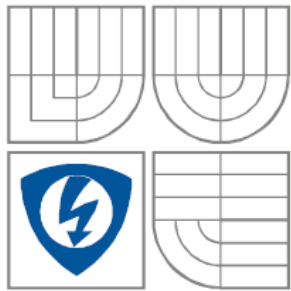


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VLASTNOSTI ULTRAZVUKOVÉHO ZAŘÍZENÍ PRO SMĚROVĚ ORIENTOVANÝ PŘENOS ZPRÁV

THE PROPERTIES OF ULTRASONIC EQUIPMENT
FOR DIRECTIONAL MESSAGES TRANSMISSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Klíma

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. Arnošt Bajer, CSc.

BRNO, 2009

Anotace

V práci jsou zkoumány možnosti realizace zařízení. pro prostorově selektivní šíření akustického signálu s využitím ultrazvukového generátoru s nízkofrekvenční modulací (dále UGNM). Dále je uveden souhrn dostupných informací týkajících se této problematiky. Součástí práce jsou i výsledky měření provedených na experimentálním vzorku zařízení a zařízení AudioSpotlight.

Abstract

The work examines the possibilities of acoustic signal selective distributing device realization which uses ultrasonic generator with low-frequency modulation (UGNM). Next there is added the summary of available information referring to this questions.

The work includes measure results of experimental device and AudioSpotlight device.

Klíčová slova

Ultrazvuk, generátor, amplitudová modulace, směrový přenos, šíření, vyzařování ultrazvuku, sluchový vjem, AudioSpotlight, nelinearita vzduchu

Key words

Ultrasonic, generator, amplitude modulation, direct transmit, emission, auditory sensation, AudioSpotlight, nonlinearity of the air

Bibliografická citace díla:

KLÍMA, Martin. *Vlastnosti ultrazvukového zařízení pro směrově orientovaný přenos zpráv*. [s.l.], 2009. 54 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Arnošt Bajer, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 2. 6. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Arnoštu Bajerovi, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji spolupracující firmě Prototypa s.r.o., za poskytnutí prostoru a vybavení k realizaci experimentálních prací. Jmenovitě panu Ing. Bohumilu Královi, CSc. za odbornou pomoc.

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Teoretické poznatky.....	3
2.1	Zvuk.....	3
2.2	Vlastnosti lidského ucha.....	4
2.2.1	Frekvenční rozsah.....	4
2.2.2	Dynamický rozsah.....	4
2.3	Ultrazvuk.....	5
2.3.1	Šíření ultrazvuku.....	5
2.3.2	Typické využití ultrazvuku.....	6
2.3.3	Biologické účinky ultrazvuku.....	6
2.3.4	Teorie nelineární ultrazvukové akustiky.....	8
2.3.5	Autodemodulace.....	8
2.4	Elektroakustické měniče.....	11
2.4.1	Dělení elektroakustických měničů.....	11
2.4.2	Technologie elektroakustických měničů pro UGNM.....	12
2.4.3	Zvukovod.....	15
2.5	Zařízení využívající nelinearity vzduchového prostředí.....	16
2.6	Amplitudová modulace.....	17
2.6.1	Hloubka modulace.....	17
2.6.2	Spektrum modulovaného signálu.....	17
2.6.3	AM modulátory.....	18
2.6.4	Generátory harmonického signálu.....	19
3	Návrh zařízení.....	21
3.1	Požadavky na zařízení.....	21
3.2	Moduly zařízení.....	22
3.2.1	Vstupní signál.....	22
3.2.2	Nastavitelný generátor harmonického signálu s AM modulací.....	23
3.2.3	Koncový zesilovač.....	24
3.2.4	Výstupní filtr.....	25
4	Měření.....	26
4.1	Výskyt demodulované složky na výstupu zařízení UGNM.....	26
4.2	Vznik rozdílové složky dvou akustických vln.....	28
4.3	Měření hloubky modulace zařízení AudioSpotlight v závislosti na frekvenci budícího signálu.....	29
4.4	Měření hladiny vyzářeného akustického tlaku v závislosti na frekvenci budícího signálu.....	31
4.5	Měření vyzařovací charakteristiky zařízení AudioSpotlight.....	35
5	Závěr.....	42
6	Seznam zkratk.....	44
7	Použitá literatura.....	45
8	Příloha.....	47

1 Úvod

Tato bakalářská práce navazuje na ročníkový projekt, jehož úkolem byl návrh a konstrukce ultrazvukového generátoru s nízkofrekvenční modulací (UGNM). UGNM je zařízení, které využívá směrového šíření modulovaného ultrazvuku k přenosu informace zastoupené zvukem o kmitočtu spadajícího do slyšitelného pásma člověka. Na rozdíl od radiového přenosu amplitudově modulovaného signálu, které vyžaduje demodulaci na straně přijímače, není demodulátor u UGNM zapotřebí. Demodulace probíhá na základě nelinearity prostředí šíření, v tomto případě vzduchovém. Jev, který nastává je označován jako autodemodulace. Při průchodu vhodně modulovaného zvukového svazku dosahujícího vysokého akustického tlaku působí nelinearita prostředí vznik rozdílové složky, která je, na rozdíl od modulovaného signálu, již slyšitelná. Očekávaný výsledný efekt je ten, že se modulací slyšitelného signálu na ultrazvukový kmitočet získají směrové vlastnosti šíření umožňující jeho specifickou distribuci. Jedná se o využití zvukových vln, které není zcela obvyklé pro audiotechniku. Předpokládané využití UGNM plyne ze směrové charakteristiky šíření modulované informace, tedy např. selektivní oslovování osob v davu, nazvučování vybraných objektů, jako jsou obrazy v galerii, a další. Takto ozvučené objekty pomocí UGNM se chovají pro ucho zdánlivě jako zdroj zvuku.

V současné době jsou takováto zařízení dostupná pod názvem Audioreflektor, avšak náklady na jejich pořízení jsou velmi vysoké [1]. Hlavním cílem projektu tedy bylo sestrojení takového zařízení s odpovídajícími vlastnostmi, nebo jim blízkými, s použitím dostupných součástek a elektroakustických měničů. Po přezkoumání možností konstrukce vyplynulo, že technologie výroby je složitější, než bylo původně očekáváno, a proto přestalo být sestrojení zařízení UGNM hlavní prioritou práce. Nejnáročnější částí zařízení je elektroakustický měnič, na který jsou kladeny vysoké a specifické požadavky, a nelze jej nahradit běžně dostupnými.

Pro ověření a osvojení si fenoménu autodemodulace jsem navrhnul a vyrobil UGNM. Požadavky na zařízení byly pro nedostatečné znalosti problematiky nevhodně stanoveny, především malý výstupní výkon, což provedená měření potvrzují. V průběhu práce na projektu se naskytlá příležitost spolupráce s firmou Prototypa s.r.o., které jsem využil. Konkrétně měření na zařízení Audio Spotlight. Tato měření měla prokázat směrové vlastnosti šíření modulovaného ultrazvukového signálu, zjistit chování výstupního

modulovaného signálu před elektroakustickým měničem a posoudit obecné vlastnosti autodemulovaného signálu.

Cílem práce je vytvoření souboru informací, na základě kterých lze provést realizaci plně funkčního zařízení UGNM včetně předzpracování vstupního signálu pro zmenšení zkreslení vlivem autodemulace a výroby vhodného elektroakustického měniče.

2 Teoretické poznatky

2.1 Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění prostředí. Zabývá se jím vědní obor akustika. Pro vznik tohoto vlnění je potřeba nosné medium, tj. hmotné prostředí, a síla působící kmity. Každé prostředí lze z akustického hlediska charakterizovat několika parametry, z nichž nejdůležitějšími jsou rychlost šíření prostředím (fázová rychlost), akustická impedance a útlum. Existují dva typy mechanického vlnění:

- Příčné - jsou kolmé ke směru šíření vlny
- Podélné - kmity jsou se směrem šíření rovnoběžné

Zvuk se vždy může šířit jako podélné vlnění, v pevných látkách pak i jako příčné. Směr šíření a rozložení zvukových vln lze znázornit vlnoplochami a paprsky.

- Vlnoplocha - je plocha, na které mají všechny částice prostředí stejně velkou výchylku i rychlost (stejnou fázi)
- Paprsky - jsou čáry kolmé k vlnoplochám a určují směr postupu vlnoploch

U UGNM je požadováno vyzařování úzkého svazku rovnoběžných paprsků. Toho lze dosáhnout vysokou frekvencí nosného kmitočtu a pomocí vhodného konstrukčního řešení zvukovodu.

Podle kmitočtu se dá zvuk dělit na:

- infrazvuk – jedná se o zvukové vlnění s frekvencí nižší než 20Hz. Člověk jej neslyší, avšak je schopný jej zaznamenat jinak, například bránicí, jako svíravý pocit hrudníku. Nejčastěji se s ním setkáváme, jako s průvodním jevem doprovázející erupce, zemětřesení, mořské vlny aj. Pomocí infrazvuku komunikují i někteří živočichové. Využití infrazvuk nachází především u průmyslových výbušnin, kde se využívá jeho destruktivních účinků v podobě rázových vln. Další oblastí užití je vojenství, a to buď u rezonančních zbraní, nebo u zbraní psychologických. Infrazvuk totiž člověku působí strach, pocit úzkosti a nejistoty,

- slyšitelnou oblast – pásmo zvukových kmitů vymezené frekvencemi 20Hz – 20kHz, tedy zvuky zaznamatelné lidským uchem. Slyšitelný zvuk má uplatnění především pro přenos informací, signalizaci. Dalšími oblastmi lidské činnosti, kde se využívá je umění a terapie
- ultrazvuk – zvuk s kmitočtem vyšším než 20kHz. Této oblasti zvukového pásma je věnována jedna z dalších kapitol [2] [13].

2.2 Vlastnosti lidského ucha

Hlavními parametry lidského slyšení jsou frekvenční a dynamický rozsah.

2.2.1 Frekvenční rozsah

Průměrný frekvenční rozsah slyšení bývá uváděn pro zdravého osmnáctiletého člověka. Nejčastější interval bývá uváděn 20Hz – 20kHz. S přibývajícím věkem se tento rozsah zužuje, především shora, podstatný vliv na něj má i namáhání sluchu.

UGNM využívá amplitudovou modulaci na nosný signál o vyšší frekvenci, než je slyšitelné pásmo pro lidské ucho, a to mimo jiné i z důvodu, aby nebyla přenášená informace rozpoznatelná již při jejím přenosu.

2.2.2 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah ucha je 0 – 120dB. Tyto hodnoty vycházejí z prahu slyšení a z prahu bolesti. Tyto hodnoty platí pro zvuk s frekvencí 1 kHz. Pro různé frekvence se citlivost liší, komplexně je znázorněna psychoakustickou křivkou vytvořenou na základě subjektivního posuzování stejné úrovně hlasitosti. Lidské ucho je nejcitlivější na zvuky s kmitočtem 3kHz.

Člověk uchem nevnímá hlasitost zvuku lineárně, ale logaritmicky. Tato skutečnost zapříčinila zavedení jednotky dB, poměrovou jednotku akustického tlaku a prahu slyšitelnosti. Na základě logaritmického vnímání ucha je zapotřebí volit potenciometry určené pro nastavení hlasitosti logaritmické. Při zvyšování hlasitosti lineárním potenciometrem se zdánlivě hlasitost rapidně zvýší na malém rozsahu, při dalším zesilování se hlasitost již jakoby nemění [14].

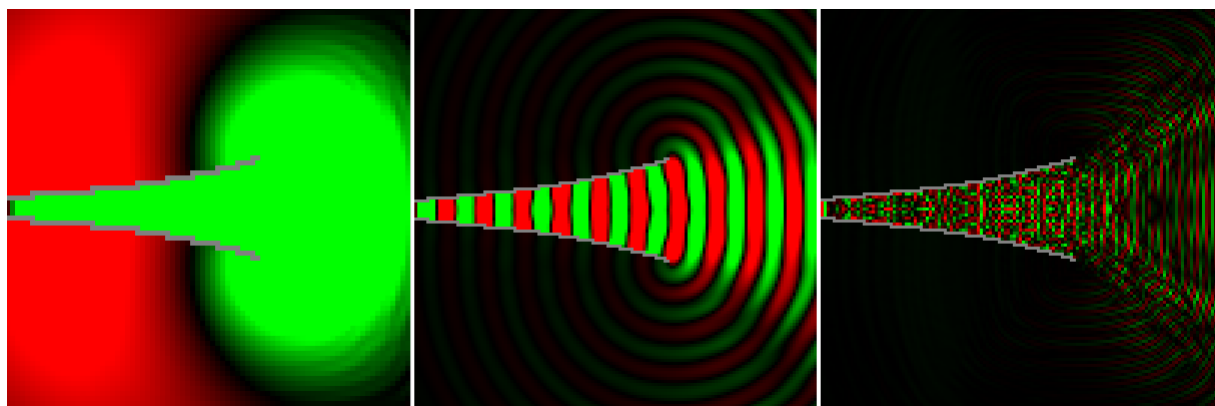
2.3 Ultrazvuk

Ultrazvukem se rozumí zvuk, jehož frekvence převyšuje 20kHz, resp. kmitočty nad oblastí lidské slyšitelnosti.

2.3.1 Šíření ultrazvuku

Šíření ultrazvukových vln je závislé na řadě vlivů prostředí, ve kterém se šíří. Ve vzduchovém prostředí se nejvíce projevuje atmosférický tlak, teplota a vlhkost. Útlum šíření ultrazvukového signálu koresponduje s útlumem šíření slyšitelného zvuku. Pro ultrazvukovou vlnu s frekvencí 50 kHz se útlum pohybuje okolo 1 dB/m při tlaku 1 atmosféra.

Směr šíření ultrazvuku určuje především jeho kmitočet. Je zde analogie s šířením elektromagnetických vln. Dlouhé vlny se lépe ohýbají, vlny s krátkou vlnovou délkou se naopak šíří přímo. Na obrázku 2.3-1 je znázorněno šíření zvuku ze zdroje vybaveného zvukovodem (horn) podle simulačního programu Horn Simulator. Pro simulaci byl použit generický horn a jediným proměnným parametrem byla frekvence generovaného zvuku. Kladné části vln jsou zde zastoupeny zelenou barvou, červené plochy jsou půlvlny záporné. Intenzita barvy odpovídá velikosti akustického tlaku. Při kmitočtu 100Hz se zvuk šíří i za ústí zvukovodu a akustické tlaky před a za ním jsou téměř stejné. Vyzařovaný zvuk s frekvencí 1kHz taktéž zasahuje do prostoru za ústím hornu. Z intenzity barvy je ale patrné, že akustický tlak za zvukovodem je podstatně nižší, z šíření zvuku lze poznat vyzařovací charakteristika zvukovodu. Zvuk o kmitočtu 10kHz se do prostorů za zářičem téměř nešíří, je vyzařován podle vyzařovací charakteristiky zvukovodu.



Obr. 2.3-1: Šíření zvuku při použití zvukovodu (zleva 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz) [17]

Pro dosažení co nejvíce přímočarého šíření modulovaného signálu by bylo třeba, aby frekvence nosného signálu byla co nejvyšší, tzn. v řádu desítek kHz. S přihlédnutím na náklady spojené s konstrukcí zařízení s těmito parametry, byly zvoleny mírnější požadavky na vyzařování a hlavní zaměření projektu je na modulaci samotnou.

2.3.2 Typické využití ultrazvuku

V současné době se ultrazvuk v technické praxi využívá k velkému množství aplikací:

- **obrábění** – založené na rozkmitávání brusiva v suspenzi pomocí ultrazvuku a následným vyražením částic obráběného materiálu [5],

- **kontaktování** – opět využívá rozkmitání pomocí ultrazvuku. Rozkmitáním mikrodrátku vzniká tepelná energie, pomocí které se vytvoří svár,

- **metrologie** – pro metrologii je ultrazvuk přínosný při měření vzdáleností pro svou směrovost. Měření samotné je nepřímé a jeho principem je měření časové prodlevy mezi vysláním ultrazvukového pulzu a jeho přijetím po odrazu o překážku. Podmínkou je známá rychlost šíření zvuku v daném prostředí. Provádí-li se více měření za sebou, přičemž se překážka, o kterou se signál odráží, pohybuje, je možné z naměřených vzdáleností vypočítat rychlost překážky [6],

- **diagnostika** – Podobně jako měření délky je diagnostika založena odrazu ultrazvuku, zde konkrétně odraženého o rozhraní dvou materiálů. Množství odražené energie je funkcí rozdílu akustických impedancí látek tvořících rozhraní. Ze získaných informací je dále konstruován obraz,

- **čištění a odmašťování** – Pro čištění a odmašťování se využívá působení nadzvukového vlnění v tekutém prostředí jako příčina akustické kavitace, tj. je vznik dutin v kapalině s jejich následnou implozí, čímž dochází k narušování okolního materiálu a tím k odlučování nečistot.

2.3.3 Biologické účinky ultrazvuku

Ultrazvuk, jakožto nosič energie, aktivně interaktuje s biologickým systémem. Jeho účinky se dělí na:

- primární – mechanické působení ultrazvukového pole,
- sekundární – působení transformované ultrazvukové energie (např. tepelná, chemická aj.).

Způsob interakce může být přímý, projevuje se během aplikace, nebo nepřímý, který je zprostředkován fyzikálně, chemicky nebo reflexně. Biologické účinky lze dále dělit podle mechanismu působení na kavitační, tepelné, mechanické a chemické. Specifičnost biologického působení ultrazvuku spočívá v komplexnosti jeho účinků, které podle velikosti dávky mohou být inhibiční (vratné i nevratné), ale i stimulační.

Ultrazvuk má na organizmy smrtelný vliv v případě vysoké intenzity a nižším kmitočtu. Účinek ultrazvuku se projevuje kavitací. Plasma a buněčné membrány prudce kmitají, v roztocích se tvoří bublinky, což vede k mechanickému poškození či roztržení buněčné stěny. U mikroorganismů ultrazvuk působí při působení po dostatečně dlouhou dobu inaktivaci. Negativní účinek ultrazvuku na organizmy je závislý na kmitočtu, amplitudě a délce působení.

Mimo jiné, ultrazvuk lze využít k odpuzování hmyzu a hlodavců. Zde se využívá rozdíl rozsahu slyšení člověka a odpuzovaných živočichů. Konkrétně ultrazvukový plašič vydává tón o frekvenci vyšší, než kterou slyší člověk, ale o takové, kterou slyší živočich, přičemž mu působí stres. Ultrazvuk může mít negativní vliv i na lidskou psychiku, a to v případě, že se jeho frekvence blíží k horní hranici slyšení.

