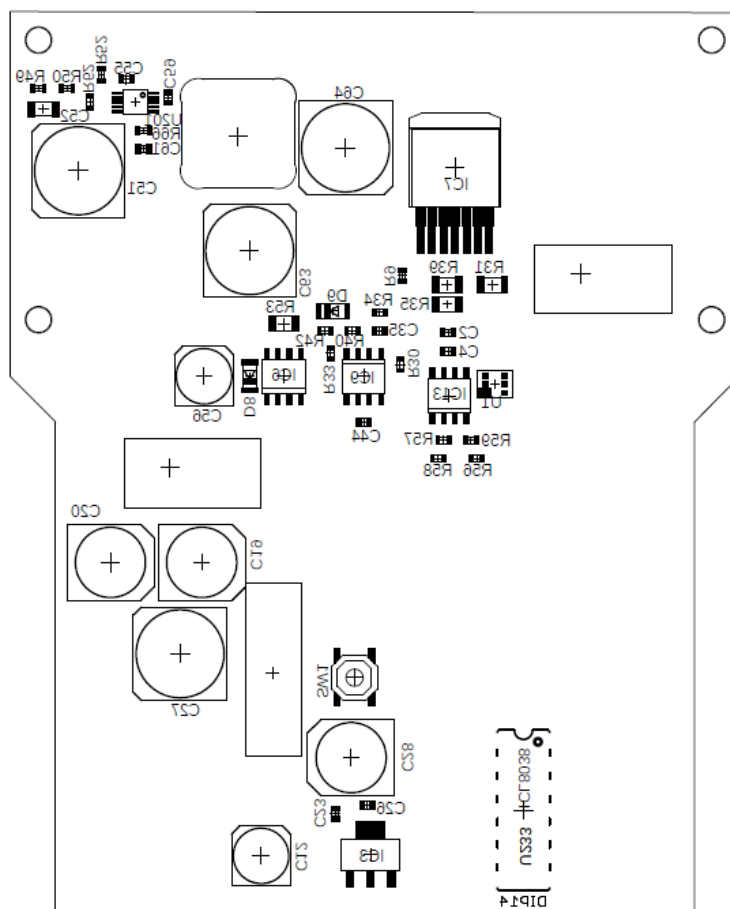
Obr. A.2: Vygenerovaná strana spojů plošného spoje, zvětšení 1.65x

