

Contribuții la reducerea zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat în modulele electronice automotive

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul Inginerie Electronică, Telecomunicații și
Tehnologii Informaționale
de către

Ing. Corina-Nicoleta COVACI

Președintele comisiei:	prof.univ.dr.ing. Dan LASCU
Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. Aurel GONTEAN
Referenți științifici:	prof.univ.dr.ing. Aldo DE SABATA
	prof.univ.dr.ing. Ovidiu POP
	prof.univ.dr.ing. Paul SVASTA

Ziua susținerii tezei: 06.10.2023

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|---|
| 1. Automatică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 2. Chimie | 12. Ingineria Sistemelor |
| 3. Energetică | 13. Inginerie Energetică |
| 4. Inginerie Chimică | 14. Calculatoare și Tehnologia Informației |
| 5. Inginerie Civilă | 15. Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | 16. Inginerie și Management |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 17. Arhitectură |
| 8. Inginerie Industrială | 18. Inginerie Civilă și Instalații |
| 9. Inginerie mecanică | 19. Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale |
| 10. Știința Calculatoarelor | |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul Școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2021

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300223 Timișoara, Bd. Vasile Pârvan 2B
Tel./fax 0256 404677
e-mail: editura@upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Electronică Aplicată al Universității Politehnica Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Aurel GONTEAN, care m-a sprijit și îndrumat încă din al doilea an al ciclului de licență. De asemenea, aș dori să le mulțumesc profesorilor din cadrul Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale, care au contribuit la dezvoltarea mea profesională.

Le mulțumesc din suflet colegiilor din echipele *User Experience Cabin Sensing* și *Quality Laboratory*, din cadrul companiei *Continental*TM pentru munca depusă în cercetarea fenomenului studiat în cadrul acestei teze. Le mulțumesc în mod special *team leader*-ului meu Florin Burza și *grup leader*-ului Cosmin MOISA pentru sprijinul oferit în elaborarea acestei teze, colegului meu Tibor CSUTAK pentru îndrumarea oferită în timpul investigațiilor realizate, colegului meu Daniel LASLĂU, pentru ajutorul oferit în efectuarea măsurărilor acustice și colegului meu Tamas KRAUSZ pentru simulările mecanice din cadrul acestei teze.

Nu în ultimul rând, aș dori să mulțumesc familiei pentru sprijinul, încrederea și răbdarea oferită. Mențiuni speciale se cuvin soțului meu Sergiu VIDONI și prietenei mele Larisa KISS-BOBESCU, cărora le mulțumesc pentru faptul că mi-au citit articolele publicate, mi-au ascultat prezentările pregătite pentru conferințele la care am participat și mi-au oferit observații constructive, fără de care nu aș fi ajuns până aici.

Timișoara, iunie 2023

Corina COVACI

NUME, Prenume

Titlul tezei

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica,
200Z, 168 pagini, 39 figuri, 27 tabele.

ISSN:

ISBN:

Cuvinte cheie

.....

.....

Rezumat

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

CUPRINS

Notații, abrevieri, acronime	7
Listă de tabele	9
Listă de figuri	10
1. Introducere	14
1.1. Motivația alegerii temei de cercetare	14
1.2. Importanța, noutatea și actualitatea temei	14
1.3. Formularea ipotezei de cercetare	15
1.4. Structura tezei	16
2. Stadiul actual	18
2.1. Noțiuni generale.....	18
2.2. Metode de măsurare.....	24
2.3. Soluții de eliminare sau atenuare a zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat	26
2.4. Metode de prevenție	33
2.5. Concluzii și contribuții originale	39
3. Analiza detaliată a problemei	42
3.1. Introducere a cazului experimental	42
3.2. Metode de măsurare folosite	44
3.3. Concluzii și contribuții originale	50
4. Simulare	52
4.1. Analiza modală – noțiuni teoretice	52
4.2. Analiza modală a sistemului.....	54
4.3. Analiza armonică – noțiuni teoretice	60
4.4. Analiza armonică a sistemului	63
4.5. Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare.....	68
4.6. Analiza armonică a sistemului după optimizarea de <i>layout</i>	73
4.7. Concluzii și contribuții originale	78
5. Validarea rezultatelor simulării prin măsurări experimentale	79
5.1. Validarea îmbunătățirii zgomotului acustic prin atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare.....	79
5.2. Validarea îmbunătățirii zgomotului acustic prin optimizarea de <i>layout</i>	89
5.3. Concluzii și contribuții originale	91
6. Alternative suplimentare investigate pentru reducerea fenomenului " <i>singing capacitors</i> "	93
6.1. Soluții concentrate pe modificări ale procesului de fabricație	93
6.2. Soluții concentrate pe modificări de componente	101
6.3. Soluții de acoperire a sunetului	104
6.4. Optimizare de <i>layout</i> prin plasarea componentelor în configurație paralelă	106
6.5. Concluzii și contribuții originale	108
7. Concluzii și contribuții originale	111
7.1. Sumarul contribuțiilor originale	111
7.2. Lista lucrărilor științifice	112
7.3. Concluzii	114
A1. Anexă	120
A2. Anexă	136
A2.1. Analiza armonică a sistemului original.....	136
A2.2. Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare.....	142

A2.3. Analiza armonică a sistemului după optimizarea de <i>layout</i>	148
Bibliografie.....	160

NOTAȚII, ABREVIERI, ACRONIME

Listă notații

A	Constantă de scalare
a	Amplitudine
C	Capacitate
c_n	Constantă complexă
$C_{xy}(f)$	Coerență dintre tensiunea semnalului $x(t)$ și vibrația $y(t)$
D	Deplasare a densității de sacină
d	Grosime a stratului dielectric
d_{ij} , e_{ij} , g_{ij}	Coefficient piezoelectric
h_{ij}	
d_{31}	Coefficient piezoelectric pe direcția y-
d_{33}	Coefficient piezoelectric pe direcția z-
E	Intensitate a câmpului electric
E_z	Câmp electric aplicat pe direcția z-
e_{ij}	Coefficient piezoelectric
$f(x)$	Valoare a funcției f în punctul x
f_i	Funcție impară
f_p	Funcție pară
$G_{xx}(f)$	Densitate auto-spectrală a semnalului x
$G_{xy}(f)$	Densitate interspectrală dintre semnalele x și y
$G_{yy}(f)$	Densitate auto-spectrală a semnalului y
g_{ij}	Coefficient piezoelectric
H	Grosime a unui strat dielectric
h_{ij}	Coefficient piezoelectric
k	Rigiditate
L	Lungime a unui strat dielectric
l_n	Lungime a liniei corespunzătoare nodului n
m	Masă
M_{33}	Coefficient electrostrictiv pe direcția z-
N	Număr de straturi dielectrice
P	<i>Loudness</i> exprimat în unitatea de măsură Phon
r	Forma modului
S	Tensiune mecanică
S	Arie a electrodului
S	<i>Loudness</i> exprimat în unitatea de măsură Sone
s	Flexibilitate elastică
s_x	Tensiune mecanică pe direcția x-
s_y	Tensiune mecanică pe direcția y-
s_z	Tensiune mecanică pe direcția z-
T	Perioadă
T	Solicitare mecanică
V	Sarcină electrică
$x(t)$	Deplasarea față de poziția medie la momentul t

$x''(t)$	Accelerație
$[d]$	Matrice a efectului piezoelectric direct
$[d^t]$	Matrice a efectului piezoelectric invers
$\{\Psi_r\}$	Vector care descrie forma modului
ΔH	Deformația pe direcția z-
ΔL	Deformația pe direcția y-
ε	Permitivitate
ε_0	Permitivitate în vid
ε_r	Permitivitate relativă a dielectricului
μ	Valoare medie
σ	Deviație standard
Ψ_{ir}	Deplasare relativă corespunzătoare modului r pentru fiecare grad de libertate i
ω	Frecvență unghiulară

Listă abrevieri

Ampl.	Amplitudine
BaTiO ₃	Titanat de bariu

Listă acronime

ANSI	Institutul Național de Standarde American (eng. <i>American National Standards Institute</i>)
DAQ	Achiziție de date (eng. <i>Data Aquisition</i>)
DUT	Dispozitiv Testat (eng. <i>Device Under Test</i>)
EPDM	Monomer de Etilenă Propilen Dienă (eng. <i>Ethylene Propylene Diene Monomer</i>)
ESL	Inductanță Serie Echivalentă (eng. <i>Equivalent Series Inductance</i>)
ESR	Rezistență Serie Echivalentă (eng. <i>Equivalent Series Resistance</i>)
FEA	Analiză de Elemente Finite (eng. <i>Finite Element Analysis</i>)
FEM	Model de Element Finit (eng. <i>Finite Element Model</i>)
FFT	Transformată Fourier Rapidă (eng. <i>Fast Fourier Transform</i>)
FR	Ignifug (eng. <i>Flame Retardant</i>)
FRF	Funcție Răspuns în Frecvență
ISO	Organizația Internațională pentru Standardizare (eng. <i>International Organization for Standardization</i>)
LDV	Laser Velocimetrie Doppler (eng. <i>Laser Doppler Vibrometer</i>)
LED	Diodă Emițătoare de Lumină (eng. <i>Light Emitting Diode</i>)
MLCC	Condensatoare Ceramice Multistrat (eng. <i>Multilayer Ceramic Capacitors</i>)
MOSFET	Tranzistor cu Efect de Câmp Metal-Oxid-Semiconductor (eng. <i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor</i>)
PCB	Cablaj imprimat (eng. <i>Printed Circuit Board</i>)
RMS	Rădăcină Medie Pătrată (eng. <i>Root Mean Square</i>)
SMD	Dispozitiv cu Montare pe Suprafață (eng. <i>Surface-Mount Device</i>)
SMT	Tehnologie de Montare pe Suprafață (eng. <i>Surface-Mount Technology</i>)
SPL	Nivel de Presiune a Sunetului (eng. <i>Sound Pressure Level</i>)
THT	Componente cu montare prin tehnologie prin inserție (Eng. <i>Through-Hole Tehnology</i>)

LISTĂ DE TABELE

2.1	Eficiența diferitelor configurații de <i>layout</i> în funcție de tipul de condensator folosit	32
2.2	Analiza sintetică a soluțiilor prezentate în literatura de specialitate	40
3.1	Moduri de comandă a LED-urilor	43
3.2	Rezultate inițiale ale măsurătorilor acustice realizate pe sistemul electronic studiat	50
4.1	Deplasarea maximă pentru modurile proprii rezultate	55
4.2	Rezultatele analizelor armonice	78
5.1	SPL-ul măsurat pentru cele trei experimente de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare	86
5.2	<i>Loudness</i> -ul măsurat pentru cele trei experimente de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare	86
5.3	Sumarizare a rezultatelor obținute prin simulare, respectiv măsurări experimentale	91
6.1	Rezultatele obținute în urma secționării longitudinale transversale a condensatoarelor pentru douăzeci de dispozitive.....	94
6.2	Rezumat al soluțiilor investigate	109

LISTĂ DE FIGURI

Fig.1.1	Obiectivele științifice din cadrul cercetării	15
Fig.2.1	Structura condensatoarelor ceramice multistrat	18
Fig.2.2	Transmiterea vibrației de la electrozi către PCB	22
Fig.2.3	Soluții pentru atenuarea fenomenului „ <i>singing capacitor</i> ”	23
Fig.2.4	Condensatoare de tipul „ <i>metal terminal</i> ”	26
Fig.2.5	Condensatoare cu <i>interposer</i>	26
Fig.2.6	Efectul de atenuare a zgomotului pentru condensatoarele produse de Murata™	27
Fig.2.7	Condensator cu strat dielectric mai gros	28
Fig.2.8	Condensator cu substrat de aluminiu	28
Fig.2.9	Condensator de tip „ <i>metal plate</i> ”	28
Fig.2.10	Condensator de tip „ <i>dipped radial leads</i> ”	29
Fig.2.11	<i>Layout</i> în configurație geometrică în formă de „L” și „T”	29
Fig.2.12	<i>Layout</i> în configurație geometrică paralelă	30
Fig.2.13	<i>Layout</i> în configurație geometrică oglindă	30
Fig.2.14	Diferențe între cele patru tipuri de condensatoare	31
Fig.2.15	Moduri normale	34
Fig.2.16	Moduri complexe	34
Fig.2.17	Lipirea condensatorului	38
Fig.3.1	Schema electronică a modului studiat	42
Fig.3.2	Moduri de fixare PCB în mașină	43
Fig.3.3	Poziția accelerometrului pe PCB	44
Fig.3.4	Vibrația PCB-ului în modul de comandă 1	45
Fig.3.5	Vibrația PCB-ului în modul de comandă 2	45
Fig.3.6	Dependența <i>loudness</i> -ului de SPL și frecvență conform modelelor publicate	47
Fig.3.7	Relația dintre <i>loudness</i> exprimat în sone și nivelul de <i>loudness</i> exprimat în phon	48
Fig.3.8	SPL obținut prin comanda LED-urilor în modul 1	48
Fig.3.9	<i>Loudness</i> obținut prin comanda LED-urilor în modul 1	49
Fig.3.10	SPL obținut prin comanda LED-urilor în modul 2	49
Fig.3.11	<i>Loudness</i> obținut prin comanda LED-urilor în modul 2	50
Fig.4.1	Rezultatul analizei modale – deplasarea maximă în cazul fixării în patru puncte	56
Fig.4.2	Rezultatul analizei modale – deplasarea maximă în cazul fixării în trei puncte	56
Fig.4.3	Analiză modală – Mod 15, fixare în trei puncte.....	57
Fig.4.4	Analiză modală – Mod 15, fixare în patru puncte.....	57
Fig.4.5	Analiză modală – Mod 20, fixare în trei puncte.....	58
Fig.4.6	Analiză modală – Mod 20, fixare în patru puncte.....	58
Fig.4.7	Analiză modală – Mod 23, fixare în trei puncte.....	59
Fig.4.8	Analiză modală – Mod 23, fixare în patru puncte.....	59
Fig.4.9	Rezultatul primei etape a tehnicii de cartografiere a traseelor de cupru – modelarea PCB-ului și a elementelor ce trebuie analizate ..	63
Fig.4.10	Rezultatul tehnicii de cartografiere a traseelor de cupru	64
Fig.4.11	Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte	65
Fig.4.12	Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte	65
Fig.4.13	Răspunsul armonic la frecvența 407Hz (fundamentală), în cazul	66

	fixării în trei puncte	
Fig.4.14	Răspunsul armonic la frecvența 788Hz (fundamentală), în cazul fixării în patru puncte puncte	66
Fig.4.15	Răspunsul armonic la frecvența 613Hz (a doua armonică), în cazul fixării în trei puncte	67
Fig.4.16	Răspunsul armonic la frecvența 1783Hz (a doua armonică), în cazul fixării în patru puncte puncte	67
Fig.4.17	Schema electronică realizată pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor de tensiune	68
Fig.4.18	Schema electronică realizată pentru pre-încărcarea condensatorilor multistrat	69
Fig.4.19	Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte, pentru cazul condensatoarelor pre-încărcate	70
Fig.4.20	Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte, în cazul condensatoarelor pre-încărcate	70
Fig.4.21	Răspunsul armonic la frecvența 411Hz (fundamentală), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate	71
Fig.4.22	Răspunsul armonic la frecvența 792Hz (fundamentală), în cazul fixării în patru puncte puncte, cu condensatoare pre-încărcate	71
Fig.4.23	Răspunsul armonic la frecvența 618Hz (a doua armonică), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate	72
Fig.4.24	Răspunsul armonic la frecvența 1776Hz (a doua armonică), în cazul fixării în patru puncte puncte, cu condensatoare pre-încărcate	72
Fig.4.25	Schema electronică realizată pentru optimizarea <i>layout</i> -ului	74
Fig.4.26	Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte, pentru cazul <i>layout</i> -ului optimizat	75
Fig.4.27	Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte, pentru cazul <i>layout</i> -ului optimizat	75
Fig.4.28	Răspunsul armonic la frecvența 411Hz (fundamentală), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate, <i>layout</i> optimizat	76
Fig.4.29	Răspunsul armonic la frecvența 805Hz (fundamentală), în cazul fixării în patru puncte puncte, cu condensatoare pre-încărcate, <i>layout</i> optimizat.....	76
Fig.4.30	Răspunsul armonic la frecvența 619Hz (a doua armonică), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate, <i>layout</i> optimizat	77
Fig.4.31	Răspunsul armonic la frecvența 1882Hz (a doua armonică), în cazul fixării în patru puncte puncte, cu condensatoare pre-încărcate, <i>layout</i> optimizat	77
Fig.5.1	Vibrația PCB-ului modificat pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor în modul de comandă 1 al LED-urilor	80
Fig.5.2	SPL-ul PCB-ului modificat pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1	80
Fig.5.3	<i>Loudness</i> -ul PCB-ului modificat pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1	81
Fig.5.4	Vibrația PCB-ului modificat pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor în modul de comandă 2 al LED-urilor	81
Fig.5.5	SPL-ul PCB-ului modificat pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor obținut prin comanda LED-urilor în modul 2	82
Fig.5.6	<i>Loudness</i> -ul PCB-ului modificat pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor obținut	82

	prin comanda LED-urilor în modul 2	
Fig.5.7	Vibrația PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor în modul de comandă 1 al LED-urilor	83
Fig.5.8	SPL-ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1	84
Fig.5.9	<i>Loudness</i> -ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1	84
Fig.5.10	Vibrația PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor în modul de comandă 2 al LED-urilor	85
Fig.5.11	SPL-ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 2	85
Fig.5.12	<i>Loudness</i> -ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 2	86
Fig.5.13	Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având <i>design</i> -ul pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor	87
Fig.5.14	Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având <i>design</i> -ul pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor	88
Fig.5.15	Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având <i>design</i> -ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor	88
Fig.5.16	Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având <i>design</i> -ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor	89
Fig.5.17	Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componente plasate în configurație tip oglindă, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor	90
Fig.5.18	Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componente plasate în configurație tip oglindă, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor	90
Fig.6.1	Imagine de secțiune longitudinală transversală al condensatorului	94
Fig.6.2	Rezultatele măsurării SPL-ului folosind <i>design</i> -ul pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor și stencil de 120 μ m	95
Fig.6.3	Rezultatele măsurării SPL-ului folosind <i>design</i> -ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor și stencil de 120 μ m	96
Fig.6.4	Rezultatele înainte și după tratarea termică a PCB-urilor	97
Fig.6.5	Aplicarea lacului pe PCB, vizibil la expunerea cu lumină UV	97
Fig.6.6	Rezultatele măsurării SPL-ului folosind <i>design</i> -ul pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor lăcuit	98
Fig.6.7	Rezultatele măsurării SPL-ului folosind <i>design</i> -ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor lăcuit	98
Fig.6.8	Aplicare <i>potting</i> pe PCB	99
Fig.6.9	Rezultatele măsurării SPL-ului în camera anecoică, înainte de aplicarea <i>potting</i> -ului	100
Fig.6.10	Rezultatele măsurării SPL-ului în camera anecoică, după aplicarea <i>potting</i> -ului	100
Fig.6.11	Rezultatele măsurării cu osciloscopul pentru <i>design</i> -ul original	101
Fig.6.12	Rezultatele măsurării cu osciloscopul pentru <i>design</i> -ul cu COG-uri	102
Fig.6.13	Rezultatele măsurării în camera anecoică pentru <i>design</i> -ul original, cu condensatoare de tip X7R	103

Fig.6.14	Rezultatele măsurării în camera anecoică pentru <i>design</i> -ul cu COG-uri	103
Fig.6.15	Studiu de plasament pentru <i>design</i> folosind condensatoare cu dielectric de tip COG	104
Fig.6.16	Montarea garniturilor anti-vibrație pe găurile de fixare ale PCB-ului ..	105
Fig.6.17	Acoperirea sunetului printr-un burete amplasat de jur-împrejurul conectorului principal	106
Fig.6.18	Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componente plasate în configurație paralel, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor	107
Fig.6.19	Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componente plasate în configurație paralel, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor	107
Fig.7.1	Captură din Web of Science privind citarea lucrării	113
Fig.7.2	Premiul „2022 Best Paper Award”	113
Fig.7.3	Reluarea obiectivelor științifice prezentate la începutul tezei și clasificarea soluțiilor în funcție de eficiență	118

1. INTRODUCERE

1.1. Motivația alegerii temei de cercetare

Condensatoarele ceramice multistrat sunt componente pasive indispensabile dispozitivelor electronice moderne, al căror material dielectric este de cele mai multe ori compus din titanat de bariu (BaTiO_3). Datorită proprietăților electromecanice ale acestui material (piezoelectricitate și electrostricție), există riscul apariției unui zgomot acustic provocat de vibrația electrozilor interni, fenomen cunoscut în literatura de specialitate sub numele de „*singing capacitors*”¹.

Trebuie înțeles faptul că, deși condensatoarele ceramice sunt cauza principală a fenomenului „*singing capacitors*”, vibrația acestora are frecvența de rezonanță de ordinul megahertzilor. Astfel, această vibrație nu reprezintă o problemă în sine. Fenomenul „*singing capacitors*” apare în momentul în care vibrația electrozilor interni a condensatoarelor este transferată cablajului imprimat, iar acesta începe să vibreze la o frecvență de rezonanță în domeniul audibil de 20Hz – 20kHz.

Prin urmare, prin natura sa, fenomenul „*singing capacitors*” este unul interdisciplinar și trebuie analizat din punct de vedere acustic, mecanic și electric. Din punct de vedere electric, vibrația electrozilor interni este cauzată de aplicarea unui câmp electric asupra condensatoarelor (efectul piezoelectric și electrostricție al materialului dielectric). Vibrația electrozilor interni este transferată prin intermediul terminalelor condensatorului către cablajul imprimat, care începe să se deformeze, transformând problema în una mecanică. Dacă vibrația cablajului imprimat are frecvența de rezonanță în domeniul 20Hz – 20kHz, fenomenul trebuie studiat și din punct de vedere acustic.

1.2. Importanța, noutatea și actualitatea temei

Fenomenul descris a apărut de curând, din dorința de a avea disponibile pe piață condensatoare cu capacitate cât mai mare, încapsulați în capsule cu dimensiuni cât mai mici. Din cauza noutății problemei, inconvenientul principal al apariției zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice este indisponibilitatea informațiilor. Există puține referințe legate de fenomenul „*singing capacitor*” în literatura de specialitate, acesta fiind menționat de un număr mic de producători de componente electronice.

Deși fenomenul nu este complet înțeles, cercetarea zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice fiind abia la început, acesta apare din ce în ce

¹ Efectele piezoelectric și cel electrostricție sunt prezentate doar în cazul condensatoarelor ceramice multistrat de clasă 2, deoarece fenomenul „*singing capacitors*” nu apare în cazul folosirii condensatoarelor de clasă 1.

Pentru claritatea exprimării, dacă nu se face referire la clasa condensatoarelor, atunci când se menționează „condensatoare ceramice multistrat” în cadrul tezei, considerăm condensatoare de clasă 2.

mai frecvent în dispozitivele electronice. De cele mai multe ori, problema apare în domeniile în care dispozitivul funcționează în imediata proximitate a utilizatorului. Acest lucru se întâmplă deoarece zgomotul acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat nu este cunoscut să provoace defecte de funcționare, ci este doar un inconvenient al utilizării dispozitivului. Cu toate acestea, apariția fenomenului „*singing capacitor*” trebuie evitată, întrucât disconfortul utilizatorului final este considerat un semn al calității îndoielnice a produsului. Prin urmare, există un interes major pentru acest subiect, în contextul internațional, datorită multitudinii de dispozitive electronice în care fenomenul „*singing capacitor*” poate apărea și efectul negativ asupra experienței utilizatorului.

1.3. Formularea ipotezei de cercetare

Obiectivele științifice în cadrul acestei cercetări constau în prezentarea metodelor de modelare/simulare și rezultatele experimentale ale fenomenului „*singing capacitors*” apărut într-o unitate de control electronic dezvoltată de către compania *Continental Automotive*TM. Problema a apărut dintr-o necesitate practică, am început cu analiza fenomenului, urmată de o analiză a vibrației sistemului electronic, rezultatele simulării au fost validate experimental, apoi a urmat o serie de experimente suplimentare, în care s-au evidențiat metode de eliminare sau minimizare a zgomotului acustic. Toate acestea sunt evidențiate în Fig.1.1.

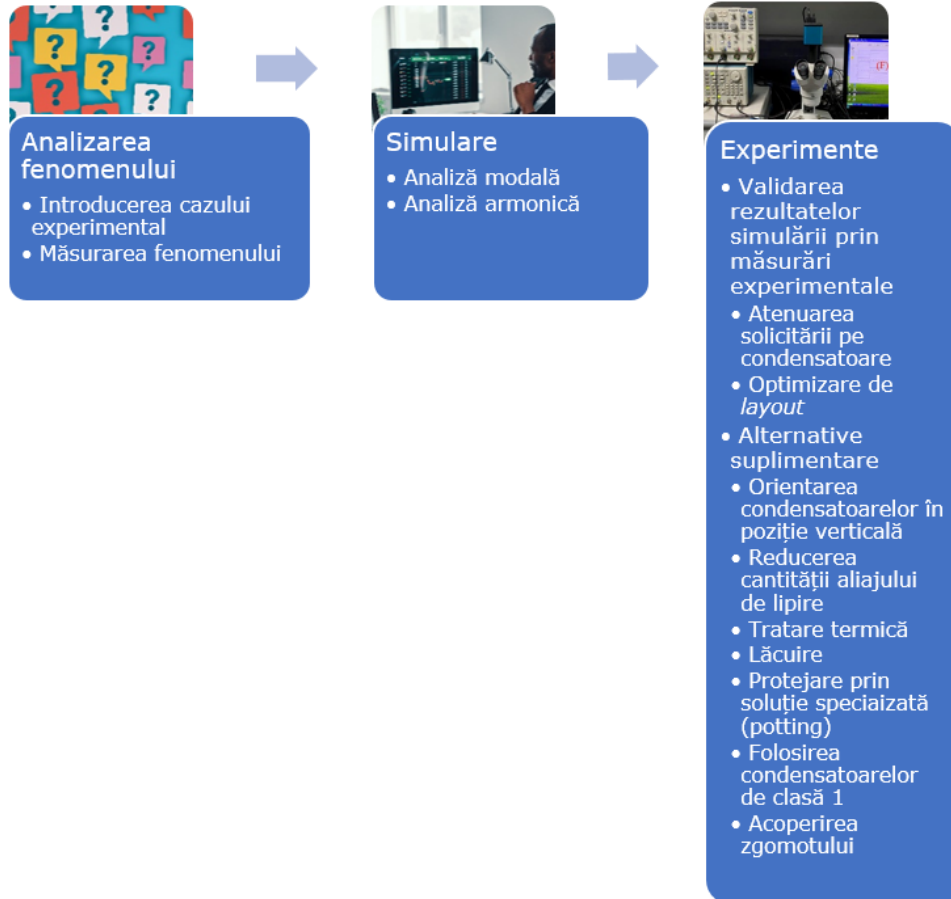


Fig.1.1. Obiectivele științifice din cadrul cercetării

În etapa de proiectare a dispozitivului, apariția zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice se poate preveni prin simularea comportamentului electromecanic al dispozitivului. Cele mai cunoscute simulări electromecanice menționate în literatură sunt analiza modală și analiza armonică. În timp ce analiza modală studiază vibrația intrinsecă a cablajului imprimat, analiza armonică studiază efectul vibrației condensatoarelor asupra comportamentului cablajului imprimat. Astfel, simulând comportamentul dispozitivului prin intermediul unei analize armonice, în stadiul de proiectare, se poate evita plasarea condensatoarelor ceramice multistrat în zone critice.

Dacă produsul se află într-un stadiu mai avansat la momentul descoperirii prezenței fenomenului „*singing capacitors*”, atunci când nu se mai pot face modificări de proiectare, se poate opta pentru schimbarea tehnologiei condensatoarelor. Această soluție vine cu dezavantajul creșterii costului, însă de cele mai multe ori acest cost este redus în comparație cu costul cauzat de modificările de proiectare realizate într-o etapă ulterioară.

Pe lângă metodele de simulare și soluții de rezolvare a fenomenului „*singing capacitors*”, literatura de specialitate oferă și informații legate de măsurarea directă sau indirectă a zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat.

Având în vedere structura și modul de abordare, această lucrare reprezintă o cercetare aplicativă a fenomenului „*singing capacitors*”, în care pornind de la problema practică, fenomenul este analizat, modelat, simulat, experimentat și în final sunt propuse metode eficiente de eliminare.

1.4. Structura tezei

Teza este împărțită în șapte capitole, urmată de bibliografie și anexe.

În primul capitol este prezentată motivația alegerii temei de cercetare, urmată de o introducere referitoare la importanța, noutatea și actualitatea temei. Capitolul se încheie cu formularea ipotezei de cercetare și structura tezei.

Al doilea capitol reprezintă stadiul actual al literaturii de specialitate. În acest capitol analizez literatura de specialitate referitoare la noțiunile generale ale fenomenului „*singing capacitors*”, metodele de măsurare a fenomenului, soluții de eliminare sau atenuare a zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat și metode de prevenție a fenomenului.

În capitolul trei am realizat o analiză detaliată a problemei, unde sunt prezentate introducerea cazului experimental și metodele de măsurare folosite.

Capitolul patru reprezintă capitolul de simulare. Acesta conține o introducere teoretică a analizei modale și armonice, urmată de analizele modale și armonice ale sistemului prezentat în capitolul trei. După interpretarea rezultatelor obținute pentru sistemul original, am propus două soluții de atenuare a fenomenului „*singing capacitors*”, prima se concentrează pe atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, în timp ce a doua propunere se concentrează pe optimizarea de *layout*, prin plasarea condensatoarelor în configurație tip oglindă. Am efectuat analiza armonică pentru ambele soluții propuse, apoi am realizat o analiză comparativă a rezultatelor.

Capitolul cinci validează experimental atât rezultatele obținute în urma simulării soluției de atenuare a solicitării aplicate pe condensatoare, cât și rezultatele obținute în urma simulării soluției cu *layout* optimizat prin plasarea condensatoarelor în configurație tip oglindă. Capitolul se încheie printr-o analiză comparativă între sistemul original, prezentat în capitolul trei, și cele două soluții propuse, luând în considerare atât simularea, cât și rezultatele experimentale.

În capitolul șase am prezentat alternative suplimentare investigate pentru reducerea fenomenului „*singing capacitors*”. Aceste alternative sunt împărțite în patru categorii: soluții concentrate pe modificări ale procesului de manufactură (plasarea condensatoarelor în orientare verticală, reducerea cantității de aliaj de lipire, tratare termică, lăcuire și izolarea vibrației prin protejarea condensatoarelor prin soluție specializată), soluții concentrate pe modificări de componente (folosirea condensatoarelor cu dielectric COG), soluții de acoperire a sunetului (prin folosirea garniturilor anti-vibrație sau a buretelui EPDM) și soluții alternative pentru optimizarea de *layout* (plasarea condensatoarelor în configurație paralelă).

În ultimul capitol prezint sumarul contribuțiilor originale, lista lucrărilor științifice publicate pe parcursul elaborării tezei și concluziile cercetării.

2. STADIUL ACTUAL

2.1. Noțiuni generale

Condensatoarele sunt componente electronice pasive, disponibile în forme variate și care pot fi fabricate din multiple materiale. Condensatoarele ceramice, în special condensatoarele ceramice multistrat (eng. *Multilayer Ceramic Capacitors* – MLCC) sunt indispensabile dispozitivelor electronice moderne, ele având un rol important în circuite rezonante, filtrarea tensiunii de alimentare, filtre ș.a.m.d. [1-3]. Datorită popularității lor, piața mondială a MLCC-urilor a fost estimată la 5315 milioane dolari americani în 2017 și se estimează o creștere până la 7833 milioane dolari americani până în 2024 [4,5].

Așa cum este prezentat în Fig.2.1, condensatoarele ceramice multistrat sunt compuse din trei elemente principale: electrozii interni, electrozii externi și materialul dielectric [6].

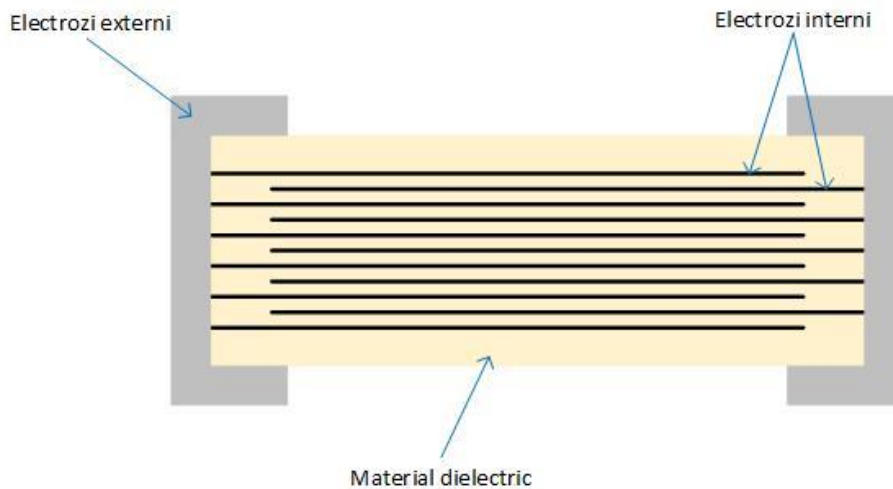


Fig.2.1. Structura condensatoarelor ceramice multistrat

Printre avantajele principale ale MLCC-urilor se numără dimensiunile reduse, prețul mic, domeniu larg de capacități și caracteristici electrice favorabile, e.g. inductanță serie echivalentă (eng. *Equivalent Series Inductance* - ESL) mică, rezistență serie echivalentă (eng. *Equivalent Series Resistance* - ESR) mică, răspuns în frecvență bun, abilitatea de a fi folosiți pentru perioade îndelungate la temperaturi înalte sau în aplicații de înaltă tensiune [7-10].

Aceste avantaje ale condensatoarelor ceramice multistrat se datorează în special materialului dielectric cu permitivitate mare din care majoritatea sunt fabricate – titanat de bariu ($BaTiO_3$). În ciuda avantajelor datorate titanatului de bariu, proprietățile sale electromecanice, piezoelectricitatea și electrostricția,

provoacă una din cele mai noi probleme ale dispozitivelor electronice: zgomotul acustic cauzat de condensatoarele ceramice multistrat, cunoscut în literatură ca „*singing capacitors phenomenon*” [11-14].

Briscoe și Dun [15] au definit piezoelectricitatea ca „o sarcină electrică ce se acumulează ca răspuns la solicitarea mecanică aplicată în materiale cu o structură a cristalelor necentrosimetrică”. În același timp, Erturk și Inman [16] au definit piezoelectricitatea ca „o formă de cuplare între comportamentul mecanic și cel electric al materialelor ceramice și cristalelor”. Traducerea din limba grecească a cuvântului *piezein* este „a strânge sau a apăsa” [17] și se referă la proprietatea materialelor piezoelectrice de a genera un câmp electric atunci când o forță mecanică este aplicată, fenomen cunoscut sub numele de efect piezoelectric direct [18].

Efectul piezoelectric este împărțit în două fenomene: efectul piezoelectric direct și efectul piezoelectric invers [19]. Proprietatea unor materiale de a genera câmp electric atunci când o tensiune mecanică este aplicată (efectul piezoelectric direct) a fost descoperită de Pierre și Jacques Curie în 1880 [17]. Efectul piezoelectric invers a fost dedus matematic un an mai târziu din principiile termodinamicii, de către Lippmann [20]. Acesta afirmă că un material piezoelectric se va deforma atunci când un câmp electric este aplicat [18]. Cele două efecte coexistă într-un material piezoelectric, prin urmare, ignorând prezența unuia dintre efecte într-o aplicație ar fi inconsistent din punct de vedere termodinamic [21].

Comportamentul electric al materialelor poate fi descris folosind legea lui Hooke [22], reprezentată în ecuația (2.1):

$$D = \varepsilon E \quad (2.1)$$

unde D este deplasarea densității de sarcină, ε este permitivitatea, iar E este forța câmpului electric aplicat.

Din punct de vedere mecanic, legea lui Hooke afirmă că:

$$S = sT \quad (2.2)$$

unde S este tensiunea mecanică, s este flexibilitatea elastică, iar T este solicitarea mecanică.

Ecuațiile (2.1) și (2.2) se pot combina pentru a forma o nouă relație:

$$\begin{cases} \{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \\ \{D\} = [d^t]\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \end{cases} \quad (2.3)$$

unde $[d]$ este matricea efectului piezoelectric direct, $[d^t]$ este matricea care descrie efectul piezoelectric invers, E indică faptul că nu există câmp electric în sistem sau că acesta este constant, T indică faptul că nu există solicitare mecanică în sistem sau că aceasta este constantă, iar t determină matricea de transpunere.

Cei patru coeficienți piezoelectrice, d_{ij} , e_{ij} , g_{ij} , h_{ij} sunt definiți în ecuația (2.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_j}\right)^E = \left(\frac{\partial S_j}{\partial E_i}\right)^T \\ e_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial S_j}\right)^E = \left(\frac{\partial T_j}{\partial E_i}\right)^S \\ g_{ij} = \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_j}\right)^D = \left(\frac{\partial S_j}{\partial D_i}\right)^T \\ h_{ij} = \left(\frac{\partial E_i}{\partial S_j}\right)^D = \left(\frac{\partial T_j}{\partial D_i}\right)^S \end{array} \right. \quad (2.4)$$

unde primii termeni caracterizează efectul piezoelectric direct, iar ultimii caracterizează efectul piezoelectric invers.

O metodă simplificată de a descrie cele două efecte este descrisă în ecuația (2.5) [23]:

$$\begin{cases} D = dT + \varepsilon E \\ S = sT + dE \end{cases} \quad (2.5)$$

unde S este tensiunea mecanică, T este solicitarea mecanică, E este intensitatea câmpului electric, D este deplasarea electrică, d este coeficientul piezoelectric, ε este permitivitatea, iar s este flexibilitatea elastică.

Efectul electrostrictiv este un mecanism prin care o deformare mecanică apare în material ca răspuns la prezența unui câmp electric. Deși, de obicei, este mai mică decât efectul piezoelectric, electrostrictivitatea are câteva caracteristici specifice, utile în aplicații la temperaturi înalte [24]. Pe lângă asta, conform teoriei fizicii solidelor, efectul piezoelectric invers este definit ca efect de cuplare electromecanică primar, prin urmare, tensiunea mecanică este proporțională cu intensitatea câmpului electric aplicat, pe când, efectul electrostrictiv este definit ca efect de cuplare electromecanică secundar, ceea ce înseamnă că acesta este proporțional cu pătratul câmpului electric aplicat [25].

Atunci când o tensiune alternativă este aplicată condensatorului, acesta începe să vibreze datorită piezoelectricității. În același timp, câmpul electric generat de către electrozii interni creează o vibrație electrostrictivă a cărei intensitate are un nivel similar cu cea creată de efectul piezoelectric. Mai mult decât atât, fenomenul nelinier al electrostrictivității creează o vibrație cu frecvența armonice a doua a tensiunii aplicate. Prin urmare, deoarece vibrația generată de efectul piezoelectric este proporțională cu câmpul electric, iar vibrația generată de electrostrictivitate este proporțională cu pătratul câmpului electric, ambele proprietăți electromecanice trebuie luate în considerare.

Datorită stratului dielectric subțire, componentele x- și y- ale direcției câmpului electric aplicat pe un condensator pot fi ignorate. Prin urmare, în ecuația tensiunii mecanice (2.6), doar direcția z- este luată în considerare.

$$s_z = d_{33}E_z + M_{33}E_z^2 \quad (2.6)$$

unde s_z este tensiunea mecanică, d_{33} este coeficientul piezoelectric, M_{33} este coeficientul electrostrictiv, iar E_z este câmpul electric aplicat pe direcția z- (câmpul electric aplicat pe direcțiile x- și y-, respectiv E_x și E_y , pot fi neglijate) [2,9,14,26].

În general, semnalul electric aplicat pe condensator are atât componentă continuă (DC), cât și componentă alternativă (AC), așa cum este prezentat în ecuația (2.7).

În acest caz, ecuația tensiunii mecanice poate fi exprimată folosind ecuațiile (2.8) și (2.9) [2,9,14,26].

$$E_z = E_{DC} + E_{AC} \cos \omega t \quad (2.7)$$

$$s_z = d_{33}(E_{DC} + E_{AC} \cos \omega t) + M_{33}(E_{DC} + E_{AC} \cos \omega t)^2 \quad (2.8)$$

$$s_z = \left(d_{33}E_{DC} + M_{33}E_{DC}^2 + \frac{1}{2}M_{33}E_{AC}^2 \right) + (d_{33} + 2M_{33}E_{DC})E_{AC} \cos \omega t + \frac{1}{2}M_{33}E_{AC}^2 \cos 2\omega t \quad (2.9)$$

Așa cum este arătat în ecuația (2.9), deși câmpul electric aplicat are un termen cu o singură frecvență, putem observa prezența deformației la a doua armonică a frecvenței datorită electrostricției. Atunci când componenta continuă (DC) este zero (semnalul electric conține doar componente alternative), vibrația este cauzată strict de către piezoelectricitate. Cum vibrația la frecvența fundamentală este influențată atât de către piezoelectricitate, cât și de către electrostricție, caracteristica neliniară a condensatorului ceramic multistrat este prezentă doar atunci când componenta continuă a câmpului electric nu este zero.

Ecuația (2.9) a fost utilizată pentru modelarea comportamentului condensatoarelor MLCC.

Nivelul vibrației MLCC-ului depinde de numărul de straturi interne, de tensiunea aplicată și de coeficientul piezoelectric al materialului dielectric [27]. Dacă analizăm formula capacității C , prezentată în (2.10), putem observa că aceasta este de asemenea dependentă de numărul de straturi interne. Prin urmare, putem concluziona că nivelul vibrației condensatoarelor multistrat este proporțională cu capacitatea.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} N \quad (2.10)$$

unde C este capacitatea, ε_0 este permitivitatea în vid, ε_r este permitivitatea relativă a dielectricului, S este aria electrodului, d este grosimea stratului dielectric, iar N este numărul de straturi.

Pe lângă efectul piezoelectric și efectul electrostrictiv, comportamentul condensatoarelor multistrat este influențat de asemenea și de efectul magnetoelectric invers. Efectul magnetoelectric este caracterizat de o polarizare electrică indusă de prezența unui câmp magnetic. În opoziție, efectul magnetoelectric invers este caracterizat de o magnetizare indusă de către un câmp electric [28]. Atunci când funcționează la frecvența de rezonanță, efectul magnetoelectric invers atinge nivelul maxim [29]. Frecvența de rezonanță a vibrației MLCC-urilor este în domeniul MHz, prin urmare, nu este auzită de către om. Însă, având în vedere că MLCC-urile sunt componente de tip SMD (eng. *Surface-Mount Device*), vibrația indusă este transferată către cablajul imprimat (eng. *PCB - Printed Circuit Board*) prin lipitură (*solder joint*) [30]. Atunci când o tensiune alternativă este aplicată condensatorului, materialul dielectric se extinde în direcția câmpului electric, cauzând deformarea PCB-ului, așa cum este prezentat în Fig.2.2. Prin

urmare, PCB-ul începe să vibreze, iar frecvența atinge domeniul audibil de 20Hz-20kHz.

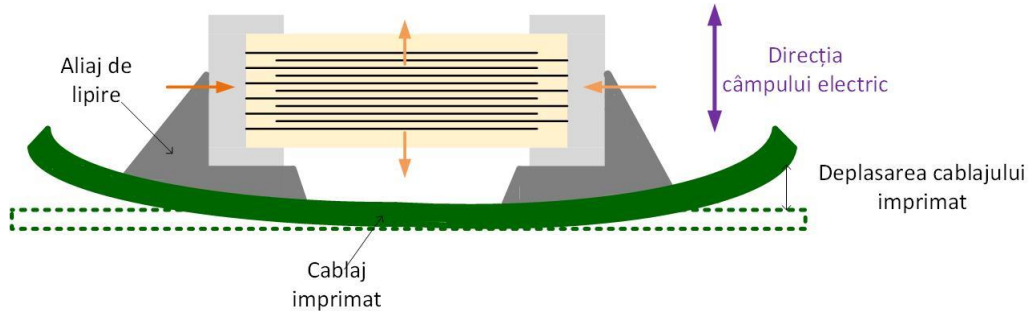


Fig.2.2. Transmiterea vibrației de la electrozi către PCB

În concluzie, fenomenul de „*singing capacitors*” are trei cauze principale:

- Condensatorul în sine – MLCC-ul este sursa de excitație;
- Lipitura – aliajul de lipire este calea de transfer a vibrației;
- PCB-ul – cablajul imprimat este rezonatorul acustic.

Unele publicații de specialitate sugerează că proprietăți dielectrice superioare pot fi obținute la temperaturi mai înalte [31,32]. Însă, materialul BaTiO_3 nu prezintă variații semnificative până la temperatura Curie, de aproximativ 130°C [33,34]. În aceste condiții, putem afirma că, în funcționarea normală a dispozitivelor electronice, zgomotul acustic cauzat de MLCC-uri nu este influențat de temperatura ambientală.

Există numeroase soluții pentru a atenua sau pentru a elimina zgomotul acustic cauzat de MLCC-uri. Fig.2.3. evidențiază fenomenul și prezintă un rezumat al soluțiilor posibile.

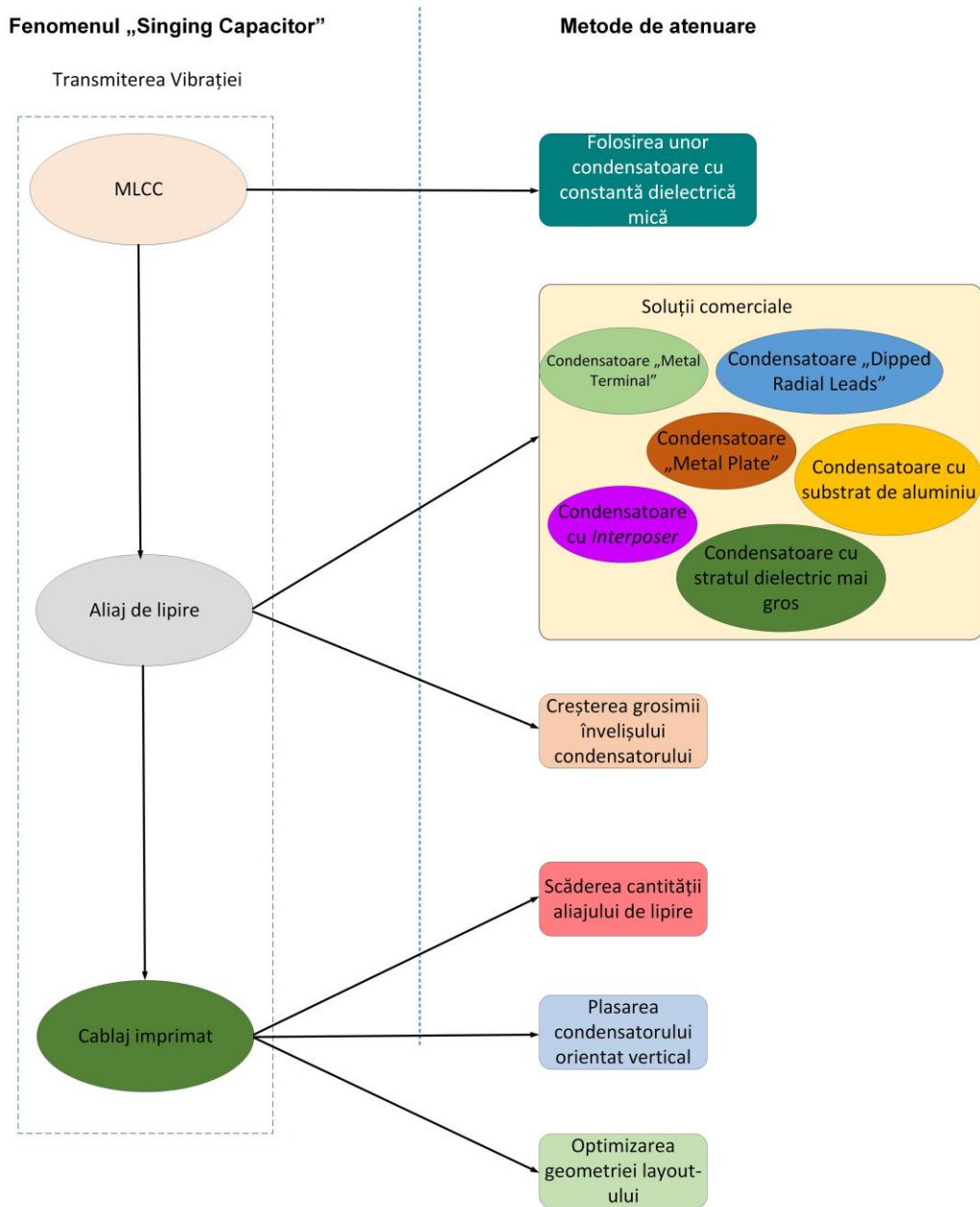


Fig.2.3. Soluții pentru atenuarea fenomenului „singing capacitor”

În următoarele subcapitole, sunt prezentate metode de măsurare a zgomotului acustic, soluții pentru atenuarea sau eliminarea fenomenului „singing capacitors”, dar și metode de prevenție a apariției fenomenului. Capitolul se încheie cu concluzii și o enumerare a contribuțiilor originale.

2.2. Metode de măsurare

Există două metode principale de măsurare a fenomenului „*singing capacitor*”: măsurarea zgomotului acustic sau măsurarea vibrației. Cea mai utilizată metodă de caracterizare a zgomotului acustic creat de MLCC-uri este măsurarea nivelului de presiune a sunetului, SPL (eng. *Sound Pressure Level*), definit în ecuația (2.11):

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{RMS}}{P_0} \right) \quad (2.11)$$

unde P_{RMS} este rădăcina medie pătrată (eng. *Root Mean Square*) a deviației presiunii față de presiunea atmosferică, iar P_0 este nivelul de referință.

De obicei, această investigație necesită un microfon, un analizor FFT (eng. *Fast Fourier Transform*) și o cutie sau o cameră anecoică [5]. Microfonul are doi senzori: un senzor de presiune, pentru a măsura presiunea sunetului în aer, și un senzor de viteză, pentru a măsura viteza mișcării aerului [10]. Analizorul FFT este folosit pentru a obține spectrul SPL, iar cutia anecoică este utilizată pentru a reduce zgomotul acustic exterior, care ar putea influența măsurarea.

Din păcate, măsurarea SPL-ului nu ajută la identificarea condensatoarelor problematice de pe un PCB. Cea mai potrivită metodă pentru a determina condensatoarele care provoacă fenomenul de „*singing capacitors*” este scanarea PCB-ului folosind echipamentul LDV (eng. *Laser Doppler Vibrometer*). Acest echipament detectează deplasarea Doppler a luminii reflectate pentru a măsura fără contact direct vibrația unei suprafețe [5,10]. LDV-ul are o rezoluție în domeniul submilimetric, acest lucru fiind util la măsurarea MLCC-urilor de dimensiuni mici.

Măsurarea vibrației este mult mai convenabilă și mai ușor de implementat decât măsurarea zgomotului acustic. Prin urmare, mulți cercetători preferă să măsoare vibrația folosind LDV-ul și apoi să coreleze rezultatul cu zgomotul acustic.

Ko et al. [8] au găsit o metodă de corelare între zgomotul acustic și vibrația PCB-ului (V_{PCB}) prin măsurarea SPL-ului și vibrației a 30 de eșantioane. Rezultatul a fost o relație liniară reprezentată în ecuația (2.12):

$$SPL = 0.57V_{PCB} + 127.30 \quad (2.12)$$

Pe lângă LDV, o altă metodă de măsurare a vibrației este senzorul cu fibră optică. Prin această metodă se poate măsura vibrația cu o frecvență de până la ordinul zecilor de kHz, folosind fascicule de fibră de sticlă pentru a ilumina ținta și pentru a colecta lumina reflectată [35,36]. Datorită tehnologiei senzorului cu fibră optică, această metodă este una de acuratețe mare și nu prezintă interferențe electromagnetice [37]. Deși această metodă ar putea fi folosită pentru a măsura vibrația PCB-ului cauzată de condensatoare, informațiile găsite în literatură legate de acest subiect sunt puține. Mai mult decât atât, lucrările disponibile care tratează subiectul de senzor cu fibră optică conțin informații neactualizate. De exemplu, Perrone și Vallan [35] sugerează în articolul lor, scris în 2009, că LDV-ul nu este suficient de precis pentru a măsura vibrații de nivel mic, pe când Sun et al. [10,11] demonstrează opusul în articolul lor scris în 2019, respectiv 2020.

Desigur, o altă metodă clasică de a măsura vibrația este accelerometrul piezoelectric [38]. Deși este o metodă ieftină și populară de a măsura vibrația, dimensiunea și greutatea accelerometrului poate influența rezultatul [35].

În concluzie, nivelul zgomotului acustic poate fi prezis prin vibrația PCB-ului. De asemenea, este cunoscut faptul că semnalul electric prin condensatoare

cauzează vibrație datorită caracteristicilor electromecanice ale materialului BaTiO₃. Prin urmare, este important să corelăm zgomotul acustic și cu semnalul electric.

Sun et al. [11] au propus două metode de corelare a semnalului electric cu zgomotul acustic și identificare a condensatoarelor problematice: metoda de stimulare activă și metoda de coerență a vibrației și tensiunii. Prima metodă detectează condensatoarele problematice la frecvențe specifice cu un nivel ridicat al raportului semnal-zgomot. A doua metodă urmărește evenimentul tranzitoriu al semnalului în timp ce sistemul operează în parametrii normali de funcționare.

În timpul metodei de stimulare activă, DUT-ul (eng. *Device Under Test*) este oprit, în timp ce un generator de semnal stimulează condensatoarele printr-un amplificator de putere audio. Pentru a elimina semnalul de vibrație irelevantă, același generator este conectat concomitent la modulul de control al vibrației unui LDV. LDV-ul scanează fiecare MLCC la diferite frecvențe și crează o hartă a vibrației. Folosind această metodă, putem identifica MLCC-urile problematice la frecvențe specifice, observând condensatoarele plasate în locații de vibrație puternică [11].

Spre deosebire de metoda de stimulare activă, metoda de coerență a vibrației și tensiunii analizează DUT-ul în modul de funcționare normală pentru a urmări efectul semnalului electric tranzitoriu asupra condensatoarelor. Când folosim această metodă, zgomotul tensiunii semnalului și vibrația MLCC-ului sunt analizate prin funcția de coerență definită în ecuația (2.13):

$$C_{xy}(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (2.13)$$

unde $C_{xy}(f)$ este coerența dintre tensiunea semnalului $x(t)$ și vibrația semnalului $y(t)$, $G_{xy}(f)$ este densitatea interspectrală dintre x și y , iar $G_{xx}(f)$ și $G_{yy}(f)$ sunt densitatea auto-spectrală a lui x , respectiv y [11].

Valoarea coerenței este întotdeauna subunitară, prin urmare un sistem liniar ideal cu x ca intrare unică și y ca ieșire unică, va avea coerența 1, în timp ce un sistem cu x și y complet necorelați, va avea valoarea coerenței 0.

Pentru investigații folosind metoda de coerență a vibrației și tensiunii, este necesară o probă de tensiune de înaltă impedanță conectată la procesorul unui LDV. Proba de tensiune este conectată la semnalul electric printr-o pereche de fire de metal subțiri, pentru a nu influența vibrația PCB-ului, iar laserul este poziționat pentru a ilumina centrul fiecărui MLCC.

Pentru fiecare condensator, se capturează spectrul tensiunii și vibrația corespunzătoare, astfel se poate calcula valoarea de coerență la diferite frecvențe. Atunci când valoarea coerenței este apropiată de 1, înseamnă că vibrația este generată cel mai probabil de către semnalul electric. Atunci când valoarea coerenței este apropiată de 0, înseamnă fie că semnalul de ieșire y înregistrat este zgomot, fie că nu există o consistență a fazei cu semnalul de intrare x [11].

În următorul subcapitol, vor fi prezentate mai multe soluții de reducere sau eliminare a fenomenului de „*singing capacitors*”.

2.3. Soluții de eliminare sau atenuare a zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat

În literatură se găsesc numeroase soluții pentru fenomenul „*singing capacitors*”, printre care folosirea unor tipuri de condensatoare alternative, plasarea MLCC-urilor într-o orientare anume sau într-o poziție specifică pe PCB, reducerea cantității de aliaj de lipire, ș.a.m.d. Mai mult decât atât, producătorii de condensatoare sunt conștienți de această nouă problemă în electronică și vin cu soluții comerciale de atenuare sau eliminare ale zgomotului acustic generat de MLCC-uri. În acest subcapitol se vor prezenta soluții disponibile la acest moment.

Așa cum am menționat, producătorii de condensatoare au venit pe piață cu soluții de condensatoare „nezgomotoase” sau „puțin zgomotoase”. De exemplu, compania Murata™ pune la dispoziție trei serii de condensatoare de acest tip [39]:

- Seria KRM – folosește condensatoare de tipul „*metal terminal*” pentru a îndepărta MLCC-ul de PCB (Fig.2.4);
- Seria ZRA/ZRB – condensatorul este plasat pe un strat numit *interposer*, care absoarbe vibrația înainte ca aceasta să ajungă la PCB (Fig.2.5);
- Seria GJ4 – folosește materiale cu constantă dielectrică mică pentru a atenua vibrația straturilor interioare.

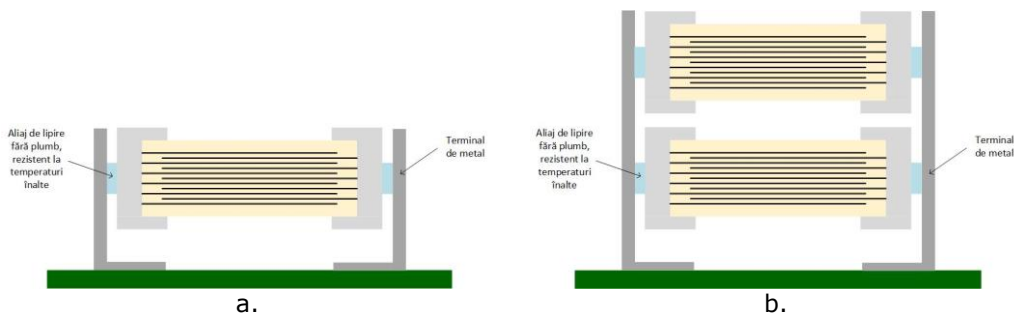


Fig.2.4. Condensatoare de tipul „*metal terminal*”: a) simplu; b) dublu [39]

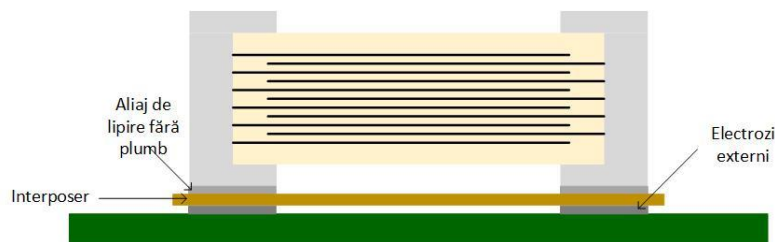


Fig.2.5. Condensatoare cu *interposer* [39]

Compania Texas Instruments™ recomandă seriile de condensatoare de zgomot acustic redus fabricați de Murata™ și face o analiză asupra efectului lor în reducerea fenomenului de „*singing capacitors*”, așa cum este prezentat în Fig.2.6. Conform Texas Instruments™, folosind condensatoarele cu constantă dielectrică mică, zgomotul acustic este redus cu 7dB. Atunci când sunt folosite condensatoarele

2.3 – Soluții de eliminare sau atenuare a zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat 27

de tip *interposer*, reducerea este de 13dB. Iar condensatoarele de tip „*metal terminal*” reduc zgomotul acustic cu 25dB [40].

