A XIII-a Conferinţă Naţională multidisciplinară – cu participare internaţională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2013

MENTENANŢA PREDICTIVĂ A ANGRENAJELOR MAŞINILOR-UNELTE PRIN ANALIZA VIBRAŢIILOR

Florin ŢEPEŞ-BOBESCU, Alina-Sabina ŢEPEŞ-BOBESCU,
Mariana ARGHIR

PREDICTIVE MAINTENANCE OF GEARING MACHINERY VIBRATION ANALYSIS TOOLS

This paper presents the implementing maintenance management for organizing and preparing system of spare parts to optimize repair time. Planning the activities of repair and minimizing "downtime" of the machine can be made only through detection of possible defects. The machine tools reliability and safety increase, they give respectively operating costs decreased lead to a better total cost. By studying the vibration signal produced by a gear in a machine tool structure and the change of the signal related to the presence of defects gear can identify various defects. Defects are localized at the contact between the mechanical parts, which means changing of geometry and conditions of power transmission, which results in vibrations and shocks, the measurements for determining the gear failures occur.

Cuvinte cheie: angrenajele maşinilor unelte, zgomot, vibraţii, eroare de transmisie, mentenanța predictivă
Keywords: spur gear, noise, gear vibration, transmission error, predictive maintenance

1. Mentenanţa predictivă

Procesul de detecţie şi diagnoză a defectelor presupune accesul la anumite mărimi/parametri semnificativi ai sistemului, care dau în orice moment informaţii asupra stării acestuia [1].

Trebuie avut în vedere faptul că, în orice sistem, programul de mentenanţă se va focaliza pe componentele critice ale acestuia.

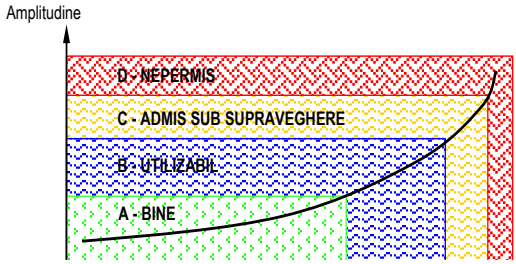


Fig.1

Domeniile ce indică starea de funcţionare a utilajelor

Toate standardele internaţionale recomandă ca, în momentul în care utilajul a intrat în prima limită de alarmare - A_1T_1 - *admis sub supraveghere*, el să fie diagnosticat şi, în funcţie de defect, să se urmărească evoluţia lui, cât mai des, până la oprire - A_2T_2 - *nepermis*, care va avea loc după un interval de timp optim ales, în funcţie de tipul defectului, evoluţia lui şi considerentele economice, astfel încât să fie evitată o oprire bruscă (necontrolată) a utilajului în avarie. Utilajele ce funcţionează în domeniile A şi B sunt în stare bună de funcţionare.

Domeniile care indică starea de funcţionare a utilajelor sunt prezentate în figura 1 [2].

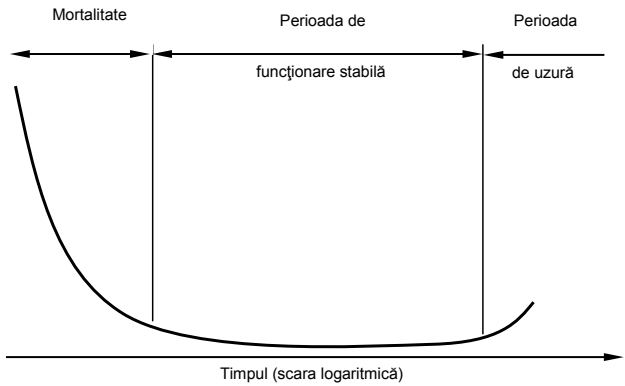


Fig. 2

Ciclul de viaţă a unui utilaj

Ca rezultat al cercetărilor în figura 2 se observă curba reală de viaţă a maşinii unelte faţă de transpunerea teoretică referitoare la utilajul în cauză [2].

