



Středoškolská technika 2023

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

VYSÍLAČ AM PRO STŘEDNÍ VLNY

Lukáš Rajmont

SPŠE V Úžlabině
V Úžlabině 320, Praha 10

Čestné prohlášení

Odevzdáním této maturitní práce na téma **Vysílač AM pro střední vlny** potvrzuji, že jsem ji vypracoval/a pod vedením vedoucího samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Dále potvrzuji, že odevzdaná vytištěná verze písemné zprávy (protokolu) a plakátu se plně shoduje s odevzdanou elektronickou verzí.

V Praze dne.....

.....
Podpis autora/autorky práce

Anotace

Maturitní práce se zaměřila na vývoj a výrobu středovlnného rozhlasového vysílače ve třídě D. V práci je popsán postup návrhu jednotlivých bloků až po jejich sestavení do funkčního celku. Byl kladen důraz na použití moderních polovodičových součástek. Výsledný produkt byl testován na umělé anténě, která je také součástí projektu.

Klíčová slova

AM vysílač, rozhlasové vysílání, střední vlny, třída D, umělá anténa

Annotation

Practical thesis focuses on development and construction of middle wave radio transmitter in class D. In this thesis is described the process of designing individual blocks till the assembly of fully working unit. Emphasis was placed on the use of modern semiconductor components. The resulting product was tested on a dummy load, which is also part of the project.

Keywords

AM transmitter, class D, dummy load, middle waves, radio transmitter

Obsah

1	ÚVOD A CÍL PRÁCE	5
2	AM VYSÍLÁNÍ	6
2.1	STRUČNÁ HISTORIE POČÁTKŮ ROZHLASOVÉHO VYSÍLÁNÍ	6
2.2	ZÁKLADNÍ POJMY A PRINCIPY.....	6
2.2.1	<i>Elektromagnetické vlnění</i>	6
2.2.2	<i>Rozhlasové vysílání</i>	6
2.2.3	<i>Vysílač</i>	7
2.2.4	<i>Modulace v rozhlasovém vysílání</i>	7
3	KONCEPCE AM VYSÍLAČE.....	9
3.1	PULZNĚ ŠÍŘKOVÁ MODULACE PWM.....	9
3.2	NUMERICKY ŘÍZENÝ OSCILÁTOR	9
3.3	H MŮSTEK.....	9
3.4	SPÍNANÝ ZDROJ.....	10
4	KONSTRUKCE AM VYSÍLAČE.....	11
4.1	VOLBA SOUČÁSTEK.....	11
4.2	NÁVRH ANALOGOVÉ ČÁSTI	11
4.3	NÁVRH ŘÍZENÍ	11
4.4	NÁVRH VÝKONOVÉHO MODULU - POWER MODULE	12
4.5	VÝROBA, OSAZENÍ A LADĚNÍ PLOŠNÝCH SPOJŮ	14
4.6	OŽIVENÍ A MĚŘENÍ PARAMETRŮ	15
4.7	ZKOUŠKA V PROVOZNÍM PROSTŘEDÍ.....	17
5	ZÁVĚR	18
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	20

1 Úvod a cíl práce

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit AM vysílač pro střední vlny řízený mikroprocesorem. Celosvětově jsme svědky oživení rozhlasového vysílání v pásmu AM, tedy na středních vlnách. Často jsou však v této oblasti stále užívány technologické prostředky, vysílače, které jsou zastaralé, a z pohledu dnešní doby jejich provoz není efektivní. V Evropě v současné době existuje jeden výrobce těchto zařízení, ve světě pak lze nalézt další dva. Pro všechny momentálně komerčně dostupné přístroje AM vysílače ale platí, že pořizovací náklady jsou vysoké, zařízení jsou objemná s vysokou hmotností a uživatelky nepřívětivé. Mým cílem bylo navrhnout konkurenční řešení, optimalizovat zástavbové rozměry a hmotnost vysílače tak, aby vznikl kompaktní přenosný přístroj s komfortním ovládním při zachování parametrů nutných pro profesionální použití a dlouhodobý nepřetržitý a spolehlivý provoz v běžných podmínkách rozhlasových vysílacích středisek.

2 AM vysílání

V této kapitole se nejprve budu stručně věnovat historii a problematice rozhlasového vysílání a objasnění a vymezení základních pojmů a principů uplatnění při plnění cíle této práce.

2.1 Stručná historie počátků rozhlasového vysílání

Na konci 19. a v prvních letech 20. století bylo využíváno bezdrátového přenosu elektromagnetického vlnění nejprve v podobě telegrafních signálů obvykle jiskrovým generátorem na úrovni tzv. telegrafie. Zhruba od roku 1903 s vynálezem elektronky se vývoj obrátil k přenosu hlasu a hudby pomocí bezdrátového přenosu a samotné rozhlasové vysílání na středních vlnách se datuje přibližně do dvacátých let 20. století. Letos oslavujeme sté výročí pravidelného rozhlasového vysílání v kontinentální Evropě. Toto vysílání bylo z Československa dne 18. 5. 1923 z vysílače Kbely. [3.] Podrobnější stručný přehled počátků vysílání AM lze nalézt v Příloze č. 2.1.1 - Stručný přehled historie AM vysílání. [1.] [2.]

2.2 Základní pojmy a principy

V této kapitole stručně objasním některé vybrané pojmy a principy nutné pro pochopení problematiky rozhlasového vysílání a konstrukci vysílače

2.2.1 Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění je šíření elektromagnetické vlny prostředím. Pojem elektromagnetické vlnění používáme všude tam, kde se velikost elektrické i magnetické složky vlnění pravidelně mění v čase a průběh této změny je sinusový. Vlnění je charakterizováno jednak velikostí elektrické složky vyjádřené vektorem intenzity elektrického pole E a dále vektorem intenzity magnetického pole H . Tyto vektory jsou vzájemně kolmé. Rychlost šíření elektromagnetické vlny v prostředí pak závisí zejména na permitivitě a permeabilitě prostředí. Délka vlny je přímo úměrná době periody vlnění T , tedy nepřímo úměrná frekvenci. Podrobněji jsou základní vlastnosti elektromagnetického záření popsány a znázorněny v Příloze č. 2.2.1.1 - Elektromagnetická vlna. [4].