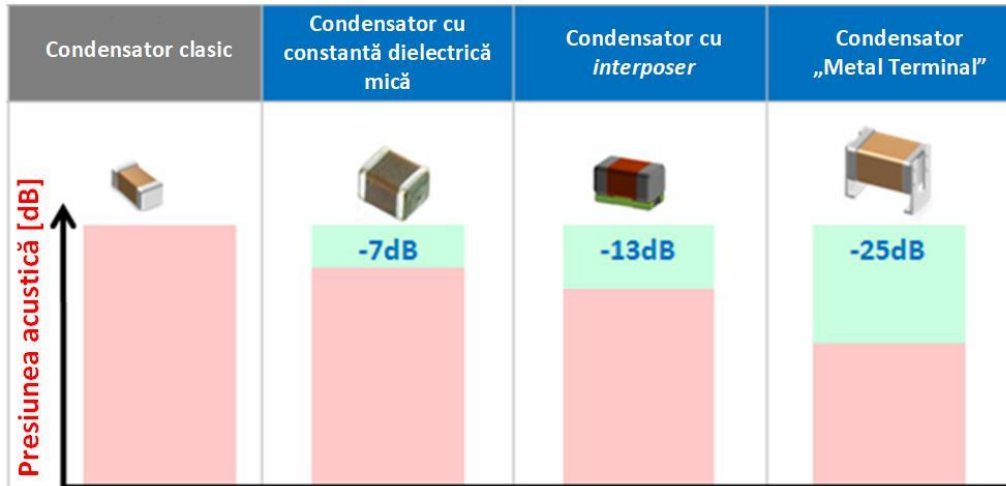


Fig.2.6. Efectul de atenuare a zgomotului pentru condensatoare produse de Murata™

Deși aceste condensatoare sunt eficiente în reducerea zgomotului acustic, compania Texas Instruments™ avertizează utilizatorii în legătură cu prețul ridicat al acestora. Ko et al. [3] nu doar că sunt de acord cu afirmația făcută de Texas Instruments™, dar și evidențiază faptul că folosirea condensatoarelor de tip „*metal terminal*” necesită pași suplimentari în procesul de fabricare a dispozitivelor electronice. În caz contrar, MLCC-urile ar putea cădea de pe PCB în urma unei cantități insuficiente de aliaj de lipire sau neadaptarea temperaturii la specificațiile condensatorului. Mai mult decât atât, acest tip de condensatoare nu este potrivit pentru dispozitive electronice cu restricții severe de dimensiuni pe înălțime (axa Z).

Pe lângă folosirea de MLCC-uri proiectate special pentru a atenua zgomotul acustic, compania Texas Instruments™ recomandă de asemenea și câteva schimbări de proiectare, cum ar fi schimbarea frecvenței vibrației folosind un PCB mai gros, plasarea condensatoarelor către marginea cablajului imprimat, plasarea MLCC-urilor simetric pe părți opuse ale PCB-ului și îmbunătățirea răspunsului de sarcină tranzitoriu sau răspunsului de linie tranzitoriu [40].

Compania Samsung™ a dezvoltat, de asemenea, trei serii speciale de MLCC-uri pentru a reduce fenomenul de „*singing capacitors*” [41]:

- Seria THMC – are un strat dielectric mai gros plasat în partea inferioară a unui MLCC tipic (Fig.2.7)
- Seria ANSC-A – folosește un substrat de aluminiu între condensator și PCB (Fig.2.8)
- Seria ANSC-B – condensatoare de tip „*metal plate*”, așa cum le sugerează și denumirea, au plăci metalice atașate de pini (Fig.2.9)

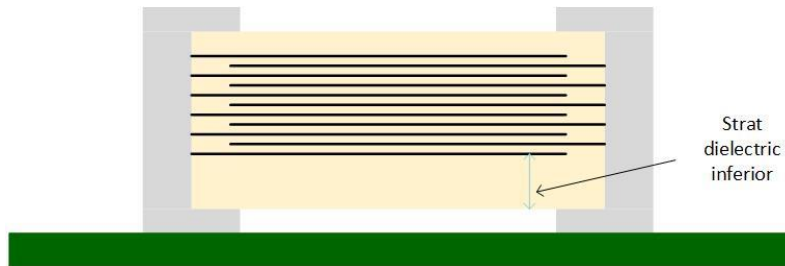


Fig.2.7. Condensator cu strat dielectric mai gros [41]

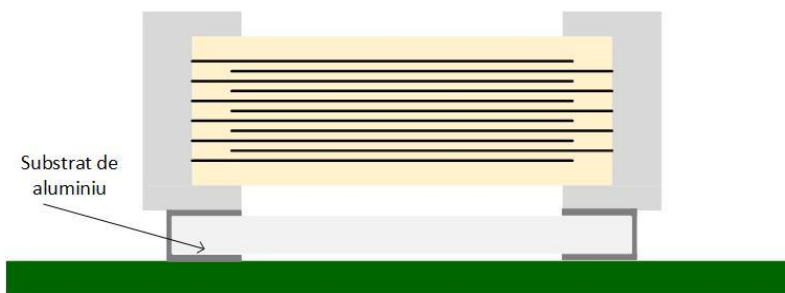


Fig.2.8. Condensator cu substrat de aluminiu [41]

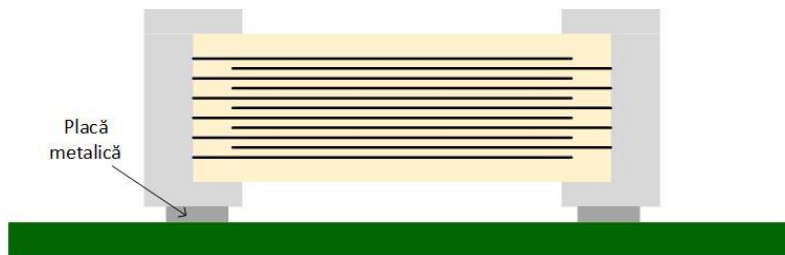


Fig.2.9. Condensator de tip „metal plate” [41]

Seriile ANSC-A și ANSC-B sunt mult mai eficiente decât seria THMC datorită structurii separate, care izolează vibrația mai eficient decât stratul dielectric intern. Cu toate acestea, seria THMC este mai potrivită pentru aplicațiile cu limitări de înălțime [41].

Compania TDK™, pe de altă parte, oferă o serie de condensatoare de tip „*dipped radial leads*”. Această serie oferă condensatoare ceramice acoperite cu rășină, fără halogen, a căror terminale sunt prelungite de două fire de plumb, așa cum este prezentat în Fig.2.10 [42].

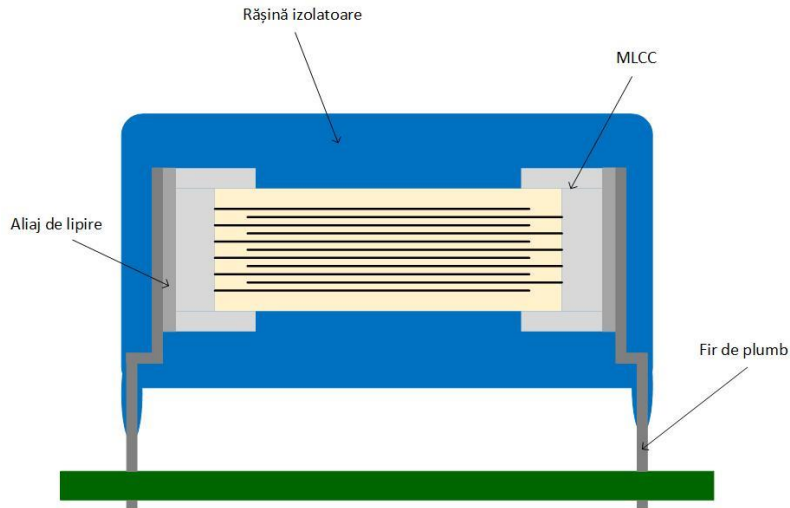


Fig.2.10. Condensator de tip „dipped radial leads” [42]

Aceste condensatoare respectă standardul automotive AEC-Q200, sunt o soluție eficientă împotriva zgomotului acustic și atenuază solicitarea mecanică și termică asupra MLCC-ului. Dezavantajul acestui tip de condensator reprezintă dimensiunea semnificativă și faptul că se găsesc doar în tehnologie THT (eng. *Through-Hole Technology*) [42].

Deși condensatoarele „de zgomot redus” disponibile comercial ar putea fi soluția pentru fenomenul de „singing capacitors”, impactul financiar este semnificativ, în special atunci când considerăm că mai multe MLCC-uri de pe PCB sunt problematice.

O soluție des întâlnită în literatură este optimizarea *layout*-ului PCB-ului prin plasarea condensatoarelor în diferite configurații geometrice. Sun et al. [43] au studiat trei geometrii de *layout*:

- Configurația în formă de „L” și „T” – condensatoarele sunt poziționate perpendicular unul față de celălalt (Fig.2.11)
- Configurația paralelă – MLCC-urile sunt poziționați în paralel, pe aceeași parte a PCB-ului (Fig.2.12)
- Configurația în oglindă (sau spate-în-spate) – condensatoarele sunt poziționate simetric, pe părți opuse ale PCB-ului (Fig.2.13)

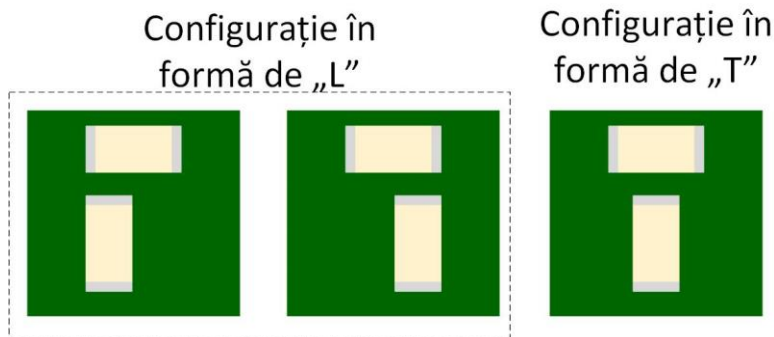


Fig.2.11. *Layout* în configurație geometrică în formă de „L” și „T” [43]

Configurație paralelă

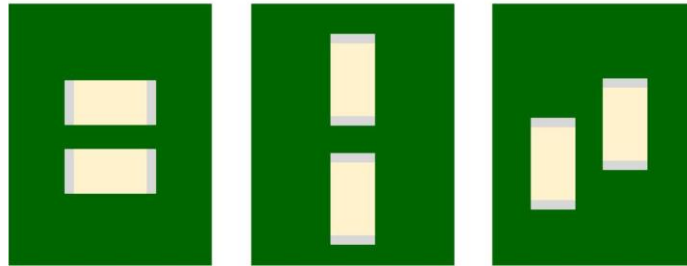


Fig.2.12. *Layout* în configurație geometrică paralelă [43]

Configurație în oglindă (Spate-în-Spate)

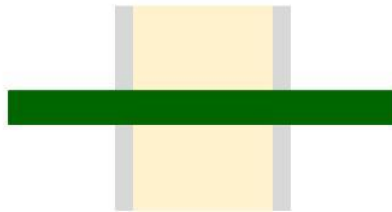


Fig.2.13. *Layout* în configurație geometrică oglindă [43]

Sun et al. [43] au investigat aceste configurații geometrice folosind patru tipuri de condensatoare:

- Condensator clasic – formă a MLCC-ului standard
- Condensator cu trei terminale – MLCC-ul are un terminal adițional, plasat între pinii clasici
- Condensator cu geometrie inversată – terminalele sunt plasate pe marginea lungă a MLCC-ului
- Condensator cu *interposer* – menționat anterior în acest subcapitol

Pe lângă forma acestora, condensatoarele prezintă și o diferență a buclei de curent, așa cum este prezentat în Fig.2.14 [43].



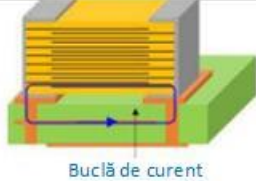


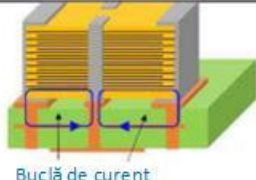

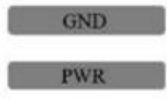
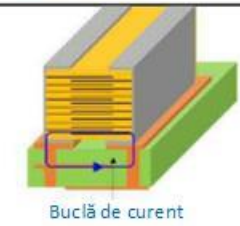


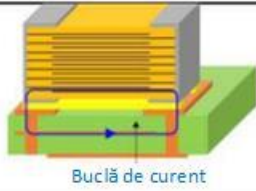
Tip condensator	Poză condensator	Geometria pad-urilor	Geometria condensatorului & Buclă de curent
Clasic			 Buclă de curent
Cu trei terminale			 Buclă de curent
Cu geometrie inversată			 Buclă de curent
Cu interposer			 Buclă de curent

Fig.2.14. Diferențe între cele patru tipuri de condensatoare [43]

Datorită efectului piezoelectric, MLCC-urile se dilată și se contractă în prezența unui câmp electric. Vibrațiile cauzate de două condensatoare se pot anula reciproc în funcție de poziția relativă a acestora și sincronizarea de fază a pinilor de putere și masă. Atunci când sunt plasați în configurația de *layout* în formă de „L” sau „T”, vibrațiile celor două MLCC-uri sunt ortogonale una față de cealaltă și oferă un anumit nivel de anulare. În cazul geometriei de tip paralel, configurația în anti-fază a pinilor de putere și masă permite anularea vibrației PCB-ului. Datorită simetriei configurației de tip oglindă, vibrațiile condensatoarelor se anulează atunci când tensiunile aplicate sunt în fază.

În timpul experimentului lor, Sun et al. [43] au aplicat două semnale electrice sinusoidale, în fază și în anti-fază, asupra MLCC-urilor și au măsurat zgomotul acustic. Prima observație a fost că, în comparație cu condensatorul de tip clasic, celelalte trei tipuri de condensatoare au avut un nivel de zgomot acustic redus cu până la 10dB. Condensatorul cu geometrie inversată a avut cel mai mic impact, în timp ce condensatorul cu trei terminale și cel cu *interposer* au avut cea mai semnificativă reducere a zgomotului acustic. A doua observație a fost că aceiași

configurație de *layout* nu a avut același efect pentru fiecare tip de condensator. Rezultatele sunt sintetizate în Tabelul 2.1.

Tip de condensator	Semnale electrice aplicate	Configurație în formă de „L” și „T”	Configurație paralelă	Configurație oglindă
Condensator clasic	În fază	NU	NU	DA
	În anti-fază	NU	DA	NU
Condensator cu trei terminale	În fază	DA	NU	NU
	În anti-fază	NU	DA	NU
Condensator cu geometrie inversată	În fază	NU	NU	DA
	În anti-fază	NU	DA	NU
Condensator cu <i>interposer</i>	În fază	NU	NU	DA
	În anti-fază	DA	DA	NU

Tabel 2.1. Eficiența diferitelor configurații de layout în funcție de tipul de condensator folosit
*Tabelul conține răspunsul la întrebarea „Este această combinație geometrie de *layout*-tip de condensator eficientă?”

Datorită impactului financiar, geometria în oglindă este cea mai apreciată în literatură. Putem afirma că, pentru cele mai multe aplicații, fenomenul de „*singing capacitors*” este redus atunci când este folosită configurația de plasare în oglindă și condensatoare clasice.

Așa cum am menționat anterior, aliajul de lipire reprezintă calea de transfer a vibrației de la MLCC la PCB. Prin urmare, putem presupune că o cantitate mai mică de aliaj de lipire va transfera mai puțină vibrație. Din păcate, Sun et al. [44] au demonstrat lipsa dependenței vibrației de cantitatea aliajului de lipire. Autorii au folosit trei *stencil*-uri cu diferite grosimi: 3 mils, 4 mils și 5 mils. Nu au fost observate deosebiri semnificative între cele trei rezultate.

O altă soluție des întâlnită în literatură este plasarea condensatorului în orientare verticală pe PCB. Atunci când electrozii interni sunt în poziție perpendiculară față de PCB, considerăm MLCC-ul amplasat în orientare verticală. În caz contrar, când electrozii interni sunt paraleli cu PCB-ul, condensatorul este considerat amplasat în orientare orizontală. Această teorie a rezultat din faptul că MLCC-ul amplasat în orientare orizontală se comportă ca o linie de transmisie cu circuit deschis, a cărei buclă de curent pornește dintr-un capăt al condensatorului. MLCC-ul amplasat în orientare verticală se comportă ca o linie de transmisie de circuit deschis, a cărei bucle de curent pornesc din centrul condensatorului către ambele capete ale MLCC-ului. Astfel, frecvența de rezonanță este mai mare în cazul orientării verticale [45].

Ko et al. [3] au propus o soluție de atenuare a zgomotului acustic prin îngroșarea stratului exterior al MLCC-ului. Acest proces nu influențează caracteristicile electrice ale condensatorului, dar reduce vibrația transmisă către PCB. Însă, la recomandarea autorilor, trebuie luat în considerare faptul că grosimea optimă a stratului exterior diferă de la o aplicație la alta.

În acest subcapitol, au fost prezentate soluții de atenuare sau eliminare a zgomotului acustic găsite în literatura de specialitate. În următorul subcapitol, se vor prezenta metode de simulări și analize pentru prevenția apariției zgomotului acustic generat de condensatoare.

2.4. Metode de prevenție

În electronică, de regulă, este mai ușor de prevenit, decât de corectat. Pe lângă efortul și timpul necesar pentru a găsi cauza și a o rezolva, în unele cazuri este imposibil de făcut modificări de proiectare. Prin urmare, este recomandată realizarea unei simulări înainte de implementarea proiectului.

Cea mai frecvent întâlnită simulare în literatură este analiza modală. Analiza modală, cunoscută și sub numele de analiza frecvențelor naturale, reprezintă modelul de determinare a caracteristicilor dinamice inerente ale unui sistem, sub formă de frecvențe naturale, factori de amortizare și forme modale. Acestea sunt folosite pentru a formula modelul matematic al comportamentului dinamic, cunoscut sub numele de model modal al sistemului [46].

Analiza modală se bazează pe faptul că răspunsul în frecvență al unui sistem dinamic liniar, invariant în timp, se poate exprima prin combinația liniară a unui set de mișcări armonice simple numite moduri naturale ale vibrației (sau moduri proprii ale structurii). Conceptul este asemănător folosirii transformatei Fourier de unde sinusoidale și cosinusoidale pentru a reprezenta forme de undă complexe. Modurile naturale ale vibrației sunt inerente sistemului dinamic și sunt complet determinate de proprietățile sale fizice (masă, rigiditate, amortizare) și distribuțiile lor spațiale. Fiecare mod este descris în termeni de parametrii modali: frecvență naturală, factorul de amortizare modală și modelul de deplasare caracteristic, numit formă modală. Forma modală poate fi reală sau complexă, fiecare corespunzând unei frecvențe naturale. Gradul de participare a fiecărui mod natural în vibrația generală este determinat atât de proprietățile sursei (sau surselor) de excitație, cât și de formele modale ale sistemului [46].

Forma modului reprezintă un parametru matematic abstract asociat cu o anumită frecvență modală, care definește deformația structurii, făcând abstracție de celelalte moduri existente. Deplasarea reală, în orice punct, este întotdeauna o combinație între toate formele modale ale structurii. Atunci când excitarea armonică este apropiată de frecvența modală, 95% din deplasare este datorată unei anumite forme a modului, însă o excitație aleatorie tinde să producă o combinație arbitrară dintre toate formele modale. Forma modului este descrisă de vectorul $\{\psi_r\}$, care descrie forma modului r . Elementele ψ_{ir} reprezintă deplasări relative corespunzătoare modului r pentru fiecare grad de libertate i [46].

Modurile reprezintă proprietăți inerente ale structurii, ele nefiind dependente de forțe sau sarcini aplicate structurii. Modurile se vor schimba dacă proprietățile materialului (masă, rigiditate și amortizare) sau condițiile de limită (fixări) ale structurii se modifică. Formele modale nu au valori unice, însă mișcarea unui punct relativ este unic pentru fiecare frecvență de rezonanță [46].

Modurile normale sunt modurile pentru care secțiunile structurii se mișcă fie în fază (0°), fie în anti-fază (180°), unele de celelalte. Deplasarea modală ψ_{ir} are valoare reală, fie pozitivă sau negativă. Forma modurilor normale se poate reprezenta ca unde statice cu nodurile într-un punct fix, așa cum este arătat în Fig.4.1. Atunci când o structură este foarte ușoară sau nu prezintă amortizare, modul se consideră normal [46].

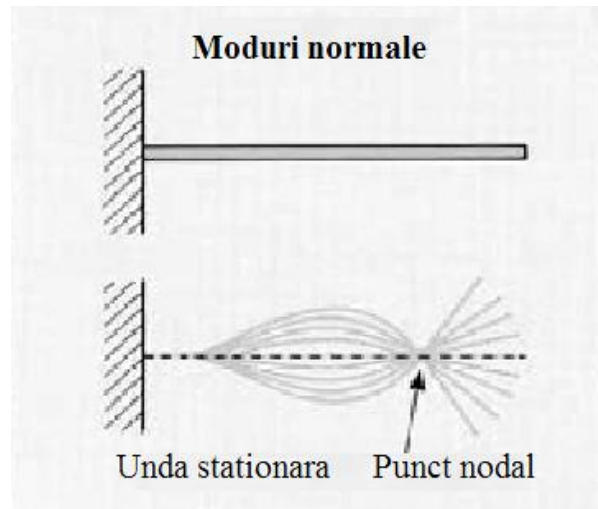


Fig.2.15. Moduri normale

Spre deosebire de modurile normale, secțiunile structurii în cazul modurilor complexe pot avea orice defazaj între ele. În acest caz, deplasarea modală ψ_{ir} are valoare complexă, care poate avea orice fază. Formele modale complexe pot fi considerate unde nestationare fără noduri într-un punct fix, așa cum este reprezentat în Fig.4.2.. Structurile cu amortizare mare, cum ar fi caroserii de automobile cu sudură în puncte și amortizare de șocuri, au moduri complexe [46].

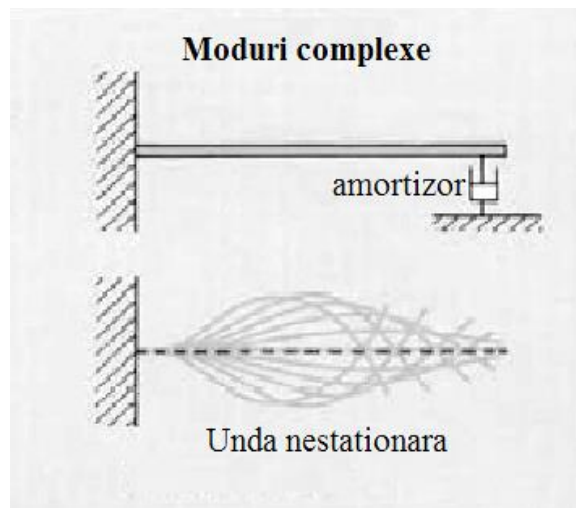


Fig.2.16. Moduri complexe

Așa cum se poate observa, distribuția amortizării în structură determină dacă modul este normal sau complex.

Analiza modală constă atât în tehnici teoretice (Analiza Elementelor Finite), cât și tehnici experimentale (testarea modală). Analiza modală teoretică se bazează pe un model fizic al sistemului dinamic, descris de proprietățile de masă, rigiditate și

amortizare. Aceste proprietăți pot fi descrise prin ecuații diferențiale parțiale, din a căror soluții se pot deduce frecvențele naturale și formele modale ale sistemului și răspunsul în frecvență ale acestuia. Un model mai realist conține proprietățile modelului teoretic în termeni de distribuție spațială, anume matricile de masă, rigiditate și amortizare. Aceste matrici sunt încorporate într-un set de ecuații diferențiale de mișcare. Principiul superpoziției sistemului liniar dinamic ne permite să transformăm aceste ecuații într-o problemă cu valori proprii, a căror soluție ne oferă datele modale ale sistemului. Analiza de elemente finite modernă permite discretizarea majorității structurilor dinamice liniare și, prin urmare, îmbunătățește capacitățile și scopul analizei modale teoretice. Pe de altă parte, dezvoltarea rapidă în ultimii douăzeci de ani a capacității datelor de achiziție și procesare, a dus la avansarea pe partea experimentală a analizei, cunoscută acum sub numele de testare modală [46].

Testarea modală reprezintă o tehnică experimentală folosită pentru obținerea modelului modal a unui sistem dinamic liniar, invariant în timp. Baza teoretică a acestei tehnici este stabilirea relației dintre sursa de excitație și răspunsul vibrației ca funcție de frecvență de excitație. Sursa de excitație și răspunsul vibrației pot fi în aceeași locație sau în locații diferite. Relația dintre ele, care de obicei este exprimată printr-o funcție matematică complexă, este cunoscută sub numele de funcție de răspuns în frecvență (FRF). Combinațiile sursă de excitație – răspuns de vibrație în diferite locații sunt folosite pentru a compune matricea FRF a sistemului. Aceasta este în general simetrică, reflectând reciprocitatea structurală a sistemului [46].

Testarea și analiza modală de obicei implică [47]:

- Una sau mai multe surse de excitație – acestea pot fi într-o anumită bandă de frecvențe, cu formă sinusoidală, tranzientă, aleatorie sau zgomot alb;
- Actuatoare de forță, pentru a achiziționa semnalul excitației (intrare);
- Accelerometre pentru a achiziționa semnalul de răspuns (ieșire);
- Un dispozitiv DAQ (*Data Acquisition*) pentru interfața și înregistrarea testului;
- Un computer cu o aplicație software de analizare și testare modală sau un analizor pentru a calcula datele FRF.

Analiza elementelor finite sau FEA (*Finite Element Analysis*) folosește calcule, modele și simulări pentru a prezice și înțelege cum un obiect s-ar putea comporta sub diferite condiții fizice. Aceasta este de obicei folosită pentru a determina vulnerabilitatea unui produs, atunci când acesta este încă la nivelul de prototip. Analiza FEA folosește metoda elementelor finite, FEM (*Finite Element Method*), care este o tehnică numerică pentru a separa structura într-o multitudine de piese sau elemente, pe care ulterior o reconectează în puncte numite noduri. Rezultatul metodei elementelor finite este un set de ecuații folosite pentru a realiza analiza FEA [48].

De cele mai multe ori, comportamentul fizic al unui obiect este descris prin intermediul unor ecuații parțial diferențiale. Analiza elementelor finite a fost creată pentru a rezolva atât ecuații diferențiale liniare, cât și neliniare. Cu toate acestea, este important ca analiza elementelor finite să ofere o soluție aproximativă, aceasta fiind o abordare numerică pentru a găsi rezultate reale ale ecuațiilor diferențiale parțiale. Analiza elementelor finite se folosește pentru a reduce numărul prototipurilor și a experimentelor realizate, în timp ce componentele sunt optimizate încă din faza de proiectare [48].

Pentru analiza elementelor finite, se pot folosi mai multe tipuri de teste, printre care [48]:

- Analiza statică structurală: Acest tip de analiză scalează modelul bazându-se pe proporțiile structurii. Testul se bazează pe faptul că orice structură micșorată la o scală mai mică, se va comporta în același mod ca structura originală și va produce aceleași rezultate.
- Analiza ingineriei termice: Acest test analizează variațiile în temperatură și cum acestea afectează structura produsului.
- Analiza modală: Acest tip de test analizează cum diferite vibrații externe afectează structura produsului. Această formă de analiză a elementelor finite permite utilizatorilor să ajusteze vibrațiile încă din faza de *design* pentru a crea un produs final stabil.

Analiza elementelor finite se bazează pe principii care includ condiții extreme de forță și presiuni, precum și trei tipuri de ecuații generale [48]:

1. Ecuații de echilibru, care se găsesc atunci când forțele sau influențele opuse sunt în echilibru;
2. Relații rigiditate-deplasare, care măsoară deformarea pe care structura o creează sub anumite forțe exterioare;
3. Ecuații constitutive, prin care se descriu relațiile dintre două cantități fizice, specifice unui anumit material, pentru a prezice răspunsul acestuia la stimuli externi.

Pentru a realiza analiza elementelor finite, este necesară o simulare mesh, care conține milioane de elemente mici care împreună formează structura obiectului. Pentru fiecare element în parte se vor face calcule, iar combinația dintre toate aceste rezolvări individuale va oferi rezultatul final pentru întreaga structură [48].

Acest proces se poate împărți în trei pași: pre-procesare, procesare, post-procesare. În timpul pre-procesării, utilizatorul selectează tipul de analiză, cum ar fi analiza modală sau analiză statică structurală, și tipul de element. Apoi, proprietățile materialului sunt definite, iar nodurile sunt create. În următorul pas, elementele sunt construite prin asignarea conectivității dintre noduri. În final, condițiile de limită și sarcină sunt aplicate. În timpul procesării, un computer rezolvă problema valorilor de limită și oferă rezultatele utilizatorului. În final, în pasul de post-procesare, utilizatorul analizează rezultatele generate și notează factori ca deplasare, temperatură, istorie temporală, solicitare, tensiune mecanică și frecvență naturală [48].

Erori comune ale analizei elementelor finite se datorează de obicei simplificării geometriei, tehnicilor de integrare, numărului limitat de *digits* folosit de computer sau alegerea tipului greșit de element sau unități de măsură [48].

Analiza elementelor finite asigură o simulare a condițiilor de sarcină potențial periculoase sau distructive, permițând proiectanților să descopere răspunsul fizic al sistemului în orice locație a acestuia. Alte beneficii sunt [48]:

- Acuratețe mare datorită analizei fiecărei solicitări fizice care ar putea afecta *design*-ul;
- *Design* îmbunătățit întrucât proiectanții pot observa cum o anumită solicitare aplicată pe un element afectează materialele din elementele conectate;
- Testare timpurie disponibilă încă din procesul de proiectare. Prototiparea virtuală permite proiectantului să creeze modele variate cu diferite materiale în timp de câteva ore, spre deosebire de zile sau chiar săptămâni pentru a produce prototipuri reale;
- Productivitate crescută, deoarece software-ul FEA permite proiectanților să producă produse de calitate într-un timp mult mai scurt, folosind mai puțin material;

- Folosire a modelelor optimizată deoarece un model poate fi utilizat în mai multe teste;
 - Timpuri de calculare rapizi și costuri de investiție relativ mici.
- Analiza modală simulează doar vibrația intrinsecă a PCB-ului, fără să ia în considerare influența vibrației condensatoarelor [49]. Prin urmare, pentru o caracterizare detaliată a fenomenului de „*singing capacitors*”, modelul trebuie să includă trei informații [5]:
- Straturile și materialele PCB-ului – necesare pentru a evalua impactul asupra tensiunii mecanice
 - Punctele de fixare ale PCB-ului în produsul final
 - Informații legate de componentele populate

Toate aceste informații se regăsesc într-o analiză armonică. Analiza armonică este o procedură matematică folosită pentru a descrie și analiza fenomene cu caracter periodic recurent [50]. Răspunsul analizei armonice ne oferă abilitatea de a prezice comportamentul dinamic susținut al structurilor, astfel permițând să se verifice dacă modelele vor depăși sau nu cu succes rezonanța, oboseala și alte efecte dăunătoare ale vibrațiilor forțate [51].

Mișcarea armonică simplă reprezintă mișcarea unui simplu oscilator armonic, unde acțiunea este intermitentă și repetitivă la intervale regulate, descrisă într-o manieră definită ca fiind sinusoidală. Analiza armonică este realizată folosind informații de amplitudine, perioada unei fluctuații singulare, frecvență și fază. Mișcarea armonică simplă descrie forma numerică a mișcărilor variate, stând la baza descrierii mișcărilor mai complexe, folosind analiza Fourier [51].

Sun et al. [49] au prezentat un ghid de realizare a unei analize armonice, pentru a reduce zgomotul acustic generat de condensatoare. În loc să se folosească o masă uniformă pentru a modela materialul dielectric al unui cablaj imprimat multistrat, ei au folosit o tehnică de cartografiere a traseelor pentru a simula modelul traseelor de cupru fără a exagera complexitatea modelului. După ce au realizat analiza modală, pentru a identifica punctele sensibile ale PCB-ului la vibrații externe, au realizat o analiză armonică pentru a demonstra că vibrația PCB-ului este redusă atunci când se plasează condensatoarele în zone mai puțin sensibile.

Aceiași autori au propus, într-o altă lucrare [52], o metodă de simulare statistică și o analiză de sensibilitate a parametrilor. Simularea statistică determină proprietățile intrinseci de vibrație a PCB-ului, inclusiv efectul variației parametrilor [53]. Analiza de sensibilitate a parametrilor este realizată pentru a determina parametrii dominanți care controlează proprietățile vibrației PCB-ului. Autorii iau în considerare toleranțele proprietăților materialului din care este făcut PCB-ul (densitatea de masă, modulul lui Young și raportul lui Poisson) și dimensiunile acestuia, pentru a obține frecvențele naturale și formele modale corespunzătoare. Efectul condensatoarelor asupra vibrației PCB-ului este investigat prin analiza armonică, aplicând superpoziția modală. După realizarea simulărilor, autorii au contravalidat prin măsurări frecvențele naturale ale PCB-ului și influența vibrației MLCC-urilor asupra cablajului imprimat.

Wand et al. [7] au ales să realizeze un model de element finit, FEM (eng. *Finite element Model*), tridimensional al unui MLCC. Autorii au ales să negligeze sutele de straturi dielectrice, simplificând modelul în câteva straturi cu performanțe similare ale vibrației. De asemenea, ei au ignorat efectul electrostrictiv din ecuația (2.6), obținând varianta simplificată de caracterizare a tensiunii mecanice pe direcția z -, s_z , din ecuația (2.14), și pe direcția y -, s_y , reprezentată în ecuația (2.15). Deoarece este similară cu direcția y -, direcția x - a fost neglijată.

$$s_z = d_{33}E = \frac{\Delta H}{H} \quad (2.14)$$

$$s_y = d_{31}E = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.15)$$

unde d_{33} și d_{31} sunt coeficienții piezoelectrice pe direcțiile z -, respectiv y -, H și L sunt grosimea și lungimea unui singur strat dielectric, iar deformațiile pe direcțiile z - și y - a unui singur strat dielectric sunt reprezentate de ΔH , respectiv ΔL .

Deformația unui singur strat dielectric poate fi calculată în funcție de sarcina electrică V , așa cum este prezentat în ecuațiile (2.16) și (2.17):

$$\Delta H = d_{33}V \quad (2.16)$$

$$\Delta L = \frac{L}{H}d_{31}V \quad (2.17)$$

Atunci când toate cele N straturi dielectrice ale MLCC-ului se iau în considerare, deformațiile se pot aproxima conform ecuațiilor (2.18), respectiv (2.19):

$$\Delta H = Hd_{33}\frac{V}{\frac{H}{N}} = d_{33}VN \quad (2.18)$$

$$\Delta L = \frac{L}{H}d_{31}VN \quad (2.19)$$

Pentru a simplifica simularea, autorii au considerat un număr redus N' de straturi dielectrice, în timp ce deformarea ΔH a rămas neschimbată. Prin urmare, pentru a menține performanțele de vibrație ale condensatorului, autorii au schimbat coeficientul piezoelectric folosind corelațiile din ecuațiile (2.20) și (2.21):

$$\Delta H = d_{33}V = d'_{33}VN' \quad (2.20)$$

$$d'_{33} = \frac{N}{N'}d_{33} \quad (2.21)$$

Modelul MLCC-ului a fost validat printr-un test de vibrație, iar rezultatul a avut o eroare de sub 7%.

Bazat pe analiza de vibrație, autorii au studiat efectul aliajului de lipire asupra vibrației PCB-ului cauzată de condensatoare. Teoria lor a fost că fenomenul de „*singing capacitors*” poate fi atenuat prin eliminarea legăturii dintre pinul MLCC-ului și PCB, așa cum este prezentat în Fig.2.15. b).

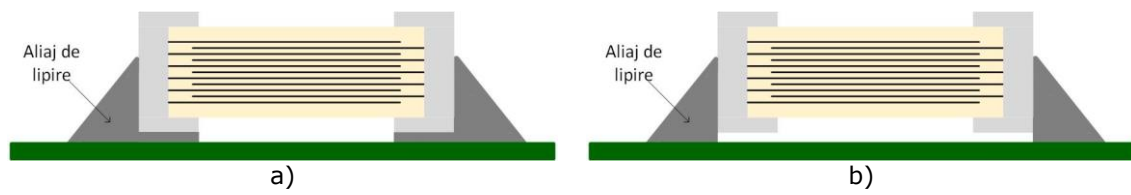


Fig.2.17. Lipirea condensatorului: a) Metodă de lipire clasică; b) Metodă de lipire propusă

Yu et al. [7] au demonstrat, atât prin simulare, cât și experimental, că această metodă de lipire îmbunătățește caracteristicile de vibrație transmise de la MLCC către PCB. Pentru validarea experimentală, lipirea a fost realizată manual, prin plasarea unui material de plastic între condensator și PCB. Ulterior, materialul de plastic a fost îndepărtat. Din acest motiv, metoda de lipire propusă nu este fezabilă din punct de vedere a automatizării pentru producția în serie.

2.5. Concluzii și contribuții originale

Datorită efectelor piezoelectric și electrostrictiv al materialului $BaTiO_3$, electrozii interni ai condensatoarelor vibrează. Vibrația este transferată de la electrozii interni către terminalele MLCC-ului, de la terminale către lipitură, pentru ca în final să fie transferate de la lipitură la PCB, cauzând fenomenul cunoscut sub numele de „*singing capacitors*”. Prin urmare, pentru a elimina zgomotul acustic cauzat de condensatoare, trebuie întreruptă calea de transfer a vibrației.

Prima soluție ar putea fi folosirea unor MLCC-uri cu constantă dielectrică mică. Aceste condensatoare ar rezolva problema fenomenului „*singing capacitors*” de la rădăcină.

Pentru întreruperea căii de transmitere a vibrației de la MLCC la lipitură există mai multe alternative disponibile. Producătorii de componente oferă condensatoare special proiectate pentru a reduce zgomotul acustic, cum ar fi condensatoare de tipul „*metal terminal*” sau „*metal plate*”, condensatoare cu interposer sau substrat de aluminiu, MLCC-uri cu un strat dielectric inferior mai gros și condensatoare de tip „*dipped radial leads*”. Cea mai eficientă soluție comercială este condensatorul de tip „*metal terminal*”, care atenuează zgomotul acustic până la 25dB. O altă soluție sugerată de câțiva autori este să se crească grosimea învelișului condensatorului.

Pentru a întrerupe calea de transmitere a vibrației la PCB, unii autori sugerează scăderea cantității de aliaj de lipire. Din păcate, până la acest moment, această soluție încă nu a fost demonstrată eficientă. Alți autori au sugerat plasarea MLCC-ului în orientare verticală pe PCB, pentru a crește frecvența de rezonanță. Un impact mare asupra fenomenului „*singing capacitors*” îl are și geometria de *layout*, configurația de tip oglindă, sau spate-în-spate, este considerată cea mai bună soluție în literatură.

În Tabelul 2.2. este prezentată o sumarizare a soluțiilor prezentate în literatura de specialitate.

Soluție propusă	Avantaje	Dezavantaje
Înlocuirea condensatoarelor clasice	Eliminarea fenomenului "singing capacitors" de la sursă Nu necesită modificări de proiectare	Preț ridicat Necesită calificări de calitate suplimentare Unele condensatoare alternative nu sunt potrivite pentru proiecte cu restricții severe de dimensiuni pe axa Z (de exemplu condensatoare de tipul "metal terminal")
Scăderea cantității de aliaj de lipire	Nu necesită modificări de proiectare sau de componente	Deocamdată nu a fost demonstrată eficiența soluției
Plasarea condensatorului în orientare verticală	Nu necesită modificări de proiectare sau de componente	Preț ridicat din cauza pre-sortării condensatoarelor
Optimizare de layout	Nu implică modificări de costuri	Necesită modificări de proiectare
Eliminarea aliajului de lipire dintre pinul condensatorului și PCB	Soluție demonstrată atât prin simulare, cât și experimental	Nu poate fi implementat în producția de serie

Tabel 2.2. Analiza sintetică a soluțiilor prezentate în literatura de specialitate

Precum a fost menționat anterior, întotdeauna este mai ușoară prevenția decât corecția. Prin urmare, simulând *design*-ul printr-o analiză armonică, putem evita apariția fenomenului „singing capacitors”. Simularea este mai precisă dacă este implementată de asemenea și o simulare statistică, împreună cu o analiză a sensibilității parametrilor. Unii autori recomandă și o simulare FEM tridimensională, împreună cu o analiză de vibrație.

Cele mai populare metode de măsurarea a zgomotului acustic, găsite în literatură, sunt măsurarea nivelului de presiune a sunetului (SPL) și măsurarea vibrației prin LDV. Aceste două metode pot fi corelate printr-o ecuație liniară. Alte metode folosite pentru investigarea fenomenului „singing capacitors” sunt senzorul cu fibră optică, accelerometrul piezoelectric, metoda stimulării active și metoda de coerență a vibrației și tensiunii.

În concluzie, zgomotul acustic cauzat de condensatori reprezintă o problemă actuală în sistemele electronice moderne. Prin urmare, interesul pentru acest subiect este mare în rândul experților din literatura de specialitate. Din păcate, nu există o soluție generală pentru fenomenul „singing capacitors”, deoarece comportamentul MLCC-urilor depinde de *design*.

Contribuțiile originale realizate în acest capitol sunt:

- Structurarea și analiza comparativă a informațiilor din literatura de specialitate actuală;
- Explicarea fenomenului „singing capacitors” prin intermediul unor reprezentări vizuale (Fig.2.1 și Fig.2.2);
- Sintetizarea soluțiilor de minimizare a fenomenului analizat, prezentate în Fig.2.3;
- Reprezentarea comparativă a soluțiilor comerciale disponibile pe piață (Fig.2.4, Fig.2.5, Fig.2.7 - Fig.2.10);

-
- Descrierea configurațiilor geometrice optime pentru plasarea condensatoarelor ceramice multistrat (Fig.2.11 – Fig.2.13);
 - Descrierea unei metode alternative de plasare a aliajului de lipire (Fig.2.15);
 - Sumarizarea eficienței configurațiilor de *layout* în Tabelul 2.1;
 - Analiza comparativă a soluțiilor de minimizare a fenomenului analizat în Tabelul 2.2.

3. ANALIZA DETALIATĂ A PROBLEMEI

3.1. Introducere a cazului experimental

Pentru a studia fenomenul de „*singing capacitors*”, am folosit un echipament electronic în care s-a observat apariția zgomotului acustic generat de condensatoarele multistrat. Echipamentul este o unitate de control electronic dezvoltată de către compania *Continental Automotive*™.

Modulul denumit „*LED Driver*”, în care sunt amplasate condensatoarele problematice (C5, C6, C10, C11, C15 și C16 din Fig.3.1), comandă intensitatea luminoasă în mai multe șiruri de LED-uri, iar valoarea lor este de 2.2μF.

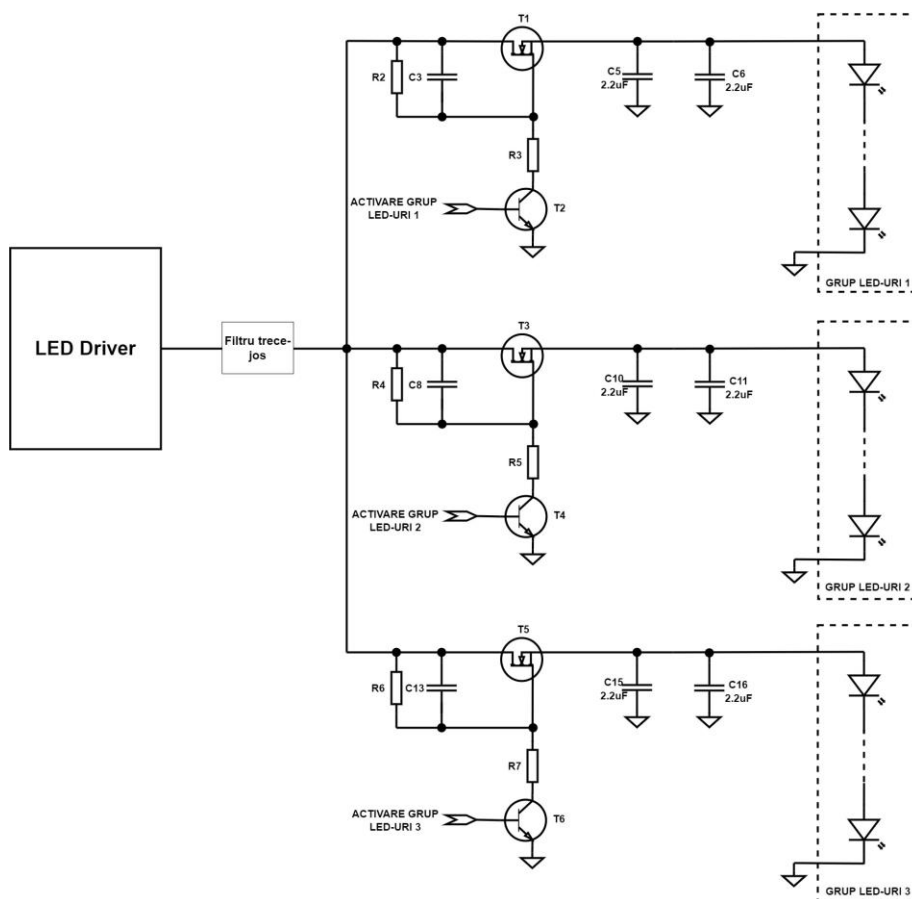


Fig.3.1. Schema electronică a modului studiat

Modulul funcționează ca o sursă constantă de curent, care generează impulsuri de 4A, cu durata de 470 μ s și frecvența de 35Hz. Aceste impulsuri sunt folosite pentru a alimenta grupurile de LED-uri infraroșu.

Pentru LED-urile folosite în aplicație, căderea de tensiune pe fiecare grup de LED-uri este de aproximativ 10V.

Am folosit două moduri de comandă a LED-urilor, prezentate în Tabelul 3.1. Modul de comandă este selectat prin intermediul semnalelor „ACTIVARE GRUP LED-uri 1”, „ACTIVARE GRUP LED-uri 2” și „ACTIVARE GRUP LED-uri 3”.

Mod de comandă a LED-urilor	Descriere
Mod de comandă 1	LED Driver-ul alimentează doar grupul de LED-uri 1, în timp ce grupurile de LED-uri 2 și 3 rămân inactive.
Mod de comandă 2	LED Driver-ul alimentează pe rând grupurile de LED-uri 1, 2 și 3, fără a avea două grupuri de LED-uri active în același timp

Tabel 3.1. Moduri de comandă a LED-urilor

De asemenea, sistemul are două moduri de fixare în mașină. Aceste moduri sunt descrise în Fig.3.2, împreună cu indicarea poziției relative a condensatoarelor multistrat problematice.

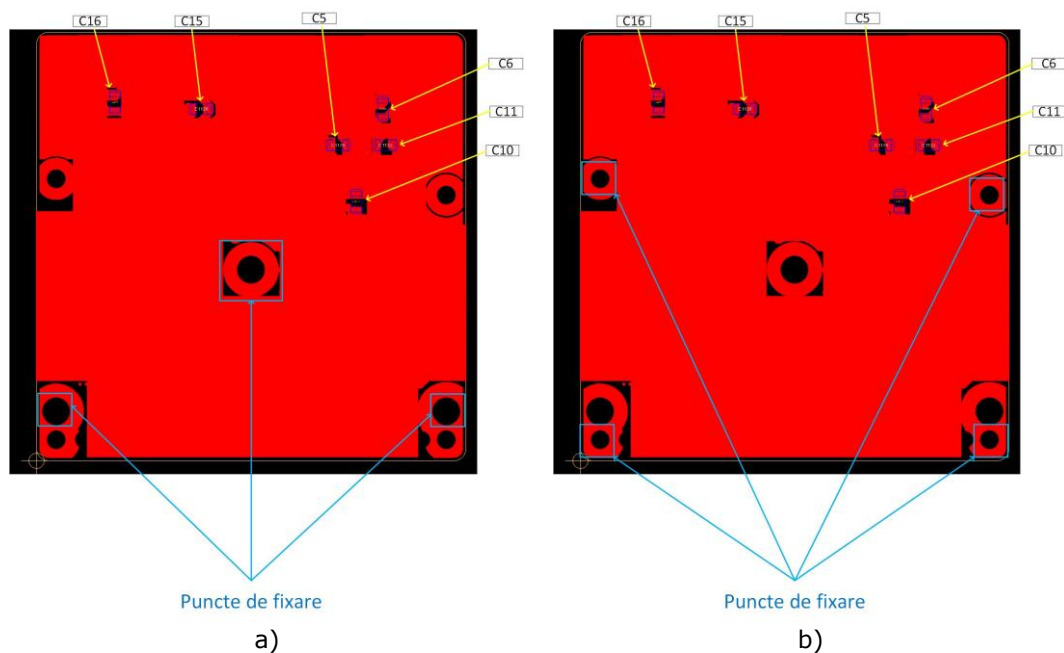


Fig.3.2. Moduri de fixare PCB în mașină: a) în trei puncte; b) în patru puncte

Vibrația PCB-ului în cazul fixării în 3 puncte (Fig.3.2.a) este mai puternică decât în cazul fixării în 4 puncte (Fig.3.2.b), fapt demonstrat prin simulare FEM (eng. *Finite Element Method*) în capitolul următor. Prin urmare, și fenomenul

„singing capacitors” este mai accentuat în modul de fixare în trei puncte. De aceea, experimentele au fost realizate doar cu PCB-ul fixat în trei puncte.

În acest capitol, voi prezenta metodele de măsurare folosite, soluțiile investigate de atenuare a sunetului generat de MLCC-uri și principalele concluzii.

Pentru experimentele din acest capitol, am fost ajutată de colegii din echipele *User Experience Cabin Sensing* și *Quality Laboratory*, din cadrul companiei *Continental*TM, cărora le mulțumesc și aici.

3.2. Metode de măsurare folosite

Așa cum am menționat în Capitolul 2, există două metode principale de măsurare a fenomenului „singing capacitor”: măsurarea vibrației și măsurarea zgomotului acustic.

În literatură, cel mai utilizat echipament de măsurare a vibrației este LDV-ul (eng. *Laser Doppler Vibrometer*). Din păcate, în cazul analizat, LDV-ul, deși detecta vibrația, nu oferea informații necesare pentru a determina nivelul de zgomot acustic al PCB-ului.

O altă metodă de măsurare a vibrației este utilizarea unui accelerometru piezoelectric. Accelerometrul folosit de mine este modelul 352A74, dezvoltat de PCB PiezoelectronicsTM. Acesta este un dispozitiv ușor (1.22g, fără cablu) și de dimensiuni mici (4.8 x 9.9 x 7.1 mm) [54]. În Fig.3.3. este prezentată poziția accelerometrului pe PCB.

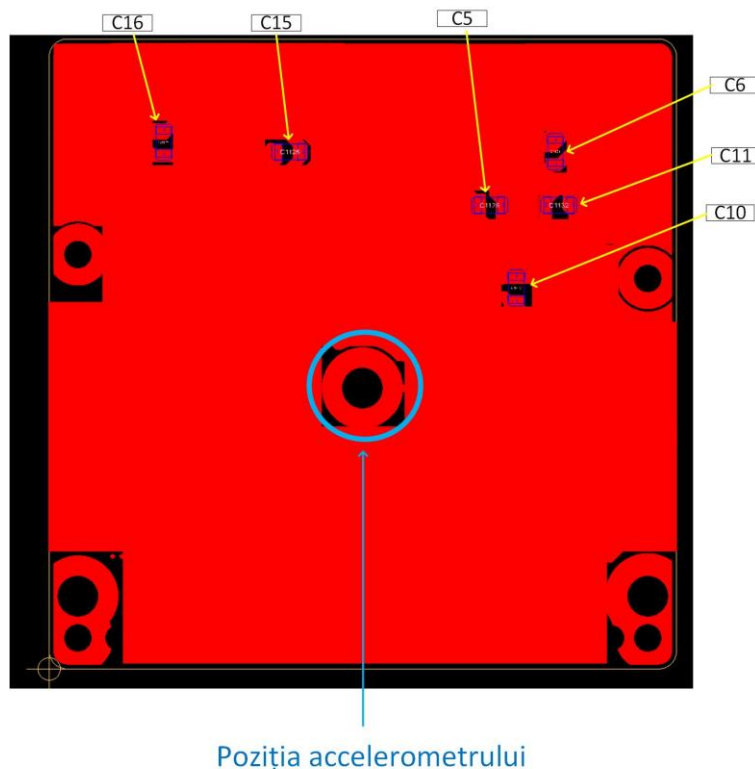


Fig.3.3. Poziția accelerometrului pe PCB

Am măsurat vibrația PCB-ului prin intermediul accelerometrului pentru ambele moduri de comandă a LED-urilor: modul de comandă 1, prezentat în Fig.3.4, și modul de comandă 2, prezentat în Fig.3.5. Forma de undă roșie reprezintă informația captată de accelerometru, iar forma de undă albastră reprezintă tensiunea de ieșire a *LED Driver*-ului.

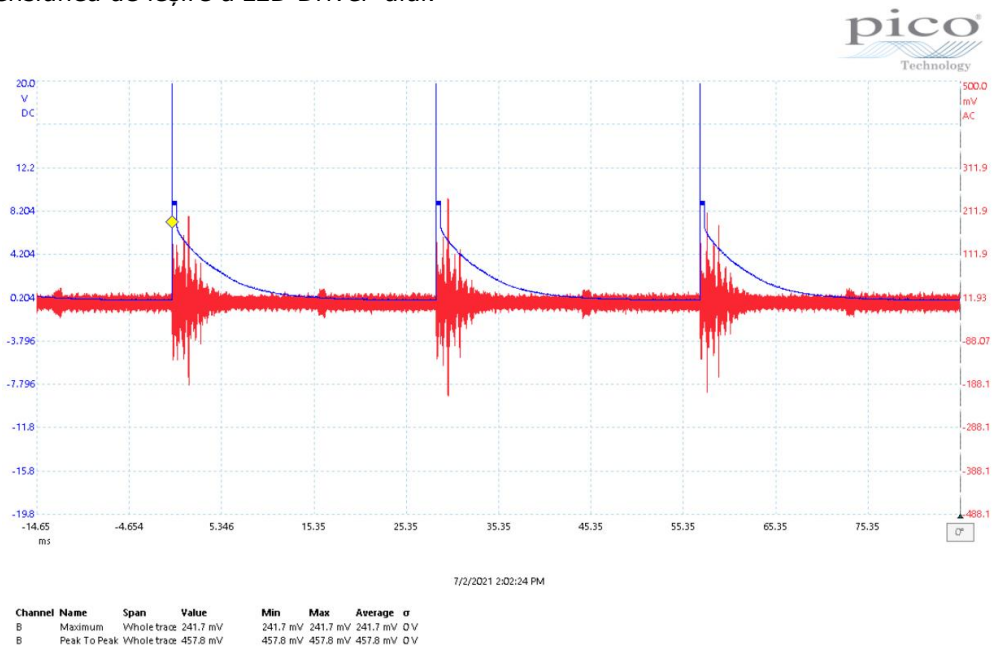


Fig.3.4. Vibrația PCB-ului în modul de comandă 1

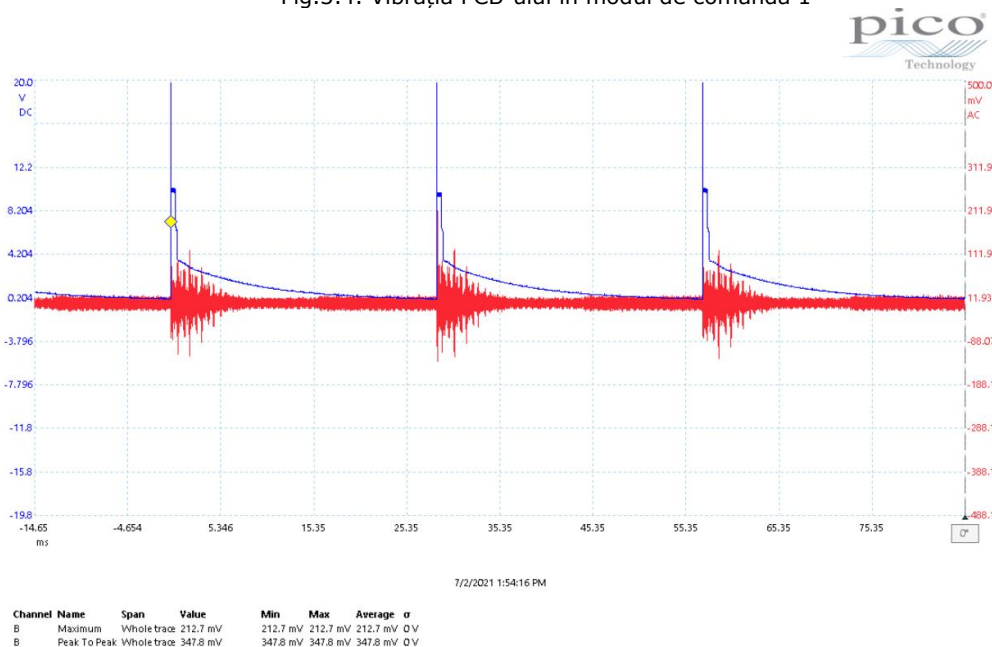


Fig.3.5. Vibrația PCB-ului în modul de comandă 2

Așa cum se poate observa, amplitudinea vibrației captate de accelerometru este ușor mai mare atunci când LED-urile sunt comandate în modul de comandă 1 (valoare *peak-to-peak* de 457.8mV), comparativ cu cazul în care LED-urile sunt comandate în modul de comandă 2 (valoare *peak-to-peak* de 347.8mV). Deși putem analiza diferențele de vibrație dintre cele două măsurări, această metodă de măsurare nu ne oferă informații cantitative despre zgomotul acustic, întrucât semnalul captat de accelerometrul piezoelectric este dependent de temperatura și forța aplicată atunci când este plasat pe PCB. Deoarece accelerometrul piezoelectric este plasat manual pe PCB, nu există o repetabilitate a condițiilor.

Pentru a măsura zgomotul acustic generat de condensatoarele multistrat, am folosit un microfon pentru a măsura SPL-ul (eng. *Sound Pressure Level*) și *Loudness*-ul semnalului acustic. Pentru o acuratețe mai bună, măsurarea este realizată într-o cameră anecoică, unde semnalul acustic nu este reflectat, iar zgomotele din exterior nu sunt sesizate.

Așa cum am menționat în Capitolul 2, nivelul de presiune a sunetului, SPL, este cea mai utilizată metodă de caracterizare a zgomotului acustic și este determinat de raportului dintre rădăcina medie pătrată a deviației presiunii față de presiunea atmosferică și nivelul de referință, așa cum este arătat în ecuația (2.11).

Loudness-ul reprezintă o evaluare subiectivă a intensității sunetului, care descrie nivelul de deranj pe care îl provoacă sunetul ascultătorului. Nivelul de *loudness* este afectat de mai mulți factori, dintre care unii sunt factori acustici, de exemplu SPL-ul, spectrul de frecvență, durata, conținutul de tonuri pure, caracterul impulsiv și nivelul de fluctuație, iar alții sunt factori non-acustici, cum ar fi perioada din zi, perioada din an, necesitatea sunetului, atitudinea comunității, experiențe anterioare și dependența economică a sursei [55].

Moore et al. [56-58] au propus în 1997 o caracterizare a *loudness*-ul, măsurat în phons, în funcție de SPL și frecvență. În 2007, a fost publicat un nou standard ANSI (eng. *American National Standards Institute*) pentru calcularea *loudness*-ul, ANSI S3.4-2007, bazat pe modelul propus de Moore et al. Deși modelul din ANSI S3.4-2007 redă o predicție precisă a percepției de *loudness*, acesta diferă de modelele propuse în standardele ISO (eng. *International Organization for Standardization*) aplicate în trecut [59-61], așa cum este prezentat în Fig.3.6. [62].

