

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЧЕСТОТЕН ДИАПАЗОН ПРИ РАБОТА НА ЛАГЕРЕН ВЪЗЕЛ С ТЪРКАЛЯЩИ ЛАГЕРИ

**Петко Недялков, Драгомир Вражилски, Димитър Ралев**

Технически Университет – София, Машиностроителен Факултет,  
e-mail: nedpetko@tu-sofia.bg, dcv@tu-sofia.bg, dralev@tu-sofia.bg

**РЕЗЮМЕ.** Изследвани са вибрационни характеристики, генерирани при работа на възли с търкалящи лагери. Изследвани са характерни честотни диапазони чрез спектрален анализ. Направена е съпоставка между теоретично изчислените и сметите честотни характеристики на лагерите.

**КЛЮЧОВИ ДУМИ:** търкалящи лагери, вибродиагностика, спектрален анализ, fft

### RESEARCH OF THE WORKING FREQUENCY DIAPASON FOR ROLLER BEARINGS

**Petko Nedyalkov, Dragomir Vrazhlski, Dimitar Ralev**

Technical University – Sofia, Faculty of Mechanical Engineering,  
e-mail: nedpetko@tu-sofia.bg, dcv@tu-sofia.bg, dralev@tu-sofia.bg

**ABSTRACT.** Research about vibration characteristics generated in working conditions by the roller bearings has been made. Using spectrum analysis there are studied particular frequency diapasons. Also there is comparison between theoretically calculated and examined frequency characteristics.

**KEYWORDS:** roller bearings, vibrodiagnostics, spectrum analysis, fft.

#### Въведение

Съвременните системи за наблюдение състоянието на механични обекти и системи търпят бурно развитие и се усъвършенстват все повече в последните години. Все повече се използват системи с вградени датчици и процесори които преобразуват потока от данни от инсталираните датчици и го предават към компютър за следене състоянието на обекта.

Конкретно при следенето състоянието на възлите с търкалящи лагери в механичните системи са разпространени няколко метода за следене: - на термично състояние; - на замърсявания на маслото; - на вибрационни характеристики.

Настоящата разработка разглежда вибро-характеристики на търкалящите лагери и тяхното приложение в диагностиката. Вибродиагностиката има няколко основни предимства – може да се използва за лагерни възли работещи без система за непрекъснато мазане, може да се използва за превантивна диагностика. Термичната диагностика се използва за детектиране на повредени лагерни възли, тъй като термичната характеристика на лагера се променя при наличие на повреди и съответстващото им повишено триене във възела.

Превантивната диагностика или непрекъснатото следене на състоянието има основна задача да осигури информация за предстояща повреда. Използва се в системите на плановите ремонти както и при диагностика на високо отговорни възли. Такива системи намират

приложение в авиотехниката, в голямо габаритните вентилатори, компресори, турбини и помпи, както и във всички средно и високо оборотни машини с отговорно предназначение.

За целите на настоящото изследване е използван стенд за изпитване на радиални търкалящи лагери при променливо радиално натоварване. Стендът се състои от вал два основни лагера, от типоразмер 1306 и конзолно изнесен изпитван лагер 6005, който се натоварва чрез винтово товарно устройство през опорна плоча.

#### Вибрационни характеристики на радиални търкалящи лагери

Както е известно от класическият курс по машинни елементи, търкалящият лагер може да се разглежда като планетен механизъм. При такава постановка могат да се изчислят ъгловите скорости на елементите на лагера. Също така могат да се изчисли честотата на преминаване на съответния елемент.

Дефектите или повредите върху съответния елемент пораждат удари при преминаването на търкалящите тела върху тях. Тъй като абсолютните стойности на породените от тези удари, вибрационни кинематични величини (преместване, скорост, ускорение) зависят както от състоянието на елементите, така и от пътя на предаването през останалите елементи, коректното им измерване е възпрепятствано. Поради тези причини най – често се

изследва честотния спектър на виброускоренията. Честотите на различните дефекти са ясно различни и информативни характеристики за нуждите на диагностиката и дефектоскопията.