Přenášení zvukové informace s využitím modulace ultrazvukového signálu využívá k demodulaci nelinearitu prostředí. Aby se tato nelinearita projevila, je požadována relativně vysoká intenzita zvuku. Úroveň akustického tlaku ultrazvuku je obvykle vyšší než 100 dB ve vzdálenosti 1 m v ose vyzařování elektroakustického měniče. Vystavení se ultrazvuku, který překračuje 140 dB a jeho frekvence se blíží slyšitelnému pásmu, tzn. 20 Hz – 40 kHz, může vyvolat projevy nevolnosti, bolestí hlavy, mdlob či únavy. I z tohoto důvodu se v komerčně dostupných zařízeních používá pracovní frekvence 60 kHz, při které nemá vystavení se ultrazvuku takovéto projevy [8] [9] [11].

Maximální bezpečná hodnota akustického tlaku ultrazvukového signálu pro komerční užití je stanovena organizací OSHA (Americká odborová organizace pro zdraví a bezpečnost) na 145 dB a zároveň musí být zajištěno, aby nemohlo dojít ke kontaktu s povrchem elektroakustického měniče, nebo se spojovacím médiem. Tato hranice je několikrát vyšší, než akustické tlaky dosahované AudioSpotlight systémy, podle čehož se dají považovat za bezpečné. Přesto si státy stanovují vlastní hygienické limity. Pro frekvenční rozsah 25 – 50 kHz je hygienický limit v Kanadě, Japonsku, Švédsku a dalších 110 dB. K tomuto limitu se připojuje také Mezinárodní společnost pro ochranu proti záření a Státní americký hygienický výbor pro průmysl [16].

V České republice je pro průmyslové aplikace maximální hodnota akustického tlaku ultrazvuku stanovena na 105 dB, u lékařských aplikací se zohledňují možné biologické účinky. Při terapeutických aplikacích je maximální výkon $30 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ a expoziční dobou 15 min. Maximální dávka v diagnostice je $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ při délce expozice do 500s. Celková dávka nesmí překročit $10^5 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ [10].

Zjištění vlivu UGNM na organizmy a zdraví člověka není předmětem zkoumání této práce, nicméně je na něj při případném uvádění zařízení do praxe je brát zřetel. Po ověření funkce přístroje by bylo vhodné zvýšit jeho pracovní kmitočet, právě z toho důvodu, že na organizmy působí především nižší ultrazvukové frekvence.

2.3.4 Teorie nelineární ultrazvukové akustiky

Rovnice popisující nelineární akustiku jsou složité a nemají celkové analytické řešení. Pro představu složitosti problému zařazuji i nejkompexnější modelovou rovnici k popisu nelineárních rovinných či kvazirovinných postupných vln reprezentovanou Chochlovovou-Zabolotské-Kuzněcovovou rovnicí (2.3-1) [16].

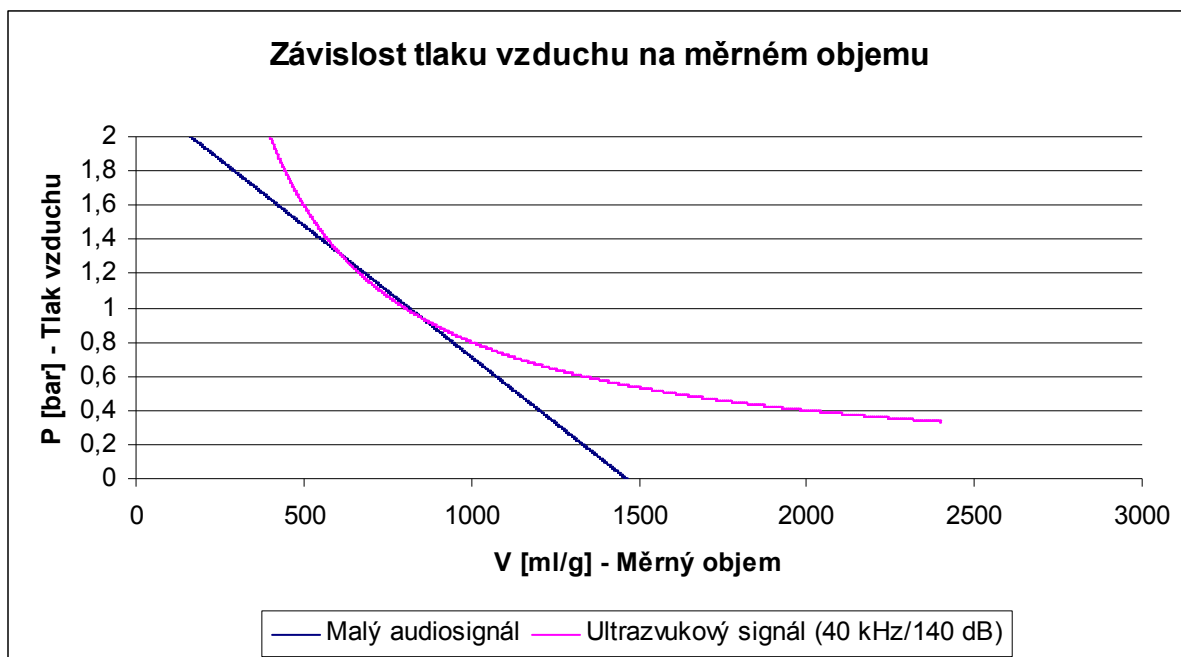
$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\beta}{c_0^2} v \cdot \frac{\partial v}{\partial \tau} - \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} \right) = \frac{c_0}{2} \Delta_{\perp} \int v d\tau \quad (2.3-1)$$

kde ρ_0 je hustota prostředí, c_0 rychlost šíření akustické vlny v lineárním přiblížení, v složka akustické rychlosti, x souřadnice v ose vyzařování, τ retardovaný čas, β koeficient nelinearity, b koeficient difúze ($\eta + 4\zeta/3 + \kappa(1/c_V - 1/c_p)$) a Δ_{\perp} Laplaceův operátor.

2.3.5 Autodemodulace

Autodemodulace je jev, ke kterému dochází průchodem amplitudově modulovaného zvukového signálu prostředím. Ve spojení s přenosem zvukových zpráv se jedná o prostředí vzduchové. K autodemodulaci dochází vlivem nelineární interakce nosné a modulační složky signálu [16].

Na projev nelinearity prostředí má vliv akustický tlak. Úroveň objem vzduchu se mění pomaleji s kladným tlakem, oproti změně objemu s odpovídajícím záporným tlakem. Pro audiosignály jsou změny tlaku natolik malé, že se změna závislost tlaku na měrném objemu jeví relativně lineární. Viz obr. 2.3-2.



Obr. 2.3-2: Graf závislosti tlaku vzduchu na měrném objemu [16]

První pokusy s vytvářením audiosignálů byly zaměřeny na vytváření rozdílové složky v prostředí, které bylo buzeno ze dvou nezávislých zdrojů ultrazvuku harmonického průběhu. Při budících frekvencích 40 - 49 kHz na jednom elektroakustickém měniči a stálých 40 kHz na druhém byl pozorován vznik rozdílové složky 1 – 9 kHz. Fakt, že dva ultrazvukové signály, tedy neslyšitelné pro lidské ucho, dokážou za určitých podmínek podnítit vznik slyšitelné složky, vedl k nárůstu zájmu o tento fenomén a dalšímu zkoumání v této oblasti.

V roce 1965 H. O. Berktaý provedl zjednodušenou analýzu akustického tlaku demodulovaného signálu, jejímž závěrem byl vztah popisující demodulovanou složku pomocí nosné ultrazvukové vlny a fyzikálního parametru. Tato rovnice (2.3-2) [16] popisující vzdálené pole říká, že slyšitelná složka je úměrná dvojí derivaci druhé mocniny obalové funkce, tedy budícímu signálu.

$$p_2(x, t) = K \cdot P_C^2 \cdot \frac{\partial^2 E^2(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.3-2)$$

kde $p_2(x, t)$ reprezentuje akustický tlak slyšitelné složky, K je fyzikální parametr, P_C akustický tlak ultrazvukové nosné a $E(x, t)$ je rovnice popisující budící signál (např. pro AM-DBS).

Pro potlačení THD demodulované složky je nutné na základě rovnice (2.3-2) budící signál předzpracovat. Předzpracování budícího signálu je opačnou operací k ději zkreslení výstupního signálu demodulací. To popisuje rovnice (2.3-3) [16].

$$E(\tau) = \sqrt{1 + m \iint g(\tau) d\tau^2} \quad (2.3-3)$$

kde $E(\tau)$ je obalová funkce modulovaného signálu, m hloubka modulace, τ je čas a $g(\tau)$ funkce popisující budící signál.

S předzpracováním budícího signálu je spojený požadavek na elektroakustické měniče, konkrétně na jejich širokou frekvenční odezvu.

Při návrhu zařízení UGNM je nutné zohlednit tyto fakta:

- maximální výkon autodemodulované složky je vždy menší, než výkon přenášený nosnou ultrazvukovou vlnou
- směrovost vyzařování je úměrná průměru elektroakustického měniče
- nižší hloubka modulace snižuje zkreslení
- větší hloubka modulace zvyšuje hlasitost autodemodulovaného signálu
- obalová křivka postranního pásma odpovídá druhé mocnině funkce popisující modulovaný tón
- výstupní objemová rychlost klesá o 12 dB při každém zvýšení ultrazvukové operace o oktávu
- směrovost autodemodulované složky je nepřímo úměrná směrovosti ultrazvukového svazku a přímo úměrná jeho délce

2.4 Elektroakustické měniče

Elektroakustickým měničem je zařízení, které převádí elektrickou energii na akustickou nebo naopak. Podle toho dále dělíme akustické měniče na reproduktory a mikrofony. Prostředkem k převodu mezi mechanickým vlněním a elektrickým signálem se běžně využívá membrána, nebo piezoelektrický krystal.

Hlavními parametry akustických měničů jsou:

- **frekvenční odezva** – vypovídá o přeneseném výkonu signálu pro danou frekvenci. Zpravidla se u ní sleduje rozsah a rovinnost průběhu,
- **vyzařovací charakteristika** – zobrazuje směr šíření zvuku z elektroakustického měniče,
- **citlivost** – průměrný akustický tlak v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1m,
- **účinnost** – poměr příkonu a vyzářeného výkonu,
- **maximální příkon** – udává maximální hodnoty proudu a napětí, aby nedošlo k poškození měniče. Často doplněn odporem vinutí u měničů s cívkou a dobou zatížení.

2.4.1 Dělení elektroakustických měničů

Elektroakustické měniče se podle principu převodu dají rozdělit na:

- **elektrodynamické** – základem těchto elektroakustických měničů je cívka a permanentní magnet. Cívkou umístěnou mezi pólovými nástavci magnetického obvodu protéká proud a cívka se v závislosti na něm pohybuje. Pohyb je dále přenášen na membránu, která působí zvukový rozruch. Reproduktory mohou být v provedení páskovém, plošném nebo s ohybovou vlnou. Horní mez jejich frekvenčního rozsahu se blíží k 20kHz. Jejich využití je zejména pro reprodukci slyšitelného zvuku. Především kvůli nízkému frekvenčnímu rozsahu jsou pro použití v UGNM nevhodné [15],

- **elektromagnetické** – dnes již nepříliš používaný princip. Jeho základem je membrána, např. z tenkého železného plechu, přitahovaná pevně umístěnou cívkou s jádrem, nebo malý magnet v poli budící cívky, který pohybuje s membránou. Výhodou je relativně jednoduchá konstrukce, nedostatkem pak velké zkreslení a malý frekvenční rozsah,

- **magnetostrikční** – využívají toho, že se některé feromagnetické látky dokážou deformovat v magnetické poli. Deformace materiálu je přímo úměrná velikosti řídicího proudu protékajícího magnetickým obvodem budící magnetické pole. Tento typ elektroakustických měničů lze použít pro reprodukci ultrazvuku,

- **elektrostatické** – tyto měniče jsou provedeny jako deskový kondenzátor s jednou z elektrod pohyblivou. V závislosti na napětí připojeného signálu pak pohyblivá elektroda mění svoji polohu a působí zvukový rozruch. Frekvenční rozsah je shora omezen 20kHz,

- **piezoelektrické** – piezoelektrické měniče pracují na základě piezoelektrického jevu, tzn. využívají změny rozměrů krystalu úměrně na přiváděném napětí. Takto vyvolané kmitání krystalu se dále šíří prostředím jako zvuk. Mají velký frekvenční rozsah použití, i pro reprodukci ultrazvukového vlnění.

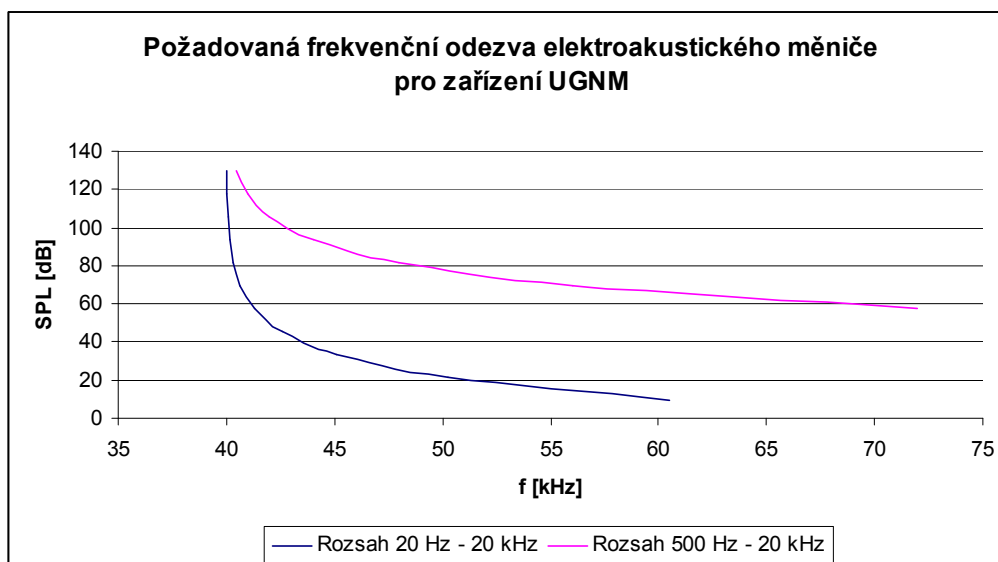
Z výše uvedených elektroakustických měničů mají pro reprodukci ultrazvukových signálů význam pouze piezoelektrický a magnetostrikční, ve kterých dochází k přeměně energie na úrovni molekul, a to prostřednictvím elektromagnetických a elastických vazeb. To je velkou výhodou oproti elektroakustickým měničům využívajících k přeměně energie z elektrické na akustickou membránu, která při zvyšování přenášené frekvence naráží na své fyzikální limity daleko dříve.

2.4.2 Technologie elektroakustických měničů pro UGNM

Ideální elektroakustický měnič pro reprodukci modulovaného ultrazvukového signálu má frekvenční rozsah od 20 kHz do nekonečna, ostrou vyzářovací charakteristiku a neomezenou vstupní kompatibilitu. To však není fyzicky možné.

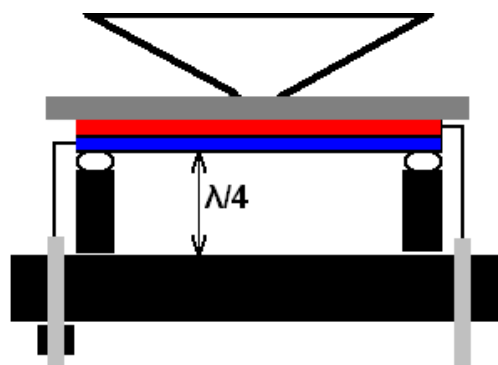
Jednou ze skutečností, která musí být vzata v potaz, je pokles intenzity zvuku se vzdáleností. Pro sférické vlny je to přibližně 6 dB každé zdvojnásobení vzdálenosti od zdroje. Řešením je použití zdroje rovinných vln, které jsou při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 80% tlumeny o 3,1 dB / 3 m pro signál o frekvenci 40 kHz. Se zvyšujícím se kmitočtem útlum narůstá, proto je vhodné používat nižší pracovní frekvenci, což je nevhodné z hygienického hlediska.

Pro zajištění stejné úrovně hlasitosti demodulovaného tónu je optimální sklon frekvenční odezvy elektroakustického měniče 12,04 dB/oktáva. Konkrétně, budeme-li chtít reprodukovat tóny 1 a 2 kHz modulováním nosné s frekvencí 40 kHz a požadujeme-li jejich stejnou hlasitost na výstupu, vyzářené signály jsou nosná a tón 41 kHz s úrovní 120 dB a tón 42 kHz s úrovní 107,96 dB. Pro reprodukci zvuku frekvenčního rozsahu slyšitelného pásma (20 Hz až 20 kHz) by byl zapotřebí elektroakustický měnič s rozdílem úrovní 120 dB na rozsahu 40 – 60 kHz. Při frekvenčním rozsahu reprodukováného zvuku na 0,5 až 20 kHz stačí dosáhnout rozdílu pouze 56 dB, což je realizovatelné. Srovnání frekvenční odezvy měničů je znázorněno na obrázku 2.4-1 [16].



Obr. 2.4-1: Požadovaná frekvenční odezva měniče při různém frekvenčním rozsahu modulačního signálu

Do roku 1998 se používaly **kónické piezoelektrické měniče** tvořené dvouvrstevným piezoelektrickým měničem v jehož středu byl umístěn ozvučný kužel s průměrem 8 mm, viz obr. 2.4-2. Pro dosažení vyššího výstupního akustického tlaku je vhodná umístit piezoelektrický měnič do výšky odpovídající vzdálenosti $\lambda/4$ pracovní frekvence od ozvučnice. Připojením napětí na vstup se červený element protáhne, modrý smrští a tím dojde k ohybu. To samé se děje připojením napětí záporné polarizace, avšak na druhou stranu. Pokud budeme měnič budit střídavým napětím, bude generován tón. Největší rozkmit je právě ve středu měniče, kde je umístěn ozvučný kužel. Frekvenční odezva měniče tohoto provedení odpovídá požadavkům přibližně 10 kHz nad rezonanční kmitočet piezoelektrických elementů. Efektivita je pro reprodukci modulovaného ultrazvukového svazku dostačující. Nevýhodou jsou malé rozměry, takže k vytvoření dostačujícího akustického pole s odpovídající šířkou svazku je zapotřebí okolo stovky těchto měničů. K zásadním nevýhodám patří křehkost piezoelektrických elementů, vznik subharmonických signálů a tím výraznému nárůstu zkreslení a praskání přípoje ozvučného kužele při vyšším zatížení.



Obr. 2.4-2: Kónický piezoelektrický elektroakustický měnič [16]

Vyřešení těchto problémů přišlo s nástupem **piezoelektrických fóliových parametrických měničů**. Nejvíce účinným piezoelektrickým materiálem pro fóliové parametrické měniče je PVDF (polyvinylidenefluorid), což je látka běžně užívaná v průmyslových a chemických aplikacích. Aby byl tento materiál použitelný pro ultrazvukovou techniku, je zapotřebí jej polarizovat nebo aktivovat. První metodou získáváme uniaxiální materiál – připojením napětí se mění rozměry pouze ve směru jedné osy, druhou pak materiál biaxiální – materiál se připojením na napětí roztahuje/smršťuje ve dvou svých osách. PVDF fólie pro parametrické měniče je biaxiální. K expanzi a koncentraci materiálu dochází v osách X a/nebo Y roviny povrchu. Pohyb v ose Z, tzn. kolmo k povrchu měniče, není efektivní, pakliže fólie není vhodně stlačena či zakřivena. Vytvoření vodivých elektrod se provádí pokovením celého povrchu z obou stran.