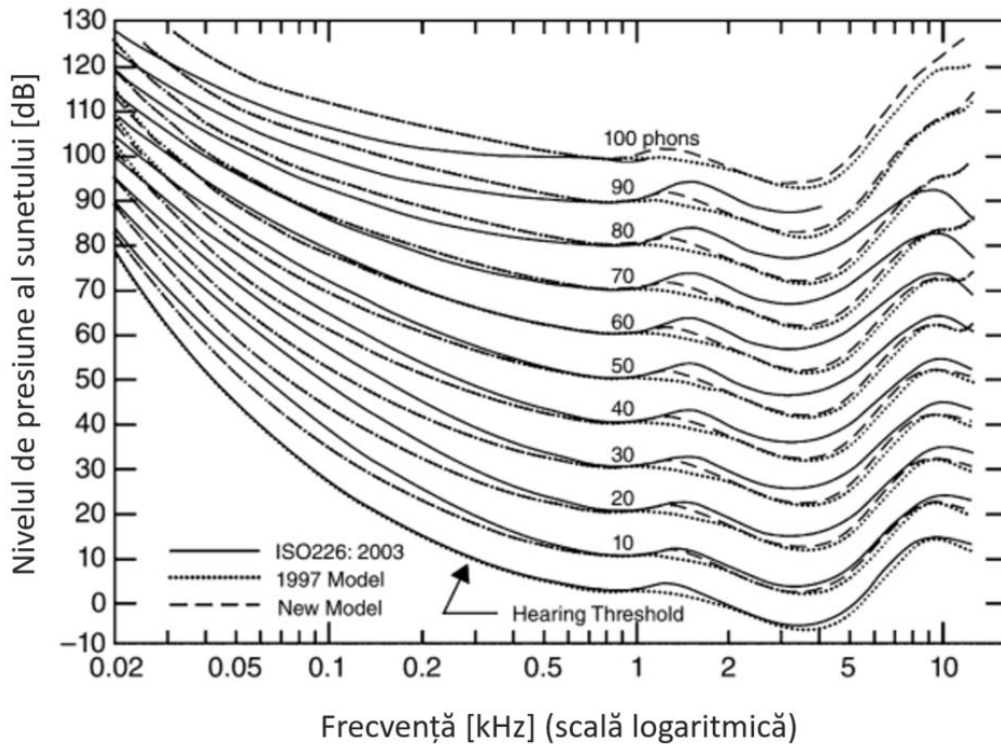


Fig.3.6. Dependența *loudness*-ului de SPL și frecvență conform modelelor publicate [62]

De multe ori, *loudness*-ul este exprimat în sone, așa cum se întâmplă în experimentele efectuate de mine în capitolele următoare. Unitatea de măsură phon este bazată pe nivelul presiunii sunetului pe scară logaritmică, așa cum este prezentat în Fig.3.6., pe când sone este o unitate de măsură liniară a percepției *loudness*-ului.

Relația dintre *loudness*-ul măsurat în phon și cel măsurat în sone este exprimat în ecuația (3.1).

$$S = 2^{\frac{P-40}{10}} \quad (3.1)$$

unde S reprezintă nivelul de *loudness* exprimat în sone, iar P reprezintă nivelul de *loudness* exprimat în phon.

Pe baza ecuației (3.1), în Fig.3.7. am reprezentat relația dintre nivelul de *loudness* exprimat în phone și *loudness*-ul exprimat în sone [63].

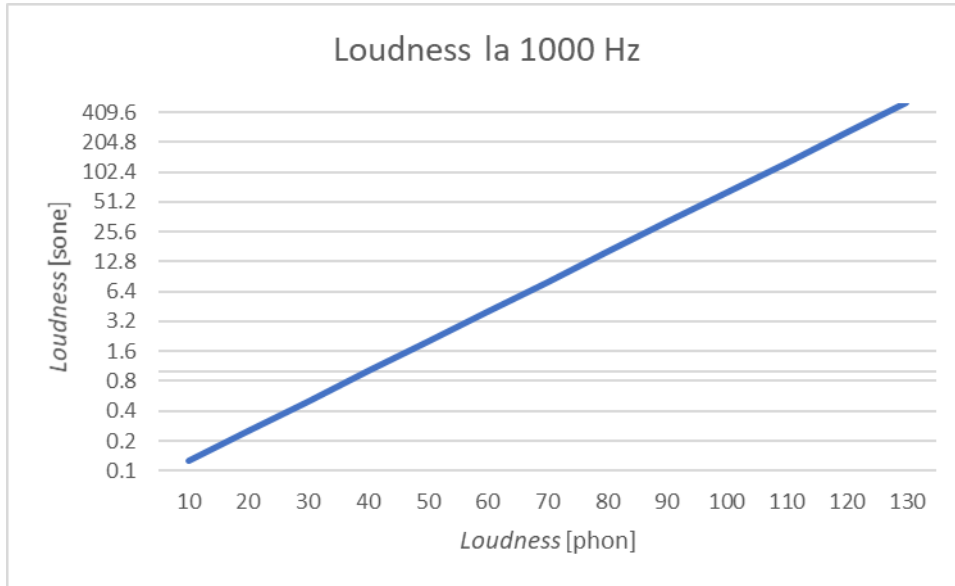


Fig.3.7. Relația dintre *loudness* exprimat în sone și nivelul de *loudness* exprimat în phon

În Fig.3.8. și Fig.3.9., sunt prezentate rezultatele pe care le-am obținut prin măsurarea zgomotului acustic în cazul în care LED-urile sunt comandate în modul 1.

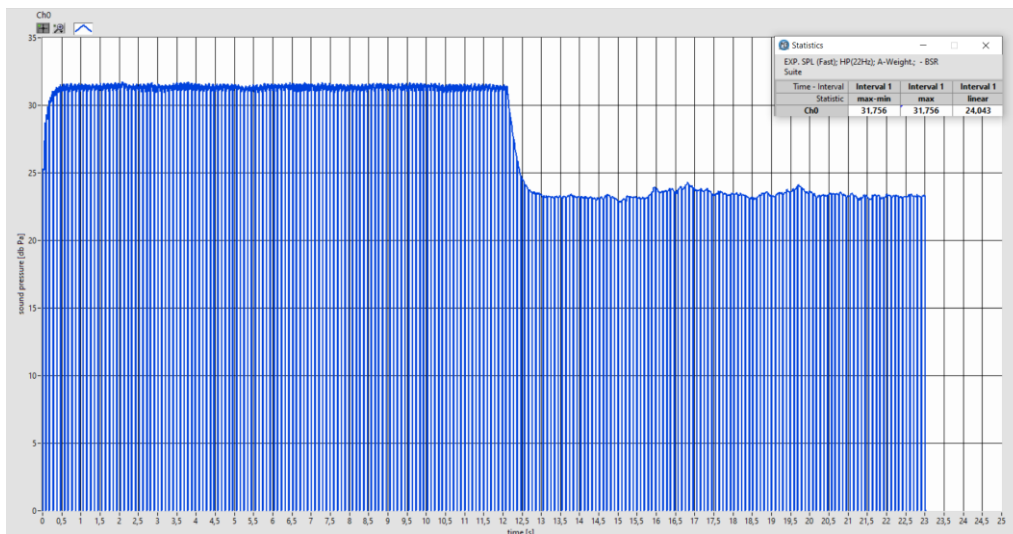


Fig.3.8. SPL obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

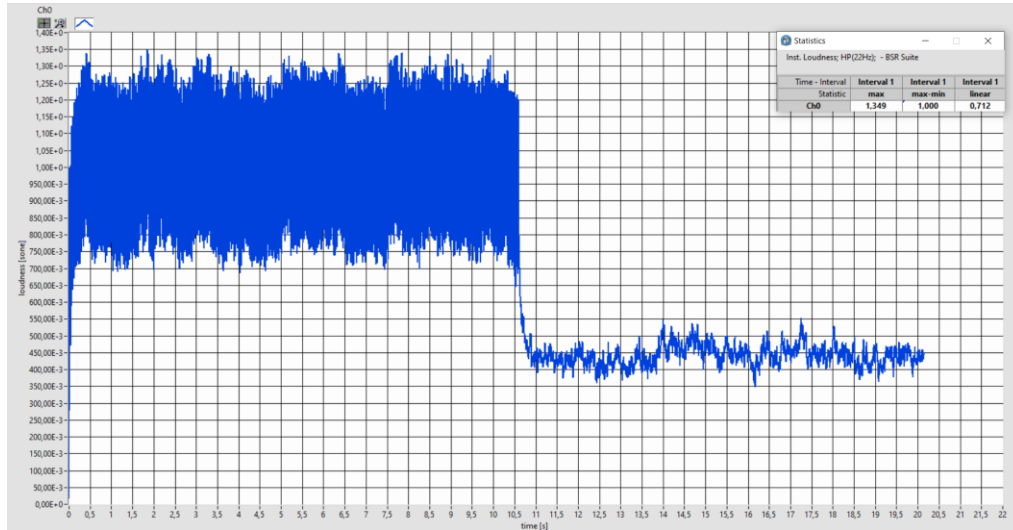


Fig.3.9. Loudness obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

Pentru al doilea mod de comandă al LED-urilor, SPL-ul și Loudness-ul obținute sunt prezentate în Fig.3.10., respectiv Fig.3.11.

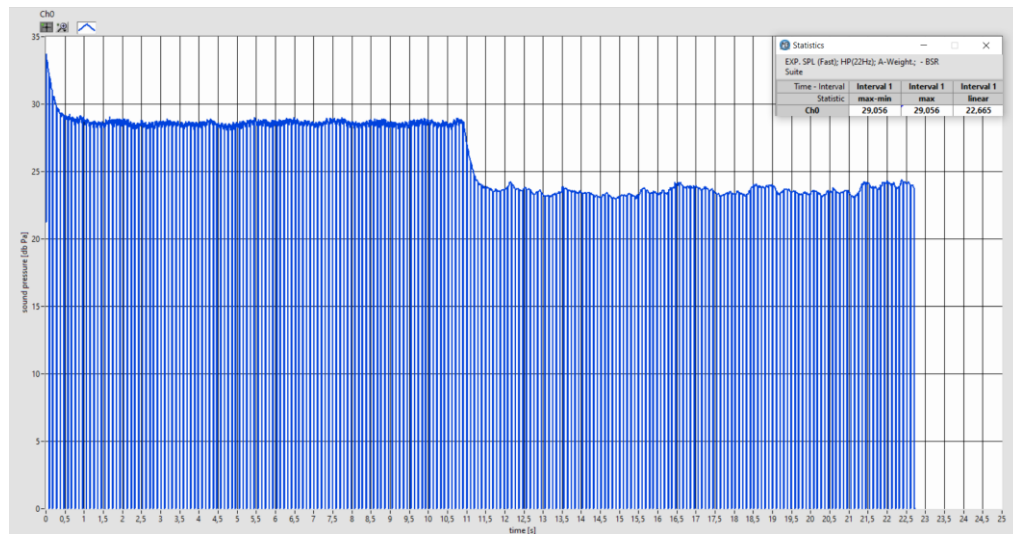


Fig.3.10. SPL obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

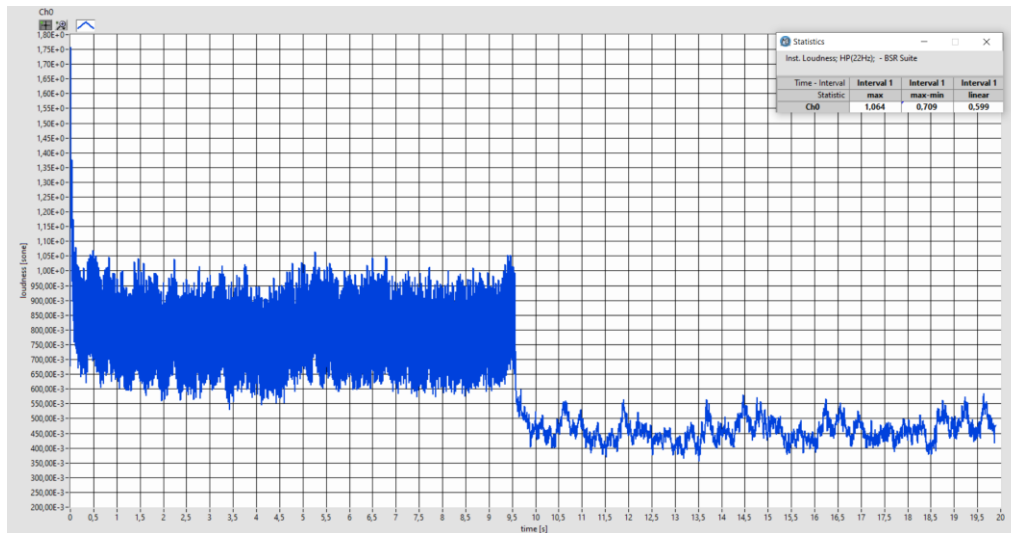


Fig.3.11. Loudness obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

În cazul celor patru măsurări, sistemul a funcționat timp de 10s, iar apoi a fost oprit pentru următoarele 10s, pentru a evidenția diferența dintre semnalul măsurat și referința dată de camera anecoică.

Pentru primul mod de comandă al LED-urilor, am obținut un SPL de 31.75dBPa și un *loudness* de 1.34 sone. Pentru modul de comandă 2 al LED-urilor, am obținut un SPL de 29.05dBPa, respectiv un *loudness* de 1.06 sone. Aceste rezultate confirmă faptul că PCB-ul are un zgomot acustic mai ridicat atunci când LED-urile sunt comandate în modul 1, comparativ cu cazul în care acestea sunt comandate în modul 2, fapt indicat și în rezultatele obținute prin intermediul accelerometrului (Fig.3.4. și Fig.3.5.).

În capitolul următor, vom realiza o analiză a vibrației sistemului electronic prezentat prin simulări mecanice.

3.3. Concluzii și contribuții originale

În teza mea am studiat fenomenul „*singing capacitors*” apărut la ieșirea unui *LED Driver*, prezent într-o unitate de control electronic dezvoltată de către compania *Continental Automotive*TM. Modulul generează pulsuri de 4A, cu durata de 470μs și frecvența de 35Hz, aplicate pe șase condensatoare ceramice multistrat, cu valoarea de 2.2μF. Sistemul are două metode de comandă a LED-urilor și două moduri de fixare în mașină.

Rezultatele măsurărilor acustice inițiale sunt prezentate în Tabelul 3.2.

Metodă de caracterizare a sunetului	Mod de comandă 1	Mod de comandă 2
SPL	31.75 dBPa	29.05 dBPa
<i>Loudness</i>	1.34 sone	1.06 sone

Tabel 3.2. Rezultate inițiale ale măsurărilor acustice realizate pe sistemul electronic studiat

Rezultatele prezentate în Tabelul 3.2 depășesc cerințele clientului, care specifică o limită a SPL-ului de 27dBPa. Astfel, au fost necesare măsuri suplimentare pentru reducerea zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat.

Contribuțiile originale realizate în acest capitol sunt:

- Evidențierea dependenței vibrației față de semnalul electric în Fig.3.4 și Fig.3.5;
- Analiza diferențiată a celor două moduri de comandă în Tabelul 3.2, evidențiind rezultatele mai bune asociate modului de comandă 1.

4. SIMULARE

4.1. Analiza modală – noțiuni teoretice

Analiza modală este un procedeu prin care se analizează dinamica structurală a unui obiect, prin aceasta analizându-se cum vibrează structura obiectului și cât de rezistentă este aceasta la forțele aplicate [47]. Pentru a explica teoria analizei modale, considerăm un sistem cu masă m , cu un singur grad de libertate, atașat de un arc liniar cu rigiditatea k . Ecuația de mișcare neamortizată este reprezentată în ecuația (4.1):

$$mx''(t) = -kx(t) \quad (4.1)$$

unde $x(t)$ este deplasarea față de poziția medie la momentul t , iar $x''(t)$ este accelerația.

Soluția cunoscută a ecuației (4.1) este o simplă armonică de forma:

$$x(t) = a \sin(\omega t) \quad (4.2)$$

unde a și ω sunt necunoscutele ecuației

Aplicând derivata de două ori pe (4.1), obținem:

$$x''(t) = -\omega^2 a \sin(\omega t) = -\omega^2 x(t) \quad (4.3)$$

Substituind (4.3) în (4.1), obținem:

$$-m\omega^2 x(t) = -kx(t) \quad (4.4)$$

Din (4.4), se poate exprima ω prin (4.5), ce descrie frecvența naturală unghiulară a oscilației:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.5)$$

Perioada naturală a oscilației T este descrisă în (4.6):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.6)$$

Pentru sistemul descris mai sus există un singur mod natural neamortizat, corespunzător singurului grad de libertate x . Însă, sistemele reale au un număr infinit de grade de libertate și, prin urmare, au un număr infinit de moduri naturale neamortizate. Aceste calcule pot fi efectuate doar folosind un computer. Prin urmare, avem nevoie de o discretizare a gradelor de libertate [64].

Pentru un sistem cu n grade de libertate, ecuațiile anterioare încă sunt valabile, însă trebuie interpretate ca ecuații matriciale. Pentru aceasta, ω și T rămân scalari, parametrii a , x și x'' devin vectori cu n elemente (un element pentru fiecare grad de libertate, iar m și k devin acum matricile M , respectiv K , de dimensiuni $n \times n$. În acest caz, ecuația (4.4) devine:

$$\omega^2 Mx = Kx \quad (4.7)$$

Ecuația (4.7) reprezintă o problemă de vectori proprii cu n soluții. Soluția i are frecvența $\omega = \omega_i$ și amplitudinea $x = a_i$, unde ω_i este scalar și a_i este un vector de dimensiune n . Considerăm fiecare soluție i un mod natural, reprezentând o oscilație

de undă staționară a liniei, în care cele n grade de libertate oscilează la o singură frecvență unghiulară ω_i , dar cu amplitudini diferite date de componentele a_i (pentru modul i , componentele a_i reprezintă deviația maximă de la poziția medie pentru fiecare grad de libertate) [64].

Pentru un mod m , avem un vector de deviație a modului a_m a cărui componente sunt gradele de libertate a liniei. Astfel, pentru un nod n a liniei, putem obține un vector de deviație a nodului a_{mn} , a cărui componente sunt gradele de libertate corespunzătoare componentelor a_m . Trebuie luat în considerare că a_m este unic doar până la un multiplu scalar, astfel trebuie aleasă o valoare a scalarului adecvată fiecărui mod. Din această cauză, avem nevoie de o normalizare a fiecărei deviații de mod a_m [64].

Pentru a normaliza vectorul deviației de mod a_m , primul pas este să împărțim vectorul deviației de nod a_{mn} într-o parte translațională a_{mn}^T , având unități de lungime, respectiv o parte rotațională a_{mn}^R , măsurată în radiani. Apoi, putem determina magnitudinea maximă a acestor vectori pentru toate nodurile și scala întregul vector de deviație a modului a_m astfel încât magnitudinea vectorului celei mai mari deviații a nodului, a_{mn}^T sau a_{mn}^R , pentru acel mod, să fie 1 [64].

Pentru a scrie componentele individuale ale lui a_{mn}^T după procesul de normalizare, calculăm componentele în linie (t_{mni}), transversale (t_{mnt}) și axiale (t_{mna}) ale formei modale m , așa cum este prezentat în ecuația (4.8):

$$\begin{cases} M_{mi} = \sqrt{\sum_n l_n t_{mni}^2} \\ M_{mt} = \sqrt{\sum_n l_n t_{mnt}^2} \\ M_{ma} = \sqrt{\sum_n l_n t_{mna}^2} \end{cases} \quad (4.8)$$

unde sumele se aplică tuturor nodurilor n și l_n este lungimea liniei corespunzătoare nodului n .

Dacă linia include și torsiune, atunci este nevoie de o componentă adițională M_{mr} , care reprezintă conținutul rotațional a formei modale. Asemănător ecuației (4.8), componentele r_{mni} , r_{mnt} și r_{mna} sunt obținute prin partiția rațională a_{mn}^R a vectorului deviației de mod a_m după normalizare, pentru fiecare nod n . Multiplicăm aceste componente cu raza girației nodului în jurul axei liniei, g_n , apoi însumăm componentele pentru toate liniile nodurilor:

$$M_{mr} = \sqrt{\sum_n l_n (g_n r_{mni})^2} + \sqrt{\sum_n l_n (g_n r_{mnt})^2} + \sqrt{\sum_n l_n (g_n r_{mna})^2} \quad (4.9)$$

În cazul în care linia nu include torsiune, M_{mr} este null.

Pentru analiza modală, componente M_{mi} , M_{mt} , M_{ma} și M_{mr} ale formei modale m , sunt exprimate procentual din suma lor ($M_m = M_{mi} + M_{mt} + M_{ma} + M_{mr}$), unde aceste procente sunt raportate ca valori ale distribuției deviației pentru fiecare mod m .

Masa modală a modului m este calculată în ecuația (4.10):

$$m_m = a_m^T M a_m \quad (4.10)$$

unde a_m este vectorul normalizat al formei modale, a_m^T este vectorul transpus, iar M este matricea de masă a sistemului.

Rigiditatea modală este calculată în ecuația (4.11):

$$k_m = a_m^T K a_m \quad (4.11)$$

unde K este matricea de rigiditate a sistemului.

Programele software pentru analiza modală folosesc diferite tehnici pentru a soluționa problema matematică. În general, dacă $m \leq n/3$ și $m \leq 1000$ (unde m este numărul de moduri extrase, iar n este numărul de grade de libertate ale sistemului) se folosește un algoritm iterativ Lanczos. În caz contrar, se folosește diagonalizarea matricei tridiagonale. Algoritmul Lanczos este cel mai des utilizat deoarece este mai rapid și folosește mai puțin spațiu [64].

4.2. Analiza modală a sistemului

Așa cum s-a menționat în Capitolul 3, sistemul are două moduri de fixare în mașină: în trei puncte și în patru puncte (descrise în Fig. 3.2.). Deoarece problema zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice a fost observată doar în cazul fixării în trei puncte, s-a realizat o analiză modală a sistemului pentru a determina diferențele formei modale în cele două situații.

Rezultatul analizei este descris în treizeci de moduri, prezentate în Tabelul 4.1., unde sunt descrise frecvența naturală și deplasarea maximă teoretică pentru fiecare mod rezultat.

Mod	Frecvență		Deplasare	
	Fixare în patru puncte	Fixare în trei puncte	Fixare în patru puncte	Fixare în trei puncte
1	713.42 Hz	419.84 Hz	289.19 μm	492.94 μm
2	820.99 Hz	633.5 Hz	583.39 μm	632.05 μm
3	1655.7 Hz	1307.7 Hz	431.85 μm	445.95 μm
4	1745.1 Hz	1618.3 Hz	565.19 μm	556.70 μm
5	1880.8 Hz	1876.9 Hz	783.35 μm	575.96 μm
6	2173.4 Hz	2377.8 Hz	528.49 μm	776.21 μm
7	2642.8 Hz	2491.4 Hz	495.97 μm	368.27 μm
8	2952.4 Hz	2624.4 Hz	594.28 μm	475.65 μm
9	3035.1 Hz	3140.5 Hz	477.80 μm	480.84 μm
10	3067.2 Hz	3163.9 Hz	383.14 μm	410.53 μm
11	3420.8 Hz	3595.8 Hz	658.23 μm	678.02 μm
12	4072.6 Hz	3846.1 Hz	945.60 μm	610.60 μm
13	4161.1 Hz	618.38 Hz	460.02 μm	618.38 μm
14	4357.2 Hz	4424.7 Hz	790.56 μm	616.51 μm
15	4627.1 Hz	4581.0 Hz	1098.3 μm	982.47 μm
16	4859.0 Hz	4802.5 Hz	653.74 μm	770.43 μm
17	5662.7 Hz	5135.2 Hz	825.94 μm	559.29 μm
18	5820.6 Hz	5758.3 Hz	623.43 μm	849.72 μm
19	6229.6 Hz	6138.3 Hz	638.29 μm	490.37 μm
20	6346.8 Hz	6498.6 Hz	565.05 μm	1151.0 μm
21	7082.2 Hz	6662.6 Hz	660.42 μm	705.29 μm
22	7189.6 Hz	6932.5 Hz	742.76 μm	957.52 μm
23	7426.6 Hz	7380.4 Hz	1197.1 μm	631.33 μm
24	7585.7 Hz	7407.4 Hz	729.95 μm	920.06 μm
25	8095.2 Hz	7549.2 Hz	692.51 μm	845.21 μm
26	8456.1 Hz	8336.2 Hz	677.62 μm	748.12 μm
27	8526.1 Hz	8815.3 Hz	1048.7 μm	726.25 μm
28	9001.3 Hz	9151.9 Hz	962.32 μm	669.10 μm
29	9538.2 Hz	9411.7 Hz	896.70 μm	756.29 μm
30	9806.8 Hz	9565.3 Hz	875.10 μm	700.71 μm

Tabel 4.1. Deplasarea maximă pentru modurile proprii rezultate

În Fig.4.1 și Fig.4.2 sunt reprezentate deplasările maxime pentru fiecare frecvență de rezonanță, atât pentru fixarea în patru puncte, cât și pentru fixarea în trei puncte.

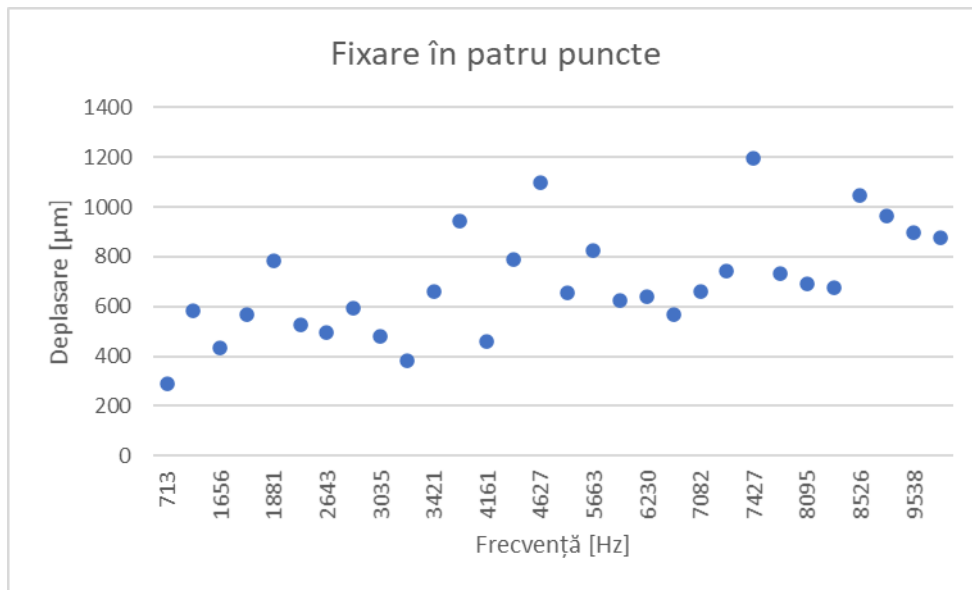


Fig.4.1. Rezultatul analizei modale – deplasarea maximă în cazul fixării în patru puncte

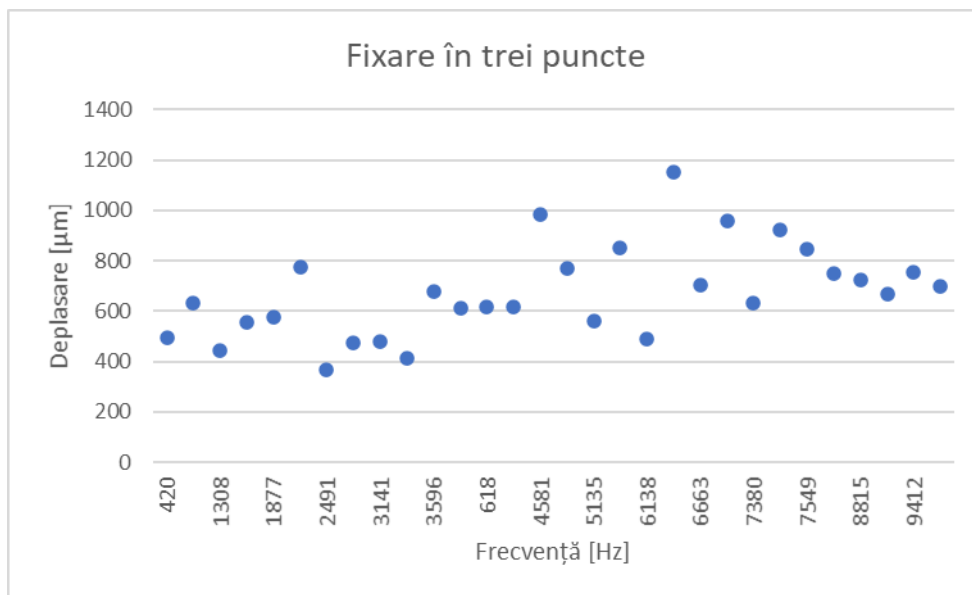


Fig.4.2. Rezultatul analizei modale – deplasarea maximă în cazul fixării în trei puncte

Se poate observa că pentru fixarea în patru puncte, cele mai mari deplasări sunt obținute în modul 23, la 7427Hz, unde deplasarea este de 1197 μm , respectiv modul 15, la 4627Hz, unde avem o deplasare de 1098 μm . În cazul fixării în trei puncte, cele mai mari deplasări sunt obținute în modul 20, la frecvența de rezonanță 6499Hz, unde este prezentă o deplasare de 1151 μm , respectiv la frecvența de 4581Hz, prezentă tot în modul 15, asemănător fixării în patru puncte, unde avem o

deplasare de 982 μ m. Aceste cazuri sunt prezentate în Fig.4.3. – Fig.4.8., restul cazurilor fiind prezentate în anexă.

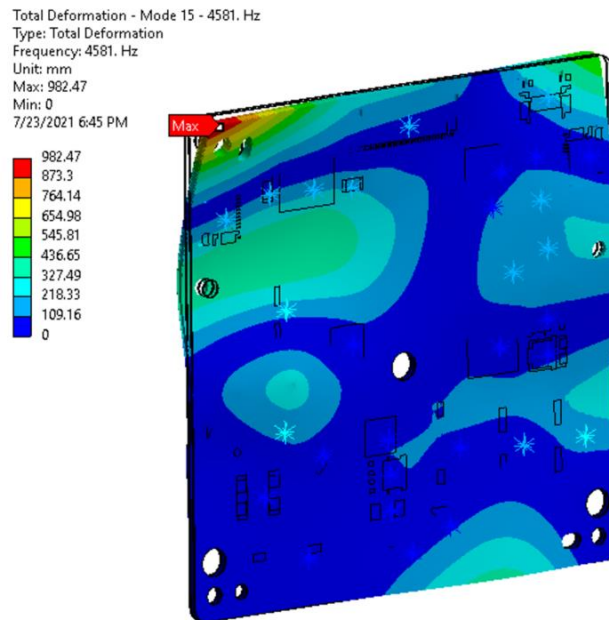


Fig.4.3. Analiză modală – Mod 15, fixare în în trei puncte

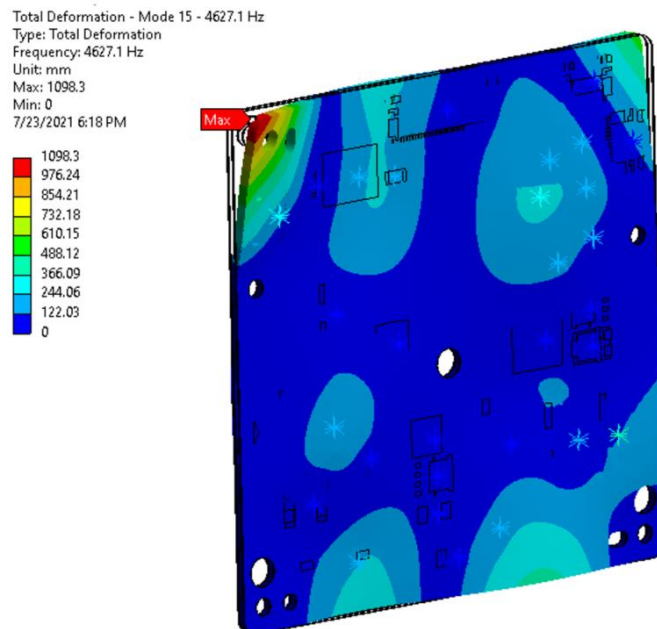


Fig.4.4. Analiză modală – Mod 15, fixare în în patru puncte

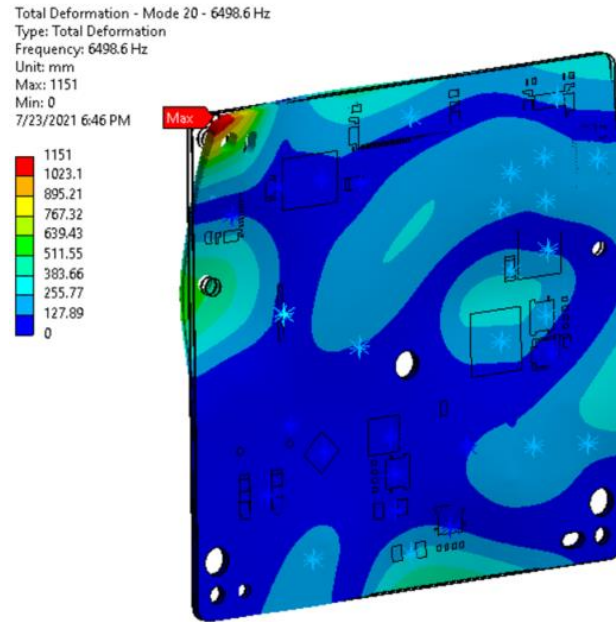


Fig.4.5. Analiză modală – Mod 20, fixare în trei puncte

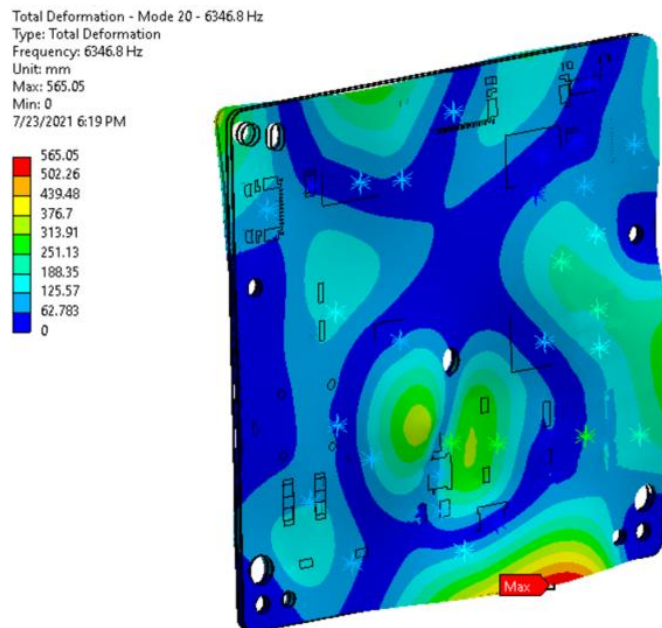


Fig.4.6. Analiză modală – Mod 20, fixare în patru puncte

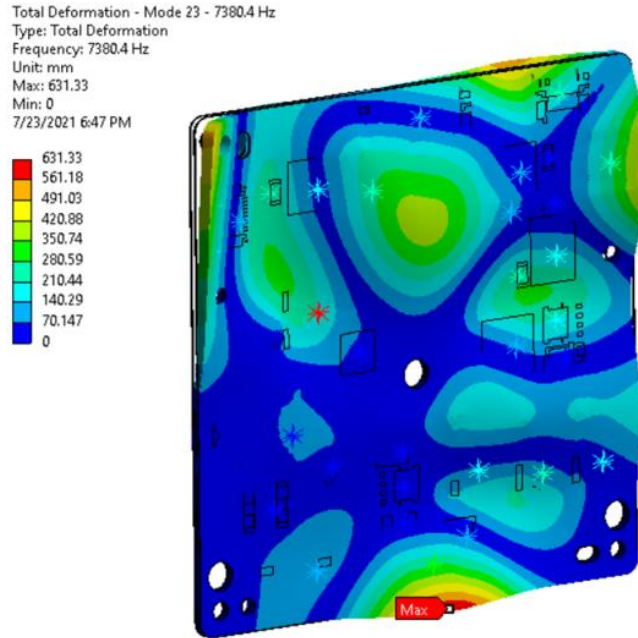


Fig.4.7. Analiză modală – Mod 23, fixare în trei puncte

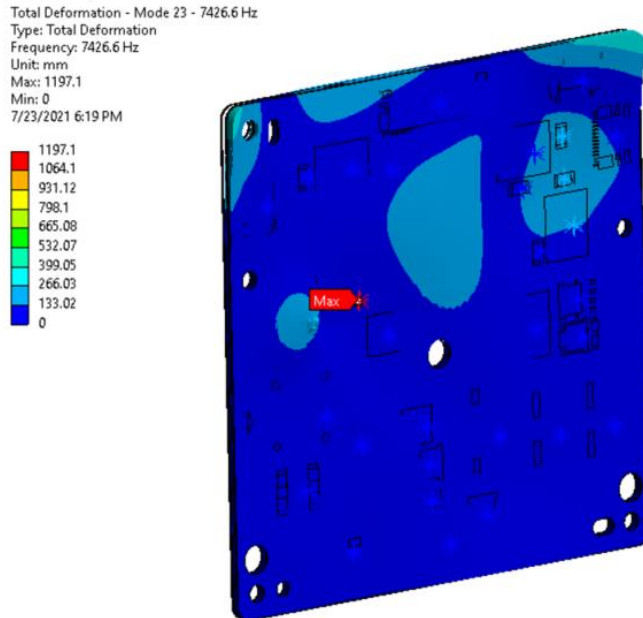


Fig.4.8. Analiză modală – Mod 23, fixare în patru puncte

Așa cum se poate observa, din analiza modală a sistemului nu se poate deduce motivul pentru care sistemul fixat în patru puncte este mai silențios decât în

cazul în care este fixat în trei puncte, deoarece rezultatele obținute nu sunt semnificativ mai bune atunci când simulăm varianta silențioasă.

În continuare, am realizat o analiză armonică a sistemului pentru a determina efectul condensatoarelor ceramice asupra PCB-ului.

4.3. Analiza armonică – noțiuni teoretice

Analiza armonică, sau analiza Fourier, este o procedură matematică prin care se analizează o funcție prin „spargerea” ei în mai multe părți [65].

Considerăm o funcție f ca fiind o funcție periodică, cu perioada $T \neq 0$, dacă:

$$f(x + T) = f(x) \quad (4.12)$$

pentru oricare ar fi x .

Dacă f are perioada T , atunci funcția are și perioadele nT , pentru orice număr întreg n .

Cele mai simple funcții periodice reale sunt sinus și cosinus, dar dacă dorim să luăm în considerare și funcțiile cu valori complexe, cea mai simplă funcție este:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad (4.13)$$

a cărei cea mai mică perioadă pozitivă este 2π .

Pentru a obține o funcție similară, dar cu perioada $2L$, aplicăm ecuația (4.14):

$$e^{\frac{ix}{L}} = \cos \frac{\pi x}{L} + i \sin \frac{\pi x}{L} \quad (4.14)$$

Pentru a efectua analiza armonică, trebuie aplicată teoria seriei Fourier pe funcția periodică f , cu perioada $2L$:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{i\pi n x}{L}} \quad (4.15)$$

unde c_n sunt constante complexe.

Pentru a simplifica formula, considerăm $L = \pi$, prin urmare funcția f are perioada 2π . Astfel, ecuația (4.15) devine:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inx} \quad (4.16)$$

Pentru a determina constantele c_n , numite coeficienți Fourier, multiplicăm ambele părți cu e^{-imx} și integrăm pe perioada 2π .

Considerând că seria poate fi integrată termen cu termen, folosim:

$$\int_{-\pi}^{\pi} e^{inx} e^{-imx} dx = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i(n-m)x} dx = \begin{cases} 0, & \text{dacă } m \neq n \\ 2\pi, & \text{dacă } m = n \end{cases} \quad (4.17)$$

Folosind această relație, obținem:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-inx} dx, \text{ pentru } -\infty < n < \infty \quad (4.18)$$

Ecuțiile (4.16) și (4.18) definesc un caz special al transformatei Fourier: dacă funcția f are perioada 2π și este netedă, atunci seria Fourier a funcției f există și converge la fiecare punct x . Mai mult decât atât, dacă este valabilă expansiunea (4.16), numerele c_n trebuie definite prin formula (4.18). Cu alte cuvinte, expansiunea Fourier este unică. Toate acestea sunt valabile pentru orice funcție reală cu valori complexe [65].

Dacă funcția f este reală, se consideră adevărată relația:

$$\bar{f} = f \quad (4.19)$$

Aplicând conjugata complexă pe (4.16), obține:

$$\overline{f(x)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \bar{c}_n e^{-inx} \quad (4.20)$$

Având în vedere că membrii stânga ai ecuațiilor (4.16) și (4.20) sunt egali, putem concluda că și membrii dreپți sunt egali. Astfel obținem:

$$\bar{c}_n = c_{-n} \quad (4.21)$$

Se știe că numărul complex $c_n = A_n + iB_n$, unde A_n și B_n sunt numere reale. Dacă aplicăm ecuația (4.21), rezultă că $A_n = A_{-n}$ și $B_n = -B_{-n}$. Astfel se poate scrie termenul general a seriei Fourier ca:

$$(A_n + iB_n)(\cos nx + i \sin nx) = A_n \cos nx - B_n \sin nx + i(A_n \sin nx + B_n \cos nx) \quad (4.22)$$

Dacă grupăm fiecare termen înmulțit cu n cu termenul înmulțit cu $-n$, toți termenii imaginari din ecuația (4.16) se anulează și astfel obținem:

$$f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (2A_n \cos nx - 2B_n \sin nx) \quad (4.23)$$

Pentru ecuația (4.18) obținem:

$$A_n + iB_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x)(\cos nx - i \sin nx) dx \quad (4.24)$$

Astfel, dacă f este funcție reală, A_n și B_n sunt:

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (4.25)$$

$$B_n = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (4.26)$$

În acest punct, putem nota $a_n = 2A_n$ și $b_n = 2B_n$. Cu aceste notații, obținem formula Fourier pentru funcții reale:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx \quad (4.27)$$

unde:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx \quad (4.28)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx \, dx \quad (4.29)$$

Aceste ecuații reprezintă formulele originale Fourier. Motivul pentru care se scrie termenul constant ca $a_0/2$ este unificarea formulei (4.28) pentru a_n pentru orice n , inclusiv $n=0$. Atunci când $n=0$, obținem media lui f pe o perioadă:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \, dx \quad (4.30)$$

O funcție f este considerată pară dacă $f(x)=f(-x)$, oricare ar fi x . Similar, o funcție f se consideră impară dacă $f(x)=-f(-x)$, oricare ar fi x . Singura funcție care este simultan și pară, și impară, este funcția zero [65].

Orice funcție reală f , se poate descompune în $f=f_p+f_i$, unde f_p este funcție pară, iar f_i este funcție impară. Cele două funcții sunt reprezentate astfel:

$$f_p(x) = \frac{f(x) + f(-x)}{2} \quad (4.31)$$

$$f_i(x) = \frac{f(x) - f(-x)}{2} \quad (4.32)$$

Se poate observa că primii doi termeni ai membrului drept din ecuația (4.27) sunt pari, iar ultimul este impar. Astfel, se poate obține descompunerea funcției reale în părți pare și impare:

$$f_p(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx \quad (4.33)$$

$$f_i(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx \quad (4.34)$$

unde a_n și b_n sunt definiți în (4.28), respectiv (4.29).

Putem observa că funcția f se poate analiza acum ca suprapunerea unor funcții armonice elementare.

4.4. Analiza armonică a sistemului

Principalele materiale din care este compus un PCB sunt materialul dielectric și cupru [49]. FR-4 (*Flame Retardant*) este cel mai comun material dielectric folosit pentru fabricarea PCB-urilor. Acesta este compus dintr-o rășină epoxidică ignifugă și dintr-un compozit de sticlă [66]. Stratul de cupru este laminat pe substratul FR-4 pentru a crea un PCB multistrat. În cazul nostru, PCB-ul este compus din cinci straturi FR-4 și șase straturi de cupru.

Deși am putea modela precis straturile de cupru, dimensiunile traseelor sunt reduse, acest lucru determinând un timp mai lung de simulare, în condițiile în care dimensiunea mică a elementelor discretizate nu aduce îmbunătățiri semnificative a acurateții rezultatelor. Pentru a nu exagera complexitatea simulării, dar în același timp pentru a obține rezultate valide, am folosit tehnica de cartografiere a traseelor de cupru (*trace mapping technique*) [67].

Tehnica aceasta constă în două etape. Primul pas este construirea, pe baza *layout*-ului, a unui grid a cărui dimensiune să fie determinată de cel mai mic element care trebuie rezolvat. Trebuie înțeles faptul că în cazul analizei vibrațiilor mecanice, dimensiunea elementului (*mesh size*) nu trebuie să coincidă cu dimensiunea celui mai îngust traseu de cupru [30]. În cazul analizei noastre armonice, am folosit un *mesh* de 1.2 mm pentru modelarea PCB-ului și un *mesh* de 0.5 mm pentru modelarea condensatoarelor ceramice multistrat. Rezultatul primei etape este prezentat în Fig.4.9.

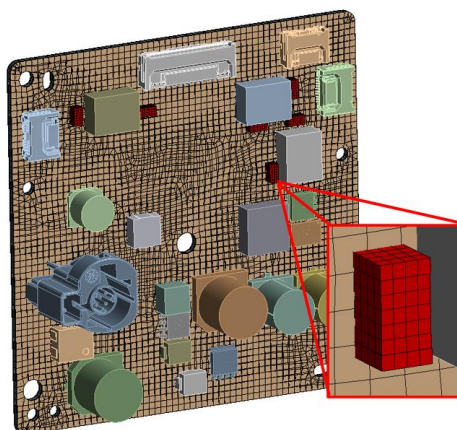


Fig.4.9. Rezultatul primei etape a tehnicii de cartografiere a traseelor de cupru – modelarea PCB-ului și a elementelor ce trebuiesc analizate

A doua etapă constă în asocierea unei valori fracționale de metal fiecărui grid, în funcție de cantitatea de metal existentă în acea zonă. Această valoare este în intervalul zero și unu, unde 0 reprezintă faptul că în acea celulă materialul este pur dielectric, iar 1 arată faptul că acea celulă este pur cupru. Rezultatul tehnicii *trace mapping* este prezentat în Fig.4.10.

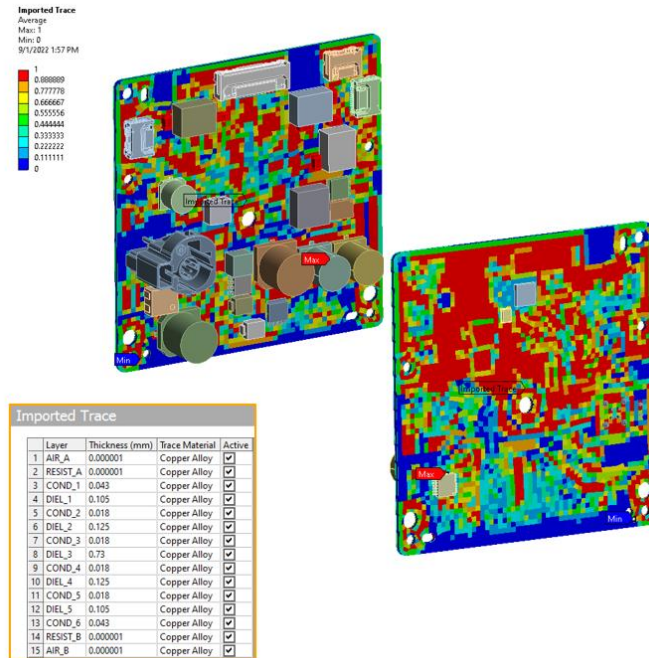


Fig.4.10. Rezultatul tehnicii de cartografiere a traseelor de cupru

Pe baza acestui model și a analizei modale a sistemului, am efectuat o analiză armonică pentru a determina efectul vibrației condensatoarelor multistrat asupra vibrației PCB-ului.

Așa cum am menționat în capitolul anterior, sistemul are două moduri de fixare (în trei și patru puncte) și șase condensatoare problematice, prezentate în Fig.3.2.

Pentru fiecare mod de fixare, s-a analizat răspunsul armonic rezultat în urma aplicării unei forțe de 2Pa pe fiecare condensator în parte. Am obținut 470 de moduri, având frecvențele de rezonanță cuprinse între 0Hz și 10kHz, acestea fiind prezentate în anexă. În Fig.4.11. este prezentat răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte, iar în Fig.4.12. cel al fixării în patru puncte.

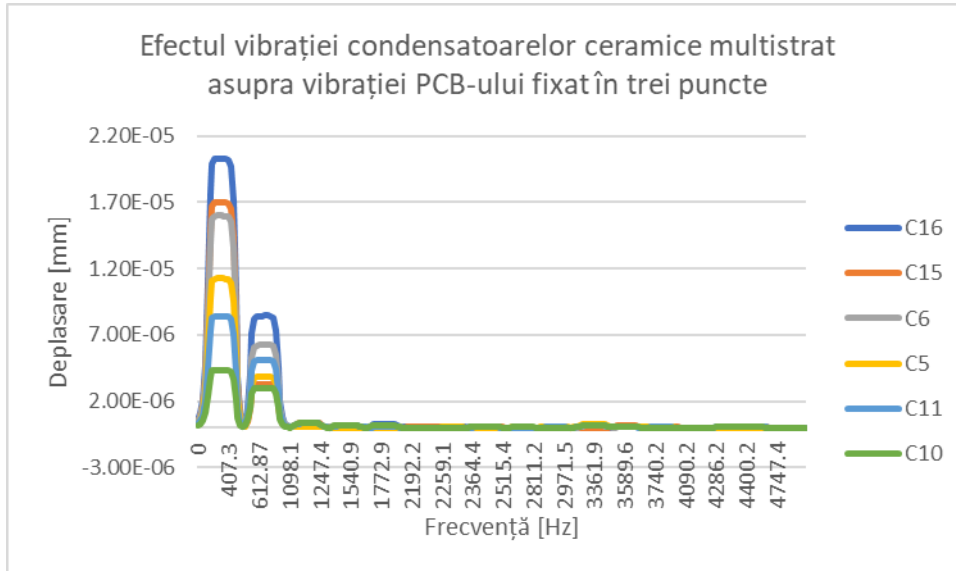


Fig.4.11. Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte

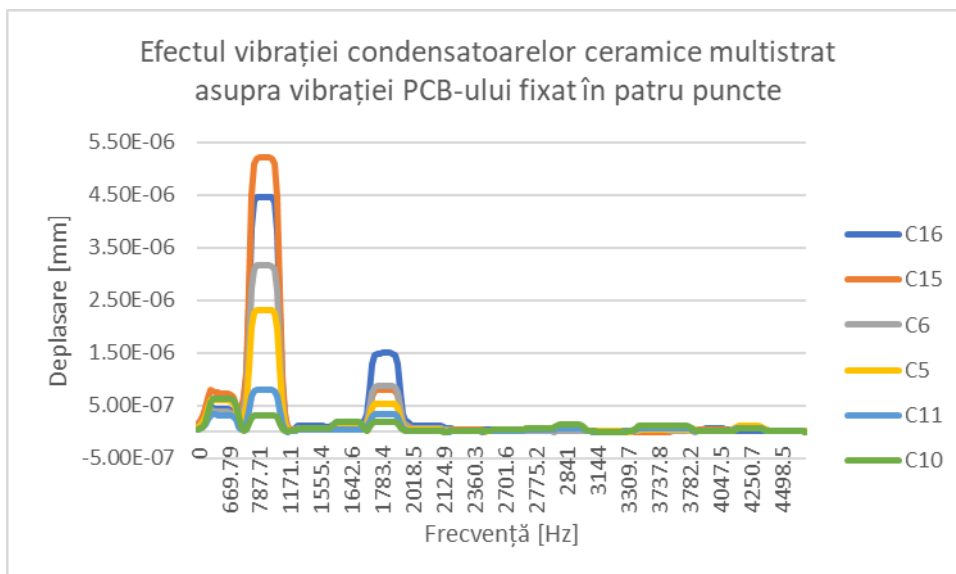


Fig.4.12. Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte

Se poate observa faptul că fixarea în patru puncte este mult mai avantajoasă în comparație cu cea în trei puncte. Așa cum este arătat în Fig.4.11., amplitudinea maximă a deplasării în cazul fixării în trei puncte este de 20.26nm, în timp ce în Fig.4.12. este arătat că în cazul fixării în patru puncte, amplitudinea maximă este de patru ori mai mică, având valoarea de 5.21nm, fundamentala fiind la frecvența de 407Hz în cazul fixării în trei puncte și 788Hz în cazul fixării în patru puncte. Atunci când ne uităm la a doua armonică, în cazul fixării în trei puncte observăm o deplasare cu amplitudinea de 8.44nm la frecvența de 613Hz, iar în cazul fixării în

patru puncte, amplitudinea de 1.49nm la frecvența de 1.78kHz. În Fig.4.13. și Fig.4.14. sunt reprezentate formele modale corespunzătoare fundamentalelor, iar în Fig.4.15. și Fig.4.16. sunt reprezentate formele modale corespunzătoare primei armonici.

Z Axis - Directional Deformation - 407.3 Hz
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Frequency: 407.3 Hz
Amplitude
Unit: mm
Solution Coordinate System
23-Apr-23 12:51 PM

2.9493e-5 Max
2.6216e-5
2.2939e-5
1.9662e-5
1.6385e-5
1.3108e-5
9.8309e-6
6.5539e-6
3.277e-6
0 Min

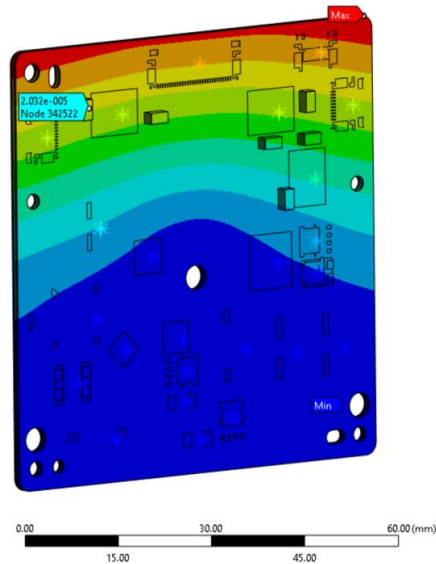


Fig.4.13. Răspunsul armonic la frecvența 407Hz (fundamentală), în cazul fixării în trei puncte

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Frequency: 787.85 Hz
Amplitude
Unit: mm
Solution Coordinate System
23-Apr-23 1:00 PM

9.3157e-6 Max
8.2806e-6
7.2455e-6
6.2104e-6
5.1754e-6
4.1405e-6
3.1052e-6
2.0701e-6
1.0351e-6
0 Min

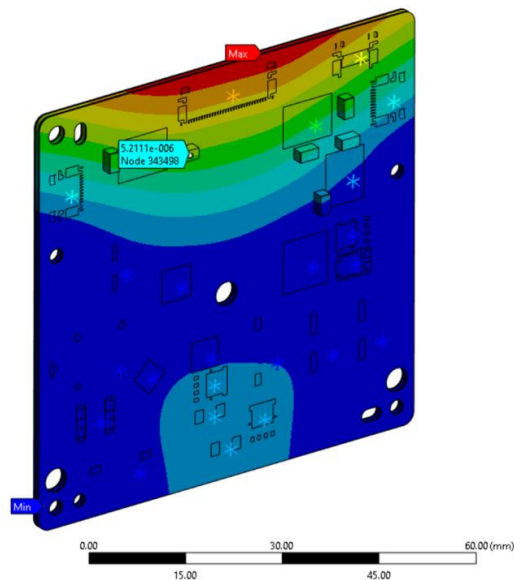


Fig.4.14. Răspunsul armonic la frecvența 788Hz (fundamentală), în cazul fixării în patru puncte

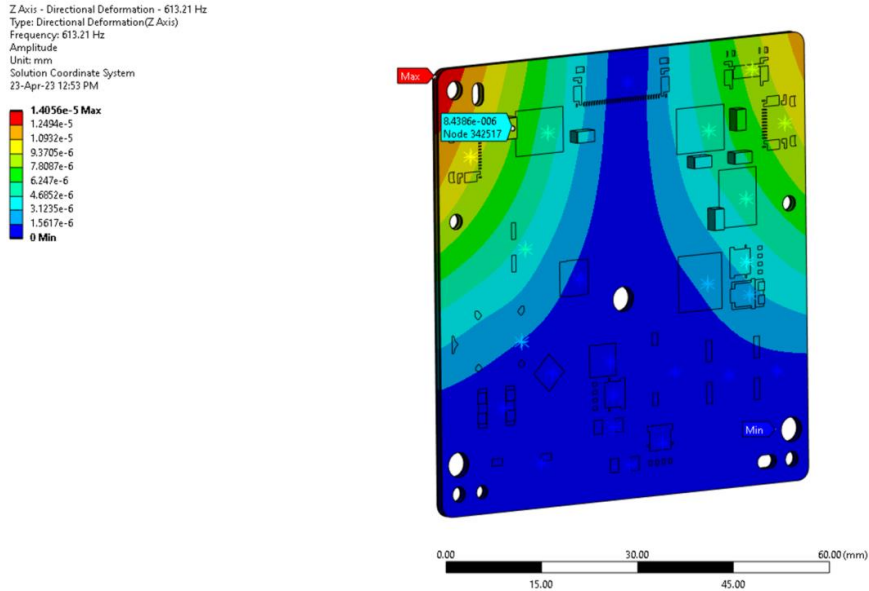


Fig.4.15. Răspunsul armonic la frecvența 613Hz (a doua armonică), în cazul fixării în trei puncte

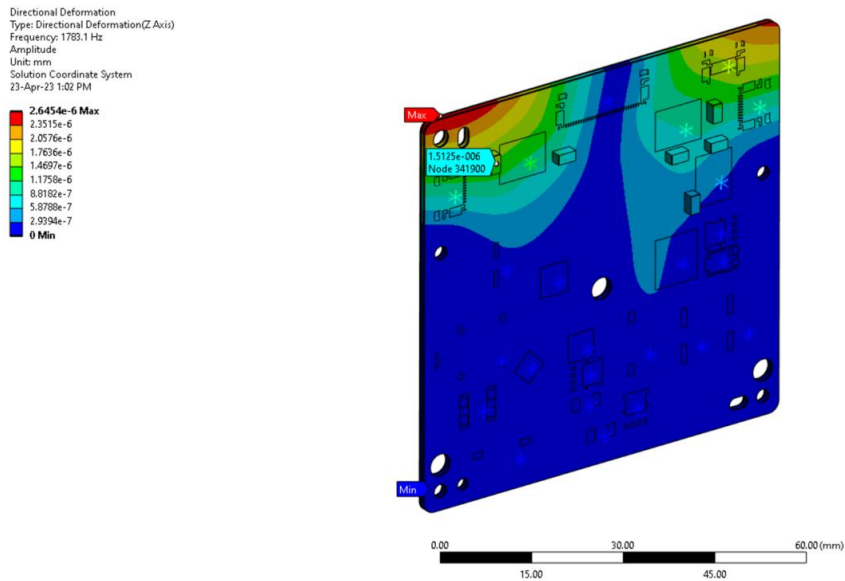


Fig.4.16. Răspunsul armonic la frecvența 1783Hz (a doua armonică), în cazul fixării în patru puncte

O altă observație este că, în cazul fixării în trei puncte, efectul condensatorului C16 are cea mai mare influență asupra vibrației sistemului atât în cazul fundamentalei, cât și în cazul primei armonici, pe când, în cazul fixării în patru puncte, fundamentala este influențată cel mai mult de către condensatorul C15, iar a doua armonică este influențată cel mai mult de condensatorul C16.

Având la dispoziție rezultatele sistemului original, voi descrie în continuare metodele prin care am reușit atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, respectiv de optimizare a *layout*-ului.

4.5. Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare

În capitolul anterior, în Fig.3.4 și Fig.3.5, se poate observa prezența unui *spike* de tensiune de 20V pe semnalul de la ieșirea *LED Driver*-ului. Acest *spike* apare în fiecare perioadă, la începutul impulsului, cauzând o solicitare suplimentară condensatoarelor multistrat.

Din analiza atentă a schemei a rezultat că *spike*-ul este generat de condensatoarele C3, C8 și respectiv C13 prezente în circuitele de întârziere de pe fiecare circuit de alimentare a grupurilor de LED-uri (R2-C3, R4-C8 și R6-C13). Aceste condensatoare sunt încărcate înainte de activarea tranzistorilor MOSFET T1, T3 și T5. Prin urmare, atunci când unul din grupurile de LED-uri sunt activate, tranzistorul MOSFET corespunzător este închis, iar condensatorul de delay se descarcă brusc, creând *spike*-ul de tensiune [68].

Considerând că întârzierea nu este absolut necesară aplicației, am eliminat condensatoarele C3, C8 și C13, așa cum este prezentat în Fig.4.17.

