

## DIAGNOSTICAREA POMPELOR CENTRIFUGE PRIN ANALIZA VIBRAȚIILOR

Marius Stan, Sorinel Buca

**Rezumat:** Starea de funcționare a pompelor centrifuge ca pompe de proces poate fi apreciată în urma analizei vibrațiilor mecanice produse în lagărele arborelui rotorului sau propagate prin rețeaua de conducte de aspirație și/sau refulare. În lucrare sunt prezentate și analizate situații reale de lucru pe stand a unor pompe centrifuge monoetajate, multietajate cuplate în serie sau în paralel într-o rețea de conducte.

**Cuvinte cheie:** pompe de proces, analiza, vibrații, severitate

### 1. CONSIDERAȚII GENERALE

În exploatarea utilajelor sau a instalațiilor de cele mai diferite categorii, pot să apară vibrații, care, peste o anumită limită, conduc la scurtarea duratei de viață a utilajelor și reprezintă pentru om factori poluatori adesea foarte periculoși.

În general, cei mai importanți parametri ai mișcării oscilatorii  $A(t)$  pot fi considerați ca fiind:

- pulsația ( $\omega$ ) – dependentă de condițiile inițiale;
- amplitudinea – parametru ce caracterizează mărimea vibrațiilor;
- viteza eficace/acelerația – parametru ce evidențiază energia vibrațiilor;
- intensitatea undelor elastice, care se modifică foarte puțin cu frecvența mișcării.

Nivelul vibrațiilor agregatelor de pompare, exprimat prin valoarea vitezei eficace ( $V_{ef}$ ), se măsoară în punctele semnificative ale pompei (carcasă, corp lagăr, etc.).

Sursele de vibrații într-un utilaj dinamic pot fi multiple, dintre care enumerăm următoarele:

## THE VIBRATION ANALYSIS DIAGNOSTICS CENTRIFUGAL PUMPS

Marius Stan, Sorinel Buca

**Summary:** Operating status as process pumps centrifugal pumps can be considered in the analysis of mechanical vibrations produced in the rotor shaft bearings or propagated through the suction piping and / or discharge. The paper presents and analysis of the actual working of centrifugal pumps stand single-stage multi-coupled in series or in parallel in a pipeline network.

**Keywords:** process pumps, analysis, vibration severity

### 1. GENERAL

The operation of equipment or facilities of the various categories, vibrations may occur, which, over a certain limit, leading to shortening the life of the equipment and the man is often very dangerous pollutants.

In general, the most important parameters of the oscillatory motion  $A(t)$  can be considered as:

- pulsation ( $\omega$ ) - dependent on initial conditions;
- amplitude - the size parameter characterizing the vibration;
- effective speed / Accelerators - parameter shows vibration energy;
- intensity of elastic waves, which changes very little with the frequency of movement.

Vibration level pumping aggregates, expressed by the value of effective speed (VEF) is measured by significant points of the pump (housing, pump body, etc.).

The sources of vibrations in a dynamic machine can be multiple, of which mention the following:

- Defectarea lagarelor;
- Dezechilibrul dinamic al rotorilor;
- Descentrarea;
- Angrenaje defecte (angrenare defectuoasă);
- Rezonanța (rigidizare necorespunzătoare, nerespectarea tehnologiilor de lucru, proiectare greșită);
- Defecțiuni electrice (apar la 2 X frecvența rețelei și dispar la întreruperea alimentării cu energie electrică, închiderea circuitelor electrice prin lagare);
- Vibrații transmise;
- Cuplaje defecte;
- Temperatura ridicată pe lagare (sisteme de răcire ineficiente);
- Curgerea fluidelor prin conducte.

Pompele centrifuge sunt utilaje esențiale în industria chimică și petrochimică. Ele prezintă avantajul construcției compacte, greutate și gabarit reduse, posibilitatea de antrenare a diferitelor lichide, reglare și întreținere ușoară. La aceste pompe paletele imprimă fluidului o accelerație mare dându-i energia cinetică. Astfel acțiunea paletelor asupra fluidului este indirectă.

