

CONTRIBUȚII LA REDUCEREA ZGOMOTULUI ACUSTIC GENERAT DE CONDENSATOARELE CERAMICE MULTISTRAT ÎN MODULELE ELECTRONICE AUTOMOTIVE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

autor ing. Corina-Nicoleta COVACI (căs. Vidoni)

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Aurel GONTEAN

luna 07 anul 2023

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Electronică Aplicată al Universității Politehnică Timișoara. Teza este structurată în șapte capitole, urmate de anexe și bibliografie. Statistic, teza este caracterizată prin:

- un număr total de 165 pagini, dintre care 119 pagini în corpul tezei, 46 pagini în anexe și bibliografie
- 100 de figuri în corpul tezei și 30 de figuri în anexe
- 11 tabele în corpul tezei și 8 tabele în anexe
- 72 referințe bibliografice

Capitolul 1 - Introducere

Primul capitol prezintă motivația alegerii temei de cercetare, importanța, noutatea și actualitatea temei, formularea ipotezei de cercetare și structura tezei.

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”.

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 electrostrictiv 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.

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 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.

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™. 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.

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.

Structura tezei

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.

Capitolul 2 – Stadiul actual

Condensatoarele ceramice multistrat sunt componente pasive, indispensabile dispozitivelor electronice moderne. Ele sunt compuse din trei elemente principale: electrozii interni, electrozii externi și materialul dielectric. Popularitatea lor se datorează multiplelor avantaje, ca dimensiuni și preț reduse, 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, și abilitatea lor de a fi folosiți pentru perioade îndelungate la temperaturi înalte sau în aplicații de înaltă tensiune.

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”.

Din cauza prezenței fenomenelor de piezoelectricitate și electrostricție, atunci când un câmp electric este aplicat pe condensator, electrozii săi interni încep să vibreze. Acest comportament este descris de ecuația (2.9), care a fost utilizată pentru modelarea comportamentului condensatoarelor ceramice multistrat.

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

unde s_z este tensiunea mecanică, d_{33} este coeficientul piezoelectric, M_{33} este coeficientul electrostricativ, E_{DC} este componenta continuă a câmpului electric aplicat, E_{AC} este componenta alternativă a câmpului electric aplicat, iar ω este frecvența unghiulară.

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). 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 poate atinge domeniul audibil de 20Hz-20kHz. În acest caz, apare fenomenul „singing capacitors”

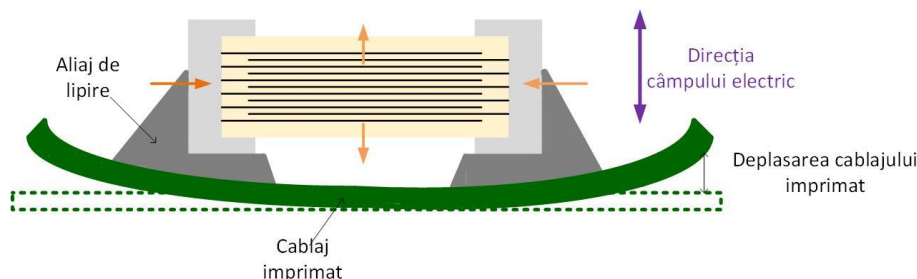


Fig.2.2. Transmiterea vibrației de la electrozii către PCB

Fenomenul „singing capacitors” se măsoară fie prin măsurarea zgomotului acustic, fie prin măsurarea vibrației.

Pentru măsurarea zgomotului acustic, cea mai utilizată metodă este măsurarea nivelului presiunii sunetului, SPL (eng. *Sound Pressure Level*), definit în ecuația (2.11):

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

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. 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. 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.

Pentru măsurarea vibrației, cea mai utilizată metodă 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. LDV-ul are o rezoluție în domeniul submilimetric, acest lucru fiind util la măsurarea MLCC-urilor de dimensiuni mici. Alte metode de măsurare a vibrației sunt folosirea senzorului cu fibră optică sau a accelerometrului piezoelectric, metoda stimulării active și metoda de coerență a vibrației și tensiunii, acestea fiind mai puțin folosite în literatura de specialitate.

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 (condensatoarea cu *metal terminal*, condensatoare cu *interposer*, condensatoare cu strat dielectric mai gros, condensatoare cu substrat de aluminiu, condensatoare *metal plate* și condensatoare de tip *dipped radial leads*) de atenuare sau eliminare ale zgomotului acustic generat de MLCC-uri.

În literatura de specialitate sunt recomandate diferite geometrii electrice în funcție de tipul de condensator folosit. Aceste configurații sunt de tip „L” sau „T”, de tip paralel sau de tip oglindă. De asemenea, eficiența asupra atenuării zgomotului acustic depinde și de semnalele aplicate pe condensatori, dacă acestea sunt în fază sau în anti-fază, așa cum este prezentat 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?”

Astfel, atunci când folosim condensatoare clasice, configurația paralelă este cea mai potrivită dacă semnalele aplicate pe condensatoare sunt în anti-fază. În caz contrar, ni se recomandă folosirea configurației de tip oglindă.

Ca metode de prevenție, în literatură ni se recomandă analiza modală, prin intermediul căreia se formulează modelul matematic al comportamentului dinamic, și analiza armonică, prin care se descrie și analizează fenomenele cu caracter periodic recurent.

Capitolul 3 – Analiza detaliată a problemei

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 cu valoare de $2.2\mu\text{F}$ (C5, C6, C10, C11, C15 și C16 din Fig.3.1), comandă intensitatea luminoasă în mai multe șiruri.

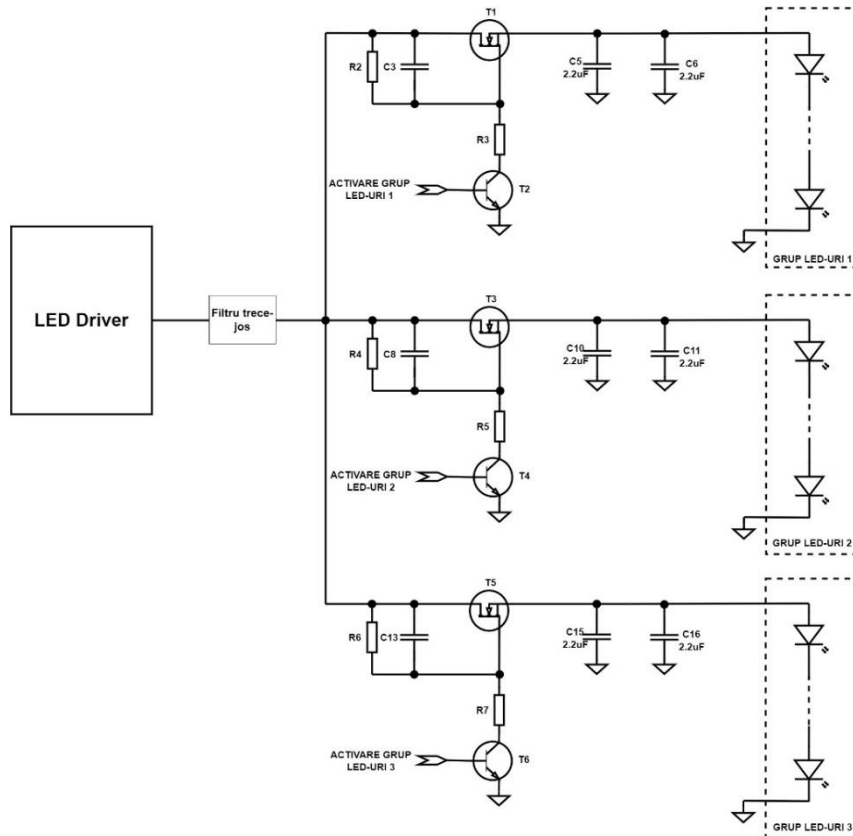


Fig.3.1. Schema electronică a modului studiat

Modulul funcționează ca o sursă constantă de curent, care generează impulsuri de 4A, cu durată de $470\mu\text{s}$ și frecvență 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.

