



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKČNÍ NÁVRH PŘENOSNÉHO MIKROFONNÍHO POLE

DESIGN OF PORTABLE MICROPHONE ARRAY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ľubomír Vazovan

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Klapka, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Lubomír Vazovan**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Klapka, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukční návrh přenosného mikrofonního pole

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh přenosného pětiramenného mikrofonního pole pro lokalizaci zdrojů hluku metodou beamforming. Předmětem řešení bude návrh mechanické konstrukce pole a připojení měřicích mikrofونů. Navržená konstrukce musí umožnit akustická měření metodou beamforming ve frekvenčním rozsahu minimálně 500 Hz - 2000 Hz.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Koncepční řešení
5. Konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení Typ

práce: konstrukční

Účel práce: vzdělávání

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf Šablona

práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Mišun, V. (2005): Vibration a hluk. Akademické nakl. CERM, Brno.

Shigley, J. E., Mischke, Ch. E. a Budynas R. G. (2010): Konstruování strojních součástí. VUTIUM, Brno.

Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, <http://bksv.com>, přístup 1. listopadu 2015

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Predmetom tejto bakalárskej práce je konštrukčný návrh prenosného päťramenného mikrofónového poľa určeného na lokalizáciu zdrojov hluku pomocou metódy beamforming. Cieľom práce je návrh jednoduchej a ľahkej mechanickej konštrukcie. Súčasťou práce je aj riešenie pripojenia meracích mikrofónov ku konštrukcii poľa.

Prvá časť práce je venovaná teórii beamformingu, dizajnu mikrofónového poľa pre beamforming a prehľadu ponúkaných rovinných mikrofónových polí. V ďalšej časti mojej bakalárskej práce vytváram koncepčné návrhy vybraných uzlov, z ktorých vyberám konkrétne konštrukčné riešenie. V závere práce zhodnotím ekonomickú stránku konštrukcie.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

Lokalizácia hluku, beamforming, mikrofónové pole, konštrukčný návrh

ABSTRACT

The subject of this thesis is the structural design of portable five-arms microphone array to localize noise sources, which is using to beamforming techniques. The aim of the work is to design a simple and easy mechanical construction. Part of the work is the solution to connect the measurement microphone to the construction field.

The first part is devoted to the theory of beamforming, design the microphone array for beamforming and offered an overview of plane mic fields. The next part of my work is drafting the proposals selected nodes from which you select a specific design. In conclusion I evaluate the economics of construction.

KEYWORDS

Localization of noise, beamforming, microphone array, engineering design

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

VAZOVAN, L. *Konstrukční návrh přenosného mikrofonního pole*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Klapka, Ph.D..

PREHLÁSENIE

Čestne prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Konštrukčný návrh mikrofónové pole vypracoval samostatne pod vedením Ing. Milana Klapku, Ph.D s použitím odbornej literatúry a zdrojov uvedených v zozname použitej literatúry.

.....
Dátum

.....
Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Milanovi Klapkovi, Ph.D za jeho rady, odbornú pomoc, konzultácie a najmä za prejavenu trpezlivosť. Taktiež by som sa chcel poďakovať pánovi Michalovi Piatkovi majiteľovi firmy Technic Carbon za ochotu, spoluprácu, rady a poskytnutie vzorky materiálu. Moje ďalšie poďakovanie je venované mojím rodičom, ktorý ma morálne a finančne podporovali počas celého štúdia. Mimoriadne poďakovanie patrí môjmu otcovi Štefanovi Vazovanovi za zvedavosť, pripomienky a rady pri tvorbe bakalárskej práce.

OBSAH

ABSTRAKT	5
KLÚČOVÉ SLOVÁ	5
ABSTRACT	5
KEYWORDS	5
BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA	5
PREHLÁSENIE	7
POĎAKOVANIE	9
OBSAH	11
1 ÚVOD	13
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	15
2.1 Beamforming	15
2.1.1 Delay and Sum Beamforming	15
2.1.2 Kalibrovanie a určovanie váhových konštánt jednotlivých mikrofónov	17
2.1.3 Rozlíšenie	17
2.1.4 Dizajn poľa	18
2.1.6 Optimalizácia poľa	21
2.1.7 Prehľad dôležitých vzorcov a vlastností pre návrh poľa	21
2.2 Prehľad mikrofónových polí využívajúcich technológiu beamforming	22
2.2.2 Skladacie polia	23
3 ANALÝZA	25
3.1 Cieľ práce	25
4 KONCEPČNÉ RIEŠENIA	27
4.1 Voľba materiálov	27
4.2 Uzol 1 – Upevnenie mikrofónov na konštrukciu	27
4.3 Uzol 2 – Mechanizmus sklápania ramien	29
5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE	31
5.1 Výsledné konštrukčné riešenie	31
5.1.1 Tri možné polohy zaistenia ramien	32
5.2 Tvar poľa a rozmiestnenie mikrofónov	34
5.2.1 Overenie funkčnosti geometrie	34
5.3 Ramená poľa	35
5.3.1 Výpočet statického zaťaženia	36
5.3.2 Uzatvorenie koncov ramien	38
5.4 Pripojenie meracích mikrofónov a SMB konektorov	38
5.5 Mechanizmus sklápania ramien	39
5.5.1 Objímka ramena	39
5.5.2 Konzola	40
5.5.3 Kontrolný výpočet poistného kolíku	41
5.5.4 Kontrolný výpočet lisovaného kolíka	42
5.5.5 Výpočet predpätie skrutiek spájajúcich konzolu a stredový náboj	43
5.5.6 Zaťahovací moment	43
5.5.7 Kontrola skrutiek na otláčenie závitů	43
5.6 Stredový náboj	44
5.6.1 Kontrola skrutiek na otláčenie závitů	45
5.7 Nosný diel	46
5.8 Kontrolný výpočet nosnej trubky	47

5.9	Detail spojenia stredového náboja, kamery a nosnej trubky	48
5.10	Montážne prvky konštrukcie	48
5.10.1	Skrutky, podložky a matice	48
5.10.2	Nastavovacia skrutka	49
5.10.3	Sťahovacie pásky	49
5.11	Meracie prvky a prvky slúžiace na vedenie signálu	50
5.11.1	Mikrofóny	50
5.11.2	SMB konektory a kabeláž	51
5.11.3	LEMO konektor	52
6	DISKUSIA	53
6.1	Zhodnotenie výsledného konštrukčného návrhu	53
6.2	Ekonomická bilancia	53
7	ZÁVER	55
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	57
9	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	59
10	ZOZNAM OBRÁZKOV	61
11	ZOZNAM TABULIEK	63
12	ZOZNAM PRÍLOH	65
12.1	Výkresová dokumentácia	65

1 ÚVOD

1

Cieľom mojej bakalárskej práce je navrhnúť konštrukciu päťramenného mikrofónového poľa pre lokalizáciu zdrojov hluku metódou beamforming. Výsledná konštrukcia má byť ľahká, jednoduchá, lacná a musí umožňovať akustické meranie metódou beamforming v minimálnom frekvenčnom rozsahu 500 Hz – 2000 Hz. Zároveň by mala umožniť využiť súčasti vlastnené ústavom konštruovania (ďalej len ÚK), pretože sa tým veľmi znížia náklady na výrobu. Keďže cieľom práce nie je vymyslieť nové usporiadanie mikrofónov, výsledné usporiadanie mikrofónov je zhodné s poľom od spoločnosti *Brüel & Kjær*.

V prvej časti práce je vysvetlený princíp fungovania beamformingu, jeho zákonitosti a malý náhľad na v súčasnosti vyrábané polia, ich konštrukciu a základné charakteristiky. V ďalšej časti práce je spravená krátka analýza problému a z nej vyplývajúce variantné riešenia jednotlivých uzlov konštrukcie. Z týchto variantných riešení je vybrané jedno najvhodnejšie pre každý uzol a následne z nich vzniká celková výsledná konštrukcia. V poslednej časti práce je riešená ekonomická stránka problému a celkové zhodnotenie napísané v závere.

Táto práca pozostáva z sprievodnej správy, ktorá obsahuje výsledný konštrukčný návrh aj s výpočtami a z výkresovej dokumentácia vypracovanej v programe Auto CAD v požadovanom rozsahu.

2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2

V tejto kapitole bude popísaná lokalizácia zdroju hluku metódou beamforming. S princípom fungovania tejto metódy a s jej limitami. Nevynechám ani prehľad súčasne dostupných zariadení na lokalizáciu zdrojov hluku metódou beamforming.

2.1 Beamforming

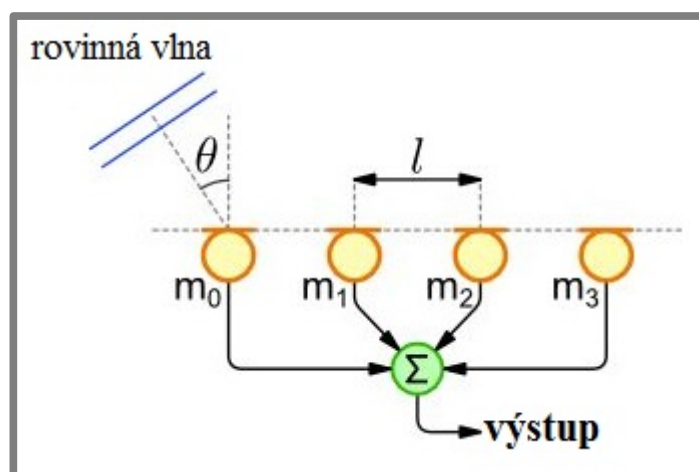
2.1

Beamforming je technika na meranie a lokalizáciu hluku zo stredných alebo väčších vzdialeností založená na poli mikrofónov. V podstate, sa lokalizácia zdroja hluku vykonáva pomocou analýzy dopadajúcich zvukových vln metódou *delay and sum*. Vzhľadom k tomu, že pri beamformingu sa meria na väčšie vzdialenosti sú tieto vlny brané ako rovinné. Uhlové rozlíšenie je nepriamo úmerné veľkosti poľa, takže veľkosť poľa by mala byť podstatne väčšia ako je vlnová dĺžka meraného signálu, aby sme dosiahli jemnejšie rozlíšenie. Avšak pri nízkych frekvenciách táto podmienka obvykle nie je splnená. Z tohto dôvodu sa metóda beamforming hodí skôr pre meranie hluku o vyšších frekvenciách. Na rozdiel od metódy NAH (Near-field Acoustical Holography) beamforming môže využívať nepravidelnú geometriu poľa mikrofónov. Pomocou nepravidelného poľa mikrofónov dokážeme udržiavať priestorový aliasing na prijateľnej úrovni až k vyšším frekvenciám. Tento fakt je tiež dôvodom prečo dokážeme pomocou beamformingu merať vysoké frekvencie s pomerne malým počtom mikrofónov. [8]

2.1.1 Delay and Sum Beamforming

2.1.1

Princíp beamformingu sa dá najlepšie pochopiť pomocou obrázka a postupu výpočtu smerovej charakteristiky intenzity hluku. Uvažujeme lineárne pole s počtom mikrofónov M ako zobrazuje obr. 1.



Obr. 2-1 Mikrofónne pole so zdrojom signálu vo veľkej vzdialenosti, vlny dopadajú na pole pod uhlom θ [15]

Na toto lineárne pole aplikujeme metódu Delay and Sum Beamforming. Zjednodušený postup výpočtu je:

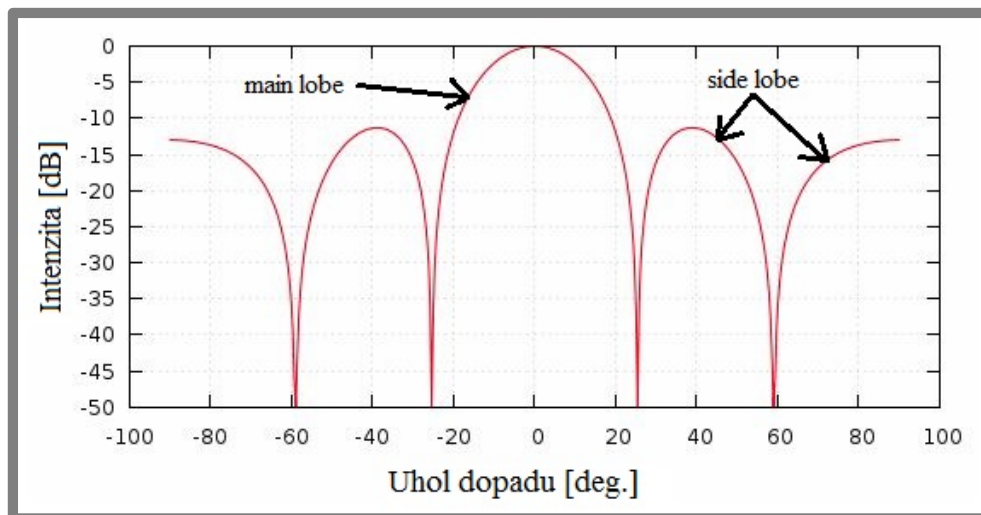
1. Dopadajúce zvukové vlny sú jednotlivo násobené váhovým koeficientom, ktorý je pre jednotlivé mikrofóny určený k referenčnému bodu spoločnému pre všetky mikrofóny, tak aby sa kompenzoval známy hluk z okolia.
2. Výpočet časového oneskorenia pre každý mikrofón pre daný počiatkový uhol podľa vzorca: $t_n = \frac{(n-1)d \sin \theta}{c}$

kde

t_n s - časové oneskorenie mikrofónu n ,
 n - poradové číslo mikrofónu (1, 2, 3...),
 d mm - rozstup medzi mikrofónmi,
 θ ° - uhol dopadu zvukovej vlny pre počítaný smer,
 c m/s - rýchlosť zvuku

3. Vypočítané časové oneskorenie pre každý mikrofón sa aplikuje na priebeh zvuku zaznamenaný daným mikrofónom. Dôjde tak k posunu zaznamenaného zvuku o oneskorenie vypočítané pre daný mikrofón.
4. Sčítajú sa priebehy zo všetkých mikrofónov pre určenie celkovej hladiny hluku z práve počítaného smeru.
5. Tento proces sa opakuje pre všetky uhly dopadu v nami definovanom rozsahu. Týmto spôsobom vznikne mapa rozloženia akustického tlaku.
6. Poloha najväčšej intenzity na mape odpovedá polohe zdroja zvuku. [1]

V dôsledku toho, že do merania presakujú vlny prichádzajúce z iných smerov ako je meraný smer sa na mapách intenzity vyskytujú tzv. sidelope. Úroveň sidelopes v porovnaní s hlavným lalokom (main lobe) v podstate určuje dynamický rozsah zariadenia ako je znázornené na obrázku 2-2 a schopnosť beamformeru potlačiť ostatné hluky.