Samotný měnič je uspořádán následujícím způsobem (Obr. 2.4-3). Na kovovém plátu s polem vyvrtaných otvorů je položena PVDF fólie. Tím se vytvoří pole elektroakustických měničů o průměru odpovídajícím průměru otvorů. Ve spodní části kovového plátu je vytvořeno vakuum pro zajištění jednotného tlaku na každý element měniče. Podtlak je také důležitý pro zamezení vzniku zpětných vln. Rezonanční frekvence měniče korespondující s pracovní frekvencí UGNM je nastavena velikostí otvorů v nosném kovovém plátu a rozdílovým tlakem. Například pro nosný signál s frekvencí 40 kHz jsou parametry $\phi = 3,556 \text{ mm}$, $\Delta p = 101,35 \text{ kPa}$.



Obr. 2.4-3: Fóliový piezoelektrický parametrický měnič [16]

Z důvodu flexibility kalibrace fóliových piezoelektrických měničů je možné dosáhnout rezonančních frekvencí od 25 kHz do 100 kHz, případně až 500 kHz. Dosažitelný akustický tlak se pohybuje okolo 140 dB, vstupní napětí měniče okolo 40 V_{pk-pk} . Tloušťka použité PVDF fólie je 20 - 30 μm .

Výhody piezoelektrického fóliového měniče:

- dosahuje velmi vysoké efektivity na rezonanční (pracovní) frekvenci,
- vhodná frekvenční odezva potřebná reprodukci audiosignálu,
- umožňuje vhodnou kalibrací nastavit vlastnosti pro různé nosné frekvence i různé typy modulátorů,
- eliminuje přenos slyšitelného signálu,
- nízké zkreslení,
- vysoká účinnost (>140 dB).

Pro doplnění, běžně požadovaná spolehlivost elektroakustického měniče je 5 – 10 let při zátěži >140 dB (20 μ Pa) v rezonanci [16].

Při realizaci UGNM je elektroakustický měnič nejnákladnější a nejvíce technologicky náročnou částí. Jeho konstrukčním řešením jsem se v této práci nezabýval. Nejvhodnějším provedením je použití piezoelektrických fóliových měničů.

2.4.3 Zvukovod

Pokud je třeba, lze šíření zvuku ze zdroje ovlivnit. Využívá se zvukovodu, což je zařízení, které slouží k účelnému vedení zvuku. Je možný použít pro zvýšení citlivosti, korekci fázové charakteristiky nebo pro úpravu směrové charakteristiky elektroakustického měniče. Jeho průřez může být buď s konstantním průřezem, což se používá např. pro měření akustické impedance materiálů, nebo plynule proměnlivého průřezu, který vede k výkonovému uzpůsobení akustického zdroje a prostředí. Podle tvaru se zvukovody dělí na konstantního průřezu, válcové, kónické, parabolické a exponenciální.

Stěny zvukovodu musí být pevné, aby svými kmity nezaváděly parazitní zvukové pole. Obvykle bývají rotačně symetrické, v případě větších zvukovodů pro přenos nízkých kmitočtů mohou být čtvercového průřezu. Osa zvukovodu se obvykle používá přímá, u speciálních aplikací se používá i zvukovod několikanásobně stočený [7].

V případě, že by byla naměřená směrovost UGNM při použití navrhnutého akustického měniče nedostačující, je možné ji zvýšit použitím vhodně přídavným zvukovodem typu horn, případně parabolou pro odraz zvuku. Primárním řešením pro dosažení vysoké směrovosti elektroakustického měniče je zvolit takový typ, který produkuje rovinné zvukové vlny, tedy takový, jehož rozměry jsou výrazně větší, než vlnová délka pracovního kmitočtu.

2.5 Zařízení využívající nelinearity vzduchového prostředí

V současné době je na světovém trhu několik zařízení využívajících ultrazvukové modulace pro přenos informací ve spojení s autodemulací. Zařízení pro reprodukci hudby a mluveného slova s velmi podobnými vlastnostmi jsou **AudioBeam** – výrobek Německé firmy Sennheiser, **Audio Spotlight** – produkt americké firmy Holosonics a **HyperSonic Sound** od společnosti American Technology Corporation.

Méně obvyklé je zařízení **Long Range Acoustic Device (LRAD)**, což je neletální zbraň využívající směrového šíření modulovaného ultrazvukového svazku a dosahovaných vysokých akustických tlaků k paralyzaci osob od fi. American Technology Corporation.

2.5.1 Sluchový vjem autodemulovaného akustického signálu

Při reprodukci zvuku zařízením AudioSpotlight se využívá jeho směrového šíření. Používá se především pro ozvučení konkrétního místa v prostoru, a to buď tak, že je ozařován konkrétní předmět, nebo část prostranství. Při ozařování objektu se tento objekt chová jako zdroj zvuku. Lze také využít odrazu ultrazvukového svazku pro jeho další distribuci. Ozvučením izolované části prostoru, například tanečního parketu, jsou ultrazvukovým svazkem ozařovány přímo osoby. V tomto případě je ozářeným objektem v podstatě hlava posluchače, která se chová jako virtuální zdroj zvuku. Pravý zdroj je přes to rozpoznatelný.

Reprodukovaná hudba postrádá hluboké tóny, což je dáno záměrným zmenšením frekvenčního rozsahu přenášeného zvuku, kvůli realizaci elektroakustického měniče. Dále jsou zvýrazněny tóny s kmitočtem blízkým 4,7 kHz. Žádné další zkreslení jsem nepozoroval.

2.6 Amplitudová modulace

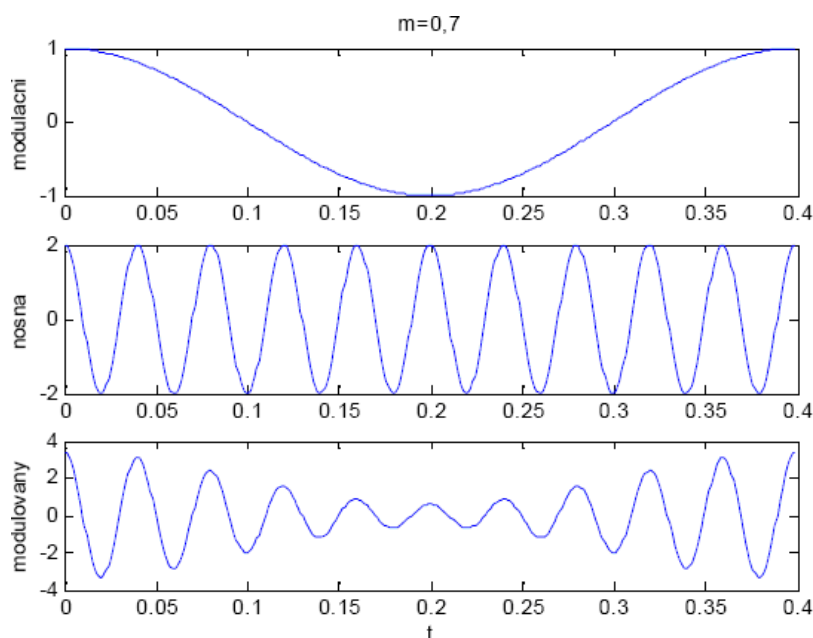
Modulace je děj, při kterém se parametr jednoho signálu – nosného; ovlivňuje parametrem signálu druhého - modulačního. Harmonický signál je popsán funkcí [3]:

$$s_c(t) = S_c \cdot \cos(\omega_c \cdot t + \varphi_c) \quad (2.6-1)$$

Amplitudovou modulací se pak rozumí řízení amplitudy nosného signálu S_c , který má zpravidla vyšší kmitočet než signál modulační. Amplitudově modulovaný signál lze popsat rovnicí [3]:

$$s_c(t) = [S_c + \Delta S f(t)] \cdot \cos \omega_c t = [1 + m f(t)] \cdot \cos \omega_c t \quad (2.6-2)$$

Proměnné v obou rovnicích: S_c je amplituda nosného signálu, ΔS amplitudový zdvih, ω_c úhlová frekvence nosného signálu, t je čas, $f(t)$ funkce popisující modulační signál a m hloubka modulace.



Obr. 2.6-1: Ukázka AM modulace [3]

2.6.1 Hloubka modulace

Ukazuje míru ovlivnění amplitudy nosného signálu signálem modulačním. Nabývá hodnot od nuly do jedné, lze vyjádřit i v procentech. Lze vypočítat ze vztahu [3]:

$$m = \frac{\Delta S}{S_c} \quad (2.6-3)$$

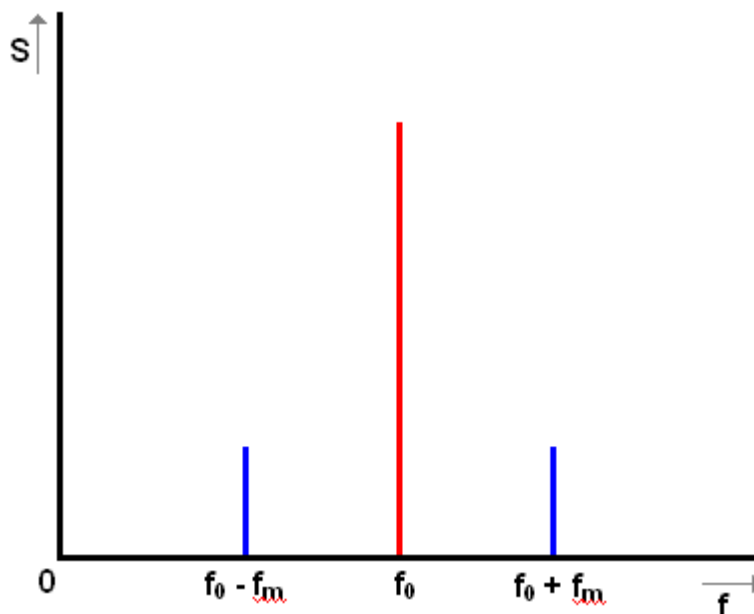
2.6.2 Spektrum modulovaného signálu

V případě, že je modulovaný signál harmonický, bude se spektrum modulovaného signálu skládat ze tří spektrálních čar, přičemž jednu bude tvořit nosný signál a zbylé dvě budou

tvořeny modulačním signálem na kmitočtech součtu a rozdílu frekvencí nosného a modulovaného signálu.

Pokud je modulační signál obecný, lze jej rozložit na jednotlivé harmonické složky a i výsledné spektrum amplitudově modulovaného signálu bude složeno ze spekter vytvořených podle výše uvedeného pravidla pro každou složku. Šířka pásma pak odpovídá dvojnásobku maximální frekvenci modulačního signálu.

Při vyšším nastaveném výkonu UGNM je třeba brát zřetel na možnost aliasingu a zvážit nutnost použití filtru pásmová propust za modulátorem [3].



Obr. 2.6-1: Spektrum amplitudově modulovaného signálu

2.6.3 AM modulátory

AM modulátorem se rozumí zařízení, jehož výstupem je amplitudově modulovaný vstupní signál. Základním principem je ovlivňování přenosu nosného signálu modulačním signálem.

Toho lze například dosáhnout použijeme-li:

- modulátor změnou předpětí,
- modulátor změnou napájecího napětí,
- operační zesilovač se zesílením řízeným napětím,
- modifikované zapojení tranzistorového zesilovače SE,
- integrovaný AM modulátor.

Pro UGNM jsem se rozhodl využít funkce integrovaného obvodu XR2206. Pokud by nebylo možné ji využít spolu s funkcí generátoru harmonického průběhu, což je další funkce tohoto IO.

Kvůli úspoře energie na straně vysílače je možné částečně nebo úplně potlačit postraní pásma a nosný kmitočet. Takto modifikované signály se pak označují:

- AM-DSB (double side band) – signál s potlačeným nosným kmitočtem
- AM-SSB (single side band) – signál s potlačeným nosným kmitočtem a jedním postraním pásmem

2.6.4 Generátory harmonického signálu

Generátor harmonického signálu (oscilátor) je takové zařízení, jehož výstupem je harmonický signál s danou amplitudou a frekvencí. Hlavními požadavky na oscilátoru jsou minimum amplitudových a fázových šumů, kmitočtová stabilita a spektrální čistota. Poměr výkonu nosné vlny a výkonu obsaženého v parazitních složkách vstupního signálu se nazývá SFDR. U oscilátoru je pro tento parametr požadována co největší hodnota.

Generátor harmonického signálu se skládá z řídicího obvodu (kmitavý okruh LC, fázovací členek RC) a automatického regulátoru, tzn. obvodu pro vhodnou distribuci energie ze zdroje napětí řídicímu obvodu.

V případě zpětnovazebních generátorů je pro rozkmitání nutno splnit podmínky amplitudovou (2.6-4) a fázovou (2.6-5) [4].

$$\begin{array}{ll} A_U \cdot A_F = 1 & \varphi_U + \varphi_F = k \cdot 360^\circ \\ A_U + A_F = 0dB & k = 1,2,3... \end{array} \quad \begin{array}{l} (2.6-4) \\ (2.6-5) \end{array}$$

Z těchto podmínek plyne nutnost stabilizace amplitudy generátoru. Problematické může být zajistit stabilizaci pro různé teplotní podmínky. To se zpravidla řeší zařazením prvků s vhodnou teplotní závislostí nebo elektronické stabilizace napětí do zpětní vazby oscilátoru.

Generátory harmonického signálu lze dělit podle principu na oscilátory:

S krystalovým rezonátorem – Jako řídicí člen oscilátoru je krystalový výbrus, který se chová jako mechanický rezonátor. Vlastní frekvence je daná geometrickými rozměry krystalu. Kmitočet oscilátoru a jeho teplotní závislost se odvíjí od řezu krystalu. Při vhodném řezu lze dosáhnout vysoké teplotní stability a malého šumu. Generátor s krystalovým rezonátorem je možné ladit pouze na harmonické násobky rezonančního kmitočtu krystalu,

další doladění se pohybuje do 0,2% rezonanční frekvence. Pomocí oscilátorů s krystalovým rezonátorem je možné generovat signál o frekvencích řádově jednotky GHz.

S pásmovou propustí ve zpětné vazbě – Takovýto oscilátor se samovolně rozkmitá na základě šumu, ze kterého je filtrem ve zpětné vazbě selektována složka s požadovaným kmitočtem. Filtr může být realizován např. jako Wienův článek, nebo rezonanční obvod, volí se podle požadavků na jakost. Změna kmitočtu výstupního signálu se provádí pomocí nastavitelných prvků. Filtry jsou zpravidla tvořeny cívkami nebo kondenzátory a pro změnu kmitočtu, který filtr propouští, je třeba současně měnit parametry více součástí. Proto realizace takto laditelného obvodu může být problematická, a to z důvodu buď samotného konstrukčního uspořádání, nebo omezení rozsahu nastavení.

Monolitické – Generátory harmonického signálu jsou vyráběny i jako integrované obvody (IO). Parametry takových to generátorů se dosti liší, jejich kvalita se odvíjí od ceny. Nižší řady IO nedosahují vysokého SFDR, obvykle to způsobuje ryze číslicové zpracování, nebo nekvalitní tvarovací obvody. Výhodou použití monolitického generátoru jsou vyřešené konstrukční problémy a stabilita jeho parametrů. Limitující může být neumožnění širšího uživatelského nastavení [4].

V návrhu UGNM jsem pro generování nosného signálu zvolil použití monolitického generátoru XR2206. Hlavními důvody byly možnost nastavení amplitudy a frekvence výstupního signálu v požadovaném rozsahu a úspora času použitím hotového funkčního bloku.

3 Návrh zařízení

UGNM využívá směrového šíření ultrazvuku a jeho autodemulace ve vzduchovém prostředí k přenosu nízkofrekvenčního signálu. Pro realizaci je třeba amplitudově namodulovat nízkofrekvenční signál, s kmitočty řádově jednotek kilohertz, na nosný o frekvenci nad oblastí slyšitelnosti, tj. >20 kHz. Aby nedošlo k překrývání spektra modulovaného signálu spektrem, které je slyšitelné pro lidské ucho, je třeba dodržet podmínku:

$$f_0 - f_m > 20 \text{ kHz} \quad (3-1)$$

kde f_0 je frekvence nosného signálu a f_m frekvence modulačního signálu.

3.1 Požadavky na zařízení

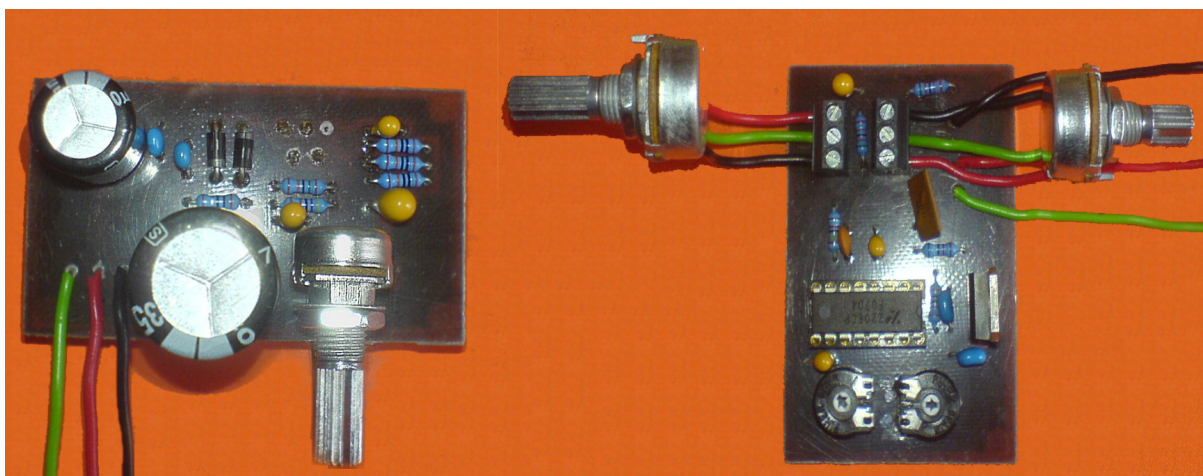
Napájení – Zařízení bude napájeno stejnosměrným napětím 12 V

Výstupní výkon – 15 W

Zpracování vstupního signálu – U vstupního signálu je předpokládána telefonní kvalita, z čehož se odvíjí jeho frekvence 300 – 3400 Hz. Zdrojem signálu může být buď mikrofon, nebo jiné zařízení.