Pompa este o mașină care transformă energia mecanică primită de la o sursă de antrenare (de exemplu, un motor electric) în energie hidrolică. Transportul lichidului cu ajutorul pompei se poate realiza doar într-o instalație hidrolică. O astfel de instalație este alcătuită în mod obișnuit din: conducte, armături, aparate de măsură și bineînțeles pompa, ca element principal.

## 2. POMPELE CENTRIFUGE DE PROCES

În desenul de mai jos este reprezentată o pompă centrifugă. O condiție de funcționare a pompei centrifuge este amorsarea ei, adică pompa și conducta de aspirație să fie umplute cu apă, dar fără aer.

Lichidul pătrunde în pompă prin conducta de aspirație 1. Rotorul 2 este fixat pe arborele 3. Prin învârtirea rotorului apa este centrifugată la periferia acestuia unde apa este colectată în

- Failure of bearings;
- rotor dynamic imbalance;
- Descentrarea;
- Gears defects (faulty gear);
- Resonance (stiffening inappropriate, non working technologies, design wrong);
- electrical disturbances (occurring in 2 X frequency network and resolves after discontinuation of power supply, electrical circuits by closing camps);
- vibration;
- Coupling defects;
- the high temperature bearings (inefficient cooling systems);
- The flow of fluids through pipes.

Centrifugal pumps are essential equipment in chemical and petrochemical industry. It has the advantage of compact construction, low weight and size, can drive a different liquid, adjustment and maintenance. These blades print pumps fluid to increase its kinetic energy accelerator. Such blades on the fluid action is indirect.

The pump is a machine that converts mechanical energy received from a source drive (eg an electric motor) into hydraulic energy. Fluid transport by the pump can only be achieved in a hydraulic. Such a facility usually consists of: pipes, valves, meters and of course the pump, as the main element.

## 2. PROCESS CENTRIFUGAL PUMPS

The picture below is the centrifugal pump. An operating condition of the pump is priming her centrifuge, ie the suction pump and is filled with water, without air.

Fluid enters the pump through the pipe aspiration 1. The rotor 2 is fixed to the shaft 3. The rotor spinning water is centrifuged at the edge where the water is collected in the chamber 6 and led to the discharge spiral 7 prin speaker 5. High

camera spirală 6 și condusă spre refularea prin difuzorul 5. Apa iese cu presiune ridicată prin conducta de refulare 4.

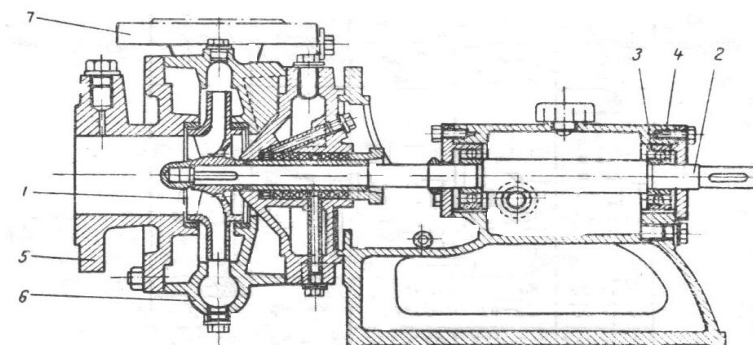


Fig. 1. Schema de funcționare a unei pompe centrifuge  
Fig. 1. Operating scheme of a centrifugal pump

### **Cauzele uzării**

Parametrii funcționali ai unei pompe nu-și păstrează valorile constante pe toată durata ei de viață. Acest lucru se explică prin faptul că piesele care intră în alcătuirea pompei se uzează în timp. În cazul pompelor centrifuge natura uzurii pieselor este de două tipuri: mecanica și chimică.

Indiferent de natura uzurii, aceasta are ca efect modificarea formelor geometrice ale pieselor, ceea ce se reflectă în final în modificarea parametrilor funcționali hidraulici ai pompei (debit, presiune, înălțime de pompare).

