

NETRADIČNÉ PORUCHY – REZONANČNÝ JAV A JEHO RIEŠENIE V PRAXI

František MOLNÁR¹

Unconventional failures – resonance effect and its solution in practice

Anotácia

Pri vibrodiagnostike a identifikovaní porúch rotačných strojov, okrem bežných porúch občas sa stretávame so špeciálnou chybou, ktorá v skutočnosti nie je porucha. Je to len vlastnosť zariadenia, ktorá v danom konfigurácii má nepriaznivý vplyv na prevádzkovanie zariadenia. Je to rezonancia, rezonančný jav, respektíve prevádzka pri kritických otáčkach. Keďže prevádzka v rezonancii môže značne poškodiť stroj, je veľmi dôležité presne ju identifikovať a navrhnúť najvhodnejšie riešenie.

Annotation

At vibrodiagnostics and identification of rotocure failures, besides of ordinary failures, occasionally a special error can occur, which is actually not a failure. It is only an attribute of a device, which has negative impact on the device's operation in a given configuration. It is a resonance, resonance effect or operation at critical rotational speed. As the operation under resonance could considerably damage the unit, it is very important to identify it precisely and suggest an optimal solution as well.

Key words: resonance, natural resonance, critical rotational speed, coast-down/run-up, waterfall, excitation, reaction,

ÚVOD

Pri vibrodiagnostike a identifikovaní porúch rotačných strojov sa stretávame s rôznymi druhmi poruchami. Najčastejšie sú opotrebovanie ložísk, nevyváženosť rotačnej časti, voľné uloženie rotačnej časti alebo celého zariadenia, nesprávne nastavenie súososti, excentricita, ohnutie hriadeľov a podobne. Z nameraného vibračného spektra môžeme identifikovať tieto poruchy, občas ale zisťujeme, že predanú poruchu navrhovaný zásah nepomôže, respektíve neprináša požadovaný efekt v plnej miere. Je to väčšinou v tých prípadoch, keď okrem danej poruchy je prítomný aj rezonančný jav, alebo práve pôsobenie rezonancie je tou hlavnou chybou.

REZONANČNÝ JAV

O rezonančnom jave pri prevádzkovaní rotačných strojov hovoríme vtedy, ak vlastná, rezonančná frekvencia sústavy je totožná s frekvenciou otáčania rotačnej časti alebo jeho násobkami respektíve podielmi. V podstate ide o skladanie dvoch kmitaní s rovnakými frekvenciami. V tom prípade stačí malá budiaca sila vyvolaná napríklad miernou nevyváženosťou, na ktorú bude vysoká odozva, pretože rezonancia má tzv. „zosilňujúci“ charakter. Tiež hovoríme, že zariadenie pracuje pri

1. Ing. František Molnár - Nexus Plus s.r.o., Nám. priateľstva 2172/33, 929 01 Dunajská Streda
tel./fax: +421 31 55 000 55
mobil: +421 908 434 862
e-mail: molnar@nexusplus.sk

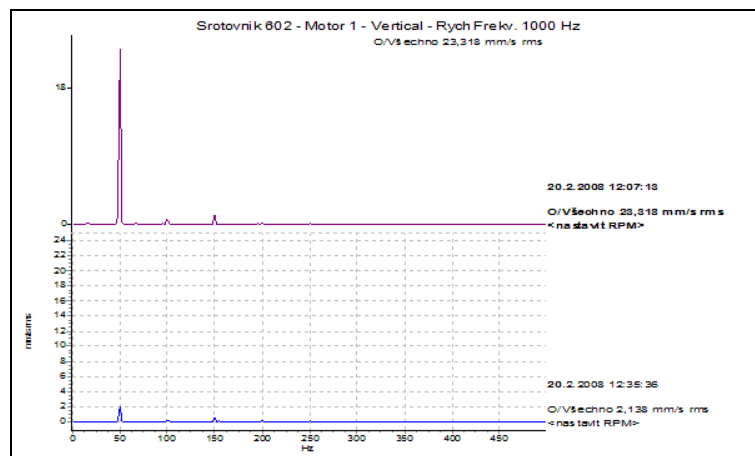
kritických otáčkach. Definícia rezonancie podľa normy STN ISO 2041 je: „rezonancia v sústave pri vynútenom kmitaní existuje vtedy, keď ľubovoľne malá zmena frekvencie budenia má za následok zmenšenie odozvy sústavy“.