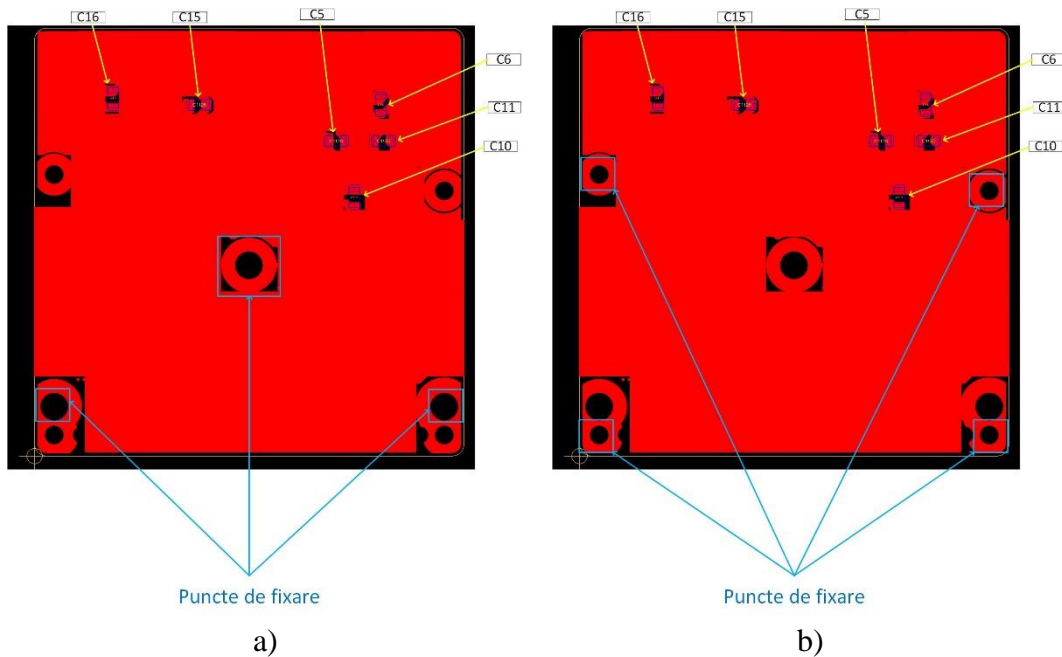


Fig.3.2. Moduri de fixare PCB în mașină: a) în trei puncte; b) în patru puncte

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). 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.

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

Pentru măsurarea vibrației, eu am folosit un accelerometru piezoelectric, pe care l-am fixat în centrul PCB-ului. Accelerometrul folosit de mine este modelul 352A74, dezvoltat de PCB Piezoelectronics™.

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. 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. Se poate observa, însă, faptul că vibrația este captată doar pe perioada impulsurilor de tensiune și prezența unor *spike*-uri de tensiune de 20V la începutul fiecărui impuls.

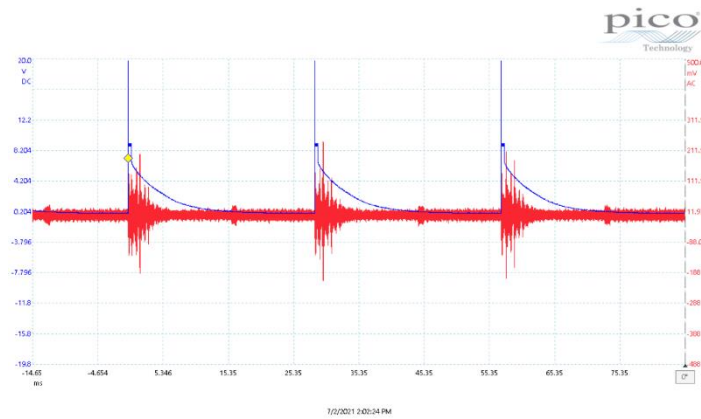


Fig.3.4. Vibrația PCB-ului în modul de comandă 1

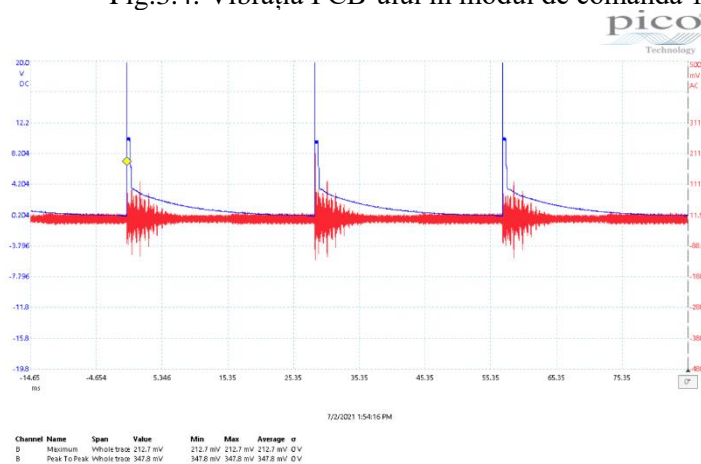


Fig.3.5. Vibrația PCB-ului în modul de comandă 2

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. În Fig.3.8 – Fig.3.11, sunt prezentate rezultatele pe care le-am obținut prin măsurarea zgomotului acustic. 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.

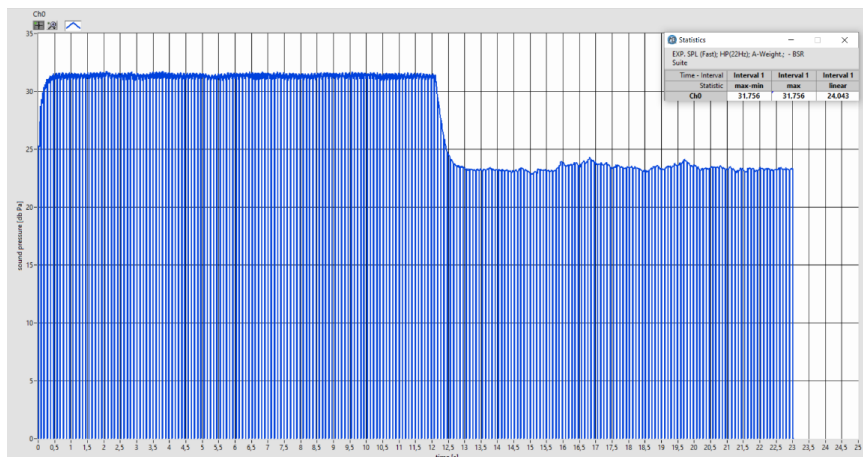


Fig.3.8. SPL obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

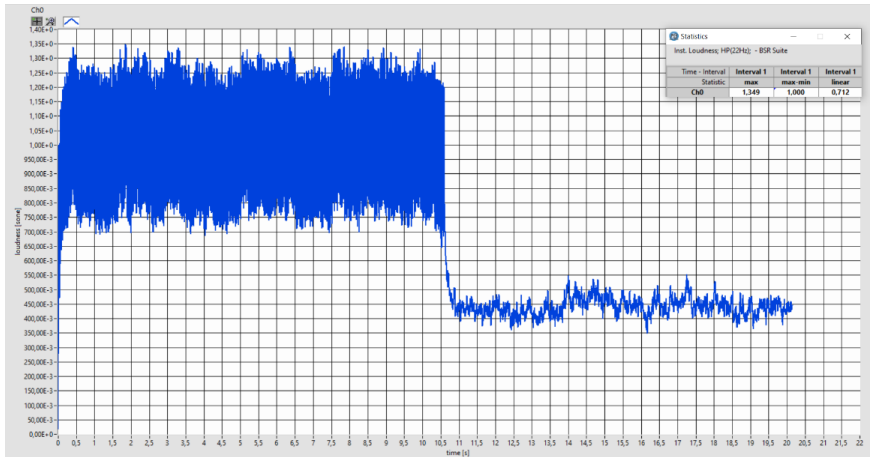


Fig.3.9. Loudness obținut prin comanda LED-urilor în modul 1

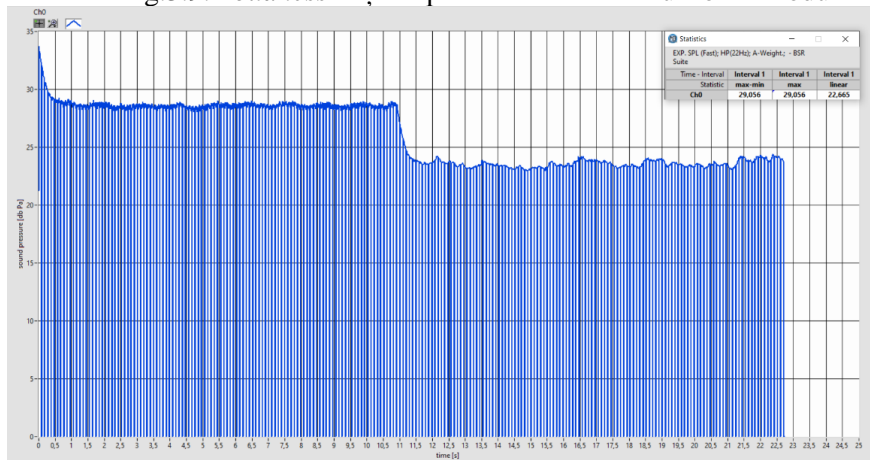


Fig.3.10. SPL obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

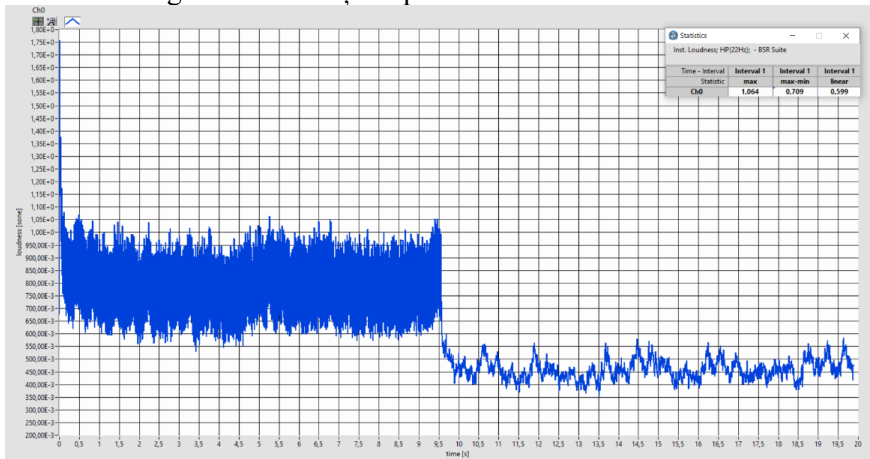


Fig.3.11. Loudness obținut prin comanda LED-urilor în modul 2

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
Loudness	1.34 sone	1.06 sone

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

Capitolul 4 - Simulare

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, unde sunt prezentate frecvența naturală și deplasarea maximă teoretică pentru fiecare mod rezultat. 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.

