

Diagnostika strojov a zariadení

Július Balog

Vibrodiagnostika

Pod vibrodiagnostikou chápeme súbor diagnostických metód založených na snímaní a analýze vibrácií objektov. Moderné stroje pracujú v oblasti vyšších pracovných kmitočtov. **Prejavy porúch** a opotrebenia v **podobe chvenia a zvýšenia hlučnosti** sa objavujú práve v oblasti vyšších frekvencií, kde na zistenie a meranie sú už potrebné príslušné vibroakustické prístroje.

Ideálny stroj by nespôsobil žiadne chvenie, pretože celá jeho energia by sa premieňala na užitočnú prácu. V praxi však chvenie vzniká ako vedľajší produkt normálneho prenosu dynamických síl mechanickou sústavou. Prvky stroja vzájomne reagujú a v sústave dochádza k rozptylu energie formou mechanického chvenia.

Opotrebenie a postupné deformácie jednotlivých súčiastok sú príčinou začínajúcich zmien dynamických vlastností strojov. Postupne dochádza k porušeniu súosovosti hriadelov, nevyváženosti rotorov a k zväčšeniu vŕt. Všetky tieto faktory sa prejavujú zvýšením energie chvenia, ktorá po prenose mechanickou sústavou vyvoláva rezonanciu a spôsobuje značné prídavné dynamické zataženie ložísk. Zdrojom kmitov v mechanizmoch je kinetická energia rázu stýkajúcich sa súčiastok. Pri otáčaní hriadeľa vo valivých ložiskách sa valivé telieska pod hriadelom odvalujú, posúvajú sa tak po obvode vnútorného krúžku ložiska a hriadel sa neustále o nepatrnú dráhu dvíha a opäť klesá. Na zdvihnutie hriadeľa treba vyvinúť určitú energiu, ktorú dodáva príslušný točivý zdroj výkonu daného mechanizmu. Energia nahromadená zdvihom hriadeľa sa premieňa na kinetickú energiu jeho pádu, pričom výška pádu hriadeľa a sila úderu závisí od veľkosti radiálnej vôle ložiska. Frekvencia úderov závisí od rozmerov ložiska, počtu valivých teliesok a rýchlosti otáčania ložiska, nie je však závislá od stavu ložiska, takže môže slúžiť ako nosná časť hodnoteného signálu. Táto nosná časť signálu s konštantnou frekvenciou je modulovaná veľkosťou amplitúdy kmitov, ktorá je závislá od veľkosti úderu, a teda od vôle ložiska.

Chvenie väčšiny strojov má typické hladiny. Keď je stroj v dobrom technickom stave, kmitočtové spektrum jeho chvenia má charakteristický tvar. Toto kmitočtové spektrum (závislosť amplitúdy chvenia od kmitočtu) je možné považovať za „vibračný podpis“ stroja a možno ho získať pomocou **kmitočtovej analýzy** jeho mechanického chvenia.

Základnou časťou meracieho zariadenia je **snímač kmitov**, a práve od jeho kvality závisí presnosť a spoľahlivosť diagnózy. Existujú snímače schopné registrovať dráhu kmitu, iné rýchlosti alebo zrýchlenia. Používajú sa prevažne snímače zrýchlenia umiestnené na nepohyblivom telese mechanizmu. Miesto pre snímač sa určuje s ohľadom na dobrú dostupnosť montáže a ľahkú definovateľnosť jeho presnej polohy. Ak je táto poloha stanovená a sú pre ňu ocachované prístroje, treba ju pri opakovanom meraní presne dodržať. Chyby v montáži snímača sa premietajú do chýb diagnózy. Populárnymi snímačmi sú snímače rýchlostí a piezoelektrické snímače zrýchlenia (akce-lerometre). Meranými parametrami sú výchylka, rýchlosť a zrýchlenie.