IDENTIFIKÁCIA REZONANCIE

Pri rotačných strojov rezonančný jav spôsobuje vysokú amplitúdu práve na tých charakteristických frekvenciách, ktoré poukazujú aj na iné poruchy. Je to logické pretože práve tie poruchy pôsobia ako budiace sily pri rezonancii. Ak by rezonancia nebola prítomná, vyvolali by menšie amplitúdy, ktoré by možno spadli aj do klasifikačnej úrovni stavu „uspokojivý“. Z obyčajného vibračného spektra rýchlosti sa preto ťažko identifikuje či sa jedná o rezonanciu, alebo chvenie spôsobuje iná chyba.

Presnú identifikáciu a riešenie tohto problému najlepšie ukážeme na príklade. Pravidelné meranie na vertikálnych šrotovníkoch vykonávame od začiatku roka 2008, keď boli sprevádzkované ako nové zariadenia. Jedná sa o dva úplne rovnaké šrotovníky, uložené na štvrtom poschodí priemyselnej budovy, z ktorých jeden pracoval správne, ale druhý bol veľmi hlučný a chvenie bolo cítiť aj na prízemí v riadiacej miestnosti.

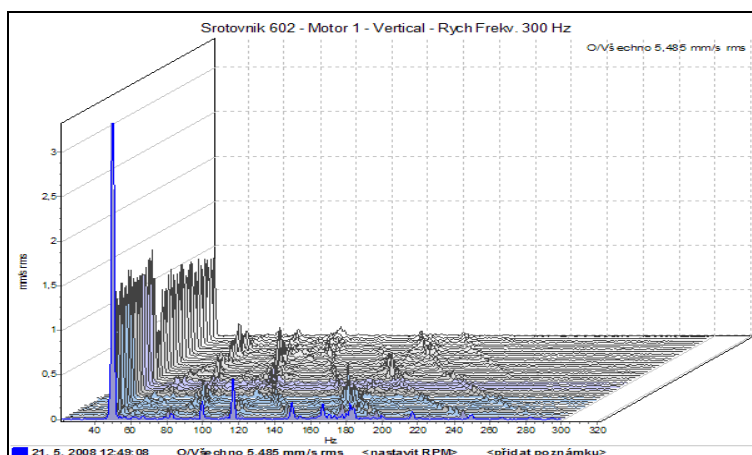
Vykonal sme základné meranie, z ktorého sme zistili, že sú vysoké amplitúdy na otáčkovej frekvencii motora t.j. na 49,9 Hz. Nevyváženosť u týchto zariadení je bežná porucha, preto sme vykonali dynamické vyvažovanie na mieste pri prevádzke. Vyvažovaním sme znížili amplitúdu na otáčkovej frekvencii 49,9 Hz z $23,3 \text{ mms}^{-1}$ na $2,0 \text{ mms}^{-1}$.



