

HODNOTENIE KVALITY A PREVÁDZKOVÉHO STAVU PREVODOVIEK VIBRODIAGNOSTIKOU

OUTPUT QUALITY AND OPERATION CONDITON EVALUATION OF GEARINGS USING VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS

Richard GALOVIČ¹

Abstrakt

Práca sa zaoberá aplikáciou experimentálnych metód vibroakustickej diagnostiky pre potreby vývoja ozubených prevodov a počas výstupnej kontroly kvality automobilových prevodoviek.

Počas životnostných a únavových skúšok ozubenia bola vibrodiagnostika použitá pre korekciu konštrukcie testovacieho zariadenia (nevyváženosť, nesúosovosť, pružná spojka), ako aj pre zistenie a rozvoj poškodenia pittingom jednotlivých testovaniach párov ozubených prevodov (štandardné evolventné profily, evolventné HCR profily, neevolventné čelné ozubené kolesá). Hľadaný je vzťah medzi stupňom poškodenia ozubených prevodov a zmenou frekvenčného spektra tak, aby v budúcnosti bolo možné určiť stav ozubení bez nutnosti zastaviť stroj.

Pri výstupnej kontrole kvality je cieľom zistiť, či chyby výroby a montáže je možné pomocou bezdemontážnej vibrodiagnostiky odhaliť a či je možné stanoviť, o aké poškodenie ide.

Kľúčové slová: prevodovka, ozubený prevod, vibroačná diagnostika, poškodenie, pitting, frekvenčné spektrum

Abstract

The paper deals with the application of the experimental methods of vibroacoustic diagnostics for the use at the stage of automotive gear development and production quality control.

The vibroacoustic diagnostics was used during gear fatigue testing for design correction of tester stand as well as for diagnostics of pitting failure development of all gear wheel sets (standard evolvent profiles, evolvent HCR profiles, non-evolvent front gear wheels). It is searched for the correlation between the degree of gear damage and the changes in frequency spectrum, so that it is possible to determine the gear condition during the normal operation condition without any gear performance break.

The aim at the phase of production output quality control is to find out, whether it is possible to distinguish gearings with failure and to determine, what sort of failure it is.

Keywords: gears, gearing ratio, vibroacoustic diagnostics, damage, pitting, frequency spectrum

ÚVOD

Vývoju, testovaniu a výrobe automobilových komponentov sa venuje významná pozornosť zo strany výrobcov automobilov, ale aj výskumných a vzdelávacích inštitúcií na celom svete. Snahou je dodávať na trh prvotriedne produkty, ale aj skracovať čas potrebný na vývoj, testovanie a zavedenie výroby nových súčiastok alebo častí zariadení. V tomto procese významnú

¹ Ing. Richard GALOVIČ, KTM, SjF STU Bratislava, richard@galovic.sk

Lektoroval: doc. Ing. Slavomír CABAN, CSc., KAMaM, SjF TU v Košiciach, slavomir.caban@tuke.sk

úlohu hrajú životnostné a únavové testy zariadení, ako aj výstupná kontrola kvality, ktoré sú zväčša veľmi náročné na čas aj finančné prostriedky. Preto je snahou všetkých významných výrobcov automobilových súčiastok aplikovať pri vývoji a testovaní nových zariadení také metodiky, ktoré významne ušetria čas aj náklady. Tento postup je podmienkou pre možnosť zachovania si svojho postavenia v silnom konkurenčnom tlaku automobilového priemyslu.

