

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Razvoj in analiza dinamičnega tlačnega
generatorja z zvočnikom**

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo

Metka Štefe

Ljubljana, maj 2017

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Razvoj in analiza dinamičnega tlačnega
generatorja z zvočnikom**

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo

Metka Štefe

Mentor: izr. prof. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž.

Ljubljana, maj 2017

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM II. STOPNJE: MAG II/380

NASLOV TEME: Razvoj in analiza dinamičnega tlačnega generatorja z zvočnikom

Osrednji cilj magistrskega dela je razvoj merilnega sistema z generatorjem periodičnih dinamičnih tlačnih sprememb, ki bo v nadaljevanju omogočal raziskave frekvenčnih lastnosti tlačnih povezovalnih cevk. Ciljno frekvenčno območje uporabe je od 1 do 500 Hz. Kot izhodišče načrtovanja dinamičnega tlačnega generatorja naj služi obstoječa izvedba generatorja z dvema zvočnikom, ki pa zaradi konstrukcijskih omejitev ne omogoča zadostne točnosti merjenja referenčnega tlaka pri višjih frekvencah. Za dinamična merjenja tlaka naj se uporabi piezoelektrični merilni sistem.

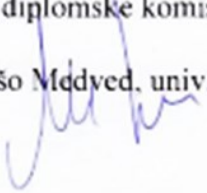
V magistrskem delu predstavite temeljna fizikalna izhodišča dinamičnih tlačnih generatorjev z zvočniki ter piezoelektričnih tlačnih merilnih sistemov, s poudarkom na njihovih frekvenčnih lastnostih in omejitvah. Načrtujte in realizirajte primerno izvedbo dinamičnega tlačnega generatorja s pripadajočim tlačnim merilnim sistemom, ki bo omogočal računalniško podprta merjenja prek programskega okolja LabVIEW. V okviru eksperimentalne analize izvedite meritve amplitudnih in faznih frekvenčnih značilnic izvedenega sistema. Poseben poudarek naj bo na oceni amplitudnih in faznih dinamičnih merilnih pogreškov za tlačne merilne signale na različnih odjemnih mestih tlaka na generatorju.

Magistrsko delo je treba oddati v jezikovno in terminološko pravilnem slovenskem jeziku. Rok za oddajo tega dela je šest mesecev od dneva prevzema.

Mentor


izr. prof. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž.

Predsednik diplomske komisije


prof. dr. Sašo Medved, univ. dipl. inž.

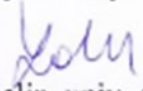
Podpisana sem delo
prevzela v Ljubljani

dne14.4.2017.....

Podpism3tka.....



Prodekan za pedagoško dejavnost
II. in III. stopnje


prof. dr. Mitjan Kalin, univ. dipl. inž.

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem izr. prof. dr. Jožetu Kutinu, ki mi je omogočil izdelavo magistrskega dela, za mentorstvo in izkazano zaupanje.

Še posebno bi se rada zahvalila asistentu dr. Andreju Svetetu za usmerjanje in pomoč pri načrtovanju ter izvedbi eksperimentalnega preizkušanja merilnega sistema. Zahvala gre tudi vsem ostalim članom laboratorija LMPS za nasvete in pomoč pri delu v laboratoriju.

Izjava

1. Spodaj podpisana Metka Štefe, rojena 20. 04. 1992 v Kranju, študentka Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, izjavljam, da sem magistrsko delo z naslovom Razvoj in analiza dinamičnega tlačnega generatorja z zvočnikom, izdelala samostojno v sodelovanju z mentorjem izr. prof. dr. Jožetom Kutinom.
2. Izjavljam, da je magistrsko delo, ki sem ga oddala v elektronski obliki, identično tiskani verziji.
3. Izrecno izjavljam, da v skladu z določili Zakona o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 21/1995 s spremembami) dovolim objavo magistrskega dela na spletnih straneh Fakultete in Univerze v Ljubljani.
4. Spodpisom se strinjam z javno objavo svojega magistrskega dela na straneh na svetovnem spletu preko Repozitorija Univerze v Ljubljani.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo besedilo rezultat izključno mojega lastnega raziskovalnega dela;
- je predloženo besedilo jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih del, kar pomeni, da sem:
 - poskrbela, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam v magistrskem delu, citirana oziroma navedena v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih del, in
 - pridobila vsa dovoljenja za uporabo uporabljenih podatkov in avtorskih del, ki so v celoti (v pisni ali grafični obliki) uporabljena v tekstu, in sem to v besedilu tudi jasno zapisala;
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku (Ur. l. RS, št. 55/2008 s spremembami);
- se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predloženega magistrskega dela dokazano plagiatorstvo lahko predstavljalo za moj status na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani v skladu z relevantnim pravilnikom.

V Ljubljani, dne 17.05.2017

Podpis avtorice: _____

Razvoj in analiza dinamičnega tlačnega generatorja z zvočnikom

Metka Štefe

Ključne besede: dinamični tlačni generator
 elektrodinamični zvočnik
 merjenje tlačnih sprememb
 piezoelektrični merilni sistem
 amplitudno frekvenčna značilnica
 fazno frekvenčna značilnica
 dinamični merilni pogrešek

V magistrskem delu smo razvili, izdelali in analizirali merilni sistem z dinamičnim tlačnim generatorjem, ki bo omogočal raziskave frekvenčnih lastnosti tlačnih povezovalnih cevk. Razviti dinamični tlačni generator sestavlja en elektrodinamični zvočnik, s katerim generiramo stabilne in nastavljive periodične tlačne spremembe znotraj zračne komore, omejene z ohišjem sistema. Pri dimenzioniranju štirih merilnih mest za odjem tlaka smo upoštevali dimenzijske lastnosti uporabljenih piezoelektričnih merilnikov tlaka in drugih priključnih elementov. Zračno komoro smo načrtovali z dovolj veliko prostornino, da je njen vpliv na določevanje frekvenčnih lastnosti povezovalnih cevk relativno majhen. V programskem okolju LabVIEW smo izdelali nadzorni program, ki omogoča računalniško podprta merjenja. S pomočjo preizkusov smo določili amplitudne in fazne frekvenčne značilnice dinamičnega tlačnega generatorja s pripadajočim tlačnim merilnim sistemom. V frekvenčnem območju od 1 do 500 Hz so amplitudni oz. fazni dinamični merilni pogreški tlačnih merilnih signalov znotraj 1,1 % oz. 0,6°.

Abstract

UDC 531.7:621.313.1(043.2)

No.: MAG II/380

Development and analysis of a dynamic pressure generator with a loudspeaker

Metka Štefe

Key words: dynamic pressure generator
 electrodynamic loudspeaker
 pressure pulsations measurement
 piezoelectric measurement system
 amplitude frequency characteristic
 phase frequency characteristic
 dynamic measurement error

In this master thesis we developed, constructed and analyzed the measurement system with a dynamic pressure generator, which will be used in investigations of frequency characteristics of pressure connecting tubes. The developed dynamic pressure generator consists of one electrodynamic loudspeaker that generates stable and adjustable periodic pressure pulsations inside the air chamber limited with the housing of the system. Dimensions of the pressure measuring ports were determined by taking into account dimensional characteristics of the piezoelectric pressure sensors and other connecting elements. The air chamber was designed with sufficiently large volume in order to minimize its effects on determination of frequency characteristics of the connecting tubes. In the LabVIEW programming environment we prepared a control program for computer supported measurements. We experimentally determined the amplitude and phase frequency characteristics of the dynamic pressure generator with associated pressure measuring system. In the frequency range from 1 to 500 Hz the amplitude and phase dynamic measurement errors of the pressure measure signals do not exceed 1.1 % and 0.6°, respectively.

Kazalo

Kazalo slik	xv
Kazalo preglednic	xvii
Seznam uporabljenih simbolov	xix
Seznam uporabljenih okrajšav	xxiii
1. Uvod.....	1
1.1. Ozadje problema.....	1
1.2. Cilji.....	2
2. Teoretične osnove in pregled literature	3
2.1. Dinamično merjenje tlaka.....	3
2.1.1. Pregled dinamičnih tlačnih generatorjev	5
2.1.1.1. Generatorji neperiodičnih dinamičnih tlačnih sprememb	5
2.1.1.2. Generatorji periodičnih tlačnih sprememb.....	7
2.1.1.3. Dinamični tlačni generator z dvema zvočnikoma.....	9
2.2. Piezoelektrični merilni sistem za tlak	11
3. Metodologija raziskave.....	19
3.1. Načrtovanje dinamičnega tlačnega generatorja	20
3.1.1. Fizikalno-matematičen model dinamičnega tlačnega generatorja.....	20
3.1.2. Izvedba dinamičnega tlačnega generatorja	22
3.1.2.1. Preskus tesnosti.....	28
3.2. Merilni sistem.....	30
3.2.1. Merilno-tehnični podatki o merilni in nadzorni opremi	31
3.2.2. Nadzorni program LabVIEW	33
3.3. Potek izvajanja meritev.....	37
4. Rezultati in diskusija	41
4.1. Frekvenčne značilnice dinamičnega tlačnega generatorja	41
4.2. Primerjava frekvenčnih značilnic dveh direktno vgrajenih piezoelektričnih merilnikov tlaka.....	48
4.3. Primer frekvenčne značilnice piezoelektričnega merilnika tlaka s povezovalno cevko	50

5. Zaključki.....	53
6. Literatura	55
7. Priloga A	59
8. Priloga B	63

Kazalo slik

Slika 1.1: Razviti dinamični tlačni generator z elektrodinamičnim zvočnikom (levo) in funkcijskim generatorjem za generiranje vzbujevalnega električnega toka (desno).	1
Slika 2.1: Harmonična tlačna sprememba.	4
Slika 2.2: Amplitudno-frekvenčna območja uporabe najpogostejših dinamičnih tlačnih generatorjev [5].	5
Slika 2.3: Shema delovanja udarne cevi.	6
Slika 2.4: Shema delovanja dinamičnega tlačnega generatorja s hitro odpirajočimi ventilom [3]. ...	6
Slika 2.5: Generator periodičnih tlačnih sprememb s stresalnikom, ki generira silo znotraj pnevmatičnega delovnega valja z eno komoro [12].	7
Slika 2.6: Generator periodičnih tlačnih sprememb s stresalnikom, ki generira silo znotraj pnevmatičnega delovnega valja z dvema komorama [14].	8
Slika 2.7: Dinamični tlačni generator z dvema nasprotnima zvočnikoma v LMPS [1].	10
Slika 2.8: Shematski prikaz piezoelektričnega merilnega zaznavala za silo.	11
Slika 2.9: Piezoelektrični merilni sistem za tlak.	12
Slika 2.10: Amplitudno frekvenčna značilnica dinamskega sistema drugega reda.	13
Slika 2.11: Fazno frekvenčna značilnica dinamskega sistema drugega reda.	14
Slika 2.12: Shematski prikaz vgradnje piezoelektričnega merilnika tlaka s povezovalno cevko [17].	15
Slika 2.13: Visokoprepustni filter prvega reda [21].	16
Slika 2.14: Amplitudno frekvenčna značilnica dinamskega sistema prvega reda.	17
Slika 2.15: Fazno frekvenčna značilnica dinamskega sistema prvega reda.	17
Slika 3.1: Razviti dinamični tlačni generator s pripadajočim merilnim sistemom za določanje frekvenčnih značilnic tlačnih merilnih sistemov.	19
Slika 3.2: Fizikalni model elektrodinamičnega zvočnika [19].	20
Slika 3.3: Zvočnik BEYMA 5MP60/N [23].	23
Slika 3.4: Piezoelektrični merilnik tlaka Kistler, 7261: (a) sestava [24] in (b) mere [25].	24
Slika 3.5: Shema direktne vgradnje in preko povezovalnih cevk merilnika tlaka v ohišje generatorja.	25
Slika 3.6: Odvisnost prostornine zračne komore od globine utora v ohišju generatorja.	26
Slika 3.7: 3D model načrtovanega ohišja dinamičnega tlačnega generatorja z zunanje strani.	27
Slika 3.8: 3D model načrtovanega ohišja dinamičnega tlačnega generatorja z notranje strani.	27
Slika 3.9: Blokovna shema merilnega sistema.	31
Slika 3.10: Blokovni diagram obdelave merilnih signalov v programskem delu sestavljenega nadzornega programa.	35
Slika 3.11: Prikazovalni del sestavljenega nadzornega programa.	36
Slika 4.1: Izmerjeni časovni poteki (a) vzbujevalnega električnega toka, (b) tlaka z merilnikom 1 in (c) tlaka z merilnikom 2 pri vzbujevalni frekvenci 10 Hz.	42
Slika 4.2: Izmerjena frekvenčna značilnica dinamičnega tlačnega generatorja: (a) amplitudna in (b) fazna.	43
Slika 4.3: Izmerjena frekvenčna značilnica amplitudne vzbujevalnega električnega toka.	44

Slika 4.4: Relativni vpliv višjih harmonikov na merilne signale električnega toka in obeh tlakov.	45
Slika 4.5: Izmerjena frekvenčna značilnica z direktno vgrajenima piezoelektričnima merilnikoma tlaka 1 in 2: (a) amplitudnega razmerja in (b) faznega zamika.	47
Slika 4.6: Ocenjeni relativni merilni pogrešek piezoelektričnega merilnika tlaka zaradi vpliva prenesenih vibracij.	48
Slika 4.7: Izmerjena amplitudna razmerja med piezoelektričnima merilnikoma tlaka pri različnih legah zvočnika: (a) lega 1, (b) lega 2, (c) lega 3 in (d) lega 4.	49
Slika 4.8: Izmerjena fazna frekvenčna značilnica med piezoelektričnima merilnikoma tlaka pri različnih legah zvočnika: (a) lega 1, (b) lega 2, (c) lega 3 in (d) lega 4.	50
Slika 4.9: Izmerjena frekvenčna značilnica med primerjalnim in referenčnim tlačnim signalom ob vgradnji enega merilnika s povezovalno cevko: (a) amplitudnega razmerja in (b) faznega zamika.	52

Kazalo preglednic

Preglednica 2.1: Določitev zgornje mejne frekvence za malo dušene dinamske sisteme drugega reda ($\xi \leq 0,1$).....	14
Preglednica 2.2: Določitev spodnje mejne frekvence dinamskega sistema prvega reda.....	18
Preglednica 3.1: Tehnični podatki elektrodinamičnega zvočnika BEYMA 5MP60/N [23].....	23
Preglednica 3.2: Območji nadzornega signala funkcijskega generatorja.....	39

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
A_a	m s^{-2}	amplituda pospeška vibracij
A_I	A	amplituda električnega toka
A_i	/	amplituda izhodnega signala
A_p	Pa	amplituda tlačne spremembe
A_s	/	RMS vrednost harmonika merilnega signala
A_v	/	amplituda vhodnega signala
B	T	gostota magnetnega polja
Bl_t	T m	konstanta zvočnika
C	F	kapacitivnost
c	m s^{-1}	hitrost širjenja tlačne spremembe
D_m	m	premer membrane
d	$\text{N m}^{-1} \text{ s}$	dušilna konstanta
d_c	m	notranji premer tlačne povezovalne cevke
d_m	$\text{N m}^{-1} \text{ s}$	dušilna konstanta membrane
e_φ	°	fazni dinamični merilni pogrešek
e_r	%	relativni merilni pogrešek
$e_{r,amp}$	%	relativni amplitudni dinamični merilni pogrešek
F_{em}	N	magnetna sila
F_p	N	sila tlaka
$F(t)$	N	časovno odvisna sila
f	Hz	vzbujevalna frekvenca
f_{lom}	Hz	lomna frekvenca
f_{sp}	Hz	spodnja mejna frekvenca
f_{vzr}	Hz	frekvenca vzorčenja
f_{zg}	Hz	zgornja mejna frekvenca
f_0	Hz	lastna frekvenca
f_{45°	Hz	frekvenca pri faznem zamiku 45°
f_{135°	Hz	frekvenca pri faznem zamiku 135°
h_u	m	globina utora v ohišju generatorja
h_z	m	višina zvočnika
I	A	vzbujevalni električni tok
K_G	Pa A^{-1}	občutljivost dinamičnega tlačnega generatorja
K_{no}	V C^{-1}	merilna občutljivost nabojnega ojačevalnika
K_{pt}	V Pa^{-1}	merilna občutljivost piezoelektričnega merilnega sistema za tlak
$K_{puš}$	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	konstanta netesnosti
$K_{zaz,pt}$	C Pa^{-1}	merilna občutljivost piezoelektričnega merilnika tlaka
$K_{zaz,po}$	$\text{C m}^{-1} \text{ s}^2$	merilna občutljivost piezoelektričnega pospeškometra
k	N m^{-1}	vzmetna konstanta
k_m	N m^{-1}	vzmetna konstanta membrane
k_z	N m^{-1}	vzmetna konstanta zraka
L	H	induktivnost

l_c	m	dolžina tlačne povezovalne cevke
l_t	m	dolžina žice tuljave
l_z	m	dolžina zvočnika
m	kg	masa
m_m	kg	masa membrane
N	/	število vzorcev
P	Pa	absolutni tlak
$P(t)$	Pa	časovno odvisno tlačno stanje
p	Pa	dinamična komponenta tlaka
$p(t)$	Pa	časovno odvisna dinamična komponenta tlaka
p_{ok}	Pa	tlak okolice
p_0	Pa	začetni absolutni tlak
q	C	električni naboj
q_m	kg s ⁻¹	masni tok puščanja
q_V	m ³ s ⁻¹	prostorninski tok puščanja
R	Ω	upornost
R_t	Ω	notranja upornost tuljave
S_c	m ²	površina prečnega preseka povezovalne cevke
S_m	m ²	efektivna površina membrane
s_z	m	širina zvočnika
THD_s	%	parameter skupnega harmoničnega popačenja
T	s	perioda tlačne spremembe
t	s	čas
t_{int}	s	čas preklopa med kanali merilne kartice
U	V	električna napetost
$U(t)$	V	časovno odvisna vzbujevalna električna napetost
U_{ind}	V	inducirana električna napetost
U_j	V	električna napetost nadzornega signala
u	V	električna napetost signala
V	m ³	prostornina
$V(t)$	m ³	časovno odvisna prostornina
V_m	m ³	prostornina zraka znotraj membrane
V_{oh}	m ³	prostornina zraka znotraj ohišja generatorja
V_{pm}	m ³	notranja prostornina merilnika tlaka
V_0	m ³	povprečna prostornina zračne komore
x	m	pomik
$x_{m,max}$	m	največji pomik membrane
$x(t)$	m	časovno odvisni pomik membrane
κ	/	adiabatni eksponent
λ	m	valovna dolžina
ξ	/	dušilni razmernik
ρ	kg m ⁻³	gostota
τ	s	časovna konstanta
φ	°	fazni zamik
φ_I	°	fazni zamik električnega toka
φ_{int}	°	fazni zamik preklopnika merilne kartice
φ_p	°	fazni zamik tlačne spremembe

Indeksi

1	prvi piezoelektrični merilni sistem za tlak
1 %	eno odstotni
2	drugi piezoelektrični merilni sistem za tlak
5 %	pet odstotni
a	vpliv vibracij
c	tlačna povezovalna cevka
G	dinamični tlačni generator
g	gibna
i	zaporedno število harmonika
j	zaporedna merilna točka
n	notranji
no	nabojni ojačevalnik
pt	piezoelektrični merilni sistem za tlak
po	piezoelektrični merilni sistem za pospešek
puš	puščanje
V	vpliv razmerja prostornin
z	zrak, zunanji

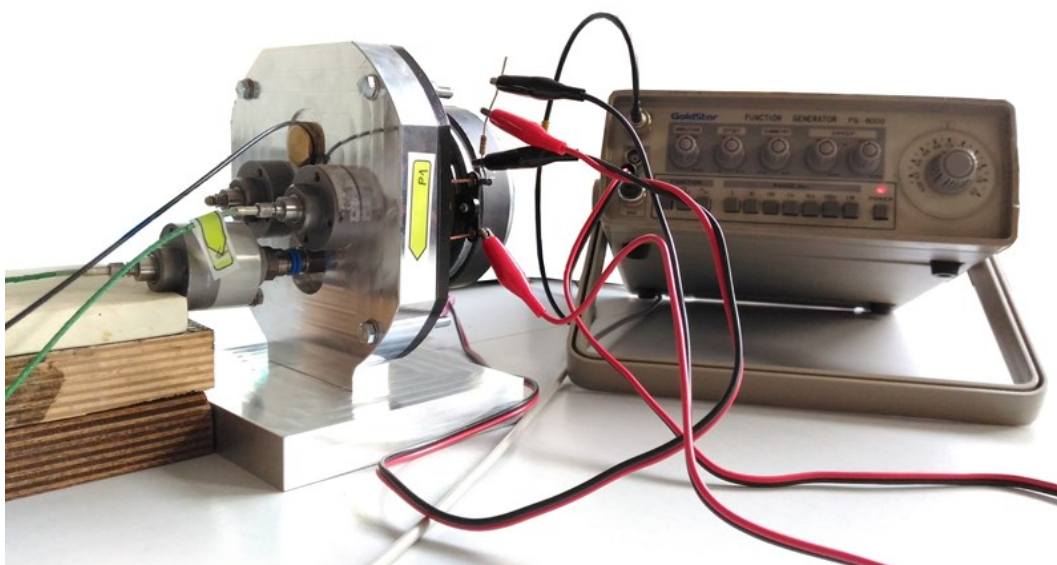
Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
DAQ	zajemanje podatkov (ang. <i>data-acquisition</i>)
FFT	hitra Fourierova transformacija
LabVIEW	programsko okolje za nadzor, zajem in obdelavo merilnih signalov (ang. <i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>)
LMPS	Laboratorij za meritve v procesnem strojništvu
MR	merilni razpon
RMS	srednja korenska vrednost (ang. <i>root mean square</i>)
THD	skupno harmonično popačenje (ang. <i>total harmonic distortion</i>)

1. Uvod

1.1. Ozadje problema

S tehnološkim napredkom so tehnični procesi v napravah vse hitrejši in zahtevnejši, s čimer se večajo zahteve po zanesljivem in točnem merjenju procesnih veličin. Eden izmed ključnih parametrov so tlačne spremembe, ki jih lahko v najširšem frekvenčnem območju merimo pri direktni vgradnji merilnikov tlaka. V mnogih sistemih zaradi prostorskih, temperaturnih ali drugih omejitev ni mogoča vgradnja merilnikov tlaka na mesto odvzema tlaka, zato je potrebna uporaba tlačnih povezovalnih elementov, kot je na primer povezovalna cevka. Leta ima kot sestavni element merilnega sistema določen vpliv na dinamične lastnosti merjenja tlaka. Z namenom vrednotenja vpliva tlačnih povezovalnih cevk smo razvili dinamični tlačni generator z enim elektrodinamičnim zvočnikom, ki bo omogočal merjenje tlačnih sprememb direktno ali/in preko povezovalnih elementov. Ta je prikazan na sliki 1.1.



Slika 1.1: Razviti dinamični tlačni generator z elektrodinamičnim zvočnikom (levo) in funkcijskim generatorjem za generiranje vzbujevalnega električnega toka (desno).

1.2. Cilji

Cilj in namen magistrskega dela je izdelati merilni sistem za določanje dinamičnih značilnic direktno ali preko povezovalnih cevk vgrajenih piezoelektričnih merilnikov tlaka. S tem namenom je razviti generator periodičnih dinamičnih tlačnih sprememb sestavljen le iz enega elektrodinamičnega zvočnika, saj smo tako lahko direktno vgradili piezoelektrične merilnike tlaka v ohišje generatorja. Slednje predstavlja osnovno prednost razvitega dinamičnega tlačnega generatorja glede na sistem z dvema zvočnikoma, ki tako zaradi konstrukcijskih omejitev ne omogoča zadostne točnosti merjenja tlačnih sprememb pri višjih frekvencah [1, 2].

Pri izbiri elektrodinamičnega zvočnika, ki bi zagotovil čim večje amplitude generiranega tlaka znotraj homogenih tlačnih razmer, smo si pomagali s fizikalno-matematičnim modelom. Na ohišju dinamičnega tlačnega generatorja smo načrtovali štiri merilna mesta za odjem tlaka, glede na mere piezoelektričnega merilnika tlaka in vtično-vijačnih priključkov, pri čemer se morajo le-ta nahajati čim bolj nad sredino membrane zvočnika za zagotovitev čim bolj istočasnega doseganja tlačnih sprememb na vsa mesta. Mere ohišja so bile dimenzionirane tako, da smo z njimi dosegli optimalno velikost prostornine zračne komore, katera omogoča dovolj visoko lastno frekvenco in občutljivost dinamičnega tlačnega generatorja ter hkrati še sprejemljiv vpliv dinamičnih lastnosti merjenja tlaka preko povezovalnih cevk priključenih na piezoelektrični merilnik tlaka.

Z razvojem novega tipa dinamičnega tlačnega generatorja želimo določiti njegove amplitudne in fazne frekvenčne značilnice. Ciljno uporabno frekvenčno območje je od 1 do 500 Hz, pri čemer želimo doseči merjenje tlačnih sprememb z direktno vgrajenima piezoelektričnima merilnikoma tlaka znotraj 1 % amplitudnega dinamičnega merilnega pogreška tlačnega signala in faznega zamika manjšega od 1° . S tem bi omogočili primerno merilno točnost za nadaljnje raziskave dinamičnih značilnic tlačnih povezovalnih cevk.

V magistrskem delu so najprej (poglavje 2) predstavljene teoretične osnove o dinamičnem merjenju tlaka, pregled že obstoječih dinamičnih tlačnih generatorjev in fizikalna izhodišča ter zmogljivosti in omejitve piezoelektričnih tlačnih merilnih sistemov. V poglavju 3 so predstavljeni fizikalno-matematični model, načrtovanje, izvedba in delovanje razvitega dinamičnega tlačnega generatorja. V poglavju 4 so predstavljene eksperimentalno določene amplitudne in fazne frekvenčne značilnice razvitega dinamičnega tlačnega generatorja in primerjava tlačnih merilnih signalov za dva direktno vgrajena piezoelektrična merilnika tlaka ter primer vpliva kratke povezovalne cevke na dinamične lastnosti merjenja tlaka. V poglavju 5 so podani zaključki o lastnostih razvitega dinamičnega tlačnega merilnega sistema.