Obr.1 Zníženie amplitúdy na otáčkovej frekvencii po vyvažovaní

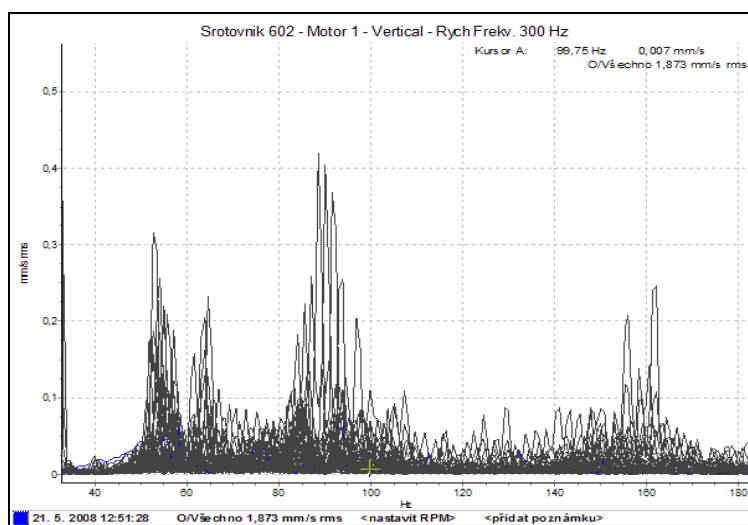
Pri ďalšom pravidelnom meraní o tri mesiace sme však znovu namerali vyššiu amplitúdu na otáčkovej frekvencii. Aby sme znížili chvenie, pri vyvažovacom procese by bolo treba pridať iba 2,8 g závažia. Keďže hmotnosť rotora bola cca. 150 kg, pridanie 2,8 g závažia nemôže priniesť výrazné zmeny pri daných pracovných otáčkach. Mali sme podozrenie, že šrotovník pracuje v rezonancii. Následne sme vykonali meranie pri dobehu po vypnutí zariadenia, aby sme zistili rezonančné frekvencie sústavy. Na obrázku č. 2 je znázornený výsledok merania pri dobehu, čo je vlastne množina meraní po vypnutí stroja, ktorý vplyvom zotrvačnosti sa ďalej otáča s klesajúcimi otáčkami. Spektrá, ktoré boli namerané počas zastavenia, sú potom znázornené do kaskádového diagramu. Na diagrame vidíme, že po vypnutí

motora okamžite klesla amplitúda na otáčkovej frekvencii pod 1,5 mm/s a potom pomaly s klesajúcimi otáčkami sa ďalej znižovala.



Obr.2 Kaskádový diagram meraný pri dobehu

Z obrázku tiež vidíme, že na 100 Hz, ktorá je harmonická frekvencia otáčkovej frekvencii postupne klesli amplitúdy až kým neklesli na cca. 50 Hz, kde sa začali zvyšovať a po prechode cez 50 Hz znovu klesli. Toto je dôkazom, že okolo 50 Hz je prítomná vlastná frekvencia systému alebo rezonančná frekvencia tzv. kritické otáčky. Nasledovný obrázok znázorňuje namerané spektrá poukladané na seba, ktoré nám presne zviditeľnia jednotlivé rezonančné pásma systému.



Obr.3 Spektrá merané pri dobehu poukladané na seba

Z obrázku je zrejmé, že rezonančné pásma systému sú nasledovné:

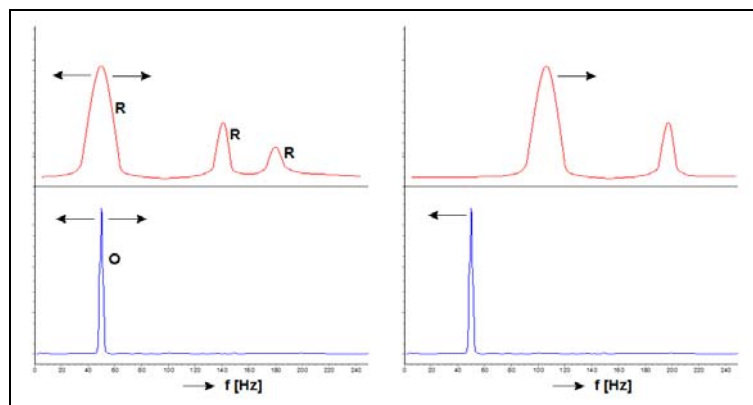
- 1.pásmo 51 - 58 Hz
- 2.pásmo 60 - 66 Hz
- 3.pásmo 82 - 100 Hz