Ideálny prípad nastane, keď je výrobca schopný navrhnuť a vyrobiť všetky produkty bez chýb. Pri tak komplikovaných sústavách ako sú automobily a ich jednotlivé časti, je to úloha veľmi náročná a často neuskutočniteľná. Existuje však možnosť zabezpečiť, aby výrobky, ktoré nespĺňajú najprísnejšie kritéria, boli odhalené ešte vo fáze testovania prípadne na výrobnom páse vo fabrike a neopustili výrobný závod. Tým by bolo možné predísť problémom a finančným stratám, ktoré súvisia so sťahovaním chybných výrobkov z trhu alebo zvolávaním majiteľov poruchových modelov do servisných centier. Finančné straty znižujú konkurencieschopnosť a hospodárske výsledky výrobcu. Preto má spoločnosť snahu navrhovať, vyrábať a predávať len výrobky s najvyššou kvalitou.

V súčasnosti prevažujúce subjektívne metódy diagnostiky a kontroly závislé od človeka a jeho výkonu je nutné nahradiť strojovými zariadeniami, ktoré sú schopné objektívne vyhodnocovať situáciu a ponúknuť odpovede na otázky týkajúce sa nielen vyskytnutých chýb, ale aj ich príčin.

Jednou z týchto nedeštruktívnych kontrolných metód, využívajúcich skutočnosť, že strojové zariadenie pri svojej práci kmitá, je vibračná diagnostika. Vibrodiagnostika nerieši všetky otázky súvisiace s návrhom a testovaním výrobkov vo fáze vývoja ako aj s výstupnou kontrolou kvality, ale ponúka nové možnosti, ktoré môžu vhodne doplniť existujúce postupy.

V mojej práci hľadám koreláciu medzi nameraným spektrom zrýchlenia kmitania pre daný model prevodovky a určitou chybou prevodu, ktorá vznikne v zariadení počas doby prevádzky pod záťažou, prípadne chybou, ktorá vznikne nepresnosťou výroby alebo chybou montáže. Z nasnímaných signálov štatistického výberu bolo vytvorené referenčné spektrum, stanovená referenčná maska, ku ktorej sa porovnávali prevodovky s chybou.

VIBRAČNÁ DIAGNOSTIKA STROJOV

Ak má výrobný závod záujem udržať svoju konkurencieschopnosť, musí vyriešiť kľúčový problém: vypracovať postup, ako zabezpečiť, aby výrobu opúšťali výhradne len výrobky spĺňajúce najnáročnejšie požiadavky na kvalitu. To znamená, že je potrebné navrhnuť a odskúšať tieto výrobky rovnako vo fázi vývoja, ako aj finálnej výroby.

V minulosti boli skúsení technici schopní rozpoznať sluchom, zrakom alebo hmatom, či stroj pracuje správne. Na tieto metódy sa dnes už nie je možné spoliehať, nakoľko stroje pracujú automatizovane len s príležitostným zásahom pracovníkov a pri veľmi vysokých rýchlostiach, kde sa poruchy prejavujú v oblasti stredných a vysokých frekvencií.

Vibrodiagnostika ponúka objektívne odpovede na otázky, na ktoré existujúce metódy a postupy nestačia. Avšak doplnením existujúcich systémov o vibrodiagnostickú kontrolu je možné presne odlíšiť kvalitné výrobky od chybných alebo zistiť, v akom stupni poškodenia sa zariadenie nachádza.

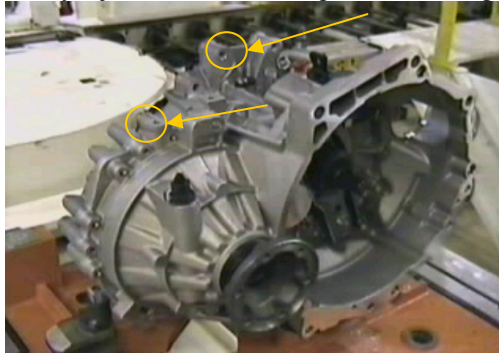
Pomocou vibrodiagnostiky môžeme trvalo monitorovať stav strojového zariadenia, ale tiež stanoviť, ktorý výrobok, opúšťajúci výrobu, nespĺňa požadované parametre. V procese vývoja zariadenia sa zaoberám trvalým monitoringom prevodovky a zmenami vo frekvenčnom spektre počas jej prevádzky, v prípade výstupnej kontroly kvality sa zaoberám jednorázovým nasnímaním frekvenčného spektra a jeho anomáliami.