Obr. 2-2 Smerová charakteristika podľa [15]

2.1.2 Kalibrovanie a určovanie váhových konštánt jednotlivých mikrofónov

2.1.2

Ešte pred aplikáciou časových oneskorení je nutné jednotlivý namerané priebehy zvukov vynásobiť váhovými konštantami. Tieto váhové konštanty sú pre každý mikrofón individuálne. Váhové konštanty pomáhajú kompenzovať lokálny hluk, ktorý sa nachádza na mieste merania. Váhové konštanty sa používajú aj pri kalibrácii, keď zdroj hluku umiestnime do definovanej pozície v mapovanej zóne poľa a jednotlivé váhové konštanty sa nastavujú tak, aby mapa rozloženia akustického tlaku odpovedala definovanej pozícií zdroja hluku. [1]

2.1.3 Rozlíšenie

2.1.3

Rozlíšenie beamformera popisuje schopnosť zariadenia rozlíšiť dva rôzne zdroje hluku nachádzajúce sa blízko seba. Minimálna rozlíšiteľnosť zdrojov hluku je podľa Rayleighovho kritéria po odvodení a úprave rovná:

$$R(\theta) = \frac{\alpha}{\cos^3 \theta} \frac{z}{D} \lambda \quad (2-1)$$

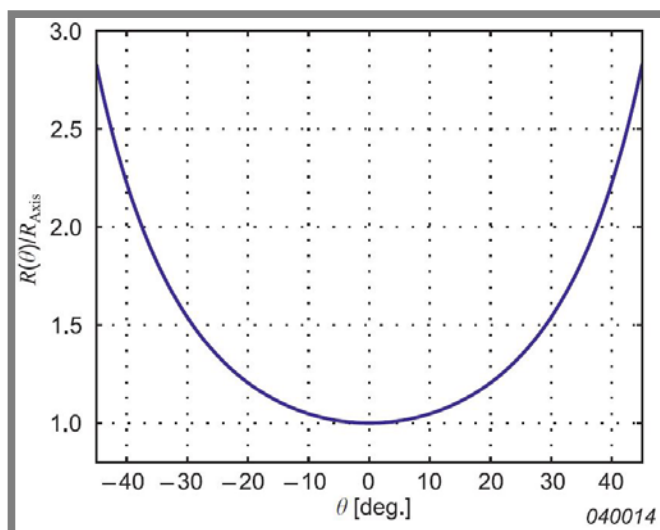
Kde $\alpha = 1$ pre lineárne polia a $\alpha \approx 1.22$ pre kruhové pole. Rovnica rozlíšenia pre vlny dopadajúce na osi sa na ľahko odvodiť ak zvolíme uhol dopadu $\theta = 0$:

$$R_{os} = \alpha \left(\frac{z}{D} \right) \lambda \quad (2-2)$$

Z týchto rovníc si môžeme všimnúť, že rozlíšenie je priamo úmerné vlnovej dĺžke a zlepšuje sa s veľkosťou beamformera, ale zhoršuje sa s rastúcou vzdialenosťou beamformera od meraného objektu. Ak porovnáme rozlíšenie na osi s všeobecnou rozlíšiteľnosťou zdrojov hluku získame vzťah:

$$\frac{R(\theta)}{R_{os}} = \frac{1}{\cos^3 \theta} \quad (2-3)$$

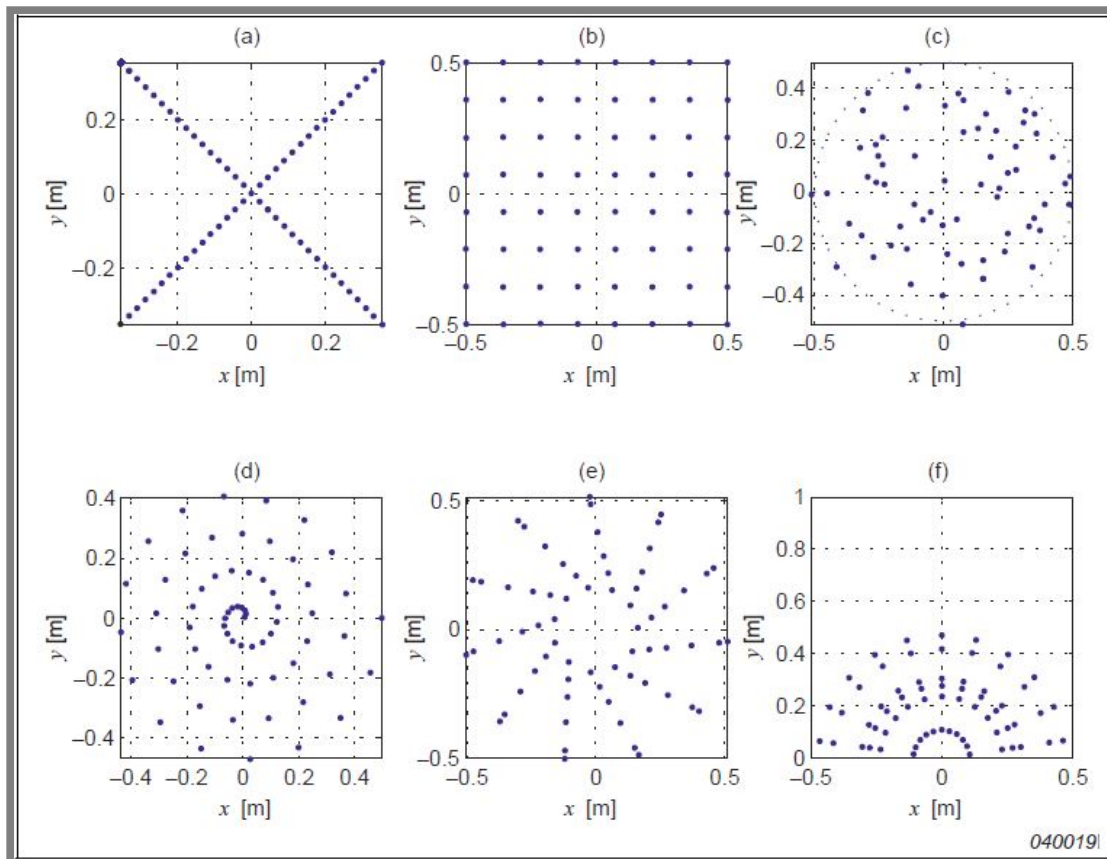
Toto porovnanie je veľmi dobre znázornené na obr. 2. Z tohto obrázka je vidieť, že pri uhle dopadu väčšom ako 30° je rozlíšenie horšie o viac ako 50% oproti rozlíšeniu pri nulovom uhle. To je dôvod prečo sa väčšinou počíta len s uhlom dopadu do 30° . [8]



br. 2-3 Znáznornenie zhoršenie rozlišovacej schopnosti poľa v závislosti na uhle dopadu [8]

2.1.4 Dizajn poľa

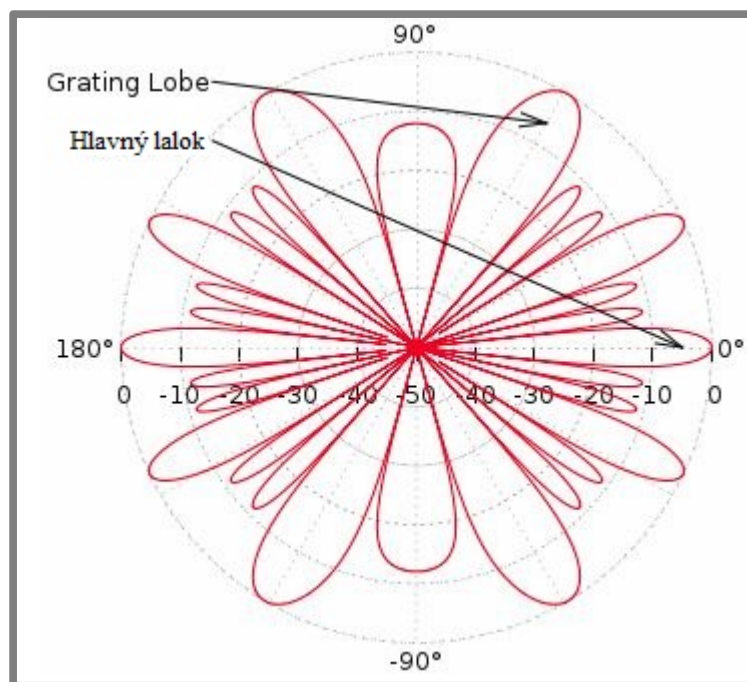
Výkonnosť beamformerov je do značnej miery daná geometriou a vyhotovením poľa meracích mikrofónov, pretože geometria poľa a rozmiestnenie mikrofónov v poli určuje správanie výpočtového modelu. To umožňuje zistiť vlastnosti daného poľa. My však potrebujeme riešiť opačnú úlohu. Ako navrhnuť pole s požadovaným frekvenčným rozsahom a rozlíšením? Toto je omnoho komplikovanejšia úloha. V ďalšom texte posúdim niekoľko rôznych dizajnov poľa ako sú pravidelné a nepravidelné polia a numericky optimalizované polia obr. 4. [8]



Obr. 2-4 Príklady rovinných pravidelných (a - b) a nepravidelných polí (c - f) [8]

Pravidelné polia

Najjednoduchším príkladom pravidelného poľa je lineárne pole. Toto pole je jednodimenzionálne s konštantnou vzdialenosťou medzi mikrofónmi. Najväčším problém týchto polí je tzv. priestorový aliasing. Ten zapríčiňuje, že okrem hlavného laloku, teda zdroja hluku, sa v smerovej charakteristike opakujú laloky, ktoré sa v tomto prípade nazývajú *grating lobes* (obr 4.). Prítomnosť *grating lobes* v smerovej charakteristike spôsobuje vznik tzv. *ghost images* vo výslednej hlukovej mape. [8]



Obr. 2-5 Periodicky vznik grating lobes [15]

Nepravidelné polia

Priestorový aliasing potlačíme použitím nepravidelnej geometrie poľa. Takáto geometria zaručuje, že každá vzdialenosť medzi dvoma mikrofónmi bude rozdielna. Vo všeobecnosti polia s nepravidelným alebo náhodným rozmiestnením mikrofónov prevyšujú polia s pravidelnou geometriou. Avšak, vyladenie takéhoto poľa je omnoho zložitejšie. Dá sa to však uľahčiť voľbou geometrie vychádzajúcej z koncentrickej logaritmickkej špirály alebo Archimedovej špirály, obr. 4 (d). Pri použití takýchto geometrií môžu byť jednotlivé vlastnosti testované systematickejšie. Ďalším problémom nepravidelných polí je stavba nosnej konštrukcie a vedenie kabeláže. Pre získanie vysokého rozlíšenia je tiež nutné, aby zariadenie malo dostatočne veľký priemer poľa. Pretože merania prebiehajú aj v exteriéri je nutné aby konštrukcia a celé pole bolo ľahko manipulovateľné, premiestniteľné a dalo sa ľahko a rýchlo zložiť a rozložiť priamo na mieste merania. [8]

2.1.5 Priestorový aliasing

Priestorový aliasing vzniká hlavne u pravidelných polí a to v dôsledku toho, že frekvencia dopadajúcich vln je vyššia ako je polovica vzorkovacej frekvencie. Podobné je to aj pri priestorovom vzorkovaní signálu. Tu je vzorkovací interval rovný vzdialenosti mikrofónov d . Nyquistovo kritérium vraví, že vzorkovacia frekvencia musí byť dvojnásobná oproti maximálnej frekvencii spracovávaného signálu, aby sme dokázali jednoznačne zrekonštruovať spracovávaný signál a nedochádzalo k priestorovému aliasingu. Z tohto dôvodu, vlny s vlnovou dĺžkou kratšou ako $\lambda_{\min} = 2d$ nebudú jednoznačne zrekonštruované. Z týchto vzťahov teda vyplýva vzorec pre maximálnu frekvenciu: [8]

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{c}{2d} \quad (2-4)$$

Avšak pre lineárne polia s rovnomerným rozložením mikrofónov a s pozorovacím uhlom v rozsahu $\pm 30^\circ$, je možné zrekonštruovať vlny s vlnovou dĺžkou minimálne $\lambda_{min} = \frac{d}{2}$. Pre takéto pole sa teda maximálna frekvencia počíta ako: [11]

$$f_{linmax} = \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{c}{\frac{d}{2}} \quad (2-5)$$

2.1.6 Optimalizácia poľa

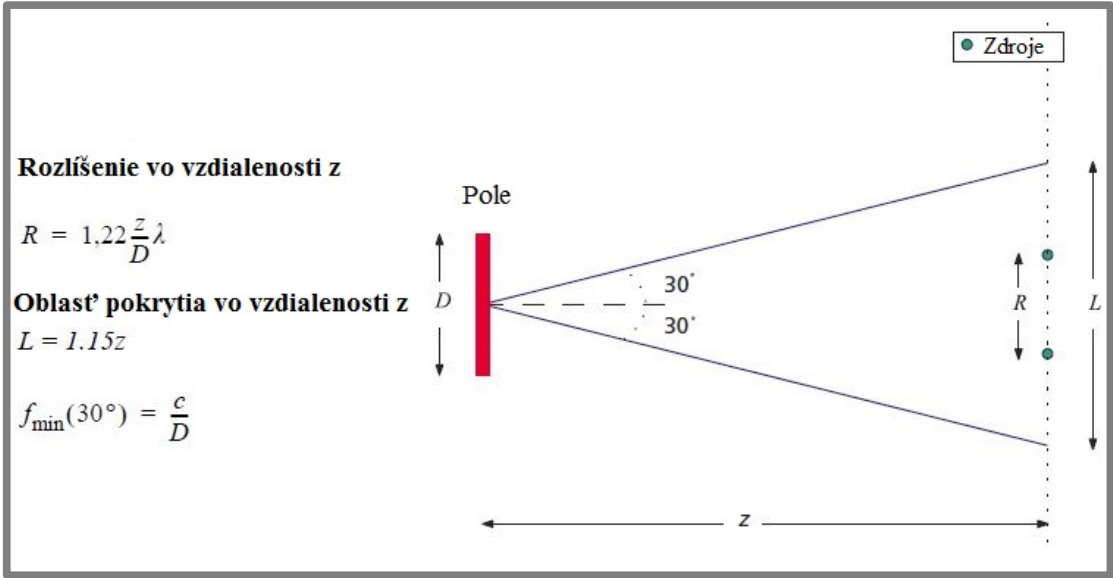
2.1.6

Jednou z možností ako sa dá navrhovať rozmiestnenie mikrofónov v poli je pomocou numerickej optimalizácie. Tá sa dá nastaviť na optimalizáciu rôznych vlastností. Napríklad na dosiahnutie určitého frekvenčného rozsahu pri nami zvolenom uhle merania. Optimalizáciou sa určia miesta kde by mali byť umiestnené mikrofóny tak, aby sme dosiahli maximálny dynamický rozsah pri danom frekvenčnom rozsahu a uhle merania. Samozrejme umiestnenie mikrofónov je tiež obmedzené nami zvolenými vonkajšími hranicami poľa (napr. kruhové pole o priemere D) a tým že pozície mikrofónov sa nesmú prekrývať. Optimalizačné metódy sú efektívny a dobre kontrolovateľný spôsob ako zvyšovať dynamický rozsah pre nami určený rozsah frekvencií. [8]