V našom prípade to znamená, že šrotovník pracoval v rezonancii, respektíve veľmi blízko k rezonancii. Ako som už vyššie popísal, rezonancia je jav, vlastnosť predmetov, pri ktorom na malé budenie rovnakou frekvenciou ako je rezonančná frekvencia je vysoká odozva (viacnásobná odozva). Otáčky motora sú blízko k 3000

ot/min, čo zodpovedá 50 Hz. Nakoľko 100% vyváženie neexistuje, pri zapnutom motore vždy pôsobí na 50 Hz nejaká dynamická sila, ktorá je takmer totožná s rezonančnou frekvenciou. K tomu ešte treba dodať, že na rotore šrotovníka sú namontované 24 ks nožov v 3 miestach, t.j. 8-8-8 ks nožov po 120°. Tieto nože pri normálnej prevádzke sa opotrebojú približne za 2-3 týždne. Vtedy ich otočia a po ďalšom opotrebovaní ich vymenia za nové. To znamená, že počas prevádzky sú pravidelné časové intervaly, keď nože sú opotrebované a zariadenie pracuje v menej vyváženom stave. V týchto intervaloch sú vyššie budiace sily na 50 Hz a vplyvom rezonancie vznikajú vysoké vibrácie.

RIEŠENIE NEPRIAZNIVÉHO VPLYVU REZONANCIE

Tento problém je možné riešiť jedine odstránením rezonančného javu, to znamená, aby stroj pracoval mimo rezonancii. Cieľom je aby frekvencia budiacej sily nepadala do niektorých z rezonančných pásiem. Vo všeobecnosti sú dva možnosti. Prvá metóda vyplýva z vyššie uvedenej definície rezonancii, a to tak, že zmeníme frekvenciu budiacej sily t.j. otáčky motora. Druhá metóda je odladenie systému, to znamená posunutie rezonančného pásma do frekvenčného rozsahu, kde nie je žiadne budenie.



Obr.4 Rezonancia a jej odladenie

R – rezonančné pásma, O – otáčky motora

Motor šrotovníka je asynchrónny bez frekvenčného meniča, to znamená otáčky sme nemohli zmeniť. Ani technológia výroby by to nedovolila pretože zníženie otáčok by znižovala kvalitu produktov. Zvolili sme druhú metódu, t.j. odladiť systém - zmeniť rezonančnú frekvenciu zariadenia tak, aby bolo mimo 50 Hz. Vo všeobecnosti pre rezonančnú frekvenciu platí vzorec:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

kde:

k - je silová konštanta (tuhosť)

m - je hmotnosť

Z tohto vzorca vyplýva, že so zväčšením tuhosti (k) rezonančná frekvencia sa zvyšuje (posunie sa smerom hore), a so zväčšením hmotnosti (m) rezonančná frekvencia sa znižuje (posunie sa smerom dole). Zariadenie bolo uložené na

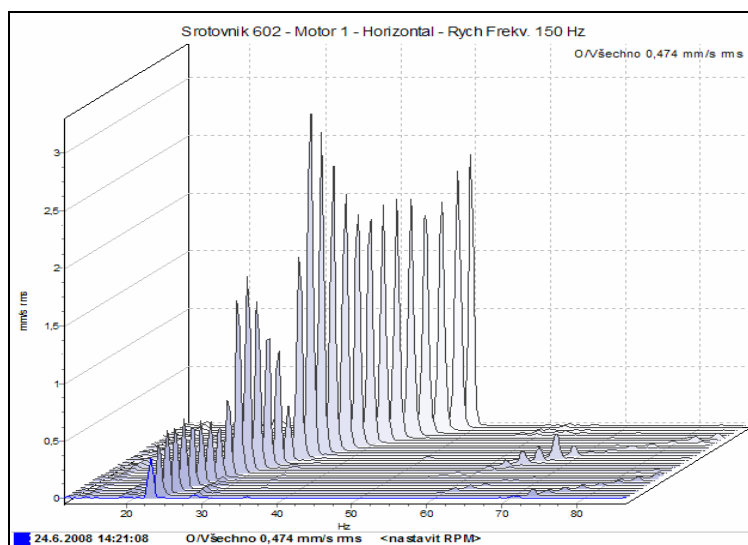
pružinové tmiče kvôli odizolovaniu od budovy. Riešenie bolo evidentné, treba odladiť vlastnú frekvenciu zmenou tuhosti, teda vymeniť pružinové tmiče za silentbloky. Šrotovník bol ešte v záruke, preto akýkoľvek zásah bolo treba konzultovať s výrobcom. Výrobca odmietol takéto riešenie s tým, že oni tiež používajú gumové tmiče, ale iba do hmotnosti stroja 1000 kg. Šrotovník vážil cca. 1300 kg. Ďalej argumentovali s tým, že druhý šrotovník, ktorý má úplne rovnakú konštrukciu, pracuje správne, teda musí tam byť iná chyba. Doniesli nový rotor – držiak nožov s predpokladom, že pôvodný rotor nie je správne vyvážený. Po výmene sme vykonali meranie, stav sa nezlepšil. Navrhli zmerať samotný motor, bez držiaka nožov, či nie je nevyvážený rotor motora. Meranie potvrdilo, že motor je v poriadku. Keďže ďalší nápad nemali, pristúpili k nášmu návrhu a vymenili sa pružinové tmiče na pripravené silentbloky. V nasledovnej tabuľke sú uvedené efektívne hodnoty chvenia namerané pri rôznych situáciách.