Vibračná diagnostika aplikovaná v procese vývoja aj výstupnej kontroly kvality je založená na analýze zmeny tvaru spektra vibračných signálov zosnímaných zo sledovaných strojov.

EXPERIMENTÁLNE PRÁCE

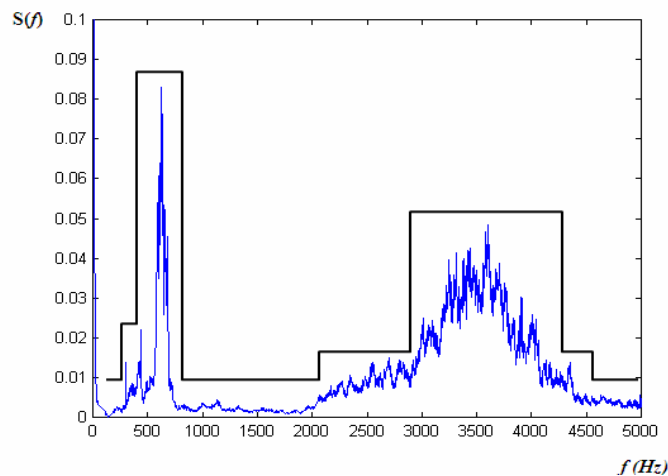
Pre návrh metodiky zisťovania stavu poškodenia prevodoviek aplikáciou vibračnej diagnostiky je nutné riešiť experimentálnu úlohu. Experimentálna časť práce má za cieľ zistiť, ktoré časti spektra kmitania je potrebné skúmať a nakoniec nasnímať signály zrýchlenia kmitania z vybraných prevodoviek.

Vlnenie sa od zdroja mechanického kmitania šíri mechanickou sústavou rôznymi cestami. V mieste pripevnenia snímača kmitanie interferuje, a teda je možné snímačom zachytiť len výslednú amplitúdu a smer kmitania. Snímače sa umiestnili tak, aby boli na tuhých miestach a čo najbližšie k významným rotačným jednotkám, ktoré sú predmetom diagnostikovania (obr.1).



Obr.1 Automobilová prevodovka a výber miest upevnenia snímačov

Výsledky spektrálnej analýzy ponúkajú veľa informácií o snímanej prevodovke. Frekvenčné spektrá poskytujú okrem kvantitatívneho pohľadu aj pohľad kvalitatívny. Táto analýza umožní identifikovať chybu, ako aj nájsť jej príčinu. Za kvalitatívne kritérium pre analýzu spektier bolo stanovené referenčné spektrum. Na základe referenčného spektra bola navrhnutá referenčná maska.



Obr.2 Príklad referenčného spektra a príslušnej referenčnej masky

Referenčné spektrum sa používa ako etalón pri diagnostike strojových zariadení s cieľom odhalenia chýb. Spektrum vibroakustického signálu diagnostikovaného zariadenia sa porovnáva s jeho referenčným spektrom.

Referenčné spektrum bolo vypočítané ako aritmetický priemer z hodnôt výkonovej spektrálnej hustoty spektier dobrých prevodoviek. Príklad referenčného spektra je znázornené na obr.2.

Rozšírením frekvenčných pásem referenčného spektra vytvoríme **referenčnú masku**, ktorú dostaneme posunutím referenčného spektra o jedno frekvenčné pásmo naľavo i na pravo. Referenčná maska tak absorbuje vplyv kolísania otáčok, pretože jej efektívna šírka pásma je trikrát širšia, ako pri referenčnom spektre.