2.1.7 Prehľad dôležitých vzorcov a vlastností pre návrh poľa

2.1.7

Pri návrhu poľa pre beamforming ako aj pri samotnom meraní musíme vziať do úvahy niekoľko hľadísk. Napríklad frekvenčný rozsah, dynamiky rozsah, vzdialenosť od meraného objektu, priemer poľa, rozlišovaciu schopnosť poľa a veľkosť meranej oblasti. Všetky tieto aspekty spolu súvisia ako je ukázané na obr. 7. Dynamický rozsah definuje schopnosť poľa rozoznať dva rôzne intenzívne zdroje hluku. Napríklad keď máte d_{12} dB pre frekvencie do 3 kHz a uhol merania 30° dokážete rozoznať sekundárny zdroj hluku ktorý nie je slabší od primárneho o 12 dB. Akustické prostredie musí byť pri výbere poľa tiež brané do úvahy. Plne odrazová plocha (zem, podlaha) môže byť využitá pro použití poľa s tvarom pol kola, obr. (4) f, a aplikovaní algoritmu zrkadlovej plochy na nahratý signál. Avšak iné odrazy sú silne rušivé. Napríklad odrazy spoza poľa, pole nedokáže odlíšiť od odrazov v rovine poľa. Zdroje prichádzajúce spoza poľa sa na mape ukážu ako zdroje prichádzajúce z pred poľa. [8]

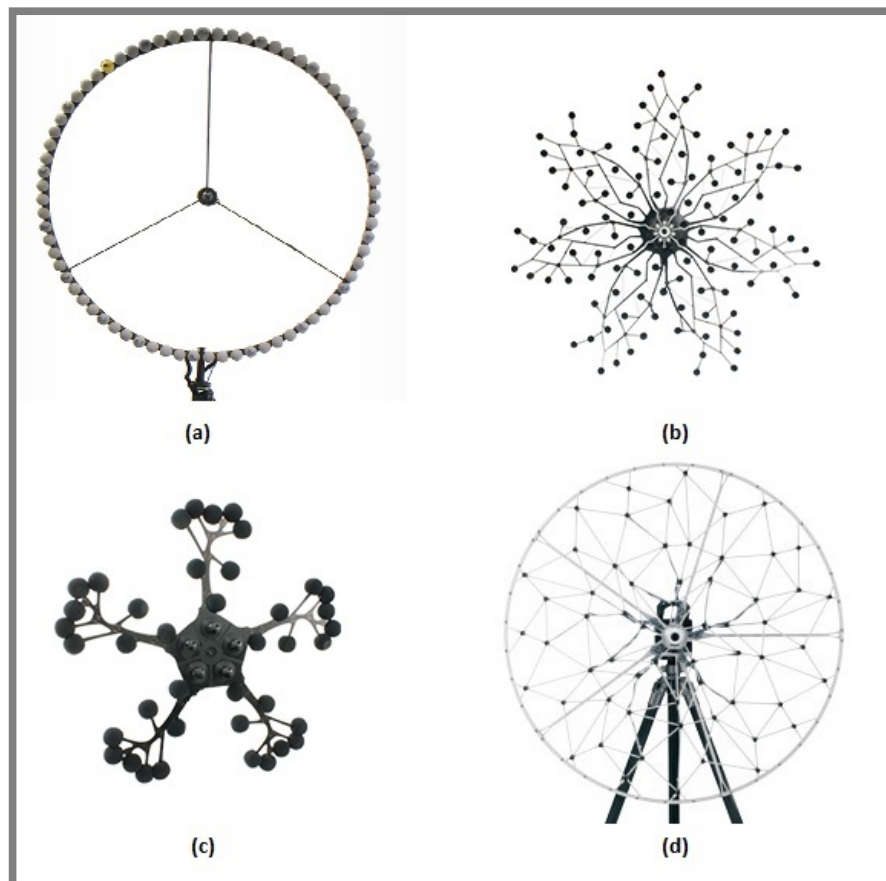


Obr. 2-6 Vlastnosti beamformera pre uhol merania 30° [8]

Mikrofónových polí existuje na dnešnom trhu pomerne veľa druhov a môžeme ich rozdeliť podľa rôznych parametrov napríklad podľa tvaru, veľkosti, frekvenčného rozsahu, používanej meracej technológie a toho či sú na vnútorné alebo vonkajšie použitie. Pri výbere vhodného poľa mikrofónov musí zákazník brať do úvahy všetky tieto parametre. Výrobcovia na svojich stránkach vôbec neudávajú ceny jednotlivých polí. To je asi spôsobené konkurenčným bojom.

S ohľadom na zadanie mojej bakalárskej práce uvediem len polia pre metódu beamforming.

Rovinné polia majú všetky mikrofóny umiestnené v jednej rovine. Existuje veľké množstvo rôznych usporiadaní mikrofónov v rovine. Od jednoduchého v tvare kruhu cez zložené v tvare pripomínajúcom kvet alebo strom, až po úplne náhodné umiestnenie. Takéto polia sa používajú najmä v exteriéri pri meraní väčších objektov.



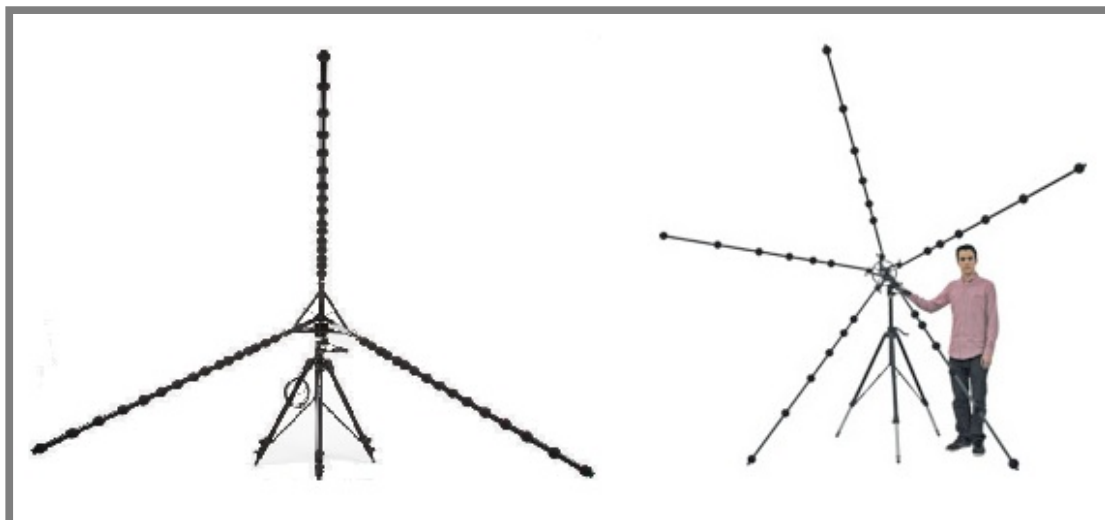
Obr. 2-7 Rôzne typy rovinných polí. (a) kruhové od spol. *gfai tech*, (b) a (c) od spol. *CAE Software & Systems*, (d) náhodné od spol. *Brüel & Kjær*

Keďže na trhu je najviac ponúkaných polí práve tohto typu sú tieto polia najrôznorodnejšie. Ich priemer sa pohybuje od 35 cm až po 4 m. Frekvenčný rozsah sa pohybuje od 200 Hz až po 20 kHz. A počet mikrofónov sa pohybuje od 32 po 120. Veľkou výhodou týchto polí je ich presnosť, ktorú dosahujú použitím veľkého počtu mikrofónov, a pomerne nízka minimálna frekvencia. Nevýhodou je zložitosť konštrukcie niektorých typov týchto polí na ktorú sa mikrofóny upevňujú. [2]

2.2.2 Skladacie polia

2.2.2

Skladacie polia majú svoje mikrofóny uložené v ramenách ktoré sa dajú sklápať. Tieto typy polí sa používajú hlavne v exteriéry. Pomocou takýchto polí sa merajú skutočne veľké objekty ako sú veterné turbíny alebo celé budovy. Tieto polia sa dajú nastaviť do troch rôznych polôh. V prvej je pole zložené s ramenami pri sebe. V tejto polohe sa pole prepravuje. V druhej polohe sú ramená otvorené tak, že tvoria rovinu. V tretej polohe sú ramená otvorené na 60°, tak že tvoria akýsi lievik. V tejto polohe dokáže pole potlačiť hluk prichádzajúci zozadu až o 10 dB v závislosti od frekvencie. [2]



Obr. 2-8 Skladacie polia. Vľavo od spoločnosti *gfai tech* a vpravo od spoločnosti *Brüel & Kjær*

Ich priemer sa pohybuje od 3,4 m po 3,5 m. Ich frekvenčný rozsah je od 100 Hz do 13 kHz. Počet mikrofónov umiestnených na poli je 30 pri *Brüel & Kjær* a 48 pri *gfai tech*. Ich výhodou je nízka minimálna frekvencia a pomerne jednoduchá konštrukcia. Nevýhodou je ich veľkosť.

3 ANALÝZA

3

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnúť prenosné päťramenné mikrofónové pole, ktoré bude schopné účinne lokalizovať zdroje hluku metódou beamforming. Konštrukcia tohoto poľa musí byť jednoduchá na výrobu a lacná. Avšak zároveň musí byť ľahká, skladacia a jeden človek ju musí sám a bez väčšej námahy zložiť a zároveň rozložiť. Takéto mikrofónové pole je možné aj zakúpiť. Takéto polia sú výkonné a presné a dokáže pracovať v širších frekvenčných pásmach, no ceny týchto polí sa pohybujú v státisícoch českých korún. ÚK už podobné pole vlastní, avšak toto pole pracuje len pri minimálnych frekvenciách okolo 1000 Hz, čo je najmä pri hlukoch produkovaných mechanickými zariadeniami nedostačujúce. Preto je mojou úlohou navrhnúť a skonštruovať konštrukciu, na ktorú bude možné nainštalovať čo najviac súčastí z polí, ktoré ÚK už vlastní. Geometria uloženia mikrofónov bude vychádzať z poľa od spoločnosti *Brüel & Kjær* ktoré splňuje požadovaný frekvenčný rozsah 500 Hz - 2000 Hz.

3.1 Cieľ práce

3.1

Cieľom práce nie je návrh novej geometrie uloženia mikrofónov, preto moja konštrukcia bude vychádzať z päťramenného mikrofónového poľa od spoločnosti *Brüel & Kjær* určeného na lokalizáciu zdrojov hluku pomocou metódy beamforming. Naopak cieľom práce je čo najväčšie využitie súčastí z polí vlastnených ÚK.

- Návrh by mal byť jednoduchý a lacný no zároveň kvalitný a funkčný
- Konštrukcia poľa musí byť ľahká, dobre manipulovateľná a skladacia
- Uchytenie mikrofónov a kamery, ktoré budú použité z poľa, ktoré je už vo vlastníctve ÚK, musí umožňovať ich jednoduchú montáž na pole a demontáž z poľa, tak aby sa dali použiť na oboch poliach
- Tento návrh bude dbať aj na pripojenie poľa a jednotlivých mikrofónov k ďalším meracím zariadeniam
- Návrh nerieši stojan, na ktorý sa pole nasadzuje, keďže ten už je vo vlastníctve ÚK
- K tomuto návrhu bude vypracované aj výkresová dokumentácia v program AutoCAD

4 KONCEPČNÉ RIEŠENIA

4

Zo zadania mojej bakalárskej práce je jasné, že moja konštrukcia bude skladacia, prenosná a päťramenná. Najviac sa tomuto konceptu približuje päťramenné skladacie pole od spoločnosti *Brüel & Kjær* z ktorého som pri návrhu vychádzal. V nasledujúcej časti mojej bakalárskej práce sa zameriam najmä na voľbu materiálov jednotlivých súčastí a rôzne varianty riešení jednotlivých uzlov konštrukcie. Konštrukcia by mala byť ľahká, skladacia, prenosná, jednoduchá na výrobu a lacná.

4.1 Voľba materiálov

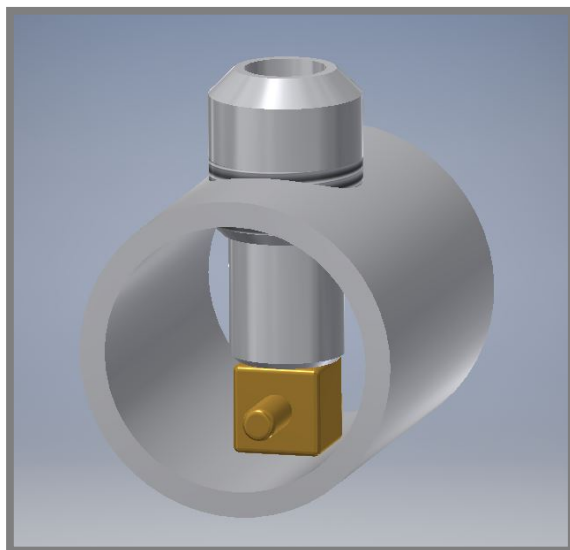
4.1

Pri voľbe materiálov jednotlivých súčastí takejto konštrukcie je treba brať do úvahy najmä ich mechanické vlastnosti, váhu, cenu a v neposlednom rade aj odolnosť voči korózií. Ak zoberieme do úvahy dva základné konštrukčné materiály oceľ a hliník a porovnáme ich, zistíme že oceľ ma lepšie mechanické vlastnosti a je lacnejšia. Jej veľkou nevýhodou je však váha a nízka odolnosť voči korózií. Hliník je drahší, ale je o 64% ľahší a dobre odoláva korózii. A mechanické vlastnosti niektorých jeho zliatin sú porovnateľné s oceľou. Preto práve polotovary zo zliatin hliníku sú dobrou voľbou na výrobu väčšiny súčastí tejto konštrukcie. Len v prípade ramien mikrofónového poľa, pripadá do úvahy okrem zliatin hliníku ešte jeden modernejší, avšak drahší materiál a to kompozit z uhlíkových vlákien. Tento materiál je veľmi ľahký, tuhý a húževnatý a jeho použitím výrazne znížime váhu celého poľa a zároveň zredukujeme napätie v jednotlivých súčastiach konštrukcie.

4.2 Uzol 1 – Upevnenie mikrofónov na konštrukciu

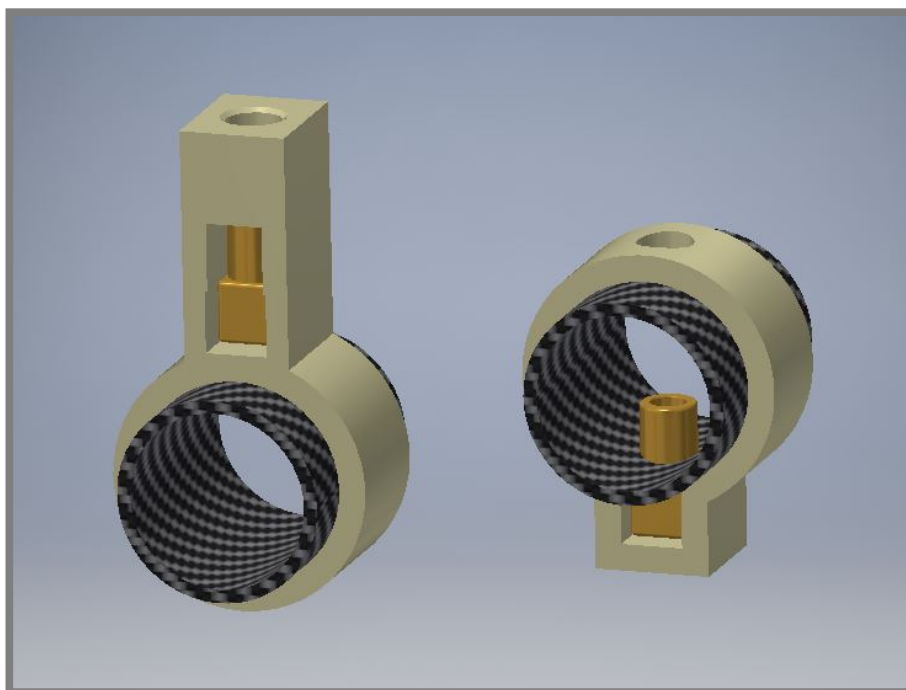
4.2

Tento uzol vyžaduje dva rôzne prístupy. Tie závisia od materiálu z ktorého sa bude vyrábať rameno na ktorom budú mikrofóny upevnené. Ako profil ramena je najvhodnejšie použiť kruhové trubky kvôli tomu že po takejto trubke sa zvukové vlny šíria najlepšie. Prvou materiálovou variantnou je hliník. Pre túto variantu sa mi podarilo vymyslieť taký systém, že SMB konektory aj kabeláž by boli schované vnútri trubky. Čo je veľmi veľká výhoda najmä pri manipulácii. Na druhú stranu je veľkou nevýhodou tejto konštrukcie náročná montáž a usadenie SMB konektorov do potrebnej pozície. Náročne by bolo aj vedenie kabeláže vnúťom trubky.