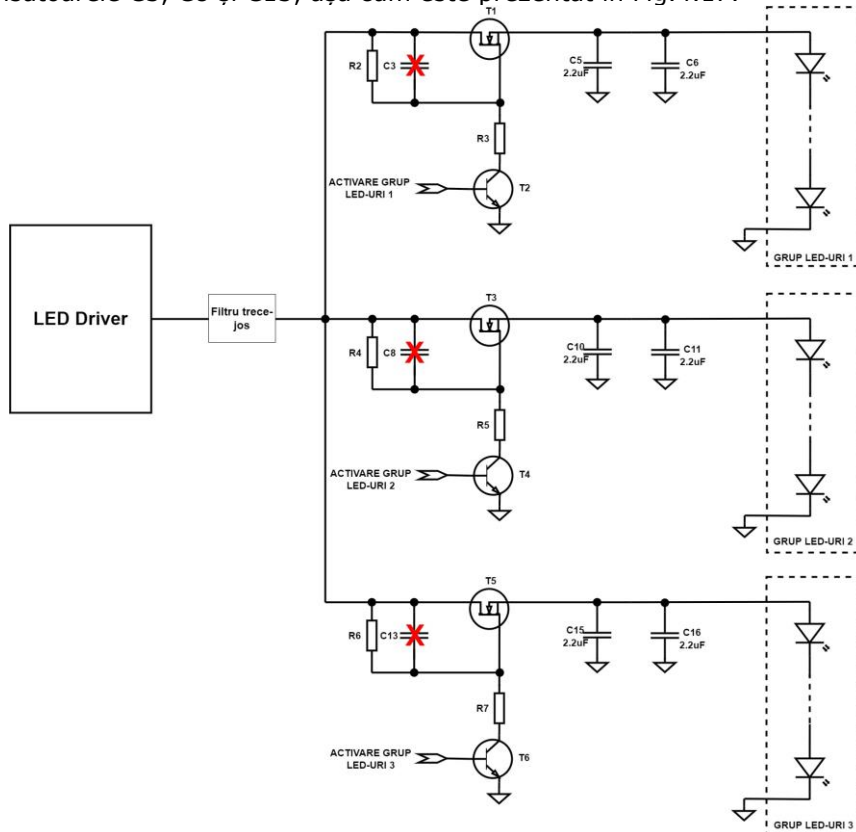


Fig.4.17. Schema electronică realizată pentru eliminarea *spike*-urilor de tensiune

4.5 – Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare

Pe lângă această modificare, solicitarea aplicată pe condensatoarele multistrat se mai poate micșora prin pre-încărcarea acestora. Pentru a pre-încărca condensatoarele, am inserat un etaj pasiv de translatare a tensiunii format din R7 și R8, amplasat la ieșirea LED Driver-ului, așa cum este prezentat în Fig.4.18.

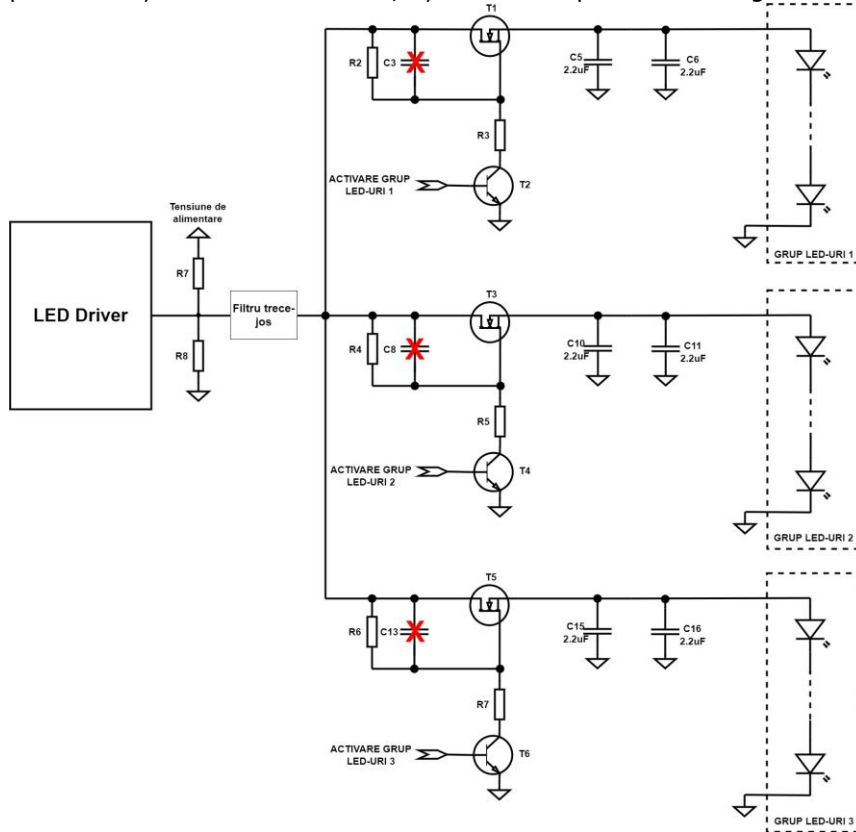


Fig.4.18. Schema electronică realizată pentru pre-încărcarea condensatorilor multistrat

Cu acest etaj de divizare de tensiune, impulsul de tensiune generat de LED Driver crește de la 5V la 10V, în comparație cu conceptul original, unde impulsul de tensiune creștea de la 0V la 10V. Înjumătățind diferența de tensiune dintre paliere, efectele piezoelectric și electrostrictiv generează o deformare mecanică mai mică.

În analiza armonică realizată în subcapitolul 4.4, nu s-a luat în considerare efectul condensatoarelor C3, C8 și C13. Prin urmare, putem analiza doar efectul pre-încărcării condensatoarelor din punct de vedere al răspunsului armonic.

Pentru această analiză armonică, s-au reluat pașii efectuați la prima simulare, folosind *layout*-ul nou, și s-a considerat forța aplicată pe condensatoare de 1 Pa - jumătate din valoarea forței aplicate în prima analiză. Rezultatele sunt prezentate în Fig.4.19. și Fig.4.20., pentru fixarea în trei puncte, respectiv patru puncte.

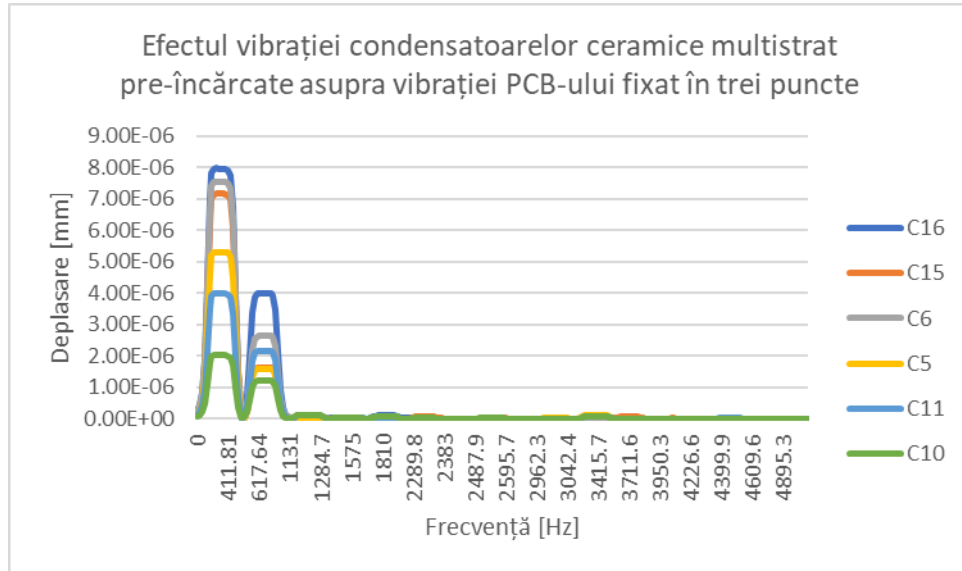


Fig.4.19. Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte, pentru cazul condensatoarelor pre-încărcate

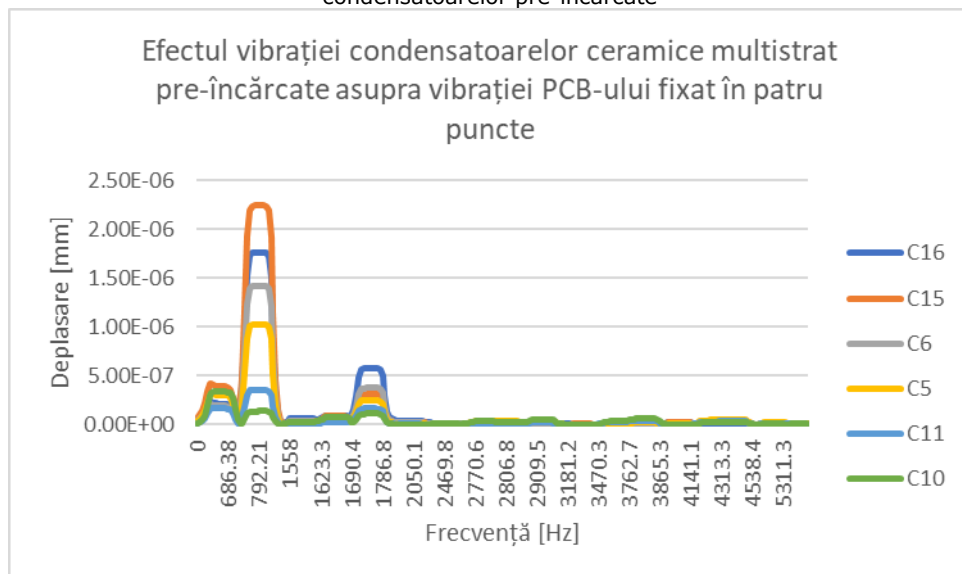


Fig.4.20. Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte, în cazul condensatoarelor pre-încărcate

În Fig.4.21. – Fig4.24., sunt prezentate răspunsurile armonice în cazul celor două fixări, atât la frecvența fundamentalei, cât și a celei de-a doua armonici.

4.5 – Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare 71

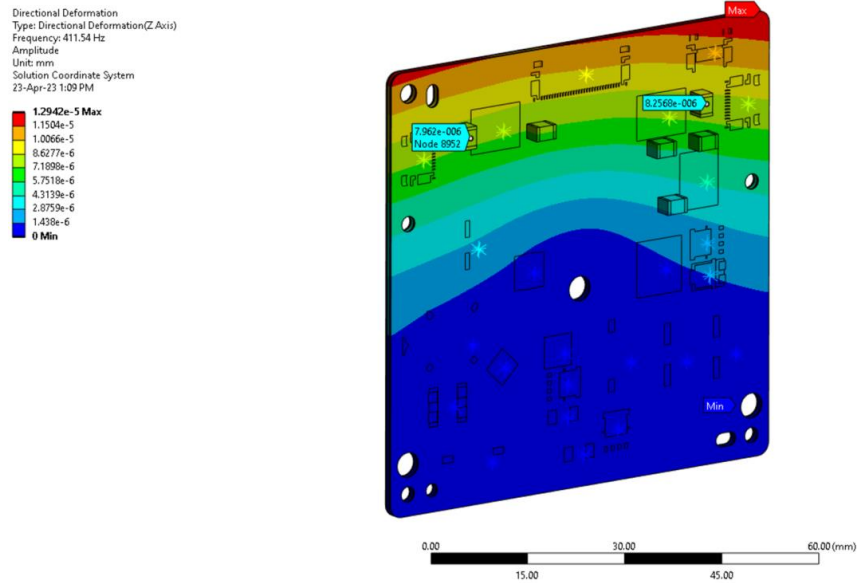


Fig.4.21. Răspunsul armonic la frecvența 411Hz (fundamentală), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate

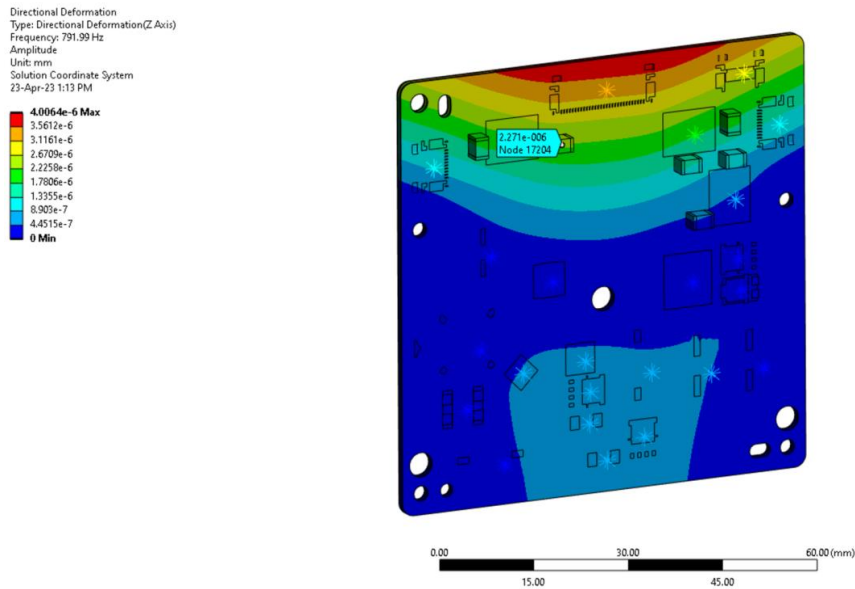


Fig.4.22. Răspunsul armonic la frecvența 792Hz (fundamentală), în cazul fixării în patru puncte, cu condensatoare pre-încărcate

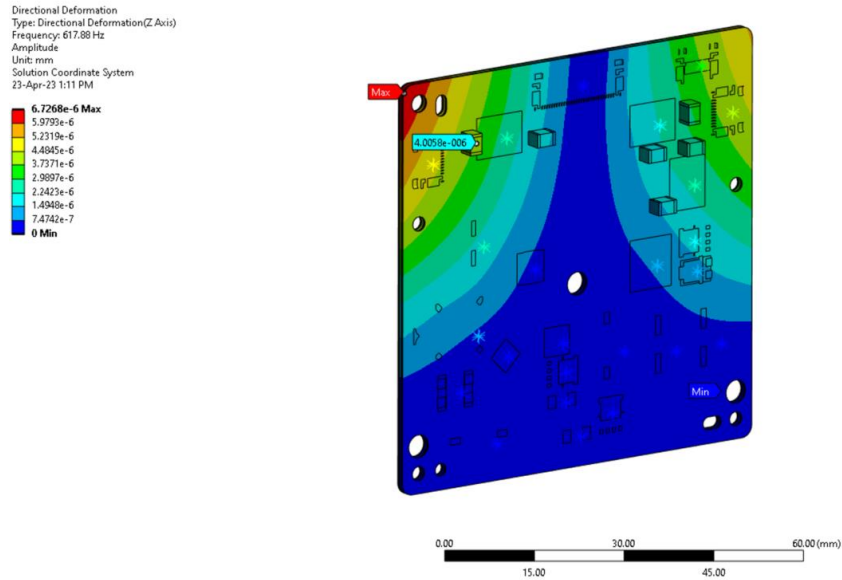


Fig.4.23. Răspunsul armonic la frecvența 618Hz (a doua armonică), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate

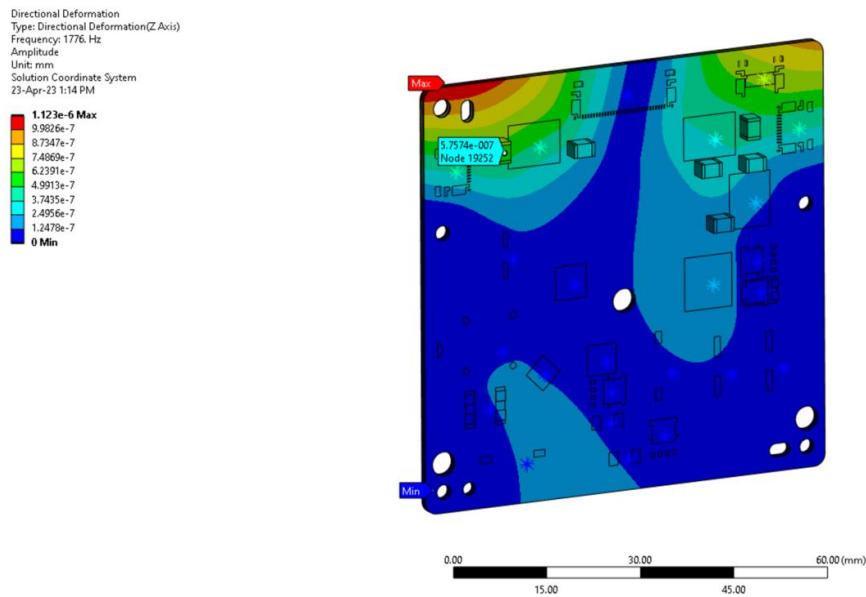


Fig.4.24. Răspunsul armonic la frecvența 1776Hz (a doua armonică), în cazul fixării în patru puncte, cu condensatoare pre-încărcate

Se poate observa o asemănare între comportamentul *design*-ului inițial și cel îmbunătățit: în cazul fixării în trei puncte, avem fundamentală la frecvența 411Hz, iar a doua armonică la 617Hz, ambele influențate cel mai mult de condensatorul C16, iar în cazul fixării în patru puncte, avem fundamentală la 792Hz, influențată în

principal de condensatorul C15, și a doua armonică la 1.77kHz, influențată cel mai mult de condensatorul C16.

Deși frecvențele de rezonanță sunt apropiate de cele prezente în primul caz, nu putem spune același lucru referitor la valorile amplitudinilor. Pentru fixarea în trei puncte, avem un vârf de 7.96nm (față de 20.26nm în prima simulare), urmat de o amplitudine de 3.99nm (față de 8.44nm în prima simulare). În cazul fixării în patru puncte, amplitudinea maximă este de 2.25nm (față de 5.21nm), iar pentru a doua armonică valoarea amplitudinii este de 0.58nm (față de 1.49nm). Putem concluziona că diminuarea zgomotului acustic prin pre-încărcarea condensatoarelor, se poate verifica și prin intermediul analizei armonice.

4.6. Analiza armonică a sistemului după optimizarea de layout

În Capitolul 2, am prezentat soluția de atenuare a fenomenului „*singing capacitors*” prin optimizarea plasării componentelor (*layout*). Așa cum am prezentat în Tabelul 2.1, atunci când sunt folosite condensatoare cu geometrie clasică, configurațiile de tip paralel (prezentată în Fig.2.12.) și oglindă (prezentată în Fig.2.13.) sunt considerate eficiente în literatură.

Pentru optimizarea de *layout* a produsului de serie, s-a ales soluția configurației tip oglindă sau *back-to-back*, unde condensatoarele sunt plasate în paralel, pe părți diferite ale PCB. *Design*-ul de la care s-a pornit a fost cel de pre-încărcare a condensatoarelor. Pentru a implementa această optimizare, condensatoarele problematice de 2.2μF au fost înlocuite de câte o pereche de condensatoare de 1μF, iar dimensiunea lor a fost micșorată de la capsula 1208 la capsula 0805, așa cum este prezentat în Fig.4.25, cu mențiunea că Cx.1 și Cx.2 sunt plasați în configurație oglindă.

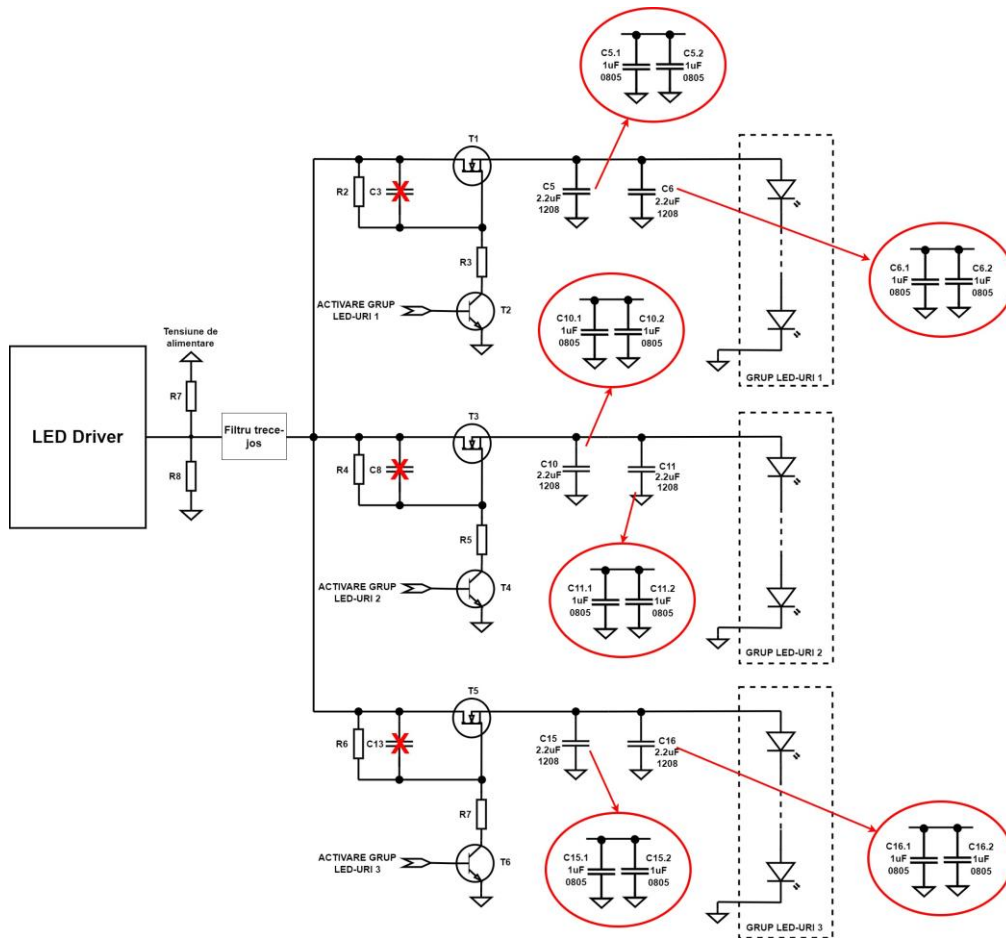
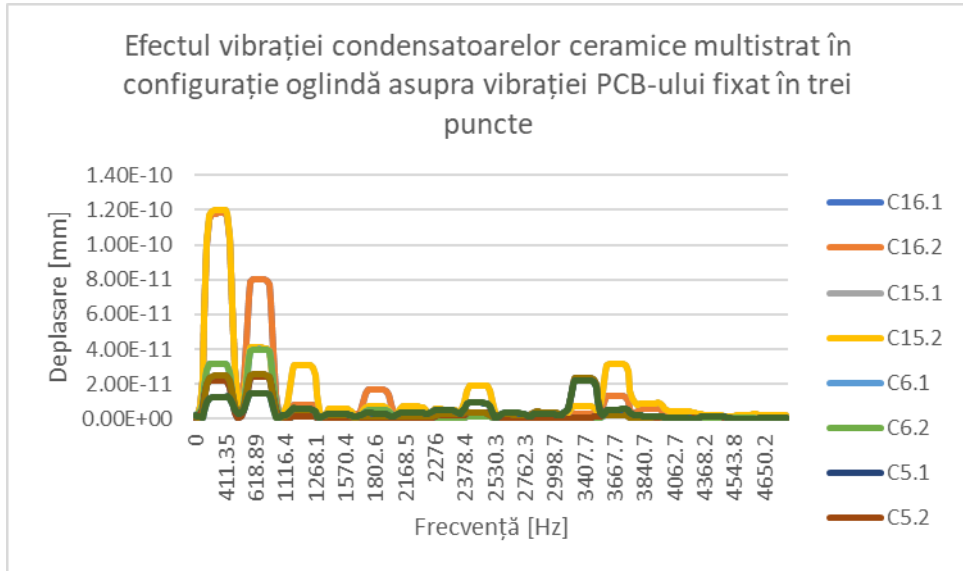
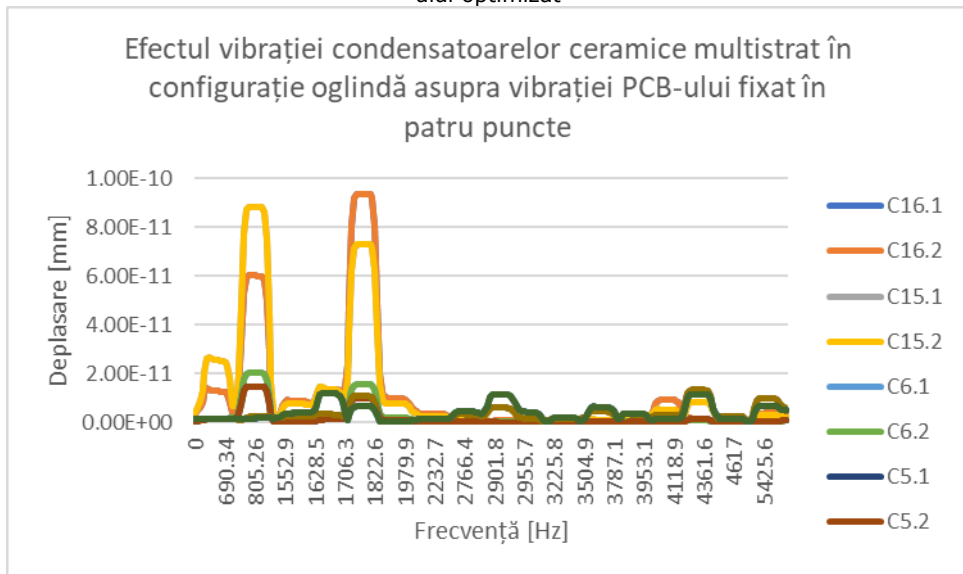


Fig.4.25. Schema electronică realizată pentru optimizarea *layout*-ului

Pentru această analiză armonică, asemenea analizei anterioare, forța aplicată pe condensatoare a fost 1 Pa. În Fig.4.26. și Fig.4.27. sunt prezentate rezultatele analizei armonice pentru cazul *layout*-ului optimizat.

Fig.4.26. Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte, pentru cazul *layout*-ului optimizatFig.4.27. Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte, pentru cazul *layout*-ului optimizat

Deși pentru acest caz observăm mai multe armonici, comparat cu analizele anterioare, amplitudinile sunt cu câteva ordine de mărime mai mici decât în cazul analizei fără *layout* optimizat. În cazul fixării în trei puncte, observăm o amplitudine maximă de 117fm, următoarea fiind de 80fm, iar în cazul fixării în patru puncte avem amplitudinile maxime de 92fm, respectiv 86fm.

De asemenea, la fel ca în cazurile anterioare, condensatoarele din partea stângă a PCB-ului au cea mai mare influență asupra vibrației PCB-ului, însă în acest

scenariu, condensatoarele aflate pe stratul *bottom* al PCB-ului sunt cele care oferă amplitudinile maxime.

În Fig.4.28 – Fig.4.31. sunt reprezentate formele modale corespunzătoare sistemului îmbunătățit prin optimizarea *layout*-ului.

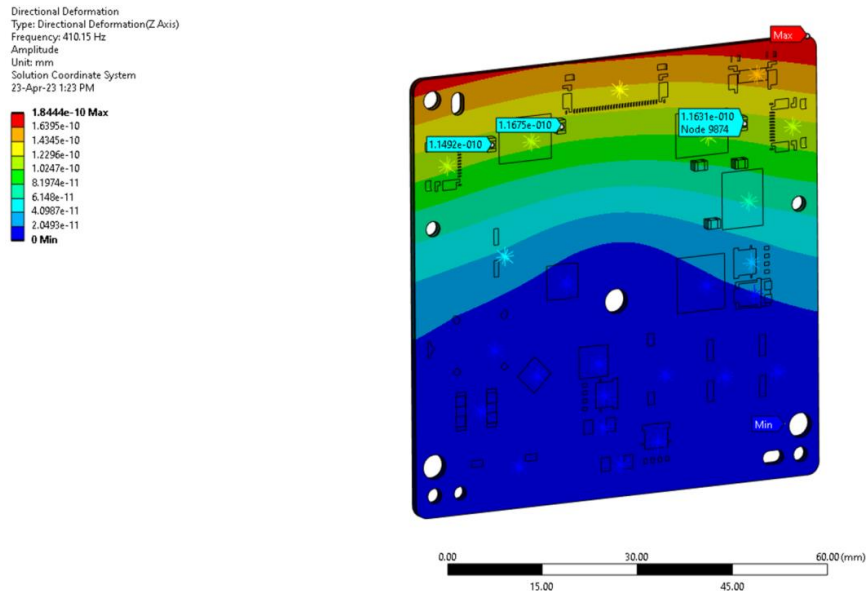


Fig.4.28. Răspunsul armonic la frecvența 411Hz (fundamentală), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate, *layout* optimizat

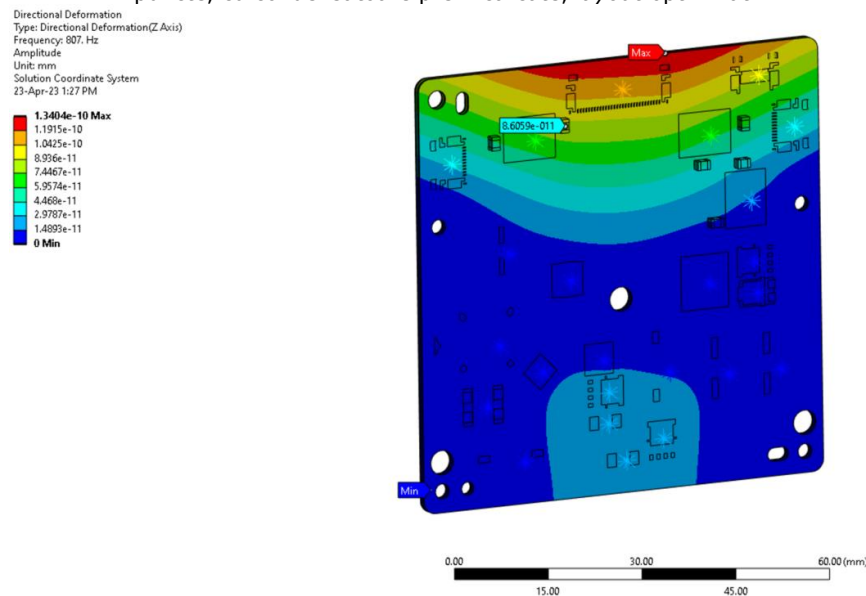


Fig.4.29. Răspunsul armonic la frecvența 805Hz (fundamentală), în cazul fixării în patru puncte, cu condensatoare pre-încărcate, *layout* optimizat

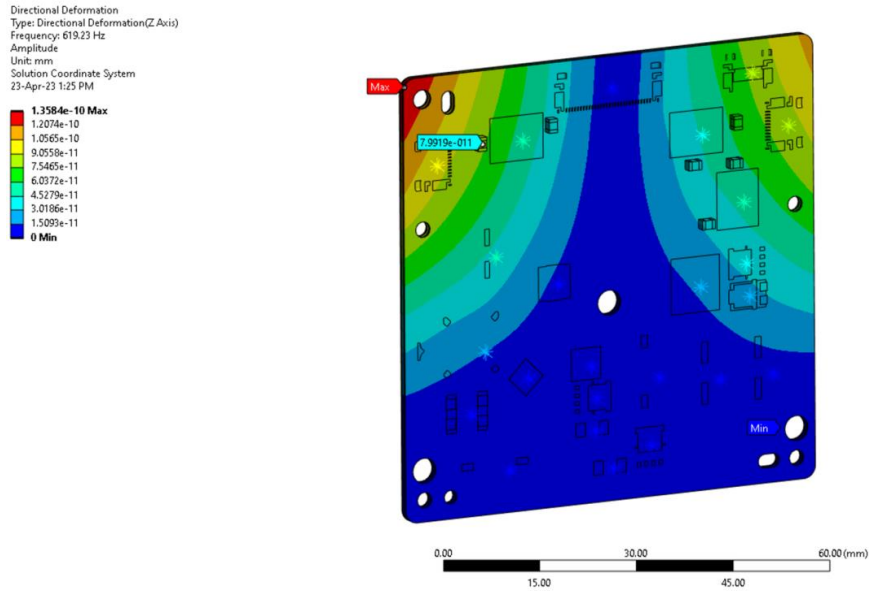


Fig.4.30. Răspunsul armonic la frecvența 619Hz (a doua armonică), în cazul fixării în trei puncte, cu condensatoare pre-încărcate, *layout* optimizat

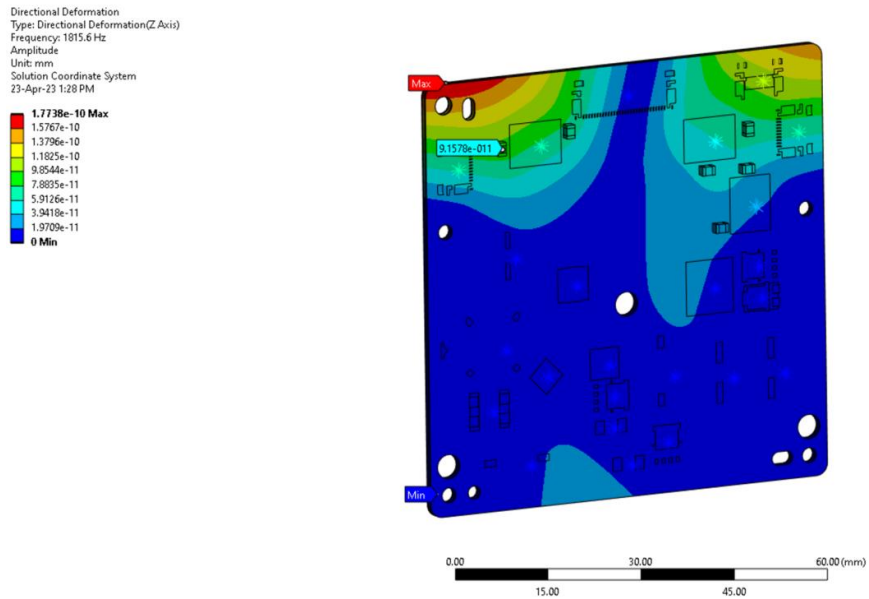


Fig.4.31. Răspunsul armonic la frecvența 1882Hz (a doua armonică), în cazul fixării în patru puncte, cu condensatoare pre-încărcate, *layout* optimizat

4.7. Concluzii și contribuții originale

Întrucât rezultatele analizei modale nu explică diferența de zgomot acustic dintre fixarea în trei și patru puncte, a fost necesar să efectuăm o analiză armonică pentru a investiga efectul vibrației condensatoarelor ceramice multistrat asupra PCB-ului.

Au fost realizate trei analize armonice pentru cazul *design*-ului original, pentru cazul condensatoarelor pre-încărcate, respectiv pentru cazul optimizării de *layout*, pentru fiecare analiză investigându-se cele două tipuri de fixări. În cazul fiecărui scenariu de simulare, fixarea în patru puncte s-a dovedit a fi mai avantajoasă.

În Tabelul 4.2. sunt prezentate cele două valori maxime pentru fiecare scenariu investigat prin intermediul analizei armonice.

Scenariu	Fixare	Amplitudinea fundamentalei	Amplitudinea celei de-a doua armonici
<i>Design original</i>	În trei puncte	20.26 nm	8.44 nm
	În patru puncte	5.21 nm	1.49 nm
<i>Design cu condensatoare pre-încărcate</i>	În trei puncte	7.96 nm	3.99 nm
	În patru puncte	2.25 nm	0.58 nm
<i>Design cu optimizare de layout</i>	În trei puncte	117 fm	80 fm
	În patru puncte	92 fm	86 fm

Tabel 4.2. Rezultatele analizelor armonice

După cum se poate observa, rezultatele simulării sugerează o îmbunătățire a zgomotului acustic, cu fiecare modificare efectuată. În capitolul următor, urmează să validăm aceste rezultate prin intermediul unor măsurări experimentale.

Contribuțiile originale realizate în acest capitol sunt:

- Propunerea unei metode de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin eliminarea spike-urilor de tensiune în Fig.4.17;
- Propunerea unei metode de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin pre-încărcarea acestora în Fig.4.18;
- Propunerea optimizării de *layout* prin plasarea componentelor în configurație tip oglindă în Fig.4.25;
- Analiza și sinteza rezultatelor obținute prin simulare.

5. VALIDAREA REZULTATELOR SIMULĂRII PRIN MĂSURĂRI EXPERIMENTALE

În capitolul anterior, am propus și simulat două metode de atenuare a zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat. Prima metodă s-a concentrat pe atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, în timp ce a doua metodă s-a concentrat pe optimizarea plasării condensatoarelor pe PCB.

În acest capitol, vom încerca să validăm experimental rezultatele simulării, măsurând din punct de vedere acustic cele două metode de atenuare a fenomenului „*singing capacitors*”. Toate măsurările prezentate în acest capitol sunt realizate în cazul cel mai nefavorabil din punct de vedere al fixării PCB-ului: fixarea în trei puncte.

5.1. Validarea îmbunătățirii zgomotului acustic prin atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare

Propunerea de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare a fost împărțită în două modificări de *design*: eliminarea *spike*-ului de tensiune prezent la ieșirea *LED Driver*-ului și pre-încărcarea condensatoarelor prin plasarea unui etaj pasiv de divizare a nivelului de tensiune înaintea condensatoarelor. Voi începe cu rezultatele obținute în urma eliminării *spike*-urilor de tensiune.

Pentru a evalua efectul modificării, am măsurat atât vibrația, cât și sunetul (asemănător măsurărilor prezentate în capitolul 3), pentru ambele moduri de comandă ale LED-urilor. Rezultatele sunt prezentate în Fig.5.1. – Fig.5.6.

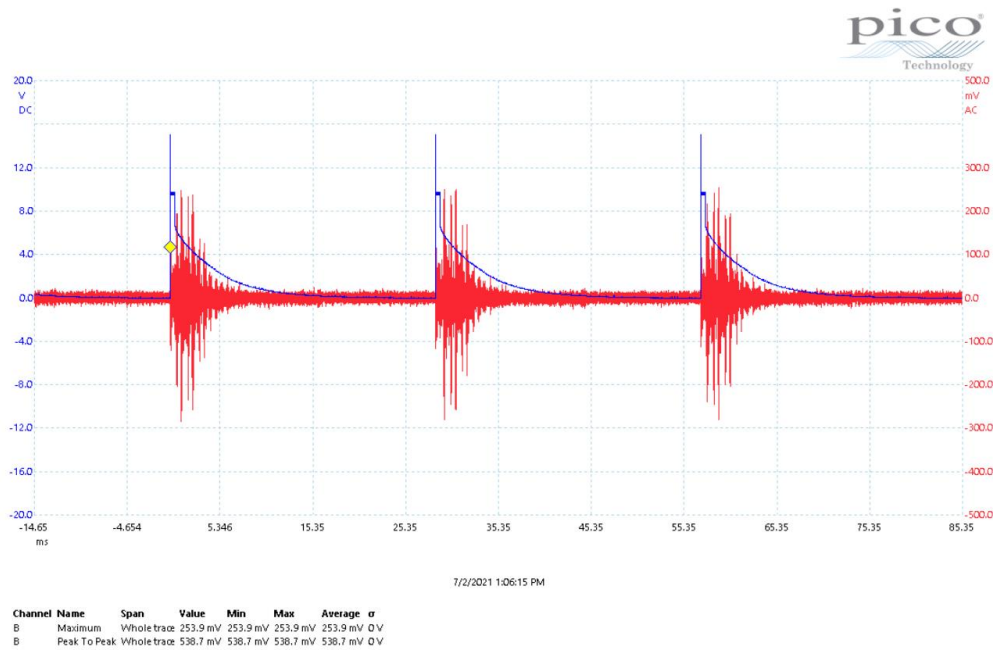


Fig.5.1. Vibrația PCB-ului modificat pentru eliminarea *spike*-urilor în modul de comandă 1 al LED-urilor

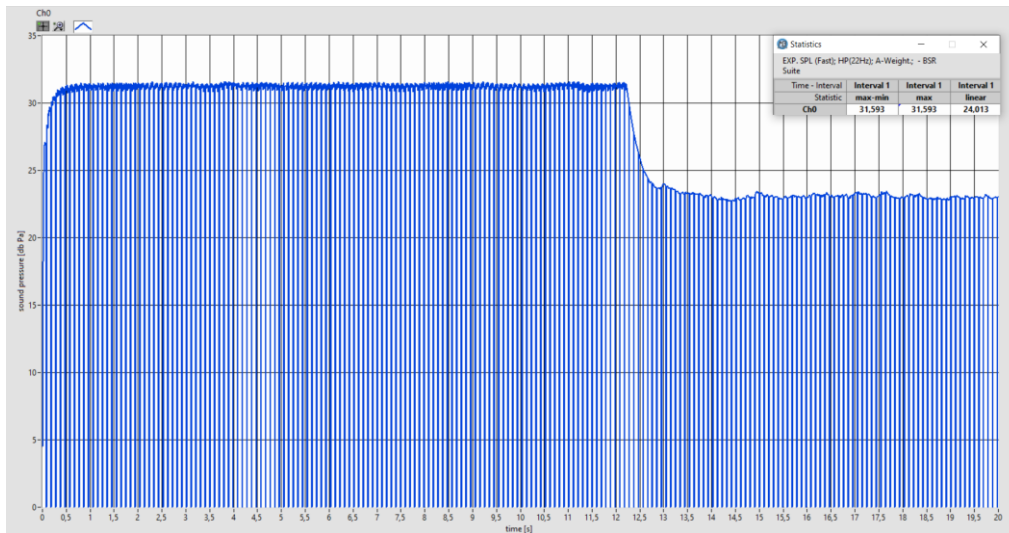


Fig.5.2. SPL-ul PCB-ului modificat pentru eliminarea *spike*-urilor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

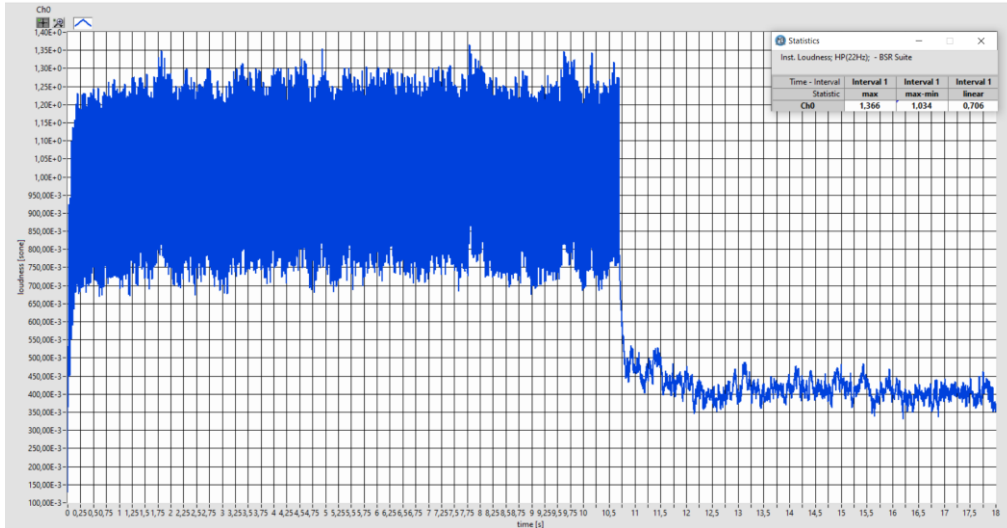


Fig.5.3. Loudness-ul PCB-ului modificat pentru eliminarea spike-urilor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

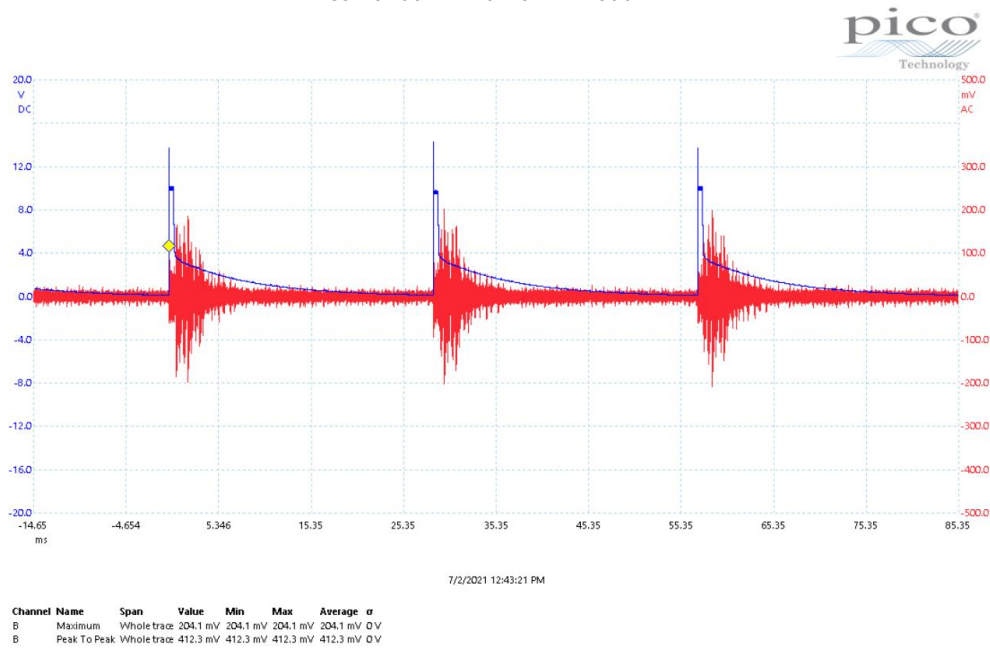


Fig.5.4. Vibrația PCB-ului modificat pentru eliminarea spike-urilor în modul de comandă 2 al LED-urilor

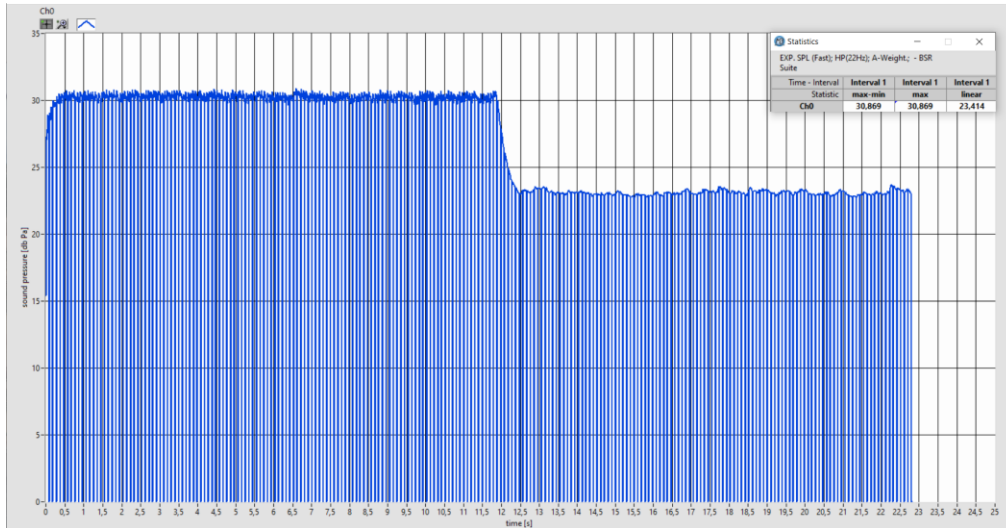


Fig.5.5. SPL-ul PCB-ului modificat pentru eliminarea *spike*-urilor obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

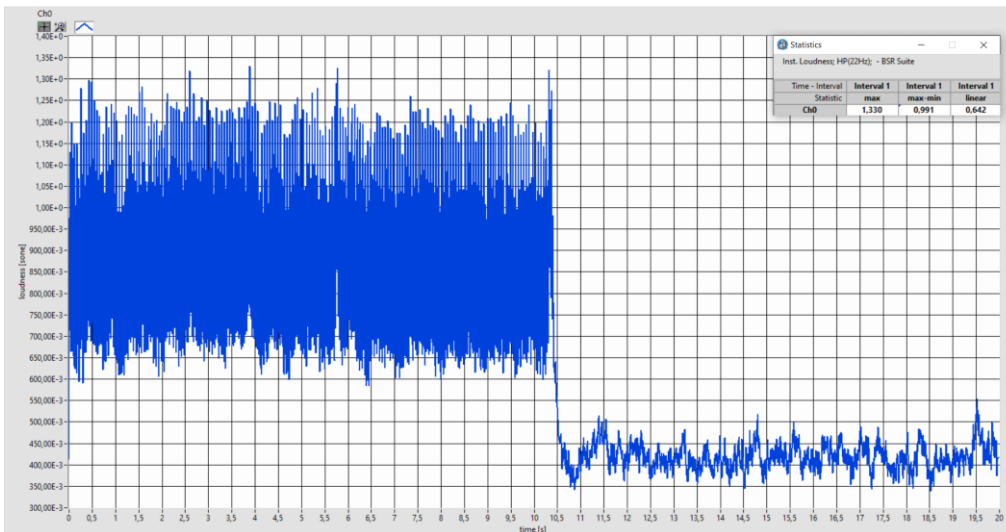


Fig.5.6. *Loudness*-ul PCB-ului modificat pentru eliminarea *spike*-urilor obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

În Fig.5.1. și Fig.5.4. se poate observa cum *spike*-ul de 20V este micșorat până la aproximativ 14V. Având în vedere solicitarea micșorată pe MLCC-uri, ne așteptăm la rezultate acustice îmbunătățite pe această schemă, comparativ cu schema inițială.

În Fig.5.2. și Fig.5.3., am observat o ușoară îmbunătățire a rezultatelor, 31.59dBPa și 1.36 sone, comparativ cu schema inițială unde aveam 31.75dBPa și 1.34 sone. În Fig.5.5. și Fig.5.6., se observă opusul: 30.86dBPa, comparativ cu

29.05dBPa în design-ul original, și 1.33 sone, în comparație cu 1.06 sone în schema inițială.

Având în vedere faptul că modificarea (depopularea condensatoarelor) a fost realizată pe aceleași PCB-uri pentru măsurările în modul de comandă 1, respectiv modul de comandă 2, diferența de rezultate ar putea fi cauzată de solicitarea termică aplicată pentru depopularea condensatoarelor de întârziere (C3, C8 și C13).

Chiar dacă a fost obținută o ușoară îmbunătățire a zgomotului acustic generat de MLCC-uri în cazul modului 1 de comandă a LED-urilor, rezultatele nu sunt încă satisfăcătoare pentru un sistem amplasat în apropierea șoferului, întrucât specificația de 27dBPa nu este îndeplinită. Prin urmare, sunt necesare îmbunătățiri suplimentare.

Rezultatele acustice obținute în urma pre-încărcării condensatoarelor se regăsesc în Fig.5.7 – Fig.5.12.

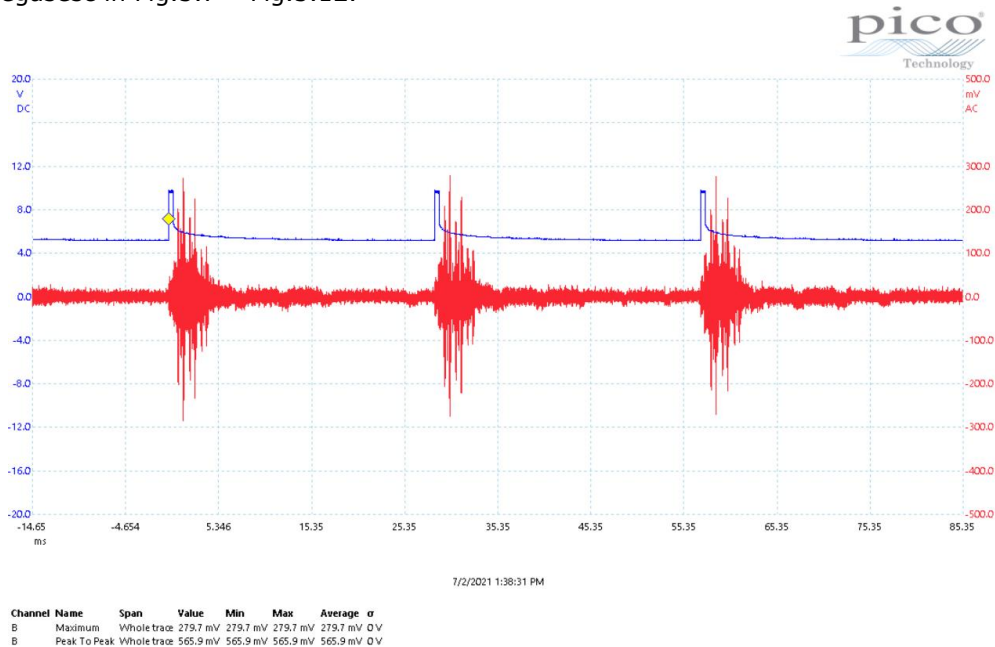


Fig.5.7. Vibrația PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor în modul de comandă 1 al LED-urilor

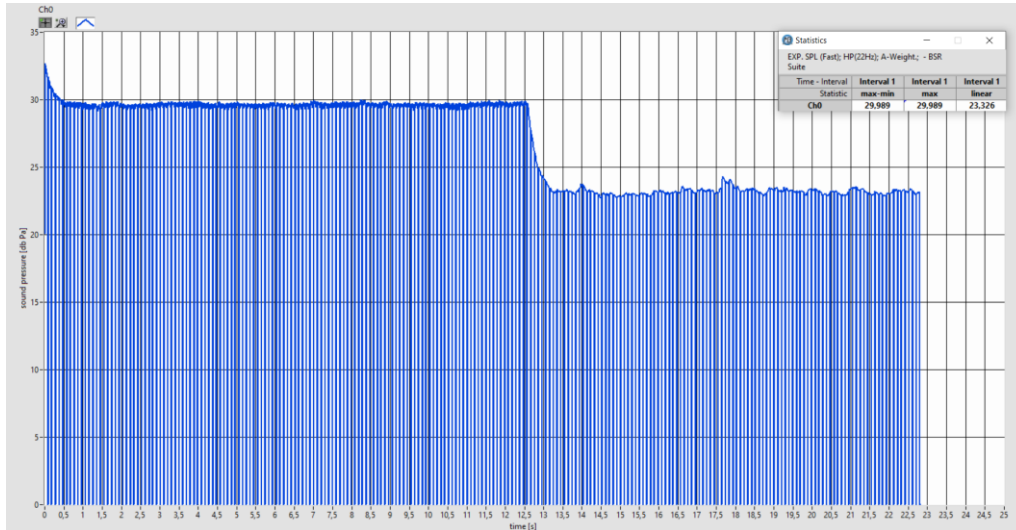


Fig.5.8. SPL-ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

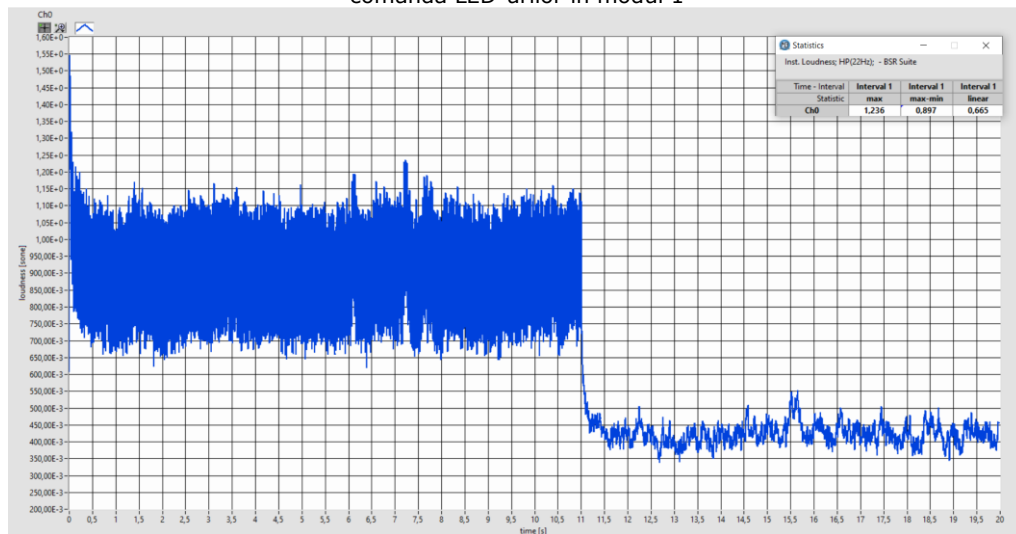


Fig.5.9. Loudness-ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

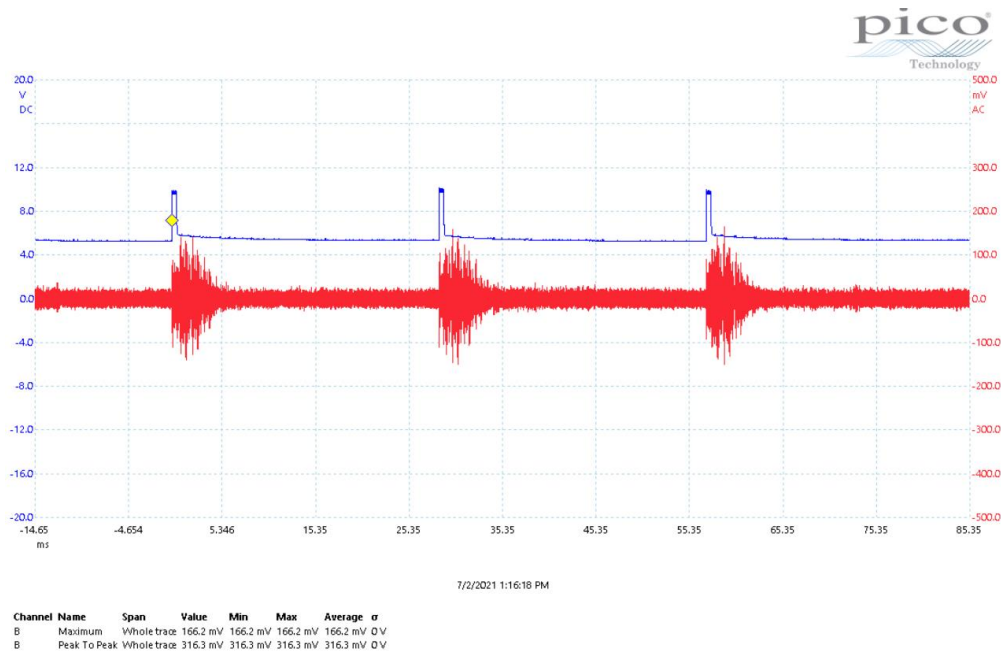


Fig.5.10. Vibrația PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor în modul de comandă 2 al LED-urilor

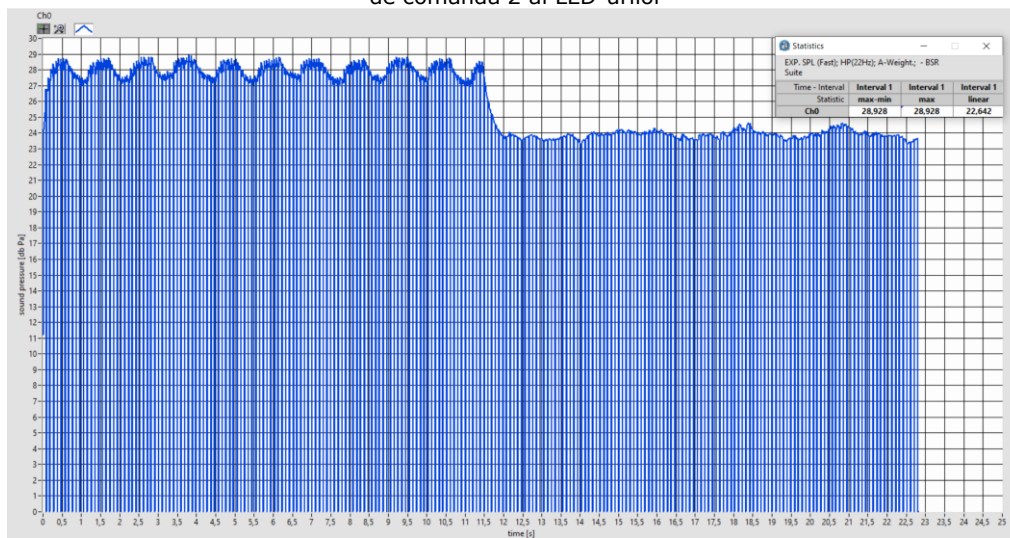


Fig.5.11. SPL-ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

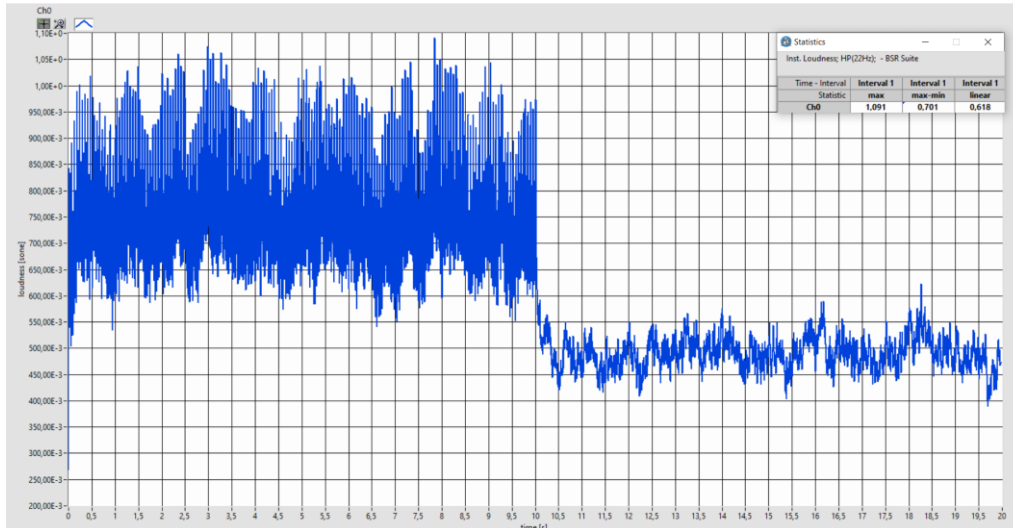


Fig.5.12. Loudness-ul PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

Deoarece această modificare necesită o schimbare de dispunere a componentelor, PCB-urile testate nu au fost aceleași ca în experimentele anterioare. Cu toate acestea, în Tabelul 5.1. și Tabelul 5.2., putem vedea o îmbunătățire a zgomotului acustic atunci când pre-încărcăm condensatoarele.