Referenčná maska bola stanovená pre každý smer kmitania a prevodový pomer samostatne. Do úvahy bolo potrebné vziať rozptyl hodnôt výkonovej spektrálnej hustoty dobrých prevodoviek okolo hodnôt referenčného spektra. K tejto referenčnej maske boli potom porovnávané prevodovky počas doby prevádzky aj počas výstupnej kontroly kvality pre každý snímaný kanál a každý prevodový stupeň samostatne.

MONITORING STAVU POŠKODENIA

Pri únavovom testovaní prevodoviek na opotrebenie skúmame vo frekvenčnej oblasti vyššie harmonické zložky základnej zubovej frekvencie. Preto pri sledovaní opotrebenia je vhodné analyzovať aspoň prvé tri harmonické. Jav všeobecného opotrebenia zubov je indikovaný nepatrným vzrastom hladiny pri zubovej frekvencii a výraznejším vzrastom jej druhej a tretej harmonickéj.

Pri vyskytnutí sa lokálnej chyby (prasknutý zub, pitting) sa pri zaťažení zväčší jeho deformácia čo sa prejaví zvýšením hodnoty sledovanej veličiny v časovej oblasti a plochejším pozadím frekvenčného spektra v okolí zubovej frekvencie a jej harmonických. Spektrum signálu modulovaného krátkym impulzom obsahuje veľký počet postranných pásem nízkej hladiny v širokom frekvenčnom pásme.

Preto v práci stanovujeme prejav stupňa poškodenia ozubenia porovnávaním významných frekvenčných zložiek pomocou nasledujúcich postupov:

- Pre stanovenie lokálnych chýb pomerom výkonovej spektrálnej hustoty harmonických zložiek zubovej frekvencie k hodnote výkonovej spektrálnej hustoty pri základnej zubovej frekvencii,
- Pre stanovenie stupňa všeobecného opotrebenia pomerom výkonovej spektrálnej hustoty obsiahnutej vo frekvenčných zložkách pozadia (postranných pásmach) k hodnote výkonovej spektrálnej hustoty pri základnej zubovej frekvencii.

Pri diagnostikovaní mechanických prevodoviek možno s výhodou využívať keprálnu analýzu. Opotrebené zuby v spektre sa prejavujú súborom postranných pásem, ktoré však často indikujú poškodenia rôzneho druhu. Postranné pásma sa zvyčajne objavujú v okolí zubovej frekvencie a v okolí jej harmonických zložiek. Vzďialenosť týchto pásem, resp. frekvenčných zložiek obsahuje veľmi cenné informácie o zdroji dynamického zaťaženie samotného prevodu a okolitého prostredia. Kepstrum zvyčajne efektívne redukuje celkovú vzorku jedného súboru postranných pásem na jednu spektrálnu čiaru kepra, čím sa zjednodušuje problém sledovania zmien stavu diagnostikovaného objektu.

Pri stanovení kritérií poškodenia ozubenia pittingom porovnáваме zmenu referenčného frekvenčného spektra s klasickou metódou, teda zisťovaním kritériálnej plochy. Na základe veľkosti kritériálnej plochy zaznamenávame kvantitatívne aj kvalitatívne zmeny frekvenčného spektra a tejto zmene priradujeme stupeň poškodenia pittingom. K zovšeobecneniu výsledkov tejto metodiky vykonávame sériu porovnávacích meraní pre rôzne druhy ozubení (štandardné evolventné profily, evolventné HCR profily, neevolventné čelné ozubené kolesá).

VÝSTUPNÁ KONTROLA KVALITY

Skupina chybných prevodoviek bola sledovaná pre tri rôzne dopredu známe poruchy. Vzhľadom na charakter výroby a na ojedinelosť výskytu chýb v prevodovkách museli byť tieto poruchy v prevodovkách pripravené zámerné. Prvá chybná meraná prevodovka mala nasimulovaný poškodený veniec diferenciálu. Druhá chybná prevodovka mala poškodené ihličkové ložisko na prvom prevodovom stupni. Tretia chybná prevodovka mala poškodený, a teda aj hlučný piaty rýchlostný stupeň. V nasledujúcej časti sa uvádzajú symptómy, ktoré boli nájdené v spektrách troch chybných prevodoviek pomocou vibračnej diagnostiky. Analýzou týchto príznakov sa hľadal vzťah k diagnostikovanej chybe.

