



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**NÁVRH A KONSTRUKCE HLUBOKOTÓNOVÉ
OZVUČOVACÍ JEDNOTKY - SUBWOOFERU**

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SUBWOOFER - LOW FREQUENCY LOUDSPEAKER UNIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Holínský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Jan Holínský

ID: 186429

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a konstrukce hlubokotónové ozvučovací jednotky - subwooferu

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte jednotlivé typy ozvučnic, které se používají pro hlubokotónové ozvučovací jednotky – subwoofery. Podrobněji se zaměřte na takové řešení ozvučnic, které umožňují dosažení nižšího dolního mezního kmitočtu nebo většího akustického tlaku při zachování minimálních rozměrů ozvučnice subwooferu. U isobarických ozvučnic podrobněji popište různé alternativy jejich řešení a uveďte jejich výhody a nevýhody. Nastudujte hybridní řešení VUE LMA pro subwoofery a porovnejte ho s isobarickou ozvučnicí. Zpracujte podrobný a kompletní návod na konstrukci vybraného typu subwooferu, obsahující veškeré podklady pro jeho realizaci. Následně tuto hlubokotónovou jednotku realizujte. Dokumentujte jednotlivé postupy v tomto pořadí: návrh, simulace, konstrukce, měření, optimalizace, měření optimalizovaného řešení a porovnání simulace s měřením optimalizovaného řešení. Jednotlivé části návrhu následně zpracujte ve formě laboratorních úloh.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy II. [Česko: s.n.], 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.

[2] VUE Audiotechnik LLC, Adams, M.C. Loudspeaker system. US Patent Application 13/494,928, US 2013/0322656 A1, 2013

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Obsahem práce je přiblížení problematiky návrhu a konstrukce hlubokotónových ozvučovacích jednotek – subwooferů a jejich použití. Práce rozebírá jednotlivé typy ozvučnic, možnosti zapojení reproduktorů s ohledem na změny parametrů reproduktorového systému, a posléze konstrukční řešení ozvučnic s ohledem na dostupné materiály. Je zde také rozebráno hybridní řešení ozvučnice VUE LMA. Kromě uvedení matematických vztahů pro výpočet parametrů ozvučnic, jsou zde rozebrány základní dostupné programy pro návrh ozvučnic. Tato práce dále popisuje návrh dvou přípravků, které budou používány v laboratoři pro výuku. Práce se simulačním programem a měření charakteristik navrhovaných přípravků jsou následně zpracovány ve formě laboratorních úloh.

Klíčová slova

subwoofer, ozvučnice, reproduktor, návrhové programy, návrh subwooferu, laboratorní úlohy

Abstract

This bachelor thesis deals with the design and construction of deep-tone sound units – subwoofers and their use. There are listed descriptions of the individual types of sound systems, the possibilities of connecting the speakers with respect to the changes of the parameters speaker system, and then the design of the baffle with respect to the available materials. Moreover, the disassembled of VUE LMA hybrid solution is described. There are the mathematical relations for calculating the baffle parameters, furthermore there are also available basic programs for the design of the baffles. There is also described the design of two products that will be used in the teaching laboratory. Working with the simulation program and measuring the characteristics of the proposed products are processed in the form of laboratory tasks.

Keywords

subwoofer, baffle, speaker, design programs, subwoofer design, laboratory tasks

BIBLIOGRAFIKÁ CITACE

HOLÍNSKÝ, J. *Návrh a konstrukce hlubokotónové ozvučovací jednotky - subwooferu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Balík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh a konstrukce hlubokotónové ozvučovací jednotky – subwooferu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Jiří Schimmelovi, Ph.D. za pomoc s programem LspCAD.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek.....	x
Úvod.....	1
1. Rozdělení subwooferů dle užití	2
1.1. Subwoofery pro účely ozvučování	2
1.2. HIFI subwoofery pro domácí poslech.....	2
1.3. Mini a mikro subwoofery pro přenosná zařízení	2
2. Ozvučnice pro hlubokotónové jednotky typu subwoofer	3
2.1. Uzavřená ozvučnice	3
2.2. Ozvučnice typu Bassreflex.....	4
2.3. Ozvučnice s pasivním zářičem	5
2.4. Ozvučnice typu Transmission line	6
2.5. Ozvučnice typu Back-loaded horn.....	6
2.6. Ozvučnice typu pásmová propust	7
2.6.1. Pásmová propust čtvrtého řádu	7
2.6.2. Pásmová propust šestého řádu	8
2.6.3. Pásmová propust šestého řádu – sériové zapojení	9
3. Více reproduktorů v jedné ozvučnici	10
3.1. Zapojení tlačit-tlačit.....	10
3.2. Zapojení tlačit-táhnout.....	11
3.3. Zapojení kužel na kužel	11
3.4. Zapojení magnet na magnet	12
3.5. Zapojení kužel na magnet	13
3.6. Parametry virtuálního reproduktoru pro isobarické zapojení reproduktorů	13
4. Subwoofer firmy Audiotechnik.....	15
4.1. Zapojení reproduktorů přes zpožďovací linku	15
4.2. Kmitočtová charakteristika	15
4.3. Typy dostupných modelů	16
5. Konstrukční řešení ozvučnic	17
5.1. Typy materiálů.....	17

5.2.	Způsoby spojování stěn	18
5.3.	Tlumení ozvučnice	18
6.	Programy pro návrh ozvučnic	20
6.1.	Program WinISD	20
6.2.	Program Amplion	21
6.3.	Program LspCAD	22
6.3.1.	Dostupné nástroje LspCAD	23
6.3.2.	Dostupné verze programu LspCAD	24
7.	Návrh ozvučnice	25
7.1.	Požadované parametry	25
7.2.	Výběr reproduktoru a bassreflexových nátrubků	25
7.3.	Postup návrhu v LspCAD	28
7.3.1.	Tvorba schémat	28
7.3.2.	Simulace a zadávání parametrů	30
7.3.3.	Návrh přípravků podle zadání	30
7.4.	Návrh mechanického uspořádání ozvučnice	33
8.	Realizace a optimalizace	35
8.1.	Konstrukce	35
8.2.	Měření	36
8.2.1.	Impedanční charakteristika	36
8.2.2.	Kmitočtová charakteristika	36
8.3.	Optimalizace	37
9.	Tvorba laboratorních úloh	38
9.1.	Požadavky na laboratorní úlohy	38
9.2.	Sepsání laboratorních úloh	39
10.	Závěr	40
	Literatura	42
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	43
	Seznam příloh	44

Seznam obrázků

Obr 1. Uzavřená ozvučnice	3
Obr 2 Ozvučnice typu Bassreflex	4
Obr 3. Ozvučnice s pasivním zářičem	5
Obr 4. Ozvučnice typu Transmission line.....	6
Obr 5. Ozvučnice typu Back-loaded horn	7
Obr 6. Ozvučnice typu pásmová propust – čtvrtý řád	7
Obr 7. Ozvučnice typu pásmová propust – šestý řád	8
Obr 8. Ozvučnice typu pásmová propust – šestý řád sériové zapojení.....	9
Obr 9. Zapojení tlačit-tlačit	10
Obr 10. Zapojení tlačit-táhnout	11
Obr 11 Zapojení kužel na kužel	12
Obr 12. Zapojení magnet na magnet.....	12
Obr 13. Zapojení kužel na magnet.....	13
Obr 14. Subwoofer firmy Audiotechnik.....	15
Obr 15. Kmitočtová charakteristika isobarického uspořádání 21 palcových reproduktorů v Bassreflexové ozvučnici s kmitočtovou charakteristikou systému hs-221 od firmy Audiotechnik (převzato z [11])	16
Obr 16. Typy spojů: z levé strany na tupo, na koso, na zámek, na zámek s následným skosením.....	18
Obr 17. Způsoby uložení tlumení: z levé strany na stěny, na stěny a výztuž, metodou zig- zag.....	19
Obr 18. Hlavní okno programu WinISD 0.7.0.950	20
Obr 19. Okno programu Amplion 2.3b3	21
Obr 20. Okno schéma programu LspCAD 6.41	23
Obr 21. Porovnání verzí Pro a Std (převzato z [13])	24
Obr 22. Parametry reproduktoru SPH-210 (převzato z [14])	26
Obr 23. Rozměry reproduktoru SPH-210 (převzato z [14])	27
Obr 24. Rozměry bassreflexových nátrubků (převzato z [15], [16]).....	27
Obr 25. Zapojení schématu pro uzavřenou ozvučnici v programu LspCAD	29
Obr 26. Zapojení schématu pro ozvučnici typu Bassreflex v programu LspCAD	29
Obr 27. Zapojení schématu pro ozvučnici typu pásmová propust v programu LspCAD ..	30
Obr 28. Rozměry připojovací misky ST-960GM (převzato z [17]).....	34

Seznam tabulek

Tab. 1. Změna parametrů pro zapojení isobaric.....	14
Tab. 2. Přehled dostupných systémů firmy audiotechnik, které kombinují přímo vyzařující reproduktor s ozvučnicí typu pásmová propust	16
Tab. 3. Přehled vhodných materiálů pro konstrukci ozvučnice.....	17
Tab. 4. Porovnání reálných parametrů reproduktorů s parametry uváděnými výrobcem	28
Tab. 5. Souhrn parametrů navržených ozvučnic	32
Tab. 6. Úprava objemů pro reálné parametry	33
Tab. 7. Soupis materiálu	35
Tab. 8. Soupis modulů pro simulaci v LspCAD	38

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu a konstrukce reproduktorových ozvučnic, které se používají pro hlubokotónové ozvučovací jednotky - subwoofery. Subwoofer se používá při ozvučování k reprodukci nejnižších kmitočtů pod 150 až 200Hz. V úvodu práce jsou rozebrány typy subwooferů podle použití s ohledem na požadované parametry v jednotlivých kategoriích.

V práci jsou řešeny typy ozvučnic vhodné pro subwoofery. Dále pak možné zapojení více reproduktorů v jedné reproduktorové ozvučnici a výhody isobarického uspořádání reproduktorů. Kromě toho je rozebrán princip hybridního řešení subwooferu od firmy Audiotechnik.

Cílem práce je návrh laboratorních přípravků, na kterých bude možné během laboratorních cvičení měřit kmitočtové a impedanční charakteristiky různých typů ozvučnic. Každý přípravek bude možné přestavět z uzavřené ozvučnice na ozvučnici typu Bassreflex a pásmovou propust šestého řádu se sériově laděnými bassreflexovými nátrubky. Jeden přípravek pak bude obsahovat isobarické zapojení reproduktorů a druhý pouze jeden reproduktor.

Dále jsou v této práci zpracovány dvě laboratorní úlohy. První se zabývá návrhem ozvučnic v programu LspCAD. Druhá pak samotným měřením charakteristik navržených přípravků.

1. Rozdělení subwooferů dle užití

Hlubokotónová ozvučovací jednotka – subwoofer je reproduktorová soustava, která je výhradně používána pro reprodukci nízkých kmitočtů pod 150 až 200 Hz.

V současné době je na výběr z velkého množství a druhů subwooferů s různými parametry jako je velikost, charakteristická citlivost, kmitočtový rozsah a další. Tyto parametry se liší podle toho, pro co má být daný subwoofer použitý.

1.1. Subwoofery pro účely ozvučování

Subwoofery v této skupině se dají označit jako PA subwoofery (Public Address – adresováno veřejnosti). Ty se využívají pro ozvučování větších prostor, a proto se u nich vyžaduje co největší charakteristická citlivost a vysoká zatížitelnost i na úkor vyrovnanosti kmitočtové charakteristiky, u které se může provést potřebná kmitočtová korekce. Rozměry subwooferu bývají velké, ale musí se dát přemístit. Používají se pasivní i aktivní subwoofery. Aktivní subwoofery kromě vlastního napájení a zesilovače obsahují i ochranné obvody, aby se předcházelo poškození reproduktoru.

1.2. HIFI subwoofery pro domácí poslech

U Hifi subwooferů, které jsou určeny hlavně pro domácí poslech, se více než u PA subwooferů hledí na to, aby jejich kmitočtová charakteristika byla co nejvyrovnanější a to i za snížení charakteristické citlivosti. Tyto subwoofery mají většinou charakteristickou citlivost okolo 90 dB/W/m. Další parametr, který je u těchto subwooferů důležitý, je jejich THD (Total Harmonic Distortion – celkové harmonické zkreslení), které by mělo být nízké.

1.3. Mini a mikro subwoofery pro přenosná zařízení

Jak už název napovídá, tak u tohoto typu subwooferů je hlavní jejich velikost. Velikost tohoto subwooferu je minimalizovaná, aby byl takovýto subwoofer snadno přenosný. To má za následek, že subwoofer není schopen reprodukovat nižší kmitočty. Tento problém se řeší pomocí algoritmů nebo metod, které přidávají druhé a vyšší harmonické původního složení signálu, které již leží v reprodukovatelném kmitočtovém rozsahu subwooferu, kdy se uplatňuje jev, že si člověk při poslechu automaticky domýšlí první harmonickou složku. Díky tomuto jevu se dá rozšířit reprodukováný kmitočtový rozsah subwooferu směrem k nižším kmitočtům.

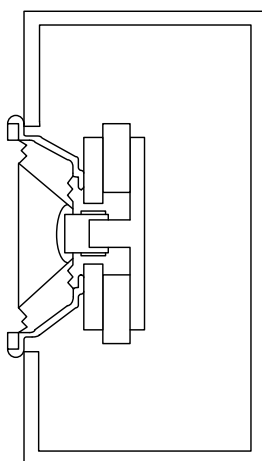
2. Ozvučnice pro hlubokotónové jednotky typu subwoofer

Ozvučnice je prostředek, jehož účelem je zabránit akustickému zkratu a také ochránit reproduktor před mechanickým poškozením. Akustickému zkratu zabraňuje tím, že odděluje přední a zadní akustické vlnění, které vytváří reproduktorová membrána. Oddělení předního a zadního akustického vlnění je nutné proto, aby se vzájemně při sečtení nevyrušili a to zejména na nižších kmitočtech [1].

V dnešní době je mnoho typů ozvučnic. Nejběžnější jsou: rovinná deska, polootevřená ozvučnice, uzavřená ozvučnice, ozvučnice typu Bassreflex, Transmission line, Back-loaded horn, pásmová propust. Pro subwoofery ovšem nejsou všechny ideální. Přehled ozvučnic pro použití s hlubokotónovým reproduktorem jsou pak rozebrány v následujících podkapitolách.

2.1. Uzavřená ozvučnice

Vestavěním reproduktoru do uzavřené ozvučnice dojde ke snížení výchylky reproduktoru pod rezonančním kmitočtem. Díky tomu lze reproduktor více mechanicky namáhat. Tato ozvučnice dokonale odstraňuje akustický zkrat. Docílí toho tak, že energii zadního akustického vlnění přemění na teplo. Tím také dochází ke snížení charakteristické citlivosti reproduktoru [2].



Obr 1. Uzavřená ozvučnice

Na obrázku (Obr 1.) je vidět, jak uzavřená ozvučnice vypadá. U polootevřené ozvučnice by zde nebyla zadní deska a mohlo by dojít k akustickému zkratu.

Uzavřený objem vzduchu ale posouvá rezonanční kmitočet výše. Ten se může vypočítat pomocí vztahu

$$f_c = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \times f_r \quad [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

kde V_{as} je ekvivalentní objem vzduchu, V_b objem ozvučnice a f_r rezonanční kmitočet reproduktoru. Z tohoto vztahu plyne, že se snižujícím objemem uzavřené ozvučnice, se zvyšuje rezonanční kmitočet [3].

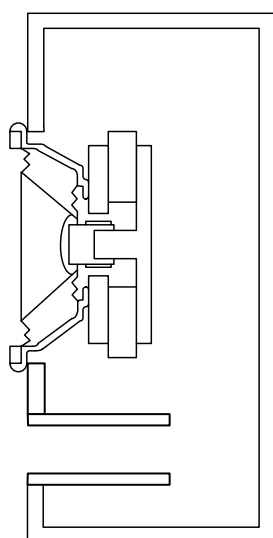
Umístěním reproduktoru do této ozvučnice dochází ke snížení charakteristické citlivosti na nízkých kmitočtech o 6 dB. Strmost změny kmitočtové charakteristiky reproduktoru po zabudování do uzavřené ozvučnice je 12 dB/okt. Z kmitočtové charakteristiky lze pak vyčíst, že uzavřená ozvučnice se chová jako horní propust [3].

2.2. Ozvučnice typu Bassreflex

Bassreflexová ozvučnice (někdy označována jako „vented“ nebo „ported“) je vlastně uzavřená ozvučnice s bassreflexovým nátrubkem o dané délce (Obr 2.). Díky tomu má reproduktor vyšší charakteristickou citlivost a objem ozvučnicové skříně může být menší než u ozvučnice uzavřené. Takovéto ozvučnicové skříně, která je tvořena jednou komorou a bassreflexovým nátrubkem se také říká větraná komora. Na druhou stranu návrh bassreflexové ozvučnice je složitější, těsnost reprosoustavy musí být větší, aby se zpřesnil návrh bassreflexového nátrubku, a reproduktor je pod rezonančním kmitočtem více namáhán. Pro určení, jestli je reproduktor vhodný pro zabudování do bassreflexové ozvučnice, se zavedl činitel *EBP* (Efficiency Bandwidth Product – efektivní šířka pásma součinitele), který je definován jako

$$EBP = \frac{f_r}{Q_{es}} \text{ [Hz]} \quad (2.2)$$

kde Q_{es} je elektrický činitel jakosti reproduktoru. Tato hodnota pak udává, jestli je reproduktor vhodný do této ozvučnice. Pokud je činitel *EBP* větší než 50, pak je reproduktor vhodný, pokud je menší než 50, pak se více hodí pro zabudování do uzavřených reproduktorových soustav [1].



Obr 2 Ozvučnice typu Bassreflex

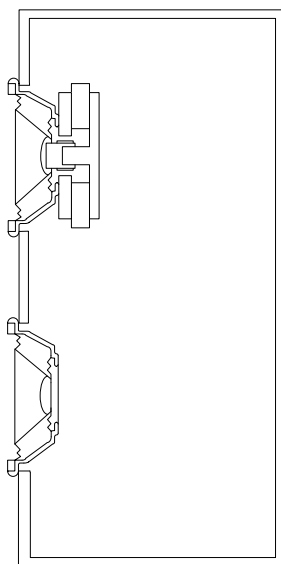
Rezonanční kmitočet této ozvučnice je pak

$$f_b = \frac{c_0}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{S}{V_b \times (l + 0,96) \times \sqrt{S}}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.3)$$

kde S průřez bassreflexového nátrubku, l délka bassreflexového nátrubku a c_0 rychlost zvuku. Konstanta 0,96 se volí podle délky a průměru bassreflexového nátrubku. Z tohoto vztahu plyne, že zužováním a prodlužováním bassreflexového nátrubku dochází ke snižování rezonančního kmitočtu. Je zde ale omezení, kdy rychlost proudícího vzduchu bassreflexovým nátrubkem nesmí přesáhnout 16 % rychlosti zvuku. Poté by mohlo dojít k nechtěnému hluku bassreflexového nátrubku. Rychlost proudění vzduchu se snižuje volbou většího průměru bassreflexového nátrubku. Impedanční charakteristika pak má kromě posunutého rezonančního kmitočtu reproduktoru také rezonanční kmitočet bassreflexového nátrubku [3].

2.3. Ozvučnice s pasivním zářičem

Pasivní zářič je ve své podstatě reproduktor, který nemá magnetický obvod ani cívku. Ozvučnice s pasivním zářičem je na následujícím obrázku (Obr 3.) [1].



Obr 3. Ozvučnice s pasivním zářičem

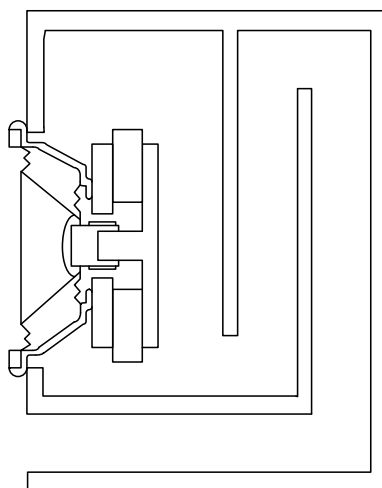
Pasivní zářič se chová podobně jako bassreflexový nátrubek. Také má svůj rezonanční kmitočet. Pasivní zářič ale zavádí do systému další hmotnost a poddajnost. Se zvětšující se hmotností a poddajností bude rezonanční kmitočet nižší. Ozvučnice s pasivním zářičem oproti s bassreflexovým nátrubkem má nižší zkreslení pod rezonančním kmitočtem. Oproti bassreflexovému nátrubku se liší ještě ve strmosti modulové kmitočtové charakteristiky, kdy ozvučnice s pasivním zářičem má větší strmost [3].

2.4. Ozvučnice typu Transmission line

Tato ozvučnice je podobná Bassreflexové tím, že reproduktor nevyzařuje zadní plochou membrány přímo. Princip ale není v rezonování, ale ve zpoždování signálu. Ozvučnice obsahuje dlouhý zvukovod (Obr 4.), jehož délka musí být minimálně čtvrtina délky vlny nejnižšího přenášeného kmitočtu. Pro výpočet se pak používá vtaž

$$l = \frac{\lambda}{k} = \frac{c_0}{k \times f_m} \quad [\text{m}] \quad (2.4)$$

Kde λ je vlnová délka a f_m dolní mezní kmitočet zvukového signálu. Vyzářené akustické vlnění zvukovodem, je pak ve fázi s akustickým vlněním přední strany reproduktoru [4].

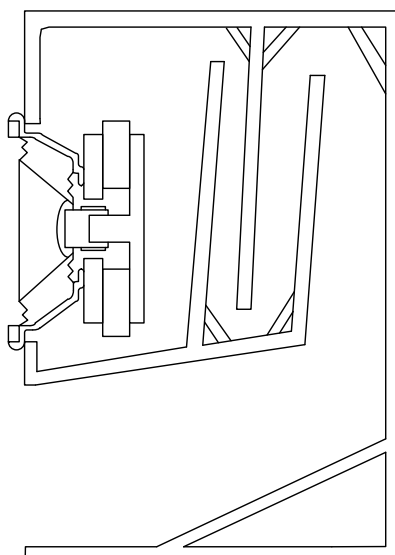


Obr 4. Ozvučnice typu Transmission line

Nevýhody této ozvučnice jsou velké rozměry, velmi složitá konstrukce, náročnost výpočtu a v neposlední řadě nižší charakteristická citlivost u nízkých kmitočtů [1].

2.5. Ozvučnice typu Back-loaded horn

Ozvučnice typu Back-loaded horn je velmi podobná ozvučnici typu Transmission line. Obsahuje stejně dlouhý zvukovod, který ale v tomto případě není v celé délce stejně široký (Obr 5.). Jeho šířka se směrem ven exponenciálně rozšiřuje a to má za následek vyšší charakteristickou citlivost. Pro jeho délku platí stejné pravidlo jako u Transmission line, kdy minimální délka je čtvrtina vlnové délky nejnižšího přenášeného kmitočtu [5].



Obr 5. Ozvučnice typu Back-loaded horn

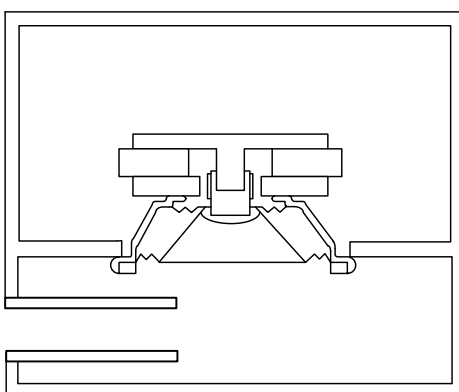
Nevýhodou této ozvučnice jsou podobné jako u Transmission line s tím, že rozměry ozvučnicové skříně jsou ještě o něco větší.

2.6. Ozvučnice typu pásmová propust

Ozvučnice typu pásmová propust, jinak také Bandpass, je jednou z hojně používaných ozvučnic. Jedná se o ozvučnici s více komorami, kdy reproduktor je umístěn na příčce mezi nimi. Reprodukter tedy nevyzařuje přímo, ale pomocí bassreflexového nátrubku. Použití více komor má za následek, že zvukový signál je filtrován filtrem typu pásmová propust. Tento typ ozvučnice se podle počtů komor a použitých bassreflexových nátrubků chová jako různé řády filtru typu pásmová propust, proto se dělí podle řádu. Dále jsou rozebrány dva nejčastější řády této ozvučnice [6].

2.6.1. Pásmová propust čtvrtého řádu

Pásmová propust čtvrtého řádu se skládá ze dvou komor, kdy přední komora vyzařuje pomocí bassreflexového nátrubku (Obr 6.).



Obr 6. Ozvučnice typu pásmová propust – čtvrtý řád

Vztah pro výpočet objemu přední komory je

$$V_f = (2 \times s \times Q_{ts})^2 \times V_{as} \quad [l] \quad (2.6)$$

kde s je konstanta udávající zvlnění a Q_{ts} je činitel jakosti reproduktoru. Pro výpočet zadní komory platí

$$V_r = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{bp}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} \quad [l] \quad (2.7)$$

kde Q_{bp} je jakost uzavřené zadní komory [7].

Přední komora má pak rezonanční kmitočet, který se vypočítá pomocí vzorce

$$f_b = Q_{bp} \times \frac{f_r}{Q_{ts}} \quad [Hz] \quad (2.8)$$

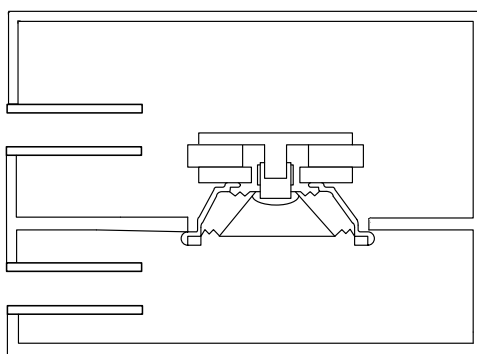
a pro bassreflexový nátrubek platí

$$l = \frac{94250 \times R^2}{f_b^2 \times V_f} - 1,595 \times R \quad [m] \quad (2.9)$$

kde R je poloměr bassreflexového nátrubku. Poloměr bassreflexového nátrubku se zpravidla volí co největší [7].

2.6.2. Pásmová propust šestého řádu

Ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu má stejně jako čtvrtého řádu dvě komory s tím rozdílem, že obě vyzařují ven pomocí bassreflexových nátrubků (Obr 7.). S ohledem na to, že zde jsou použity dva bassreflexové nátrubky, by se jejich průměr měl volit co největší, aby se minimalizovalo riziko jejich hluku [8].



Obr 7. Ozvučnice typu pásmová propust – šestý řád

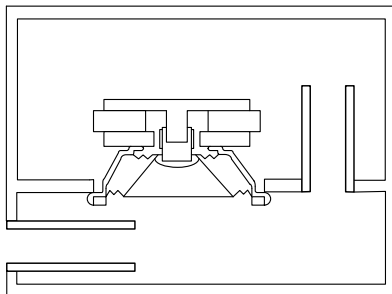
Pro délku bassreflexového nátrubku u ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu platí vztah

$$L_v = \frac{23562,5 \times R^2 \times N_p}{f_b^2 \times V_b} - k \times R \quad [m] \quad (2.10)$$

kde N_p je počet bassreflexových nátrubků a k je korekce podle použitého bassreflexového nátrubku. Obvykle se používá hodnota 0,732, kdy jeden konec bassreflexového nátrubku je s přírubou [8].

2.6.3. Pásmová propust šestého řádu – sériové zapojení

Ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu se sériově laděnými bassreflexovými nátrubky je velmi podobná klasickému zapojení ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu s tím rozdílem, že komory jsou propojeny bassreflexovým nátrubkem a zadní komora je větrána do přední (Obr 8.).



Obr 8. Ozvučnice typu pásmová propust – šestý řád sériové zapojení

Výpočet délky vnitřního bassreflexového nátrubku je složitější, protože vnitřní i vnější bassreflexové nátrubky spolupracují na ladění kmitočtu zadní komory. V tomto případě vnější bassreflexový nátrubek musí být větší, protože vyzařuje jak z přední komory, tak i vyzařovaný zvuk ze zadní komory do přední.

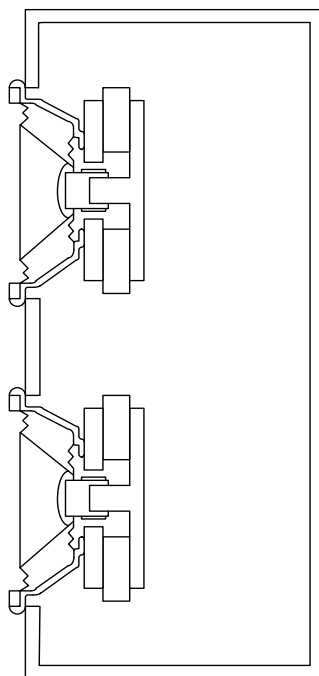
3. Více reproduktorů v jedné ozvučnici

Jedná se o použití dvou reproduktorů v jedné ozvučnici, přičemž oba reproduktory mají stejné vlastnosti a mají mezi sebou konstantní objem. Díky použití dvou reproduktorů se dosáhne o 3 dB vyšší charakteristická citlivost. Při takto zabudovaných reproduktorech je zapotřebí dvojnásobný objem ozvučnice, aby systém měl stejný rezonanční kmitočet jako při použití jednoho reproduktoru [1].

Pokud jsou reproduktory uspořádány v ozvučnici tak, že sdílejí mezi sebou malý objem, pak se jedná o isobarické uspořádání reproduktorů. Výhodou tohoto uspořádání reproduktorů je, že při polovičním objemu ozvučnice mají stejný rezonanční kmitočet, jako jeden reproduktor v ozvučnici dvojnásobné. Charakteristická citlivost isobarického uspořádání je ale nižší. Pro stejný akustický výkon je zapotřebí vyššího elektrického příkonu. Možností isobarického uspořádání jsou rozebrány v podkapitolách 3.3. až 3.5. [1].