SPL	Mod de comandă 1	Mod de comandă 2
Design original	31.75 dBPa	29.05 dBPa
Design pentru eliminarea spike-urilor de tensiune	31.59 dBPa	30.86 dBPa
Design pentru pre-încărcarea condensatoarelor	29.98 dBPa	28.92 dBPa

Tabel 5.1. SPL-ul măsurat pentru cele trei experimente de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare

Loudness	Mod de comandă 1	Mod de comandă 2
Design original	1.34 sone	1.06 sone
Design pentru eliminarea spike-urilor de tensiune	1.36 sone	1.33 sone
Design pentru pre-încărcarea condensatoarelor	1.23 sone	1.09 sone

Tabel 5.2. Loudness-ul măsurat pentru cele trei experimente de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare

După realizarea design-ului pentru eliminarea spike-urilor de tensiune și cel pentru pre-încărcarea condensatoarelor, zgomotul acustic a mii de dispozitive a fost măsurat în laboratorul de măsurări acustice. Rezultatele sunt prezentate în Fig.5.13. – Fig.5.16., unde pe axa orizontală sunt reprezentate nivelurile de SPL obținute, iar pe axa verticală numărul dispozitivelor măsurate cu acel nivel de SPL, exprimat procentual. Toate rezultatele au fost interpolate cu ecuația curbei Gauss, reprezentată în ecuația (5.1) [69]:

$$f(x) = A e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

unde $f(x)$ reprezintă valoarea funcției în punctul x de pe curba lui Gauss, A este o constantă de scalare care controlează înălțimea curbei, μ este valoarea medie sau centrul curbei Gauss, iar σ este deviația standard care controlează lățimea curbei.

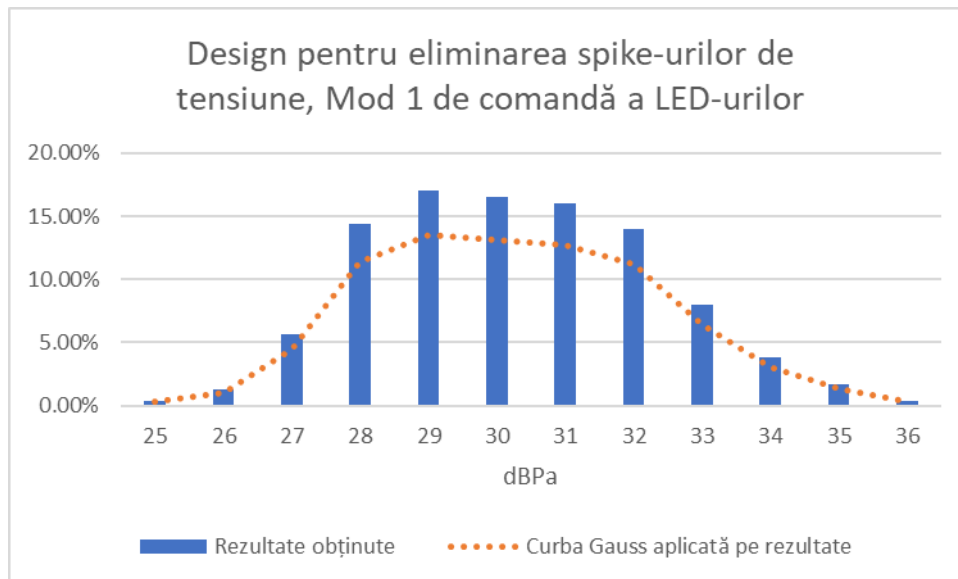


Fig.5.13. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

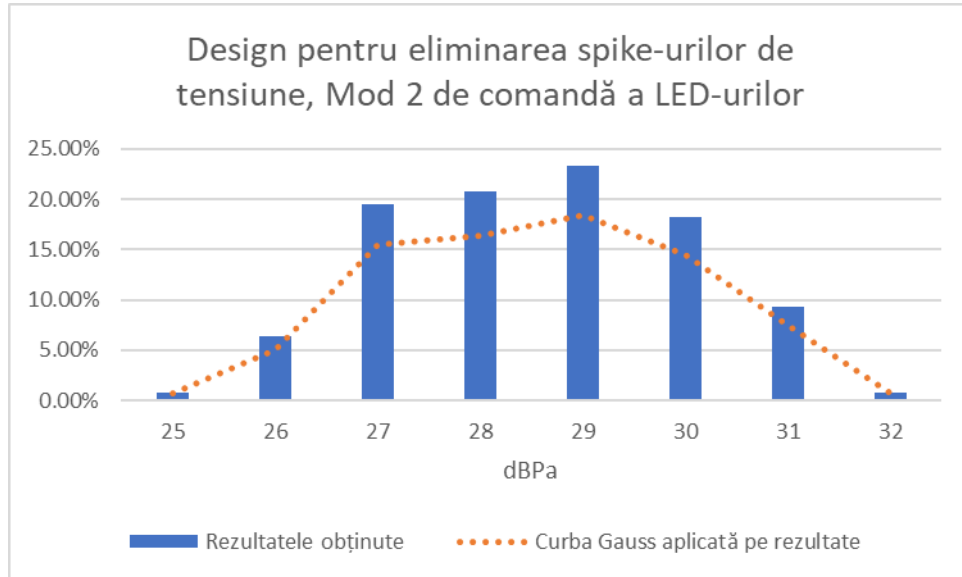


Fig.5.14. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor

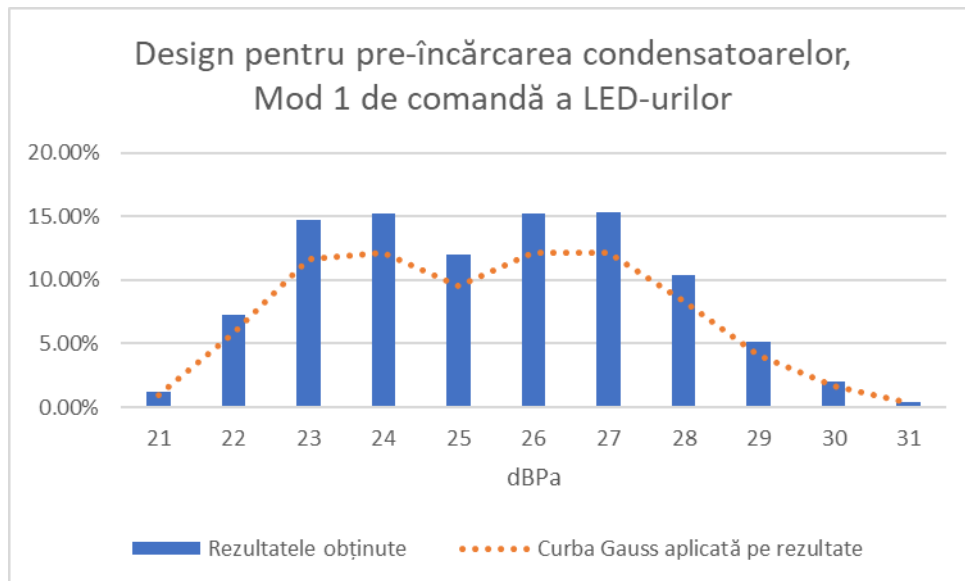


Fig.5.15. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

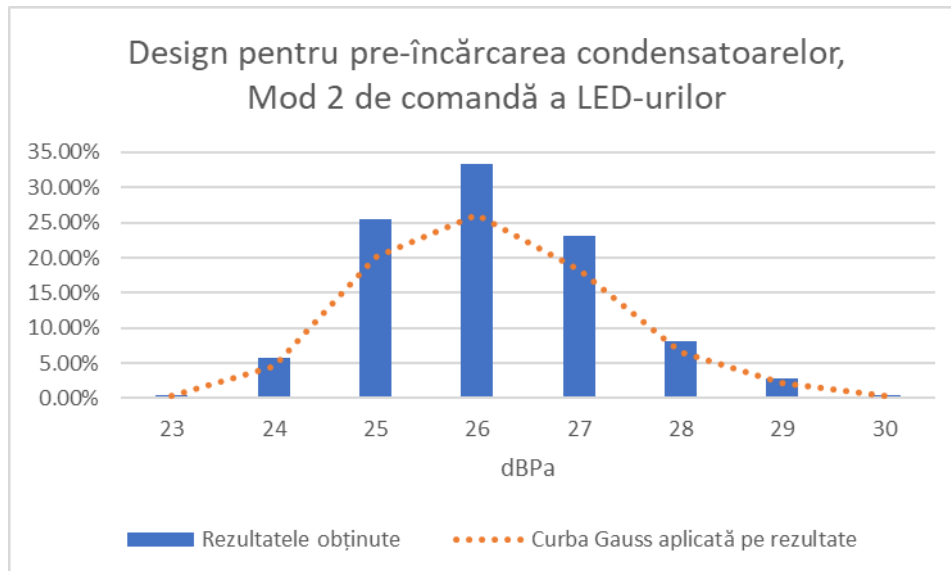


Fig.5.16. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor

Se poate observa variația mare a nivelului presiunii sunetului de la un dispozitiv la altul. Această variație este datorată orientării condensatorului pe PCB. Așa cum este explicat în Capitolul 2 – State of the art, un MLCC plasat în orientare verticală generează mai puțin zgomot acustic decât un condensator plasat în orientare orizontală. Tot orientarea condensatorului pe PCB este explicația pentru suprapunerea de două curbe Gauss în Fig.5.15, unde se poate observa că vârful clopotului lui Gauss pentru condensatoarele plasate vertical este la 23dBPa, pe când vârful pentru condensatoarele plasate orizontal este la 26dBPa.

Acest fenomen este studiat în capitolul următor, unde sunt prezentate alternative suplimentare investigate pentru reducerea fenomenului „*singing capacitors*”.

5.2. Validarea îmbunătățirii zgomotului acustic prin optimizarea de *layout*

În capitolul 3, am propus o soluție de atenuare a fenomenului „*singing capacitors*” prin plasarea condensatoarelor în configurație tip oglindă.

Pentru a valida experimental această posibilă soluție, am înlocuit fiecare condensator de 2.2 μ F, cu amprentă 1206, cu câte două condensatoare cu valoare de 1 μ F și amprentă 0805, plasate paralel, pe părți diferite ale PCB-ului. *Design*-ul de la care s-a pornit a fost cel de pre-încărcare a condensatoarelor.

Pentru experiment, am folosit trei furnizori de componente diferiți. Rezultatele sunt prezentate în Fig.5.17 și Fig.5.18.

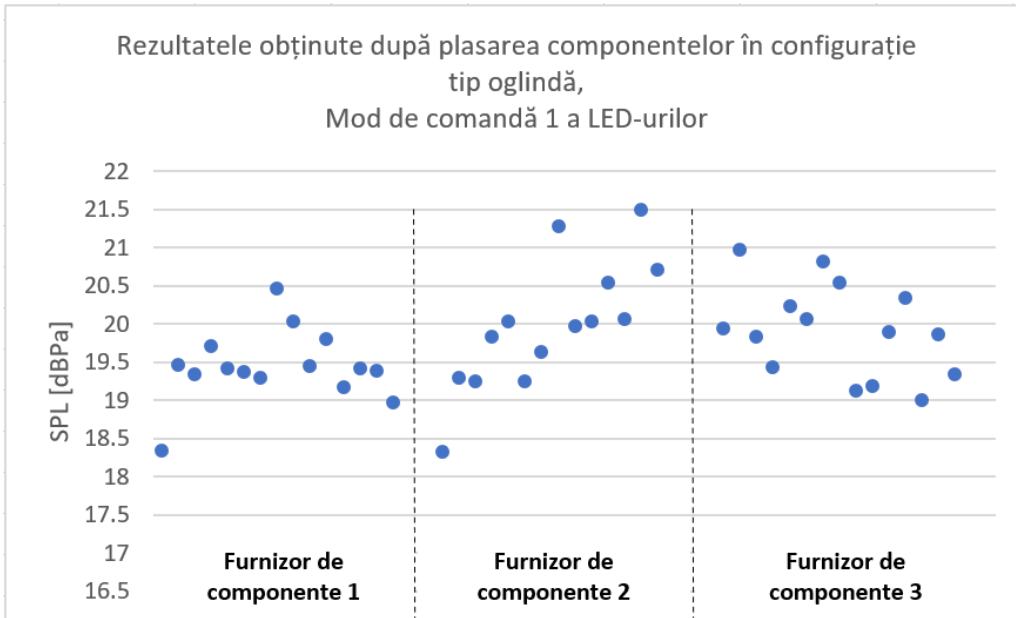


Fig.5.17. Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componentele plasate în configurație tip oglindă, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

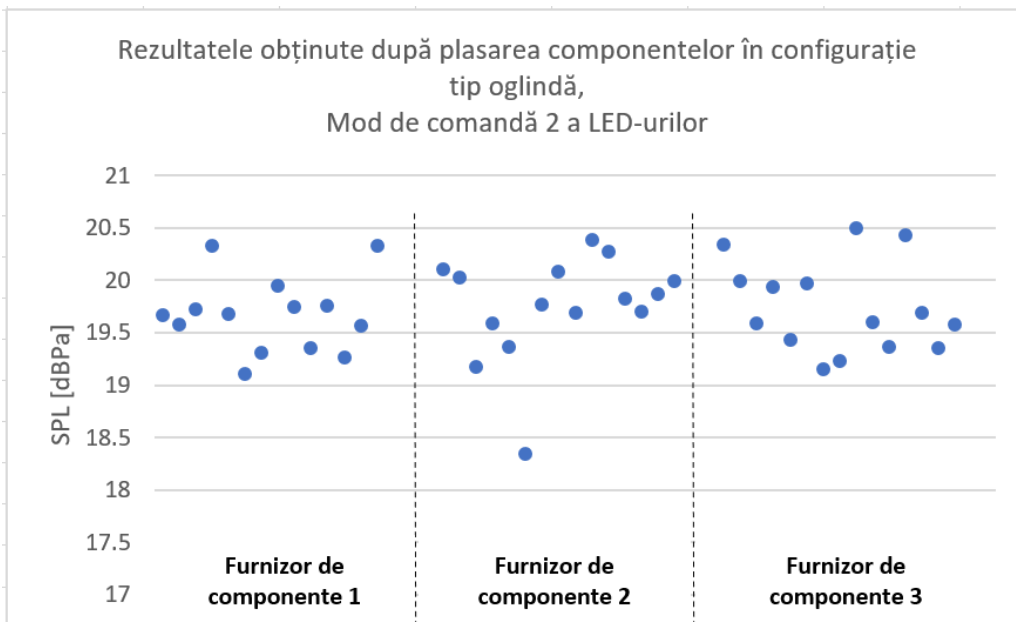


Fig.5.18. Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componentele plasate în configurație tip oglindă, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor

În concordanță cu simularea armonică, rezultatele obținute în urma plasării condensatoarelor în configurație tip oglindă sunt mult mai bune comparativ cu rezultatele obținute în urma atenuării solicitării aplicate pe condensatoare. Pentru

modul de comandă 1 al LED-urilor, s-au înregistrat valori cuprinse între 18.33dBPa și 21.50dBPa, iar pentru modul de comandă 2 al LED-urilor, s-au înregistrat valori cuprinse între 18.34dBPa și 20.50dBPa. Astfel, prin plasarea componentelor în configurație tip oglindă, cerința clientului de a avea un SPL de maxim 27dBPa este îndeplinită.

5.3. Concluzii și contribuții originale

În acest capitol am validat rezultatele simulărilor prezentate în capitolul anterior, prin măsurări experimentale. Așa cum se poate observa, rezultatele măsurărilor prezintă îmbunătățiri de la *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor de tensiune la *design*-ul cu pre-încărcare a condensatoarelor, iar apoi de la *design*-ul pentru atenuarea solicitării aplicate pe condensatoare la *design*-ul cu *layout* optimizat.

Deși nu se observă o îmbunătățire din punct de vedere acustic de la *design*-ul original la cel pentru eliminarea *spike*-urilor de tensiune, există totuși un avantaj electric pentru această măsură, și anume reducerea *spike*-ului de tensiune prezent la ieșirea *LED Driver*-ului de la 20V la 14V.

În Tabelul 5.3, am sumarizat rezultatele obținute în cele mai nefavorabile cazuri, atât prin simulare cât și pentru măsurări experimentale. În tabel am considerat doar rezultatele obținute pentru sistemele fixate în trei puncte, cu LED-urile comandate în modul de comandă 1. Întrucât condensatoarele C3, C8 și C13 nu sunt luate în considerare în analiza armonică, vom considera simularea *design*-ului original corespunzătoare măsurărilor experimentale efectuate cu *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor de tensiune.

Scenariu	Deplasarea maximă obținută în simulare	Valoarea maximă a SPL-ului măsurată experimental
<i>Design</i> pentru eliminarea <i>spike</i> -urilor de tensiune	20.26nm	36.83dBPa
<i>Design</i> cu condensatoare pre-încărcate	7.96nm	31.99dBPa
<i>Design</i> cu optimizare de <i>layout</i> folosind configurație tip oglindă	117fm	21.50dBPa

Tabel 5.3. Sumarizare a rezultatelor obținute prin simulare, respectiv măsurări experimentale

Contribuțiile originale realizate în acest capitol sunt:

- Validarea experimentală a propunerii metodei de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin eliminarea *spike*-urilor de tensiune (Fig.5.1 – Fig.5.6, respectiv Fig.5.13 – Fig.5.14);
- Validarea experimentală a propunerii metodei de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin pre-încărcarea acestora (Fig.5.7 – Fig.5.12, respectiv Fig.5.15 – Fig.5.16);

- Sumarizarea rezultatelor comparative obținute în urma măsurării *design*-ului original, respectiv a celor două metode de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, în Tabelul 5.1 și Tabelul 5.2;
- Validarea experimentală a propunerii optimizării de *layout* prin plasarea componentelor în configurație tip oglindă (Fig.5.17 – Fig.5.18);
- Validarea simulării armonice prin măsurări experimentale, sumarizată în Tabelul 5.3.

6. ALTERNATIVE SUPLIMENTARE INVESTIGATE PENTRU REDUCEREA FENOMENULUI „SINGING CAPACITORS”

În capitolele anterioare, am propus și validat două metode de atenuare a fenomenului „*singing capacitors*”: atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare și optimizarea de *layout* prin plasarea componentelor în configurație tip oglindă. În continuare, voi propune alternative suplimentare investigate pentru reducerea zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat. Acestea se vor împărți în:

- Soluții concentrate pe modificări de proces de fabricație
- Soluții concentrate pe modificări de componente
- Soluții de acoperire a sunetului
- Optimizare de *layout* prin plasarea componentelor în configurație paralelă

6.1. Soluții concentrate pe modificări ale procesului de fabricație

În acest capitol, am investigat cinci soluții posibile de atenuare a zgomotului acustic generat de vibrația MLCC-urilor, toate având la bază modificări aduse la procesul de fabricație.

Prima metodă investigată este plasarea condensatoarelor în orientare verticală pe PCB. Așa cum este menționat în Capitolul 2, în literatură se consideră condensatoarele plasate în orientare verticală mai puțin gălăgioase decât cele plasate în orientare orizontală. Considerăm condensatorul plasat în orientare verticală atunci când electrozii interni sunt în poziție perpendiculară pe PCB, și considerăm MLCC-ul plasat în orientare orizontală atunci când electrozii interni sunt paraleli cu PCB-ul.

Pentru a ușura analiza rezultatelor, investigația s-a făcut doar pe *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor, controlat în modul 1 de comandă al LED-urilor. Astfel, doar condensatoarele C5 și C6, cu valoare de 2.2μF, generează zgomotul acustic.

Pentru această investigație, am selectat douăzeci de dispozitive cu valori diferite de SPL și am efectuat secțiune longitudinală transversală pe condensatoarele C5 și C6, pentru a determina orientarea în care acestea au fost plasate pe PCB. În Fig.6.1., este reprezentat un condensator plasat în poziție verticală și unul plasat în poziție orizontală.

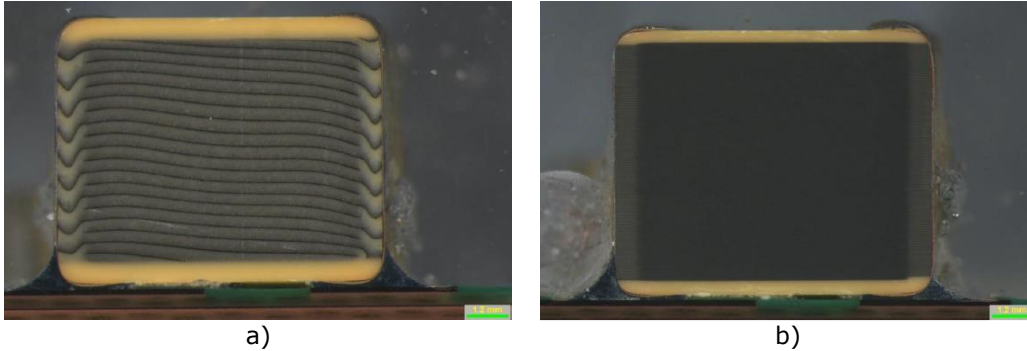


Fig.6.1. Imagine de secțiune longitudinală transversală al condensatorului: a) plasat în orientare verticală; b) plasat în orientare orizontală

În Tabelul 6.1. sunt reprezentate orientările condensatoarelor C5 și C6, împreună cu nivelul corespunzător al presiunii sunetului.

SPL [dBPa]	Orientare C6	Orientare C5
23.51	Verticală	Verticală
23.54	Verticală	Orizontală
23.86	Verticală	Orizontală
23.99	Verticală	Orizontală
24.03	Verticală	Orizontală
25.52	Verticală	Verticală
26.31	Verticală	Verticală
26.34	Orizontală	Orizontală
26.97	Orizontală	Orizontală
27.05	Orizontală	Orizontală
27.23	Orizontală	Verticală
27.63	Orizontală	Orizontală
28.42	Orizontală	Orizontală
28.42	Orizontală	Verticală
28.77	Orizontală	Verticală
29.37	Orizontală	Verticală
29.41	Orizontală	Orizontală
29.74	Orizontală	Verticală
31.08	Orizontală	Orizontală
31.64	Orizontală	Verticală

Tabel 6.1. Rezultatele obținute în urma secționării longitudinale transversale a condensatoarelor pentru douăzeci de dispozitive

Se poate observa faptul că nivelul de zgomot acustic generat de PCB este dependent de orientarea condensatorului C6, în timp ce orientarea condensatorului C5 nu pare să influențeze nivelul presiunii sunetului. Acest lucru se datorează poziției condensatoarelor pe PCB. Condensatorul C6 este plasat spre exteriorul PCB-ului, mai departe de punctele de prindere ale acestuia, în timp ce condensatorul C5 este mai apropiat de centrul PCB-ului. Prin urmare, deși ambele condensatoare vibrează la fel, vibrația PCB-ului este preponderent afectată de componenta plasată mai departe de punctele de fixare.

În concluzie, popularea MLCC-urilor în poziție verticală este o soluție eficientă pentru atenuarea fenomenului „*singing capacitors*”, însă aceasta adaugă un pas în plus în procesul de manufacturare: rotirea condensatoarelor sau sortarea acestora în funcție de orientarea în rolă. O altă soluție ar fi pre-sortarea condensatoarelor la producătorul de componente. Bineînțeles, această soluție presupune un preț mai mare al MLCC-urilor.

O altă posibilă soluție menționată în capitolul 2 este reducerea cantității de aliaj de lipire. Pentru a verifica această ipoteză, am redus grosimea *stencil*-ului de la 150 μ m la 120 μ m. Am folosit acest *stencil* pentru a popula componentele atât pentru *design*-ul de eliminare a *spike*-urilor, cât și pentru *design*-ul de pre-încărcare a condensatoarelor. La fel ca în cazul investigației anterioare, pentru a ușura analiza rezultatelor, investigația s-a făcut doar pentru cazurile în care sistemul este controlat în modul 1 de comandă al LED-urilor. Rezultatele se pot observa în Fig.6.2. și Fig.6.3, unde am efectuat și o interpolare a acestora cu curba Gauss.

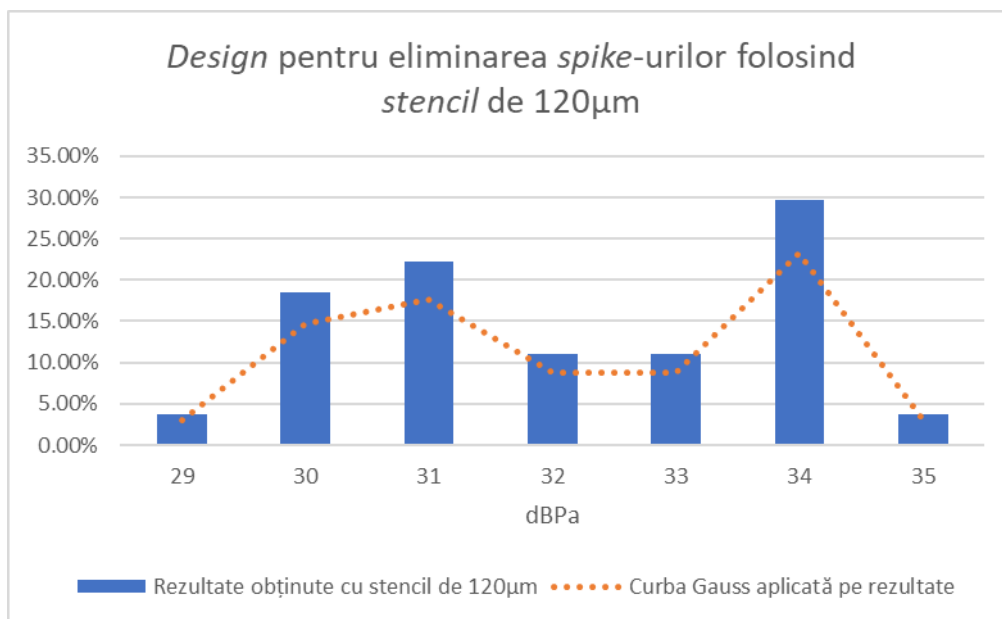


Fig.6.2. Rezultatele măsurării SPL-ului folosind *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor și *stencil* de 120 μ m

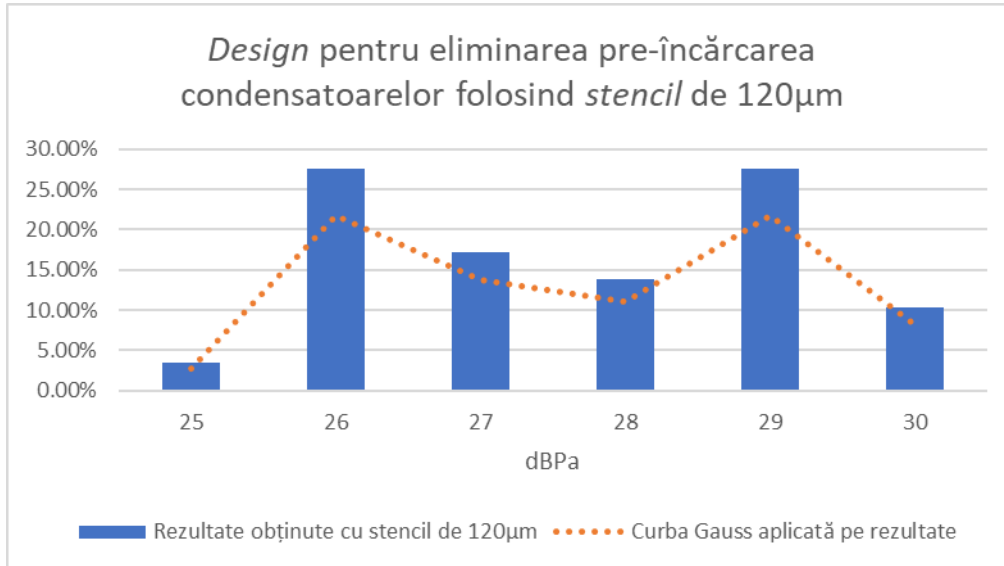


Fig.6.3. Rezultatele măsurării SPL-ului folosind *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor și *stencil* de 120µm

Putem observa că rezultatele obținute prin folosirea unui *stencil* cu grosime de 120µm sunt ușor îmbunătățite în comparație cu rezultatele prezentate în Fig.5.13 și Fig.5.15, unde s-a folosit un *stencil* cu grosime de 150µm.

În cazul *design*-ului de eliminare a *spike*-urilor, SPL-ul măsurat cu *stencil*-ul cu grosime de 120µm a fost cuprins între 29dBPa și 35dBPa, în timp ce SPL-ul măsurat cu *stencil*-ul cu grosime de 150µm a fost cuprins între 25dBPa și 36dBPa.

În cazul *design*-ului pentru pre-încărcarea condensatoarelor, SPL-ul măsurat cu *stencil*-ul cu grosime de 120µm a fost cuprins între 25dBPa și 30dBPa, în timp ce SPL-ul măsurat cu *stencil*-ul cu grosime de 150µm a fost cuprins între 21dBPa și 31dBPa.

Deși valoarea maximă a SPL-ului măsurat a fost ușor mai mică atunci când am folosit *stencil*-ul de 120µm, iar nivelul presiunii sunetului a avut o variație mai mică, trebuie luat în considerare faptul că numărul de sisteme măsurate (s-au produs câte 30 PCB-uri pentru fiecare *design*, folosind *stencil*-ul de 120µm) a fost mult mai mic decât în cazul în care s-a folosit *stencil* de 150µm.

Prin urmare, folosind o cantitate mai mică de aliaj de lipire, nu se obțin îmbunătățiri semnificative ale zgomotului acustic generat de condensatoarele multistrat. Mai mult decât atât, reducerea cantității de aliaj de lipire poate conduce la probleme de calitate a produsului.

Unele studii sugerează că proprietățile dielectricului din interiorul MLCC-urilor sunt superioare la temperaturi înalte, în special la temperatura Curie a materialului BaTiO₃ (în jur de 130°C) [70,31,32,34]. Pentru a investiga acest lucru, am selectat câteva sisteme cu *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor și am măsurat SPL-ul în camera anecoică. Apoi, am dus PCB-urile înapoi în cuptorul prezent pe linia de SMT din producție, unde am tratat termic cablajul imprimat la

temperatura de 130°C, timp de jumătate de oră. Rezultatele inițiale și cele obținute după tratarea termică sunt prezentate în Fig.6.4.

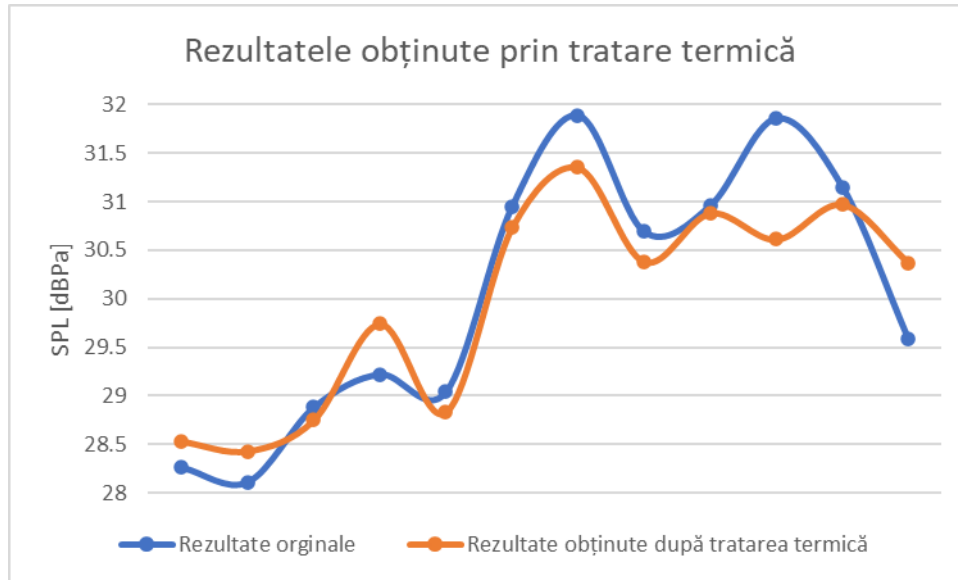


Fig.6.4. Rezultatele înainte și după tratarea termică a PCB-urilor

După cum se poate observa, nu există îmbunătățiri semnificative în urma tratării termice a PCB-urilor.

O altă soluție pentru atenuarea fenomenului „singing capacitors”, care implică modificări ale procesului de fabricație este lăcuirea, sau *varnishing*. Pentru această investigație, s-a aplicat lac pe PCB, doar în zona condensatoarelor de 2.2μF, așa cum este prezentat în Fig.6.5.



Fig.6.5. Aplicarea lacului pe PCB, vizibil la expunerea cu lumină UV

În Fig.6.6. și Fig.6.7. sunt prezentate rezultatele obținute înainte și după aplicarea lacului, pentru *design*-ul de eliminare a *spike*-urilor, respectiv pentru *design*-ul de pre-încărcare a condensatoarelor.

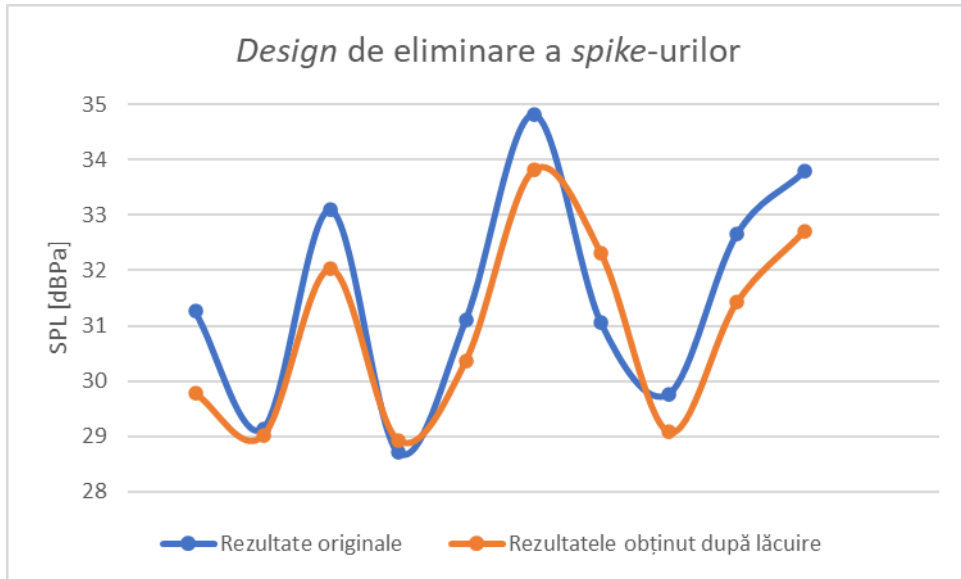


Fig.6.6. Rezultatele măsurării SPL-ului folosind *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor lăcuit

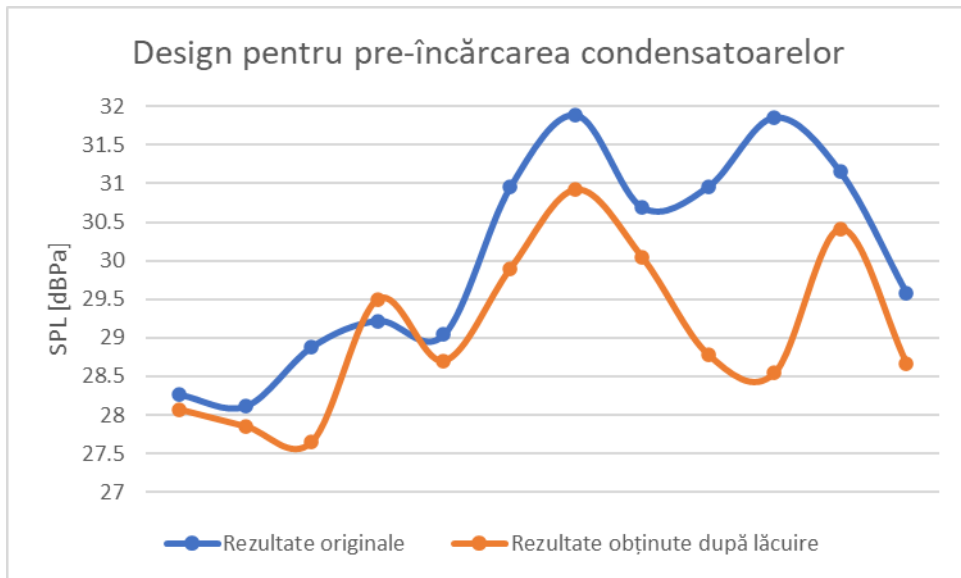


Fig.6.7. Rezultatele măsurării SPL-ului folosind *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor lăcuit

Pentru primul *design*, rezultatele înainte și după lăcuire sunt similare, în timp ce pentru *design*-ul de pre-încărcare a condensatoarelor rezultatele sunt ușor îmbunătățite după lăcuire.

Ultima investigație din seria soluțiilor ce presupun modificări ale procesului de fabricație, este izolarea vibrației generată de MLCC-uri prin protejarea acestora prin soluție specializată (*potting*). *Potting*-ul este un proces de aplicare a unui compus solid sau gelatinos pe PCB. În cazul investigației, am folosit materialul de *potting* DOWSIL 7091, adeziv siliconic cu polimer neutru de înaltă performanță. Materialul de *potting* a fost aplicat pe toate condensatoarele de $2.2\mu\text{F}$, asemănător Fig.6.8.

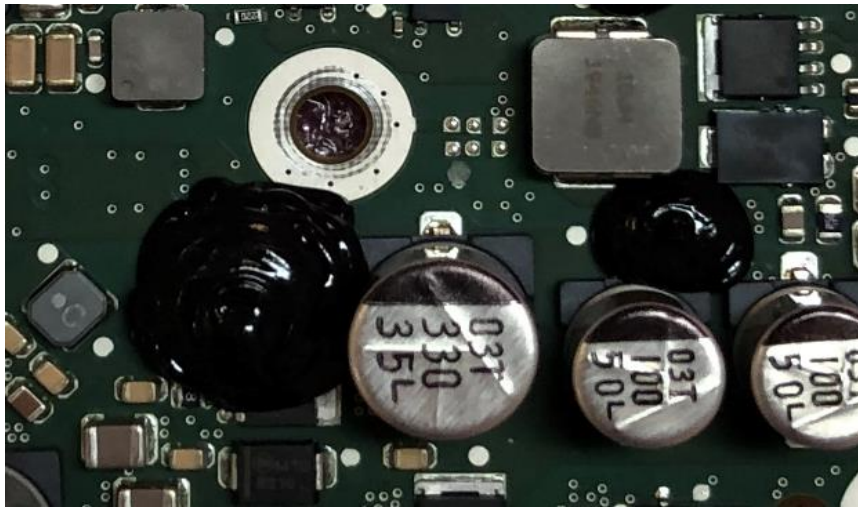


Fig.6.8. Aplicare *potting* pe PCB

În Fig.6.9. și Fig.6.10. sunt reprezentate măsurările realizate în camera anecoică înainte și după aplicarea *potting*-ului.

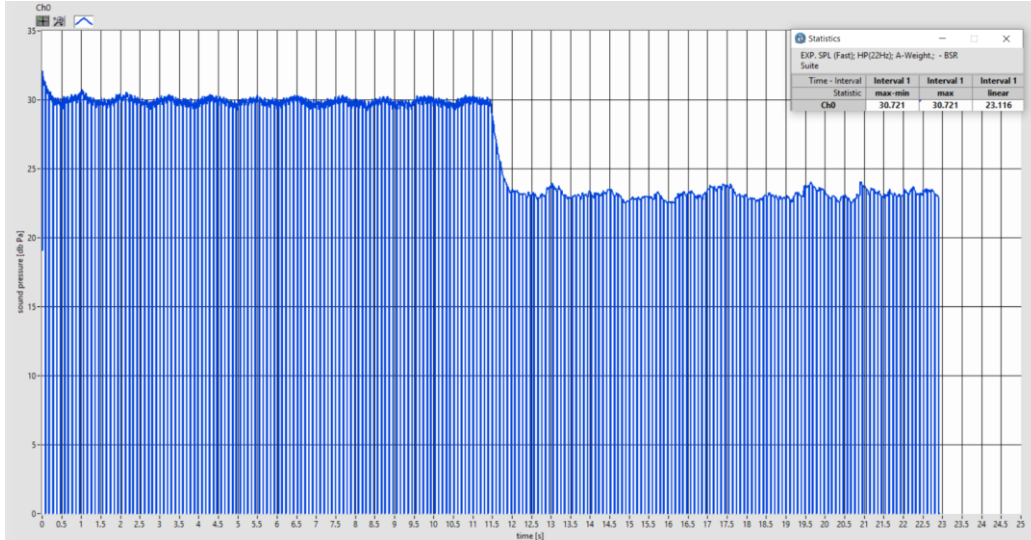


Fig.6.9. Rezultatele măsurării SPL-ului în camera anecoică, înainte de aplicarea *potting*-ului

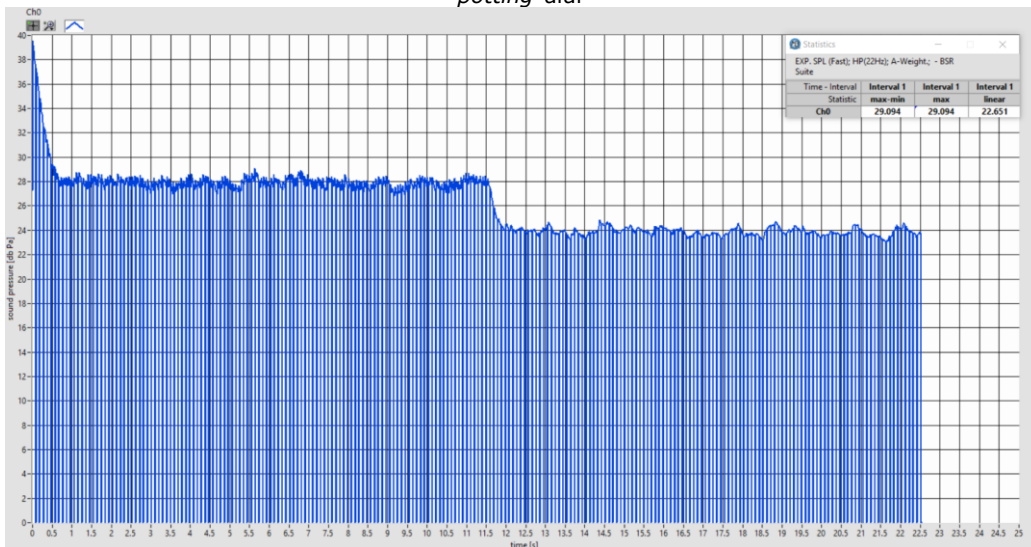


Fig.6.10. Rezultatele măsurării SPL-ului în camera anecoică, după aplicarea *potting*-ului

Comparând cele două rezultate, putem observa o îmbunătățire de 2dBPa în nivelul presiunii aerului. Prin urmare, procesul de *potting* ar putea fi o soluție de atenuare a fenomenului „singing capacitors”, însă aceasta ar putea crea probleme termice ale dispozitivului sau probleme legate de garanția produsului.

În acest subcapitol au fost prezentate cinci posibile soluții de atenuare a zgomotului acustic creat de condensatoare toate presupunând modificări ale procesului de fabricație. Orientarea condensatoarelor în poziție verticală și *potting*-ul s-au dovedit a fi cele mai eficiente soluții, în timp ce reducerea cantității de aliaj de

lipire și lăcuirea au prezentat ușoare îmbunătățiri. Soluția de tratare termică nu a prezentat rezultate îmbunătățite.

În continuare, voi prezenta soluțiile concentrate pe folosirea altor tipuri de condensatoare.

6.2. Soluții concentrate pe modificări de componente

În Capitolul 2, am prezentat soluțiile comerciale de atenuare a fenomenului „*Singing Capacitors*”. Majoritatea acestora se concentrează pe atenuarea vibrației transmise de la MLCC la PCB folosind *metal terminal* sau *metal plate*, *interposer*, substrat de aluminiu sau terminale de tip „*dipped radial leads*”. Alte tipuri de condensatoare folosesc materiale cu constantă dielectrică mică, au un strat dielectric mai gros sau au stratul exterior al condensatorului mai gros.

În acest subcapitol, am studiat comportamentul condensatoarelor cu dielectric de tip C0G din punct de vedere al zgomotului acustic.

Condensatoarele analizate se împart în trei clase din punct de vedere al dependenței capacității de temperatură: Clasa 1, Clasa 2 și Clasa 3. Condensatoarele folosite în sistemul prezentat sunt de tip X7R, care aparțin Clasei 2 de dielectric. Condensatoarele cu dielectric de tip C0G fac parte din Clasa 1 și sunt cunoscute în industrie ca unele din cele mai stabile condensatoare, deoarece capacitatea acestora nu este afectată semnificativ de temperatură, tensiunea aplicată sau îmbătrânire [71]. Dezavantajele acestora sunt domeniul redus al capacității, cuprinse între 0.5pF și 100nF și prețul mai ridicat.

Pentru a observa comportamentul din punct de vedere al zgomotului acustic, am înlocuit condensatoarele de 2.2μF cu serii de condensatoare C0G, conectate în paralel, pentru a egala valoarea capacității originale.

În Fig.6.11. și Fig.6.12., am conectat semnalul de la ieșirea *LED Driver*-ului la un canal al osciloscopului și un microfon plasat la 10cm de centrul PCB-ului pe un alt canal al osciloscopului.

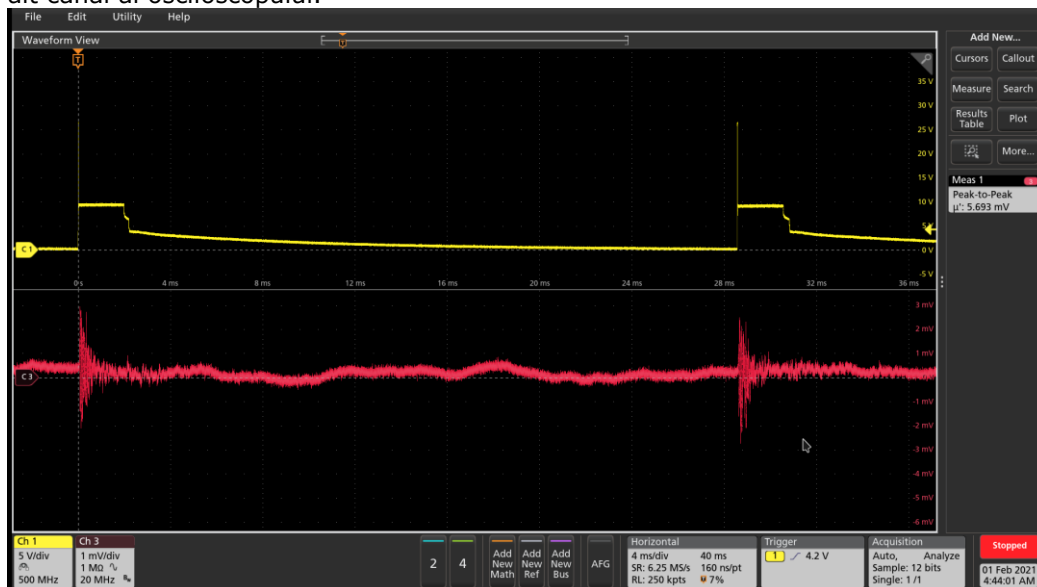


Fig.6.11. Rezultatele măsurării cu osciloscopul pentru *design*-ul original

102 Alternative suplimentare investigate pentru reducerea fenomenului „singing capacitors” - 6

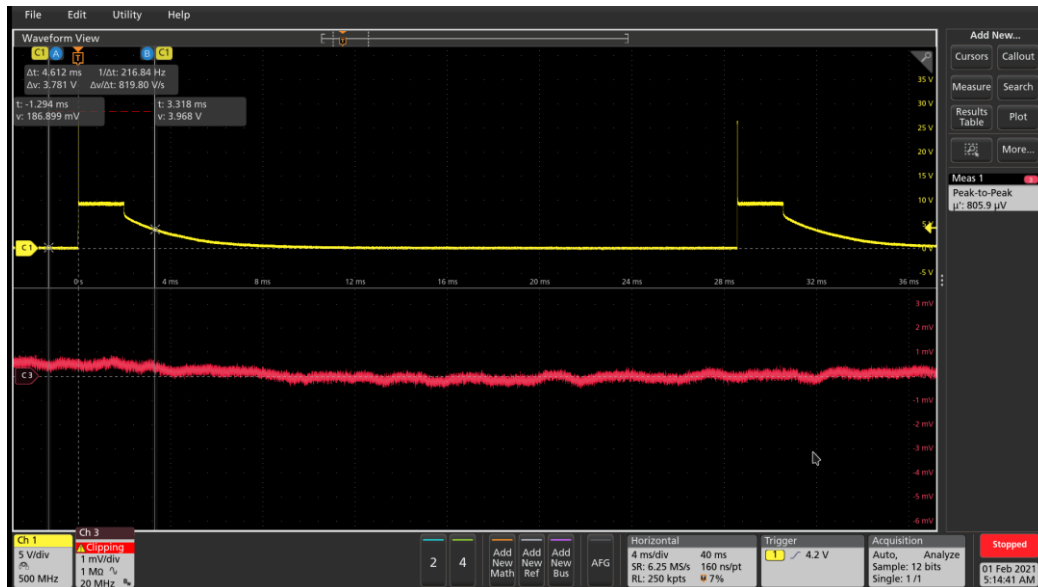


Fig.6.12. Rezultatele măsurării cu osciloscopul pentru *design*-ul cu C0G-uri

Așa cum se poate observa, semnalul de la ieșirea *LED Driver*-ului este similar pentru ambele cazuri, însă zgomotul acustic captat de microfon este redus semnificativ. Pentru cazul în care pe PCB au fost populate condensatoare cu dielectric de tip X7R, valoarea *peak-to-peak* a zgomotului măsurată cu osciloscopul este de 5.693mV, pe când în cazul în care se folosesc C0G-uri, valoarea măsurată este de 805.9μV.

Am repetat măsurările acustice și în camera anecoică. Asemănător măsurărilor anterioare, pentru a observa diferența față de nivelul de zgomot de referință al camerei anecoice, sistemul a fost pornit timp de 10s, apoi oprit pentru alte 10s. În Fig.6.13. este reprezentată măsurarea cu condensatoare de tip X7R, iar în Fig.6.14., este reprezentată măsurarea cu condensatoare de tip C0G.

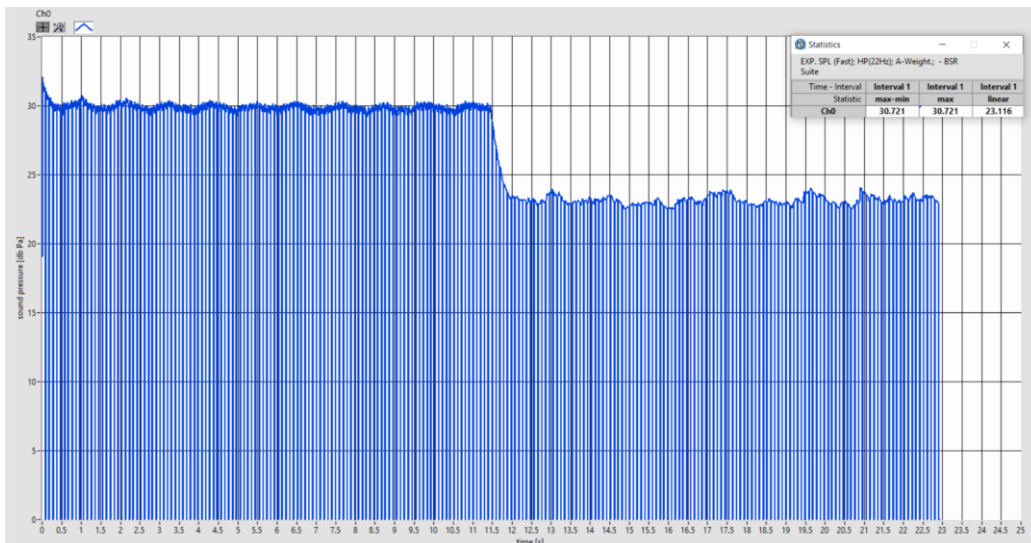


Fig.6.13. Rezultatele măsurării în camera anecoică pentru *design*-ul original, cu condensatoare de tip X7R

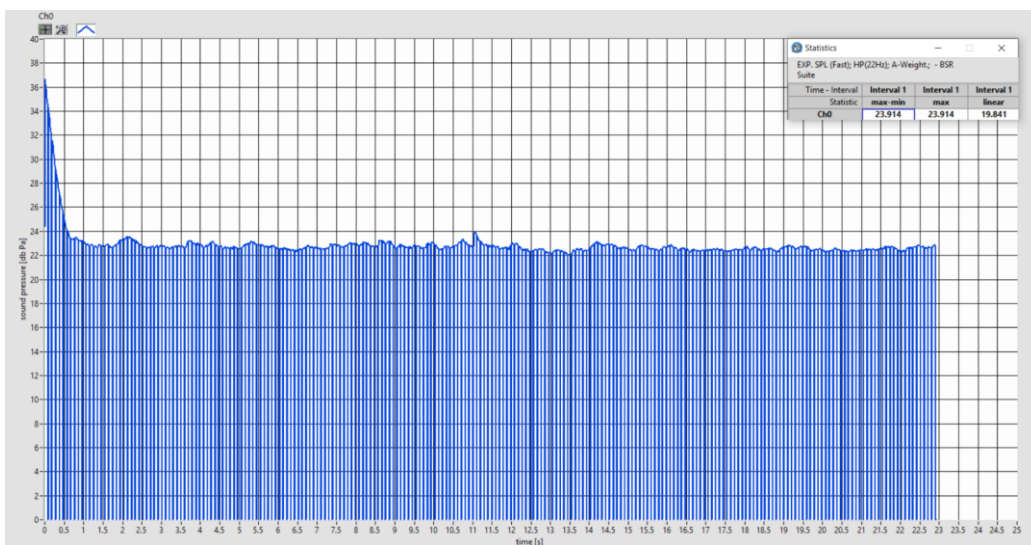


Fig.6.14. Rezultatele măsurării în camera anecoică pentru *design*-ul cu COG-uri

Așa cum se poate observa, pentru *design*-ul în care s-au folosit condensatoare de tip X7R, SPL-ul măsurat a fost de 30dBPa. Atunci când am înlocuit condensatoarele de $2.2\mu\text{F}$ cu seriile de condensatoare de tip COG, conectate în paralel, valoarea SPL-ului a fost de 24dBPa, acesta fiind nivelul de referință al zgomotului camerei anecoice.

Îmbunătățirea zgomotului acustic atunci când se folosesc condensatoare cu dielectric de tip COG este inconstabilă. Cu toate acestea, spațiul necesar pe PCB pentru a popula condensatoare COG cu capacitatea echivalentă de $2.2\mu\text{F}$ crește substanțial.

În Fig.6.15., este prezentat un studiu de plasare, în cazul în care fiecare condensator cu dielectric X7R, cu valoare de $2.2\mu\text{F}$ și amprență 1206, este înlocuit cu trei condensatoare cu dielectric de tip COG, fiecare având valoarea de 660nF și amprența 2220.

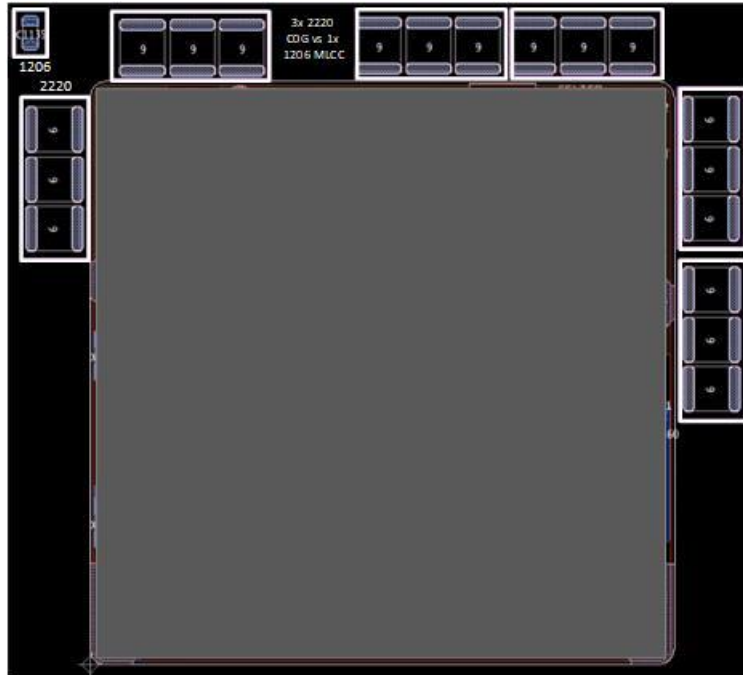


Fig.6.15. Studiu de plasament pentru *design* folosind condensatoare cu dielectric de tip COG

Am evidențiat atât spațiul necesar pentru a popula cele 18 condensatoare cu amprență 2220, cât și diferența de dimensiune între cele trei condensatoare COG, comparativ cu condensatorul X7R cu amprență 1206 și valoare $2.2\mu\text{F}$.

Prin urmare, această soluție nu este fezabilă pentru sisteme cu cerințe restrictive de dimensiune.

6.3. Soluții de acoperire a sunetului

În unele situații, fie din cauza stadiului avansat al proiectului, fie din cauza costurilor, cea mai bună soluție este de a acoperi sunetul, pentru a nu ajunge la urechea utilizatorului. În subcapitolul 6.1. - Soluții concentrate pe modificări ale procesului de fabricație, au fost prezentate câteva soluții care atenuează zgomotul acustic generat de condensatoarele multistrat. În acest subcapitol, sunt prezentate soluții care, deși implică modificări ale procesului de fabricație, nu atenuează zgomotul acustic, ci îl acoperă. Astfel utilizatorul nu sesizează existența problemei.

Există două căi de transmitere a sunetului: calea de transfer a sunetului prin structură și calea de transfer a sunetului prin aer.

Pentru a elimina calea de transmitere a sunetului prin structură, o soluție este folosirea unor garnituri anti-vibrație, pentru a izola vibrația sistemului de restul

caroseriei. Aceste garnituri anti-vibrație sunt fabricate dintr-un cauciuc EPDM (eng. *Ethylene Propylene Diene Monomer*) și se montează pe găurile de fixare, așa cum este prezentat în Fig.6.16.

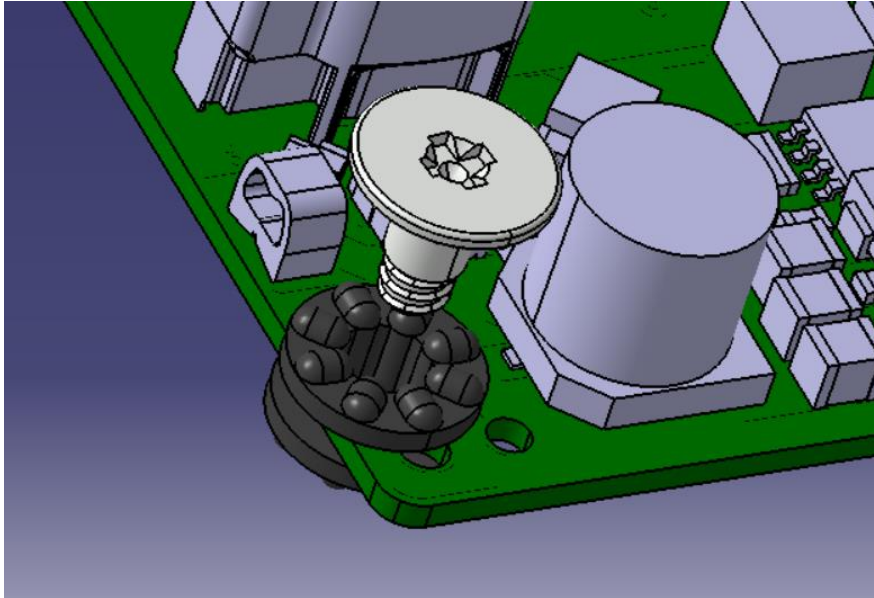


Fig.6.16. Montarea garniturilor anti-vibrație pe găurile de fixare ale PCB-ului

Pentru a elimina calea de transmitere a sunetului prin aer, se poate folosi un burete. În cazul produsului dezvoltat în colectivul nostru, singura cale prin care sunetul se transmite prin aer, este spațiul dintre conector și carcasa produsului. Pentru a acoperi sunetul generat de condensatoarele multistrat, am folosit un burete special, ignifug, realizat din EPDM cu celulă semi-închisă, așa cum este arătat în Fig.6.17.