2. Teoretične osnove in pregled literature

Izhodišče pri razvoju dinamičnega tlačnega generatorja je poznavanje teoretičnih osnov s področja merjenja dinamičnih tlačnih sprememb in pregled že obstoječih dinamičnih tlačnih generatorjev. Uporaba piezoelektričnega tlačnega merilnega sistema za merjenje tlaka zahteva seznanitev z njegovim načelom delovanja in omejitvami.

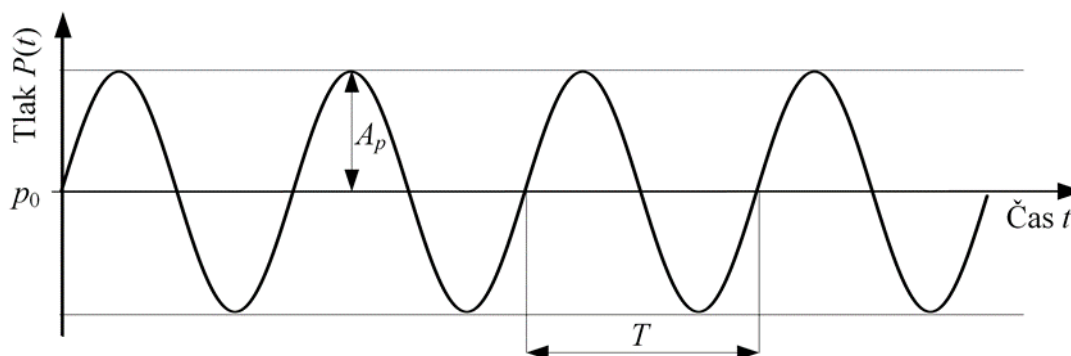
2.1. Dinamično merjenje tlaka

Tlak je skalarna fizikalna veličina stanja, ki predstavlja razmerje med ploskovno porazdeljeno silo in površino ploskve. Pomembna lastnost tlaka je neodvisnost od smeri ploskve, tako tlačna sila v mirujoči tekočini deluje vedno pravokotno na ploskev. V mednarodnem sistemu enot je osnovna enota za tlak pascal. Tlak lahko izrazimo kot absolutni tlak ali kot relativni tlak glede na tlak okolice (nadtlak, podtlak). Tlačna stanja delimo na stacionarna (časovno nespreminjajoča) in nestacionarna (dinamični tlak, tlačne spremembe).

Periodične tlačne spremembe predstavljajo spreminjanje tlaka okoli povprečne vrednosti, ki se ponavlja v enakih časovnih intervalih. Sinusno harmonično nihanje je najpreprostejša oblika periodično spreminjajočega tlačnega stanja, ki ga prikazuje slika 2.1 in ga lahko opišemo kot:

$$P(t) = p_0 + A_p \sin(2\pi f t), \quad (2.1)$$

kjer je p_0 povprečni tlak, A_p amplituda tlačne spremembe, ki predstavlja največji odmik tlaka od povprečne vrednosti tlačne spremembe, in f frekvenca sprememb, ki predstavlja število nihajev na časovno enoto. Slednja je obratno sorazmerna periodi tlačne spremembe $T = 1 / f$.

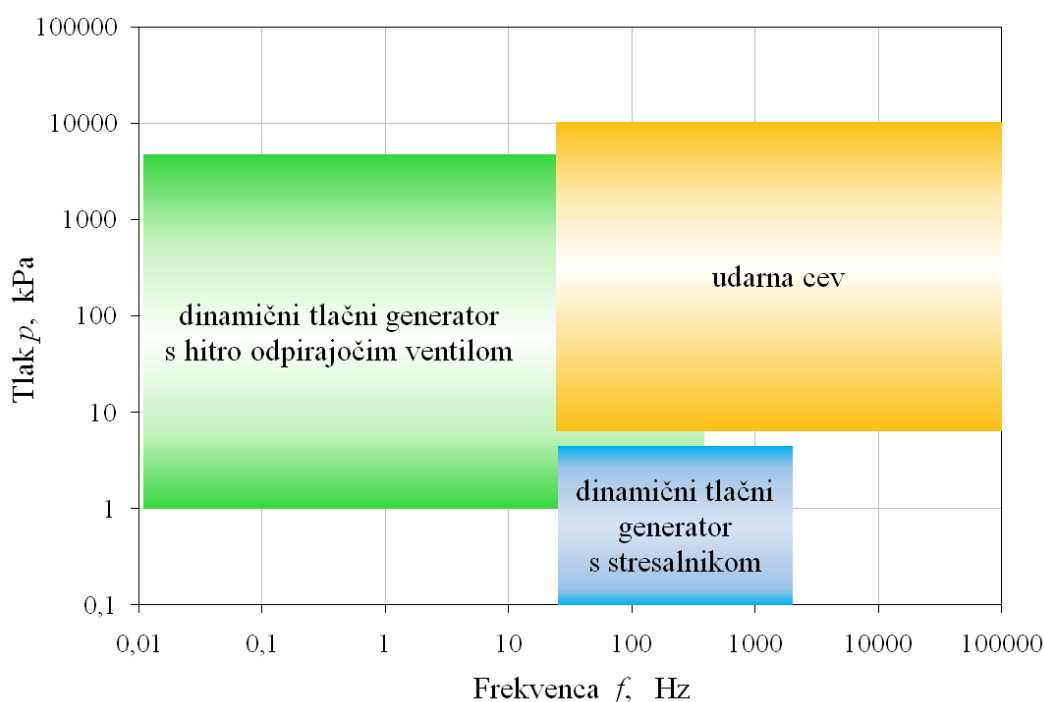


Slika 2.1: Harmonična tlačna sprememba.

Merjenje tlačnih sprememb je pomembno na raznolikih področjih. Pri motorjih z notranjim zgorevanjem je tlak v zgorevalni komori in izpušnem sistemu uporabljen kot kontrolni parameter za določanje količine vbrizganega goriva v delovne valje pri pogoju doseganja čim nižjih emisij in porabe goriva. Pri tem je območje merjenja od relativno majhnih amplitud pri visokih povprečnih tlakih do merjenja pri amplitudah tlačnih sprememb tudi do nekaj MPa in frekvencah do 100 kHz. V avtomobilski industriji se meri tlačne spremembe v še mnogo drugih procesih, kot so sprožilni sistem varnostnih zračnih blazin, tlak olja v zavornih, mazalnih sistemih in prenosnih komponentah ... Krvni tlak s kontinuiranim časovnim spreminjanjem popisuje zdravstveno stanje človeka, zato v medicini zdravniki na podlagi vrednosti in opazovanja tlačnih sprememb krvnega tlaka postavijo diagnoze, nadzirajo zdravstveno stanje kritično bolnih bolnikov in tistih, ki okrevajo po kirurških posegih. Poleg tega se v zadnjih nekaj letih razvijajo implantanti, katere se optimizira na podlagi meritev tlačnih sprememb v človeških sklepih. Merjenje tlačnih sprememb je ključnega pomena pri parnih in plinskih turbinah, ki so v elektrarnah in letalskih reaktivnih motorjih, saj se s pomočjo le-teh določa učinkovitost turbostrojev ter vrednosti izgube tekočine iz sistema. Pri tem se zaradi načina delovanja le-teh pojavljajo relativno majhne amplitude tlačnih sprememb (nekaj Pa) pri običajno visokih povprečnih tlakih v zelo širokem frekvenčnem območju (od nekaj Hz pa tudi do 30 kHz). Zvočni ali akustični tlak, ki se spreminja glede na tlak okolice z nizko amplitudo, se določa pri merjenju notranjega hrupa v stavbah in vozilih, zunanjega hrupa prometa, hrupa gospodinjskih naprav in podobno. Porazdelitev aerodinamičnih sil v časovno odvisnem tlačnem polju se določa pri gradnji nebotičnikov, mostov in aerodinamičnem oblikovanju vozil, tako avtomobilskih kot vesoljskih. Le-to se lahko določa v vetrovnikih, pri čemer običajno nastopajo relativno nizke amplitude tlačnih sprememb do nekaj deset kPa, v frekvenčnem območju od nekaj Hz pa do približno 1 kHz. V proizvodnih procesih merjenje tlačnih sprememb omogoča nadzor in optimizacijo procesa. Pri vbrizgavanju polimerov in tlačnem litju kovin je tlačno stanje osnovni parameter, od katerega je odvisna kakovost izdelka. V vojaški industriji je merjenje tlačnih sprememb prisotno na primer pri razvoju eksplozivov, kjer so zaželeno največje vrednosti amplitud vse do 800 MPa in frekvenc nekaj sto kHz. Zaklonska pa se načrtuje tako, da bi vzdržala zračne udarne valove eksplozij. Zahtevane meritve tlačnih sprememb se zaradi tako velike raznovrstnosti področij med seboj razlikujejo po velikosti povprečnih vrednosti tlaka, vrednosti amplitud in frekvenc [3]. Merilni sistemi za tlak morajo imeti za dinamične meritve poleg sprejemljivih statičnih lastnosti tudi ustrezne dinamične lastnosti, ki se določajo pri dinamičnem umerjanju ter podajajo kot amplitudna in fazna frekvenčna značilnica, lastna frekvenca, dušenje, odzivni čas in podobno [4]. Sestavni del merilnega sistema za dinamično umerjanje tlačnih merilnih sistemov je dinamični tlačni generator.

2.1.1. Pregled dinamičnih tlačnih generatorjev

Dinamični tlačni generatorji so naprave, ki se uporabljajo za generiranje tlačnih sprememb v želenem amplitudnem in frekvenčnem območju, kar omogoča ovrednotenje dinamičnih značilnic merilnikov tlaka v časovni in frekvenčni domeni. Razvitih je že mnogo vrst dinamičnih tlačnih generatorjev, vezanih na raznolikost področij uporabe in zahtev po dinamičnem umerjanju merilnikov tlaka. Slika 2.2 prikazuje najpogostejše uporabljene dinamične tlačne generatorje glede na njihovo amplitudno-frekvenčno območje. Dinamične tlačne generatorje se po navadi deli na dve skupini; neperiodične in periodične [4].



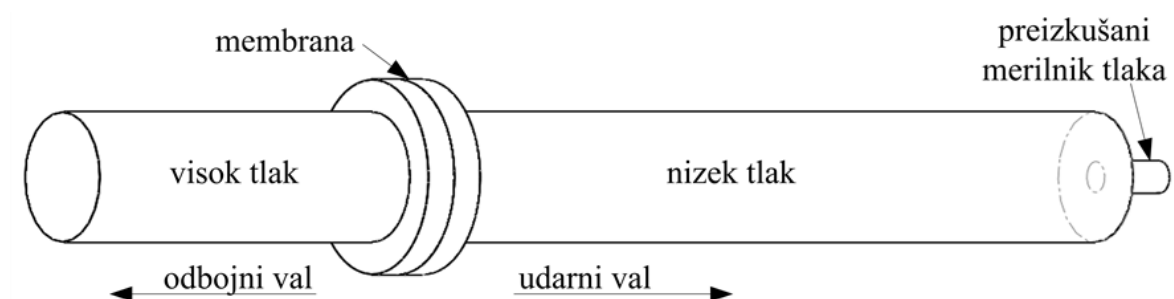
Slika 2.2: Amplitudno-frekvenčna območja uporabe najpogostejših dinamičnih tlačnih generatorjev [5].

2.1.1.1. Generatorji neperiodičnih dinamičnih tlačnih sprememb

Generatorji neperiodičnih dinamičnih tlačnih sprememb, ki generirajo skočne spremembe tlaka ali tlačni pulz, pokrivajo relativno široko področje uporabe merilnikov tlaka, saj so zmožni generirati zelo nizke kot tudi najvišje amplitude v širokem frekvenčnem območju.

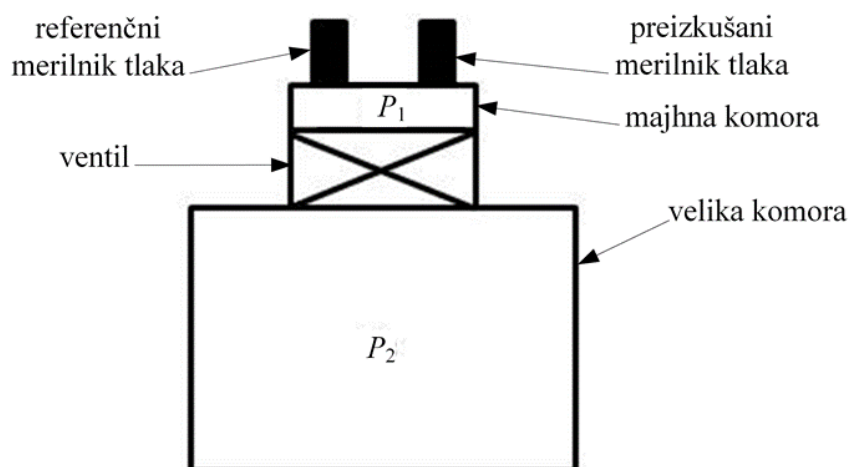
Udarne cev je najpogostejši predstavnik generatorjev neperiodičnih dinamičnih tlačnih sprememb, ki generira udarni val z zelo veliko hitrostjo (do 1500 m s^{-1}) s hipnim pretrganjem tanke membrane zaradi prevelike tlačne razlike med nizkotlačno in visokotlačno cevjo enakih premerov (slika 2.3). Amplituda tlačne spremembe, ki le za trenutek (približno 10^{-8} s) doseže nameščen temperaturno neobčutljiv merilnik tlaka na koncu nizkotlačne cevi, je odvisna od tlačne razlike med cevema, dimenzij in izdelave cevi, vrste membrane ter fizikalnih lastnosti uporabljenega plina. S tem so dosežene skočne spremembe tlaka do

20 MPa v frekvenčnem območju do 500 MHz [3]. Z namenom doseganja čim bolj idealne skočne funkcije se udarna cev preizkuša z različnimi čim bolj idealnimi plini pri trenutni porušitvi membrane [6, 7].



Slika 2.3: Shema delovanja udarne cevi.

Dinamični tlačni generator s hitro odpirajočimi ventilom je sestavljen iz dveh različno velikih komor, med katerima je v obliki ventila odpiralni sistem, ki ob odprtju v zelo kratkem času povzroči tlačno spremembo (slika 2.4). Le-ta je lahko pozitivna ali negativna, odvisno od tlakov v komorah pred odprtjem, katero zaznata dva direktno vgrajena merilnika tlaka v manjši komori. Izvedba omogoča ohranjanje amplitude tlaka (do 18 MPa) za poljuben čas, kar je glavna prednost teh generatorjev v primerjavi z udarnimi cevmi, vendar pa so omejeni na nižje frekvence (le do 10 kHz).



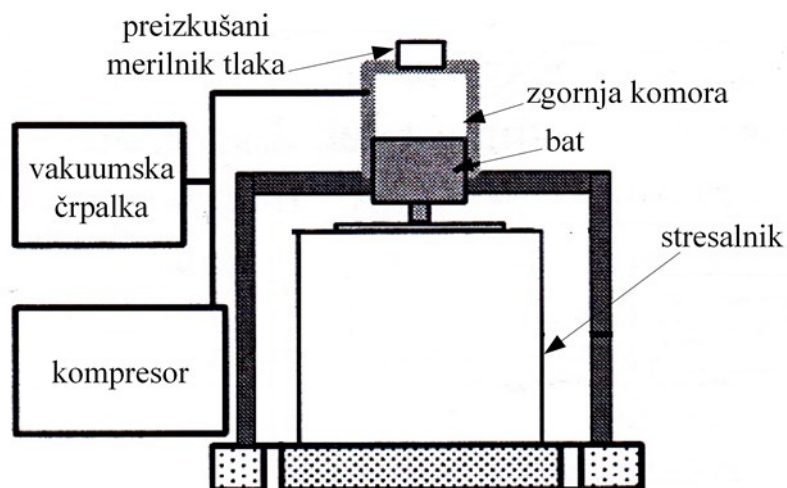
Slika 2.4: Shema delovanja dinamičnega tlačnega generatorja s hitro odpirajočimi ventilom [3].

Dinamični tlačni generator s padajočo utežjo generira neperiodično tlačno spremembo z najenostavnejšo tehniko, in sicer z udarcem uteži na merilnik tlaka, ki je lahko direkten ali posreden (preko bata in nestisljive kapljevine). Ta metoda omogoča doseganje najvišjih amplitud tlačne spremembe od 700 kPa do 800 MPa (odvisno od višine izpusta uteži), pri tem pa je omejena z relativno veliko časovno konstanto (od 1 do 2 ms), kar zmanjša uporabno frekvenčno območje na manj kot 1 kHz [3, 8, 9].

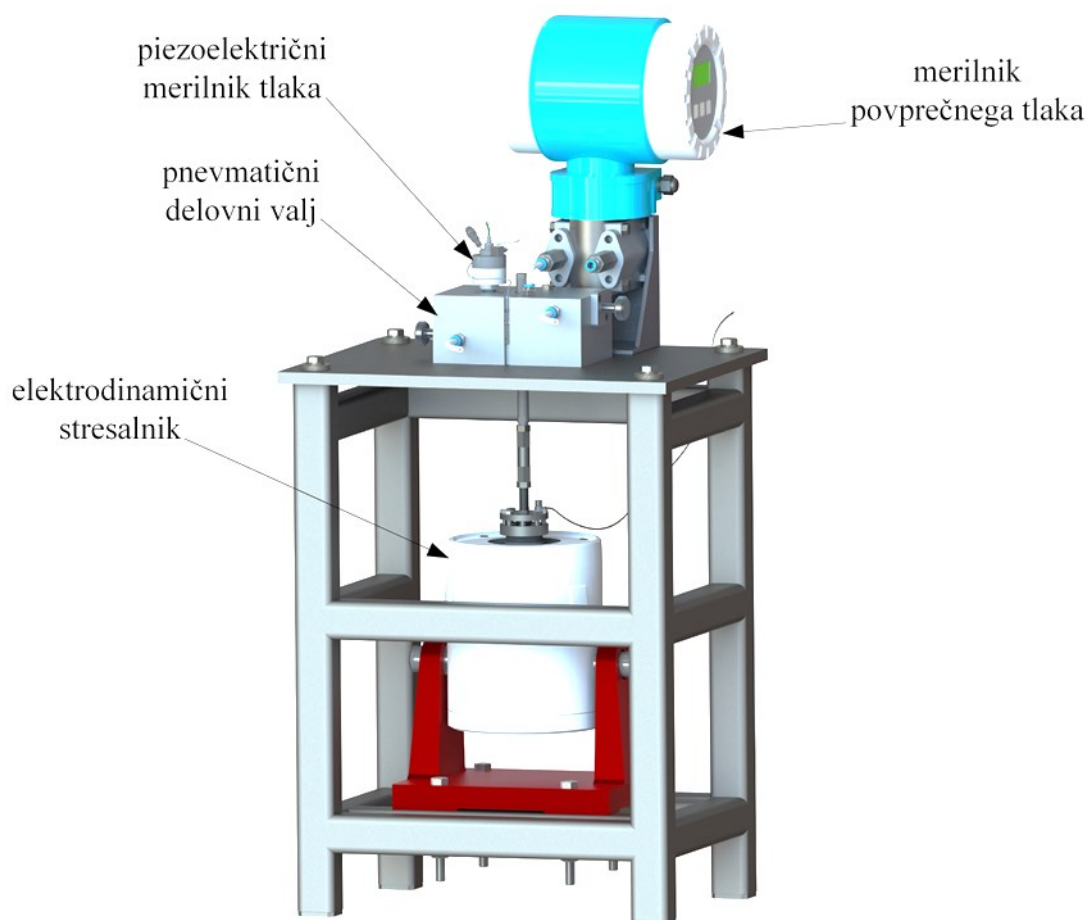
2.1.1.2. Generatorji periodičnih tlačnih sprememb

Generatorji periodičnih tlačnih sprememb generirajo tlačne spremembe v obliki periodične funkcije (harmonične, pravokotne ali druge periodične funkcije), ki v nasprotju z neperiodičnimi ne pokrivajo celotnega področja uporabe merilnikov tlaka (glej sliko 2.2). Osnovno omejitev predstavlja nelinearnost generiranih harmoničnih tlačnih sprememb pri visokih amplitudah in frekvencah v plinastem mediju, ki je posledica fizikalne dinamike realnega plina [5].

Dinamični tlačni generator s stresalnikom, ki deluje na osnovi generiranja sile, generira tlačne spremembe v obliki sinusne funkcije. Sila se lahko harmonično generira neposredno na zaznavalo merilnika tlaka [10] ali posredno na membrano s piezoelektričnim aktuatorjem, ki v tekočini povzroči tlačno spremembo preneseno do merilnikov tlaka [11]. Pogosteje se generira silo posredno preko bata v valju, v katerem je lahko, glede na nadaljnjo uporabo merilnikov tlaka, kapljevina ali plin. Y. Jun et al. [12] so za generiranje mikro-tlačnih sprememb (amplitude tlaka do 150 kPa in frekvence do 500 Hz) uporabili generator s plinom le v zgornji komori valja (slika 2.5). Svete et al. [13] smo z namenom zmanjšanja začetne mehanske prednapetosti na stresalnik, katera je posledica delovanja začetnega tlaka na bat, razvili generator harmoničnih tlačnih sprememb, ki ima obe komori pnevmatičnega delovnega valja vzpostavljeni z enakim začetnim povprečnim tlakom (slika 2.6). S tem smo omogočili umerjanje merilnikov tlaka pri različnih povprečnih tlakih (od 100 kPa do 1000 kPa) in v frekvenčnem območju do nekaj sto Hz, kar pa ni bilo omogočeno s konvencionalnimi pnevmatičnimi delovnimi valji z eno komoro.



Slika 2.5: Generator periodičnih tlačnih sprememb s stresalnikom, ki generira silo znotraj pnevmatičnega delovnega valja z eno komoro [12].



Slika 2.6: Generator periodičnih tlačnih sprememb s stresalnikom, ki generira silo znotraj pnevmatičnega delovnega valja z dvema komorama [14].

Rotirajoč ventil je generator periodičnih tlačnih sprememb, ki so dosežene z vrtenjem rotorja znotraj statorja, med katerima se ustvarita dve komori ločeni s pregrado. Tlak v posamezni komori je različnih vrednosti in tako izmenično deluje na dva merilnika tlaka povezana s kratko tlačno povezovalno cevko do komore statorja. S tem se generirajo periodične tlačne spremembe v obliki pravokotne funkcije z amplitudami do 100 kPa in v odvisnosti od hitrosti vrtenja rotorja frekvence od nekaj Hz do 5 kHz [3, 15].

Sirena za generiranje tlačnih sprememb uporablja spreminjajočo maso oz. količino plina, s čimer se razlikuje od ostalih generatorjev periodičnih tlačnih sprememb, ki za generiranje tlačnih sprememb spreminjajo prostornino plina. Na prvem koncu valjaste komore je nameščen rotirajoči disk z enakomerno porazdeljenimi luknjicami, ki z vrtenjem periodično omogoča izhod masnega toka plina, ki vstopa na sredini komore. S tem se generirajo periodične tlačne spremembe približno sinusne funkcije, katere merita dva merilnika na zaprti strani valjaste komore. Tlačne spremembe dosegajo amplitude do 200 kPa in frekvencah do 10 kHz, pri čemer sta glavni omejitvi zmanjšanje amplitude ob hkratnem zvišanju frekvence s povečano hitrostjo vrtenja diska in ozko uporabno frekvenčno območje zaradi lastne frekvence valjaste komore [3].

Pistonfon je edini komercialno dosegljiv dinamični tlačni generator, ki je namenjen za dinamično umerjanje mikrofонов in nizkotlačnih merilnikov tlaka. Sinusne tlačne

spremembe generira bat v pnevmatičnem delovnem valju, ki ima majhno prostornino komore z namenom doseganja visoke lastne frekvence generatorja. Pistonfoni omogočajo generiranje majhnih amplitud tlačnih sprememb (do 20 μPa) pri točno določeni frekvenci [3].

Zvočnik je elektromehanski pretvornik, ki električno energijo preko mehanskega sistema, ki niha, pretvori v akustično energijo. Najpogostejše mehanski sistem predstavlja membrana, na katero se dovede vzbujevalna sila. Le-to pridobimo s pretvorbo električne energije v mehansko s pomočjo različnih metod, kot so elektrodinamična, elektromagnetna in elektrostatika. Gibanje tuljave tako omogoča premik membrane konusne oblike, ki je vpeta v košaro zvočnika. Zvočnik je lahko uporabljen kot dinamični tlačni generator v primeru njegove vgradnje v ohišje, ki med njima tvori zračno komoro. Znotraj le-te se z gibanjem membrane zvočnika generira periodične tlačne spremembe, ki so omejene na majhne amplitude (do 2 kPa) pri akustičnih frekvencah do 3 kHz [3]. Prednost zvočnika kot generatorja je relativno preprosta izvedba in enostavno ter zanesljivo generiranje tlačnih sprememb, kar omogoča tudi raziskave dinamičnih lastnosti tlačnih povezovalnih cevk. Yoshida et al. [16] so z dinamičnim tlačnim generatorjem z zvočnikom preučevali vpliv premera, dolžine, ukrivljenosti in mesta vgradnje povezovalnih cevk na dinamične lastnosti merjenja tlaka. V Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu so tudi že razvili dinamični tlačni generator z zvočnikom in sicer v izvedbi dveh nasprotnih zvočnikov, ki je opisan v naslednjem podpoglavju, saj predstavlja izhodišče magistrskega dela.

2.1.1.3. Dinamični tlačni generator z dvema zvočnikoma

Kutin in Bajsić [1] sta z namenom analize statičnih in dinamičnih lastnosti merilnikov tlaka razvila dinamični tlačni generator, ki ga sestavljata dva elektrodinamična zvočnika, kateri je prikazan na sliki 2.7. Med njima je bil aluminijski obroč z vgrajenimi priključki za priklop povezovalnih cevk. Skupaj so tvorili zaprto prostornino, katerega velikost se je spreminjala s pozicijo membran. Zaradi spremembe prostornine pri gibanju membran se je na priključkih na obroču pojavljalo tlačno nihanje. Pri določitvi frekvenčnih značilnic so se zavedali omejitve dinamičnega tlačnega generatorja, saj le-ta omogoča merjenje tlačnih sprememb le s priključitvijo merilnika tlaka s povezovalno cevko, katera s svojimi dinamičnimi lastnosti v odvisnosti od premera in dolžine lahko znatno vpliva na amplitudni in fazni dinamični merilni pogrešek merjenega tlaka. Bajsić et al. [17] so teoretično in eksperimentalno dokazali, da je želena visoka lastna frekvenca dosežena pri kratkih povezovalnih cevkah z večjim notranjim premerom.