2.2.2 Rozhlasové vysílání

Rozhlasové vysílání není jiného než šíření elektromagnetického vlnění specifických vlastností. Za radiové vlny je považováno elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami od 1 mm až po tisíce kilometrů. Podle frekvence pak rozlišujeme jednotlivá vlnová pásma (Příloha č. 2.2.2.1 - Vlnová pásma). Pro klasické komerční rozhlasové vysílání jsou pak

využívána pásma dlouhých (LF / DV), středních (MF/ SV), krátkých (HF / KV) a velmi krátkých vln (VHF /VKV). Cílem rozhlasového vysílání je bezdrátové šíření zvukového signálu od vysílače k velkému množství přijímačů – k posluchačům.

2.2.3 Vysílač

Vysílač je specializované technické zařízení, které vysílá signál určený k přenosu informace, v případě rozhlasového vysílání jde o zvuk. Vysílače se rozlišují zejména podle typu modulace (viz. následující kapitola) nebo podle tříd. Třídy vysílačů jsou označovány A, B, C, D, E a to podle polohy klidového pracovního bodu v převodní charakteristice zesilovače. Ve spojitém (analogovém) režimu jsou obvyklé třídy A až C, u spínaných výkonových zesilovačů se setkáme s třídou D nebo E.

2.2.4 Modulace v rozhlasovém vysílání

V rozhlasovém vysílání jsou přenášeny kmitočty z oblasti přibližně 20 Hz -20 kHz, což je slyšitelné spektrum vnímané člověkem. Viz také Příloha č. 2.2.4.1 - AM a FM modulace. Takto dlouhé vlny by bylo velmi obtížné vysílat i přijímat. Proto se zvukový signál moduluje na podstatně vyšší kmitočty. Tyto nosné vlny se pak již poměrně snadno vyzáří do prostoru vysílací anténou.

Rozlišujeme dva základní typy modulace.

Amplitudová modulace AM

Nejstarším užívaným typem je amplitudová modulace. Pro vysílání musí být nejprve vybrán vhodný nosný kmitočet. Modulací pak měníme charakter nosného signálu pomocí modulujícího signálu a to tak, že tento modulační signál ovlivňuje amplitudu nosné vlny. Spektrum modulačního signálu se pak přesune do pásma po stranách nosné vlny. Obě (dolní i horní) postranní pásma jsou pak zrcadlově převrácené. V praxi se však používají i modifikace, kdy je potlačena nosná vlna, nebo je potlačeno jedno z postranních pásem. Šířka přenášeného pásma je u AM modulace s oběma postranními pásmy dvojnásobně velká než maximální frekvence. Nosná vlna nenesu u AM žádnou informaci, všechny informace jsou tedy obsaženy v postranních pásmech. Aby se sousední rozhlasové stanice nerušily, musejí být nosné vlny od sebe dostatečně vzdáleny – u AM 10 kHz.

AM modulace se užívá pro oblast středovlnného vysílání, kdy je frekvence v rozsahu 300-3000 kHz (s odpovídající vlnovou délkou 1 km -100 m). To vyžaduje na straně vysílače

poměrně mohutné antény, nicméně dosah takového vysílání je v závislosti na výkonu řádově stovky km. Pokrytí sítí vysílačů je poměrně řídké. Nevýhodou šíření středních vln je, že jedná o vlny přízemní, u nichž kvalita šíření závisí na kvalitě prostředí, meteorologických podmínkách a i na stavu ionosféry. Obecně je kvalita přijímaného signálu horší, než u frekvenční modulace.

Frekvenční modulace FM

U frekvenční modulace je modulována přímo nosná vlna, kdy se mění okamžitá frekvence vlny. Šířka přenášeného pásma u FM je závislá na modulačním indexu a je vždy větší než dvojnásobek maximální frekvence. Vzdálenost nejbližších nosných je u FM 200 kHz. FM modulace je užívána zejména v oblasti vysílání na velmi krátkých vlnách frekvence 30-300 MHz (vlnová délka 10-1 m). Vysílání s těmito vlnovými délkami neklade nijak vysoké nároky na konstrukci vysílacích antén, nicméně dosah vysílání je v závislosti na výkonu vysílače jen v desítkách km. Je tedy zapotřebí hustá síť vysílačů.

Názorná ukázka AM a FM modulace je zobrazena v Příloze č. 2.2.4.1 - AM a FM modulace

3 Koncepce AM vysílače

Vysílač je typicky sestaven z několika základních modulů. Názorně to zobrazuje blokové schéma v Příloze č. 3.0 - Blokové schéma vysílače. Audiosignál vstupuje do předzesilovače a dále do modulátoru. V koncovém stupni dojde k amplitudové modulaci nosné vlny. Takto modulovaná nosná vlna vstupuje do dalších možných výstupních zesilovačů a následně do antény, odkud je elektromagnetická vlna vyzářena do okolí.

3.1 Pulzně šířková modulace PWM

Pulse Width Modulation (PWM) je technika pro generování analogových signálů prostřednictvím změny šířky pulzů. Napětí vzniklé rychlým přepínáním mezi napájecím a nulovým napětím zdroje je totiž aritmetickým průměrem napětí zdroje za dobu zapnutí a vypnutí.