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 μ m, respectiv modul 15, la 4627Hz, unde avem o deplasare de 1098 μ m. 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 μ m, respectiv la frecvența de 4581Hz, prezentă tot în modul 15, asemănător fixării în patru puncte, unde avem o deplasare de 982 μ m.

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.

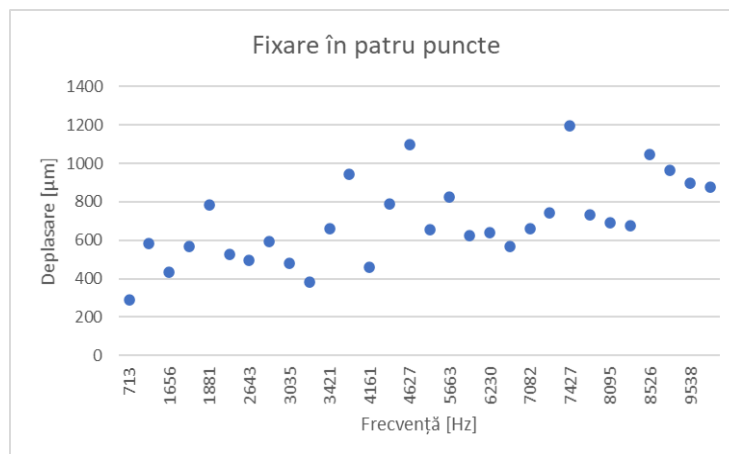


Fig.4.1. Rezultatul analizei modale – deplasarea maximă în cazul fixării în patru puncte

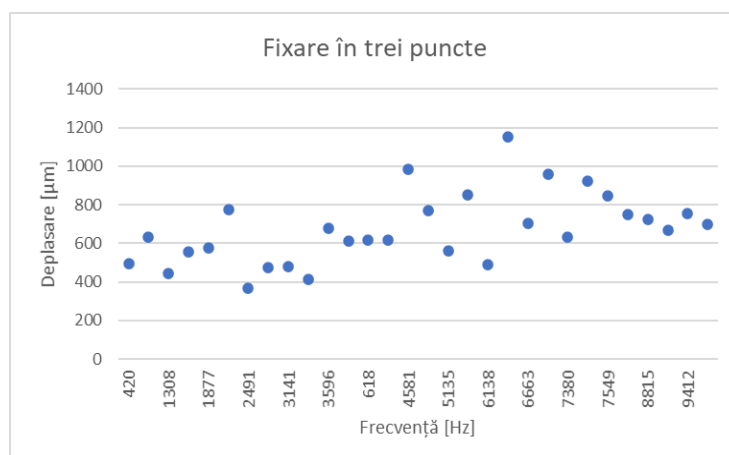


Fig.4.2. Rezultatul analizei modale – deplasarea maximă în cazul fixării în trei puncte

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

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, fundamentală 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.

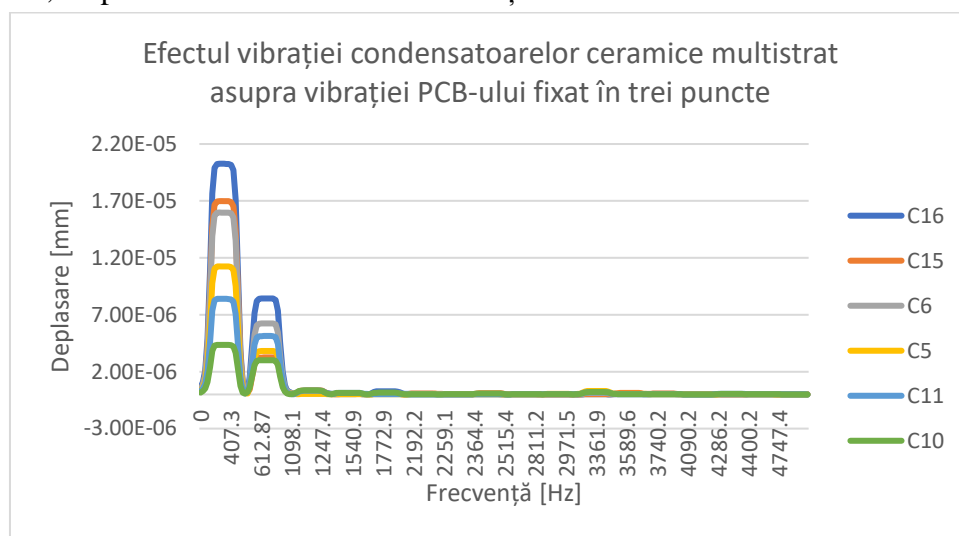


Fig.4.11. Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte

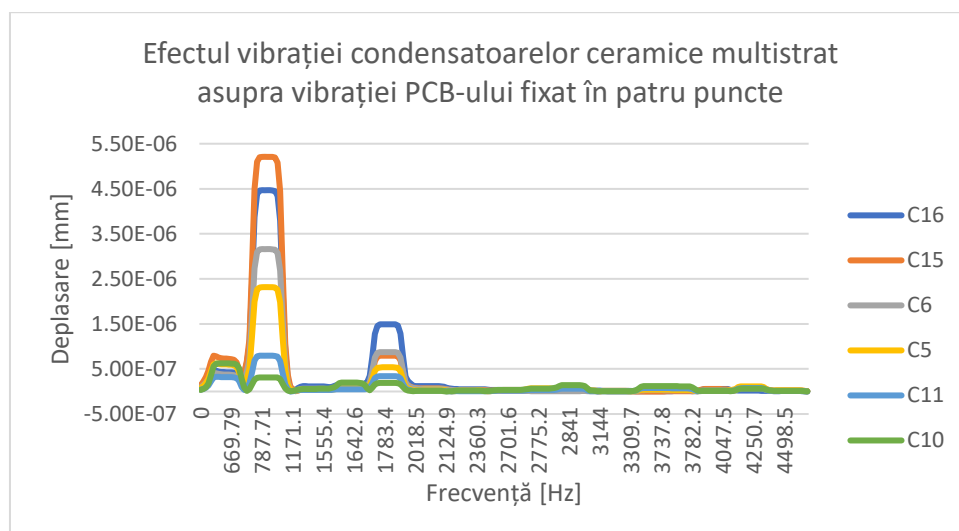


Fig.4.12. Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte

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, fundamentală 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 două propuneri pentru atenuarea zgomotului acustic: atenuarea solicitării mecanice aplicate pe condensatoare, respectiv de optimizare a *layout*-ului.

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.

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

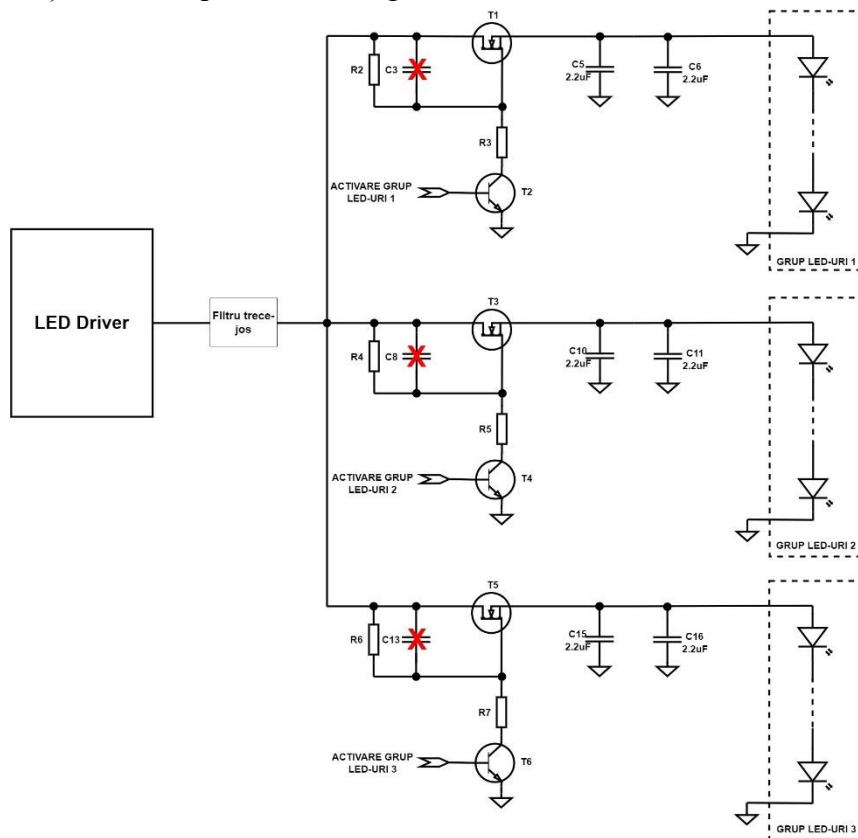


Fig.4.17. Schema electronică realizată pentru eliminarea *spike*-urilor de tensiune

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. 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, nu s-au 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.

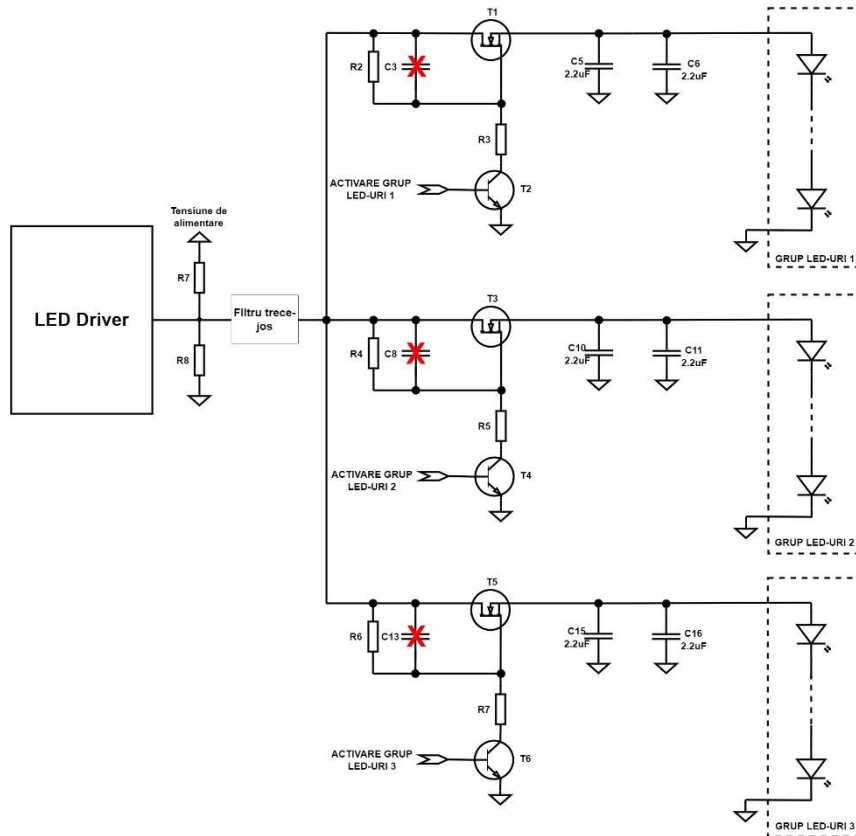


Fig.4.18. Schema electronică realizată pentru pre-încărcarea condensatorilor multistrat

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.

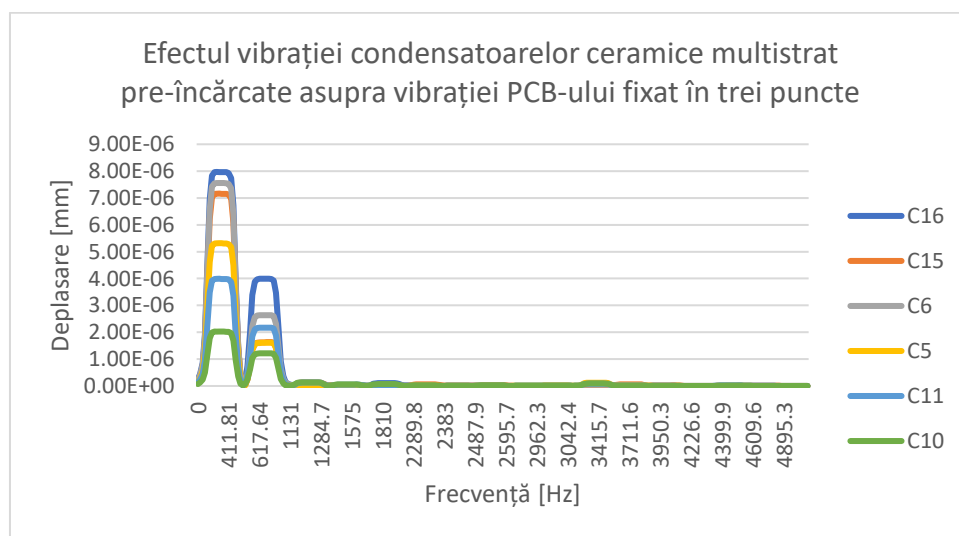


Fig.4.19. Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte, pentru cazul condensatoarelor pre-încărcate

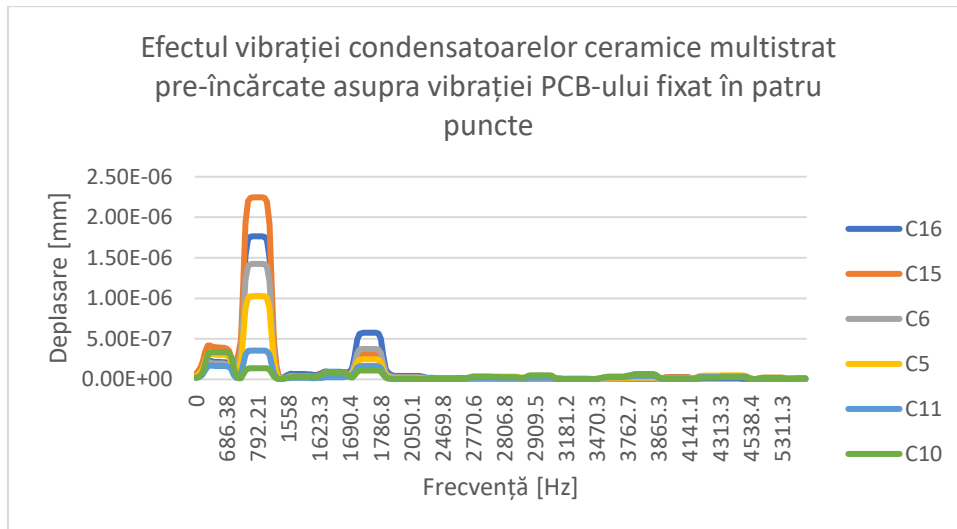


Fig.4.20. Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte, în cazul condensatoarelor pre-încărcate

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.

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 2.2 μ F au fost înlocuite de câte o pereche de condensatoare de 1 μ F, iar dimensiunea lor a fost micșorată de la capsula 1208 la capsula 0805, așa cum este prezentat în Fig.4.25, cu menținea că Cx.1 și Cx.2 sunt plasați în configurație oglindă.

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.

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.

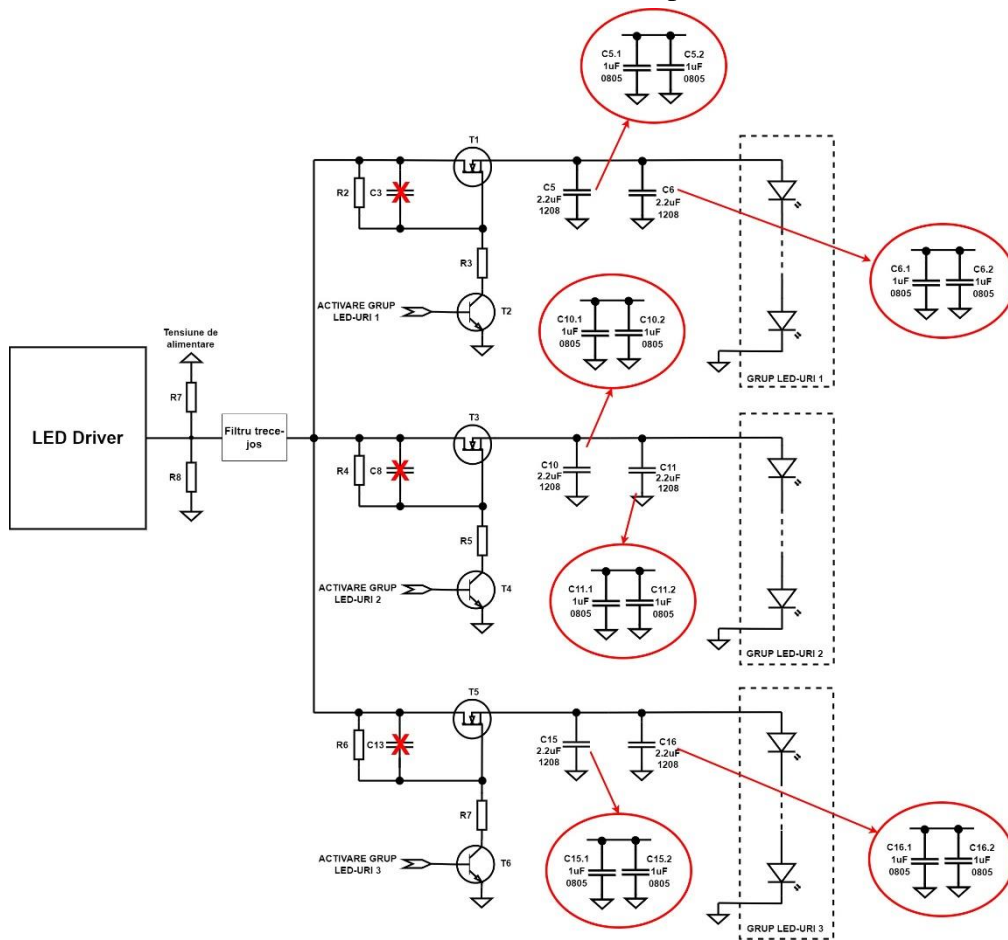


Fig.4.25. Schema electronică realizată pentru optimizarea *layout*-ului

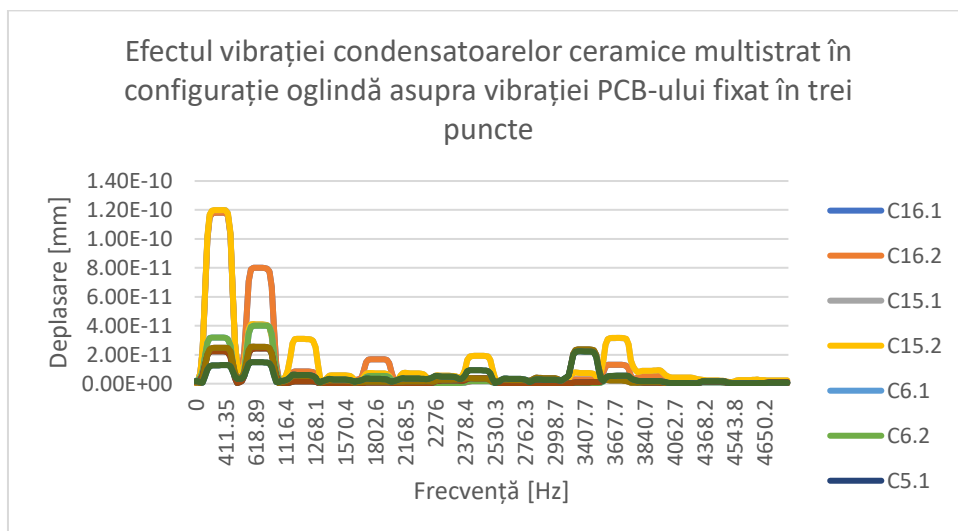


Fig.4.26. Răspunsul armonic corespunzător fixării în trei puncte, pentru cazul *layout*-ului optimizat

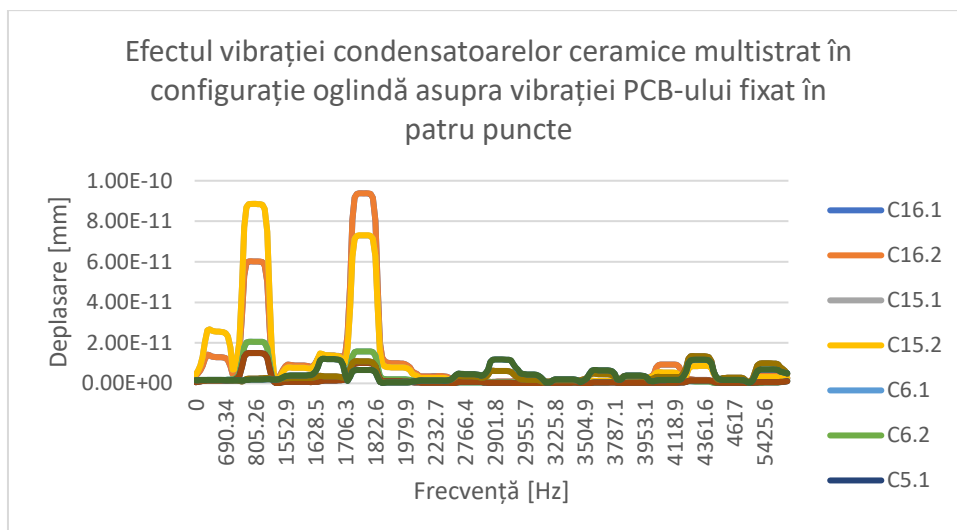


Fig.4.27. Răspunsul armonic corespunzător fixării în patru puncte, pentru cazul *layout*-ului optimizat

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.

Capitolul 5 – Validarea rezultatelor simulării prin măsurări experimentale

În acest capitol, s-au reluat măsurările prezentate în Capitolul 3 în cazul modificărilor de atenuare a solicitării pe condensatoare și optimizare de *layout*.

În Fig.5.1 și Fig. 5.7, se poate observa tensiunea de la ieșirea *LED Driver*-ului. În Fig.5.1 se poate observa cum spike-ul de 20V este micșorat până la aproximativ 14V., iar în Fig.5.7 se observă cum impulsurile de tensiune cresc de la un nivel de 5V la 10V (comparativ cu creșterea de la nivelul de 0V la 10V, în cazul anterior).

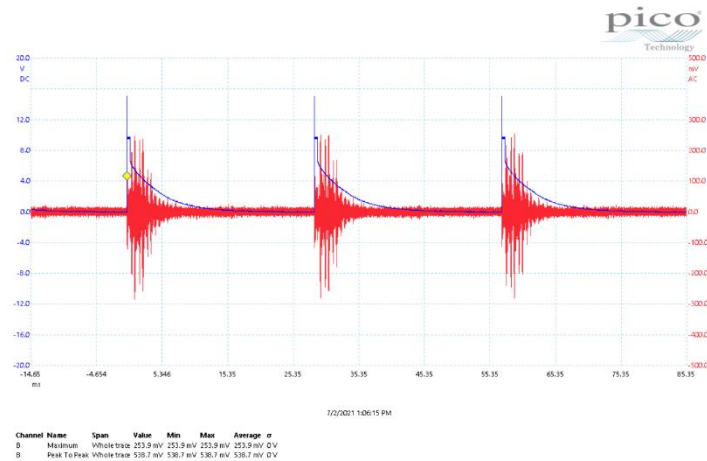


Fig.5.1. Vibrația PCB-ului modificat pentru eliminarea *spike*-urilor în modul de comandă 1 al LED-urilor

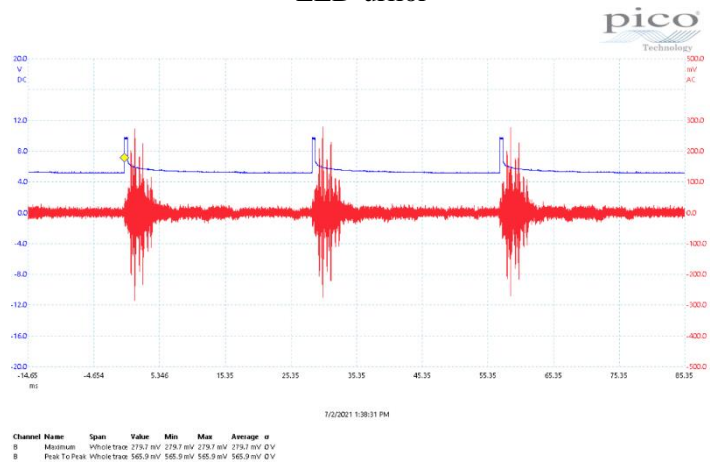


Fig.5.7. Vibrația PCB-ului modificat pentru pre-încărcarea condensatoarelor în modul de comandă 1 al LED-urilor

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):

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

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.