Obr. 4-1 Znáznornenie upevnenia SMB konektoru na rameno z hliníku

Druhou materiálovou variantou ramena je kompozitná trubka z uhlíkových vlákien. Pre túto možnosť som vymyslel dve možné podobné riešenia. Jedná sa vlastne o prstence v ktorých je vsunutý a prilepený SMB konektor. Prstence by sa voči trubke poistili napríklad nastavovacou skrutkou.



Obr. 4-2 Príklady možného upevnenia SMB konektoru na rameno z kompozitu

Prevedenie na obr. vľavo je bez priechodnej diery cez trubku. Mikrofón prechádza dierou v prstenci a nasúva sa do SMB konektoru, ktorý je vsunutý v drážke a prilepený. Prevedenie na obrázku 4-2 vpravo je s priechodnou dierou v trubke a v prstenci. Mikrofón sa na SMB konektor, ktorý je uložený v trubke zo spodnej

strany, nasúva cez prstenec a trubku z druhej strany. Tieto varianty majú nevýhodu v tom že kabeláž by musela byť ťahaná po vonkajšej strane trubky a pri manipulácii s poľom by sa mohla zachytávať o okolité objekty. Ďalšou nevýhodou je, že ak by pole spadlo na nejakú ostrú hranu kabeláž by sa mohla poškodiť.

4.3 Uzol 2 – Mechanizmus sklápania ramien

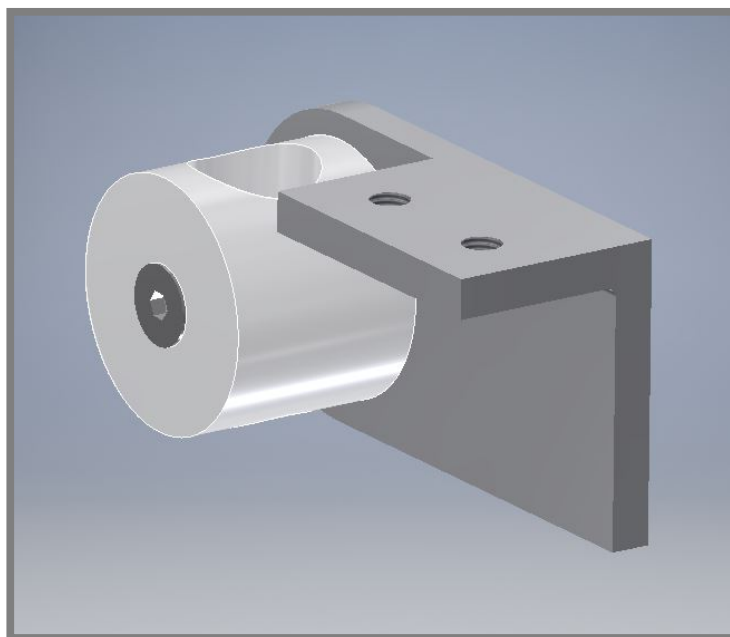
4.3

Tento uzol musí splňovať tri hlavné podmienky.

1. Ramená musia smerovať do stredu poľa
2. Ramená sa musia dať sklápať
3. Ramená sa musia dať zaistiť v minimálne troch polohách. V zatvorenej, v rovinnej a v otvorenej na 60° tak aby tvorili lievik

Nasledujúce riešenia sú vybrané ako dve najlepšie mnou navrhované a splňajúce vyššie vymenované podmienky.

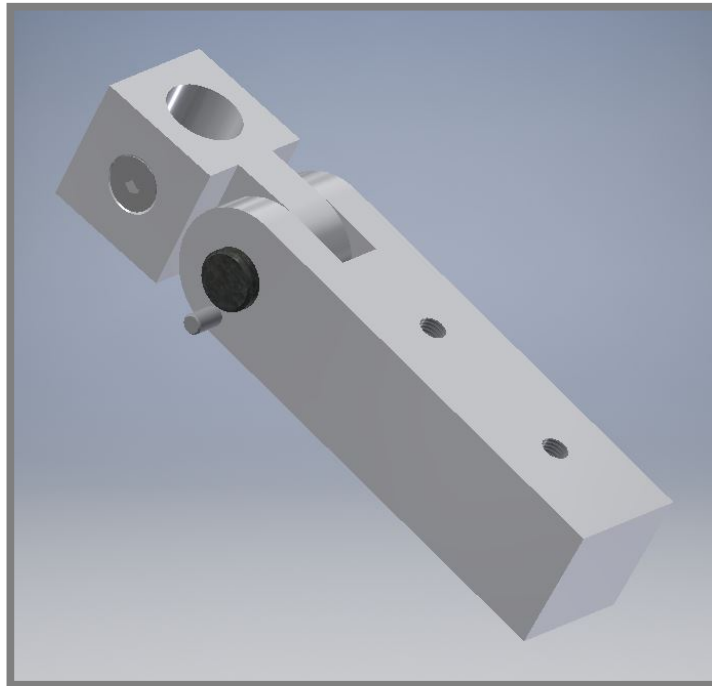
Prvým riešením je konzola v tvare L ktorá sa pomocou skrutiek priskrutkuje na stredový diel. Do konzoly je vsadený rotačný diel do ktorého sa vsúva rameno ktoré je v ňom zaistené skrutkou. Táto skrutka zároveň spája rotačný diel s konzolou. Zaistovanie ramena v jednotlivých pozíciách by bolo pomocou kolíka.



Obr. 4-3 Prvé prevedenie mechanizmu sklápania ramien. L konzola a rotačný diel so skrutkou

Druhým riešením je mechanizmus pripomínajúci pánt. Taktiež sa skladá z dvoch dielov. Prvý diel, ktorý sa priskrutkováva k stredovému dielu, má v sebe drážku do ktorej sa vkladá diel druhý. Oba diely majú v mieste spojenia diery do ktorých sa

vkladá čap. Ten umožňuje rotáciu druhého dielu, v ktorom je umiestnené rameno zaistené skrutkou. Vymedzenie polôh ramena je opäť zabezpečené pomocou kolíka.



Obr. 4-4 Druhé prevedenie mechanizmu sklápania ramien „pant“

5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

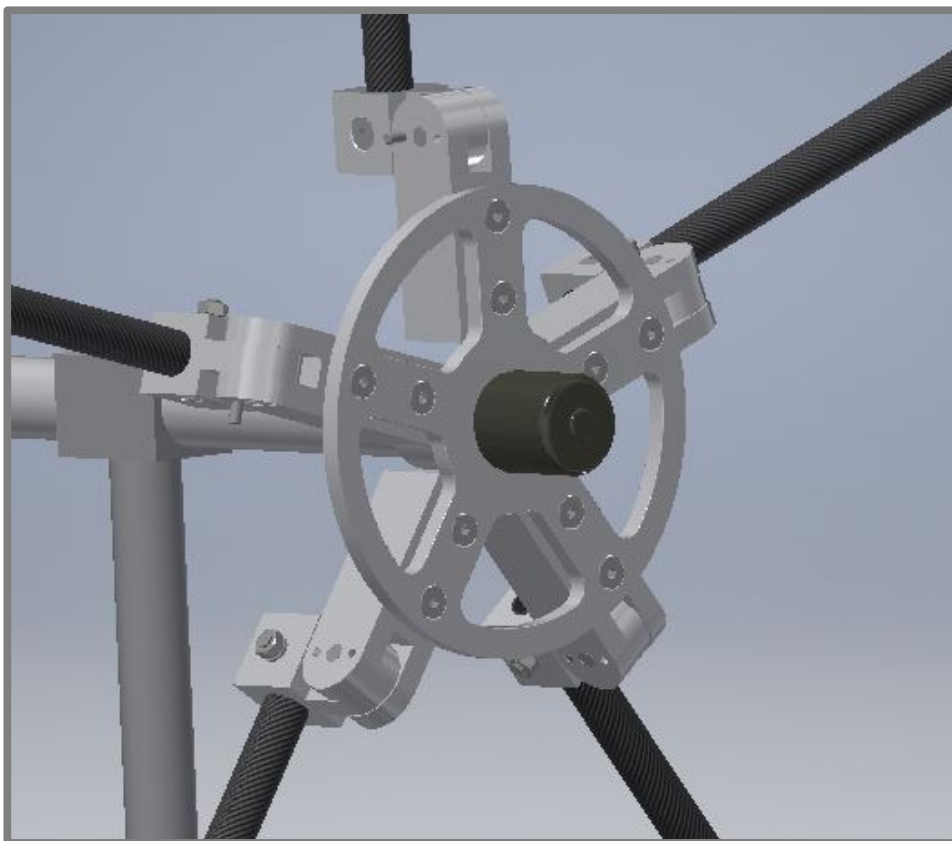
5

Vybrané konštrukčné riešenie vychádza so skladacieho päťramenného poľa od spoločnosti *Brüel & Kjær*. U tohto poľa poznáme presnú geometriu uloženia mikrofónov a vieme dokázať, že bude fungovať v nami požadovanom frekvenčnom rozsahu. Ďalším dôvodom je, že zadanie udáva aby mnou navrhnuté pole bolo päťramenné. Konštrukciu som navrhoval a modeloval v programe Autodesk Inventor Professional 2016. V tomto programe som aj robil výpočty jednotlivých prvkov konštrukcie, overoval ich priehyb, tuhosť a počítal napätia a momenty. Konštrukciu som navrhol tak aby bola čo najjednoduchšia a najlacnejšia, ale nebola ťažká a dobre odolávala korózii.

5.1 Výsledné konštrukčné riešenie

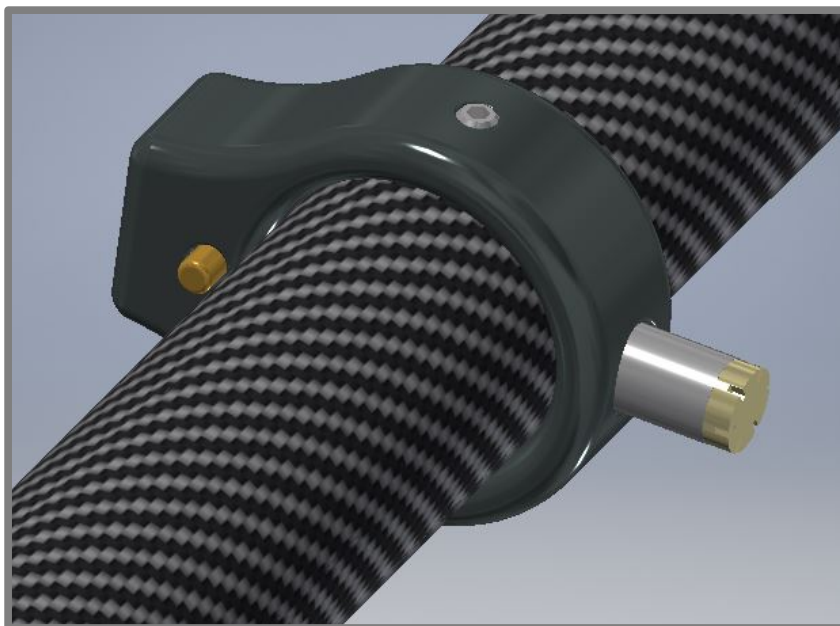
5.1

Vzhľadom na pomer veľkosti priemeru poľa k ostatným častiam, sú na obrázkoch vyobrazené detailnejšie jednotlivé uzly. Mechanizmus sklápania ramien som sa rozhodol riešiť druhou možnosťou. Toto riešenie je síce ťažšie, ale poskytuje celej konštrukcii vyššiu tuhosť.



Obr. 5-1 Stred poľa spredu

Úchyty mikrofónov som sa rozhodol riešiť tretím riešením. Toto riešenie je váhovo najľahšie a zabezpečí mikrofóny v presne definovaných polohách.



Obr. 5-2 Detail uchytenie mikrofónu a SMB konektora

5.1.1 Tri možné polohy zaistenia ramien

Zavretá

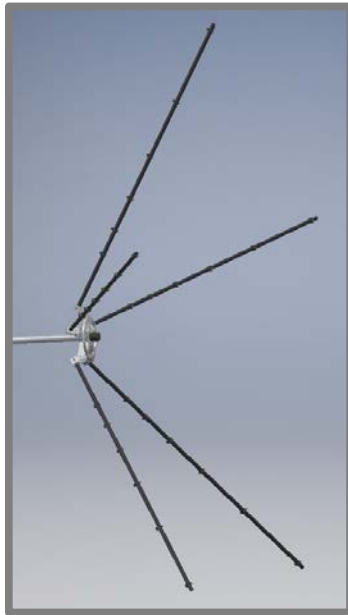
V tejto polohe sú všetky ramená sklopené smerom k sebe. V tejto polohe sa pole preváža.



Obr. 5-3 Zavreté pole

Otvorená na 60°

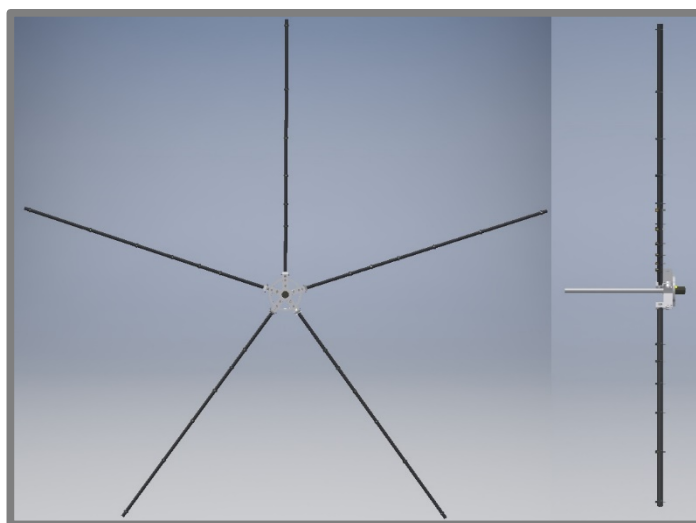
V tejto polohe sa meria ak zo zadnej časti poľa prichádzajú nejaké nežiadúce odrazy zvuku a hluk. Ramená tvoria akýsi lievik. V tejto polohe dokáže pole potlačiť hluk prichádzajúci spoza poľa až o 10 dB v závislosti od frekvencie. [2]



Obr. 5-4 Ramená sú otvorené na 60°

Rovinná

Ramená a teda aj mikrofóny v tejto polohe tvoria jednu rovinu. Toto je štandardná poloha používaná pri bežnom meraní.