Princip PWM a více o ní je v příloze - Příloha č. 3.1.1 - Pulzně šířková modulace

3.2 Numericky řízený oscilátor

Numericky řízený oscilátor (NCO) je digitální prvek, který využívá jevu - přetečení akumulátoru fáze k vytvoření výstupního signálu. Přetečení akumulátoru fáze je řízeno nastavitelnou hodnotou přírůstku, nikoli pouze jedním hodinovým impulsem, jak bývá běžné např. u čítačů. NCO tedy funguje tak, že se opakovaně přičítá pevná hodnota k hodnotě akumulátoru fáze. Sčítání probíhá při náběžné hraně vstupního hodinového signálu. Akumulátor fáze bude tedy periodicky přetékat přenosem, což je „surový“ výstup NCO. Znázorněno v příloze - Příloha č. 3.2.1 - NCO - numericky řízený oscilátor.

Výstup NCO lze dále upravit dělením dvěma, což definuje konstantní střihu výstupního signálu 50% - nutný předpoklad pro další zpracování. Více v příloze - Příloha č. 3.2.2 - Kmitočtový rozbor řízení vysílače.

3.3 H můstek

H-můstek je zapojení čtyřech spínacích prvků (nejčastěji tranzistorů), které podle řízení obrací polaritu napětí (proudu) na svém výstupu. H můstek je zobrazen v příloze - Příloha č. 3.3.1 - H můstek.

Při současném sepnutí tranzistorů Q1 a Q4, teče proud zátěží jedním směrem, při sepnutí tranzistorů Q2 a Q3 směrem opačným. Během přechodu mezi jednotlivými stavy je však

nutno napřed sepnuté tranzistory rozepnout a po nějaké době (dead time) teprve sepnout diagonálu opačnou. Vlivem reálných parametrů součátek a s tím spojené konečné době zapnutí a vypnutí by jinak došlo ke krátkodobému, ale přesto destruktivnímu zkratu napájecího zdroje tranzistory Q1 a Q2, nebo Q3 a Q4. Více o dead time v příloze - Příloha č. 4.4 - Logika mrtvých časů.

3.4 Spínaný zdroj

Spínaný napájecí zdroj (SMPS) je elektronický obvod, který převádí energii (výkon) pomocí spínacích prvků, které pracují při vysokých frekvencích, a úložných komponent, jako jsou indukčnosti nebo kondenzátory, které akumulují energii, když je spínač rozepnutý.

Spínané napájecí zdroje mají vysokou účinnost a jsou široce používány v různých elektronických zařízeních, včetně počítačů a dalších citlivých zařízení vyžadujících stabilní a účinné napájení.

Základní izolovaný AC/DC spínaný napájecí zdroj se skládá ze vstupního usměrňovače a filtru, invertoru sestávajícího ze spínacích prvků nejčastěji tranzistor MOSFET), transformátoru, výstupního usměrňovače a filtru, zpětné vazby a řídicího obvodu.

Vstupní stejnosměrné napájení z usměrňovače je přiváděno do střídače, kde je zapínáno a vypínáno na vysokých frekvencích mezi 20 kHz a 200 kHz tranzistory MOSFET nebo výkonovými bipolárními tranzistory. Vysokofrekvenční napěťové impulsy z měniče jsou přiváděny do primárního vinutí transformátoru a sekundární střídavý výstup je usměrněn a vyhlazován, aby se vytvořila požadovaná stejnosměrná napětí. Zpětnovazební obvod monitoruje výstupní napětí a dává pokyn řídicímu obvodu, aby upravil pracovní cyklus pro udržení výstupu na požadované úrovni. Více konstrukci a výpočtech spínaného zdroje v příloze - Příloha č. 3.4.1 - Spínaný zdroj.

4 Konstrukce AM vysílače

Cílem této práce bylo vyrobit prototyp vysílače pro střední vlny s amplitudovou modulací v třídě D, řízený mikroprocesorem určený pro trvalý provoz rozhlasového vysílání s minimálními zástavbovými rozměry a minimální hmotností tak, aby byl snadno manipulovatelný a uživatelsky přívětivý.

4.1 Volba součástek

Tranzistory MOSFET z karbidu křemíku, SiC jsou nové – moderní součástky, které svými parametry řádově předčí stávající polovodičové spínací prvky. V podstatě tyto SiC MOSFETy mají vyšší blokovací napětí, nižší odpor v sepnutém stavu a vyšší tepelnou vodivost než jejich křemíkové protějšky. Jeden z parametrů, je obzvláště důležitý u MOSFETů z karbidu křemíku - totiž vyšší spínací rychlosti, kterých lze dosáhnout. To umožňuje jejich použití ve vysokofrekvenčních aplikacích – což bezesporu AM středovlnný vysílač je.

4.2 Návrh analogové části

Více o návrhu analogové části v příloze - Příloha č. 4.2.1 - Návrh analogové části.

4.3 Návrh řízení

Jak logicky vyplývá z předchozích kapitol, aby mohl být výsledkem činnosti vysílače amplitudově modulovaný průběh nosné vlny, musí být řídicími obvody generováno několik signálů. Prvním důležitým signálem je vlastní kmitočet nosné. Ten je možné generovat mnoha způsoby, kdy každý z nich má své výhody a nevýhody: krystalový oscilátor pevně naladěný na daný kmitočet sice zajišťuje požadovanou kmitočtovou přesnost a stálost, nicméně pro případ přeladění vysílače na jiný kmitočet by bylo nutné krystal vyměnit. Jelikož kmitočty jednotlivých kanálů středních vln jsou „divné“, musel by se příslušný krystal vyrobit na zakázku, což je nejen nákladné, ale dnes již skoro nemožné. Další možností je systém kmitočtové syntézy pomocí fázového závěsu, což je nejčastěji používaná metoda. Nevýhodou je přílišná obvodová složitost, pokud je syntezátor navrhován z diskrétních prvků. Existují sice integrované obvody, které obsahují celý blok fázového závěsu, ale jsou příliš „exotické“ a tím pádem špatně dostupné a drahé. Digitálně řízený oscilátor, který byl v projektu použit, je sice za normálních okolností také obvodově složitý, ale stává se často periferní součástí různých mikrokontrolérů, či hradlových polí.