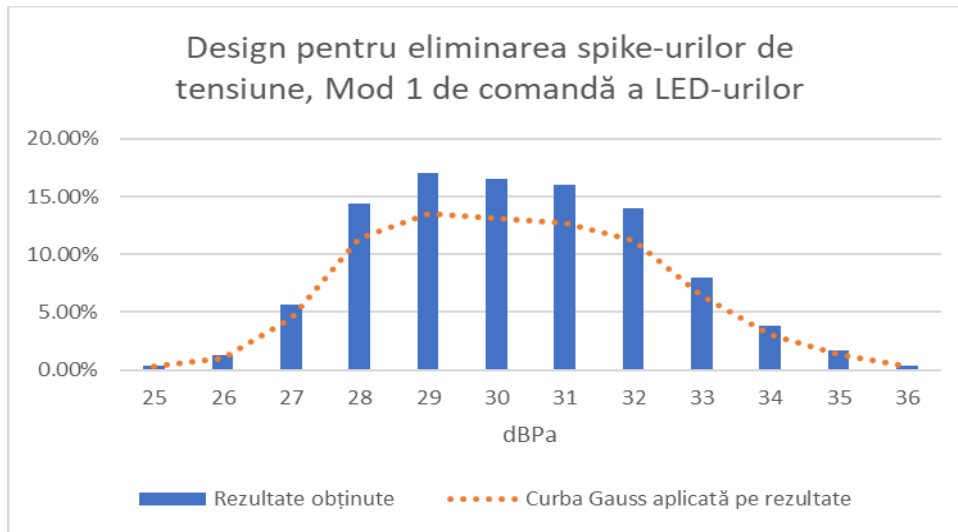


Fig.5.13. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

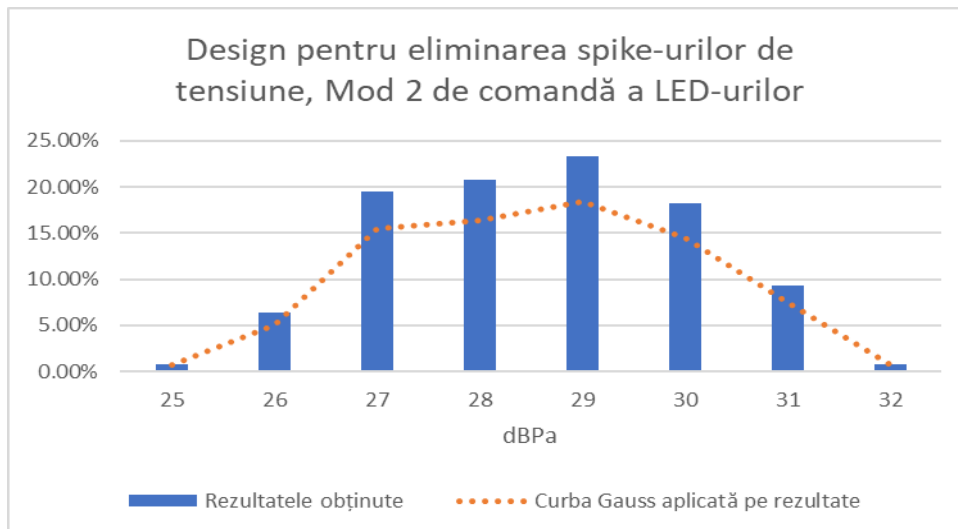


Fig.5.14. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor

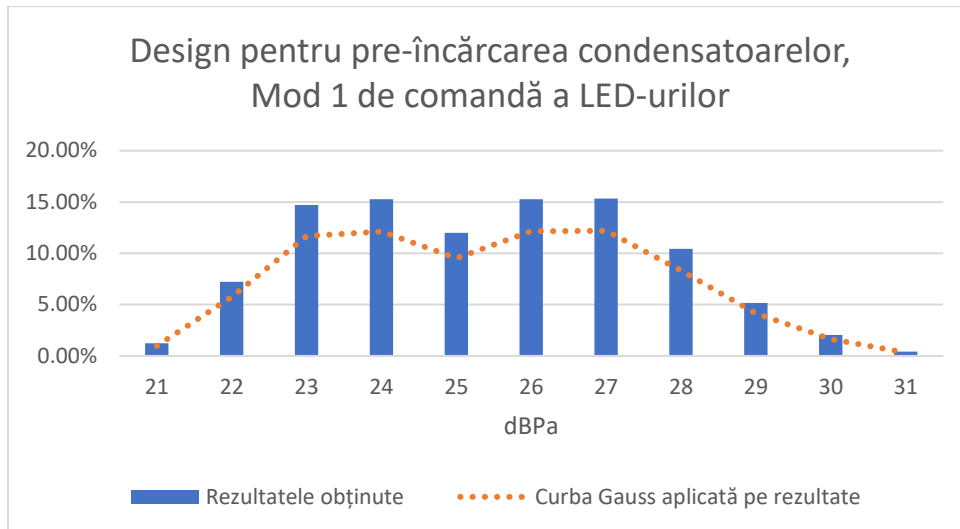


Fig.5.15. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

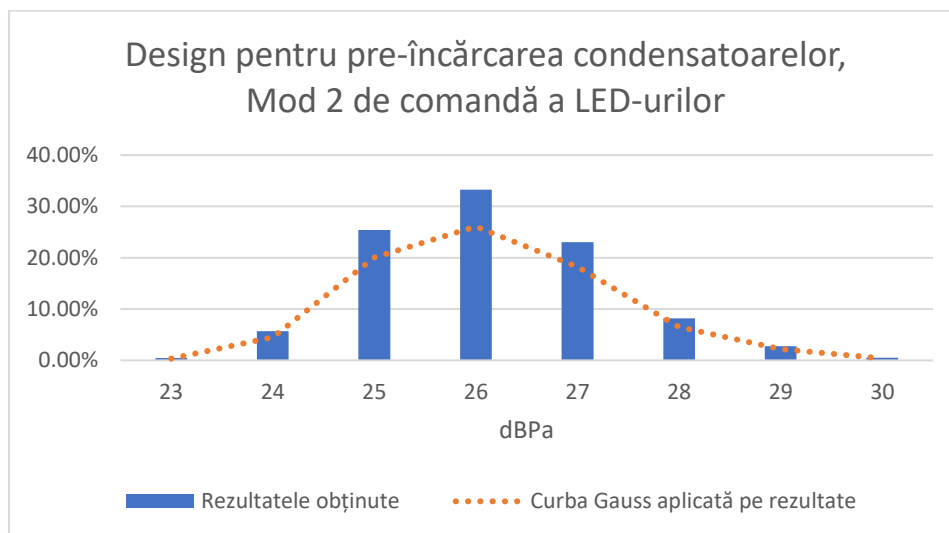


Fig.5.16. Rezultate obținute prin măsurarea dispozitivelor având *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor

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”.

În cazul modificării cu optimizare de *layout*, am folosit trei furnizori de componente diferiți. Rezultatele sunt prezentate în Fig.5.17 și Fig.5.18.

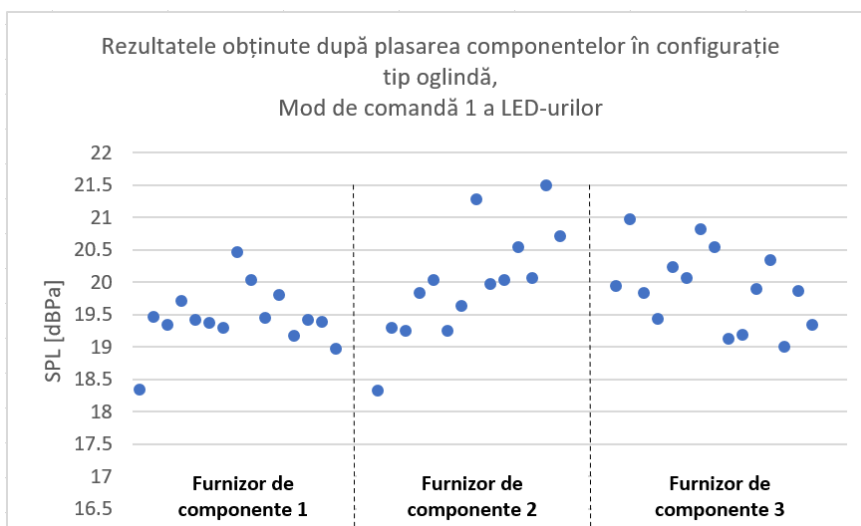


Fig.5.17. Rezultatele obținute prin măsurarea dipozitivelor cu componentele plasate în configurație tip oglindă, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

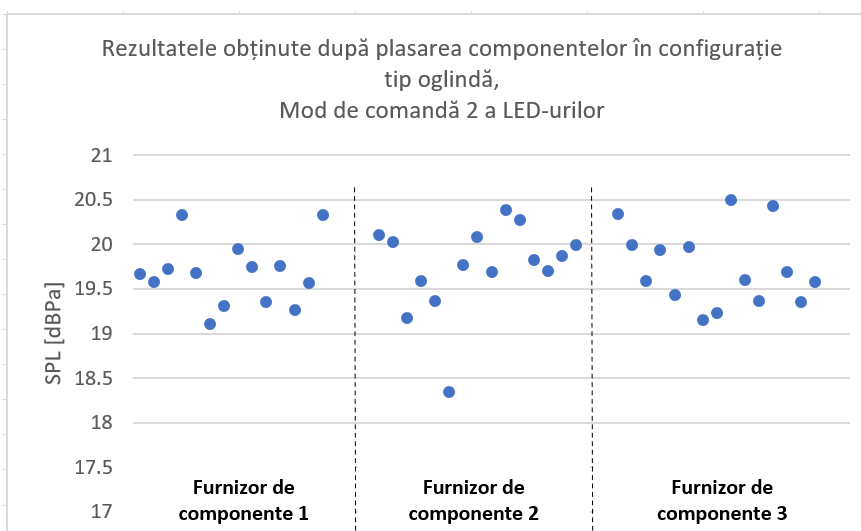


Fig.5.18. Rezultatele obținute prin măsurarea dipozitivelor cu componentele plasate în configurație tip oglindă, controlate în modul de comandă 2 al LED-urilor

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.