3.1. Zapojení tlačit-tlačit

Jedná se o zapojení, kdy oba reproduktory vyzařují ven z ozvučnice přední stranou membrány (Obr 9.).

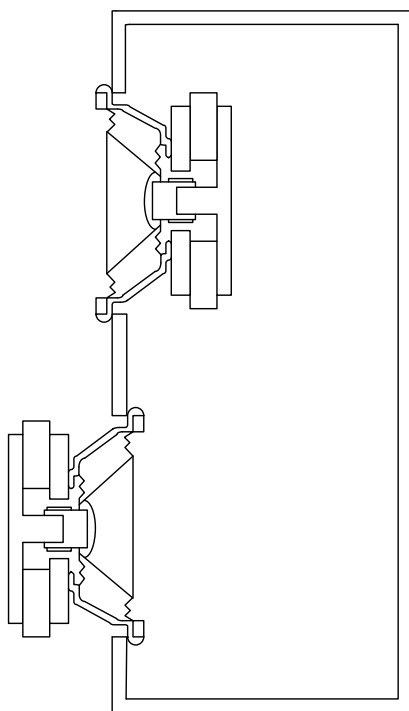


Obr 9. Zapojení tlačit-tlačit

Jedná se o zapojení, kdy pro dosažení stejného rezonančního kmitočtu, jako při použití jednoho reproduktoru je potřebná ozvučnice o dvojnásobném objemu. To plyne z toho, že při použití dvou reproduktorů se zdvojnásobuje hodnota ekvivalentního objemu vzduchu V_{as} , tedy i celkového objemu ozvučnice [10].

3.2. Zapojení tlačit-táhnout

U klasického zapojení tlačit-táhnout (jinak také „push-pull“) je jeden z reproduktorů zabudován opačně, magnet tedy přesahuje půdorys ozvučnice (Obr 10.). To je nebezpečné, protože může být mechanicky poškozen.

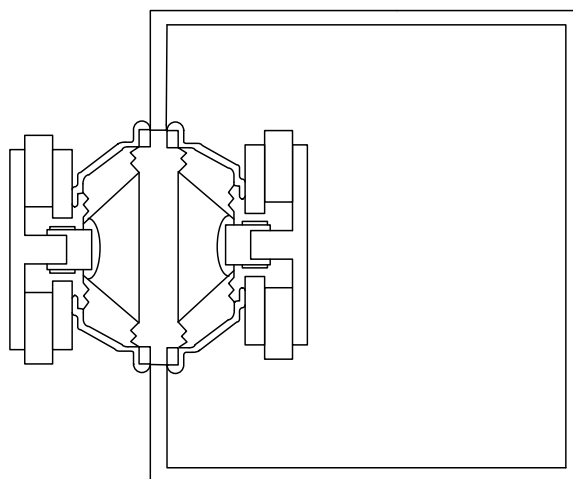


Obr 10. Zapojení tlačit-táhnout

Tím, že je jeden z reproduktorů zabudován opačně, tak se na něj musí přivést signál v opačné fázi, aby se membrány reproduktorů pohybovali stejným směrem. Pokud jsou použity reproduktory se stejnými parametry, pak se díky tomuto uspořádání docílí nižšího zkreslení. To díky tomu, že dojde k minimalizaci sudých harmonických [1].

3.3. Zapojení kužel na kužel

Zapojení kužel na kužel (jinak také „front to front“) je isobarické uspořádání reproduktorů. Reproductory v tomto uspořádání jsou zapojeny obdobně jako v zapojení tlačit-táhnout, kdy na jeden reproduktor je přiveden signál v opačné fázi (Obr 11.).

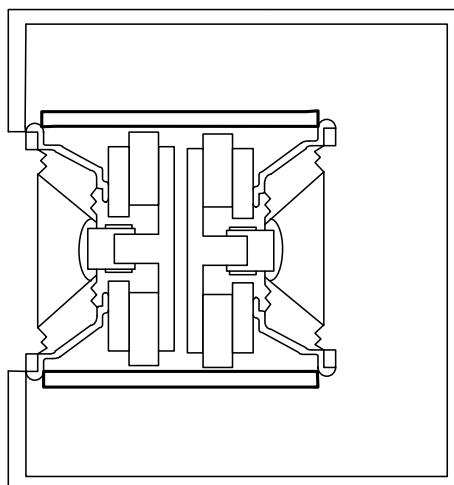


Obr 11 Zapojení kužel na kužel

Stejně jako u zapojení tlačit-táhnout má toto zapojení nižší zkreslení. Reproductory mají mezi sebou konstantní malý objem a membrány se pohybují stejným směrem, díky opačné fázi na jednom z reproduktorů. V tomto případě se jedná o isobarické uspořádání reproduktorů, kdy reproduktory v ozvučnici s polovičním objemem mají stejný resonanční kmitočet, jako dvojnásobná ozvučnice s jedním reproduktorem. Toto zapojení je často využíváno v ozvučnicích typu Bassreflex nebo pásmová propust [1].

3.4. Zapojení magnet na magnet

Toto zapojení má stejný efekt jako předchozí zapojení. Reproductory jsou zde k sobě umístěny zadní plochou membrány (Obr 12.) na rozdíl od předchozího zapojení. To má jednu velkou výhodu, kdy z přední části ozvučnice netrčí magnet, tedy nemůže být při běžném použití poškozen.

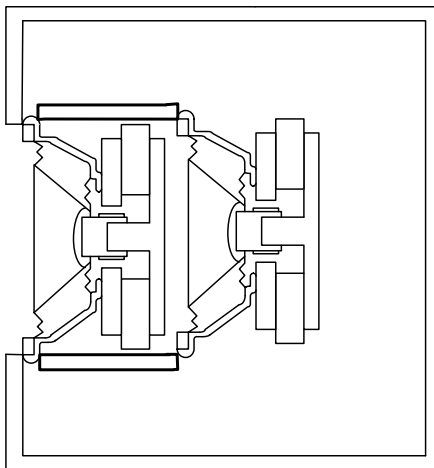


Obr 12. Zapojení magnet na magnet

Nevýhodou tohoto zapojení oproti zapojení kužel na kužel je to, že reproduktory mezi sebou svírají podstatně větší objem vzduchu, který je ještě k tomu ohřívám kmitacími cívkami. To vše má za následek malé změny tlaku mezi reproduktory [1].

3.5. Zapojení kužel na magnet

Dalším typem zapojení je zapojení kužel na magnet (jinak také „piggyback“). Toto zapojení již není zapojení tlačit-táhnout, oba reproduktory jsou situovány stejným směrem (Obr 13.).



Obr 13. Zapojení kužel na magnet

Oproti předchozímu zapojení jsou nevýhody jako ohřev vzduchu mezi reproduktory, nebo malé změny tlaku nižší díky tomu, že objem vzduchu mezi reproduktory je menší a vzduch ohřívá pouze jedna kmitací cívka [1].

3.6. Parametry virtuálního reproduktoru pro isobarické zapojení reproduktorů

Na isobarické zapojení reproduktorů se dá nahlížet jako na jeden reproduktor, který ovšem bude mít jiné parametry než reproduktor původní. Tento přístup je ale velmi zidealizovaný, protože je zapotřebí dvou identických reproduktorů a to je nereálný požadavek. Využitím tohoto principu se vnáší do návrhu nepřesnosti.

Dvojice reproduktorů zapojených v isobarickém zapojení se začne chovat jako nový reproduktor s poloviční poddajností, dvojnásobně těžkou membránou a dvojnásobným odporem kmitacího systému. Následkem toho se změní i některé další parametry uvedené v tabulce (Tab. 1.). [1]

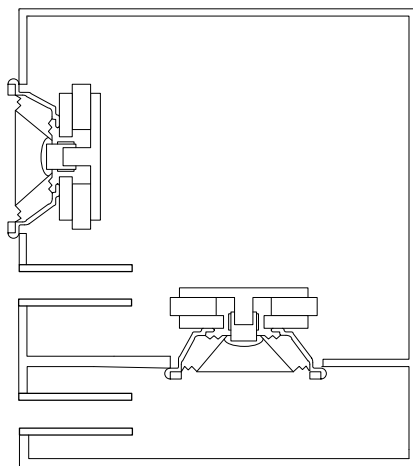
Tab. 1. Změna parametrů pro zapojení isobaric

Jeden reproduktor	Dvojice reproduktorů (isobaric)
c_{ms}	$c_{ms}/2$
S_d	S_d
V_{as}	$V_{as}/2$
c_a	$c_a/2$
m_{ms}	$2m_{ms}$
r_{ms}	$2r_{ms}$
Bl	Bl
Q_{ms}	Q_{ms}
Q_{es}	Q_{es}
Q_{ts}	Q_{ts}
f_s	f_s
R_e	$R_e/2$
L_e	$L_e/2$

Takto upravené parametry lze použít v simulaci isobarického zapojení reproduktorů. Toho bude využito i v následujícím návrhu v kapitole 7.3.

4. Subwoofer firmy Audiotechnik

Tento subwoofer od firmy Audiotechnik kombinuje přímo vyzařující hlubokotónový reproduktor s principem pásmové propusti. Tím je docíleno snížení zkreslení a zvýšení výstupního výkonu zvuku při současném snižování objemu boxu. Jedná se o uspořádání dvou hlubokotónových reproduktorů, které sdílejí společnou větranou komoru. Nepřímo vyzařující reproduktor pak vyzařuje přední plochou membrány do větrané komory, která má charakter pásmové propusti čtvrtého řádu (Obr 14.) [11].



Obr 14. Subwoofer firmy Audiotechnik

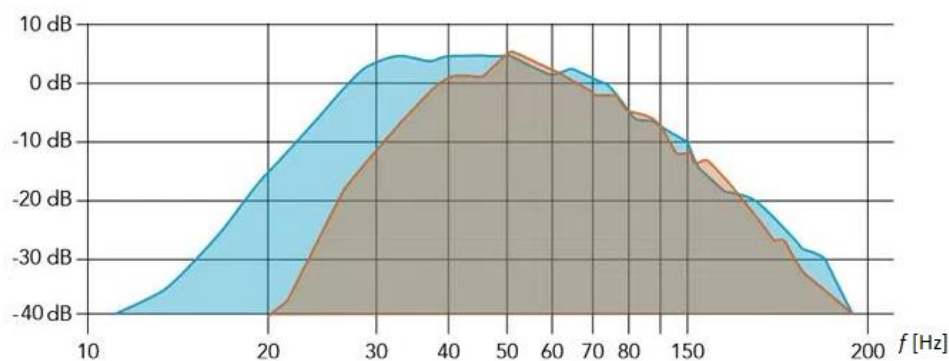
Každý reproduktor pak má vlastní zesilovač a DSP (Digital Signal Processor – digitální signálový procesor). Tato kombinace vede ke zvýšení charakteristické citlivosti, přičemž součet modulových charakteristik reproduktorů a bassreflexových nátrubků udržuje plochou fázovou odezvu, aby docházelo k minimálnímu zkreslení [11].

4.1. Zapojení reproduktorů přes zpožďovací linku

U tohoto subwooferu je díky tomu, že každý reproduktor má vlastní DSP, možné libovolně zpožďovat jeden či druhý signál. Pokud jsou oba bez zpoždění, tak daný systém reproduktorů funguje jako klasický systém s dvěma reproduktory a větranou komorou. To má za následek vytváření symetrického tlaku ve společné komoře, ale reproduktory vzájemně ovlivňují svůj akustický výkon. Pokud je jeden ze signálů zpožděn a reproduktory se dostanou do protifáze, pak se jejich akustický výkon sčítá, ale ve společné komoře vzniká asymetrický tlak [11].

4.2. Kmitočtová charakteristika

Při porovnání kmitočtové charakteristiky isobarického uspořádání 21 palcových hlubokotónových reproduktorů v Bassreflexové ozvučnici se subwooferem od firmy Audiotechnik (obr 15.) je vidět, že díky uspořádání, které tato firma vyvinula, je tento systém schopen reprodukce nižších kmitočtů při vyšší charakteristické citlivosti než srovnávaná Bassreflexová ozvučnice [11].



Obr 15. Kmitočtová charakteristika isobarického uspořádání 21 palcových reproduktorů v Bassreflexové ozvučnici s kmitočtovou charakteristikou systému hs-221 od firmy Audiotechnik (převzato z [11])

Z Kmitočtové charakteristiky je vidět, že systém hs-221 od firmy Audiotechnik dosahuje až o 10 Hz nižšího mezního kmitočtu než srovnávaná Bassreflexová ozvučnice s isobarickým uspořádáním hlubokotónových reproduktorů.

4.3. Typy dostupných modelů

V dnešní době firma Audiotechnik nabízí více typů subwooferu, které fungují na výše popsaném principu. Jejich přehled je v následující tabulce (Tab. 2.) [11].

Tab. 2. Přehled dostupných systémů firmy audiotechnik, které kombinují přímo vyzařující reproduktor s ozvučnicí typu pásmová propust

Název systému	Velikost reproduktorů	Kmitočtová odezva	Charakteristická citlivost	THD+N	Velikost systému
hs-20	10 palců	40 – 60 Hz	94 dB	< 0,05%	362;600;560 mm
hs-25	15 palců	32 – 169 Hz	97 dB	< 0,05%	457;813;688 mm
hs-28	18 palců	35 – 80 Hz	99 dB	< 0,05%	538;965;813 mm
hs-221	21 palců	25 – 150 Hz	101 dB	< 0,05%	610;1117,5;813 mm

5. Konstrukční řešení ozvučnic

Ozvučnice reproduktoru by měla být co nerobustnější a z co nejtužšího materiálu, aby nedocházelo k rozkmitání stěn na jejich rezonančních kmitočtech. Použitý materiál by tedy měl mít dobré tlumící vlastnosti. Krom požadavků na materiál jsou zde požadavky i na provedení spojů a to, že mají být co nejtěsnější, aby nedocházelo k úniku vzduchu. Toho se docílí lepením stěn k sobě kvalitním lepidlem a jejich sešroubování vruty, dále pak použitím silikonového tmelu pro vylití koutů popřípadě i hran ozvučnice [1].

5.1. Typy materiálů

V dnešní době je na výběr z mnoha materiálů vhodných pro konstrukci ozvučnice. Liší se svými vlastnosti jako je hmotnost, tuhost, vnitřní tlumení a také cena. V následující tabulce (Tab. 3.) je přehled a vlastnosti vhodných materiálů [1],[3].

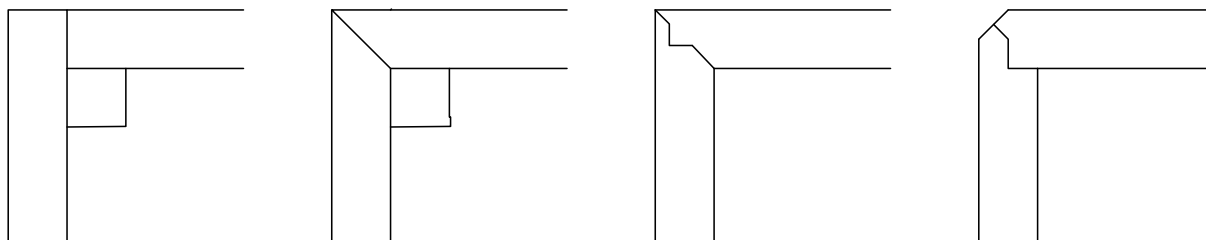
Tab. 3. Přehled vhodných materiálů pro konstrukci ozvučnice

Materiál	Vlastnosti	Cena Kč/m ²
MDF (Medium density fibre board - středně zhuštěná dřevovláknitá deska)	Velmi používaný, těžký, tuhý materiál s velmi dobrým vnitřním tlumením. Pro svoji hmotnost je to dobrý materiál pro menší ozvučnice, ale příliš těžký pro velké přenosové boxy. Hlavní uplatnění je u HIFI ozvučnic.	225
DTD – Dřevovláknitá deska	Velmi používaný, středně těžký a tuhý materiál s dobrým vnitřním tlumením. Vyrábí se lisováním dřevo-odpadu a jeho lepením speciálním lepidlem. Používají se tloušťky desky 18 – 25 mm. Odolnost proti vodě je malá.	125
Překližka z břízy	Středně těžký, silný a tuhý materiál s horším vnitřním tlumením než M.D.F., ale přesto dobrým. Velmi odolný materiál. Velmi často používaný pro přenosné reproduktorové soustavy.	200 – 300 dle šířky
Překližka z topolu	Lehký, silný a tuhý materiál. Vyrábí se laminováním dřeva, jejichž vrstvy jsou v sousedních vrstvách na sebe kolmo orientované. Mezi jednotlivými vrstvami se mohou vyskytnout dutiny, které mají za následek nežádoucí rezonance a zvonivý zvuk.	200
A.B.S – Plast	Často používaný materiál u menších ozvučnic. Vyrábí se z něho levnější reproduktorové soustavy.	-
Kámen	Těžký a tvrdý materiál. Používá se břidlice, žula, pískovec, mramor či vápenec. Zvonivý materiál. Zvonivost materiálu se tlumí jiným nalepeným materiálem.	-

5.2. Způsoby spojování stěn

Při spojování stěn se dbá na co nejvyšší těsnost spoje, aby vzduch z vnitřního objemu ozvučnice neunikal ven jinudy než navrženým bassreflexovým nátrubkem. To by mělo vliv na přesnost ladění bassreflexového nátrubku a další vypočtené a navržené vlastnosti ozvučnice. Proto i reproduktor je podložen těsněním. Utěsněné jsou i další komponenty jako bassreflexové nátrubky či připojovací terminál.

Stěny pak lze spojovat více způsoby. Pokud jsou vzaty dvě desky a jsou k sobě spojeny kolmo, tak se takovému spoji říká spoj na tupo. Takovýto spoj má menší pevnost je potřeba ho odýhovat. Často se zpevňuje přidáním hranolů podél hran. Pokud jsou kraje desky seříznuty pod úhlem 45° a posléze spojeny tak se takovému spoji říká na pokos. Tento spoj není potřeba dýhovat, ale také se podél hran přidávají zpevňující hranoly. Další typ spoje je na pokos se zámkem neboli na zámek. Takovýto spoj vypadá tak, že krom seříznutí okrajů desek pod úhlem 45° se u jedné z desek nechává výběžek, který pak zasedne do žlábků udělaného v druhé desce. Tento spoj je velmi pevný a již nepotřebuje výztuhu pomocí hranolů. Je však velmi náročný na přesnost. Jednodušším ale stále dostatečně pevným spojením je spoj nazývaný na zámek s následným skosením. Ten vypadá tak, že je vytvořen zámek podobně jako v předchozím případě a po slepení se vnější hrana zaoblí. Toto zaoblění pomáhá snížit difrakční vyzařování (Obr 16.) [1].



Obr 16. Typy spojů: z levé strany na tupo, na koso, na zámek, na zámek s následným skosením

Při spojování stěn se ještě využívají kolíky, které jsou zastrčeny do obou desek a způsobují ještě větší tuhost a pevnost spoje.

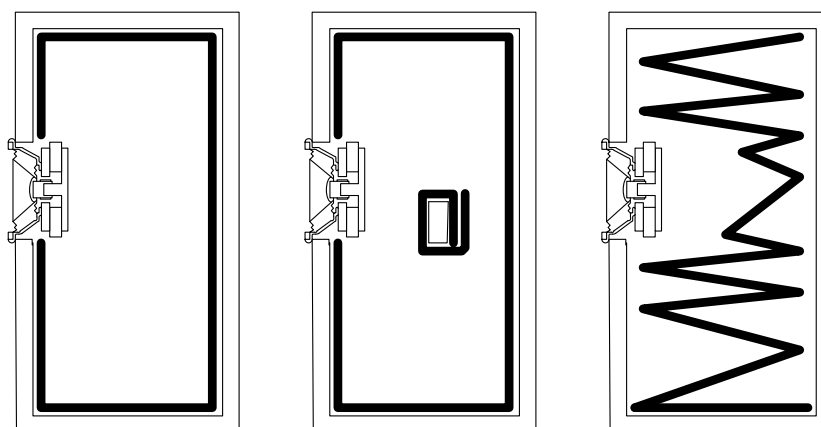
5.3. Tlumení ozvučnice

Uvnitř ozvučnice může dojít ke vzniku stojatých vln, které jsou tvořeny pomocí přímé vlny a všech dalších odražených vln. Pokud by daná stojatá vlna byla ve fázi, zesílila by výstupní signál, pokud v protifázi, pak by ho zeslabila. Tím by došlo ke vzniku nerovnosti kmitočtové charakteristiky reproduktorové soustavy. Pro kmitočet stojatých vln platí

$$f = 2^n \times \frac{c_0}{l} \quad [\text{Hz}] \quad (5.1)$$

kde l je rozměr ozvučnice a c_0 rychlost zvuku. Stojaté vlnění je tedy potřeba odstranit a to buď konstrukcí skříně, anebo přidáním tlumícího materiálu. Při konstrukčním řešení odstranění stojatých vln se jedná o to, že stěny skříně nebudou rovnoběžné. Pokud se

přidává tlumicí materiál je několik možností jak to udělat. Jeden ze způsobů je umístění na stěny, kdy nejvíce tlumená je stěna zadní, horní, dolní a postranní stěny. Tloušťka tlumicího materiálu bývá nejčastěji 6 cm, ale může být až desetina nejdelšího rozměru skříně. Další způsob je tlumení na výztuhu. To se využívá, pokud je při konstrukci použita nějaká výztuha, zejména pak pokud je výztuha umístěna v polovině nejdelšího rozměru skříně. V tomto místě má stojatá vlna pro první mód největší amplitudu a proto je zde tlumení této vlny účinné. Další způsobem umístění tlumicího materiálu je metoda zig-zag. Ta spočívá v umísťování tlumicího materiálu od jedné stěny ke druhé a zpět. Uprostřed skříně pak bývají vzniklé zuby více nahusto. Při tomto způsobu umístění tlumení se musí dát pozor, aby tlumicí materiál nebyl v oblasti bassreflexového nátrubku a reproduktoru (Obr 17.) [3].



Obr 17. Způsoby uložení tlumení: z levé strany na stěny, na stěny a výztuž, metodou zig-zag

Tlumení má ale i nevýhody jako snížení činitele jakosti. To je zapříčiněno změnou poddajnosti vnitřního objemu. Tím dochází také k nepatrnému přelaďování reproduktorové soustavy. Naopak pokud je potřeba snížit činitel jakosti, tak jsou skříně vyplněny tlumícím materiálem skoro celé. Tlumicí materiál by měl být v ozvučnici vhodně umístěn, nebo přilepen, aby se nepohyboval [1].

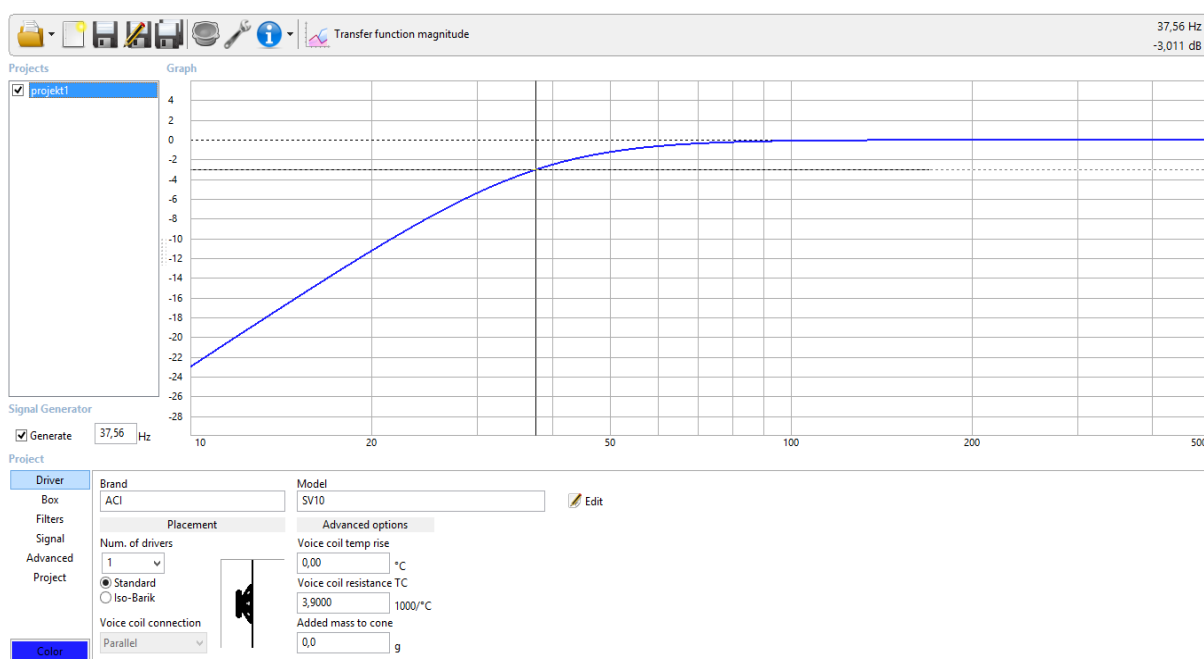
6. Programy pro návrh ozvučnic

Dokud se navrhovaly jednodušší typy ozvučnic, nebylo simulačních programů zapotřebí. V dnešní době jsou konstrukce reproduktorových ozvučnic složitější a výpočtů je mnoho. K usnadnění návrhu se tedy využívají simulační programy.

Simulační programy se staly nedílnou součástí návrhu reproduktorových ozvučnic. Pomocí nich lze předem vidět a očekávat jak se navržená ozvučnice bude chovat. V dnešní době existuje mnoho simulačních programů. V následujících podkapitolách je stručný popis některých z nich.

6.1. Program WinISD

Nejaktuálnější verzí programu WinISD je 0.7.0.950 z roku 2016. Při spuštění programu se objeví okno, ve kterém je podokno projekty – umožňuje přepínání mezi více spuštěnými projekty, graf – zobrazuje kmitočtovou odezvu navrhovaného signálu, generátor signálu – umožňuje poslech signálu o nastaveném kmitočtu přes navržený systém, a projekt – zde se dají nastavovat jednotlivé parametry navrhovaného systému (Obr 18.).



Obr 18. Hlavní okno programu WinISD 0.7.0.950

V horní liště jsou pak záložky umožňující otevřít již existující projekt, vytvořit nový projekt, různé možnosti uložení, dále pak záložka pro editaci a vytvoření nového reproduktoru s danými parametry, záložka možnosti pro definování jak parametrů okolního prostředí, tak parametrů grafu a asi nejdůležitější záložka pro výběr zobrazované grafické závislosti. V pravém rohu této lišty jsou pak hodnoty, které lze z grafu odečítat pomocí kurzoru.

Tato verze jako i předchozí má při vytváření nového projektu možnost výběru reproduktoru z databáze reproduktorů, jejichž parametry jsou již nadefinované. To velmi usnadňuje výběr a zadávání parametrů reproduktoru. Vybraný model reproduktoru lze pak měnit pomocí podokna projekt. Dalším krokem při tvorbě nového projektu je definování počtu použitých reproduktorů a výběr zapojení. Dále se vybírá typ ozvučnice, která má být navržena. Zde je celkem velké omezení ve výběru. Dají se zde navrhovat typy ozvučnic jako uzavřená ozvučnice, Bassreflexová ozvučnice, ozvučnice typu pásmová propust čtvrtého řádu, ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu s paralelně laděnými bassreflexovými nátrubky a ozvučnice s pasivním zářičem.

Při porovnání této verze programu s verzí 0.50a7z roku 2004 není vidět žádné hlavní změny. V obou dvou verzích lze navrhnout stejné typy ozvučnic. Tato novější verze se liší pouze větší databází reproduktorů a grafickým zpracováním programu.

6.2. Program Amplion

Simulační program Amplion verze 2.3b3 je verze programu z roku 2017. Při spuštění programu se zobrazí okno s třemi záložkami. První slouží pro výběr reproduktoru pro navrhovaný systém či definování jeho parametrů, pokud daný reproduktor není v databázi. Na rozdíl od programu WinISD je zde k dispozici filtr parametrů, který pomáhá při výběru reproduktoru pomocí zadání některých z hlavních požadovaných parametrů (Obr 19.).

Obr 19. Okno programu Amplion 2.3b3

Druhá záložka umožňuje výběr typu navrhované ozvučnice. V tomto ohledu je na tom program Amplion ještě hůře než program WinISD. Umožňuje návrh pouze tří typů ozvučnic a to uzavřené ozvučnice, Bassreflexové ozvučnice a ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu s paralelně laděnými bassreflexovými nátrubky. Dále se v této záložce definují parametry ozvučnice, počet použitých reproduktorů a jejich zapojení. Tento program nemá na výběr z různých grafických závislostí, ale má funkci, kdy lze porovnávat kmitočtové odezvy navrhovaného systému s různými parametry v jednom okně.