Dalším důležitým signálem je PWM řízení modulátoru. Analogové řešení takového bloku je notoricky známé a celkem jednoduché, bohužel se při realizaci ukázala nutnost mít tento signál ve vazbě na nosnou vlnu. Jakékoliv řešení této synchronizace by opět bylo obvodově složité ba až nemožné.

Posledním úkolem řídicích obvodů je ovládání silových obvodů, generování zapínací sekvence, dohled a zpracování reflektometrické ochrany, psaní na displej a blikání kontrolkami.

Pokud shrneme veškeré požadavky na řídicí obvody vysílače, je jedinou volbou použit mikroprocesor či hradlové pole, nebo kombinaci obojího. Naštěstí fa. Microchip má ve své – paradoxně „nevyšší řadě svých nejnižších typů“ mikrořadič splňující skoro všechny požadavky na řízení AM vysílače. Osmibitový mikroprocesor PIC18F46Q43 má na čipu numericky řízený oscilátor, buňky s logickými obvody, komparátor (sice ne ideálně rychlý, ale pro potřebu středních vln dostačující), má dostatečnou rychlost (hodinový signál až 64MHz)... a hlavně – dodává se v pouzdru DIL, což umožňuje „odbastlení“ zapojení bez nutnosti výroby plošných spojů pro speciální pouzdra.

Vývojové prostředí fy. Microchip - MPLABX je volně dostupné na internetových stránkách výrobce, stejně jako kompilátor jazyka C. Ten má sice v nelicencované verzi drobná omezení (neumožňuje optimalizaci výsledného kódu na velikost a rychlost), ale pro tento projekt vyhoví. Dalším ulehčením je grafický tool, který umožňuje snadné nastavení konfiguračních registrů mikrořadiče a jeho periférií, což urychlí práci a eliminuje množství počátečních chyb. Ukázka prostředí MPLABX je v Příloze č. 4.3.1 - MPLABXIDE.

4.4 Návrh výkonového modulu - Power Module

Výkonový modul byl po mnoha nezdarech navržen jako samostatně fungující celek. Odzadu – H můstek spínající kmitočtem nosné vlny: Vzhledem k vysokému spínacímu kmitočtu bylo nutností použít tranzistory MOSFET. Později se ukázalo, že existuje ještě lepší technická varianta, a to tranzistor SiC MOSFET. Obecný problém zapojení tranzistorů do H můstku je buzení horních spínačů. Emitor těchto tranzistorů totiž není potenciálově spojen s žádnou „zemí“, nýbrž tzv. „plave“. Proto musí být budící obvod potenciálově oddělen, což přináší jen komplikace a obvodovou složitost. Naštěstí je střída budícího signálu v podstatě stále jen 1:1 (o mrtvých časech později), proto je možno použít jako budící prvek transformátor. Transformátor má ještě jednu výhodu – v případě výpadku budícího signálu

způsobí malý stejnosměrný odpor sekundárního vinutí připojeného na gate a emitor tranzistoru okamžité uzavření spínacích tranzistorů. Primár budícího trafo je připojen přes vazební kondenzátor eliminující případnou stejnosměrnou složku signálu a tím možné přesycení magnetického obvodu. Odpor R11 slouží k omezení překmitů budícího signálu a jeho hodnota musela být zjištěna zkusmo. Jako budič byl zvolen osvědčený obvod řízení tranzistorů MOSGET a IGBT - IXDD414YI od firmy IXYS. Tento obvod vyniká vysokým opakovacím kmitočtem a je pro tyto účely často používán. (pozn. mezitím během zpracování tohoto projektu se přestal vyrábět a je nahrazen řadou 614 a 630). Buzení tranzistoru je zobrazeno v příloze - Příloha č. 4.4.2 - Schéma buzení tranzistoru MOSFET.

V praxi se ale ukázalo, že ne všechny parametry jsou tak ideální, jak zmiňuje datový list. Pro kmitočty středních vln jej není možné použít na plný výkon, nýbrž musí pracovat na cca 1/2 napájecím napětí (1/4 výkon), jinak dojde k jeho tepelné destrukci. Jelikož jeden výkonový modul nedodá požadovaný výkon, je třeba je spojovat. Jako problém se ukázalo značné impulsní rušení, které pronikalo do řídicích obvodů vysílače a nebylo možné se jej zbavit. Proto každý modul obsahuje i řídicí logiku mrtvých časů (viz také Příloha č. 3.3.2 - Logika mrtvých časů), aby se zamezilo případné chybné funkci z centrálního řízení.

Jako PWM modulátor je použito klasické zapojení snižujícího měniče (chopper) s horním spínačem a diodou. Následuje LC filtr 5tého řádu, kde se vtipně využívá první – pracovní indukčnost jako akumulací, druhá jako doplňková, která zároveň tvoří s paralelní kapacitou rejekční filtr spínacího kmitočtu PWM. Filtr byl navržen ve webovém kalkulátoru <https://rf-tools.com/lc-filter/> a následně „odbastlen“ s běžně dostupnými hodnotami součástek. Více o výpočtu filtru Příloha č. 4.4.3 - Modulační filtr.