Elektrický signál je pri výstupe zo snímača veľmi slabý, preto sa do systému zaraďuje najprv **predzosilňovač** s rovnomernou frekvenčnou charakteristikou. Za ním sa inštaluje **frekvenčný pásmový filter** – ten zosilňuje signál, ktorý nás práve zaujíma a zároveň zoslabuje iné signály. Po frekvenčnej filtrácii sa signál podrobí **časovej filtrácii**. Časový filter (strobátor) prepúšťa tie časti signá-

lu, ktoré prichádzajú v predvolenom časovom úseku zodpovedajúcom okamihom úderov sledovanej časti mechanizmu. Pri prechode od jednej diagnostikovanej súčasti k druhej sa predvolia iné príslušné časové úseky.

Vysokofrekvenčné kmity sú len nosnou časťou signálu, ich frekvencia nezávisí od veľkosti vŕt v mechanizme, je však od nich závislá amplitúda kmitov. Po prechode **detektorom** sa stráca VF nosná zložka kmitov a akustický signál má tvar jednoduchých, za sebou idúcich impulzov. Amplitúda týchto impulzov charakterizuje intenzitu úderov skúmaných častí, a teda vŕt v uložení.

Najlahšie možno amplitúdu impulzu merať pomocou **amplitúdového diskriminátora**. Impulz prejde diskriminátorom vtedy, keď jeho amplitúda prekročí vopred stanovenú hranicu. Táto hodnota sa dá nastaviť a pre každé skúmané súčasti možno nájsť konkrétnu hodnotu zodpovedajúcu prechodu medzi normálnym stavom a poruchou. Impulz, ktorý prejde diskriminátorom môže napríklad rozsvietiť signalizačné svetlo alebo dať iný signál.

Aplikácia vibroakustických metód vyžaduje kvalitnú prístrojovú techniku a vykonanie rozsiahlych experimentov s každým konkrétnym typom mechanizmu s cieľom presného dešifrovania diagnostického signálu.

Prístrojové vybavenie na sledovanie mechanického chvenia je možné rozdeliť podľa zložitosti do dvoch kategórií.

Základný systém pozostáva z vreckového merača určujúceho celkové hladiny chvenia, zo stroboskopu na meranie rýchlosti otáčania a relatívnych pohybov súčiastok a zo slúchadiel pre akustickú kontrolu. Celkové hladiny je možné porovnať s referenčnými hodnotami (určenými normami alebo definovanými pre každý stroj). Slúchadlá pripojené priamo k meraču chvenia spájajú operátora bezprostredne s pracovným chodom stroja.

Prenosný systém vykonáva kmitočtovú analýzu chvenia, umožňuje včasné zisťovanie porúch, diagnostiku a odhad doby výskytu poruchy. Je schopný ďalej registrovať spektrum chvenia priamo na mieste. Pribežne zaznamenávané spektrá sa potom automaticky porovnávajú s referenčnými spektrami v pamäti za účelom zisťovania rastu amplitúd jednotlivých kmitočtových zložiek.

Pri veľkom počte monitorovaných bodov a komplikovanom zisťovaní porúch sa používajú **systémy s počítačom**. Tieto kombinujú prednosti prenosného systému, t. j. možnosti analýzy a detekcie na mieste s výhodami počítača, t. j. s rozsiahlymi diagnostickými možnosťami a schopnosťou zberu, ukladania a spracovania veľkých súborov dát. Zber dát zodpovedajúcich chveniu každého stroja je možné riadiť počítačom na základe zostavovaných pracovných postupností. Počítač zaručuje, že každý stroj je monitorovaný tak často a takým spôsobom, ako je to potrebné.

V prípadoch, že sledovaný stroj má kľúčovú úlohu vo výrobe a jeho porucha má za následok nákladnú opravu, prichádzajú do úvahy **systémy na trvalé sledovanie stavu strojných zariadení**. Monitory chvenia v spojení s trvalo inštalovanými snímačmi zrýchlenia okamžite indikujú zmeny stavu sledovaného zariadenia. V prípade výskytu príliš vysokých hladín uvedú monitory do činnosti poplachové zariadenie alebo prerušia prácu sledovaného zariadenia.

