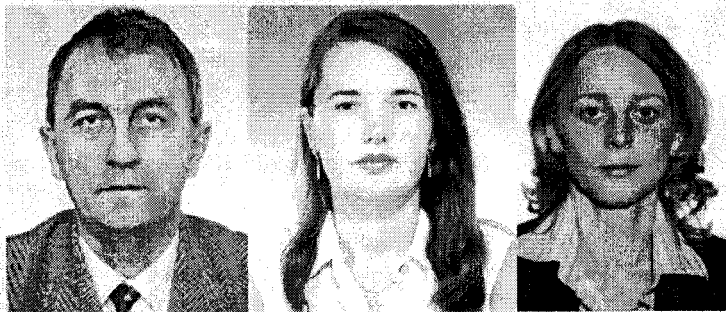


PRIMENA KEPSTRUM ANALIZE U TEHNIČKOJ DIJAGNOSTICI

APPLICATION OF CEPSTRUM ANALYSIS IN THE FIELD OF DIAGNOSIS OF COMPLEX MACHINERY

Prof. dr Živoslav Adamović
Mr Ljiljana Radovanović
Mr Eleonora Desnica
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin",
Zrenjanin



REZIME:

Dijagnostika stanja vibracionog ponašanja, posebno kod zupčaničkih transmisija, kao što su reduktori, menjači i sl. iziskuju primenu posebnih metoda i tehnika koje su u suštini pre svega bazirane na frekventnoj analizi. Jedna od tih metoda, nazvana kepstrum analiza omogućuje istraživanja pojava modulacije u signalima vibracija koja je pre svega svojstvena zupčaničkim transmisijama, bilo da je reč o frekventnoj, ili amplitudnoj modulaciji. U radu je dat prikaz teoretskih osnova za kepstrum analizu kao i primer njene primene na analizu vibracija u sklopu složenog postrojenja za pripremu i preradu gume.

Cljučne reči: *kepstrum analiza, vibracije*

ABSTRACT

:Condition monitoring and diagnosis of the dynamic behaviour of gear transmission assemblies like gear-boxes, requests the application of specific methods and techniques essentially based on frequency analysis. One of these methods, named the cepstrum analysis enables investigations in the modulation process produced by vibrating equipment specially gear transmission assemblies in form of amplitude-or frequency modulation. The paper presents the theoretical background for cepstrum analysis as well as an example of its application in vibration analysis of a rubber processing machine .

Key words: *cepstrum analysis, vibrations*

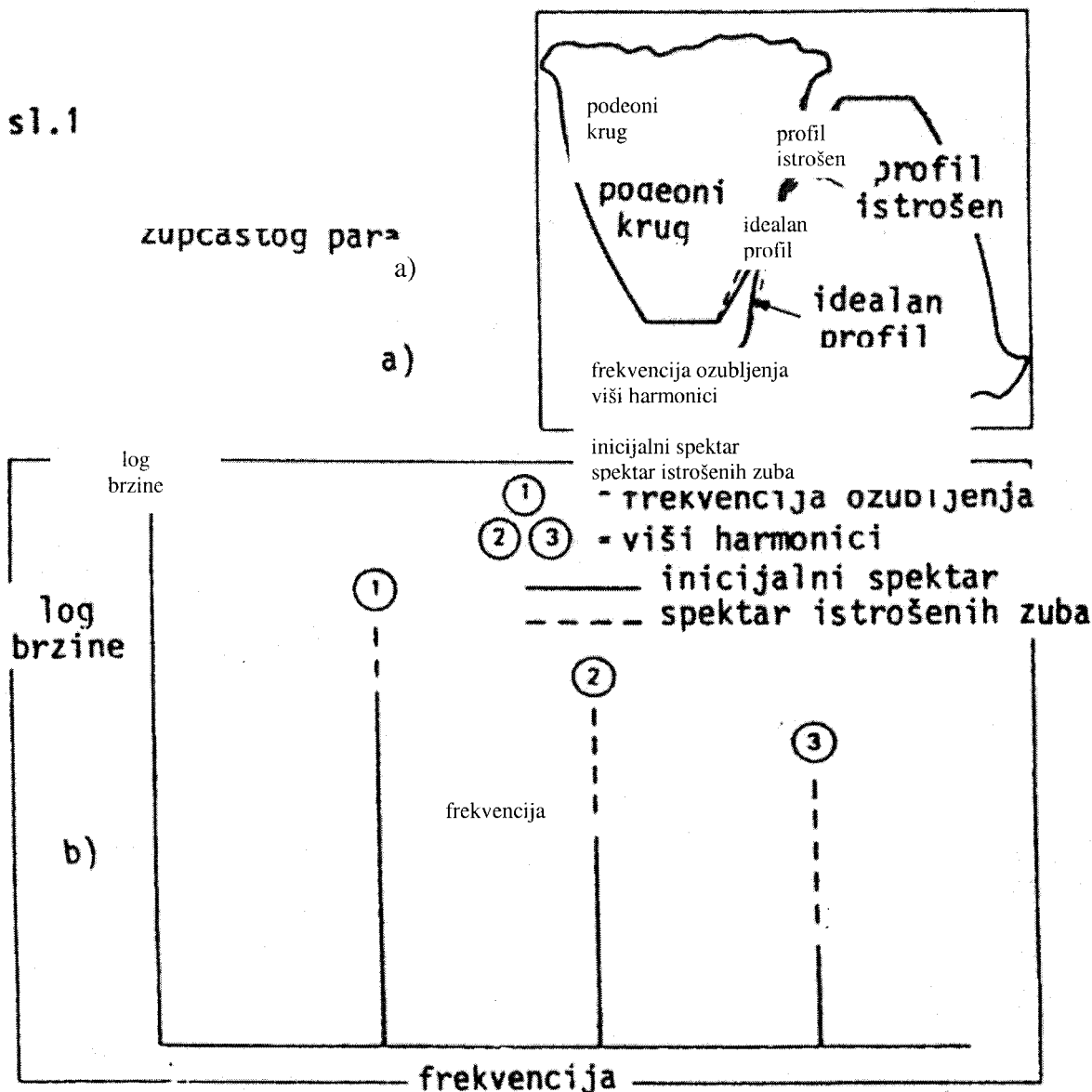
1. TEORETSKA PODLOGA

Vibracije koje se javljaju u sklopu složenih zupčastih transmisija (reduktora, menjača i sl.) ili postrojenja koja poseduju takve sklopove, bez obzira na činjenicu da često deluju veoma složeno, mogu uz pomoć savremenih sredstava analize biti rasčlanjenje na svoje uzročne komponente koje omogućuju preciznu dijagnostiku stanja. Dijagnostika zasnovana na frekventnoj analizi i na njenoj daljoj primeni, analizi Kepstruma. Uzroci vibracija na zupčastim sklopovima kao posledica netačne izrade ili izhabanosti, mogu biti višestruki i leže uglavnom u činjenici geometrijskih i elastičnih odstupanja odn. deformacija zupčanika, manifestujući se periodičnim komponentama u signalu koje primenom spektralne analize mogu jasno biti izdvojene.

1.1. Frekvencija ozubljenja

Frekvencija ozubljenja određuje se kao proizvod frekvencije broja obrtaja i broja zuba zupčanika, i javlja se kao posledica odstupanja od idealnog profila zuba. Pojava te frekvencije uslovljena je sa jedne strane elastičnom deformacijom zuba pri opterećenju a sa druge strane istrošenjem zuba, odn. poremećenom geometrijom. Kako je deformacija zuba posledica opterećenja, neuniformno opterećenje slučajnog karaktera prouzrokuje i slučajne komponente poremećaja. Slika 1. daje profil istrošenog zupčastog para, (1), a skica (b) daje prikaz tipičnog spektra pri istrošenim zubima gde