U snižujícího měniče s pulsně šířkovou modulací je opět problém s řízením takzvaného horního spínače. Jelikož je zde střída řídicího signálu proměnná, nelze použít transformátor, jako tomu bylo u H můstku výkonového modulu řízeného nosnou vlnou s konstantní střídou, nýbrž musí být budící obvod zapojen na řídicí elektrodu tranzistor přímo. To přináší jeden velký problém a to jak galvanicky oddělit jak řízení, tak napájení tohoto systému. Pomocný napájecí zdroj by celou situaci velice zkomplikoval a optočleny nejsou dostatečně rychlé, navíc mají různé zpoždění vzestupné a sestupné hrany, což by způsobilo značné zkreslení modulačního signálu. Jediné možné řešení bylo celou topologii snižujícího měniče otočit a spínací prvek umístit na nulový potenciál. Zapojení vypadá velice bizarně, nicméně na funkci nemá žádný vliv a problém s galvanickým oddělením odpadl.

4.5 Výroba, osazení a ladění plošných spojů

Rozhlasový vysílač je zařízení, které pracuje nepřetržitě 24 hodin denně 7 dní v týdnu a 365 dní v roce. Samozřejmě jako u každého technického zařízení i zde může dojít k poruše. Výpadek vysílání má však vliv na ekonomiku rozhlasové stanice, protože posluchači přeladí své rozhlasové přijímače jinam a pokud by výpadek trval delší dobu, vložily by se do toho regulační orgány jako Český telekomunikační úřad a Rada pro rozhlasové a televizní vysílání. V konečném důsledku by mohlo dojít i k odejmutí přiděleného kmitočtu z důvodu jeho nevyužívání. Z tohoto důvodu musí být veškeré části vysílače modulární, aby mohly být celé bloky při poruše snadno vyměněny, a jejich následná oprava může být provedena mimo vysílač. Jelikož jsem měl možnost získat starší mechaniku modulového systému, byla zvolena koncepce tzv. zásuvných karet. Elektronika vysílače byla rozdělena do bloků, a jsou propojeny s tzv. backplane konektory. Jelikož je tento způsob standardně využíván, došlo ke sjednocení konektorů na deskách plošných spojů a backplane normou DIN 41612 a DIN 41617. Díky tomu je možno kombinovat konektory od mnoha výrobců se zajištěnou vzájemnou kompatibilitou.

Některé polovodiče se vyrábí pouze v pouzdrech SMD, což paradoxně zjednodušilo montáž a osazování. (méně místa na DPS).

Plošné spoje vzhledem k jejich složitosti musely být navrženy jako dvouvrstvé. To zároveň umožnilo „tahat“ některé proudem zatížené cesty na obou stranách DPS současně a tím zabránit přílišnému oteplení DPS.

Rozměrově velké součástky (hlavně tlumivky modulačního filtru) jsou k DPS připevněny stahovacími pásky protažené otvory v DPS.

Blok výstupních filtrů je připevněn na hliníkový plech v horní části vysílače. Cívky jsou namotány na železoprachových jádrech, ta využívají rozprostřené vzduchové mezery, keramické VF kondenzátory jsou přišroubovány za svoje patky. Rozvod vf energie je kvůli potlačení skin-efektu proveden vysokofrekvenčními lanky. Více o návrhu výstupního filtru v Příloha č. 4.5.1 - Výstupní filtr.

Pomocné konstrukční prvky, jako např. úchyty konektorů, kostry a podpěry cívek byly vytištěny na 3D tiskárně.

Během testování bylo zjištěno, že na exponovaných vf částech vysílače není možno použít černou barvu filamentu. Ta totiž obsahuje saze (uhlík), které se stávají ve vf poli vodivé a začnou celý výtisk zahřívat, což způsobí jeho destrukci.

4.6 Oživení a měření parametrů

Oživení vysílače bylo prováděno po jednotlivých funkčních blocích. Nejprve byl na univerzální desce plošných spojů vyzkoušen mikrokontrolér a USB programátor fy. Microchip na „standardním testovacím software“ – blikání diodou LED na jednom z jeho výstupů. Pro nastavení periférií jako NCO a časovačů byl použit grafický tool vývojového prostředí. Výsledný vygenerovaný zdrojový soubor v jazyce C byl poté přenesen do konečného kódu. Dále bylo na nepájivém poli odzkoušeno generování signálu PWM a nastavení modulační nuly. Viz příloha - Příloha č. 4.6.1 - Zkouška nepájivém poli. Ostatní věci – jako dolní propust a vstupní zesilovač „jsem risknul“ navrhnout do konečné verze bez zkoušek – což se v konečném řešení neobešlo bez nutného přeškrabování cest na konečné verzi plošného spoje.

Pulsní zdroj byl zkoušen pomocí regulačního transformátoru do zátěže tvořené 2mi 500W žárovkami. Z koncepce spínaného zdroje byla nakonec vyřazena regulační smyčka zajišťující konstantní výstupní napětí. Ta způsobovala rušení, které pronikalo do všech cest vysílače bez jakékoliv šance jej odstranit. Spínaný zdroj se proměnil v elektronický transformátor (pokud by byl osazen běžný síťový transformátor s usměrňovačem, byly by vlastnosti zdroje podobné – také nemá stabilizaci napětí). Viz příloha - Příloha č. 4.6.2 - Zkouška pulsního zdroje.

Vlastní výkonový modul byl zkoušen postupně – nejprve obvody H můstku s logikou dead-time, poté i s PWM modulátorem. Napájen byl z regulačního transformátoru, za kterým byl ještě transformátor oddělovací.

Pro zkušební účely musela být vyrobena ještě umělá anténa – odporová zátěž 50 ohmů. Požadavek na bezindukční výkonové odpory je velmi striktní. Na světě existuje velmi málo výrobců, nicméně nakonec se podařilo sehnat několik kusů 25Ohmů/50W v pouzdru TO247. Ty jsou přišroubovány na společném chladiči a vybaveny VF ampérmetrem z nějaké sovětské vojenské radiostanice získané na radioamatérské burze. Viz příloha - Příloha č. 4.6.3 - Umělá anténa.