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 pentru eliminarea spike-urilor de tensiune</i>	20.26nm	36.83dBPa
<i>Design cu condensatoare pre-încărcate</i>	7.96nm	31.99dBPa
<i>Design cu optimizare de layout folosind configurație tip oglindă</i>	117fm	21.50dBPa

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

Capitolul 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

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 $2.2\mu\text{F}$, generează zgomotul acustic.

Pentru această investigație, am selectat douăzeci de dispozitive cu valori diferite de SPL și am efectuat secțiuni longitudinale transversale 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.

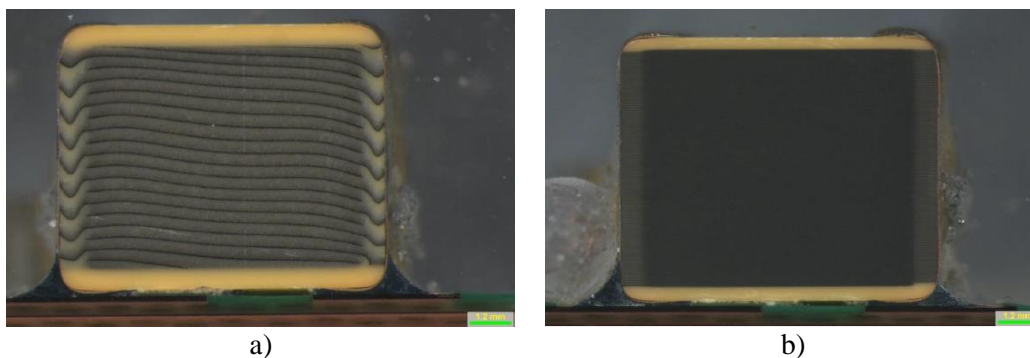


Fig.6.1. Imagine de secțiune longitudinală transversală al condensatorului: a) plasat în orientare verticală; b) plasat în orientare orizontală

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

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

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.

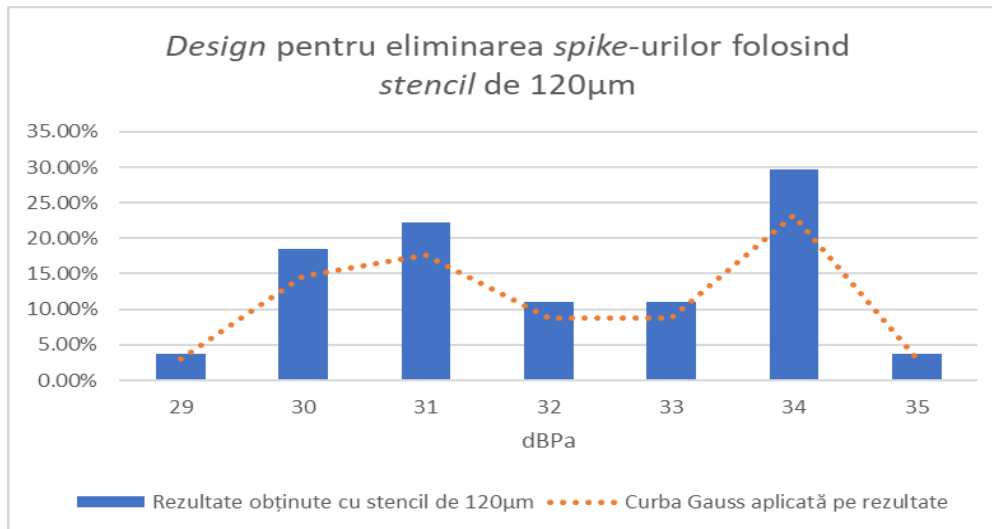


Fig.6.2. Rezultatele măsurării SPL-ului folosind *design*-ul pentru eliminarea *spike*-urilor și *stencil* de 120µm

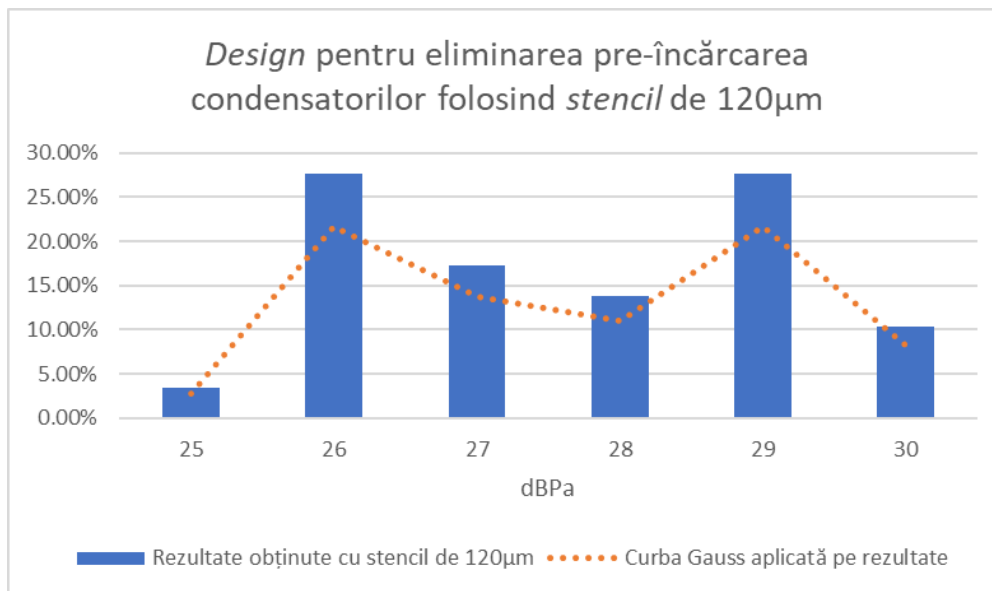


Fig.6.3. Rezultatele măsurării SPL-ului folosind *design*-ul pentru pre-încărcarea condensatoarelor și *stencil* de 120µm

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 pentru 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 150 μ m.

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). 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 însă nu au arătat 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 2.2 μ F, așa cum este prezentat în Fig.6.5.

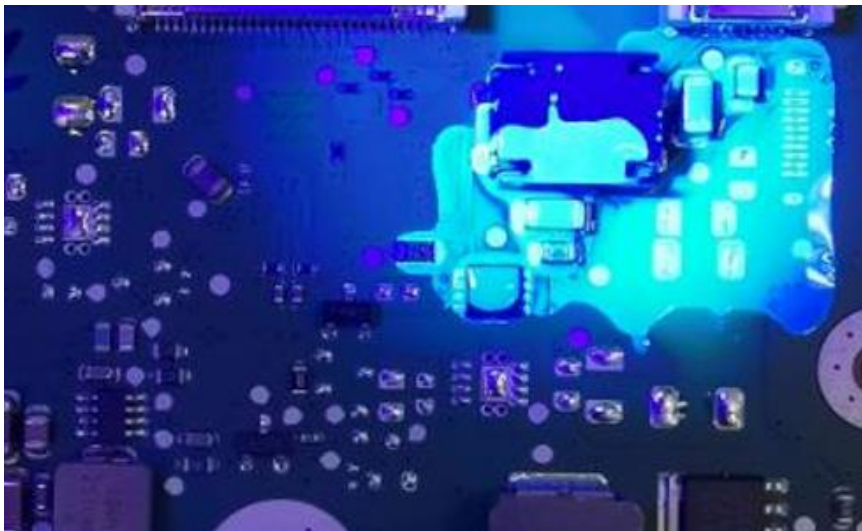


Fig.6.5. Aplicarea lacului pe PCB, vizibil la expunerea cu lumină UV

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 μ F, asemănător Fig.6.8.