Ако се разгледа лагерен възел в който валът се върти с обороти  $n, (об / min)$ , на които отговаря основна честота  $f, (Hz)$ , то може да се дефинират (Buscarello 2002):

а) честота на преминаване върху вътрешната гривна:

$$f_1 = \frac{N_b}{2} * \left( 1 + \frac{d_b}{d_s} * \cos \alpha \right) * f, (Hz), \text{ където:} \quad (1)$$

- $N_b, (бр.)$  – брой на търкалящите тела;
- $d_b, (mm)$  – диаметър на търкалящите тела;
- $d_s, (mm)$  – диаметър на сепаратора /среден диаметър на търкаляне на търкалящите тела;
- $\alpha, (deg)$  – контактен ъгъл за лагери с едностранен контакт на телата и гривните, за лагери с двустранен контакт  $\alpha = 0 \text{ deg}$ .

б) честота на преминаване върху външната гривна:

$$f_2 = \frac{N_b}{2} * \left( 1 - \frac{d_b}{d_s} * \cos \alpha \right) * f, (Hz) \quad (2)$$

в) честота на въртене на търкалящите тела:

$$f_3 = \frac{d_s}{2 * d_b} * \left[ 1 - \left( \frac{d_b}{d_s} * \cos \alpha \right)^2 \right] * f, (Hz) \quad (3)$$

г) честота на сепаратора:

$$f_4 = \frac{1}{2} * \left( 1 - \frac{d_b}{d_s} * \cos \alpha \right) * f, (Hz) \quad (4)$$

Това са четирите основни честоти създавани от елементите на лагера, петата основна честота е честотата на въртене на вала. Тези пет основни честоти и техните целочислено кратни хармоници служат за основен критерии за състоянието на лагера.

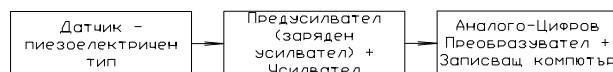
Тези формулировки са за общия случай, при който се въртят и двете гривни. Могат да се разграничат два основни частни случая

а) неподвижна външна гривна – вътрешната гривна се върти с вала и задвижва търкалящите тела. Може да се приеме, че  $f_1 = 0 \text{ Hz}$ , т.е. телата нямат относително въртене спрямо вътрешната гривна и няма да породят удари върху нея;

б) неподвижна вътрешна гривна – външната гривна се върти с главината и задвижва търкалящите тела. Може да се приеме, че  $f_2 = 0 \text{ Hz}$ , т.е. телата нямат относително въртене спрямо външната гривна и няма да породят удари върху нея;

### Измервателна система за вибросигнали

За целите на настоящото изследване е използвана класическа измервателна система за вибро сигнали, показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Схема на измервателната система.

Датчиците са монтирани с винтово съединение на опорната плоча за натоварване на изпитвания лагер. Така е използван най-краткия път за предаване на вибрациите към осезателя.

Аналого – Цифровият Преобразувател /АЦП/ NI USB-6210 е с максимална семплираща честота 250 kS/s. За разглежданите записи е използвана честота на семплиране 65.536 kS/s което позволява ефективно възстановяване на честоти до 32.768 kHz.

Използваните датчици са KD35 с резонансна област между 10 – 20 kHz и нелинейна част 5 – 25 kHz.

При тази конфигурация е реализирана възможност за наблюдение на честотите създавани в изпитвания лагерен възел в диапазона под 5 kHz. Над тези честоти пиезоелектричният датчик не дава линейна зависимост между входен и изходен сигнал и може да се използва само като регистратор на честоти.

### Резултати от измерването и обработка на данните

Изпитваният лагер е SKF 60052Z, а оборотите на вала на стенда са  $n = 1240 \text{ min}^{-1}$ . За този лагер и тези обороти на вала създаваните от лагера, теоретично пресметнати честоти и съответните им хармоници са дадени в табл. 1.

Таблица 1.

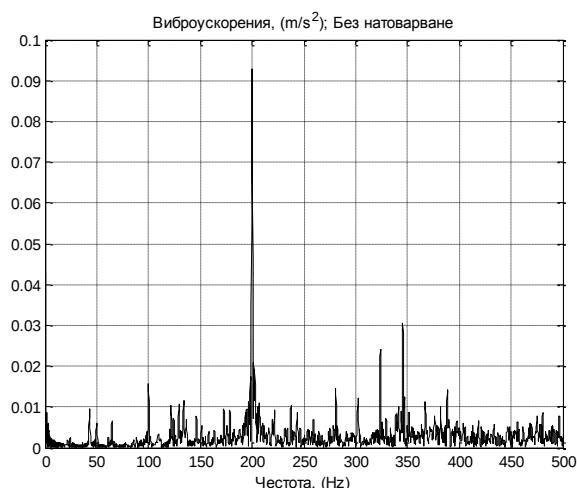
Основни честоти и кратните (от 1 – 5) им хармоници.