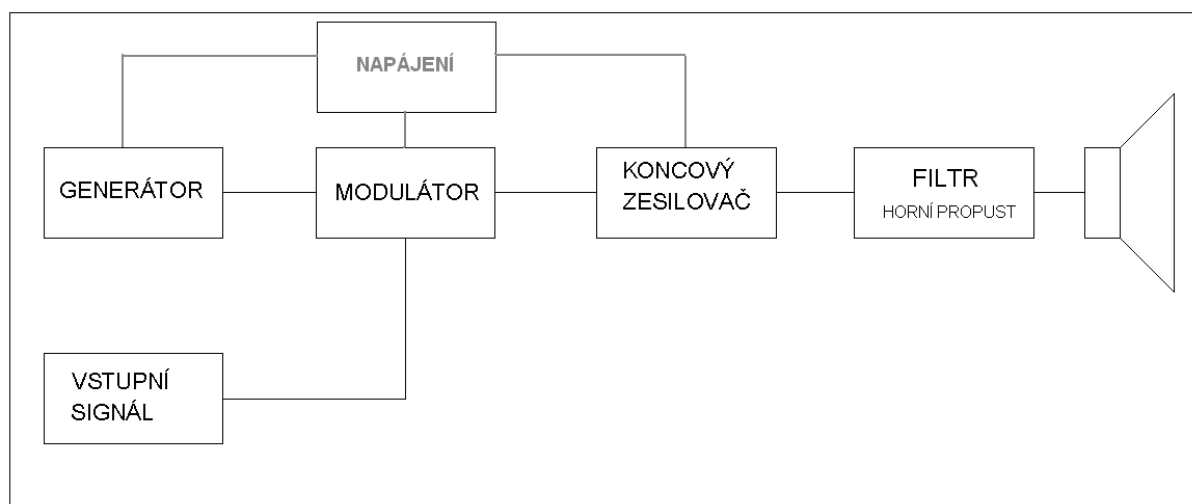
Nosný signál – U UGNM je požadován frekvenční rozsah nosného signálu 10 – 30 kHz.

Dalšími požadavky jsou možnost nastavení hlasitosti, frekvence nosného signálu, možnost připojení mikrofону nebo jiného zdroje modulačního signálu.



Obr. 3.1-1: Zkušební vzorek zařízení UGNM

3.2 Moduly zařízení



Obr. 3.2-1: Blokové schéma UGNM

3.2.1 Vstupní signál

V prvotní fázi konstrukce a měření charakteristik UGNM je zdrojem vstupního, modulačního, signálu laboratorní zdroj s možností nastavení amplitudy, tedy bez nutnosti korekce signálu na vstupu. V případě použití jiného zařízení, např. přehrávače, nebo použití mikrofonu jako zdroje modulačního signálu, je nutné použít příslušné vstupní obvody. Pro zajištění vysoké vstupní impedance je třeba na vstup zařadit sledovač, případně neinvertující zesilovač. Pokud by byla požadována možnost dalšího nastavení, je možné zařadit korekční zesilovač.

Protože v době zadání projektu jsem neměl dostatečné znalosti z nelineární akustiky, v návrhu jsem nezohlednil nutnost předzpracování vstupního signálu pro snížení zkreslení po autodemulaci. Možným řešením je zařazení AD převodníku, mikrokontroléru realizujícího příslušnou matematickou operaci a zpětný převod na analogový signál pomocí DA převodníku.

3.2.2 Nastavitelný generátor harmonického signálu s AM modulací

Jako primární modulátor jsem zvolil monolitický generátor funkcí XR2206, který má možnost přímo připojit modulační signál, přičemž nosný signál je tvořený výstupním signálem generátoru.

Výpočty součástek pro generátor harmonického průběhu:

Výstupní frekvence monolitického generátoru XR2206 je dána vztahem [12]:

$$F = \frac{1}{R \cdot C} \rightarrow R = \frac{1}{F \cdot C} \quad (3.2-1)$$

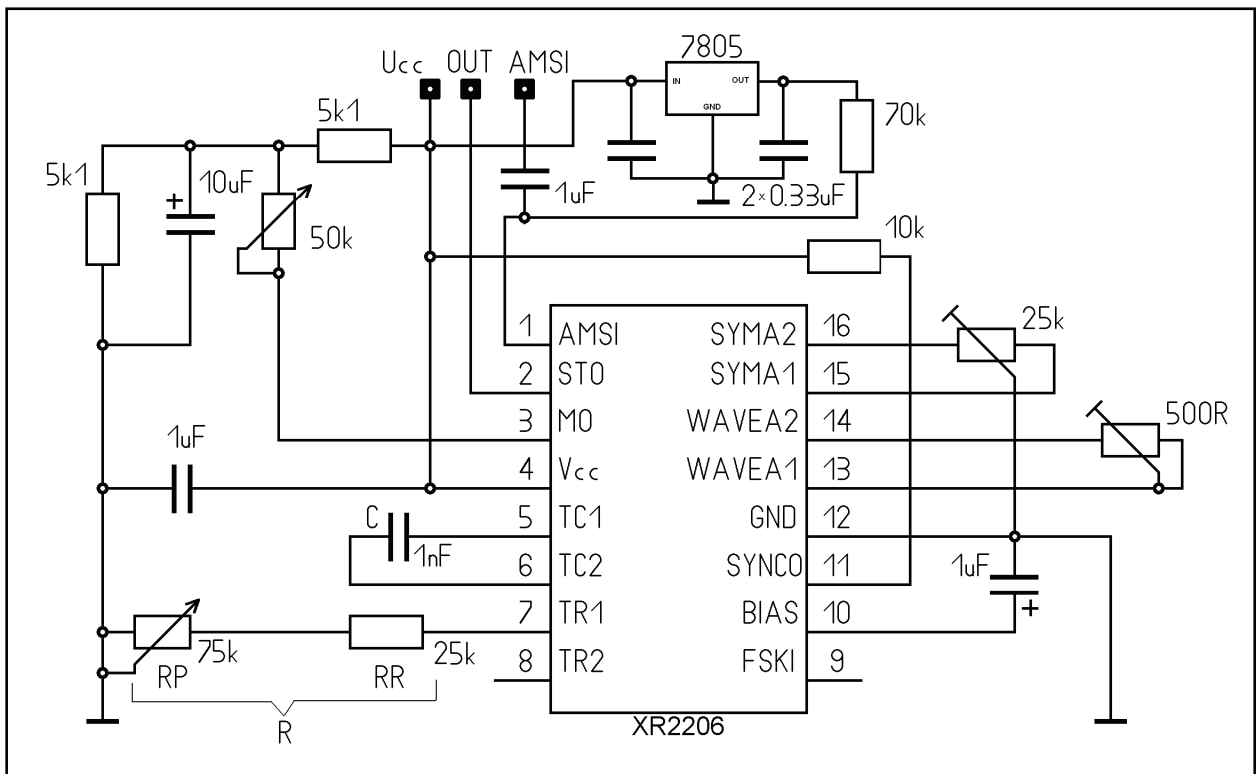
Kondenzátor volím 1nF, interval výstupního kmitočtu pak <10,40> kHz

$$10 \text{ kHz} : R = \frac{1}{10 \text{ kHz} \cdot 1 \text{ nF}} = 100 \text{ k}\Omega \quad (3.2-2)$$

$$40 \text{ kHz} : R = \frac{1}{40 \text{ kHz} \cdot 1 \text{ nF}} = 25 \text{ k}\Omega$$

Podle minimálního a maximálního vypočteného odporu R volím řešení sériového zapojení rezistoru R_R a potenciometru R_P , kde R_R má minimální možnou hodnotu, tedy 25 k Ω , a R_P je doplňkem do maximální hodnoty R, tzn. 75 k Ω . Pro R_R a R_P platí vztah [12]:

$$R_R + R_P = R \quad (3.2-3)$$



Obr. 3.2-2: Schéma nastavitelného generátoru harmonického napětí a AM modulátor s IO XR2206

Tab. 3.2-1: Popis jednotlivých pinů IO XR2206 [12]

Pin	Zkratka	In/Out	Popis
1	AMSI	I	Vstup modulovacího kmitočtu pro amplitudovou modulaci
2	STO	O	Výstup sinusového nebo trojúhelníkového signálu
3	MO	O	Multiplikační výstup
4	Vcc		Napájení
5	TC1	I	Vstup časovacího kondenzátoru 1
6	TC2	I	Vstup časovacího kondenzátoru 2
7	TR1	O	Výstup časovacího rezistoru 1
8	TR2	O	Výstup časovacího rezistoru 2
9	FSKI	I	Vstup Frequency Shift Keying
10	BIAS	O	Interní napěťová reference
11	SYNCO	O	Synchronizační výstup
12	GND		Zemnění
13	WAVEA1	I	Nastavení tvaru výstupní vlny (sinus,trojúhelník) 1
14	WAVEA2	I	Nastavení tvaru výstupní vlny (sinus,trojúhelník) 1
15	SYMA1	I	Nastavení vlnové symetrie 1
16	SYMA2	I	Nastavení vlnové symetrie 2

Pro zajištění symetrie modulování je nutné, podle datasheetu, přivést na vstup modulačního signálu předpětí odpovídající $U_{CC}/4$, tedy 3 V. To jsem vyřešil zařazením napěťové reference 7805 a napěťového děliče tvořeného odpory $R_1 = 70 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, který je vstupním odporem pinu AMSI. Modulační signál je připojen přes blokovací kondenzátor $1 \mu\text{F}$ [12].

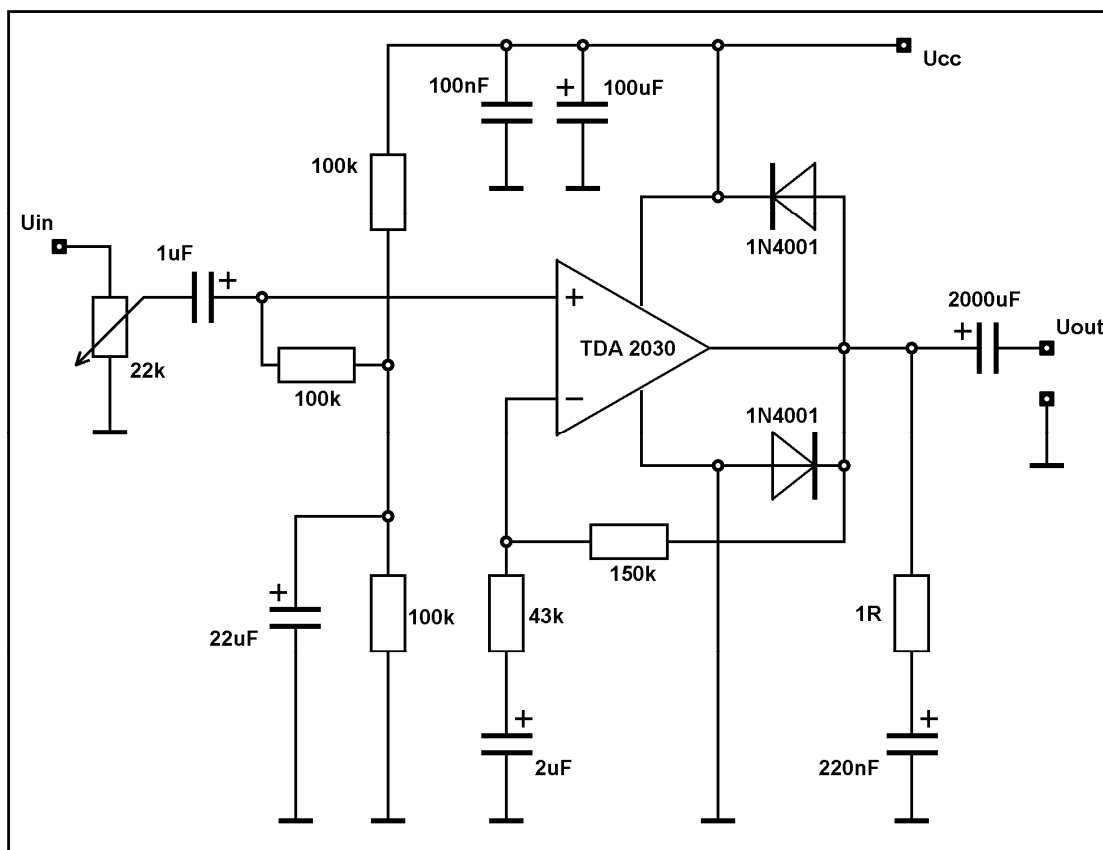
$$U_{OUT} = U_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow R_1 = \frac{U_{IN} \cdot R_2}{U_{OUT}} - R_2$$

$$R_1 = \frac{5 \cdot 100k}{3} - 100k \doteq 70 \text{ k}\Omega \quad (3.2-4)$$

3.2.3 Koncový zesilovač

Pro zvýšení příkonu elektroakustického měniče a zároveň minimalizování zatížení modulačního členu je nutné na výstup UGNM zařadit koncový zesilovač. Zesilovač lze sestavit z diskretních součástí, nebo použít integrovaný operační zesilovač (OZ). Na základě požadovaného výstupního výkonu a úspory prostoru v zařízení jsem se rozhodl použít integrovaný operační zesilovač TDA2030.

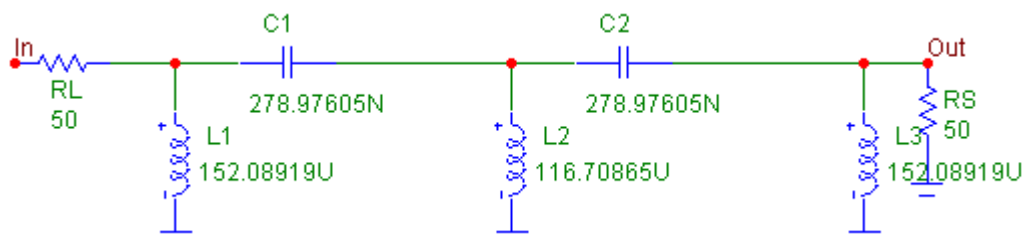
Existují dvě základní zapojení pro použití OZ jako zesilovače, a to invertující a neinvertující. Aby nedocházelo k zatížení modulátoru, volil jsem neinvertující zapojení dle datasheetu s možností nastavení zesílení trimrem $22 \text{ k}\Omega$.



Obr. 3.2-3: Schéma zapojení koncového zesilovače s operačním zesilovačem TDA 2030 [18]

3.2.4 Výstupní filtr

Aby nedocházelo k přenášení rušení s frekvencí ležící ve slyšitelném pásmu na výstup, zařadil jsem před elektroakustický měnič filtr horní propust. Ten jsem navrhl s pomocí průvodce návrhem pasivních filtrů programu MicroCap 6.0. Z možných provedení nejvíce vyhovoval Chebyshevův filtr (Obr. 3.2-4), pro svoji strmost a počet použitých součástek. Požadavky na filtr jsou $f_c = 15 \text{ kHz}$, $f_s = 10 \text{ kHz}$ s útlumem 30 dB. Tyto požadavky jsou splněny i v případě sestavení pomocí nejbližších reálných součástek řady z řad E6 a E12.

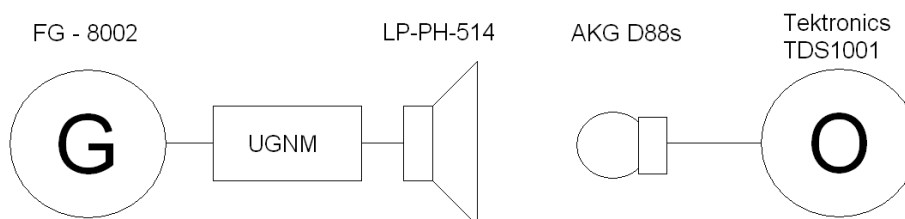


Obr. 3.2-4: Chebyshevův pasivní filtr

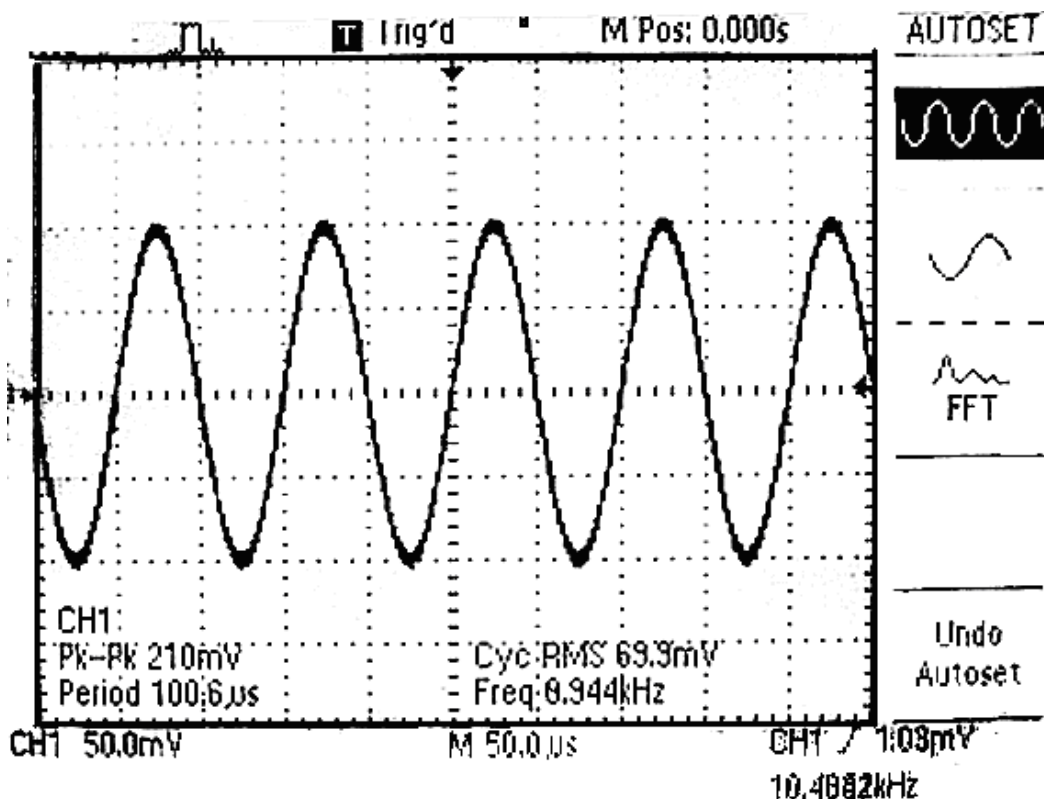
4 Měření

4.1 Výskyt demodulované složky na výstupu zařízení UGNM

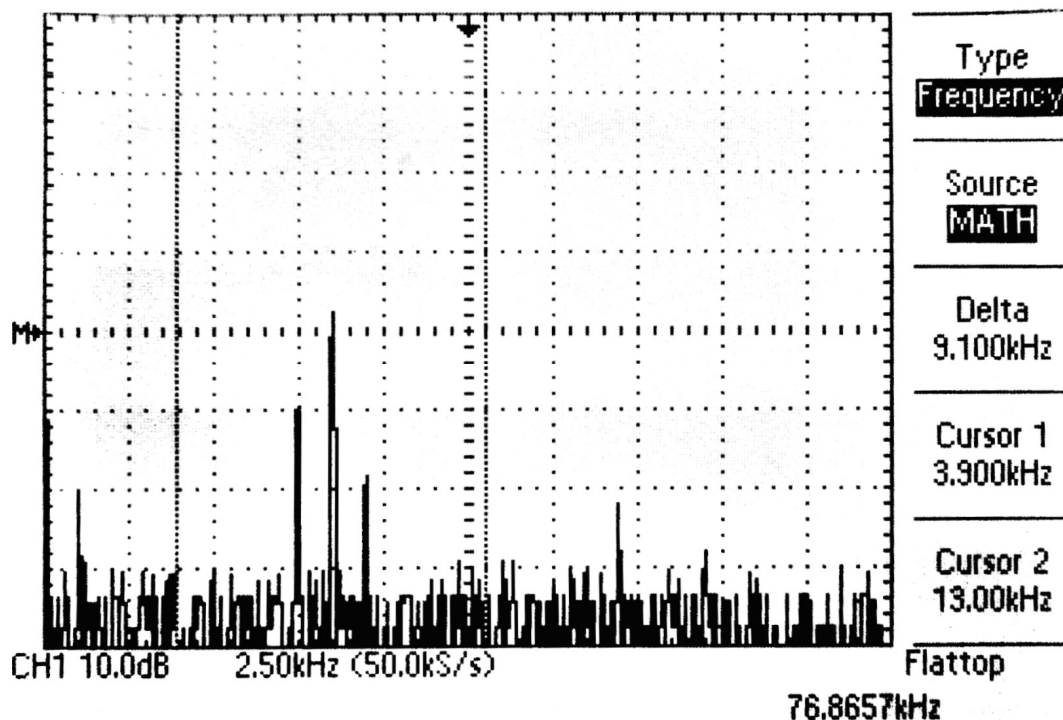
Cílem měření na mnou navrženém zařízení UGNM bylo ověření existence autodemodulovaného signálu při modulování jediným tónem. Jako zdroj modulačního napětí jsem použil funkční generátor. Akustický tlak jsem snímal mikrofonom AKG D88s bez dalšího zesílení jeho výstupního napětí. Měření probíhalo pouze pro nosný kmitočet do frekvence 17 kHz, z důvodu nevhodné frekvenční odezvy použitého elektroakustického měniče. Parametry měření byly nastaveny: modulační signál s amplitudou $210 \text{ mV}_{\text{PK-PK}}/1 \text{ kHz}$, hloubka modulace 0,7 a frekvence nosného signálu 10 -17 kHz. Měřicí soustava byla uspořádána dle následujícího obrázku.



