

STUDIUL TEHNOLOGIC AL ANGRENAJELOR CILINDRICE, CONICE ȘI MELCATE PRIN ANALIZĂ ACUSTICĂ

ENCIU Cornel Cristian

Facultatea: IMST, Specializarea: TCM, Anul de studii: IV, e-mail: enciucornel9495@yahoo.com

Conducători științifici: ȘL. dr. ing. Cristian TARBĂ, Dr. Cristian BĂRBULESCU

REZUMAT: Lucrarea are ca scop determinarea frecvențelor proprii ale unei bormașini electrice, prin măsurare și analizare comparativă a variațiilor nivelelor de intensitate acustică, utilizând metoda Transformata Fourier Rapidă (FFT). Metoda FFT a fost aplicată utilizând un stand dezvoltat pentru lucrarea prezentată. Au fost prezentate, succint, și alte metode pentru realizarea măsurărilor pentru analiza acustică.

CUVINTE CHEIE: FFT, Transformata Fourier Rapidă, intensitate sonoră, analiză acustică

1. Introducere

Subiectul lucrării este reprezentat de analiza acustică a diferitelor tipuri de mașini rotative.

Obiectivele urmărite sunt prezentarea metodelor de analiză acustică, a instrumentelor folosite, determinarea frecvențelor proprii ale unei bormașini electrice și analizarea diagramelor efectuate în urma măsurărilor.

Pentru a putea obține diagramele a fost dezvoltat un stand pe care a fost fixată bormașina, iar, prin utilizarea programului Spectrum Analysis [7], au fost obținute diagrame pentru diferitele încărcări la care a fost supus angrenajul.

2. Modelare teoretică

Metode de precizie pentru surse cu spectru larg și discret în camere reverberante. Această metodă este avantajoasă la evaluarea puterii sonore emisă de o sursă care produce zgomot în benzi largi sau discrete de frecvență, factorul de directivitate fiind fără importanță. Volumul sursei este preferabil să nu depășească 1% din volumul camerei reverberante. Obiectul testat se plasează în camera reverberantă în poziția de lucru, la distanță de cel puțin 1,5 m față de cel mai apropiat perete. Nivelul de presiune sonoră poate fi măsurat astfel: mișcând un singur microfon din poziție în poziție, folosind o linie de microfoane fixe, mișcând continuu un microfon pe o cale adecvată în camera reverberantă. Pentru primele două metode se folosesc cel puțin 3 microfoane, sau 3 poziții pentru microfoane la o distanță minimă de $\lambda/2$ pentru fiecare. Ieșirile microfoanelor trebuie urmărite automat și/sau mediate. Pentru a treia metodă microfonul va traversa cu viteză constantă un traseu de cel puțin 3 m lungime, interval în care semnalul de la microfon este mediat într-o bază pătratică medie.



Fig. 1. Câmpul de măsurare a izolării zgomotului de fond folosind un sonometru și un braț de microfon rotativ [3]

Metode tehnice pentru măsurări în camere reverberante speciale. Această metodă se folosește atunci când precizia măsurătorilor nu este impusă. Proprietățile camerei reverberante sunt alese astfel încât influența camerei asupra puterii sonore a sursei să fie minimă. Mărimea camerei determină atât dimensiunile maxime ale sursei cât și frecvența limită pentru care metoda este valabilă. Dimensiunea minimă permisă a volumului camerei este 70 m^3 , iar a sursei cel mult 1 % din volumul camerei. Pentru măsurare sursa se așează în poziție nominală de lucru, pe podea, la o distanță de cel puțin 1 m de fiecare perete. Numărul minim de poziții ale microfoanelor este determinat de precizia măsurătorilor.

Metode tehnice pentru măsurători în câmp liber, pe o suprafață reflectantă. Sursa este plasată pe o suprafață reflectantă dură în câmp liber. Condiția de câmp liber este satisfăcută dacă raportul dintre absorbția totală a camerei în care se efectuează măsurătorile, A și suprafața de măsurare, S , este suficient de mare. În general dacă $A/S > 10$, nu sunt necesare corecții. Pentru $6 \leq A/S \leq 10$, corecția uzuală este de 2 dB. Absorbția totală A se calculează prin formula Sabine:

$$A = 0,16 \frac{V}{T} \quad (1)$$

V – volumul camerei [m^3]

T – timpul de reverberație [s]

Suprafața de măsurare poate avea forma unei emisfere, a unui paralelipiped rectangular sau să urmărească forma sursei. Numărul minim al pozițiilor de măsurare este 8.