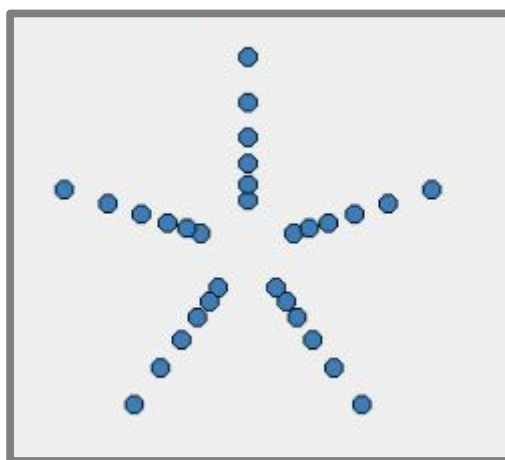


Obr. 5-5 Pole v rovinatej polohe spredu a z boku

5.2 Tvar poľa a rozmiestnenie mikrofónov

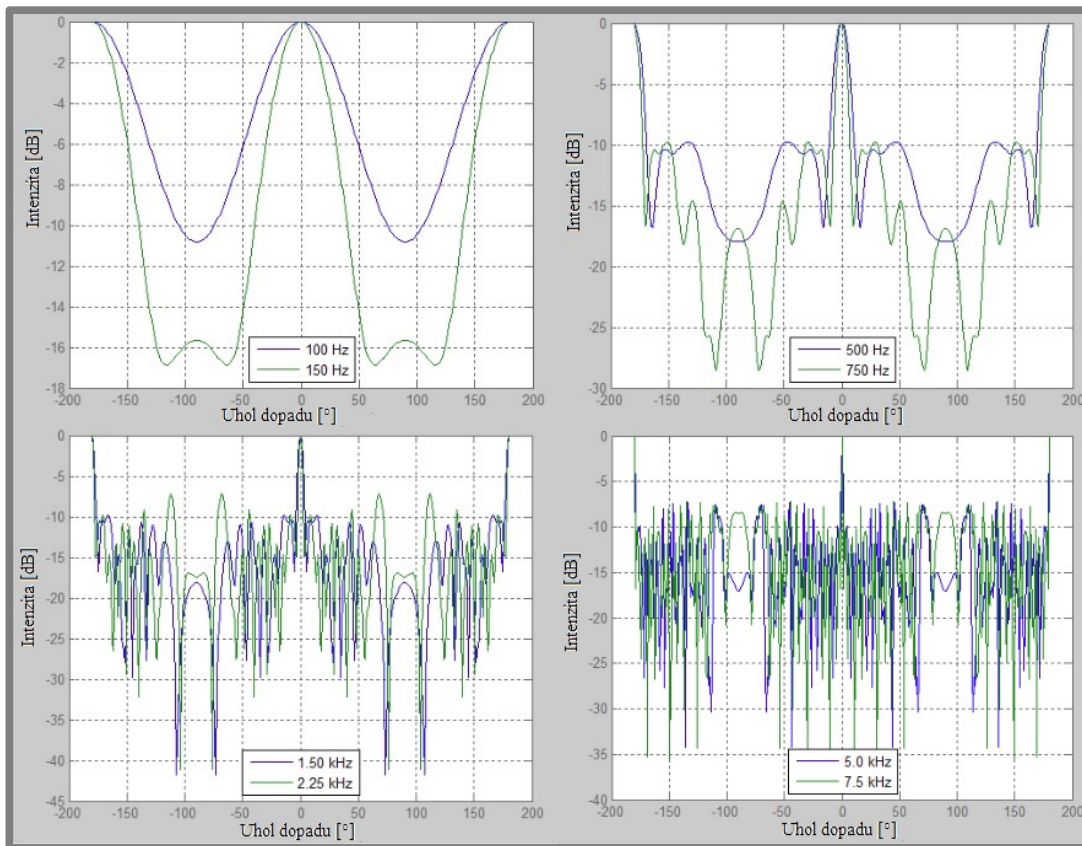
S mojím zadáním sa zhoduje jedno už vyrábané pole od spoločnosti *Brüel & Kjær*. Vzhľadom k tomu, že zadáním práce nie je nachádzať nové rozmiestnenia mikrofónov a geometrie poľa, som sa rozhodol použiť rozmiestnenie mikrofónov použité na tomto poli, keďže toto rozmiestnenie je už optimalizované a výrobca s ním dosahuje najlepšie výsledky. Podľa výrobcu by malo pole účinne pracovať vo frekvenčnom rozsahu 100 Hz až 5 kHz a keďže tento rozsah spĺňa moje zadanie je tato geometria vhodná pre moje použitie. Ďalšou výhodou je, že ÚK už pole od tohto výrobcu vlastní, a teda vlastní aj vyhodnocovací software na ktorý je táto geometria optimalizovaná. Schematické znázornenie tejto geometrie je zobrazené na obrázku 5-6.

Obr. 5-6 Schematické znázornenie geometrie rozmiestnenia mikrofónov



5.2.1 Overenie funkčnosti geometrie

Aj keď sa jedná o geometriu už používanú, rozhodol som sa jej funkčnosť overiť. Pomocou programu MATLAB a výpočtového kódu napísaného mojím vedúcim práce pánom Ing. Milanom Klapkom, Ph.D sme simulovali správanie smerovej charakteristiky s závislosti na frekvencii dopadajúceho signálu. Na obrázku 5-2 sú vykreslene smerové charakteristiky vypočítané v programe MATLAB pre geometriu poľa zhodnú s poľom od spoločnosti *Brüel & Kjær*. Nás zaujímajú hodnoty len do $\pm 30^\circ$ vid'. kapitola 2.1.3 Rozlíšenie.



Obr. 5-7 Smerové charakteristiky pre vybrané frekvencie

Ako je vidieť na obrázku pri nízkych frekvenciách okolo 100 Hz je smerovosť charakteristiky veľmi zlá. S rastúcou frekvenciou sa smerovosť zlepšuje. Z vypočítaných smerových charakteristík je možné vyčítať, že pole v požadovanom frekvenčnom rozsahu 500 Hz - 2000 Hz pracuje dobre. Jeho dynamický rozsah je na úrovni 10 dB. Avšak pri príliš vysokých frekvenciách okolo 5 kHz a vyššie sa začína naplno prejavovať priestorový aliasing a jeho dynamický rozsah klesá.

5.3 Ramená poľa

5.3

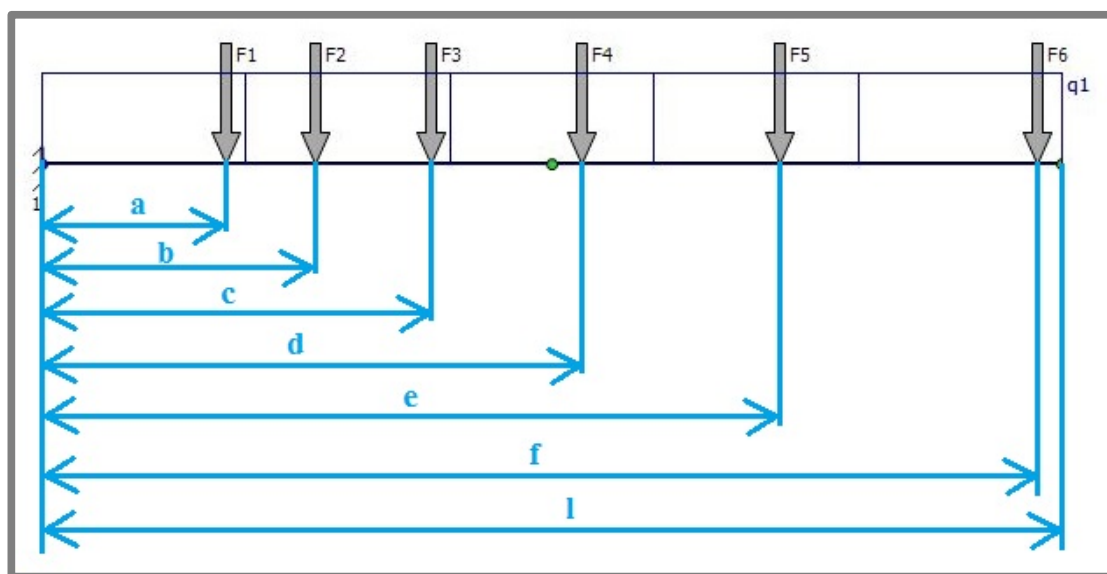
Pri návrhu ramena prichádzajú do úvahy z hľadiska hmotnosti, tuhosti a odolnosti voči korózii dva materiály. Zliatina hliníka a kompozit z uhlíkových vlákien. Keďže beamforming vyžaduje aby mikrofóny boli čo najpresnejšie umiestnené v daných pozíciách, zvolil som ako materiál ramena kompozit z uhlíkových vlákien. Jeho cena je vyššia, ale ušetrí sa tak celkovo asi 2 kg hmotnosti a tým sa zmenší zaťaženie ostatných častí konštrukcie. Avšak jeho vlastnosti sú silno závislé na smere uloženia vlákna v matrici (živica). Mechanické vlastnosti kompozitu z uhlíkových vlákien su uvedené v tab. 1. Ako je vidno sú silno závislé na smere pôsobiaceho zaťaženia. Nastavenie týchto vlastností sa robí po dohode s výrobcom podľa požiadaviek zákazníka.

Tab. 5-1 Mechanické vlastnosti kompozitu z uhlíkových vlákien [10]

Modul pružnosti v ťahu 0°	175 GPa
Modul pružnosti v ťahu 90°	8 GPa
Modul tuhosti	5 GPa
Poissonová konštanta	0,3
Pevnosť v ťahu 0°	1000 MPa
Pevnosť v ťahu 90°	40 MPa
Hustota	1690 kg/m ³

5.3.1 Výpočet statického zaťaženia

Výpočet som vypracoval v programe Autodesk Inventor Professional 2016 v funkcií pre analytický výpočet nosníku. V prvom rade som musel definovať môj nosník, jeho profil a materiál. V ďalšom kroku som definoval veľkosť a umiestnenie zaťaženia nosníka. Nosník je umiestnený v polohe vodorovnej so zemou. V tejto polohe je nosník vďaka gravitácii maximálne namáhaný. Z ponuky firiem som si vybral trubku s vonkajším priemerom $D = 23 \text{ mm}$ a hrúbkou steny $S = 1,5 \text{ mm}$.



Obr. 5-8 Znáozornenie spôsobu zaťaženia a jeho polohy

$$a = 318 \text{ mm}$$

$$b = 471 \text{ mm}$$

$$c = 670 \text{ mm}$$

$$d = 932 \text{ mm}$$

$$e = 1273 \text{ mm}$$

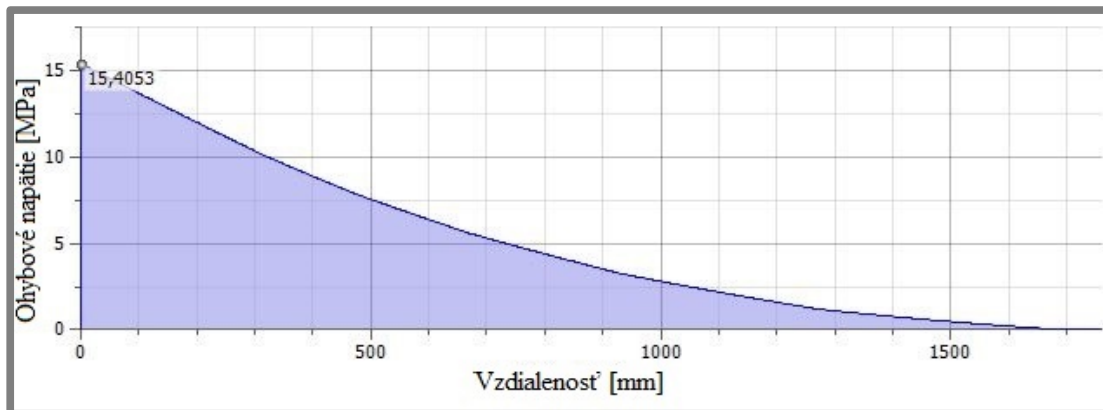
$$f = 1718 \text{ mm} \dots \text{vzdialenosť síl od počiatku (odpovedajú umiestneniu mikrofónov)}$$

$$l = 1760 \text{ mm} \dots \text{celková dĺžka voľného konca ramena}$$

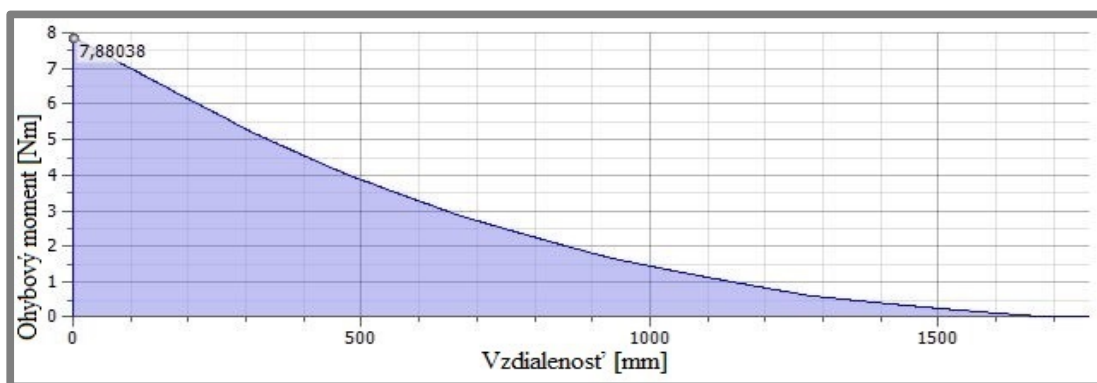
$$q1 = 1,68 \text{ N/m} \dots \text{gravitačná sila}$$

$$F1 - F6 = 0,981 \text{ N} \dots \text{zaťaženie od mikrofónov, držiakov a káblov}$$

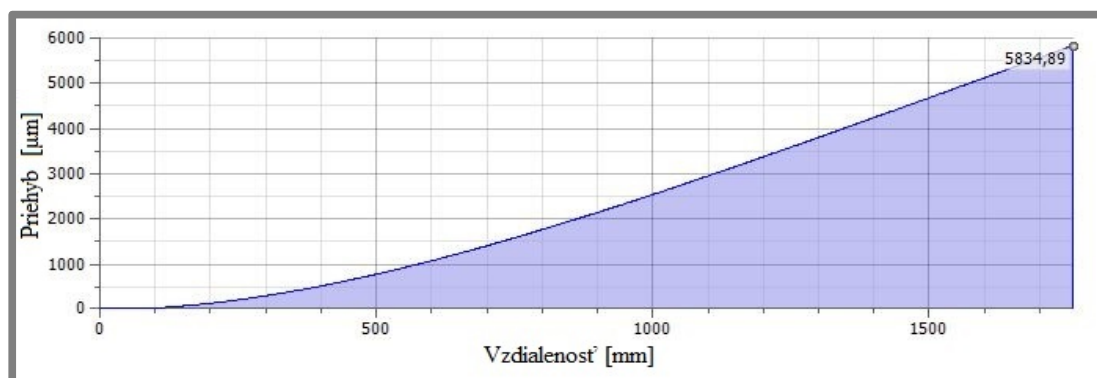
Sily F1 – F6 sú mierne predimenzované, aby sme potvrdili funkčnosť konštrukcie aj pri vyššom zaťažení. Na grafoch je znázornený priebeh ohybového napätia, ohybového momentu a priebyb. Vstupné hodnoty mechanických vlastností sú uvedené v tabuľke 1.