Prejavy chybných prevodoviek č. 1:

Výrazné prekročenie referenčnej masky (dvojnásobné až trojnásobné) v oblasti 650 Hz až 700 Hz pre prevodové stupne R,1 až 5.

Prejavy chybných prevodoviek č. 2:

Výrazná frekvencia 750 Hz prekračuje referenčnú masku viac ako dvakrát pri prevodových stupňoch R,2,3,4 (obr.3).

Prejavy chybných prevodoviek č. 3:

Výrazný, neobvyklý vrchol pri frekvencii 100 Hz na prevodovom stupni R.

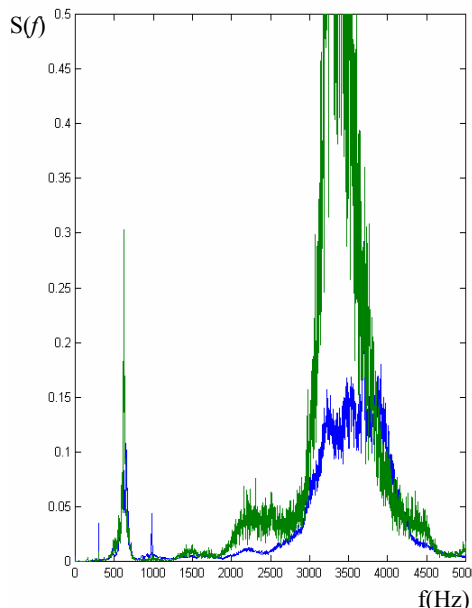
Dvojnásobné prekročenie referenčnej masky v oblasti 3500 Hz až 4000 Hz pri prevodových stupňoch R, 1.

Frekvencia prekračuje referenčnú masku pri frekvencii 700 Hz pri prevodových stupňoch R, 1,2,3,4.

Chybná prevodovka číslo 1 má zubovú frekvenciu venca diferenciálu veľmi výrazne prevyšujúcu referenčnú masku na všetkých prevodových stupňoch, čo zodpovedá poškodenému venci diferenciálu.

Chybná prevodovka číslo 2 má veľmi výraznú ložiskovú frekvenciu pri prevodových stupňoch R,2,3,4, čo zodpovedá chybnému ložisku na prvom prevodovom stupni, kde sa táto porucha nemôže prejaviť.

Chybná prevodovka číslo 3 má zaznamenaných niekoľko prekročení referenčných masiek zubovou frekvenciou na prevodových pomeroch R, 1, 2, 3, 4, avšak nie pri piatom prevodovom stupni, kde by bolo možné takúto anomáliu očakávať vzhľadom na informácie od výrobcu.



Obr.3 Graf výkonovej spektrálnej hustoty vo frekvenčnej oblasti, Chybná prevodovka číslo 2, Snímaný kanál číslo 1, prevodový pomer: štvrtý

PRAKTICKÉ VYUŽITIE A ANALÝZA PRÍNOSU

Vo výrobnom závode sa pri vývoji, výrobe alebo montáži, okrem prevodoviek spĺňajúcich všetky náročné kritéria kvality, vplyvom náhodných chýb vyrobí aj prevodovky s niektorým druhom poruchy. Takýchto prevodoviek je málo a väčšina z nich (98,5%) je odhalená pri výstupnej kontrole pomocou dnes používaných metód. Pri zavedení vibrodiagnostickej kontroly kvality vieme diagnostikovať 22% chybných prevodoviek, ktoré opúšťajú výrobný závod.

Čo dnes nie je možné posúdiť bez ďalšieho výskumu je, či by bolo možné aj zvýšené chyby identifikovať pomocou vibračnej diagnostiky.

V minulosti bolo slovo „kvalita“ používané najmä v súvislosti s drahým a luxusným tovarom. Dnes je kvalita základným predpokladom úspešnosti výrobcov, lebo zákazníci z celého sveta ju vyžadujú a očakávajú.

Ako vidieť z výsledkov analýz predkladanej práce, existuje úzky súvis medzi chybou mechanického zariadenia a jej prejavmi vo frekvenčnom spektre alebo vo zvýšení mohutnosti kmitania. Avšak nie je jednoduché túto koreláciu identifikovať a priradiť jej patričnú mieru dôležitosti. Výsledky skúšok však dokazujú, že tieto vzťahy sa podarilo nájsť pri chybných prevodovkách, kde bola známa mechanická chyba a jej prejav.

Treba podotknúť, že simulované chyby na troch prevodovkách patrili medzi tie, ktoré je možné jednoducho sluchom identifikovať. Avšak v prevodovkách sa vyskytujú aj chyby, ktoré má súčasne výstupná kontrola problémy diagnostikovať. Medzi tieto chyby patria hlavne nekompletnosť montáže niektorých prvkov, najmä ložísk. Odhaliť systematické chyby vibrodiagnostikou je náročné a vyžaduje si ďalšie výskumy vyšších harmonických zložiek a ich postranných pásiem. Zrejmý je prínos hľadanej metodiky v podstatnom zjednodušení prevádzkového hodnotenia stavu stupňa opotrebenia prevodových sústav. Ale náhodné chyby v procese výroby a montáže je možné spoľahlivo odhaliť. Práve pre identifikáciu takýchto porúch je metóda vibrodiagnostikovej kontroly vhodná.

ZÁVER

Svetoví výrobcovia motorových vozidiel vynakladajú veľké úsilie na dosiahnutie najvyššej kvality svojich produktov.

Na základe výsledkov tejto práce môžeme povedať, že navrhnutá metodika vibračnej diagnostiky prostredníctvom analýzy výkonovej spektrálnej hustoty je vhodná pre kontrolu kvality výroby prevodoviek. Táto metodika bola aplikovaná ako nový objektívny vyhodnocovací postup kontroly voči dodnes používanému subjektívnemu hodnoteniu prevodoviek sluchom, ktoré nedokáže exaktne určiť, či je prevodovka chybná, aká chyba sa vyskytla a prečo.

Aplikovaním tejto metodiky ako nástroja kontroly kvality prevodoviek výrobcu získa jednoduchú objektívnu a ekonomicky nenáročnú metódu na identifikáciu anomálií, teda stupňa kvality prevodoviek.

Práca ďalej bude pokračovať v hľadaní miery únavového poškodenia ozubení pomocou vibrodiagnostiky a zovšeobecnení navrhovanej metodiky tak, aby bolo možné v budúcnosti používať túto metodiku pri vývoji a únavovom testovaní prototypov prevodoviek.

LITERATÚRA

- [1] ŽIARAN, S.: *Znižovanie huku a kmitania*, STU, Bratislava, 1997, s.69 – 93, s. 236 – 240
- [2] BROCH, J.T.: *Mechanical vibration and shock measurements*, Brüel&Kjær, Nærum, október 1980, s. 40 – 71, s. 97 – 121
- [3] CROCKER, M.J.: *Encyklopedia of acoustics*, volume 2, Auburn University, John Wiley & Sons, inc., 1997, s. 869 – 879
- [4] MIŠUN, V.: *Úvod do problémů vibrodiagnostiky strojních zařízení*, VUT, Brno, 1991, s.29 – 40, s. 84 – 104
- [5] ŽIARAN, S.: *Metódy identifikácie väd strojového zariadenia vibračnou diagnostikou*, Inžinierska mechanika '97, ŽDAS, a.s., Žďár nad Sázavou, 1996, s.257 – 262