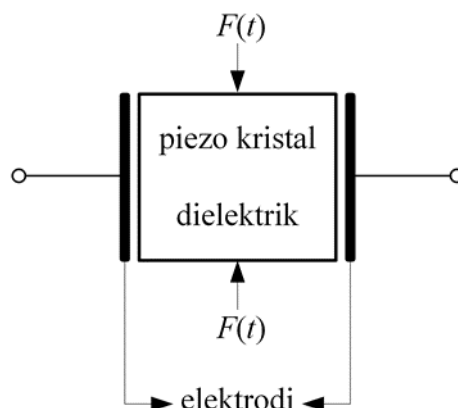
Slika 2.7: Dinamični tlačni generator z dvema nasprotnima zvočnikoma v LMPS [1].

Prednost izvedbe generatorja z nasprotno namestitvijo dveh zvočnikov z vmesno zračno komoro je višja lastna frekvenca generatorja v primerjavi z dinamičnim tlačnim generatorjem z enim zvočnikom, ki bi imel enako prostornino zračne komore, kar je posledica dvakrat večje togosti zraka v sistemu. V tem primeru je manjši tudi vpliv notranje prostornine zraka na statično občutljivost generatorja, ki so jo določili kot razmerje med generiranim tlakom in vzbujevalnim električnim tokom. Pri tem pa je dinamični tlačni generator omejen z največjo dosegljivo statično generirano amplitudo tlaka 1000 Pa zaradi omejitve električnega toka, ki vzbuja zvočnik. Pri višjih vzbujevalnih električnih tokovih se pojavi segrevanje tuljave elektrodinamičnega zvočnika, kar vodi do povišanja upornosti le-te in posledično zmanjšanje električnega toka pri konstantni napajalni napetosti.

Dinamične lastnosti generatorja so odvisne od lastnosti membrane zvočnika, zračne komore in povezovalnih cevk. Z eksperimentalno analizo so z nasprotno ležečima piezoelektričnima tlačnima merilnikoma (z notranjo prostornino 1500 mm³), vgrajenima s kratkima povezovalnima cevka (dolžine približno 50 mm in premera 4 mm), pri sinusnem vzburjanju zvočnika dosegli amplitudne oz. fazne dinamične merilne pogreške tlačnih signalov znotraj 2 % oz. 1° v frekvenčnem območju do 500 Hz. Amplitudno in frekvenčno značilnico generatorja so določili v frekvenčnem območju do 1000 Hz, pri čemer je pri približno 400 Hz lastna frekvenca dinamičnega tlačnega generatorja ter pri približno 600 Hz lastna frekvenca, ki je posledica prostornine zraka znotraj povezovalne cevke in notranje prostornine merilnika.

2.2. Piezoelektrični merilni sistem za tlak

Piezoelektrični merilni sistemi delujejo na osnovi piezoelektričnega učinka, katerega sta leta 1880 odkrila brata Pierre in Jacques Curie. Direktni piezoelektrični učinek je fizikalni pojav, kjer poteka linearno izmenično delovanje med časovno odvisno mehansko obremenitvijo piezoelektričnega materiala in posledično električno polarizacijo nabojev. Piezoelektrični materiali ali kristali so kristali brez osne simetrije, kot so kremenčev kristal, svinčev cirkonat titanat, barijev titanat, barijev fosfid in druge piezoelektrične keramike ter polimeri. Glede na smer obremenitve kristala ločimo vzdolžni ali longitudinalni, prečni ali transverzalni in strižni piezoelektrični učinek, kar pomeni, da so kristali triosno občutljivi in tako omogočajo razvoj namensko različnih merilnih sistemov. V splošnem piezoelektrični merilni sistemi delujejo kot ploščni kondenzator, kjer kristal predstavlja dielektrik, kot je prikazano na sliki 2.8 za primer merjenja sile. Mehanska obremenitev kristala povzroča elastično deformacijo kristalne mreže, ki je sorazmerna generiranemu električnemu naboju. Glede na način delovanja spadajo med aktivna zaznavala, saj ne potrebujejo zunanje napajanja za generiranje merilnega signala. Glavna prednost piezoelektričnih merilnih sistemov je možnost merjenja časovno spremenljivih veličin v širokem frekvenčnem območju zaradi visokih lastnih frekvenc (od 10 kHz do 500 kHz). Poleg tega imajo dobro linearnost, časovno stabilnost, visoko občutljivost ter majhno občutljivost na vplive iz okolice. Glavno omejitev predstavlja neuporabnost za statične meritve, poleg tega so povezovalni vodniki za prenos električnega naboja zelo občutljivi in merilni pretvorniki električnega naboja (nabojni ojačevalniki) relativno dragi [18].

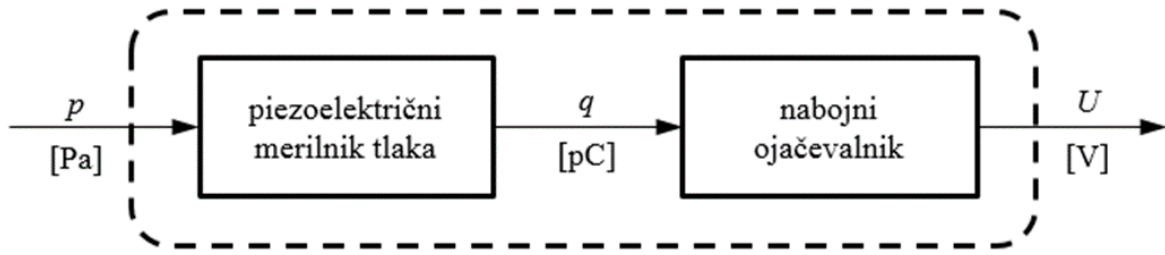


Slika 2.8: Shematski prikaz piezoelektričnega merilnega zaznavala za silo.

Piezoelektrični merilni sistem za tlak sestavljata dva elementa; piezoelektrični merilnik tlaka in nabojni ojačevalnik, kot je prikazano na sliki 2.9. Merilna občutljivost sistema je definirana kot produkt merilne občutljivosti piezoelektričnega merilnika tlaka $K_{\text{zaz,pt}}$ in ojačitve oz. merilne občutljivosti nabojnega ojačevalnika $K_{\text{no,pt}}$:

$$K_{\text{pt}} = K_{\text{zaz,pt}} K_{\text{no,pt}} = \frac{q}{p} \frac{U}{q} = \frac{U}{p}, \quad (2.2)$$

kjer q predstavlja električni naboj, p dinamično komponento tlaka in U izhodno napetost.



Slika 2.9: Piezoelektrični merilni sistem za tlak.

Uporabno frekvenčno območje piezoelektričnega merilnega sistema je omejeno tako pri nizkih kot visokih frekvencah ter je odvisno od dinamičnih lastnosti piezoelektričnega merilnika tlaka ter nabojnega ojačevalnika.

Dinamične lastnosti piezoelektričnega merilnika tlaka lahko opišemo z dinamskim sistemom drugega reda. V primeru harmoničnega vzburjanja $K_{\text{zaz,pt}}$ predstavlja razmerje med amplitudo izhodnega električnega naboja in amplitudo vhodnih tlačnih sprememb, ki pa velja le pri dovolj majhnih vzbujevalnih frekvencah f . V splošnem lahko amplitudno razmerje med izhodnim in vhodnim signalom opišemo z normirano amplitudno frekvenčno značilnico dinamskega sistema drugega reda [19]:

$$\frac{A_i}{A_v} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{f}{f_0}\right)^2}}, \quad (2.3)$$

poleg tega pa se spremeni tudi fazni zamik med signaloma, ki ga določimo s fazno frekvenčno značilnico:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2\xi \frac{f}{f_0}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}\right), \quad (2.4)$$

kjer je f vzbujevalna frekvenca, f_0 lastna frekvenca sistema in ξ dušilni razmernik. Če dinamski sistem drugega reda predstavimo kot model masa-vzmet-dušilka, lahko lastno frekvenco zapišemo kot:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2.5)$$

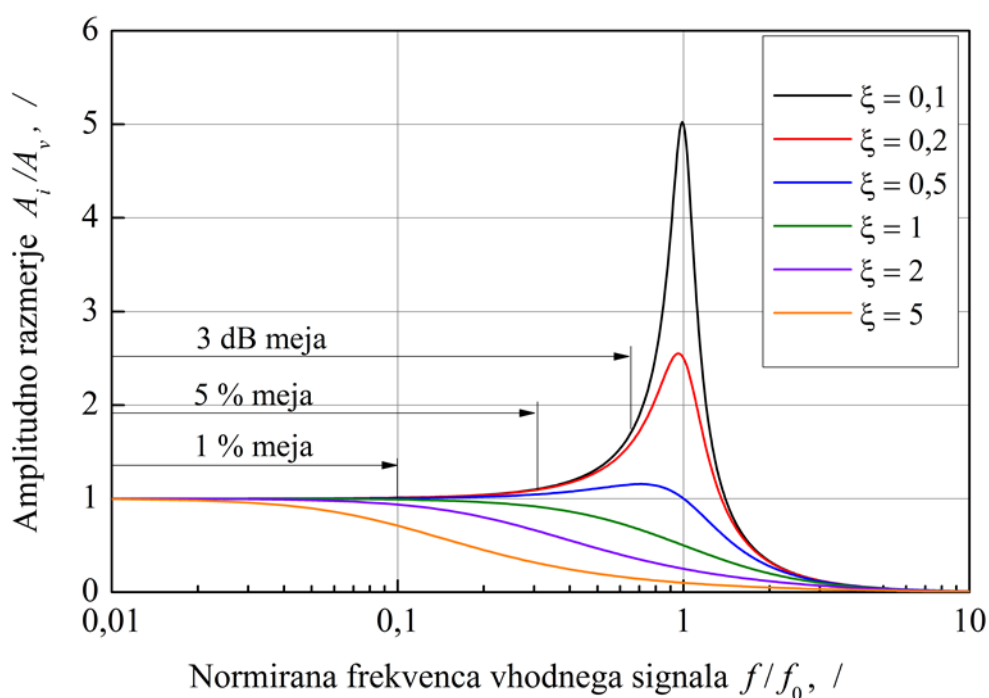
kjer je m masa in k vzmetna konstanta. Dušilni razmernik ξ je poleg lastne frekvence sistema drugi parameter, ki določa dinamične lastnosti dinamskega sistema drugega reda, in je definiran z razmerjem med dejanskim dušenjem sistema in kritičnim dušenjem, ki se pojavi pri lastni frekvenci sistema:

$$\xi = \frac{d}{2 \pi m f_0}, \quad (2.6)$$

kjer je d dušilna konstanta. Glede na vrednost dušilnega razmernika ločimo dinamske sisteme drugega reda na:

- podkritično dušene ($\xi < 1$),
- nadkritično dušene ($\xi > 1$),
- kritično dušene ($\xi = 1$).

Slika 2.10 prikazuje odvisnost amplitudno frekvenčne značilnice dinamskega sistema drugega reda od vrednosti dušilnega razmernika ξ . Za podkritično dušene merilne sisteme velja, da se z večanjem vzbujevalne frekvence v podresonančnem območju ($f < f_0$) povečuje tudi amplitudno razmerje, medtem ko se v nadresonančnem območju ($f > f_0$) amplitudno razmerje zmanjšuje. V resonanci, kjer je vzbujevalna frekvenca enaka lastni frekvenci sistema ($f = f_0$), se amplitudno razmerje poviša, pri čemer je to večje pri manjšem dušenju.

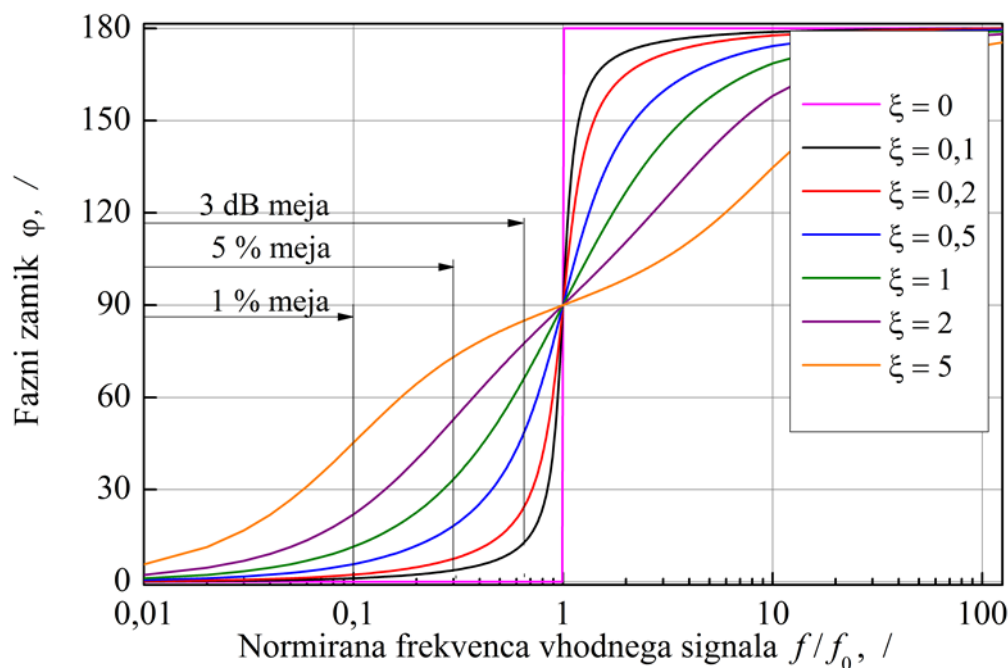


Slika 2.10: Amplitudno frekvenčna značilnica dinamskega sistema drugega reda.

Slika 2.11 prikazuje odvisnost fazno frekvenčne značilnice dinamskega sistema drugega reda od vrednosti razmernika dušenja ξ , kjer je razvidno da je v resonanci fazni zamik enak 90° neodvisno od razmernika dušenja. Razlog temu je ravnovesje med dinamično togostjo sistema in vztrajnostnega učinka. Za primer nedušenega sistema ($\xi = 0$) se v podresonančnem področju dinamična togost sistema zmanjšuje, vendar ostaja pozitivna, zato je odziv v fazi z vzbujevalnim signalom, medtem ko je v nadresonančnem področju vztrajnostni učinek večji od dinamične togosti, zato se odziv zamakne na 180° oz. je v proti fazi z vzbujevalnim signalom. Dušilni razmernik lahko iz rezultatov meritev določimo kot:

$$\xi = \frac{f_{135^\circ} - f_{45^\circ}}{2 f_0}, \quad (2.7)$$

kjer f_{45° oz. f_{135° predstavljata frekvenci pri faznem zamiku 45° oz. 135° .



Slika 2.11: Fazno frekvenčna značilnica dinamskega sistema drugega reda.

Uporabno frekvenčno območje piezoelektričnega merilnika tlaka, ki je malo dušen sistem ($\xi \leq 0,1$), je omejeno z zgornjo mejno frekvenco. Z velikostjo odstopanja glede na amplitudno razmerje ena je v podresonančnem območju določen relativni amplitudni dinamični pogrešek. V preglednici 2.1 je prikazana določitev zgornje mejne frekvence za malo dušene sisteme glede na želen relativni amplitudni dinamični merilni pogrešek, ki s tem hkrati določi tudi fazni dinamični merilni pogrešek pri dani frekvenci. Slednji so označeni tudi na sliki 2.10 in 2.11, iz katerih je razvidno, da za širše uporabno frekvenčno območje potrebujemo čim višjo lastno frekvenco piezoelektričnega merilnika tlaka.

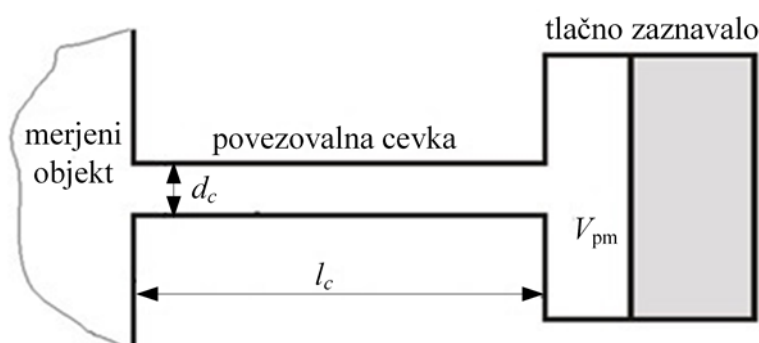
Preglednica 2.1: Določitev zgornje mejne frekvence za malo dušene dinamske sisteme drugega reda ($\xi \leq 0,1$).

zgornja mejna frekvenca f_{zg}	relativni amplitudni dinamični merilni pogrešek $e_{r,amp}$	fazni dinamični merilni pogrešek e_ϕ
$0,1 f_0$	1 %	$\leq 1,2^\circ$
$0,22 f_0$	5 %	$\leq 2,6^\circ$
$0,54 f_0$	29 % (3 dB meja)	$\leq 8,7^\circ$

Direktno vgrajeni piezoelektrični merilniki tlaka imajo visoko lastno frekvenco (od nekaj kHz do MHz), kar omogoča njihovo uporabo v širokem frekvenčnem območju. V primeru vgradnje merilnika preko povezovalnega elementa, kot je tlačna povezovalna cevka (slika 2.12), se lastna frekvenca le-tega močno zniža, saj ima tekočina znotraj povezovalne cevke in notranje prostornine merilnika tlaka občutno nižjo lastno frekvenco, ki jo lahko z uporabo modela za Helmholtzev resonator ocenimo kot:

$$f_{0,c} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_c}{l_c V_{pm}}}, \quad (2.8)$$

kjer c predstavlja hitrost širjenja tlačnih valovanj, S_c notranji prečni presek cevke, l_c dolžino povezovalne cevke in V_{pm} notranja prostornina merilnika tlaka (v nadgrajenem modelu Helmholtzevega resonatorja se namesto V_{pm} upošteva efektivna prostornina, ki upošteva tudi določen vpliv prostornine povezovalne cevke [20]). Zapis je veljaven le v primeru, če ima merjeni objekt mnogo večjo prostornino kot je notranja prostornina tlačnega zaznavala, s čimer le-ta ne vpliva kot dodatna togost sistema na lastno frekvenco sistema povezovalna cevka-merilnik. Slednja se niža z uporabo daljših tlačnih povezovalnih cevk, kar posledično občutno zniža uporabno frekvenčno območje glede na uporabo direktno vgrajenih piezoelektričnih merilnikov tlaka.



Slika 2.12: Shematski prikaz vgradnje piezoelektričnega merilnika tlaka s povezovalno cevko [17].

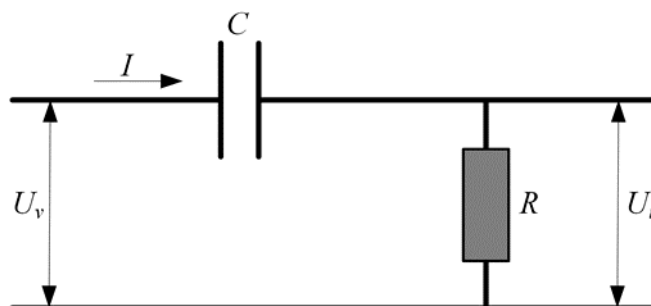
Spodnjo omejitev uporabnega frekvenčnega območja določa vpliv razelektritve v kondenzatorju znotraj nabojnega ojačevalnika. Pri nizkih frekvencah prihaja do izgub električnega naboja, saj kondenzator pri nizkih frekvencah ne prepušča enosmernega električnega toka in zato idealna merilna značilnica nabojnega ojačevalnika velja le pri dovolj visokih frekvencah spreminjanja električnega naboja ($K_{no} = 1/C$). Dinamične lastnosti nabojnega ojačevalnika piezoelektričnega merilnega sistema so analogne visokoprepustnemu napetostnemu filtru, ki je shematsko prikazan na sliki 2.13. Slednji je sestavljen iz kondenzatorja in upora, kjer produkt kapacitivnosti C in upornosti R predstavlja časovno konstanto:

$$\tau = C R, \quad (2.9)$$

slednja pa je obratno sorazmerna lomni frekvenci:

$$f_{lom} = \frac{1}{2\pi\tau}, \quad (2.10)$$

katera predstavlja mejo, kjer je razmerje amplitude izhodnega in vhodnega signala -3 dB oz. 0,707.



Slika 2.13: Visokoprepustni filter prvega reda [21].

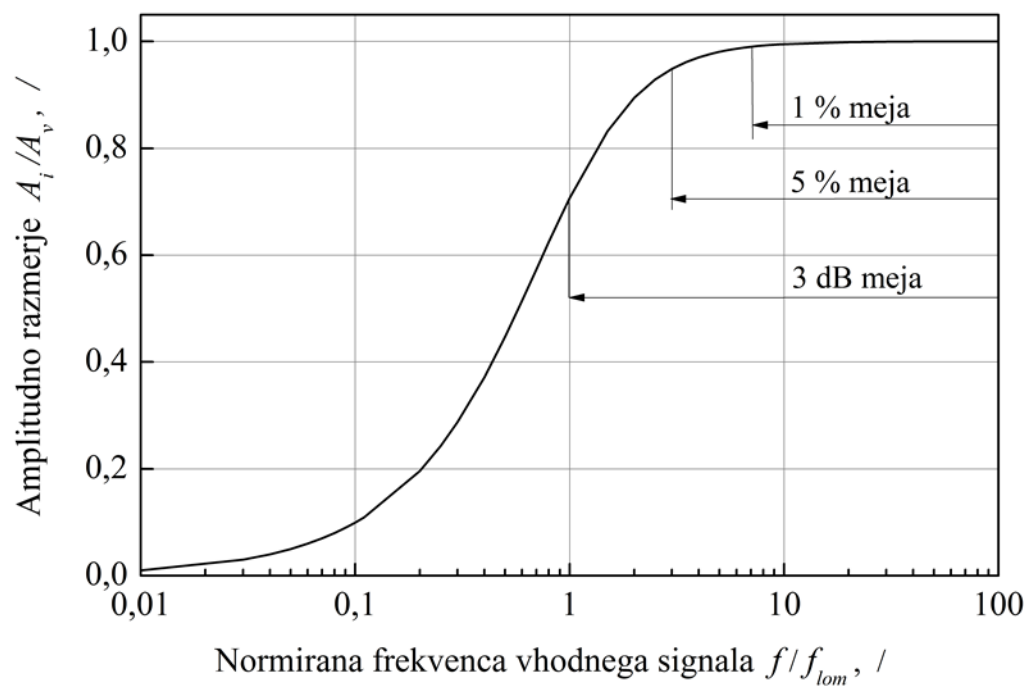
Dinamične lastnosti dinamskega sistema prvega reda določa en parameter, to je časovna konstanta τ oz. lomna frekvenca f_{lom} . Pri obravnavi harmonično vzbujanega sistema v ustaljenem stanju lahko zapišemo normirano amplitudno frekvenčno značilnico dinamskega sistema prvega reda kot:

$$\frac{A_i}{A_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{lom}}\right)^2}}, \quad (2.11)$$

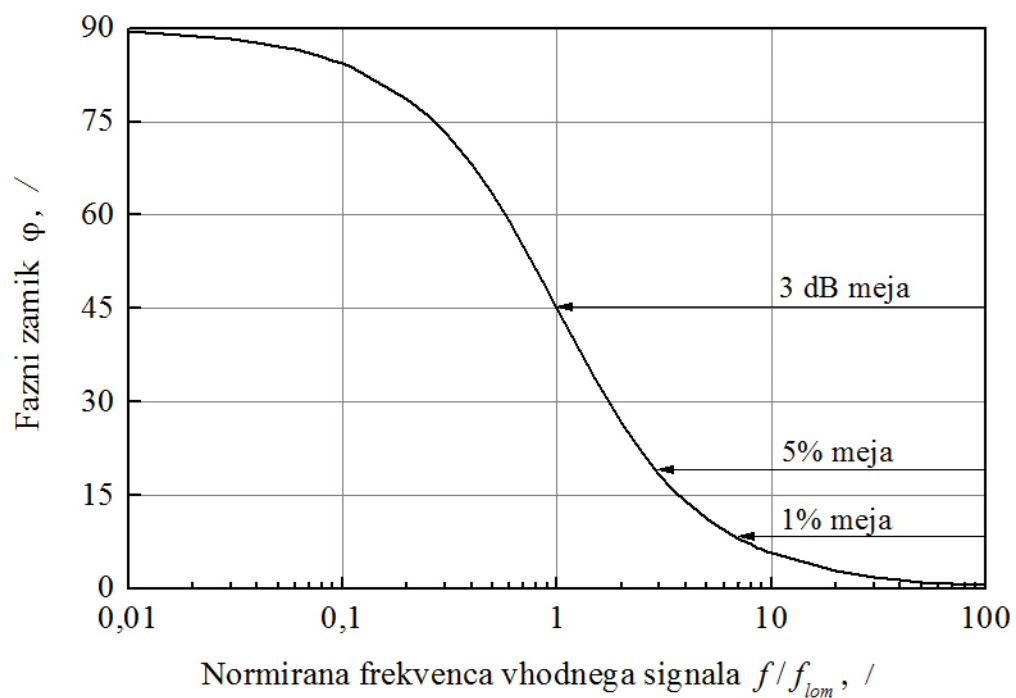
in fazno frekvenčno značilnico:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{f}{f_{lom}}\right). \quad (2.12)$$

Sliki 2.14 in 2.15 prikazujeta amplitudno in fazno frekvenčno značilnico dinamskega sistema prvega reda. Preglednica 2.2 prikazuje določitev spodnje mejne frekvence glede na zelen amplitudni in fazni dinamični merilni pogrešek. Le-ti so označeni tudi na slikah, iz česar je razvidno, da je zaželena uporaba sistemov s čim nižjo lomno frekvenco oz. majhno časovno konstanto, kar omogoča širše uporabno frekvenčno območje.



Slika 2.14: Amplitudno frekvenčna značilnica dinamskega sistema prvega reda.



Slika 2.15: Fazno frekvenčna značilnica dinamskega sistema prvega reda.

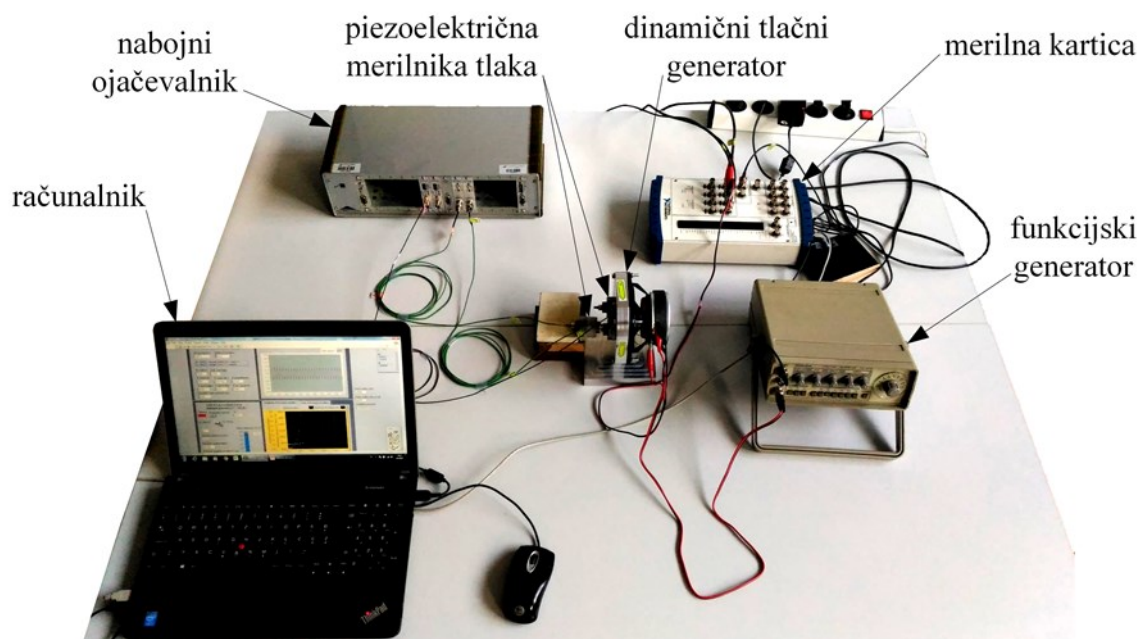
Preglednica 2.2: Določitev spodnje mejne frekvence dinamskega sistema prvega reda.

spodnja mejna frekvenca f_{sp}	relativni amplitudni dinamični merilni pogrešek $e_{r,amp}$	fazni dinamični merilni pogrešek e_{φ}
$7 f_{lom}$	1 %	8,1°
$3 f_{lom}$	5 %	18,4°
f_{lom}	29 % (3 dB meja)	45,0°

Piezoelektrični merilni sistem je tako navzgor omejen z vplivom lastne frekvence piezoelektričnega merilnika tlaka oz. tlačne povezovalne cevke in navzdol z vplivom lomne frekvence nabojnega ojačevalnika, ki glede na želen amplitudni ter fazni dinamični merilni pogrešek definirata uporabno frekvenčno območje.

3. Metodologija raziskave

V Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu (LMPS) smo razvili in analizirali dinamični tlačni generator s pripadajočim piezoelektričnim tlačnim merilnim sistemom, ki je prikazan na sliki 3.1. Načrtovanje sistema je temeljilo na problematiki vpliva povezovalnih elementov v tlačnih merilnih sistemih na dinamične lastnosti merjenja tlaka. V razviti merilni sistem je vgrajen generator periodičnih dinamičnih tlačnih sprememb v obliki enega elektrodinamičnega zvočnika z ohišjem, ki omogoča tako direktno vgradnjo piezoelektričnih merilnikov tlaka kot tudi priključitev preko tlačnih povezovalnih cevk na štirih merilnih mestih za odjem tlaka. Merilni sistem je namenjen določevanju amplitudnih in faznih dinamičnih merilnih pogreškov za harmonične tlačne signale pri različnih načinih vgradnje merilnikov tlaka v frekvenčnem območju do vsaj 500 Hz. Dinamični tlačni generator je načrtovan modularno, da se ga lahko uporabi na različne načine in po potrebi nadgradi.



Slika 3.1: Razviti dinamični tlačni generator s pripadajočim merilnim sistemom za določanje frekvenčnih značilnic tlačnih merilnih sistemov.

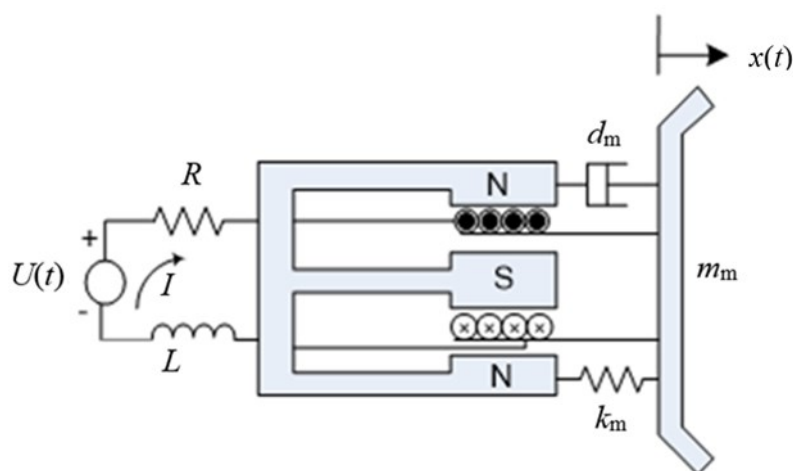
3.1. Načrtovanje dinamičnega tlačnega generatorja

Z namenom merjenja tlačnih sprememb direktno na mestu nastanka smo dinamični tlačni generator razvili v obliki enega elektrodinamičnega zvočnika z ohišjem. Do sedaj razviti dinamični tlačni generatorji z dvema nasprotno ležečima zvočnikoma zaradi konstrukcijskih omejitev omogočajo vgradnjo merilnikov tlaka le preko tlačnih povezovalnih cevk, s čimer je omejena točnost merjenja referenčnega tlaka predvsem pri višjih frekvencah [1]. S tem izhodiščem smo pri dimenzioniranju ohišja dinamičnega tlačnega generatorja načrtovali dve merilni mesti za odjem tlaka, ki bosta omogočali direktno vgradnjo piezoelektričnih merilnikov tlaka. Dve odjemni mesti pa omogočata povezavo merilnika tlaka s tlačno povezovalno cevko, saj bo v prihodnje merilni sistem uporabljen za raziskave frekvenčnih lastnosti le-teh.

3.1.1. Fizikalno-matematičen model dinamičnega tlačnega generatorja

Načrtovan dinamični tlačni generator z enim elektrodinamičnim zvočnikom in ohišjem, med katerima je zračna komora, je mogoče poenostavljeno popisati kot dinamski sistem drugega reda. Zvočnik je elektromehanski sistem, pri katerem elektromagnetni učinek uporabimo za generiranje gibanja mehanskih delov (membrane) zvočnika, kar rezultira v tlačnih spremembah v zračni komori.

Burton [19] je predstavil poenostavljen model zvočnika (slika 3.2), kjer je z upoštevanjem modela z zgoščenimi parametri membrana modelirana kot mehanski oscilator z določeno maso, vzmetno konstanto in dušilno konstanto. Na membrano je pritrjena tuljava, ki se nahaja v magnetnem polju permanentnega magneta. Ko skozi tuljavo steče električni napajalni signal, prične med tuljavo in magnetom delovati elektromagnetna sila, kar povzroči premik tuljave in posledično premik membrane.



Slika 3.2: Fizikalni model elektrodinamičnega zvočnika [19].

Magnetno silo, ki deluje na membrano, lahko zapišemo preko definicije, ki velja za vodnik v magnetnem polju, skozi katerega teče električni tok:

$$\mathbf{F}_{em} = \int \mathbf{B} \times d\mathbf{l}_t I, \quad (3.1)$$

kjer $\mathbf{B}$ predstavlja gostoto magnetnega polja, v katerem je tuljava, I vzbujevalni električni tok skozi žico tuljave in l_t efektivno dolžino žice tuljave, na katero deluje magnetno polje. Slednja je odvisna od premera tuljave in števila ovojev. V primeru, da na vodnik deluje homogeno magnetno polje v pravokotni smeri, lahko magnetno silo zapišemo kot:

$$F_{em} = B l_t I, \quad (3.2)$$

kjer $B l_t$ predstavlja konstanto zvočnika in I vzbujevalni električni tok. V primeru sinusnega vzbujanja membrane ga lahko zapišemo kot :

$$I = A_I \sin(2\pi f t - \varphi_I), \quad (3.3)$$

kjer A_I predstavljata amplitudo in φ_I začetni fazni zamik vzbujevalnega električnega toka. Masa, togost in dušenje membrane zvočnika so konstantne, tako sledi enačba gibanja membrane brez vpliva okoliškega plina:

$$m_m \ddot{x}(t) + d_m \dot{x}(t) + k_m x(t) = B l_t I, \quad (3.4)$$

kjer je $x(t)$ pomik, $\dot{x}(t)$ hitrost in $\ddot{x}(t)$ pospešek membrane zvočnika ter m_m efektivna masa, d_m dušilna konstanta in k_m vzmetna konstanta membrane zvočnika. Efektivna površina membrane elektrodinamičnega zvočnika S_m je predpostavljena konstantna v območju majhnih periodičnih sinusnih pomikov $x(t)$, kar povzroči spremembo prostornine zračne komore:

$$V(t) = V_0 - S_m x(t), \quad (3.5)$$

kjer V_0 predstavlja povprečno prostornino zračne komore. V primeru, da so mere le-te relativno majhne v primerjavi z valovno dolžino generiranih tlačnih sprememb, lahko v akustičnem modelu predpostavimo generiranje krajevno homogenih tlačnih sprememb [22]. Najdaljša linearna dimenzija zračne komore tako, glede na definicijo valovne dolžine kot razmerja med zvočno hitrostjo v plinu in generirano frekvenco ($\lambda = c / f$), omeji frekvenčno območje. Znotraj zaprtega sistema plina, kjer so relativno majhni pomiki z visokimi frekvencami, lahko zapišemo povezavo med časovno odvisno komponento tlaka in pomikom membrane kot [20]:

$$p(t) = \frac{\kappa S_m p_0}{V_0} x(t), \quad (3.6)$$

kjer je p_0 povprečni tlak plina v zaprti komori dinamičnega tlačnega generatorja in κ adiabatni eksponent. Termodinamične spremembe v plinu pri višjih frekvencah lahko obravnavamo kot adiabatne, medtem ko se je potrebno zavedati, da je pri relativno počasnih spremembah bolj smiselna predpostavka izotermnega sistema s $\kappa = 1$ [1, 20]. Ker je v zaprtem prostoru zrak s svojimi elastičnimi lastnostmi, le-ta vpliva na membrano kot dodatna vzmetna sila z vzmetno konstanto k_z :

$$F_p = p(t)S_m = k_z x(t); \quad k_z = \frac{\kappa S_m^2 p_0}{V_0}, \quad (3.7)$$

katero je potrebno upoštevati v enačbi gibanja membrane dinamičnega tlačnega generatorja:

$$m_m \ddot{x}(t) + d_m \dot{x}(t) + (k_m + k_z) x(t) = B l_t I. \quad (3.8)$$

V stacionarnih razmerah mora obstajati enakost med vzbujevalno silo in kombiniranim vplivom sile zaradi togosti zraka in togosti membrane:

$$(k_m + k_z)x = B l_t I, \quad (3.9)$$

od koder sledi statična občutljivost tlačnega generatorja, definirana kot razmerje med spremembo tlaka in spremembo vzbujevalnega električnega toka, ki velja v stacionarnih razmerah oz. pri dovolj nizkih vzbujevalnih frekvencah:

$$K_G = \frac{p}{I} = \frac{B l_t}{S_m} \frac{1}{1 + \frac{k_m}{k_z}}. \quad (3.10)$$

V osnovi je statična občutljivost linearno odvisna od razmerja med $B l_t$ konstanto zvočnika in efektivno površino membrane, v zadnjem členu pa je opazen še vpliv razmerja med togostjo membrane in togostjo zraka v zaprti komori.

Lastna frekvenca dinamičnega tlačnega generatorja je glede na enačbo (3.8), ki predstavlja dinamski model drugega reda, definirana kot (glej podpoglavje 2.2):

$$f_{0,G} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m + k_z}{m_m}}. \quad (3.11)$$

Kutin in Bajsić [1] sta eksperimentalno potrdila, da je $k_m \ll k_z$, torej je lastna frekvenca sistema močno odvisna od lastnosti prostornine zraka znotraj zračne komore.

3.1.2. Izvedba dinamičnega tlačnega generatorja

V Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu (LMPS) želimo, da bi v prihodnje izvedli raziskave frekvenčnih lastnosti tlačnih povezovalnih cevk (dolžine med 0,2 in 2 m ter notranjega premera med 1 in 4 mm) v frekvenčnem območju od 1 do 500 Hz. Za analizo vpliva dolžine in premera povezovalnih cevk med objektom merjenja ter merilnikom tlaka na amplitudni in fazni dinamični merilni pogrešek je potrebno dobro poznavanje frekvenčnih lastnosti dinamičnega tlačnega generatorja. Izhodiščna izvedba pri načrtovanju je generator z dvema nasprotnima zvočnikoma, ki pa zaradi same konstrukcijske izvedbe ne omogoča direktne vgradnje merilnika tlaka in s tem omejuje točnost določanja referenčnega tlaka. Pri načrtovanju novega dinamičnega tlačnega generatorja je bil predpogoj, da bo slednji omogočal tako direktno vgradnjo merilnikov tlaka kot tudi vgradnjo le-teh s tlačno povezovalno cevko. Direktna vgradnja dveh piezoelektričnih merilnikov tlaka bo omogočala

oceno merilne zmogljivosti uporabljenega merilnega sistema, torej določitev amplitudnih in faznih dinamičnih merilnih pogreškov med obema tlačnima signaloma. Slednji bodo kot referenčne vrednosti tega merilnega sistema uporabljeni v nadaljnjih raziskavah vpliva dinamike tlačnih povezovalnih cevk na točnost merjenja tlaka.

Razviti dinamični tlačni generator bo za generiranje periodičnih tlačnih sprememb uporabljal en elektrodinamični zvočnik, in sicer BEYMA 5MP60/N (slika 3.3). Izbira zvočnika je temeljila na doseganju čim večje amplitude generiranega tlaka, ki je posledica čim večjega razmerja med Bl_t konstanto zvočnika in površino membrane (glej enačbo (3.10)). Ohišje generatorja je načrtovano tako, da se prilega zunanjim meram zvočnika, glej preglednico 3.1, in s svojo obliko nalega na 6 mm širok rob membrane, s čimer omogoča tesnjenje zaprte prostornine. Pri tem je bilo potrebno zagotoviti čim krajšo linearno dimenzijo zračne komore, saj v tem primeru lahko predpostavimo homogeno generirano tlačno stanje znotraj zračne komore.

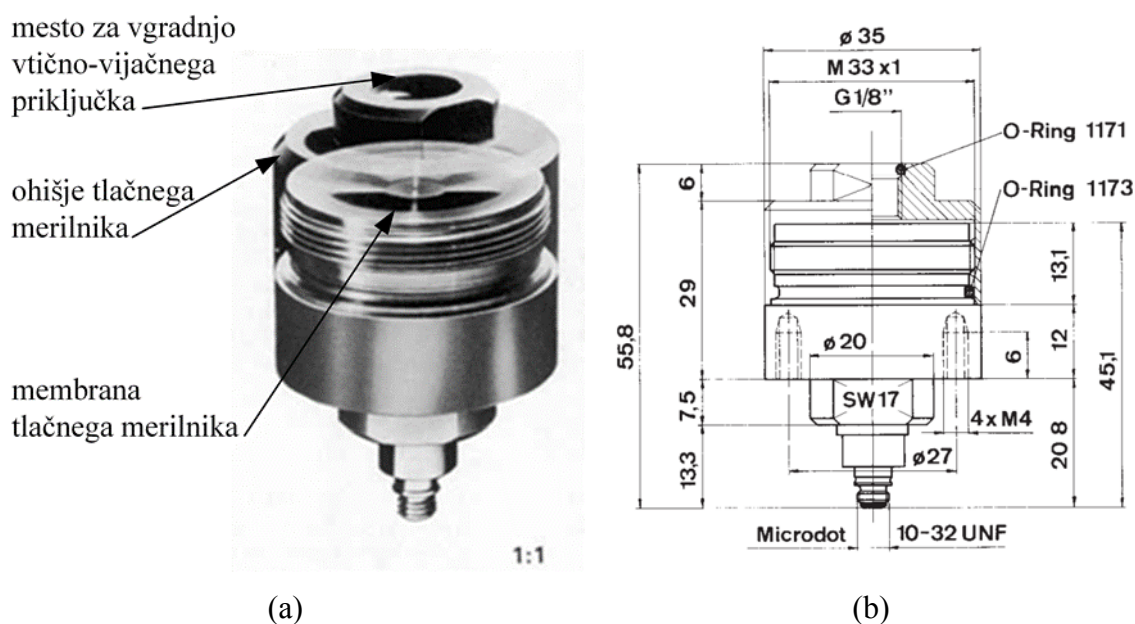


Slika 3.3: Zvočnik BEYMA 5MP60/N [23].

Preglednica 3.1: Tehnični podatki elektrodinamičnega zvočnika BEYMA 5MP60/N [23].

parameter	opis	vrednost
l_z	dolžina zvočnika	133 mm
s_z	širina zvočnika	133 mm
h_z	višina zvočnika	68 mm
$D_{m,z}$	zunANJI premer membrane	125 mm
$x_{m,max}$	največji pomik membrane	5,5 mm
$S_{m,g}$	gibna površina membrane	8500 mm ²
$V_{m,g}$	gibna prostornina znotraj membrane	46000 mm ³
m_m	masa membrane	0,011 kg
Bl_t	Bl_t konstanta zvočnika	6,4 NA ⁻¹

Celotna debelina ohišja (20 mm) je bila izbrana glede na mere piezoelektričnih merilnikov tlaka (Kistler, 7261), ki bodo direktno vgrajeni (potrebna dolžina vsaj 13,1 mm kot je razvidno na sliki 3.4), in najmanjšo možno globino utora v ohišju, ki še omogoča neovirano gibanje membrane. Za analizo frekvenčnih značilnic dinamičnega tlačnega generatorja sta na ohišju generatorja načrtovani dve merilni mesti za direktno vgradnjo piezoelektričnih merilnikov tlaka z zunanjim navojem M33x1, ki imata nasprotno lego glede na sredino ohišja (glej prilogo A), kar omogoča hkratno merjenje z dvema enakima merilnikoma tlaka ter določitev njunih amplitudnih in faznih dinamičnih merilnih pogreškov. Tretje merilno mesto za odjem tlaka mora ustrezati različnim vtično-vijačnim priključkom, kar bo omogočalo priključitev povezovalnih cevk različnih notranjih premerov (1, 2, 3 in 4 mm), ter pri tem zagotoviti čim manj dodatne prostornine znotraj zračne komore. Vtično-vijačni priključki G $\frac{1}{8}$ " z dolžino navoja 5,1 mm obstajajo v več izvedbah in s tem omogočajo priključitev izbranih premerov povezovalnih cevk. Z namenom zmanjšanja dodatne prostornine in lažje vgradnje vtično-vijačnih priključkov je izvedena poglobitev (premera 30 mm in višine 8,2 mm). Nasproti tretjega merilnega mesta za odjem tlaka je še četrto merilno mesto, ki omogoča direktno vgradnjo piezouporovnega merilnika tlaka (Kistler, 4260A) ali pa merilnika tlaka preko povezovalne cevke, kjer je lahko uporabljen vtično-vijačni priključek G $\frac{1}{4}$ ". Vsa štiri merilna mesta so načrtovana tako, da se nahajajo čim bolj nad sredino membrane zvočnika, saj s tem zagotovimo, da bodo generirane tlačne spremembe bolj istočasno dosegle vsa mesta.



Slika 3.4: Piezoelektrični merilnik tlaka Kistler, 7261: (a) sestava [24] in (b) mere [25].

Čeprav je za doseganje čim višje lastne frekvence dinamičnega tlačnega generatorja (glej enačbo (3.11)) in čim boljše homogenosti tlačnih razmer bolje, da bi bila notranja prostornina zračne komore čim manjša, pa jo moramo še vedno zagotoviti dovolj veliko, da je njen vpliv na določevanje frekvenčnih lastnosti povezovalnih cevk dovolj majhen. Določitev optimalne velikosti prostornine zračne komore je mogoče le s spremembo globine utora v ohišju generatorja, saj so vse ostale dimenzije že izbrane glede na mere zvočnika. Pri dimenzioniranju je bilo potrebno zadostiti zahtevi po zelo velikem razmerju med prostornino

zračne komore in notranjo prostornino merilnika tlaka ($V_0 \gg V_{pm}$), saj ob obravnavi sistema s povezovalno cevko prostornini na obeh straneh cevke predstavljata vzmetni konstanti zraka. Torej ob upoštevanju prostornine zračne komore dinamičnega tlačnega generatorja V_0 lahko glede na enačbo (2.8) določimo lastno frekvenco sistema povezovalna cevka-merilnik tlaka kot:

$$f_{0,c,v} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_c}{l_c} \left(1 + \frac{V_{pm}}{V_0}\right)}, \quad (3.12)$$

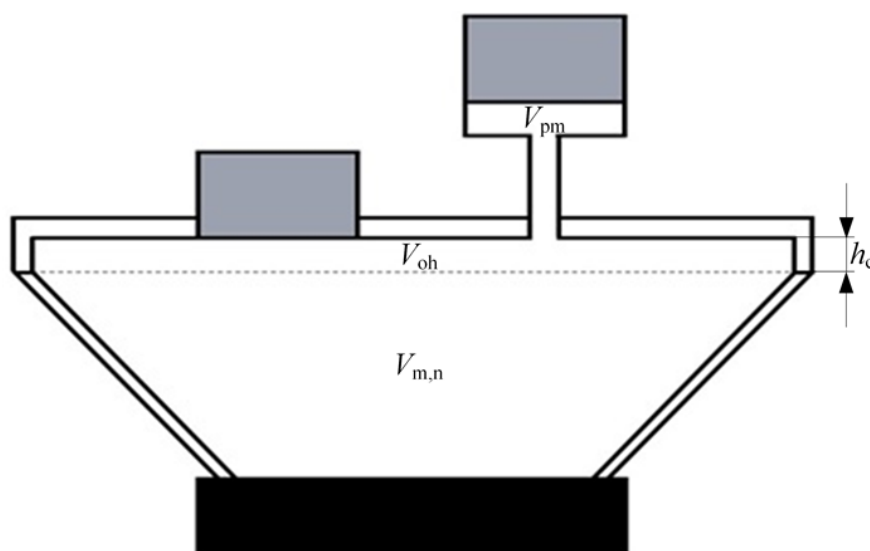
kjer je V_{pm} notranja prostornina piezoelektričnega merilnika tlaka, če upoštevamo osnovni model Helmholtzevega resonatorja. Tako lahko ocenimo relativni vpliv razmerja prostornin na vrednost lastne frekvence povezovalne cevke kot:

$$e_{r,v} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{pm}}{V_0} \right). \quad (3.13)$$

Prostornino zračne komore dinamičnega tlačnega generatorja V_0 smo preračunali kot vsoto prostornine zraka znotraj membrane zvočnika $V_{m,n}$, ki smo jo zaradi oblike membrane ocenili po enačbi za prisekan stožec ($V_{m,n} \approx 93500 \text{ mm}^3$), in prostornine znotraj ohišja v odvisnosti od globine utora h_u (glej sliko 3.5):

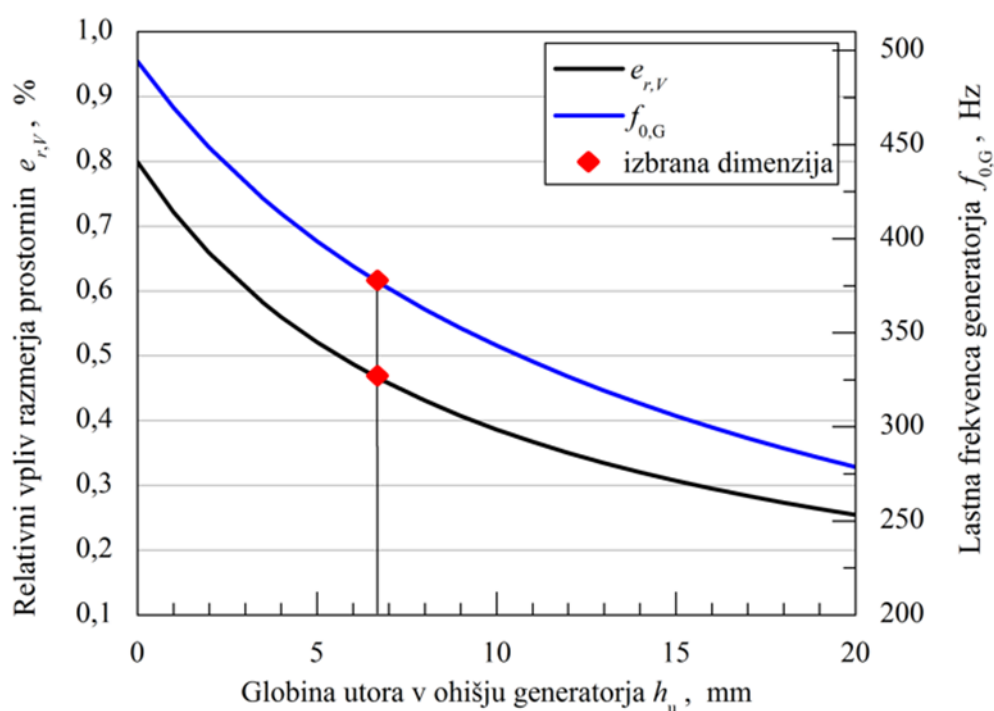
$$V_0 = V_{m,n} + V_{oh} = V_{m,n} + \frac{\pi D_{m,n}^2}{4} h_u, \quad (3.14)$$

kjer je notranji premer membrane $D_{m,n} = 113 \text{ mm}$. Z namenom doseganja dovolj visoke lastne frekvence dinamičnega tlačnega generatorja smo slednjo ocenili po enačbi (3.11), kjer smo upoštevali za povprečni tlak v zračni komori tlak okolice ($p_0 = 98 \text{ kPa}$), adiabatne termodinamične spremembe ($\kappa = 1,4$), maso in gibno površino membrane, ki ju podaja izdelovalec zvočnika (preglednica 3.1), ter zanemarili vpliv vzmetne konstante membrane [1].



Slika 3.5: Shema direktne vgradnje in preko povezovalnih cevk merilnika tlaka v ohišje generatorja.