Metode de precizie pentru măsurări în camere anecoice și semianecoice. Aceste metode se referă la două sisteme de determinare, în laborator, a puterii sonore a unei surse și se bazează pe premiza că dacă sursa emite într-un câmp liber sau într-un câmp liber pe o suprafață reflectantă, atunci câmpul reverberant este neglijabil și toată puterea emisă de sursă se obține din nivelul total de presiune sonoră, mediat în timp și spațiu pe suprafața unei sfere, respective emisfere, ipotetice, ce înconjoară sursa.

Volumul sursei nu trebuie să depășească 0,5 % din volumul camerei. Coeficientul de absorbție al suprafeței reflectante nu trebuie să fie mai mare de 0,06. Sursa se plasează pe un suport rigid pentru a preveni vibrațiile. În câmp liber suprafața de măsurare este o sferă centrată pe sursă între dublul dimensiunii maxime a sursei și 1 m. În câmp liber pe o suprafață plană, suprafața de măsurare este o emisferă centrată pe sursă.

Nivelul de presiune sonoră se măsoară în poziții diferite pe suprafețe considerate, astfel: mișcând un microfon în diferite poziții sau cu o linie de microfoane conectate secvențial; mișcând un microfon pe căi circulare, distanțate regulat, pe suprafața sferei sau emisferei; mișcând un microfon în lungul unor arce meridiane, distanțate regulat pe suprafața sferei sau emisferei; utilizând o metodă dezvoltată de Brüel & Kjaer, în care microfonul se deplasează pe o spirală, pe suprafața sferei sau emisferei [1].

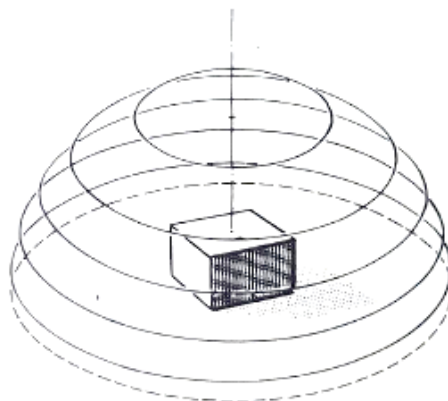


Fig. 2. Deplasarea microfonului în jurul unor arce meridiane [1]

3. Determinarea experimentală a frecvențelor proprii pentru o bormașină electrică

3.1. Suport teoretic

Metoda Transformata Fourier Rapidă (FFT). În ultimii ani s-a înregistrat o dezvoltare rapidă în domeniul instrumentelor de analiză a frecvenței. Prețul scăzut al componentelor digitale arată faptul că acestea sunt foarte competitive cu analizoarele analogice mai vechi utilizate pentru analiza frecvenței.

Conceptul RTA (Analiză în timp real) a devenit un termen comun pentru un analizor rapid care produce un spectru complet în paralel și îl afișează pe un ecran actualizat continuu. Această caracteristică a producerii rapide a spectrelor actualizate continuu este foarte valoroasă pentru detectarea problemelor.

Cele mai bune metode de obținere a spectrelor sunt filtrarea digitală și FFT [2].

Perechea integrală de transformare Fourier oferă un mijloc de transformare a unei funcții de timp $f(t)$ în funcția sa complexă $F(\omega)$ și invers. Este scrisă după cum urmează:

$$F(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (2)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (3)$$

Intensitatea sonoră. Intensitatea, I , a unei unde sonore este definită ca fiind valoarea medie a energiei acustice care traversează o zonă unitară perpendiculară pe direcția de propagare, în unitatea de timp. Spre deosebire de expresia densității energetice a undelor sonore, expresia intensității este diferită pentru diferitele tipuri de câmpuri sonore [3], [4].