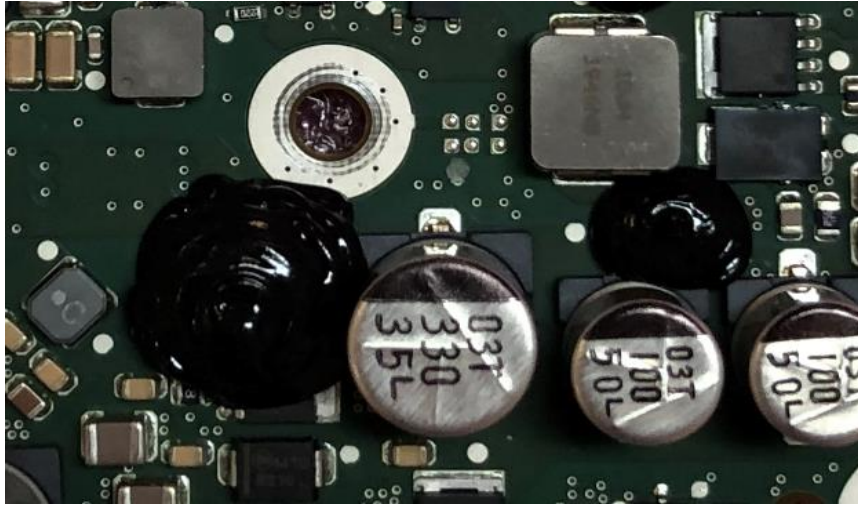


Fig.6.8. Aplicare *potting* pe PCB

Rezultatele arată 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.

Din punct de vedere al soluțiilor concentrate pe modificări de componente, am studiat comportamentul condensatoarelor cu dielectric de tip C0G din punct de vedere al zgomotului acustic. 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.

Pentru a observa comportamentul din punct de vedere al zgomotului acustic, am înlocuit condensatoarele de $2.2\mu\text{F}$ cu serii de condensatoare C0G, conectate în paralel, pentru a egala valoarea capacității originale. 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.

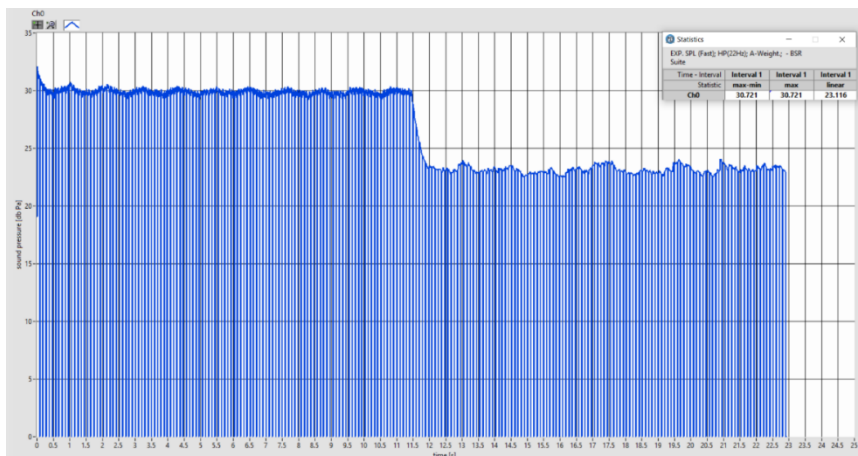


Fig.6.13. Rezultatele măsurării în camera anecoică pentru *design*-ul original, cu condensatoare de tip X7R

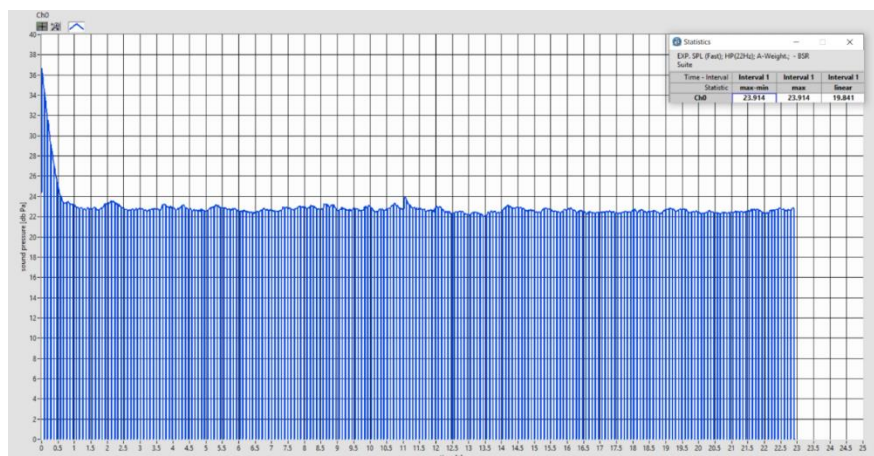


Fig.6.14. Rezultatele măsurării în camera anecoică pentru *design*-ul cu C0G-uri

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 C0G, 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 C0G este inconstabilă. Cu toate acestea, spațiul necesar pe PCB pentru a popula condensatoare C0G cu capacitatea echivalentă de $2.2\mu\text{F}$ crește substanțial. Prin urmare, această soluție nu este fezabilă pentru sisteme cu cerințe restrictive de dimensiune.

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. 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. 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.

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, configurația paralelă este de asemenea eficientă.

Pentru a investiga această soluție, asemănător investigației configurației de tip oglindă, am înlocuit fiecare condensator de $2.2\mu\text{F}$, cu amprentă 1206, cu câte două condensatoare cu valoare de $1\mu\text{F}$ 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.

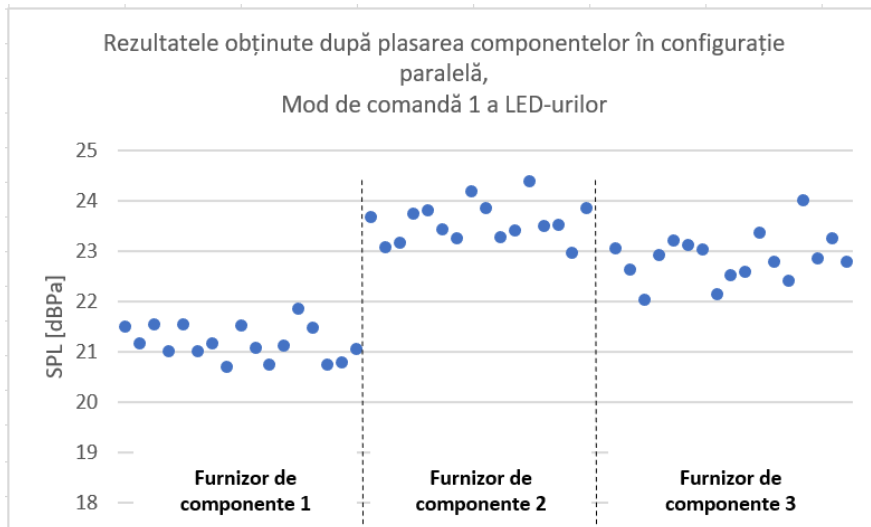


Fig.6.18. Rezultatele obținute prin măsurarea dispozitivelor cu componente plasate în configurație paralelă, controlate în modul de comandă 1 al LED-urilor

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, condensatoarele primite de la furnizorul 1 de componente sunt mai silențioase, pe când al doilea furnizor generează un nivel mai mare de zgomot acustic.

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 Clasa 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

Capitolul 7 – Concluzii și contribuții originale

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”.

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™. 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.

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 (sumarizate în Tabelul 4.2.) au fost validate experimental în Capitolul 5.

În capitolul 6 am propus alternative suplimentare pentru reducerea fenomenului „singing capacitors”, pe care le-am analizat din punct de vedere al eficienței. Acestea sunt împărțite în patru categorii: soluții concentrate pe modificări ale procesului de fabricație, soluții concentrate pe modificări de componente, soluții de acoperire a sunetului, optimizare de layout. În categoria soluțiilor concentrate pe modificări de ale procesului de fabricație, am propus plasarea condensatoarelor în orientare verticală, reducerea cantității aliajului de lipire, tratare termică, lăcuire și *potting*. Deoarece soluțiile disponibile comercial sunt deja investigate în Capitolul 2, pentru categoria soluțiilor concentrate pe modificări de componente, am studiat efectul folosirii condensatoarelor de clasă 1 (cu dielectric de tip C0G) din punct de vedere acustic. Pentru acoperirea sunetului, am propus folosirea garniturilor anti-vibrație sau a buretelui special, ignifug, realizat din EPDM cu celulă semi-închisă. Capitolul se încheie cu propunerea optimizării de layout prin plasarea condensatoarelor în configurație geometrică paralelă. Rezultatele acestor investigații sunt prezentate în Tabelul 6.2.

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.

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
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>

Selecție din 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. 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
4. 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
5. 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
6. 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
7. 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
8. 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
9. Briscoe, J., & Dunn, S. (2014). *Nanostructured Piezoelectric Energy Harvesters* (1st ed., pp. 3-4). Cham: Springer.
10. 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.
11. **Covaci, C., & Gontean, A. (2020).** Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review. *Sensors*, 20(12), 3512. doi:10.3390/s20123512
12. 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
13. 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
14. 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
15. 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
16. 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
 17. Crocker, M. J., & Arenas, J. P. (2021). *Engineering acoustics noise and vibration control* (1st ed., pp. 155-156). Hoboken, NJ: Wiley
 18. **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
 19. **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
 20. 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