Subansambluri care se uzează frecvent

La pompele centrifuge, piesele cele mai expuse uzării, atât abrazive cât și corozive, sunt: rotorul; labirintii; bușa de protecție a arborelui; etanșarea mecanică; garniturile moi; lagărele.

O pompa centrifuga are la baza ca principiu de funcționare creșterea presiunii fluidului datorită forțelor centrifuge ce iau naștere în timpul învârtirii rotorului ceea ce face ca fluidul să se separe radial pe rotor. De obicei o pompa centrifuga are ca elemente componente rotorul, racordul aspirației, dispozitivul de conducere, carcasa spirală, difuzorul, paletele rotorului și paletele de conducere.

### **The causes of wear**

Functional parameters of a pump do not keep constant values throughout her life. This is explained by the fact that the parts that make up the pump wear out over time. If centrifugal pumps nature of wear parts is of two types: mechanical and chemical.

Whatever the nature of wear, it has the effect of changing geometric shapes of parts, which is reflected in the final modification of the hydraulic pump functional parameters (flow, pressure, pumping height). Subassemblies that wear out frequently

Centrifugal pumps, parts most exposed to wear, both abrasive and corrosive are: rotor labyrinth, the outer shaft protection, mechanical seal, gaskets soft camps.

During shutdown of the unit for carrying out the review stage there is wear and parts replaced.

A centrifugal pump is based on the principle of operation due to increased fluid pressure centrifugal forces that arise during rotor spin which makes the fluid to separate rotor. De radial centrifugal pump is usually a rotor components, aspiration connection, the device management, housing spiral, speaker, rotor blades and management blades.

Tabel 1. Cauzele uzării pieselor și subansamblurilor unei pompe centrifuge și caracteristicile date de uzură

Nr.crt	Piesa uzată	Cauzele uzării și caracteristicile pieselor uzate
1	Rotorul	ciupituri, știrbituri, discontinuități ale formei, subțieri de pereți, ovalizări ale alezajului butucului, deformări ale canalului de pană.
2	Arborele	porțiunea pe care freacă garniturile de etanșare, porțiunile pe care freacă simeringurile ( inele de etanșare din cauciuc), părțile care vin în contact cu lichidul din pompă supuse coroziunii
3	Inelul labirint	se uzează datorită acțiunii abrazive a particulelor care circulă prin interstițiul dintre inel și rotor.
4	Garniturile moi	se uzează datorită frecării la contactul cu suprafața bucșei de uzură ; se înlocuiesc, nu se repară.
5	Etanșarea mecanică	uzură pe suprafețele de frecare dintre inelul mobil și cel staționar; nu se repară, se înlocuiește.
6	Lagărele de sprijin ale arborelui (de obicei, rulmenți)	se uzează bilele și căile de rulare ; se înlocuiesc cauzele uzurii pot fi: sarcini prea mari, turații prea ridicate, ungere insuficientă, montaj necorespunzător.

Table 1. Causes of wear parts and subassemblies of centrifugal pumps and wear characteristics of data

Nr.crt	Worn	Cauzele uzării și caracteristicile pieselor uzate
1	Rotor	pinching, indenture, discontinuities in shape, thin wall, camber of the hub bore, deformation of the keyway.
2	Shaft	portion of the seals rub, rub portion rings (rubber seals), the parties who come into contact with fluid from the pump subject to corrosion
3	Wear ring	. wear due to abrasive action of particles that flow through the gap between ring and rotor
4	Soft gaskets	wear due to friction at the contact surface wear bushings, are replaced, not repaired.
5	Mechanical seal	wear on the friction surfaces of the stationary ring and mobile, not repair, replace.
6	Bearings supporting the shaft (usually bearing)	wear balls and taxiways, are replaced wear causes include: excessive loads, speeds too high, insufficient lubrication, improper installation.

### 3. MĂSURĂTORI DE VIBRAȚII ALE POMPELOR CENTRIFUGE

Evaluarea stării tehnice și siguranța în funcționare a unui utilaj dinamic, presupune colectarea tuturor informațiilor tehnice de la instrumentele de măsură și control ce echipează utilajul: ungere, presiuni, temperaturi etc. Dar informațiile cele mai utile, alături de cele enumerate mai sus, sunt informațiile furnizate de măsurătorile de vibrații.