Efektívne hodnoty rýchlosti chvenia v mms^{-1}

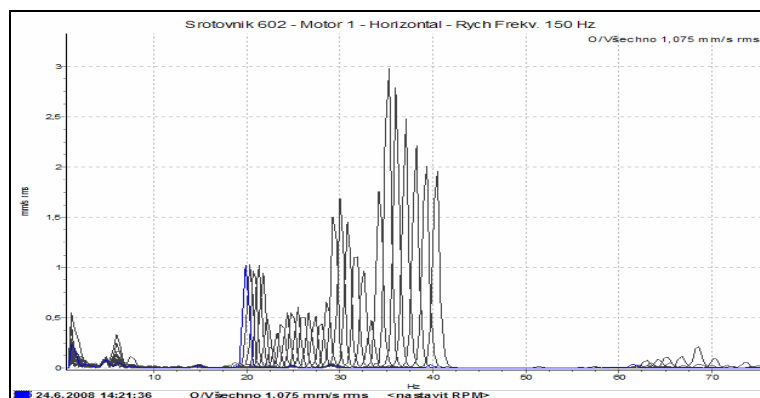
Tab. 6

Poz.	Počiatočný stav	Nový držiak bez kladív	Motor bez držiaka	Starý držiak bez kladív po výmene pružín na silentbloky	Starý držiak s kladivami po výmene pružín na silentbloky
1 H	20,9	15,3	2,2	2,4	7,8
1 V	29,5	20,6	1,7	1,6	7,9
2 H	4,9	4,4	0,3	1,2	0,2
2 V	8,8	9,8	0,4	1,1	1,0
2 A	8,1	1,0	1,0	0,4	1,4

Po namontovaní silentblokov sme vykonali kontrolné meranie pri dobehu aby sme zistili ako sa zmenila rezonančná frekvencia. Na obrázku č.7 vidíme, že po vypnutí zariadenia s klesajúcimi otáčkami postupne klesla amplitúda, ale nie rapídne. Po určitom čase znovu sa zvýšila, kým neprešla cez kritické otáčky. Tento jav s klesajúcimi otáčkami sa viackrát opakovalo. Na obrázku č.8 sú spektrá s klesajúcimi otáčkami poskladané na seba (pohľad na kaskádový diagram spredu), aby sme mohli presne určiť zmenené rezonančné frekvencie.



Obr.7 Kaskádový diagram meraní po výmene pružinových tmičov na silentbloky



Obr.8 Spektrá merané po výmene pružinových tlmičov na silentbloky – poukladané na seba

Z obrázku č.8 je zřejmé, že rezonančné pásma zariadenia po prevedenej úprave sú nasledovné:

1.pásmo	4 - 7 Hz
2.pásmo	19 - 23 Hz
3.pásmo	28 - 32 Hz
4.pásmo	35 - 41 Hz
5.pásmo	61 - 71 Hz