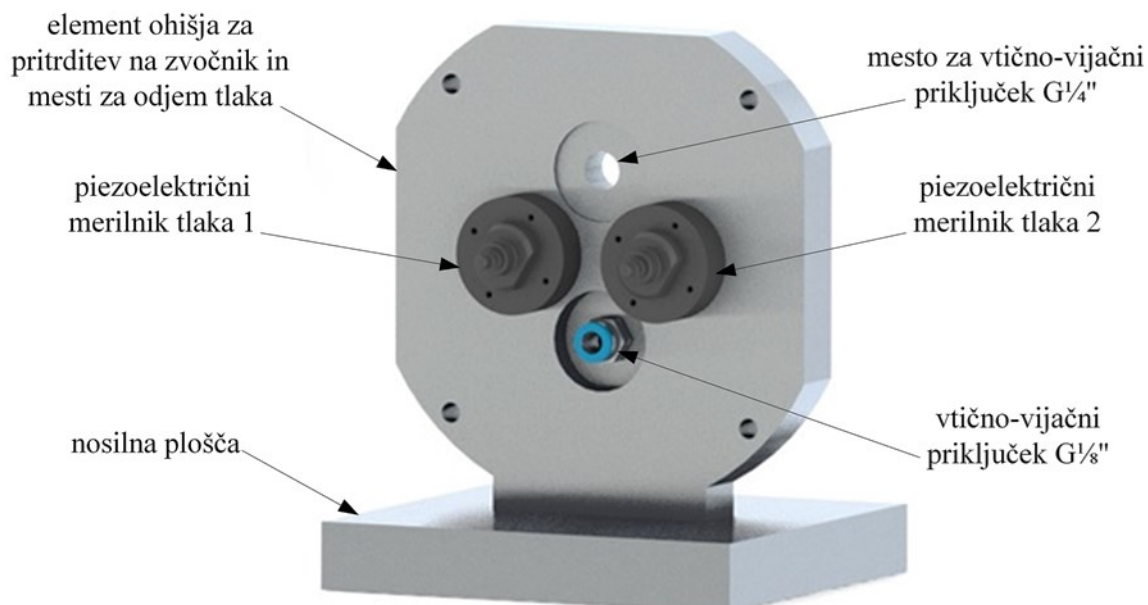
Slika 3.6 prikazuje vpliv izbire globine utora na določitev optimalne prostornine zračne komore. Ob upoštevanju notranje prostornine piezoelektričnega merilnika ($V_{pm}=1500 \text{ mm}^3$) je pri najmanjši možni globini utora ($h_u = 3,5 \text{ mm}$), ki ravno še omogoča neovirano gibanje membrane, ocenjena lastna frekvenca dinamičnega tlačnega generatorja $f_{0,G} \approx 421 \text{ Hz}$ in relativni vpliv razmerja prostornin na merjenje lastne frekvence povezovalne cevke $e_{r,V} \approx 0,6 \%$. Če bi prostornino zračne komore dvakrat povečali, globina utora $h_u = 16 \text{ mm}$, bi se ocenjena lastna frekvenca generatorja znižala za približno 30 % ($f_{0,G} \approx 300 \text{ Hz}$), vendar bi dosegli dvakratno znižanje relativnega vpliva razmerij prostornin ($e_{r,V} \approx 0,3 \%$). Ker ima že najmanjša možna prostornina zračne komore relativno majhen vpliv na merjenje lastne frekvence povezovalne cevke, smo želeli zagotoviti čim višjo lastno frekvenco dinamičnega tlačnega generatorja ter s tem čim širše podresonančno območje. V odvisnosti od standardnih mer komercialnih aluminijastih plošč in kot že omenjene potrebne dolžine za direktno vgradnjo piezoelektričnih merilnikov tlaka smo izbrali globino utora $h_u = 6,8 \text{ mm}$, s čimer je ocenjena povprečna prostornina zračne komore $V_0 \approx 161,7 \text{ cm}^3$. Tako smo ocenili lastno frekvenco generatorja $f_{0,G} \approx 376 \text{ Hz}$ in relativni vpliv na merjenje lastne frekvence povezovalne cevke $e_{r,V} \approx 0,5 \%$.



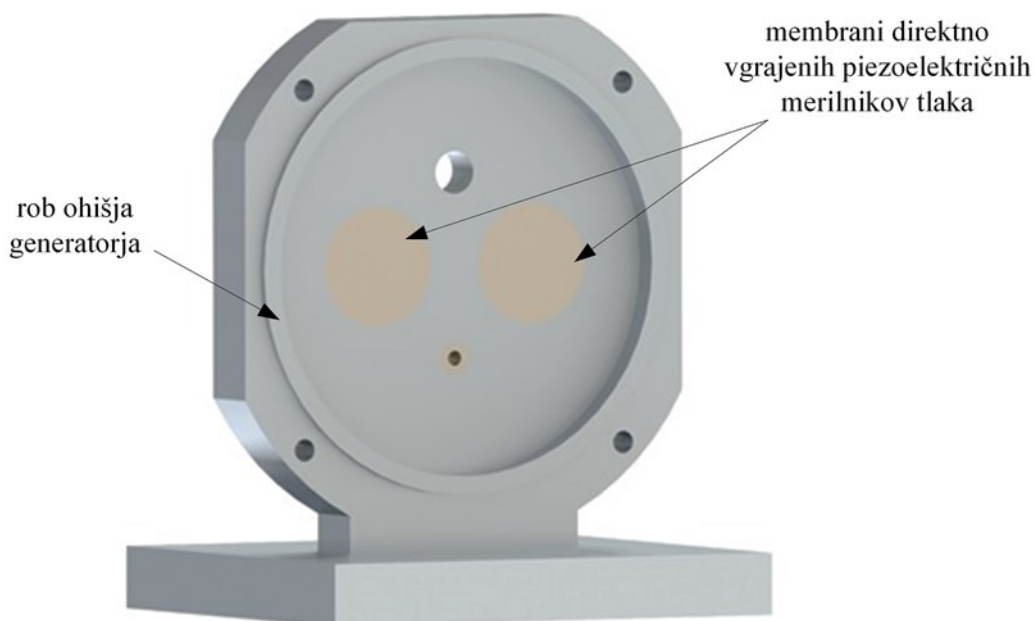
Slika 3.6: Odvisnost prostornine zračne komore od globine utora v ohišju generatorja.

Sliki 3.7 in 3.8 prikazujeta 3D model izdelanega ohišja dinamičnega tlačnega generatorja z omenjenima direktno vgrajenima piezoelektričnima merilnikoma tlaka in vtično-vijačnim priključkom G $\frac{1}{8}$ ". Glede na lego izvrtin v ohišju zvočnika ima ohišje dinamičnega generatorja po obodu 4 dodatne izvrtine, s čimer je omogočena vijačna zveza (M5x40) med ohišjem in elektrodinamičnim zvočnikom ter s tem zagotovitev zaprte zračne komore med membrano in merilniki. Načrtovana postavitev zvočnika tekom meritev mora biti takšna, da je pokrov zvočnika pravokotno na podlago, saj se bodo preučevale ravne povezovalne cevke dolžin do 2 m, pritrjene vzporedno s podlago z namenom preprečitve njihovega ukrivljenja.

Zatorej je ohišje dinamičnega tlačnega generatorja izvedeno kot stojalo, kjer je element z merilnimi mesti za odjem tlaka prečno povezan z manjšo nosilno ploščo (133x120x20 mm, glej prilogo B). Elementa sta med seboj vijačena z dvema imbus vijakoma M8. Izbira materiala ohišja (aluminij) je temeljila na njegovi nizki gostoti, ki pomeni manjšo maso in lažjo prenosnost sistema, ter korozivni odpornosti.



Slika 3.7: 3D model načrtovanega ohišja dinamičnega tlačnega generatorja z zunanje strani.



Slika 3.8: 3D model načrtovanega ohišja dinamičnega tlačnega generatorja z notranje strani.

3.1.2.1. Preskus tesnosti

Pred uporabo razvitega dinamičnega tlačnega generatorja je potreben preskus tesnjenja zračne komore, ki je med zvočnikom in ohišjem generatorja, s čimer zagotovimo homogeno tlačno polje znotraj le-te tekom meritev. Tesnost zračne komore smo preverili na dva načina.

Pri prvem načinu smo želeli le vizualno oceniti prisotnost puščanja, in sicer s preskusom tesnosti z mehurčki, kjer je potrebno vzpostaviti določen nadtlak v zračni komori. Zaradi tlačne razlike se mehurčki po omočeni površini s kapljevino tvorijo tam, kjer so netesna mesta v sistemu. S tem načinom smo ugotovili prisotnost puščanja po celotnem stičnem robu med zvočnikom in ohišjem generatorja, ki je bila najverjetneje posledica nekoncentrične namestitve membrane v ohišje zvočnika in tako slabega ujemanja z načrtovanim ohišjem generatorja. To relativno veliko puščanje smo odpravili z dodatnim ploščatim tesnilom iz navadne tehnične gume (debeline 2 mm), ki smo ga vstavili na rob membrane za preprečitev ugotovljenih mest puščanja, ki so posledica neujemanja med zvočnikom in ohišjem generatorja.

Pri drugem načinu smo uporabili preskus tesnosti s spremembo tlaka, kjer tudi kot pri prvem načinu vzpostavimo določen nadtlak v zračni komori. Nato se meri tlačni padec v določenem časovnem intervalu, s čimer lahko ocenimo pretok zraka zaradi puščanja. Pred tem testom smo še nanesti tanek tesnilni sloj na prašno kapo v sredini membrane, ki je iz polprepustnega materiala, da ob hkratni preprečitvi vdora prašnih delcev omogoči hlajenje vzbujevalnega sistema. Pri sistemih z deformabilnimi stenami, kot je membrana pri razvitem dinamičnem tlačnem generatorju, lahko definiramo masni tok puščanja kot:

$$q_m = \frac{dm}{dt} = \frac{dp}{dt} V + \rho \frac{dV}{dt}, \quad (3.15)$$

kjer je prvi člen povezan s časovno spremembo mase m v opazovani prostornini zaradi spremembe gostote plina ρ , drugi člen pa zaradi spremembe velikosti prostornine V . Pretok puščanja lahko izrazimo tudi kot prostorninski tok pri danih pogojih v opazovani prostornini:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = \frac{V}{\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{dV}{dt}, \quad (3.16)$$

ob predpostavki idealnega plina, konstantne temperature ter majhnih sprememb prostornine in tlaka pa se ta izraz poenostavi v:

$$q_v = \frac{V_0}{p_0} \frac{\Delta p}{\Delta t} + \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (3.17)$$

kjer sta V_0 in p_0 začetna prostornina in tlak v opazovani prostornini zračne komore pri merjenju puščanja ter Δp padec tlaka znotraj prostornine zaradi puščanja. Člen, v katerem nastopa sprememba velikosti prostornine ΔV je povezan s premikom membrane zvočnika Δx kot posledica spremembe tlaka v sistemu z deformabilnimi stenami. Na membrani zvočnika lahko zapišemo ravnotežje med spremembo tlačne sile na membrano in spremembo vzmetne sile membrane:

$$\Delta p S_m = k_m \Delta x; \quad \Delta x = \frac{\Delta V}{S_m}, \quad (3.18)$$

od koder sledi povezava med spremembo prostornine in spremembo tlaka sistema:

$$\Delta V = \frac{S_m^2}{k_m} \Delta p. \quad (3.19)$$

Tako lahko prostorninski tok puščanja določimo kot:

$$q_V = \frac{\Delta p}{\Delta t} \left(\frac{V_0}{p_0} + \frac{S_m^2}{k_m} \right) = \frac{\Delta p}{\Delta t} \frac{V_0}{p_0} \left(1 + \frac{p_0 S_m^2}{V_0 k_m} \right). \quad (3.20)$$

Če upoštevamo definicijo vzmetne konstante zraka iz podpoglavja 3.1.1, lahko zgornji izraz zapišemo kot:

$$q_V = \frac{\Delta p}{\Delta t} \frac{V_0}{p_0} \left(1 + \frac{k_z}{k_m} \right), \quad (3.21)$$

kjer je k_z vzmetna konstanta zraka v izotermnih pogojih s počasnimi spremembami tlaka ($\kappa = 1$). Pri testu tesnjenja s spremembo tlaka smo v zračni komori vzpostavili relativno majhen nadtlak ($p_0 - p_{ok} = 1$ kPa, $p_0 \approx 99$ kPa) ter v eni minuti izmerili padec tlaka $\Delta p \approx 40$ Pa. Če predpostavimo, da je naša prostornina zračne komore ($V_0 \approx 161,7$ cm³, glej podpoglavje 3.1.2) približno dvakrat manjša od prostornine pri izvedbi z dvema zvočnikoma ter je s tem posledično približno dvakrat manjši vpliv vzmetne konstante zraka, lahko za oceno razmerja vzmetnih konstant upoštevamo kar rezultate meritev iz [glej 1]. Sledi, da je $k_z / k_m \approx 100$, in s tem glede na rezultate preskusa tesnjenja s spremembo tlaka ocenjen pretok puščanja $q_V \approx 6,6$ cm³ min⁻¹. Iz enačbe (3.21) je razvidno, da ima upoštevanje člena zaradi premika membrane bistven vpliv na določitev pretoka puščanja.

Prostorninski tok puščanja preko majhne odprtine (laminarne tokovne razmere) lahko zapišemo kot:

$$q_V = K_{\text{puš}} (P - p_{ok}), \quad (3.22)$$

kjer je P absolutni tlak v zračni komori, p_{ok} tlak okolice in $K_{\text{puš}}$ konstanta netesnosti. Ob upoštevanju enačbe (3.21) za prostorninski tok puščanja pri začetnem tlaku p_0 lahko konstanto netesnosti določimo kot:

$$K_{\text{puš}} = \frac{1}{p_0 - p_{ok}} \frac{\Delta p}{\Delta t} \frac{V_0}{p_0} \left(1 + \frac{k_z}{k_m} \right), \quad (3.23)$$

katero smo v odvisnosti od rezultatov preskusa tesnosti ocenili $K_{\text{puš}} \approx 0,11$ mm³ s⁻¹ Pa⁻¹.

Za prostornino zraka v dinamičnem tlačnem generatorju lahko ob predpostavki idealnega plina, adiabatnih termodinamičnih sprememb in upoštevanju pretoka puščanja zapišemo enačbo [26]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\kappa}{V} \left(-P q_V - P \frac{dV}{dt} \right). \quad (3.24)$$

Če v tej enačbi upoštevamo izraz za pretok puščanja in jo lineariziramo, torej upoštevamo majhne spremembe tlaka p okrog tlaka okolice p_{ok} in majhne spremembe prostornine okoli

povprečne prostornine zračne komore V_0 , dobimo enačbo visokoprepustnega dinamskega sistema prvega reda:

$$\tau \frac{dp}{dt} + p = -\frac{1}{K_{\text{puš}}} \frac{dV}{dt}, \quad (3.25)$$

kjer je $\tau_{\text{puš}}$ časovna konstanta vpliva puščanja:

$$\tau_{\text{puš}} = \frac{V_0}{\kappa p_{\text{ok}} K_{\text{puš}}}. \quad (3.26)$$

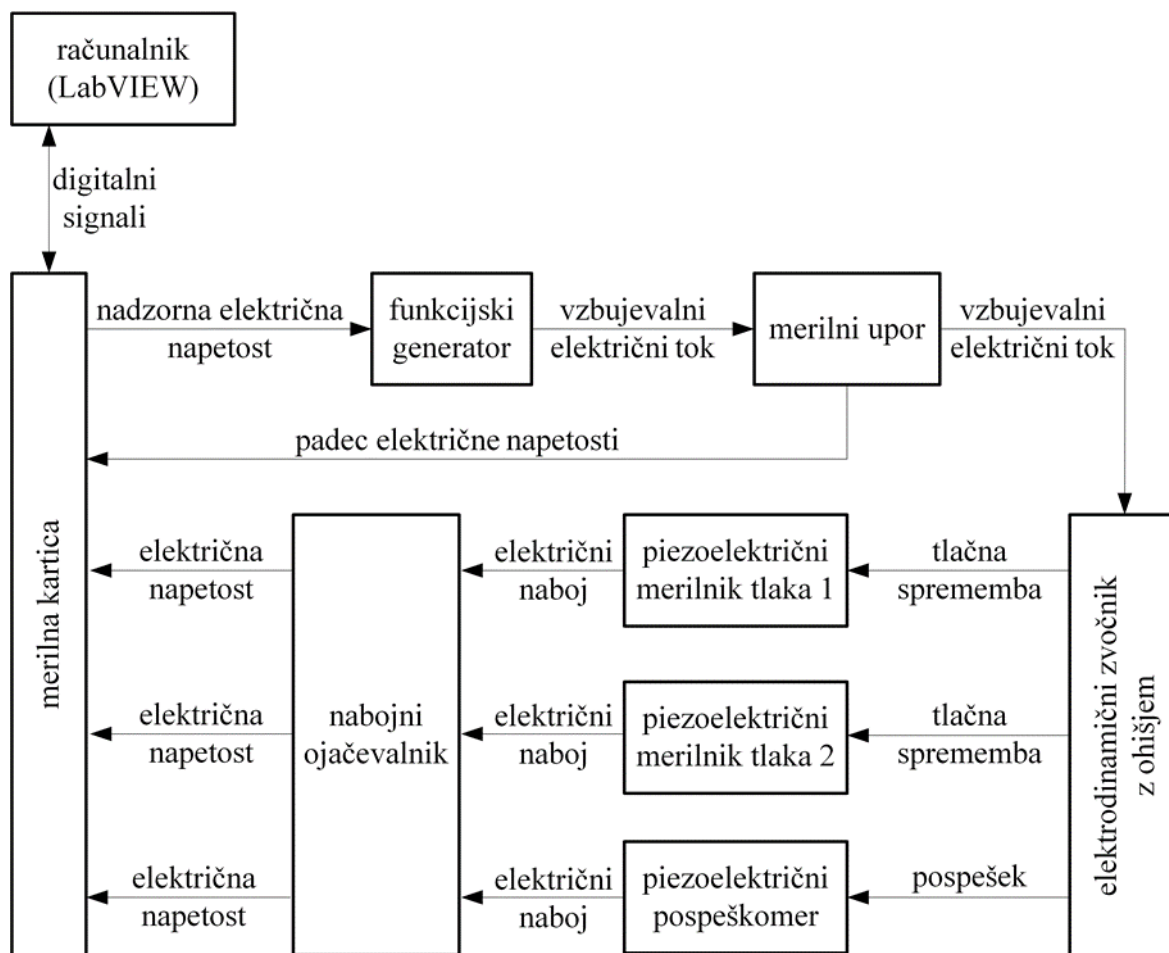
Upoštevajoč enačbo (2.10) lahko določimo spodnjo lomno frekvenco (-3 dB) vpliva puščanja:

$$f_{\text{lom,puš}} = \frac{1}{2 \pi \tau_{\text{puš}}}. \quad (3.27)$$

Večje kot je puščanje, višja je lomna frekvenca in tako se vpliv puščanja pozna pri višjih frekvencah delovanja tlačnega generatorja. Glede na rezultate preskusa tesnjenja lahko ocenimo spodnjo lomno frekvenco ($f_{\text{lom,puš}} \approx 0,015$ Hz), ki je dovolj majhna, da ne bo vplivala na generirane tlačne spremembe nad spodnjo mejo načrtovanega frekvenčnega območja (1 Hz).

3.2. Merilni sistem

Slika 3.9 prikazuje blokovno shemo merilnega sistema, ki je bil uporabljen za eksperimentalno preizkušanje dinamičnega tlačnega generatorja. S pomočjo nadzornega programa se v programskem okolju LabVIEW na računalniku določi željeno frekvenco električnega vzbujevalnega signala elektrodinamičnega zvočnika, ki ga generira funkcijski generator. Z zagonom programa se nastavlja frekvenco na funkcijskem generatorju preko nadzornega električnega napetostnega signala, ki ga pošljemo na le-tega preko izhoda merilne kartice. Nato funkcijski generator pri nastavljeni frekvenci vzbuja elektrodinamični zvočnik z vzbujevalnim električnim tokovnim signalom. Pri tem je bila amplituda vzbujevalnega električnega signala določena ročno na funkcijskem generatorju. Na sponah zvočnika smo preko merilnega upora merili dejanski vzbujevalni električni tok kot padec napetosti na merilnem uporu z znano upornostjo. Generirane tlačne spremembe smo merili z dvema piezoelektričnima merilnikoma tlaka. Za oceno vpliva prenesenih vibracij dinamičnega tlačnega generatorja na piezoelektrična merilnika smo na sredini ohišja generatorja med merilnikoma tlaka pritrdili piezoelektrični pospeškometer, s katerim smo merili nihanje ohišja generatorja. Vsi piezoelektrični merilniki so povezani z nabojnimi ojačevalniki, ki pretvarjajo električni naboj v električno napetost. Izhodne električne signale izmerjenih tlakov in pospeška preko merilne kartice vodimo na računalnik, kjer je v nadzornem programu izveden prikaz, obdelava in shranjevanje podatkov.



Slika 3.9: Blokovna shema merilnega sistema.

3.2.1. Merilno-tehnični podatki o merilni in nadzorni opremi

Elektrodinamični zvočnik

- izdelovalec: BEYMA,
- model: 5MP60/N,
- glej podpoglavje 3.1.2.

Funkcijski generator:

- izdelovalec: GoldStar,
- model: FG - 8002,
- frekvenčno območje: 0,02 Hz do 2 MHz (razdeljeno na 7 podobmočij),
- krmilno območje: 0 do 10 V,
- izhodno vzbujevalno območje: -10 do 10 V,
- harmonično popačenje: $\leq 1 \%$ (od 10 Hz do 100 kHz),
- oblika izhodnega signala: sinusni.

Piezoelektrični merilnik tlaka:

- izdelovalec: Kistler,
- model: 7261,
- serijska številka: 294781 (merilnik 1) in 294777 (merilnik 2),
- merilno območje: -100 do $+1000$ kPa,
- merilna občutljivost: ≈ 22 pC kPa $^{-1}$,
- občutljivost na vibracije: $< 0,01$ kPa m $^{-1}$ s 2 ,
- linearnost: $\leq 0,8$ % MR,
- lastna frekvenca:
 - direktna vgradnja: ≈ 13 kHz,
 - vgradnja s pokrovom: $\approx 2,5$ kHz,
- notranja prostornina: 1500 mm 3 .

Piezoelektrični pospeškomer:

- izdelovalec: Brüel & Kjær,
- model: 4393,
- serijska številka: 10836,
- občutljivost: $\approx 0,316$ pC m $^{-1}$ s 2 ,
- lastna frekvenca: 55 kHz,
- točnost: ± 2 % MR.

Nabojni ojačevalnik:

- izdelovalec: Dewetron,
- model: DAQ-Charge,
- nabojna modula za piezoelektrična merilnika tlaka:
 - izhodno merilno območje: -5 do $+5$ V,
 - merilna občutljivost: $0,01$ do $0,05$ V pC $^{-1}$,
 - frekvenčno območje (-3 dB): $0,07$ Hz do 30 kHz,
 - točnost: ± 1 % MR,
- nabojni modul za piezoelektrični pospeškomer:
 - izhodno merilno območje: -5 do $+5$ V,
 - ojačitev: $0,0001$ do 1 V pC $^{-1}$,
 - frekvenčno območje (-3 dB): $0,3$ Hz do 50 kHz,
 - točnost: ± 1 % MR.

Merilna kartica:

- izdelovalec: National Instruments,
- model: NI USB-6251 BNC,
- ločljivost: 16 bit,
- frekvenca vzorčenja: 100 kHz,
- vhodno merilno območje: -10 do $+10$ V,
- izhodno merilno območje: -10 do $+10$ V.

3.2.2. Nadzorni program LabVIEW

Program za nadzor, zajem in obdelavo merilnih signalov smo izdelali v programskem okolju LabVIEW (National Instruments, Ver. 10.0), ki omogoča računalniško podprte meritve s pomočjo komunikacije z merilnimi moduli in vmesniki (DAQ kartice). Tako z merilno kartico zajeto električno napetost nadzorni program preračunava v merjene veličine v odvisnosti od merilne občutljivosti merilnika. Osnovna programska celica programa LabVIEW (ang. *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), imenovana navidezni inštrument (ang. *virtual instrument*), je sestavljena iz dveh delov, in sicer programskega dela (ang. *block diagram*) in prikazovalnega dela (ang. *front panel*). Pri pisanju programskega dela se grafično sestavlja program kot blokovno shemo iz slikovnih elementov, ki predstavljajo različne funkcije ter podprograme, in žic za prenos signalov med njimi. Z njimi se poveže tudi elemente, ki v prikazovalnem delu ustvarijo nadzorne, grafične in številčne prikazovalnike. Z njimi je omogočen prikaz zajetih, analiziranih in izračunanih podatkov ter rezultatov meritev in nastavitve zelenih parametrov tekom meritev [27].

Delovanje nadzornega programa omogoča sestavljen programski del, ki smo ga programirali v obliki več pogojnih zank (ang. *case structure*), kar omogoča potek programa po korakih. Nadzorni program v tem delu lahko razdelimo na štiri sklope.

Prvi sklop programskega dela sestavlja nadzor dinamičnega tlačnega generatorja, kjer smo uporabili naslednje podprograme:

- **podprogram za določitev nadzorne električne napetosti;**
 - izračunava vrednost nadzorne izmenične električne napetosti za funkcijski generator glede na željeno vzbujevalno frekvenco. Algoritem s pomočjo funkcijske strukture (ang. *Formula Node*) omogoča avtomatski prehod na naslednjo vzbujevalno frekvenco v določenem frekvenčnem območju. Podprogram ima tudi možnost nastavitve posamezne vzbujevalne frekvence pri izbrani nadzorni izmenični električni napetosti;
- **podprogram za generiranje izhodne električne napetosti (*DAQ Assistant.vi*);**
 - podprogram omogoča pošiljanje izhodnega nadzornega signala preračunane izmenične električne napetosti preko merilne kartice do funkcijskega generatorja.