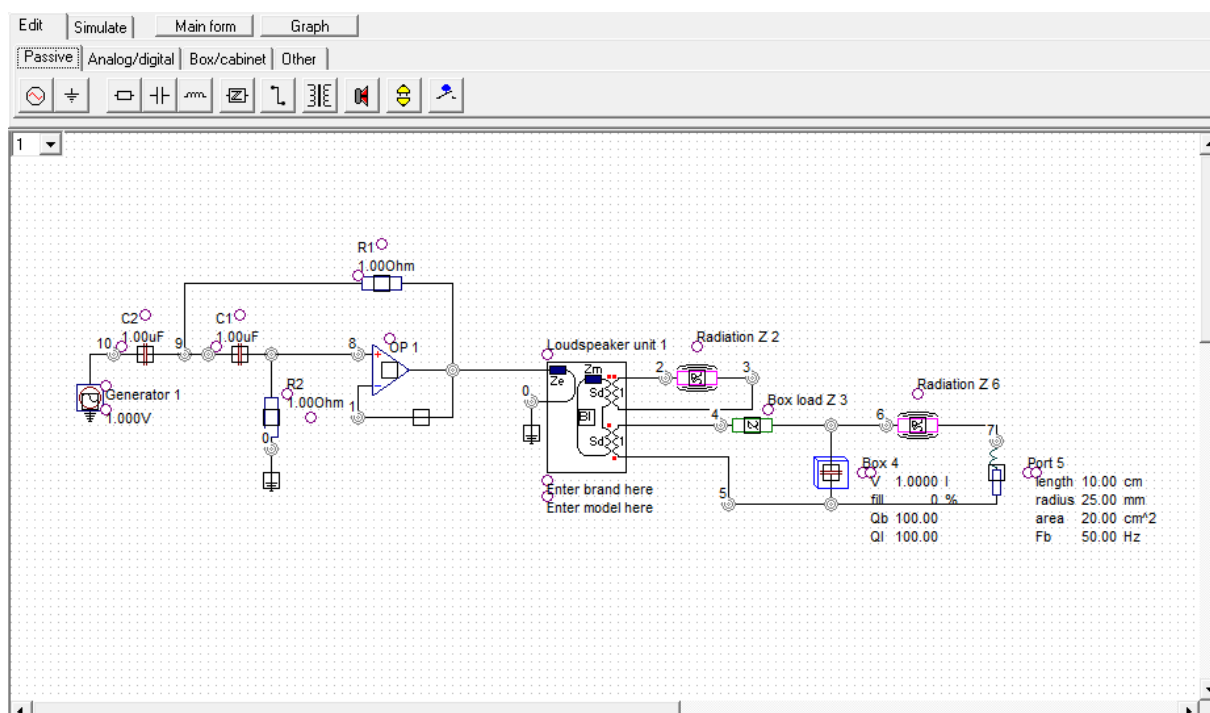
Třetí záložka pak zobrazuje použité vzorce při simulaci a výpočet daných parametrů.

6.3. Program LspCAD

U programu LspCAD je vidět mezi verzemi, na rozdíl od programu WinISD, velký rozdíl. Hlavní a na první pohled zřejmý rozdíl mezi verzí 6.41 z roku 2015 a 5.25 z roku 2004 je ten, že verze 6.41 pracuje s ekvivalentními schématy. V tomto programu je možné navrhovat reproduktorové ozvučnice, pasivní, aktivní i digitální filtry libovolné konfigurace. Zde je vidět další rozdíl mezi verzemi. Verze 6.41 umožňuje práci při návrhu ozvučnice a výhybky v jednom projektu. Verze 6.41 tedy umožňuje nasimulovat jakoukoli ozvučnici bez omezení na definované typy ozvučnic, jak tomu bylo v předchozích programech.

Při spuštění programu se zobrazí dvě okna. Hlavní okno obsahuje klasické záložky jako soubor – kde lze vytvořit, otevřít, uložit či zavřít aktuální projekt, upravit – zde lze jedním kliknutím uložit otevřený projekt a vytvořit druhý, který bude obsahovat stejný návrh ozvučnice jako předchozí, nastavení – zde lze buďto vložit již používané nastavení programu, či nastavit program pro další práci, lze zde definovat zobrazování křivek v grafu či jejich součet a další, nástroje – zde lze spustit optimalizaci či toleranční analýzu, nebo uložit aktuální grafickou závislost a nebo také spustit předchozí verzi 5.25. Více o nástrojích LspCAD v kapitole 6.3.1. Dále pak obsahuje záložku pro zobrazení informací o používané verzi programu a záložky, které otevírají okna schéma a graf.

V okně schéma (Obr 20.) lze pak vytvářet různá schémata zapojení. Jsou zde dva módy a to editační a simulační. V editačním módu lze vytvářet schéma zapojení ozvučnice či výhybky a v simulačním pak přiřazovat parametry jednotlivým součástkám.



Obr 20. Okno schéma programu LspCAD 6.41

V editačním módu pak jsou v hlavní liště k dispozici záložky s pasivními součástkami, analogovými a digitálními součástkami, náhradní schémata komponentů pro tvorbu reproduktorových systémů a záložka pro vkládání poznámek do schématu. Po přepnutí do simulačního módu se automaticky zobrazí okno s grafem, kde lze přepínat mezi jednotlivými grafickými závislostmi.

Při porovnání programu LspCAD 6.41 s ostatními programy je zřejmé, že tento program má nejvíce možností. Návrh v něm je ale složitější díky ekvivalentním schématům jednotlivých prvků reproduktorové soustavy.

6.3.1. Dostupné nástroje LspCAD

LspCAD není pouze simulační program. V základu má i několik nástrojů, které přibývají s novějšími verzemi programu. Prvním nástrojem, který se asi nejvíce využije u návrhu je Optimizer. Tento nástroj umí optimalizovat vybrané prvky zapojení. Umí udělat ideální celkovou odezvu simulovaného systému, optimalizovat odezvu jednotlivých reproduktorů, impedanční křivku, přenosovou funkci atd. (Obr. 21.). Dalším nástrojem je Snapshot. Tento nástroj umožňuje vytisknout různé charakteristiky a to podle dostupné verze. Dále je zde nástroj Tolerance analysis. Tento nástroj zohledňuje toleranci vyráběných součástek. Hodnoty tolerancí pro tuto analýzu se zadávají při návrhu v simulačním módu. Nástroj justMLS, který je dostupný v tomto programu pak umožňuje měření SPL a kmitočtové odezvy reproduktorových soustav či měření impedance. [13]

6.3.2. Dostupné verze programu LspCAD

Nejnovější verzí tohoto programu je verze 6.52 z 24. 2. 2018. U každé verze jsou pak dostupné čtyři varianty a to LspCAD Pro, LspCAD Std a dále LspCAD Pro demo a LspCAD Std demo. Při porovnání verzí Pro a Std je vidět, že ve verzi Std je k dispozici mnohem méně optimalizací než u verze Pro. Dále pak verze Std nemá toleranční analýzu a neumožňuje ukládání většiny průběhů ze simulace jako verze Pro (Obr. 21.). [13]

LspCAD 6 feature list		
	Std	Pro
LspCAD 5.25 bundled	YES (std)	YES (pro)
justMLS	YES	YES
Number of driver units	100	100
XO emulator	YES	YES
+ Number of outputs	2	10
+ IIR filtering	YES	YES
+ Circular convolution	YES	YES
+ Digital equalization	YES (G(s) component)	YES (G(s) component)
Optimizer		
+ Optimize total response	YES	YES
+ Optimize ind. driver response	YES	YES
+ Optimize impedance curve	NO	YES
+ Optimize transfer function	NO	YES
+ Set target crossover points	NO	YES
+ Set min allowed load impedance	NO	YES
+ Optimize with total box volume locked	NO	YES
+ Optimize with HP / LP targets	YES	YES
+ Optimize with EQ (peak/notch) targets	NO	YES
+ Optimize phase response	NO	YES
+ Optimize with imported target	NO	YES
Tolerance analysis	NO	YES
Thermal modeling		
+ Voice coil heating simulation	NO	YES
+ Power dissipation in resistors	NO	YES
Nonlinear modeling		
+ Bl(x) and Cms(x) modeling	NO	YES
+ Port nonlinearity	NO	YES
Import extra transfer function for driver	NO	YES
Polar plot	NO	YES
Predicted power response	NO	YES
Snapshot	Only SPL data	SPL, impedance, Transfer function...

Obr 21. Porovnání verzí Pro a Std (převzato z [13])

Demo verze se pak od plných verzí liší tím, že mají větší či menší omezení. Omezení těchto verzí je zejména na použití maximálně dvou reproduktorů v jednom schématu, dále že nelze exportovat data z programu, nelze ukládat projekt a parametry reproduktoru a je zakázána funkce justMLS.

7. Návrh ozvučnice

Tato kapitola se zabývá návrhem dvou přípravků, u kterých bude možné měnit typ ozvučnice podle potřeby. Tyto přípravky budou sloužit jako učební pomůcka. Bude možné sledovat změnu kmitočtové charakteristiky v závislosti na typu ozvučnice a dále pak porovnávat vliv jednoduchého či isobarického zapojení reproduktorů.

7.1. Požadované parametry

Požadované parametry navrhovaných ozvučnic vyplývají z účelu, pro který jsou navrhovány. Zadáním je, že tyto ozvučnicové přípravky musí jít snadno přestavět na různý typ ozvučnice a zároveň je kladen důraz na optimální kmitočtové charakteristiky jednotlivých typů ozvučnic.

Dále je zadáno, že jeden přípravek bude mít jeden reproduktor a druhý bude obsahovat isobarické uspořádání dvou reproduktorů, kdy všechny použité reproduktory budou mít stejné parametry. Při návrhu je také kladen důraz na praktičnost a malý objem navrhovaných přípravků.

Každý z přípravků by pak mělo jít přestavět na ozvučnice:

- polouzavřená ozvučnice
- uzavřená ozvučnice
- ozvučnice typu Bassreflex
- ozvučnice typu pásmová propust

Zároveň se téže hledí na složitost výroby a proto je návrh směřován pokud možno k stejným rozměrům ozvučnic.

7.2. Výběr reproduktoru a bassreflexových nátrubků

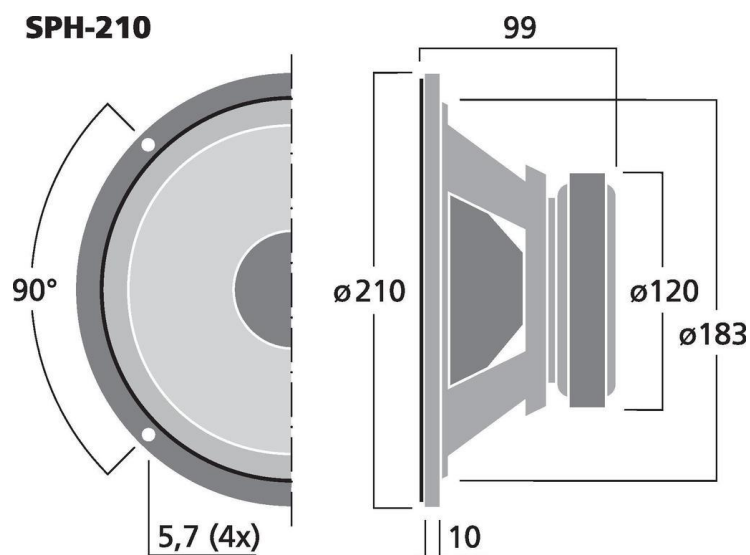
Jelikož se jedná o složitější návrh ozvučnice, tak je výběr reproduktoru více než jindy důležitý. Tento reproduktor musí být použitelný jak v ozvučnici typu Bassreflex tak i v uzavřené ozvučnici. Díky tomu je zvolen reproduktor s činitelem EBP přes 100, tedy vhodný pro ozvučnici typu Bassreflex. To je z toho důvodu, že ozvučnice typu Bassreflex je náročnější na zvolený reproduktor. Dále pak vybraný reproduktor musí jít použít v ozvučnici typu pásmová propust šestého řádu v sériovém zapojení. Zde nastává další problém s rozdílnými požadavky na parametry. Do ozvučnice typu Bassreflex by se měl použít reproduktor s co nejnižším Q_{ts} , zatím co u ozvučnice typu pásmová propust je zapotřebí vyšší Q_{ts} z důvodu menšího zvlnění kmitočtové charakteristiky při větší šířce reprodukováného kmitočtového pásma. Bylo zvoleno nižší Q_{ts} s tím ohledem, že reprodukováné kmitočtové pásmo bude užší a zvlnění kmitočtové charakteristiky bude upravováno vhodně zvolenými bassreflexovými nátrubky.

Vybraný reproduktor, který je nakonec použit v této práci je Monacor SPH-210. Jedná se o osmipalcový basový reproduktor s rezonančním kmitočtem 28 Hz. Parametry tohoto reproduktoru jsou shrnuty na obrázku (Obr 22.) [14].

SPH-210	
Impedance (Z)	8 Ω
Frequency range	f3-4,000 Hz
Resonant frequency (fs)	28 Hz
Power rating	50 W
Peak music power output	100 W
Sensitivity	90 dB/W/m
Suspension compl. (Cms)	1.32 mm/N
Moving mass (Mms)	24.5 g
Mech. Q factor (Qms)	2.14
Electr. Q factor (Qes)	0.27
Total Q factor (Qts)	0.24
Equivalent volume (Vas)	81 l
DC resistance (Re)	6.5 Ω
Force factor (BxL)	10.3 Tm
Voice coil induct. (Le)	1.0 mH
Voice coil diameter	$\varnothing$ 35.5 mm
Voice coil former	aluminium
Linear excursion (X _{MAX})	$\pm$ 3.5 mm
Eff. cone area (Sd)	210 cm ²
Magnet weight	840 g
Magnet diameter	$\varnothing$ 120 mm
Mounting cutout	$\varnothing$ 183 mm
Mounting depth	89 mm
Dimensions	$\varnothing$ 210 mm x 99 mm
Outside diameter	$\varnothing$ 210 mm
Width	$\varnothing$ 210 mm
Depth	99 mm
Admiss. ambient temp.	0-40 °C
Weight	2.52 kg
Sales unit	1
Type of speaker	8"

Obr 22. Parametry reproduktoru SPH-210 (převzato z [14])

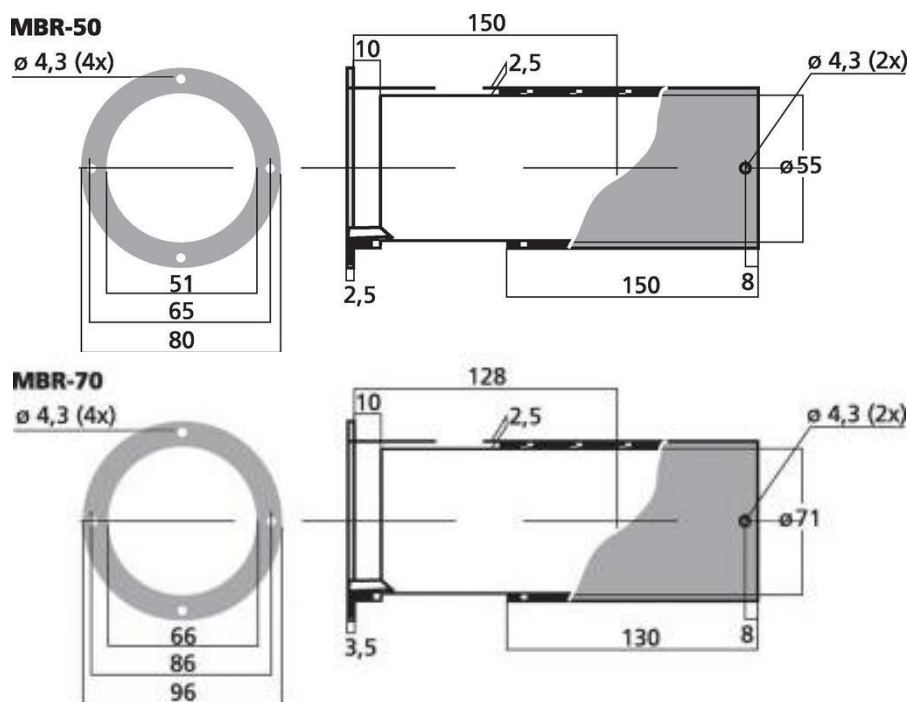
Tento reproduktor byl vybrán na základě požadovaných parametrů a zároveň na výsledcích základních simulací v programu LspCAD. Jeho rozměry jsou na obrázku (Obr 23.).



Obr 23. Rozměry reproduktoru SPH-210 (převzato z [14])

Dalším krokem je výběr vhodných bassreflexových nátrubků. Z důvodu zvolení nižšího Q_{ts} bude zapotřebí co nejdelšího zadního nátrubku u ozvučnice typu pásmová propust pro získání malého zvlnění kmitočtové charakteristiky. Délka by se dala zkrátit zvolením užšího bassreflexového nátrubku. To by ale způsobovalo zrychlení proudění vzduchu bassreflexovým nátrubkem a to by sebou neslo nechtěné komplikace, jak již bylo popsáno v kapitole 2.2.

Jako zadní bassreflexový nátrubek je nakonec vybrán bassreflexový nátrubek Monacor MBR-50. Jako přední je vybrán Monacor MBR-70. Rozměry těchto nátrubků jsou na obrázku (Obr 24.).



Obr 24. Rozměry bassreflexových nátrubků (převzato z [15], [16])

Po zakoupení vybraných reproduktorů je potřeba změřit jejich reálné parametry. Toto měření bylo provedeno pomocí elektroakustického analyzátoru s generátorem NTi Audio RT-2B při vstupním napětí 6 V. Pomocí tohoto analyzátoru byla změřena impedanční charakteristika jednotlivých reproduktorů a následně vypočteny parametry Q_{ms} , Q_{ts} , Q_{es} a určeno f_r a R_e . Souhrn naměřených parametrů v porovnání s parametry uváděnými výrobcem je v následující tabulce (Tab. 4.)

Tab. 4. Porovnání reálných parametrů reproduktorů s parametry uváděnými výrobcem

Reproduktor č.	1	2	3	Udávané parametry
R_e [Ω]	6,46	6,43	6,46	6,5
f_r [Hz]	30	31	32	28
Q_{ms}	2,48	2,53	2,53	2,14
Q_{es}	0,34	0,33	0,33	0,27
Q_{ts}	0,3	0,29	0,3	0,24

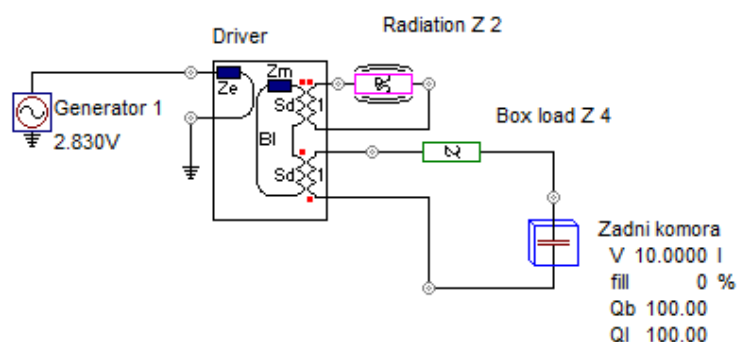
Z tabulky lze vyčíst, že parametry jsou cca o 25 % jiné, než uvádí výrobce.

7.3. Postup návrhu v LspCAD

Pro návrh jsou již zadány požadavky na ozvučnici a parametry jednotlivých prvků, které budou v této ozvučnici použity. Dalším krokem je návrh v některém ze simulačních programů. Z popisovaných simulačních programů v kapitole 6 je použit program LspCAD 6.41. Tento program je zvolen pro možnost simulace jakéhokoli schématu, možnost simulace ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu – sériové zapojení a dále proto, že v tomto programu je využíván při laboratorních úlohách. Možnosti programu jsou popsány v kapitole 6 a tak zde bude popsán stručný postup návrhu.

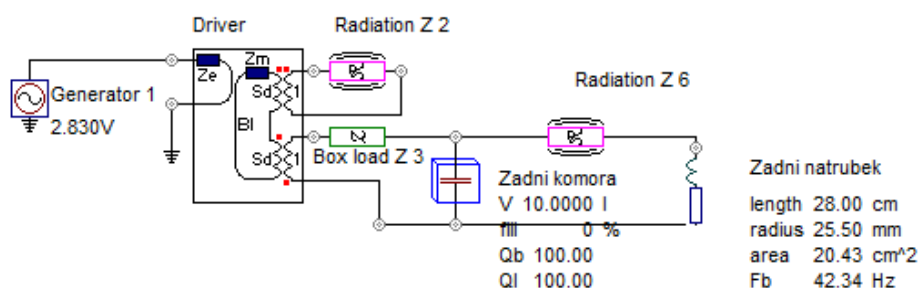
7.3.1. Tvorba schémat

Při otevření programu LspCAD je nejdříve potřeba vytvořit schéma zapojení. To je možné použít z karty templates z rolovacího lišty hlavního okna programu, nebo ho lze poskládat z jednotlivých komponent. Při kreslení schématu v editačním módu po jednotlivých komponentách se nejdříve vybere komponenta Loudspeaker unit z karty Box/kabinet. Tato komponenta představuje reproduktor, kterému se následně v simulačním módu přiřadí parametry daného reproduktoru. U této komponenty se k jejímu hornímu levému pinu připojí komponenta Signal source z karty Passive a k dolnímu levému pinu komponenta GND. Právě horní dva piny komponenty Loudspeaker unit pak představují prostor, do kterého vyzařuje přední plocha membrány reproduktoru a dolní dva piny pak prostor kam vyzařuje zadní plocha membrány. Při tvorbě schématu uzavřené ozvučnice se k horním pinům připojí komponenta Radiation z karty Box/kabinet, která představuje volný prostor, do kterého reproduktor vyzařuje. K dolním pinům pak komponenty Box load, která slouží k přenesení parametrů reproduktoru pro komponentu Box, a komponentu Box, která představuje objem komory. Schéma zapojení je vidět na obrázku (Obr 25.).



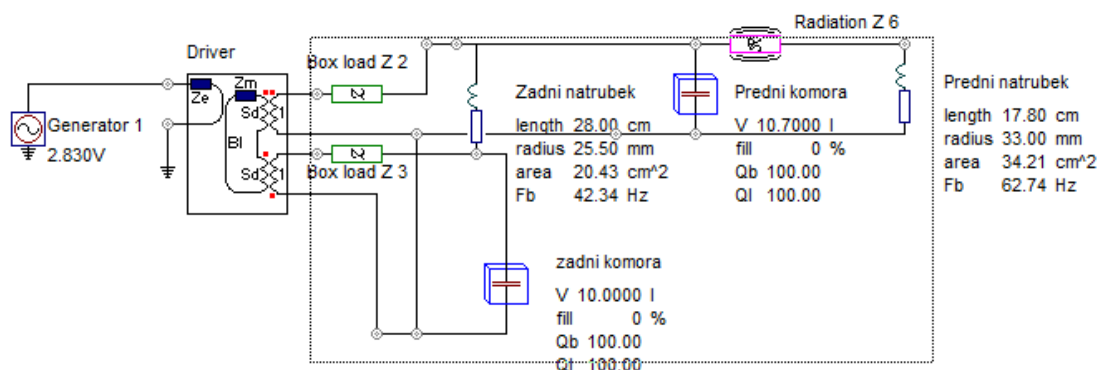
Obr 25. Zapojení schématu pro uzavřenou ozvučnici v programu LspCAD

Další typ ozvučnice, který bude simulován, je ozvučnice typu Bassreflex. Pokud se vyjde ze schématu pro uzavřenou ozvučnici, pak ho je potřeba rozšířit o bassreflexový nátrubek a volný prostor, do kterého vyzařuje. K tomu zde slouží prvek Port v kartě Box/kabinet a již zmíněná komponenta Radiation, která v tuto chvíli představuje prostor, do kterého vyzařuje bassreflexový nátrubek. Schéma zapojení je pro simulaci ozvučnice typu Bassreflex je vidět na obrázku (Obr 26.).



Obr 26. Zapojení schématu pro ozvučnici typu Bassreflex v programu LspCAD

Poslední simulovanou ozvučnicí je ozvučnice typu pásmová propust šestého řádu – sériové zapojení. Toto zapojení je již složitější, ale využívá stejné prvky. Zapojení je na následujícím obrátku (Obr 27.).



Obr 27. Zapojení schématu pro ozvučnici typu pásmová propust v programu LspCAD

Po dokončení zapojování schématu tu je možnost vytvořit skupinu ze všech komponent pro lepší přehlednost při zadávání parametrů v simulačním módu. Skupinu komponent lze udělat označením skupiny, stisknutím pravého tlačítka myši a zvolením funkce Group.

7.3.2. Simulace a zadávání parametrů

Po vytvoření schématu je potřeba přepnout z editačního módu do módu simulačního. Zde se pak po kliknutí na komponentu Loudspeaker unit objeví okno, kde je potřeba zadat TS parametry reproduktoru, který má být použit v navrhované ozvučnici. Dále pak kliknutím na komponentu Signal source lze měnit amplitudu napětí. Při kliknutí na jednotlivé komponenty, nebo na vytvořenou skupinu lze pak měnit parametry jako objem, délka nátrubku, či jeho průměr.

Dalším krokem, který se musí udělat, je nastavení referencí jednotlivých komponentů. Při pohledu na uzavřenou ozvučnici zde jsou komponenty Radiation, kde se po rozkliknutí objeví okno kde u položky Ref to... je potřeba vybrat komponentu Loudspeaker unit. To proto, že do volného prostoru před přední membránou reproduktoru vyzařuje právě samotný reproduktor. Další komponentou je Box load, na kterou je vázaná komponenta Box. U komponenty Box load je potřeba nastavit Ref to... také na Loudspeaker unit. To proto, že zadní plocha membrány vyzařuje do objemu ozvučnice.

Po nastavení referencí a zadání základních parametrů součástí jako TS parametry a průměru zvoleného nátrubku se může přestoupit k upravování objemu komory a délky nátrubku tak, aby se dosáhlo co nejideálnější kmitočtové charakteristiky navrhované ozvučnice.

7.3.3. Návrh přípravků podle zadání

Návrh jednotlivých typů ozvučnic, kterými bude navrhovaný přípravek disponovat je proveden zvlášť, ale zároveň se dbá na to, aby všechny parametry byli stejné u těch komponent, které nebude možno přestavbou měnit.

Při ohledu na zadání je po provedení několika desítek simulací určen základní objem zadní komory obou přípravků jako 10 l. S tímto objemem je pak začnuto návrh od ozvučnice typu pásmová propust s isobarickým zapojením reproduktorů. Pro zadávání TS parametrů je

využito principu popsaného v kapitole 3.6. Schéma s nastavenými parametry a kmitočtová charakteristika je v příloze A1. Simulací bylo určeno, že zadní nátrubek bude mít maximální délku, která činí 280 mm. Dále pak objem přední komory 10,7 l a délka předního nátrubku 178 mm. Při simulaci ozvučnice typu Bassreflex s isobarickým zapojením reproduktorů bylo zjištěno, že při použití stejně dlouhého nátrubku, jako u ozvučnice typu pásmová propust lze získat dobrou kmitočtovou charakteristiku. Schéma s nastavenými parametry a kmitočtová charakteristika je v příloze A2. Tento fakt dále usnadní návrh, kdy v zadní komoře bude pouze jeden bassreflexový nátrubek pro ozvučnice typu pásmová propust a Bassreflex. Poslední ozvučnicí, která je simulována s isobarickým zapojením reproduktorů, je uzavřená ozvučnice. Zde již je pevně zadán objem, ke kterému je zapotřebí pro simulaci připočítat objem bassreflexového nátrubku, který bude uzavřen. Schéma s nastavenými parametry a kmitočtová charakteristika je v příloze A3.

Druhý navrhovaný přípravek bude využívat jednoho reproduktoru. Nejprve se začne opět u ozvučnice typu pásmová propust. Bylo rozhodnuto, že pro dobré porovnání výhod a nevýhod isobarického zapojení reproduktorů, bude mít zadní komora stejný objem jako zadní komora u návrhu ozvučnice typu pásmová propust s isobarickým zapojením reproduktorů. Zadní objem je tedy 10 l. Pro co nejmenší zvlnění byla délka zadního nátrubku určena 280 mm. Simulací pak byl určen objem přední komory na 7,2 l a délka předního nátrubku na 155 mm. Schéma s nastavenými parametry a kmitočtová charakteristika je v příloze A5. U simulace ozvučnice typu Bassreflex s jedním reproduktorem nastával ale problém. Tato ozvučnice vyžadovala větší objem. Při změně objemu zadní komory by však došlo u ozvučnice typu pásmová propust k přeladění dolního mezního kmitočtu níže a to je nežádoucí. Rozhodlo se tedy, že se objem zadní komory bude přidávat pomocí další části přípravku o potřebném objemu. Ze simulace pak vyšlo, že objem zadní komory bude 10 + 4,6 l a délka nátrubku 280 mm. Opět délka zadního nátrubku navrhovaného přípravku byla navržena stejně a tak se ulehčí jak návrh mechanického uspořádání ozvučnice, tak samotná konstrukce. Schéma s nastavenými parametry a kmitočtová charakteristika je v příloze A6. Návrh uzavřené ozvučnice s jedním reproduktorem pak opět vycházel z určeného objemu zadní komory v součtu s objemem uzavřeného bassreflexového nátrubku. Schéma s nastavenými parametry a kmitočtová charakteristika je v příloze A7.

Díky tomu, že bude vyrobena část ozvučnice, která bude přidávat k zadní komoře objem, vyplynula možnost zvětšování objemu uzavřených ozvučnic a sledovat tak vliv změny objemu zadní komory na kmitočtovou charakteristiku. Simulace s tímto objemem pro uzavřené ozvučnice jsou v přílohách A4 a A8.

Souhrn všech parametrů navržených ozvučnic jsou v tabulce (Tab. 5.).