Ako vidíme, okolo 50 Hz, kde sú pracovné otáčky, už nie je žiadna rezonančná frekvencia. Namontovali sme kladivá šrotovníka presne v poradí, ako bolo pri počiatkovom meraní, to znamená ako namontovala miestna obsluha pred 7 dňami. Kladivá boli už mierne opotrebované, čiže stav nebol ideálny. Hodnoty merané s namontovanými nožmi sú uvedené v poslednom stĺpci tabuľky č.6. Porovnaním prvého a posledného stĺpca je zřejmé, že po namontovaní silentblokov sme rezonančnú frekvenciu odladili a vibrácie výrazne klesli. Namerané hodnoty boli už uspokojivé. Amplitúdy $7,8 \text{ mms}^{-1}$, respektíve $7,9 \text{ mms}^{-1}$, ktoré boli namerané v bode 1H a 1V, boli spôsobené opotrebovaním kladív čo spôsobovalo určité nevyváženie. Aj keď tieto hodnoty pre šrotovníka s otáčkami 2994 otmin^{-1} nie sú vysoké, predpokladali sme, že pri nasledovnej výmene kladív ak sa dodrží rovnomerné rozloženie kladív podľa hmotnosti, vibrácie budú ešte nižšie.



Obr.9 vľavo – pôvodné pružinové tlmiče, vpravo – silentbloky po výmene

Popísané riešenie bolo prevedené 24.06.2008. Od toho času v rámci pravidelného merania sme vykonali už 4 merania. V tabuľke č.10 sú uvádzané namerané efektívne hodnoty v jednotlivých meracích bodoch.

	1H	1V	2H	2V	2A
24.06.2008	7,8	7,9	0,2	1,0	1,4
12.08.2008	1,8	2,6	1,0	1,0	1,0
10.12.2008	1,3	3,1	2,1	1,0	2,0
24.02.2009	0,7	2,3	2,0	1,9	1,5
20.05.2009	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1

Jednotlivé merania boli vykonané počas prevádzky v reálnych podmienkach. To znamená raz boli nože opotrebované viac, inokedy menej, podľa bežného výrobného režimu. Podľa dlhodobých výsledkov merania môžeme konštatovať, že navrhovaný zásah bol úspešný, vibrácie klesli na trvalo a sú dané podmienky na dlhodobú bezporuchovú prevádzku.

ZÁVER

Popísané riešenie na prvý pohľad môže sa zdať univerzálnym. Veď je zrejmé, že ak spevníme uchytenie, chvenie viac menej klesne. Ale pozor! Ak sa to stane bez toho, že by sa vedelo konkrétne čo spôsobuje vyššie chvenie, časom toto spevnenie môže prasknúť a poškodzujú sa aj ďalšie časti stroja. Skutočný zdroj vibrácie sa tým totiž neodstráni a porucha naďalej prejavuje svoj účinok. Môže sa stať aj to, že bez potrebných informácií a neodborným spevnením odladí sa sústava a práve po úprave sa posunie rezonančná frekvencia blízko k pracovným otáčkam, respektíve presne do pracovných otáčok. V našom prípade výmena tlmičov za pevnejšie prinieslo trvalé riešenie práve preto, lebo zdrojom vysokého chvenia bol výlučne rezonančný jav, ktorý sme odstránili s tým, že sme zmenili rezonančnú vlastnosť stroja.

Taktiež nie je pravda, že dva stroje s rovnakou konštrukciou musia mať rovnakú vlastnú frekvenciu. Rezonancia závisí od viacerých faktorov, od samotnej konštrukcie, od miesta a spôsobu uloženia a podobne. Rôzne zariadenia sú bežne uložené na poschodie. Podlaha je často podopretá s I profilmi. Rezonančnú frekvenciu môže ovplyvniť aj poloha a vzdialenosť upevňovacích miest stroja od I profilu. V každom prípade ak je podozrenie na tento jav, treba zmerať rezonančné frekvencie a vylúčiť prevádzkovanie stroja v rezonancii.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Protokol o meraní vydaný firmou Nexus Plus s.r.o. č.147/NX/08 - 26.05.2008
- [2] Protokol o meraní vydaný firmou Nexus Plus s.r.o. č.151/NX/08 - 24.06.2008
- [3] STN ISO 2041 (01 1400) Mechanické kmitanie a otrasy - Názvoslovie