Pentru orice undă progresivă liberă, relația de determinare este:

$$I = \frac{\rho^2 v_{rms}^2}{\rho c} \quad (4)$$

- I – intensitatea [$W m^{-2}$], $\rho^2 v_{rms}^2$ - presiunea sonoră [Pa], ρ – densitatea aerului [$kg m^{-3}$]
 - c – viteza sunetului [$m s^{-1}$]

Intensitatea câmpului sonor difuz la pereții unei încăperi este determinată cu relația:

$$I = \frac{\rho^2 v_{rms}^2}{4\rho c} \quad (5)$$

3.2. Standul de măsurare

Schema cinematică a dispozitivului măsurat este prezentată în Fig. 3, după cum urmează:

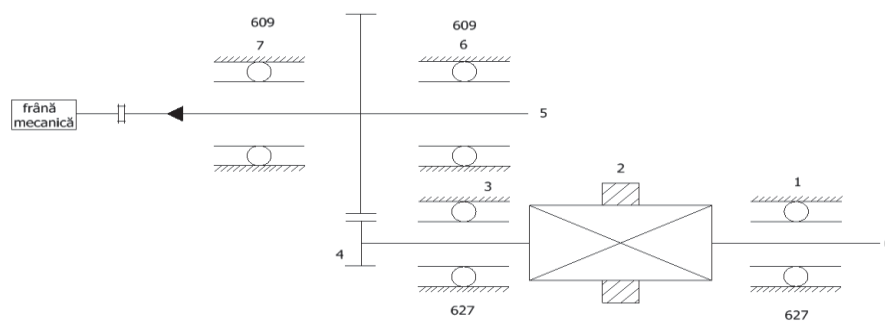


Fig. 3. Schema cinematică a dispozitivului măsurat

Schema bloc a standului este prezentată în Fig. 4, după cum urmează:

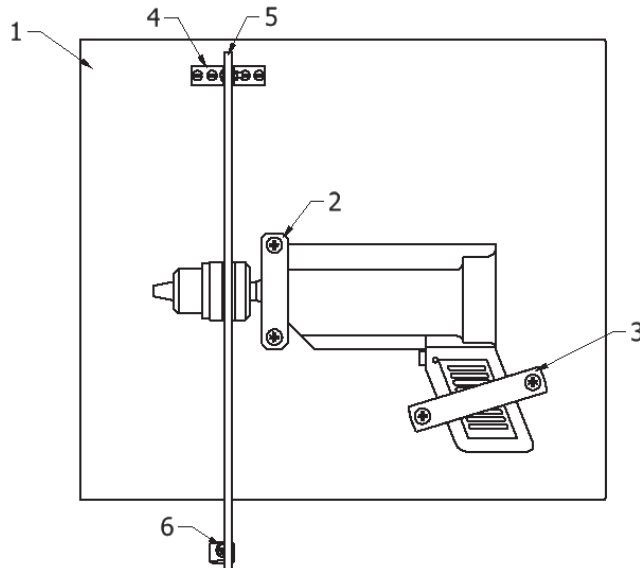


Fig. 4. Schema bloc a standului

Componentele standului din Fig. 4 sunt după cum urmează :

1. Suport cu 4 piciorușe din pânză;
2. Colier de tip heko;
3. Colier de tip INKA;
4. Dispozitiv fixare frână;
5. Frână din lemn care are atașată o bucată de ferodou;
6. Dinamometru;
7. Mickrofon x 2-High Definition Audio.

3.3. Tehnologia de măsurare

Măsurătorile au fost realizate utilizând programul Spectrum Analysis. Pentru determinarea valorilor frecvențelor fundamentale, dar și a armonicilor au fost aplicate următoarele relații de calcul:

$$f_0 = \frac{2300}{\epsilon_0} \quad (6)$$

$$f_1 = f_3 = f_0 * nr. bile rulment \quad (7)$$

$$f_2 = f_0 * nr. poli (sau lamele rotor) \quad (8)$$

$$f_4 = f_0 * z_1 \quad (9)$$

$$f_5 = \frac{f_4}{z_2} \quad (10)$$

$$f_6 = f_7 = f_5 * nr. bile rulment \quad (11)$$

În cadrul programului software utilizat, au fost realizate următoarele setări:

- scara amplitudinii: x2 liniar;
- scara frecvențelor: întindere x3;
- afișare diagramă: spectrogramă cu mediere;
- banda de trecere: 22 Hz ISO.