### 3. CENTRIFUGAL PUMP VIBRATION MEASUREMENTS

Assessment of technical condition and reliability of a dynamic machine, involves gathering all technical information on instrumentation and control equipment fitted in: lubrication, pressures, temperatures, etc.. But the most useful information, along with those listed above, is information provided by vibration measurements.

Vibration measurement will indicate if

Masuratoarea de vibratii va indica daca nivelul de vibratii este in limite normale, inca admisibile sau inadmisibile, dar nu ne va furniza informatii privind care este defectul si unde este localizat acesta. Problema este cu atat mai complicata in cazul utilajelor complexe unde, evaluand vibratiile pe un lagar, nu vom sti daca acestea vin de la rulment, de la cuplaj, din angrenare etc

Valorile lor, comparate cu nivelele admisibile recomandate de producatorul utilajului dinamic sau de standarde ISO 2372 si ISO 10816, va indica daca utilajul functioneaza in conditii de siguranta.

Practic, pentru determinarea nivelului global de vibratie, se efectueaza masuratori pe toate lagarele utilajului, pe cele 3 directii relevante:

- orizontal;
- vertical;
- axial.

the vibration is normal, still acceptable or unacceptable, but we will provide information on which is defective and where it is located. The problem is even more complicated for complex machinery where vibration evaluating a camp, we will not know if they come from the capital, the coupling of the gear, etc.

Their values, compared with permissible levels recommended by the manufacturer or dynamic equipment and ISO 10816 standards ISO 2372, will indicate whether the equipment operates safely. Basically, to determine the overall level of vibration measurements are performed on all equipment camps on the three relevant directions:

- Horizontal;
- Vertical;
- Axial.

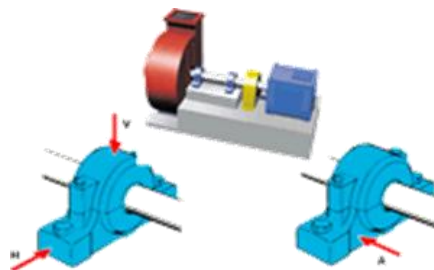


Fig. 2. Directiile de amplasare a senzorului de vibratii  
Fig. 2. Directions of vibration sensor location

Din punctul de vedere al defectelor ce pot fi depistate putem enumera:

- dezechilibru dinamic;
- aliniere defectuasa (paralela sau unghiulara, probleme de angrenare prin cardan;
- probleme electro-mecanice;
- angrenare defectuasa (simptome specifice reductoare/multiplicatoare);
- jocuri si slabiri;
- defecte specifice lagarelor (cu rulmenti sau de alunecare);
- rezonante specifice utilajelor sau ansamblurilor conexe si multe altele.

In terms of defects that can be detected can include:

- dynamic imbalance;
- faulty alignment (parallel or angular, the cardan gear problems;
- electro-mechanical problems;
- faulty gear (symptoms reducers / multipliers);
- specific defective bearings (bearings or sliding);
- specific resonances related equipment or assemblies and more.

Tabel 2. Criterii de apreciere pentru vibratiile masurate la nivelul lagarelor extrase din normativele canadiene CDA/MS/NVSH 107 (Limite de vibratii pentru intretinere)