Základním parametrem AM vysílače je přesnost a stabilita jeho kmitočtu. Zde je proto použit krystalový oscilátor 64MHz se standardní přesností 10^{-6} , takže časová stálost je zajištěna výrobcem. Kmitočet 1071kHz, na který je vysílač naladěn je pomocí NCO a následným dělením dvěma generován systémem na 1.071.014 Hz. Odchylka 14Hz od jmenovitého kmitočtu bez problémů vyhoví a krom vsudypřítomných rýpavých radioamatérů si jí běžné rozhlasové přijímače „ani nevšimnou“. Podobně o odchylkách frekvence v Příloze č. 3.2.2 - Kmitočtový rozbor řízení vysílače.

Dalším důležitým parametrem je promodulovatelnost. Čím je hloubka modulace vyšší, tím větší dosah vysílaná stanice má. Digitální vysílač díky své koncepci umí bez problémů 100% promodulování (až na výpadek nosné), takže není problém nastavit libovolný modulační zdvih dle požadavků rozhlasové stanice.

S kvalitou audiopřenosu souvisí linearita vysílače a zkreslení. V praxi se u PWM řízení projevují parazitní vlastnosti součástek, jako např. jiná spínací a rozpínací rychlost, kapacita přechodů, parazitní kapacity indukčností u PWM filtrů a další, což s sebou přináší zkreslení. Metody kompenzace zkreslení jsou notoricky známé (zpětná vazba), což ovšem v případě tak složitého systému, jakým bezesporu AM vysílač není jednoduché aplikovat, proto je lepší systém provozovat jako „otevřený“ a holt některé parametry oželeť. Linearitu vysílače lze nejnadhěji změřit osciloskopem, kdy jako modulaci přivedeme na vstup vysílače trojúhelníkový signál a na umělé zátěži kontrolujeme výsledný průběh.

Stejného výsledku dosáhneme i zapojením osciloskopu pro získání tzv. „modulačního trojúhelníku“.

Další možností je použít speciální jednoúčelové měřicí přístroje, jako je MAM21 (indikátor modulace) a měřič nelineárního zkreslení. Viz příloha - Příloha č. 4.6.4 - Naměřené parametry.

Posledním parametrem je spektrální čistota výsledného signálu, neboť číslicové systémy z principu vyšší harmonické obsahují. Pak už záleží jen na kvalitě výstupního filtru, který vyšší harmonické signály potlačuje. K měření těchto parametrů je nutno použít spektrální analyzátor. Viz příloha - Příloha č. 4.6.5 - Spektrální čistota.

4.7 Zkouška v provozním prostředí

Pokud je vysílač řádně nastaven na umělé zátěži o jmenovité impedanci 50 Ohmů, měl by v reálném prostředí pracovat bez problémů, neboť přizpůsobovací členy antény (anténní domek) jsou vždy navrhovány na vstupní impedanci právě 50 Ohmů. Praxe je však trochu jiná, neboť i sem vstupují reálné faktory, jako je počasí, vlhkost půdy (a s tím spojená kvalita uzemnění) a dokonce i denní či noční doba (stav ionosféry). Změna impedance vnějšími vlivy však není většinou příliš velká, takže vysílač by měl bez potíží pracovat.

Možné problémy mohou nastat tak pronikáním VF pole do nf modulační trasy. To se projevuje zkresleným a nevýrazným zvukem bez hloubek a pocitem sníženého výkonu. Většinou stačí „nacvaknout“ EMC feritový toroid na přívodní nf kablík před vysílačem a je po problémech. Pokud ne, musí se modulační trasa vést prostorově odděleně.

5 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit AM vysílač pro střední vlny řízený mikroprocesorem, optimalizovat jeho zástavbové rozměry a hmotnost vysílače tak, aby vznikl kompaktní přenosný přístroj s komfortním ovládáním při zachování parametrů nutných pro profesionální použití a dlouhodobý spolehlivý a nepřetržitý provoz v běžných podmínkách rozhlasových vysílacích středisek.

V první etapě této práce se podařilo zvolit takový přístup ke konfiguraci AM vysílače, který zajistil za pomoci využití dostupných moderních součástek postupně vyrobit, optimalizovat a oživit jednotlivé moduly AM vysílače. Každému bloku jako například vstupní analogové části, samotnému řízení, výkonovému modulu a podobně, byla věnována vždy zvláštní pozornost a tyto samostatné moduly byly, pokud to bylo možné, samostatně a nezávisle optimalizovány a zatěžovány do té doby, než poskytly potřebné parametry a spolehlivost.

V druhé etapě byl z jednotlivých modulů sestaven celek, který sloužil již jako funkční AM vysílač. Pro jeho testování bylo třeba zajistit vstupní podmínky a umělou anténu, jako zátěž. V této fázi došlo k ladění a případné úpravě jednotlivých modulů, pokud se ukázalo, že jejich parametry v rámci celku nejsou optimální. Testovány byly jak kvalitativní parametry, tak spolehlivost vysílače.