Tab. 5. Souhrn parametrů navržených ozvučnic

Ozvučnice	Uspořádání reproduktorů	Základní objem zadní komory [l]	Připočítaný objem (nátrubek + přídavná komora) [l]	Zadní komora				
				Objem LspCAD [l]	Vnitřní průměr nátrubku [mm]	Vnější průměr nátrubku [mm]	Délka nátrubku [mm]	Objem nátrubku [l]
Uzavřená	jednoduché	10	0,792 + 0	10,792	-	-	-	-
Uzavřená	jednoduché	10	0,792 + 4,6	15,392	-	-	-	-
Bassreflex	jednoduché	10	0 + 4,6	14,6	51	60	280	0,792
Bandpass	jednoduché	10	0 + 0	10	51	60	280	0,792
Uzavřená	isobaric	10	0,792 + 0	10,792	-	-	-	-
Uzavřená	isobaric	10	0,792 + 4,6	15,392	-	-	-	-
Bassreflex	isobaric	10	0 + 0	10	51	60	280	0,792
Bandpass	isobaric	10	0 + 0	10	51	60	280	0,792

Ozvučnice	Přední komora					Objem reproduktoru [l]	Reálné objemy		
	Objem LspCAD [l]	Vnitřní průměr nátrubku [mm]	Vnější průměr nátrubku [mm]	Délka nátrubku [mm]	Objem nátrubku [l]		Zadní komora [l]	Přídavná komora [l]	Přední komora [l]
Uzavřená	-	-	-	-	-	1,068	11,860	-	-
Uzavřená	-	-	-	-	-	1,068	11,860	4,600	-
Bassreflex	-	-	-	-	-	1,068	11,860	4,600	-
Bandpass	7,2	66	76	155	0,703	1,068	11,860	-	7,903
Uzavřená	-	-	-	-	-	1,068	11,860	-	-
Uzavřená	-	-	-	-	-	1,068	11,860	4,600	-
Bassreflex	-	-	-	-	-	1,068	11,860	-	-
Bandpass	10,7	66	76	178	0,807	1,068	11,860	-	12,576

Ozvučnice	Reálné objemy			Rezerva [%]	Objemy komor s rezervou		
	Zadní komora [l]	Přídavná komora [l]	Přední komora [l]		Zadní komora [l]	Přídavná komora [l]	Přední komora [l]
Uzavřená	11,860	-	-	20	14,232	-	-
Uzavřená	11,860	4,600	-	20	14,232	5,520	-
Bassreflex	11,860	4,600	-	20	14,232	5,520	-
Bandpass	11,860	-	7,903	20	14,232	-	9,484
Uzavřená	11,860	-	-	20	14,232	-	-
Uzavřená	11,860	4,600	-	20	14,232	5,520	-
Bassreflex	11,860	-	-	20	14,232	-	-
Bandpass	11,860	-	12,576	20	14,232	-	15,091

V tabulce (Tab. 5.) jsou vidět parametry prvků ozvučnic, které byly zadány do programu LspCAD. Také je zde vidět jak se došlo k jednotlivým objemům. Dále pak přepoččet na reálný objem všech komor a připočítání rezervy pro tlumící materiál.

Objemy nátrubků byly určeny výpočtem jako

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad [l] \quad (7.1)$$

kde za r se dosadí vnější poloměr nátrubku a za h délka nátrubku. Objem reproduktoru byl pak určen jako

$$V = \pi \times r_m^2 \times h + \frac{\pi \times v}{3} \times 1(r_1^2 + r_1 \times r_2 + r_{m2}^2) \quad [l] \quad (7.2)$$

kde r_m je poloměr magnetu reproduktoru, h výška reproduktoru, v výška membrány a r_1 , r_2 poloměry reproduktoru a úchyty membrány.

Po změření reálných parametrů a provedení simulace bylo zjištěno, že navržené velikosti komor nebudou vyhovovat a to ani při odebrání části tlumícího materiálu. Porovnání objemů návrhů jednotlivých komor s uváděnými parametry a s reálnými parametry je v následující tabulce (Tab. 6.).

Tab. 6. Úprava objemů pro reálné parametry

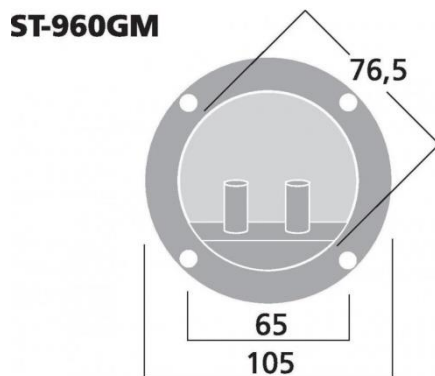
Komora – uspořádání	Původní objem [l]	Upravený objem [l]
Zadní – isobaric i jednoduché	14,232	14,232
Přídavná – isobaric	0	2,16
Přídavná – jednoduché	5,52	11,040
Přední – isobaric	15,091	16,188
Přední – jednoduché	9,484	11,061

Z této tabulky je vidět, že objem původní zadní komory je zanechán. Velikost stěn všech ostatních komor budou muset být přepočítány a předělány. Více o mechanickém uspořádání je popsáno v kapitole 7.4.

7.4. Návrh mechanického uspořádání ozvučnice

Ze získaných parametrů simulací je zapotřebí vypočítat rozměry ozvučnice a také určit rozložení jednotlivých komponentů jako jsou reproduktory, nátrubky, připojovací misky, úchyty, bednové uzávěry a další. Jako materiál stěn bude použito MDF a 18 mm tloušťky.

Nejprve je potřeba určit rozložení na desce, která ponese reproduktor a zadní bassreflexový nátrubek. Pro požadovaný malý objem celého přípravku je šířka desky určena jako 266 mm, kde z každé strany bude zapírat 18 mm deska, která se bude připojovat na tupo. Popis možných spojů stěn ozvučnice je popsán v kapitole 5.2. Vnitřní šířka ozvučnice je tedy 230 mm kde reproduktor bude mít na každou stranu 1 cm místo. Vnitřní výška ozvučnice je pak určena na 334 mm, kdy vnější rozměr je 370 mm. Tento rozměr je určen proto, že bassreflexový nátrubek nemůže být příliš blízko stěn a ani reproduktoru. Z takto určených základních rozměrů lze pak jednoduše vypočítat hloubku komory. Hloubka komory vychází na 185 mm. Do jedné z bočních stěn musí být zabudována připojovací miska. Její rozměry jsou na obrázku (Obr 28.).



Obr 28. Rozměry připojovací misky ST-960GM (převzato z [17])

Pro přední komoru již jsou zadány rozměry šířky a výšky. Dopočítaná hloubka komory je pro přípravek s jedním reproduktorem 72 mm a pro přípravek se dvěma reproduktory 197 mm. Při volbě umístění předního nátrubku je zvoleno umístění shora ozvučnice směrem dolů.

Dalším a podstatným krokem v návrhu je rozmístění spojovacích kolíků. Šířka spojovacích kolíků byla určena na 8 mm. Vzdálenost mezi nimi pak maximálně 90 mm. Rozměry všech desek i s otvory pro reproduktory, nátrubky a připojovací misku jsou v přílohách B1 – B15.

Z důvodů velké rozdílnosti reálných a udávaných parametrů musí být návrh rozměrů stěn ozvučnic pozměněn. Tyto změny plynou z porovnání objemů simulací s udávanými TS parametry a měřeními TS parametry (Tab. 4. A 6.). Změny jednotlivých stěn jsou v přílohách B1-17 s označením nové.

8. Realizace a optimalizace

V této kapitole je rozebrán postup při konstrukci navržených přípravků. Jelikož jsou přípravky variabilní a budou se dát přestavovat na různé typy ozvučnic, tak je zapotřebí zajistit těsnící spojení všech komor.

Spojování jednotlivých částí ozvučnice bylo řešeno pomocí bednových uzávěrů a těsnění. Jako úchyty byly pro malou velikost přípravků vybrány pásková ucha MZF-8302, které nezasahují do objemu ozvučnice. Jejich rozměry jsou 25x240x4 mm. Dále byly pro ochranu přípravku použity ochranné rohy, lišty a přípravky byly potaženy potahovou tkaninou. Jako tlumící materiál byl vybrán materiál MDM-2/SW. Soupis množství veškerého potřebného materiálu krom desek MDF použitých na výřezy je v následující tabulce (Tab. 7.).

Tab. 7. Soupis materiálu

Materiál	Vybráno	Množství [ks]	Cena za kus [kč]
Reproduktory	Monacor SPH-210	3	1241
Přední bassreflexový nátrubek	Monacor MBR-70	2	79
Zadní bassreflexový nátrubek	Monacor MBR-50	3	101
Miska	Monacor ST-960GM	2	118
Ucha	MZF-8302	12	59
Rohy	MZF-8512	58	17
Potahová látka	Mecatron 374051	3	309
Tlumící materiál	MDM-2/SW	3	128
Bednový uzávěr	Bednový uzávěr 60x16	40	9

Jednotlivé komponenty jsou uvedeny v přílohách C1 – C8. Dále byly zapotřebí šrouby a vruty na přidělení jednotlivých komponent jako jsou reproduktory, bassreflexové nátrubky, misky, ucha a rohy.

8.1. Konstrukce

Stěny byly nechány vyřezat podle výkresů uvedených v příloze. Tyto desky byly zabroušeny a slepeny epoxidovým lepidlem. Dále byl proveden zábrus stran, které budou spojovány přes těsnění, a následně i zaoblení hran ozvučnic. Jednotlivé komory ozvučnic v této fázi výroby jsou vidět v přílohách D1 - D6.

Po dokončení zábrusu všech potřebných ploch byly vnitřní strany ozvučnic vystříkány černou barvou. Dále byly navrtány díry pro šrouby a vruty pro misky, bassreflexové nátrubky, reproduktory a bednové uzávěry. Tyto komponenty byly následně přišroubovány na své místo. Ochranné rohy byly ještě před použitím upraveny tak, že je zaoblená část, která přiléhá k rohu, odříznuta. Dalším krokem je přilepení těsnění na plochy, kde se budou spojit jednotlivé části ozvučnice. To však v rámci bakalářské práce nebylo provedeno.

Po mechanickém upevnění všech komponent byly připájeny kontakty mezi reproduktory a miskou.

8.2. Měření

V tomto kroku konstrukce je čas na měření zhotoveného přípravku. Hlavní charakteristiky, které byly měřeny, byly impedanční a kmitočtová charakteristika. Měření bylo provedeno na zhotoveném přípravku. Byly měřeny charakteristiky uzavřené ozvučnice a ozvučnice typu Bassreflex.

8.2.1. Impedanční charakteristika

Impedanční charakteristika byla měřena pomocí elektroakustického analyzátoru s generátorem NTi Audio RT-2B. Nejdříve byla změřena impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice. Závislost impedance na frekvenci je uvedena v příloze E1. Měření bylo provedeno při vstupním napětí 6 V.

Ze změřené impedanční charakteristiky byl odečten rezonanční kmitočet 56 Hz. Tento kmitočet se liší od návrhu, kdy při návrhu byl rezonanční kmitočet 67,76 Hz. Proto byl proveden výpočet na určení ekvivalentního objemu pomocí vztahu

$$f_c = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \times f_r \quad [\text{Hz}] \quad (8.1)$$

kde V_{as} je ekvivalentní objem vzduchu, V_b objem ozvučnice a f_r rezonanční kmitočet reproduktoru. Tento vztah byl upraven do podoby

$$V_{as} = \left(\left(\frac{f_c}{f_r} \right)^2 - 1 \right) \times V_b \quad [\text{Hz}] \quad (8.2)$$

Za f_r byl dosazen změřený rezonanční kmitočet reproduktoru č. 1 a to 30 Hz a za V_b objem navržené ozvučnice i s počítanou rezervou na tlumení, protože tlumení při tomto měření ještě nebylo přiděleno. Za V_b byl tedy dosazený objem 24,204 l. Za f_c byl dosazen odečtený rezonanční kmitočet uzavřené ozvučnice 56 Hz. Z tohoto vztahu vyšel ekvivalentní objem 60,13 l, který se velmi liší od údaje uvedeného výrobcem.

Po změření impedanční charakteristiky uzavřené ozvučnice byla zátka z bassreflexového nátrubku odstraněna a změřena impedanční charakteristika ozvučnice typu Bassreflex. Změřená impedanční charakteristika je uvedena v Příloze E2. Z této charakteristiky je vidět, že naladěný rezonanční kmitočet je příliš nízký a to až pod 20 Hz. Výpočtem pomocí vztahu uvedeného v kapitole 2.2 byl vypočten tento kmitočet jako 15,01 Hz. Bylo zjištěno, že ekvivalentní objem se liší od objemu udávaného výrobcem. Proto bude muset v následné práci být předělán celý návrh.

Zapojení pracoviště při měření impedanční charakteristiky je v příloze F1.

8.2.2. Kmitočtová charakteristika

Měření by bylo provedeno pomocí měřicího systému Pulse, který se skládá z hardware LAN-XI obsahujícího mikrofonní vstupy a výstupy generátoru, který se pomocí intranetu propojí s počítačem s ovládacím software LabShop.

Nejdříve byla změřena kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice. Změřená charakteristika je uvedena v příloze E3. Měření bylo provedeno v bezodrazové komoře, která bohužel není uzpůsobená k měření tak nízkých kmitočtů. Měřící mikrofón tedy nebyl umístěn 1 m od reproduktoru, ale pouze 25 cm od membrány.

Dále byla změřena kmitočtová charakteristika ozvučnice typu Bassreflex s jedním reproduktorem. Měření bylo provedeno ve třech místech a to ve vyzařovací ose reproduktoru, vyzařovací ose bassreflexového nátrubku a v ose soustavy. Naměřená kmitočtová charakteristika je v příloze E4. Ze získané charakteristiky je vidět již zmiňovaný nízký rezonanční kmitočet má velký vliv na charakteristiku v oblasti 40 – 100 Hz. Kde je charakteristika o 5 dB nižší.

Toto měření bude provedeno znovu po provedení optimalizace. Pokud by bylo zjištěno, že optimalizované řešení stále neodpovídá požadavkům, mohla by se provést znovu, pokud by to přípravek stále umožňoval.

Zapojení pracoviště při měření kmitočtové charakteristiky je v příloze F2.

8.3. Optimalizace

Optimalizace je jeden ze závěrečných a hlavních kroků konstrukce ozvučnice. Málo kdy se podaří postavit ozvučnici, která by splňovala zadané parametry.

Optimalizaci lze provést změnou délky bassreflexového nátrubku – změna rezonančního kmitočtu bassreflexového nátrubku, či odebráním nebo přidáním tlumícího materiálu – změnou objemu komory ozvučnice. Změnou těchto parametrů dojde ke změně v kmitočtové charakteristice ozvučnice. Správnou úpravou lze docílit optimální kmitočtové charakteristiky dané ozvučnice.

V případě ozvučnice typu Bassreflex je provedena optimalizace zkrácením bassreflexového nátrubku v místě ohybu na délku 124 mm. Měření kmitočtové charakteristiky při této délce nátrubku je uvedena v příloze G1

Dále byla provedena simulace s vypočítaným ekvivalentním objemem. Simulace je uvedena v příloze G2. V této simulaci byla délka bassreflexového nátrubku učena jako 164 mm. Simulace s délkou nátrubku získanou v předchozí simulaci při návrhu je v příloze G3. Optimalizací bylo docíleno lepší kmitočtové charakteristiky než při neoptimalizovaném řešení. Po provedení další optimalizace a přidání tlumení by mohlo být docíleno ještě lepších výsledků.

9. Tvorba laboratorních úloh

V zadání této práce je vytvoření dvou laboratorních úloh na zadané téma. Bude se jednat o laboratorní úlohy využívajících navržených přípravků v této práci. Studenti by po absolvování těchto úloh měli být schopni říct výhody a nevýhody jednotlivých uspořádání, které budou jak navrhovat, tak měřit jejich charakteristiky. Měli by být schopni definovat vliv jednotlivých typů ozvučnic na kmitočtovou či impedanční charakteristiku.

9.1. Požadavky na laboratorní úlohy

První laboratorní úloha se bude zabývat návrhem reproduktorových skříní pro subwoofer. Návrh by měl být realizován pomocí programu LspCAD a využívat jeho možnosti pro návrh. V úloze bude za úkol navrhnout ozvučnice:

- Uzavřená ozvučnice
- Ozvučnice typu Bassreflex
- Ozvučnice typu pásmová propust 6. řádu se sériově laděnými nátrubky

Tyto ozvučnice budou navrženy jak s jedním reproduktorem, tak s isobarickým zapojením reproduktorů. Studenti budou mít k dispozici tabulku (Tab. 8.) z které si budou vybírat jednotlivé moduly pro návrh a zadávat jejich parametry do simulačního programu. Zvedené objemy jsou již reálné objemy ozvučnice i s počítanou rezervou na tlumení. Studenti budou mít za úkol od těchto objemů odečíst jednotlivé objemy reproduktoru či nátrubků. Nejdříve však odečíst počítanou rezervu na tlumení.

Tab. 8. Soupis modulů pro simulaci v LspCAD

Modul č.	Objem [l]	Vnitřní průměr nátrubku [mm]	Vnější průměr nátrubku [mm]	Délka nátrubku [mm]	Uspořádání reproduktorů
1	14,232	51	60	280	jednoduché
2	14,232	51	60	280	isobaric
3	11,061	66	76	114	bez reproduktoru
4	19,188	66	76	159	bez reproduktoru
5	11,040	-	-	-	bez reproduktoru
6	2,160	-	-	-	bez reproduktoru

Druhá úloha se bude zabývat měřením reproduktorových skříní pro subwoofer. Tato úloha bude využívat navržené přípravky. V úloze se tedy budou měřit kmitočtové a impedanční charakteristiky ozvučnic:

- Uzavřená ozvučnice s jedním i dvěma reproduktory
- Ozvučnice typu Bassreflex s jedním i dvěma reproduktory
- Ozvučnice typu pásmová propust 6. řádu se sériově laděnými nátrubky s jedním i dvěma reproduktory

Měření bude uskutečněno pomocí Pulse a NTI. V závěru úlohy budou studenti schopni říct výhody a nevýhody jednotlivých uspořádání.

Studenti si z těchto možných uspořádání vyberou dvě, které proměří a následně vyhodnotí. Pokud budou mít úlohu rychle změřenou, budou moci změřit i další z typů uspořádání, které jim předložené přípravky umožňují.

9.2. Sepsání laboratorních úloh

Tyto laboratorní úlohy byly sepsány dle výše uvedených požadavků. Znění těchto úloh je přiloženo v elektronické podobě k této práci.

10. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nastudovat problematiku hlubokotónových ozvučovacích jednotek – subwooferů. Pro přiblížení tématu byly zpracovány kapitoly, které rozebírají jak typy ozvučnic a možnosti zapojení reproduktorů, tak i konstrukční řešení ozvučnic. Kromě nastudování typů ozvučnic a isobarických uspořádání reproduktorů, bylo nastudováno hybridní řešení subwooferu od firmy Audiotechnik. Z dostupných materiálů bylo zjištěno, že hybridním řešením, které tato firma poskytuje, se dá docílit snížení dolního mezního kmitočtu reprodukovatelného kmitočtového pásma reproduktorové soustavy až o 10 Hz.

V této práci jsou navrženy dva přípravky s hlubokotónovým reproduktorem, na kterých bude možné v rámci laboratorních cvičení měřit kmitočtové a impedanční charakteristiky. Oba přípravky bude možno přestavět z ozvučnice uzavřené na ozvučnici typu Bassreflex a ozvučnici typu pásmová propust šestého řádu se sériově laděnými bassreflexovými nátrubky. Přípravky se budou lišit uspořádáním reproduktorů a to že jeden bude obsahovat isobarické uspořádání reproduktorů a druhý přípravek bude obsahovat pouze jeden reproduktor.

Výběr vhodného reproduktoru byl složitější, ale po provedení několika simulací byl vybrán reproduktor SPH-210 od firmy Monacor. Návrh všech typů ozvučnic byl proveden v programu LspCAD. Pro získání lepších kmitočtových charakteristik bylo rozhodnuto použít přidavné komory, která bude zvětšovat objem zadní komory. To je nutné zejména u ozvučnice typu Bassreflex kdy objem zadní komory je u isobarického uspořádání zvětšován o 2,16 l a u jednoduchého uspořádání o 11,04 l. Dalším problémem, který se bral v potaz, bylo nastavení dolního mezního kmitočtu u ozvučnice typu pásmová propust. V bezodrazové komoře, v které bude probíhat měření, nelze měřit nízké kmitočty a tak se dolní mezní kmitočet v návrhu zvyšoval.

Po provedení návrhu byly napočítány objemy komor a následně určeno rozložení jednotlivých prvků v ozvučnici. Rozměry všech desek použitých při konstrukci přípravků jsou uvedeny v přílohách.

Při změření reálných TS parametrů reproduktorů bylo zjištěno, že tyto parametry se od parametrů udávaných výrobcem liší až o 25 %. Například Q_{ts} bylo uváděno výrobcem 0,24. Z měření byla zjištěna hodnota Q_{ts} u dvou reproduktorů 0,3 a u třetího 0,29. Resonanční kmitočet byl uváděn 28 Hz a naměřeno bylo 30, 31 a 32 Hz. Celý návrh byl tedy proveden znovu.

Byl zkonstruován přípravek s jedním reproduktorem. Proběhlo měření kmitočtové a impedanční charakteristiky uzavřené ozvučnice a ozvučnice typu Bassreflex. Z měření bylo zjištěno, že ekvivalentní objem 81 l, který udává výrobce, není zcela přesný. Z měření uzavřené ozvučnice byla hodnota ekvivalentního objemu vypočítána na 60,13 l. Při měření kmitočtové charakteristiky ozvučnice typu Bassreflex bylo zjištěno, že frekvence, na kterou je bassreflexový nátrubek naladěn je příliš nízká. Byla tedy provedena optimalizace délky nátrubku a znovu změřena kmitočtová charakteristika. Touto optimalizací bylo získáno zvýšení kmitočtové charakteristiky na nízkých kmitočtech až o 4 dB.

Do formy laboratorních úloh byl zpracován návrh pomocí programu LspCAD, kdy studenti budou pracovat s moduly, které byly v této práci navrženy a následně s nimi budou v druhé úloze pracovat. V této úloze si vyzkouší práci s návrhovým programem a také by měli být schopni definovat, jak se typy ozvučnic liší a jaký mají vliv na kmitočtovou charakteristiku reproduktoru. V druhé úloze si následně vyberou, které uspořádání budou chtít měřit a zhodnotí dosažené výsledky měření. Laboratorní úlohy jsou k práci přidány pouze v elektronické podobě.

Jelikož bylo zjištěno, že parametry udávané výrobcem nesedí s reálnými parametry reproduktorů, tak nebyly přípravky zcela zkonstruovány. V práci by se tedy mělo pokračovat od nového návrhu se získanými parametry. Po dokončení návrhu bude zapotřebí více či méně přepracovat vyrobené komory. Pokud bude ověřeno, že návrh se získanými novými parametry je správný, tak budou vytvořeny oba přípravky, proměřeny jejich charakteristiky, provedena optimalizace a následně změřeno optimalizované řešení navrhovaných přípravků.

Literatura

- [1] TOMAN, Kamil. Reproduktory a reprosoustavy 1. díl [Česko: s.n.], 2001. ISBN 859-14-592-8080-5.
- [2] SVOBODA, Ladislav a Miloslav ŠTEFAN. Reproduktory a reproduktorové soustavy. 2. vyd. Praha: SNTL, 1976.
- [3] SCHIMMEL, Jiří. Elektroakustika. Brno, 2016. VUT.
- [4] BAILER, A. The Transmission-line Loudspeaker Enclosure. Wireless World. 1972
- [5] KING, Martin. A Method for Designing a Compact Back Loaded Horn Loudspeaker System [online]. 2012 [cit. 2017-10-26].
Dostupné z: http://www.quarter-wave.com/Horns/BLH_Design_Article.pdf
- [6] Typy ozvučnic. ReproMania.net [online]. 2005 [cit. 2017-11-03].
Dostupné z: <http://www.repromania.net/teorie/rozdeleni-ozvucnic.php>
- [7] 4th order bandpass calculator – With box design example. Audiojudgement [online]. 2016 [cit. 2017-11-11].
Dostupné z: <http://audiojudgement.com/4th-order-bandpass-design>
- [8] 6th Order Bandpass Systems. The Subwoofer DIY Page [online]. 2011 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <http://www.diysubwoofers.org/bnd/6thorder.htm>
- [9] 6th Order Bandpass Systems. The Subwoofer DIY Page Systems [online]. 2010 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://www.diysubwoofers.org/bnd/6thord4.htm>
- [10] Isobaric subwoofer box design – Advantages and disadvantages. Audiojudgement [online]. 2017 [cit. 2017-11-25].
Dostupné z: <http://audiojudgement.com/isobaric-subwoofer-box-design/>
- [11] Active Compliance Management (ACM). VUEaudiotechnik [online]. 2012 [cit. 2017-11-22].
Dostupné z: <http://www.vueaudio.com/active-compliance-management-acm>
- [12] WF223BD01/02. Wavecor specifications [online]. 2015 [cit. 2017-12-05].
Dostupné z: https://www.lautsprecher-shop.de/pdf/wavecor/WF223BD01_02_specifications.pdf
- [13] IJData [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.ijdata.com/>
- [14] SPH-210. Monacor [online]. [cit. 2018-05-20].
Dostupné z: <https://www.monacor.com/products/components/speaker-technology/hi-fi-speakers/sph-210/>
- [15] MBR-50. Monacor [online]. [cit. 2018-05-20].
Dostupné z: <https://www.monacor.com/products/components/speaker-technology/diy/mbr-50/>
- [16] MBR-70. Monacor [online]. [cit. 2018-05-20].
Dostupné z: <https://www.monacor.com/products/components/speaker-technology/diy/mbr-70/>
- [17] st-960gm. Monacor [online]. [cit. 2018-05-20].
Dostupné z: <https://www.monacor.com/products/components/speaker-technology/diy/st-960gm/>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

THD	Total harmonic distortion, Celkové harmonické zkreslení
EBP	Efficiency Bandwidth Product, Efektivní šířka pásma produktu
f_c	Rezonanční kmitočet uzavřené ozvučnice
V_{as}	Ekvivalentní objem vzduchu
V_b	Objem ozvučnice
f_r	Rezonanční kmitočet reproduktoru
Q_{es}	Elektrický činitel jakosti reproduktoru
S	Průřez bassreflexového nátrubku
l	Délka bassreflexového nátrubku
f_b	Rezonanční kmitočet bassreflexové ozvučnice
λ	Vlnová délka
c_0	Rychlost zvuku
f_m	Dolní mezní kmitočet
V_f	Objem přední komory reproduktoru
s	Konstanta udávající zvlnění
Q_{ts}	činitel jakosti reproduktoru
V_r	Objem zadní komory reproduktoru
R	Poloměr bassreflexového nátrubku
Q_{bp}	Jakost uzavřené zadní komory reproduktoru
N_p	Počet bassreflexových nátrubků
K	Korekce
R_L	Impedance reproduktoru
PA	Public Address, adresováno veřejnosti
DSP	Digital Signal Processor, digitální signálový procesor
MDF	Medium density fibre board - středně zhuštěná dřevovláknitá deska

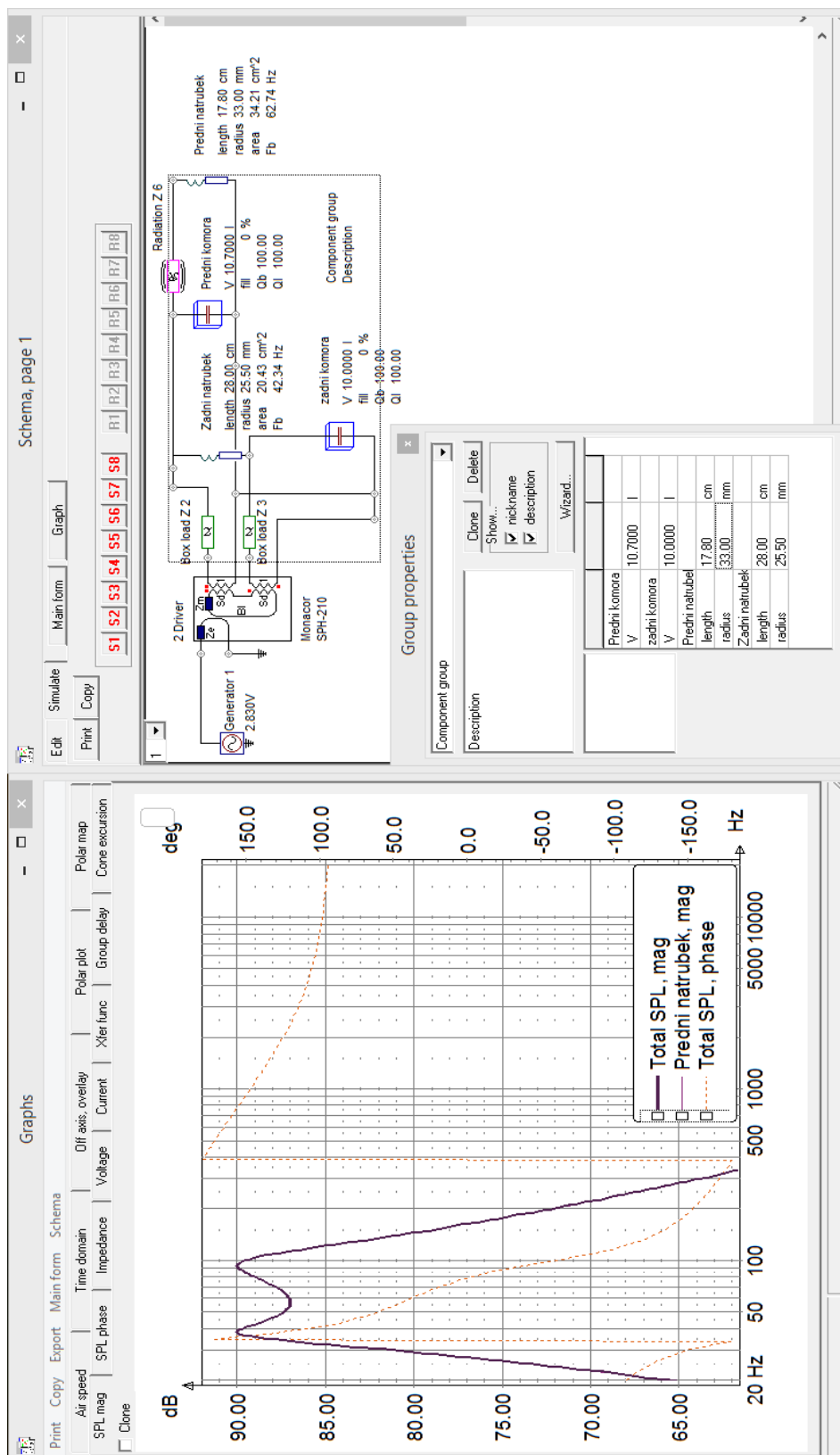
Seznam příloh

A.	Návrhy z programu LspCAD	46
1.	Návrh ozvučnice typu pásmová propust - isobaric.....	46
2.	Návrh ozvučnice typu Bassreflex - isobaric.....	47
3.	Návrh uzavřené ozvučnice – isobaric.....	48
4.	Návrh uzavřené ozvučnice – isobaric – větší objem	49
5.	Návrh ozvučnice typu pásmová propust.....	50
6.	Návrh ozvučnice typu Bassreflex	51
7.	Návrh uzavřené ozvučnice	52
8.	Návrh uzavřené ozvučnice – větší objem	53
B.	Podklady pro řezání desek.....	54
1.	Zadní komora – přední deska.....	54
2.	Zadní komora – stěna s miskou	55
3.	Zadní komora – stěna bez misky.....	56
4.	Zadní komora – dno a vrch	57
5.	Zadní deska	58
6.	Přední komora (i pro isobaric) – přední deska.....	59
7.	Přední komora – stěny	60
8.	Přední komora – dno	61
9.	Přední komora – vrch.....	62
10.	Přední komora isobaric – stěny.....	63
11.	Přední komora isobaric – dno	64
12.	Přední komora isobaric – vrch.....	65
13.	Přídavná komora (i pro isobaric) – zadní deska	66
14.	Přídavná komora – stěny.....	67
15.	Přídavná komora – dno a vrch	68
16.	Přídavná komora isobaric – stěny	69
17.	Přídavná komora isobaric – dno a vrch	69
C.	Fotografie komponentů.....	70
1.	Reproduktor	Chyba! Záložka není definována.
2.	Přední bassreflexový nátrubek	70