Utilajul	Utilaje noi		Utilaje uzate Sarcina si viteza 100%	
	Durata indelungata 1000-10000 ore	Durata scurta 100- 1000 ore	Se solicita operatii de service	Se solicita reparative imediate
	Vibratii, valoare eficace de viteza (nivel global), mm/s			
Turbine cu gaz				
>15000 Kw	7.9	18	18	32
4500...15000Kw	2.5	5.6	10	18
<3750Kw	0.79	3.2	5.6	10
Turbine cu abur				
>15000 Kw	1.8	18	18	32
4500...15000Kw	1.0	5.6	18	32
<3750Kw	0.58	3.2	10	18
Compressoare				
-cu piston liber	10	32	32	56
-de aer, inalta presiune	4.5	10	10	18
-de aer, joasa presiune	1.4	5.6	10	18
-pentru instalatii frigorifice	0.56	5.6	10	18
Generatoare diesel, centrifuge, separatoare de ulei	1.4	10	18	32
Transmisii cu angrenaje				
>7500 Kw	1.0	10	18	32
7,5...75000 Kw	0.56	5.6	18	32
<7,5 Kw	0.32	3.2	10	18
Instalatii auxiliare pentru cazane	1.0	3.2	5.6	10
Grup motor generator	1.0	3.2	5.6	10
Pompe				
>3,75 Kw	1.4	5.6	10	18
<3,75 Kw	0.79	3.2	5.6	10
Ventilatoare				
sub 1800 rot/min	1.0	3.2	5.6	10
peste 1800 rot/min	0.56	3.2	5.6	10
Motoare electrice				
>3.75 Kw, <1200 rot/min	0.25	1.8	3.2	5.6
<3.75 Kw, >1200 rot/min	0.14	1.8	3.2	5.6
Transformatoare				
>1 KVA	0.14	-	0.56	1.0
<1 KVA	0.1	-	0.32	0.56

Table 2. Criteria for assessing the vibration measured at the bearings taken from Canadian norms CDA / MS / NVSH 107 (vibration limits for maintenance)

Equipment	New equipment		Used equipment 100% load and speed	
	1000-10000 hours long duration	Short hours 100- 1000	The request service operations	They require immediate reparative
	Vibration, effective value of speed (global), mm / s			
Gas turbines				
>15000 Kw	7.9	18	18	32
4500...15000Kw	2.5	5.6	10	18
<3750Kw	0.79	3.2	5.6	10
Steam turbines				
>15000 Kw	1.8	18	18	32
4500...15000Kw	1.0	5.6	18	32
<3750Kw	0.58	3.2	10	18
compressors				
free-piston	10	32	32	56
-air, high pressure	4.5	10	10	18
-air, low pressure	1.4	5.6	10	18
-for refrigeration	0.56	5.6	10	18
Diesel generators, centrifugal oil separators	1.4	10	18	32
Transmission gear				
>7500 Kw	1.0	10	18	32
7,5...75000 Kw	0.56	5.6	18	32
<7,5 Kw	0.32	3.2	10	18
Auxiliary plant for boilers	1.0	3.2	5.6	10
Grup motor generator	1.0	3.2	5.6	10
Pumps>3,75 Kw				
<3,75 Kw	1.4	5.6	10	18
	0.79	3.2	5.6	10
fans				
below 1800 r / min	1.0	3.2	5.6	10
1800 r / min	0.56	3.2	5.6	10
electric motors				
> 3.75 kW <1200 rev / min	0.25	1.8	3.2	5.6
<3.75 kW> 1200 r / min	0.14	1.8	3.2	5.6

In urma analizei de vibratii, efectuate cu ajutorul aparatului Vibrotest 80, pe mai multe tipuri constructive de pompe centrifuge, s-a ajuns la urmatoare rezultate:

In vibration analysis, performed using VIBROTEST device 80, a more constructive types of centrifugal pumps, it was the following results:

**Pompa multietajata orizontala cu zece Horizontal multistage pump rotors ten: rotoare:**

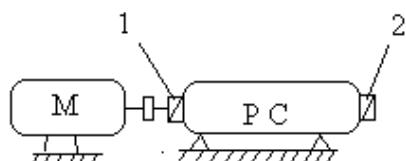


Fig. 3. Schema de amplasare a senzorilor de vibratii pe pompa multietajata orizontala cu zece rotoare: M - motor electric de current alternativ; PC- pompa centrifuga; 1,2 - lagare de rostogolire.

Fig. 3. Scheme of location of vibration sensors on horizontal multistage pump rotors ten  
M - alternating current electric motor; PC centrifugal pump; 1.2 - Rolling bearings.