Obr. 5-9 Priebeh ohybového napätia



Obr. 5-10 Priebeh ohybového momentu



Obr. 5-11 Priebyb voľného konca nosníku

Ako je vidieť z obrázkov, z pevnostného hľadiska tento profil spĺňa požiadavky viac ako dostatočne. Z grafu priehybu sme zistili aj odchýlky jednotlivých mikrofónov od ideálnej pozície. Tie sú uvedené v tabuľke 2.

Tab. 5-2 Odchýlky mikrofónov

Číslo mikrofónu	Odchýlka [mm]
1	0,34
2	0,7
3	1,3
4	2,27
5	3,69
6	5,65

To či a do akej miery budú tieto odchýlky znehodnocovať meranie sa ukáže až pri praktickom meraní. Ak by pri meraní problémy nastali, bolo by možné pozície mikrofónov zaistiť použitím dodatočnej konštrukcie upevnenej na koncoch ramien, ktorá by zaistila ich vzájomnú polohu.

5.3.2 Uzatvorenie koncov ramien

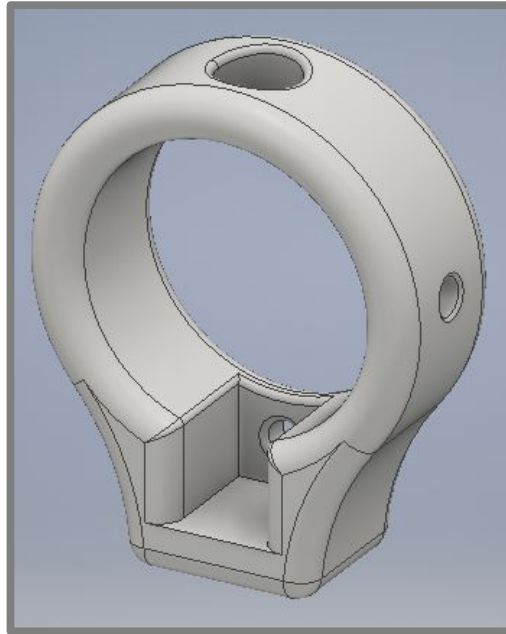
Konce ramien som sa rozhodol uzavrieť pomocou záslepky. Je to veľmi jednoduché a lacné riešenie. Navyše tieto záslepky sú vyrobené z plastu, takže sú veľmi ľahké.



Obr. 5-12 Záslepka [16]

5.4 Pripojenie meracích mikrofónov a SMB konektorov

Návrh musí zaistiť presnú geometriu umiestnenia a polohu mikrofónov. Taktiež musí umožňovať jednoduchú, rýchlu a pohodlnú výmenu mikrofónov. Zároveň by mal byť čo najjednoduchší a najlacnejší. Rozhodol som sa pre variantu zobrazenú na obrázku 6, pretože je jednoduchá, ľahká a najlepšie spĺňa požiadavky.



Obr. 5-13 Úchyt SMB konektorov

U tejto súčasti predpokladám jej výrobu technológiou Rapid Prototyping. Súčasť bude vyrobená z ABS plastu, ktorý má dobré mechanické vlastnosti. Naša škola touto technológiou disponuje a to znižuje náklady na jej výrobu. Polohu súčasti na ramene poistí nastavovacia skrutka inštalovaná na boku súčasti.

5.5 Mechanizmus sklápania ramien

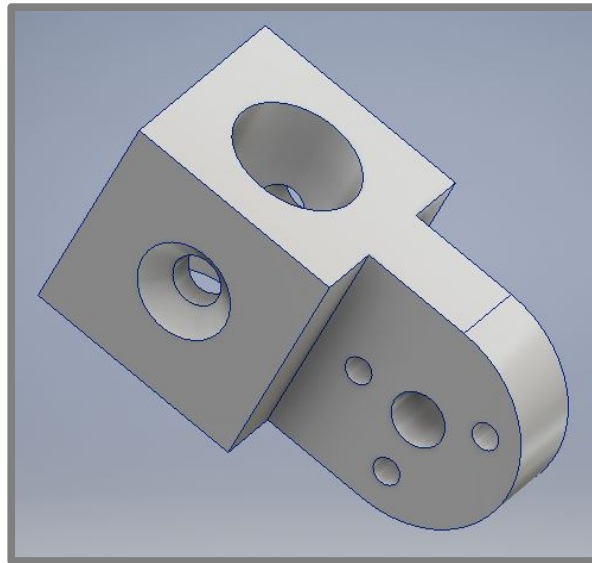
5.5

Tento uzol som sa rozhodol riešiť pomocou varianty zobrazenej na obrázku 4. Jej súčasti sú jednoduchšie na výrobu a poskytujú celej konštrukcii väčšiu tuhosť. Obe súčiastky sú spojené pomocou kolíka ktorý je v konzole nalisovaný a v objímke je uložený voľne tak aby sa objímka mohla otáčať. Poloha natočenia je zaistená kolíčkom.

5.5.1 Objímka ramena

Objímka ramena slúži na uchytenie ramena v mechanizme sklápania. Rameno sa nasunie do objímky a zaistí sa skrutkou proti ďalšiemu pohybu.

Materiál:	EN AW-2030-T4
Polotovár:	40x40-85 ČSN EN 755-4
Hmotnosť:	0,4 kg

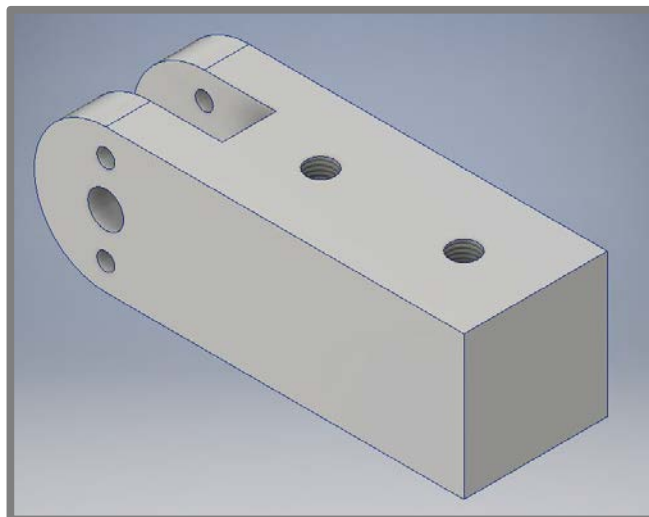


Obr. 5-14 Objímka

5.5.2 Konzola

Konzola je slúži na prichytenie objímky s ramenom k stredovému náboju. Konzola je k stredovému náboju priskrutkovaná pomocou dvoch skrutiek.

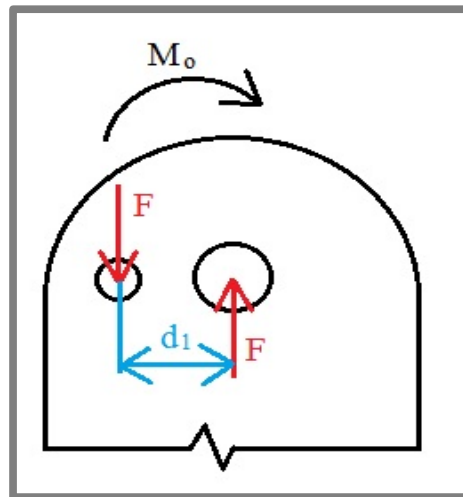
Materiál: EN AW-2030-T4
Polotovár: 40x40-85 ČSN EN 755-4
Hmotnosť: 0,4 kg



Obr. 5-15 Konzola

5.5.3 Kontrolný výpočet poistného kolíku

Priemer kolíka som predbežne zvolil $d = 5 \text{ mm}$ a materiál kolíka som zvolil ČSN EN 1.0060. V nasledujúcom výpočte overím či mnou navrhovaný kolík bude môcť byť použitý.



Obr. 5-16 Schéma statického zaťaženia

Výpočet sily pôsobiacej na kolík

Silu pôsobiacu na kolík vypočítame zo vzťahu

$$F = \frac{M_o}{d_1} = \frac{7,88}{0,0125} = 630,4 \text{ N} \quad (5-1)$$

kde:

M_o Nm - ohybový moment

d_1 m - vzdialenosti osi poistného kolíku od osi lisovaného kolíku

Kontrola kolíka na strih

Kolík je vyrobený z ocele ČSN EN 1.0060, ktorej medza klzu $R_e = 325 \text{ MPa}$. Z tejto medze vypočítame dovolené napätie v šmyku podľa vzťahu

$$\tau_{Ds} = 0,577 \cdot R_e = 0,577 \cdot 325 = 187,5 \text{ MPa} \quad (5-2)$$

Šmykové napätie vypočítame pomocou vzorca

$$\tau_s = \frac{4F}{\pi d^2 \cdot 2} = \frac{4 \cdot 630,4}{\pi \cdot 5^2 \cdot 2} = 16,05 \text{ MPa} \quad (5-3)$$

kde:

F N - sila pôsobiaca na kolík

d mm - priemer kolíka

Kolík musí spĺňať podmienku

$$\tau_s \leq \tau_{Ds}$$
$$16,05 \leq 187,5$$

kde:

τ_{Ds} MPa - dovolené šmykové napätie

τ_s MPa - šmykové napätie

Ako je vidno kolík splnil podmienku. Súčiniteľ bezpečnosti je $k_s = 15,32$

Kontrola otláčenia

Kolík sa zasúva do súčastí vyrobených z materiálu EN AW-2030-T4 ktorého dovolený tlak $p_D = 70$ MPa. Oceľ má hodnotu dovoleného tlaku vyššiu preto ju nebudeme počítať. Keďže v objímke je kratšia časť kolíka bude tu tlak väčší. Z tohto dôvodu skontrolujeme na otláčenie len stenu objímky. Tlak na stene diery objímky vypočítame podľa vzorca

$$p = \frac{F}{d \cdot l} = \frac{630,4}{5 \cdot 15} = 8,4 \text{ MPa} \quad (5-4)$$

kde:

F N - sila pôsobiaca na kolík

d mm - priemer kolíka

l mm - dĺžka kolíka v objímke

Kolík musí splniť podmienku

$$p \leq p_d$$
$$8,4 \leq 70$$

kde:

p MPa - tlak na stene

p_D MPa - tlak dovolený

Kolík splnil aj túto podmienku. Súčiniteľ bezpečnosti je $k_s = 8,33$.

Kolík splnil obidve podmienky a je teda možné ho použiť na zaistenie ramien v nami požadovaných polohách.

5.5.4 Kontrolný výpočet lisovaného kolíka

Sila pôsobiaca na lisovaný kolík má rovnakú veľkosť ako sila pôsobiaca na poistný kolík $F = 630,4$ N. Tento fakt vychádza zo statickej rovnováhy telesa. Tento spoj sa

kontroluje podobne ako poistný kolík. V mojom prípade sa zmenil len priemer a to na $d = 10 \text{ mm}$. Materiál kolíku ostal totožný ČSN EN 1.0060. A keďže priemer lisovaného kolíka je dvojnásobný, tak je jasné, že tento kolík splní všetky podmienky nato aby mohol byť v konštrukcii použitý.

5.5.5 Výpočet predpätie skrutiek spájajúcich konzolu a stredový náboj

5.5.5

Výpočet predpätia skrutiek M8x35-4.8 ČSN 4558, ktoré spájajú stredový náboj s konzolou vypočítame pomocou vzorca

$$F_i = 0,75 \cdot F_p = 0,75 \cdot A_s \cdot S_p = 0,75 \cdot 36,6 \cdot 310 = 8\,509,5 \text{ N} \quad (5-5)$$

kde:

$F_p = A_s \cdot S_p$ - skúšobné zaťaženie

Podľa [13] sú charakteristiky použitej skrutky nasledovné:

$A_s = 36,6 \text{ mm}^2$ - výpočtový prierez skrutky, tabuľka 8-1

$S_p = 310 \text{ MPa}$ - skúšobné napätie pre triedu ISO 4.8, tabuľka 8-8

5.5.6 Zaťahovací moment

5.5.6

Zaťahovací moment sa vypočíta zo vzťahu

$$M = K F_i d = 0,20 \cdot 8\,509,5 \cdot 8 = 13\,615,2 \text{ Nmm} \approx 13,6 \text{ Nm} \quad (5-6)$$

kde:

K - súčiniteľ zaťahovacieho momentu

F_i N - sila predpätia

d mm - priemer skrutky

5.5.7 Kontrola skrutiek na otláčenie závitů

5.5.7

Skrutky sú zaskrutkované do konzoly z hliníku. Dovoľený tlak pre hliník je $p_d = 70 \text{ MPa}$.

Výpočet prevádzkovej sily

$$F = \frac{M_o}{d_1} = \frac{7,88}{0,02} = 394 \text{ N} \quad (5-7)$$

kde:

M_o Nm - ohybový moment

d_1 mm - rameno sily

Výpočet časti prevádzkovej sily F prenášanej skrutkou

$$\Delta F_s = C \cdot F = 0,23 \cdot 394 = 90,62 \text{ N} \quad (5-8)$$

kde:

C - tuhostná konštanta spoja

Výpočet výsledného silového zaťaženia skrutky

$$F_s = F_i + \Delta F_s = 8\,509,5 + 90,62 = 8600,12 \text{ N} \quad (5-9)$$

Výpočet otláčovanej plochy závitů

$$S_p = \pi \cdot d_2 \cdot \frac{d - D_1}{2} \cdot z \cdot i = \pi \cdot 7,188 \cdot \frac{8 - 6,647}{2} \cdot 20 \cdot 2 = 611,06 \text{ mm}^2 \quad (5-10)$$

kde:

d_2 mm - stredný priemer závitů

d mm - priemer závitů

D_1 mm - malý priemer závitů

z - počet zaskrutkovaných závitů

i - počet skrutiek

Výpočet tlaku na závitů

$$p = \frac{F_s}{S_p} = \frac{8600,12}{611,06} = 14,07 \text{ MPa} \quad (5-11)$$

Z podmienky pre dovolený tlak vypočítame súčiniteľ bezpečnosť

$$k_s = \frac{p_d}{p} = \frac{70}{14,07} = 4,975 \quad (5-12)$$

Skrutky vyhovujú.

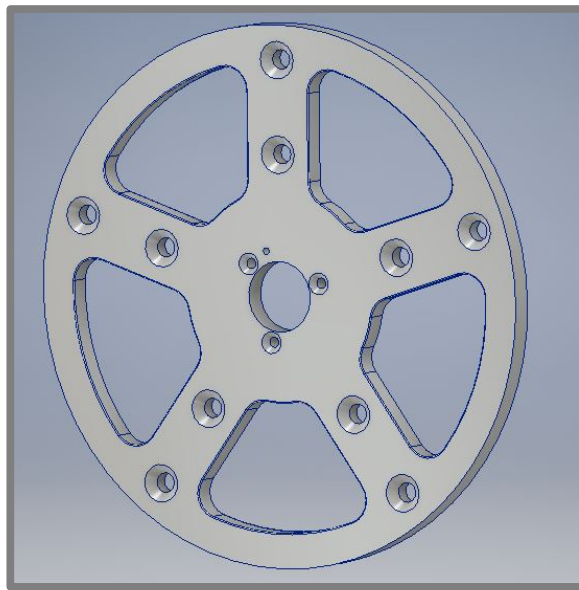
5.6 Stredový náboj

Je to asi najdôležitejšia súčasť z hľadiska geometrie poľa, pretože sú na nej naskrutkované konzoly, ktoré držia ramená. Táto súčasť sa bude pravdepodobne vypaľovať pomocou lasera. Následne do nej budú vyvŕtané diery a zahlbenia. V strede tejto súčasti bude umiestnená kamera s kolíčkom, ktorý pri nasúvaní kamery do stredu zapadne do dierky a tým zaistí, že kamera bude voči poľu stále v rovnakej pozícii.