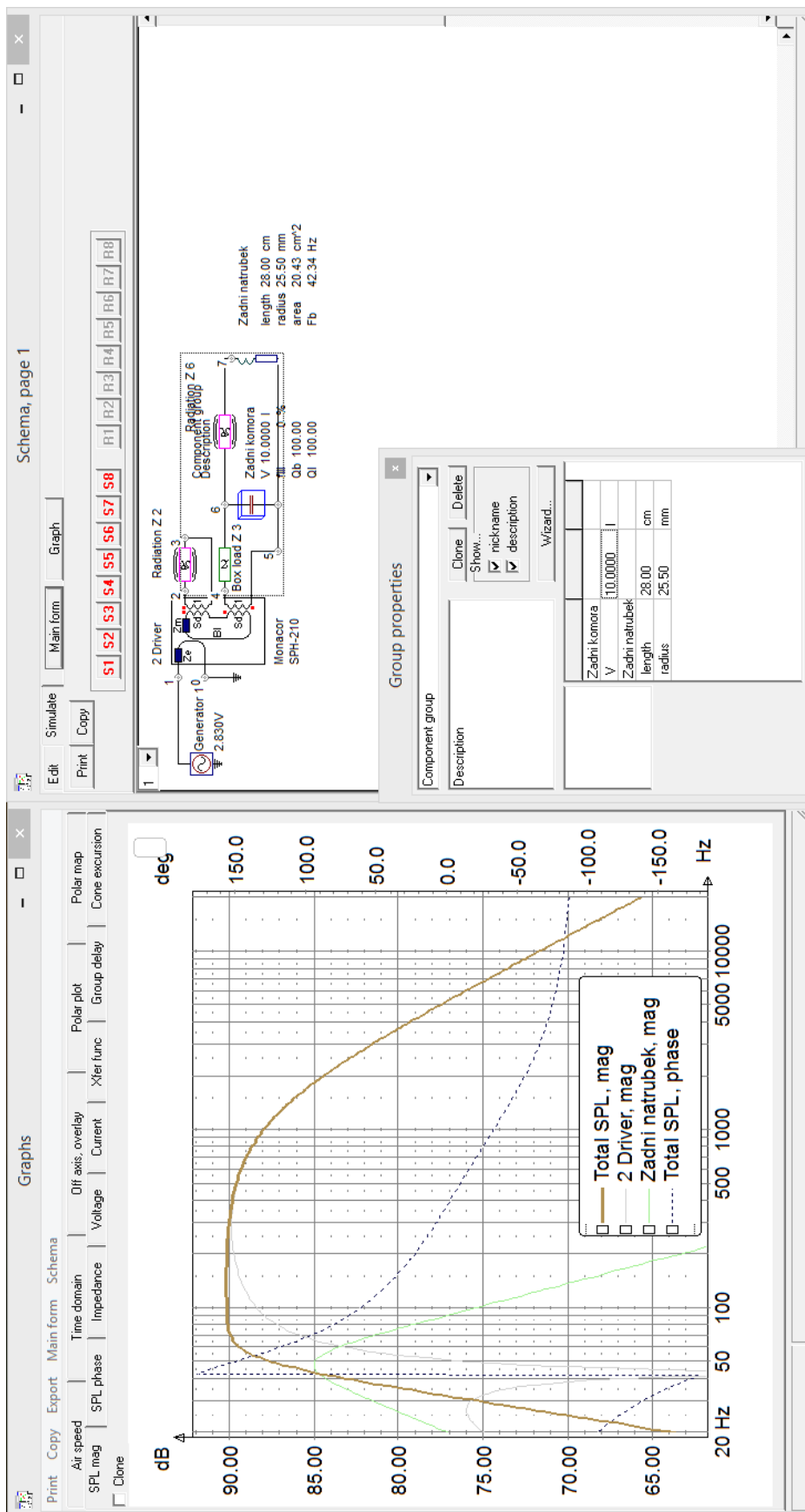
3. Zadní bassreflexový nátrubek	70
4. Miska	71
5. Ucho	71
6. Roh (seřízlý).....	71
7. Potahová látka	72
8. Bednový uzávěr.....	72
D. Fotografie komor po lepení a zábrusu	73
1. Zadní komora (jednoduché uspořádání i isobaric)	73
2. Přední komora.....	73
3. Přední komora – isobaric	74
4. Přídavná komora	74
5. Přídavná komora – isobaric.....	75
6. Zadní deska (jednoduché uspořádání i isobaric)	75
E. Měření charakteristik	76
1. Impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice s jedním reproduktorem	76
2. Impedanční charakteristika ozvučnice typu Bassreflex s jedním reproduktorem	76
3. Kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice	77
4. Kmitočtová charakteristika ozvučnice typu Bassreflex.....	77
F. Zapojení pracovišť při měření.....	78
1. Zapojení pro měření impedanční charakteristiky	78
2. Zapojení pro měření kmitočtové charakteristiky	78
G. Optimalizace	79
1. Měření kmitočtové charakteristiky	79
2. Simulace s vypočteným V_{as} pro určení délky nátrubku	80
3. Simulace s původní délkou nátrubku	81

A. Návrhy z programu LspCAD

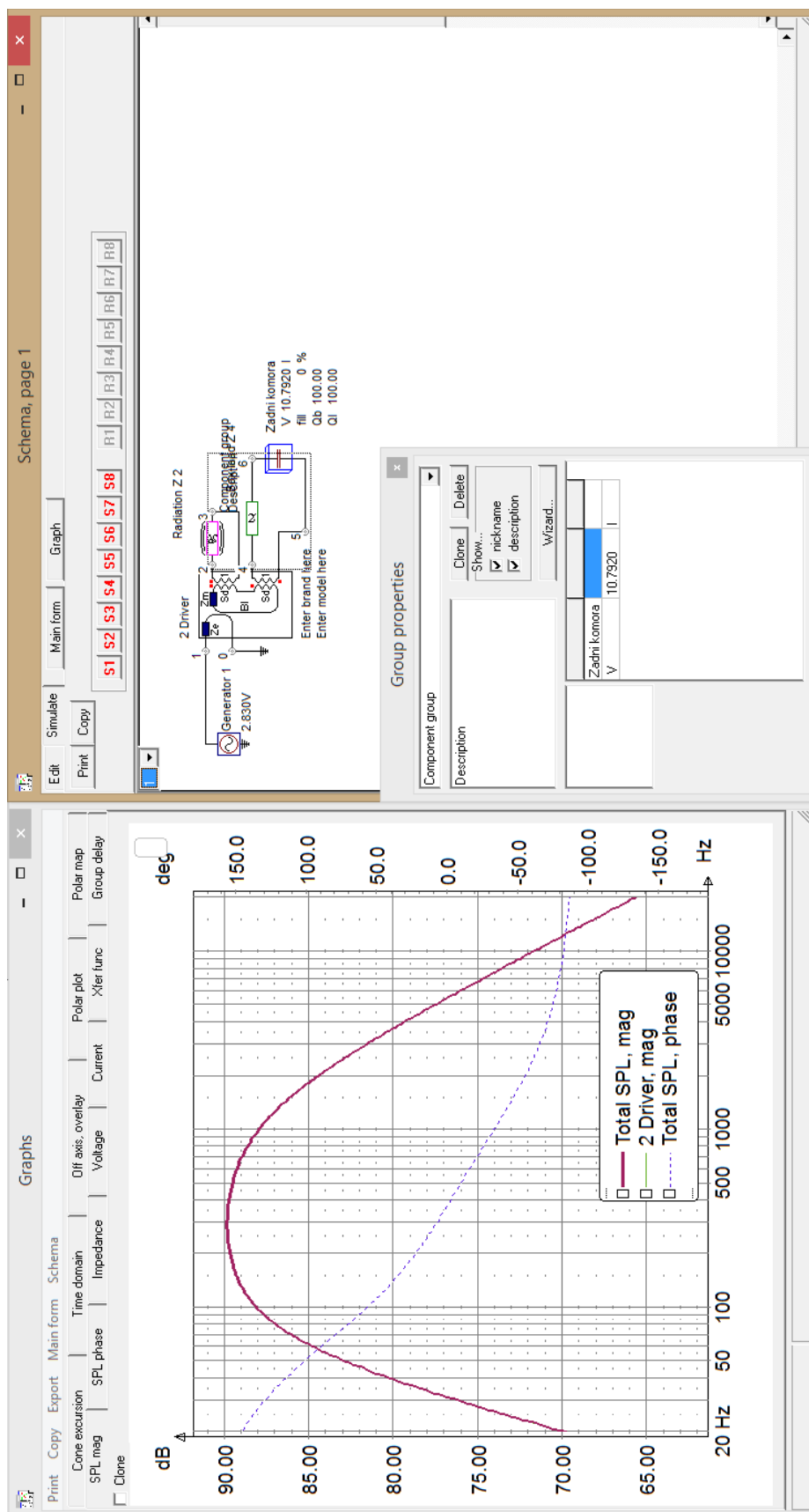
1. Návrh ozvučnice typu pásmová propust - isobaric



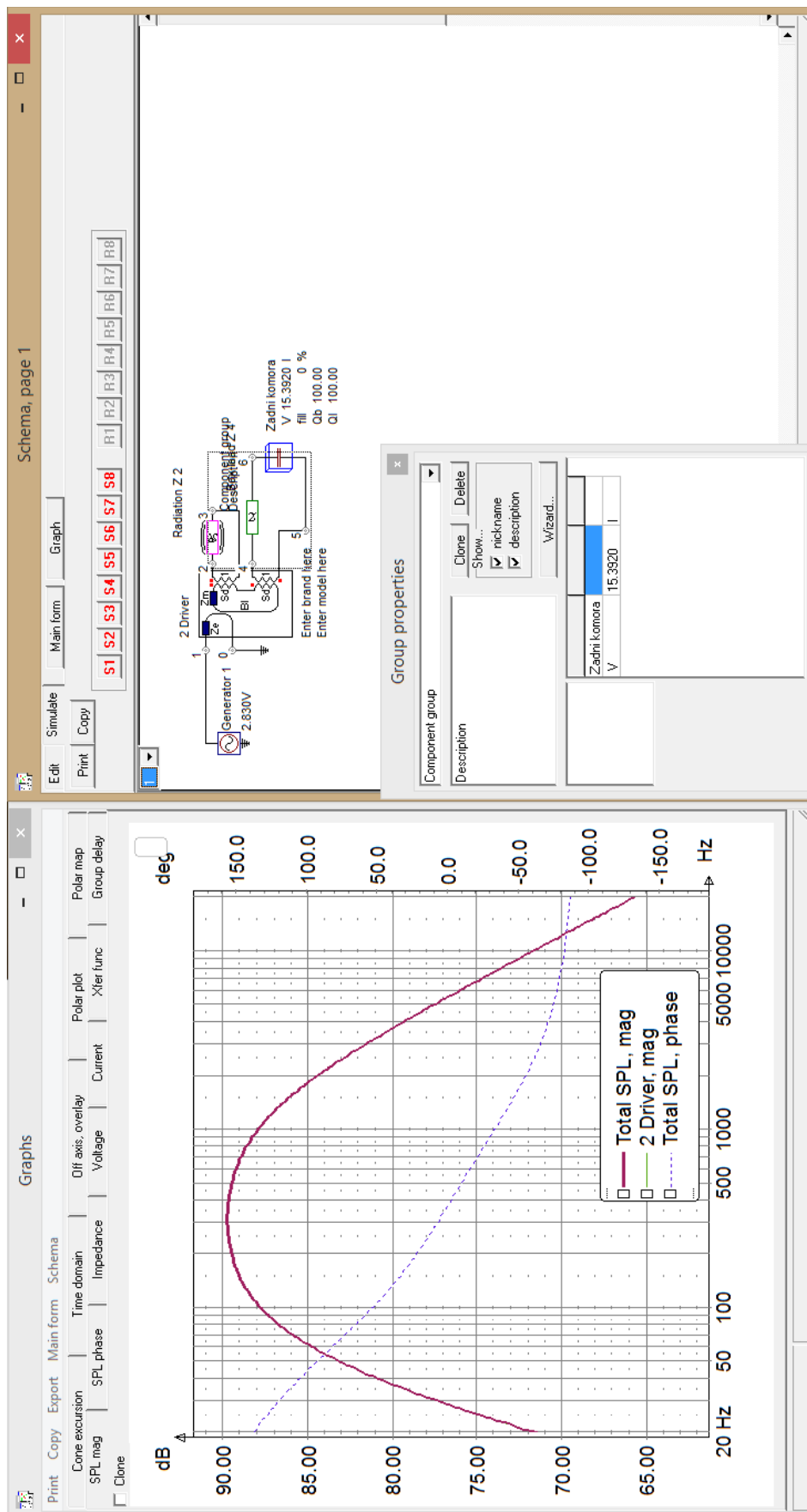
2. Návrh ozvučnice typu Bassreflex - isobaric



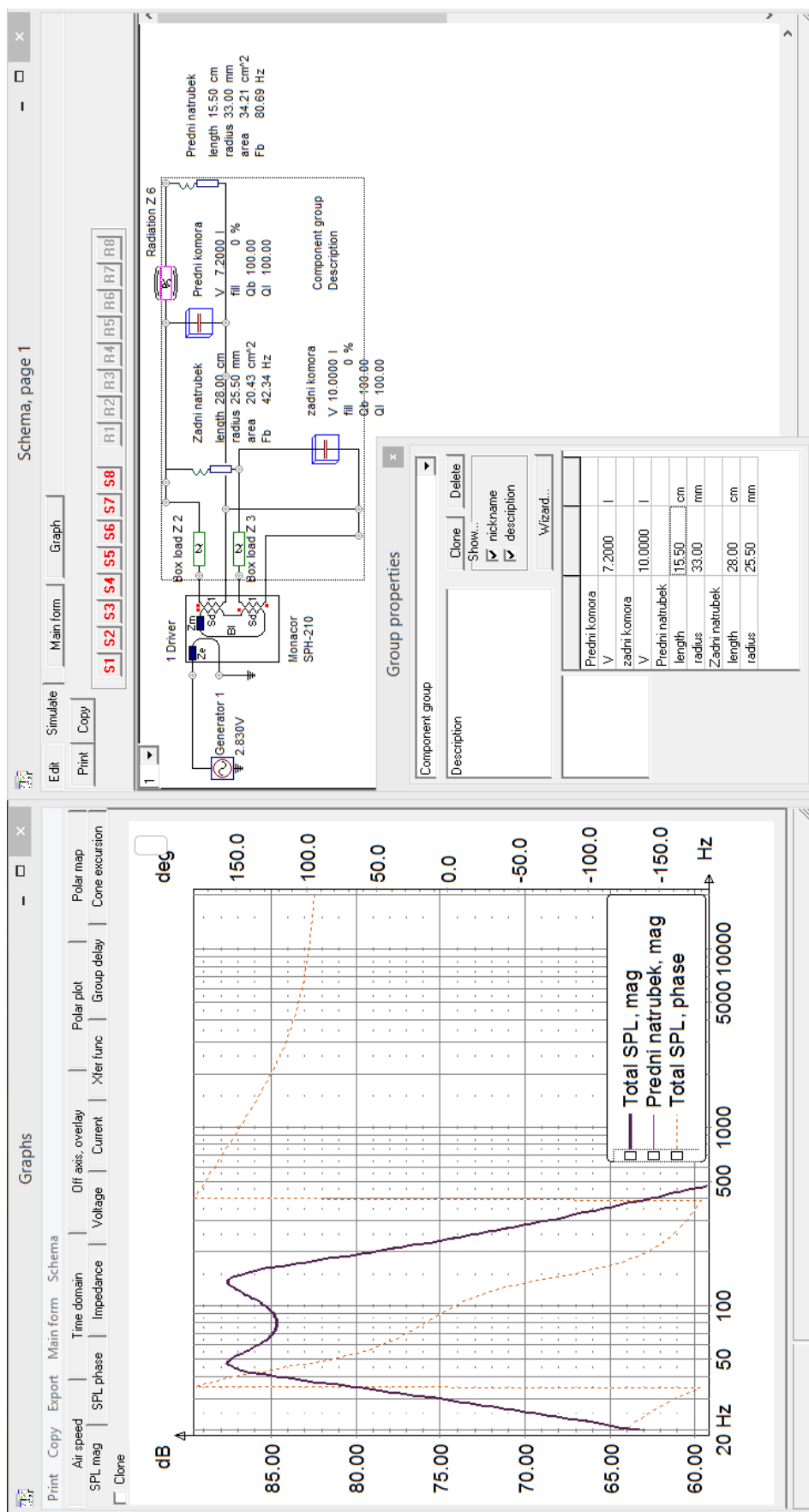
3. Návrh uzavřené ozvučnice – isobaric



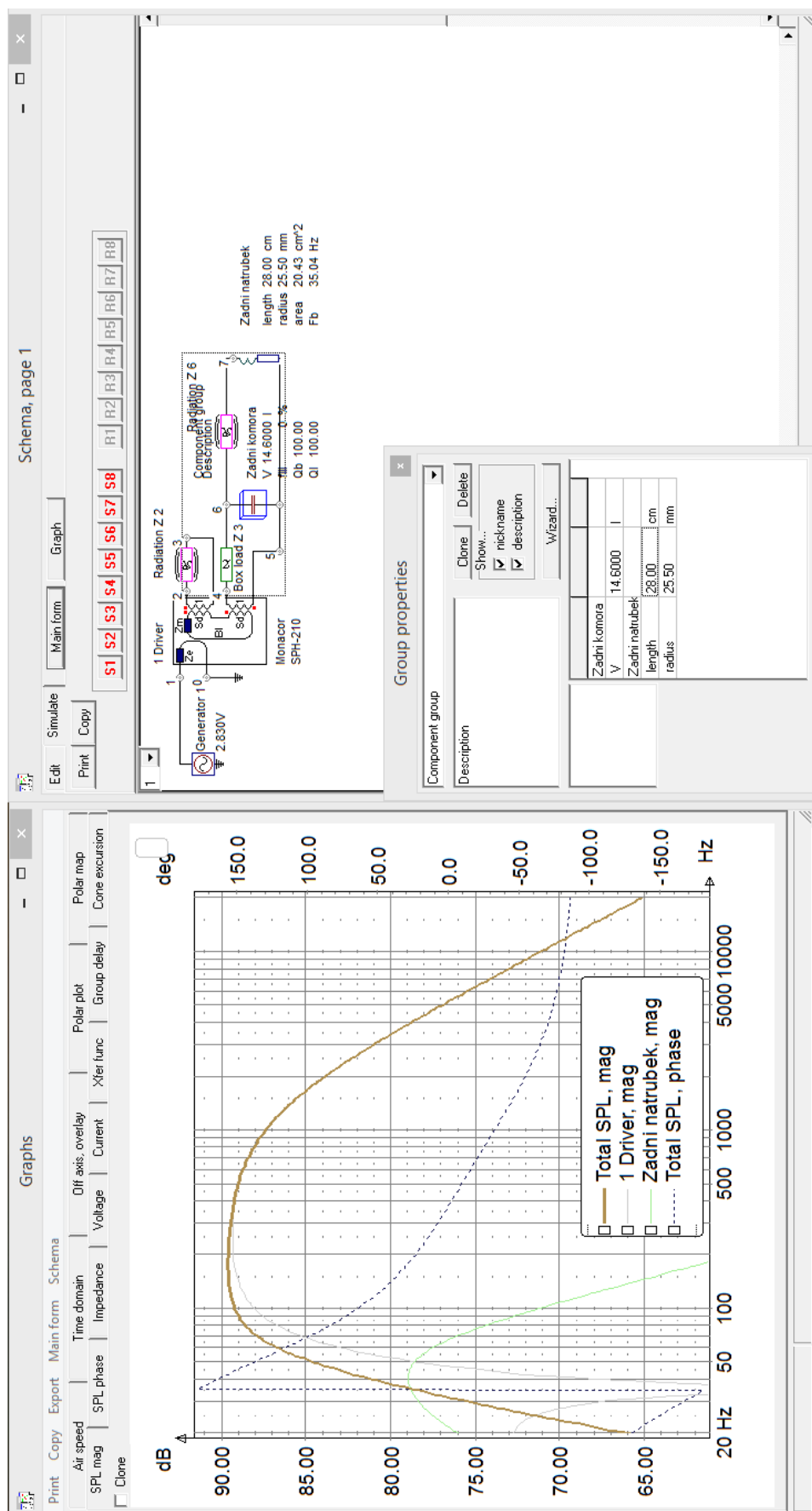
4. Návrh uzavřené ozvučnice – isobaric – větší objem