Tabel 3. Rezultate in urma analizei de vibratii pe pompa centrifuga multietajata cu zece sertare

Presiune refulare [bar]	Lagar 1 (turatie 2960 rot/min)			Lagar 2 (turatie 2960 rot/min)		
	orizontal [mm/s]	vertical [mm/s]	axial [mm/s]	orizontal [mm/s]	Vertical [mm/s]	axial [mm/s]
10	0.130	0.354	0.154	0.124	0.242	0.106
8	0.261	0.390	0.272	0.129	0.122	0.125
6	0.302	0.380	0.288	0.121	0.117	0.129
3	0.279	0.327	0.257	0.120	0.128	0.143

Table 3. Results from analysis of multistage centrifugal pump vibrations with ten drawers

Presiune refulare [bar]	Lagar 1 (turatie 2960 rot/min)			Lagar 2 (turatie 2960 rot/min)		
	orizontal [mm/s]	vertical [mm/s]	axial [mm/s]	orizontal [mm/s]	Vertical [mm/s]	axial [mm/s]
10	0.130	0.354	0.154	0.124	0.242	0.106
8	0.261	0.390	0.272	0.129	0.122	0.125
6	0.302	0.380	0.288	0.121	0.117	0.129
3	0.279	0.327	0.257	0.120	0.128	0.143

**Pompa multietajata orizontala cu patru Horizontal multistage pump with four rotoare: rotoare:**



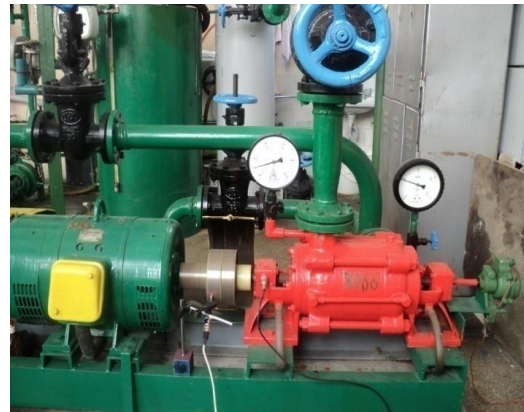
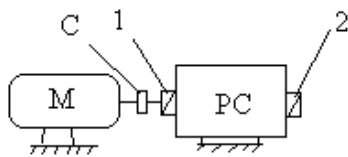


Fig. 4. Schema de amplasare a senzorilor de vibratii pe pompa multietajata orizontala cu patru rotoare: M - motor electric de curent continuu; C - cuplaj; 1,2- lagare de rostogolire.

Tabel 4. Rezultate in urma analizei de vibratii pe pompa centrifuga multietajata cu patru sertare

Turatie [rot/min]	Lagar 1			Lagar 2		
	orizontal [mm/s]	vertical [mm/s]	axial [mm/s]	orizontal [mm/s]	Vertical [mm/s]	axial [mm/s]
1010	0.235	0.077	0.211	0.149	0.053	0.124
1220	0.279	0.106	0.161	0.130	0.110	0.138
1450	1.144	0.443	0.788	0.990	0.251	0.564
1800	1.365	0.593	0.992	1.293	0.378	0.772

Table 4. Experimental results from analysis of multistage centrifugal pump vibrations with four drawers

Rotation [rot/min]	Bearings 1			Bearings 2		
	Horizontal [mm/s]	Vertical [mm/s]	Axial [mm/s]	Horizontal [mm/s]	Vertical [mm/s]	Axial [mm/s]
1010	0.235	0.077	0.211	0.149	0.053	0.124
1220	0.279	0.106	0.161	0.130	0.110	0.138
1450	1.144	0.443	0.788	0.990	0.251	0.564
1800	1.365	0.593	0.992	1.293	0.378	0.772

**Pompa monoetajata:**

**Single stage pump**

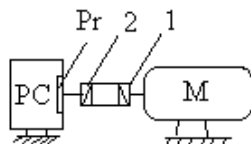


Fig. 5. Schema de amplasare a senzorilor de vibratii pe pompa monoetajata:  
M - motor electric de current continuu; Pr - presetupa; 1,2- lagare de rostogolire.