|   | $n$                   | $f$   | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | $f_4$ |
|---|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | ( $\text{min}^{-1}$ ) | (Hz)  | (Hz)  | (Hz)  | (Hz)  | (Hz)  |
| 1 | 1265                  | 21.1  | 125.2 | 85.7  | 54.3  | 8.6   |
| 2 | 2530                  | 42.2  | 250.3 | 171.3 | 108.5 | 17.1  |
| 3 | 3795                  | 63.3  | 375.5 | 257.0 | 162.8 | 25.7  |
| 4 | 5060                  | 84.3  | 500.7 | 342.6 | 217.1 | 34.3  |
| 5 | 6325                  | 105.4 | 625.9 | 428.3 | 271.4 | 42.8  |

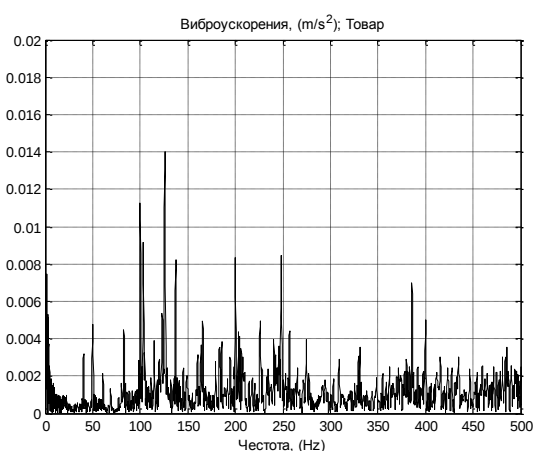
Наличието на множество хармонични съставляващи говори за наслагване на хармонични, нехармонични, импулсни и/или ударни въздействия. Това е особено показателно за наличие на дисбаланс и увеличени лагерни хлабини. Също е сигнал за наличие на нарушения на ролковият път или телата.

Амплитудния спектър на сигнала бе изследван чрез Бързо Преобразуване на Фурие /БПФ/. Тъй като сигналите са записани в компютърен формат, може да се използва едно от големите предимства на БПФ - да се прилага за различни честотни диапазони и така да се изследва подробно една или друга област.

Направени са няколко измервания на виброускорения създавани в изпитвания лагер тип 6005 при различен радиален товар на изпитвания лагер.

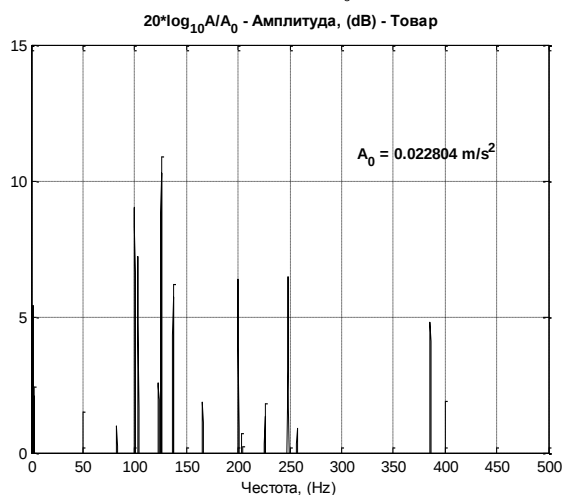


Фиг. 2. Спектър в диапазона 0 – 500 Hz на виброускоренията при работа на лагера без радиално натоварване.

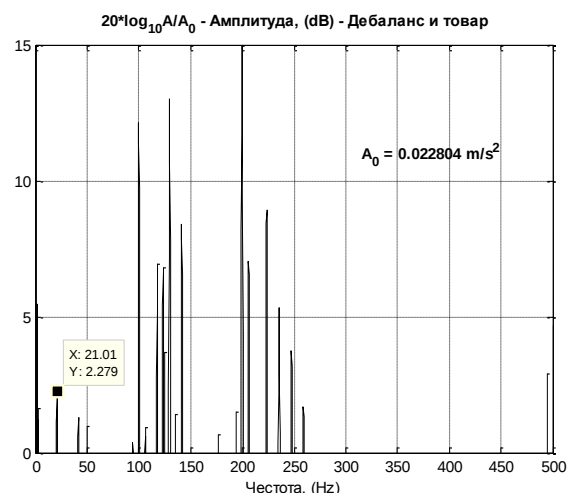


Фиг. 3. Спектър в диапазона 0 – 500 Hz на виброускоренията при работа на лагера с радиално натоварване.

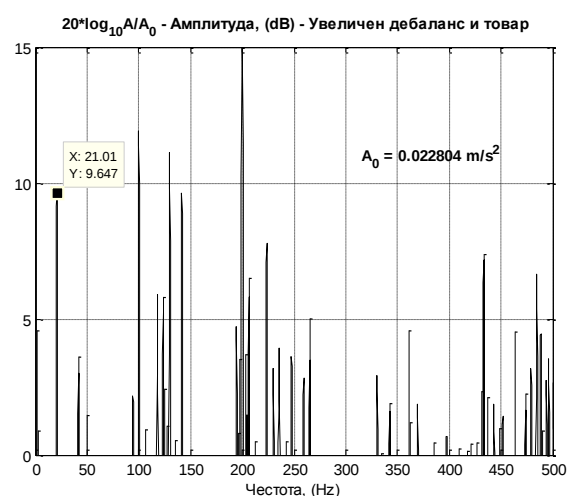
На фиг. 2 и 3 са дадени спектрите на виброускоренията в диапазон 0- 500 Hz. Отчетливата честота от 200 Hz не е свързана с никоя от лагерните честоти и може да се допусне, че това е собствена честота на някои от съпътстващите елементи. Вижда се наличието на много спектрални линии което е породено от нивото на шума във възела. За да се избегне това може да се използва разпечатване на логаритмична зависимост на амплитудите спрямо една основна (в случая  $A_0 = 0.022804 \text{ m/s}^2$ ).



Фиг. 4. Спектър в диапазона 0 – 500 Hz на виброускоренията при работа на лагера с радиално натоварване.



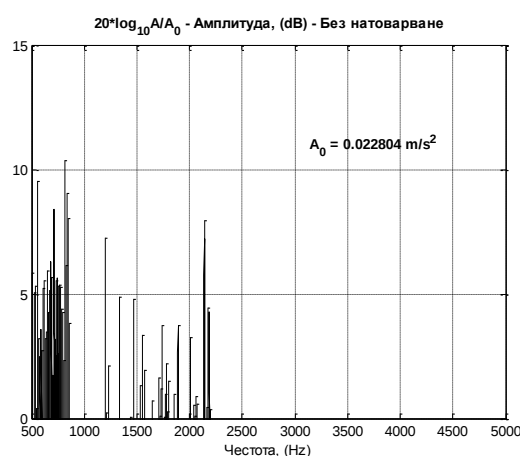
Фиг. 5. Спектър в диапазона 0 – 500 Hz на виброускоренията при работа на лагера с дебаланс монтиран върху вала.



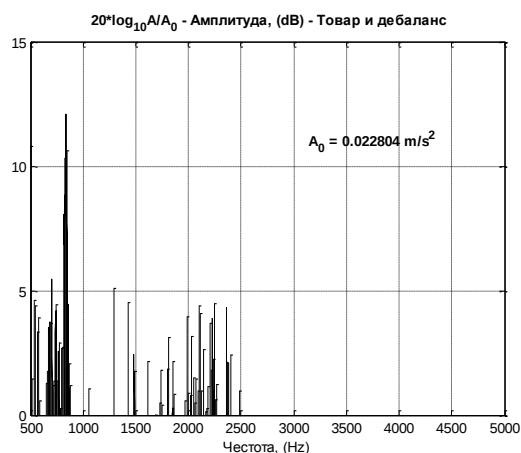
Фиг. 6. Спектър в диапазона 0 – 500 Hz на виброускоренията при работа на лагера с увеличен дебаланс.

На фиг. 4. е показан същия спектър на натоварения лагер в диапазона 0 - 500 Hz, както на фиг. 3, но със логаритмична зависимост:

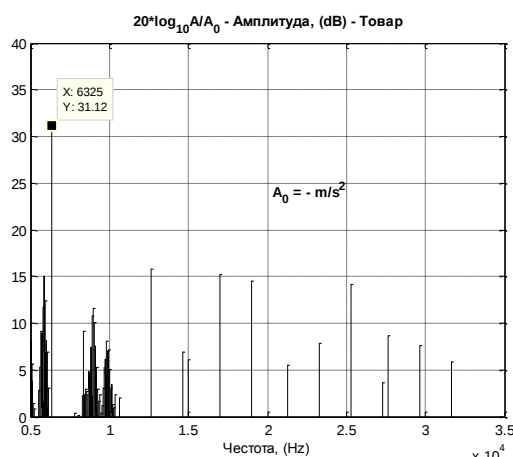
$$A_{dB} = 20 * \log_{10} \frac{A}{A_0}, (dB), \quad (5)$$



Фиг. 7. Спектър в диапазона 500 – 5000 Hz на виброускоренията при работа на лагера без радиално натоварване.