Drugi sklop programskega dela je zajem merilnih signalov, katerega sestavljajo:

- **podprogram za zakasnitev (*Wait Until Next ms Multiple Function.vi*);**
 - po vsaki spremembi vzbujevalne frekvence nadzorni program pred zajemom signalov počaka določen časovni interval, ki omogoča zajem merilnih signalov v ustaljenem stanju;
- **podprogram za zajem vhodnih električnih napetostnih signalov (*DAQ Assistant.vi*);**
 - podprogram omogoča zajem merilnih signalov v obliki električne napetosti preko merilne kartice. Pri tem je potrebno podati število vzorcev N in frekvenco vzorčenja f_{vzr} , ki definirata čas zajemanja, ter vhodno merilno območje napetosti in vrste merilnih signalov na posameznem kanalu merilne kartice. Izmerjeni električni napetostni signali predstavljajo naslednje merjene veličine;
 - prvi vhodni kanal (ai0): tlačne spremembe merjene z merilnikom 1 (p_1);
 - drugi vhodni kanal (ai1): tlačne spremembe merjene z merilnikom 2 (p_2);
 - tretji vhodni kanal (ai2): vzbujevalni električni tok (I);
 - četrti vhodni kanal (ai3): pospešek nihanja ohišja generatorja (a).

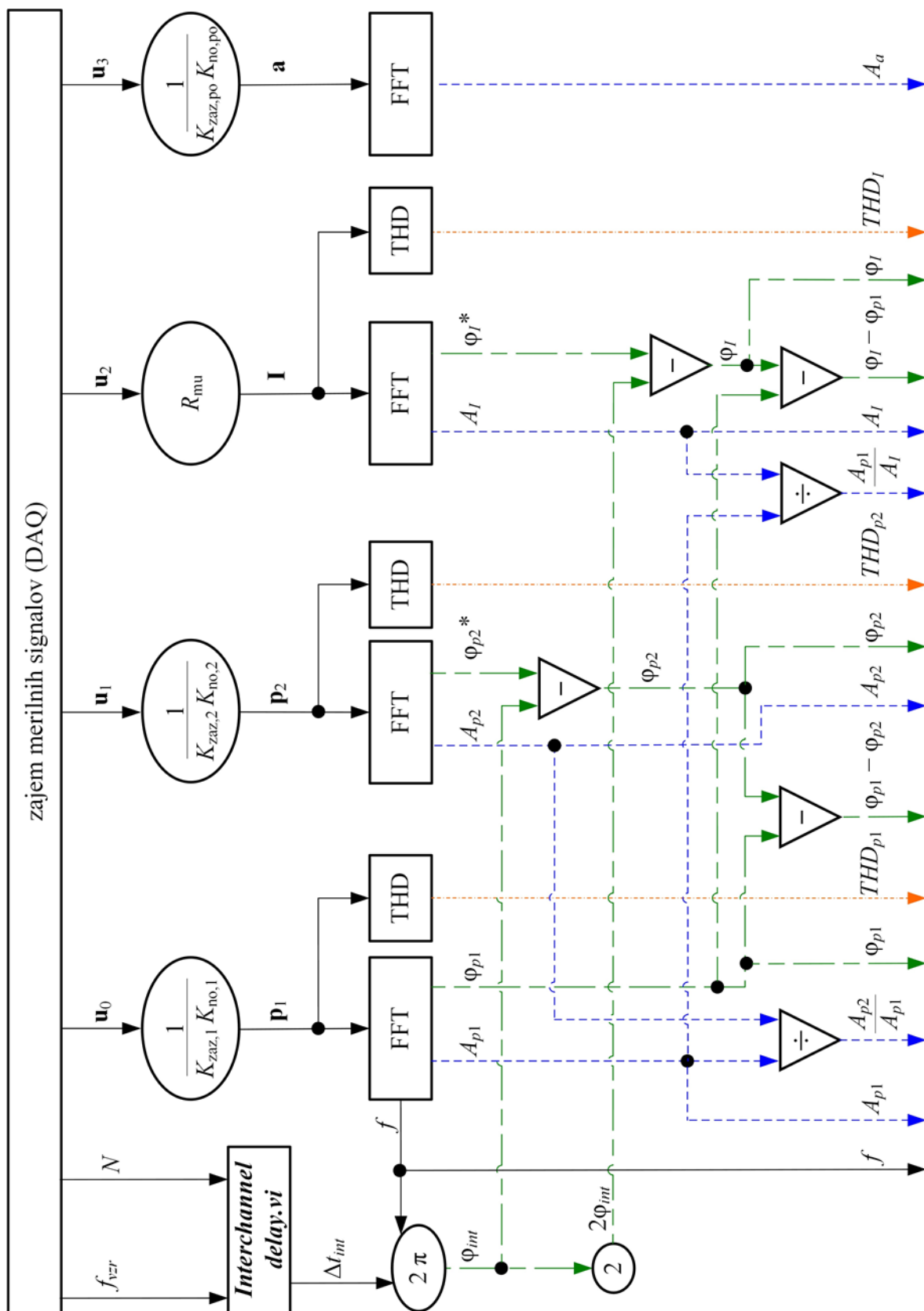
Tretji sklop programskega dela je obdelava merilnih signalov, ki je prikazana z blokovnim diagramom na sliki 3.10, in ga sestavljajo:

- **preračun vhodnih merilnih signalov;**
 - vhodni merilni signal v obliki električne napetosti se preračuna v dejansko merjeno veličino, in sicer tlak s pomočjo merilnih občutljivosti piezoelektričnih merilnikov tlaka $K_{zaz,pt}$ in pripadajočih nabojnih ojačevalnikov $K_{no,pt}$ ter enako za pospešek vibracij preko merilne občutljivosti piezoelektričnega pospešekomera $K_{zaz,po}$ in nabojnega ojačevalnika $K_{no,po}$ (glej enačbo 2.3). Električni tok se preračunava glede na izmerjen padec napetosti na merilnem uporu in predhodno določeni upornosti le-tega R_{mu} ;
- **podprogram za določitev frekvenčnih lastnosti merilnega signala (*Extract Single Tone Information.vi*);**
 - podprogram v merilnem signalu, kateremu predhodno odšteje povprečno vrednost (izničenje frekvenčne komponente pri frekvenci $f = 0$ Hz zaradi morebitnega lezenja povprečne vrednosti signala) in nato izvede hitro Fourierovo transformacijo (*ma_FFT with Hanning.vi*), poišče samo glavno frekvenčno komponento z najvišjo amplitudo oz. le-to išče v določenem frekvenčnem območju, nato nam poda frekvenco, amplitudo in fazni zamik glavne komponente za vse merilne signale;
- **podprogram za izračun skupnega harmoničnega popačenja THD (*Harmonic Distortion Analyzer.vi*);**
 - s pomočjo hitre Fourierove transformacije (FFT) določi razmerje moči višjih harmonikov in moči osnovne komponente;
- **določanje amplitudnega razmerja in faznih zamikov;**
 - amplitudno razmerje med amplitudo tlačne spremembe izmerjene z merilnikom 1 in amplitudo električnega toka (A_{p1}/A_I);
 - amplitudno razmerje med amplitudo tlačne spremembe izmerjene z merilnikom 2 in amplitudo tlačne spremembe izmerjene z merilnikom 1 (A_{p2}/A_{p1});
 - fazni zamik med fazo električnega toka in fazo tlačne spremembe izmerjene z merilnikom 1 ($\varphi_I - \varphi_{p1}$);
 - fazni zamik med fazo tlačne spremembe izmerjene z merilnikom 1 in fazo tlačne spremembe izmerjene z merilnikom 2 ($\varphi_{p1} - \varphi_{p2}$);
- **podprogram za korekcijo faznega zamika preklopnika merilne kartice;**
 - korekcijo zaradi faznega zamika, ki se pojavi v merili kartici, katera ima zaporeden način zajema signalov po vhodnih kanalih. Korekcijo za fazni zamik določimo kot:

$$\varphi_{int} = \Delta t_{int} 2 \pi f, \quad (3.28)$$

kjer je Δt_{int} čas preklopa med kanali, ki nam ga poda podprogram *Interchannel delay.vi*. Ta časovni interval je odvisen od števila zajetih vzorcev, frekvence vzorčenja, modela merilne kartice in izbranega kanala na njej. Korekcija izračunanega faznega zamika zaradi časovne zakasnitve pri preklopu med kanali merilne kartice φ_{int} se določi na vhodnem kanalu 1 pri vsaki vzbujevalni frekvenci f , ki jo nato nadzorni program odšteje od fazne razlike tlačne spremembe merjene z merilnikom 2 in dvakratno vrednost od fazne razlike električnega toka, saj slednjega vodimo na vhodni kanal 3.

- **podprogram za izračun amplitudno frekvenčnega spektra (*Spectral Measurements.vi*);**
 - izvede hitro Fourierovo transformacijo (FFT) za merilne signale obeh tlakov in električnega toka, katerim se predhodno odšteje povprečno vrednost. Dobljene amplitudno frekvenčne spektre smo uporabili za opazovanje višjih harmonikov v merilnih signalih.

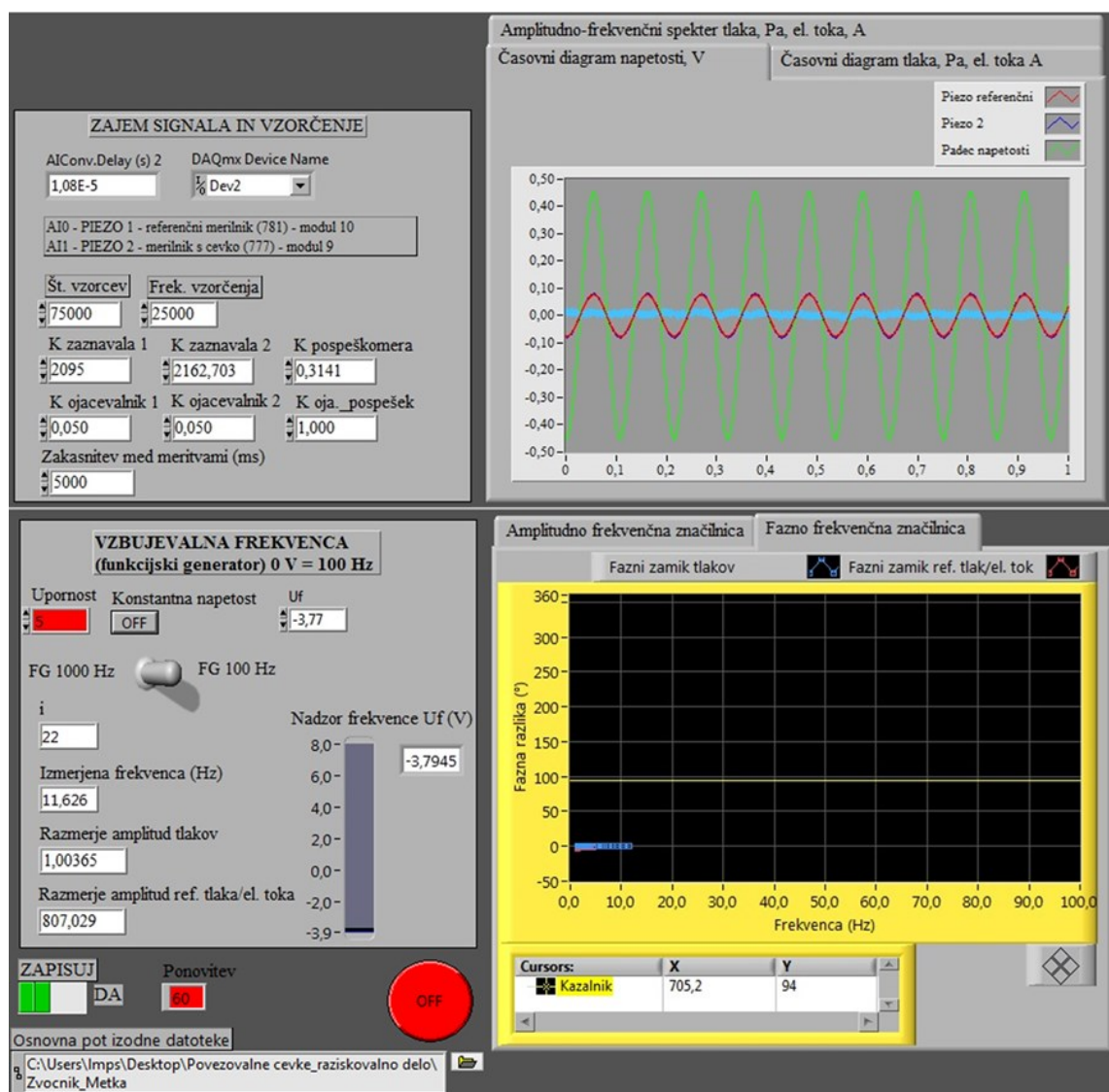


Slika 3.10: Blokovni diagram obdelave merilnih signalov v programskem delu sestavljenega nadzornega programa.

Četrty sklop programskega dela sestavljajo podprogrami za zapis merjenih in obdelanih podatkov:

- podprogram za zapis rezultatov meritev (*Write To Measurement File.vi* in *Write To Spreadsheet File.vi*);
- pri vsaki vzbujevalni frekvenci;
 - časovni poteki merilnih signalov tlaka, električnega toka in pospeška v času zajemanja;
 - amplitudno razmerje ter fazni zamik tlačnih sprememb in električnega toka;
 - amplitudno razmerje ter fazni zamik med obema tlačnima signaloma;
 - parameter skupnega harmoničnega popačenja za signale obeh tlakov in električnega toka;
 - amplituda obeh tlačnih sprememb, električnega toka in pospeška.

Slika 3.11 prikazuje prikazovalni del sestavljenega nadzornega programa, s katerim smo med meritvami nastavljal in opazovali različne parametre.



Slika 3.11: Prikazovalni del sestavljenega nadzornega programa.

Prvi sklop prikazovalnega dela predstavlja parametre zajetega merilnega signala:

- število vzorcev zajetega merilnega signala;
- frekvenca vzorčenja;
- merilne občutljivosti piezoelektričnih merilnih sistemov;
- čas zakasnitve med zajemom merilnih signalov;
- fazni zamik zaradi preklopa med kanali merilne kartice.

Drugi sklop prikazovalnega dela predstavlja nadzorne in številčne prikazovalnike parametrov ter rezultatov meritev, ki so vezani na delovanje dinamičnega tlačnega generatorja:

- nastavitev vrednosti merilnega upora;
- gumb za vklop vzbujanja pri izbrani konstantni električni napetosti ali pri spreminjajočih vrednostih električnega napetostnega signala, določenih z nadzornim algoritmom;
- gumb za izbiro preračuna vrednosti nadzornega signala za vzbujevalno frekvenco v funkcijski strukturi, ki je odvisen od nastavljenega frekvenčnega podobmočja na funkcijskem generatorju;
- številčni prikaz zaporedne merilne točke, izmerjene vzbujevalne frekvence, pripadajočega razmerja amplitud tlakov in razmerja amplitud med električnim tokom ter tlakom merjenim z merilnikom 1.

Tretji sklop prikazovalnega dela vsebuje grafične prikazovalnike rezultatov meritev z več zavihki:

- časovni diagram izhodnega električnega napetostnega signala električnega toka, obeh tlakov in pospeška;
- časovni diagram električnega toka in obeh tlakov;
- amplitudno frekvenčni spekter električnega toka in obeh tlakov;
- amplitudna frekvenčna značilnica dinamičnega tlačnega generatorja in razmerja tlakov;
- fazno frekvenčna značilnica dinamičnega tlačnega generatorja in razmerja tlakov.

Četrty sklop prikazovalnega dela se navezuje na shranjevanje izmerjenih podatkov:

- vklop/izklop zapisovanja;
- nastavitev imena zapisane tekstovne datoteke s številko zaporedne meritve;
- določitev datoteke za shranjevanje podatkov.

Na prikazovalnem delu je tudi kontrolni varnostni gumb, ki omogoča takojšni izklop celotnega nadzornega programa in posledično meritve.

3.3. Potek izvajanja meritev

Pred izvedbo meritev smo določili vhodne parametre merilnega sistema. Merilno območje obeh piezoelektričnih merilnikov tlaka je relativno veliko (do 1000 kPa) glede na velikost tlačnih sprememb, ki jih lahko dosežemo z danim tlačnim generatorjem. S tem razlogom je ojačitev nabojnih ojačevalnikov izbrana na največjo možno vrednost, ki jo omogočata nabojna modula ($K_{no,1} = K_{no,2} = 0,05 \text{ V pC}^{-1}$). Iz merilno-tehniških podatkov (glej podpoglavje 3.2.1) lahko tako ocenimo najvišjo merilno občutljivost piezoelektričnega merilnega sistema za tlak:

$$K_{pt} = K_{zaz,pt} K_{no,pt} = 22 \frac{\text{pC}}{\text{kPa}} \cdot 0,05 \frac{\text{V}}{\text{pC}} = 1,1 \frac{\text{V}}{\text{kPa}}. \quad (3.29)$$

V odvisnosti od te vrednosti občutljivosti in od načrtovanih generiranih tlačnih sprememb manjših od 0,9 Pa sledi, da na merilni kartici nastavimo vhodno območje električnih napetosti ± 1 V. Merilna kartica zajema signale z zaporednim načinom preklopa med kanali, zato je za bolj točen zajem le-teh priporočeno, da nastavimo čim bolj podobne parametre za vse kanale. Tako smo na merilni kartici za vse kanale nastavili enako območje električnih napetosti ± 1 V. To je bilo izhodišče za prilagoditev vrednosti merilnega upora (5Ω), ki s padcem električne napetosti na le-tem omogoča merjenje vzbujevalnega električnega toka elektrodinamičnega zvočnika, in nastavitev ojačitve nabojnega modula ($K_{no,po} = 1 \text{ V pC}^{-1}$) za uporabljeni piezoelektrični pospeškomer ($K_{zaz,po} = 0,3141 \text{ pC m}^{-1} \text{ s}^2$).

Iz merilno-tehničnih podatkov za uporabljen piezoelektrični tlačni merilni sistem (glej podpoglavje 3.2.1) lahko izračunamo zgornjo mejno frekvenco frekvenčnega območja za izbran 1 % amplitudni dinamični merilni pogrešek:

$$f_{zg,1\%} = 0,1 f_{0,zaz,pt} = 0,1 \cdot 13 \text{ kHz} = 1,3 \text{ kHz}, \quad (3.30)$$

kjer je $f_{0,zaz,pt}$ podana lastna frekvenca piezoelektričnega merilnika tlaka pri direktni vgradnji. V odvisnosti od lomne frekvence nabojnega ojačevalnika $f_{lom,no,pt}$ lahko določimo še spodnjo mejno frekvenco:

$$f_{sp,1\%} = 7 f_{lom,no,pt} = 7 \cdot 0,07 \text{ Hz} = 0,49 \text{ Hz}. \quad (3.31)$$

Glede na izbrani amplitudni dinamični pogrešek tlačnega signala so definirani tudi pripadajoči fazni dinamični pogreški (glej preglednici 2.1 in 2.2). Frekvenčno območje piezoelektričnega merilnega sistema za tlak, znotraj katerega so načrtovane meritve generiranih tlačnih sprememb, smo omejili od 1 do 1000 Hz. V odvisnosti od preračunanih mejnih frekvenc frekvenčnega območja piezoelektričnega tlačnega merilnega sistema lahko pričakujemo relativni amplitudni dinamični merilni pogrešek tlačnih signalov znotraj 1 % pri vseh frekvencah. Pri tem bodo tudi fazni dinamični pogreški manjši kot pri podanih mejnih frekvencah merilnega sistema, in sicer pri najnižjih frekvencah pričakujemo, da bodo manjši od 4° , pri najvišjih frekvencah pa bodo dosegli največ $0,9^\circ$.

Z analizo dinamičnih merilnih pogreškov tlačnih signalov smo ugotovili, da imata pri frekvenci vzbujanja 10 Hz lastna frekvenca piezoelektričnega merilnika tlaka in lomna frekvenca nabojnega ojačevalnika zanemarljiv vpliv na točnost merjenja. Tako smo frekvenco vzbujanja 10 Hz izbrali za usklajevanje merilnih signalov obeh tlačnih merilnikov oz. smo pred meritvami izvedli nastavitve merilne občutljivosti enega od njih. V nadzornem programu smo najprej nastavili merilne občutljivosti merilnikov tlaka, ki jih podaja izdelovalec ($K_{zaz,1} = 20,95 \text{ pC kPa}^{-1}$ in $K_{zaz,2} = 21,30 \text{ pC kPa}^{-1}$), in enaki občutljivosti nabojnega ojačevalnika, nato pa določili razmerje amplitud generiranih tlačnih sprememb z obema merilnikoma tlaka:

$$\frac{A_{p2}}{A_{p1}} = \frac{K_{zaz,1}}{K_{zaz,2}}. \quad (3.32)$$

Merilniku 2 smo s pridobljenim razmerjem nastavili merilno občutljivost ($21,63 \text{ pC kPa}^{-1}$), tako da naj bi v nadaljevanju oba merilnika izmerila približno enako amplitudo generirane tlačne spremembe.

V nadzornem programu se izračuna vrednost nadzorne električne napetosti, s katero na funkcijskem generatorju nastavljamo frekvenco vzbujevalnega signala, in sicer tako, da je izbrano frekvenčno območje od 1 do 1000 Hz logaritemsko porazdeljeno na 30 merilnih točk (j):

$$U_j = k f_j + n = k 10^{j/10} + n, \quad (3.33)$$

kjer U_j predstavlja električno napetost nadzornega signala funkcijskega generatorja glede na želeno vzbujevalno frekvenco f_j . Zaradi omejenosti frekvenčnih podobmočij funkcijskega generatorja smo določili dve logaritemski funkciji nadzornega signala funkcijskega generatorja, kot je prikazano v preglednici 3.2.

Preglednica 3.2: Območji nadzornega signala funkcijskega generatorja.

nadzorni signal funkcijskega generatorja	izbrano frekvenčno podobmočje funkcijskega generatorja	območje vzbujevalnih frekvenc
prva funkcija	100 Hz	1 do 250 Hz
druga funkcija	1000 Hz	251 do 1000 Hz

Meritve amplitudnih in faznih frekvenčnih značilnic dinamičnega tlačnega generatorja smo izvedli pri štirih legah elektrodinamičnega zvočnika glede na ohišje generatorja z vgrajenima merilnikoma tlaka, in sicer z rotacijo zvočnika za 90° . Po spremembi vsake vzbujevalne frekvence je v programu pred zajemom signalov določen čas zakasnitve (5 s), ki omogoča, da prehodni del odziva merilnih signalov preide v ustaljeno stanje. Za tem sledi meritev v časovnem intervalu 3 s pri frekvenci vzorčenja merilne kartice 25000 Hz in številu vzorcev 75000 ter nato zapis izmerjenih digitalnih merilnih signalov v tekstovno datoteko. Ko program zaključi zajem signalov v vseh merilnih točkah, zajete podatke obdela ter v tekstovno datoteko zapiše tudi opazovane amplitudne in fazne frekvenčne značilnice.

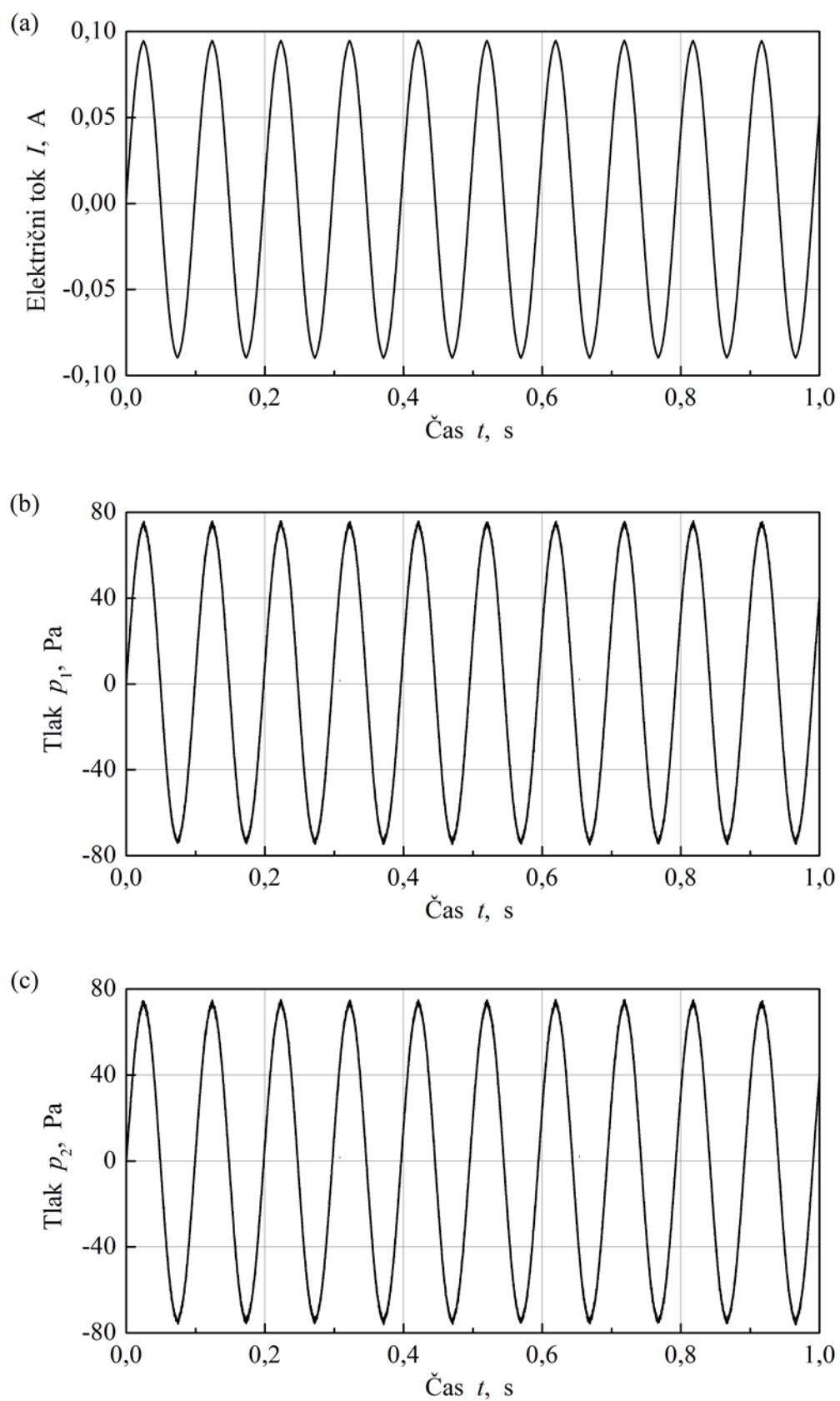
Pri vsaki poziciji smo naredili tri ponovitve, s čimer smo preverili ponovljivost meritev in morebitno asimetričnost nihanja membrane. Z uporabo dveh direktno vgrajenih piezoelektričnih merilnikov tlaka omogočimo merjenje dinamičnih lastnosti tlačnih sprememb neposredno v zračni komori. Na koncu smo naredili še primer merjenja generiranih tlačnih sprememb s kratko povezovalno cevko, z namenom prikaza vpliva povezovalnih elementov na dinamične značilnice merilnega sistema za tlak.

4. Rezultati in diskusija

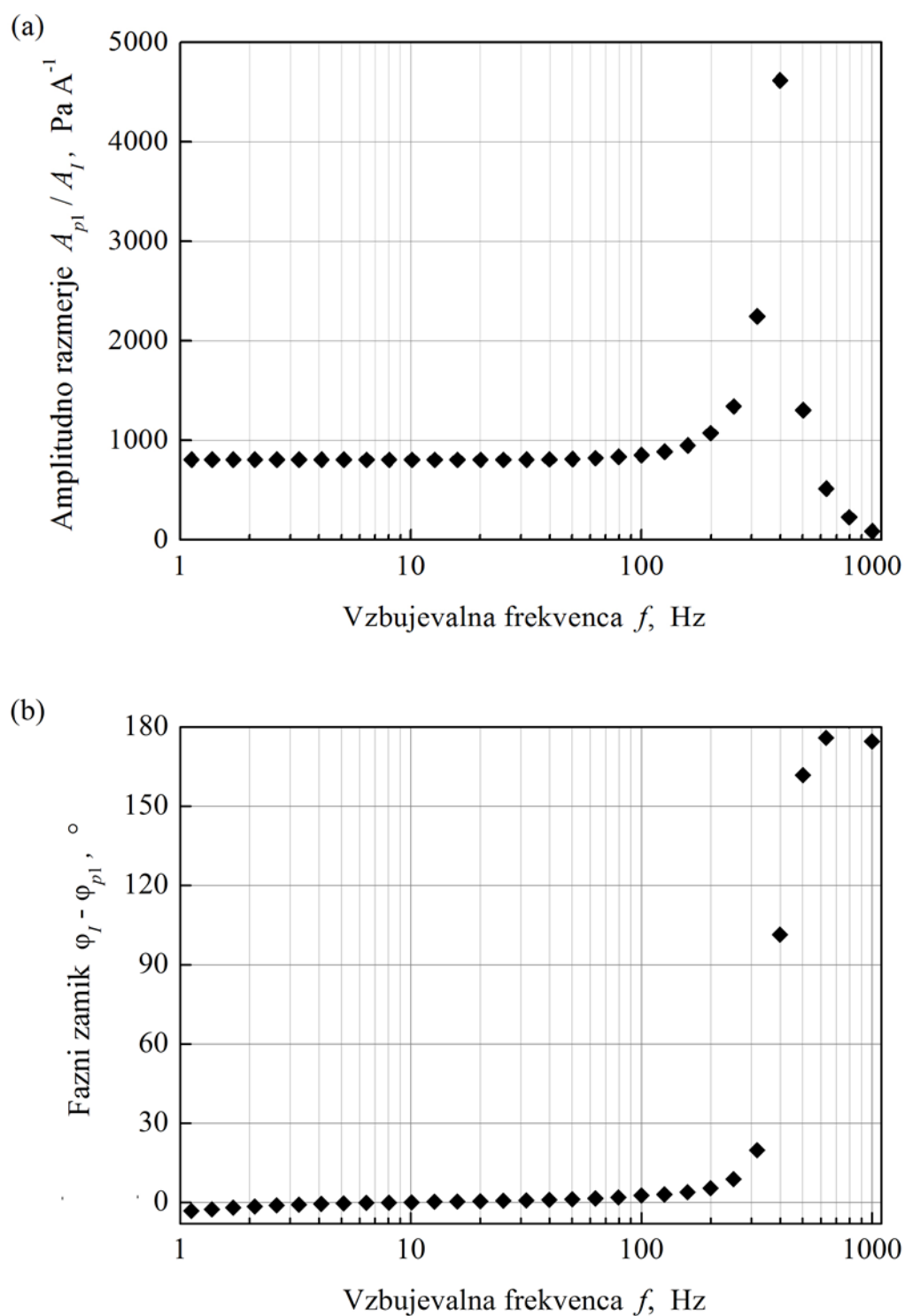
4.1. Frekvenčne značilnice dinamičnega tlačnega generatorja

Razviti dinamični tlačni generator s pripadajočim tlačnim merilnim sistemom omogoča generiranje stabilnih in nastavljivih periodičnih tlačnih sprememb znotraj zračne komore pri povprečnem tlaku okolice. Slika 4.1 prikazuje primer časovnega poteka harmoničnega vzbujevalnega električnega toka elektrodinamičnega zvočnika pri vzbujevalni frekvenci 10 Hz in rezultirajočih harmoničnih tlačnih sprememb, ki se generirajo z gibanjem membrane znotraj zračne komore. Direktno vgrajena piezoelektrična merilnika tlaka merita dinamično tlačno komponento s približno enako amplitudo in fazo, saj so pri vzbujevalni frekvenci 10 Hz amplitudni in fazni dinamični merilni pogreški uporabljenega piezoelektričnega tlačnega merilnega sistema zanemarljivo majhni (glej podpoglavje 3.3).

Slika 4.2 prikazuje izmerjeno amplitudno in fazno frekvenčno značilnico med generiranimi tlačnimi spremembami, merjenimi s piezoelektričnim tlačnim merilnikom 1, in vzbujevalnim električnim tokom v frekvenčnem območju od 1 do 1000 Hz. Iz amplitudno frekvenčne značilnice je razvidno, da se amplitudno razmerje tlačne spremembe in vzbujevalnega električnega toka povišuje z vzbujevalno frekvenco. Bližje kot sta si vzbujevalna frekvenca in lastna frekvenca dinamičnega tlačnega generatorja, večje je amplitudno razmerje. Lastno frekvenco smo določili iz fazno frekvenčne značilnice pri faznem zamiku 90° ($f_{0,G} \approx 380$ Hz), ki je nekoliko nižja od lastne frekvence sistema z dvema nasprotnima zvočnikoma (400 Hz, podpoglavje 2.1.1.3). To je posledica manjše prostornine zračne komore in dvakrat manjše togosti zraka znotraj le-te, saj pri obravnavani izvedbi generatorja tlačne spremembe generira le ena membrana namesto dveh (glej podpoglavje 3.1.1). Iz amplitudno frekvenčne značilnice je v podresonančnem frekvenčnem območju do približno 100 Hz razvidna relativno konstantna statična občutljivost dinamičnega tlačnega generatorja ($K_G \approx 810$ Pa A⁻¹), medtem ko lahko iz fazno frekvenčne značilnice z ocenitvijo frekvenc pri faznih zamikih 45° , 90° in 135° po enačbi (2.7) določimo razmernik dušenja $\xi_G \approx 0,13$. To tudi eksperimentalno potrdi, da je dinamični tlačni generator podkritično dušen dinamski sistem drugega reda. Pri nizkih vzbujevalnih frekvencah so razvidni določeni fazni zamiki med vzbujevalnim električnim tokom in tlakom (približno -3° pri vzbujevalni frekvenci 1 Hz), kar napoveduje tudi teorija uporabljenega visokoprepustnega filtra znotraj nabojnega ojačevalnika (glej podpoglavje 3.3).



Slika 4.1: Izmerjeni časovni poteki (a) vzbujevalnega električnega toka, (b) tlaka z merilnikom 1 in (c) tlaka z merilnikom 2 pri vzbujevalni frekvenci 10 Hz.



Slika 4.2: Izmerjena frekvenčna značilnica dinamičnega tlačnega generatorja: (a) amplitudna in (b) fazna.

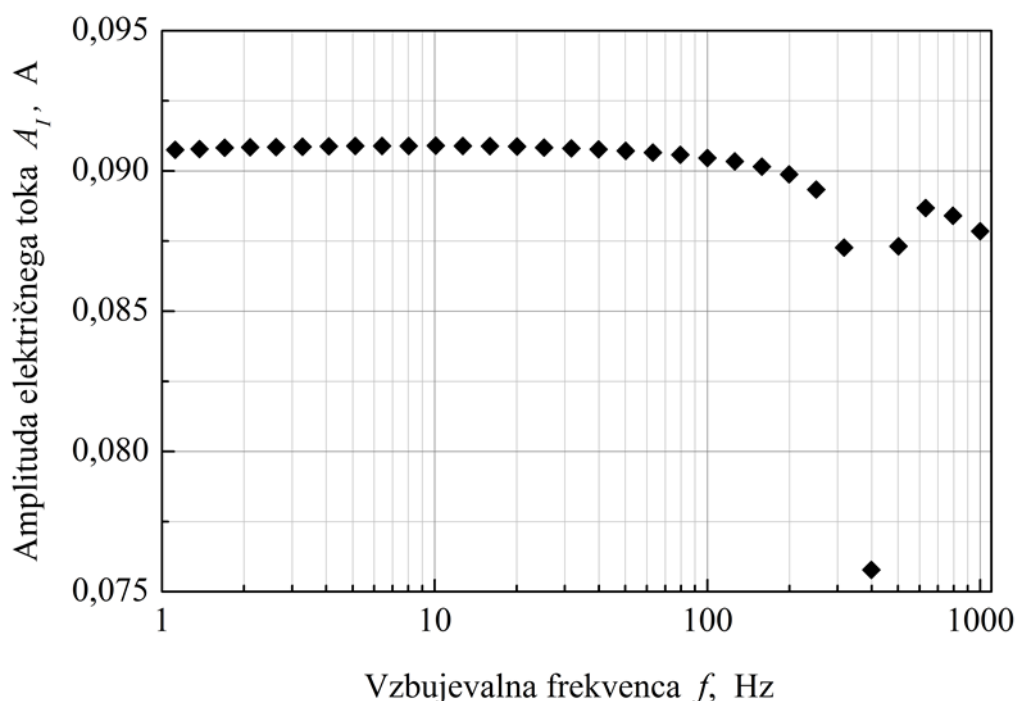
V elektrodinamičnem vzbujevalnem sistemu se pojavlja tudi učinek elektromagnetne indukcije, ki je posledica gibanja tuljave znotraj elektromagnetnega polja. To ustvari električni napetostni potencial, tako imenovano inducirano električno napetost [19]:

$$U_{ind} = -Bl_t \dot{x}(t), \quad (4.1)$$

ki pri konstantni vzbujevalni električni napetosti $U(t)$ zmanjšuje vzbujevalni električni tok I v tuljavi:

$$R_t I = U(t) - U_{ind}, \quad (4.2)$$

kjer R_t pomeni notranjo upornost tuljave. Iz slike 4.3 je razviden izrazit vpliv inducirane električne napetosti kot zmanjšanje amplitude električnega toka v resonančnem območju dinamičnega tlačnega generatorja, kjer so najvišje amplitude hitrosti gibanja tuljave. Amplituda vzbujevalnega električnega toka se zmanjša za približno 20 %, kar posledično pomeni, da se v resonančnem območju zmanjša tudi velikost amplitude tlačne spremembe.

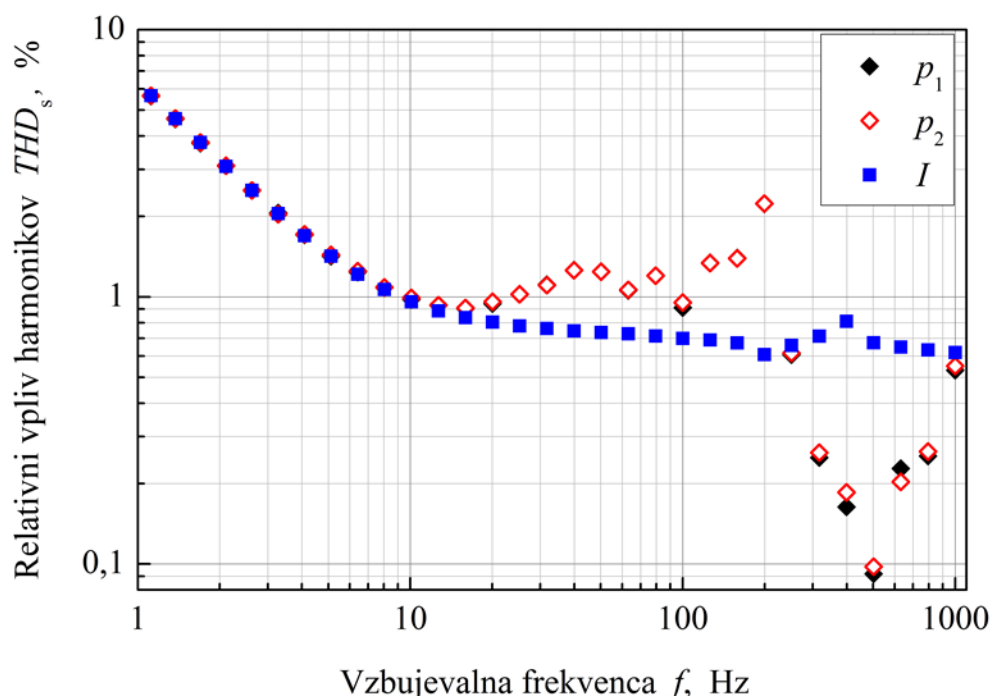


Slika 4.3: Izmerjena frekvenčna značilnica amplitudne vzbujevalnega električnega toka.

Prisotnost višjih harmonikov glede na osnovno vzbujevalno komponento povzroči popačenje tlačnih in električnih tokovnih signalov. Z namenom ocene kakovosti signala smo izračunali parameter skupnega harmoničnega popačenja *THD* (ang. *total harmonic distortion*), ki poda razmerje med vsoto RMS (ang. *root mean square*) vrednosti višjih harmonikov ($i = 2, 3, 4 \dots$) in RMS vrednostjo osnovne komponente pri vzbujevalni frekvenci ($i = 1$) [27]:

$$THD_s = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^K A_{s,i}^2}}{A_{s1}} 100\%, \quad (4.3)$$

kjer indeks s pomeni opazovan merilni signal, $A_{s,i}$ pa pripadajoče amplitude harmonikov. Slika 4.4 prikazuje relativni vpliv višjih harmonikov pri merilnih signalih električnega toka in obeh tlakov. V frekvenčnem območju od 1 do 10 Hz se skupno harmonično popačenje pojavi enako za vse merilne signale, kar je posledica relativno velikega harmoničnega popačenja izhodnega signala funkcijskega generatorja pri nizkih frekvencah (glej podpoglavje 3.2.1). To pomeni, da se harmonično popačen signal vzbujevalnega električnega toka prenese na merjeno tlačno spremembo. V tem območju je opazen trend padanja parametra skupnega harmoničnega popačenja od 6 % do 1 %. Pri frekvencah nad 10 Hz je po podatkih izdelovalca harmonično popačenje funkcijskega generatorja znotraj 1 %, kar smo potrdili tudi z izmerjenim vplivom višjih harmonikov v merilnem signalu električnega toka. Razvidno je, da so vrednosti skupnega harmoničnega popačenja vzbujevalnega električnega toka znotraj 1 % tudi v resonančnem območju, kjer pride do rahlega zvišanja zaradi zmanjšanja amplitude osnovne komponente električnega toka (glej sliko 4.3). Pri tlačnih merilnih signalih pa pride do obratnega pojava, in sicer parameter skupnega harmoničnega popačenja pri lastni frekvenci dinamičnega tlačnega generatorja pade na vrednost manjšo od 0,2 %, kar je posledica povečanja amplitude osnovne komponente tlačnega signala. Vpliv višjih harmonikov se pri tlačnih signalih v frekvenčnem območju od 10 do 200 Hz najprej povečuje (do 2,5 %), kar je najverjetneje posledica dinamike delovanja piezoelektričnega merilnega sistema za tlak, nato kot že omenjeno v resonančnem območju izrazito pade zaradi povečanja amplitud osnovnih tlačnih komponent, ter nato zaradi zelo majhnih amplitud v nadresonančnem območju ponovno narašča. Za slednje predvidevamo, da na njih nekoliko vpliva tudi prisotnost zunaj prenesenih vibracij na piezoelektrična merilnika tlaka.



Slika 4.4: Relativni vpliv višjih harmonikov na merilne signale električnega toka in obeh tlakov.

Slika 4.5 prikazuje frekvenčno značilnico amplitudnega razmerja in faznega zamika med izmerjenima tlakoma z dvema direktno vgrajenima piezoelektričnima merilnikoma tlaka. Pred izvajanjem meritev se je pri vzbujevalni frekvenci približno 10 Hz nastavila statična merilna občutljivost merilniku 2 z namenom doseganja enakosti amplitudnega razmerja med obema izmerjenima tlakoma pri dani frekvenci. V želenem frekvenčnem območju od 1 do 500 Hz smo z razvitim dinamičnim tlačnim generatorjem eksperimentalno dosegli amplitudne dinamične merilne pogreške tlačnih signalov znotraj 1,1 % (amplitudno razmerje med 0,989 in 1,011), kljub temu da je znotraj frekvenčnega območja tudi lastna frekvenca generatorja. Pri višjih vzbujevalnih frekvencah pa ti pogreški močno narastejo, celo nad 20 % pri frekvenci 1000 Hz. Tudi pri fazno frekvenčni značilnici je razvidno, da so fazni zamiki v frekvenčnem območju do 500 Hz relativno majhni, in sicer znotraj 1° , pri višjih frekvencah pa se intenzivno povečujejo. Pri nizkih frekvencah so, kljub temu da teorija delovanja nabojnega ojačevalnika napoveduje določene fazne zamike tlačnih signalov, slednji zanemarljivo majhni, s čimer lahko sklepamo na skoraj simetrično delovanje nabojnih ojačevalnikov obeh piezoelektričnih merilnikov tlaka. Glede na rezultate eksperimentalnega preizkušanja razvitega dinamičnega tlačnega generatorja smo potrdili uporabno frekvenčno območje za nadaljnje analize tlačnih povezovalnih cevk od 1 do 500 Hz, saj so le v tem frekvenčnem območju doseženi amplitudni oz. fazni dinamični merilni pogreški med tlačnima signaloma znotraj 1,1 % oz. 1° .

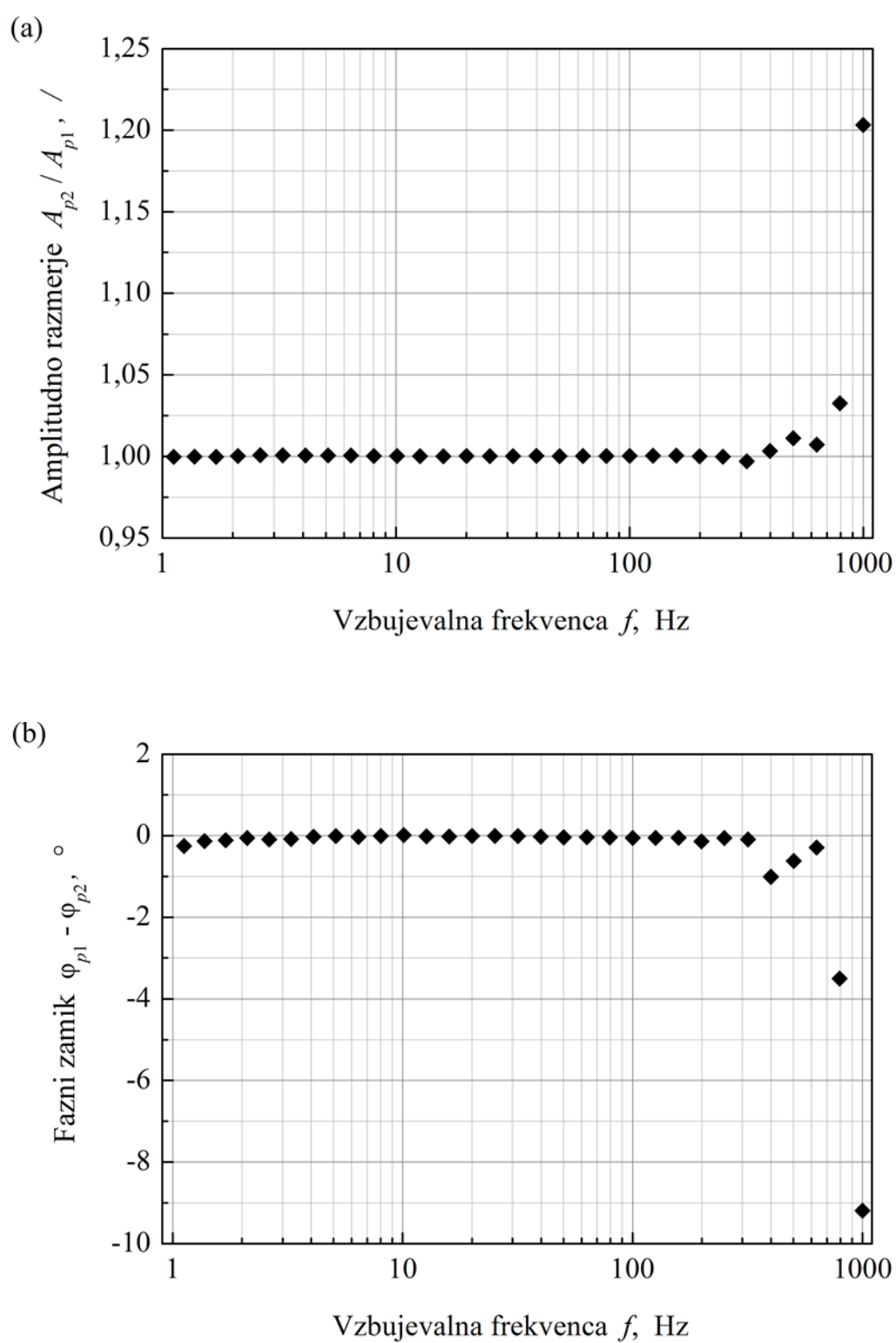
Eksperimentalno preučevanje omejitve uporabnega frekvenčnega območja do 500 Hz je pokazalo, da je povečano odstopanje amplitudnega razmerja in faznega zamika pri vzbujevalnih frekvencah nad 500 Hz posledica vpliva zunanjih vibracij dinamičnega tlačnega generatorja. Le-te znotraj kristala piezoelektričnega merilnika tlaka generirajo dodatni naboj, kar povzroči povišanje izmerjene amplitude tlačne komponente. Občutljivost uporabljenih piezoelektričnih merilnikov tlaka na zunanje vibracije je s strani proizvajalca podana kot $K_{zaz,pt,a} = 0,01 \text{ kPa m}^{-1} \text{ s}^2$, kar smo Svete et al. [28] tudi eksperimentalno potrdili. Ocenjeni relativni pogrešek merjenja tlačnih sprememb zaradi vpliva vibracij smo določili kot:

$$e_{r,a} = \left(\frac{A_{p,a}}{A_{p1}} \right) 100 \% , \quad (4.4)$$

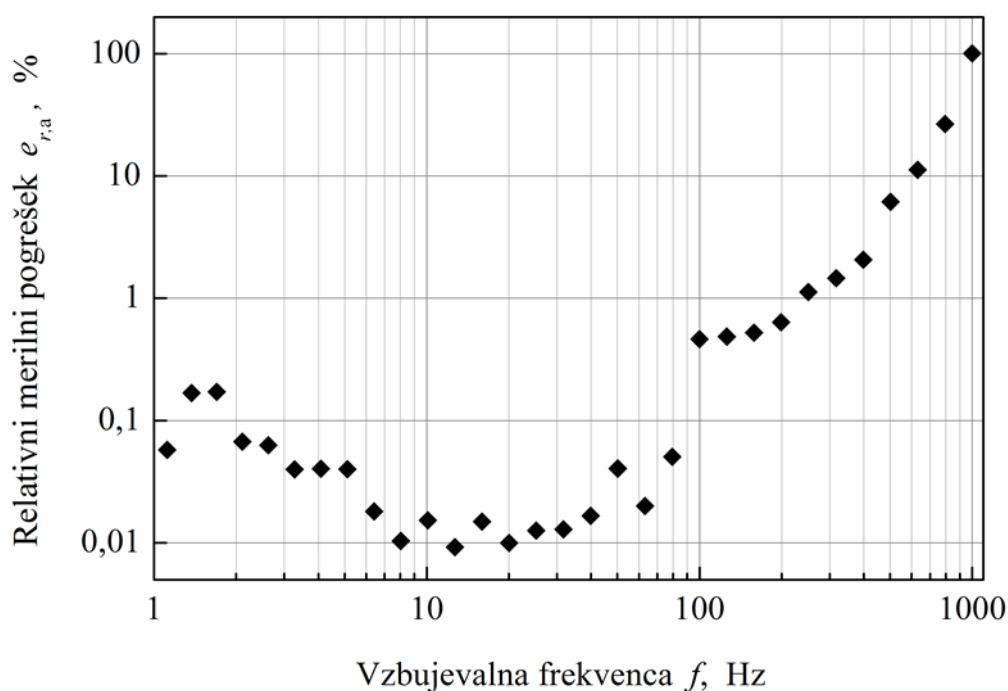
kjer $A_{p,a}$ predstavlja generirano tlačno komponento zaradi vpliva vibracij:

$$A_{p,a} = K_{zaz,pt,a} A_a . \quad (4.5)$$

Amplitudo pospeška vibracij A_a pa smo merili s piezoelektričnim pospeškometerom, nameščenim na ohišje generatorja, in sicer približno nad sredino membrane ter med piezoelektričnima merilnikoma tlaka. Iz slike 4.6 je razvidno, da je v frekvenčnem območju do 100 Hz vpliv vibracij na merjenje tlačnih sprememb manjši od 0,2 %, medtem ko je v okolici lastne frekvence dinamičnega tlačnega generatorja relativni merilni pogrešek približno 2 %. Pri vzbujevalnih frekvencah nad 500 Hz se zunanje vibracije dinamičnega tlačnega generatorja močno ojačajo, s čimer lahko potrdimo razloge za povečanje amplitudnega razmerja in faznega zamika med merjenima tlakoma v tem območju (glej sliko 4.5). Zaključimo lahko, da omejitev uporabnega frekvenčnega območja določa togost konstrukcije ohišja.



Slika 4.5: Izmerjena frekvenčna značilnica z direktno vgrajenima piezoelektričnima merilnikoma tlaka 1 in 2: (a) amplitudnega razmerja in (b) faznega zamika.