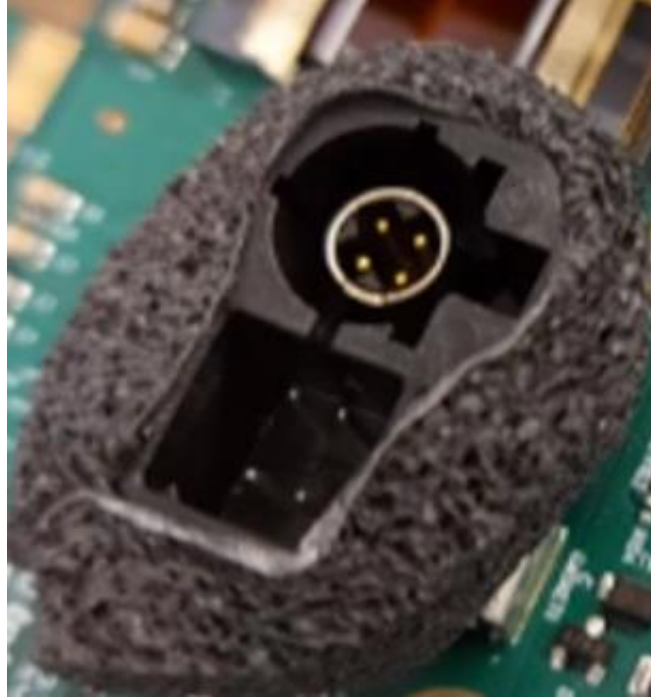


Fig.6.17. Acoperirea sunetului printr-un burete amplasat de jur-împrejurul conectorului principal

Așa cum am menționat, aceste soluții nu rezolvă problema creată de fenomenul „singing capacitors”, ci doar o acoperă. Pe lângă aceasta, soluția implică adăugarea unui pas în procesul de fabricație.

6.4. Optimizare de *layout* prin plasarea componentelor în configurație paralelă

În capitolul 4, am propus soluția de optimizare a *layout*-ului prin plasarea componentelor în configurație tip oglindă, a cărei eficiență a fost demonstrată în capitolul 5. Însă, în Tabelul 2.1, este evidențiat faptul că atunci când sunt folosite condensatoare cu geometrie clasică, pe lângă configurația de tip oglindă, prezentată în Fig.2.13, configurația paralelă, prezentată în Fig.2.12, este de asemenea eficientă.

În acest capitol, voi analiza eficiența configurației paralele de *layout*, din punct de vedere al zgomotului acustic. Pentru aceasta, asemănător investigației configurației de tip oglindă, am înlocuit fiecare condensator de 2.2 μ F, cu amprentă 1206, cu câte două condensatoare cu valoare de 1 μ F și amprentă 0805. Și în acest caz, *design*-ul de la care s-a pornit a fost cel de pre-încărcare a condensatoarelor, însă de data aceasta, condensatoarele au fost plasate în paralel, pe aceeași parte a PCB-ului.

Asemănător investigației precedente, am folosit trei furnizori de componente diferiți. Rezultatele sunt prezentate în Fig.6.18 și Fig.6.19.

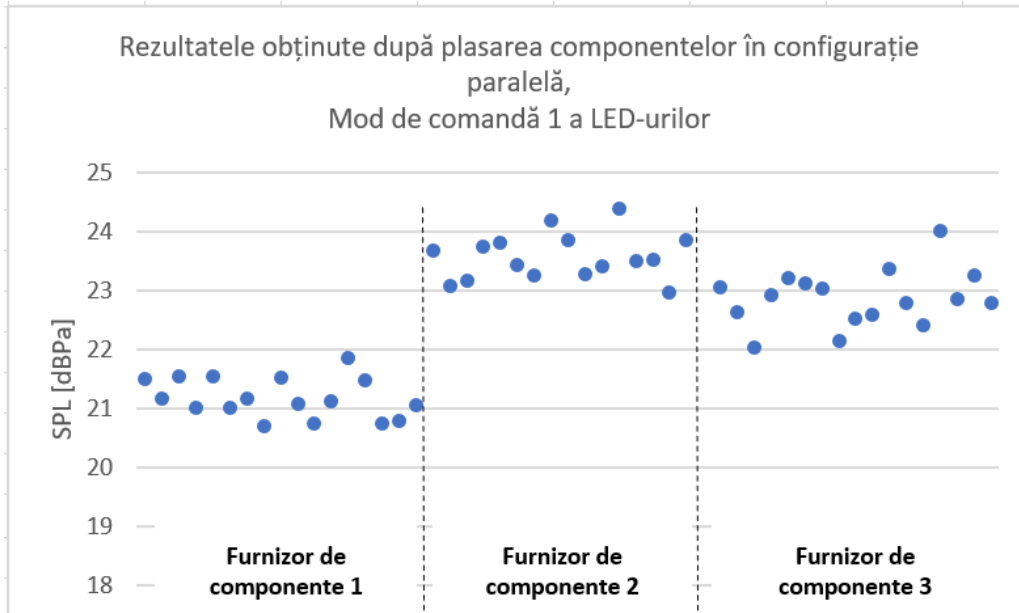


Fig.6.18. Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componente plasate în configurație paralel, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

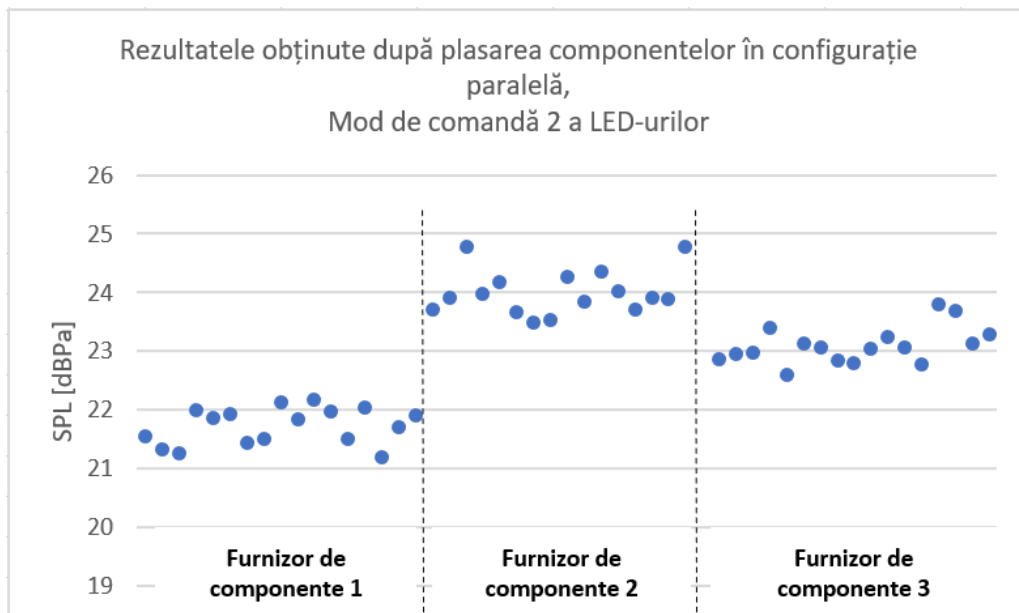


Fig.6.19. Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componente plasate în configurație paralel, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor

Prima observație este că rezultatele obținute sunt mai bune, comparativ cu cele obținute în Fig.5.15., unde valoarea maximă a SPL-ului a fost 31dBPa. A doua observație este că atunci când folosim configurația de tip paralel, rezultatele sunt

dependente de furnizorul de componente folosit. Așa cum este prezentat în Fig.6.18 și Fig.6.19, condensatoarele primite de la furnizorul 1 de componente sunt mai silențioase, pe când al doilea furnizor generează un nivel mai mare de zgomot acustic. Acest comportament nu se observă atunci când folosim configurația de tip oglindă (Fig.5.17 și Fig.5.18).

6.5. Concluzii și contribuții originale

Soluțiile pentru atenuarea sau eliminarea fenomenului „*singing capacitors*” se pot împărți în patru categorii principale, în funcție de modificările ce trebuiesc efectuate. Astfel, pentru a atenua sau elimina zgomotul acustic generat de condensatoarele multistrat, putem face modificări de proiectare, putem adăuga pași suplimentari în procesul de fabricare, putem rezolva problema de la rădăcină prin înlocuirea condensatoarelor problematice cu alte tipuri de condensatoare, sau putem acoperi zgomotul pentru a nu fi observat de utilizator.

În Tabelul 6.2. este prezentat un rezumat al soluțiilor propuse în această lucrare.

Categoria	Soluția	Eficiență	Observații	Costuri adiționale
Modificări de <i>design</i>	Atenuarea solicitării mecanice aplicat pe condensatoare	++	Soluția este individuală pentru fiecare produs în parte	Cost pentru modificarea <i>design</i> -ului
	Optimizare de <i>layout</i>	+++	Soluția este dependentă de <i>design</i> -ul și tipurile de condensatoare folosite	Cost pentru modificarea <i>design</i> -ului
Modificări ale procesului de fabricație pentru atenuarea zgomotului acustic	Reducerea cantității aliajului de lipire	+	Poate duce la probleme de calitate	Costul este neafectat (ușor îmbunătățit din cauza cantității reduse de aliaj de lipire)
	Tratare termică	-	-	Costul de adăugare a tratării termice în procesul de fabricație
	Lăcuire	+	-	Costul de adăugare a lăcuirii în procesul de fabricație
	<i>Potting</i>	++	Poate duce la probleme termice sau legate de garanția produsului	Costul de adăugare a <i>potting</i> -ului în procesul de fabricație
	Orientarea condensatoarelor în poziție verticală	+++	Condensatoarele pot fi pre-selectate de furnizorul de componente	Costul condensatoarelor pre-selectate
Modificări de componente	Folosirea condensatoarelor speciale disponibile comercial	++++	Această soluție nu a fost investigată experimental, însă rezultatele disponibile în literatură sunt prezentate în Capitolul 2	Costul componentelor alternative
	Folosirea condensatoarelor cu dielectric de tip COG	++++	Pe lângă prețul ridicat, condensatoarele cu dielectric COG ocupă mai mult spațiu decât cele de Clasă 2	Costul componentelor COG
Modificări ale procesului de fabricație pentru acoperirea zgomotului acustic	Folosirea garniturilor anti-vibrație	++	Poate necesita modificări ale ambalajului sau jigului de asamblare	Costul garniturilor anti-vibrație și costul pentru modificarea ambalajului sau jigului de asamblare
	Folosirea buretelui EPDM	++	Poate fi greu de implementat într-un proces automat de asamblare	Costul de adăugare a pasului adițional în procesul de fabricație

Tabel 6.2. Rezumat al soluțiilor investigate

110 Alternative suplimentare investigate pentru reducerea fenomenului „*singing capacitors*” - 6

Contribuțiile originale prezentate în acest capitol sunt:

- Analizarea efectului poziționării condensatorului în poziție verticală sau orizontală asupra zgomotului acustic generat de acesta și a procesului de fabricație;
- Analizarea efectului reducerii cantității de aliaj de lipire pe PCB asupra fenomenului „*singing capacitors*” și a calității produsului;
- Interpretarea rezultatelor privind tratarea termică a PCB-ului au dus la concluzia că aceasta nu este o soluție pentru reducerea zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat;
- Investigarea rezultatelor obținute după lăcuirea PCB-ului;
- Analizarea procesului de protejare a condensatoarelor prin soluție specializată (*potting*) asupra zgomotului acustic;
- Propunerea folosirii condensatoarelor de clasă 1 și a restricțiilor impuse de acestea din punct de vedere al spațiului pe PCB;
- Propunerea folosirii garniturilor anti-vibrație și a buretelui EPDM ca metode de acoperire a sunetului transmis prin structură, respectiv aer;
- Propunerea optimizării de *layout* prin plasarea componentelor în configurație paralelă;
- Sinteza rezultatelor obținute împreună cu observații referitoare la eficiența acestora și costuri implicate, în Tabelul 6.2.

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

7.1. Sumarul contribuțiilor originale

Contribuțiile originale aduse acestei lucrări sunt următoarele:

- Capitolul 2 – Stadiul actual
 - Structurarea și analiza comparativă a informațiilor din literatura de specialitate actuală;
 - Explicarea fenomenului „*singing capacitors*” prin intermediul unor reprezentări vizuale (Fig.2.1 și Fig.2.2);
 - Sintetizarea soluțiilor de minimizare a fenomenului analizat, prezentate în Fig.2.3;
 - Reprezentarea comparativă a soluțiilor comerciale disponibile pe piață (Fig.2.4, Fig.2.5, Fig.2.7 - Fig.2.10);
 - Descrierea configurațiilor geometrice optime pentru plasarea condensatoarelor ceramice multistrat (Fig.2.11 – Fig.2.13);
 - Descrierea unei metode alternative de plasare a aliajului de lipire (Fig.2.15);
 - Sumarizarea eficienței configurațiilor de *layout* în Tabelul 2.1;
 - Analiza comparativă a soluțiilor de minimizare a fenomenului analizat în Tabelul 2.2.
- Capitolul 3 – Analiza detaliată a problemei
 - Evidențierea dependenței vibrației față de semnalul electric în Fig.3.4 și Fig.3.5;
 - Analiza diferențiată a celor două moduri de comandă în Tabelul 3.2, evidențiind rezultatele mai bune asociate modului de comandă 1.
- Capitolul 4 – Simulare
 - Propunerea unei metode de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin eliminarea *spike*-urilor de tensiune în Fig.4.17;
 - Propunerea unei metode de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin pre-încărcarea acestora în Fig.4.18;
 - Propunerea optimizării de *layout* prin plasarea componentelor în configurație tip oglindă în Fig.4.25;
 - Analiza și sinteza rezultatelor obținute prin simulare.
- Capitolul 5 – Validarea rezultatelor simulării prin măsurări experimentale
 - Validarea experimentală a propunerii metodei de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin eliminarea *spike*-urilor de tensiune (Fig.5.1 – Fig.5.6, respectiv Fig.5.13 – Fig.5.14);
 - Validarea experimentală a propunerii metodei de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare prin pre-

- încărcarea acestora (Fig.5.7 – Fig.5.12, respectiv Fig.5.15 – Fig.5.16);
- Sumarizarea rezultatelor comparative obținute în urma măsurării *design*-ului original, respectiv a celor două metode de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, în Tabelul 5.1 și Tabelul 5.2;
- Capitolul 6 – Alternative suplimentare investigate pentru reducerea fenomenului „*singing capacitors*”
 - Analizarea efectului poziționării condensatorului în poziție verticală sau orizontală asupra zgomotului acustic generat de acesta și a procesului de fabricație;
 - Analizarea efectului reducerii cantității de aliaj de lipire pe PCB asupra fenomenului „*singing capacitors*” și a calității produsului;
 - Interpretarea rezultatelor privind tratarea termică a PCB-ului au dus la concluzia că aceasta nu este o soluție pentru reducerea zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat;
 - Investigarea rezultatelor obținute după lăcuirea PCB-ului;
 - Analizarea procesului de protejare a condensatoarelor prin soluție specializată (*potting*) asupra zgomotului acustic;
 - Propunerea folosirii condensatoarelor de clasă 1 și a restricțiilor impuse de acestea din punct de vedere al spațiului pe PCB;
 - Propunerea folosirii garniturilor anti-vibrație și a buretelui EPDM ca metode de acoperire a sunetului transmis prin structură, respectiv aer;
 - Propunerea optimizării de *layout* prin plasarea componentelor în configurație paralelă;
 - Sinteza rezultatelor obținute împreună cu observații referitoare la eficiența acestora și costuri implicate, în Tabelul 6.2.

7.2. Lista lucrărilor științifice

Lista lucrărilor științifice publicate, referitoare la fenomenul „*singing capacitors*”:

1. Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review. *Sensors*, 20(12), 3512. doi:10.3390/s20123512 – Citată de 166 ori, este în top 1% cele mai citate lucrări din domeniul academic al chimiei și a primit premiul „2022 Best Paper Award” din partea editurii MDPI

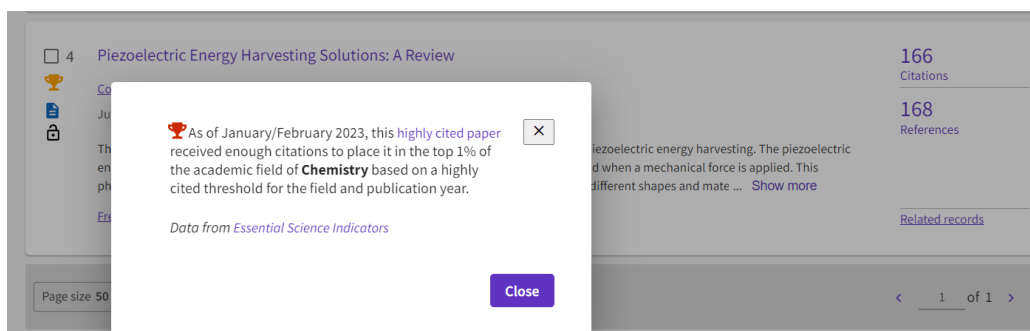


Fig.7.1. Captură din Web of Science privind citarea lucrării



Fig.7.2. Premiul „2022 Best Paper Award”

2. Covaci, C., & Gontean, A. (2022). “Singing” multilayer ceramic capacitors and mitigation methods — a review. *Sensors*, 22(10), 3869. doi:10.3390/s22103869 – Citată de două ori
3. Covaci, C., Burza, F., & Krausz, T. (2022). MLCC acoustic noise mitigation via appropriate design. *2022 IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*. doi:10.1109/estc55720.2022.9939506 – în curs de indexare WoS
4. Covaci, C., Burza, F., & Gontean, A. (2022). Solutions for acoustic noise caused by multilayer ceramic capacitors. *2022 IEEE 28th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. doi:10.1109/siitme56728.2022.9988700

Lista lucrărilor științifice suplimentare publicate pe parcursul elaborării tezei

1. Covaci, C., & Gontean, A. (2018). Spice model of a piezoelectric transducer. *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. <https://doi.org/10.1109/siitme.2018.8599212>
2. Covaci, C., & Gontean, A. (2019). Energy harvesting with piezoelectric materials for IOT – Review. *ITM Web of Conferences*, 29, 03010. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192903010> - neindexată în WoS
3. Covaci, C., Porobic, I., & Gontean, A. (2019). Setup for Piezoelectric Energy Harvesting System. *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. <https://doi.org/10.1109/siitme47687.2019.8990858>
4. Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Two-stage converter for piezoelectric energy harvesting using Buck Configuration. *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. <https://doi.org/10.1109/siitme50350.2020.9292138>
5. Covaci, C., & Gontean, A. (2021). Piezoelectric energy harvesting using SSHI technique. *2021 IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. <https://doi.org/10.1109/siitme53254.2021.9663643>

7.3. Concluzii

Această lucrare studiază zgomotul acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat în echipamentele electronice. Pentru a obține avantaje ca dimensiuni reduse, preț mic, domeniu larg de capacități și caracteristici electrice favorabile, majoritatea condensatoarelor ceramice au materialul dielectric realizat din titanat de bariu. Principalele proprietăți electromecanice ale titanatului de bariu sunt piezoelectricitatea și electrostricția. Din cauza acestor proprietăți, atunci când o tensiune alternativă este aplicată condensatorului, materialul dielectric se extinde în direcția câmpului electric, cauzând deformarea cablajului imprimat. Atunci când această deformare atinge frecvența de rezonanță în domeniul audibil 20Hz-20kHz, apare fenomenul cunoscut sub numele de „*singing capacitors*”.

Pentru a măsura fenomenul, există două metode preferate în literatura de specialitate: măsurarea acustică și măsurarea vibrației. Măsurarea acustică este preferată în cazul măsurărilor la nivel de sistem. În acest caz, se măsoară nivelul de presiune a sunetului, SPL, folosind un microfon, un analizor FFT și o cutie anecoică. Atunci când se dorește determinarea condensatoarelor problematice, este recomandată scanarea cablajului imprimat cu un LDV, care măsoară vibrația fără a contacta suprafața. Conform investigației Ko et al. [8], cele două măsurări pot fi corelate printr-o relație liniară, descrisă în ecuația (2.12).

Alte măsurări disponibile sunt măsurarea vibrației folosind un senzor cu fibră optică sau un accelerometru piezoelectric, și corelarea semnalului electric cu zgomotul acustic. Acestea însă sunt puțin menționate în literatura de specialitate.

Atunci când studiem zgomotul acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat, trebuie să investigăm trei factori principali:

- Condensatorul în sine – sursa de excitație;

- Aliajul de lipire – calea de transfer a vibrației;
- Cablajul imprimat – rezonatorul acustic.

Astfel, întrerupând transmiterea vibrației dintre condensator – aliaj de lipire – cablaj imprimat, putem atenua sau elimina fenomenul „*singing capacitors*”.

Pentru a elimina vibrația la nivel de condensator, în literatură se recomandă folosirea condensatoarelor cu constantă dielectrică mică.

Pentru a atenua vibrația transmisă de la condensator la aliajul de lipire, se pot folosi condensatoarele de tipul „*metal terminal*” sau „*metal plate*”, condensatoare cu *interposer* sau cu substrat de aluminiu, condensatoare cu strat dielectric mai gros sau condensatoare de tip „*dipped radial leads*”.

Pentru a atenua vibrația cablajului imprimat, în literatură este menționată scăderea cantității de aliaj de lipire, plasarea condensatoarelor în orientare verticală și optimizarea de *layout*.

Pentru a preveni apariția zgomotului acustic cauzat de condensatoarele ceramice multistrat, cele mai populare metode sunt realizarea unei analize modale și a unei analize armonice. Analiza modală simulează vibrația intrinsecă a cablajului imprimat, pe când analiza armonică ia în considerare straturile și materialele PCB-ului, punctele de fixare în produsul final și informații legate de componentele populate [72].

Această lucrare este o cercetare aplicativă, în care se studiază apariția fenomenului „*singing capacitors*” la ieșirea unui *LED Driver*, prezent într-o unitate de control electronic dezvoltată de către compania *Continental Automotive*TM. Modulul generează impulsuri de 4A, cu durata de 470μs și frecvența de 35Hz, aplicate pe șase condensatoare ceramice multistrat, cu valoarea de 2.2μF.

Inițial, s-au folosit două metode de măsurare a fenomenului „*singing capacitors*”: măsurarea vibrației printr-un accelerometru piezoelectric și măsurarea acustică printr-un microfon plasat într-o cameră anecoică. Măsurarea acustică s-a dovedit a fi mai precisă, astfel investigațiile ulterioare au fost realizate folosind condiții identice de măsurare acustică.

În capitolul de simulare, s-a încercat, în primul rând, determinarea diferenței dintre fixarea în trei și în patru puncte, din punct de vedere a vibrației mecanice. Inițial, s-a realizat o analiză modală a celor două tipuri de fixări, însă rezultatele nu au arătat o diferență semnificativă a formelor modale în cele două cazuri. Astfel, s-a realizat o analiză armonică, în care s-a ținut cont de componentele populate și informații detaliate, legate de structura PCB-ului. S-a considerat o forță de 2Pa aplicată pe fiecare condensator problematic și s-a demonstrat că în cazul fixării în patru puncte, deplasarea maximă a PCB-ului este mai mică, în comparație cu cea rezultată în cazul fixării în trei puncte. De asemenea, s-a demonstrat, ca în cazul investigației orientării condensatoarelor pe PCB, că MLCC-urile plasate spre exteriorul cablajului imprimat, au o influență mai mare din punct de vedere al zgomotului acustic, în comparație cu condensatoarele plasate mai aproape de centru PCB-ului.

Apoi s-au propus două metode de atenuare a fenomenului „*singing capacitors*”, una concentrată pe atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare și una concentrată pe optimizare de *layout* prin plasarea componentelor în configurație tip oglindă. Rezultatele analizelor armonice au prezentat îmbunătățiri ale vibrației sistemului: soluția de pre-încărcare a condensatoarelor a arătat o deplasare maximă mai mică decât în cazul *design*-ului original, iar soluția *layout* optimizat a arătat o îmbunătățire în comparație cu soluția precedentă. Aceste rezultate sunt sumarizate în Tabelul 4.2..

În capitolul 5, am validat rezultatele simulării prin măsurări experimentale. Prima investigație practică a fost concentrată pe schimbări de proiectare pentru a atenua solicitarea mecanică aplicată pe condensatoare. Deoarece la începutul impulsului de tensiune aplicat pe condensatoare era prezent un *spike* de tensiune cu un maxim de 20V, s-a încercat eliminarea acestuia. Însă, după o reducere a *spike*-ului la 14V, nu s-au observat îmbunătățiri semnificative din punct de vedere al zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice. Apoi, s-a continuat atenuarea solicitării aplicate pe condensatoare prin pre-încărcarea acestora, unde s-a observat o reducere a zgomotului acustic de $\sim 1\text{dBPa}$ sau $\sim 2\text{dBPa}$, în funcție de modul de comandă.

Deși s-a observat o îmbunătățire a zgomotului acustic generat de MLCC-uri atunci când s-a atenuat solicitarea aplicată pe acestea, în statisticile referitoare la măsurările ulterioare (Fig.5.13. – Fig.5.16.), se observă o variație de câțiva dBPa între dispozitive. Aceste variații sunt datorate orientării condensatoarelor pe PCB.

Din punct de vedere al optimizării de *layout*, Sun et al. [43] au analizat trei tipuri de configurații geometrice: configurația în formă de „L” sau „T”, configurația paralelă și configurația oglindă sau spate-în-spate. De asemenea, au folosit patru tipuri de condensatoare: condensator clasic, condensator cu trei terminale, condensator cu geometrie inversată și condensatoare cu *interposer*. Rezultatele investigației sunt prezentate în Tabelul 2.1.. Pentru condensatorul clasic, cel folosit în aplicația noastră, configurația paralelă și cea oglindă s-au dovedit a fi eficiente pentru a atenua fenomenul „singing capacitors”. Pentru a valida rezultatele simulării, am înlocuit fiecare condensator de $2.2\mu\text{F}$, capsulă 1206, cu câte două condensatoare de $1\mu\text{F}$, capsulă 0805, pe care le-am plasat în configurație oglindă, astfel condensatoarele sunt poziționate simetric, pe părți opuse ale PCB-ului. Și în acest caz măsurările experimentale au validat rezultatele simulării. O sinteză a rezultatelor obținute este prezentată în Tabelul 5.3.

În capitolul 6, am propus alternative suplimentare pentru reducerea fenomenului „singing capacitors”. Prima investigație din acest capitol s-a concentrat pe analizarea diferenței între plasarea condensatoarelor în orientare verticală sau orizontală. Condensatorul plasat în orientare verticală atunci când electrozii interni sunt în poziție perpendiculară pe PCB, și considerăm MLCC-ul plasat în orientare orizontală atunci când electrozii interni sunt paraleli cu PCB-ul. Pentru această investigație, s-au selectat douăzeci de dispozitive cu nivele diferite de zgomot acustic și s-a realizat un *cross-section* pe condensatoarele problematice. S-a concluzionat că orientarea condensatoarelor impactează nivelul de zgomot acustic, orientarea verticală fiind mai puțin zgomotoasă decât cea orizontală, acest lucru fiind susținut și în literatura de specialitate.

În următoarea investigație, am analizat efectul cantității aliajului de lipire asupra fenomenului „singing capacitors”. Astfel, am redus grosimea *stencil*-ului de la $150\mu\text{m}$ la $120\mu\text{m}$ și am măsurat din punct de vedere acustic dispozitivele produse în cele două cazuri. Rezultatul a întărit concluziile din literatură [44], întrucât nu s-au observat îmbunătățiri semnificative din punct de vedere acustic între cele două grosimi ale aliajului de lipire.

Următoarele investigații au analizat tratarea termică și lăcuirea cablajului imprimat. Pentru tratarea termică, PCB-ul a fost ținut timp de jumătate de oră în cuptorul din linia de SMT din producție, la temperatura de 130°C (temperatura Curie a titanatului de bariu). Pentru *varnishing*, s-a aplicat un lac pe PCB, în zona condensatoarelor problematice. Niciuna dintre metode nu a prezentat îmbunătățiri semnificative din punct de vedere acustic.

Pasul următor a fost izolarea vibrației generată de condensatoare prin aplicarea unui adeziv siliconic cu polimer neutru pe componentele problematice. Procedul este cunoscut în industrie sub numele de *potting*. Această investigație a arătat o îmbunătățire de 2dBPa, însă poate provoca probleme termice sau legate de garanția produsului.

După ce am studiat soluții concentrate pe atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare și pe modificări ale procesului de manufactură, am căutat condensatoare alternative pentru a rezolva problema fenomenului „*singing capacitors*”. Îmbunătățirile rezultate prin folosirea condensatoarelor alternative menționate anterior („*metal terminal*”, *interposer*, *dipped radial leads*, ș.a.m.d.) sunt incontestabile. Pentru acestea, producătorii de componente electronice asigură o atenuare a zgomotului acustic de până la 25dBPa. Astfel, pentru investigația noastră, am analizat efectul folosirii condensatoarelor cu dielectric de tip COG din punct de vedere acustic. Aceste condensatoare fac parte din Clasa 1 și sunt cunoscute în industrie ca unele din cele mai stabile condensatoare deoarece capacitatea acestora nu este afectată semnificativ de temperatură, tensiune aplicată sau îmbătrânire. Folosind condensatoare cu dielectric de tip COG, SPL-ul a fost redus de la un nivel de 30dBPa la 24dBPa, acesta fiind nivelul de referință al zgomotului camerei anecoice. Dezavantajul acestei soluții este prețul ridicat al componentelor și spațiul ocupat pe PCB pentru a echivala valoarea capacității inițiale.

Ca metode de acoperire a sunetului, în lucrare au fost menționate garniturile anti-vibrație, folosite pentru atenuarea vibrației transmise prin structura dispozitivului, și buretele EPDM cu celulă semi-închisă, folosit pentru atenuarea sunetului transmis prin aer..

Pe lângă optimizarea de *layout* prin configurare tip oglindă, Sun et al. [43] au propus și plasarea componentelor în configurație paralelă ca metodă de reducere a zgomotului generat de condensatoarele multistrat. La fel ca în investigația anterioară, am înlocuit fiecare condensator de 2.2 μ F, capsulă 1206, cu câte două condensatoare de 1 μ F, capsulă 0805, pe care le-am plasat în paralel, pe aceeași parte a PCB-ului. Ambele configurații de *layout* au prezentat îmbunătățiri semnificative din punct de vedere acustic, însă valorile cele mai mici de SPL au fost înregistrate atunci când s-a folosit configurația oglindă. Mai mult decât atât, la configurația de tip oglindă se poate observa o repetabilitate a comportamentului, pe când comportamentul dispozitivelor cu configurație paralelă diferă în funcție de furnizorul de componente folosit, așa cum este prezentat în Fig.6.18 și Fig.6.19.

Un rezumat al rezultatelor obținute este prezentat în Tabelul 6.2, unde este menționată eficiența tuturor soluțiilor investigate, împreună cu observații determinate în urma analizei lor și implicații de cost.

În Fig.1.1, au fost prezentate obiectivele științifice din cadrul acestei cercetări. În urma interpretării rezultatelor obținute, putem relua obiectivele și clasifica soluțiile în funcție de eficiența acestora, așa cum este prezentat în Fig.7.3.

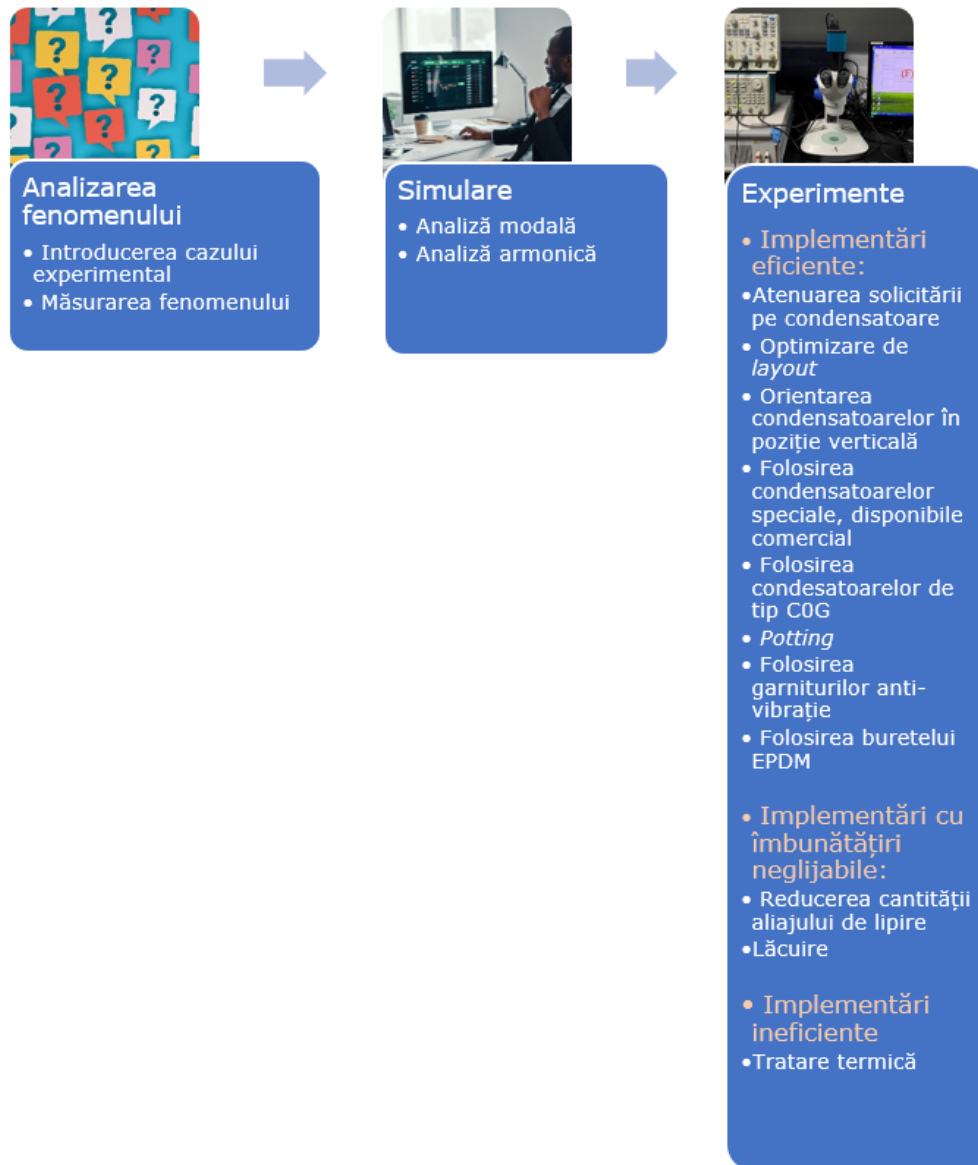


Fig.7.3. Reluarea obiectivelor științifice prezentate la începutul tezei și clasificarea soluțiilor în funcție de eficiență

Pentru produsul implementat în *mass production*, s-a ales inițial soluția de atenuare a solicitării mecanice aplicate pe condensatoare și ulterior, soluția de optimizare de *layout* cu configurație de tip oglindă.

Având un caracter aplicativ, cercetarea efectuată este limitată la cazul particular investigat. Deși sunt prezentate soluții universal valabile, de exemplu

folosirea tipurilor alternative de condensatoare sau plasarea MLCC-urilor în orientare verticală, unele rezultate sunt valabile doar pentru dispozitivul analizat, de exemplu modificările de *design* realizate pentru atenuarea forței aplicate pe condensatoare.

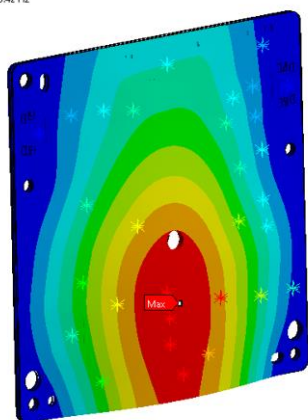
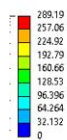
Ca direcții viitoare de cercetare a fenomenului „*singing capacitors*”, se poate automatiza detecția zgomotului acustic generat de condensatoarele ceramice multistrat folosind Inteligența Artificială. Astfel, un computer ar putea evalua dacă vibrația PCB-ului este deranjantă pentru urechea umană.

Deși este un subiect apărut de curând, fenomenul „*singing capacitors*” a devenit o temă de interes, în special în domeniul industrial, unde confortul utilizatorului final este fundamental pentru profitul companiei.

ANEXA A1

În această anexă sunt prezentate cele treizeci de moduri rezultate în urma analizei modale efectuată în capitolul 4.

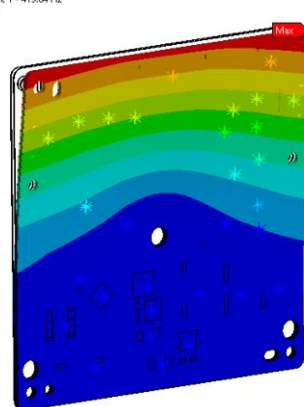
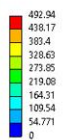
Total Deformation - Mode 1 - 713.42 Hz
Type: Total Deformation
Frequency: 713.42 Hz
Unit: μm
Max: 289.19
Min: 0



Fixare în patru puncte - 713 Hz

a)

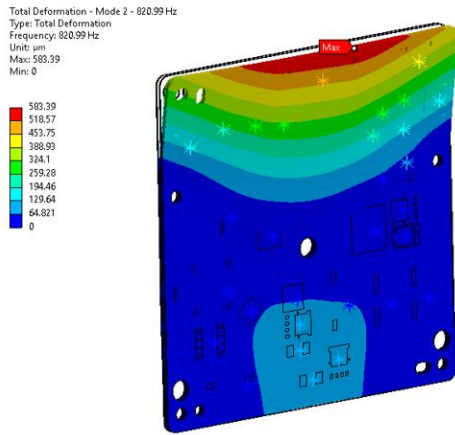
Total Deformation - Mode 1 - 419.84 Hz
Type: Total Deformation
Frequency: 419.84 Hz
Unit: μm
Max: 492.94
Min: 0



Fixare în trei puncte - 419 Hz

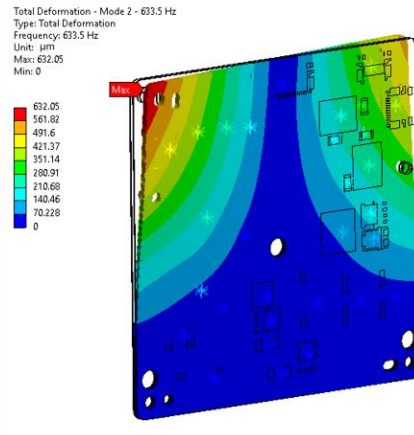
b)

Fig.A1.1. Analiză modală – Mod 1: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 820 Hz

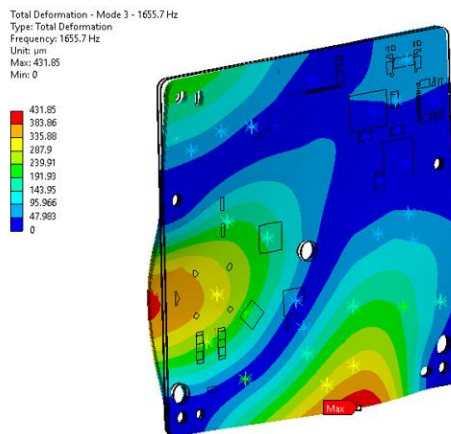
a)



Fixare în trei puncte - 633 Hz

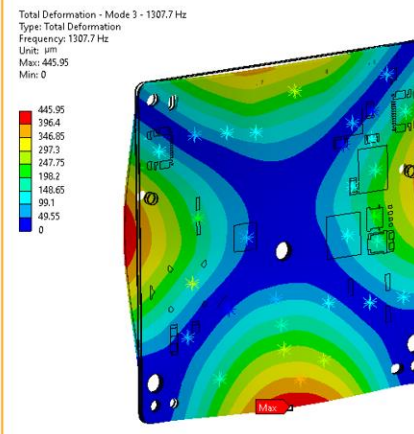
b)

Fig.A1.2. Analiză modală – Mod 2: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 1655 Hz

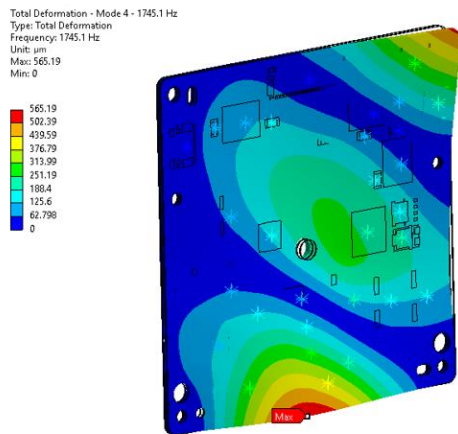
a)



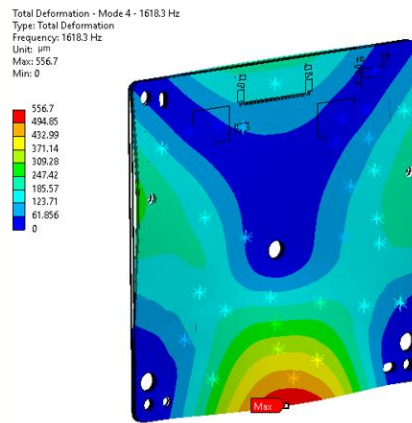
Fixare în trei puncte- 1307 Hz

b)

Fig.A1.3. Analiză modală – Mod 3: a) în trei puncte; b) în patru puncte

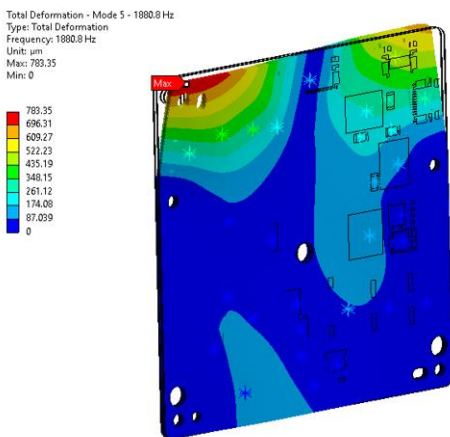


Fixare în patru puncte - 1745 Hz
 a)

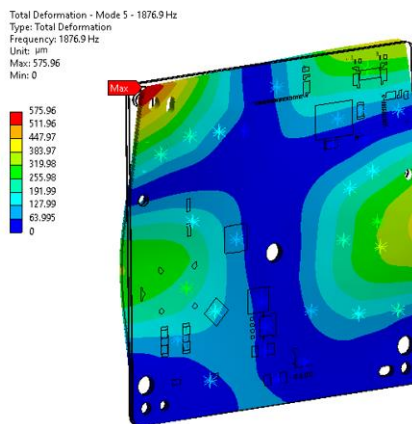


Fixare în trei puncte - 1618 Hz
 b)

Fig.A1.4. Analiză modală – Mod 4: a) în trei puncte; b) în patru puncte

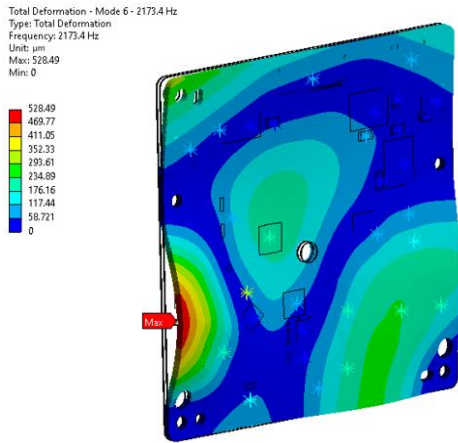


Fixare în patru puncte - 1880 Hz
 a)



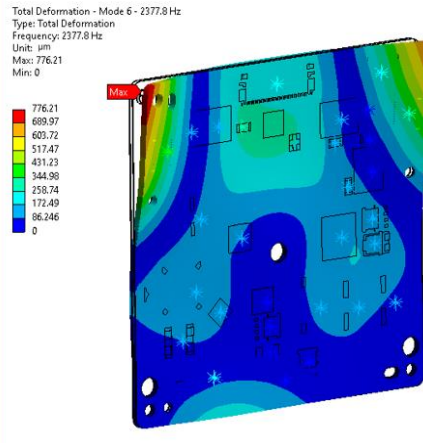
Fixare în trei puncte - 1876 Hz
 b)

Fig.A1.5. Analiză modală – Mod 5: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 2173 Hz

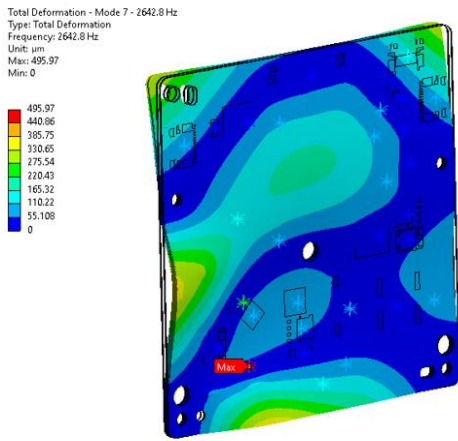
a)



Fixare în trei puncte - 2377 Hz

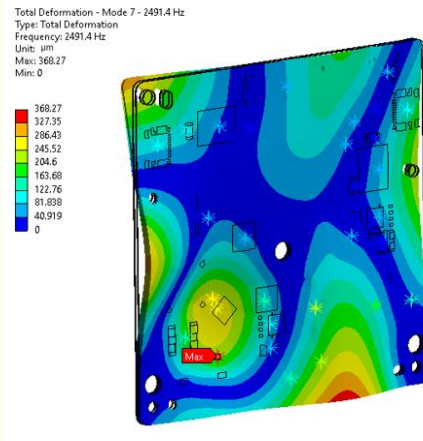
b)

Fig.A1.6. Analiză modală – Mod 6: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 2642 Hz

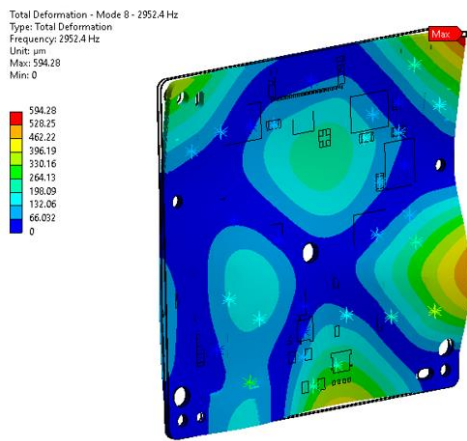
a)



Fixare în trei puncte - 2491 Hz

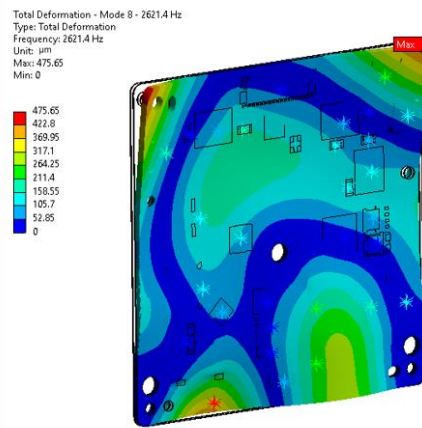
b)

Fig.A1.7. Analiză modală – Mod 7: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 2952 Hz

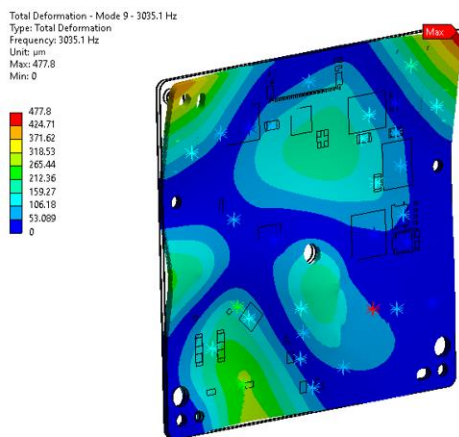
a)



Fixare în trei puncte - 2621 Hz

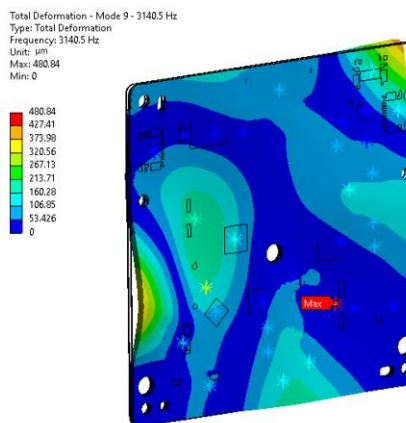
b)

Fig.A1.8. Analiză modală – Mod 8: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 3035 Hz

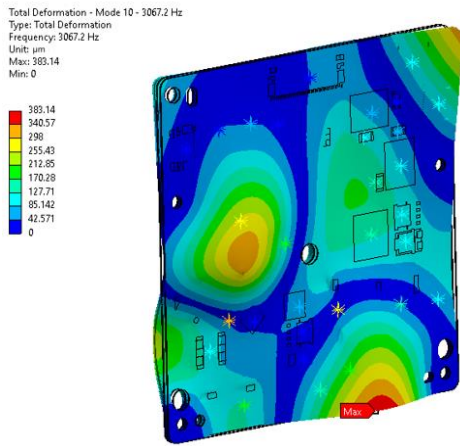
a)



Fixare în trei puncte - 3140 Hz

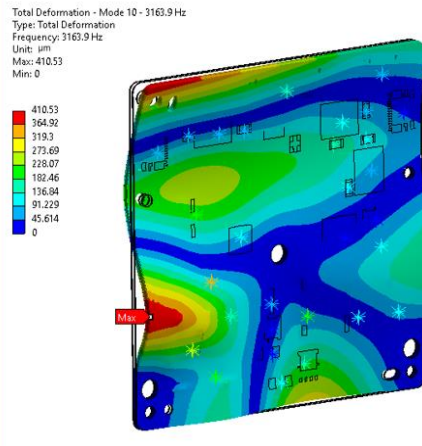
b)

Fig.A1.9. Analiză modală – Mod 9: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 3067 Hz

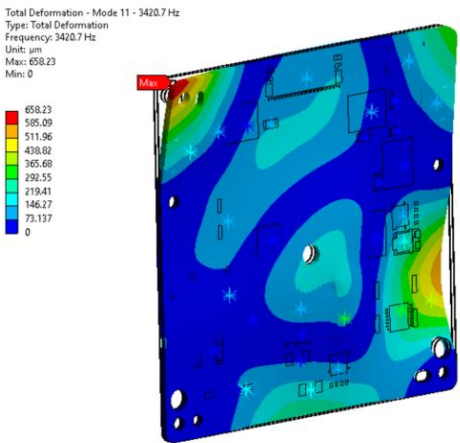
a)



Fixare în trei puncte - 3163 Hz

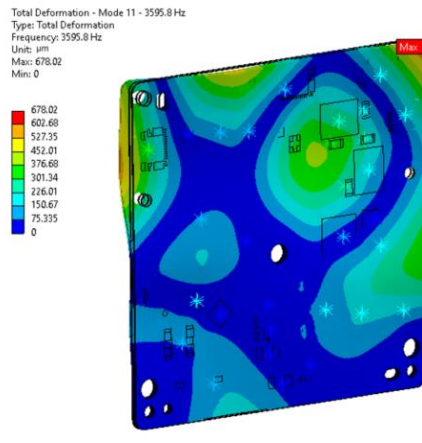
b)

Fig.A1.10. Analiză modală – Mod 10: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 3420 Hz

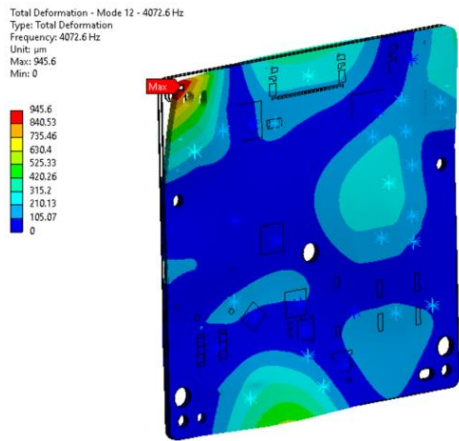
a)



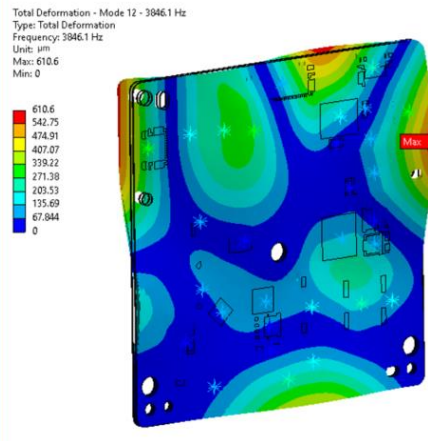
Fixare în trei puncte - 3595 Hz

b)

Fig.A1.11. Analiză modală – Mod 11: a) în trei puncte; b) în patru puncte

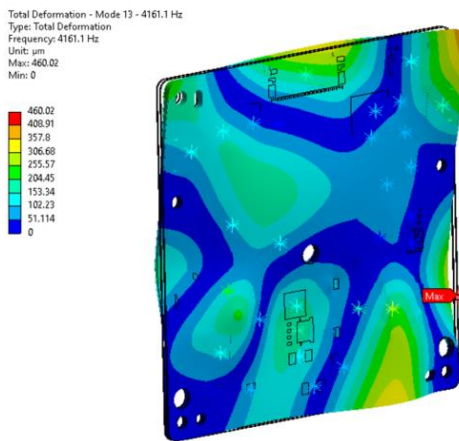


Fixare în patru puncte - 4072 Hz
 a)

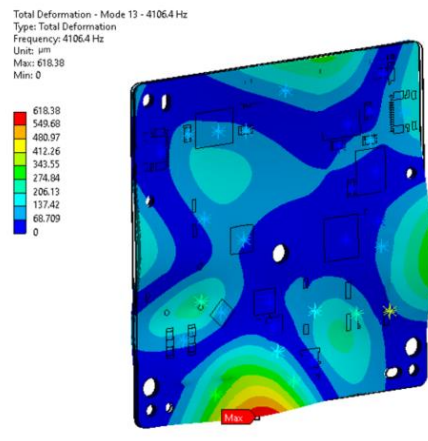


Fixare în trei puncte - 3846 Hz
 b)

Fig.A1.12. Analiză modală – Mod 12: a) în trei puncte; b) în patru puncte

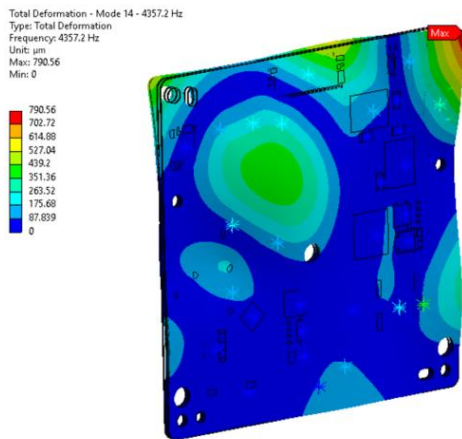


Fixare în patru puncte - 4161 Hz
 a)



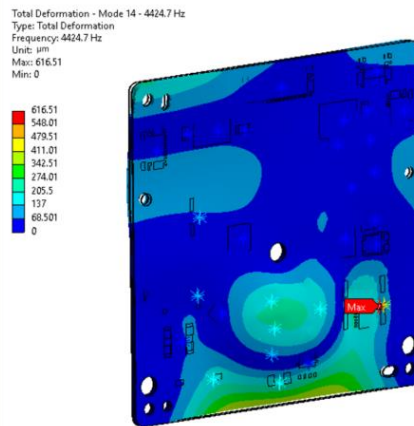
Fixare în trei puncte - 4106 Hz
 b)

Fig.A1.13. Analiză modală – Mod 13: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 4357 Hz

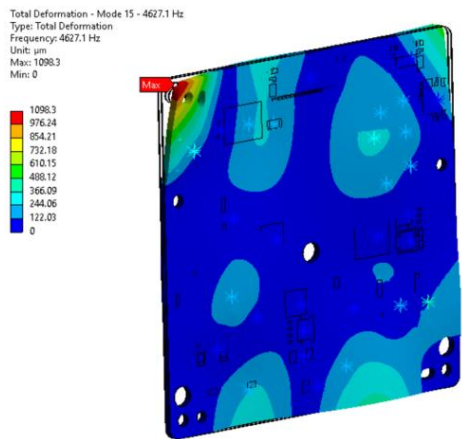
a)



Fixare în trei puncte - 4424 Hz

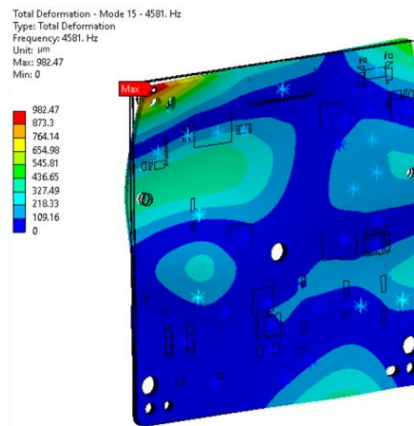
b)

Fig.A1.14. Analiză modală – Mod 14: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 4627 Hz

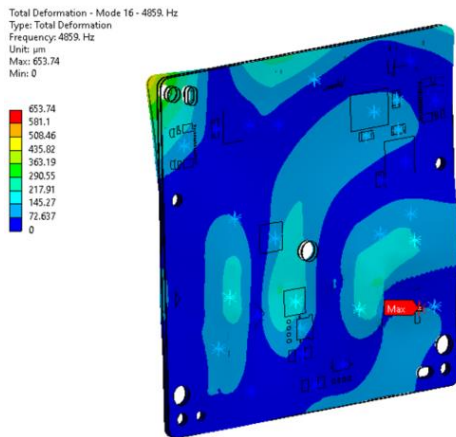
a)



Fixare în trei puncte - 4581 Hz

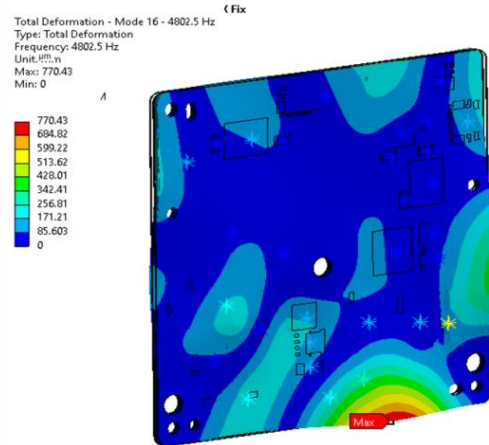
b)

Fig.A1.15. Analiză modală – Mod 15: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 4859 Hz

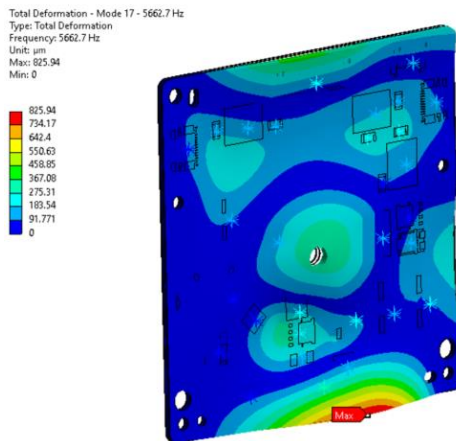
a)



Fixare în trei puncte - 4802 Hz

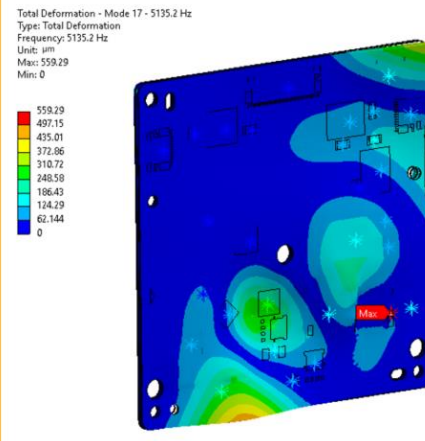
b)

Fig.A1.16. Analiză modală – Mod 16: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 5662 Hz

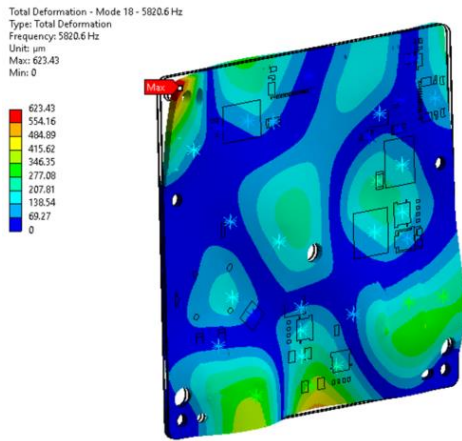
a)



Fixare în trei puncte - 5135 Hz

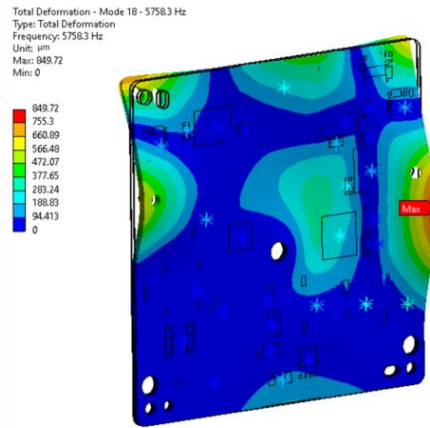
b)

Fig.A1.17. Analiză modală – Mod 17: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 5820 Hz

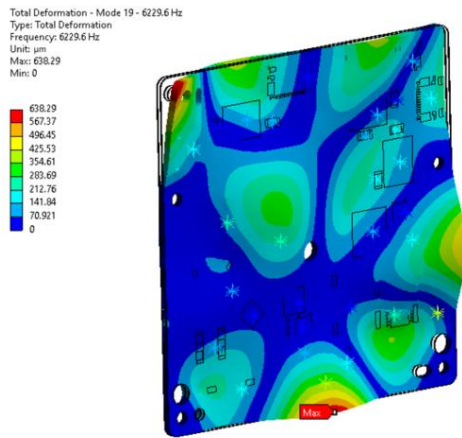
a)



Fixare în trei puncte - 5758 Hz

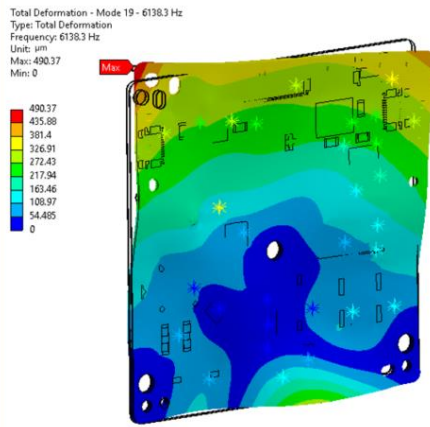
b)

Fig.A1.18. Analiză modală – Mod 18: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 6229 Hz

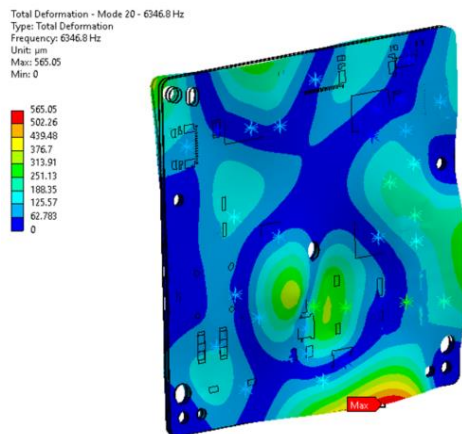
a)



Fixare în trei puncte - 6138 Hz

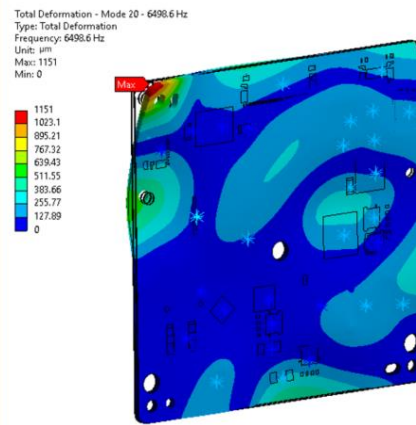
b)

Fig.A1.19. Analiză modală – Mod 19: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 6346 Hz

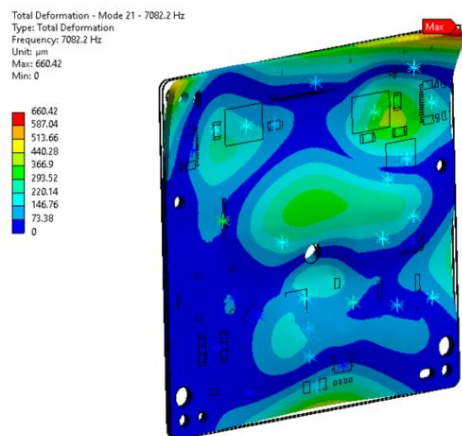
a)



Fixare în trei puncte - 6498 Hz

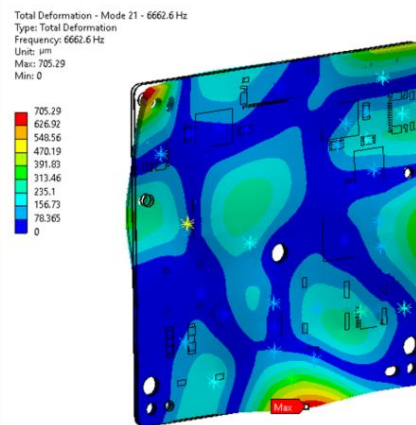
b)

Fig.A1.20. Analiză modală – Mod 20: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 7082 Hz

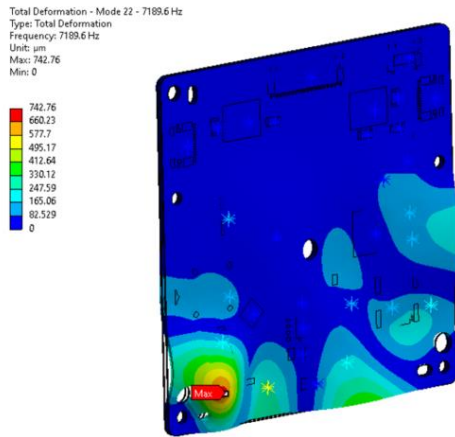
a)



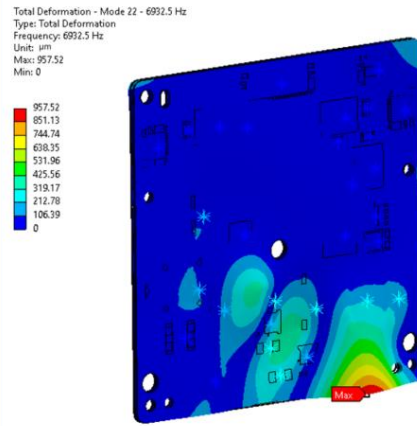
Fixare în trei puncte - 6662 Hz

b)

Fig.A1.21. Analiză modală – Mod 21: a) în trei puncte; b) în patru puncte

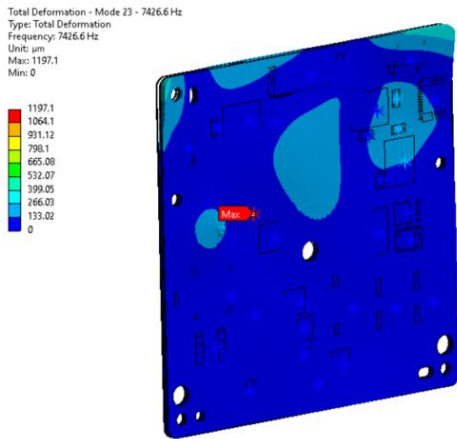


Fixare în patru puncte - 7189 Hz
 a)

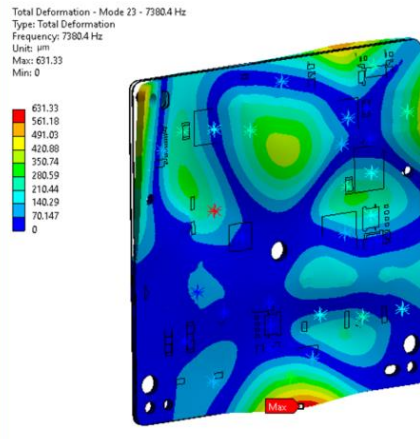


Fixare în trei puncte - 6932 Hz
 b)

Fig.A1.22. Analiză modală – Mod 22: a) în trei puncte; b) în patru puncte

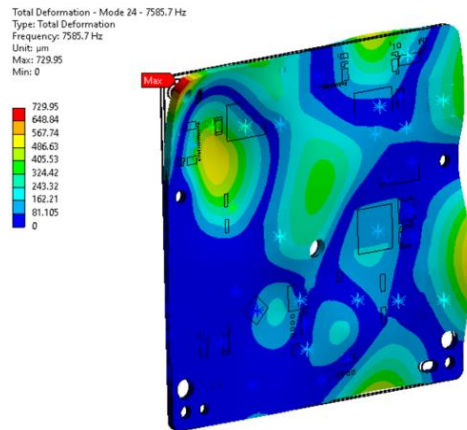


Fixare în patru puncte - 7426 Hz
 a)



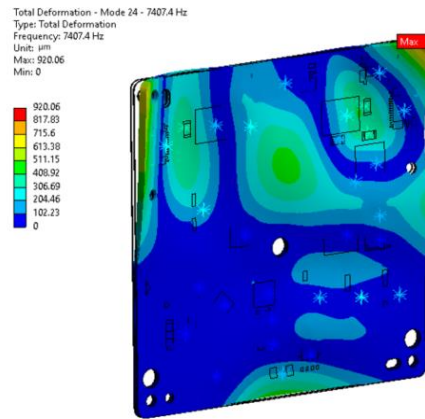
Fixare în trei puncte - 7380 Hz
 b)

Fig.A1.23. Analiză modală – Mod 23: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 7585 Hz

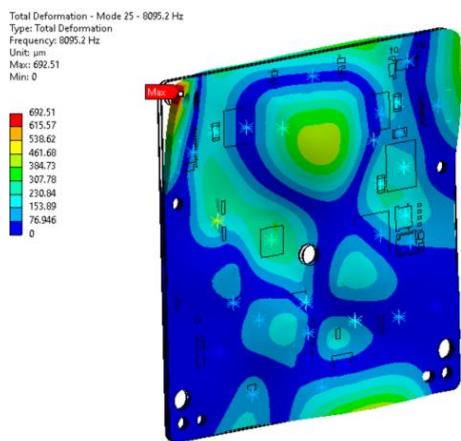
a)



Fixare în trei puncte - 7407 Hz

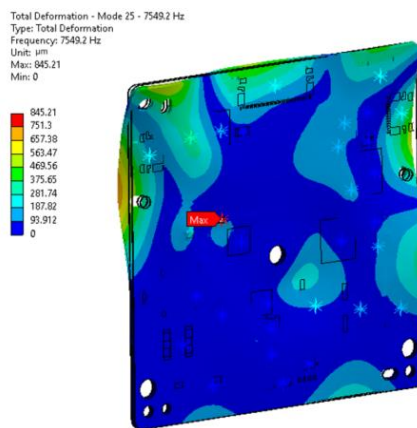
b)

Fig.A1.24. Analiză modală – Mod 24: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 8095 Hz

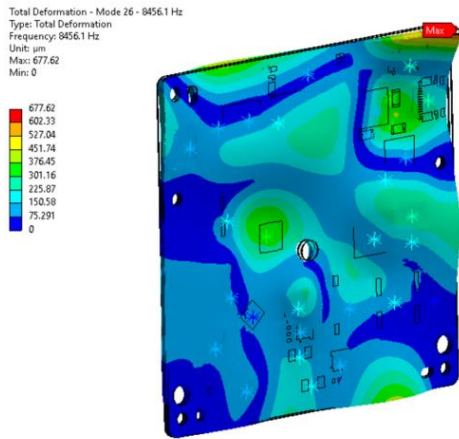
a)



Fixare în trei puncte - 7549 Hz

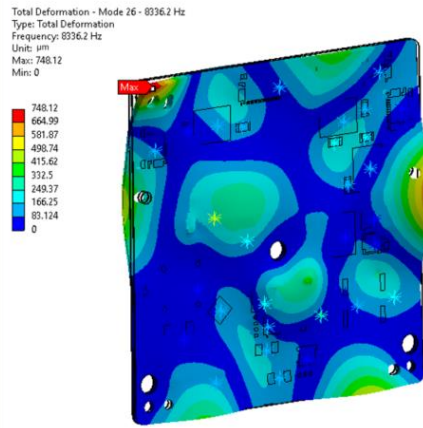
b)

Fig.A1.25. Analiză modală – Mod 25: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 8456 Hz

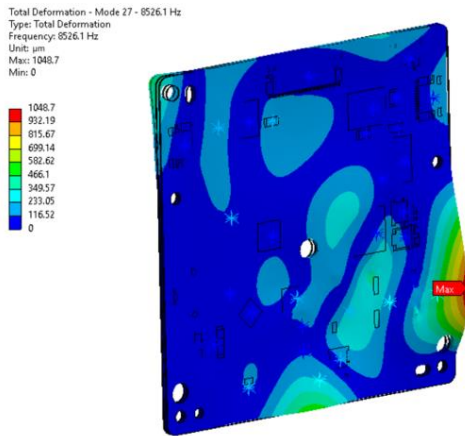
a)



Fixare în trei puncte - 8336 Hz

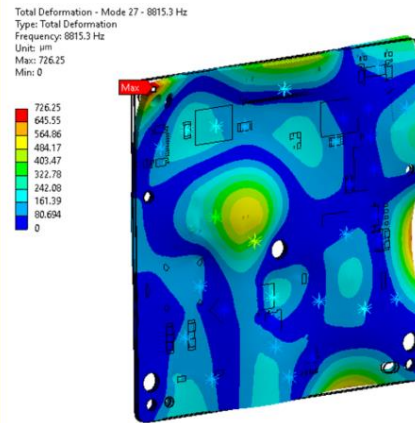
b)

Fig.A1.26. Analiză modală – Mod 26: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 8526 Hz

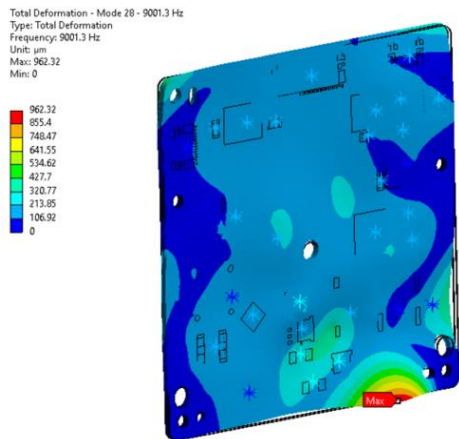
a)



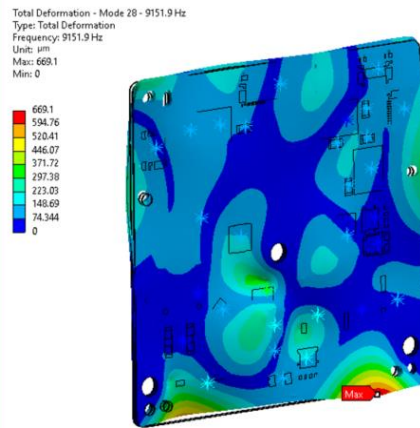
Fixare în trei puncte - 8815 Hz

b)

Fig.A1.27. Analiză modală – Mod 27: a) în trei puncte; b) în patru puncte

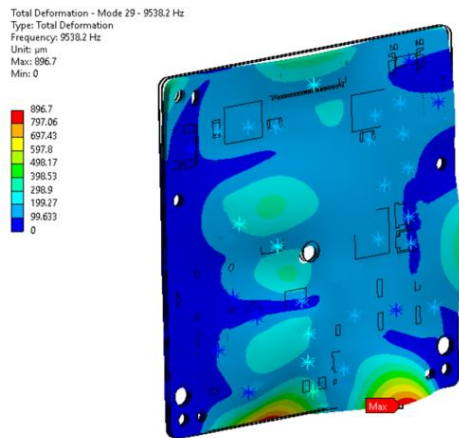


Fixare în patru puncte - 9001 Hz
 a)

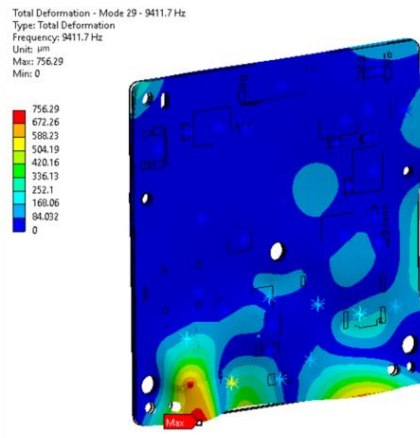


Fixare în trei puncte - 9151 Hz
 b)

Fig.A1.28. Analiză modală – Mod 28: a) în trei puncte; b) în patru puncte

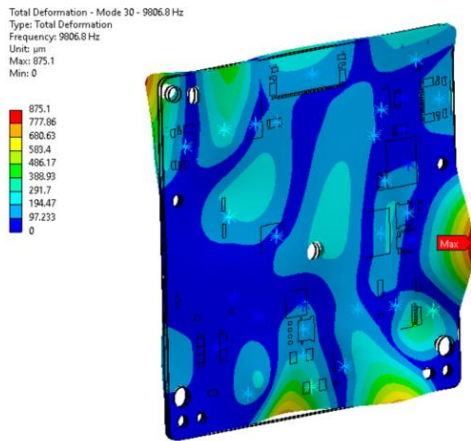


Fixare în patru puncte - 9538 Hz
 a)



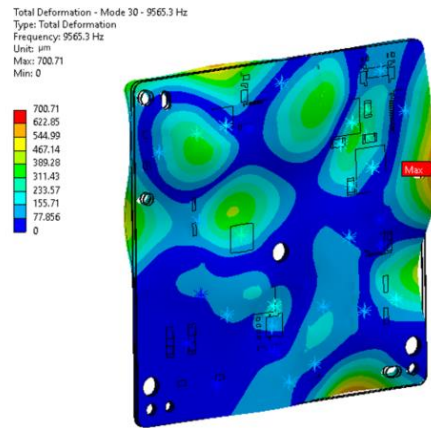
Fixare în trei puncte - 9411 Hz
 b)

Fig.A1.29. Analiză modală – Mod 29: a) în trei puncte; b) în patru puncte



Fixare în patru puncte - 9806 Hz

a)



Fixare în trei puncte - 9565 Hz

b)

Fig.A1.30. Analiză modală – Mod 30: a) în trei puncte; b) în patru puncte

ANEXA A2

În această anexă sunt prezentate răspunsurile armonice rezultate în urma analizei armonice din capitolul 4.

A2.1. Analiza armonică a sistemului original

Mod	Frecvență [Hz]	C16	C15	C6	C5	C11	C10
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	5.85E-07	4.22E-07	4.53E-07	3.13E-07	2.88E-07	1.70E-07
2	299.39	1.12E-06	8.43E-07	8.68E-07	6.02E-07	5.18E-07	2.92E-07
3	360.44	2.14E-06	1.69E-06	1.68E-06	1.17E-06	9.50E-07	5.17E-07
4	388.94	4.85E-06	3.95E-06	3.81E-06	2.67E-06	2.08E-06	1.10E-06
5	400.31	1.09E-05	9.04E-06	8.60E-06	6.04E-06	4.58E-06	2.40E-06
6	404.56	1.77E-05	1.47E-05	1.39E-05	9.79E-06	7.35E-06	3.82E-06
7	406.11	1.99E-05	1.67E-05	1.57E-05	1.10E-05	8.27E-06	4.29E-06
8	406.67	2.02E-05	1.70E-05	1.60E-05	1.12E-05	8.39E-06	4.35E-06
9	406.87	2.03E-05	1.70E-05	1.60E-05	1.12E-05	8.40E-06	4.35E-06
10	406.95	2.03E-05	1.70E-05	1.60E-05	1.12E-05	8.40E-06	4.35E-06
11	406.99	2.03E-05	1.70E-05	1.60E-05	1.12E-05	8.40E-06	4.35E-06
12	407.03	2.03E-05	1.70E-05	1.60E-05	1.12E-05	8.39E-06	4.35E-06
13	407.1	2.02E-05	1.70E-05	1.60E-05	1.12E-05	8.39E-06	4.34E-06
14	407.3	2.02E-05	1.69E-05	1.59E-05	1.12E-05	8.35E-06	4.32E-06
15	407.86	1.97E-05	1.65E-05	1.55E-05	1.09E-05	8.15E-06	4.22E-06
16	409.43	1.71E-05	1.44E-05	1.35E-05	9.52E-06	7.06E-06	3.64E-06
17	413.78	1.00E-05	8.52E-06	7.93E-06	5.59E-06	4.10E-06	2.10E-06
18	425.88	3.84E-06	3.35E-06	3.04E-06	2.16E-06	1.52E-06	7.58E-07
19	459.55	1.07E-06	1.07E-06	8.67E-07	6.30E-07	3.58E-07	1.56E-07
20	510.01	1.62E-07	3.67E-07	1.54E-07	1.38E-07	6.58E-08	6.96E-08
21	542.92	2.82E-07	1.24E-07	1.84E-07	8.45E-08	2.81E-07	1.92E-07
22	585.85	1.55E-06	4.46E-07	1.13E-06	6.68E-07	1.02E-06	6.23E-07
23	602.98	4.16E-06	1.49E-06	3.06E-06	1.86E-06	2.60E-06	1.54E-06
24	609.38	7.13E-06	2.68E-06	5.26E-06	3.21E-06	4.37E-06	2.57E-06
25	611.72	8.20E-06	3.13E-06	6.07E-06	3.71E-06	5.00E-06	2.94E-06
26	612.56	8.40E-06	3.22E-06	6.21E-06	3.80E-06	5.11E-06	3.00E-06

27	612.87	8.43E-06	3.24E-06	6.24E-06	3.81E-06	5.13E-06	3.00E-06
28	612.98	8.44E-06	3.25E-06	6.24E-06	3.82E-06	5.13E-06	3.01E-06
29	613.04	8.44E-06	3.25E-06	6.24E-06	3.82E-06	5.13E-06	3.01E-06
30	613.1	8.44E-06	3.25E-06	6.24E-06	3.82E-06	5.13E-06	3.01E-06
31	613.21	8.44E-06	3.25E-06	6.25E-06	3.82E-06	5.13E-06	3.00E-06
32	613.51	8.43E-06	3.25E-06	6.24E-06	3.82E-06	5.12E-06	3.00E-06
33	614.36	8.29E-06	3.22E-06	6.14E-06	3.76E-06	5.03E-06	2.94E-06
34	616.71	7.35E-06	2.89E-06	5.45E-06	3.34E-06	4.43E-06	2.59E-06
35	623.26	4.54E-06	1.85E-06	3.37E-06	2.07E-06	2.70E-06	1.56E-06
36	641.49	1.99E-06	8.69E-07	1.48E-06	9.20E-07	1.14E-06	6.49E-07
37	692.21	8.10E-07	3.92E-07	6.11E-07	3.82E-07	4.38E-07	2.36E-07
38	833.35	3.09E-07	1.58E-07	2.37E-07	1.47E-07	1.49E-07	6.69E-08
39	926.48	2.10E-07	1.03E-07	1.63E-07	9.96E-08	9.19E-08	3.24E-08
40	1098.1	1.13E-07	3.81E-08	9.52E-08	5.52E-08	2.89E-08	1.36E-08
41	1184.9	6.40E-08	2.78E-08	7.24E-08	3.96E-08	3.13E-08	6.96E-08
42	1219.6	5.26E-08	1.42E-07	6.06E-08	3.10E-08	1.37E-07	1.79E-07
43	1232.5	1.37E-07	2.78E-07	6.15E-08	3.37E-08	2.60E-07	3.00E-07
44	1237.3	1.84E-07	3.33E-07	6.84E-08	4.04E-08	3.08E-07	3.42E-07
45	1239	1.98E-07	3.46E-07	7.16E-08	4.31E-08	3.19E-07	3.49E-07
46	1239.6	2.02E-07	3.49E-07	7.28E-08	4.41E-08	3.21E-07	3.50E-07
47	1239.8	2.04E-07	3.50E-07	7.31E-08	4.44E-08	3.22E-07	3.50E-07
48	1239.9	2.05E-07	3.50E-07	7.34E-08	4.46E-08	3.22E-07	3.50E-07
49	1240	2.05E-07	3.51E-07	7.36E-08	4.47E-08	3.22E-07	3.50E-07
50	1240.3	2.07E-07	3.51E-07	7.40E-08	4.50E-08	3.23E-07	3.50E-07
51	1240.9	2.10E-07	3.53E-07	7.50E-08	4.59E-08	3.24E-07	3.49E-07
52	1242.6	2.17E-07	3.51E-07	7.75E-08	4.78E-08	3.22E-07	3.43E-07
53	1247.4	2.16E-07	3.22E-07	8.09E-08	5.01E-08	2.93E-07	3.01E-07
54	1260.6	1.72E-07	2.16E-07	7.66E-08	4.62E-08	1.92E-07	1.80E-07
55	1297.5	1.15E-07	1.11E-07	6.48E-08	3.69E-08	9.39E-08	7.06E-08
56	1390.2	7.64E-08	5.68E-08	4.97E-08	2.63E-08	4.10E-08	1.46E-08
57	1472.2	5.88E-08	3.73E-08	3.91E-08	1.91E-08	1.41E-08	2.01E-08
58	1515.2	5.19E-08	2.68E-08	3.23E-08	1.45E-08	4.18E-08	7.13E-08
59	1531.3	4.87E-08	2.99E-08	3.19E-08	1.53E-08	9.72E-08	1.26E-07
60	1537.2	4.60E-08	3.65E-08	3.46E-08	1.80E-08	1.22E-07	1.45E-07
61	1539.3	4.47E-08	3.91E-08	3.59E-08	1.91E-08	1.28E-07	1.49E-07
62	1540.1	4.42E-08	4.00E-08	3.64E-08	1.95E-08	1.30E-07	1.49E-07
63	1540.4	4.41E-08	4.03E-08	3.66E-08	1.97E-08	1.31E-07	1.49E-07

64	1540.5	4.40E-08	4.05E-08	3.66E-08	1.97E-08	1.31E-07	1.49E-07
65	1540.7	4.39E-08	4.06E-08	3.67E-08	1.98E-08	1.31E-07	1.49E-07
66	1540.9	4.37E-08	4.09E-08	3.69E-08	1.99E-08	1.32E-07	1.49E-07
67	1541.7	4.32E-08	4.17E-08	3.73E-08	2.03E-08	1.33E-07	1.49E-07
68	1543.8	4.18E-08	4.34E-08	3.83E-08	2.11E-08	1.34E-07	1.47E-07
69	1549.7	3.89E-08	4.51E-08	3.96E-08	2.19E-08	1.27E-07	1.30E-07
70	1566.2	3.54E-08	3.99E-08	3.70E-08	1.99E-08	9.10E-08	7.78E-08
71	1612	2.62E-08	2.85E-08	2.93E-08	1.48E-08	5.14E-08	2.66E-08
72	1656.8	1.33E-08	2.09E-08	2.24E-08	1.14E-08	3.81E-08	8.45E-09
73	1694.5	1.65E-08	1.42E-08	1.51E-08	8.59E-09	3.11E-08	1.46E-08
74	1744	1.07E-07	1.53E-08	2.43E-08	5.37E-09	2.30E-08	6.71E-08
75	1762.5	2.17E-07	3.97E-08	6.27E-08	1.19E-08	2.33E-08	1.25E-07
76	1769.3	2.64E-07	5.15E-08	8.11E-08	1.59E-08	2.65E-08	1.47E-07
77	1771.7	2.75E-07	5.48E-08	8.63E-08	1.71E-08	2.80E-08	1.52E-07
78	1772.6	2.78E-07	5.58E-08	8.78E-08	1.75E-08	2.85E-08	1.53E-07
79	1772.9	2.78E-07	5.61E-08	8.83E-08	1.76E-08	2.86E-08	1.53E-07
80	1773.1	2.79E-07	5.63E-08	8.85E-08	1.77E-08	2.87E-08	1.53E-07
81	1773.3	2.79E-07	5.65E-08	8.88E-08	1.78E-08	2.88E-08	1.53E-07
82	1773.6	2.80E-07	5.67E-08	8.92E-08	1.79E-08	2.90E-08	1.54E-07
83	1774.5	2.81E-07	5.74E-08	9.03E-08	1.82E-08	2.94E-08	1.54E-07
84	1776.9	2.81E-07	5.85E-08	9.20E-08	1.87E-08	3.04E-08	1.52E-07
85	1783.7	2.61E-07	5.66E-08	8.92E-08	1.86E-08	3.16E-08	1.37E-07
86	1802.7	1.79E-07	4.21E-08	6.73E-08	1.45E-08	2.88E-08	8.76E-08
87	1855.4	9.75E-08	2.37E-08	4.19E-08	8.32E-09	2.22E-08	3.90E-08
88	1985	5.78E-08	7.33E-09	2.69E-08	1.73E-09	1.43E-08	1.25E-08
89	2099.5	4.80E-08	1.17E-08	2.14E-08	3.98E-09	9.74E-09	2.37E-09
...
470	10000	2.83E-09	7.08E-09	6.99E-09	3.85E-09	6.65E-09	3.73E-09

Tabel A2.1. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistemul original, fixare în trei puncte

Mod	Frecvență [Hz]	C16	C15	C6	C5	C11	C10
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	1.27E-07	1.37E-07	9.21E-08	7.84E-08	3.80E-08	3.65E-08
2	492.58	1.92E-07	2.19E-07	1.40E-07	1.22E-07	5.61E-08	5.60E-08
3	593.01	2.63E-07	3.18E-07	1.96E-07	1.81E-07	8.19E-08	9.07E-08
4	639.9	3.48E-07	4.60E-07	2.70E-07	2.83E-07	1.32E-07	1.77E-07
5	658.61	4.37E-07	6.58E-07	3.64E-07	4.57E-07	2.25E-07	3.61E-07
6	665.61	4.78E-07	7.92E-07	4.19E-07	6.05E-07	3.11E-07	5.58E-07
7	668.16	4.58E-07	7.79E-07	4.05E-07	6.23E-07	3.27E-07	6.18E-07
8	669.08	4.40E-07	7.51E-07	3.88E-07	6.11E-07	3.23E-07	6.24E-07
9	669.41	4.33E-07	7.37E-07	3.80E-07	6.04E-07	3.20E-07	6.23E-07
10	669.53	4.30E-07	7.32E-07	3.77E-07	6.01E-07	3.19E-07	6.22E-07
11	669.6	4.28E-07	7.29E-07	3.76E-07	5.99E-07	3.19E-07	6.22E-07
12	669.67	4.27E-07	7.25E-07	3.74E-07	5.98E-07	3.18E-07	6.21E-07
13	669.79	4.24E-07	7.20E-07	3.71E-07	5.94E-07	3.16E-07	6.20E-07
14	670.12	4.15E-07	7.02E-07	3.62E-07	5.84E-07	3.12E-07	6.16E-07
15	671.04	3.90E-07	6.48E-07	3.33E-07	5.49E-07	2.96E-07	5.98E-07
16	673.61	3.28E-07	4.80E-07	2.54E-07	4.23E-07	2.35E-07	5.09E-07
17	680.77	3.08E-07	2.55E-07	1.82E-07	1.64E-07	1.00E-07	2.79E-07
18	700.68	4.23E-07	4.07E-07	2.76E-07	1.38E-07	3.73E-08	8.06E-08
19	728.77	6.31E-07	6.78E-07	4.33E-07	2.83E-07	9.47E-08	1.39E-08
20	752.98	1.03E-06	1.16E-06	7.19E-07	5.04E-07	1.74E-07	4.65E-08
21	775	2.37E-06	2.73E-06	1.67E-06	1.21E-06	4.18E-07	1.52E-07
22	783.24	3.87E-06	4.50E-06	2.73E-06	2.00E-06	6.86E-07	2.65E-07
23	786.24	4.38E-06	5.10E-06	3.10E-06	2.27E-06	7.78E-07	3.05E-07
24	787.32	4.46E-06	5.20E-06	3.15E-06	2.31E-06	7.92E-07	3.13E-07
25	787.71	4.47E-06	5.21E-06	3.16E-06	2.32E-06	7.94E-07	3.14E-07
26	787.85	4.47E-06	5.21E-06	3.16E-06	2.32E-06	7.94E-07	3.14E-07
27	787.93	4.47E-06	5.21E-06	3.16E-06	2.32E-06	7.94E-07	3.14E-07
28	788.01	4.47E-06	5.21E-06	3.16E-06	2.32E-06	7.94E-07	3.14E-07
29	788.15	4.46E-06	5.21E-06	3.16E-06	2.32E-06	7.93E-07	3.14E-07
30	788.54	4.45E-06	5.19E-06	3.15E-06	2.31E-06	7.91E-07	3.14E-07
31	789.63	4.35E-06	5.08E-06	3.08E-06	2.26E-06	7.74E-07	3.09E-07
32	792.66	3.79E-06	4.45E-06	2.69E-06	1.98E-06	6.76E-07	2.73E-07
33	801.08	2.24E-06	2.65E-06	1.59E-06	1.18E-06	4.00E-07	1.67E-07
34	824.5	8.85E-07	1.07E-06	6.31E-07	4.73E-07	1.57E-07	6.75E-08
35	889.7	2.85E-07	3.65E-07	2.06E-07	1.57E-07	4.67E-08	1.75E-08

140 Anexă - A2

36	1071.1	5.62E-08	9.85E-08	4.37E-08	3.34E-08	2.03E-09	8.62E-09
37	1171.1	1.79E-08	5.63E-08	1.71E-08	1.30E-08	6.34E-09	1.48E-08
38	1376.4	3.77E-08	5.74E-09	1.91E-08	1.40E-08	1.85E-08	2.74E-08
39	1485.3	7.70E-08	2.27E-08	4.20E-08	3.01E-08	2.68E-08	3.99E-08
40	1528.7	1.08E-07	3.85E-08	5.85E-08	4.15E-08	3.23E-08	4.93E-08
41	1544.9	1.22E-07	4.58E-08	6.58E-08	4.64E-08	3.46E-08	5.47E-08
42	1550.9	1.19E-07	4.77E-08	6.44E-08	4.54E-08	3.46E-08	5.74E-08
43	1553	1.16E-07	4.81E-08	6.28E-08	4.43E-08	3.44E-08	5.86E-08
44	1553.8	1.14E-07	4.82E-08	6.21E-08	4.38E-08	3.43E-08	5.90E-08
45	1554.1	1.14E-07	4.83E-08	6.19E-08	4.36E-08	3.43E-08	5.91E-08
46	1554.2	1.14E-07	4.83E-08	6.17E-08	4.35E-08	3.42E-08	5.92E-08
47	1554.4	1.13E-07	4.83E-08	6.16E-08	4.34E-08	3.42E-08	5.93E-08
48	1554.6	1.13E-07	4.84E-08	6.13E-08	4.32E-08	3.42E-08	5.94E-08
49	1555.4	1.11E-07	4.85E-08	6.05E-08	4.27E-08	3.41E-08	5.99E-08
50	1557.6	1.06E-07	4.89E-08	5.82E-08	4.11E-08	3.39E-08	6.11E-08
51	1563.5	9.49E-08	5.07E-08	5.33E-08	3.76E-08	3.36E-08	6.45E-08
52	1580.1	9.83E-08	6.05E-08	5.61E-08	3.95E-08	3.62E-08	7.56E-08
53	1598.3	1.18E-07	7.63E-08	6.61E-08	4.65E-08	4.05E-08	9.47E-08
54	1615.5	1.39E-07	9.80E-08	7.62E-08	5.38E-08	4.54E-08	1.28E-07
55	1632.7	1.61E-07	1.26E-07	8.80E-08	6.17E-08	5.05E-08	1.85E-07
56	1638.9	1.66E-07	1.26E-07	9.35E-08	6.41E-08	5.09E-08	1.99E-07
57	1641.2	1.67E-07	1.23E-07	9.57E-08	6.48E-08	5.07E-08	1.98E-07
58	1642	1.67E-07	1.21E-07	9.66E-08	6.51E-08	5.06E-08	1.97E-07
59	1642.3	1.67E-07	1.20E-07	9.69E-08	6.52E-08	5.05E-08	1.97E-07
60	1642.5	1.68E-07	1.20E-07	9.70E-08	6.53E-08	5.05E-08	1.96E-07
61	1642.6	1.68E-07	1.20E-07	9.72E-08	6.53E-08	5.05E-08	1.96E-07
62	1642.9	1.68E-07	1.19E-07	9.75E-08	6.54E-08	5.05E-08	1.95E-07
63	1643.7	1.68E-07	1.16E-07	9.83E-08	6.57E-08	5.03E-08	1.93E-07
64	1646	1.69E-07	1.09E-07	1.01E-07	6.65E-08	5.00E-08	1.85E-07
65	1652.3	1.73E-07	8.75E-08	1.07E-07	6.92E-08	5.00E-08	1.51E-07
66	1669.9	2.03E-07	7.43E-08	1.26E-07	8.07E-08	5.65E-08	6.98E-08
67	1713	3.45E-07	1.58E-07	2.07E-07	1.31E-07	8.92E-08	2.58E-08
68	1754.3	7.63E-07	3.89E-07	4.51E-07	2.81E-07	1.83E-07	8.75E-08
69	1772.9	1.28E-06	6.71E-07	7.50E-07	4.63E-07	2.97E-07	1.58E-07
70	1779.7	1.46E-06	7.74E-07	8.55E-07	5.25E-07	3.34E-07	1.83E-07
71	1782.2	1.49E-06	7.92E-07	8.73E-07	5.35E-07	3.40E-07	1.87E-07
72	1783.1	1.49E-06	7.96E-07	8.75E-07	5.36E-07	3.40E-07	1.88E-07

73	1783.4	1.49E-06	7.96E-07	8.75E-07	5.36E-07	3.40E-07	1.89E-07
74	1783.6	1.49E-06	7.97E-07	8.75E-07	5.36E-07	3.40E-07	1.89E-07
75	1783.7	1.49E-06	7.97E-07	8.75E-07	5.36E-07	3.40E-07	1.89E-07
76	1784	1.49E-06	7.97E-07	8.75E-07	5.35E-07	3.39E-07	1.89E-07
77	1784.9	1.49E-06	7.96E-07	8.73E-07	5.34E-07	3.38E-07	1.89E-07
78	1787.4	1.46E-06	7.84E-07	8.56E-07	5.23E-07	3.30E-07	1.86E-07
79	1794.2	1.29E-06	6.95E-07	7.52E-07	4.57E-07	2.87E-07	1.64E-07
80	1813.3	7.78E-07	4.30E-07	4.54E-07	2.71E-07	1.67E-07	9.98E-08
81	1866.3	3.26E-07	1.89E-07	1.88E-07	1.07E-07	6.23E-08	3.84E-08
82	1907.1	2.23E-07	1.33E-07	1.29E-07	6.90E-08	3.83E-08	2.28E-08
83	1940.6	1.77E-07	1.08E-07	1.02E-07	5.11E-08	2.72E-08	1.49E-08
84	1997.3	1.29E-07	8.36E-08	7.51E-08	3.04E-08	1.48E-08	6.50E-09
85	2018.5	1.18E-07	7.68E-08	6.82E-08	3.06E-08	1.48E-08	1.06E-08
86	2026.3	1.17E-07	7.33E-08	6.57E-08	3.56E-08	1.73E-08	1.35E-08
87	2029.1	1.17E-07	7.18E-08	6.47E-08	3.77E-08	1.82E-08	1.43E-08
88	2030.1	1.17E-07	7.12E-08	6.44E-08	3.83E-08	1.85E-08	1.45E-08
89	2030.4	1.17E-07	7.10E-08	6.43E-08	3.86E-08	1.86E-08	1.46E-08
...
436	10000	7.18E-09	2.77E-09	6.60E-09	3.83E-09	4.56E-09	2.90E-09

Tabel A2.2. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistemul original, fixare în patru puncte

A2.2. Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare

Mod	Frecvență [Hz]	C16	C15	C6	C5	C11	C10
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	2.43E-07	1.83E-07	2.07E-07	1.43E-07	1.31E-07	7.41E-08
2	302.71	4.56E-07	3.62E-07	4.02E-07	2.78E-07	2.38E-07	1.30E-07
3	364.43	8.62E-07	7.19E-07	7.82E-07	5.45E-07	4.42E-07	2.34E-07
4	393.24	1.93E-06	1.67E-06	1.79E-06	1.25E-06	9.76E-07	5.05E-07
5	404.74	4.31E-06	3.82E-06	4.06E-06	2.85E-06	2.17E-06	1.11E-06
6	409.04	6.95E-06	6.21E-06	6.57E-06	4.62E-06	3.49E-06	1.77E-06
7	410.61	7.84E-06	7.03E-06	7.42E-06	5.22E-06	3.92E-06	1.99E-06
8	411.18	7.96E-06	7.15E-06	7.55E-06	5.30E-06	3.99E-06	2.02E-06
9	411.38	7.97E-06	7.16E-06	7.56E-06	5.31E-06	3.99E-06	2.02E-06
10	411.45	7.97E-06	7.16E-06	7.56E-06	5.31E-06	3.99E-06	2.02E-06
11	411.49	7.97E-06	7.16E-06	7.55E-06	5.31E-06	3.99E-06	2.02E-06
12	411.54	7.96E-06	7.16E-06	7.55E-06	5.31E-06	3.99E-06	2.02E-06
13	411.61	7.96E-06	7.15E-06	7.55E-06	5.31E-06	3.98E-06	2.02E-06
14	411.81	7.93E-06	7.13E-06	7.52E-06	5.29E-06	3.97E-06	2.01E-06
15	412.38	7.74E-06	6.97E-06	7.35E-06	5.17E-06	3.87E-06	1.96E-06
16	413.96	6.72E-06	6.07E-06	6.40E-06	4.50E-06	3.36E-06	1.70E-06
17	418.36	3.92E-06	3.58E-06	3.76E-06	2.65E-06	1.95E-06	9.83E-07
18	430.59	1.48E-06	1.40E-06	1.45E-06	1.03E-06	7.30E-07	3.60E-07
19	464.64	3.91E-07	4.37E-07	4.24E-07	3.07E-07	1.82E-07	8.13E-08
20	514.66	3.18E-08	1.41E-07	9.43E-08	7.96E-08	1.64E-08	1.94E-08
21	547.15	1.69E-07	3.43E-08	5.66E-08	2.23E-08	1.06E-07	7.06E-08
22	590.41	7.57E-07	2.44E-07	4.60E-07	2.69E-07	4.24E-07	2.47E-07
23	607.68	1.99E-06	7.60E-07	1.28E-06	7.72E-07	1.09E-06	6.19E-07
24	614.13	3.38E-06	1.35E-06	2.22E-06	1.34E-06	1.85E-06	1.04E-06
25	616.49	3.89E-06	1.57E-06	2.56E-06	1.56E-06	2.12E-06	1.19E-06
26	617.34	3.97E-06	1.62E-06	2.62E-06	1.60E-06	2.16E-06	1.21E-06
27	617.64	3.99E-06	1.62E-06	2.64E-06	1.60E-06	2.17E-06	1.21E-06
28	617.75	3.99E-06	1.63E-06	2.64E-06	1.60E-06	2.17E-06	1.21E-06
29	617.82	3.99E-06	1.63E-06	2.64E-06	1.60E-06	2.17E-06	1.22E-06
30	617.88	3.99E-06	1.63E-06	2.64E-06	1.61E-06	2.17E-06	1.22E-06
31	617.99	3.99E-06	1.63E-06	2.64E-06	1.61E-06	2.17E-06	1.21E-06
32	618.29	3.99E-06	1.63E-06	2.64E-06	1.60E-06	2.17E-06	1.21E-06

A2.2 – Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice 143 aplicate pe condensatoare

33	619.15	3.92E-06	1.61E-06	2.60E-06	1.58E-06	2.13E-06	1.19E-06
34	621.52	3.47E-06	1.44E-06	2.31E-06	1.41E-06	1.88E-06	1.05E-06
35	628.12	2.13E-06	9.12E-07	1.44E-06	8.80E-07	1.15E-06	6.35E-07
36	646.49	9.22E-07	4.21E-07	6.39E-07	3.95E-07	4.91E-07	2.66E-07
37	697.61	3.69E-07	1.85E-07	2.68E-07	1.67E-07	1.91E-07	9.83E-08
38	839.85	1.39E-07	7.36E-08	1.06E-07	6.58E-08	6.63E-08	2.88E-08
39	947.43	9.02E-08	4.61E-08	6.99E-08	4.27E-08	3.91E-08	1.31E-08
40	1131	5.00E-08	1.79E-08	4.07E-08	2.36E-08	1.24E-08	5.42E-09
41	1220.4	3.44E-08	8.41E-09	3.15E-08	1.72E-08	1.19E-08	2.70E-08
42	1256.1	2.45E-08	5.14E-08	2.72E-08	1.39E-08	5.42E-08	6.88E-08
43	1269.4	3.63E-08	1.03E-07	2.69E-08	1.44E-08	1.03E-07	1.15E-07
44	1274.3	4.85E-08	1.25E-07	2.88E-08	1.66E-08	1.23E-07	1.31E-07
45	1276.1	5.28E-08	1.30E-07	2.98E-08	1.76E-08	1.27E-07	1.33E-07
46	1276.7	5.42E-08	1.31E-07	3.01E-08	1.79E-08	1.28E-07	1.34E-07
47	1276.9	5.47E-08	1.31E-07	3.03E-08	1.80E-08	1.29E-07	1.34E-07
48	1277	5.49E-08	1.31E-07	3.03E-08	1.81E-08	1.29E-07	1.34E-07
49	1277.2	5.52E-08	1.32E-07	3.04E-08	1.82E-08	1.29E-07	1.34E-07
50	1277.4	5.56E-08	1.32E-07	3.05E-08	1.83E-08	1.29E-07	1.34E-07
51	1278	5.68E-08	1.32E-07	3.08E-08	1.86E-08	1.29E-07	1.33E-07
52	1279.8	5.94E-08	1.32E-07	3.16E-08	1.93E-08	1.29E-07	1.31E-07
53	1284.7	6.17E-08	1.22E-07	3.27E-08	2.02E-08	1.17E-07	1.15E-07
54	1298.4	5.41E-08	8.28E-08	3.13E-08	1.88E-08	7.72E-08	6.82E-08
55	1336.3	4.08E-08	4.35E-08	2.71E-08	1.54E-08	3.79E-08	2.62E-08
56	1425.8	2.98E-08	2.35E-08	2.14E-08	1.13E-08	1.71E-08	5.24E-09
57	1504.7	2.40E-08	1.60E-08	1.72E-08	8.42E-09	6.23E-09	8.01E-09
58	1548.7	2.16E-08	1.18E-08	1.43E-08	6.42E-09	1.69E-08	2.76E-08
59	1565.2	2.05E-08	1.24E-08	1.41E-08	6.78E-09	3.96E-08	4.79E-08
60	1571.2	1.92E-08	1.46E-08	1.52E-08	7.99E-09	4.98E-08	5.50E-08
61	1573.3	1.86E-08	1.55E-08	1.58E-08	8.50E-09	5.25E-08	5.62E-08
62	1574.1	1.84E-08	1.58E-08	1.60E-08	8.67E-09	5.32E-08	5.64E-08
63	1574.4	1.83E-08	1.60E-08	1.61E-08	8.73E-09	5.35E-08	5.64E-08
64	1574.6	1.82E-08	1.60E-08	1.61E-08	8.77E-09	5.36E-08	5.64E-08
65	1574.7	1.82E-08	1.61E-08	1.61E-08	8.80E-09	5.37E-08	5.64E-08
66	1575	1.81E-08	1.62E-08	1.62E-08	8.86E-09	5.39E-08	5.64E-08
67	1575.8	1.79E-08	1.64E-08	1.64E-08	9.01E-09	5.43E-08	5.63E-08
68	1577.9	1.72E-08	1.71E-08	1.68E-08	9.36E-09	5.49E-08	5.53E-08

69	1584	1.58E-08	1.77E-08	1.74E-08	9.76E-09	5.20E-08	4.85E-08
70	1600.8	1.43E-08	1.59E-08	1.63E-08	8.87E-09	3.74E-08	2.85E-08
71	1647.6	1.11E-08	1.16E-08	1.30E-08	6.70E-09	2.10E-08	8.75E-09
72	1692.4	6.17E-09	8.68E-09	1.02E-08	5.34E-09	1.54E-08	2.81E-09
73	1729.9	5.48E-09	6.05E-09	7.15E-09	4.25E-09	1.23E-08	7.92E-09
74	1780.5	3.89E-08	5.88E-09	9.68E-09	2.64E-09	8.35E-09	3.11E-08
75	1799.4	8.08E-08	1.53E-08	2.56E-08	3.97E-09	1.01E-08	5.64E-08
76	1806.3	9.85E-08	2.00E-08	3.33E-08	5.27E-09	1.28E-08	6.59E-08
77	1808.8	1.03E-07	2.13E-08	3.55E-08	5.70E-09	1.38E-08	6.78E-08
78	1809.7	1.04E-07	2.17E-08	3.62E-08	5.84E-09	1.42E-08	6.82E-08
79	1810	1.04E-07	2.18E-08	3.64E-08	5.89E-09	1.43E-08	6.83E-08
80	1810.2	1.05E-07	2.19E-08	3.65E-08	5.91E-09	1.43E-08	6.83E-08
81	1810.4	1.05E-07	2.20E-08	3.66E-08	5.94E-09	1.44E-08	6.84E-08
82	1810.7	1.05E-07	2.21E-08	3.68E-08	5.98E-09	1.45E-08	6.84E-08
83	1811.6	1.06E-07	2.24E-08	3.73E-08	6.09E-09	1.48E-08	6.84E-08
84	1814.1	1.06E-07	2.28E-08	3.81E-08	6.32E-09	1.54E-08	6.76E-08
85	1821.1	9.85E-08	2.21E-08	3.71E-08	6.43E-09	1.60E-08	6.05E-08
86	1840.4	6.83E-08	1.66E-08	2.84E-08	5.28E-09	1.40E-08	3.79E-08
87	1894.2	3.78E-08	9.34E-09	1.80E-08	3.20E-09	1.02E-08	1.63E-08
88	2044	2.22E-08	2.04E-09	1.14E-08	3.56E-10	5.95E-09	3.84E-09
89	2056.9	2.17E-08	1.55E-09	1.11E-08	3.36E-10	5.69E-09	3.28E-09
...
458	10000	1.68E-09	4.07E-09	2.40E-09	1.87E-09	2.43E-09	1.77E-09

Tabel A2.3. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistem după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, fixare în trei puncte

A2.2 – Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice 145 aplicate pe condensatoare

Mod	Frecvență [Hz]	C16	C15	C6	C5	C11	C10
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	5.24E-08	6.11E-08	4.21E-08	3.54E-08	1.75E-08	1.77E-08
2	504.53	8.08E-08	1.00E-07	6.56E-08	5.67E-08	2.65E-08	2.79E-08
3	607.4	1.14E-07	1.50E-07	9.41E-08	8.60E-08	3.98E-08	4.65E-08
4	655.43	1.59E-07	2.27E-07	1.34E-07	1.39E-07	6.61E-08	9.28E-08
5	674.6	2.11E-07	3.38E-07	1.85E-07	2.28E-07	1.15E-07	1.93E-07
6	681.77	2.40E-07	4.19E-07	2.16E-07	3.04E-07	1.60E-07	3.00E-07
7	684.38	2.31E-07	4.17E-07	2.10E-07	3.15E-07	1.70E-07	3.33E-07
8	685.32	2.22E-07	4.04E-07	2.02E-07	3.09E-07	1.68E-07	3.37E-07
9	685.66	2.18E-07	3.97E-07	1.98E-07	3.06E-07	1.67E-07	3.36E-07
10	685.78	2.16E-07	3.94E-07	1.97E-07	3.05E-07	1.66E-07	3.36E-07
11	685.85	2.15E-07	3.93E-07	1.96E-07	3.04E-07	1.66E-07	3.36E-07
12	685.92	2.14E-07	3.91E-07	1.95E-07	3.03E-07	1.66E-07	3.36E-07
13	686.04	2.12E-07	3.88E-07	1.93E-07	3.01E-07	1.65E-07	3.35E-07
14	686.38	2.07E-07	3.80E-07	1.88E-07	2.96E-07	1.63E-07	3.33E-07
15	687.33	1.92E-07	3.52E-07	1.74E-07	2.79E-07	1.55E-07	3.23E-07
16	689.96	1.51E-07	2.61E-07	1.31E-07	2.16E-07	1.24E-07	2.76E-07
17	697.29	1.23E-07	1.22E-07	8.96E-08	8.49E-08	5.39E-08	1.53E-07
18	717.69	1.86E-07	1.96E-07	1.43E-07	7.10E-08	1.88E-08	4.59E-08
19	739.03	2.70E-07	3.14E-07	2.13E-07	1.34E-07	4.35E-08	1.38E-08
20	757.07	4.02E-07	4.88E-07	3.21E-07	2.17E-07	7.42E-08	1.32E-08
21	779.22	9.35E-07	1.17E-06	7.52E-07	5.33E-07	1.85E-07	6.15E-08
22	787.49	1.53E-06	1.93E-06	1.23E-06	8.84E-07	3.07E-07	1.13E-07
23	790.51	1.73E-06	2.20E-06	1.40E-06	1.01E-06	3.49E-07	1.33E-07
24	791.6	1.76E-06	2.24E-06	1.42E-06	1.03E-06	3.55E-07	1.37E-07
25	791.99	1.77E-06	2.25E-06	1.43E-06	1.03E-06	3.56E-07	1.37E-07
26	792.14	1.77E-06	2.25E-06	1.43E-06	1.03E-06	3.56E-07	1.37E-07
27	792.21	1.77E-06	2.25E-06	1.43E-06	1.03E-06	3.56E-07	1.38E-07
28	792.29	1.77E-06	2.25E-06	1.42E-06	1.03E-06	3.56E-07	1.38E-07
29	792.44	1.76E-06	2.24E-06	1.42E-06	1.03E-06	3.56E-07	1.38E-07
30	792.83	1.76E-06	2.24E-06	1.42E-06	1.02E-06	3.55E-07	1.38E-07
31	793.92	1.72E-06	2.19E-06	1.39E-06	1.00E-06	3.48E-07	1.36E-07
32	796.96	1.50E-06	1.92E-06	1.21E-06	8.80E-07	3.04E-07	1.22E-07
33	805.43	8.89E-07	1.15E-06	7.20E-07	5.27E-07	1.81E-07	7.65E-08
34	828.99	3.51E-07	4.64E-07	2.86E-07	2.13E-07	7.18E-08	3.27E-08

146 Anexă - A2

35	894.53	1.13E-07	1.60E-07	9.37E-08	7.13E-08	2.18E-08	9.39E-09
36	1076.9	2.14E-08	4.30E-08	1.98E-08	1.55E-08	1.18E-09	3.45E-09
37	1188.1	4.51E-09	2.28E-08	6.55E-09	5.44E-09	3.02E-09	6.79E-09
38	1402.8	2.03E-08	1.76E-09	1.13E-08	7.22E-09	8.96E-09	1.32E-08
39	1513.8	4.09E-08	1.62E-08	2.46E-08	1.55E-08	1.34E-08	1.96E-08
40	1558	5.96E-08	2.72E-08	3.62E-08	2.20E-08	1.66E-08	2.46E-08
41	1574.6	6.92E-08	3.27E-08	4.21E-08	2.50E-08	1.79E-08	2.75E-08
42	1580.6	6.80E-08	3.36E-08	4.13E-08	2.44E-08	1.76E-08	2.90E-08
43	1582.8	6.61E-08	3.35E-08	4.02E-08	2.36E-08	1.74E-08	2.96E-08
44	1583.6	6.52E-08	3.35E-08	3.96E-08	2.32E-08	1.72E-08	2.98E-08
45	1583.9	6.49E-08	3.34E-08	3.94E-08	2.31E-08	1.72E-08	2.99E-08
46	1584	6.47E-08	3.34E-08	3.93E-08	2.30E-08	1.72E-08	3.00E-08
47	1584.2	6.45E-08	3.34E-08	3.92E-08	2.30E-08	1.71E-08	3.00E-08
48	1584.5	6.42E-08	3.34E-08	3.90E-08	2.28E-08	1.71E-08	3.01E-08
49	1585.3	6.31E-08	3.33E-08	3.83E-08	2.24E-08	1.70E-08	3.03E-08
50	1587.4	6.01E-08	3.31E-08	3.65E-08	2.13E-08	1.66E-08	3.10E-08
51	1593.5	5.29E-08	3.33E-08	3.21E-08	1.85E-08	1.60E-08	3.30E-08
52	1610.5	5.51E-08	4.06E-08	3.33E-08	1.85E-08	1.70E-08	3.93E-08
53	1623.3	6.54E-08	5.02E-08	3.92E-08	2.08E-08	1.84E-08	4.64E-08
54	1635.4	7.72E-08	6.28E-08	4.58E-08	2.30E-08	1.97E-08	5.66E-08
55	1652.8	9.54E-08	8.73E-08	5.57E-08	2.81E-08	2.28E-08	7.89E-08
56	1659.1	9.62E-08	9.08E-08	5.68E-08	3.25E-08	2.56E-08	8.29E-08
57	1661.4	9.46E-08	8.92E-08	5.64E-08	3.45E-08	2.69E-08	8.20E-08
58	1662.2	9.37E-08	8.82E-08	5.61E-08	3.53E-08	2.74E-08	8.12E-08
59	1662.5	9.34E-08	8.78E-08	5.60E-08	3.56E-08	2.75E-08	8.09E-08
60	1662.7	9.32E-08	8.76E-08	5.60E-08	3.57E-08	2.76E-08	8.07E-08
61	1662.8	9.30E-08	8.73E-08	5.59E-08	3.59E-08	2.77E-08	8.05E-08
62	1663.1	9.27E-08	8.68E-08	5.58E-08	3.61E-08	2.79E-08	8.02E-08
63	1663.9	9.16E-08	8.54E-08	5.55E-08	3.69E-08	2.84E-08	7.90E-08
64	1666.2	8.86E-08	8.04E-08	5.47E-08	3.89E-08	2.97E-08	7.48E-08
65	1672.6	8.17E-08	6.28E-08	5.36E-08	4.36E-08	3.27E-08	5.90E-08
66	1690.4	9.37E-08	3.70E-08	6.43E-08	5.26E-08	3.85E-08	2.51E-08
67	1719.4	1.55E-07	6.73E-08	1.03E-07	7.57E-08	5.36E-08	2.28E-08
68	1747	2.88E-07	1.43E-07	1.89E-07	1.30E-07	8.95E-08	5.18E-08
69	1765.6	4.89E-07	2.57E-07	3.20E-07	2.14E-07	1.44E-07	9.32E-08
70	1772.3	5.61E-07	3.00E-07	3.66E-07	2.43E-07	1.62E-07	1.08E-07
71	1774.8	5.74E-07	3.08E-07	3.74E-07	2.47E-07	1.64E-07	1.11E-07

A2.2 – Analiza armonică a sistemului după atenuarea solicitării mecanice 147 aplicate pe condensatoare

72	1775.7	5.76E-07	3.10E-07	3.75E-07	2.48E-07	1.65E-07	1.11E-07
73	1776	5.76E-07	3.10E-07	3.75E-07	2.48E-07	1.65E-07	1.11E-07
74	1776.2	5.76E-07	3.10E-07	3.75E-07	2.48E-07	1.65E-07	1.11E-07
75	1776.3	5.76E-07	3.10E-07	3.75E-07	2.48E-07	1.65E-07	1.11E-07
76	1776.7	5.76E-07	3.11E-07	3.75E-07	2.47E-07	1.64E-07	1.12E-07
77	1777.5	5.75E-07	3.11E-07	3.75E-07	2.47E-07	1.64E-07	1.11E-07
78	1780	5.65E-07	3.07E-07	3.68E-07	2.41E-07	1.60E-07	1.10E-07
79	1786.8	4.99E-07	2.74E-07	3.24E-07	2.11E-07	1.39E-07	9.72E-08
80	1805.8	3.04E-07	1.73E-07	1.97E-07	1.25E-07	8.08E-08	5.91E-08
81	1858.6	1.29E-07	7.80E-08	8.31E-08	4.98E-08	3.02E-08	2.33E-08
82	1912.8	8.10E-08	5.09E-08	5.17E-08	2.89E-08	1.65E-08	1.25E-08
83	1958.6	6.16E-08	3.97E-08	3.92E-08	2.03E-08	1.09E-08	7.78E-09
84	2015.9	4.71E-08	3.15E-08	3.01E-08	1.31E-08	6.33E-09	3.80E-09
85	2037.3	4.34E-08	2.92E-08	2.76E-08	1.23E-08	5.85E-09	4.10E-09
86	2045.1	4.25E-08	2.82E-08	2.66E-08	1.34E-08	6.44E-09	4.96E-09
87	2047.9	4.22E-08	2.78E-08	2.62E-08	1.39E-08	6.69E-09	5.25E-09
88	2048.9	4.21E-08	2.76E-08	2.61E-08	1.41E-08	6.78E-09	5.33E-09
89	2049.3	4.21E-08	2.76E-08	2.60E-08	1.42E-08	6.81E-09	5.36E-09
...
432	10000	4.02E-09	9.27E-10	2.01E-09	1.81E-09	1.70E-09	1.54E-09