Materiál: EN AW-6061-T6

Polotovár: P 10 – 250 x 250

Hmotnosť: 0,7 kg



Obr. 5-17 Stredový náboj

Stredový náboj je prichytený k vymedzovaciemu dielu pomocou troch skrutiek M4x25-4.8 ČSN 4558.

5.6.1 Kontrola skrutiek na otláčenie závitu

5.6.1

Skrutky sú zaskrutkované do nosného dielu vyrobeného z hliníku. Dovoľený tlak pre hliník je $p_d = 70 \text{ MPa}$.

Výpočet minimálnej osovej sily v skrutke

$$F_A = \frac{F_t \cdot k}{f \cdot i} = \frac{500 \cdot 5}{1,05 \cdot 3} = 793,65 \text{ N} \quad (5-7)$$

kde:

- | | | |
|-------|---|----------------------------------|
| F_t | N | - sila kolmá na os skrutku |
| k | - | - návrhový súčiniteľ |
| f | - | - súčiniteľ šmykového trenia [5] |
| i | - | - počet skrutiek |

Výpočet odtlačovanej plochy závitu

$$S_p = \pi \cdot d_2 \cdot \frac{d - D_1}{2} \cdot z = \pi \cdot 3,545 \cdot \frac{4 - 3,242}{2} \cdot 21 = 88,64 \text{ mm}^2 \quad (5-10)$$

kde:

- | | | |
|-------|----|-------------------------|
| d_2 | mm | - stredný priemer závit |
| d | mm | - priemer závit |

D_1 mm - malý priemer závitu
 z - počet zaskrutkovaných závitov

Výpočet tlaku na závit

$$p = \frac{F_A}{S_p} = \frac{793,65}{88,64} = 8,95 \text{ MPa} \quad (5-11)$$

Z podmienky pre dovoľený tlak vypočítame súčiniteľ bezpečnosť

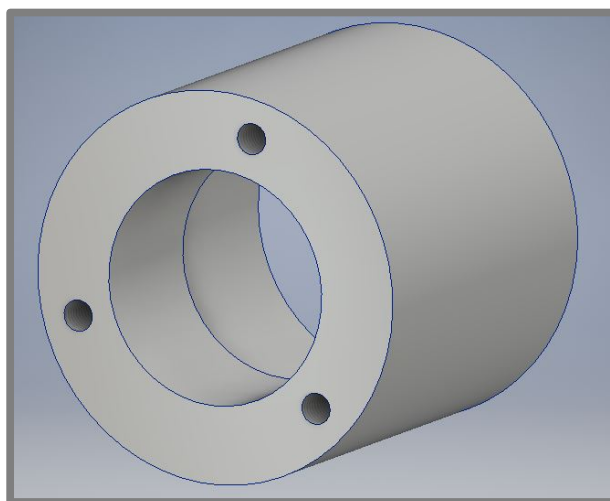
$$k_s = \frac{p_d}{p} = \frac{70}{14,07} = 7,82 \quad (5-12)$$

Skrutky vyhovujú.

5.7 Nosný diel

Hlavnou úlohou tohto dielu je niesť váhu poľa a preniesť ju na nosnú trubku, ktorá je prichytená na stojane. Tento diel je priskrutkovaný k stredovému náboju pomocou troch skrutiek M4. Tento diel má v sebe spravenú dieru s osadením do ktorej sa zasúva nosná trubka, ktorá je pripevnená k statívu pomocou klieštiny a skrutkuje sa na vsunutú kameru. Kamera aj nosná trubka už sú vo vlastníctva ÚK.

Materiál: EN AW-6061-T6
 Polotovár: Ø50 - 55
 Hmotnosť: 0,2 kg



Obr. 5-18 Nosný diel

5.8 Kontrolný výpočet nosnej trubky

Ten výpočet som taktiež vypracoval v programe Autodesk Inventor Professional 2016 vo funkcii pre analytický výpočet nosníku. Táto nosná trubka sa upevňuje do klieštiny, ktorá je umiestnená na statíve. Vstupné hodnoty boli:

Materiál: EN AW-6061-T6

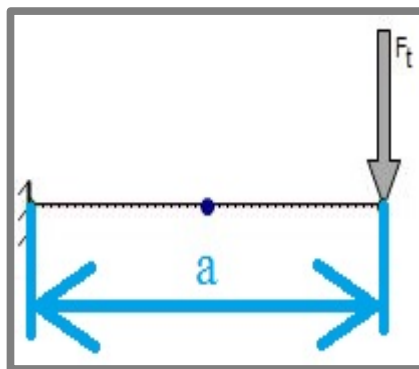
$D = 40 \text{ mm}$ - vonkajší priemer

$d = 25 \text{ mm}$ - vnútorný priemer

$L = 170 \text{ mm}$ - vzdialenosť voľného konca

$F_t = 500 \text{ N}$ - sila na voľnom konci

$a = 170 \text{ mm}$ - vzdialenosť sily od počiatku



Obr. 5-19 Znáozornenie zaťaženia a jeho polohy

Hodnota sily F_t je tak vysoká lebo zahrňuje aj prípadnú nešetrnú manipuláciu s poľom.

Hodnoty vypočítané programom:

$\sigma_{\max} = 16,019 \text{ MPa}$ - maximálne ohybové napätie

$M_{\max} = 85,3 \text{ Nm}$ - maximálny ohybový moment

$P_{\max} = 0,105 \text{ mm}$ - maximálny priehyb

Súčiniteľ bezpečnosti aj v prípade nešetrného zaobchádzania vychádza podľa

$$k_s = R_{p0,2} / \sigma_{\max} = 70 / 16,019 = 4,3 \quad (5-7)$$

kde:

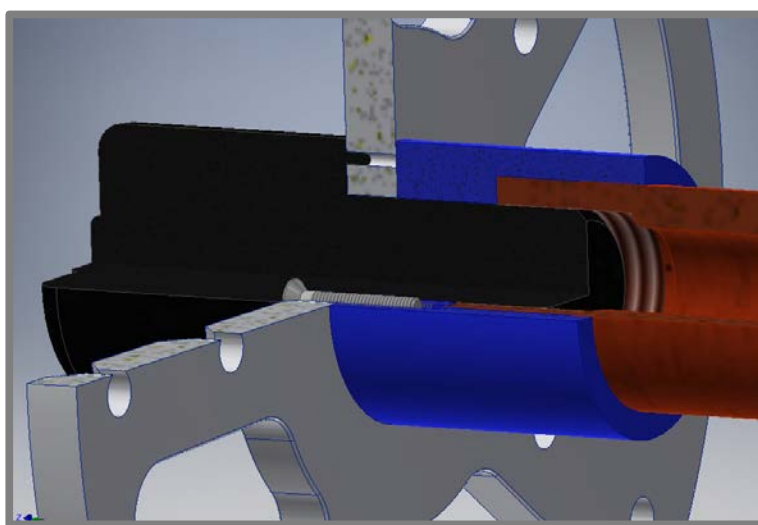
$R_{p0,2}$ MPa - zmluvná medz klzu

Táto súčasť je značne predimenzovaná. Dôvodom je získanie čo najväčšej tuhosti tak aby jej ohyb bol minimálny.

5.9 Detail spojenia stredového náboja, kamery a nosnej trubky

Kvôli lepšiemu pochopeniu tohto uzla pripájam obrázok 5-19 na ktorom je rez týmto uzlom. Nosný diel (modrý) je troma skrutkami M4x25-4.8 ČSN 4558 priskrutkovaný k stredovému náboju. Kamera (čierna) sa vloží do stredového náboja (šedý) tak aby kolíček, ktorý kamera obsahuje zapadol do diery v stredovom náboji. Tým sa zaistí kamera proti pootočeniu voči mikrofónom. Do diery s osadením v nosnom diely sa nasunie nosná trubka (oranžová) a zaskrutkuje sa na zadnú časť kamery. Nosná trubka je k statívu pripevnená pomocou klieštin. Celé pole nie je poistené voči pootočeniu. To však nie je dôležité, pretože výsledný obraz si môžeme otáčať pri vyhodnocovaní dát. Dôležité je, že kamera je zaistená kolíčkom s stálej polohy voči mikrofónom.

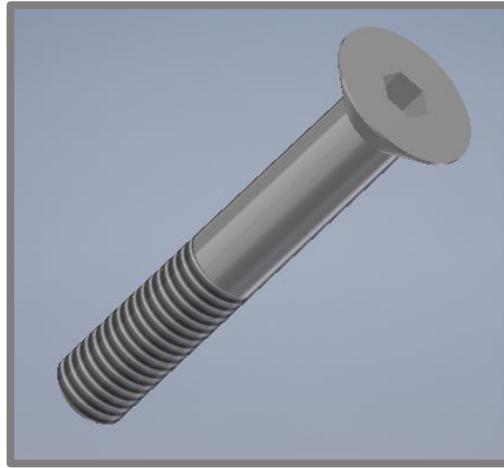
Obr. 5-20 Detail uzla v reze



5.10 Montážne prvky konštrukcie

5.10.1 Skrutky, podložky a matice

Na spojenie jednotlivých komponentov poľa som využil skrutky s pol guľovou zápusťou hlavou s vnútorným šesťhranom. Najväčšou výhodou použitia týchto skrutiek je že sa zapúšťajú do materiálu a netrčia z neho von. Na spojenie konzol so stredovým nábojom som použil skrutky M8x35-4.8 ČSN 4558. Na vymedzenie a zaistenie polohy ramien v objímke som použil skrutky M8x55-4.8 DIN EN ISO 10642. Na spojenie stredového náboja a nosného dielu som použil skrutky M4x25-4.8 ČSN 4558.



Obr. 5-21 Skrutka M8x50-4.8 ČSN 4558

5.10.2 Nastavovacia skrutka

5.10.2

Nastavovacie skrutky som sa rozhodol použiť kvôli ich jednoduchosti, nízkej cene a relatívne dobrej spoľahlivosti. Nastavovacou skrutkou len poistím ujem polohu úchytovej SMB konektora a mikrofónu v správnej polohe.



Obr. 5-22 Nastavovacia skrutka DIN 914 [14]

5.10.3 Sťahovacie pásy

5.10.3

Sťahovacie pásy budú použité na prichytenie kabeľáže k ramenám. Je to veľmi lacný a jednoduchý spôsob prichytenia kabeľáže a zároveň aj ľahký. V prípade poškodenia kabeľáže alebo inej súčasti je veľmi jednoduché pásy odstrániť a následne po oprave znova nainštalovať. Samozrejme počas inštalácie sa voľné konce pásy odstraňujú.



Obr. 5-23 Sťahovacia páska [9]

5.11 Meracie prvky a prvky slúžiace na vedenie signálu

5.11.1 Mikrofóny

Vzhľadom k cene mikrofónu, ktorá sa pohybuje okolo 10 000 Kč za kus sú financie ušetrené použitím mikrofónov z poľa, ktoré ÚK už vlastní ohromné. Navyše tieto mikrofóny sú plnohodnotne použiteľné, pretože ich merací rozsah je od 50 Hz až po 10 kHz . A to je viac ako dostatočné. Navyše tieto mikrofóny sú konštruované ako mikrofóny na použitie v mikrofónovom poli. Konkrétne použijeme mikrofóny typu 4957 od spoločnosti *Brüel & Kjær*. Základné vlastnosti tohto mikrofónu sú uvedené v tabuľke 3.

Tab. 5-3 Základne vlastnosti mikrofónu typ 4957 od spoločnosti *Brüel & Kjær* [3]

Priemer	¼ palca
Dynamický rozsah	32 – 134 dB
Frekvenčný rozsah	50 – 10 000 Hz
Vnútorný hluk	32 dB A
Optimalizovaný pre	Polia
Citlivosť	11,2 mV/Pa
Teplotný rozsah	-10 – +55 °C

Obr. 5-24 Mikrofón typ 4957 od spoločnosti *Brüel & Kjær* [3]

5.11.2 SMB konektory a kabeľ

Výrobca mikrofónov používa na ich pripojenie SMB konektor. Vybrať vhodný SMB konektor nebolo jednoduché. Výrobcovia ponúkajú veľké množstvo tvarov a prevedení. Hlavným kritériom bolo, že to musela byť „samica“. Rozhodol som sa pre pravouhlý konektor SMB. S výberom káblu to bolo jednoduchšie, keďže výrobca v technických parametroch uvádza presný typ káblu vhodný pre pripojenie do tohto konektora. V tabuľke 4 sú uvedené technické parametre SMB konektora a v tabuľke 5 sú uvedené technické parametre káblu.

Tab. 5-4 Technické parametre SMB konektora [4]

Typ	SMB
Prevedenie	na kábel
Impedancia	50 Ω
Priemer kábla	2,8 mm
Typ kábla	RG-174/U
Vidlica/zásuvka	zásuvka

Tab. 5-5 Technické parametre kábla RG-174/U [6]

Impedancia	50 $\pm$ 2 Ω
Nominálna kapacita	101 pF/m
Vnútorňý odpor vodiča	max. 318,2 Ω /km
Rýchlosť šírenia	66% (5,1 ns/m)
Vnútorňý vodič	CuSn 7x0,16 mm ($\varnothing$ 0,48 mm)
Dielektrikum	PE $\varnothing$ 1,5 mm
Vonkajší vodič	CuSn drôt
Krytie	87%
Priemer vonkajšieho vodiča	2,0 mm
Vonkajší obal	PVC
Vonkajší priemer	2,8 mm
Pracovná teplota	-10 - +75 $^{\circ}$ C
Skladovacia teplota	-30 - +75 $^{\circ}$ C
Váha	cca 14 kg/km



Obr. 5-25 SMB konektor [7]

5.11.3 LEMO konektor

Výber LEMO konektoru bol podobne problematický ako výber SMB konektoru. LEMO konektor musel mať správny počet pinov. V mojom prípade sedem lebo mám šesť mikrofónov na jednom ramene plus jeden pin ako spoločný uzemnenie. Ďalej tu bol podobný problém s určovaním zásuvky/zástrčky ako pri SMB konektore. Nakoniec sa mi však podarilo nájsť taký LEMO konektor, ktorý vyhovoval mojím požiadavkám. Môžete ho vidieť na obrázku 16.



Obr. 5-26 LEMO konektor [12]

6 DISKUSIA

6

6.1 Zhodnotenie výsledného konštrukčného návrhu

6.1

Konštrukčný návrh päťramenného mikrofónového poľa na lokalizáciu zdrojov hluku som vytvoril s ohľadom na požadovaný frekvenčný rozsah a nízku váhu konštrukcie. Tento konštrukčný návrh vychádza z už existujúceho mikrofónového poľa od spoločnosti *Brüel & Kjær*, ktoré umožňuje natáčanie a zaistenie ramien v troch rôznych polohách.