Obr. 4.1-1: Uspořádání měřicí soustavy



Obr. 4.1-2: Časový průběh modulačního signálu



Obr. 4.1-3: Spektrum signálu zaznamenaného měřicím mikrofonom

Použité měřicí přístroje:

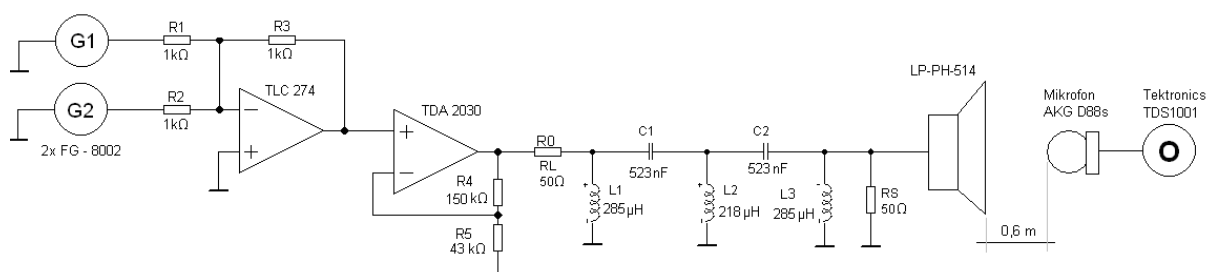
- funkční generátor - Digital Co.Ltd. Korea, model FG – 8002,
- osciloskop Tektronics TDS1001.

Na obr. 5.1-3 jsou patrné zázněje s frekvencí odpovídající rozdílu frekvencí nosného signálu a postranního pásma. Při změně frekvence nosné zůstává frekvence zázněje stejná, tzn. chová se stejně jako očekávaný autodemodulovaný signál. Po proměření spektra signálu před elektroakustickým měničem, jsem vzniku autodemodulované složky vyvrátil, neboť se zázněj objevuje již před vyzářením, s největší pravděpodobností se jedná o elektromagnetické rušení. Tento fakt potvrzuje i to, že při zvýšení útlumu filtru před reproduktorem byly naměřené zázněje téměř nezaznamatelné.

Tímto měřením jsem ověřil správnou funkci zařízení UGNM. Vznik autodemodulovaného signálu se nepodařilo potvrdit. Příčinou je malý akustický tlak vyzářeného signálu, nízká pracovní frekvence, která byla limitována elektroakustickým měničem. Použitý elektroakustický měnič není vhodný pro reprodukci modulovaného ultrazvukového signálu pro nedostačující frekvenční odezvu a jeho provedení snižuje směrovost vyzářování. Měření potvrdilo, že se vzduch pro malé signály chová lineárně. (Pozn. Použité obrázky jsou upravené snímky obrazovky osciloskopu)

4.2 Vznik rozdílové složky dvou akustických vln

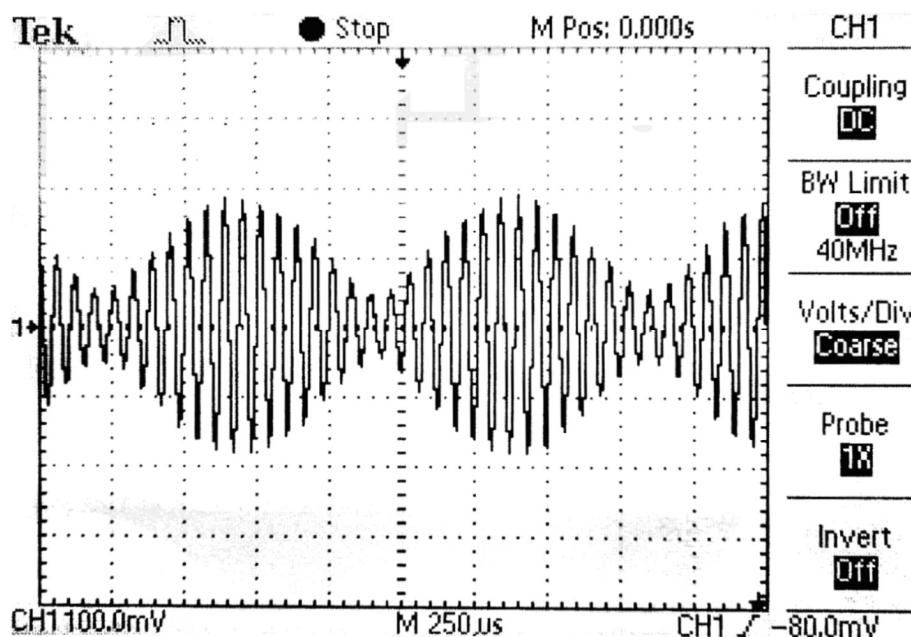
Záměrem tohoto experimentu bylo zjistit, zda se po sečtení dvou harmonických signálů a jejich následné reprodukci jediným reproduktorem objeví i jejich rozdílová složka. Tento pokus měl zároveň zjistit, zda je vhodnější použít pro UGNM AM-SSB modulátor, oproti AM-DSB použitým při předchozím měření. Sečtením harmonických signálů se totiž jejich součet ve frekvenční oblasti jeví jako spektrum amplitudové modulační s jedním postranním pásmem, přičemž lze jeden signál považovat za nosný, rozdíl signálů pak za modulační. U vstupních signálů byly nastavovány parametry tak, aby se rozdíl jejich frekvencí pohyboval od 1 do 8 kHz a amplituda pro fiktivní hloubku modulační 0,3, 0,5, 0,8 a 1. Rozmezí frekvencí vstupních signálů jsem zvolil 9 – 17 kHz. Abych předešel přenosu rušivého signálu na vstup reproduktoru, použil jsem Chebyshevův filtr s $f_c = 8000$ kHz a útlumem 30 dB.



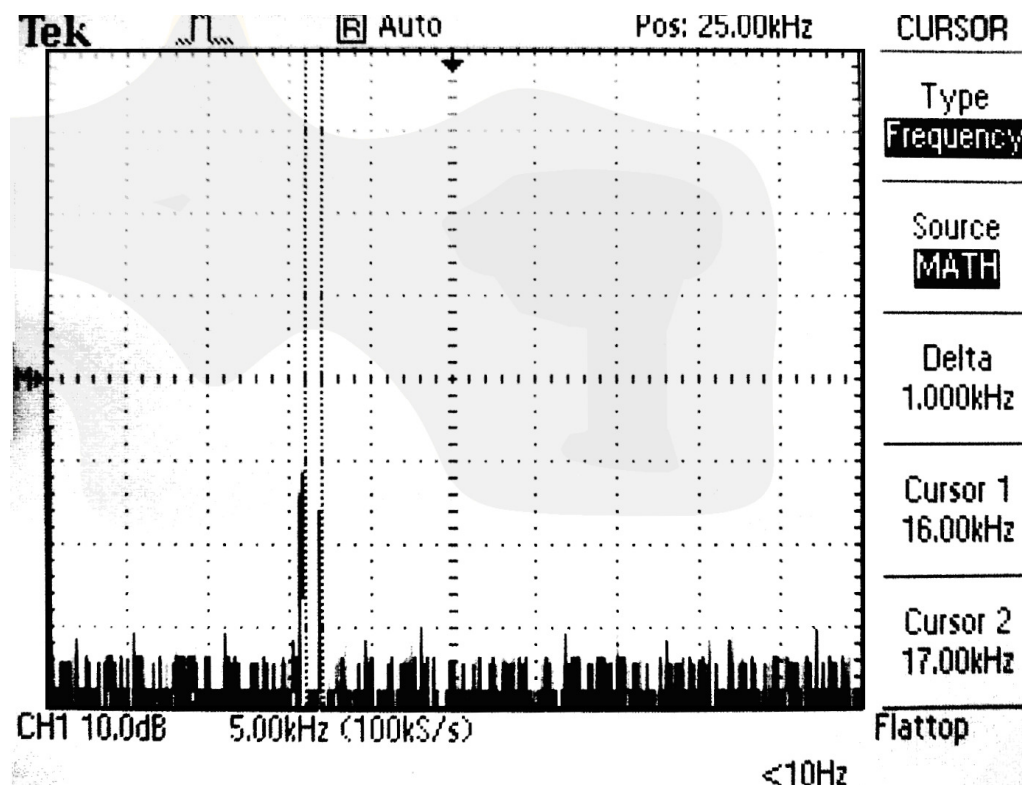
Obr. 4.2-1: Schéma zapojení měřicí soustavy

Použité měřicí přístroje:

- funkční generátor - Digital Co.Ltd. Korea, model FG – 8002,
- osciloskop Tektronics TDS1001.



Obr. 4.2-2: Průběh napětí za součtovým zesilovačem



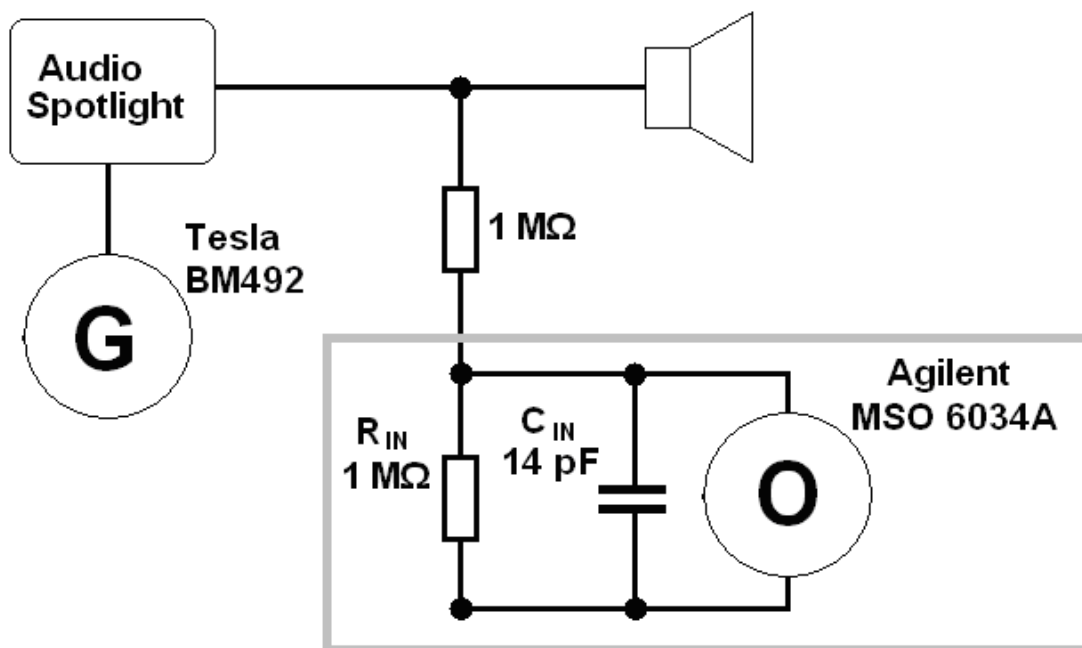
Obr. 4.2-3: Spektrum signálu naměřeného mikrofonem

Měřením jsem neprokázal vznik rozdílového signálu. Tím jsem částečně vyloučil nevhodnost použitého typu modulace u zařízení UGNM. Hlavní příčinou, proč se nelinearita prostředí neprojevuje, je, že dosahované akustické tlaky spadají mezi malé audiosignály.

4.3 Měření hloubky modulace zařízení AudioSpotlight v závislosti na frekvenci budícího signálu

Zjištění hloubky modulace výstupního signálu zařízení AudioSpotlight jsem provedl připojením osciloskopu na výstup AudioSpotlightu přes BNC odbočku při zapojeném elektroakustickém měniči. Frekvenci budícího signálu jsem volil od 0,5 do 10 kHz, kde 0,5 kHz je přibližně minimální frekvence, kterou lze po autodemodulaci rozpoznat sluchem. Měření jsem provedl pro napětí budícího signálu 15, 28, 45 a 100 mV_{pk-pk} při zapojeném elektroakustickém měniči.

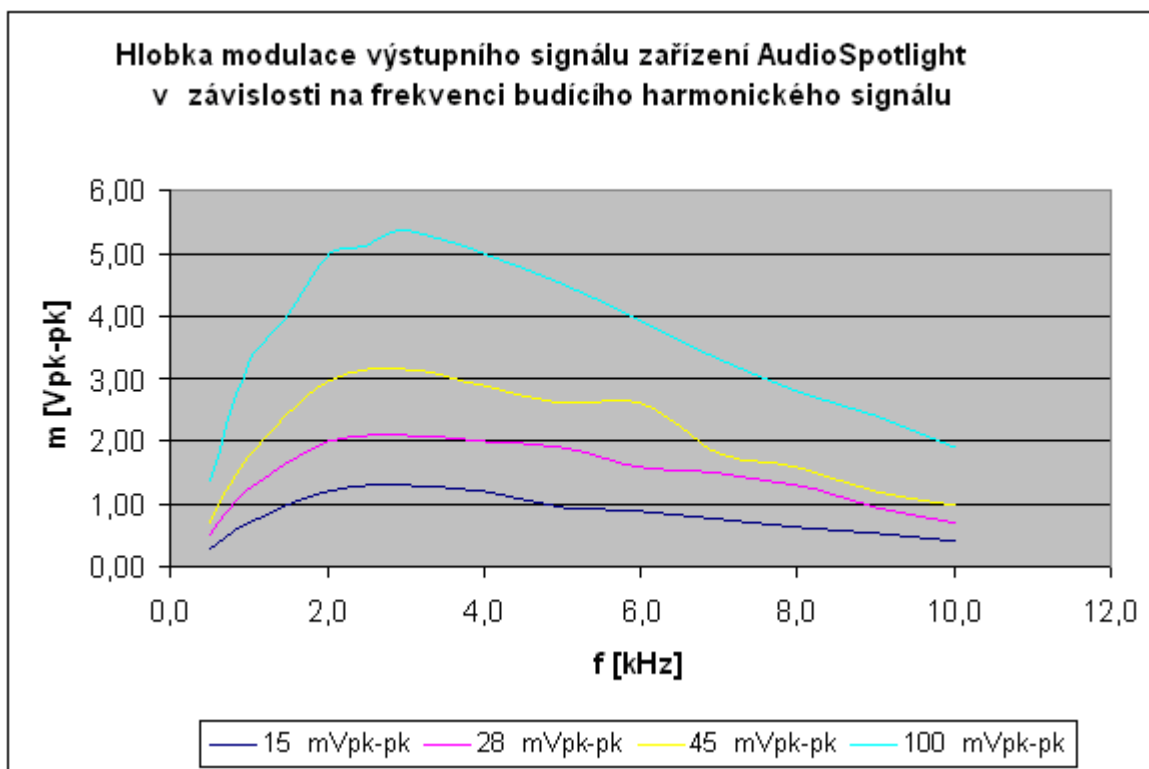
Abych mohl zaznamenat průběh napětí na osciloskopu, z důvodu malého rozsahu přístroje, připojil jsem osciloskop pomocí děliče tvořeným rezistorem 1M Ω a vstupním odporem R_{IN} a kapacitou C_{IN} osciloskopu (Viz obr. 4.3-1). Tento dělič dělí při frekvenci 64 kHz výstupní napětí v poměru 1 : 8. Vstupní kapacita C_{IN} způsobuje změnu dělicího poměru na různých frekvencích výstupního signálu. Budeme-li uvažovat šířku pásma modulovaného signálu 20 kHz, bude jeho spodní hranice v poměru 1 : 6,5 a horní 1 : 8,5. Dochází tedy ke zkreslení právě vlivem vstupní kapacity osciloskopu.