Tabel A2.4. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistem după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, fixare în patru puncte

A2.3. Analiza armonică a sistemului după optimizarea de layout

Mod	Frecvență [Hz]	C16.1	C16.2	C15.1	C15.2	C6.1	C6.2
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	2.80E-13	2.83E-13	5.43E-13	5.46E-13	1.56E-12	1.56E-12
2	302.37	1.98E-12	1.98E-12	1.97E-12	1.97E-12	2.56E-12	2.56E-12
3	364.02	7.41E-12	7.41E-12	7.64E-12	7.63E-12	4.28E-12	4.28E-12
4	392.8	2.29E-11	2.29E-11	2.35E-11	2.35E-11	8.59E-12	8.59E-12
5	404.29	5.88E-11	5.88E-11	5.99E-11	5.99E-11	1.80E-11	1.80E-11
6	408.58	1.00E-10	1.00E-10	1.02E-10	1.02E-10	2.83E-11	2.83E-11
7	410.15	1.15E-10	1.15E-10	1.17E-10	1.17E-10	3.15E-11	3.15E-11
8	410.71	1.18E-10	1.18E-10	1.19E-10	1.19E-10	3.19E-11	3.19E-11
9	410.92	1.18E-10	1.18E-10	1.20E-10	1.20E-10	3.19E-11	3.19E-11
10	410.99	1.18E-10	1.18E-10	1.20E-10	1.20E-10	3.19E-11	3.19E-11
11	411.03	1.18E-10	1.18E-10	1.20E-10	1.20E-10	3.18E-11	3.18E-11
12	411.07	1.18E-10	1.18E-10	1.20E-10	1.20E-10	3.18E-11	3.18E-11
13	411.15	1.18E-10	1.18E-10	1.20E-10	1.20E-10	3.18E-11	3.18E-11
14	411.35	1.18E-10	1.18E-10	1.20E-10	1.20E-10	3.16E-11	3.16E-11
15	411.92	1.16E-10	1.16E-10	1.18E-10	1.18E-10	3.07E-11	3.07E-11
16	413.5	1.03E-10	1.03E-10	1.04E-10	1.04E-10	2.64E-11	2.64E-11
17	417.89	6.35E-11	6.35E-11	6.42E-11	6.42E-11	1.48E-11	1.48E-11
18	430.11	2.84E-11	2.84E-11	2.84E-11	2.84E-11	4.93E-12	4.93E-12
19	464.12	1.33E-11	1.33E-11	1.28E-11	1.28E-11	4.27E-13	4.27E-13
20	515.04	1.04E-11	1.04E-11	9.16E-12	9.16E-12	1.62E-12	1.62E-12
21	548.25	1.15E-11	1.15E-11	9.18E-12	9.18E-12	3.02E-12	3.02E-12
22	591.6	2.13E-11	2.13E-11	1.37E-11	1.37E-11	8.57E-12	8.57E-12
23	608.9	4.48E-11	4.48E-11	2.53E-11	2.53E-11	2.07E-11	2.07E-11
24	615.37	7.07E-11	7.07E-11	3.75E-11	3.76E-11	3.44E-11	3.44E-11
25	617.73	7.91E-11	7.91E-11	4.10E-11	4.10E-11	3.92E-11	3.92E-11
26	618.58	8.01E-11	8.01E-11	4.11E-11	4.12E-11	4.00E-11	4.00E-11
27	618.89	8.01E-11	8.01E-11	4.10E-11	4.10E-11	4.01E-11	4.01E-11
28	619	8.01E-11	8.01E-11	4.10E-11	4.10E-11	4.01E-11	4.01E-11
29	619.06	8.00E-11	8.00E-11	4.09E-11	4.09E-11	4.01E-11	4.01E-11
30	619.12	8.00E-11	8.00E-11	4.09E-11	4.09E-11	4.01E-11	4.01E-11
31	619.23	7.99E-11	7.99E-11	4.08E-11	4.08E-11	4.01E-11	4.01E-11
32	619.54	7.95E-11	7.95E-11	4.04E-11	4.04E-11	4.00E-11	4.00E-11

A2.3 – Analiza armonică a sistemului după optimizarea de *layout* 149

33	620.39	7.75E-11	7.75E-11	3.90E-11	3.90E-11	3.92E-11	3.92E-11
34	622.77	6.68E-11	6.68E-11	3.27E-11	3.27E-11	3.44E-11	3.44E-11
35	629.38	3.82E-11	3.82E-11	1.72E-11	1.72E-11	2.07E-11	2.07E-11
36	647.79	1.38E-11	1.38E-11	4.47E-12	4.47E-12	8.54E-12	8.54E-12
37	699.01	3.39E-12	3.39E-12	8.98E-13	9.00E-13	3.12E-12	3.12E-12
38	841.54	1.36E-13	1.39E-13	2.63E-12	2.63E-12	1.02E-12	1.02E-12
39	939.82	7.02E-13	7.05E-13	3.12E-12	3.12E-12	6.48E-13	6.48E-13
40	1116.4	1.49E-12	1.50E-12	4.81E-12	4.82E-12	3.96E-13	3.96E-13
41	1204.7	2.71E-12	2.71E-12	9.00E-12	9.00E-12	5.21E-13	5.21E-13
42	1239.9	5.16E-12	5.17E-12	1.81E-11	1.81E-11	9.92E-13	9.92E-13
43	1253.1	7.69E-12	7.70E-12	2.78E-11	2.78E-11	1.53E-12	1.53E-12
44	1257.9	8.39E-12	8.40E-12	3.07E-11	3.07E-11	1.70E-12	1.70E-12
45	1259.6	8.42E-12	8.43E-12	3.10E-11	3.10E-11	1.72E-12	1.72E-12
46	1260.2	8.39E-12	8.40E-12	3.09E-11	3.09E-11	1.72E-12	1.72E-12
47	1260.5	8.38E-12	8.38E-12	3.09E-11	3.09E-11	1.72E-12	1.72E-12
48	1260.6	8.37E-12	8.37E-12	3.09E-11	3.09E-11	1.72E-12	1.72E-12
49	1260.7	8.36E-12	8.36E-12	3.08E-11	3.09E-11	1.72E-12	1.72E-12
50	1260.9	8.33E-12	8.34E-12	3.08E-11	3.08E-11	1.72E-12	1.72E-12
51	1261.6	8.26E-12	8.27E-12	3.06E-11	3.06E-11	1.71E-12	1.71E-12
52	1263.3	7.97E-12	7.97E-12	2.97E-11	2.97E-11	1.66E-12	1.66E-12
53	1268.1	6.67E-12	6.67E-12	2.52E-11	2.52E-11	1.43E-12	1.43E-12
54	1281.6	3.45E-12	3.46E-12	1.38E-11	1.38E-11	8.21E-13	8.20E-13
55	1319.1	7.72E-13	7.71E-13	4.09E-12	4.09E-12	3.23E-13	3.23E-13
56	1415.3	4.90E-13	4.93E-13	4.61E-13	4.63E-13	1.77E-13	1.77E-13
57	1500.3	7.44E-13	7.47E-13	2.06E-12	2.06E-12	1.66E-13	1.66E-13
58	1544.2	6.90E-13	6.92E-13	3.97E-12	3.97E-12	1.58E-13	1.58E-13
59	1560.6	1.45E-12	1.45E-12	5.56E-12	5.56E-12	4.15E-13	4.14E-13
60	1566.6	2.05E-12	2.05E-12	5.85E-12	5.86E-12	5.84E-13	5.83E-13
61	1568.8	2.26E-12	2.26E-12	5.79E-12	5.79E-12	6.41E-13	6.40E-13
62	1569.5	2.32E-12	2.32E-12	5.74E-12	5.74E-12	6.59E-13	6.59E-13
63	1569.8	2.35E-12	2.35E-12	5.71E-12	5.72E-12	6.66E-13	6.65E-13
64	1570	2.36E-12	2.36E-12	5.70E-12	5.70E-12	6.69E-13	6.68E-13
65	1570.1	2.37E-12	2.37E-12	5.69E-12	5.69E-12	6.72E-13	6.72E-13
66	1570.4	2.40E-12	2.40E-12	5.66E-12	5.66E-12	6.78E-13	6.78E-13
67	1571.2	2.46E-12	2.46E-12	5.58E-12	5.58E-12	6.94E-13	6.93E-13
68	1573.3	2.59E-12	2.59E-12	5.29E-12	5.29E-12	7.29E-13	7.28E-13
69	1579.4	2.76E-12	2.76E-12	4.18E-12	4.18E-12	7.65E-13	7.64E-13

150 Anexă - A2

70	1596.2	2.60E-12	2.60E-12	1.73E-12	1.73E-12	7.03E-13	7.03E-13
71	1642.8	2.60E-12	2.60E-12	9.80E-13	9.83E-13	6.98E-13	6.98E-13
72	1686.4	3.18E-12	3.18E-12	1.78E-12	1.78E-12	8.81E-13	8.81E-13
73	1722.8	4.26E-12	4.27E-12	2.53E-12	2.54E-12	1.22E-12	1.22E-12
74	1773.2	9.25E-12	9.26E-12	4.83E-12	4.84E-12	2.81E-12	2.81E-12
75	1792	1.48E-11	1.48E-11	6.87E-12	6.88E-12	4.59E-12	4.59E-12
76	1798.9	1.66E-11	1.66E-11	7.30E-12	7.31E-12	5.20E-12	5.20E-12
77	1801.4	1.69E-11	1.69E-11	7.24E-12	7.25E-12	5.29E-12	5.29E-12
78	1802.3	1.69E-11	1.69E-11	7.19E-12	7.20E-12	5.30E-12	5.30E-12
79	1802.6	1.69E-11	1.69E-11	7.17E-12	7.18E-12	5.30E-12	5.30E-12
80	1802.8	1.69E-11	1.69E-11	7.15E-12	7.16E-12	5.30E-12	5.30E-12
81	1803	1.68E-11	1.68E-11	7.14E-12	7.15E-12	5.30E-12	5.30E-12
82	1803.3	1.68E-11	1.68E-11	7.11E-12	7.12E-12	5.30E-12	5.30E-12
83	1804.2	1.68E-11	1.68E-11	7.02E-12	7.03E-12	5.28E-12	5.28E-12
84	1806.7	1.63E-11	1.63E-11	6.68E-12	6.69E-12	5.17E-12	5.16E-12
85	1813.6	1.42E-11	1.42E-11	5.36E-12	5.37E-12	4.51E-12	4.51E-12
86	1832.9	8.20E-12	8.20E-12	2.35E-12	2.36E-12	2.67E-12	2.67E-12
87	1886.5	3.05E-12	3.05E-12	7.08E-13	7.09E-13	1.06E-12	1.06E-12
88	1988	1.18E-12	1.18E-12	2.03E-12	2.03E-12	4.37E-13	4.37E-13
89	2076.8	7.72E-13	7.68E-13	3.38E-12	3.38E-12	2.47E-13	2.47E-13
...
459	10000	2.06E-13	2.07E-13	1.07E-13	1.06E-13	3.41E-13	3.42E-13

Tabel A2.5. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistem după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoarele C16.1, C16.2, C15.1, C15.2, C6.1, C6.2, fixare în trei puncte

Mod	Frecvență [Hz]	C5.1	C5.2	C11.1	C11.2	C10.1	C10.2
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	9.44E-13	9.44E-13	1.39E-12	1.39E-12	1.84E-12	1.84E-12
2	302.37	1.62E-12	1.62E-12	9.78E-13	9.81E-13	1.65E-12	1.66E-12
3	364.02	2.81E-12	2.81E-12	1.99E-13	1.98E-13	1.12E-12	1.13E-12
4	392.8	5.84E-12	5.84E-12	3.39E-12	3.38E-12	7.33E-13	7.29E-13
5	404.29	1.25E-11	1.25E-11	1.11E-11	1.11E-11	4.72E-12	4.72E-12
6	408.58	1.98E-11	1.98E-11	2.02E-11	2.02E-11	9.79E-12	9.79E-12
7	410.15	2.21E-11	2.21E-11	2.38E-11	2.38E-11	1.20E-11	1.20E-11
8	410.71	2.24E-11	2.24E-11	2.45E-11	2.45E-11	1.25E-11	1.25E-11
9	410.92	2.24E-11	2.24E-11	2.47E-11	2.47E-11	1.27E-11	1.27E-11
10	410.99	2.24E-11	2.24E-11	2.47E-11	2.47E-11	1.27E-11	1.27E-11
11	411.03	2.24E-11	2.24E-11	2.47E-11	2.47E-11	1.27E-11	1.27E-11
12	411.07	2.24E-11	2.24E-11	2.48E-11	2.48E-11	1.27E-11	1.27E-11
13	411.15	2.23E-11	2.23E-11	2.48E-11	2.48E-11	1.28E-11	1.28E-11
14	411.35	2.22E-11	2.22E-11	2.48E-11	2.48E-11	1.28E-11	1.29E-11
15	411.92	2.16E-11	2.16E-11	2.46E-11	2.46E-11	1.29E-11	1.29E-11
16	413.5	1.86E-11	1.86E-11	2.23E-11	2.23E-11	1.20E-11	1.21E-11
17	417.89	1.06E-11	1.06E-11	1.46E-11	1.46E-11	8.48E-12	8.48E-12
18	430.11	3.68E-12	3.68E-12	7.41E-12	7.41E-12	4.94E-12	4.95E-12
19	464.12	5.27E-13	5.28E-13	4.35E-12	4.35E-12	3.42E-12	3.42E-12
20	515.04	8.06E-13	8.05E-13	3.92E-12	3.93E-12	3.24E-12	3.25E-12
21	548.25	1.68E-12	1.68E-12	4.40E-12	4.40E-12	3.54E-12	3.54E-12
22	591.6	5.07E-12	5.07E-12	7.58E-12	7.58E-12	5.37E-12	5.38E-12
23	608.9	1.25E-11	1.25E-11	1.50E-11	1.50E-11	9.53E-12	9.54E-12
24	615.37	2.08E-11	2.08E-11	2.29E-11	2.29E-11	1.38E-11	1.38E-11
25	617.73	2.37E-11	2.37E-11	2.53E-11	2.54E-11	1.49E-11	1.49E-11
26	618.58	2.42E-11	2.42E-11	2.56E-11	2.56E-11	1.49E-11	1.49E-11
27	618.89	2.43E-11	2.43E-11	2.55E-11	2.55E-11	1.48E-11	1.48E-11
28	619	2.43E-11	2.43E-11	2.55E-11	2.55E-11	1.48E-11	1.48E-11
29	619.06	2.43E-11	2.43E-11	2.55E-11	2.55E-11	1.47E-11	1.47E-11
30	619.12	2.43E-11	2.43E-11	2.55E-11	2.55E-11	1.47E-11	1.47E-11
31	619.23	2.43E-11	2.43E-11	2.54E-11	2.54E-11	1.47E-11	1.47E-11
32	619.54	2.42E-11	2.42E-11	2.52E-11	2.52E-11	1.45E-11	1.45E-11
33	620.39	2.38E-11	2.38E-11	2.45E-11	2.45E-11	1.39E-11	1.39E-11
34	622.77	2.09E-11	2.09E-11	2.08E-11	2.08E-11	1.15E-11	1.15E-11
35	629.38	1.26E-11	1.26E-11	1.14E-11	1.14E-11	5.75E-12	5.74E-12

152 Anexă - A2

36	647.79	5.29E-12	5.29E-12	3.51E-12	3.51E-12	1.08E-12	1.07E-12
37	699.01	2.00E-12	2.00E-12	1.93E-13	1.91E-13	1.01E-12	1.01E-12
38	841.54	7.27E-13	7.28E-13	1.07E-12	1.08E-12	1.74E-12	1.75E-12
39	939.82	5.07E-13	5.08E-13	1.31E-12	1.31E-12	1.93E-12	1.93E-12
40	1116.4	3.90E-13	3.91E-13	1.73E-12	1.73E-12	2.36E-12	2.36E-12
41	1204.7	5.40E-13	5.42E-13	2.47E-12	2.47E-12	3.16E-12	3.17E-12
42	1239.9	9.67E-13	9.69E-13	3.95E-12	3.95E-12	4.73E-12	4.74E-12
43	1253.1	1.42E-12	1.43E-12	5.33E-12	5.33E-12	6.10E-12	6.10E-12
44	1257.9	1.55E-12	1.55E-12	5.56E-12	5.57E-12	6.23E-12	6.23E-12
45	1259.6	1.55E-12	1.56E-12	5.49E-12	5.49E-12	6.09E-12	6.09E-12
46	1260.2	1.55E-12	1.55E-12	5.44E-12	5.44E-12	6.01E-12	6.01E-12
47	1260.5	1.54E-12	1.55E-12	5.41E-12	5.42E-12	5.98E-12	5.98E-12
48	1260.6	1.54E-12	1.55E-12	5.40E-12	5.40E-12	5.96E-12	5.96E-12
49	1260.7	1.54E-12	1.54E-12	5.39E-12	5.39E-12	5.94E-12	5.94E-12
50	1260.9	1.54E-12	1.54E-12	5.36E-12	5.36E-12	5.90E-12	5.90E-12
51	1261.6	1.52E-12	1.53E-12	5.28E-12	5.28E-12	5.79E-12	5.80E-12
52	1263.3	1.47E-12	1.47E-12	5.00E-12	5.00E-12	5.43E-12	5.43E-12
53	1268.1	1.23E-12	1.23E-12	3.95E-12	3.95E-12	4.15E-12	4.15E-12
54	1281.6	6.42E-13	6.43E-13	1.66E-12	1.66E-12	1.56E-12	1.56E-12
55	1319.1	1.66E-13	1.66E-13	4.26E-13	4.28E-13	9.60E-13	9.66E-13
56	1415.3	2.74E-14	2.81E-14	1.11E-12	1.11E-12	1.78E-12	1.79E-12
57	1500.3	1.01E-13	1.01E-13	1.50E-12	1.50E-12	2.26E-12	2.27E-12
58	1544.2	2.49E-13	2.51E-13	2.03E-12	2.03E-12	2.88E-12	2.89E-12
59	1560.6	4.22E-13	4.23E-13	2.38E-12	2.38E-12	3.23E-12	3.24E-12
60	1566.6	4.84E-13	4.85E-13	2.32E-12	2.32E-12	3.09E-12	3.10E-12
61	1568.8	4.96E-13	4.97E-13	2.22E-12	2.23E-12	2.95E-12	2.95E-12
62	1569.5	4.98E-13	4.98E-13	2.18E-12	2.18E-12	2.89E-12	2.89E-12
63	1569.8	4.98E-13	4.99E-13	2.16E-12	2.16E-12	2.86E-12	2.87E-12
64	1570	4.98E-13	4.99E-13	2.15E-12	2.15E-12	2.85E-12	2.85E-12
65	1570.1	4.98E-13	4.99E-13	2.14E-12	2.14E-12	2.84E-12	2.84E-12
66	1570.4	4.98E-13	4.99E-13	2.13E-12	2.13E-12	2.81E-12	2.82E-12
67	1571.2	4.98E-13	4.98E-13	2.07E-12	2.07E-12	2.74E-12	2.74E-12
68	1573.3	4.90E-13	4.91E-13	1.90E-12	1.90E-12	2.51E-12	2.52E-12
69	1579.4	4.36E-13	4.36E-13	1.39E-12	1.39E-12	1.89E-12	1.90E-12
70	1596.2	2.75E-13	2.74E-13	6.70E-13	6.71E-13	1.32E-12	1.33E-12
71	1642.8	1.43E-13	1.42E-13	9.31E-13	9.33E-13	1.79E-12	1.80E-12
72	1686.4	1.34E-13	1.33E-13	1.11E-12	1.11E-12	2.10E-12	2.11E-12

73	1722.8	1.66E-13	1.65E-13	1.21E-12	1.21E-12	2.38E-12	2.38E-12
74	1773.2	3.66E-13	3.64E-13	1.38E-12	1.38E-12	3.15E-12	3.16E-12
75	1792	6.01E-13	5.99E-13	1.43E-12	1.43E-12	3.62E-12	3.63E-12
76	1798.9	6.84E-13	6.82E-13	1.37E-12	1.37E-12	3.50E-12	3.51E-12
77	1801.4	6.98E-13	6.96E-13	1.33E-12	1.33E-12	3.35E-12	3.35E-12
78	1802.3	6.99E-13	6.98E-13	1.31E-12	1.32E-12	3.28E-12	3.29E-12
79	1802.6	7.00E-13	6.98E-13	1.31E-12	1.31E-12	3.25E-12	3.26E-12
80	1802.8	7.00E-13	6.98E-13	1.31E-12	1.31E-12	3.24E-12	3.24E-12
81	1803	7.00E-13	6.98E-13	1.30E-12	1.30E-12	3.22E-12	3.23E-12
82	1803.3	6.99E-13	6.98E-13	1.30E-12	1.30E-12	3.19E-12	3.20E-12
83	1804.2	6.98E-13	6.96E-13	1.28E-12	1.28E-12	3.11E-12	3.12E-12
84	1806.7	6.84E-13	6.83E-13	1.23E-12	1.23E-12	2.85E-12	2.86E-12
85	1813.6	6.01E-13	6.00E-13	1.13E-12	1.14E-12	2.10E-12	2.11E-12
86	1832.9	3.65E-13	3.65E-13	1.12E-12	1.12E-12	1.24E-12	1.25E-12
87	1886.5	1.58E-13	1.58E-13	1.25E-12	1.26E-12	1.74E-12	1.75E-12
88	1988	8.02E-14	8.09E-14	1.37E-12	1.37E-12	2.30E-12	2.31E-12
89	2076.8	5.16E-14	5.25E-14	1.42E-12	1.42E-12	2.80E-12	2.81E-12
...
459	10000	5.78E-13	5.76E-13	2.27E-12	2.27E-12	1.34E-12	1.35E-12

Tabel A2.6. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistem după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoarele C5.1, C5.2, C11.1, C11.2, C10.1, C10.2, fixare în trei puncte

154 Anexă - A2

Mod	Frecvență [Hz]	MLCC 16.1	MLCC 16.2	MLCC 15.1	MLCC 15.2	MLCC 6.1	MLCC 6.2
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	3.77E-12	3.78E-12	4.43E-12	4.43E-12	5.79E-13	5.78E-13
2	507.44	4.98E-12	4.99E-12	6.29E-12	6.30E-12	8.78E-13	8.77E-13
3	610.91	6.41E-12	6.42E-12	8.74E-12	8.75E-12	1.18E-12	1.18E-12
4	659.21	8.62E-12	8.63E-12	1.30E-11	1.30E-11	1.46E-12	1.46E-12
5	678.49	1.19E-11	1.19E-11	2.02E-11	2.02E-11	1.62E-12	1.62E-12
6	685.7	1.41E-11	1.41E-11	2.62E-11	2.62E-11	1.70E-12	1.70E-12
7	688.33	1.38E-11	1.38E-11	2.67E-11	2.67E-11	1.74E-12	1.74E-12
8	689.27	1.33E-11	1.33E-11	2.61E-11	2.61E-11	1.76E-12	1.76E-12
9	689.62	1.31E-11	1.31E-11	2.57E-11	2.57E-11	1.76E-12	1.76E-12
10	689.74	1.30E-11	1.30E-11	2.56E-11	2.56E-11	1.77E-12	1.76E-12
11	689.81	1.29E-11	1.29E-11	2.55E-11	2.55E-11	1.77E-12	1.77E-12
12	689.88	1.28E-11	1.28E-11	2.54E-11	2.54E-11	1.77E-12	1.77E-12
13	690	1.27E-11	1.27E-11	2.53E-11	2.53E-11	1.77E-12	1.77E-12
14	690.34	1.24E-11	1.24E-11	2.48E-11	2.48E-11	1.78E-12	1.77E-12
15	691.29	1.14E-11	1.14E-11	2.32E-11	2.32E-11	1.79E-12	1.79E-12
16	693.94	8.43E-12	8.43E-12	1.76E-11	1.76E-11	1.84E-12	1.84E-12
17	701.32	4.43E-12	4.43E-12	6.71E-12	6.71E-12	1.94E-12	1.94E-12
18	721.83	6.80E-12	6.81E-12	7.01E-12	7.01E-12	2.32E-12	2.32E-12
19	747.53	1.02E-11	1.02E-11	1.26E-11	1.26E-11	3.19E-12	3.19E-12
20	769.54	1.55E-11	1.55E-11	2.06E-11	2.06E-11	4.87E-12	4.87E-12
21	792.05	3.35E-11	3.35E-11	4.75E-11	4.75E-11	1.10E-11	1.10E-11
22	800.46	5.31E-11	5.31E-11	7.71E-11	7.71E-11	1.79E-11	1.79E-11
23	803.53	5.94E-11	5.94E-11	8.70E-11	8.70E-11	2.02E-11	2.02E-11
24	804.64	6.02E-11	6.02E-11	8.84E-11	8.84E-11	2.05E-11	2.05E-11
25	805.04	6.02E-11	6.02E-11	8.85E-11	8.85E-11	2.06E-11	2.06E-11
26	805.18	6.02E-11	6.02E-11	8.85E-11	8.85E-11	2.06E-11	2.06E-11
27	805.26	6.02E-11	6.02E-11	8.85E-11	8.85E-11	2.06E-11	2.06E-11
28	805.34	6.01E-11	6.01E-11	8.85E-11	8.85E-11	2.05E-11	2.05E-11
29	805.49	6.01E-11	6.01E-11	8.84E-11	8.84E-11	2.05E-11	2.05E-11
30	805.88	5.98E-11	5.98E-11	8.81E-11	8.81E-11	2.05E-11	2.05E-11
31	807	5.82E-11	5.82E-11	8.61E-11	8.61E-11	2.00E-11	2.00E-11
32	810.09	5.01E-11	5.02E-11	7.48E-11	7.48E-11	1.74E-11	1.74E-11
33	818.69	2.86E-11	2.86E-11	4.37E-11	4.37E-11	1.02E-11	1.02E-11
34	842.64	9.93E-12	9.93E-12	1.65E-11	1.65E-11	3.97E-12	3.97E-12

A2.3 – Analiza armonică a sistemului după optimizarea de *layout* 155

35	909.26	1.62E-12	1.62E-12	4.27E-12	4.26E-12	1.20E-12	1.20E-12
36	1094.7	1.99E-12	2.00E-12	8.37E-13	8.42E-13	1.14E-13	1.15E-13
37	1192	2.82E-12	2.83E-12	1.84E-12	1.85E-12	9.97E-14	9.84E-14
38	1398.2	4.79E-12	4.80E-12	3.86E-12	3.87E-12	5.15E-13	5.14E-13
39	1508.7	6.84E-12	6.84E-12	5.74E-12	5.75E-12	9.38E-13	9.37E-13
40	1552.9	8.54E-12	8.54E-12	7.23E-12	7.24E-12	1.36E-12	1.35E-12
41	1569.4	9.27E-12	9.27E-12	7.88E-12	7.89E-12	1.58E-12	1.58E-12
42	1575.4	9.09E-12	9.09E-12	7.82E-12	7.83E-12	1.54E-12	1.54E-12
43	1577.5	8.91E-12	8.91E-12	7.72E-12	7.73E-12	1.49E-12	1.49E-12
44	1578.3	8.83E-12	8.83E-12	7.68E-12	7.69E-12	1.46E-12	1.46E-12
45	1578.6	8.80E-12	8.80E-12	7.66E-12	7.67E-12	1.45E-12	1.45E-12
46	1578.8	8.78E-12	8.79E-12	7.65E-12	7.66E-12	1.45E-12	1.45E-12
47	1578.9	8.77E-12	8.77E-12	7.64E-12	7.65E-12	1.44E-12	1.44E-12
48	1579.2	8.74E-12	8.74E-12	7.63E-12	7.63E-12	1.43E-12	1.43E-12
49	1580	8.65E-12	8.66E-12	7.58E-12	7.59E-12	1.40E-12	1.40E-12
50	1582.2	8.42E-12	8.42E-12	7.45E-12	7.46E-12	1.31E-12	1.31E-12
51	1588.2	7.97E-12	7.97E-12	7.25E-12	7.26E-12	1.08E-12	1.07E-12
52	1605.1	8.47E-12	8.48E-12	7.92E-12	7.93E-12	9.82E-13	9.81E-13
53	1628.5	1.01E-11	1.01E-11	9.71E-12	9.72E-12	1.30E-12	1.30E-12
54	1650.8	1.22E-11	1.22E-11	1.23E-11	1.23E-11	1.69E-12	1.68E-12
55	1668.3	1.39E-11	1.39E-11	1.47E-11	1.47E-11	2.01E-12	2.01E-12
56	1674.7	1.39E-11	1.39E-11	1.45E-11	1.46E-11	2.03E-12	2.03E-12
57	1677	1.38E-11	1.38E-11	1.41E-11	1.41E-11	2.01E-12	2.01E-12
58	1677.8	1.37E-11	1.37E-11	1.39E-11	1.39E-11	1.99E-12	1.99E-12
59	1678.1	1.37E-11	1.37E-11	1.38E-11	1.38E-11	1.99E-12	1.99E-12
60	1678.3	1.37E-11	1.37E-11	1.37E-11	1.38E-11	1.99E-12	1.99E-12
61	1678.5	1.36E-11	1.37E-11	1.37E-11	1.37E-11	1.98E-12	1.98E-12
62	1678.8	1.36E-11	1.36E-11	1.36E-11	1.36E-11	1.98E-12	1.98E-12
63	1679.6	1.35E-11	1.35E-11	1.33E-11	1.34E-11	1.96E-12	1.96E-12
64	1681.9	1.33E-11	1.33E-11	1.25E-11	1.26E-11	1.92E-12	1.92E-12
65	1688.4	1.29E-11	1.29E-11	1.04E-11	1.04E-11	1.84E-12	1.84E-12
66	1706.3	1.48E-11	1.48E-11	9.84E-12	9.85E-12	2.14E-12	2.14E-12
67	1745	2.41E-11	2.41E-11	1.78E-11	1.78E-11	3.73E-12	3.73E-12
68	1782	4.87E-11	4.87E-11	3.74E-11	3.74E-11	7.92E-12	7.92E-12
69	1800.9	8.07E-11	8.07E-11	6.26E-11	6.26E-11	1.34E-11	1.34E-11
70	1807.8	9.17E-11	9.18E-11	7.13E-11	7.14E-11	1.54E-11	1.54E-11
71	1810.3	9.35E-11	9.35E-11	7.28E-11	7.28E-11	1.57E-11	1.57E-11

156 Anexă - A2

72	1811.2	9.37E-11	9.38E-11	7.30E-11	7.30E-11	1.58E-11	1.58E-11
73	1811.6	9.38E-11	9.38E-11	7.30E-11	7.31E-11	1.58E-11	1.58E-11
74	1811.7	9.38E-11	9.38E-11	7.30E-11	7.31E-11	1.58E-11	1.58E-11
75	1811.9	9.37E-11	9.38E-11	7.30E-11	7.31E-11	1.58E-11	1.58E-11
76	1812.2	9.37E-11	9.37E-11	7.30E-11	7.30E-11	1.58E-11	1.58E-11
77	1813.1	9.34E-11	9.35E-11	7.28E-11	7.29E-11	1.57E-11	1.57E-11
78	1815.6	9.16E-11	9.16E-11	7.14E-11	7.14E-11	1.55E-11	1.55E-11
79	1822.6	8.03E-11	8.03E-11	6.27E-11	6.27E-11	1.37E-11	1.37E-11
80	1842	4.81E-11	4.81E-11	3.77E-11	3.77E-11	8.35E-12	8.35E-12
81	1893.7	2.01E-11	2.01E-11	1.58E-11	1.58E-11	3.67E-12	3.67E-12
82	1943.2	1.28E-11	1.28E-11	9.79E-12	9.79E-12	2.40E-12	2.40E-12
83	1963.9	1.10E-11	1.10E-11	8.42E-12	8.42E-12	2.11E-12	2.11E-12
84	1971.4	1.03E-11	1.03E-11	8.06E-12	8.06E-12	2.03E-12	2.03E-12
85	1974.1	1.00E-11	1.00E-11	7.95E-12	7.95E-12	2.00E-12	2.00E-12
86	1975.1	9.94E-12	9.94E-12	7.91E-12	7.91E-12	1.99E-12	1.99E-12
87	1975.4	9.90E-12	9.90E-12	7.89E-12	7.90E-12	1.99E-12	1.99E-12
88	1975.6	9.88E-12	9.88E-12	7.88E-12	7.89E-12	1.99E-12	1.99E-12
89	1975.8	9.86E-12	9.86E-12	7.88E-12	7.88E-12	1.99E-12	1.99E-12
...
430	10000	2.90E-12	2.92E-12	8.28E-14	9.03E-14	4.84E-13	4.87E-13

Tabel A2.7. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistem după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoarele C16.1, C16.2, C15.1, C15.2, C6.1, C6.2, fixare în patru puncte

Mod	Frecvență [Hz]	MLCC 5.1	MLCC 5.2	MLCC 11.1	MLCC 11.2	MLCC 10.1	MLCC 10.2
		Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]	Ampl. [mm]
1	0	5.49E-13	5.47E-13	1.53E-12	1.53E-12	1.54E-12	1.55E-12
2	507.44	7.60E-13	7.59E-13	1.54E-12	1.55E-12	1.59E-12	1.60E-12
3	610.91	9.73E-13	9.72E-13	1.55E-12	1.55E-12	1.62E-12	1.63E-12
4	659.21	1.17E-12	1.17E-12	1.55E-12	1.55E-12	1.66E-12	1.67E-12
5	678.49	1.27E-12	1.27E-12	1.57E-12	1.57E-12	1.72E-12	1.73E-12
6	685.7	1.33E-12	1.33E-12	1.57E-12	1.57E-12	1.73E-12	1.74E-12
7	688.33	1.37E-12	1.37E-12	1.54E-12	1.54E-12	1.68E-12	1.68E-12
8	689.27	1.39E-12	1.39E-12	1.52E-12	1.52E-12	1.64E-12	1.65E-12
9	689.62	1.40E-12	1.40E-12	1.51E-12	1.51E-12	1.63E-12	1.64E-12
10	689.74	1.40E-12	1.40E-12	1.51E-12	1.51E-12	1.63E-12	1.64E-12
11	689.81	1.40E-12	1.40E-12	1.51E-12	1.51E-12	1.63E-12	1.63E-12
12	689.88	1.40E-12	1.40E-12	1.51E-12	1.51E-12	1.62E-12	1.63E-12
13	690	1.41E-12	1.41E-12	1.50E-12	1.51E-12	1.62E-12	1.63E-12
14	690.34	1.41E-12	1.41E-12	1.50E-12	1.50E-12	1.61E-12	1.61E-12
15	691.29	1.43E-12	1.43E-12	1.48E-12	1.48E-12	1.57E-12	1.58E-12
16	693.94	1.48E-12	1.48E-12	1.44E-12	1.45E-12	1.51E-12	1.51E-12
17	701.32	1.55E-12	1.55E-12	1.43E-12	1.44E-12	1.50E-12	1.50E-12
18	721.83	1.82E-12	1.82E-12	1.44E-12	1.44E-12	1.55E-12	1.56E-12
19	747.53	2.44E-12	2.44E-12	1.38E-12	1.39E-12	1.55E-12	1.56E-12
20	769.54	3.66E-12	3.66E-12	1.26E-12	1.27E-12	1.52E-12	1.53E-12
21	792.05	8.12E-12	8.12E-12	9.86E-13	9.89E-13	1.39E-12	1.39E-12
22	800.46	1.31E-11	1.31E-11	1.55E-12	1.55E-12	1.47E-12	1.48E-12
23	803.53	1.47E-11	1.47E-11	2.10E-12	2.10E-12	1.67E-12	1.68E-12
24	804.64	1.49E-11	1.49E-11	2.29E-12	2.29E-12	1.76E-12	1.77E-12
25	805.04	1.50E-11	1.50E-11	2.35E-12	2.36E-12	1.80E-12	1.81E-12
26	805.18	1.50E-11	1.50E-11	2.38E-12	2.38E-12	1.81E-12	1.82E-12
27	805.26	1.50E-11	1.50E-11	2.39E-12	2.39E-12	1.81E-12	1.82E-12
28	805.34	1.49E-11	1.49E-11	2.40E-12	2.40E-12	1.82E-12	1.83E-12
29	805.49	1.49E-11	1.49E-11	2.42E-12	2.42E-12	1.83E-12	1.84E-12
30	805.88	1.49E-11	1.49E-11	2.47E-12	2.48E-12	1.86E-12	1.87E-12
31	807	1.45E-11	1.45E-11	2.60E-12	2.60E-12	1.93E-12	1.94E-12
32	810.09	1.26E-11	1.26E-11	2.72E-12	2.73E-12	2.05E-12	2.05E-12
33	818.69	7.35E-12	7.35E-12	2.45E-12	2.46E-12	2.00E-12	2.01E-12
34	842.64	2.77E-12	2.77E-12	2.02E-12	2.02E-12	1.84E-12	1.85E-12

158 Anexă - A2

35	909.26	7.66E-13	7.67E-13	1.82E-12	1.82E-12	1.80E-12	1.81E-12
36	1094.7	2.14E-14	2.07E-14	1.82E-12	1.83E-12	1.91E-12	1.92E-12
37	1192	1.51E-13	1.50E-13	1.88E-12	1.88E-12	2.01E-12	2.02E-12
38	1398.2	3.89E-13	3.88E-13	2.09E-12	2.09E-12	2.44E-12	2.45E-12
39	1508.7	5.76E-13	5.75E-13	2.33E-12	2.33E-12	3.03E-12	3.04E-12
40	1552.9	7.11E-13	7.09E-13	2.48E-12	2.48E-12	3.53E-12	3.54E-12
41	1569.4	7.62E-13	7.61E-13	2.56E-12	2.56E-12	3.79E-12	3.80E-12
42	1575.4	7.46E-13	7.45E-13	2.60E-12	2.61E-12	3.89E-12	3.90E-12
43	1577.5	7.31E-13	7.30E-13	2.62E-12	2.63E-12	3.92E-12	3.93E-12
44	1578.3	7.25E-13	7.23E-13	2.63E-12	2.63E-12	3.93E-12	3.94E-12
45	1578.6	7.22E-13	7.21E-13	2.63E-12	2.64E-12	3.93E-12	3.94E-12
46	1578.8	7.21E-13	7.20E-13	2.63E-12	2.64E-12	3.94E-12	3.95E-12
47	1578.9	7.20E-13	7.18E-13	2.63E-12	2.64E-12	3.94E-12	3.95E-12
48	1579.2	7.17E-13	7.16E-13	2.64E-12	2.64E-12	3.94E-12	3.95E-12
49	1580	7.11E-13	7.09E-13	2.64E-12	2.65E-12	3.96E-12	3.97E-12
50	1582.2	6.92E-13	6.90E-13	2.66E-12	2.67E-12	3.99E-12	4.00E-12
51	1588.2	6.55E-13	6.54E-13	2.71E-12	2.72E-12	4.11E-12	4.12E-12
52	1605.1	6.82E-13	6.81E-13	2.84E-12	2.84E-12	4.61E-12	4.62E-12
53	1628.5	7.65E-13	7.63E-13	3.07E-12	3.08E-12	5.78E-12	5.79E-12
54	1650.8	8.25E-13	8.24E-13	3.43E-12	3.43E-12	8.06E-12	8.07E-12
55	1668.3	1.02E-12	1.01E-12	3.70E-12	3.71E-12	1.14E-11	1.14E-11
56	1674.7	1.25E-12	1.25E-12	3.58E-12	3.59E-12	1.21E-11	1.21E-11
57	1677	1.35E-12	1.35E-12	3.47E-12	3.48E-12	1.21E-11	1.21E-11
58	1677.8	1.39E-12	1.39E-12	3.43E-12	3.43E-12	1.20E-11	1.20E-11
59	1678.1	1.40E-12	1.40E-12	3.41E-12	3.42E-12	1.19E-11	1.19E-11
60	1678.3	1.41E-12	1.41E-12	3.40E-12	3.41E-12	1.19E-11	1.19E-11
61	1678.5	1.42E-12	1.42E-12	3.39E-12	3.40E-12	1.19E-11	1.19E-11
62	1678.8	1.43E-12	1.43E-12	3.37E-12	3.38E-12	1.18E-11	1.18E-11
63	1679.6	1.47E-12	1.46E-12	3.32E-12	3.33E-12	1.17E-11	1.17E-11
64	1681.9	1.56E-12	1.56E-12	3.18E-12	3.18E-12	1.12E-11	1.12E-11
65	1688.4	1.74E-12	1.74E-12	2.86E-12	2.87E-12	9.01E-12	9.01E-12
66	1706.3	1.96E-12	1.96E-12	2.94E-12	2.94E-12	4.07E-12	4.06E-12
67	1745	2.78E-12	2.78E-12	4.15E-12	4.15E-12	1.24E-12	1.24E-12
68	1782	5.32E-12	5.32E-12	6.91E-12	6.91E-12	3.34E-12	3.35E-12
69	1800.9	8.67E-12	8.67E-12	1.01E-11	1.01E-11	5.75E-12	5.76E-12
70	1807.8	9.82E-12	9.82E-12	1.09E-11	1.09E-11	6.51E-12	6.52E-12
71	1810.3	9.99E-12	9.99E-12	1.09E-11	1.09E-11	6.61E-12	6.62E-12

A2.3 – Analiza armonică a sistemului după optimizarea de *layout* 159

72	1811.2	1.00E-11	1.00E-11	1.09E-11	1.09E-11	6.62E-12	6.62E-12
73	1811.6	1.00E-11	1.00E-11	1.09E-11	1.09E-11	6.62E-12	6.62E-12
74	1811.7	1.00E-11	1.00E-11	1.09E-11	1.09E-11	6.61E-12	6.62E-12
75	1811.9	1.00E-11	1.00E-11	1.08E-11	1.08E-11	6.61E-12	6.61E-12
76	1812.2	1.00E-11	1.00E-11	1.08E-11	1.08E-11	6.60E-12	6.61E-12
77	1813.1	9.97E-12	9.97E-12	1.07E-11	1.07E-11	6.57E-12	6.58E-12
78	1815.6	9.75E-12	9.75E-12	1.03E-11	1.03E-11	6.40E-12	6.41E-12
79	1822.6	8.51E-12	8.51E-12	8.51E-12	8.51E-12	5.49E-12	5.49E-12
80	1842	5.05E-12	5.05E-12	4.25E-12	4.25E-12	2.99E-12	2.98E-12
81	1893.7	2.08E-12	2.08E-12	8.16E-13	8.13E-13	6.98E-13	6.90E-13
82	1943.2	1.29E-12	1.30E-12	3.84E-13	3.87E-13	2.23E-13	2.27E-13
83	1963.9	1.11E-12	1.11E-12	5.65E-13	5.69E-13	3.35E-13	3.43E-13
84	1971.4	1.04E-12	1.04E-12	5.97E-13	6.01E-13	3.79E-13	3.87E-13
85	1974.1	1.02E-12	1.02E-12	5.98E-13	6.02E-13	3.93E-13	4.02E-13
86	1975.1	1.01E-12	1.01E-12	5.97E-13	6.00E-13	3.98E-13	4.07E-13
87	1975.4	1.00E-12	1.00E-12	5.97E-13	6.00E-13	4.00E-13	4.09E-13
88	1975.6	1.00E-12	1.00E-12	5.96E-13	6.00E-13	4.01E-13	4.10E-13
89	1975.8	9.99E-13	1.00E-12	5.96E-13	5.99E-13	4.02E-13	4.11E-13
...
430	10000	1.86E-13	1.82E-13	9.58E-13	9.67E-13	1.07E-12	1.10E-12

Tabel A2.8. Răspunsul armonic rezultat în urma analizei armonice realizate pentru sistem după atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoarele C5.1, C5.2, C11.1, C11.2, C10.1, C10.2, fixare în patru puncte

BIBLIOGRAFIE

1. Covaci, C., & Gontean, A. (2022). "Singing" multilayer ceramic capacitors and mitigation methods—a review. *Sensors*, 22(10), 3869. doi:10.3390/s22103869
2. Kim, D., Kim, W., & Kim, W. (2019). Dynamic analysis of multilayer ceramic capacitor for vibration reduction of printed circuit board. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(4), 1595-1601. doi:10.1007/s12206-019-0311-4
3. Ko, B., Park, H., Kim, D., Park, N., & Park, Y. (2016). Reduction of multilayer ceramic capacitor vibration by changing the cover thickness. *Microsystem Technologies*, 22(6), 1375-1380. doi:10.1007/s00542-016-2846-y
4. Johnson, W. L., Kim, S. A., Quinn, T. P., & White, G. S. (2013). Nonlinear acoustic effects in multilayer ceramic capacitors. *AIP Conference Proceedings*. doi:10.1063/1.4789214
5. Lu, T., Ding, M., & Wu, K. (2019). Simulation and characterization of singing capacitors in consumer electronics. *2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI)*. doi:10.1109/isemc.2019.8825286
6. Yu, D., Dai, K., Zhang, J., Yang, B., Zhang, H., & Ma, S. (2020). Failure mechanism of multilayer ceramic capacitors under transient high impact. *Applied Sciences*, 10(23), 8435. doi:10.3390/app10238435
7. Sun, Y., Zhang, J., Yang, Z., Hwang, C., & Wu, S. (2019). Measurement investigation on acoustic noise caused by "singing" capacitors on mobile devices. *2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI)*. doi:10.1109/isemc.2019.8825220
8. Ko, B., Jeong, S., Ahn, Y., Park, K., Park, N., & Park, Y. (2014). Analysis of the correlation between acoustic noise and vibration generated by a multilayer ceramic capacitor. *Microsystem Technologies*, 20(8-9), 1671-1677. doi:10.1007/s00542-014-2209-5
9. Ko, B., Jeong, S., Kim, D., Park, N., & Park, Y. (2017). Identification of the electromechanical material properties of a multilayer ceramic capacitor. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 14(3), 424-432. doi:10.1111/ijac.12649
10. Sun, Y., Zhang, J., Yang, Z., Hwang, C., & Wu, S. (2019). Measurement investigation on acoustic noise caused by "singing" capacitors on mobile devices. *2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI)*. doi:10.1109/isemc.2019.8825220
11. Sun, Y., Wu, S., Zhang, J., Hwang, C., & Yang, Z. (2020). Measurement methodologies for acoustic noise induced by multilayer ceramic capacitors of power distribution network in Mobile Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(4), 1515-1523. doi:10.1109/temc.2020.2993850

12. Kim, H., Kim, D., Park, N., & Park, Y. (2018). Acoustic noise and vibration analysis of solid state drive induced by multi-layer ceramic capacitors. *Microelectronics Reliability*, 83, 136-145. doi:10.1016/j.microrel.2018.01.021
13. Margielewicz, J., Gąska, D., Litak, G., Wolszczak, P., & Trigona, C. (2022). Nonlinear Dynamics of a star-shaped structure and variable configuration of elastic elements for energy harvesting applications. *Sensors*, 22(7), 2518. doi:10.3390/s22072518
14. Ko, B., Kim, D., Park, N., & Park, Y. (2015). Study on effective piezoelectric coefficient for finite element analysis of multi-layer ceramic capacitor. *2015 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF), International Symposium on Integrated Functionalities (ISIF), and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (PFM)*. doi:10.1109/isaf.2015.7172669
15. Briscoe, J., & Dunn, S. (2014). 2.1 Background. In *Nanostructured Piezoelectric Energy Harvesters* (1st ed., pp. 3-4). Cham: Springer.
16. Erturk, A., & Inman, D. J. (2011). 1.4 Summary of the Theory of Linear Piezoelectricity. In *Piezoelectric Energy Harvesting* (1st ed., pp. 9-12). Chichester: Wiley.
17. Maghsoudi Nia, E., Wan Abdullah Zawawi, N., & Mahinder Singh, B. (2019). Design of a pavement using piezoelectric materials. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 50(3), 320-328. doi:10.1002/mawe.201900002
18. de Almeida, B. V., & Pavanello, R. (2019). Topology Optimization of the Thickness Profile of Bimorph Piezoelectric Energy Harvesting Devices. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 5(1), 113-127. doi:10.22055/jacm.2018.25097.1228
19. Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review. *Sensors*, 20(12), 3512. doi:10.3390/s20123512
20. Lippmann, G. (1881). Principe de la Conservation de l'électricité, ou second Principe de la Théorie des phénomènes électriques. *Journal De Physique Théorique Et Appliquée*, 10(1), 381-394. doi:10.1051/jphystap:0188100100038100
21. Koh, S. J., Zhao, X., & Suo, Z. (2009). Maximal energy that can be converted by a dielectric elastomer generator. *Applied Physics Letters*, 94(26), 262902. doi:10.1063/1.3167773
22. Briscoe, J., & Dunn, S. (2014). 2.2 Polarisation. In *Nanostructured Piezoelectric Energy Harvesters* (1st ed., pp. 4-6). Cham: Springer.
23. Chopra, I. (2002). Review of State of Art of smart structures and Integrated Systems. *AIAA Journal*, 40, 2145-2187. <https://doi.org/10.2514/3.15309>
24. Santucci, S., & Esposito, V. (2021). Electrostrictive ceramics and their applications. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, 369-374. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.12071-5
25. Uchino, K. (2001). Electrostrictive Materials. *Encyclopedia of Vibration*, 475-490. doi:10.1006/rwvb.2001.0078
26. Kim, D., Ko, B., Jeong, S., Park, N., & Park, Y. (2015). Vibration reduction of MLCC considering piezoelectric and electrostriction effect. *2015 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF), International Symposium on Integrated Functionalities (ISIF), and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (PFM)*. doi:10.1109/isaf.2015.7172701

27. Baek, H., Yu, D., Lee, J., Shim, H., & Kim, J. (2015). Electrical approach to acoustic noise for mlccs of power delivery network in mobile system. *2015 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS)*. doi:10.1109/edaps.2015.7383668
28. Jia, Y., Luo, H., Zhao, X., & Wang, F. (2008). Giant magnetoelectric response from a piezoelectric/magnetostrictive laminated composite combined with a piezoelectric transformer. *Advanced Materials*, 20(24), 4776-4779. doi:10.1002/adma.200800565
29. Wu, Z., Xiang, Z., Jia, Y., Zhang, Y., & Luo, H. (2012). Electrical impedance dependence on the direct and converse magnetoelectric resonances in magnetostrictive/piezoelectric laminated composites. *Journal of Applied Physics*, 112(10), 106102. doi:10.1063/1.4766405
30. Kim, D., Park, N., & Park, Y. (2016). Analysis of high-pitched noise from solid-state drives generated by multilayer ceramic capacitors. *Microsystem Technologies*, 22(6), 1367-1374. doi:10.1007/s00542-016-2845-z
31. Yao, G., Li, Y., Yan, J., Tan, J., Pei, C., Jia, Y., . . . Liu, P. (2021). Structure and microwave dielectric properties of nasr4v5o17 ceramics for LTCC applications. *Ceramics International*, 47(12), 17147-17152. doi:10.1016/j.ceramint.2021.03.024
32. Pei, C., Li, Y., Tan, J., Yao, G., Jia, Y., Liu, W., . . . Zhang, H. (2020). Temperature stable (1-X)NACA4V5O17-xBaV2O6 microwave dielectric ceramics for ULTCC applications. *Ceramics International*, 46(17), 27579-27583. doi:10.1016/j.ceramint.2020.07.250
33. "Miclea, C.; Tănăsioiu, C.; Amarande, L.; Miclea, C.F.; Plăvit, u, C.; Cioangher, M.; Trupina, L.; Miclea, C.T.; David, C. Effect of Temperature on the Main Piezoelectric Parameters of a Soft PZT Ceramic. *Rom. J. Inf. Sci. Technol.* 2007, 10, 243-250"
34. Sakayori, K., Matsui, Y., Abe, H., Nakamura, E., Kenmoku, M., Hara, T., . . . Takuro Ikeda, T. I. (1995). Curie temperature of BaTiO₃. *Japanese Journal of Applied Physics*, 34(9S), 5443. doi:10.1143/jjap.34.5443
35. Perrone, G., & Vallan, A. (2009). A low-cost optical sensor for noncontact vibration measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(5), 1650-1656. doi:10.1109/tim.2008.2009144
36. Chitnis, V., Kumar, S., & Sen, D. (1989). Optical fiber sensor for vibration amplitude measurement. *Journal of Lightwave Technology*, 7(4), 687-691. doi:10.1109/50.19096
37. Yang, C., Tan, Y., Liu, Y., Xia, P., Cui, Y., & Zheng, B. (2022). Modeling and optimization of laser cladding fixation process for optical fiber sensors in harsh environments. *Sensors*, 22(7), 2569. doi:10.3390/s22072569
38. Li, H., Li, H., & Tzou, H. (2011). A circuit design in piezoelectric vibration measurement system. *2011 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA)*. doi:10.1109/spawda.2011.6167306
39. MLCC solutions for suppressing acoustic noise in the battery lines of laptop computers: Ceramic capacitor. Disponibil online: <https://www.murata.com/en-global/products/capacitor/ceramiccapacitor/library/apps/notepc> (accesat în aprilie 2023)
40. How to reduce acoustic noise of mlccs in power applications. Disponibil online: https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/posts/how-to-reduce-acoustic-noise-of-mlccs-in-power-applications (accesat în aprilie 2023)

41. Reduce the acoustic noise effect from class II MLCC vibration. Disponibil online:
<https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21154968/samsung-reduce-the-acoustic-noise-effect-from-class-ii-mlcc-vibration>
(accesat în aprilie 2023)
42. Guide on various solutions offered by mlccs with dipped radial leads. Disponibil online:
https://product.tdk.com/en/techlibrary/solutionguide/lead-mlcc_pcb-noise-motor.html (accesat în aprilie 2023)
43. Sun, Y., Wu, S., Zhang, J., Hwang, C., & Yang, Z. (2020). Decoupling capacitor layout design guidelines for acoustic noise consideration in power distribution network. *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*. doi:10.1109/emcsi38923.2020.9191476
44. Sun, Y., Wu, S., Zhang, J., Hwang, C., & Yang, Z. (2020). Measurement investigation of MLCC mounting variation impact on acoustic noise in power distribution network. *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*. doi:10.1109/emcsi38923.2020.9191464
45. Patel, H., Levesque, L., Morales, H., & Dunleavy, L. (2017). Addressing performance differences in horizontal and vertical orientation mounting of multi-layer capacitors. *2017 IEEE 18th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*. doi:10.1109/wamicon.2017.7930261
46. Model Based Fault Detection Lab. Disponibil online:
<http://vlabs.iitkgp.ernet.in/vlabs/vlab17/web/note3.html> (accesat în aprilie 2023)
47. What is Modal Analysis: The ultimate guide. Disponibil online:
<https://dewesoft.com/daq/what-is-modal-analysis> (accesat în aprilie 2023)
48. Finite Element Analysis (FEA). Disponibil online:
<https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/finite-element-analysis-FEA> (accesat în aprilie 2023)
49. Sun, Y., Zhang, J., Yang, Z., Hwang, C., & Wu, S. (2019). Simulation investigation on acoustic noise caused by "singing" capacitors on mobile devices. *2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI)*. doi:10.1109/isemc.2019.8825205
50. Harmonic analysis. Disponibil online:
<https://www.britannica.com/science/harmonic-analysis> (accesat în aprilie 2023)
51. IRJET-International Research Journal of Engineering and Technology. Disponibil online: <https://www.irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6536.pdf> (accesat în aprilie 2023)
52. Sun, Y., Wu, S., Zhang, J., Hwang, C., & Yang, Z. (2021). Simulation methodologies for acoustic noise induced by multilayer ceramic capacitors of power distribution network in Mobile Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63(2), 589-597. doi:10.1109/temc.2020.3019438
53. Palacios Játiva, P., Azurdia-Meza, C. A., Sánchez, I., Zabala-Blanco, D., Dehghan Firoozabadi, A., Soto, I., & Seguel, F. (2022). An enhanced VLC channel model for underground mining environments considering a 3D dust particle distribution model. *Sensors*, 22(7), 2483. doi:10.3390/s22072483

54. Model 352A74 | PCB piezotronics. Disponibil online:
<https://www.pcb.com/products?m=352A74> (accesat în aprilie 2023)
55. Crocker, M. J., & Arenas, J. P. (2021). 6.2 Loudness and Annoyance. In *Engineering acoustics noise and vibration control* (1st ed., pp. 155-156). Hoboken, NJ: Wiley.
56. Moore, B. J., Glasberg, B. R., & Baer, T. (1997). A Model for the Prediction of Thresholds, Loudness, and Partial Loudness. *J. Audio Eng. Soc.*, 45, 4th ser., 224-240.
57. Moore, B. J. (2013). *An introduction to the psychology of hearing*. Leiden: Brill.
58. Glasberg, B. R., & Moore, B. C. (2006). Prediction of absolute thresholds and equal-loudness contours using a modified loudness model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 585-588. doi:10.1121/1.2214151
59. International Organization for Standardization. (1987). Acoustics — Normal equal-loudness level contours (Standard No.226) Disponibil online:
<https://www.iso.org/standard/4100.html> (accesat în aprilie 2023)
60. International Organization for Standardization. (2005). Acoustics — Reference zero for the calibration of audiometric equipment — Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions (Standard No.389-7) Disponibil online:
<https://www.iso.org/standard/38976.html> (accesat în aprilie 2023)
61. International Organization for Standardization. (2003). Acoustics — Normal equal-loudness-level contours (Standard No.226) Disponibil online:
<https://www.iso.org/standard/34222.html> (accesat în aprilie 2023)
62. Crocker, M. J., & Arenas, J. P. (2021). 6.3 Loudness and Loudness Level. In *Engineering acoustics noise and vibration control* (1st ed., pp. 156-157). Hoboken, NJ: Wiley.
63. Crocker, M. J., & Arenas, J. P. (2021). 4.3 Subjective Response. In *Engineering acoustics noise and vibration control* (1st ed., pp. 99-115). Hoboken, NJ: Wiley.
64. Modal Analysis: Theory. Disponibil online:
<https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Modalanalysis,Theory.htm> (accesat în aprilie 2023)
65. Harmonic Analysis - Purdue University. Disponibil online:
<https://www.math.purdue.edu/~eremenko/dvi/fourier.pdf> (accesat în aprilie 2023)
66. FR4 material: Glossary - Multi Circuit Boards - Multi-CB leiterplatten. Disponibil online: https://www.multi-circuit-boards.eu/en/glossary/FR4_Material.html (accesat în aprilie 2023)
67. Refai-Ahmed, G., Shi, H., Bhartiya, Y., Pawlak, T., Keshavamurthy, M., Boots, B., . . . Pytel, S. G. (2016). Electronic PCB and pkg thermal stress analysis. *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. doi:10.1109/ectc.2016.196
68. Covaci, C., Burza, F., & Krausz, T. (2022). MLCC acoustic noise mitigation via appropriate design. *2022 IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*. doi:10.1109/estc55720.2022.9939506
69. Brereton, R. G. (2014). The normal distribution. *Journal of Chemometrics*, 28(11), 789-792. <https://doi.org/10.1002/cem.2655>
70. Covaci, C., Burza, F., & Gontean, A. (2022). Solutions for acoustic noise caused by multilayer ceramic capacitors. *2022 IEEE 28th International*

-
- Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*.
doi:10.1109/siitme56728.2022.9988700
71. X7R, X5R, C0G...: A concise guide to ceramic capacitor types - technical articles. Disponibil online: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/x7r-x5r-c0g...-a-concise-guide-to-ceramic-capacitor-types/> (accesat în aprilie 2023)
 72. Yang, H., Wang, B., Grigg, S., Zhu, L., Liu, D., & Marks, R. (2022). Acoustic emission source location using finite element generated delta-t mapping. *Sensors*, 22(7), 2493. doi:10.3390/s22072493