Etalonarea benzii de frecvență s-a realizat cu ajutorul unui diapazon cu nota fa ($f = 352$ Hz).

S-au determinat forțele de acționare asupra dispozitivului măsurat, la funcționarea acestuia sub sarcini de 30 %, 60 %, respectiv 100 %.

Tabelul 1. Forțele de acționare

Sarcina	P [W]	n [rot/min]	ω [rad/s]	M [Nm]	b [m]	F [N]
100 %	230	328,57	34,4	6,68	0,41	16,29
60 %	230	328,57	34,4	6,68	0,41	9,77
30 %	230	328,57	34,4	6,68	0,41	4,88

Pentru fiecare element al schemei cinematice s-au determinat valorile frecvențelor fundamentale, dar și a armonicilor.

Tabelul 2. Valorile frecvențelor

Element	f [Hz]	Armonica a II-a [Hz]	Armonica a III-a [Hz]
0. Arborele motor	38,33	76,66	114,99
1. Rulment URB 627 - Z - S	268,31	536,62	804,93
2. Motor electric	919,92	1839,84	2759,76
3. Rulment URB 627 - Z - S	268,31	536,62	804,93
4. Frecvența de angrenare	229,98	459,96	689,94
5. Arbore condus	5,34	10,68	16,02
6. Rulment URB 609 - Z - S	37,38	74,76	112,14
7. Rulment URB 609 - Z - S	37,38	74,76	112,14

Schema de măsurare a dispozitivului este prezentată în Fig. 5, după cum urmează:

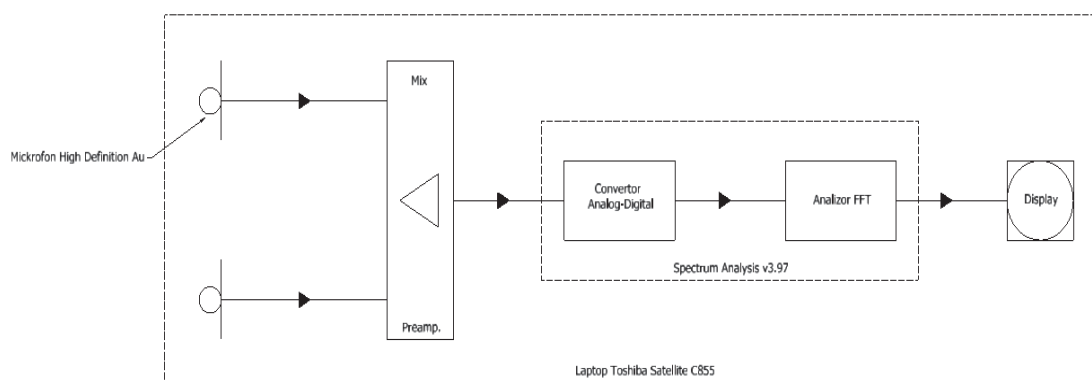


Fig. 5. Schema de măsurare

În schema de măsurare se poate observa cum cele 2 microfoane preiau zgomotul emis de angrenaj și cu ajutorul unui preamplificator se convertește semnalul în semnal digital care este afișat pe ecran.

S-au realizat măsurătorile, iar valorile înregistrate sunt exemplificate în diagramele din Fig. 6, după cum urmează:

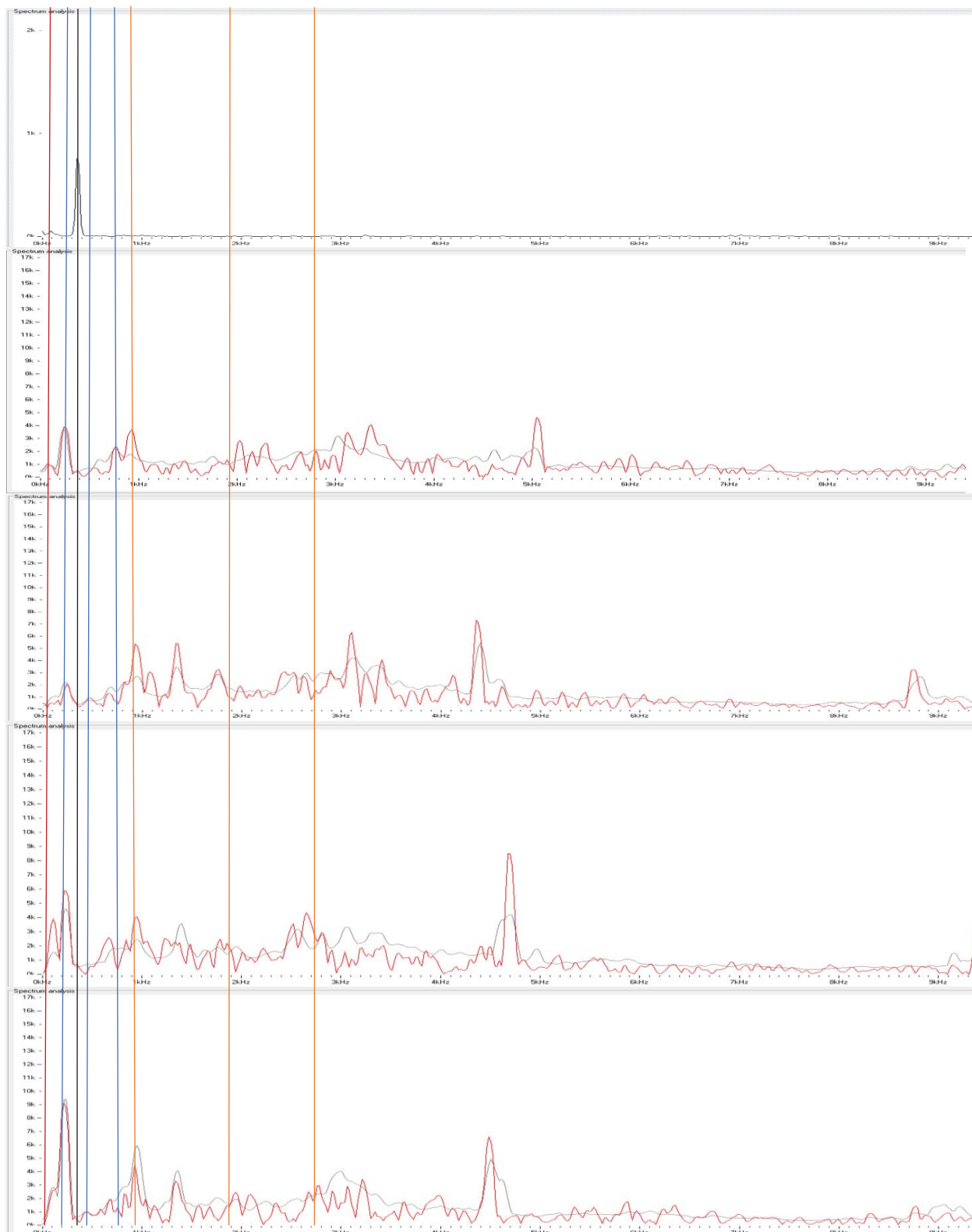


Fig. 6. Diagrame măsurate [7]

S-au analizat diagramele și pentru fiecare element al schemei cinematice s-au determinat nivelele de intensitate sonoră, apoi pe baza acestora s-au făcut interpretări. Am ales nivelul liniar de măsurare al nivelului intensității acustice [W/m^2], deoarece măsurarea presiunii acustice [dB] nu evidențiază clar valorile diferențiale obținute în spectrograme.

Tabelul 3. Arborele motor

Sarcină [%]	F [N]	$L_i(f)$	$L_i(2f)$	$L_i(3f)$
0	0	1	1	1
30	4,88	0,5	0,5	0,8
60	9,77	3,9	3,9	3,9
100	16,29	2,5	2,5	2,5

Arborele motor funcționează normal, având un grad de uzură avansat, fiind echilibrat dinamic și centrat.

Tabelul 4. Rulmenți 627

Sarcină [%]	F [N]	$L_i(f)$	$L_i(2f)$	$L_i(3f)$
0	0	3,9	0,6	2,2
30	4,88	2,1	0,4	2,2
60	9,77	5,9	0,5	2,3
100	16,29	9,1	1,2	2,2

Rulmenții 627 funcționează corect, nu au bătaii, prezintă o uzură pronunțată la calea de rulare, ceea ce duce la un nivel de zgomot mărit pe frecvența fundamentală.