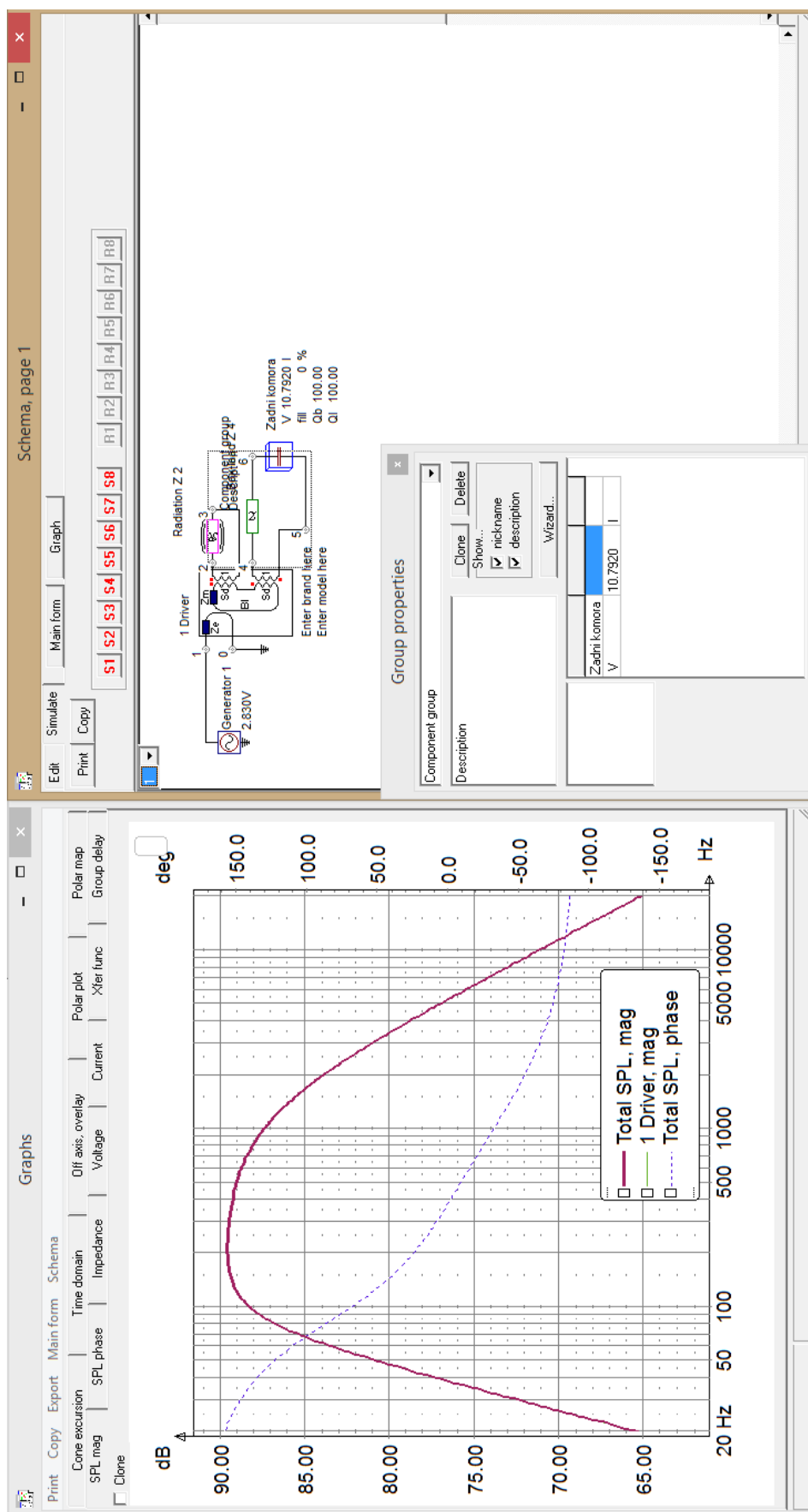
5. Návrh ozvučnice typu pásmová propust



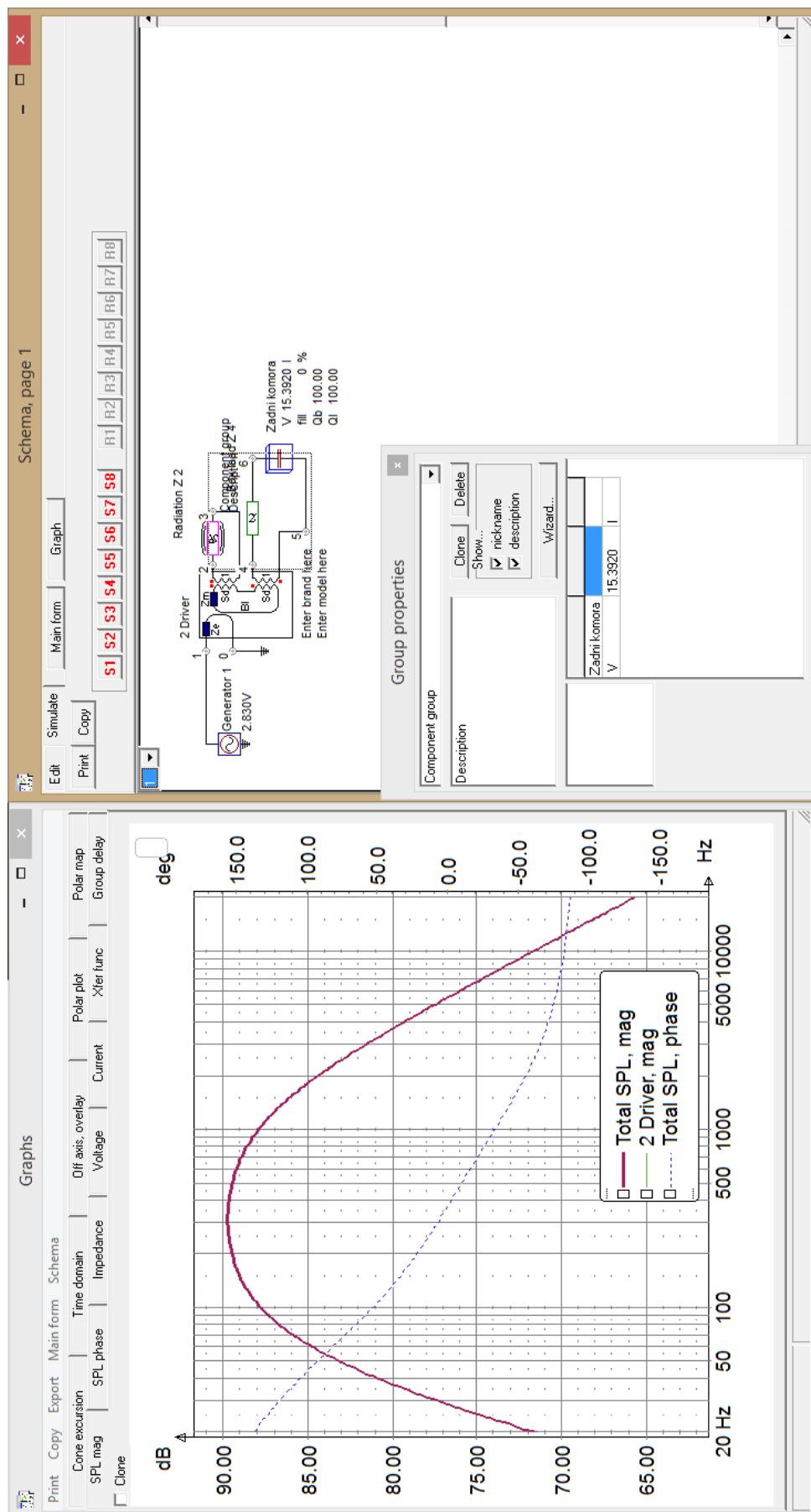
6. Návrh ozvučnice typu Bassreflex



7. Návrh uzavřené ozvučnice

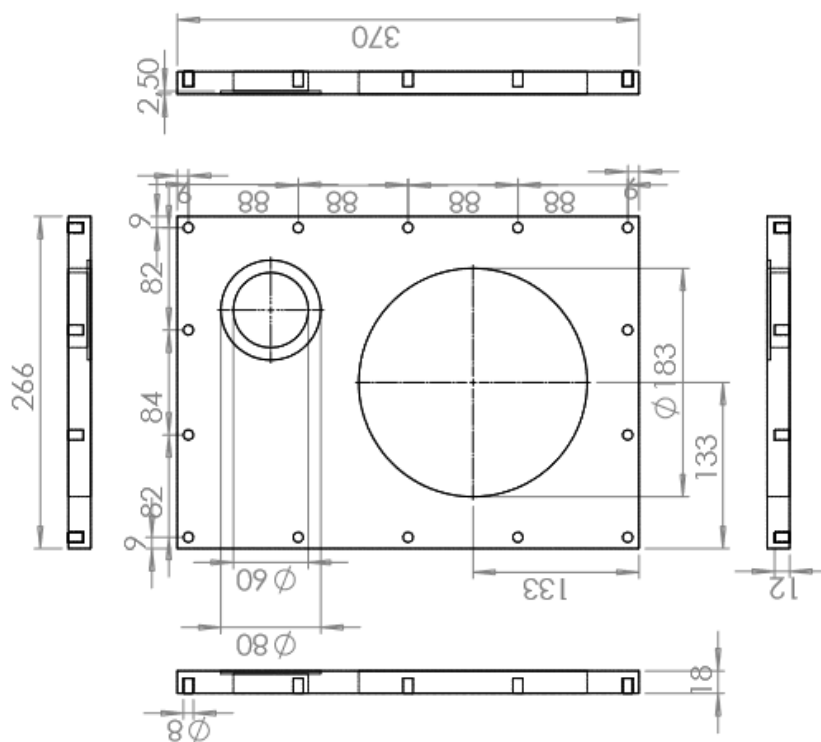


8. Návrh uzavřené ozvučnice – větší objem

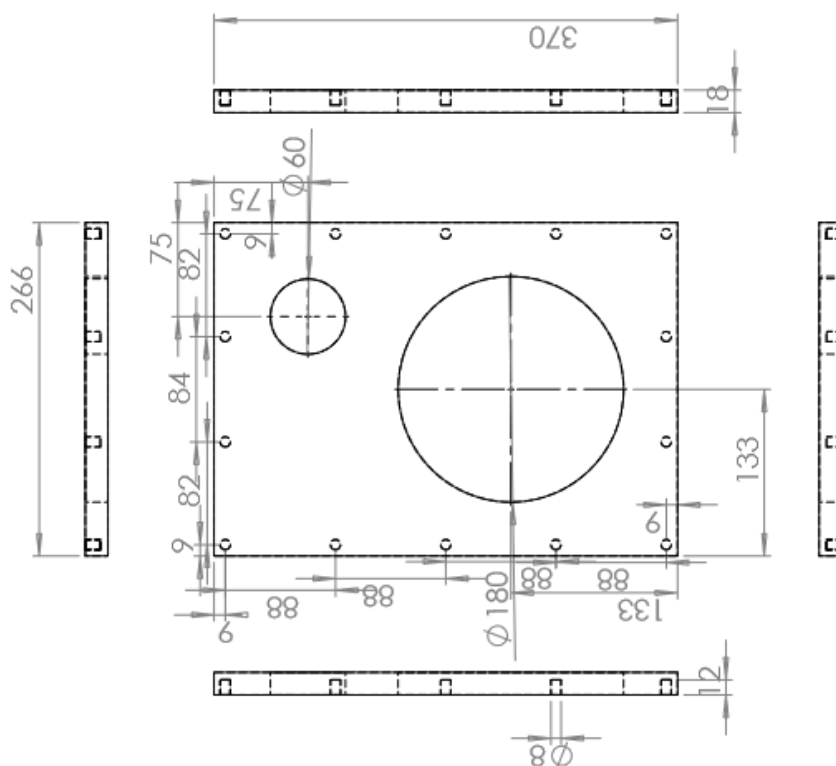


B. Podklady pro řezání desek

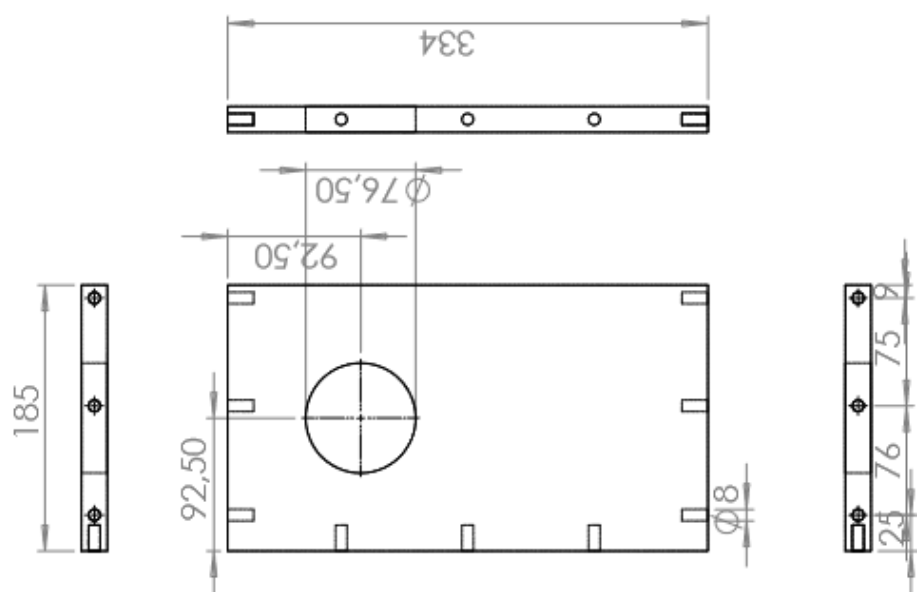
1. Zadní komora – přední deska



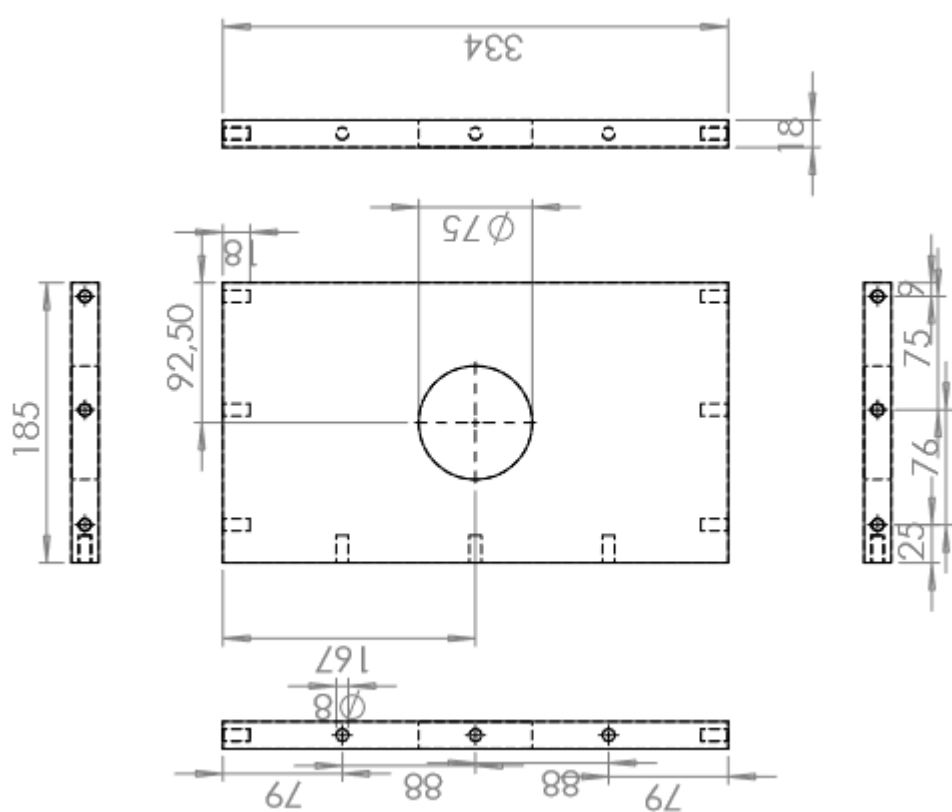
Nové:



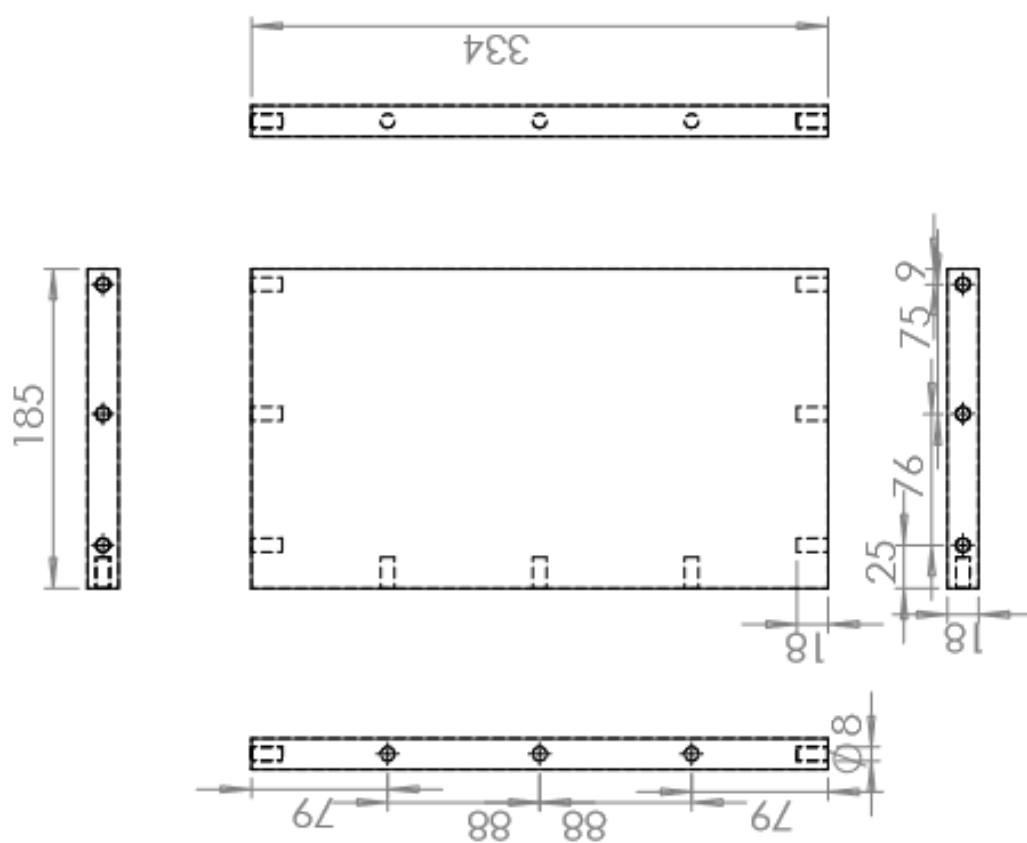
2. Zadní komora – stěna s miskou



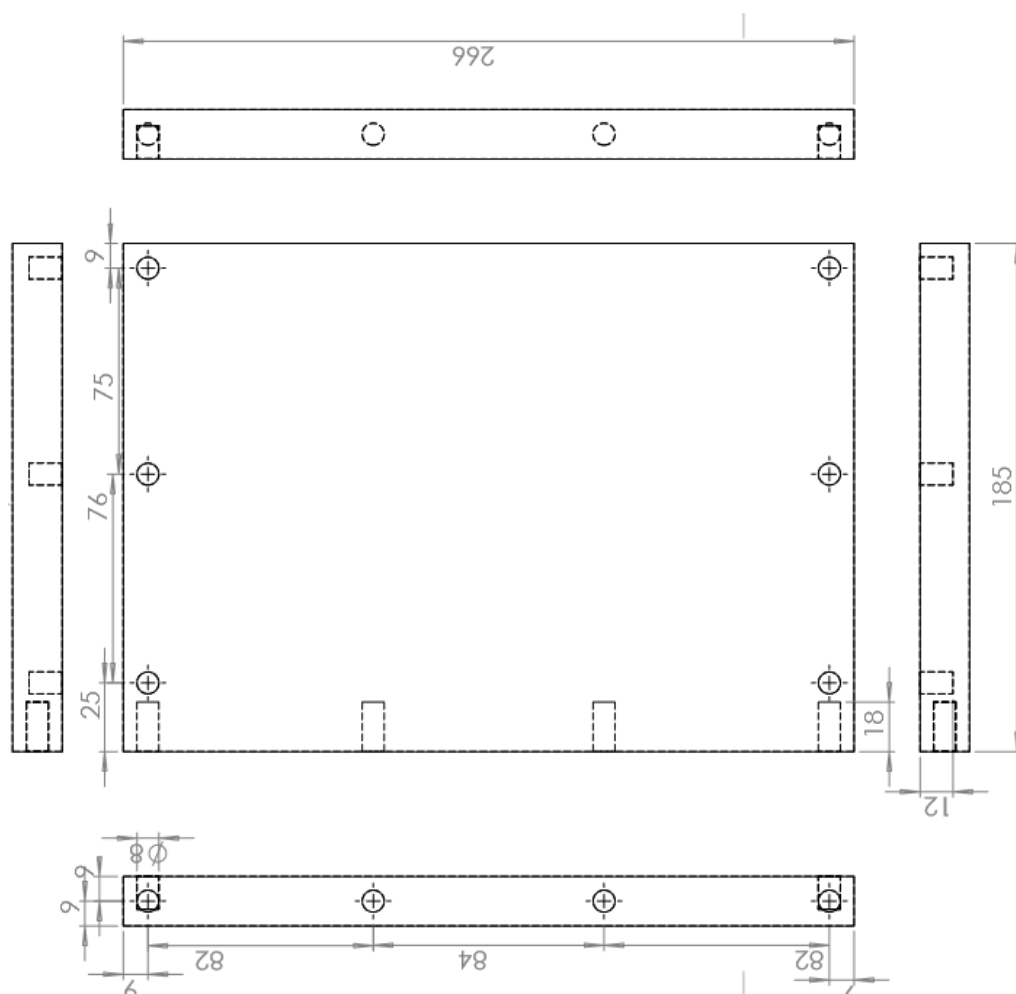
Nové:



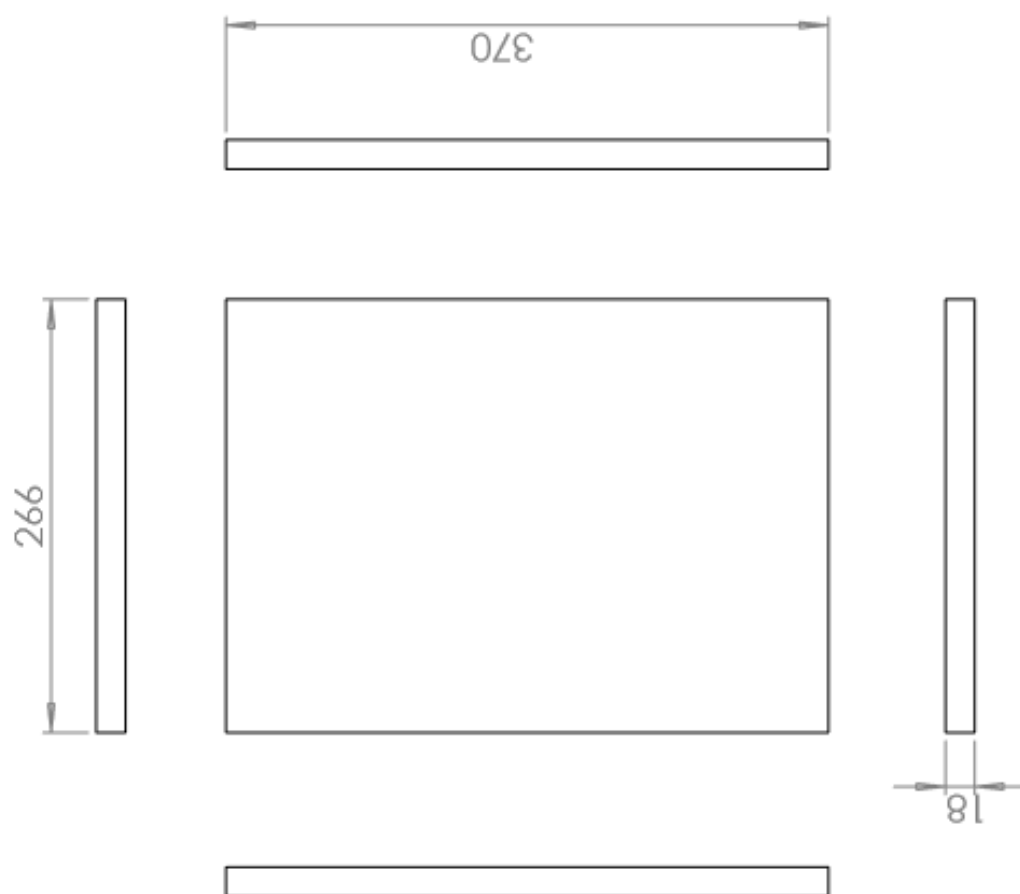
3. Zadní komora – stěna bez misky



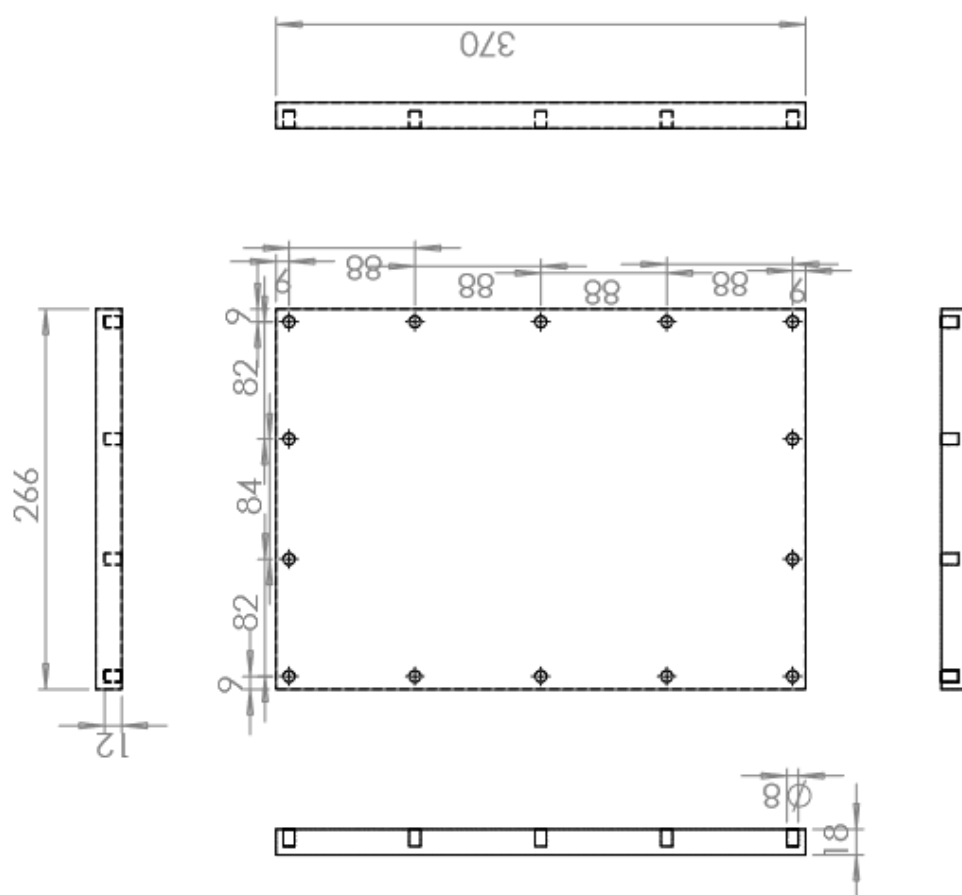
4. Zadní komora – dno a vrch



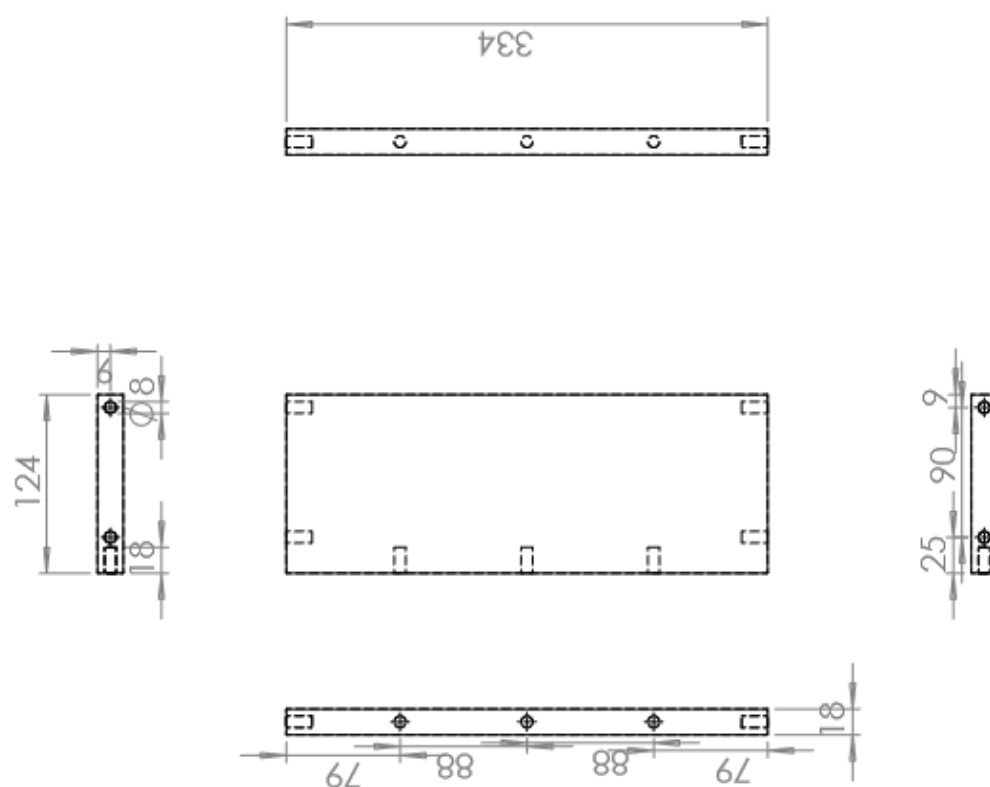
5. Zadní deska



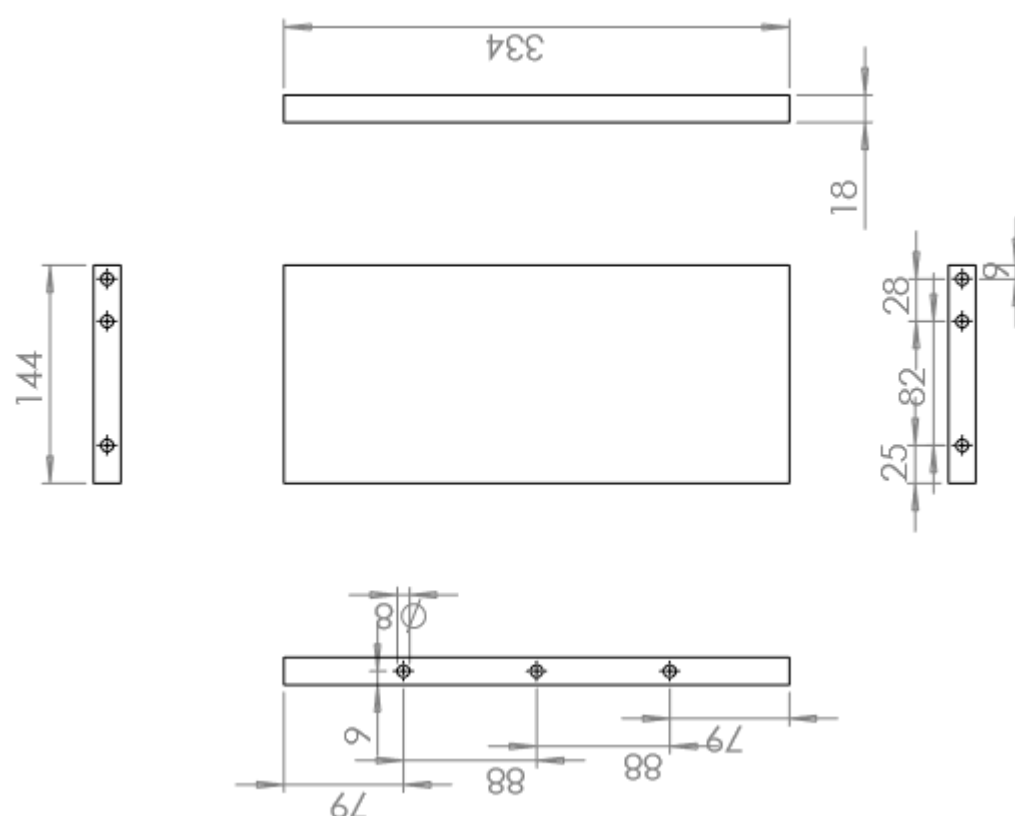
6. Přední komora (i pro isobaric) – přední deska



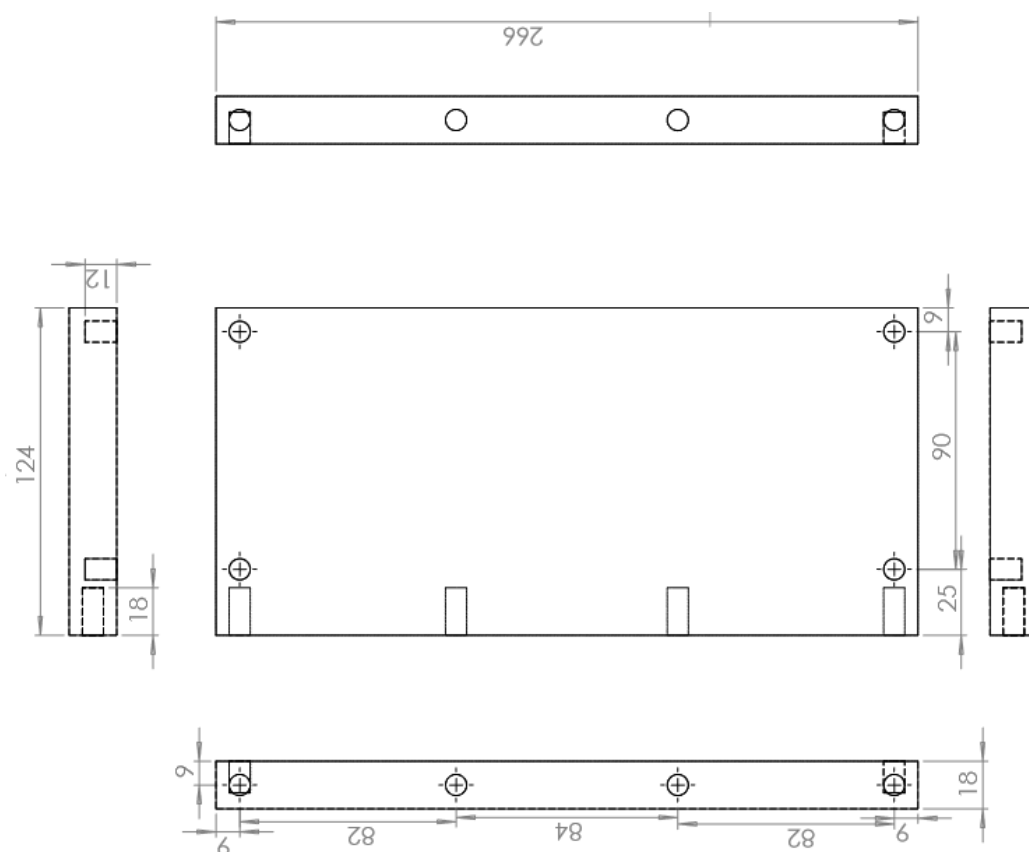
7. Přední komora – stěny



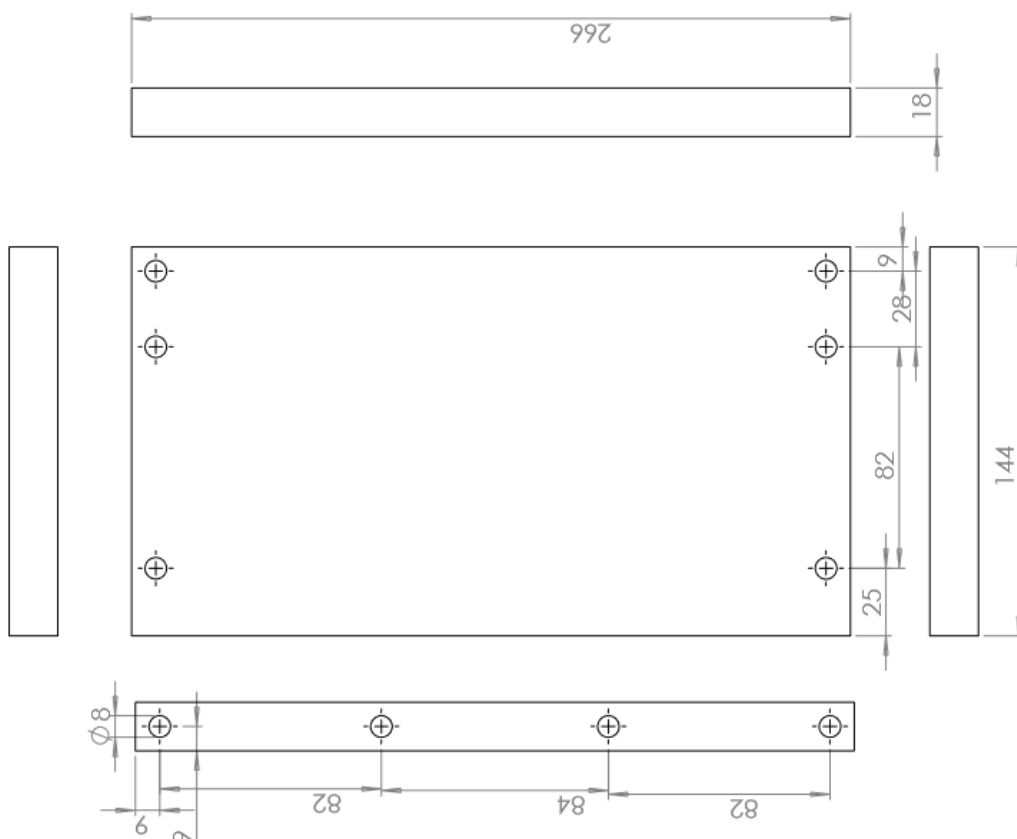
Nové:



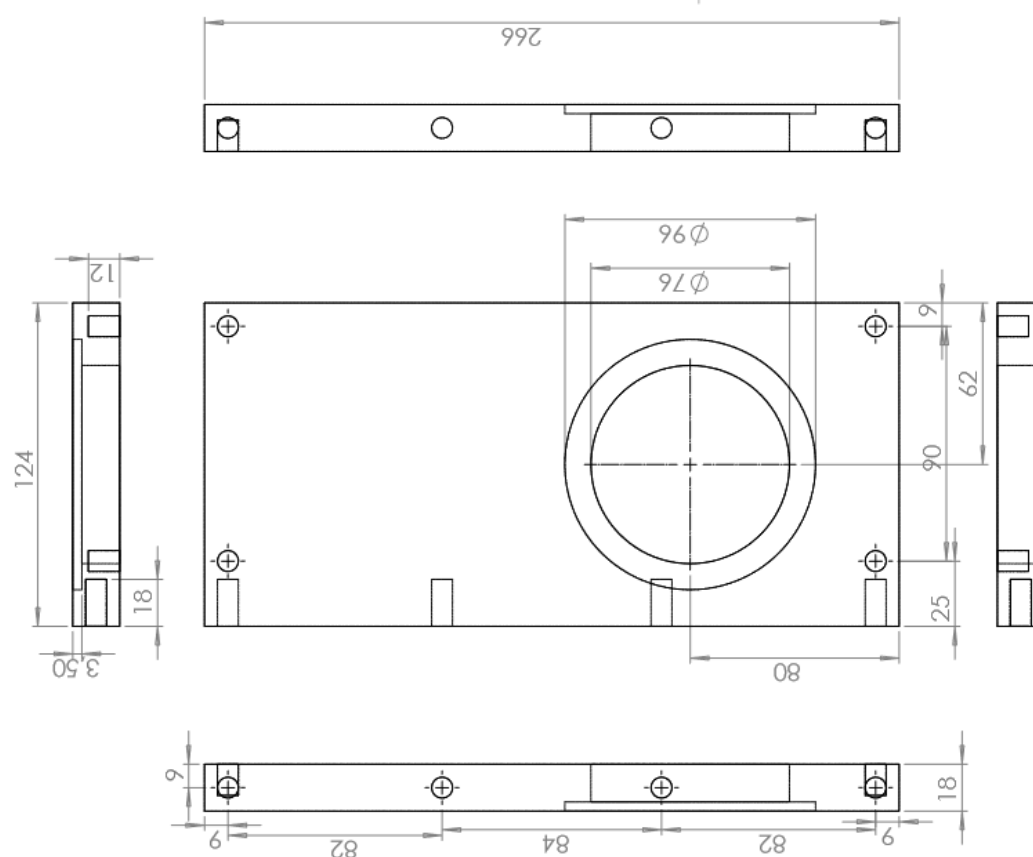
8. Přední komora – dno



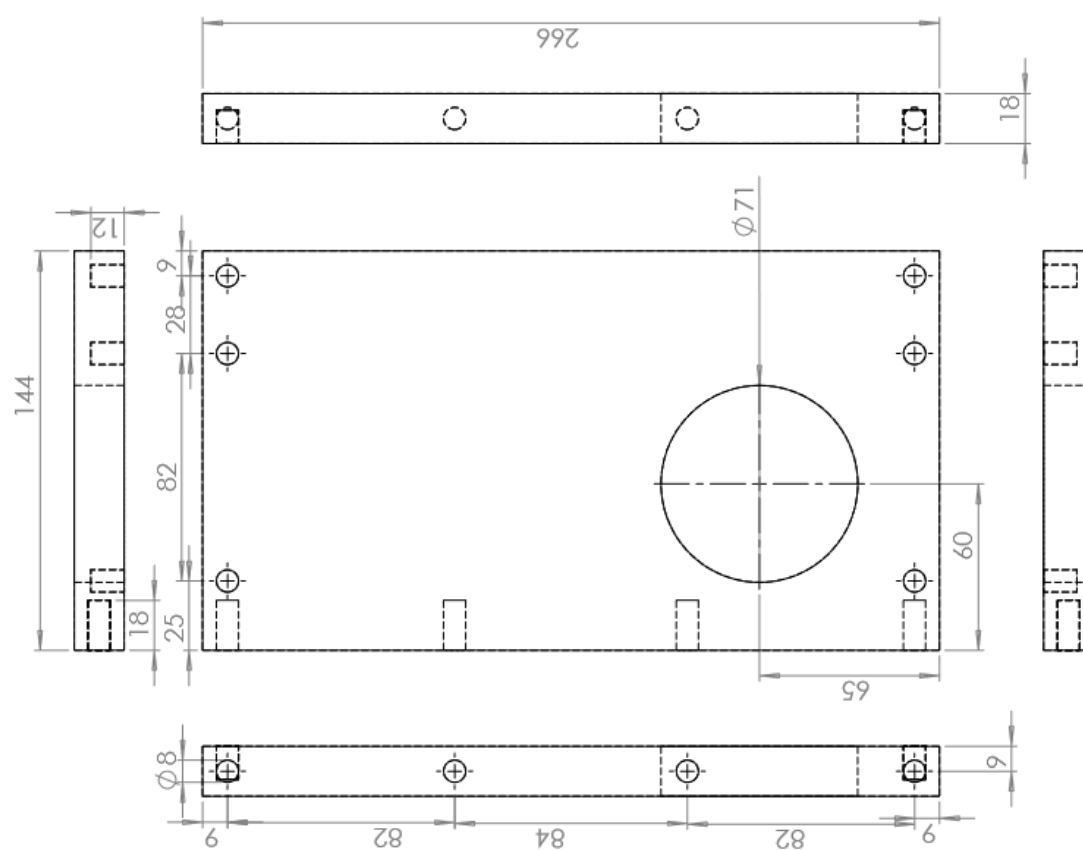
Nové:



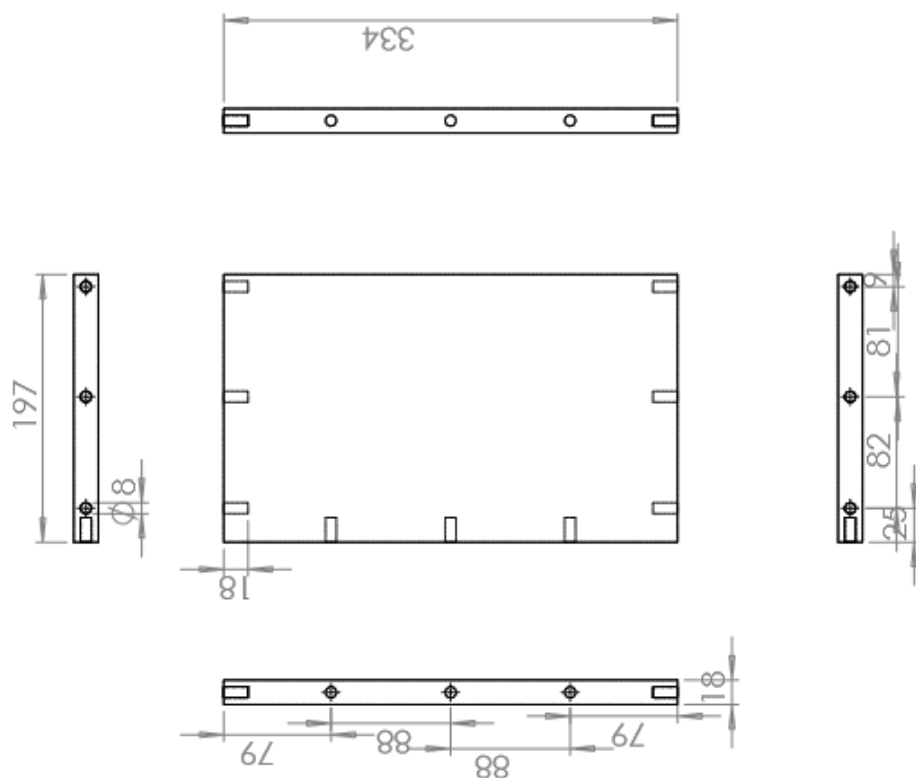
9. Přední komora – vrch



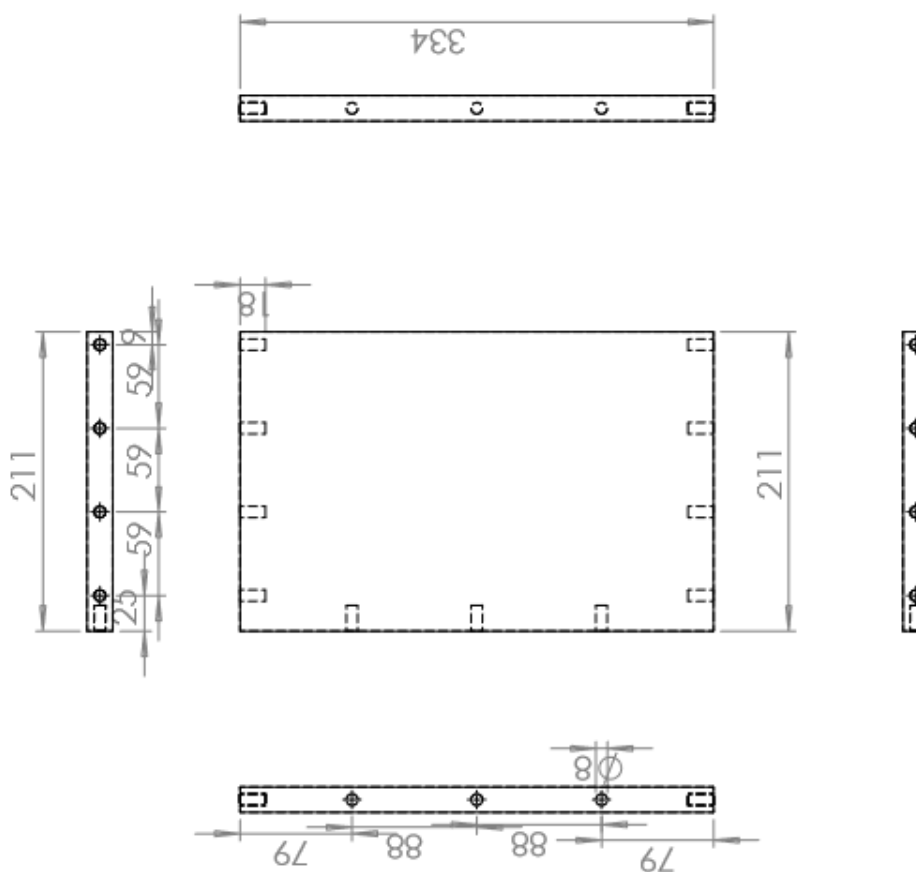
Nové:



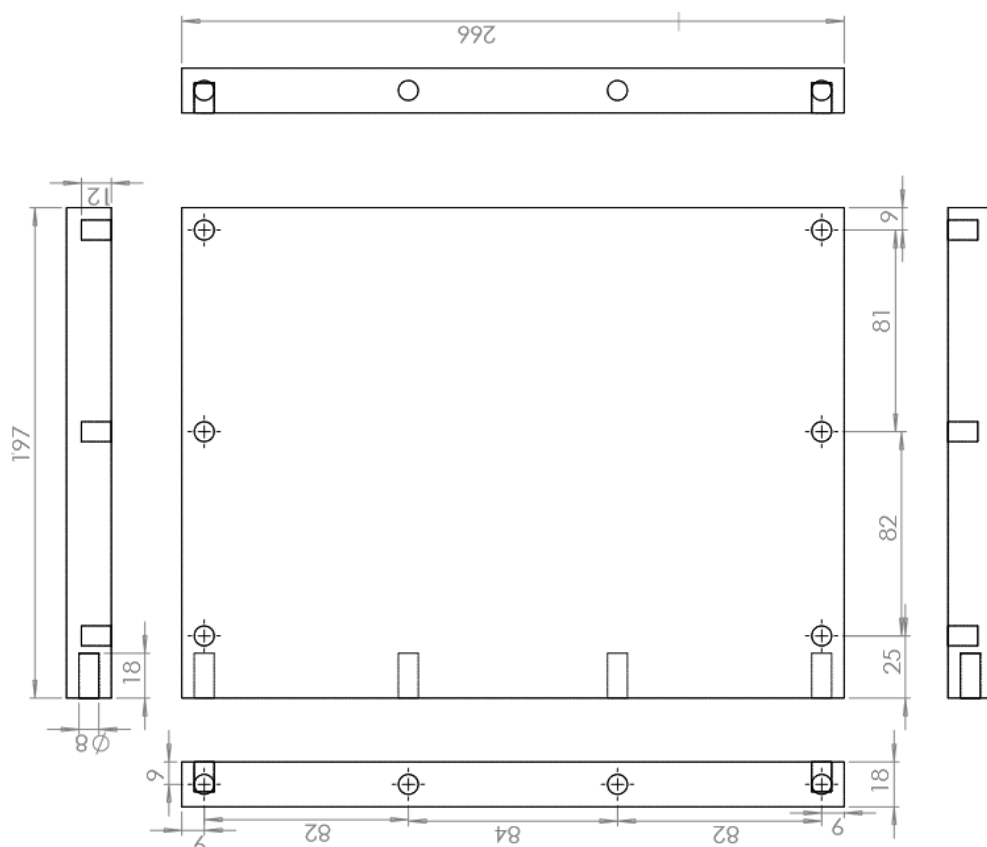
10. Přední komora isobaric – stěny



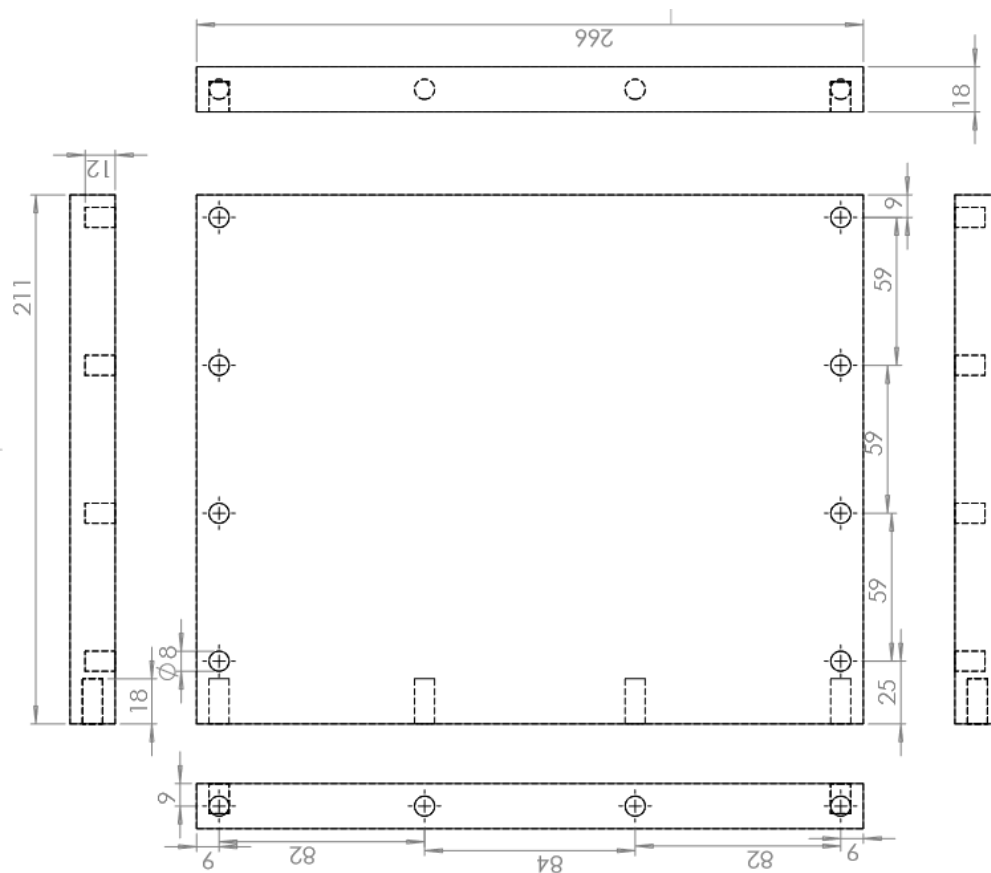
Nové:



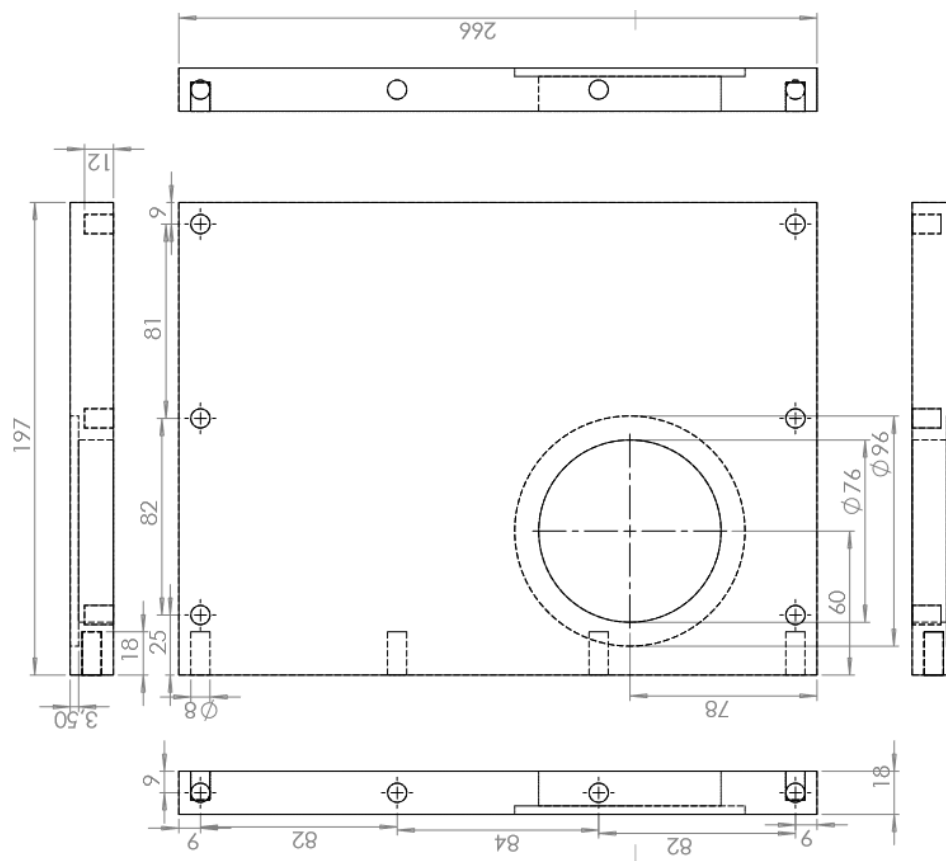
11. Přední komora isobaric – dno



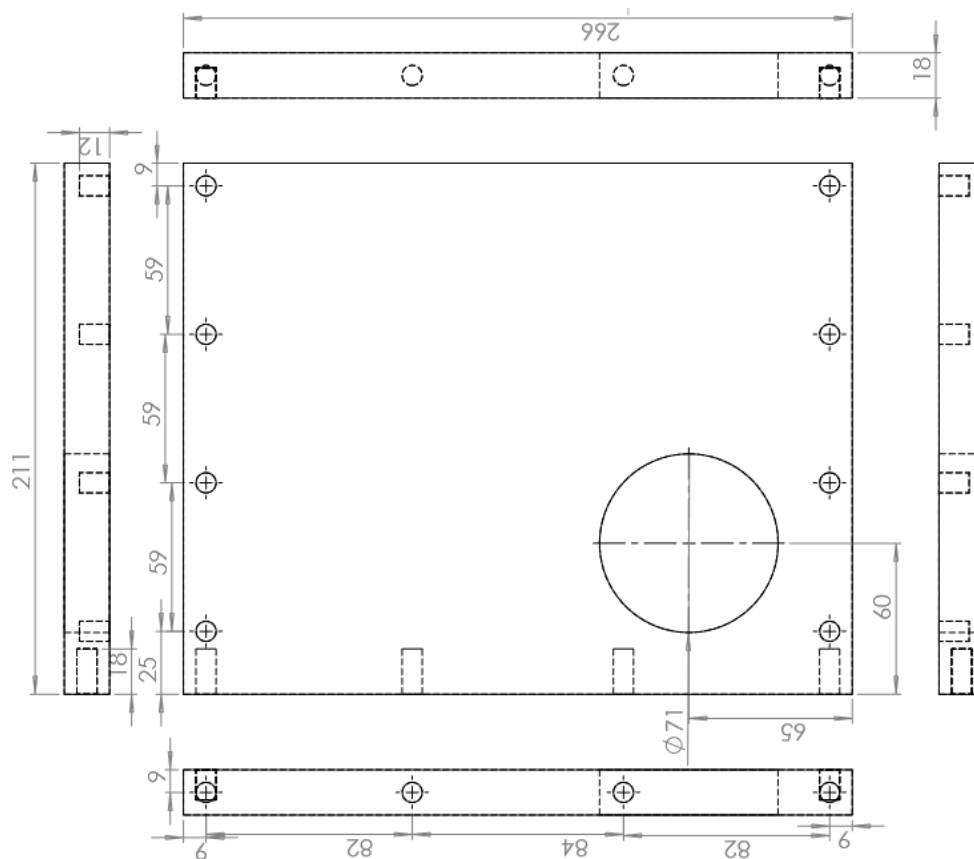
Nové:



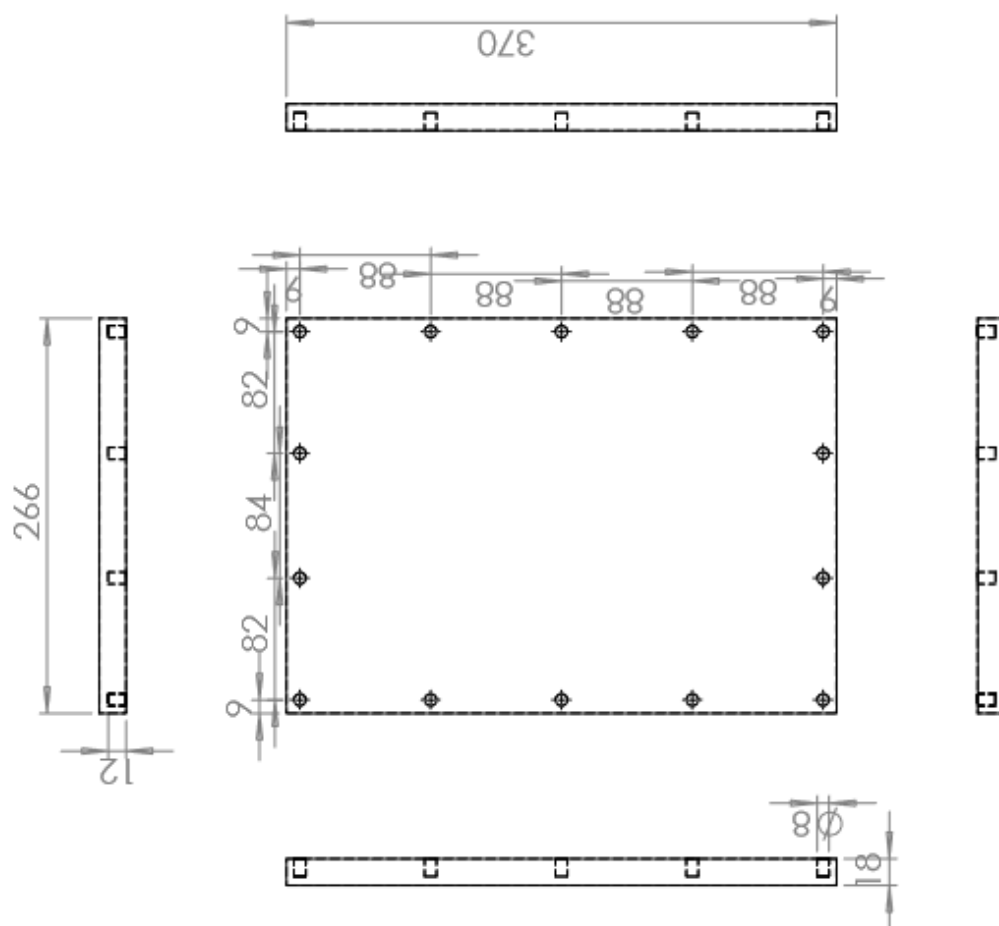
12. Přední komora isobaric – vrch



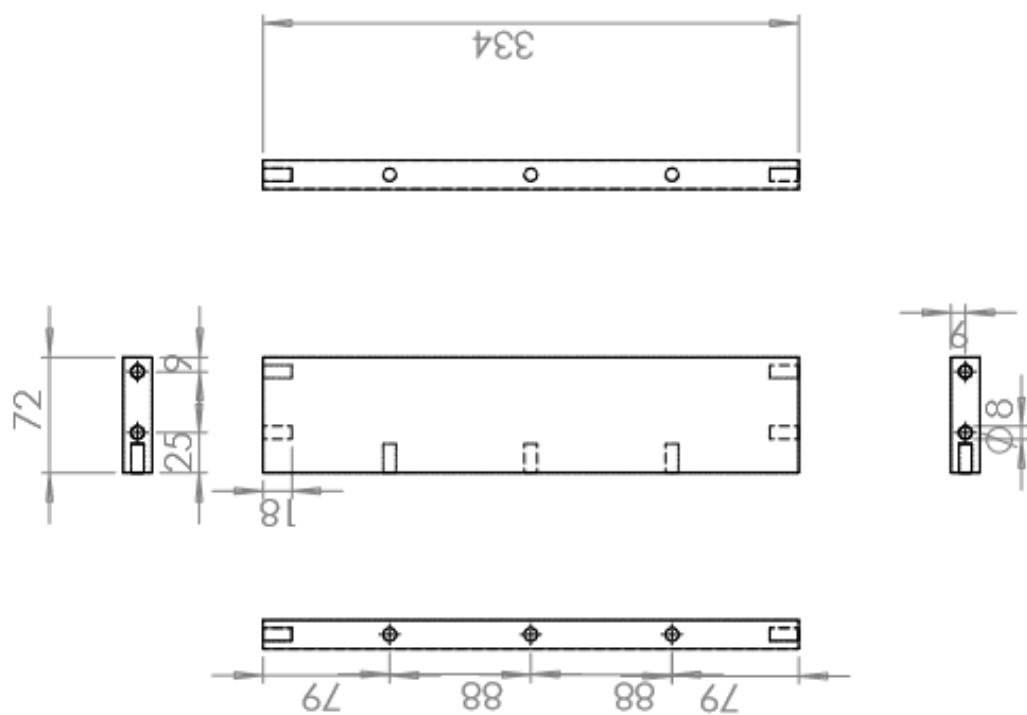
Nové:



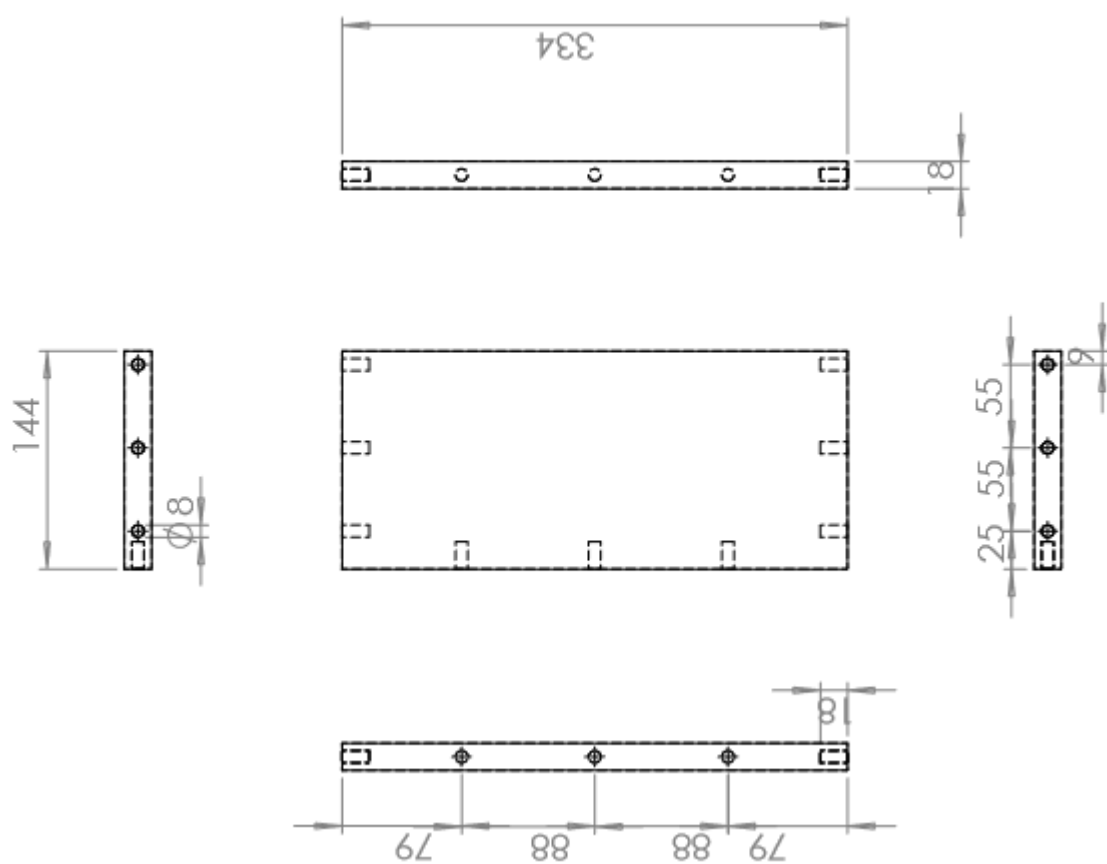
13. Přídavná komora (i pro isobaric) – zadní deska