Fig. 5. Sensor placement scheme the single-stage pump vibrations: M - continuous current electric motor; Pr - gland; 1.2 - Rolling bearings

Tabel 5. Rezultate experimentale in urma analizei de vibratii pe pompa centrifuga monoetajata

Turatie [rot/min]	Lagar 1		Lagar 2		Presetupa
	orizontal [mm/s]	vertical [mm/s]	orizontal [mm/s]	vertical [mm/s]	
1010	0.237	0.123	0.203	0.077	0.130
1220	0.230	0.125	0.168	0.107	0.139
1450	1.485	0.726	1.273	0.683	0.571
1800	0.706	0.472	0.524	0.173	0.383

Table 5. Results from analysis of monostage centrifugal pump vibrations with four drawers

Rotation [rot/min]	Bearings 1		Bearings 2		Gland
	Horizontal [mm/s]	Vertical [mm/s]	Horizontal [mm/s]	Vertical [mm/s]	
1010	0.237	0.123	0.203	0.077	0.130
1220	0.230	0.125	0.168	0.107	0.139
1450	1.485	0.726	1.273	0.683	0.571
1800	0.706	0.472	0.524	0.173	0.383

#### 4. CONCLUZII

In urma analizei rezultatelor, determinate cu ajutorul vibrotestului, rezulta ca pompele studiate nu necesita reparatii, deoarece acestea functioneaza corect in conformitate cu tabelul 2.

Vibratiile cauzate de slabirile mecanice pe arbori sunt cele mai periculoase deoarece conduc la solicitari suplimentare, prin soc, ale arborilor si ale lagarelor.

Diagnosticarea slabirilor mecanice prin metoda analizei vibratiilor prezinta o serie de avantaje cum ar fi: reducerea costurilor de intretinere; cresterea sigurantei in functionare;

#### 4. CONCLUSIONS

After analyzing the results, determined by VIBROTEST, results that do not require repair pumps studied because it is operating correctly in accordance with Table 2.

Mechanical vibrations due to weakened trees are the most dangerous because they lead to additional requests by shock shaft and the bearings.

Diagnosing mechanical weakening vibration analysis method has several advantages such as lower maintenance costs, increase operational safety, reducing wear on bearings, etc..

reducerea uzurii in lagare etc.

Vibrațiile pe rulmenți reprezintă unul dintre indicatorii globali de calitate, acestea manifestându-se fie prin efecte directe, fie prin efecte indirecte.

Cu ajutorul măsurătorilor de vibrații putem determina defecte cum ar fi: dezechilibru dinamic, aliniere defectuoasă, jocuri și slăbiri, defecte specifice lagarelor, etc.

## BIBLIOGRAFIE

1. STAN, M. Fiabilitatea sistemelor și aplicații, Editura Universității Petrol – Gaze din Ploiești, Ploiești, 2008
2. STAN, M. Metode avansate de proiectare a utilajului petrolier, Editura Universității Petrol – Gaze Ploiești, Ploiești, 2006 ;
3. Nguyen J.P. Le forage, Edition Technip, 1993
4. A. Tudor, ș.a – Durabilitatea și fiabilitatea transmisiilor mecanice, Editura Tehnică, București, 1998

Vibration on bearings is one of the global indicators of quality, these effects manifest themselves either directly or through indirect effects.

With the measurement of vibration can cause defects such as dynamic imbalance, poor alignment, games and weakening, bearing specific defects, etc..

## BIBLIOGRAPHY

1. STAN, M. Fiabilitatea sistemelor și aplicații, Editura Universității Petrol – Gaze din Ploiești, Ploiești, 2008
2. STAN, M. Metode avansate de proiectare a utilajului petrolier, Editura Universității Petrol – Gaze Ploiești, Ploiești, 2006 ;
3. Nguyen J.P. Le forage, Edition Technip, 1993
4. A. Tudor, ș.a – Durabilitatea și fiabilitatea transmisiilor mecanice, Editura Tehnică, București, 1998