Obr. 4.3-1: Spektrum signálu naměřeného mikrofonom

Tab. 4.3-1: Tabulka naměřených hodnot hloubky modulace podle frekvence budícího signálu

Buzení:	15 mV _{pk-pk}		28 mV _{pk-pk}		45 mV _{pk-pk}		100 mV _{pk-pk}	
	fin [kHz]	m [V _{pk-pk}]	fin [kHz]	m [V _{pk-pk}]	fin [kHz]	m [V _{pk-pk}]	fin [kHz]	m [V _{pk-pk}]
	0,5	0,30	0,5	0,50	0,5	0,70	0,5	1,35
	1,0	0,70	1,0	1,25	1,0	1,75	1,0	3,20
	2,0	1,20	2,0	2,00	2,0	2,95	1,5	4,00
	3,0	1,30	3,0	2,10	3,0	3,15	2,0	4,95
	4,0	1,20	4,0	2,00	4,0	2,90	2,5	5,10
	5,0	0,95	5,0	1,90	5,0	2,60	3,0	5,35
	6,0	0,90	6,0	1,60	6,0	2,60	4,0	5,00
	7,0	0,75	7,0	1,50	7,0	1,80	5,0	4,50
	8,0	0,65	8,0	1,30	8,0	1,60	6,0	3,90
	9,0	0,55	9,0	0,95	9,0	1,20	7,0	3,30
	10,0	0,40	10,0	0,70	10,0	1,00	8,0	2,80
<i>m</i> – hloubka modulace, <i>f_{IN}</i> - frekvence budícího signálu							9,0	2,40
							10,0	1,90

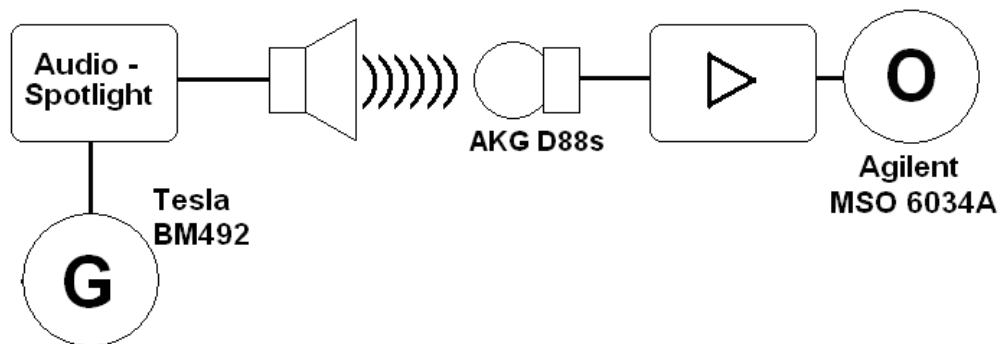


Obr. 4.3-2: Závislost hloubky modulační na frekvenci budícího signálu při různém zesílení

Ze získaných závislostí (Obr. 4.3-2) je patrné, že hloubka modulační nosného signálu zařízení AudioSpotlight se mění s frekvencí. Hloubka modulační je největší pro budící signál 3 kHz. Pro nízké frekvence hloubka modulační prudce klesá, což odpovídá sluchovému vjemu a dalším provedeným měřením, stejně jako pokles hlasitosti na vyšších kmitočtech. Změna hloubky modulační pro různé frekvence je pravděpodobně korekcí frekvenční odezvy elektroakustického měniče nebo zkreslení vzniklým na základě autodemodulační. Doplnující obrázky 8-1, 8-2 a 8-3 v příloze.

4.4 Měření hladiny vyzářeného akustického tlaku v závislosti na frekvenci budícího signálu

Toto měření mělo zjistit možnou souvislost hloubky modulační výstupního signálu zařízení AudioSpotlight s akustickým tlakem v ose vyzarování elektroakustického měniče při frekvencích budícího signálu $f_{IN} = 0,5 - 10$ kHz a amplitudách $U_{IN} = 30$ a 100 mV_{PK-PK}. Bod měření jsem zvolil B5 (viz obr. 4.5-2), kde již se neprojevuje demodulační v blízkém poli. Měřicí soustava byla uspořádána dle obrázku 4.4-1. Sběr dat proběhl pomocí osciloskopu za zařazeným předzesilovačem s nastaveným zesílením $A_U = 74,1$. Naměřená napětí byla následně přepočtena na napětí na mikrofonu a vyhodnocena.



Obr. 4.4-1: Uspořádání měřicí soustavy

Použité měřicí přístroje:

- AudioSpotlight Holosonic Research Labs
- Generátor Tesla BM492 ($R_{OUT} = 75 \Omega$)
- Osciloskop Agilent MSO 6034A v.č. MY 44001937 ($R_{IN} = 1 M\Omega$, $C_{IN} = 14 pF$)
- Mikrofon AKG D88s
- Mixážní pult Phonic MM1002s

Zařízení AudioSpotlight umožňuje nastavení následujících parametrů: hlasitost, korekci výšek a hloubek, autolevel (ochrana proti přenosu napěťových špiček). Měření jsem provedl při následujícím nastavení:

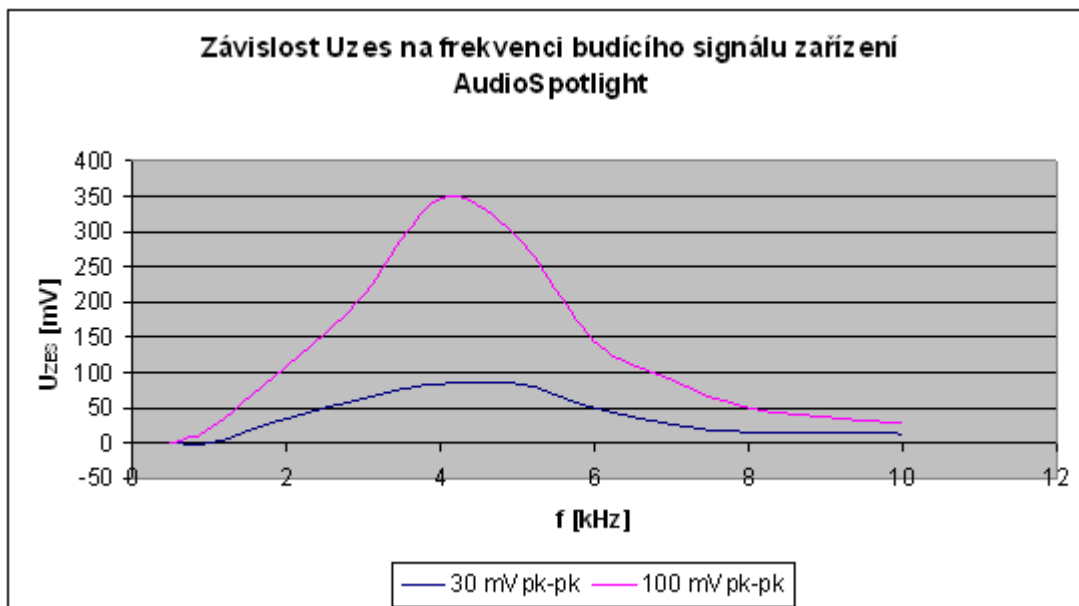
- Hlasitost: maximální
- Korekce: bez zvýraznění i bez potlačení
- Autolevel: aktivní

Protože generátor harmonického signálu má pouze jeden výstupní kanál, ale AudioSpotlight má stereo vstup, byl budící signál připojen pouze do levé vstupní zdířky, přičemž pravá zůstala nezapojena, pouze se zapojením zemním vodičem. Změna hlasitosti nemá vliv na amplitudu nosného signálu.

Tab. 4.4-1: Tabulka naměřených hodnot hloubky modulace podle frekvence budícího signálu

U_{IN} : 30 mV _{pk-pk}		100 mV _{pk-pk}	
f_{IN} [kHz]	U_{ZES} [mV _{pk-pk}]	f_{IN} [kHz]	U_{ZES} [mV _{pk-pk}]
0,5	0,0	0,5	0,0
1,0	0,0	1,0	21,5
2,0	34,0	2,0	109,0
3,0	62,5	3,0	210,0
4,0	85,0	4,0	347,5
5,0	85,0	5,0	292,5
6,0	49,0	6,0	145,0
7,0	26,0	7,0	90,0
8,0	16,5	8,0	50,0
9,0	14,5	9,0	37,5
10,0	12,5	10,0	28,5

U_{IN} – napětí budícího signálu
 f_{IN} – frekvence budícího signálu
 U_{ZES} – výstupní napětí předzesilovače



Obr. 4.4-2: Závislost U_{ZES} na frekvenci budícího signálu

Pro přepočet akustického tlaku na dB jsem použil pro celý rozsah měření citlivost mikrofonu na 1 kHz, tj. $U_{OUT} = 1,35 \text{ mV}_{PK-PK}$ při 1 kHz, 90 dB. Příklad výpočtu pro budící signál 30 mV_{pk-pk}/2 kHz ukazuje rovnice (4.4-1).

$$A_U = \frac{U_{ZES}}{U_{MIC}} \rightarrow U_{MIC} = \frac{U_{ZES}}{A_U} = \frac{34}{74,1} = 0,4588 \text{ mV} \quad (4.4-1)$$

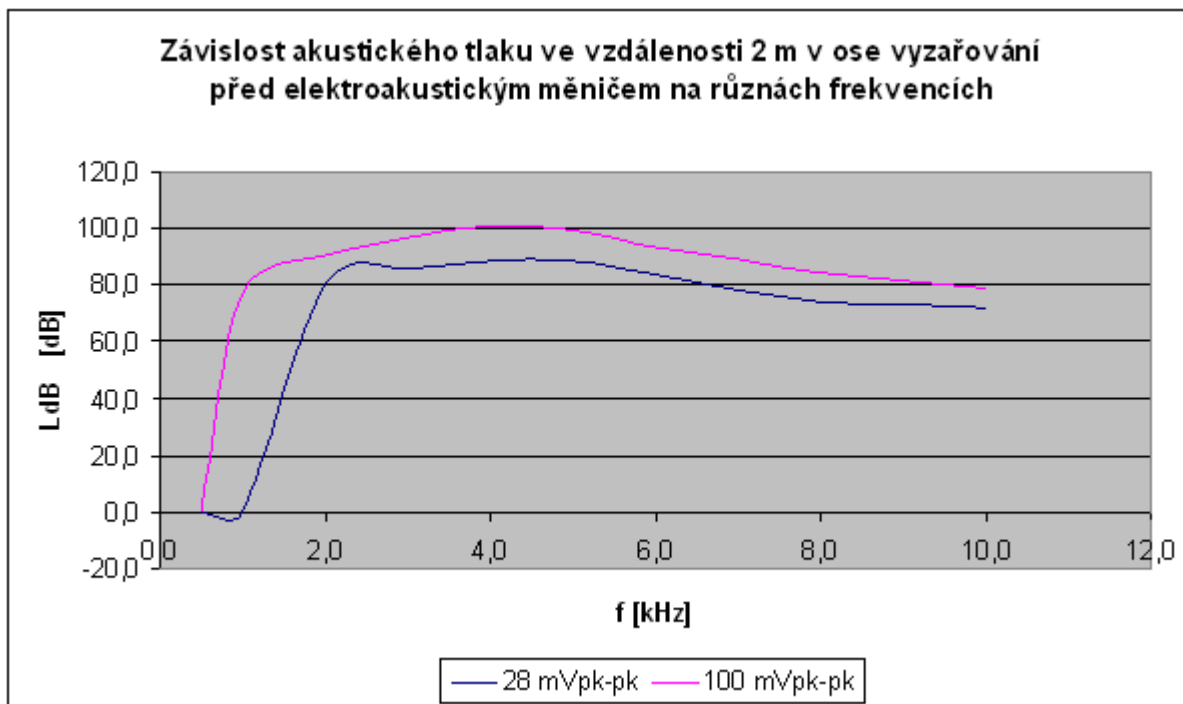
Předpokládám lineární závislost výstupního napětí mikrofonu na akustickém tlaku. Přepočet jsem provedl následujícím způsobem, viz (4.4-2): 1) převod úrovně akustického tlaku, při kterém byla zjištěna citlivost mikrofonu, do absolutních jednotek; 2) výpočet absolutního akustického tlaku odpovídajícího naměřenému napětí; 3) přepočet naměřeného absolutního tlaku do poměrných jednotek.

$$\begin{aligned}
 L_{dB} = 90 \text{ dB} &\rightarrow L = 10^{\frac{90}{20}} = 31622,8 \\
 31622,8 \text{ j} &\dots\dots\dots 1,35 \text{ mV} \\
 x &\dots\dots\dots 0,4588 \text{ mV} \qquad (4.4-2) \\
 \frac{x}{31622,8} &= \frac{0,4588}{1,35} \rightarrow x = 10747,1 \text{ j} \\
 L_{dB} = 20 \cdot \log \frac{x}{U_0} &= 20 \cdot \log \frac{10747,1}{1} = 80,626 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Tab. 4.4-2: Akustický tlak na mikrofonu při různých frekvencích budícího signálu

U_{IN}: 30 mV_{pk-pk}		100 mV_{pk-pk}	
f_{IN} [kHz]	L_{dB} [dB]	f_{IN} [kHz]	L_{dB} [dB]
0,5	/	0,5	/
1,0	/	1,0	76,6
2,0	80,6	2,0	90,7
3,0	85,9	3,0	96,4
4,0	88,6	4,0	100,8
5,0	88,6	5,0	99,3
6,0	83,8	6,0	93,2
7,0	78,3	7,0	89,1
8,0	74,3	8,0	84,0
9,0	73,2	9,0	81,5
10,0	71,9	10,0	79,1

U_{IN} - napětí vstupního signálu
f_{IN} - frekvence vstupního signálu
L_{dB} - naměřený akustický tlak



Obr. 4.4-3: Závislost akustického tlaku na frekvenci budícího signálu

Při srovnání naměřených hodnot se závislostí hloubky modulace na frekvenci je patrný daleko větší útlum vysokých frekvencí. Frekvence, kde byla naměřena maximální hodnota napětí, neodpovídá frekvenci s největší hloubkou modulace, ale pohybuje se okolo 4,3 kHz. Na rozdílný tvar křivek mají pravděpodobně vliv vlastnosti prostředí, frekvenční odezva elektroakustického měniče, případně různá citlivost mikrofonu na různých frekvencích. Na základě tohoto měření usuzuji, že účelem proměnné hloubky modulace výstupního signálu zařízení AudioSpotlight není vyrovnání frekvenční odezvy elektroakustického měniče. Doplňující obrázek 8-4 v příloze.

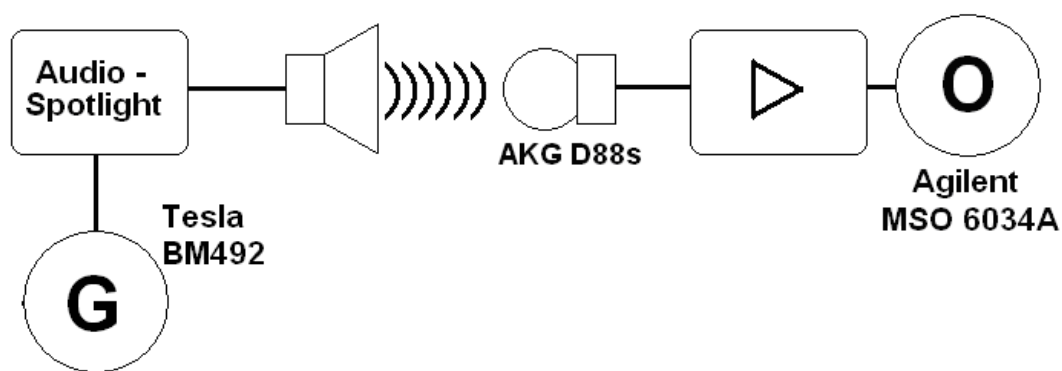
4.5 Měření vyzařovací charakteristiky zařízení AudioSpotlight

Cílem měření bylo změřit hladinu akustického tlaku před elektroakustickým měničem a sestrojit podle ní jeho vyzařovací charakteristiku k ověření směrovosti vyzařování a zjištění vlivu frekvence budícího signálu na její tvar.

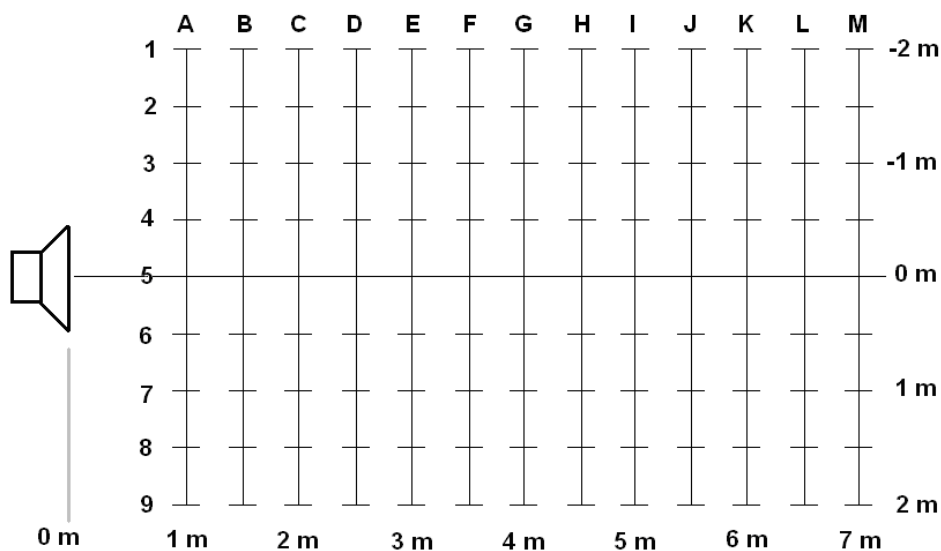
Měření bylo uskutečněno ve zkušebním tunelu firmy Prototypa s.r.o. o rozměrech 5 x 100 x 4 m (š x d x v). Soustava byla uspořádána podle obrázku 4.5-1. Měření proběhlo pouze pro rovinu v ose vyzařování ve výšce 153 cm nad zemí, kde byl umístěn jak elektroakustický měnič, tak měřící mikrofon. Pro měření jsem použil budící signál harmonický $U_{pk-pk} = 100$ mV a měřil jsem na frekvencích 3 kHz, na které jsem předpokládal nejvyšší akustický tlak za elektroakustickým měničem, a 10 kHz pro porovnání vyzařovací

charakteristiky s předchozím měření. Budícím signálem se rozumí vstupní signál zařízení AudioSpotlight, protože předpokládám, že vstupní a modulační signál nejsou stejné z důvodu preprocessingu.

Samotný sběr dat probíhal rastrováním ve vybraných bodech souřadnicového systému, dle obrázku 4.5-2, a to 0; 0,5; 1,0; 1,5 a 2,0 m kolmo od osy vyzařování na obě strany. V ose vyzařování měření začínalo ve vzdálenosti 1 m od elektroakustického měniče, kde se přestává projevovat demodulace v blízkém poli, do 7 m s krokem 0,5 m. Pro eliminování chyby způsobené směrovou charakteristikou mikrofonu byl mikrofon nastaven vždy na střed elektroakustického měniče. Veškerá nastavení a použité přístroje jsou totožná s předchozím měřením.