Konštrukčný návrh, ktorý som ja vytvoril umožňuje využitie mikrofónov, kamery a nosnej trubky, ktoré už sú vo vlastníctve ÚK. Tým sa náklady na výrobu tohto poľa výrazne znížili. Konštrukcia je navrhnutá tak, aby sa jednotlivé súčasti dali vyrobiť priamo v areáli VUT a nemusela sa ich výroba zadávať externým firmám, čo by výrazne navýšilo náklady na výrobu tohto poľa. Konštrukcia spĺňa všetky požiadavky ako je nízka hmotnosť, tuhosť a umožňuje natáčanie a zaistenie ramien v troch rôznych polohách. Geometria uloženia mikrofónov prevzatá z už existujúceho poľa *Brüel & Kjær* umožňuje meranie metódou beamforming vo frekvenčnom rozsahu, ktorý je väčší ako minimálne požadovaný 500 Hz – 2000 Hz.

Jednotlivé súčasti sú vyrábané z materiálov a polotovarov bežne dostupných na trhu. Aj ďalšie súčasti poľa ako SMB konektory, LEMO konektory, kabeláž a záslepky som vyberal z tých, ktoré sú ponúkané na trhu a dajú sa bežne kúpiť.

6.2 Ekonomická bilancia

6.2

V tejto časti rozoberiem odhadované náklady na výrobu navrhovaného päťramenného mikrofónového poľa a náklady na kúpu poľa ponúkaného na trhu. Jednotlivé súčasti som navrhol tak aby boli čo možno najlacnejšie. Ceny polotovarov zo zliatiny hliníka sú z internetovej stránky www.ehlinik.cz.

Tab. 6-1 Cena a počet kupovaných dielov

Názov	Počet kusov	Cena v Kč
Skrutky	13	cca. 80
Samoistiacie matice	5	10
Podložky	5	2
Lisovacie kolíky	5	90
Poistné kolíky	5	60
SMB konektory	30	2 200
LEMO konektory	5	3 400
Nastavovacie skrutky	30	85
Kábel	31 m	310
Sťahovacie pásy	100	51
Záslepky	10	36
Celkovo		6324,-

Tab. 6-2 Cena a počet vyrábaných dielov

Názov	Počet kusov	Cena v Kč
Úchyty SMB konektorov	30	4 000
Ramená	5	9 000
Objímky	5	1 750
Konzoly	5	1 850
Stredový náboj	1	1 110
Nosný diel	1	400
Celkovo		18 110,-

V cenách vyrábaných súčastí je zahrnutá cena polotovaru a približná cena za prácu. Ceny za prácu sú určované približne. Ak by sme chceli vedieť presnú cenu práce mohli by sme si nechať vypracovať cenovú ponuku u konkrétnej firmy, ktorej by sme zadali výrobu týchto súčastí.

Tab. 6-3 Celková cena mikrofónového poľa

	Cena v Kč
Celková cena kupovaných dielov	6 324
Celková cena vyrábaných dielov	18 110
Celková cena mikrofónového poľa	24 434

Ekonomická bilancia ukázala, že približná cena mikrofónového poľa bude okolo 24 500 Kč. Táto cena počíta s využitím súčastí poľa, ktoré sú už vo vlastníctve ÚK ako sú mikrofóny, kamera a statív. Tieto súčasti v cene zahrnuté neboli. Táto cena, ale zahŕňa aj prácu, ak by sme výrobu zadali nejakej firme. Ak by sa výroba tohto poľa realizovala na pôde VUT v Brne, náklady na výrobu by sa mohli veľmi znížiť. V porovnaní s cenou poľa od spoločnosti *Brüel & Kjaer*, ktorá sa pohybuje v státisícoch Kč je cena môjho konštrukčného návrhu veľmi nízka.

7 ZÁVER

7

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo navrhnuť konštrukciu prenosného päťramenného mikrofónového poľa pre lokalizáciu zdrojov hluku metódou beamforming vo frekvenčnom rozsahu minimálne 500 Hz – 2 000 Hz. Predmetom riešenia bola mechanická konštrukcia poľa a pripojenie meracích mikrofónov. Statív nie je súčasťou riešenia, keďže ten už je vo vlastníctve ÚK.

Cieľom práce nebolo vymýšľať nové usporiadania mikrofónov a preto som sa rozhodol použiť existujúce usporiadanie mikrofónov z poľa od spoločnosti *Brüel & Kjær*, ktoré spĺňalo požadované parametre. Jedna z požiadaviek bola, aby uchytenie mikrofónov umožňovalo ich jednoduché nasadenie na pole a odobratie z poľa. Toto sa mi podarilo vyriešiť špeciálne navrhnutým držiakom.

U jednotlivých súčastí som kontroloval ich priehyb, napätie v ohybe, ohybový moment, otláčenie a šmykové napätie podľa typu súčasti a jej namáhania. Iné konštrukčné prvky som vyberal podľa požiadaviek konštrukcie z predávaných druhov a typov ako napríklad SMB konektory, LEMO konektory, káble a záslepky.

Z pohľadu ekonomického, bolo mojou úlohou postaviť mikrofónové pole za čo najnižšiu cenu. Konečná odhadovaná cena tejto konštrukcie je 24 434 Kč, avšak dala by sa ešte znížiť o cenu práce ak by sa súčasti vyrábali priamo vo VUT v Brne. Môj návrh spĺňa požadované parametre a jednoduchosť jeho súčasti uľahčuje jeho prípadnú realizáciu v budúcnosti.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

8

- [1] AUTOMA, *Použití akustického beamformingu pro lokalizaci zdroje hluku vyzařovaného projíždějícími vozidly* [online], dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=52424
- [2] BRŮEL & KJÆR, *Foldable arrays* [online], dostupné z: <http://bksv.com/Products/transducers/acoustic/acoustical-arrays>
- [3] BRŮEL & KJÆR, *4957 - 10 kHz array microphone* [online], dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4957?tab=specifications>
- [4] EPCS, *Koaxiální konektor SMB-C V 90 RG174U* [online], dostupné z: <http://www.epcs.sk/sk/4303354/vyrobca-neznamy-koaxialni-konektor-smb-c-v-90-rg174u-nezaradene-13035354>
- [5] E-KONSTRUKTÉR, *Tabulka hodnot součinitele (koeficientu) smykového tření pro různé kombinace materiálů* [online], dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [6] GES, *RG 174/U / NORDIX* [online], dostupné z: <http://www.ges.cz/sk/rg-174-u-GES06700706.html>
- [7] GM ELEKCRONIC, *SMB-C V 90 RG174U* [online], dostupné z: <http://www.gme.sk/smb-c-v-90-rg174u-p817-047>
- [8] Christensen J.J., Hald J., *Technical review: Beamforming* [online], dostupné z: <http://bksv.com/Library/Technical%20Reviews>
- [9] KUTIL, *Páska stahovací černá 1ks* [online], dostupné z: <http://www.kutil.eu/cs/eshop/zelezarstvi/drobne-zelezarstvi/stahovaci-pasky/paska-stahovaci-cerna-1ks.html>
- [10] PERFORMANCE COMPOSITES, *Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials, Fibre / Epoxy resin (120°C Cure)* [online], dostupné z: http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp
- [11] RABINOVICH, Victor. a Nikolai. ALEXANDROV. *Antenna arrays and automotive applications*. New York, NY: Springer, c2013. ISBN 978-1-4614-1073-7

- [12] RS.COM, *Lemo 1B Series, 7 Pole Panel Mount Connector Socket, 1 Shell Size, Female Contacts* [online], dostupné z:
<http://uk.rs-online.com/web/p/industrial-automation-circular-connectors/2156212/>
- [13] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [14] TECHMAT-SK.EU, *Červík 6x10* [online], dostupné z:
<http://www.techmat-sk.eu/obchod/action/productdetail/oc/840/product/cervik-6x10.xhtml>
- [15] THE LAB BOOK PAGE, *Delay Sum Beamforming* [online], dostupné z:
<http://www.labbookpages.co.uk/audio/beamforming/delaySum.html>
- [16] ZASLEPKY.CZ, *Kulatá záslepka 23mm* [online], dostupné z:
<https://www.zaslepky.cz/produkt/kulata-zaslepka-23mm/>

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

t_n	[s]	časové oneskorenie mikrofónu
n	[-]	poradové číslo mikrofónu
d	[mm]	rozstup medzi mikrofónmi
θ	[°]	uhol dopadu zvukovej vlny pre počítaný smer
c	[m/s]	rýchlosť zvuku
R	[m]	rozlíšiteľnosť
R_{os}	[m]	rozlíšiteľnosť na osi
α	[-]	koeficient tvaru poľa
D	[mm]	priemer poľa
λ	[m]	vlnová dĺžka
z	[m]	vzdialenosť od poľa
λ_{min}	[m]	minimálna vlnová dĺžka
d	[m]	vzdialenosť mikrofónov
a	[mm]	vzdialenosť sily od počiatku
b	[mm]	vzdialenosť sily od počiatku
c	[mm]	vzdialenosť sily od počiatku
d	[mm]	vzdialenosť sily od počiatku
e	[mm]	vzdialenosť sily od počiatku
f	[mm]	vzdialenosť sily od počiatku
l	[mm]	celková dĺžka voľného konca ramena
q_1	[N/m]	gravitačná sila
F	[N]	sila pôsobiaca na rameno
F	[N]	sila pôsobiaca na kolík
M_o	[Nm]	ohybový moment
d_1	[m]	vzdialenosti osi poistného kolíku od osi lisovaného kolíku
τ_{Ds}	[MPa]	dovolené šmykové napätie
R_e	[MPa]	medz klzu
τ_s	[MPa]	šmykové napätie
d	[mm]	priemer kolíka
p	[MPa]	tlak na stene diery
l	[mm]	dĺžka kolíka v objímke
p_d	[MPa]	tlak dovolený
F_i	[N]	sila predpätia
F_p	[N]	skúšobné zaťaženie
A_s	[mm ²]	výpočtový prierez skrutky
S_p	[MPa]	skúšobné napätie pre triedu ISO 4.8
M	[Nm]	zaťahovací moment
K	[-]	súčiniteľ zaťahovacieho momentu
F_i	[N]	sila predpätia
d	[mm]	priemer skrutky
F	[N]	prevádzková sila
d_1	[mm]	rameno sily
ΔF_s	[N]	časť prevádzkovej sily prenášaná skrutkou
C	[-]	tuhostná konštanta spoja

F_s	[N]	silové zaťaženie skrutky
S_p	[mm ²]	otlačovaná plocha závit
d_2	[mm]	stredný priemer závit
d	[mm]	priemer závit
D_1	[mm]	malý priemer závit
z	[-]	počet zaskrutkovaných závitov
i	[-]	počet skrutiek
p	[Mpa]	tlak na závit
k_s	[-]	súčiniteľ bezpečnosti
F_A	[N]	minimálna osová sila v skrutke
F_t	[N]	sila kolmá na os skrutku
k	[-]	návrhový súčiniteľ
f	[-]	súčiniteľ šmykového trenia
i	[-]	počet skrutiek
$\sigma_{\max}$	[MPa]	maximálne ohybové napätie
$M_{\max}$	[Nm]	maximálny ohybový moment
$P_{\max}$	[mm]	maximálny prieťah
$R_{p0,2}$	[MPa]	zmluvná medz klzu

10 ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2-1 Mikrofónové pole so zdrojom signálu vo veľkej vzdialenosti, vlny dopadajú na pole pod uhlom θ [15]	15
Obr. 2-2 Smerová charakteristika poľa [15]	16
br. 2-3 Znárodnienie zhoršenie rozlišovacej schopnosti poľa v závislosti na uhle dopadu [8]	18
Obr. 2-4 Príklady rovinných pravidelných (a - b) a nepravidelných polí (c - f) [8]	19
Obr. 2-5 Periodicky vznik grating lobes [15]	20
Obr. 2-6 Vlastnosti beamformera pre uhol merania 30° [8]	22
Obr. 2-7 Rôzne typy rovinných polí. (a) kruhové od spol. <i>gfai tech</i> , (b) a (c) od spol. <i>CAE Software & Systems</i> , (d) náhodné od spol. <i>Brüel & Kjær</i>	23
Obr. 2-8 Skladacie polia. Vľavo od spoločnosti <i>gfai tech</i> a vpravo od spoločnosti <i>Brüel & Kjær</i>	24
Obr. 4-1 Znárodnienie upevnenia SMB konektoru na rameno z hliníku	28
Obr. 4-2 Príklady možného upevnenia SMB konektoru na rameno z kompozitu	28
Obr. 4-3 Prvé prevedenie mechanizmu sklápania ramien. L konzola a rotačný diel so skrutkou	29
Obr. 4-4 Druhé prevedenie mechanizmu sklápania ramien „pant“	30
Obr. 5-1 Stred poľa spredu	31
Obr. 5-2 Detail uchytenie mikrofónu a SMB konektora	32
Obr. 5-3 Zavreté pole	32
Obr. 5-4 Ramená sú otvorené na 60°	33
Obr. 5-5 Pole v rovinnnej polohe spredu a z boku	33
Obr. 5-6 Schematické znázornenie geometrie rozmiestnenia mikrofónov	34
Obr. 5-7 Smerové charakteristiky pre vybrané frekvencie	35
Obr. 5-8 Znárodnienie spôsobu zaťaženia a jeho polohy	36
Obr. 5-9 Priebeh ohybového napätia	37
Obr. 5-10 Priebeh ohybového momentu	37
Obr. 5-11 Priebeh voľného konca nosníku	37
Obr. 5-12 Záslepka [16]	38
Obr. 5-13 Úchyt SMB konektorov	39
Obr. 5-14 Objímka	40
Obr. 5-15 Konzola	40
Obr. 5-16 Schéma statického zaťaženia	41
Obr. 5-17 Stredový náboj	45
Obr. 5-18 Nosný diel	46
Obr. 5-19 Znárodnienie zaťaženia a jeho polohy	47
Obr. 5-20 Detail uzla v reze	48
Obr. 5-21 Skrutka M8x50-4.8 ČSN 4558	49
Obr. 5-22 Nastavovacia skrutka DIN 914 [14]	49
Obr. 5-23 Sťahovacia páska [9]	50
Obr. 5-24 Mikrofón typ 4957 od spoločnosti <i>Brüel & Kjær</i> [3]	50
Obr. 5-25 SMB konektor [7]	52
Obr. 5-26 LEMO konektor [12]	52

11 ZOZNAM TABULIEK**11**

Tab. 5-1 Mechanické vlastnosti kompozitu z uhlíkových vlákien [10]	36
Tab. 5-2 Odchýlky mikrofónov	38
Tab. 5-3 Základne vlastnosti mikrofónu typ 4957 od spoločnosti <i>Brüel & Kjær</i> [3]	50
Tab. 5-4 Technické parametre SMB konektora [4]	51
Tab. 5-5 Technické parametre kábla RG-174/U [6]	51
Tab. 6-1 Cena a počet kupovaných dielov	53
Tab. 6-2 Cena a počet vyrábaných dielov	54
Tab. 6-3 Celková cena mikrofónového poľa	54

12 ZOZNAM PRÍLOH

12

12.1 Výkresová dokumentácia

Výkres zostavy	BP-01-00
Úchyt	BP-04-01
Rameno	BP-03-02
Objímka	BP-04-03
Konzola	BP-04-04
Stredový náboj	BP-03-05
Nosný diel	BP-04-06