A.4 Osazovací plán - Strana součástek



Obr. A.3: Osazovací plán strany součástek plošného spoje, zvětšení 1.5x

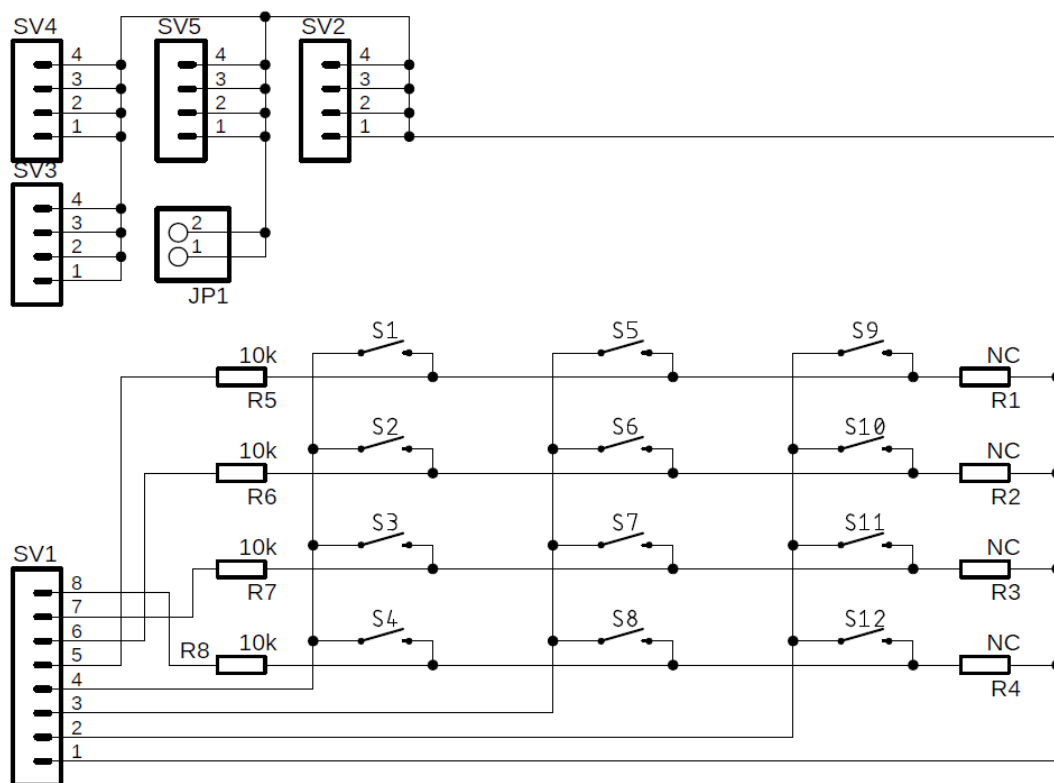
A.5 Osazovací plán - Strana spojů



Obr. A.4: Osazovací plán strany spojů plošného spoje pro schéma, zvětšení 1.5x

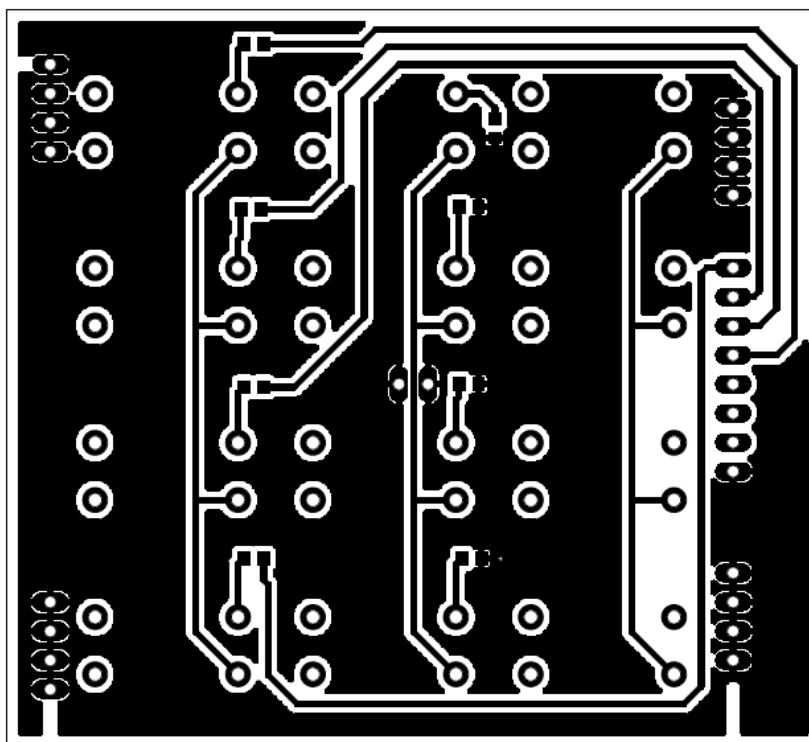
B Maticová klávesnice

B.1 Schéma zapojení



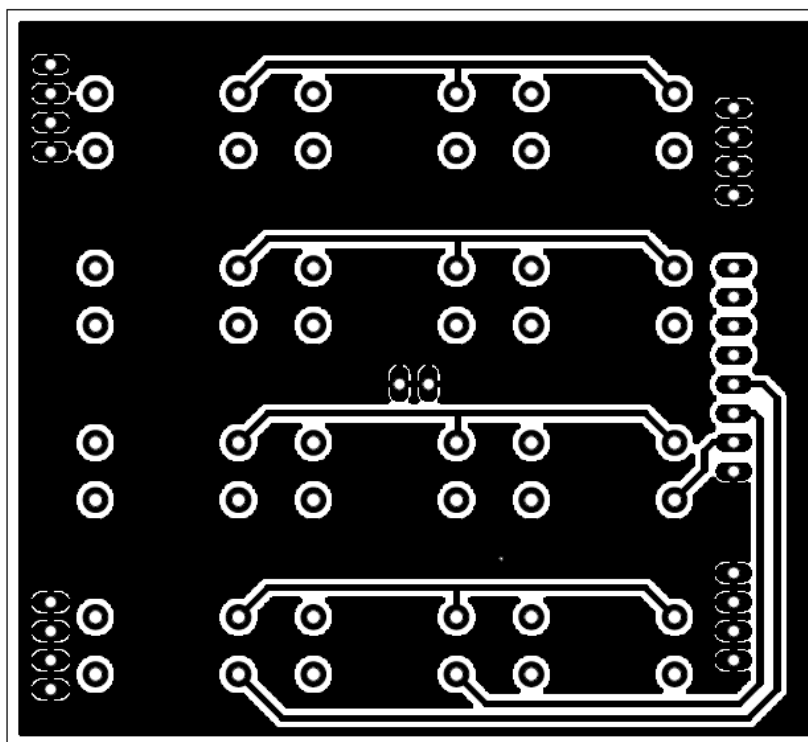