Obr. 4.5-1: Uspořádání soustavy pro měření



Obr. 4.5-2: Souřadnicový systém měření

Tab. 4.5-1: Tabulka naměřených hodnot napětí za předzesilovačem – 3 kHz

[mV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	6	35	80	240	800	20	16	7
B	20	20	16	70	450	38	30	12	15
C	15	15	40	100	500	100	30	25	15
D	30	35	28	80	500	120	80	30	20
E	16	20	42	61	480	90	36	10	25
F	30	20	30	84	480	80	60	15	25
G	27	10	24	85	390	110	54	15	12
H	20	23	37	90	370	116	44	42	15
I	21	30	23	117	330	123	46	41	20
J	26	27	26	153	304	122	35	47	27
K	17	29	30	149	298	120	47	56	16
L	8	43	37	161	262	121	29	28	24
M	18	23	52	156	247	156	44	33	47

Tab. 4.5-2: Tabulka naměřených hodnot napětí na mikrofonu – 3 kHz

[mV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,000	0,081	0,472	1,080	3,239	10,796	0,270	0,216	0,094
B	0,270	0,270	0,216	0,945	6,073	0,513	0,405	0,162	0,202
C	0,202	0,202	0,540	1,350	6,748	1,350	0,405	0,337	0,202
D	0,405	0,472	0,378	1,080	6,748	1,619	1,080	0,405	0,270
E	0,216	0,270	0,567	0,823	6,478	1,215	0,486	0,135	0,337
F	0,405	0,270	0,405	1,134	6,478	1,080	0,810	0,202	0,337
G	0,364	0,135	0,324	1,147	5,263	1,484	0,729	0,202	0,162
H	0,270	0,310	0,499	1,215	4,993	1,565	0,594	0,567	0,202
I	0,283	0,405	0,310	1,579	4,453	1,660	0,621	0,553	0,270
J	0,351	0,364	0,351	2,065	4,103	1,646	0,472	0,634	0,364
K	0,229	0,391	0,405	2,011	4,022	1,619	0,634	0,756	0,216
L	0,108	0,580	0,499	2,173	3,536	1,633	0,391	0,378	0,324
M	0,243	0,310	0,702	2,105	3,333	2,105	0,594	0,445	0,634

Tab. 4.5-3: Akustický tlak na mikrofonu – 3 kHz

[dB]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	/	65,560	80,878	88,059	97,601	108,059	76,018	74,079	66,899
B	76,018	76,018	74,079	86,899	103,061	81,593	79,539	71,581	73,519
C	73,519	73,519	82,038	89,997	103,976	89,997	79,539	77,956	73,519
D	79,539	80,878	78,940	88,059	103,976	91,581	88,059	79,539	76,018
E	74,079	76,018	82,462	85,704	103,622	89,082	81,123	69,997	77,956
F	79,539	76,018	79,539	88,483	103,622	88,059	85,560	73,519	77,956
G	78,624	69,997	77,601	88,585	101,818	90,825	84,645	73,519	71,581
H	76,018	77,232	81,361	89,082	101,361	91,286	82,866	82,462	73,519
I	76,441	79,539	77,232	91,361	100,367	91,795	83,252	82,253	76,018
J	78,296	78,624	78,296	93,691	99,654	91,724	80,878	83,439	78,624
K	74,606	79,245	79,539	93,461	99,481	91,581	83,439	84,961	74,079
L	68,059	82,666	81,361	94,133	98,363	91,653	79,245	78,940	77,601
M	75,102	77,232	84,317	93,859	97,851	93,859	82,866	80,367	83,439

Tab. 4.5-4: Tabulka naměřených hodnot napětí za předzesilovačem – 10 kHz

[mV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	10	12	12	23	43	14	14	12
B	8	12	15	10	50	14	6	10	14
C	10	10	8	15	38	15	12	12	8
D	12	14	10	10	64	22	12	6	10
E	8	10	18	24	80	35	13	8	8
F	7	8	6	28	87	33	17	8	11
G	12	13	11	21	93	36	7	16	9
H	8	12	7	15	110	23	10	18	7
I	8	7	11	24	108	25	9	8	10
J	12	13	11	22	83	25	12	9	11
K	9	11	12	31	87	31	17	7	10
L	8	8	9	28	86	38	27	8	11
M	10	9	14	23	82	40	15	9	8

Tab. 4.5-5: Tabulka naměřených hodnot napětí na mikrofonu – 10 kHz

[mV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0,000	0,135	0,162	0,162	0,311	0,581	0,189	0,189	0,162
B	0,108	0,162	0,203	0,135	0,676	0,189	0,081	0,135	0,189
C	0,135	0,135	0,108	0,203	0,514	0,203	0,162	0,162	0,108
D	0,162	0,189	0,135	0,135	0,865	0,297	0,162	0,081	0,135
E	0,108	0,135	0,243	0,324	1,081	0,473	0,176	0,108	0,108
F	0,095	0,108	0,081	0,378	1,176	0,446	0,230	0,108	0,149
G	0,162	0,176	0,149	0,284	1,257	0,486	0,095	0,216	0,122
H	0,108	0,162	0,095	0,203	1,486	0,311	0,135	0,243	0,095
I	0,108	0,095	0,149	0,324	1,459	0,338	0,122	0,108	0,135
J	0,162	0,176	0,149	0,297	1,122	0,338	0,162	0,122	0,149
K	0,122	0,149	0,162	0,419	1,176	0,419	0,230	0,095	0,135
L	0,108	0,108	0,122	0,378	1,162	0,514	0,365	0,108	0,149
M	0,135	0,122	0,189	0,311	1,108	0,541	0,203	0,122	0,108

Tab. 4.5-6: Akustický tlak na mikrofonu – 10 kHz

[dB]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	/	61,471	63,055	63,055	68,706	74,140	64,394	64,394	63,055
B	59,533	63,055	64,993	61,471	75,450	64,394	57,034	61,471	64,394
C	61,471	61,471	59,533	64,993	73,067	64,993	63,055	63,055	59,533
D	63,055	64,394	61,471	61,471	77,595	68,319	63,055	57,034	61,471
E	59,533	61,471	66,576	69,075	79,533	72,352	63,750	59,533	59,533
F	58,373	59,533	57,034	70,414	80,261	71,841	66,080	59,533	62,299
G	63,055	63,750	62,299	67,915	80,841	72,597	58,373	65,553	60,556
H	59,533	63,055	58,373	64,993	82,299	68,706	61,471	66,576	58,373
I	59,533	58,373	62,299	69,075	82,139	69,430	60,556	59,533	61,471
J	63,055	63,750	62,299	68,319	79,853	69,430	63,055	60,556	62,299
K	60,556	62,299	63,055	71,298	80,261	71,298	66,080	58,373	61,471
L	59,533	59,533	60,556	70,414	80,161	73,067	70,098	59,533	62,299
M	61,471	60,556	64,394	68,706	79,747	73,512	64,993	60,556	59,533

Zjištěná citlivost použitého měřicího mikrofonu je:

$$U_{OUT} = 1,35 \text{ mV}_{PK-PK} \text{ při } 1 \text{ kHz, } 90 \text{ dB}$$

$$U_{OUT} = 1,28 \text{ mV}_{PK-PK} \text{ při } 10 \text{ kHz, } 81 \text{ dB}$$

Pro měření při buzení harmonickým signálem $f = 3 \text{ kHz}$ pracuji se stejnou citlivostí jako pro $f = 1 \text{ kHz}$, protože předpokládám lineární charakteristiku mikrofonu na nízkých kmitočtech. Příklad výpočtu je vždy pro bod A2. Postup výpočtu je totožný s předchozím měřením.

$$L_{dB} = 90 \text{ dB} \rightarrow 10^{\frac{90}{20}} = 31622,1 \text{ j} \quad (4.5-1)$$

V bodě A2 $U_{OUT} = 0,081 \text{ mV}$

$$\begin{aligned} 31622,8 \text{ j} & \dots\dots\dots 1,35 \text{ mV} \\ x & \dots\dots\dots 0,081 \text{ mV} \\ \frac{x}{31622,8} & = \frac{0,081}{1,35} \rightarrow x = 1896,704 \text{ j} \\ L_{dB} & = 20 \cdot \log \frac{x}{U_0} = 20 \cdot \log \frac{1896,704}{1} = 65,56 \text{ dB} \end{aligned} \quad (4.5-2)$$

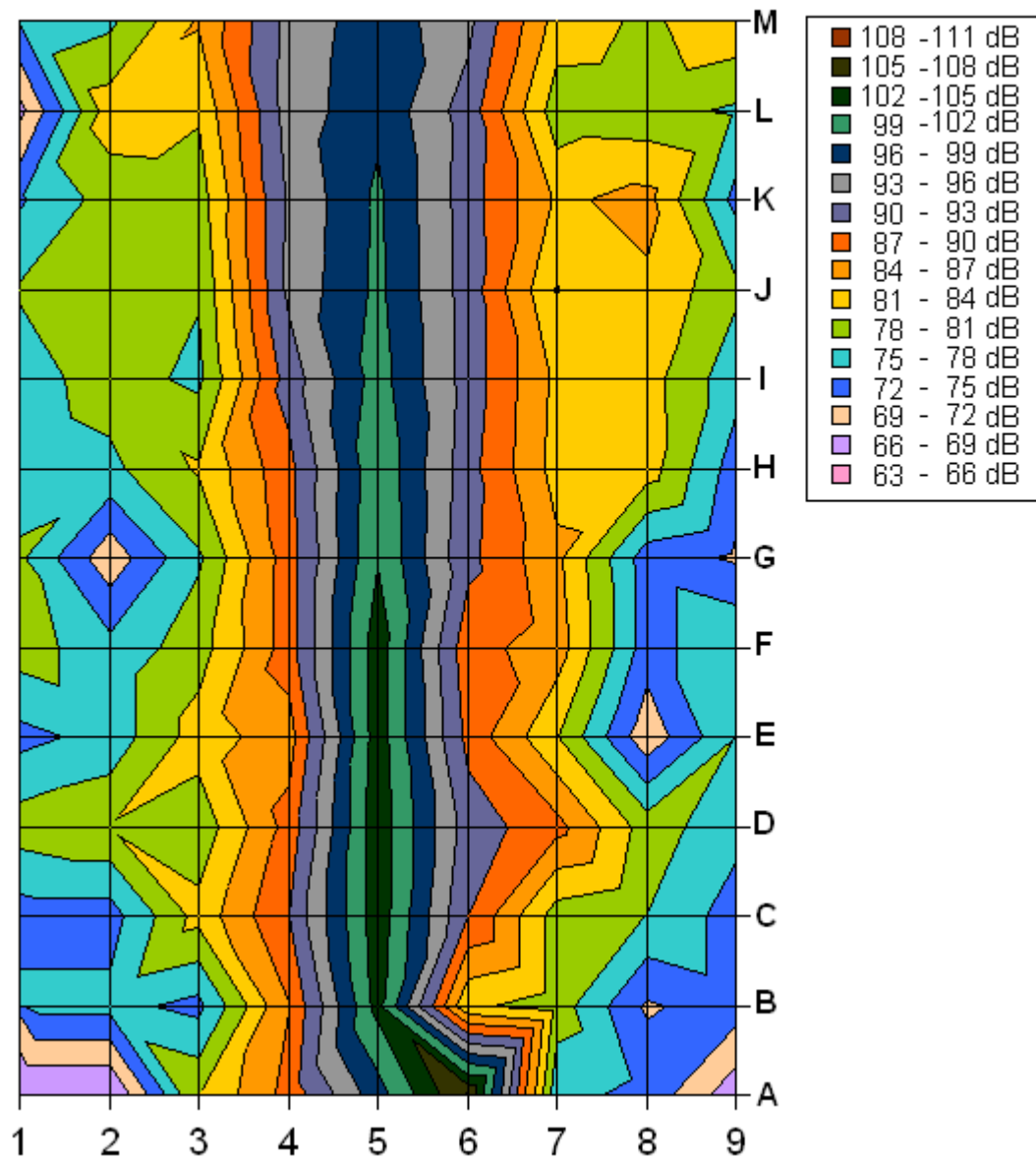
Pro zpracování měření při buzení harmonickým signálem $f = 10 \text{ kHz}$ jsem pracoval s citlivostí $U_{OUT} = 1,28 \text{ mV}_{PK-PK} / 81 \text{ dB}$.

$$L_{dBV} = 81 \text{ dB} \rightarrow 10^{\frac{81}{20}} = 11220 \text{ j} \quad (4.5-3)$$

V bodě A2 $U_{OUT} = 0,135 \text{ mV}$

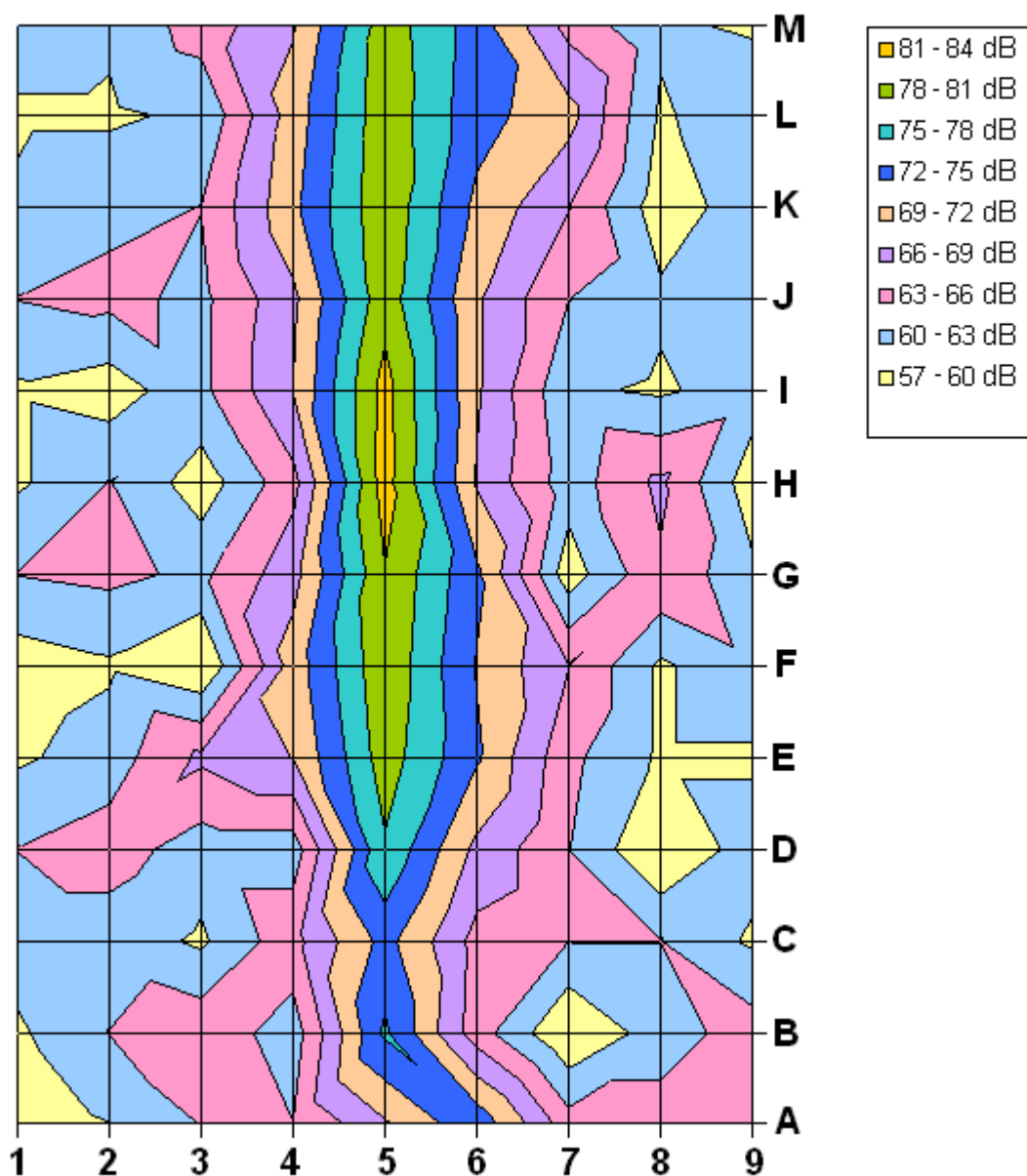
$$\begin{aligned} 11220 \text{ j} & \dots\dots\dots 1,28 \text{ mV} \\ x & \dots\dots\dots 0,135 \text{ mV} \\ \frac{x}{11220} & = \frac{0,135}{1,28} \rightarrow x = 1883,379 \text{ j} \\ L_{dB} & = 20 \cdot \log \frac{x}{U_0} = 20 \cdot \log \frac{1883,379}{1} = 61,46 \text{ dB} \end{aligned} \quad (4.5-4)$$

Vyzařovací charakteristika zařízení AudioSpotlight při harmonickém budícím signálu $U_{pk-pk} = 100 \text{ mV}$, $f = 3 \text{ kHz}$



Obr. 4.5-3: Vyzařovací charakteristika zařízení AudioSpotlight při buzení tónem 3 kHz

Vyzařovací charakteristika zařízení AudioSpotlight při harmonickém budícím signálu $U_{pk-pk} = 100 \text{ mV}$, $f = 10 \text{ kHz}$



Obr. 4.5-4: Vyzařovací charakteristika zařízení AudioSpotlight při buzení tónem 10 kHz

Na základě sestrojených vyzařovacích charakteristik (obr. 4.5-3 a 4.5-4) lze potvrdit, že přenos audiosignálu pomocí modulace na ultrazvukový svazek s využitím nelinearity prostředí pro jeho demodulaci je výrazně směrový. Porovnání charakteristik zároveň ukazuje nižší dosahované akustické tlaky pro vyšší kmitočty, což koresponduje s měření závislosti výstupního akustického tlaku na frekvenci budícího signálu. Maximální naměřené napětí na mikrofonu při vypnutém zařízení AudioSpotlight je $0,2 \text{ mV}_{PK-PK}$.

Veškerá měření s použitím mikrofonu jsou zatížena chybou způsobenou možnými odrazy. Protože ale nejbližší protější stěna tvořená pískem byla vzdálena cca 90 m

od elektroakustického měniče a vyzařovaný ultrazvukový paprsek byl dostatečně úzký, aby docházelo k odrazu o boční stěny a podlahu, nepředpokládám výrazný vliv na výsledek měření. Dalšími faktory, které mají vliv na výsledek měření jsou nasměrování elektroakustického měniče, nepřesné umístění měřicího mikrofону v souřadnicovém systému a jeho natočení, možné elektromagnetické rušení, chyba použitých měřicích přístrojů, nedostačující citlivost mikrofону a chyby zanesené zpracováním, např. špatné určení amplitudy naměřeného signálu a chyby zaokrouhlením.

5 Závěr

Úkolem této práce bylo shromáždění informací týkajících se problematiky přenosu slyšitelného zvuku pomocí amplitudové modulace na nosný signál o frekvenci spadající do ultrazvukové oblasti s využitím nelinearity prostředí pro zpětnou demodulaci. Tyto informace měly utvořit soubor znalostí vedoucích k návrhu a konstrukci funkčního zařízení UGNM. Součástí práce byl návrh a výroba zkušební vzorku zařízení a měření na hotovém zařízení AudioSpotlight firmy Prototypa s.r.o.