Фиг. 8. Спектър в диапазона 500 – 5000 Hz на виброускоренията при работа на лагера с радиално натоварване и увеличен дебаланс.



Фиг. 9. Спектър в диапазона 5 – 32 kHz на виброускоренията при работа на натоварения лагер.

Увеличените амплитуди в диапазона 0 – 500 Hz при работа на лагерния възел с дебалансна маса и товар се обяснява с увеличаване на общия ексцентритет на вала при натоварването му. Също така е явно – фиг. 6 увеличаването на амплитудата на основната честота  $f = 21.01 \text{ Hz}$  при увеличаване на масата на дебаланса.

Анализирайки различията между фиг. 7 и фиг. 8 се вижда, че при работа на лагера без товар диапазона между 500 – 1000 Hz е запълнен със множество спектрални линии. Това са линиите на собствените честоти на лагерните елементи. Тъй като това е диапазона в които човешкото ухо е най – чувствително е лесно да бъде доловено и без специални средства, че лагера „звънти“. Както се вижда при натоварване част от линиите изчезват.

Също така в този диапазон се проявява зашумяването от наличие на замърсители или абразивно износване на лагерните пътечки – появява се плътен непрекъснат спектър в диапазона 2500 – 6000 Hz. Тъй като това също е чуваем диапазон много често се хваща като „бучене“ на лагера. При наличие на такъв сигнал лагера или се почиства, ако е замърсен или се заменя ако има абразивно износване.

Спектрите на честотите от 5 – 32 kHz не се влияят от натоварването и наличието на дебаланс. Видима и ясно различима е линията с честота 6325 Hz. Тази линия се използва за диагностика на лагерния възел като параметър „spike energy<sup>(TM)</sup>“ (Ху 1999). Параметъра „spike energy<sup>(TM)</sup>“ или енергия на микро пулсациите е дефиниран (Stevens 2001 и Ху 1999) като енергия на високо честотните удари породени от питингово или абразивно износване на лагерните пътечки. За съжаление този критерий е запазена марка и информация се публикува само за начина на използването му, но не и за теоретичната обосновка. Практически това е ултразвукова вибрация, която за класическите пиезо-електрични датчици е трудно да бъде дефинирана и калибрирана като абсолютна стойност. Също това е параметър който има уникална абсолютна стойност за система възел – датчик, т.е. не е възможно сравняването му при използване на други датчици. Според посочените източници при началото на процеса на разрушаване на ролковите пътища параметъра „spike energy<sup>(TM)</sup>“ нараства като амплитуда и може да бъде използван за критерий за началото на влошаване на състоянието на лагера.

## Изводи

1. Разгледани са различните приложения на вибро-диагностичен метод чрез записване на виброускорения и спектралният им анализ за контрол на състоянието на радиален сачмен лагер.
2. Изследван е радиален сачмен лагер при различни натоварване и големина на дебалансната маса прикачена към вала.
3. На базата на разгледания метод са регистрирани дипазоните на собствените трептения на лагерните елементи.
4. Съвременните средства за вибродиагностика на лагерни възли позволяват с относително евтини измерителни средства да бъде определено текущото им състояние. Също така е възможно използването на виброизмервателни методи за следене на състоянието на лагерния възел.
5. На базата на тези изследвания е отчетено като необходимо да се създаде усъвършенстван стенд за изпитване на лагери с възможност за прецизно регулиране и измерване на оборотите и на натоварването на изпитвания лагер.

## Литература

- Buscarello Ralph T “Practical Solutions to Machinery and Maintenance Vibration Problems” <http://www.update-intl.com/VibrationBook8g.htm> (2002)
- Stevens David “Machinery Vibration Diagnostics” (2001) - <http://www.vibanalysis.co.uk/vibanalysis/rolling/rolling.html>
- Ming Xu, “Spike Energy<sup>(TM)</sup> measurement and case histories”. ENTEK IRD International Corporation (1999).