Obr. B.1: Schéma zapojení maticové klávesnice, zvětšení 1.65x

B.2 Top layer - Vrstva součástek



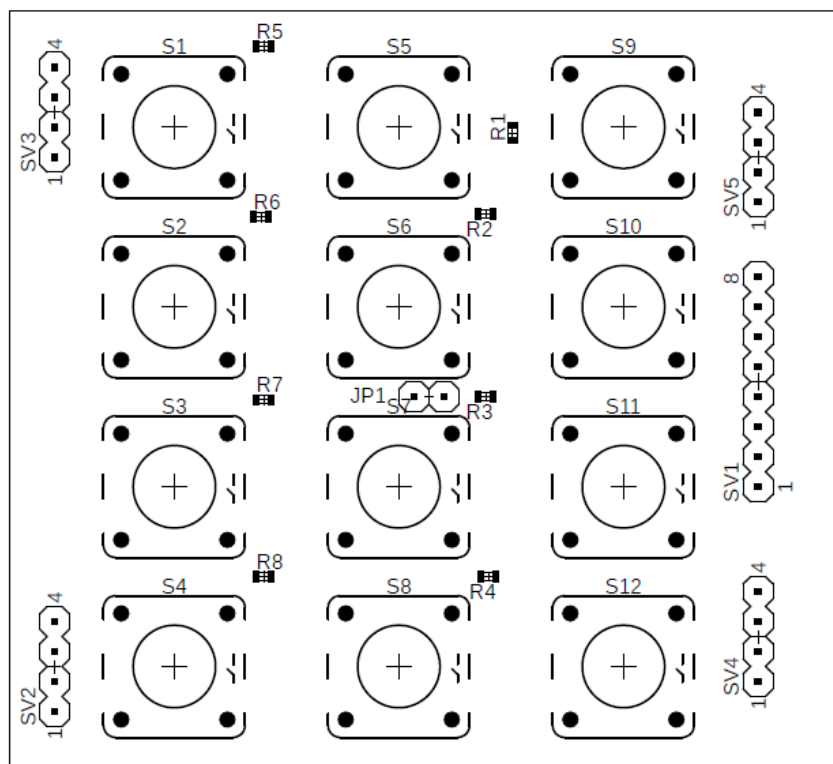
Obr. B.2: Vygenerovaná strana spojů součástek plošného spoje, zvětšení 1.65x

B.3 Bottom layer - Vrstva spojů



Obr. B.3: Vygenerovaná strana spojů plošného spoje, zvětšení 1.65x

B.4 Osazovací plán - Strana součástek



Obr. B.4: Osazovací plán strany součástek plošného spoje, zvětšení 1.5x