Samotný vývoj trval tři roky. Během této doby jsem poznal mnoho odborníků v oboru. Zadaný náročný cíl se však podařilo úspěšně splnit, výsledkem je funkční prototyp s požadovanými parametry. Vysílač byl v laboratorních podmínkách testován úspěšně. V budoucnu bude testován i v běžném provozu, a pokud i tyto testy budou úspěšné, bude tento konkrétní prototyp sloužit jako záložní zařízení pro Country Radio nebo Radio Dechovka na některém středovlnném vysílači. Lze tedy konstatovat, že zadaný cíl se podařilo úspěšně naplnit.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Valentovi CSc. – specialista pro výzkum a vývoj z fy. Tronic s.r.o, Ing. Petru Kmeťovi – specialista - Altium z fy. HWart s.r.o., Ing. Janu Junkovi - vývoj vysílačů z bývalé Tesly Hloubětín, Ing. Romanu Culkovi – technický ředitel – Rádio Impuls, Český Impuls, Rock Zone, Mgr. Janu Novákovi – Vrchní rada odboru monitorování spektra z ČTÚ jejich ochotu, čas a přínosné rady poskytované v průběhu zpracování této maturitní práce. Také bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Šindelkovi za trpělivost a cenné rady.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1.] History of radio. Wikijii: Encyklopedie [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/History_of_radio
- [2.] A Brief History of the Radio. Wwww.scaruffi.com [online]. Piero Scaruffi, 1999 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://www.scaruffi.com/politics/radio.html>
- [3] Patzaková-Jandová Anna. Prvních deset let československého rozhlasu. 1. Praha: Radiojournal, 1935, 1039 s. ISBN nepřiděleno
- [4] DVOŘÁČEK, ING., Jaroslav. Kurs radiotechniky. 1975. Praha: SNTL, 1975, 528 s. ISBN nepřiděleno. 04-517-75.
- [5.] Broadcast Signals. Wwww.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu [online]. R.Nave [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Audio/bcast.html>
- [6.] RF Wireless World. <https://www.rfwireless-world.com/> [online]. 2012 [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/difference-between-transmitter-and-receiver-types.html>
- [7.] Kronika nápadů, které změnily svět. 2004. Praha: Fortuna Print, 2004. ISBN 80-732-1130-0. Začátek formuláře
- [8.] JANOVIC, Branimir. WIRELESS: The Life, Work and Doctrine of Nikola Tesla. 2014. Beograd: VULKAN, 2014, 312 s. ISBN 978-86-10-01832-5.
- [9.] PATURI, Felix R. Kronika techniky. Praha: Fortuna Print, 1993, 651 s.
- [10.] Vyhláška o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka): 105/2010 Sb. In: Sběrka zákonů české republiky. 2010.
- [11.] Využití radiového spektra [online]. ČTU, 2022 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://spektrum.ctu.cz/>
- [12.] SMIRENIN, B. A. Radiotechnická příručka. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 1224 s., ISBN nepřiděleno
- [13.] KOHLMANN, Čeněk. Matematika ve sdělovací technice. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960, 1127 s., ISBN nepřiděleno
- [14.] VACKÁŘ, Jiří. Měření a provoz vysílačů. 1. Praha: SNTL, 1963, 288 s. ISBN nepřiděleno.]
- [15.] NEC CORPORATION. 25kW MW BROADCAST TRANSMITTER: Instruction Manual, MBT-9025A. 3 edition. Tokyo, Japan
- [16.] TESLA N.P. SRV 1 - TR: uživatelský manuál. Česká republika.

- [17.] Microchip Developer Help: NCO- Numerically Controlled Oscillator [online]. 2021 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://microchipdeveloper.com/8bit:nco>
- [18.] LIBERTY steel group: Toroidní jádra [online]. Česká republika, 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://libertysteelgroup.com/cz/o-spolecnosti/zavody/liberty-technotron-s-r-o/produkty/toroidni-jadra/>
- [19.] Final Acts of the Regional Administrative LF/MF Broadcasting Conference (Regions 1 and 3) [online]. Switzerland, Geneva: ITU, 1975 [cit. 2023-01-10]. ISBN 92-61-00231-5. Dostupné z: <https://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/4.98.43.en.100.pdf>
- [20.] PIC18F26/46/56Q43: data sheet [online]. Microchip, 2021 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/268/PIC18F26_46_56Q43_Data_Sheet_40002171E-2449384.pdf
- [21.] IR2110(S)PbF/IR2113(S)PbF, HIGH AND LOW SIDE DRIVER: Data Sheet No. PD60147 rev.V [online]. California: International IR Rectifier, 2019 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/268/PIC18F26_46_56Q43_Data_Sheet_40002171E-2449384.pdf
- [22.] ard_newbie. Dead Time. In: Arduino [online]. 2020 [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/t/generate-pwm-complementary-signals-with-dead-time/205435/8>
- [23.] ELECTRICAL ENGINEERING: PWM with programmable Dead Time [online]. 2023 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/101520/pwm-with-programmable-dead-time>
- [24.] TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits: data sheet [online]. Texas Instrumenst, 2022 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf?ts=1678382975292&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [25.] SG3525A, Pulse Width Modulator Control Circuit: data sheet [online]. Europe, Middle East and Africa Technical Support: ON Semiconductor, 2005 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/sg3525a-d.pdf>
- [26.] Собранный блок питания DA Power1000 [online]. RU: DARK AMP, 2020 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <http://darkamp.ru/da-power1000/>
- [27.] Ferrites and accessories: SIFERRIT material N87 [online]. TDK, 2017 [cit. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528882/71e02c7b9384de1331b3f625ce4b2123/pdf-n87.pdf>
- [28.] Рест металл: Сборка сварочного инвертора своими руками [online]. RU, 2023 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://takorest.ru/welding/oscillator-dla-svarki-v-argone-izgotovlennyj-svoimi-rukami-po-tipovoj-shem.html>

- [29.] ELECTRONICS-LAB.COM: PWM MODULE WITH DUAL SOURCE/SINK OUTPUTS USING SG3525 [online]. 2023 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.electronics-lab.com/>
- [30.] Mimmotronics.com: SALLEN-KEY FILTER CALCULATION TOOL [online]. 2018 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: www.mimmotronics.com
- [31.] Edn.com: What does 'rail to rail' output operation really mean? [online]. EDN magazine, 2013 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: www.edn.com
- [32.] Www.analog.com: REF195, 5.0V Precision Micropower, Low Dropout, Low Voltage Reference [online]. 2022 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: www.edn.com
Začátek formuláře
- [33.] Positive 1.0 A MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800: data sheet [online]. ONSEMI, 2014 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: [datasheet MC7800](#)
- [34.] Audio Electronics: Cascodes, Folded Cascodes, and Current Mirrors (Part 2). AudioXpress [online]. 2021 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://audioxpress.com>
- [35.] LC Filter Design Tool. RF Tools [online]. 2021 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://rf-tools.com>
- [36.] Toroid. Micrometals [online]. 2022 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.micrometals.com/>
- [37.] MULTISIM [online]. NATIONAL INSTRUMENTS [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://www.multisim.com/>
- [38.] Feritová jádra - základní definice. Www.semic.cz [online]. 2012 [cit. 2023-03]. Dostupné z: https://www.semic.cz!/KATEGORIE/6K/Definice_CZ.pdf