Tabelul 5. Motor electric

Sarcină [%]	F [N]	$L_i(f)$	$L_i(2f)$	$L_i(3f)$
0	0	3,7	1,2	2
30	4,88	5,5	3,3	1,5
60	9,77	4	2,2	2,9
100	16,29	4,5	1,2	2,8

Motorul electric își păstrează turația nominală la toate încărcările, având o uzură a lamelelor colectoare.

Tabelul 6. Angrenaj

Sarcină [%]	F [N]	$L_i(f)$	$L_i(2f)$	$L_i(3f)$
0	0	3,9	0,5	2,2
30	4,88	2	0,8	1,2
60	9,77	5,9	0,5	2,5
100	16,29	9	0,9	1,9

Angrenajul are o evolventă bine conturată care, în urma funcționării îndelungate, a căpătat un joc care poate fi observat prin valorile mărite ale nivelului de zgomot emis pe frecvența fundamentală și armonică a III-a. Prin creșterea progresivă a sarcinii jocul dispare treptat printr-o flancare a dinților, fapt observat prin scăderea nivelului de zgomot în sarcină nominală.

Tabelul 7. Arbore condus

Sarcină [%]	F [N]	$L_i(f)$	$L_i(2f)$	$L_i(3f)$
0	0	1	1	1
30	4,88	0,5	0,5	0,5
60	9,77	0,2	0,2	0,2
100	16,29	0,3	0,3	0,3

Arborele condus funcționează în parametri normali.

Tabelul 8. Rulmenți 609

Sarcină [%]	F [N]	$L_i(f)$	$L_i(2f)$	$L_i(3f)$
0	0	0,5	1	1
30	4,88	0,5	0,5	0,7
60	9,77	0,2	0,2	3,9
100	16,29	0,5	0,5	2,5

Rulmenții 609 au o funcționare corectă, nu au bătaie radială sau axială. Valorile mai ridicate ale nivelului de zgomot pe armonica a III-a nu pot fi separate în totalitate de cele de pe armonica a III-a a arborelui motor, frecvențele fiind foarte apropiate.

4. Concluzii

Metoda de analiză folosită în acest experiment permite determinarea exactă a frecvențelor de lucru ale unei mașini rotative fără a necesita folosirea unui laborator de specialitate. Totodată variațiile intensităților sonore ale componentelor spectrale pot indica eventuale neregularități în funcționarea dispozitivului măsurat, cât și abateri tehnologice în realizarea elementelor componente, asamblarea lor și utilizarea în regim nominal.

5. Bibliografie

- [1]. G. Niemann (1965), *Maschinenelemente*, Editura Springer Verlag
- [2]. Brüel & Kjaer (1981), *Digital Signal Analysis*, Editura Tehnical Review
- [3]. Brüel & Kjaer (1982), *NOISE CONTROL*, ISBN 87 87355 38 8 (hf.), Editura Naerum Offset
- [4]. Brüel & Kjaer (1979), *Acoustic Noise Measurements*, ISBN 87 87355 30 2, Editura Naerum Offset
- [5]. Brüel & Kjaer (1978), *Architectural Acoustics*, ISBN 87 87355 26 4, Editura Naerum Offset
- [6]. Gh. Miloiu, Fl. Diliță, D. V. Diaconescu (1918), *Transmisii mecanice moderne*, Editura Tehnică, București
- [7] *** www.techmind.org

6. Notații

Următoarele simboluri sunt utilizate în cadrul lucrării:

- p_{rms}^2 - presiunea sonoră [Pa]
- ρ – densitatea aerului [kg m⁻³]
- c – viteza sunetului [m s⁻¹]
- I – intensitatea [W m⁻²]
- $L_i = I/I_0$ (adimensional) – nivel de intensitate sonoră
- z_1 – nr. dinți pinion
- z_2 – nr. dinți roata condusă
- V – volumul camerei [m³]
- T – timpul de reverberație [s]
- λ – lungimea de undă corespunzătoare celei mai mici frecvențe studiat [m]