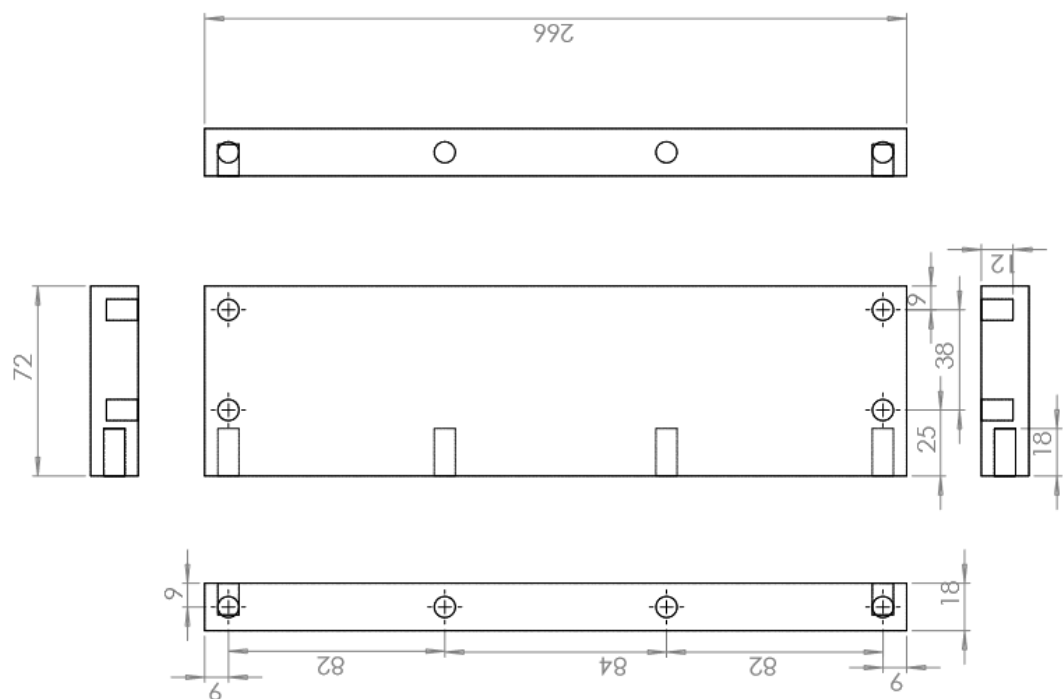
14. Přídavná komora – stěny



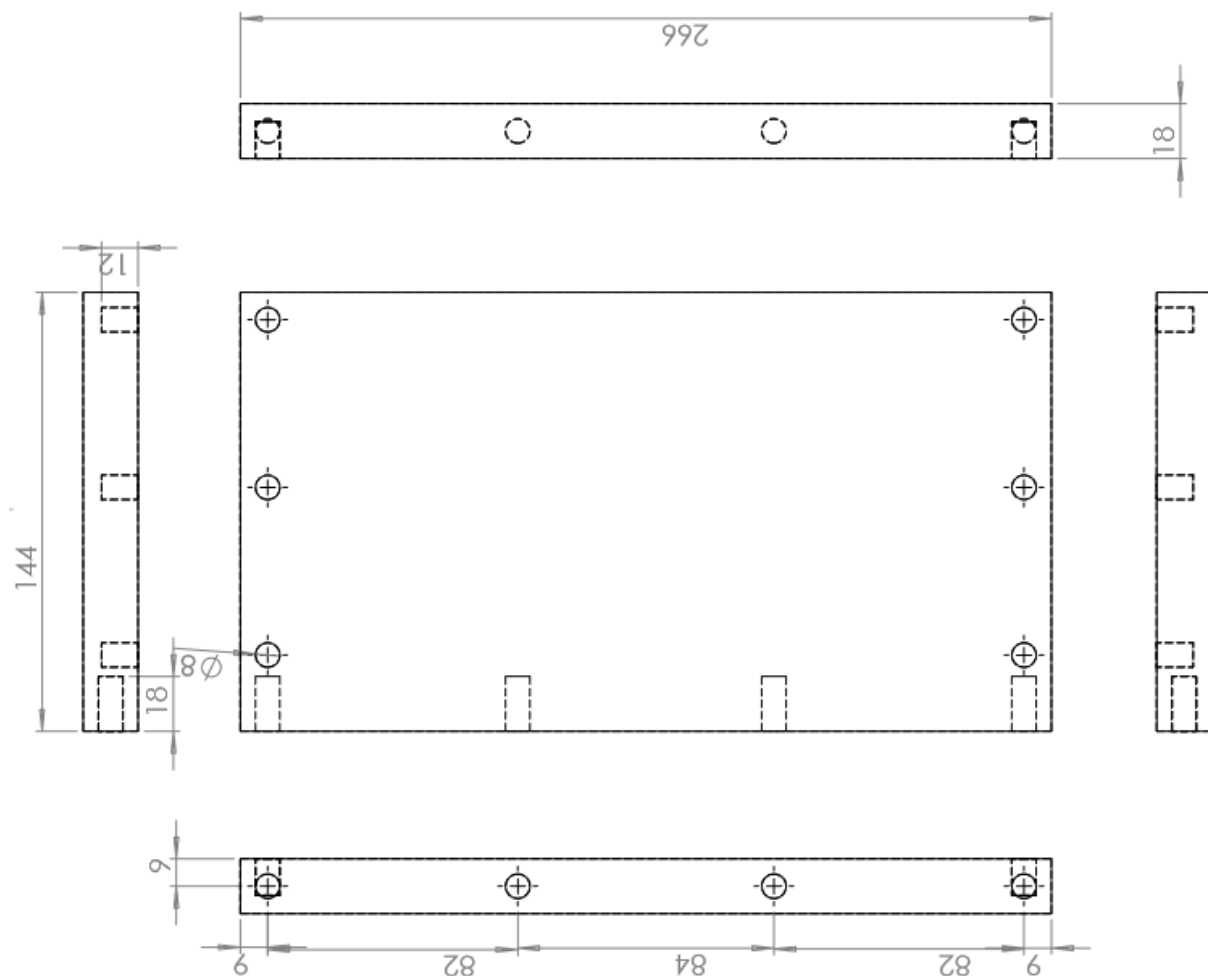
Nové:



15. Přídavná komora – dno a vrch

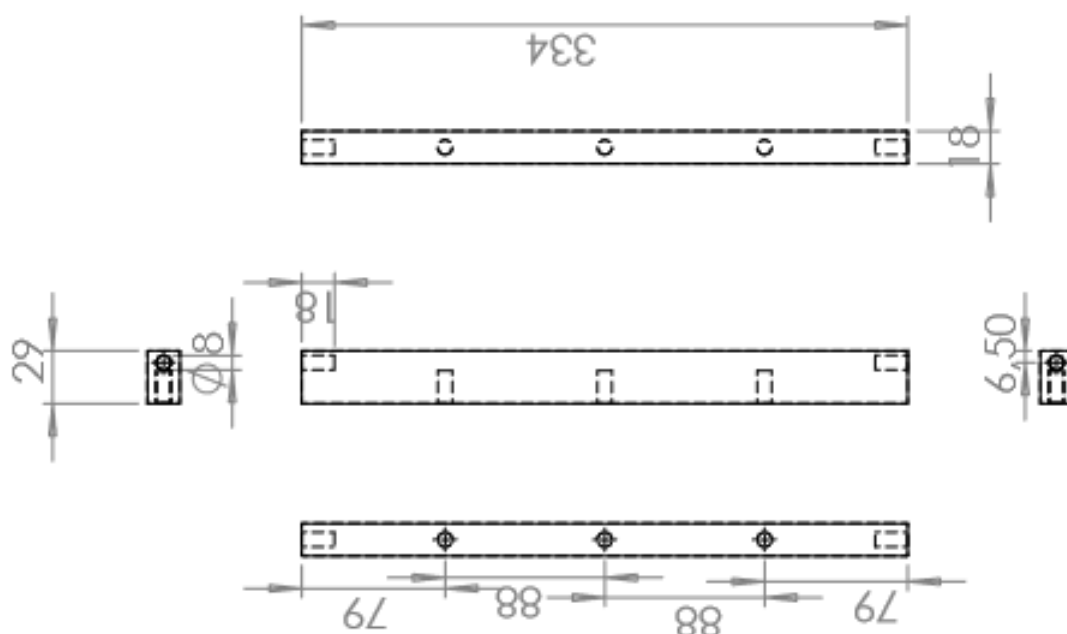


Nové:



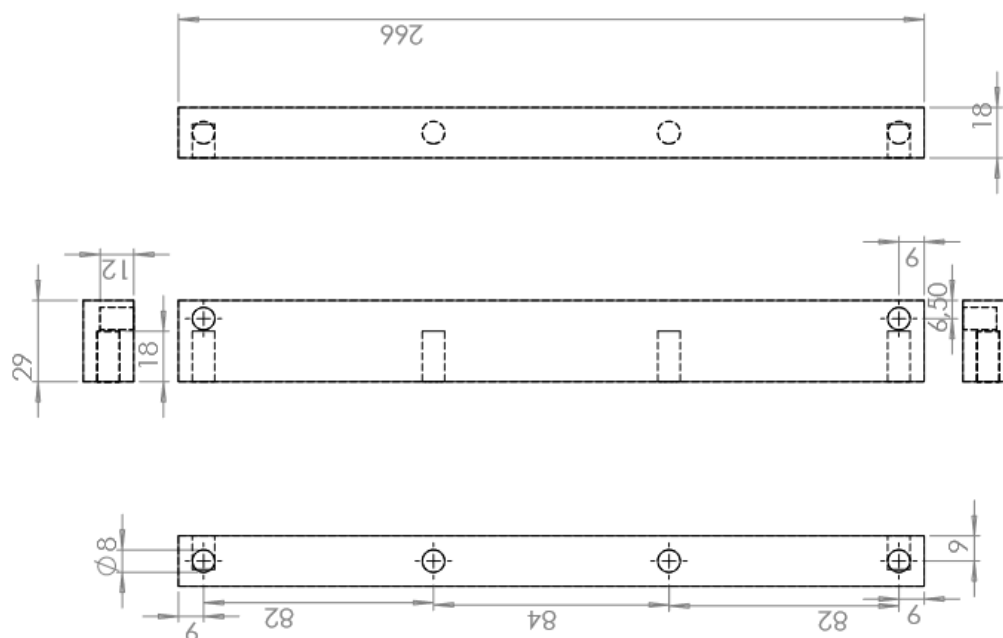
16. Přídavná komora isobaric – stěny

Nové:



17. Přídavná komora isobaric – dno a vrch

Nové:



C. Fotografie komponentů

1. Reproduktor



2. Přední bassreflexový nátrubek



3. Zadní bassreflexový nátrubek



4. Miska



5. Ucho



6. Roh (seřízlý)



7. Potahová látka



8. Bednový uzávěr



D. Fotografie komor po lepení a zábrusu

1. Zadní komora (jednoduché uspořádání i isobaric)



2. Přední komora



3. Přední komora – isobaric



4. Přídavná komora



5. Přídavná komora – isobaric

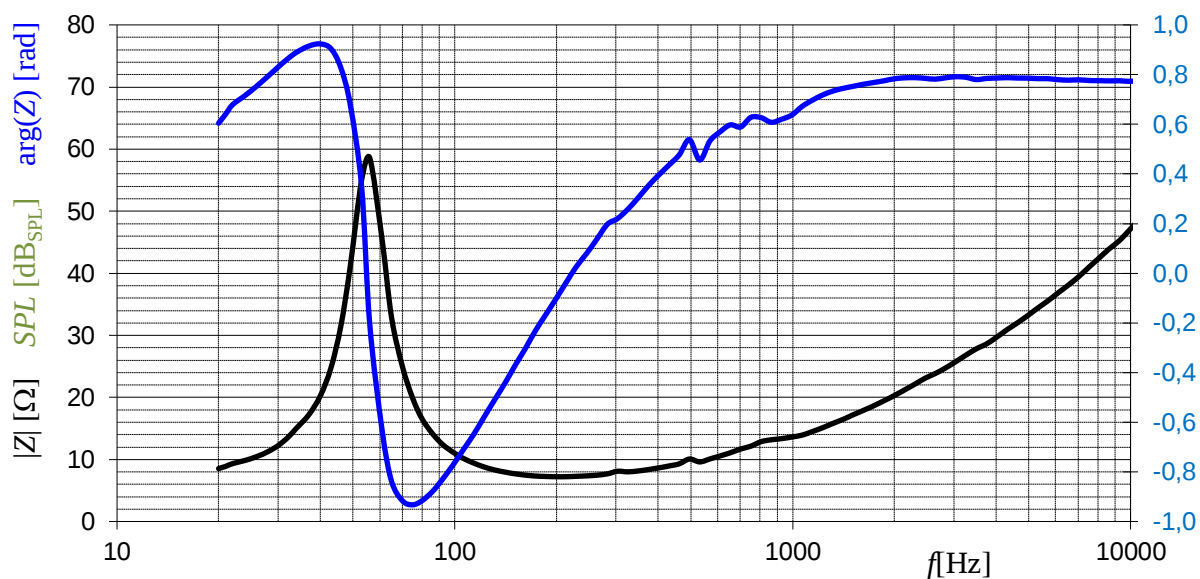


6. Zadní deska (jednoduché uspořádání i isobaric)

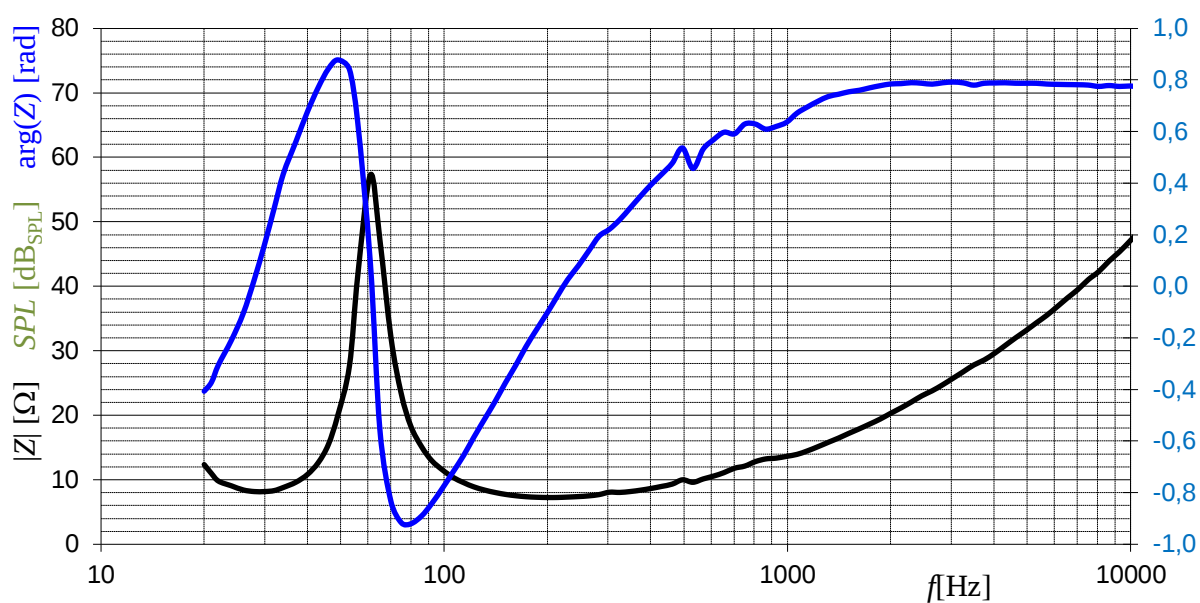


E. Měření charakteristik

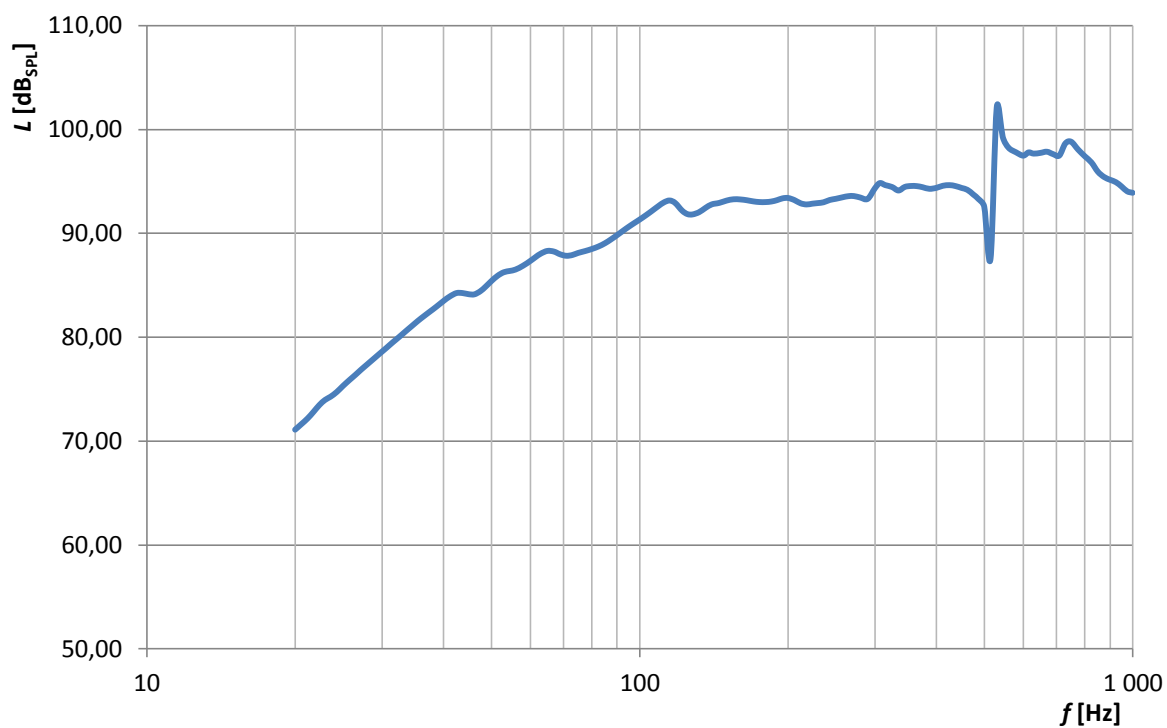
1. Impedanční charakteristika uzavřené ozvučnice s jedním reproduktorem



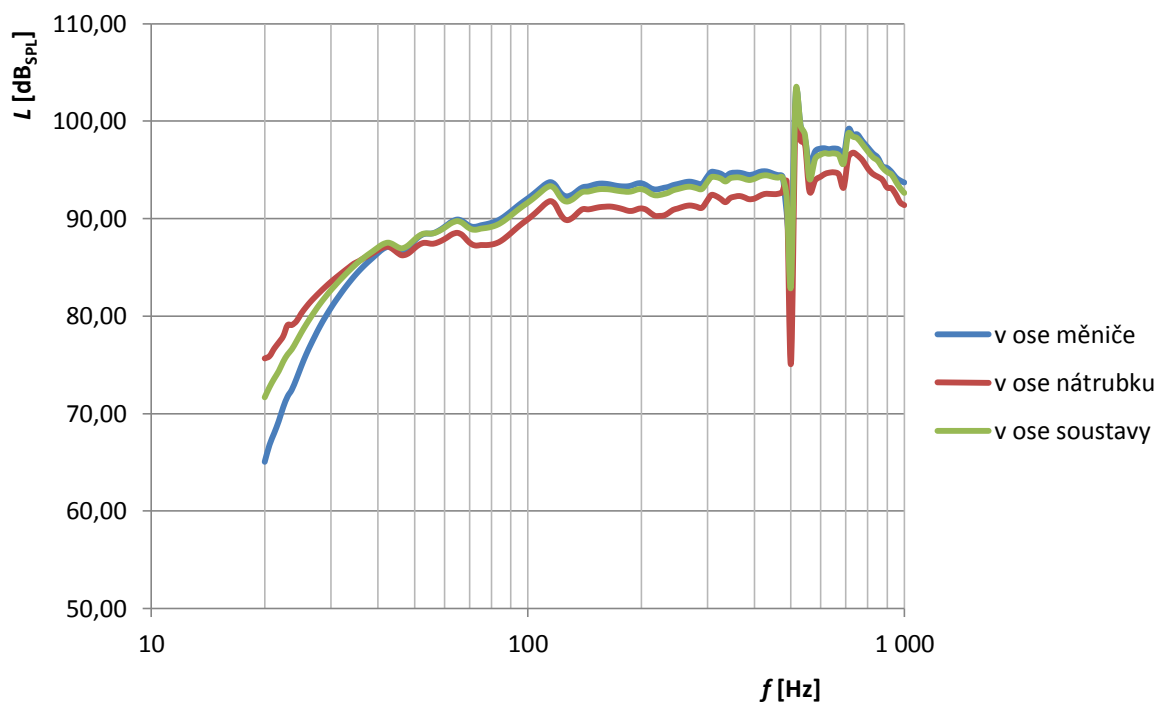
2. Impedanční charakteristika ozvučnice typu Bassreflex s jedním reproduktorem



3. Kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice



4. Kmitočtová charakteristika ozvučnice typu Bassreflex

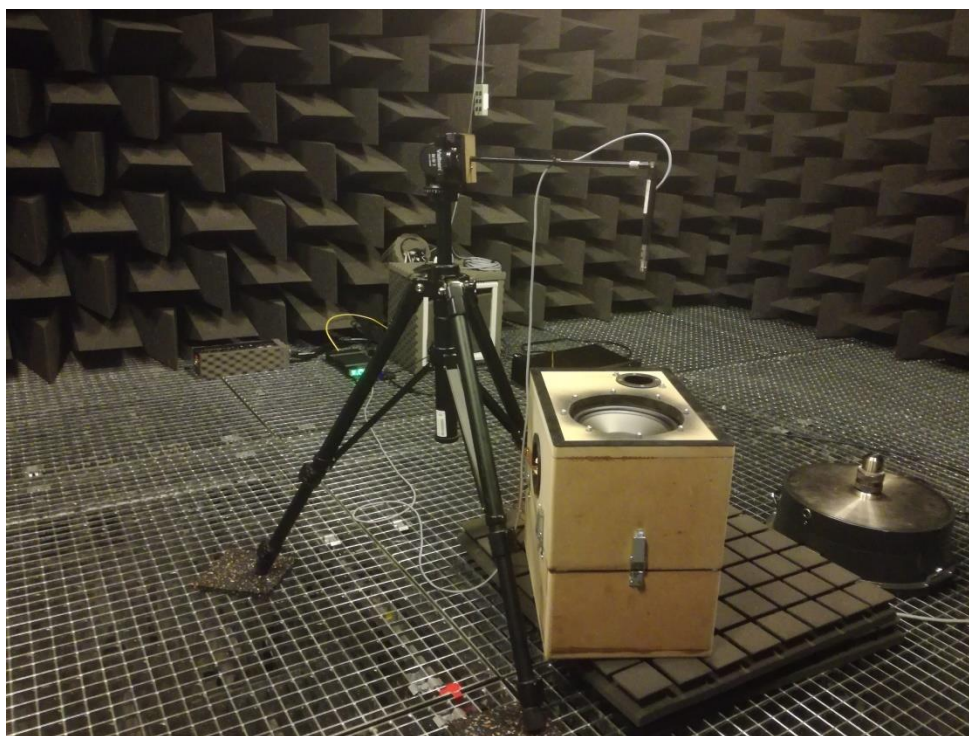


F. Zapojení pracovišť při měření

1. Zapojení pro měření impedanční charakteristiky

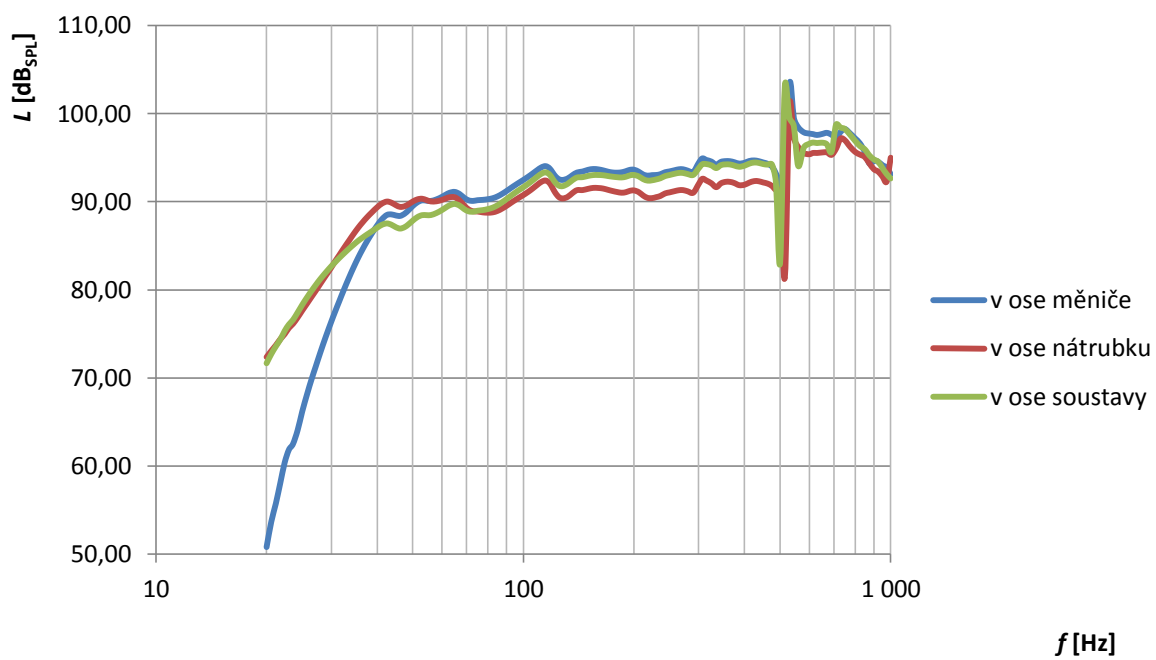


2. Zapojení pro měření kmitočtové charakteristiky

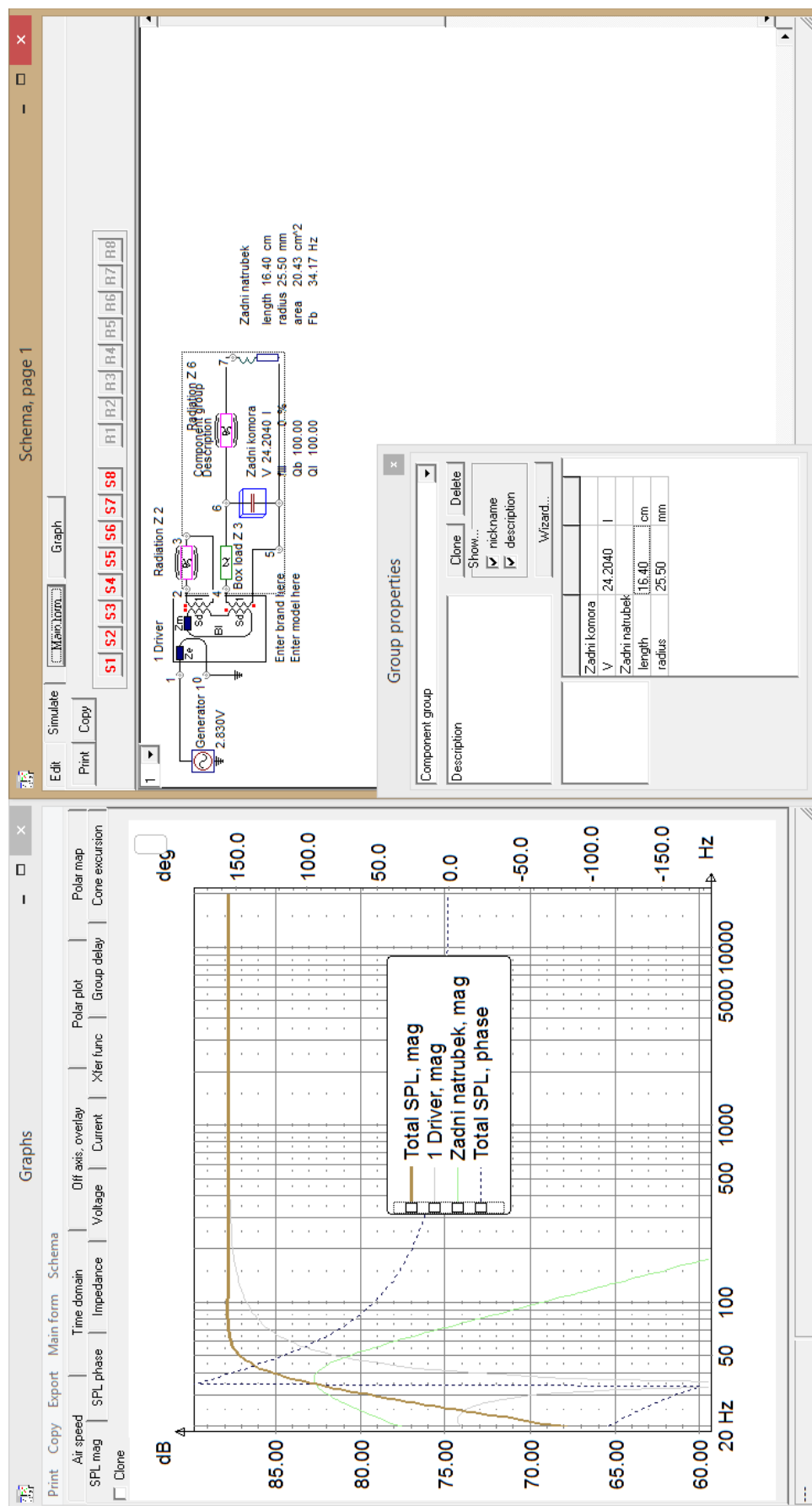


G. Optimalizace

1. Měření kmitočtové charakteristiky



2. Simulace s vypočteným V_{as} pro určení délky nátrubku



3. Simulace s původní délkou nátrubku