Seznam obrázků

- Obr. 2.2.4.1-1: Zobrazení amplitudové a frekvenční modulace Zdroj: [2], v příloze 2.2.4.1
- Obr.: 3.1-1: Blokové schéma AM vysílače Zdroj [6.], v příloze 3.1
- Obr.: 2.2.2.1-1 Přehled vlnových pásem, vlastní obrázek., v příloze 2.2.2.1
- Obr.: 2.2.1.1-1 Elektromagnetické pole a jeho vlnová délka, Zdroj [4], v příloze 2.2.1.1
- Obr. 3.1.1-1: PWM – princip, Zdroj vlastní obrázek, v příloze 3.1.1
- Obr.: 3.2.2-1 Blokové schéma číslicově řízeného oscilátoru u mikrokontroléru PIC18F26, Zdroj [20.], v příloze 3.2.2
- Obr.: 3.2.2-2 Blokové schéma časovače typ 2 u mikrokontroléru PIC18F26, Zdroj [20.], v příloze 3.2.2
- Obr. 3.3.1-1 H můstek, Zdroj – vlastní obrázek, v příloze 3.3.1
- Obr.: 3.3.2-1 Dead time, Zdroj [22.]
- Obr.: 3.3.2-2 Logika dead time , Zdroj [23.]
- Obr. 3.4.1-1 Principiální schéma polovičního můstku, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr.: 3.4.1-2 Toroid, Zdroj [18]
- Obr: 4.2.1-1: Vstupní zesilovač v symetrickém zapojení, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr.: 4.2.1-2: Dolní propust, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr.: 4.2.1-3 Dolní propust salten-key, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr.: 4.2.1-4: Nastavení modulační nuly, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr. 4.2.1-5: Zdroj diferenčního napětí, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr.: 4.2.1-6 Generátor pilového průběhu, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr.: 4.2.1-7: Blokové schéma rychlého komparátoru u mikrokontroléru PIC18F26 , Zdroj [20.]
- Obr. 4.4.3-1 Simulace filtru, Zdroj [35.]
- Obr.: 4.4.3 Katalogový list, Zdroj [36.]
- Obr.: 4.4.3-2: Simulace v MULTISIM , Zdroj [36.]
- Obr. 4.5.1 Výpočet výstupního filtru, Zdroj [35.]
- Obr. 4.5.1 - 2: Výpočet výstupního filtru II., Zdroj [35.]
- Obr. 4.5.1-3: Katalogový list toroid, Zdroj [36.]
- Obr. 4.6.1 -1 Sestavený hotový spínaný zdroj, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr. 4.6.2 -2 : Měření PWM pro řízení výkonu, potažmo výstupního napětí zdroje., Zdroj – vlastní obrázek
- Obr. 4.6.2-3: Testování maximálního výkonu do umělé zátěže v podobě dvou 500W žárovek, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr. 4.6.3-1: Zde je vidět mechanické provedení umělé antény (zátěže), potřebné pro ověření parametrů vysílače., Zdroj – vlastní foto
- Obr. 4.6.3-2: Schéma umělé antény tvořené z osmnácti bezindukčních odporů, $R = 25\Omega$, $P = 25W$. Výsledný odpor je tedy $R = 50\Omega$ a výkon $P = 1000W$, Zdroj – vlastní obrázek
- Obr. 4.6.4-1: Měření linearity vysílače. Jako modulační signál je použit trojúhelníkový průběh., Zdroj – vlastní foto
- Obr. 4.6.4-2: Měření promodulovanosti s pomocí měřiče hloubky modulace Tesla MAM 21., Zdroj – vlastní foto
- Obr. 4.6.1-1 Postupné ožívování na nepájivém poli. Zlomový bod bylo rozblíkat LEDku, potom to šlo hladce., Zdroj – vlastní foto
- Obr.: 4.6.1 – 2: Zkouška komunikace, Zdroj – vlastní foto

Seznam příloh

- Příloha 2.1.1 - Stručný přehled historie AM vysílání
- Příloha 2.2.1.1 - Elektromagnetické vlnění
- Příloha 2.2.2.1 - Vlnová pásma
- Příloha 2.2.4.1 - Amplitudová (AM) a frekvenční (FM) modulace
- Příloha 3.1 - Blokové schéma AM vysílače
- Příloha 3.1.1 - PWM – pulzně šířková modulace
- Příloha 3.2.1 - NCO - Numericky řízený oscilátor
- Příloha 3.2.2 - Kmitočtový rozbor řízení vysílače
- Příloha 3.3.1 - H můstek
- Příloha 3.3.2 - Logika mrtvých časů (dead time)
- Příloha 3.4.1 - Spínaný zdroj
- Příloha 4.2.1 - Výpočet analogové části vysílače
- Příloha 4.4.3 - Výpočet modulačního filtru
- Příloha 4.5.1 - Výpočet výstupního filtru
- Příloha č. 4.6.1 – Zkouška na nepájivém poli
- Příloha č. 4.6.2 – Zkouška pulsního zdroje
- Příloha č. 4.6.3 – Umělá anténa
- Příloha č. 4.6.4 - Naměřené parametry
- Příloha č. 4.6.5 – Spektrální čistota
- Příloha 4.6.6 - Výpis SW
- Příloha 4.6.7 - Schémata