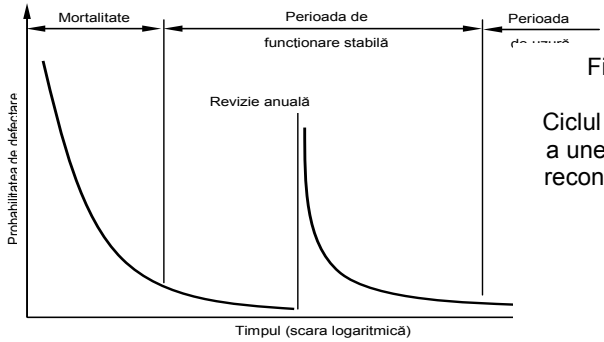


Fig. 3

Ciclul de viaţă a unei maşini recondiţonate

În figura 3 se observă ciclul de viaţă a unei maşinii care este repusă în funcţiune imediat după efectuarea reparaţiilor, existând o mare probabilitate a identificării unor defecte datorate imperfecţiunilor din timpul reparaţiilor sau datorate chiar subansamblelor din componenţa respectivei lucrării.

Prin implementarea mentenanţei predictive se înregistrează creşteri economice obţinute din reducerea costurilor de reparaţie.

2. Măsurarea nivelului global de vibraţie al unui extruder

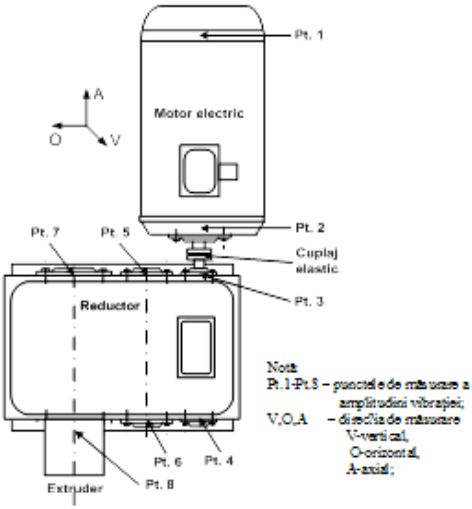
Pentru a pune în evidenţă eficacitatea mentenanţei prin analiza vibraţiilor s-au efectuat măsurători de vibraţii pentru grupul de acţionare al unui extruder (figura 4), la mers în sarcină, în 3 perioade de timp diferite.

2.1. Metoda de aliniere la rece cu trusă cu ceasuri comparatoare

Unul din factorii principali de apariţie a vibraţiilor în extruder este dezalinierea arborilor grupului de acţionare. Prin urmare, iniţial s-a determinat valoarea dezalinierilor grupul acţionare aplicând metoda de aliniere la rece, cu trusă cu ceasuri comparatoare.

A. **Caracteristici tehnice:**

- Masa rotorului: 300 kg
- Tipul fundaţiei: Elastic.
- Turaţia maşinii: 1605 rpm
- Turaţia de echilibrare: 1605 rpm
- Modul de corecţie: – fixarea locului pentru corecţie



Schema cinematică a reductorului

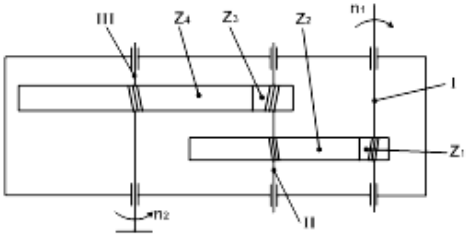


Fig. 4 Schiţa grupului de acţionare

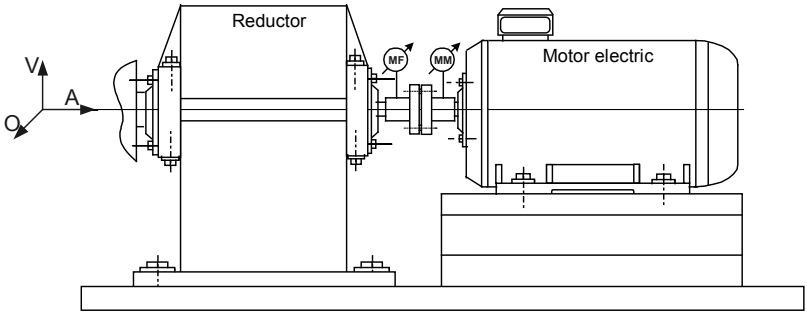


Fig. 5 Amplasarea ceasurilor comparatoare

Calificativul de funcţionare se acordă în funcţie de puterea maşinii-unelte, conform [3] şi [4], (tabelul 1 - Calificativul de funcţionare conform [3]).

Tabelul 1

Standardul		**ISO 10816-3**	**ISO 10816-3**	**ISO 10816-3**	**ISO 10816-3**
Tipul maşinii		Maşini medii 15<P<300 [kW]	Maşini medii 15<P<300 [kW]	Maşini medii 15<P<300 [kW]	Maşini medii 15<P<300 [kW]
Fundaţia		rigidă	rigidă	flexibilă	flexibilă
Unit. de măs. (val. eficace - RMS)		[mm/s]	[μm]	[mm/s]	[μm]
Calificativul de funcţionare	Bine	sub 1,4	sub 22	sub 2,3	sub 36
	Utilizabil	1,4 – 2,8	22 – 45	2,3 – 4,5	36 – 71
	Admis sub supraveghere	2,8 – 4,5	45 – 71	4,5 – 7,1	71 – 113
	Nepermis	peste 4,5	peste 71	peste 7,1	peste 113

Tabelul 2

Nr. crt.	Maşina	Diametrul cuplajului [mm]	Distanţa d [mm]	Nealinierea [mm]					
				Radială r		Unghiulară u		Combinată r-u	
				V	O	V	O	V	O
1	motor-reductor	250	3	0,05	0,01	0,01	0,01	-	-

Măsurătoarea I. S-au determinat valorile eficace RMS ale parametrilor viteză şi deplasare de vibraţie, efectuate pentru extruderul în sarcină, în domeniile de frecvenţă 10 - 1000 Hz şi 2-1000 Hz (Tabel 2 - valorile dezalinierilor).

Tabelul 3

Punct de măsurare	*Direcţia de măsurare*								
	Vertical			**Orizontal**			**Axial**		
	[mm/s]	[μm]	gSE	[mm/s]	[μm]	[mm/sR]	[mm/s]	[μm]	gSE
B. Punct 1	0,8	2	0,1	**2,2**	**12**	0,15	2,5	13	-
Punct 2	1,3	10	0,14	**1,7**	**9**	0,3	2,5	13	-
Punct 3	1,3	7	0,4	2,3	11	1,4	2,2	11	-
Punct 4	2	6	0,5	2	8	1,5	2,3	12	-

Punct 5	1,4	8	0,7	2	10	2,2	0,8	4	-
Punct 6	6,8	4	1,17	0,7	5	0,5	1,4	5	-
Punct 7	1	4	0,3	2,5	19	1	0,8	4	-
Punct 8	0,9	5	0,1	0,8	5	0,2	1	6	-

Diagnoza de vibraţii: calificativul de funcţionare a extruderului este utilizabil.

Măsurătoarea II. Au fost efectuate măsurătorile de vibraţii, cu maşina-unealtă în sarcină, turaţie extruder 98,4 rpm, turaţie motor 2050 rpm şi frecvenţă centrală 1,75 kHz. Parametrii de măsurare sunt viteza, deplasarea de vibraţie în domeniul de frecvenţă 10-1000 Hz, 2-1000 Hz.

Rezultatele s-au sistematizat în tabelul 3 - Rezultatele măsurătorilor pe direcţia verticală/ orizontală/axială și tabelul 4 - Rezultatele măsurătorilor pe direcţia verticală/ orizontală/axială.

Tabelul 4

Punct de măsurare	*Direcţia de măsurare*								
	Vertical			**Orizontal**			**Axial**		
	[mm/s]	[μm]	gSE	[mm/s]	[μm]	[mm/sR]	[mm/s]	[μm]	gSE
Punct 1	0,8	3	0,15	**5,1**	**23**	-	5,9	27	-
Punct 2	2,3	10	0,14	**4,3**	**20**	-	6,8	32	-
Punct 3	2,6	12	1,3	1,8	8	-	0,8	3	-
Punct 4	2,3	11	0,9	1,3	6	-	0,9	3	-
Punct 5	2,4	11	0,6	1,2	5	-	0,5	2	-
Punct 6	1,8	8	0,4	0,9	5	-	0,4	2	-
Punct 7	1,6	9	0,8	1,6	10	-	0,7	7	-
Punct 8	1,6	10	0,2	0,7	8	-	0,9	7	-

Diagnoza de vibraţie: Calificativul de funcţionare a extruderului este admis sub supraveghere. Se va verifica funcţionarea extruderului la diferite regimuri de funcţionare în funcţie de turaţia acestuia.

Măsurătoarea III. Măsurătorile de vibraţii au fost efectuate cu maşina în sarcină, parametrii de măsurare fiind viteza, deplasarea de vibraţie în domeniul de frecvenţă 10-1000 Hz, 2-1000 Hz.

Rezultatele măsurătorilor sunt sistematizate în tabelul 5 - Rezultatele măsurătorilor pe direcţia verticală/ orizontală/axială.

Tabelul 5

Punct de măsurare	*Direcţia de măsurare*								
	Vertical			**Orizontal**			**Axial**		
	[mm/s]	[μm]	gSE	[mm/s]	[μm]	[mm/sR]	[mm/s]	[μm]	gSE
C. Punct 1	0,7	1,2	-	**1,7**	**9**	-	0,9	5	-
Punct 2	0,5	2	-	**1,1**	**6**	-	0,9	5	-
Punct 3	0,7	3	-	0,7	2	-	1,2	6	-
Punct 4	0,8	1	-	1,5	3	-	1,2	6	-
Punct 5	0,6	2	-	0,9	5	-	0,8	4	-
Punct 6	0,5	2	-	0,6	5	-	0,7	2	-
Punct 7	0,6	2	-	0,7	2	-	0,7	2	-
Punct 8	0,3	1	-	0,9	6	-	0,6	3	-

Diagnoza de vibraţie: Calificativul de funcţionare a extruderului este utilizabil.

Pentru verificarea dezechilibrului prin măsurarea nivelului global de vibraţii în funcţie de turaţie *la mers în gol* s-au determinat valorile eficace RMS ale vitezei de vibraţie în domeniul de frecvenţă 2/10 - 1000 Hz, pe direcţie orizontală, la mers în gol – tabelul 6.

Tabelul 6

Turaţia la motorul electric	Turaţia șnecului	Puncte de măsurare		
		Pt. 1 - Orizontală		
		[mm/s]	[μm]	g
290	14	0,7	23	0,1
395	19	0,7	16	0,12
512	24,7	0,8	15	0,1
608	29,3	0,7	17	0,1
745	35,9	1	6	0,08
800	38,6	2,2	13	0,08
903	43,5	0,9	6	0,08
1000	48,2	1	6	0,08
1107	54,9	1	6,6	0,08
1213	58,5	0,8	3,5	0,08
1299	62,6	0,97	5	0,075
1405	67,7	1,2	7	0,08
1505	72,5	1,95	12	0,09
1602	77,3	3,6	21	0,1
1633	78,8	6,8	38	0,13
1708	82,3	3,4	19	0,1

1800	87	1,6	8	0,08
1903	91,8	1,5	7	0,08
2015	97,2	2,9	14	0,1
2060	99,3	3,1	14,36	0,11
2108	101,6	2,9	13	0,11
2204	106,2	2,8	12	0,11
2218	107	2,7	12	0,11

Diagnoza de vibraţie: Maşina poate fi încadrată în funcţie de turaţia șnecului la toate cele trei calificative de funcţionare, şi anume: utilizabil, admis sub supraveghere şi nepermis. Amplitudinile cele mai mari ale vibraţiilor sunt cuprinse în gama de turaţie 77-79 rpm a şnecului, respectiv 1600-1650 rpm a motorului electric. Aceste amplitudini sunt datorate unui posibil dezechilibru rotoric al motorului electric şi amplificate la frecvenţa de rezonanţă de aproximativ 27-27,8 Hz -1630...1670 rpm. Se recomandă echilibrarea în situ a rotorului motorului electric în afara frecvenţei de rezonanţă cu cel puţin 25 %.

Pentru verificarea dezechilibrului prin măsurarea nivelului global de vibraţii în funcţie de turaţie la mers în sarcină s-au determinat valorile eficace RMS ale vitezei de vibraţie în domeniul de frecvenţă 2/10 - 1000 Hz în direcţie orizontală, simulare în sarcină – tabelul 7.

Tabelul 7

Turaţia la motorul electric	Turaţia șnecului	Puncte de măsurare		
		Pt. 1 - O		
		[mm/s]	[μm]	g
823	39,6	0,1	6	0,08
904	43,6	0,6	4	0,07
1017	49	0,8	5	0,07
1100	53,1	0,9	7	0,07
1220	58,2	0,9	6	0,07
1340	64,6	1,5	10	0,07
1415	68,2	2	14	0,07
1508	72,6	3,1	20	0,09
1604	77,3	6	36	0,12
1637/1670	78,9	9,6-10,5	56	0,19
1705	82,3	7,1	40	0,15
1803	87	2,1	11	0,08
1909	92,1	3,1	14	0,09
2007	96,8	5,2	25	0,14
2102	101,3	4,3	20	0,13
2204	106,2	3,3	14	0,11
2218	107	3,2	14	0,11

Diagnoza de vibraţie: Diagnoza de vibraţii este asemănătoare celei efectuate cu extruderul în gol cu menţiunea că la aceeaşi frecvenţă de rezonantă amplitudinile vitezei de vibraţie sunt mai mari cu aproximativ 4 mm/s.

Maşina poate fi încadrată în funcţie de turaţia şnecului la toate cele trei calificative de funcţionare, şi anume: utilizabil, admis sub supraveghere şi nepermis.

Amplitudinile cele mai mari ale vibraţiilor sunt cuprinse în gama de turaţie 77-79 rpm a şnecului, respectiv 1600-1650 rpm a motorului electric.

Aceste amplitudini sunt datorate unui posibil dezechilibru rotoric al motorului electric şi amplificate la frecvenţa de rezonanţă de aproximativ 27-27,8 Hz -1630...1670 rpm.

Se recomandă echilibrarea în situ a rotorului motorului electric în afara frecvenţei de rezonanţă cu cel puţin 25 %.

Calificativul alinierii maşinii este *admisibil.*

3. Concluzii

■ Dezvoltarea tehnicilor de monitorizare şi diagnoză şi implementarea lor pe sistemele industriale asigură funcţionarea în condiţii de siguranţă şi de performanţă a acestora, cu efecte pozitive asupra fiabilităţii, productivităţii şi protecţiei muncii.

■ Prin metoda analizei vibraţiilor se pot identifica diverse defecte ce pot apărea în angrenajele din componenţa maşinilor unelte.

■ În timpul funcţionării angrenajelor, acestea se uzează diferit, astfel se modifică suprafaţa în contact, forţa se distribuie diferit în spaţiu şi timp şi se produc vibraţii.

■ În urma efectuării măsurătorilor s-a constatat faptul că vibraţia unei maşini unelte variază în funcţie de gradul de uzură a acesteia, de turaţie, de regimul în care funcţionează şi de echilibrul acesteia.

■ Aplicând mentenanţa prin diagnoza prin vibraţii prin efectuarea a 3 seturi de măsurători s-a pus în evidenţă eficenţa acestei.

BIBLIOGRAFIE

[1] Ţepeş-Bobescu, Fl., Arghir, Mariana, *Studiul predictiv al angrenajelor din masini-unelte*, Ştiinţă şi Inginerie, vol. 20, Editura AGIR, Bucureşti, 2011, ISSN 2067-7138, pag. 613.
[2] Ţepeş-Bobescu, Fl., Arghir, Mariana, *Consideraţii teoretice privind mentenanţa predictivă a angrenajelor sub acţiunea vibraţiilor*, Ştiinţă şi Inginerie, vol. 19, Editura AGIR, Bucureşti, 2012, ISSN 2067-7138, pag. 765.
[3] * * * ISO 10816-1:1995 *Mechanical Vibration – Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating parts* – Part 1.
[4] * * * ISO 10816-3:1998 *Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts* – Part 3.
[5] Bejan, M., În lumea unităţilor de măsură, ediţia a doua revăzută şi adăugită. Editura Academiei Române şi Editura AGIR, Bucureşti, 2005.

Drd. Ing.Florin ŢEPEŞ-BOBESCU
Drd. Alina-Sabina ŢEPEŞ-BOBESCU
Prof. Dr. Ing. Mariana ARGHIR
Mecanică şi Programare, Facultatea de Construcţii de Masini,
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca,
e-mail: tepes_b_florin@yahoo.com, marianananaarghir@yahoo.com,
telefon: 0264 401759, 0264 401657
membri AGIR