Při sestavování teoretického základu jsem se zaměřil nejen na problematiku nelineární akustiky, ale i na obecné informace týkající se akustiky, elektroakustických prvků a amplitudové modulace pro zvážení možností realizace UGNM. Po prostudování tohoto základu jsem došel k závěru, že nejproblematictější část výroby zařízení pro směrový přenos audiosignálu je konstrukce elektroakustického měniče, na který jsou kladeny vysoké požadavky. Konkrétně je to vysoký pracovní kmitočet, vysoká účinnost a specifická frekvenční odezva. Pro zvýšení směrovosti jsou to navíc také vhodné rozměry.

Cílem semestrálního projektu, na který tato práce navazuje, byla právě konstrukce zařízení UGNM. Požadované parametry však nebyly vhodně zvoleny, kvůli nedostatečné znalosti problematiky nelineární akustiky. Zkušební vzorek jsem realizoval na DPS a provedl na něm základní měření pro ověření funkce zařízení a předpokládané autodemodulace signálu. Z důvodu nízkého výstupního akustického tlaku měření potvrdila fakt, že se vzduchové prostředí pro malé audiosignály chová lineárně – autodemodulovaná složka nebyla prokázána. Nelinearita by se projevila až po zvýšení výstupního výkonu zařízení a použití vhodného elektroakustického měniče.

Ve spolupráci s firmou Prototypa s.r.o. mi bylo umožněno provádět experimenty na zařízení AudioSpotlight. Hlavním cílem měření na tomto zařízení bylo zjištění chování automodulovaného zvuku. Dále potvrzení směrovosti šíření modulovaného svazku

a proměření parametrů výstupního signálu AudioSpotlightu před elektroakustickým měničem. Po zhodnocení sluchového vjemu mohu říci, že reprodukováný zvuk se jeví jako ostrý, což je dáno rozsahem přenášených frekvencí od 500 Hz, a lze jej distribuovat buď přímo, nebo odrazem. Provedená měření potvrdila směrové vlastnosti šíření modulovaného ultrazvukového svazku a poskytla informace o vlastnostech výstupu zařízení.

Při návrhu zařízení UGNM je nutné brát v úvahu podmínky, za kterých k autodemulaci dochází. První z nich je dosažení dostatečného akustického tlaku, přibližně 100 dB. Dále je to vysoká frekvence nosného signálu, řádově desítky kHz. Třeba je také brát v potaz zkreslení vlivem autodemulace, což vede k nutnosti předzpracování vstupního signálu podle rovnice (2.3-3) včetně snížení frekvenčního rozsahu vstupního signálu zdola. Nejnákladnější částí zařízení a zároveň částí nejnáročnější na výrobu je elektroakustický měnič.

Možným pokračováním této práce je návrh a konstrukce fóliového piezoelektrického elektroakustického měniče a budících a předzpracujících elektrických obvodů zařízení UGNM.

6 Seznam zkratk

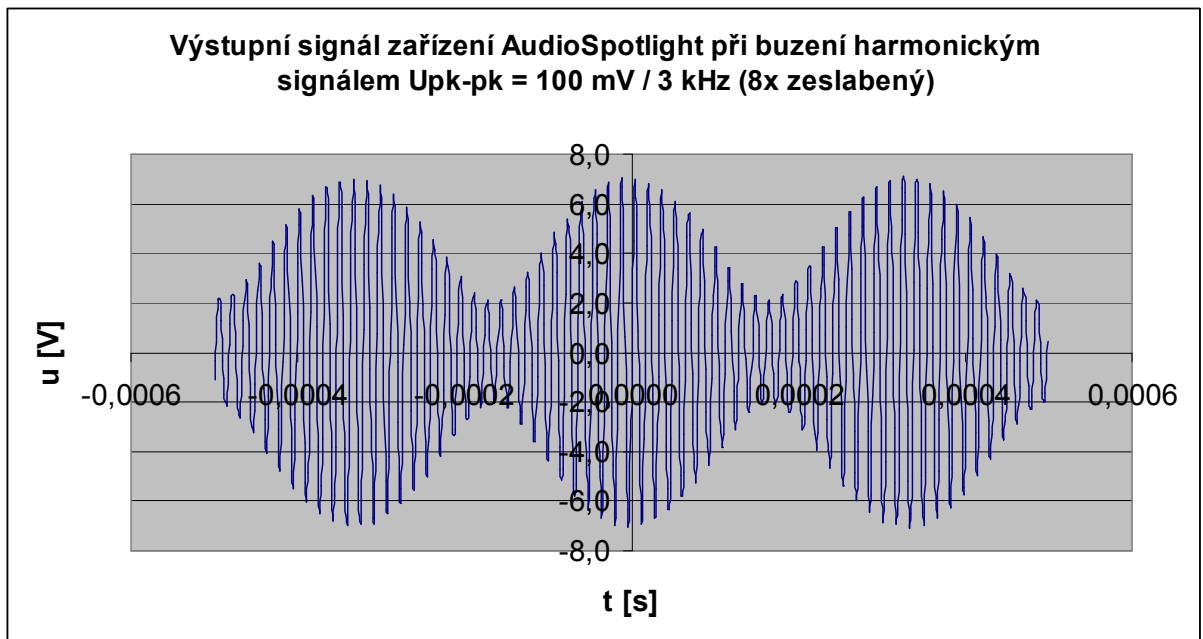
A_F	- zesílení zpětné vazby
A_U	- zesílení zesilovače
(AM-)DSB	- double side band – modulovaný signál s potlačeným nosným kmitočtem
(AM-)SSB	- single side band – modulovaný signál s potlačeným nosným kmitočtem a jedním postraním pásmem
DPS	- deska plošného spoje
f	- frekvence
f_{in}	- frekvence modulačního signálu
f_m	- frekvence modulačního signálu
f_{max}	- maximální frekvence
f_{min}	- minimální frekvence
f_0	- frekvence nosného signálu
$f(t)$	- funkce popisující modulační signál
IO	- integrovaný obvod
L_{dB}	- akustický tlak v decibelech
m	- hloubka modulace
OZ	- operační zesilovač
S_c	- amplituda nosného signálu
s_c	- okamžitá hodnota nosného signálu
SE	- společný editor (v souvislosti se zapojením tranzistorového zesilovače)
SFDR	- Spurious Free Dynamic Range – dynamicky rozsah bez intermodulačního zkreslení
t	- čas
U_0	- výchozí napětí
U_{MIC}	- výstupní napětí mikrofону
U_{OUT}	- výstupní napětí
U_{ZES}	- výstupní napětí předzesilovače
UGNM	- ultrazvukový generátor s nízkofrekvenční modulací
ΔS	- amplitudový zdvih
φ_C	- fázový posun nosného signálu
φ_F	- fázový posun zpětné vazby
φ	- fázový posun zesilovače
ω_C	- úhlová frekvence nosného signálu

7 Použitá literatura

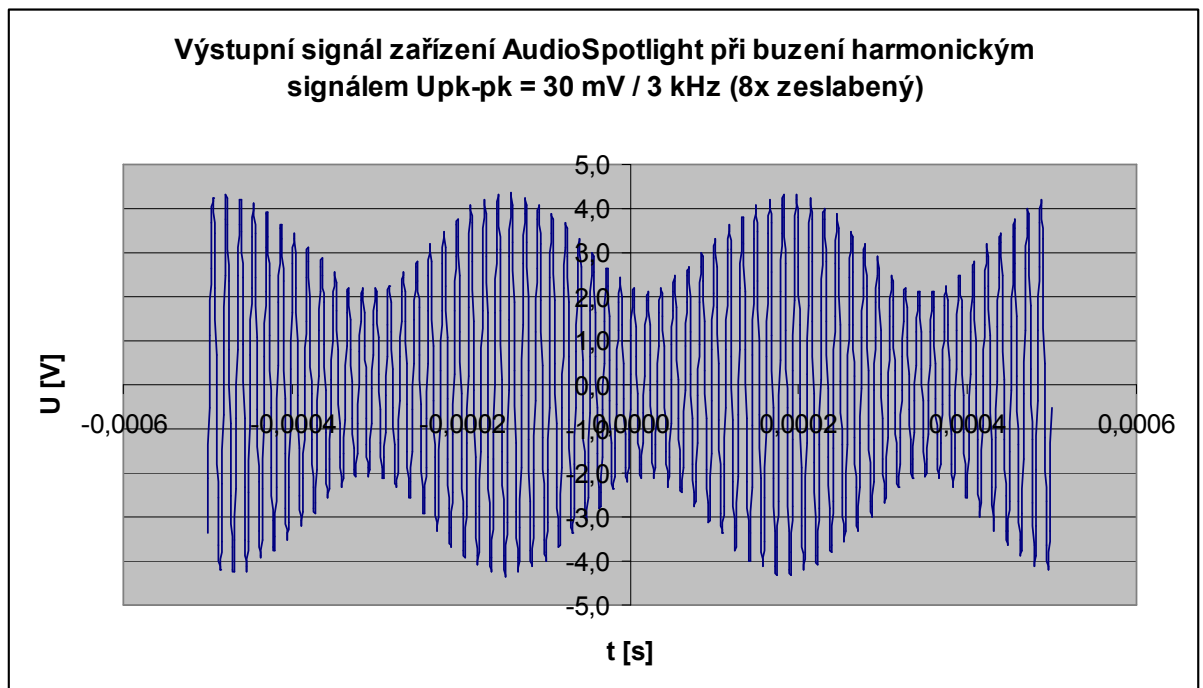
- [1] NÝVLT, Václav . *Zvuk, který se chová jako světlo : Test zvukového reflektoru* [online]. c2008 [cit. 2008-02-27]. Dostupný z WWW: <http://technet.idnes.cz/slyseli-j sme-zvuk-ktery-sechova-jako-svetlo-test-zvukoveho-reflektoru-1om-tec_audio.asp?c=A080318_170651_tec_audio_NYV>.
- [2] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika*. VUTIUM, 2001, 467s.
- [3] ŠEBESTA, V., SMÉKAL, Z. *Skriptum: Signály a soustavy*. Brno: FEKT VUT v Brně. 125s
- [4] PROKEŠ, A. *Skriptum: Radiové přijímače a vysílače*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005. 67s,
- [5] *Obrábění ultrazvukem : Obrábění ultrazvukem* [online]. c2007 [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.ultrazvuk.cz/index.php?mnu=79,0&PHPSESSID=1e5a913e26ac6e9b7645d55b717e0a37>>
- [6] *Fyzikální principy zobrazení ultrazvukem* [online]. c2007 [cit. 2008-11-23]. Dostupný z WWW: <http://zdravotnictvi.ultrazvuk.cz/prilohy/1/Fyzikalni_principy_uz.pdf>.
- [7] *TEÓRIA A ZÁKLADY KONŠTRUKCIE ZVUKOVODOV* [online]. 2006 [cit. 2008-12-01]. Dostupný z WWW: <http://www.kemt.fe.i.tuke.sk/predmety/KEMT320_EA/_materialy/2006/prednasky/EAK2006_L10_Te%F3ria%20a%20kon%9Atrukcia%20zvukovodov.pdf>.
- [8] AMBOŽOVA, J. *Mikrobiologie v technologii vod*. 2nd ed. Vysoká škola chemickotechnologická v Praze, Praha 2008. ISBN 978-80-7080-676-0
- [9] OHLIDALOVA, Dana. *Vliv ultrazvuku na pohybovou aktivitu prvoků*. [s.l.], 2006. 88s. Bakalářská práce. Dostupný z WWW: <http://is.muni.cz/th/52103/prif_m/dip_IS.pdf>.
- [10] BÁLEK , R.. *Hluk a vibrace* [online]. 2008 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/zivotni_prostredi/prednasky/ZP_prednaska_11_v6.doc>.
- [11] *Ultrazvuk* [online]. 2008 [cit. 2008-11-19]. Dostupný z WWW: <<http://biofyzika.lfp.cuni.cz/file.php/1/referaty/21-Ultrazvuk.ppt>>.
- [12] EXAR Corporation. *Technická dokumentace XR2206* [online]. c1997 [cit. 2008-11-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/exar/-XR2206v103.pdf>>.
- [13] *Elektroakustika - vlastnosti, rozdělení* [online]. c2008 [cit. 2008-11-02]. Dostupný z WWW: <<http://audioweb.cz/tp-elektroakustika.htm>>.

- [14] *Zajímá Vás, jak to všechno funguje?* [online]. 2008 [cit. 2008-11-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.s-audio.cz/novinky/2>>.
- [15] *Měření elektroakustická* [online]. 2005 [cit. 2008-12-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.gorkyland.ic.cz/mereni/1b.doc>>.
- [16] *FT-TA/028 : Technologie neletálních obranných prostředků*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 1000.
- [17] *HornSimulator* [online]. 2008 [cit. 2008-10-29]. Dostupný z WWW: <<http://mywebsite.bigpond.com/dmcbean/>>.
- [18] *Datasheet : TDA2030A* [online]. 2000 [cit. 2008-11-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXyurq.pdf>>
- [19] KLÍMA, Martin. *ULTRAZVUKOVÝ GENERÁTOR S NÍZKOFREKVENČNÍ MODULACÍ*. [s.l.], 2008. 22 s. VUT Brno. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Arnošt Bajer, CSc.

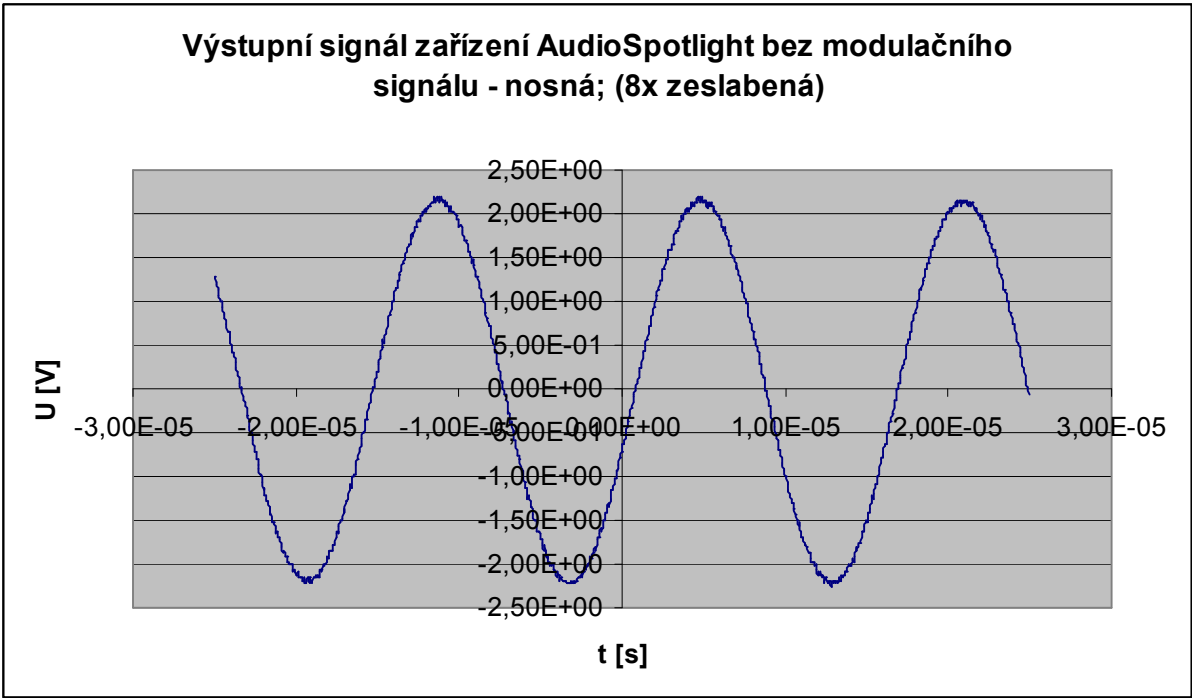
8 Příloha



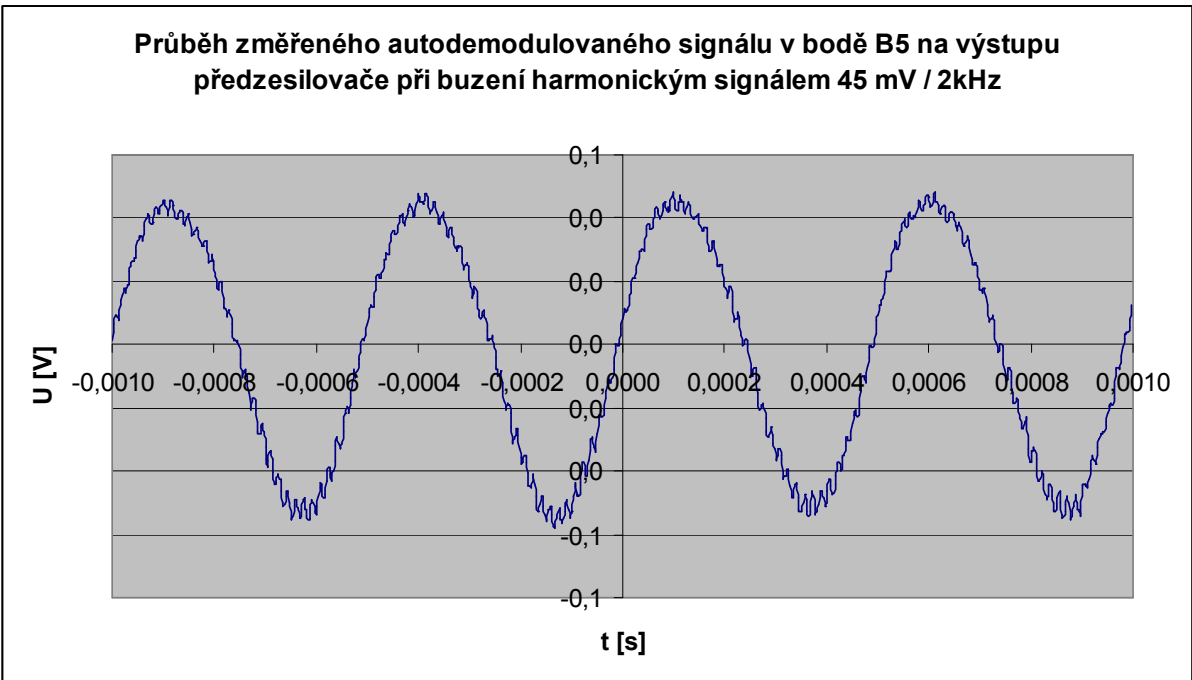
Obr. 8-1: Průběh výstupního signálu zařízení AudioSpotlight při $U_{IN} = 100 \text{ mV}_{PK-PK}$



Obr. 8-2: Průběh výstupního signálu zařízení AudioSpotlight při $U_{IN} = 30 \text{ mV}_{PK-PK}$



Obr. 8-3: Průběh autodemodulovaného signálu



Obr. 8-4: Průběh autodemodulovaného signálu



Obr. 8-5: Použité vybavení pro měření



Obr. 8-6: Zkušební tunel, ve kterém měření probíhala