Pri interpretácii výsledkov merania je veľmi dôležitá voľba správneho typu zobrazenia. Bežne sa používajú tak lineárne, ako aj lo-

garitmické stupnice, avšak len logaritmická stupnica amplitúd dovoľuje merať s potrebným rozlíšením a presnosťou zložky chvenia v dostatočne širokom dynamickom rozsahu. Stupnice sa často ciachujú v jednotkách napr. $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ale i v jednotkách dB. Použitie jednotiek dB umožňuje výrazné zúženie širokého rozsahu číselných hodnôt.

Na osiach kmitočtu sa obvykle používajú tak lineárne, ako aj logaritmické stupnice. Logaritmické stupnice sú najvýhodnejšie na zisťovanie a predvídanie porúch. Pre diagnostické účely, hlavne pri zložitých zariadeniach, sú výhodné lineárne stupnice. Umožňujú lepšie oddelenie jednotlivých kmitočtových zložiek.

Termodiagnostika

Termodiagnostické metódy sa vyznačujú využívaním teploty ako diagnostického parametra charakterizujúceho stav objektu. V praktickej aplikácii sa používajú tak lokálne, ako aj integrálne hodnoty teplôt, a to buď ustálených (stredná hodnota, efektívna a pod.), alebo časovo premenných (okamžité hodnoty, frekvenčné spektra atď.). Sú nasadzované všade tam, kde vznikajúca porucha stroja spôsobuje zvýšenie pasívnych strát, zníženie účinnosti alebo vytvorenie nového tepelného zdroja. Typickým príkladom je zvýšenie teploty ložísk so stúpajúcim opotrebením, lokálne teplotné zmeny na čele trhliny, ohrev intenzívne kmitajúcich častí strojov vplyvom transformácie tlmiacej energie na energiu tepelnú atď. Druhou skupinou použitia sú poruchy vyhrievacích telies, výmenníkov, únik tepelnej energie netesnosťami alebo nedostatočnou izoláciou a pod.

Podľa cieľov konkrétneho diagnostického zariadenia sú volené vhodné typy snímačov teploty. Značné rozšírenie zaznamenali snímače teplôt na princípe tepelného žiarenia, a to tak pyrometre, ako aj prístroje zisťujúce celkové tepelné obrazy.

Vlastné rozdelenie je potom nasledovné:

- dotykové meranie teploty – tzv. teplomery, termokriedy,
- bezdotykové meranie teploty – tzv. pyrometre,
- indikácia teplotných obrazov – tzv. termovízia.

V technickej praxi sú používané dva typy **pyrometrov**. Integrálny pyrometer transformuje energiu žiarenia prakticky v celom rozsahu vlnových dĺžok vyplývajúcich zo Stefanovho/Boltzmannovho zákona. Žiarenie premeriavaného telesa je optickou sústavou sústredené na termoelektrickú batériu – snímač teploty. Zaostrenie je kontrolované objektívom. Generovaná elektromotorická sila je indikovaná ručičkovým prístrojom. Pyrometer býva ciachovaný na žiarenie absolútne čierneho telesa. Nameraný údaj teploty je nutné preto opraviť podľa skutočnej emisivity a priestupnosti prostredia na skutočnú teplotu.

Lepšie výsledky sa dosahujú pri meraní pásmovými pyrometrami, pri ktorých je možné presnejšie určiť tak strednú hodnotu emisivity, ako aj priestupnosť v danom pásme vlnových dĺžok. Snímačom týchto pyrometrov sú selektívne kvantové snímače a meracie pásmo vlnových dĺžok býva ešte upravované filtermi.

Indikáciu teplotných obrazov je možné realizovať buď systémami s priamym zobrazením poľa alebo systémami s optickým alebo elektrickým rozkladom obrazu.