sl.1



Sl. 1. Frekventni spektar novog i istrošenog zupčastog para

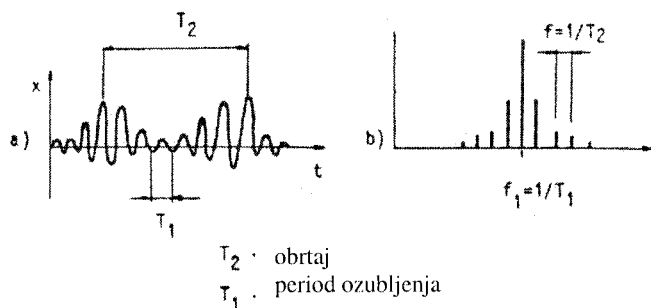
su pored osnovne frekvencije ozubljenja vidljivi i viši harmonici uz specifičnost da su oni veoma jako izraženi. Stoga se preporučuje praćenje bar tri harmonika ili više.

1.2. Bočne komponente spektra

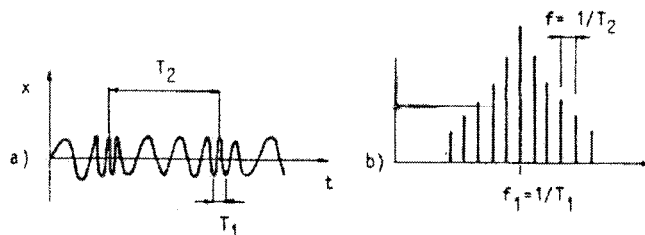
Bočne komponente tj. spektralne komponente raspoređene ravnomerno oko frekvencije ili njenih viših harmonika javljaju se kao posledica efekata modulacije drugih frekvencijama. Te modulišuće komponente osnovne frekvencije ozubljenja sadrže bitne informacije o tipu oštećenja odn. greške. Modulacija može da bude amplitudna ili frekventna ili pak kombinovana. Amplitudna modulacija se na

izazivajući usled toga promenljivo opterećenje (sl. 2a) sa periodom broja obrtaja vratila. Promenljivo opterećenje izaziva neravnomernost u ugaonoj brzini obrtanja zupčanika, što dovodi do frekventne modulacije (sl.3a).

I u slučaju amplitudne kao i kod frekventne modulacije, frekventni spektar se odlikuje pojavom niza bočnih spektralnih komponenata lociranih oko osnovne frekvencije pomerenih za iznos frekvencije koja vrši modulaciju, pa analiza spektra odn. tih bočnih komponenata omogućuje da se iznadje izvor efekata modulacije koji najčešće leži na nekom specifičnom zupčaniku unutar reduktora.



Sl. 2. a) vremenski signal b) frekventni spektar



Sl. 3. a) vremenski signal b) frekventni spektar

1.3. Komponente usled greške u geometriji zuba

Te komponente javljaju se kao posledica poremećene geometrije pri izradi zupčanika na podeonom krugu. Frekvencija te pojave odgovara nekom broju (broju "loših" zuba) i mora odgovarati celobrojnom umnošku broja obrtaja zuba. Shodno tome, neka komponenta u spektru koja nije objašnjiva, može odgovarati toj frekvenciji. Karakteristično je to, da je pojava te komponente, s obzirom da je uslovljena poremećenom geometrijom, nezavisna od opterećenja, i da se sa pojavom izhabanosti zuba, gubi. U cilju iznalaženja ranije opisanih frekvencija komponenata možemo se poslužiti metodom spektralne analize, i to:

- za detekciju osnovnih komponenata i njihovih harmonika koristi se uskopojasna analiza dok,
- za analizu efekata modulacije, uskopojasna analiza ne zadovoljava pa se pribegava Kepstrum analizi.

2. FREKVENTNA ANALIZA

Frekventna analiza omogućuje iznalaženje periodičnih komponenata u signalu vibracija i zasnovana je na izračunavanju Fourier-ovog integrala:

$$F_{(w)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-jt} dt$$

gde : $f(t)$ - predstavlja vremensku funkciju.

U slučaju primene digitalne obrade uz korišćenje računara, Fourier-ov integral izračunava se diskretno prema sledećem izrazu:

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-\frac{jk n 2\pi}{N}}$$

i predstavlja Diskretnu Fourier-ovu Transformaciju (DFT). Brzina određivanja frekventnog spektra postiže se putem algoritma brze Fourier-ove transformacije (FFT) koji od N -realnih vremenskih vrednosti digitalizovanog signala daje $N/2$ kompleksnih vrednosti u frekventnom domenu uz ograničenje da broj N mora biti veličina sa eksponentom 2 (tj. 64, 128, 256 ...). Frekventna analiza nalazi veoma široku primenu na svim poljima analize dinamičkih procesa.

3. CEPSTRUM ANALIZA

Kepstrum je definisan kao spektar logaritma spektra, ili izraženo matematičkom formom:

$$C(\tau) = \left[\log F_{xx}(f) \right]^2$$

pri čemu su:

$F_{xx}(f)$ – frekventni spektar vremenskog procesa

{ } – Fourier-ova transmisija izraza u zagradi

Kao takav, Kepstar omogućuje efikasno iznalaženje periodičnih komponenata sadržanih u spektru. Time je on naročito pogodan za detekciju harmonijskih komponenata kao i bitnih komponenata spektra, posebno onda kada su maskirane slučajnim komponentama, tj. šumom.

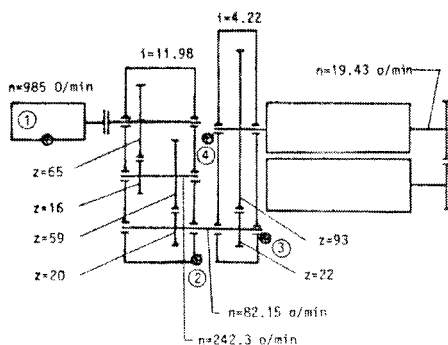
Nezavisna promenljiva veličina, τ , u ceostrumu ima dimenziju vremena ima naziv "kvefrencija" (engl.naziv: "quefrecy"). Visoke vrednosti kvefrencije označavaju brže promene u spektru (mali inkrement frekvencije Δf) i obrnuto za male vrednosti. Kada se pikovi u kepstru javljaju kao posledica bočnih komponenti u spektru, kvefrencija pikova predstavlja periodično vreme modulacije, odn. njegova recipročna vrednost, frekvenciju modulacije. Time kepstar u suštini ne govori o apsolutnoj frekvenciji, već samo o dislokaciji frekventnih komponenata. Za proračun kepstra najadekvatnija je primena digitalnog računara. Postupak se svodi na dvostruku Fourier-ovu transformaciju, vodeći računa o skaliranju s obzirom da algoritam brze Fourier-ove transformacije (FFT) za N realnih vrednosti u frekventnom domenu, daje N/2 realnih vrednosti u frekventnom spektru.

4. ANALIZA VIBRACIJA NA POSTROJENJU

Ispitano postrojenje za pripremu gumene mase, prikazano na sl.4, sastoji se iz pogonskog motora snage 130 kW, elastične spojnice, dvostepenog reduktora, zupčastog para, i dva valjka. Postrojenje je propisno utemeljeno i nalazi se u sklopu proizvodne hale. Slika daje prikaz osnovnih kinematskih parametara postrojenja (brojevi obrtaja, brojevi zuba i prenosni odnosi).

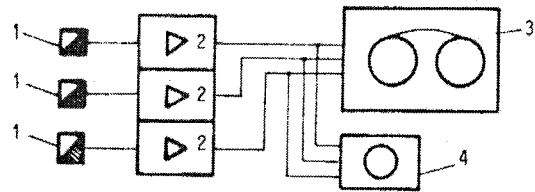
4.1. Metodologija merenja vibracija

Merenje vibracija izvršeno je na više tačaka na postrojenju (tačke 1, 2, 3 i 4 prethodne slike) i u tri pravca u uslovima redovne eksploatacije. Za merenje su korišćeni davači ubrzanja na bazi kvarca, proizvođača BSK, pojačala naboja sa integratorima, a sve merne veličine memorisane su na magnetnoj traci, u cilju naknadne obrade na računaru. Kao signal, registrovana je brzina vibracija.



Sl.4. Kinematska šema transmisije

Merni lanci za tu namenu prikazani su na sl.5. Pored toga izmerene su i vibracije u prostoriji na prvom spratu hale tačno gde je ispoljavanje vibracija najizraženije.

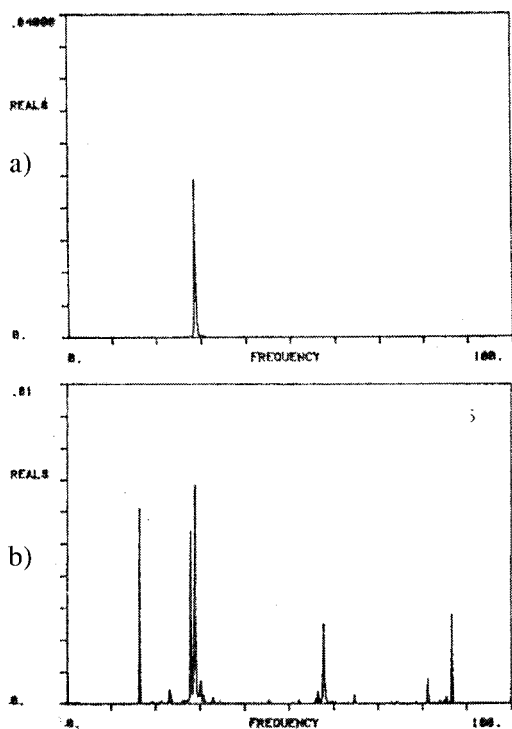


Sl.5. Merna oprema za registrovanje signala: 1 - davač ubrzanja B&K 4370, 2 - pojačalo naboja B&K 2635, 3 - magnetofon Honeywell 5600, 4 - osciloskop Tektronix 434

4.2. Obrada i analiza izmerenih veličina vibracija

Nakon snimanja vibracija na licu mesta, izvršena je obrada mernih signala na računarskom sistemu CAT 2515 firme GenRad u laboratoriji Instituta. Izvršena obrada signala omogućuje analizu procesa, tj. defekciju uzroka vibracija i mehanizam prenošenja na deo zgrade. Analiza je izvedena na osnovu izračunatih frekventnih spektara i kepstra. Kao prvo, analizirane su vibracije na delu zgrade na prvom spratu, gde je utvrđeno da se radi o sinusnoj oscilaciji na patosu prostorije, što očitno pokazuje spektar na sl.6a. Kako je iz spektra očigledno, radi se o sinusnoj promeni sa frekvencijom od 29 Hz. U cilju iznalaženja uzroka pomenute frekvencije izanalizirani su signali snimljeni na pojedinim elementinima postrojenja. Sl.6b. daje prikaz frekventnog spektra snimljenog na kućištu motora u vertikalnom pravcu u linearnoj razmeri. Kako je sa slike vidljivo, izražene komponente leže kod sledećih frekvencija:

- 16.4 Hz osnovna komponenta broja obrtaja motora pri 985 o/min, prouzrokovana debalansom rotora motora
- 29 Hz komponenta koja se javlja kao posledica broja obrtaja izlaznog vratila reduktora (82.15) i broja zuba malog zupčanika (22): $f = \frac{82.15}{60} \times 22$
- 58 Hz drugi harmonik frekvencije od 29 Hz
- 87 Hz treći harmonik frekvencije od 29 Hz



Sl. 6. Frekventni spektri

Uočljivo je da su drugi i treći harmonik veoma izraženi. Prikaz spektra sa sl.6b. u logaritamskoj razmeri dat je na sl.7a. gde je vidljiv veliki broj spektralnih komponenata, od kojih su neke locirane u ravnomernim razmacima, a neke rasporedjene stohastično. Sl.7b. daje prikaz frekventnog spektra u dijapazonu od 0-200 Hz i log razmeri za merno mesto 2, vertikalno (izlaz vratila reduktora). Uočljive su u osnovi iste komponente kao na sl.7a, s tim da komponenta broja obrtaja motora nije uočljiva. Jasno je da osnovna komponenta od 29 Hz, potiče od ozubljenja zupčastog para 22/93 zuba (veliki i mali zupčanik), a veoma izražene komponente drugog i trećeg harmonika govore u prilog tome da se radi o ishabanosti zuba. U cilju iznalaženja izvofa modulacije, što se jasno manifestuje pojavom bočnih komponenata u spektru, izvršeno je određivanje kepstra za navedene veličine i oni su prikazani na sl.8a. i b. Kako je iz dijagrama vidljivo, sepstar ima u osnovi isti karakter, sa nekoliko izraženih pikova. Kako je na x-osi predstavljeno vreme, recipročna vrednost kvefrencije odgovara frekvenciji, odn. broju obrtaja promene koja izaziva modulaciju. U navedenom slučaju to su:

- Prvi pik odgovara broju obrtaja od 83.5 o/min

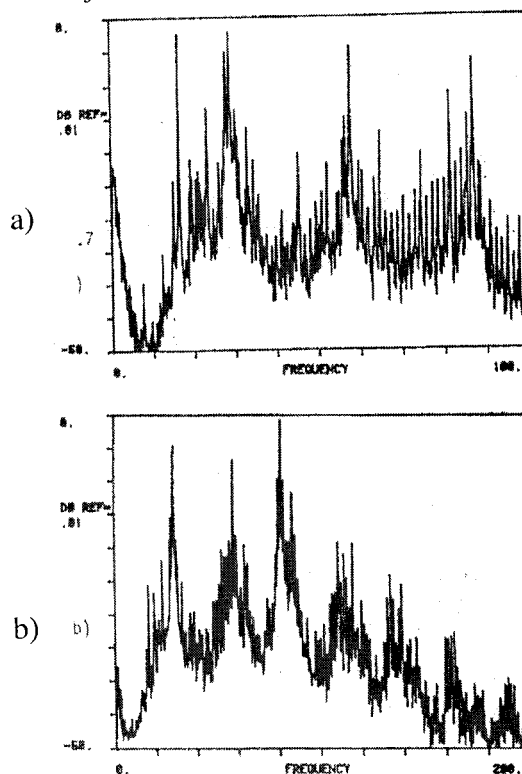
- Drugi, treći i četvrti pik odgovara brojevima obrtaja od 41,3 ; 27,64 i 20,66 o/min, što predstavlja drugi, treći i četvrti "rahmonik"(ana logno "harmoniku")

- Peti pik odgovara broju obrtaja od 18,6 o/inin.

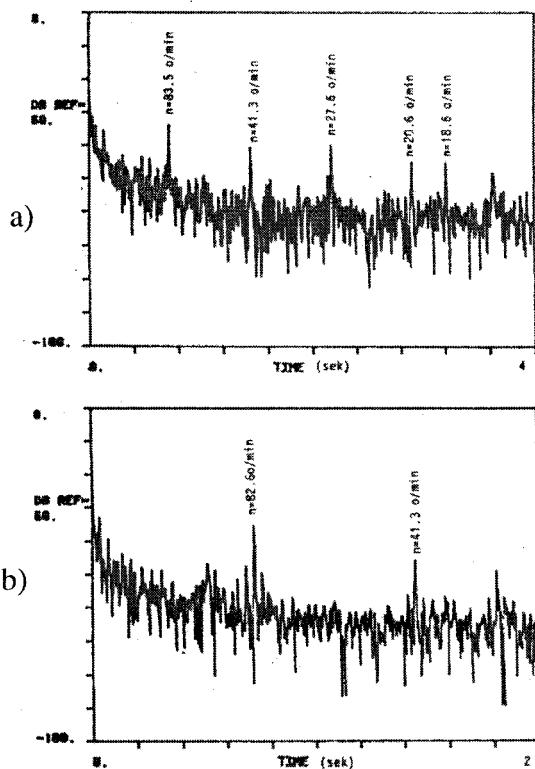
Jasno je sa kinematske šeme da brojevi obrtaja 83,5 i 18,6 o/min odgovaraju brojevima obrtaja zupčanika poslednjeg zupčastog para gde se generira i frekvencija od 29 Hz a kepstar pokazuje da modulacija te frekvencije direktno potiče od brojeva obrtaja oba vratila.

ZAKLJUČAK

Na osnovu analize jasno i nedvosmisleno proizilazi činjenica da uzrok povećanim vibracijama leži u nedopuštenom istrošenju zupčastog para (22/93), dok su ostali efekti, izuzev debalansa rotora motora, zanemarivi. Prenosenje vibracija na gornje postrojenje vrši se očigledno preko nosećih elemenata zgrade uz pretpostavku da u konstrukciji elemenata zgrade postoji određena sopstvena frekvencija koja leži u blizini pobudne frekvencije, a to znači da i vrlo mala pobuda sa tom frekvencijom može da izazove intenzivne vibracije. Tome u prilog govori uskopojasni karakter odziva na podu prostorije (praktično čista sinusna promena). Zamena istrošenih zupčanika će sigurno poboljšati situaciju, a druga mera sanacije bila bi u promeni te frekvencije pobude što bi iziskivalo dodatno posebno razmatranje.



Sl. 7. Prikaz spektra u logaritamskoj razmeri



Sl. 8. Prikaz kepstra

- [1] Adamović, Ž., *Tehnička dijagnostika*, OMO, Beograd, 2001.
- [2] Adamović, Ž., Golubović, D., *Totalno održavanje tehničkih sistema*, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 2000.
- [3] Adamović, Ž., Stojković, B., *Pouzdanost i dijagnostika hidrauličkih sistema*, OMO, Beograd, 2002.
- [4] Биргер, А., *Техническаја диагностика*, Машиностроенис, Москва, 1976.
- [5] Верзаков, Г. Ф., и гр. *Введение в техничкују дијагностику*, Москва, 1968.



TERMOTEHNIKA-ADS

TERMIČKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA
Nikole Marakovića br. 33 11090 Beograd

Tel: +381 11 585 817
Fax: +381 11 585 817
Mob: 064 182 38 48
E-mail: adstermo@veratnet

Preduzeće za izvođenje radova na predgrevanju, termičkoj obradi zavarenih spojeva i održavanju opreme u zemlji i inostranstvu.

DELATNOST PREDUZEĆA:

- a) Primena, realizacija i dokumentovnost
- Predgrevanje kod zavarivanja
 - Naponsko zarenje posle zavarivanja
 - Rekristalizaciono zarenje p o cele hladne detormacije
 - Meko zarenje (n. pr. zarenje krajeva cevi za valcovanje)

b) Održavanje i proizvodnja:

- Popravka i servisiranje (bazdarenje) pisaca temperature
- Popravka i servisiranje (bazdarenje) elektronskih programera temperature
- Popravka, servisiranje i proizvodnja uređaja za privarivanje termoparova
- Popravka i proizvodnja elektrotopornih grejaca
- Popravka induktora za indukciono zarenje
- Popravka i servisiranje opreme za indukciono zarenje
- Popravka i servisiranje opreme za elektrotoporno zarenje.
- Proizvodnja uređaja za bazdarenje pisaca