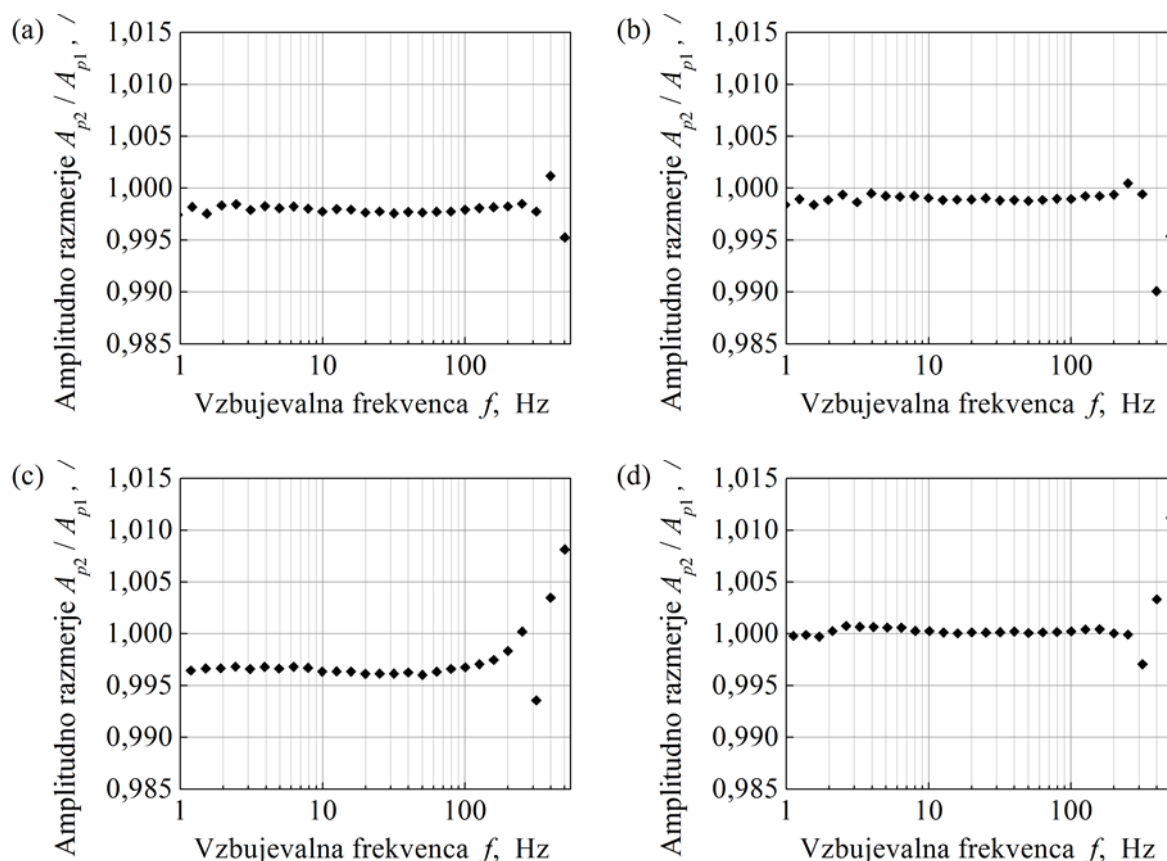
Slika 4.6: Ocenjeni relativni merilni pogrešek piezoelektričnega merilnika tlaka zaradi vpliva prenesenih vibracij.

4.2. Primerjava frekvenčnih značilnic dveh direktno vgrajenih piezoelektričnih merilnikov tlaka

Razviti dinamični tlačni generator omogoča različne načine vgradnje piezoelektričnih merilnikov tlaka. Z direktno vgradnjo dveh piezoelektričnih merilnikov tlaka smo določili in primerjali izmerjene tlačne spremembe pri štirih različnih legah zvočnika glede na ohišje generatorja z vgrajenima merilnikoma (rotacija zvočnika za 90°). Slika 4.7 prikazuje izmerjena amplitudna razmerja med merilnikom 2 in 1 v uporabnem frekvenčnem območju od 1 do 500 Hz (glej prejšnjo podpoglavje). Iz slike 4.7d je razvidno, da je bila nastavitev statične merilne občutljivosti piezoelektričnega tlačnega merilnika 2 izvedena pri legi 4 (po postopku opisanem v podpoglavju 3.3), s približno enotskim amplitudnim razmerjem pri nižjih frekvencah. S spremembo lege zvočnika lahko določimo ponovljivost statične merilne občutljivosti piezoelektričnega merilnega sistema v podresonančnem območju dinamičnega tlačnega generatorja, ki je znotraj 0,05 %, kljub dejstvu, da imata vgrajena piezoelektrična merilnika tlaka relativno veliko merilno območje (-100 do $+1000$ kPa) glede na majhne amplitude generiranih tlačnih sprememb (od 70 do 300 Pa). Na vrednost ponovljivosti lahko vpliva tudi sprememba temperature znotraj zračne komore in v okolici piezoelektričnih merilnikov tlaka.

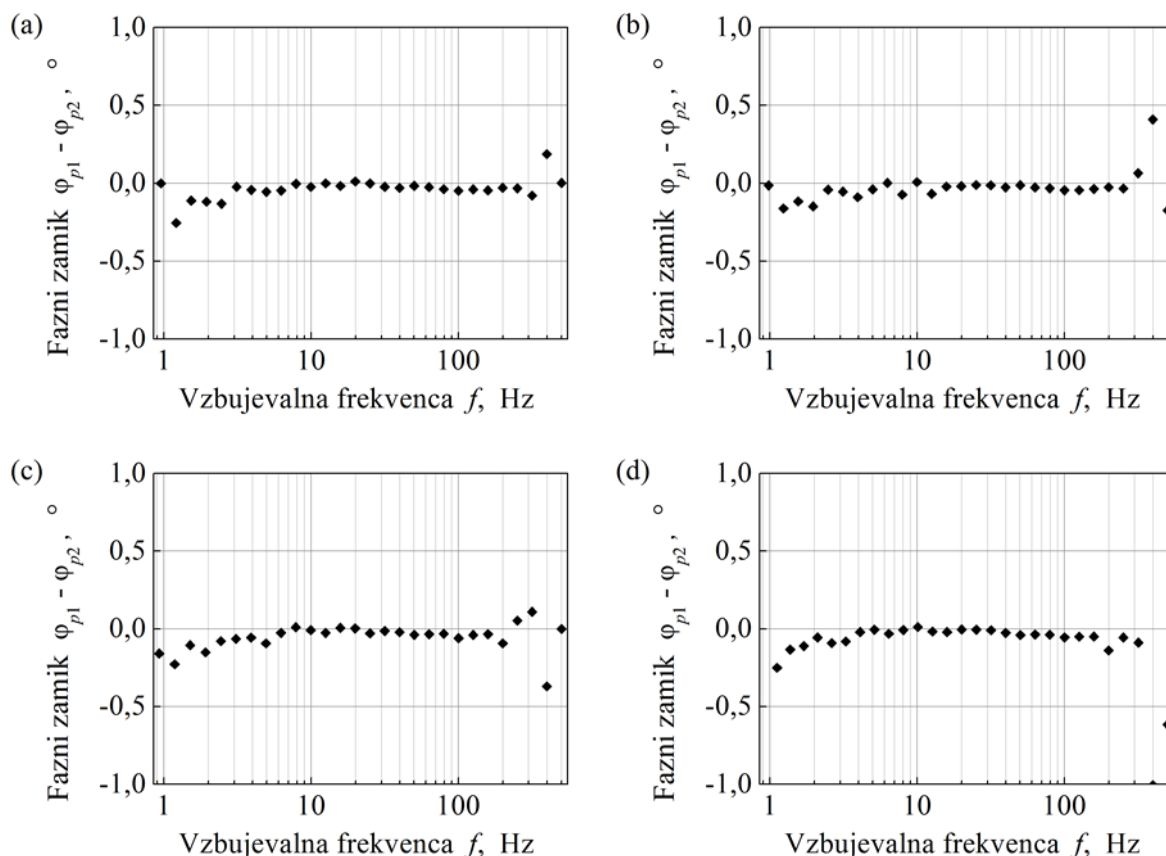
Iz frekvenčne značilnice amplitudnega razmerja obeh tlačnih signalov je razvidno, da je amplitudni relativni dinamični merilni pogrešek merjenega tlaka znotraj 0,6 % do vzbujevalne frekvence 300 Hz pri vseh legah zvočnika. Pri višjih frekvencah je le-ta

večinoma manjši od 1 %, pri čemer s spremembo lege zvočnika ni opaziti značilnega trenda spreminjanja amplitudnega razmerja tlakov, ki bi ga na primer lahko povzročalo asimetrično nihanje membrane. Pri nasprotnih legah zvočnika 2 in 4 je sicer razviden nasprotni trend amplitudnega razmerja tlakov, medtem ko le-ta pri legah zvočnika 1 in 3 ni opazen.



Slika 4.7: Izmerjena amplitudna razmerja med piezoelektričnima merilnikoma tlaka pri različnih legah zvočnika: (a) lega 1, (b) lega 2, (c) lega 3 in (d) lega 4.

Slika 4.8 prikazuje frekvenčne značilnice faznih zamikov med tlačnima signaloma merjenima z merilnikoma 1 in 2, kjer tako kot pri amplitudno frekvenčni značilnici ni značilnega trenda med nasprotnimi legami zvočnika, ki bi lahko pomenilo asimetrično nihanje membrane. Pri nizkih frekvencah je opazen fazni zamik med tlačnima signaloma, ki je manjši od $0,25^\circ$, kateri je posledica nesimetričnega delovanja uporabljenih modulov nabojnega ojačevalnika. Medtem ko so do frekvence 500 Hz fazni dinamični pogreški znotraj $0,6^\circ$, kar nakazuje na relativno homogeno porazdelitev tlačnih sprememb znotraj zračne komore. Rezultati potrjujejo, da lahko neodvisno od lege zvočnika v uporabnem frekvenčnem območju dinamičnega tlačnega generatorja z enim elektrodinamičnim zvočnikom v nadaljnjih meritvah upoštevamo amplitudni oz. fazni dinamični merilni pogrešek manjši od 1,1 % oz. $0,6^\circ$.



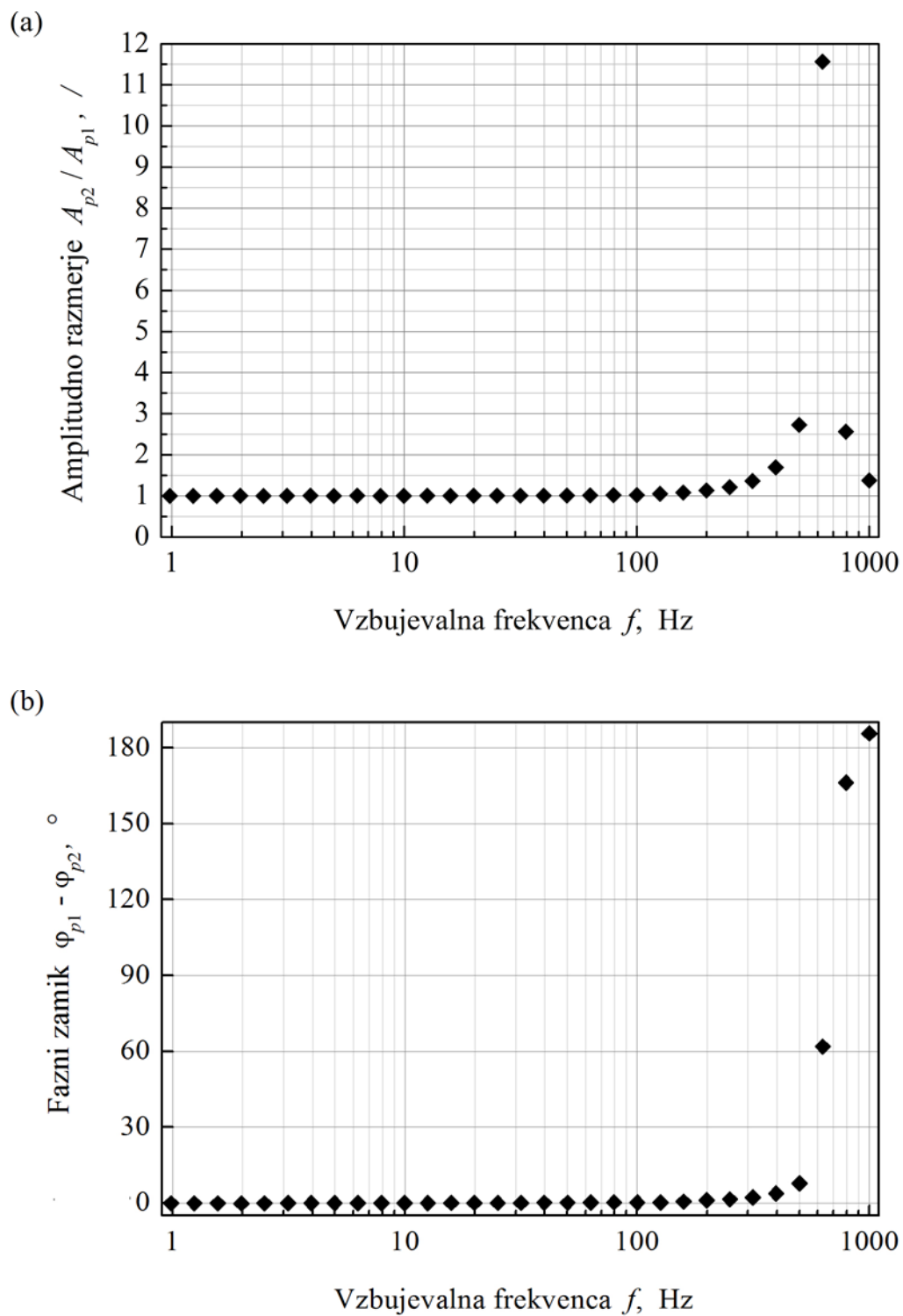
Slika 4.8: Izmerjena fazna frekvenčna značilnica med piezoelektričnima merilnikoma tlaka pri različnih legah zvočnika: (a) lega 1, (b) lega 2, (c) lega 3 in (d) lega 4.

4.3. Primer frekvenčne značilnice piezoelektričnega merilnika tlaka s povezovalno cevko

Pri realnih sistemih pogosto ni mogoča direktna vgradnja merilnikov tlaka, zato se le-te umesti v sistem z uporabo tlačnih povezovalnih cevk, katere vplivajo na dinamične lastnosti merjenja tlačnih sprememb v odvisnosti od premera in dolžine cevk. Razviti dinamični tlačni generator s pripadajočim tlačnim merilnim sistemom omogoča kakovostno določanje dinamičnih merilnih pogreškov povezovalnih elementov v frekvenčnem območju od 1 do 500 Hz, in sicer s primerjavo med primerjalnim tlakom izmerjenim z merilnikom tlaka povezanim preko povezovalne cevke in referenčnim tlakom določenim z direktno vgrajenim piezoelektričnim merilnikom tlaka. Za primer ocenitve dinamičnih merilnih pogreškov povezovalne cevke smo izvedli meritve s povezovalno cevko notranjega premera 4 mm in dolžine 43 mm, ki je pri izvedbi dinamičnega tlačnega generatorja z dvema zvočnikom predstavljala najkrajšo možno povezavo referenčnega merilnika tlaka.

Slika 4.9 prikazuje izmerjene frekvenčne značilnice amplitudnega razmerja in faznih zamikov merjenih tlakov, ki potrjuje, da je merjenje tlačnih sprememb z uporabo kratke cevke dokaj točno le v frekvenčnem območju do 100 Hz, kjer je relativni amplitudni

dinamični merilni pogrešek znotraj 2 % ter fazni $0,3^\circ$. Iz tega lahko sklenemo, da bi pri dinamičnem tlačnem generatorju z dvema zvočnikoma, kjer se referenčni tlak zajema preko kratke povezovalne cevke, merjenje le-tega pri višjih frekvencah povzročalo že zelo velike amplitudne oz. fazne dinamične merilne pogreške, in sicer tudi do 173 % oz. $7,8^\circ$ pri 500 Hz. Kljub visoki lastni frekvenci povezovalne cevke, približno 730 Hz, ocenjeni iz fazno frekvenčne značilnice, smo s tem primerom dokazali, da je zadosti točno merjenje referenčnega tlaka znotraj zračne komore s kratkimi povezovalnimi tlačnimi cevkami omejeno na nizkofrekvenčna območja do 100 Hz. Z novo izvedbo tlačnega generatorja z enim zvočnikom smo to uporabno frekvenčno območje povečali do 500 Hz.



Slika 4.9: Izmerjena frekvenčna značilnica med primerjalnim in referenčnim tlačnim signalom ob vgradnji enega merilnika s povezovalno cevko: (a) amplitudnega razmerja in (b) faznega zamika.

5. Zaključki

- 1) Izdelali smo dinamični tlačni generator s pripadajočim piezoelektričnim tlačnim merilnim sistemom, v katerem periodične tlačne spremembe generira elektrodinamični zvočnik. Primeren elektrodinamični zvočnik smo izbrali na podlagi postavljenega fizikalno-matematičnega modela.
- 2) Konstrukcija razvitega dinamičnega tlačnega generatorja z enim zvočnikom omogoča priključitev piezoelektričnih merilnikov tlaka direktno v ohišje, kar predstavlja glavno prednost glede na generator z dvema nasprotnima zvočnikoma. Pri načrtovanju ohišja generatorja smo optimizirali prostornino zračne komore tako, da bi dosegli čim višjo občutljivost in lastno frekvenco dinamičnega tlačnega generatorja ter zmanjšali vpliv dinamičnih lastnosti merjenja tlačnih sprememb z merilniki tlaka, ki so priključenimi s povezovalno cevko.
- 3) V programskem okolju LabVIEW smo izdelali nadzorni program, ki je omogočal izvajanje meritev z avtomatskim spreminjanjem vzbujevalne frekvence. Amplitudne in fazne frekvenčne značilnice smo v okviru digitalne obdelave signalov določali preko Fourierove analize merilnih signalov.
- 4) Rezultati eksperimentalnega preizkušanja omogočajo vpogled v zmožljivosti in omejitve razvitega merilnega sistema z generatorjem periodičnih tlačnih sprememb in primernost uporabe le-tega za raziskave dinamičnih značilnic tlačnih povezovalnih cevk. Pri tem je bilo ugotovljeno, da so njegove dinamične značilnice določene z lastnostmi elektrodinamičnega zvočnika, velikostjo zračne komore ter lastnostmi piezoelektričnega tlačnega merilnega sistema in načinom priključitve merilnikov tlaka.
- 5) S pomočjo preizkusov smo določili amplitudne in fazne frekvenčne značilnice dinamičnega tlačnega generatorja in pripadajočega merilnega sistema pri štirih različnih legah zvočnika. Rezultati merjenja tlačnih sprememb z dvema direktno vgrajenima piezoelektričnima merilnikoma tlaka pokažejo, da so v frekvenčnem območju od 1 do 500 Hz amplitudni oziroma fazni dinamični merilni pogreški tlačnih merilnih signalov znotraj 1,1 % oziroma 0,6°. S tem smo potrdili uporabnost dinamičnega tlačnega generatorja za nadaljnje študije vpliva tlačnih povezovalnih cevk na točnost merjenja tlačnih sprememb.
- 6) Razviti dinamični tlačni generator ima omejeno frekvenčno območje z zgornjo mejno frekvenco 500 Hz, ki je posledica vpliva zunanjih vibracij le-tega. Pri višjih frekvencah

se znotraj kristala piezoelektričnega merilnika tlaka generira dodatni naboj, kar povzroči povišanje izmerjenih amplitud in faznih zamikov tlačne spremembe.

- 7) Potrdili smo izboljšanje frekvenčnih lastnosti dinamičnega merilnega sistema glede na staro izvedbo z dvema zvočnikom, ki ni omogočala direktne vgradnje merilnika tlaka. Kratka povezovalna cevka pri 500 Hz povzroča relativno velike amplitudne oziroma fazne dinamične merilne pogreške tlačnih signalov, to je 173 % oziroma $7,8^\circ$.

Z eksperimentalnim preizkušanjem smo izmerili dinamične značilnice razvitega generatorja periodičnih dinamičnih tlačnih sprememb z enim elektrodinamičnim zvočnikom ter določili amplitudne in fazne dinamične merilne pogreške tlačnih signalov znotraj 1,1 % in $0,6^\circ$ v frekvenčnem območju od 1 do 500 Hz pri merjenju tlačnih sprememb direktno v zračni komori. Potrdili smo zmožnost uporabe dinamičnega tlačnega generatorja za raziskave frekvenčnih lastnosti tlačnih povezovalnih cevk.

Predlogi za nadaljnje delo

V nadaljevanju želimo z razvitim dinamičnim merilnim sistemom izvesti meritve amplitudnih in fazno frekvenčnih značilnic tlačnih povezovalnih cevk. Ti rezultati bodo omogočali oceno dinamičnih merilnih pogreškov tlačnih merilnih sistemov v odvisnosti od dolžine in premera tlačnih povezovalnih cevk.

S povečanjem togosti ohišja dinamičnega tlačnega generatorja bi v prihodnje lahko zmanjšali vpliv prenosa zunanjih vibracij na direktno vgrajene piezoelektrične merilnike, s čimer bi se povečalo uporabno frekvenčno področje merjenja tlačnih sprememb in preizkušanja tlačnih povezovalnih cevk.

6. Literatura

- [1] J. Kutin, I. Bajsić: *Characteristics of a dynamic pressure generator based on loudspeakers*. Sensors and Actuators A: Physical **168**:1 (2011) str. 149–154.
- [2] T. Lokar: *Modeliranje generatorja dinamičnega tlaka: diplomsko delo*. Ljubljana, 1999.
- [3] J. Hjelmgren: *Dynamic Measurement of Pressure – A Literature Survey*. SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 2002.
- [4] V. E. Bean: *Dynamic pressure metrology*. Metrologia **30**:6 (1994) str. 737–741.
- [5] A. C. G. C. Diniz, A. B. S. Oliveira, J. N. de Souza Vianna, F. J. R. Neves: *Dynamic calibration methods for pressure sensors and development of standard devices for dynamic pressure*. XVIII IMEKO World Congress. Rio de Janeiro, Brazil, 2006, str. 17–22.
- [6] G. J. Rosasco, V. E. Bean, W. S. Hurst: *A Proposed Dynamic Pressure and Temperature Primary Standard*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology **95**:33 (1990) str. 33–47.
- [7] J. N. de Souza Vianna, A. B. de Sousa Oliveira, J. P. Damion: *Influence of the diaphragm on the metrological characteristics of a shock tube*. Metrologia **36**:6 (1999) str. 599–603.
- [8] C. Matthews, F. Pennecchi, S. Eichstädt, A. Malengo, T. Esward, I. Smith, C. Elster, A. Knott, F. Arrhen and A. Lakka: *Mathematical modelling to support traceable dynamic calibration of pressure sensor*. Metrologia **51**:3 (2014) str. 326–338.
- [9] H. Soyama, A. Lichtarowicz, T. Momma and E. J. Williams: *A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement*. Journal of Fluids Engineering **120**:4 (1998) str. 712–718.
- [10] Z. Del Prete, L. Monteleone, R. Steindler: *A novel array sensor based on contact resistance variation: Metrological properties*. Review of Scientific Instruments **72**:2 (2001) str. 1548–1553.

- [11] L. Tomasi, E. Wieser, E. Baruah, D. Collomb, F. Jolly, G. Krotz, S. Storm, P. Janker, E. Obermeier: *Development of a new piezoelectric dynamic pressure generator for high pressure periodic and aperiodic calibration. XVII IMECO World Congress*. Dubrovnik, Croatia, 2003, str. 1995–1998.
- [12] Y. Jun, L. Cheng, W. Wei: *Micro dynamic pressure calibration with frequency method. X International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. Chengdu, China, 2011, str. 364–368.
- [13] A. Svete, M. Štefe, A. Maček, J. Kutin, I. Bajsić: *Dynamic pressure generator for dynamic calibrations at different average pressures based on a double-acting pneumatic actuator*. Sensors and Actuators A: Physical **247** (2011) str. 136–143.
- [14] M. Štefe: *Razvoj merilnega sistema za dinamično umerjanje merilnikov tlaka: diplomsko delo*. Ljubljana, 2015.
- [15] T. Kobota, A. Ooiwa: *Square-wave pressure generator using a novel rotating valve*. Metrologia **36**:6 (1999) str. 637–640.
- [16] A. Yoshida, Y. Tamura, T. Kurita: *Effects of bends in a tubing system for pressure measurement*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **89**:14–15 (2001) str. 1701–1716.
- [17] I. Bajsić, J. Kutin, T. Žagar: *The response time of a pressure measurement system with a connecting tube*. Instrumentation Science and Technology **35**:4 (2007) str. 399–409.
- [18] J. Kutin: *Piezoelektrična merilna zaznavala*. Meritve – zapis predavanj, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2017.
- [19] T. D. Burton: *Introduction to dynamic systems analysis*. McGraw-Hill, New York, 1994.
- [20] R. D. Blevins: *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. Krieger Publishing Company, Malabar, 1995.
- [21] Wikipedija: *High-pass filter*. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/High-pass_filter, ogled: 15. 03. 2017.
- [22] R. E. Apfel: *Acoustic lumped elements from first principles*. V: M. J. Crocker (ur.): *Handbook of Acoustics*. Wiley, New York, 1998, str. 145–149.
- [23] BEYMA: *5MP60/N low & mid frequency transducer*. Dostopno na: <https://www.beyma.com/getpdf.php?pid=5MP60/N>, ogled: 17. 02. 2017.
- [24] INTERTECHNOLOGY: *Kistler model 7261 Low Pressure Quartz Transducer*. Dostopno na: <http://www.process-controls.com/intertechnology/Kistler/images/7261.gif>, ogled: 21. 02. 2017.
- [25] KISTLER: *Low pressure Transducer*. Dostopno na: http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/Pressure_Model_7261.pdf, ogled: 21. 02. 2017.
- [26] J. Kutin, G. Bobovnik in I. Bajsić: *Dynamic effects in a clearance-sealed piston prover for gas flow measurements*. Metrologia **48**:3 (2011) str. 123–132.
- [27] M. L. Chugani, A. R. Samant, M. Cerna: *LabVIEW signal processing*. Prentice-Hall, New York, 1998.

- [28] A. Svete, M. Štefe, A. Maček, J. Kutin, I. Bajsić: *Development of a measurement system for dynamic calibration of pressure sensors. XXI IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry*. Prague, Czech Republic, 2015, str. 1666–1671.

7. Priloga A

Glej delavniško risbo na naslednji strani.

8. Priloga B

Glej delavniško risbo na naslednji strani.