Priame zobrazenie poľa umožňujú obrazové meniče pracujúce s kombináciou fotoemisie a luminiscencie. Je to metóda univerzálneho charakteru založená na systéme elektronickej premeny infračerveného žiarenia na viditeľné spektrum. Všetky telesá emitujú v infračervenom vlnovom pásme elektromagnetickú energiu v podobe fotónov. Keďže počet fotónov je funkciou teploty telesa, tento efekt možno technicky využiť na viditeľné zobrazenie tepelného poľa vyžarovaného povrchom skúmaných predmetov. Uvedený poznatok je základom metódy nazývanej „termovízia“. Pri nej je meranie bezdotykové. Optický systém sníma infračerve-

né lúče a privádza ich na detektor, kde sa energia dopadajúcich fotónov, emitovaných pozorovaným objektom, prevádza na elektrické signály. Vzniknuté elektrické signály sú zosilnené a určené na riadenie emisie elektrónov bežnej televíznej obrazovky. Termovízia umožňuje sledovať teplotné pole i v pohybujúcich sa predmetoch a uplatňuje sa v mnohých odboroch. Umožňuje priamo vidieť napr. zvýšený prechodový odpor v studenom spoji elektrického obvodu, studenú sviečku nepracujúceho motora, zvýšené zahrievanie ložiska. Rozsah teplôt telies, ktoré termovízia bežne zobrazuje, je od -30 do 2000 °C. Teplotný rozsah v jednom obraze sa však volí podstatne menší, napríklad 1 °C, maximálne 1000 °C, a docieľuje sa vysoká rozlišovacia schopnosť až $\pm 0,2$ °C. Termovízne systémy umožňujú tiež selektívne rozlíšenie polí, tzv. izotermické zobrazenie. Amplitúdovým diskriminátorom je vymedzený len signál zodpovedajúci zvolenému teplotnému rozsahu, takže vplyv ostatných teplôt je potlačený. K zvýšeniu rozlišovacej schopnosti sa používa bežná fa-rebná obrazovka.

Termovízne systémy s elektronickým rozkladom obrazu využívajú ako snímací element vidikony, a to buď s prevodovou fotoodporovou vrstvou $\text{PbO} + \text{PbS}$, alebo s pyroelektrickou. Fotoodporové vidikony môžu indikovať teplotné pole nad 300 °C. Pyroelektrické vidikony pracujú spoľahlivo už od teplôt okolia a majú rozlišovaciu schopnosť okolo $0,5$ °C.

Tribodiagnostika

Tribodiagnostika je jednou z metód bezdemontážnej technickej diagnostiky, ktorá využíva mazivo ako médium na získanie informácií o dejoch a mechanických zmenách v technických systémoch, v ktorých sú mazivá aplikované. Tribodiagnostika teda plní dve hlavné úlohy:

- sledovanie degradácie (starnutie) maziva,
- sledovanie stavu opotrebenia strojnych zariadení.

Starnutie oleja je bežný jav, ktorý vzniká predovšetkým v dôsledku reakcie so vzdušným kyslíkom. Rozsah a rýchlosť zmien závisí od chemického zloženia maziva, od teploty (predovšetkým), od aditív atď. Práve sledovanie týchto fyzikálnych a chemických vlastností, ku ktorým v priebehu prevádzky dochádza, poskytuje relatívne presný obraz o okamžitom stave maziva a jeho ďalšom prevádzkovaní. Popri normalizovaných testoch, resp. skúškach, existuje i celý rad tzv. zmluvných testov, ktorými je možné normalizované testy nahradiť s dostatočnou presnosťou. Obvykle sa testuje kinematická viskozita, bod vzplanutia, obsah vody, číslo celkovej alkality a kyslosti, Conradsonov karbonizačný zvyšok, kvapková skúška, celkové znečistenie a ďalšie.

Pre potreby diagnostiky sa oleje rozdeľujú do dvoch základných skupín – motorové a priemyslové. Východiskom pre hodnotenie dynamiky zmien jednotlivých parametrov v prevádzke sú parametre čistého oleja.

Do tejto skupiny tribodiagnostiky patrí i tzv. spektrálna analýza olejov, resp. infračervená spektrometria. Metódy tribodiagnostiky, ktoré umožňujú sledovanie **veľkosti opotrebenia** sledovaného objektu, je možné v podstate rozdeliť do nasledovných skupín:

- metódy na stanovenie koncentrácie oterových kovov,
- metódy pre hodnotenie morfológie a distribučného rozdelenia.

doc. Ing. Július Balog, CSc.

**Katedra spoľahlivosti strojov
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre**